



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INGRID DA COSTA TRINDADE

**Análise de Estabilidade de Taludes com Métodos de
Equilíbrio Limite: Barragem de Rejeitos Laborrie, Distrito do
Lourenço, Calçoene/AP**

Macapá – AP
2025

INGRID DA COSTA TRINDADE

**Análise de Estabilidade de Taludes com métodos de Equilíbrio Limite:
Barragem de Rejeitos Laborrie, Distrito do Lourenço, Calçoene/AP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Fábio Araújo Pereira

APROVADO EM: ___ / ___ / ___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Fábio Araújo Pereira
Orientador – UNIFAP

Prof. Me. Adenilson Costa de Oliveira
Examinador interno – UNIFAP

Prof. Dr. Jamil José Salim Neto
Examinador interno – UNIFAP

**MACAPÁ – AP
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP
Elaborado por Cristina Fernandes – CRB-2 / 1569

T833a Trindade, Ingrid da Costa.

Análise de estabilidade de taludes com métodos de equilíbrio limite: barragem de rejeitos laborrie, Distrito do Lourenço, Calçoene/AP / Ingrid da Costa Trindade. - Macapá, 2025.
1 recurso eletrônico. 166 folhas.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Amapá,
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, Macapá, 2025.

Orientador: Prof. Me. Fábio Araújo Pereira.

Coorientador: .

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Taludes. 2. Estabilidade. 3. Barragem. I. Pereira, Fábio Araújo, orientador. II. Universidade Federal do Amapá. III. Título.

CDD 23. ed. – 624.151363

TRINDADE, Ingrid da Costa. **Análise de estabilidade de taludes com métodos de equilíbrio limite:** barragem de rejeitos laborrie, Distrito do Lourenço, Calçoene/AP. Orientador: Prof. Me. Fábio Araújo Pereira. 2025. 166 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Civil. Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2025.

AGRADECIMENTOS

Nada existiu senão Ele desde o princípio, e à Ele vai a mais profunda gratidão e devoção por ter me acompanhado até aqui, e ter me dado todo fôlego e suspiro, entre condicionantes e incógnitas, que me fizeram concluir esta etapa da vida.

Agradeço aos dois “Manoel”, o Raimundo e o Fernandes, assim como as duas “Mari”, a Maria e Marilza, que talvez não tenham conseguido sonhar com as inúmeras possibilidades de futuro das suas descendências, mas que se depender de mim, posso ir ainda mais longe e ainda mais alto, e tudo isso graças aos inúmeros sacrifícios que eles fizeram em vida.

Obrigada vô “Manél Raimundo”; obrigada vô “Cabrito”; obrigada vó “Biló”; obrigada vó “Marilza”.

Aos meus pais, obrigada pela paciência por conta da minha teimosia em querer realizar o meu sonho, foi sem querer, mas foram vocês que me aspiraram a buscar o que quero mesmo que isso seja diferente da vontade de vocês para mim.

Aos meus irmãos, eu não sei quem seria eu se não fosse vocês dois.

Aos amigos, eu sinto muito por não ser alguém melhor, por não ser quem eu gostaria de ser para cada um de vocês, mas saibam que essa jornada dependeu tremendamente de todos vocês.

Aos antigos amores, obrigada por me ajudar quando eu mais precisei.

Ao amor da minha vida, obrigada por acreditar em tudo o que eu posso ser e fazer mesmo com a minha dúvida frequente de se sou capaz.

Aos mestres de carreira, fui ensinada a honrar e respeitar em casa, aprendi cedo a lição de que meu crescimento dependia de mim, mas que vocês são aqueles que abrem as portas. Do “prézinho” à academia, obrigada pela inspiração, pela confiança, pelo carinho, pela paciência, e pela dedicação.

Tetelestai.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a estabilidade de taludes por meio de métodos de equilíbrio limite em uma barragem de rejeitos de mineração localizada no distrito de Lourenço, município de Calçoene, no Estado do Amapá. A estrutura estudada, a Barragem Laborrie, é uma das mais antigas em operação legal no país.

A pesquisa foi fundamentada em ensaios de campo e laboratório realizados em 2020, incluindo SPT, compressão triaxial, adensamento, cisalhamento direto e permeabilidade. Para a modelagem numérica, utilizou-se o software GeoStudio, possibilitando simulações com diferentes geometrias e condições operacionais indicadas a partir dos estudos de identificação do solo e geometria do maciço, inclusive a situação crítica de reservatório cheio documentada pela cooperativa em que está situada a estrutura.

Foram aplicados quatro métodos clássicos de análise de estabilidade de taludes: Fellenius, Janbu, Morgenstern-Price e Spencer, permitindo uma comparação entre os fatores de segurança (FS) obtidos. Para intuito de estabilidade em condição crítica com criação de borda livre, foi executado simulações de alteamento de 3 metros para os três métodos construtivos conhecidos: a linha de centro, a jusante e a montante.

Os resultados indicaram que, na condição original da barragem, apontam para valores de segurança na estabilidade da barragem. Para hipótese de condição crítica, os valores de FS diminuíram, mas ainda apresentou índices suficiente quando analisado o alteamento a jusante, e assim enquadrando-se nos critérios mínimos de segurança exigidos por norma.

O estudo reforça a importância da caracterização geotécnica de estruturas em operação e contribui para o entendimento da segurança de barragens de terra no Amapá.

Palavras-Chave: Estabilidade; Barragem; Taludes; Análise

ABSTRACT

This study aims to analyze slope stability using limit equilibrium methods applied to a tailings dam located in the Lourenço district, municipality of Calçoene, in the state of Amapá, Brazil. The structure under analysis, known as the Laborrie Dam, is one of the oldest legally operating tailings dams in the country.

The research was based on field and laboratory tests conducted in 2020, including SPT (Standard Penetration Test), triaxial compression, consolidation, direct shear, and permeability tests. For numerical modeling, the GeoStudio software was used, enabling simulations with different geometries and operational conditions derived from soil identification studies and embankment geometry, including the critical full-reservoir condition documented by the cooperative overseeing the structure.

Four classic slope stability analysis methods were applied: Fellenius, Janbu, Morgenstern-Price, and Spencer, allowing a comparison between the obtained safety factors (SF). To assess stability under critical conditions with the creation of a freeboard, simulations were performed for a 3-meter raise using the three known construction methods: centerline, downstream, and upstream.

The results indicated that, under the dam's original condition, the safety factors suggest stability. For the critical condition hypothesis, the SF values decreased but remained sufficient when analyzing the downstream raise, thus meeting the minimum safety criteria required by regulations.

The study reinforces the importance of geotechnical characterization for operational structures and contributes to the understanding of earth dam safety in Amapá.

Keywords: Stability; Dam; Slope; Analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Garimpo do Lourenço quanto ao território do estado do Amapá	24
Figura 2 – Perfis de Barragens de terra	26
Figura 3 – Método de construção a montante	29
Figura 4 – Método de construção a jusante	30
Figura 5 – Método de construção a linha de centro	31
Figura 6 – Exemplo simplificado de um talude e alguns de seus componentes	34
Figura 7 – Exemplificação de talude artificial por corte (Juiz de Fora/MG)	35
Figura 8 – Exemplificação de taludes artificiais de corte e de aterro.....	35
Figura 9 – Movimento de massa: quedas	37
Figura 10 – Movimento de massa: tombamento	37
Figura 11 – Elementos de caracterização de movimento de escorregamento (A) e as dimensões envolvidas na movimentação da massa (B)	38
Figura 12 – Movimento de massa: escorregamento – translacionais.....	38
Figura 13 – Movimento de massa: escorregamento – rotacionais	39
Figura 14 – Movimento de massa: escorregamento – em cunha.....	39
Figura 15 – Movimento de massa: escoamento lento – rastejo	40
Figura 16 – Movimento de massa: Escoamento rápido – corrida.....	40
Figura 17 – Ação das forças deslizantes (F), do fluxo de água (f) e da resistência de cisalhamento (τ).....	41
Figura 18 – Decomposição de tensões normal (σ) e cisalhante (τ) em um plano genérico.....	41
Figura 19 – Determinação das tensões normais (eixo x, abscissa) e cisalhantes (eixo y, ordenada) em um plano genérico por meio do círculo de Mohr	42
Figura 20 – Representação do círculo de Mohr qual, A representa um estado de tensões dentro do limite estabelecido pelo critério; B representa um estado na ruptura; e C representa um estado em que já ocorreu a ruptura.....	44
Figura 21 – Representação gráfica do envoltório Mohr-Coulomb	45
Figura 22 – Representação gráfica da análise determinística de estabilidade de taludes.....	45

Figura 23 – Exemplo da divisão em fatias de uma superfície circular.....	48
Figura 24 – Fatia de Fellenius.....	49
Figura 25 – Fatia de Janbu.....	51
Figura 26 – Fluxograma de etapas de desenvolvimento do trabalho.....	55
Figura 27 – Localização em mapa da barragem Laborrie	55
Figura 28 – Localização da barragem Laborrie, ano 2015	55
Figura 29 – Disposição de rejeito na barragem Laborrie, ano 2017.....	55
Figura 30 – Disposição de rejeito na barragem Laborrie, ano 2025.....	55
Figura 31 – Registros da realização do ensaio SPT em diversos pontos	57
Figura 32 – Fotos dos blocos abertos no laboratório da UENF – blocos de 1 a 4	58
Figura 33 – Registro de etapas do ensaio de compressão triaxial no laboratório da UENF.....	60
Figura 34 – Registro de etapas do ensaio de adensamento clássico no laboratório da UENF.....	62
Figura 35 – Registro do ensaio cisalhamento direto no laboratório da UENF	64
Figura 36 – Registro do ensaio de permeabilidade no laboratório da UENF .	65
Figura 37 – Interface inicial do GeoStudio	67
Figura 38 – Interface comum do GeoStudio, inicial do módulo SLOPE/w.....	68
Figura 39 – Interface do AutoCAD com os modelos do mesmo perfil desenhados para análise	69
Figura 40 – interface do GeoStudio com a importação do perfil para análise	69
Figura 41 – Seção tipo da barragem de rejeito Laborrie	71
Figura 42 – Definição da geometria do talude estudado	73
Figura 43 – Registro da retirada das amostras: crista da barragem Laborrie	74
Figura 44 – Interface GeoStudio, geometria da barragem com as camadas de solo identificadas.....	81
Figura 45 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Fellenius para solução do FS.....	81
Figura 46 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo	82
Figura 47 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Janbu para solução do FS	82

Figura 48 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo...	83
Figura 49 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Morgenstern-Price para solução do FS	83
Figura 50 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo.....	84
Figura 51 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Spencer para solução do FS.....	84
Figura 52 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo	85
Figura 53 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – simulação da condição crítica de Reservatório.....	86
Figura 54 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – simulação da condição crítica de Reservatório cheio	86
Figura 55 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgesntern-Price – simulação da condição crítica de Reservatório cheio ...	87
Figura 56 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – simulação da condição crítica de Reservatório cheio	87
Figura 57 – Interface GeoStudio, com a geometria do perfil da barragem Laborrie alteada por linha de centro.....	88
Figura 58 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT.....	89
Figura 59 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA na altura da crista atual.....	89
Figura 60 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.....	90
Figura 61 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT.....	90

Figura 62 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA na altura da crista atual.....	91
Figura 63 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.....	91
Figura 64 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT.....	92
Figura 65 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA na altura da crista atual.....	92
Figura 66 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.....	93
Figura 67 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT.....	93
Figura 68 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA na altura da crista atual.....	94
Figura 69 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alçamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.....	94
Figura 70 – Interface GeoStudio, com a geometria do perfil da barragem Laborrie alçada por linha de centro, NA de acordo com o SPT.....	95
Figura 71 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alçamento a jusante, NA de acordo com o SPT.....	95
Figura 72 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alçamento a jusante, NA na altura da crista atual.....	96

Figura 73 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista	96
Figura 74 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT	96
Figura 75 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual	97
Figura 76 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista	97
Figura 77 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT.....	98
Figura 78 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price– talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual	98
Figura 79 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.....	99
Figura 80 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT	99
Figura 81 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual	100
Figura 82 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista	100
Figura 83 – Interface GeoStudio, com a geometria do perfil da barragem Laborrie alteada a Montante.....	101

Figura 84 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT.....	101
Figura 85 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual.....	102
Figura 86 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista	102
Figura 87 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT	103
Figura 88 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual.....	103
Figura 89 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista	104
Figura 90 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT.....	104
Figura 91 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual	105
Figura 92 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.....	105
Figura 93 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT	106
Figura 94 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual.....	106

Figura 95 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista 107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades Médias dos Solos – Aspectos Quantitativos	29
Quadro 2 – Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos	34
Quadro 3 – Características dos métodos de equilíbrio limite	50
Quadro 4 – Aspectos para estabelecimento de borda livre: fatores de influência considerados no dimensionamento, referências para o cálculo desses fatores, e valores mínimos recomendados (VMR).....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das areias segundo o tamanho dos grãos de acordo com a NBR 7225/1993	29
Tabela 2 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração de acordo com a NBR 13028	48
Tabela 3 – – Compacidade e consistência dos solos de acordo com o S.P.T (Standart Penetration Test)	76
Tabela 4 – Classificação do tipo de solo que compõe a barragem Laborrie, de acordo com os dados do SP-03 do laudo técnico de sondagem SPT.....	77
Tabela 5 – Resumo do programa experimental	79
Tabela 6 – Resultados das características granulométricas	81
Tabela 7 – Resultado do peso específico e limites de Atteberg de cada amostra	81
Tabela 8 – Resultados do ensaio de compressão triaxial do tipo CIU Sat.....	82
Tabela 9 – Principais índices a partir dos resultados do ensaio de adensamento.....	84
Tabela 10 – Resultados do ensaio de adensamento	84
Tabela 11 – Resultados do ensaio de permeabilidade	85
Tabela 12 – Índices utilizados na análise computacional do talude, camada 01	86
Tabela 13 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração	115

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 1 (a. Trajetória de Tensões; b. Circulo de Mhor).....	82
Gráfico 2 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 2 (a. Trajetória de Tensões; b. Circulo de Mhor).....	83
Gráfico 3 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 3 (a. Trajetória de Tensões; b. Circulo de Mhor).....	83
Gráfico 4 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 4 (a. Trajetória de Tensões; b. Circulo de Mhor).....	83
Gráfico 5 – Resultado da análise computacional de taludes nas condições atuais para todos os métodos	114
Gráfico 6 – Resultado da análise computacional de taludes nas condições críticas de Reservatório Cheio para todos os métodos	115
Gráfico 7 – Resultado da análise computacional de taludes considerando os três métodos de alteamento nas condições atuais, com NA de acordo com o SPT para todos os métodos	116
Gráfico 8 – Resultado da análise computacional de taludes considerando os três métodos de alteamento nas condições atuais, com NA na altura da crista atual	118
Gráfico 9 – Resultado da análise computacional de taludes considerando os três métodos de alteamento nas condições atuais, com NA no limite da Borda Livre	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

ANM – Agência Nacional de Mineração

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral

CIU – Consolidated Isotropically Undrained

COOGAL – Cooperativa de Garimpeiros do Lourenço

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

FS – Fator de Segurança

ICOLD – International Committee On Large Dams

IEPA – Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá

IMAP – Instituto de Meio Ambiente e de Ordenamento Territorial do Amapá

MME – Ministério de Minas e Energia

NA – Nível De Água

NBR – Norma Brasileira

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

S/A – Sociedade Anônima

SNISB – Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragem

SPT – Standard Penetration Teste

SRC – Superfície de Ruptura Crítica

SUCS – Sistema Unificado De Classificação Dos Solos

UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense

VMR – Valores Mínimos Recomendados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. JUSTIFICATIVA	22
1.2. OBJETIVOS	23
1.2.1. OBJETIVO GERAL	23
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. BREVE HISTÓRICO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NO BRASIL E NO AMAPÁ.....	25
2.2. BARRAGENS PARA CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO ..	26
2.2.1. BARRAGENS DE TERRA	27
2.2.1. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO PARA BARRAGENS DE REJEITOS	28
2.2.2.1. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	28
2.2.2.2. MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO	30
2.3. ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA	34
2.3.1. TIPOS DE TALUDE.....	34
2.3.1.1. TALUDE NATURAL OU ENCOSTAS	35
2.3.1.2. TALUDE ARTIFICIAL OU CONSTRUÍDO	36
2.3.2. TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA.....	37
2.3.3. RESISTÊNCIA DO SOLO E CRITÉRIOS DE RUPTURA.....	42
2.3.4. FATOR DE SEGURANÇA	46
2.3.5. MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES... 48	
2.3.5.1. MÉTODO FELLENIUS (1927)	50
2.3.5.2. MÉTODO JANBU (1954)	52
2.3.5.3. MÉTODO MORGENSTERN E PRICE (1965)	53

2.3.5.4. MÉTODO SPENCER (1965)	53
2.3.6. CONDIÇÃO DE TENSÃO CRÍTICA: RESERVATÓRIO CHEIO	54
3. METODOLOGIA	56
3.1. METODOLOGIA DE PESQUISA	56
3.2 DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....	57
3.3. LEVANTAMENTO DE DADOS GEOTÉCNICOS	59
3.3.1. SONDAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIO DE PENETRAÇÃO SIMPLES (SPT).....	59
3.3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO COMPLETA	61
3.3.3. ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL	62
3.3.4. ENSAIOS DE ADENSAMENTO CLÁSSICO	64
3.3.5. ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO RÁPIDO.....	65
3.3.6. ENSAIOS DE PERABILIDADE À CARGA VARIÁVEL	67
3.3. MODELAGEM E ANÁLISE COMPUTACIONAL	68
3.3.1. SOFTWARE: GEOSTUDIO 2D.....	69
3.4. ANÁLISE EM CONDIÇÃO CRÍTICA: RESERVATÓRIO CHEIO.....	72
4. ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES COM MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE DA BARRAGEM DE REJEITOS LABORRIE, EM CALÇOENE/AMAPÁ.....	74
4.1. HISTÓRICO PRELIMINAR DO OBJETO DE ESTUDO	74
4.2. DEFINIÇÃO DO PERFIL GEOMÉTRICO DO TALUDE	74
4.3. DADOS DA ANÁLISE GEOTÉCNICA.....	74
4.4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM CONDIÇÕES ATUAIS.....	85
4.5. ANÁLISE DE ESTABILIDADE COM RESERVATÓRIO CHEIO.....	91
4.6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE COM ALTEAMENTO	93
5. DISCUSSÃO	114
6. CONCLUSÕES	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

ANEXOS	128
APÉNDICE	161

1 INTRODUÇÃO

As barragens de rejeitos no Brasil surgiram das atividades de mineração, as quais tiveram seu início em épocas que remontam a mais de 300 anos atrás (CBDB, 2011). Diante a uma grande potencialidade mineral na região norte do país, a história de ocupação do território amapaense se entrelaça com a atividade de extração mineral no século XVII (MME, 2010).

Das 517 barragens de disposição de resíduos industriais e de rejeitos de mineração enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), 16 estão no território do Estado do Amapá, e 3 destas no município de Calçoene, na região do distrito do Lourenço (SNISB, 2025).

A barragem Laborrie, o objeto deste estudo, localizada no Distrito do Lourenço, no município de Calçoene, e de responsabilidade da Cooperativa de Garimpeiros do Lourenço (COOGAL), é uma das mais antigas do Brasil ainda em processo de extração atuante de forma legal, contudo, assim como as demais barragens no Estado do Amapá, as informações quanto às características geotécnicas e comportamentos físicos são escassas, e se propagam ao público amplo somente após a ocorrência de crises ou colapsos.

Nesse sentido, se faz de extrema importância a investigação adequada desse tipo de estrutura. A análise da estabilidade de taludes ou encostas são estudos que podem ser realizados através de abordagens determinísticas e probabilísticas, e tem como objetivo prever e prevenir condições que sejam favoráveis à ocorrência de movimentos de massa — contribuindo, assim, para a prevenção de riscos e mitigação de acidentes com potenciais impactos materiais, ambientais e sociais.

Nos métodos determinísticos, são empregados valores médios dos parâmetros geotécnicos para calcular o Fator de Segurança (FS), considerando as propriedades do solo constantes e bem definidas, o FS é o resultado da relação entre as forças solicitantes do solo e as resistentes ao escorregamento.

De maneira que, com o passar dos anos, esse tipo de análise ficou ainda mais facilitada e mais meticulosa com a implementação do uso de softwares computacionais. O método das fatias, por exemplo, é utilizado pela maioria dos programas de computador, pois pode acomodar facilmente

geometrias complexas de taludes, condições variáveis do solo e a influência de cargas externas de contorno.

Tendo em vista essas novas possibilidades, a análise de talude sobre uma barragem de contenção de rejeito de mineração existente e em operação dentro do Estado do Amapá é possível de maneira que contribua para comunidade científica e para a população em geral como fomento de informações desse tipo de obras pouco conhecidas e aumente a confiabilidade na eficiência e segurança dessas estruturas.

Para isso, pretende-se encontrar os Fatores de Segurança através dos métodos de estabilidade baseados no método de equilíbrio limite, utilizando como objeto a barragem Laborrie. Como instrumento fundamental para o estudo, utilizou-se o software GeoStudio, como ferramenta computacional da qual é possível a realização da análise de maneira automatizada e assim obter os valores de FS das condições atuais reais e simular outras associadas mudança do nível de água (NA) e em modificações da geometria.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os desastres envolvendo colapso de taludes de barramento de rejeito ocorridos no Brasil na década passada, impactaram profundamente a forma de projetar e inspecionar esse tipo de obra de terra. Os casos de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, marcaram intensamente a população do país e a engenharia geotécnica como um todo, gerando assim urgência em garantir a segurança de barragens em nível normativo da concepção à vistoria, principalmente quanto a transparência da situação real das milhares de barragens existentes em território nacional, em termos de riscos e danos.

A região de estudo, há muito tempo estabelecida como região garimpeira dentro do Estado do Amapá, por possuir longa distância da capital e difícil acesso, mantém seus dados poucos conhecidos ao público geral e da academia. A própria relação da comunidade local com essas informações é pouco difundida, concentrada principalmente pela Cooperativa responsável pela área do garimpo escolhido.

Nesse contexto, a importância de difundir informações sobre as obras geotécnicas dentro do Estado do Amapá, considerando o seu imenso potencial minerador, eleva a também importante tarefa de capacitar engenheiros civis para a área de estudo e execução de barragens e obras de solo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar análises da estabilidade de taludes por métodos de equilíbrio limite em uma barragem de rejeitos de mineração em atividade no distrito de Lourenço, no município de Calçoene, no Estado do Amapá.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar levantamento bibliográfico sobre barragem;
- Levantar as condições atuais do talude de estudo;
- Caracterizar a geometria do talude e fazer a modelagem do talude de estudo no software GEOSTUDIO, módulo SLOPE/W;
- Realizar o estudo da estabilidade de taludes por diferentes métodos;
- Comparar os valores obtidos pelos diferentes métodos;
- Analisar o comportamento dos taludes em situação de condições críticas (reservatório cheio);
- Analisar o comportamento dos taludes após mudança na geometria por alteamento para solucionar a situação crítica de reservatório cheio;
- Comparar os valores obtidos pelos diferentes métodos;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo é composto por sete capítulos. O primeiro e presente capítulo apresenta a visão geral do tema abordado, assim como os objetivos e a esquematização da estrutura deste documento de maneira descritiva.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica contendo a contextualização do assunto, fundamentação teórica e conceitos fundamentais abordado neste estudo, sendo estes: o histórico do tema

abordado; a tipologia de barragens; métodos e materiais de construção do objeto estudado; e análise de estabilidade de taludes.

O terceiro capítulo apresenta o objeto de estudo e todo o levantamento de dados necessários para compreensão do conteúdo e quais foram os conteúdos principais da área de estudo que foram baseadas as análises, além de apresentar o software utilizado para tal.

O quarto capítulo utiliza dos dados apresentados no capítulo anterior para apresentar os resultados de acordo com a ideia proposta nos objetivos gerais descritos no capítulo 1 através do uso do software e criação de imagens que representam graficamente diferentes análises.

O quinto capítulo, apresenta a discussão dos resultados obtidos através da análise proposta, bem como as comparações entre os mesmos a fim de filtrar as condições de segurança resultantes para cada caso proposto.

As conclusões obtidas a partir de todas as informações apresentadas conforme o conteúdo estudado, está presente no capítulo sexto deste trabalho, o qual são feitas as disposições finais de todo o estudo. Foi incluído também no fim desde capítulo, sugestões de trabalhos futuros a partir do conteúdo desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE HISTORICO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NO BRASIL E NO AMAPÁ;

Antes do século XV, a geração de rejeitos pelas empresas de mineração e os impactos decorrentes de sua disposição no meio ambiente eram desprezíveis. Por muito tempo descartaram seus resíduos na natureza, em cursos d'água ou lançando-os em terrenos adjacentes, formando depósitos sem nenhuma preocupação de ordenação e sistematização. (CBDB, 2011).

Com a introdução da força a vapor houve um aumento significativo da capacidade de processamento dos minerais de interesse econômico o que, conseqüentemente, fez aumentar também a geração de rejeitos.

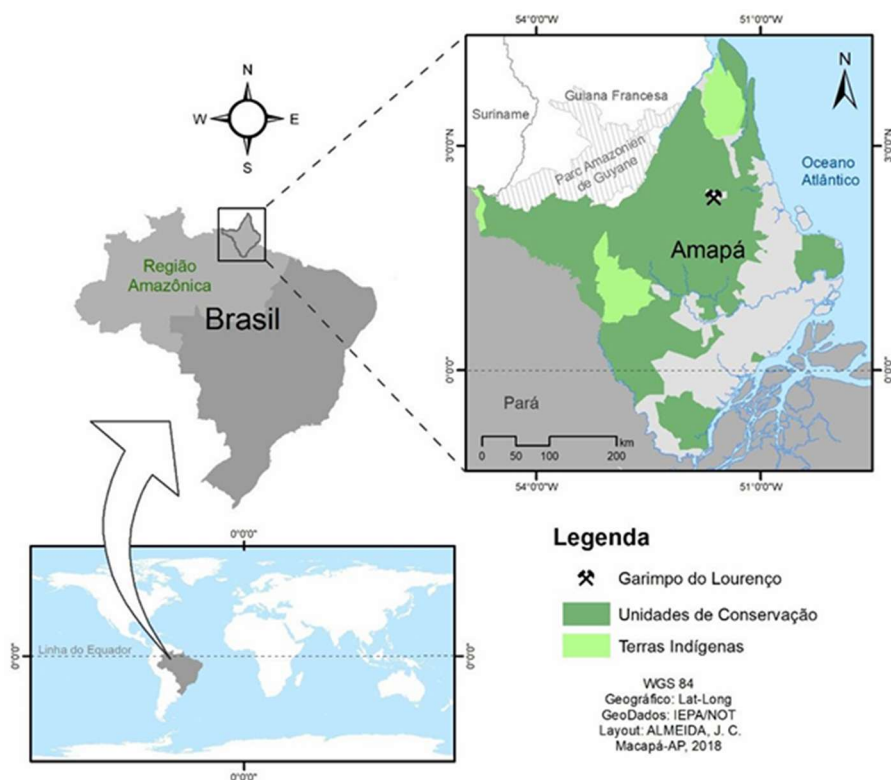
A partir ainda do século XV, o desenvolvimento tecnológico amplificou ainda mais a habilidade de minerar corpos com baixo teor mineral, resultando na produção ainda maior de rejeitos, com cada vez menor granulometria. Entretanto, as práticas de disposição de rejeitos permaneceram inalteradas e, como resultado, mais rejeitos estavam sendo depositados e transportados por distâncias cada vez maiores das fontes geradoras para os cursos d'água, lagos e oceanos. (CBDB, 2011).

Para a manutenção da mineração e a mitigação dos impactos ambientais, as indústrias investiram na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos no início do século XIX (Souza Junior, 2018). Da mesma forma aconteceu no Brasil, as barragens de rejeitos no território brasileiro surgiram das atividades de mineração, as quais tiveram seu início em épocas que remontam cerca de 300 anos atrás (CBDB, 2011).

Diante a uma grande potencialidade mineral na região norte do país, a história de ocupação do território amapaense se entrelaça com a atividade de extração mineral no século XVII (MME, 2010). contudo, foi em 1894 a descoberta de grande quantidade de ouro na região centro-norte do Estado do Amapá, na área que hoje abriga os municípios de Calçoene e Oiapoque, nas cabeceiras do Rio Cassiporé, num alto topográfico conhecido como Serra Lombarda (IEPA, 2010). mas conhecida como distrito aurífero de

Lourenço, que se consolidou como um grande polo garimpeiro e assim tem se mantido até então.

Figura 1 – Localização do Garimpo do Lourenço quanto ao território do estado do Amapá



Fonte: Chagas (2019)

Atualmente, de acordo com Relatório de Segurança de Barragens de 2023, o último publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024), temos no Brasil 517 barragens de disposição de resíduos industriais e de rejeitos de mineração enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), 16 estão no território do Estado do Amapá, e 3 destas no Lourenço, distrito do município de Calçoene (SNISB, 2025).

2.2 BARRAGENS PARA CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Segundo Carvalho (1983) barragem são todos os tipos de obstáculos artificiais ao fluxo de algum curso de água, com o objetivo de retê-la. O autor também afirma que sua finalidade é um fator determinante para o tipo de projeto a ser executado, e cita exemplos como: o abastecimento

humano, o abastecimento animal, o abastecimento industrial, a irrigação, a produção de energia elétrica, o controle de cheias, a piscicultura, a regularização de rios, a recreação, a navegação e a realização de pesquisas.

Conforme estabelecido no Artigo 2º da Portaria nº 416/2012 da Agência Nacional de Mineração (ANM), sucessora do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), no ramo da mineração é definido por: “barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas”

Uma forma inicial de classificar barragens é feita pelo tipo de material que é utilizado em sua construção (Medeiros, 2014), definidas como:

- Barragens rígidas: construídas com concreto, pedra e alvenaria; e
- Barragens de aterro: construídas com terra e rocha, podendo se classificar em barragens de terra, de enrocamento, e barragens de terra e enrocamento

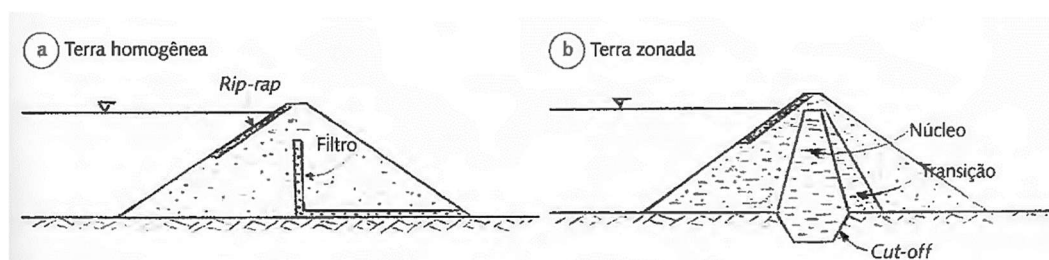
2.2.1 BARRAGENS DE TERRA

As barragens de contenção de rejeitos de mineração são estruturas feitas principalmente de terra, projetadas para armazenar subprodutos do processamento de minério (Silva, J. R.; Souza, M. F, 2023). São as mais elementares obras de barragens e normalmente se prestam a qualquer tipo de fundação, desde rocha compacta, até terrenos construídos de materiais inconsolidados (Maragon, 2004).

Este tipo de barragem é vastamente utilizado e seu mecanismo é de amplo conhecimento na literatura especializada, além de defini-las como convencional por Costa (2012), elas podem ser divididas entre:

- Homogêneas: quando há predominância de um único material, embora possam ocorrer elementos diversificados, com filtro, rip-rap etc.
- Zoneadas: há um zoneamento de materiais terrosos em função de suas características de materiais e/ou permeabilidade

Figura 2 – Perfis de Barragens de terra



Fonte: Costa (2012)

A unidade de uma barragem de terra deve ser compreendida em todo o tempo ou nas suas atividades que, apesar de subsequente no tempo, devem ser encaradas como inseparáveis ou, no mínimo, interdependentes: o projeto; a construção; o primeiro enchimento; e as vistorias periódicas da barragem em opção para garantir a sua segurança em longo prazo (Massad, 2010).

Se faz necessário também entender que o corpo de uma barragem de terra é complexo e singular. Os fatores ambientais, geotécnicos e topográficos são específicos para cada unidade, e faz com que essas obras sejam únicas já justificadas pelas especificidades dos materiais empregados na sua construção.

2.2.2 MATERIAIS E METODOS DE CONTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS

2.2.2.1 MATERIAIS DE CONTRUÇÃO

As barragens de rejeitos são normalmente construídas com materiais locais facilmente disponíveis (Lumbroso et al. 2020), em uma distância na qual a aplicação deles na execução do barramento seja economicamente viável.

As fontes de obtenção desses materiais naturais são basicamente duas: escavações da própria obra e áreas de empréstimo (Costa 2012). Esses materiais são fundamentalmente: solos e areia.

A classificação dos solos tem em vista grupá-los em classes de propriedades geotécnicas aproximadamente iguais, de modo que, simplesmente pela classificação, seja possível prever o seu comportamento. No Quadro 1, elaborada por Vieira et. al. (1996) esquematiza as propriedades

médias dos tipos de solo a partir da classificação do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Quadro 1 - Propriedades Médias dos Solos – Aspectos Quantitativos

Propriedades Médias dos Solos				
Tipo de Solo	Permeabilidade	Resistência ao "Piping"	Resistência ao Cisalhamento	Trabalhabilidade
GW	Permeável	Alta	Muito alta	Muito boa
GP	Permeável a muito permeável	Alta a média	Alta	Muito boa
GM	Semi- permeável	Alta a média	Alta	Muito boa
GC	impermeável	Alta a média	Alta	Muito boa
SW	Permeável	Alta	Muito alta	Muito boa
SP	Permeável a semi- permeável	Baixa a muito baixa	Alta	Boa a regular
SM	Semi-permeável a impermeável	Média a baixa	Alta	Boa a regular
SC	Impermeável	Alta	Alta a média	Boa a regular
ML	Impermeável	Baixa a muito baixa	Média e baixa	Regular a muito má
CL	Impermeável	Alta	Média	Boa a regular
OL	Impermeável	Média	Baixa	Regular a má
MH	Muito impermeável	Média a alta	Baixa	Má a muito má

Fonte: Vieira et. al. (1996)

Para barragens de terra, o material arenoso pode ser utilizado como elemento filtrante, podendo ter uma origem natural ou artificial, Segundo Costa (2012):

“Na sua **forma natural**, resulta da deposição aluvionar nos cursos d’água, podendo seus depósitos estar emersos ou submersos nesses corpos d’água, e também pode ser encontrado como material de alteração *in situ* de arenitos. Na **forma artificial**, esse material resulta da cominuição da rocha, quando as frações mais finas possuem granulometria que pode ser classificada como areia” (Costa, 2012). Esta classificação granulométrica pode ser encontra na NBR 7225/1993, como exposto na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Classificação das areias segundo o tamanho dos grãos de acordo com a NBR 7225/1993

Areia Fina - entre 0,42 e 0,075 mm
Areia Média - entre 1,20 e 0,42 mm
Areia Grossa - entre 2,00 e 1,20 mm

Fonte: autoral

2.2.2.2 METODOS DE CONSTRUÇÃO

Inicialmente, para a construção de uma barragem de terra, é executado um aterro denominado dique de partida, esse aterro é utilizado para auxiliar na formação do reservatório de rejeitos. Embora esse dique inicial seja comumente feito de solo de origem local, os próprios rejeitos são frequentemente utilizados na construção

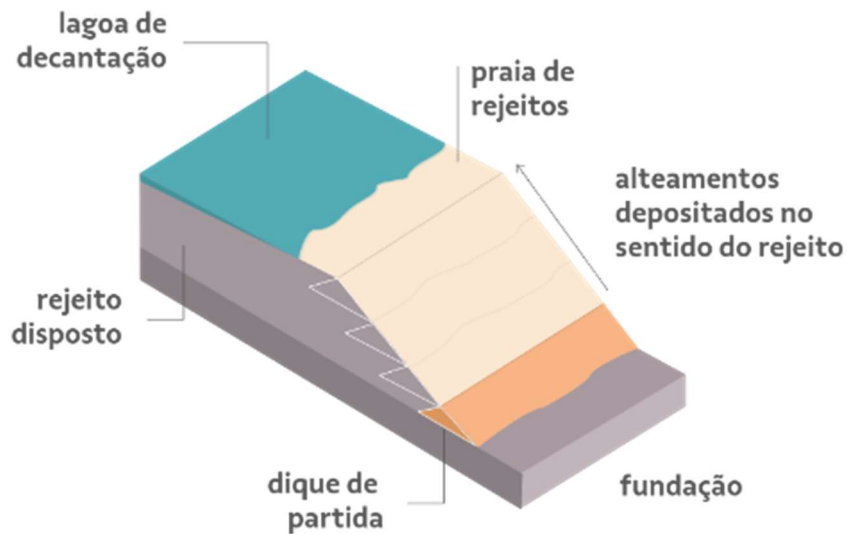
A partir do dique partida, aterros intermediários de contenção são normalmente construídos e depois elevados conforme a demanda por armazenamento aumenta (Kossof et al, 2014), esse processo é chamado de alteamento e podem ser elevados de maneira que fique: para “dentro” do reservatório, para “fora” do reservatório e, de maneira vertical, para “cima” do dique. É essa disposição dos alteamentos que identifica os métodos construtivos mais tradicionais: Montante, Jusante e Linha de centro. (ANM 95/2022; Lumbroso et al. 2020; ABNT NBR 13.028/2017; CETEM 2010; Maturano Rafael, 2010)

De acordo com a Resolução ANM 95/2022, entende-se por alteamento a montante a metodologia construtiva em que os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançados e depositados, ou seja, nesse caso o eixo da obra se desloca para montante e há o aproveitamento dos rejeitos depositados como parte da estrutura de contenção.

Durante o lançamento dos rejeitos, ocorre segregação granulométrica, ficando a fração mais grossa depositada próxima ao maciço. As frações mais finas (lamas) fluem em direção ao lago de decantação ou são lançadas no mesmo. (CETEM, 2010)

Esse método possui o menor custo inicial, devido à quantidade mínima de material de aterro necessária para a construção inicial e elevações subsequentes (Lumbroso et al. 2020). Contudo, conforme exposto no Art. 2º da Lei nº 14.066/2020, que altera o regramento aplicável à segurança de barragens, método Montante está proibido no Brasil.

Figura 3 – Método de construção a montante

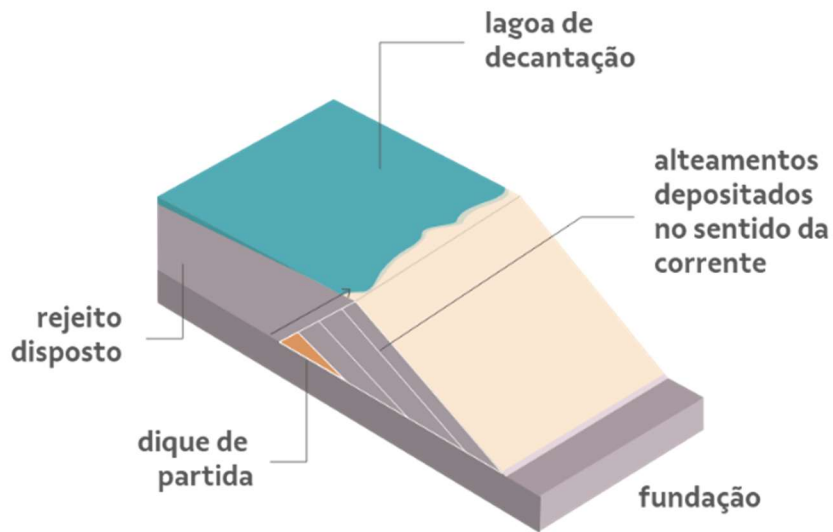


Fonte: Vale S/A (2025)

Para o método Jusante, a Resolução ANM 95/2022 diz que consiste no alteamento para jusante a partir do dique inicial, onde os maciços de alteamento são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito.

É um método mais conservador do que o método à montante. Depois da construção do dique de partida, os alteamentos subsequentes são realizados à jusante do mesmo, até atingir a cota de projeto, ou seja, a linha do centro (eixo da barragem), se desloca a jusante durante os processos de alteamentos. Neste processo construtivo, cada alteamento é estruturalmente independente da disposição do rejeito, melhorando assim a estabilidade da estrutura (Maturano Rafael, 2010).

Figura 4 – Método de construção a jusante

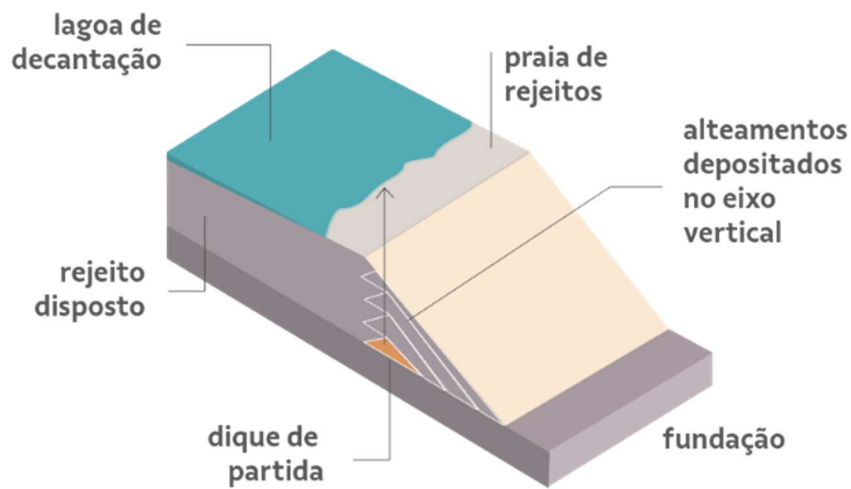


Fonte: Vale S/A (2025)

Segundo a Resolução ANM 95/2022 também, o método Linha de centro utiliza a metodologia em que os alteamentos se dão de tal forma, que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida; em razão da disposição do material construtivo, ocorre avanço parcial para jusante e parcial para montante, em relação à crista da etapa anterior sem per a simetria da barragem.

Trata-se de um método intermediário entre o método da linha de montante e o da linha de jusante, inclusive em termos de custo (CETEM, 2010). Este método possui uma estabilidade maior que a barragem alteada somente com o método à montante, porém não requerendo um volume de materiais tão significativo como no alteamento somente com o método à jusante. (Maturano Rafael, 2012)

Figura 5 – Método de construção a linha de centro



Fonte: Vale S/A (2025)

No Quadro 2, estão sumarizadas as principais características e aspectos de segurança das obras construídas, de maneira que possam ser comparadas segundo cada um dos métodos já apresentado.

Quadro 2 – Comparação entre as principais características de barragens de contenção de rejeitos em função dos métodos construtivos

	Convencional	Montante	Jusante	Linha de Centro
Tipo de Rejeito Recomendado	Qualquer tipo.	Mais de 40% de areia. Baixa densidade de polpa para promover segregação.	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Armazenamento d'Água	Boa	Não recomendado para grandes volumes.	Boa	Não recomendado para armazenamento permanente.
Resistência Sísmica	Boa	Pobre em áreas de alta sismicidade	Boa	Aceitável.
Restrições de Alteamento	De uma só vez, ou em poucas etapas.	Recomendável menos de 5 a 10m/ano	Nenhuma	Pouca
Requisitos de Alteamento	Materiais naturais e/ou estéril.	Solo natural. Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.	Rejeitos ou estéril.
Custo Relativo do Corpo do Aterro.	Alto ($3V_m$)	Baixo V_m *	Alto ($3 V_m$)	Moderado ($2 V_m$)
* V_m = volume da barragem pelo método de montante.				

Fonte: CETEM (2012)

A NBR 13.028 (ABNT, 2017) faz menção somente a esses três métodos construtivos mais tradicionais, embora exista alternativas menos convencionais, como:

- Método Misto: Uma modificação do método linha de centro, que mescla o método jusante com o Montante
- Método de Etapa Única: Não há alteamentos neste modelo, ou seja, a barragem é construída sem ampliar a capacidade de contenção de rejeitos

2.3 ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA

2.3.1 TIPOS DE TALUDE

Segundo Gerscovich (p. 11, 2016) “Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode ser natural ou construído pelo homem”.

O formato de um talude só pode ser obtido através de levantamento topográfico, e dentre os principais elementos que compõe um talude, estão:

- Crista ou Topo
- Corpo do talude
- Ângulo de Inclinação
- Pé
- Altura
- Terreno de Fundação

Na Figura 6, é possível conferir a localização de cada um destes elementos de maneira didática.

Figura 6 – Exemplo simplificado de um talude e alguns de seus componentes



Fonte: Autoral (2025)

2.3.1.1 TALUDE NATURAL OU ENCOSTAS

Taludes naturais são definidos como encostas de maciços terrosos, rochosos, ou mistos de solo e rocha, originados por agentes naturais e de superfície não horizontal, mesmo que tenham sofrido algumas ações antrópicas, tais como cortes, desmatamentos, introdução de cargas (Londe e Bitar, 2011).

São vários os fatores naturais que atuam isolada ou conjuntamente durante o processo de formação de um talude natural e que respondem pela estrutura característica destes maciços (Figura 7). Marangon (2006) agrupa esses fatores em duas categorias:

- Fatores Geológicos: litologia, estruturação e geomorfologia;
- Fatores Ambientais: clima, topografia e vegetação.

Figura 7 – Exemplificação de talude natural qual obteve corte (Juiz de Fora/MG)

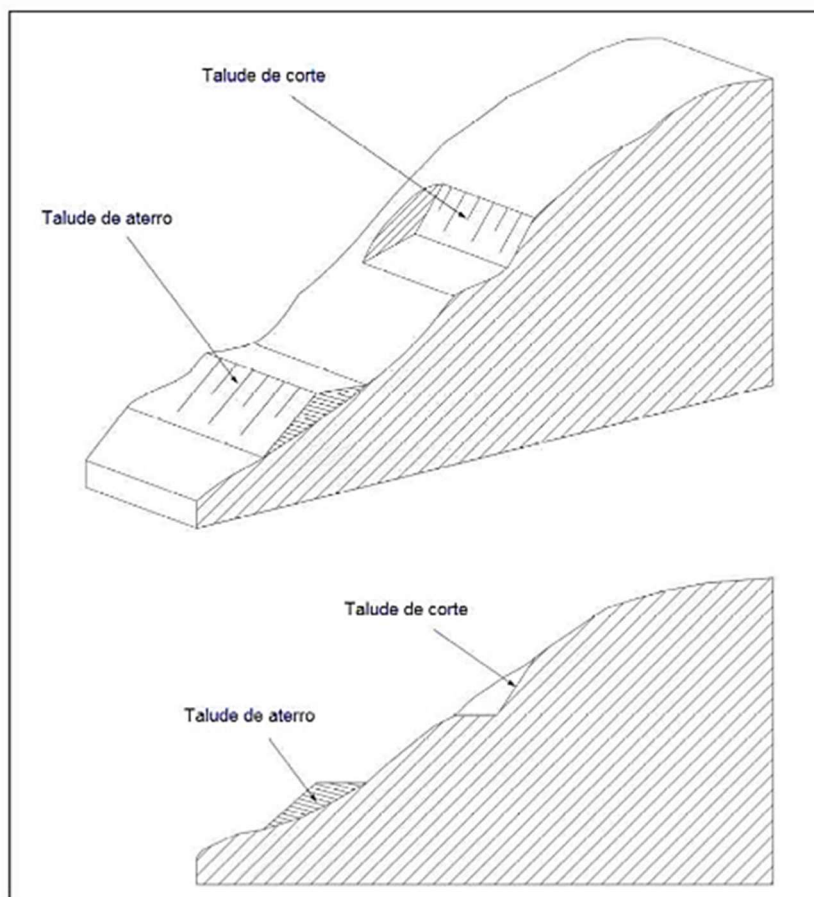


Fonte: Maragon (2018)

2.3.1.2 TALUDE ARTIFICIAL OU CONSTRUÍDO

Os taludes artificiais construídos pela ação humana são resultados dos cortes em encostas, escavações ou aterros (Gerscovich, 2012). Esse tipo de talude frequentemente exhibe uma homogeneidade mais acentuada que os maciços naturais, e não apresentam tanta instabilidade pois suas características são conhecidas previamente para sua utilização.

Figura 8 – Exemplificação de taludes artificiais de corte e de aterro



Fonte: NBR 11682 – Anexo A, Figura A.1 – Taludes de corte e aterro (ABNT, 2009)

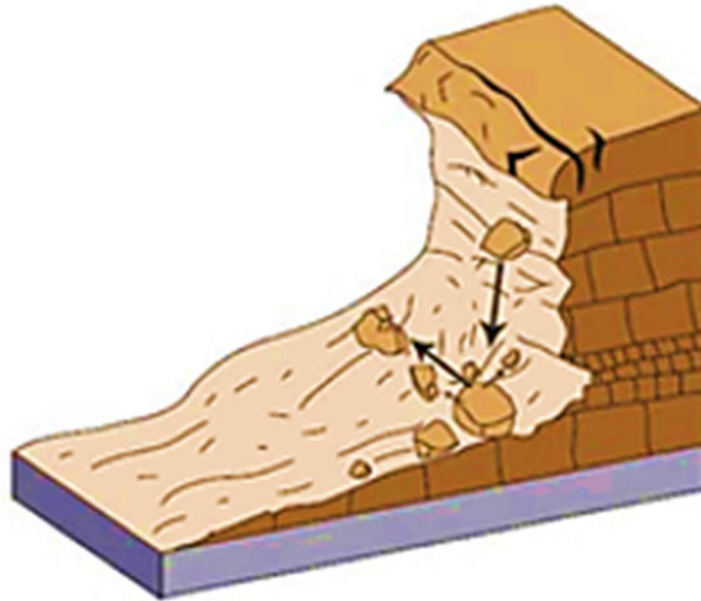
2.3.2 TIPOS DE MOVIMENTO DE MASSA

Entende como movimento de massa qualquer deslocamento de um determinado volume de solo (Gerscovich, 2012). Frequentemente os movimentos são associados a problemas de instabilidade, embora exista uma tendência natural do solo a atingir o nível da base devido a forças gravitacionais.

A NBR 11.682, classifica 4 tipos básicos de movimentos, sendo esses:

a) *Queda*: “Desprendimento de fragmentos do terreno, de qualquer tamanho, que caem de certa altura, em queda livre ou com qualquer outra trajetória e tipo de movimento”. Pode ser chamado de “desabamento”, segundo Gerscovich (2012), a formação dos blocos origina-se na ação do intemperismo nas fraturas, pressão hidrostáticas nas fraturas, perda de confinamento lateral, decorrentes de obras subterrâneas, vibrações etc.

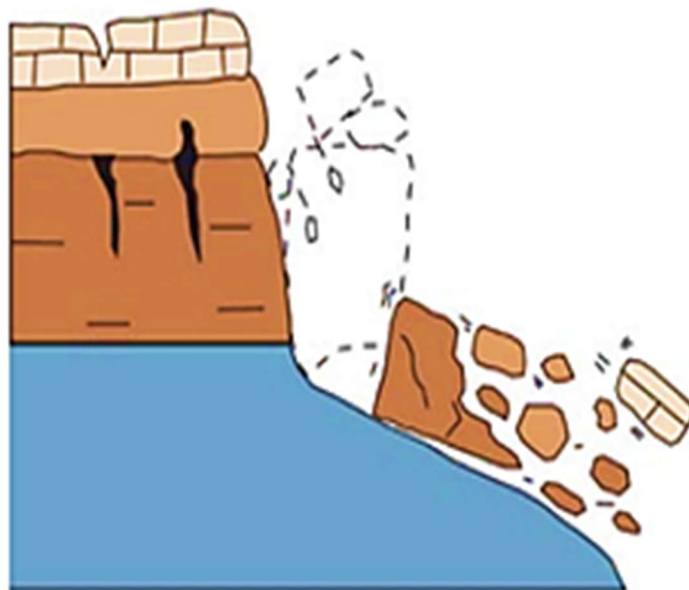
Figura 9 – Movimento de massa: quedas



Fonte: Bobrowsky; Highland (p. 10, 2008).

b) Tombamento: “Movimento de massa em forma de báscula com eixo na base”. O bloco de solo ou rocha rotaciona em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa, de maneira que esse movimento pode ser lento ou rápido (Souza, 2014).

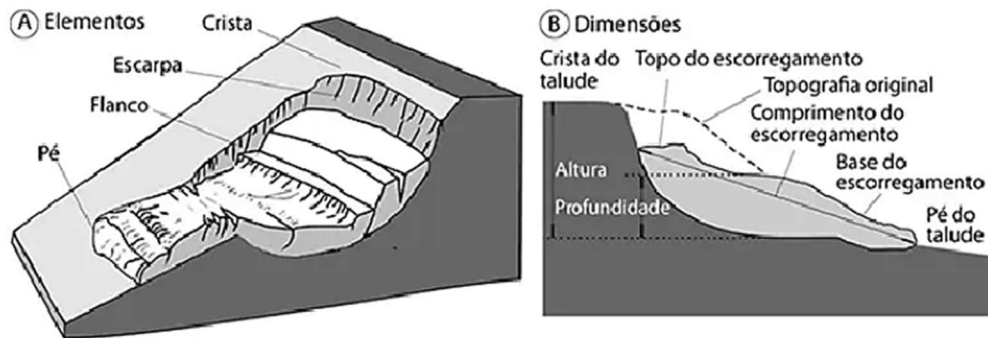
Figura 10 – Movimento de massa: tombamento



Fonte: Bobrowsky; Highland (p. 11, 2008).

c) *Escorregamento*: “Movimento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies”.

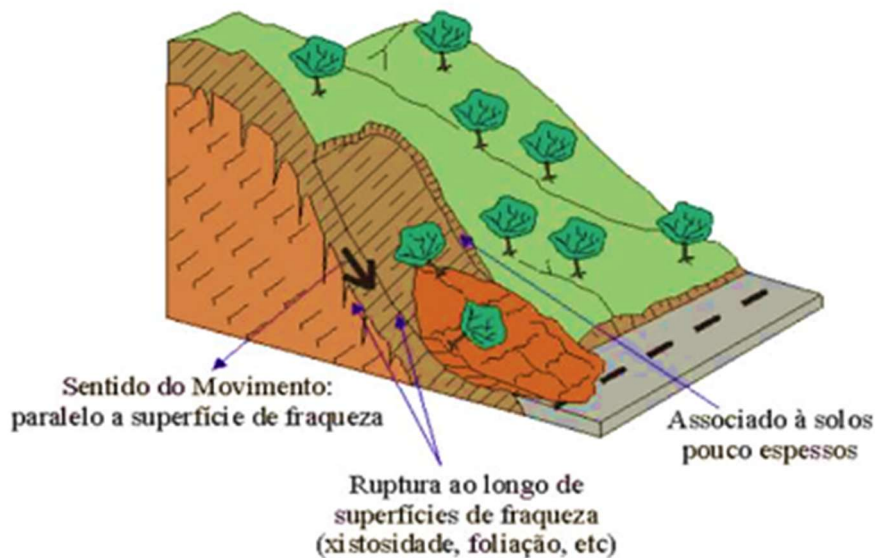
Figura 11 – Elementos de caracterização de movimento de escorregamento (A) e as dimensões envolvidas na movimentação da massa (B)



Fonte: Gerscovich, 2012 (adaptado de ABNT NBR 11.682: 2008, p. 26 e p.27)

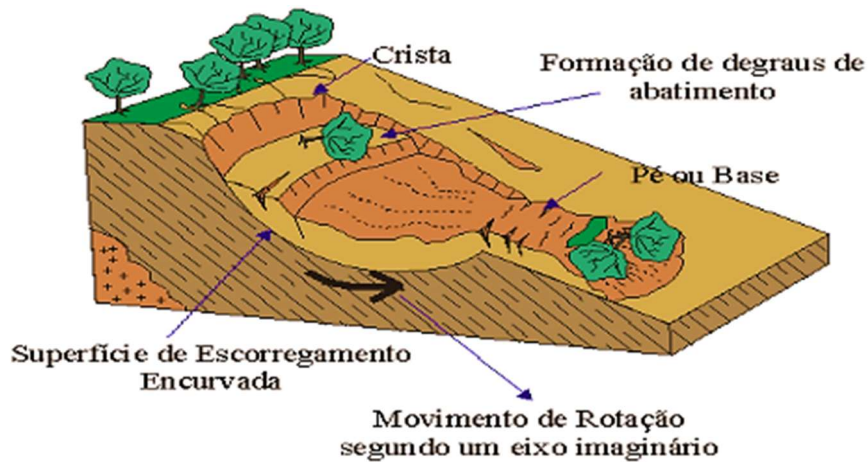
Tanto em solos como em rochas, a ruptura por escorregamento se dá pela superfície que apresenta a menor resistência de acordo com as condições geomorfológicas. Os movimentos de escorregamento podem ser subdividido em: Translacionais (planar), figura 13; Rotacionais (circular), figura 12; e em Cunha, figura 13.

Figura 12 – Movimento de massa: escorregamento - translacionais



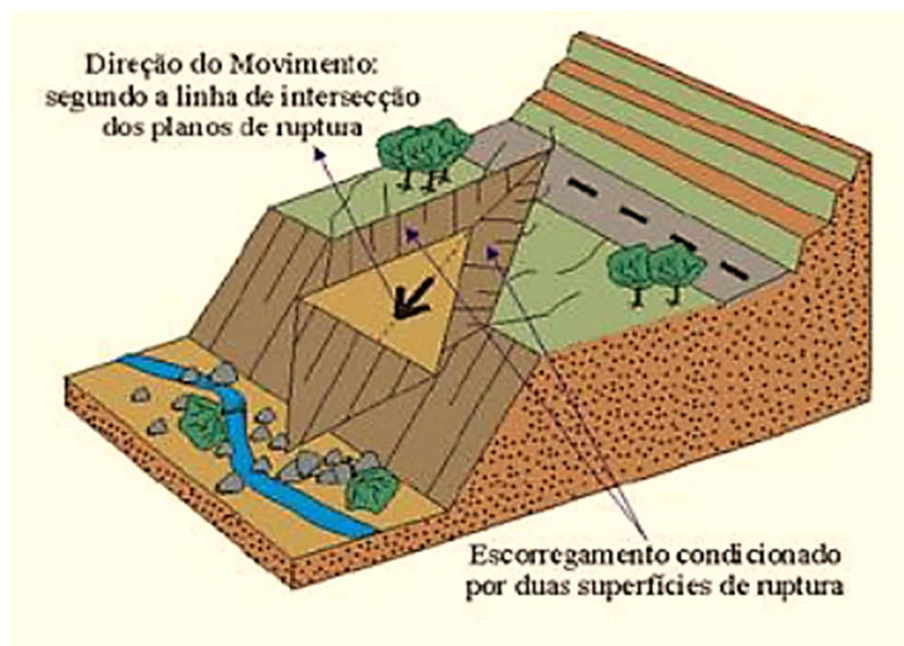
Fonte: Souza, 2014, p. 38 (adaptado de Cruden & Varnes, 1996)

Figura 13 – Movimento de massa: escorregamento – rotacionais



Fonte: Souza, 2014, p. 39 (adaptado de Cruden & Varnes, 1996)

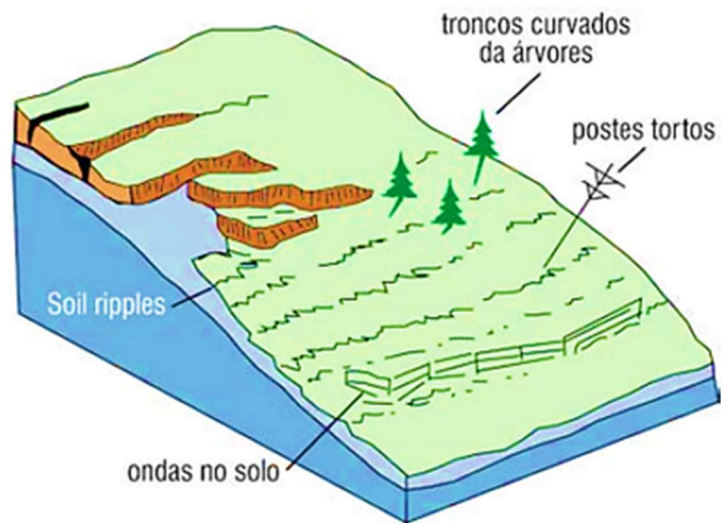
Figura 14 – Movimento de massa: escorregamento – em cunha



Fonte: Souza, 2014, p. 39 (adaptado de Cruden & Varnes, 1996)

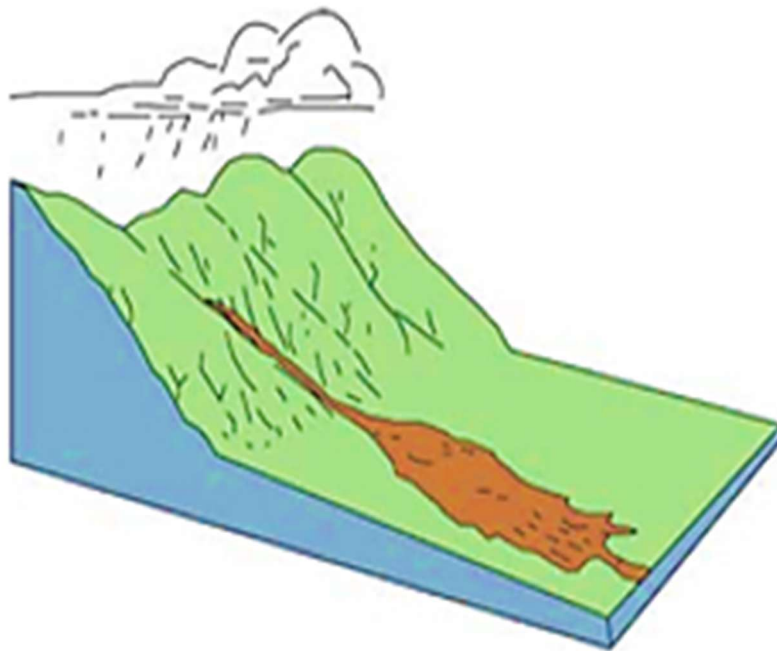
d) *Escoamento*: “Movimento de massa com propriedades de fluidos, lento (creep) ou rápido (corrida)”. Caracterizado por movimentos contínuos, com ou sem superfície de deslocamento definido, e não associado a uma velocidade específica além da definição de alta velocidade para ≥ 10 km/h (Gerscovich, 2012; Souza, 2014).

Figura 15 – Movimento de massa: Escoamento lento - rastejo



Fonte: Bobrowsky; Highland (p. 34, 2008).

Figura 16 – Movimento de massa: Escoamento rápido - corrida



Fonte: Bobrowsky; Highland (p. 24, 2008).

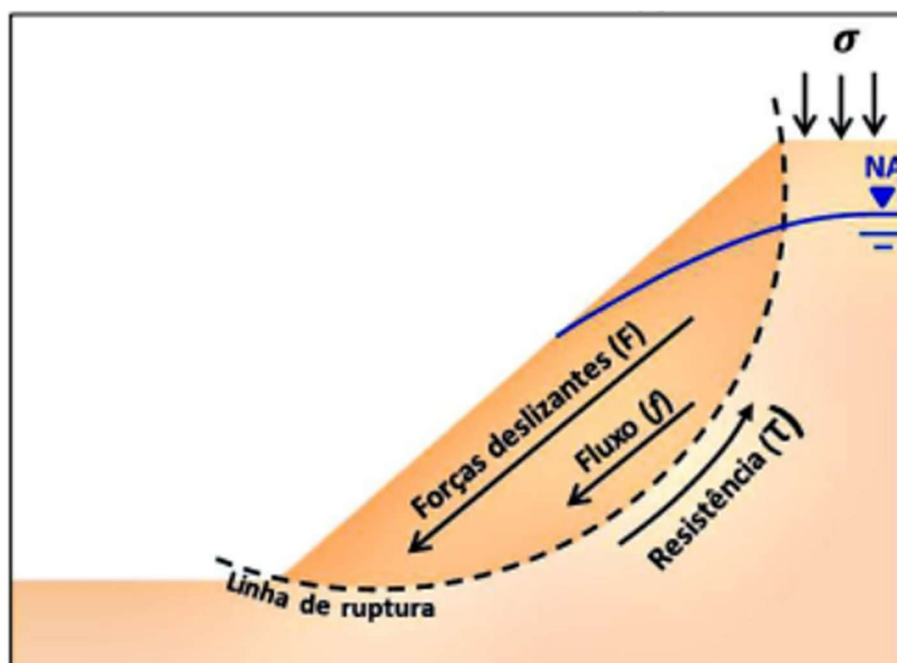
As causas ou fatores influentes nos movimentos de massa devem ser bem entendidos, para que acontecimentos similares possam ser previstos, controlados e evitados, uma vez que ocorrem sob a influência de fatores geológicos, topográficos, climáticos específicos - que se repetem em diferentes regiões do planeta - e, principalmente, por ações antrópicas.

2.3.3 RESISTENCIA DO SOLO E CRITÉRIOS DE RUPTURA

As tensões aplicadas em taludes, conforme afirma Fiori (2015), podem ser observados a três campos de forças (Figura 17): forças devidas ao peso do solo (deslizantes), forças devidas ao carregamento da água (fluxo) e forças devidas à resistência ao cisalhamento.

“A resistência do solo ao cisalhamento é responsável por sustentar a estabilidade, uma vez que ela resiste à tendência de movimentação da massa de solo para baixo, gerada pelas outras forças” (Fiori, 2015).

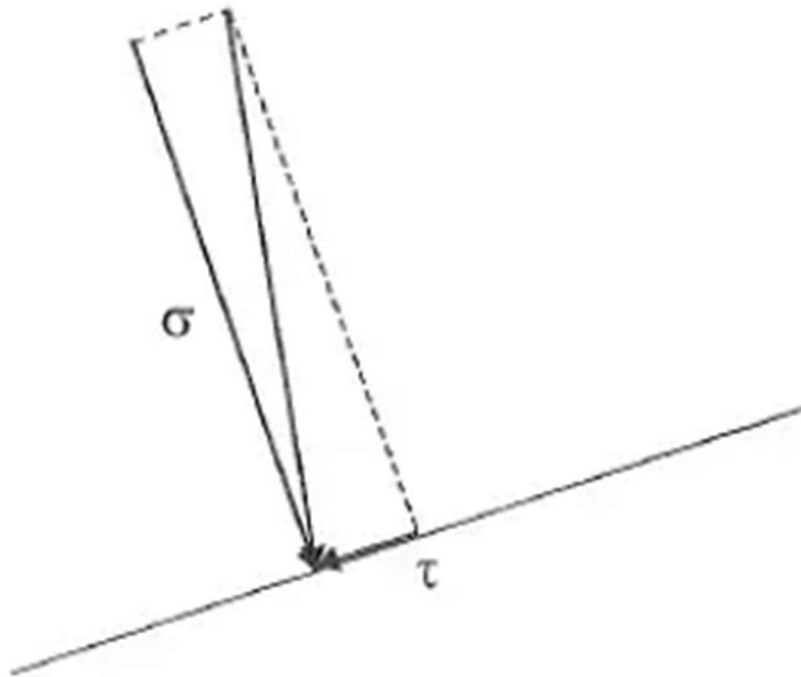
Figura 17 – Ação das forças deslizantes (F), do fluxo de água (f) e da resistência de cisalhamento (τ)



Fonte: Santos Junior, 2019 (adaptado de Soares, 2017)

Relembrando os conhecimentos de tensões por parte da mecânica dos solos, “as força atuantes em um plano podem ter qualquer direção relativa ao plano” (Fiori, 2015). Essas tensões atuantes são decompostas numa componente normal (força ou tensão normal, “ σ ”) e em uma componente externa tangencial (força ou tensão cisalhante, “ τ ”).

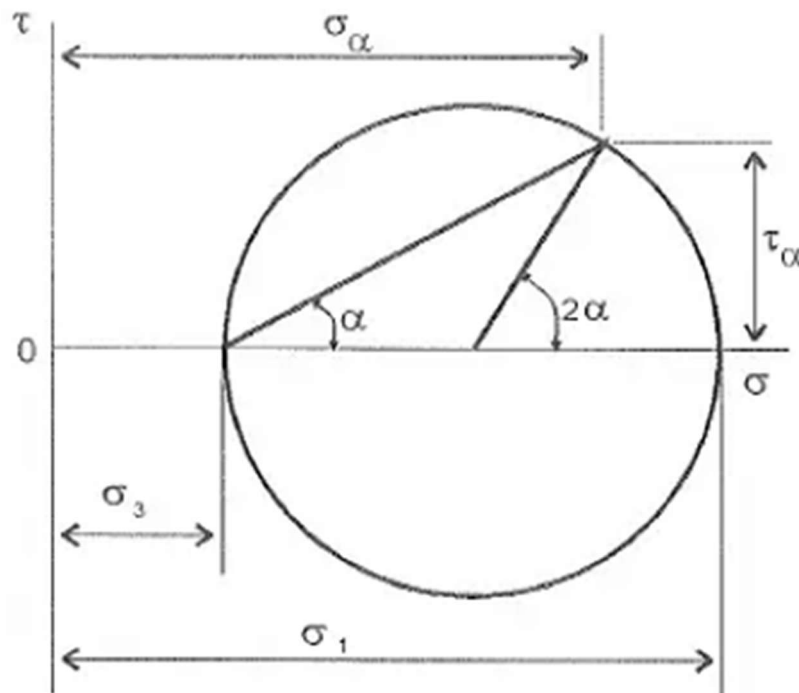
Figura 18 – Decomposição de tensões normal (σ) e cisalhante (τ) em um plano genérico



Fonte: Pinto 2006, p 255

Para determinar o estado de tensões em qualquer que seja a localização de um ponto contido no maciço de solo, pode-se adotar a representação gráfica conhecida como Círculo de Mohr, qual é possível representar em um sistema de coordenadas as tensões normais (σ), que se dão na abscissa, e as tensões cisalhantes (τ), que seguem a ordenada em qualquer plano para qual o ponto pertença.

Figura 19 – determinação das tensões normais (eixo x, abscissa) e cisalhantes (eixo y, ordenada) em um plano genérico por meio do círculo de Mohr



Fonte: Pinto 2006, p 257

A grande vantagem do uso desse conceito é que é possível determinar não só todos os estados de tensão em um determinado ponto, como também nos planos que atuam, diz Gerscovich (2012).

Como nos solos a tensão atuante predominante é a de cisalhamento e, de acordo com Pinto (2006) “a ruptura do solo é quase sempre um fenômeno de cisalhamento”, critérios de ruptura foram formulados para estabelecer as tensões máximas que contribuem com a as condições que ocorre a ruptura dos materiais.

Para Pinto (2006) os critérios ruptura mais representativos do comportamento dos solos são os critérios de Coulomb e de Mohr.

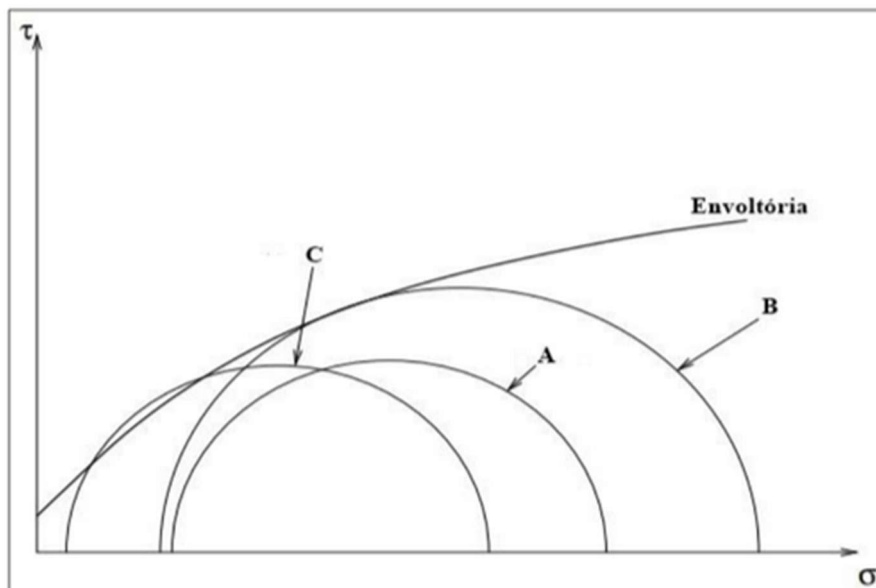
a) *Critério de Coulomb*: o limite de resistência do solo à tensão de cisalhamento (τ_f) está em função da coesão (c) e do ângulo de atrito interno da partícula (Φ), propriedade do solo, e da tensão normal existente no plano de ruptura (σ). (Pinto, 2006; Das, 2014).

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi \quad (\text{eq. 01})$$

A coesão (c) pode ser definida como sendo a parcela da resistência do solo que, independente da tensão aplicada, a atração química entre as partículas provoca uma coesão real semelhante a uma cola entre os corpos, que se mantêm mesmo que todas as tensões aplicadas ao solo forem removidas (Pinto, 2006). O ângulo de atrito (Φ) pode ser entendido como o máximo ângulo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato, sem que ocorra o deslizamento (Pinto, 2006).

b) *Critério de Mohr*: o limite de ruptura só ocorre quando o círculo representativo do estado de tensões ultrapasse a curva dos círculos relativos a estados de ruptura observados experimentalmente. (Pinto, 2006)

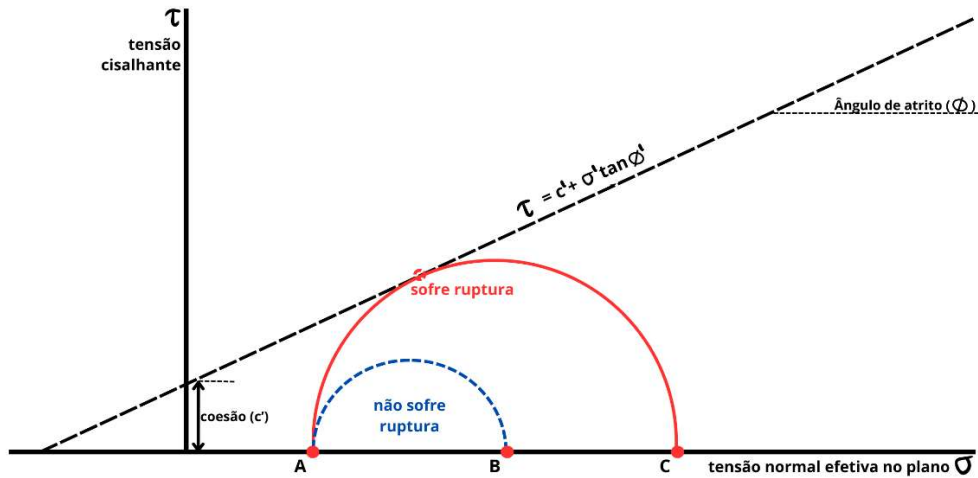
Figura 20 – Representação do círculo de Mohr qual, A representa um estado de tensões dentro do limite estabelecido pelo critério; B representa um estado na ruptura; e C representa um estado em que já ocorreu a ruptura.



Fonte: Santos Junior 2019 (adaptado de Barros, 2013)

Esses critérios, o modelo Mohr para representação gráfica de tensões em associação a equação da reta de Coulomb, dá origem ao que se chama envoltório de Mohr-Coulomb. Esta envoltória é definida pela relação apresentada na (equação 1), representando o traçado de uma reta tangente ao círculo de tensões plotado.

Figura 21 – Representação gráfica do envoltório Mohr-Coulomb.



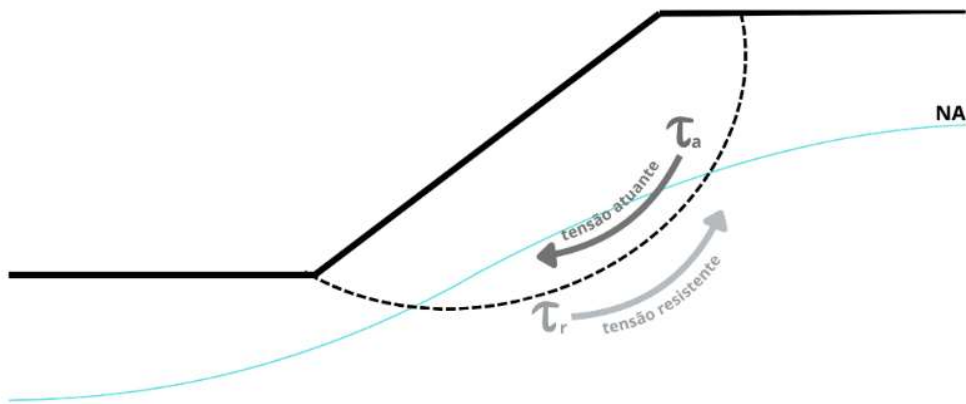
Fonte: Autoral (2025).

2.3.4 FATOR DE SEGURANÇA

Para que seja feita uma análise de estabilidade de taludes, dois aspectos principais são considerados: o cálculo do Fator de Segurança (FS) e a determinação precisa da localização da Superfície Crítica de Ruptura (SCR) (Czap et al, 2024). Estas análises podem ser conduzidas por abordagens determinísticas e/ou probabilísticas, cada uma delas tem características e aplicações específicas.

Nos métodos determinísticos, são empregados valores médios dos parâmetros geotécnicos para calcular o Fator de Segurança, considerando as propriedades do solo constantes e bem definidas, o FS é o resultado da relação entre as forças solicitantes do solo e as resistentes ao escorregamento. Essa relação é exemplificada graficamente por meio da figura 22 e expressa pela equação abaixo:

Figura 22 – Representação gráfica da análise determinística de estabilidade de taludes



Fonte: Autoral, 2025

$$FS = \frac{F_{solicitantes}}{F_{resistentes}} \rightarrow FS = \frac{\tau_r}{\tau_a} \quad (\text{eq.02})$$

Onde:

FS : Fator de Segurança

τ_r : Forças Solicitantes = Tensões de cisalhamento resistentes

τ_a : Forças Resistentes ao Escorregamento = Tensões de cisalhamento atuantes

A avaliação crítica do Fator de Segurança (FS) se baseia no valor numérico desse indicador, refletindo o equilíbrio entre forças atuantes e resistentes no talude (Czap, 2024).

- $FS = 1,0$: Quando o fator de segurança é igual a 1,0, significa que o talude está na iminência de ruptura;
- $FS < 1$: Quando o fator de segurança está abaixo de um, significa que o talude já deveria ter se rompido;
- $FS > 1$: Quando o fator de segurança está acima de 1,0 indica que o talude está estável.

A NBR 13.028 (ABNT, 2017) informa que em termos de estabilidade, as análises devem ser feitas por etapas e globalmente considerando o dique de partida e a sua fundação, os maciços de alteamento independentemente do método construtivo, sua fundação e o rejeito, tendo como objetivo obter as superfícies potenciais de ruptura local e global. A mesma norma recomenda a

obtenção de valores mínimos de fator de segurança para barragens de rejeitos de mineração a partir de análises determinísticas de estabilidade em condições de carregamento drenados (tensões efetivas) e não drenados (tensões totais) de cada material envolvido (Souza Junior et al, 2018).

Tabela 2 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração de acordo com a NBR 13.028

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança
Final de construção *	Maciço e fundações	Montante Jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e Jusante	1,1

Fonte: ABNT NBR 13028 (2017)

2.3.5 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Analisar a estabilidade de um talude consiste em verificar o equilíbrio de um corpo formado por um maciço de solo, sujeito as solicitações já descritas, e às leis que governam a estática e a dinâmica dos corpos sólidos. De acordo com Fiori (2015), o objetivo é realizar a análise estática do volume de material sobre a superfície potencial de escorregamento, sendo essa circular ou não, de maneira que:

a) *Equação 03 para verificação do equilíbrio das forças horizontais:*

$$\sum F_h = 0 \quad (\text{eq.03})$$

b) *Equação 04 para verificação do equilíbrio das forças verticais:*

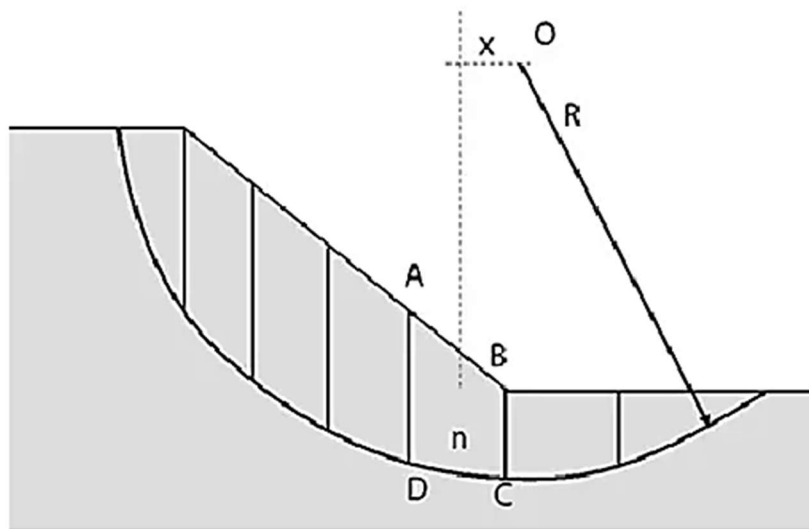
$$\sum F_v = 0 \quad (\text{eq. 04})$$

c) Equação 05 para verificação do equilíbrio dos momentos:

$$\sum M_o = 0 \quad (\text{eq.05})$$

De acordo com Abramson et al (2002), essa condição é geralmente analisada dividindo a massa do talude instável em fatias menores e tratando cada fatia individual como um bloco de deslizamento único, assim o equilíbrio das forças é feito através da análise do equilíbrio de cada fatia.

Figura 23 – Exemplo da divisão em fatias de uma superfície circular



Fonte: Gerscovich, 2012

O método das fatias é utilizado pela maioria dos programas de computador, pois pode acomodar facilmente geometrias complexas de taludes, condições variáveis do solo e a influência de cargas externas de contorno. Uma vez determinadas a geometria do talude e as condições do subsolo, a estabilidade de um talude pode ser avaliada utilizando-se tanto gráficos publicados quanto análise computacional.

“A maioria dos programas de computador usados para análise de estabilidade de taludes baseia-se na abordagem do equilíbrio limite para um modelo bidimensional, embora alguns também permitam análises tridimensionais.” (Abramson et al, p 329, 2002)

O Quadro 3 a seguir lista alguns dos métodos mais tradicionais de análise de taludes e suas características quanto a forma da superfície de ruptura admitida e quanto as equações de equilíbrio que são satisfeitas

Quadro 3 – Características dos métodos de equilíbrio limite

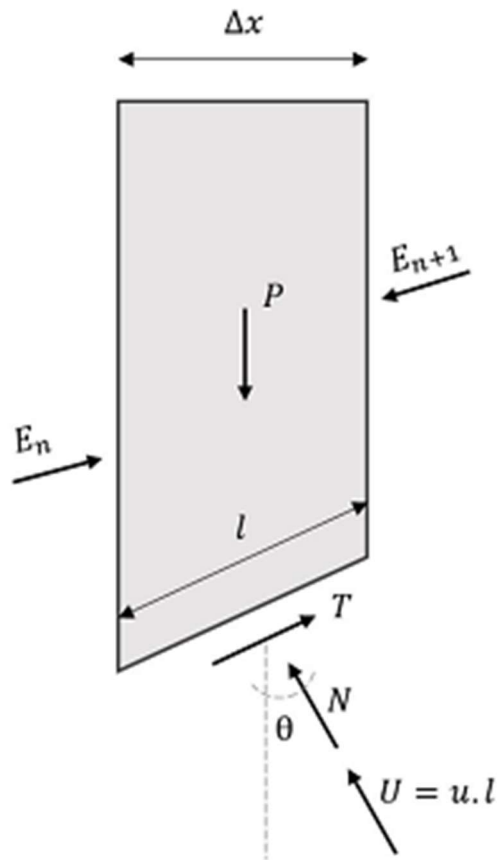
Método	Características
Fellenius (1927)	Superfície de ruptura circular Satisfaz o equilíbrio de momentos
Janbu Generalizado (1954)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Morgenstern e Price (1965)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais
Spencer (1967)	Superfície de ruptura qualquer Satisfaz o equilíbrio de momentos Satisfaz o equilíbrio de forças verticais Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais

Fonte: Autoral (2025).

2.3.5.1 MÉTODO FELLENIUS (1927)

Este método desconsidera todas as forças entre fatias e não satisfaz o equilíbrio de forças tanto para a massa deslizante quanto para as fatias individuais. No entanto, segundo Abramson et al (2002), é um dos procedimentos mais simples baseados no método das fatias.

Figura 24 – Fatia de Fellenius



Fonte: Figueiredo Brito, 2023 (adaptado de Massad, 2010)

O cálculo do Fator de Segurança (equação 06) é feito admitindo uma superfície de ruptura circular e é unicamente aferido pelo equilíbrio de momentos.

$$FS = \frac{\sum[c * l + (P * \cos \alpha - U * l) * \tan \phi]}{\sum P * \sin \alpha} \quad (\text{eq. 06})$$

Onde:

FS : Fator de segurança de uma fatia pertencente a linha de ruptura;

c : coesão do solo;

ϕ : ângulo de atrito;

l: comprimento da base da fatia analisada;

P: peso da fatia analisada;

U: força de poropressão normal a base da fatia;

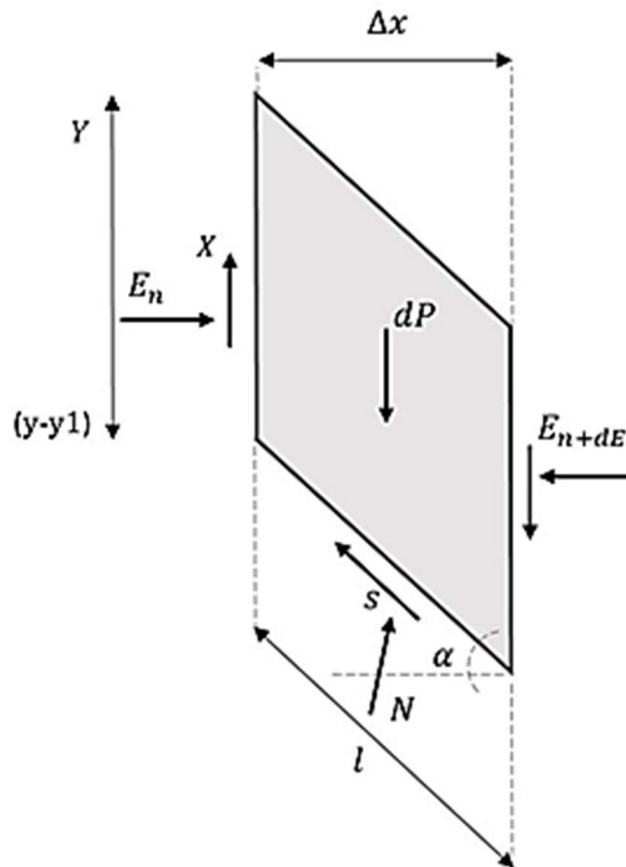
α : inclinação da base da fatia.

2.3.5.2 MÉTODO JANBU GENERALIZADO (1954)

Janbu assume uma localização da linha de empuxo, reduzindo assim o número de incógnitas (Abramson, 2002), este método pressupõe também que a resultante dos esforços normais de qualquer fatia passa pelo ponto médio dela.

O método de Janbu generalizado é considerado rigoroso, se propõe a satisfazer todas as equações de equilíbrio a partir da divisão do maciço em fatias infinitesimais e, assim, realizando o equilíbrio das forças e dos momentos (Gerscovich, 2016).

Figura 25 – Fatia de Janbu



Fonte: Figueiredo Brito, 2023 (adaptado de Gerscovich, 2016)

Para as forças entres as fatias, adota-se:

$$dE = (P + dx) * \tan\alpha - [c' + (P + dx - u) * \tan\phi] * \frac{b}{n_\alpha * FS} \quad (\text{eq. 07})$$

Sendo a adequação para a linha de empuxo:

$$x = -E * \tan\phi + (y - y') * \frac{dE}{l} \quad (\text{eq. 08})$$

Onde:

$(y-y')$: posição da linha de empuxo

ϕ : Inclinação da linha de empuxo

E, assim, para o equilíbrio dos momentos:

$$FS = \frac{\sum[l * c + (P - u * l) * \tan\phi \frac{1}{M_\alpha}]}{dE + \sum(dx * (P * dx) \propto} \quad (\text{eq. 09})$$

Onde:

M_α : Somatória dos momentos para a fatia analisada.

$$n_\alpha = \frac{1 + \tan\alpha * \tan\phi}{1 + \tan^2\alpha} = \cos^2\alpha * \left(1 + \tan\alpha * \frac{\tan\phi}{FS}\right) \quad (\text{eq. 10})$$

2.3.5.3 MÉTODO MORGENTERN E PRICE (1965)

Esse é um método satisfaz todas as condições de equilíbrio. Segundo Ferreira (2012), para o cálculo utiliza-se de equações diferenciais, uma para o equilíbrio dos momentos e outra para o equilíbrio das forças numa fatia.

Para Morgenstern e Price, as fatias consideradas são infinitesimais, isso faz com que o número de incógnitas seja maior que o de equações, ou seja, ele é estaticamente indeterminado, necessitando de métodos computacionais para sua resolução.

2.3.5.4 MÉTODO SPENCER (1965)

Spencer, semelhante ao método Morgenstern e Price, propõe um método que satisfaz rigorosamente o equilíbrio estático, assumindo que a força resultante entre fatias tem uma inclinação constante (porém desconhecida) (Abramson, 2002).

Sendo assim, substituiu-se as forças de interação entre fatias por uma resultante estaticamente equivalente, que atua no ponto médio da base da fatia de solo (Ferreira, 2012). Assim, com a manipulação das equações de equilíbrio pode-se desenvolver a solução para o cálculo do Fator de Segurança para esse método.

2.3.6 CONDIÇÃO DE TENSÃO CRÍTICA: RESERVATÓRIO CHEIO

Quando se estuda a estabilidade de uma obra, compara-se a resistência ao cisalhamento com as tensões cisalhantes transmitidas aos grãos do solo (Gercovich, 2014), portanto, o projeto de estabilidade de talude deve ser elaborado com o completo conhecimento de como a barragem irá responder à diferentes tensões durante e após a construção.

A condição chamada “Reservatório Cheio”, é uma das três condições de tensões críticas onde fluxo de água pelo barramento, de montante à jusante, causa uma pressão de percolação que submete a estrutura aos esforços máximos de pressão hidrostática, infiltração e carregamentos externos, aumentando o risco de ruptura ou falha. Para maior segurança, a NBR 13028 (ABNT, 2017) recomenda:

“Quando o volume para amortecimento de cheias atingir o valor do volume de espera, deve-se interromper a operação da barragem para a manutenção da segurança da estrutura frente a cheia do projeto, devendo-se proceder ao alteamento do maciço ou adequar a geometria do vertedouro” (ABNT NBR 13028, p 13, 2017).

A maioria das barragens é inicialmente concebida com uma capacidade de suportar inundações projetadas menores do que as necessárias, devido à falta de dados confiáveis sobre inundações e ao uso de métodos de cálculo menos avançados que os atuais (Pereira et al, 2023).

No relatório final do ICOLD (2019) sobre falhas em barragens, uma análise estatística mostrou que entre as principais causas técnicas de rompimento está a capacidade insuficiente dos vertedouros, diretamente relacionada a capacidade instalada insuficiente, a capacidade disponível insuficiente e a borda livre insuficiente.

No Brasil, dependendo da finalidade, as barragens de rejeitos construídas devem atender aos critérios da ANA (Agência Nacional de Águas)

e da ANM (Agência Nacional de Mineração), ambas autarquias sugerem borda livre mínima de 1,0m acima da máxima cheia do reservatório em barragens de aterro.

Quadro 4 – Aspectos para estabelecimento de borda livre: fatores de influência considerados no dimensionamento, referências para o cálculo desses fatores, e valores mínimos recomendados (VMR)

Fonte	Fatores	Referências	VMR
ANM (2022)	-	-	Borda Livre mínima maior ou igual a 1,0m ou conforme projeto, o que for maior.
ANA (2016)	-	-	Borda livre normal: 3,0m para as barragens de aterro, e 1,5 para as barragens de concreto; Borda livre mínima: 1,0m acima do nível de máxima cheia do reservatório em barragem de aterro, e de 0,5m em barragens de concreto.

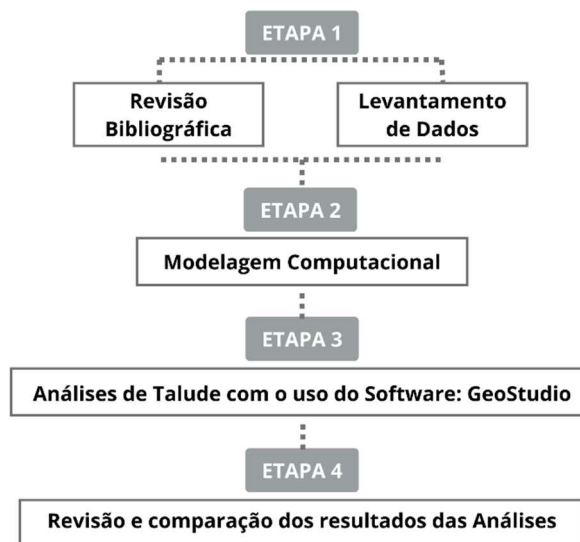
Fonte: Perreira et al, 2023, adaptado.

3 METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho de conclusão de curso seguiu de acordo com o fluxograma apresentado abaixo, o qual ilustra de maneira simplificada a divisão deste presente estudo em etapas e as atividades desenvolvidas em cada uma delas.

Figura 26 – Fluxograma de etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Autoral (2025)

A revisão bibliográfica foi conduzida com o propósito de construir uma base teórica sólida e estabelecer um domínio abrangente sobre o tema, permitindo posteriormente um direcionamento específico para o foco desta pesquisa: barragens de terra e, em particular, a estabilidade de taludes.

A etapa 2, correspondente a modelagem computacional, se refere a escolha do software computacional que foi utilizado para o desenvolvimento da etapa seguinte (etapa 3), e que também gerou os resultados necessários para comparação das condições atuais encontradas e hipóteses criadas em cima de dados reais, para que então a conclusão deste estudo estivesse concluída na etapa 4.

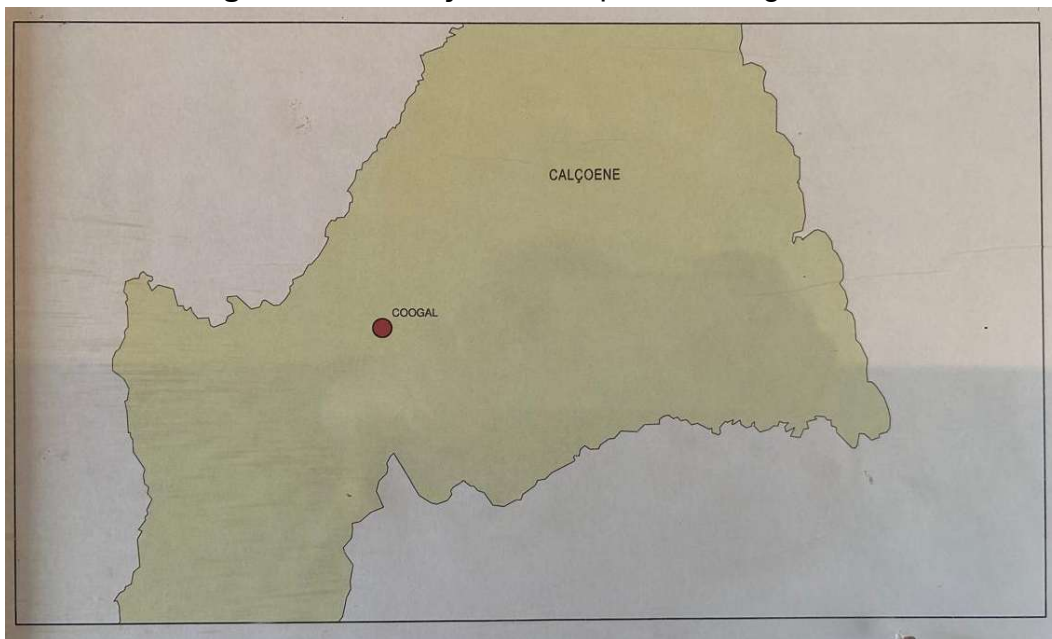
3.2 DELIMITAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O objetivo da análise de talude é contribuir para a segurança e economia da estrutura em questão, geralmente para promover levantamento de dados suficientes para a reformação da estrutura de modo que suporte à capacidade atual sem riscos ou para que comporte um aumento significativo de conteúdo represado.

Para este estudo, a análise de talude sobre uma barragem de contenção de rejeito de mineração será feita de maneira que contribua para o fomento de informações desse tipo de obras pouco conhecidas no Estado do Amapá.

O local do estudo, deu-se em uma barragem de rejeito de ouro, chamada “Barragem Laborrie”, localizada no Distrito do Lourenço, no município de Calçoene, e de responsabilidade da Cooperativa de Garimpeiros do Lourenço (COOGAL).

Figura 27 – Locação em mapa da barragem Laborrie



Fonte: COOGAL, Cooperativa de Garimpeiros do Lourenço (deconhecido)

Tal cooperativa atua há alguns anos já neste local, considerado como um dos três garimpos mais antigos do Brasil ainda em processo de extração atuante de forma legal (Rambo, 2020).

Figura 28 – Locação da barragem Laborrie, ano 2015



Fonte: Rambo, 2020 (IMAP - Instituto de Meio Ambiente e de Ordenamento Territorial do Amapá, 2018)

Figura 29 – Disposição de rejeito na barragem Laborrie, ano 2017



Fonte: Rambo, 2020 (IMAP - Instituto de Meio Ambiente e de Ordenamento Territorial do Amapá, 2018)

Figura 30 – Disposição de rejeito na barragem Laborrie, ano 2025



Fonte: Autoral (2025)

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS GEOTÉCNICOS

A metodologia anteriormente apresentada sobre análise de talude requer informações específicas quanto ao material que compõe a estrutura da barragem e, também, quanto ao formato geométrico em que esta obra se exhibe. Essas informações são necessárias para que seja possível a caracterização do estado e do comportamento do objeto de estudo.

Este trabalho propõe obter um modelo da barragem a partir do aproveitamento de análises geotécnicas realizados em 2020 do local do talude, sendo estes: laudo técnico de sondagem através de ensaios de penetração dinâmica do tipo SPT (Standard Penetration Test), ensaios de caracterização completa, ensaios de compressão triaxial, ensaios de adensamento clássico, ensaios de cisalhamento direto rápido, ensaios de permeabilidade à carga variável.

3.3.1 SONDAGEM ATRAVÉS DE ENSAIO DE PENETRAÇÃO SIMPLES (SPT)

Uma das formas de caracterização do material presente no subsolo da localidade da barragem foi através de perfuração com trado de sondagem a percussão, uma prospecção semidireta do tipo SPT (Standard Penetration Test) (ANEXO A).

“A aplicação da sondagem a percussão em projetos de barragem praticamente resume à medição da resistência do solo como suporte para cargas que lhe serão aplicadas. Assim, o seu emprego tem significativa importância para definir as características das fundações da barragem, quando se trata de solo espesso ou de sedimento pouco consolidado. Nesses casos, a barragem mais indicada é a de terra, e o SPT esclarecerá dois pontos: a) a que profundidade encontra o impenetrável à percussão; b) qual profundidade em que o SPT é compatível com a carga máxima imposta pela obra a projetar.” (Costa, p 155, 2012).

De acordo com Costa (2012), é possível fazer inúmeras correlações entre a resistência à penetração e diversos índices dos solos. Para essa prospecção geotécnica, a empresa responsável executou o processo de sondagem com circulação d'água, em conformidade com as recomendações das seguintes normas:

- ABNT – NBR 6484: Sondagens de simples reconhecimento – método de ensaio;
- ABNT – NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios.

Figura 31 – Registros da realização do ensaio SPT em diversos pontos.



Fonte: Relatório Técnico – Amazon Engenharia e Urbanismo (2020)

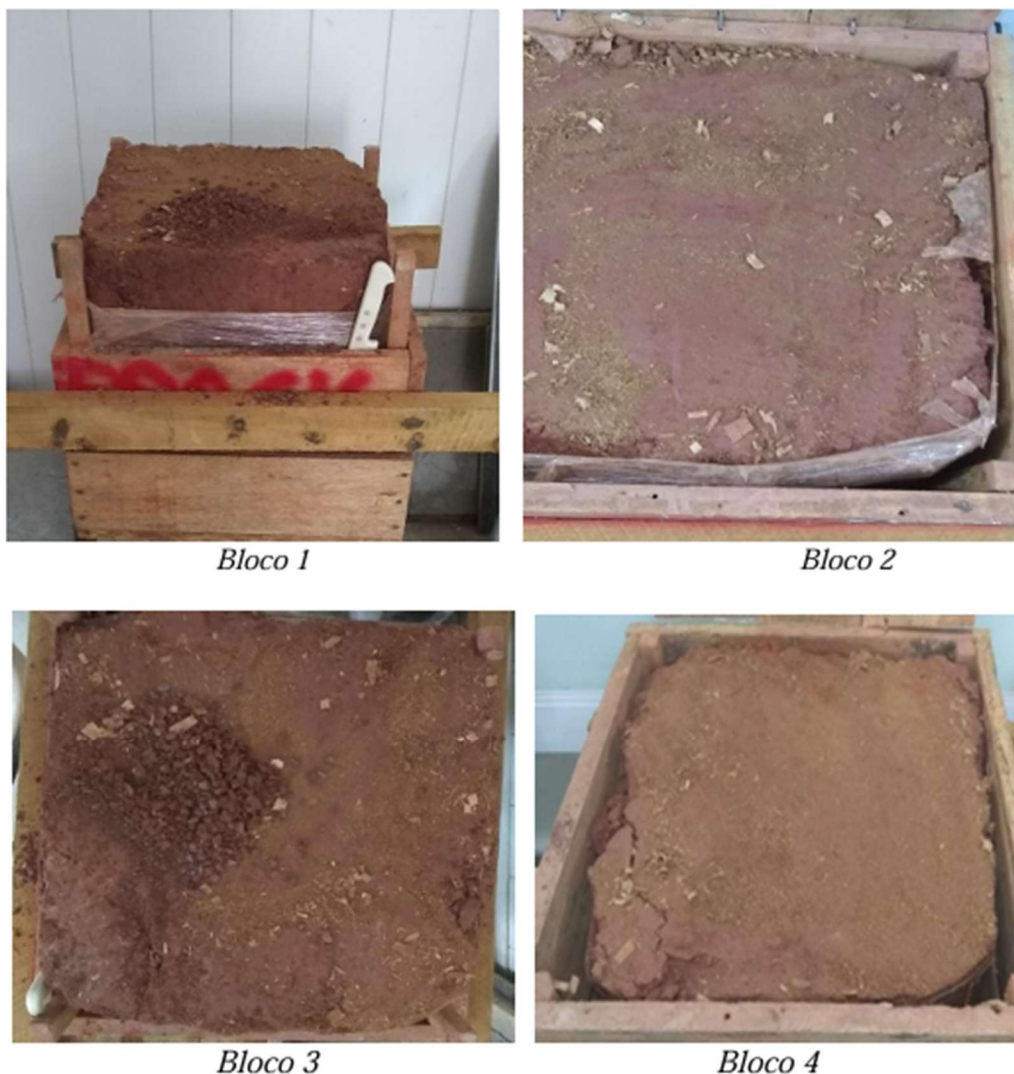
3.3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO COMPLETA

Com intuito de determinar propriedades físicas, químicas e mecânicas do solo, foi realizado um conjunto de procedimentos laboratoriais em amostras do solo da barragem deste estudo. Essas amostras foram coletadas em blocos e levadas para análise no laboratório da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, no Rio de Janeiro (ANEXO B).

Os ensaios de caracterização completa foram realizados executados segundo as recomendações preconizadas nas seguintes normas:

- ABNT NBR 7181: Análise granulométrica;
- ABNT NBR 6459: Determinação do Limite de liquidez;
- ABNT NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade;
- ABNT NBR 6508: Determinação da densidade dos grãos.

Figura 32 – Fotos dos blocos abertos no laboratório da UENF – blocos de 1 a 4



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

3.3.3 ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

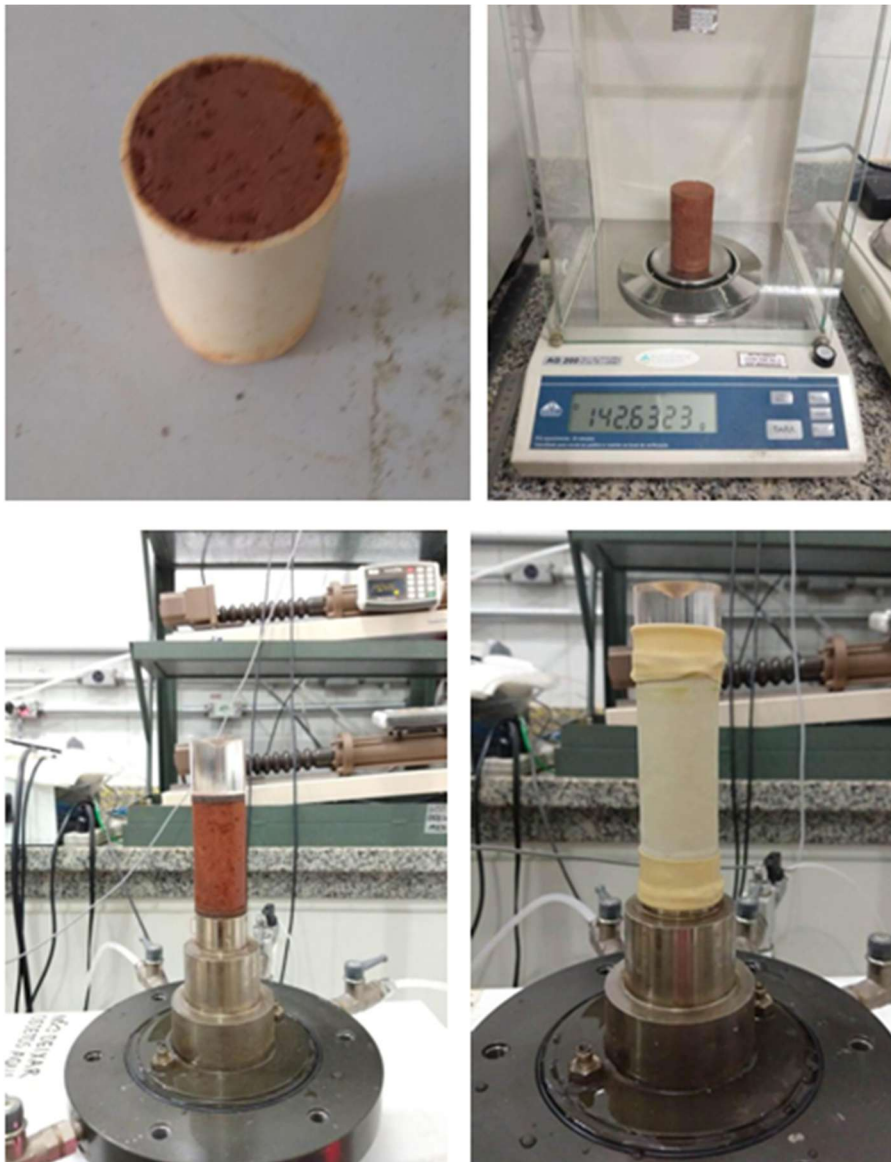
Segundo Costa (2012), o ensaio de compressão triaxial é o método mais confiável para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos, pois permite medir a influência da propressão ou pressão neutra (μ) na ruptura por cisalhamento.

Para as amostras de solo desta barragem de estudo, foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo CIU sat (Anexo B), ou seja, solo Consolidado-Isotrópico-Não Drenado Saturado, aplicado para reconhecimento do comportamento principalmente de argilas sob carregamento rápido como em barragens ou aterros.

Cada corpo de prova ensaiado foi adensado em um nível diferente de tensão de confinamento (σ_3), sendo, 150, 300 e 600 kPa. Os ensaios foram realizados com o intuito de determinar a resistência e as relações de tensão deformação em diversos níveis de confinamento, possibilitando, dessa forma, determinar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e suas respectivas trajetórias.

Os ensaios tiveram as seguintes fases: preparação das amostras, saturação, adensamento e cisalhamento, podendo ser encontrado gráficos de cada um desses no Anexo B.

Figura 33 – Registro de etapas do ensaio de compressão triaxial no laboratório da UENF.



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

3.3.4 ENSAIOS DE ADENSAMENTO CLÁSSICO

Com o objetivo de compreender a maneira de como um solo argiloso se deforma ao longo de um determinado período quando submetido a um carregamento vertical, essas informações são extraídas pela expulsão da água dos vazios no solo. Este ensaio foi regido de acordo a norma:

- ABNT NBR 12007: Solo - Ensaio de adensamento

A programação dos ensaios de adensamento foi previamente estabelecida juntamente com o solicitante (ANEXO B). As medidas para a determinação do K (Coeficiente de permeabilidade) e C_v (Coeficiente de adensamento), foram através da raiz quadrada do tempo correspondente a 90% do recalque para estágios de pressão de 160, 320,0, 640,0 e 1280,0 kPa, respectivamente.

Os corpos de prova para esses ensaios foram retirados nos pontos onde se obteve uma melhor qualidade. Este procedimento foi fundamental para se obter corpos de prova representativos com a condição "In situ". O procedimento de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de adensamento consistiu na introdução do anel 50,8 por 19,1mm (adensamento). Este procedimento permite a cravação do anel no solo sem amolgamento do corpo de prova. Após a cravação completa do anel faz-se o arrasamento cuidadoso do topo e da base.

Figura 34 – Registro de etapas do ensaio de adensamento clássico no laboratório da UENF.



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

3.3.5 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO RÁPIDO

O ensaio de cisalhamento direto objetiva determinar em laboratório a resistência à ruptura por cisalhamento dos solos (Costa, 2012) a facilidade de

execução deste método se mostrou satisfatória quanto aos parâmetros de resistência obtidos.

Os ensaios deste estudo foram executados segundo as especificações técnicas da *ASTM International*, com as normas:

- ASTM D6528 – 07, Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive;
- ASTM D 3080 - 04 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

Foram moldados corpos de prova com comprimento de 100 mm e altura de 24 mm diretamente na célula de cisalhamento, nas condições naturais de umidade e densidade aparente. E foram realizados ensaios em três amostras de bloco indeformado, totalizando 12 pontos.

Os ensaios foram executados com as amostras montadas na célula e embebidas durante um tempo de 15 minutos, esse processo de embebição faz com que a coesão e ângulo de atrito apresentem parâmetros que diferem. Em seguida, a amostra foi submetida ao adensamento prévio até sua estabilização para torná-las mais representativas das suas situações atuais dos diques. As tensões normais utilizadas foram aproximadamente de 100, 200 e 400 kPa. A velocidade de deformação adotada, com base nos ensaios de no coeficiente de adensamento do material, para fase de cisalhamento foi de aproximadamente 0,40 mm/min.

Figura 35 – Registro do ensaio cisalhamento direto no laboratório da UENF



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

O cisalhamento do solo forneceu para cada tensão um gráfico de “tensão x deslocamento”, possibilitando a construção da envoltória de resistência do solo a partir desses mesmos gráficos, obtendo assim os parâmetros de resistência para cada tensão (ANEXO B).

3.3.6 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE À CARGA VARIÁVEL

Devido a constatação local de que a água na barragem aplica sobre o solo uma tensão a partir da diferença de carga hidráulica que varia com o tempo, em níveis de “adição” ou “retirada” do fluido barrado. Foi adotado ensaio de permeabilidade à carga variável para compreender o comportamento da barragem junto a essa condição.

O critério adotado para a análise das amostras foi a Lei de Darcy:

$$v = k * i \quad (\text{eq. 11})$$

Onde:

v = velocidade do fluxo

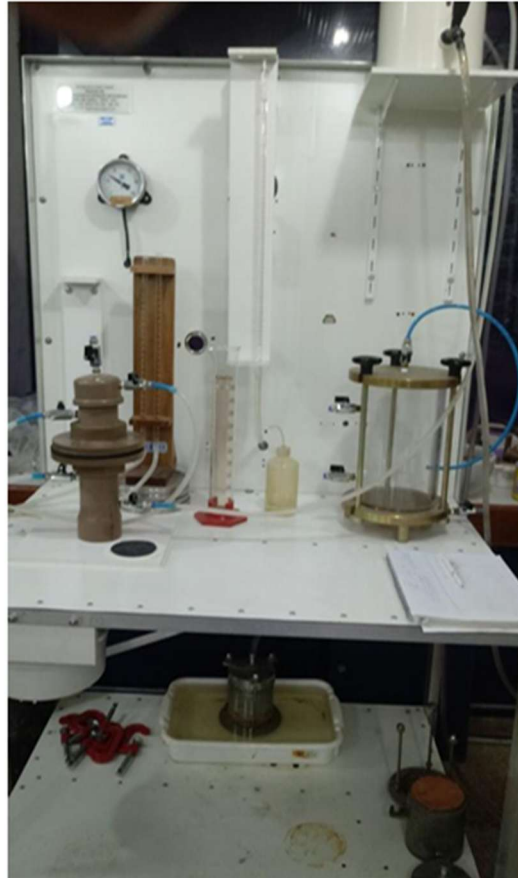
k = coeficiente de permeabilidade

i = gradiente hidráulico (este varia durante o teste)

Este ensaio também foi regido pela norma:

- ABNT NBR 14545: Ensaio de permeabilidade em solos (métodos gerais).

Figura 36 – Registro do ensaio de permeabilidade no laboratório da UENF



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

3.4 MODELAGEM E ANÁLISE COMPUTACIONAL

O processo de modelagem se refere a definição da geometria do perfil da barragem que será analisada. A seção correspondente ao perfil do talude foi registrada pelo IMAP, disposto na dissertação de Rambo (2020).

A análise de estabilidade do talude de estudo foi realizada com métodos baseados na Teoria do Equilíbrio Limite, amplamente utilizada nesse tipo de estudo. Essa teoria considera uma superfície de ruptura (plana, circular ou mista) em que a razão entre tensão cisalhante e normal atinge um patamar crítico.

Os métodos utilizados neste se diferenciam pelas hipóteses simplificadoras adotadas em cada um deles, sendo estes:

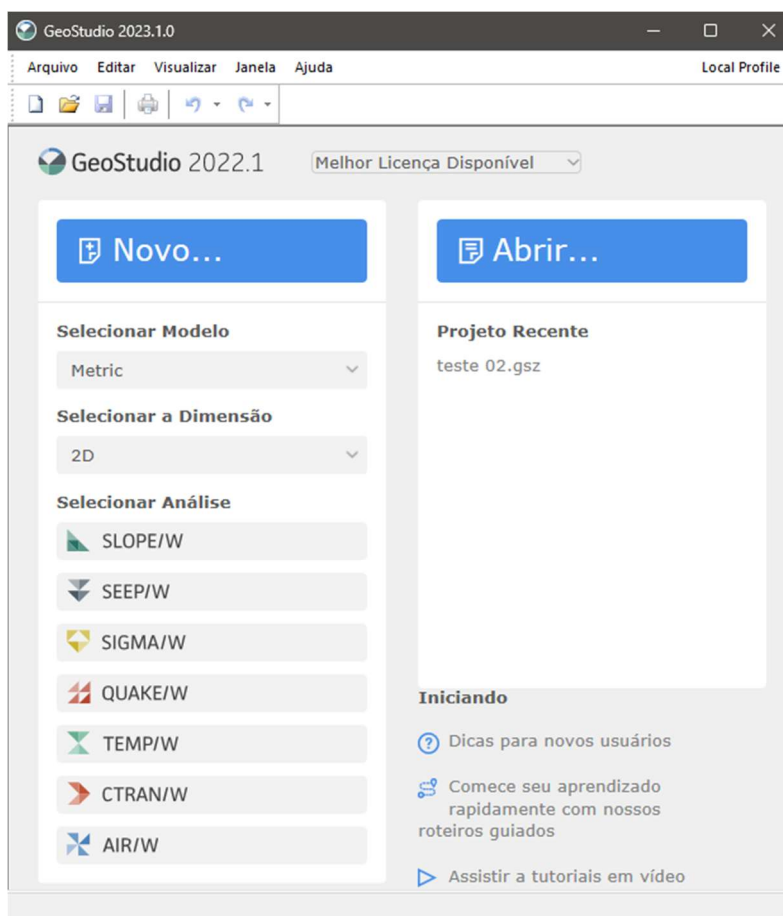
- Método Fellenius
- Método Janbu
- Método Morgenstern – Price
- Método Spencer

O software GeoStudio 2D, desenvolvido pela empresa Seequent permite combinar múltiplas análises usando diferentes produtos em um único projeto de modelagem. Este programa foi escolhido para este estudo por conseguir modelar situações para diferentes tipos de solo, geometrias complexas, situação de pressões neutras variável, utilizando uma variedade de métodos no cálculo.

3.4.1 SOFTWARE: GEOSTUDIO 2D

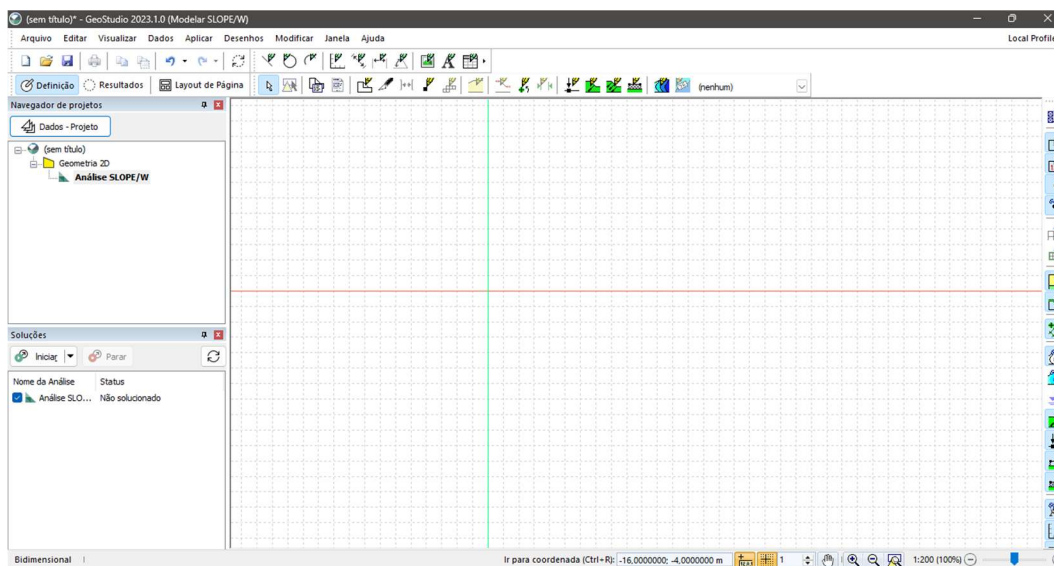
O GeoStudio 2D oferece o recurso essencial para realizar a análise de estabilidade de taludes de equilíbrio limite, o módulo SLOPE/W. Ele é utilizado para calcular o fator de segurança de taludes, encostas, barragens, escavações, aterros e outros tipos de solos inclinados. Isso permite trabalhar com solo em problemas que exijam integração de informações que influenciam no comportamento.

Figura 37 – Interface inicial do GeoStudio



Fonte: Aural (2025)

Figura 38 – Interface comum do GeoStudio, inicial do módulo SLOPE/w



Fonte: Aural (2025)

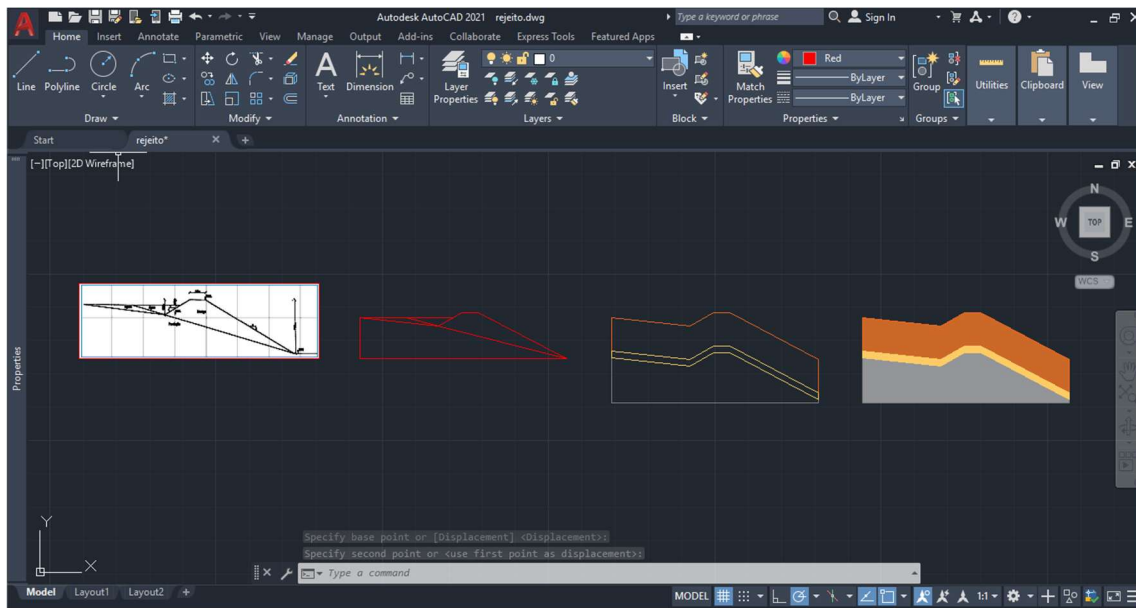
Para o lançamento da geometria da barragem no GeoStudio, foi necessária a composição da seção transversal em figura plana, de modo que entre no sistema em coordenadas do software. Para isso, utilizou-se o software AutoCAD, da Autodesk, para determinar as delimitações externas do traçado da seção transversal e camadas de solo que compõe a barragem, incluindo o solo impenetrável.

O procedimento utilizado foi o seguinte:

- I. Desenharam-se as bordas da seção transversal da barragem no AutoCAD a partir das informações obtidas na revisão bibliográfica;
- II. Com os dados de sondagem, definiu-se as camadas de solo encontrado de maneira separada por linhas e cores (comando HATCH);
- III. Cada camada foi desenhada em única polilinha, com o comando POLILINHA (POLYLINE);
- IV. Com a geometria da seção definida, o arquivo foi salvo no formato “.dxf” para que seja compatível à incorporação;
- V. Executando o software GeoStudio, inicia-se um novo arquivo e “Importa” o arquivo em “.dxf” que contém o perfil geométrico da barragem de estudo;
- VI. Após a importação do arquivo em “.dxf”, é necessário informar quais os métodos que serão utilizados para análise, o material de cada camada, e as informações específicas de cada solo de acordo com os resultados dos ensaios em laboratório;

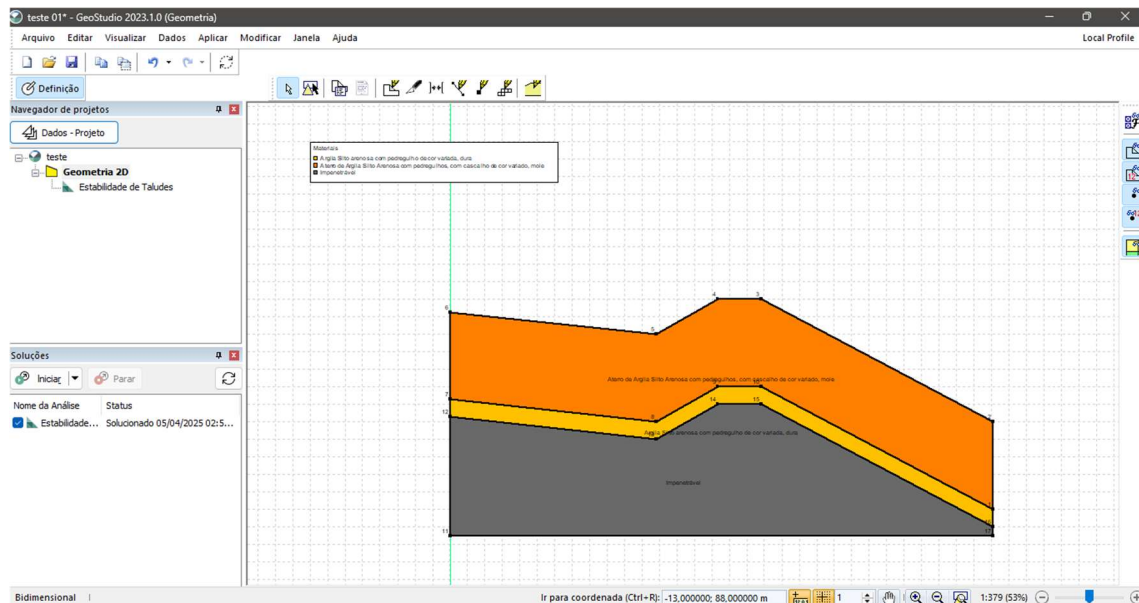
As figuras abaixo são os modelos criados no AutoCAD para a barragem (Anexo C) e o resultado do processo de lançamento da geometria da seção tipo dos barramentos no GeoStudio.

Figura 39 – interface do AutoCAD com os modelos do mesmo perfil desenhados para análise



Fonte: Autoral (2025)

Figura 40 – interface do GeoStudio com a importação do perfil para análise



Fonte: Autoral (2025)

3.5 ANÁLISE EM CONDIÇÃO CRÍTICA: RESERVATÓRIO CHEIO

A barragem foi submetida a condição crítica de Reservatório cheio, devida ao histórico de cheia qual o nível da água alcançou o nível da crista. A carga hidráulica da barragem não está delimitada, portanto, este estudo

pretende simular alteamentos com espessura de 3,0 metros e definir o limite de borda livre com margem de segurança para aplicar a análise.

O fatore de segurança adotados como referência para a estabilidade nessa condição crítica será de 1,3, de acordo com a NBR 13.028 (ABNT, 2017).

4 ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES COM MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE DA BARRAGEM DE REJEITOS LABORRIE, CALÇOENE/AP

4.1 HISTÓRICO PRELIMINAR DO OBJETO DE ESTUDO

Nas últimas décadas a extração mineral artesanal vem sendo reduzida, principalmente em função da criação de áreas impeditivas à mineração, como áreas protegidas, unidades de conservação e terras indígenas. Contudo, áreas garimpeiras tradicionais, como a região de Lourenço continua ativas e constitui a principal ocupação socioeconômica de algumas centenas de trabalhadores informais (IEPA, 2010).

Apesar de estar sob a responsabilidade da Cooperativa dos Garimpeiros do Lourenço (COOGAL), a continuidade da exploração e produção de ouro de maneira desordenada e individual por cada cooperado, ocasiona um aumento no volume de rejeito que, em época de cheia, torna-se estressante para a estrutura atual da barragem.

Apesar da estimativa do período de construção do maciço, década de 90, o histórico de ocorrências é incerto. Mais recente, a barragem passou por um processo de galgamento em 2018, e foram abertos extrusores na área da crista em pelo menos dois momentos informados pelo presidente da cooperativa, um ainda em 2018 e outro em 2020.

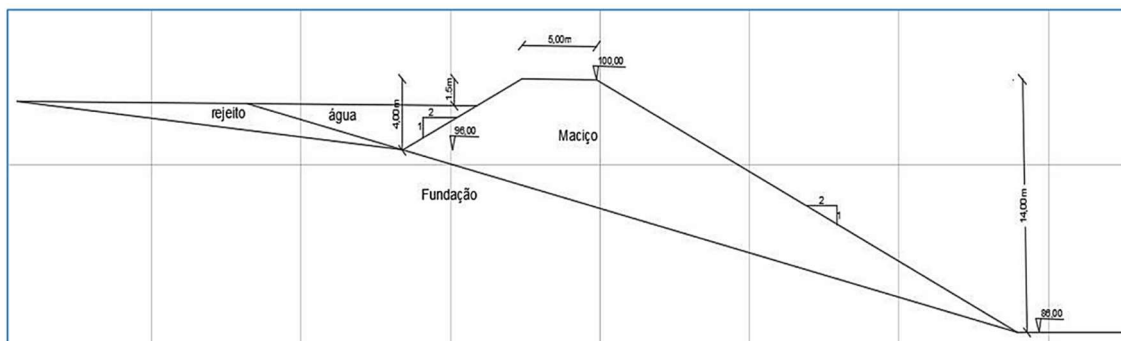
Não há projeto original do talude, apenas registros fotográficos do processo de alteamento, sem dados específicos do método ou dos materiais utilizados, além de que os estudos de reconhecimento do geotécnico foram feitos décadas depois do início da extração local, no ano de 2020.

4.2 DEFINIÇÃO DO PERFIL GEOMETRICO DO TALUDE

Uma das informações fundamentais para o desenvolvimento desse estudo é a caracterização do perfil geométrico do talude. A seção da barragem foi obtida baseando-se nas informações encontradas na dissertação de Rambo (2020), fornecidas pelo Instituto do Meio Ambiente e de Ordenamento Territorial do Amapá (IMAP/AP), que indica as seguintes características: “O maciço da Barragem Laborrie consiste em um aterro de solo compactado, com altura de 4,00 m a montante e 14,00 m a jusante, comprimento de crista de

110,00m e 5,00 m de largura. Os taludes têm inclinação de 1V:2H a montante e 1V:2H a jusante.” (Figura 41)

Figura 41 – Seção tipo da barragem de rejeito Laborrie



Fonte: Rambo (2020)

É importante ressaltar que foi considerado um perfil geométrico constante, único, para a análise do talude como um todo devido a falta de recortes transversais para análises em diferentes pontos na mesma estrutura. Toda a análise será feita em cima desse mesmo perfil apresentado na Figura 40, logo os resultados podem variar em caso de mudança na geometria ao longo do maciço.

A partir do traçado encontrado, inclui-se as informações das camadas de solo que compõem o talude a partir dos resultados contidos no Laudo Técnico de Sondagem (ANEXO A) executado e emitido em 2020 pela empresa Amazon Engenharia e Urbanismo.

O procedimento realizado seguiu o método de ensaio descrito pela ABNT NBR 6484/2001: “SOLO – SONDAJENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT – MÉTODOS DE ENSAIO”. De acordo com este, as amostras foram colhidas a cada metro de profundidade, atrás de amostrador padrão, e a perfuração de cada furo só foram paralisadas nas profundidades consideradas “impenetrável” ao amostrador, conforme os critérios da norma.

Tabela 3 – Compacidade e consistência dos solos de acordo com o S.P.T
(Standart Penetration Test)

TABELA 1 – ARGILAS E SILTES ARGILOSOS Correlação entre penetração e tensões admissíveis do solo Kg / cm ²		
N.º de Golpes SPT	Aparência	Kg/cm²
≤ 2	Muito Mole	0,25
3 a 5	Mole	0,50
6 a 10	Média	1,0
11 a 19	Rija	2,0
> 19	Dura	4,0

TABELA 2 – AREIAS E SILTES ARENOSOS Correlação entre penetração e tensões admissíveis do solo Kg / cm ²			
N.º de Golpes - SPT	Aparência		Fadm – Kgf/cm²
< 4	Fofa Solta	{ areia fina e média	1,0
		{ areia grossa	1,5
5 a 8	Pouco compacta	{ areia fina e média	1,5
		{ areia grossa	2,0
9 a 18	Medianamente Compacta	{ areia fina e média	2,0
		{ areia grossa	2,5
19 a 40	Compacta	{ areia fina e média	4,0
		{ areia grossa	4,5

Fonte: Fonte: Relatório Técnico – Amazon Engenharia e Urbanismo (2020)

Foram executados a quantidade total de 05 furos de sondagem a percussão, de acordo com a locação apresentada no laudo técnico, e a caracterização solo da barragem foi definida a partir das informações obtidas no SP-03, qual a locação do furo foi uma perfuração em meio crista do talude, resultando dos dados da tabela 4.

Tabela 4 – Classificação do tipo de solo que compõe a barragem Laborrie, de acordo com os dados do SP-03 do laudo técnico de sondagem SPT

CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL – CAMADAS ESTRATIGRÁFICAS	
10,05 metros de profundidade	= 82% do Solo: ATERRO DE ARGILA SILTO ARENOSA COM PEDREGULHOS, COM CASCALHO DE PEDRA COR VARIEGADA, MOLE
1,90 metros de profundidade	= 18% do Solo: ARGILA SILTO ARENOSA COM PEDREGULHOS, COM CASCALHO DE PEDRA COR VARIEGADA, DURO

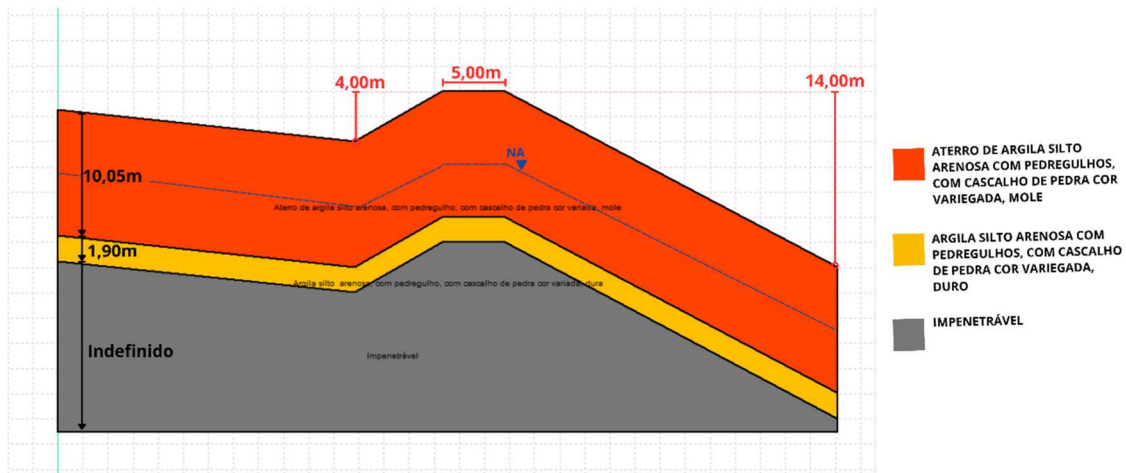
Fonte: Autoral (2025)

O laudo apresentou nível de água nas seguintes profundidades de início em 5,55m, e final em 5,42. Apesar de descrita em boletim de campo, o nível d'água podem variar em virtude tempo e período climático, e para o desenvolvimento desse estudo essa informação será adotada como fixa durante a proposta de análise.

O perfil geométrico definido se resume às informações desse único furo de sondagem, apesar de limitado considerando toda a extensão que compõe o maciço, as informações colhidas no laudo ainda servem como base para a proposta modelada.

De maneira analítica, foi pressuposto as informações de maneira uniforme para todo o perfil, e, dessa forma, obteve-se a seção tipo da barragem para o estudo, definida de acordo com a figura 42 abaixo.

Figura 42 – Definição da geometria do talude estudado



Fonte: Autoral (2025)

Parâmetros generalizados não são recomendados para análises globais de estruturas compostas por maciços de solo, mesmo apresentando resultados suficientes para análise do objeto de estudo, pode ser um risco uma análise pontual quando considerado toda a extensão da estrutura. Contudo, para o estudo apresentado, foi utilizado os dados do laudo técnico como aterro homogêneo em toda a barragem.

4.3 DADOS DA ANÁLISE GEOTÉCNICA

Foi executado uma campanha de investigação geotécnica em laboratório a partir de amostras do solo retiradas da estrutura da barragem de Laborrie e enviadas em bloco para a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes, no Rio de Janeiro.

Figura 43 – Registro da retirada das amostras: crista da barragem Laborrie



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

O programa experimental de análise consistiu na realização de ensaios caracterização completa, ensaios de permeabilidade à carga variável, ensaios oedométricos com Inundação num período de 24hs, ensaio de cisalhamento direto e ensaios compressão triaxial do tipo CIUsat.

Tabela 5 – Resumo do programa experimental

<i>Atividade</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Observação</i>
<i>Ensaio de compressão triaxial – CIU sat.</i>	<i>4 ensaios</i>	<i>12 Corpos de prova talhados nos blocos.</i>
<i>Ensaio de adensamento clássico</i>	<i>3 ensaios</i>	<i>Corpos de prova talhados no blocos.</i>
<i>Ensaio de caracterização completa</i>	<i>4 ensaios</i>	<i>Realizadas nas amostras após corte dos corpos de prova</i>
<i>Ensaio de cisalhamento direto rápido</i>	<i>3 ensaios</i>	<i>Corpos de prova talhados nos blocos.</i>
<i>Ensaio de permeabilidade à carga variável</i>	<i>3 ensaios</i>	<i>Corpos de prova talhados nos blocos.</i>

Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

O solo coletado representa a parte superficial do talude, cerca de 3 metros de profundidade, em poços de investigação, que foram executados de

acordo com a NBR 9604 – Abertura de Poços e Trincheiras de Inspeção de Solos com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas da ABNT.

Conforme as profundidades das camadas estratigráficas conhecidas devido os resultados do ensaio de SPT, a partir das amostras coletadas foi possível reunir as propriedades da camada 1 “ATERRO DE ARGILA SILTO ARENOSA COM PEDREGULHOS, COM CASCALHO DE PEDRA COR VARIEGADA, MOLE”, e do solo que a compõem.

O ensaio de caracterização geral gerou o resultado das características granulométricas (Tabela 6), qual é possível comprovar os resultados obtidos pelo SPT quanto ao tipo de solo, sendo assim exequível a consideração de uso de aterro homogêneo para toda a estrutura. Outras características como o peso específico (γ_s) e os limites de consistência (Atterberg) (Tabela 7) também foi possível classificar.

Tabela 6 – Resultados das características granulométricas*Frações Granulométricas e Classificação Unificada (USCS)*

Pedregulho			Areia			Silte	Argila	Classificação (USCS)	Gs
Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina				
-	-	1	5	6	11	47	29	MH	2,79
-	-	3	3	7	13	42	31	MH	2,75
-	1	4	5	8	14	39	29	MH	2,77
-	-	2	1	2	13	51	31	MH	2,75

Legenda:

MH = Silte Inorgânico

Gs = Densidade Real dos Grãos.

Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)**Tabela 7 – Resultado do peso específico e limites de Atteberg de cada amostra**

Bloco nº	Peso específico (Ys) kN/m ³	Limites de Atteberg %		
		Limite de Liquidez (LL)	de Limite de Plasticidade (LP)	de Índice de Plasticidade (IP)
1	27,37	60,3	32,7	27,6
2	26,98	64,8	34,4	30,4
3	27,17	61,2	37,9	23,3
4	26,98	61,5	36,7	24,7

Fonte: Autoral, com base nos resultados do Anexo B - Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

Com os dados resultantes dos ensaios de compressão triaxial (Tabela 8) foi determinado a resistência e as relações de tensão deformação em diversos níveis de confinamento, possibilitando, dessa forma, determinar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e as respectivas trajetórias de tensões em gráficos para cada bloco testado.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de compressão triaxial do tipo CIU Sat

Bloco n°	Tensão Confinante (σ_3)	Corpo de Prova	Densidade Aparente Úmida (g/cm ³)	Umidade Natural (%)	Densidade Aparente Seca (g/cm ³)	Coesão a' (kPa)	Atrito α'	Resistência C' (kPa) Cisalhamento	Ângulo ϕ de Atrito
1	150	1	1,767	27,0	1,391	28	25	31	27
	300	2	1,775	27,1	1,397				
	600	3	1,754	26,9	1,382				
2	150	1	1,768	28,6	1,375	30	23	33	26
	300	2	1,715	27,6	1,344				
	600	3	1,691	26,6	1,336				
3	150	1	1,809	28,7	1,406	23	25	26	28
	300	2	1,793	28,5	1,395				
	600	3	1,806	28,3	1,408				
4	150	1	1,802	27,3	1,416	17	26	18	29
	300	2	1,799	27,6	1,410				
	600	3	1,812	27,8	1,418				

Legenda:

a' (kPa)/ α' Parâmetros obtidos na trajetórias de tensões, p' e q' ;

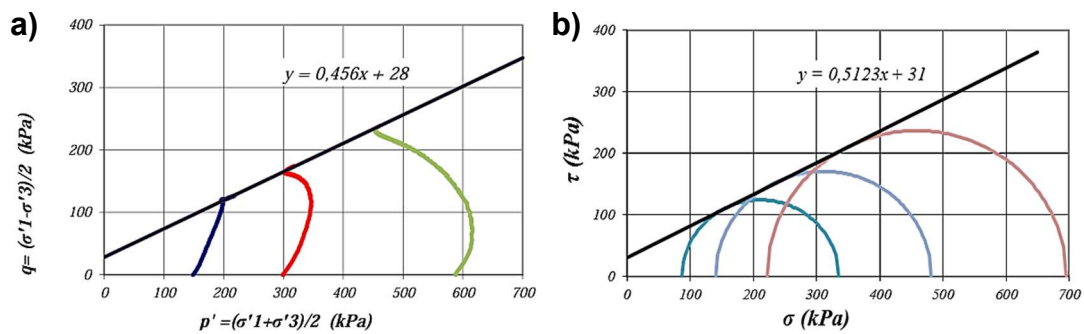
C' (kPa)/ ϕ' Parâmetros obtidos através das formulações de $C' = a'/\tan \phi'$ e $\tan \phi' = C'/a'$.

Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020).

Adaptado

Gráfico 1 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 1

(a. Trajetória de Tensões; b. Círculo de Mohr)

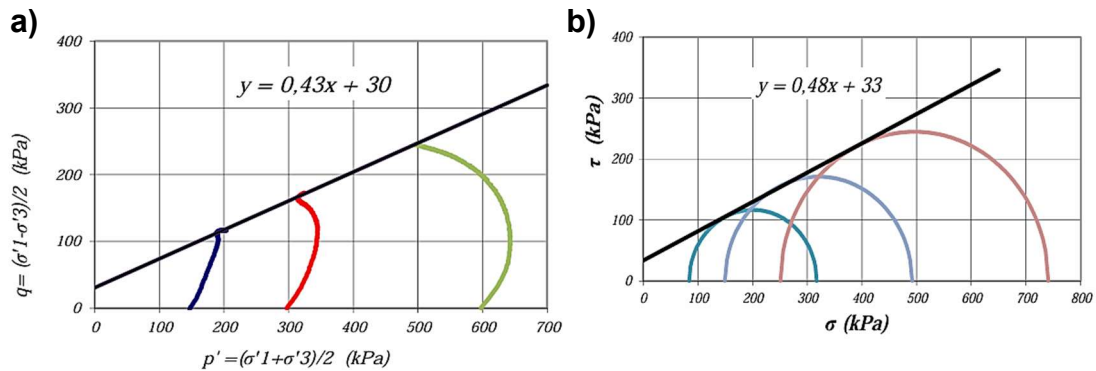


Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020).

Adaptado

Gráfico 2 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 2

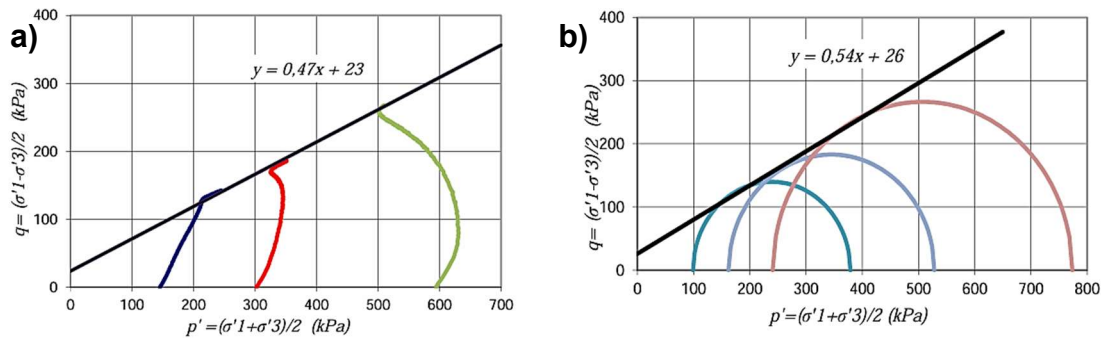
(a. Trajetória de Tensões; b. Círculo de Mohr)



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020).
Adaptado

Gráfico 3 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 3

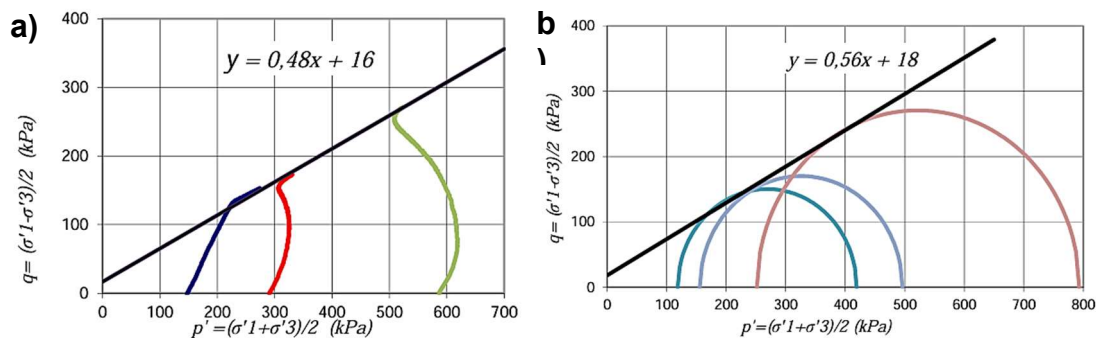
(a. Trajetória de Tensões; b. Círculo de Mohr)



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020).
Adaptado

Gráfico 4 – Ensaio triaxial CIU Sat – Bloco 4

(a. Trajetória de Tensões; b. Círculo de Mohr)



Fonte: Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020).
Adaptado

Os principais índices de avaliação da estabilidade de solos argilosos sujeitos a carregamentos ou variações de umidade se encontram na tabela 9 abaixo, que foram obtidos através do ensaio de adensamento clássico do solo.

Tabela 9 – Principais índices a partir dos resultados do ensaio de adensamento

Bloco nº	Índice de Compressão (Cc)	Índice de Recompressão (Cr)	Tensão de Pré-Adensamento ($\sigma_{p'c}$) kPa	Coefficiente de Variação Volumétrica (mv) m ² /kN	Coefficiente Adensamento (Cv) cm ² /s	Permeabilidade (k) cm/s
1	0,35	0,05	290	1,4×E-4	2,02×1E-3	1,71×E-8
2	0,32	0,05 (estimado)	250	1,2×E-4	2,85×E-3	2,36×E-8
3	0,3	0,04	300	1,0×E-4	2,38×E-3	2,37×E-8

Fonte: Autoral, com base nos resultados do Anexo B - Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

Os principais parâmetros de resistência do solo (Tabela 10) analisado se deram a partir dos resultados do ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de adensamento

Bloco nº	Coesão efetiva ou total (c') kPa	Ângulo de atrito interno (ϕ)
1	29,67	23,5°
2	14,85	31°
4	29,1	29,1°

Fonte: Autoral (2025), com base nos resultados do Anexo B - Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

Os índices de condutividade hidráulica (permeabilidade, k) foram determinados a partir do ensaio de permeabilidade a carga variável (Tabela 11).

Tabela 11 – Resultados do ensaio de permeabilidade

Bloco nº	Coeficiente de permeabilidade (K) cm/seg
1	6,70E-06
2	3,70E-06
4	3,90E-06

Fonte: Autorial (2025), com base nos resultados do Anexo B - Relatório técnico: Investigação Geotécnica de Laboratório COOGAL – UENF (2020)

4.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE EM CONDIÇÕES ATUAIS

Para a análise computacional do talude da barragem Laborrie, através do software GeoStudio, duas considerações iniciais precisam ser pontuadas:

1. O perfil estratigráfico da cama 2 da barragem será considerada ausente quanto as características geotécnicas devido ao não conhecimento dessas informações de identificação específicas;
2. Os índices utilizados para a análise serão os piores para cada um dos ensaios de caracterização geotécnica, para que seja observado o comportamento mais sensível a partir das informações conhecidas;
3. A linha piezométrica (nível da água), seguiu de acordo com a profundidade encontrada no relatório de sondagem (ANEXO A), 5,42 metros abaixo da crista;
4. A geometria do perfil do talude foi considerada constante para toda a extensão da estrutura apesar da não uniformidade geométrica in loco;
5. Devido à falta de investigação em pontos de diferentes localizações na estrutura do talude, os parâmetros de análises encontrados nos ensaios a seguir serão considerados globais, de maneira que os resultados encontrados nas análises podem não corresponder a uma veracidade categórica para múltiplos locais na mesma estrutura.

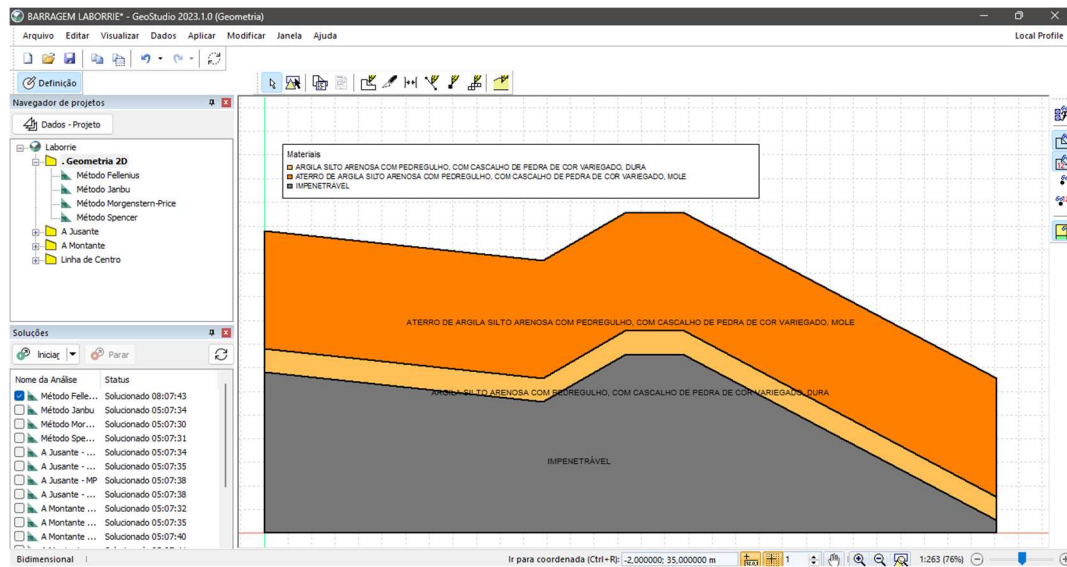
6. O tempo desde a realização dos ensaios devem ser considerados com atenção pois os parâmetros podem variar com o tempo devido ao uso ativo da estrutura e outras intempéries, podendo apresentar alterações nos resultados caso os ensaios apresentados sejam refeitos no futuro e utilizados novamente para o mesmo propósito deste estudo.

Tabela 12 – Índices utilizados na análise computacional do talude, camada 01

Índices aplicados para análise computacional no GeoStudio – Camada 01		
Ensaio de Caracterização		Bloco
Peso específico do Solo (kN/m ³)	26,98	4
Ensaio Triaxial		Bloco
Coesão, a' (kPa)	17	4
Ângulo de atrito, Phi	29°	
Ensaio Cisalhamento Direto		Bloco
Coesão total, c' (kPa)	14,85	2
Ângulo de Atrito Interno, Phi	31	
Ensaio de Permeabilidade		Bloco
Compressibilidade (1/kPa)	1,4E-04	2
Teor Saturado	36%	

Fonte: Autoral (2025)

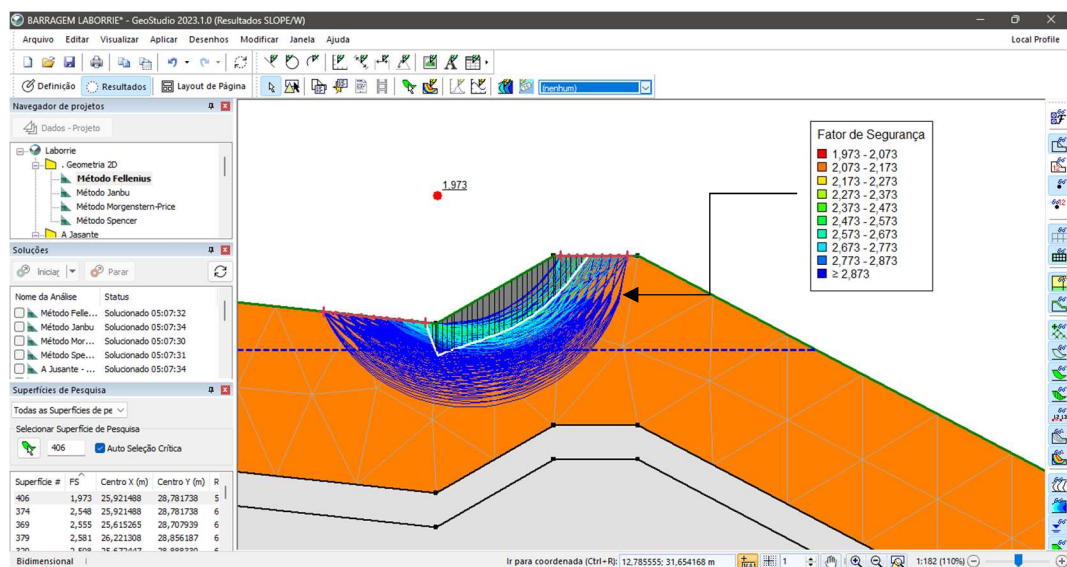
Figura 44 – Interface GeoStudio, geometria da barragem com as camadas de solo identificadas



Fonte: Autoral (2025)

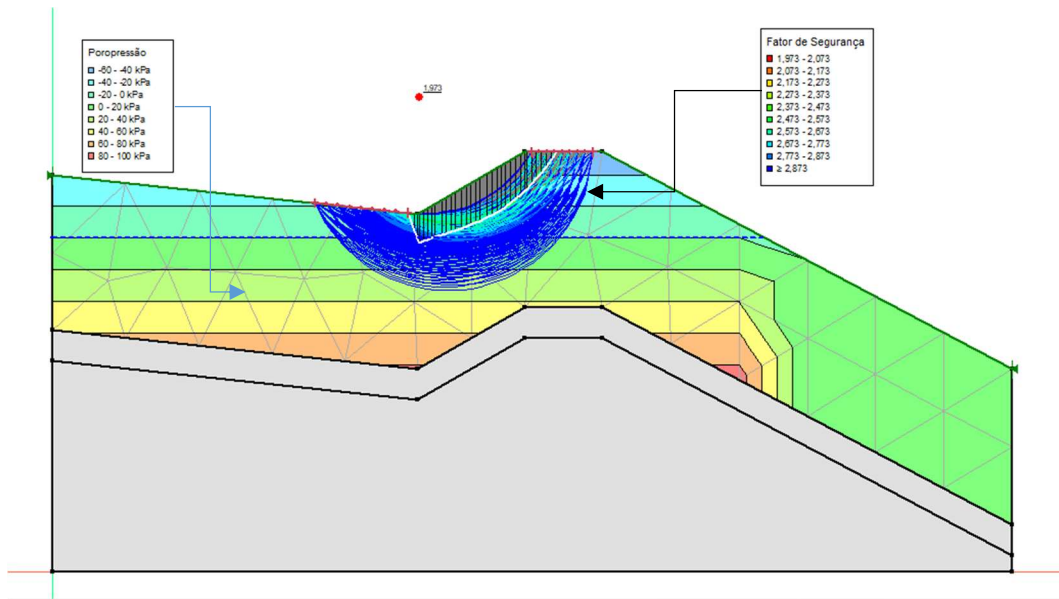
Após a inclusão dos índices no software, o software aguarda o comando para a geração das soluções de encontro dos Fatores de Segurança para cada método - Fellenius, Janbu, Morgenstern-Price e Spencer, respectivamente –, sendo possível verificar a análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo para cada um dos métodos aplicados.

Figura 45 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Fellenius para solução do FS



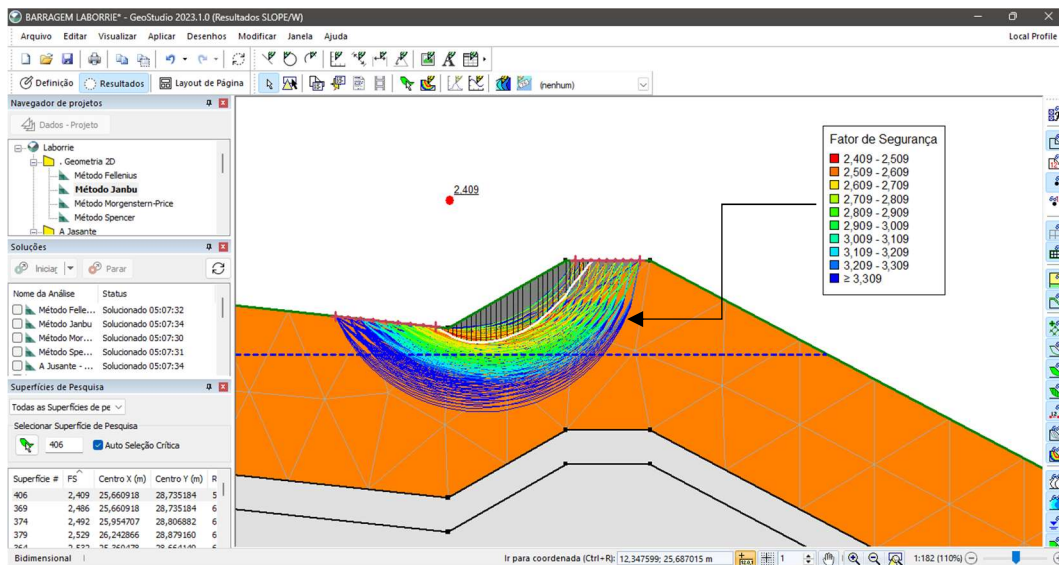
Fonte: Autoral (2025)

Figura 46 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo



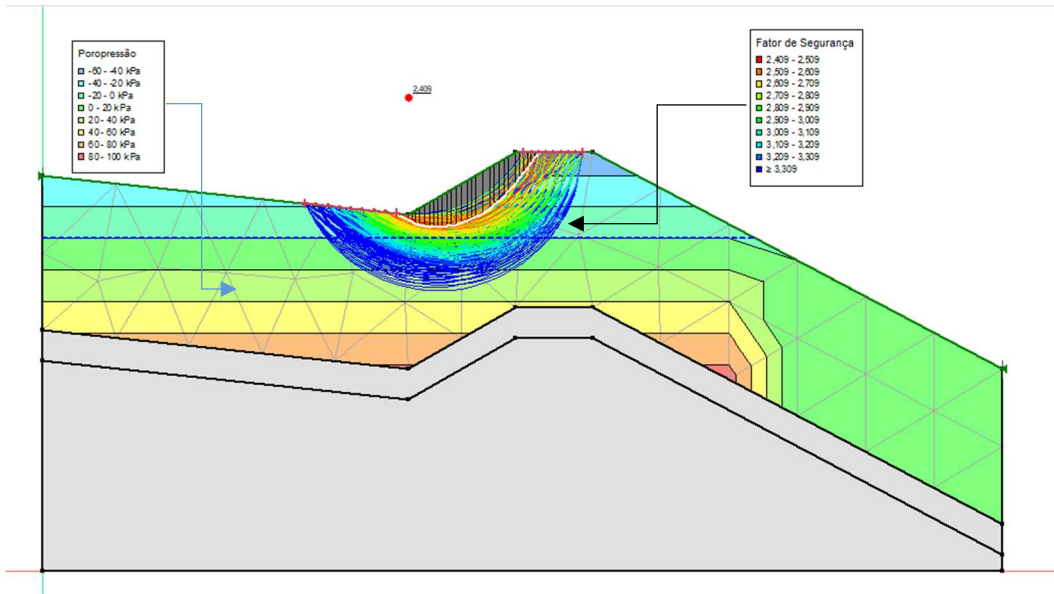
Fonte: Autoral (2025)

Figura 47 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Janbu para solução do FS



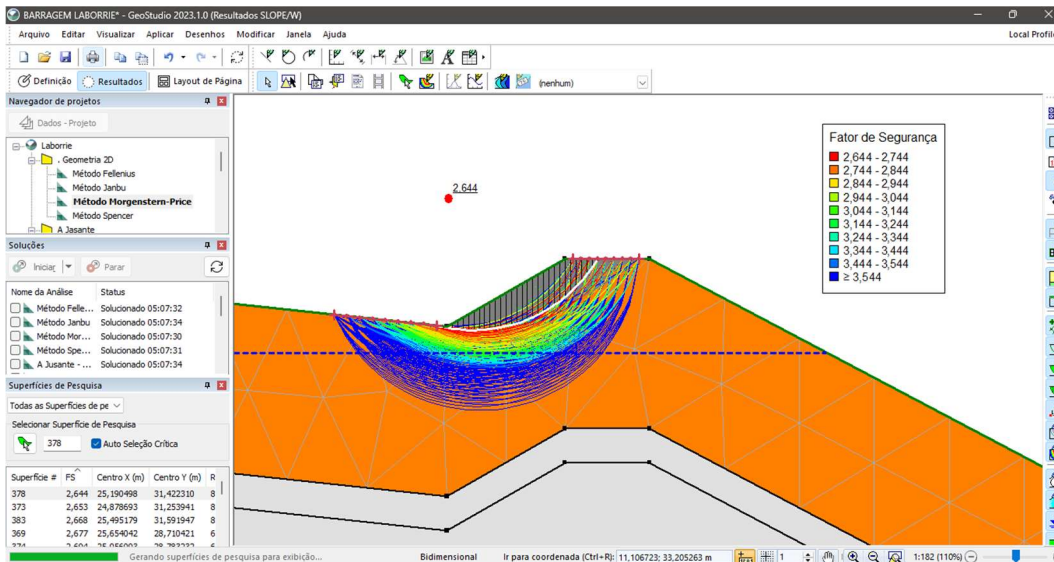
Fonte: Autoral (2025)

Figura 48 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo



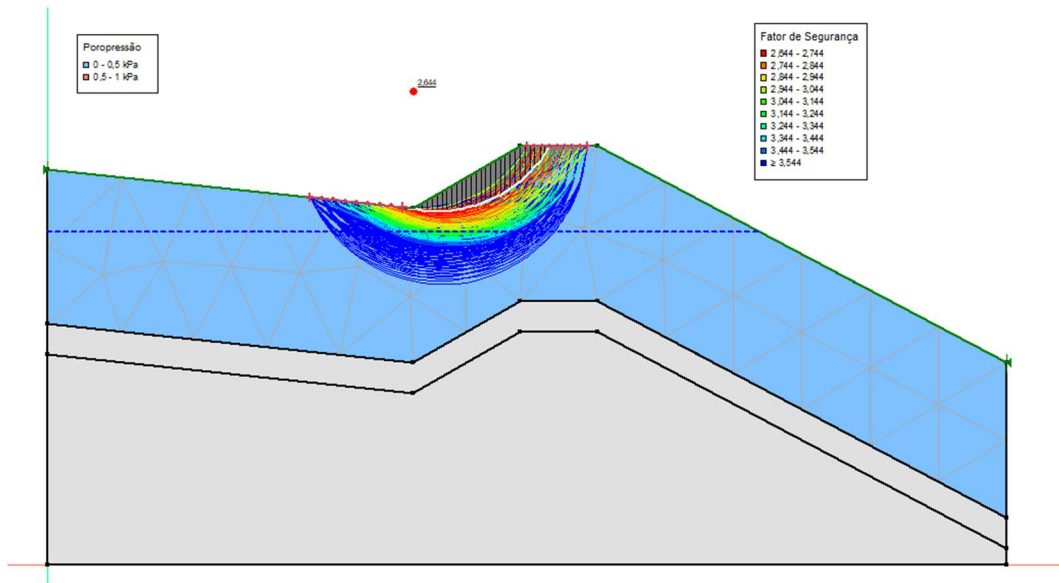
Fonte: Autoral (2025)

Figura 49 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Morgenstern-Price para solução do FS



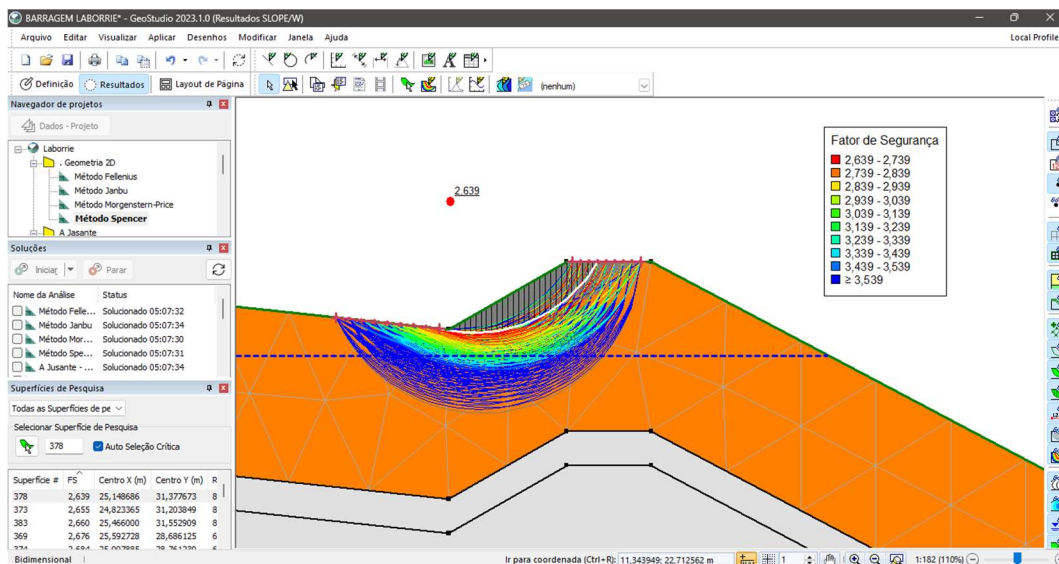
Fonte: Autoral (2025)

Figura 50 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo



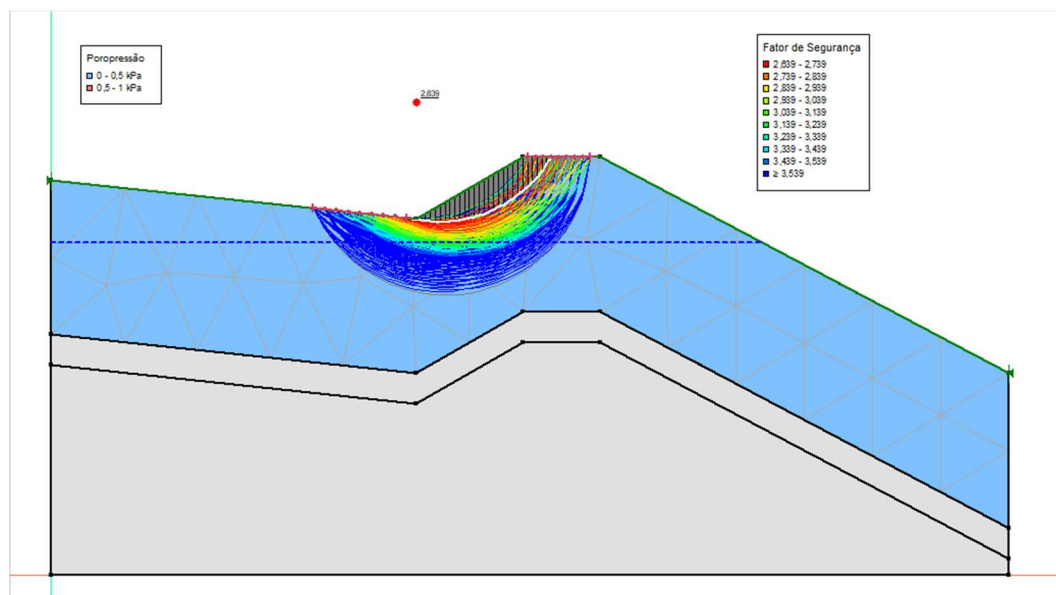
Fonte: Autoral (2025)

Figura 51 – Interface GeoStudio: Análise computacional de estabilidade de talude pelo Método de Spencer para solução do FS



Fonte: Autoral (2025)

Figura 52 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – análise gráfica do comportamento da carga total da água no solo



Fonte: Autoral (2025)

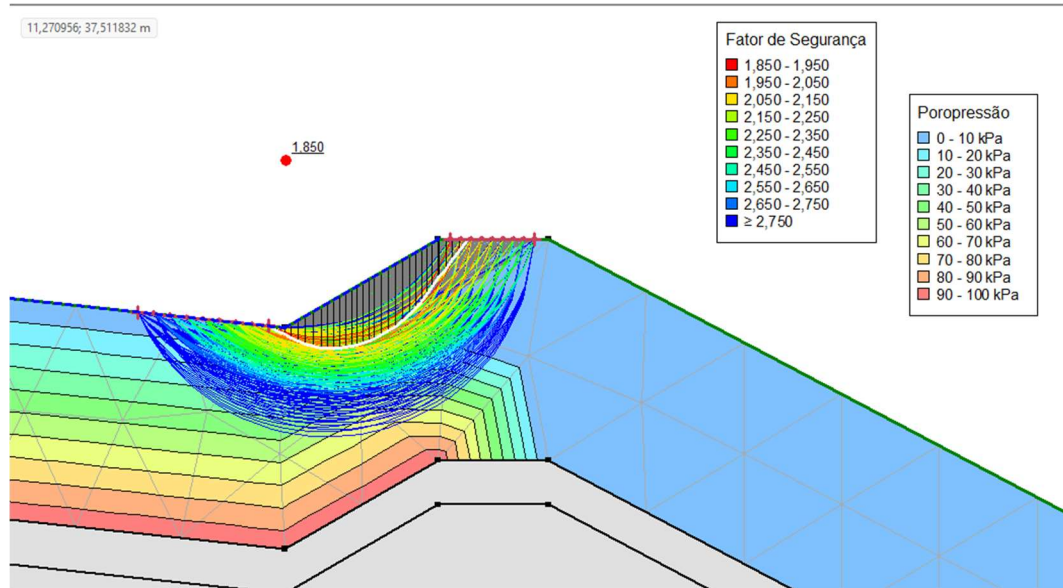
4.5 ANÁLISE DE ESTÁBILIDADE DE TALUDE COM O RESERVATÓRIO CHEIO

Considerando o histórico de cheia sazonal no período de inverno amapaense durante os meses de janeiro até maio, com chuvas mais intensas no mês de abril, foi modificada algumas características das análises anteriores para a possibilidade da análise do talude em condições de tensões críticas.

O nível piezométrico da água no talude atual foi alocado junto ao nível da superfície da barragem, e as condições de solo nos dados do material foram alterados para “Peso Específico Saturado” para então simular a condição de Reservatório cheio.

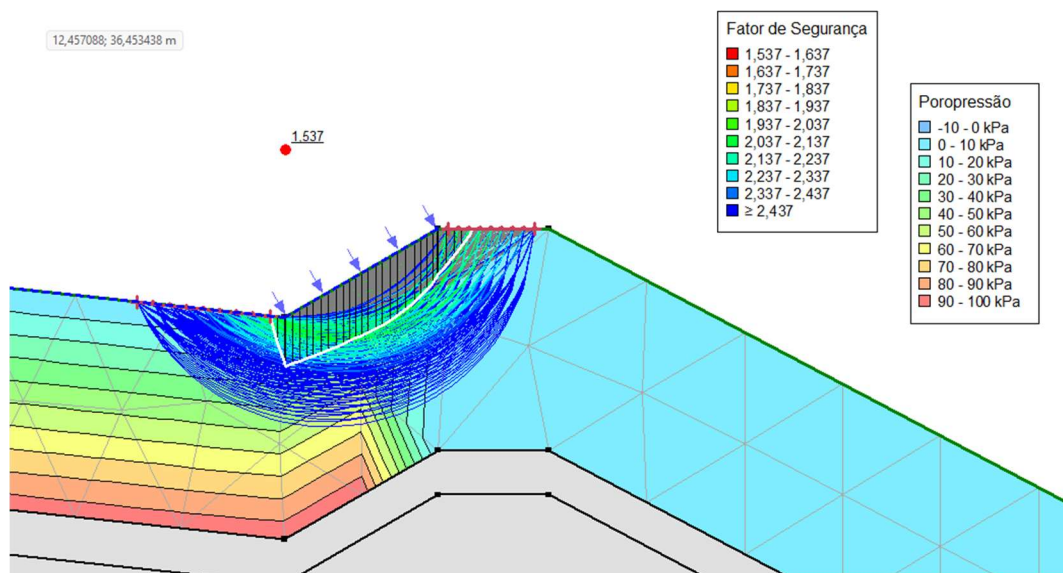
A configuração da análise computacional de cada método para o FS encontrada foram os seguintes:

Figura 53 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – simulação da condição crítica de Reservatório cheio.



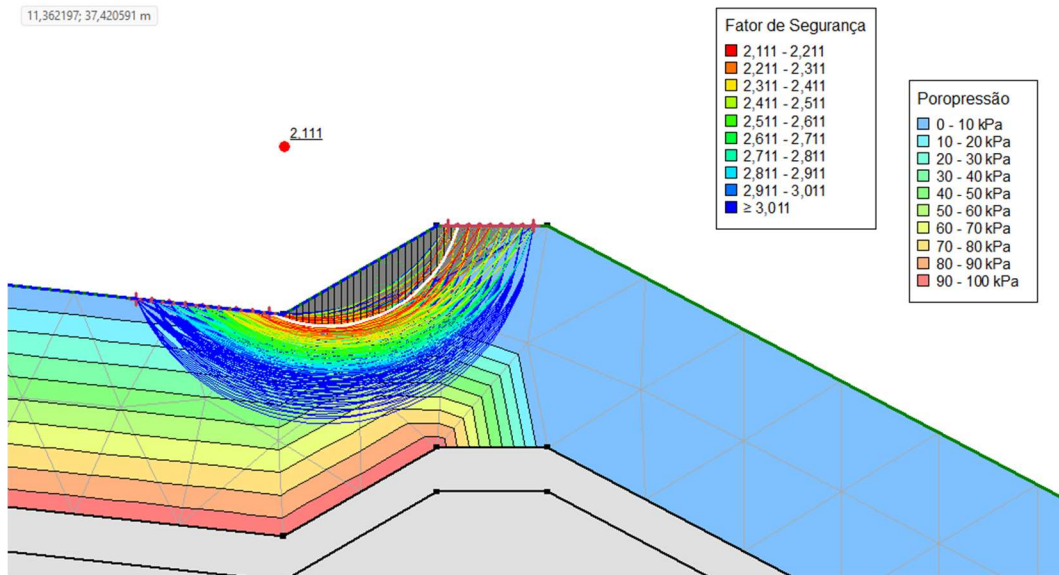
Fonte: Autoral (2025)

Figura 54 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – simulação da condição crítica de Reservatório cheio.



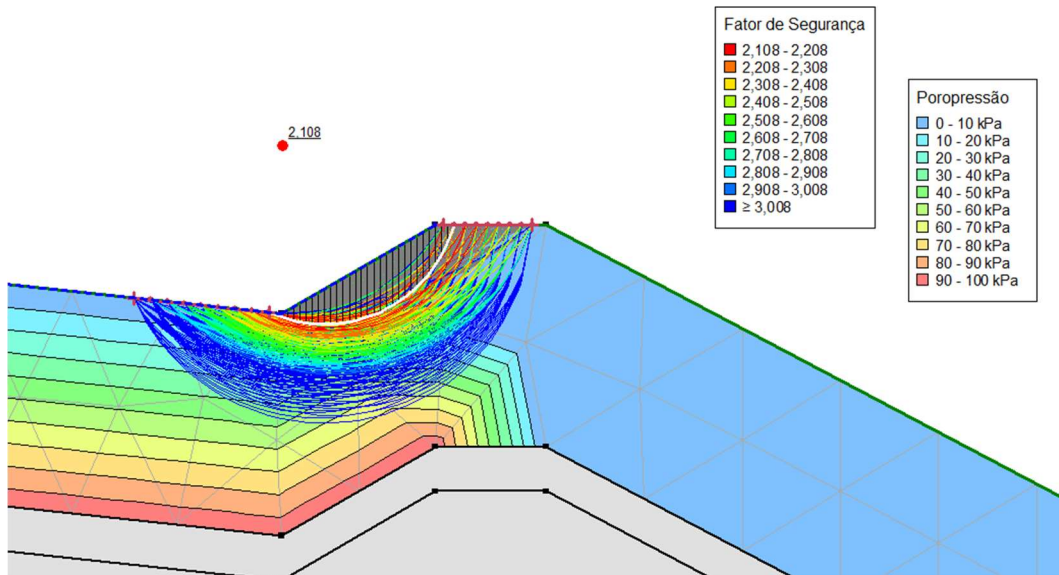
Fonte: Autoral (2025)

Figura 55 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – simulação da condição crítica de Reservatório cheio.



Fonte: Autoral (2025)

Figura 56 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – simulação da condição crítica de Reservatório cheio.



Fonte: Autoral (2025)

4.6 ANÁLISE DE ESTÁBILIDADE COM ALTEAMENTO EM 3 METROS

Conhecendo o histórico de cheia e de galgamento da barragem, soluções de mudanças geométrica são consideradas. Para esse estudo, foi feita a análise da estabilidade a partir da proposta de alteamento, respeitando a

NBR 13028 (ABNT, 2017) que recomenda a altura para alteamento em 3m na camada superior conforme a necessidade da barragem.

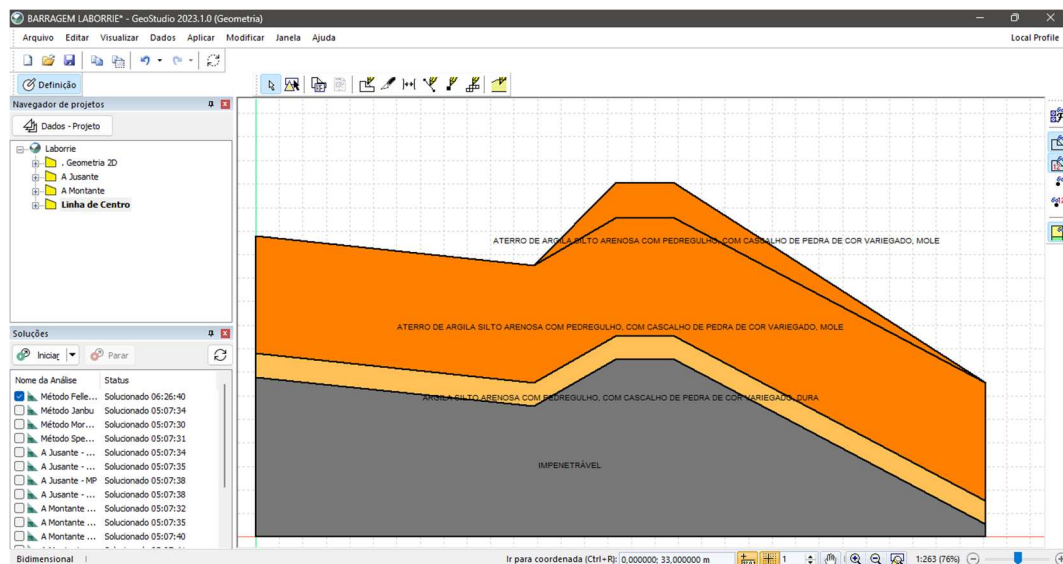
Foi considerado o material de aterro semelhante ao que compõe a camada 01, pois mesmo sem a indicação exata, sabe-se que o material de construção foi emprestado de áreas próximas a barragem e, por ser um material conhecido, os resultados da serão mais confiáveis.

Para análise, a modelagem do alteamento foi reproduzida nos três métodos conhecidos: linha de centro, a jusante e a montante.

Será considerado três níveis de água (NA): um de acordo com o encontrado na investigação geotécnica por sondagem (5,42 metros abaixo da crista atual), um na altura da crista atual da barragem, e um com a borda livre de 1,0m (2,0 metros acima da crista atual) para supor a ocorrência de uma nova máxima cheia na barragem.

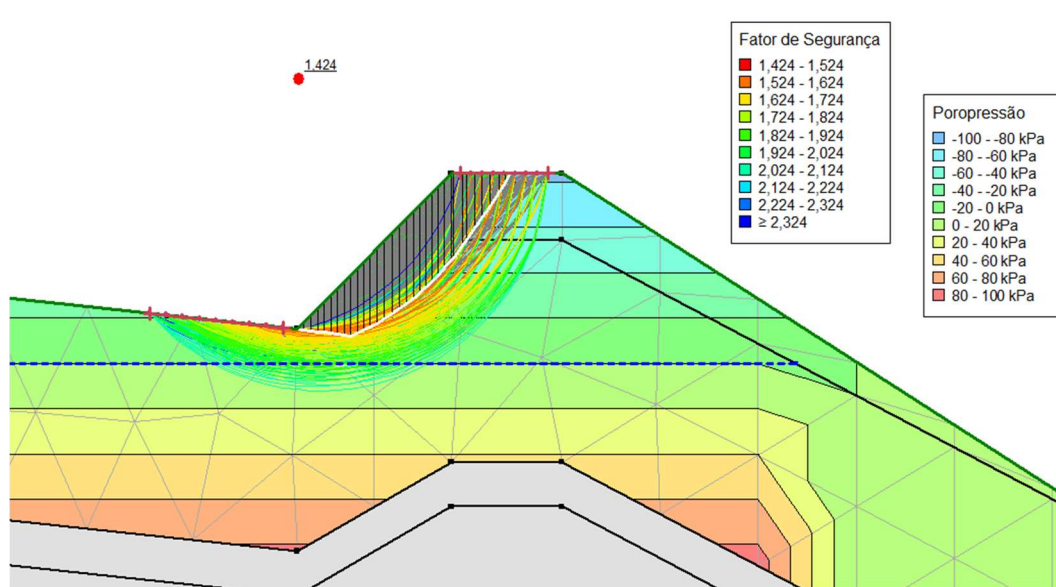
a) *Linha de centro*: As figuras abaixo contêm a nova geometria do perfil do talude estudado com o alteamento em 3,0 metros e as análises a partir dos métodos até então estudados

Figura 57 – Interface GeoStudio, com a geometria do perfil da barragem Laborrie alteada por linha de centro



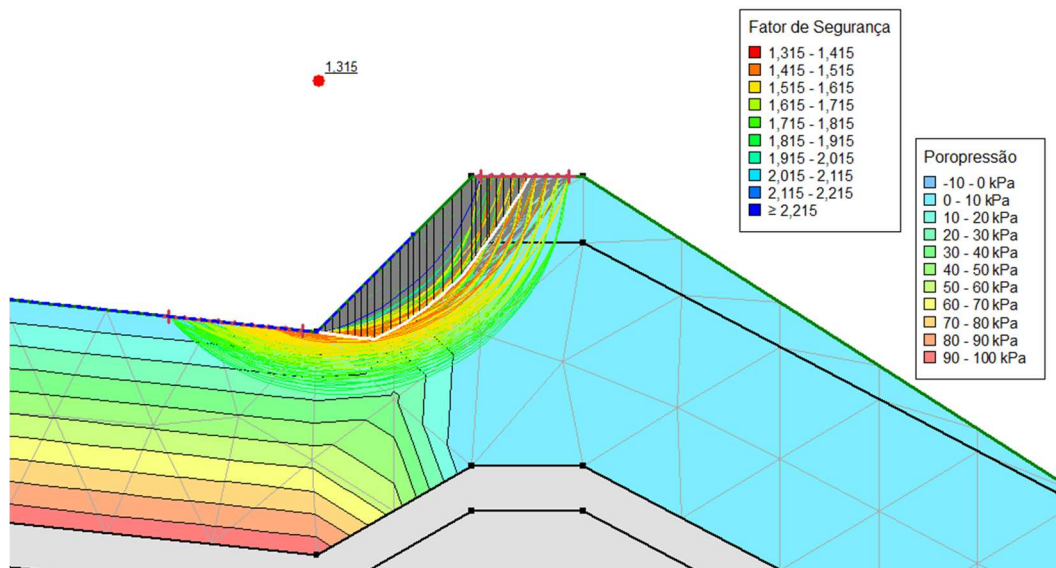
Fonte: Autoral (2025)

Figura 58 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT



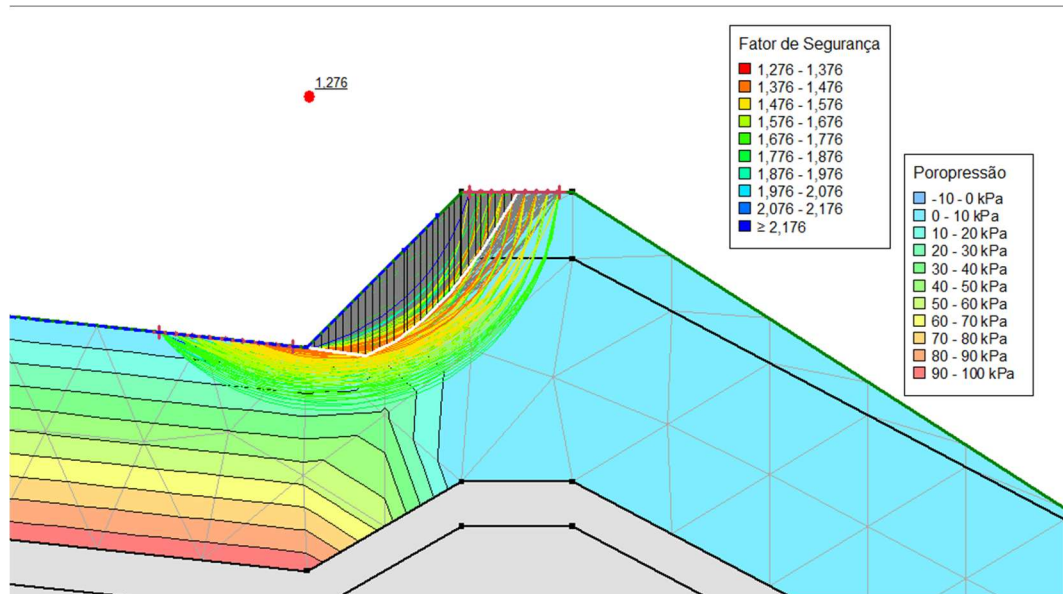
Fonte: Autoral (2025)

Figura 59 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA na altura da crista atual



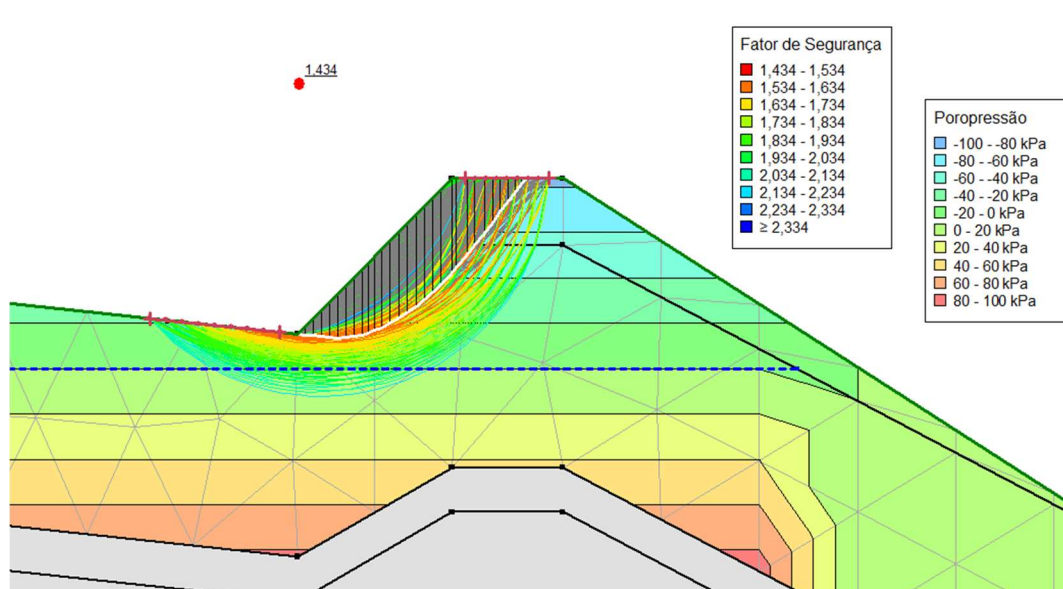
Fonte: Autoral (2025)

Figura 60 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



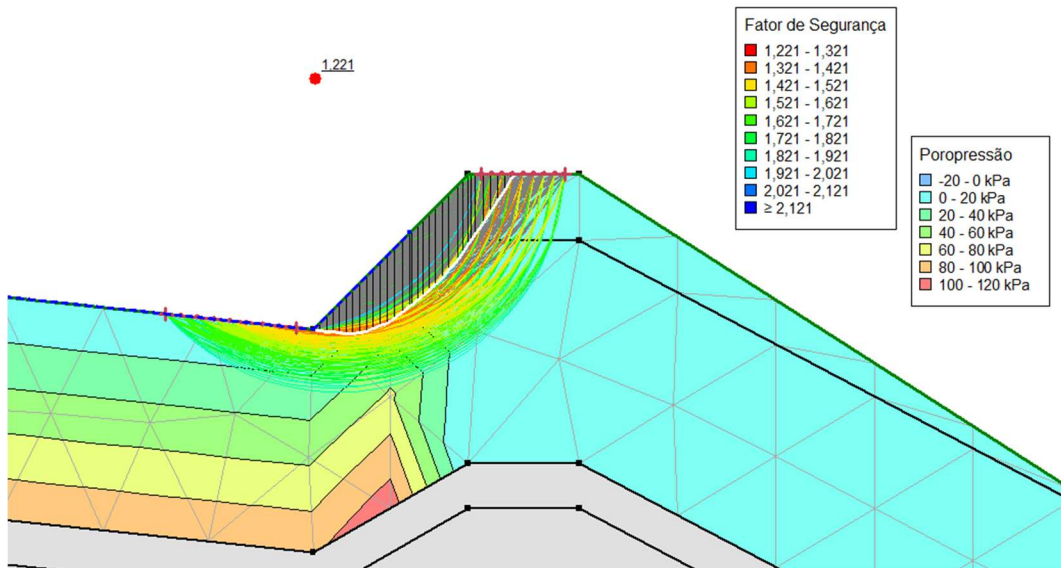
Fonte: Autoral (2025)

Figura 61 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT



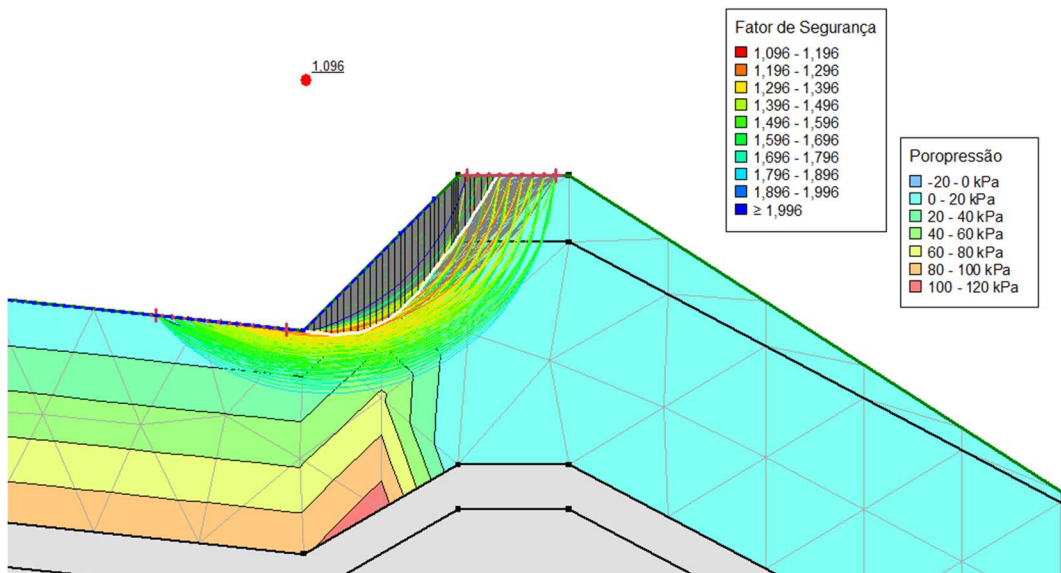
Fonte: Autoral (2025)

Figura 62 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA na altura da crista
 atual



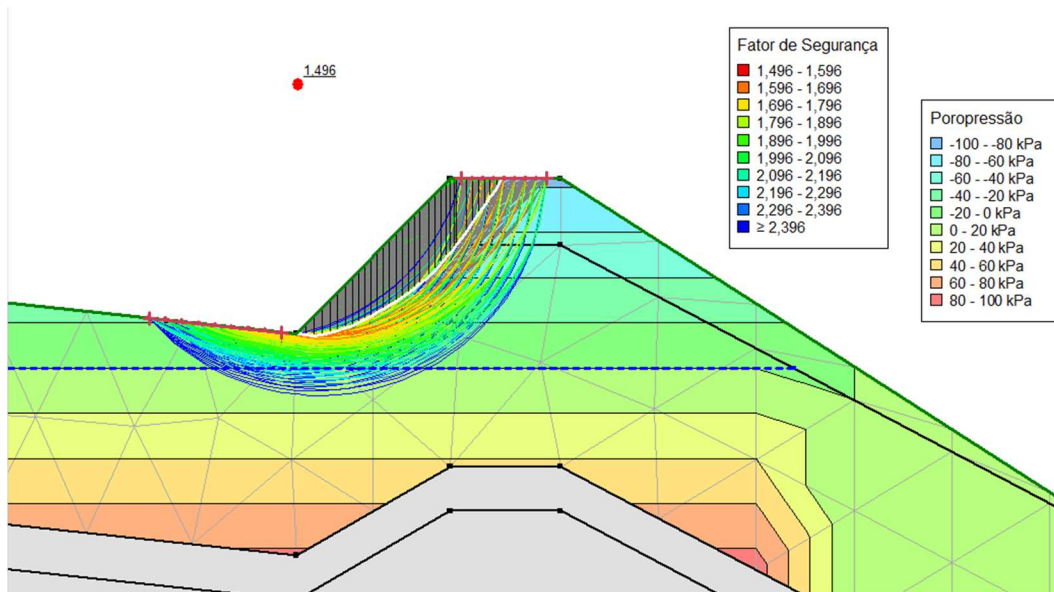
Fonte: Autoral (2025)

Figura 63 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA no limite da borda
 livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.



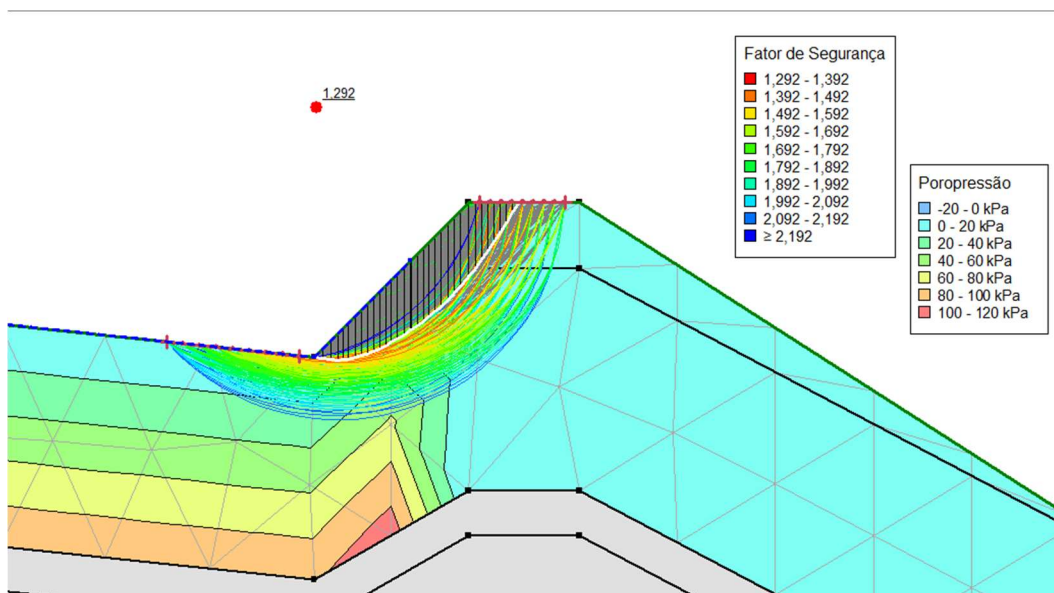
Fonte: Autoral (2025)

Figura 64 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT.



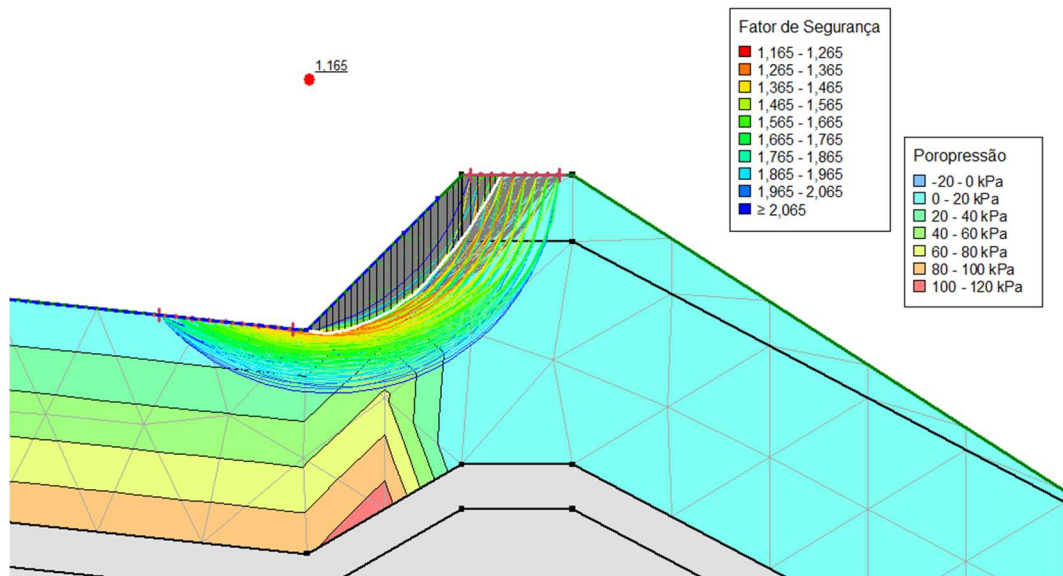
Fonte: Autorial (2025)

Figura 65 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA na altura da crista atual.



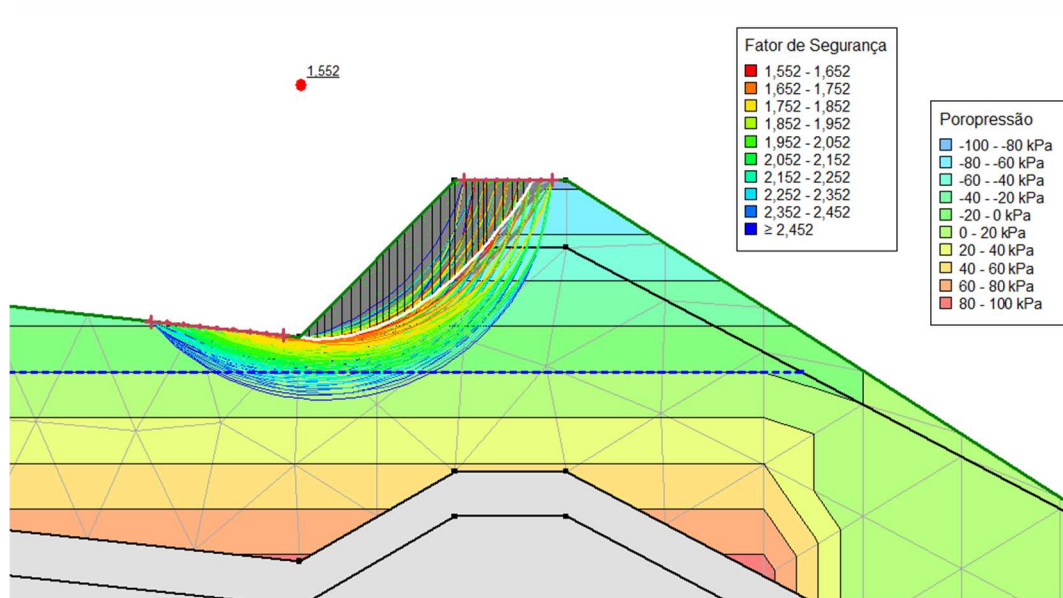
Fonte: Autorial (2025)

Figura 66 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.



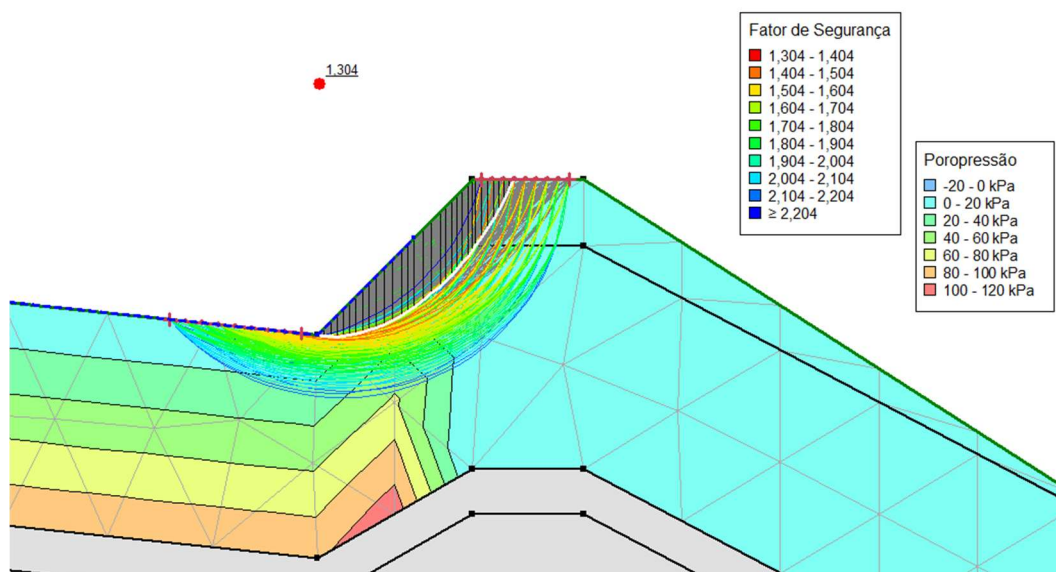
Fonte: Autoral (2025)

Figura 67 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA de acordo com o SPT.



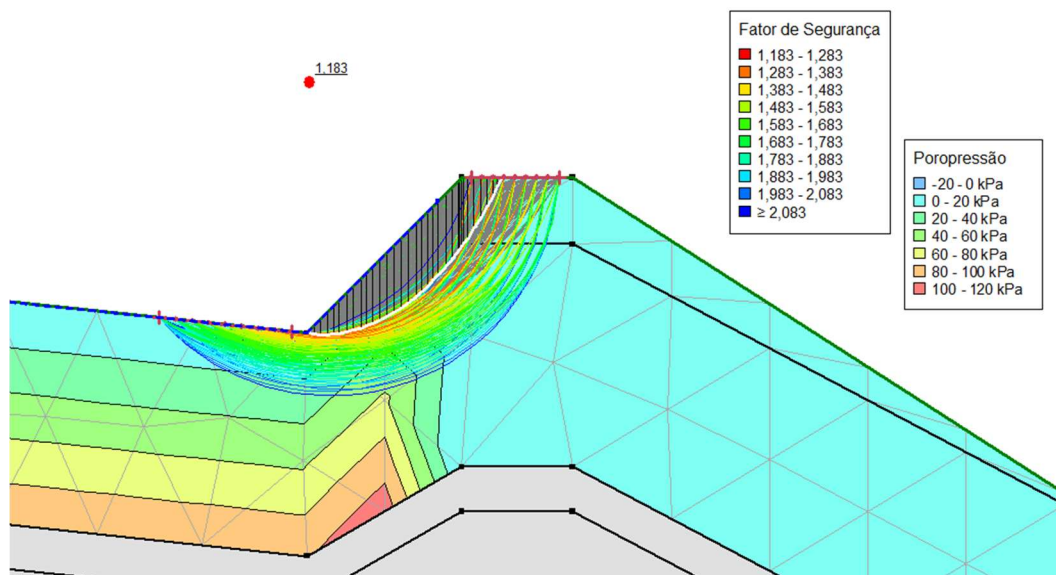
Fonte: Autoral (2025)

Figura 68 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA na altura da crista atual.



Fonte: Autoral (2025)

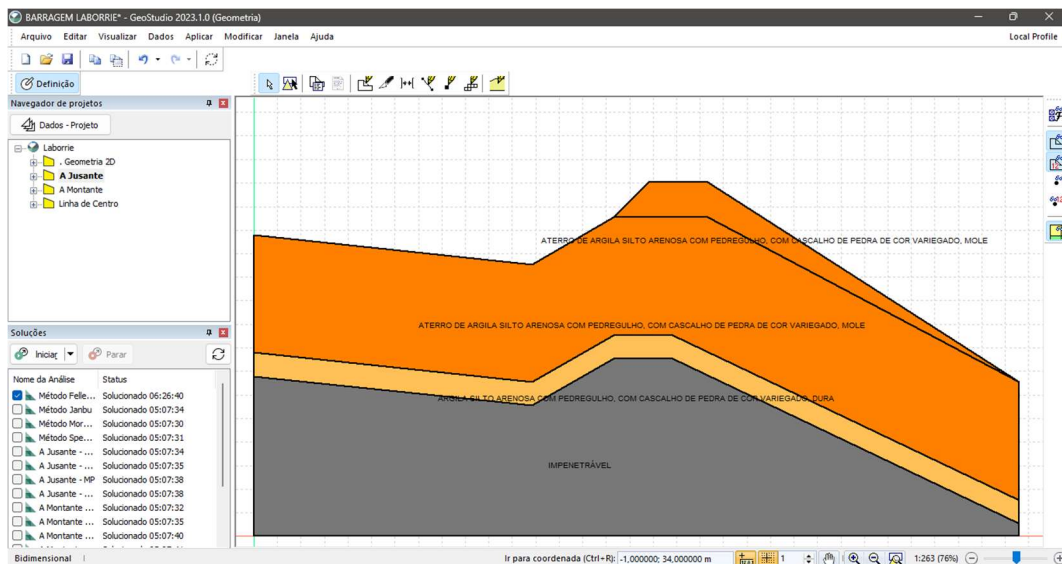
Figura 69 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a linha de centro, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.



Fonte: Autoral (2025)

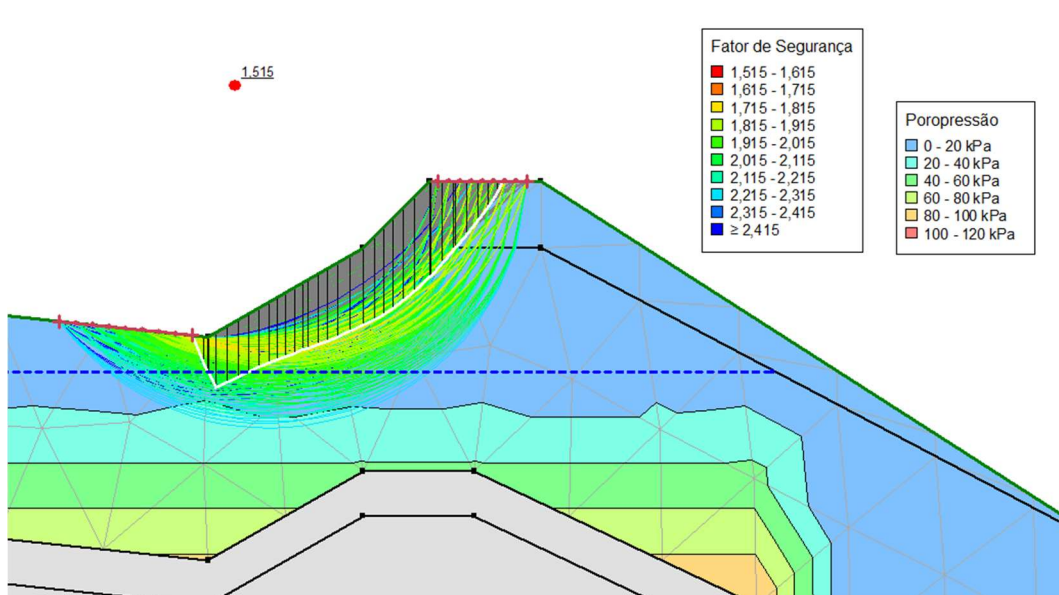
b) *A Jusante*: As figuras abaixo contêm a nova geometria do perfil do talude estudado com o alteamento em 3,0 metros e as análises a partir dos métodos até então estudados.

Figura 70 – Interface GeoStudio, com a geometria do perfil da barragem Laborrie alteada a jusante, NA de acordo com o SPT



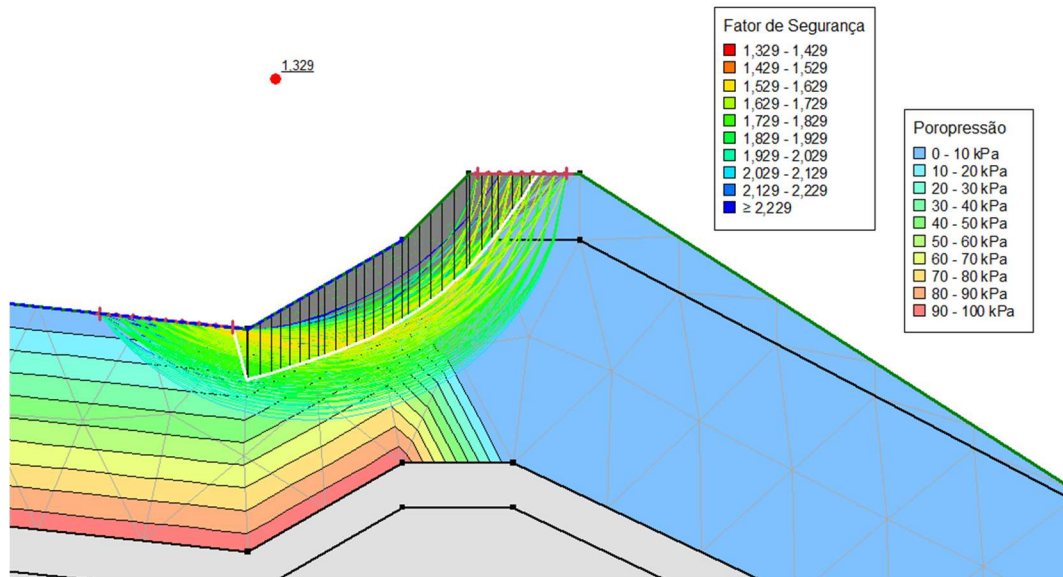
Fonte: Autoral (2025)

Figura 71 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT



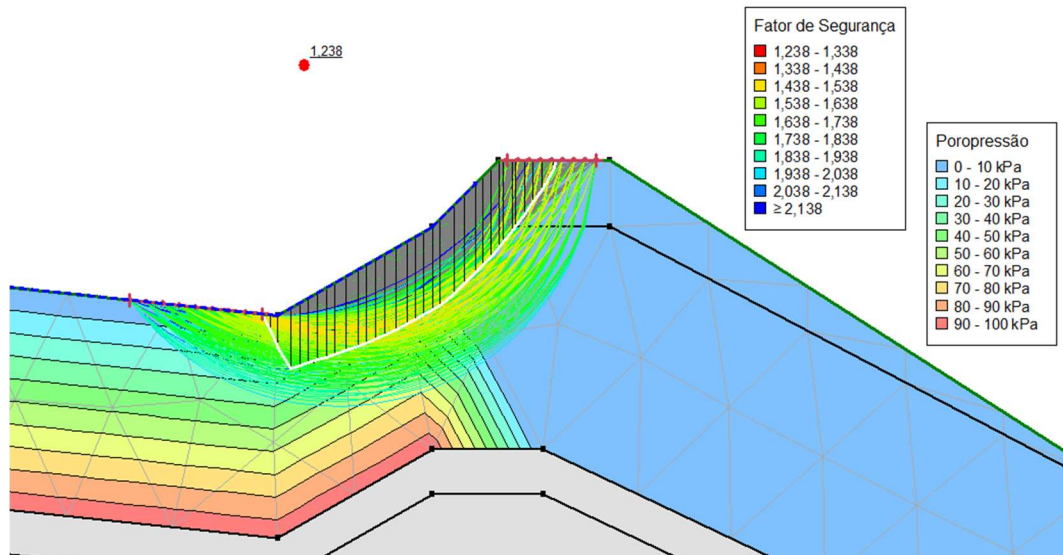
Fonte: Autoral (2025)

Figura 72 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual



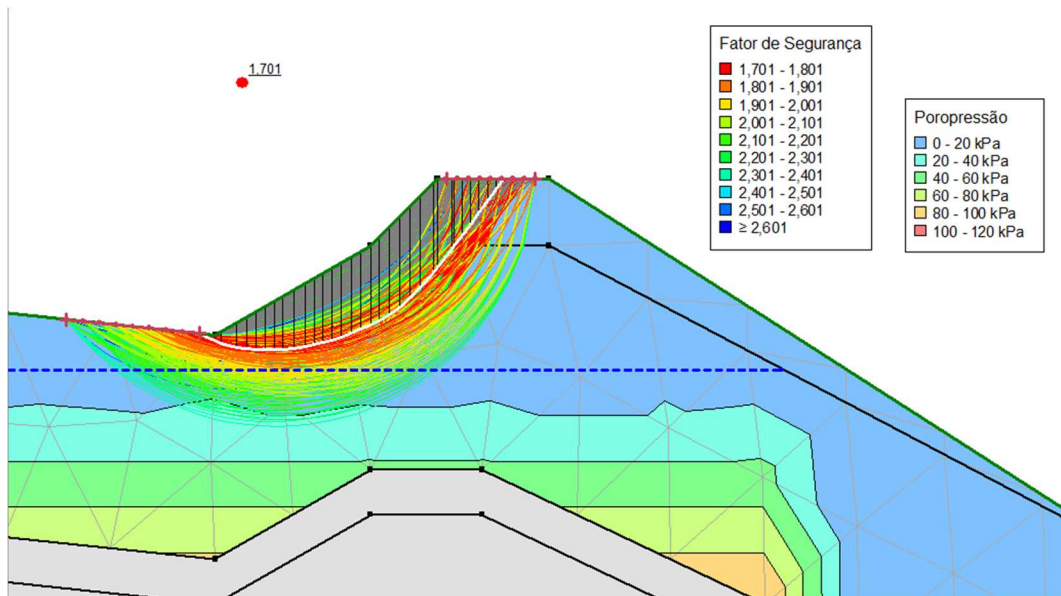
Fonte: Autoral (2025)

Figura 73 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



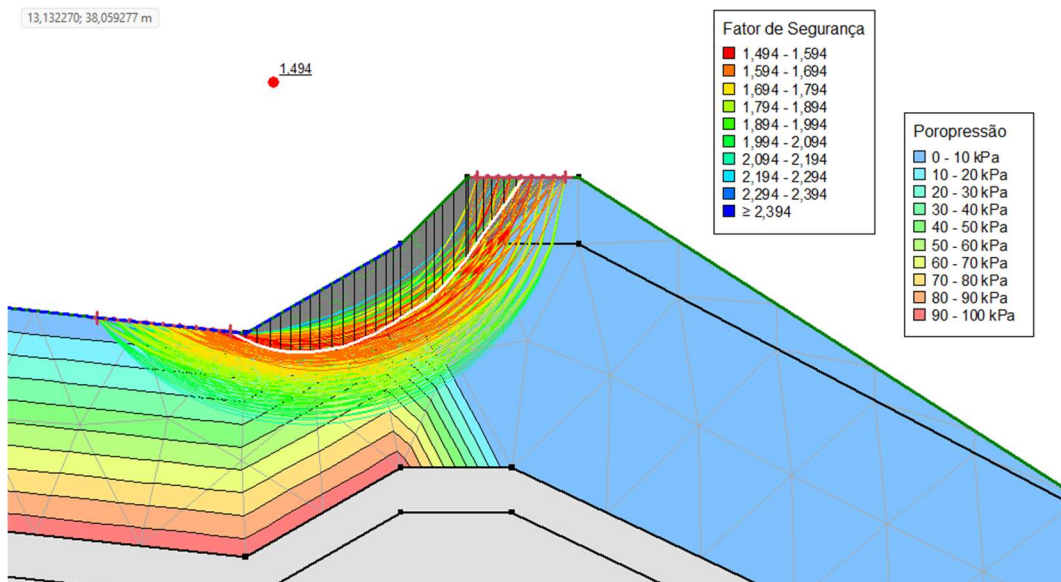
Fonte: Autoral (2025)

Figura 74 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT



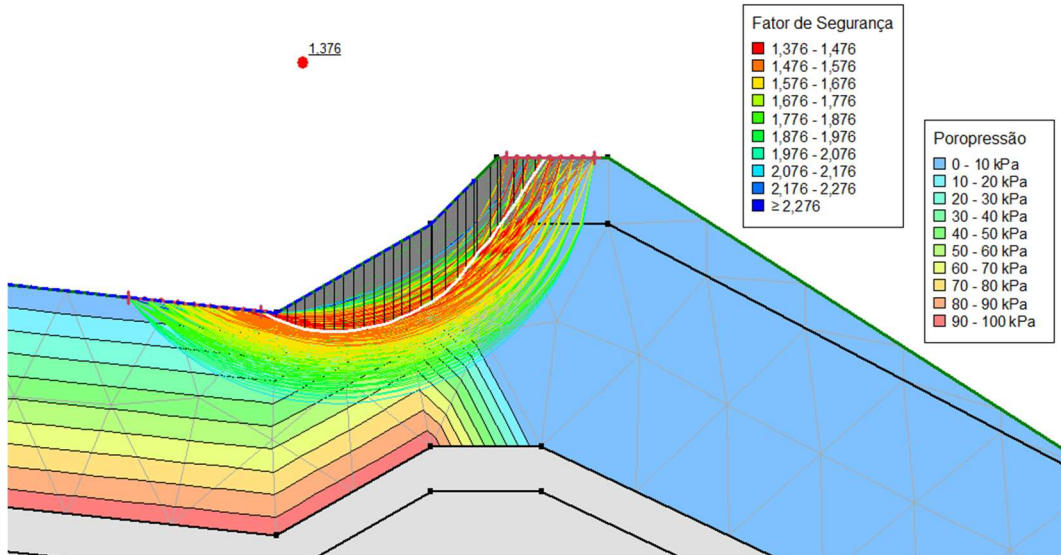
Fonte: Autoral (2025)

Figura 75 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual



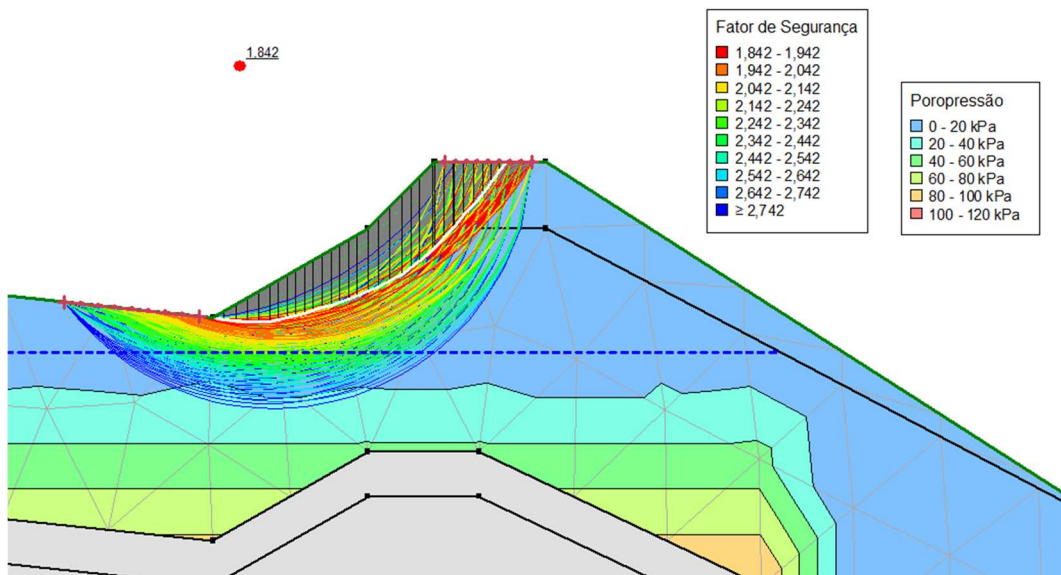
Fonte: Autoral (2025)

Figura 76 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



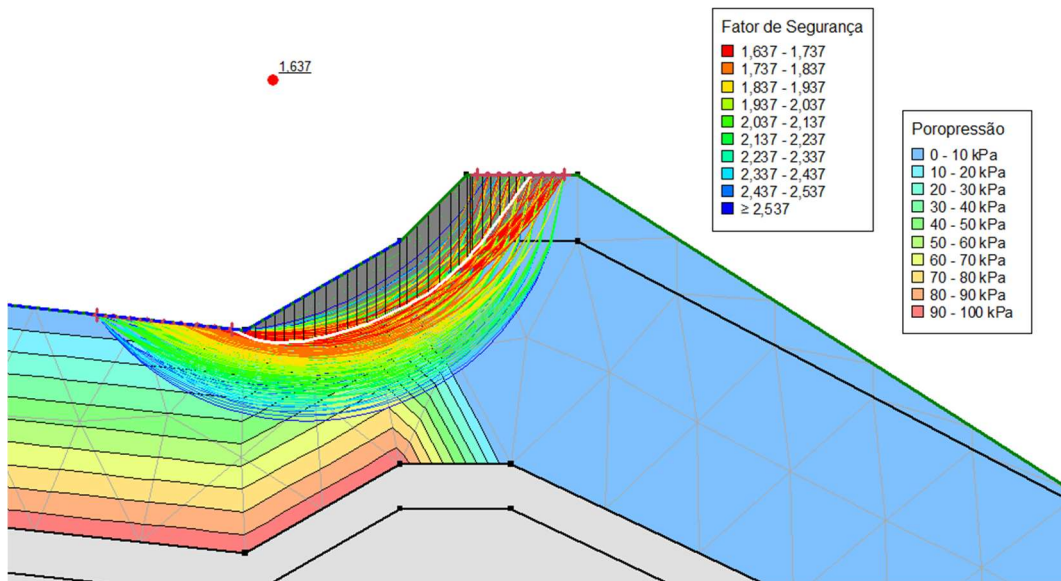
Fonte: Autoral (2025)

Figura 77 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT



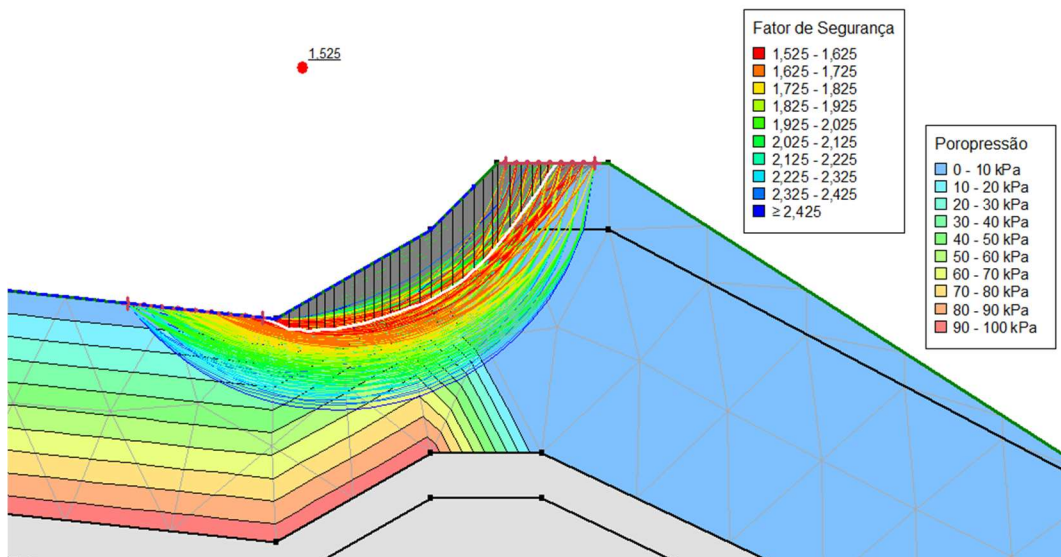
Fonte: Autoral (2025)

Figura 78 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price– talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual



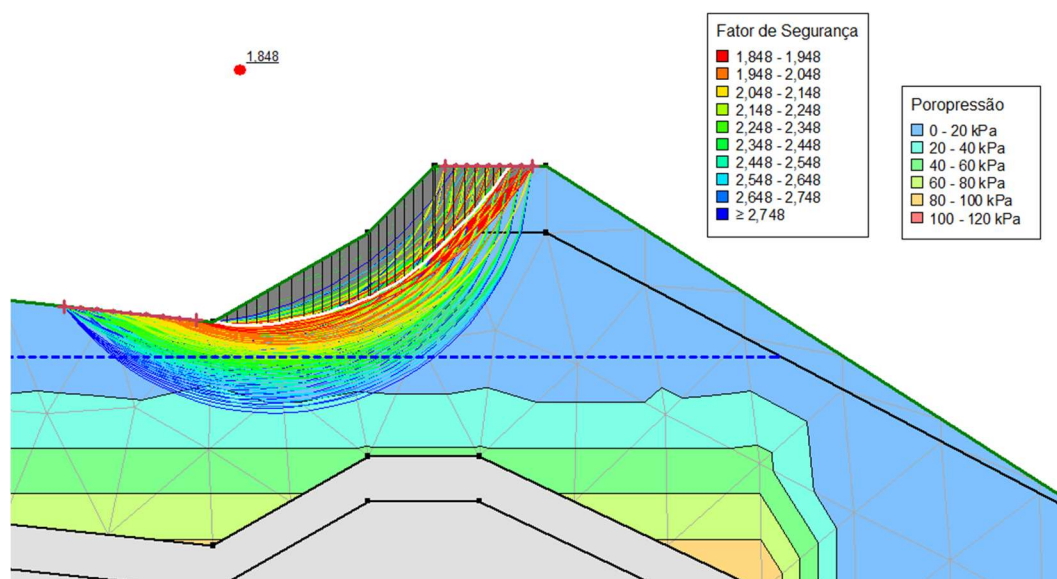
Fonte: Autoral (2025)

Figura 79 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price– talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



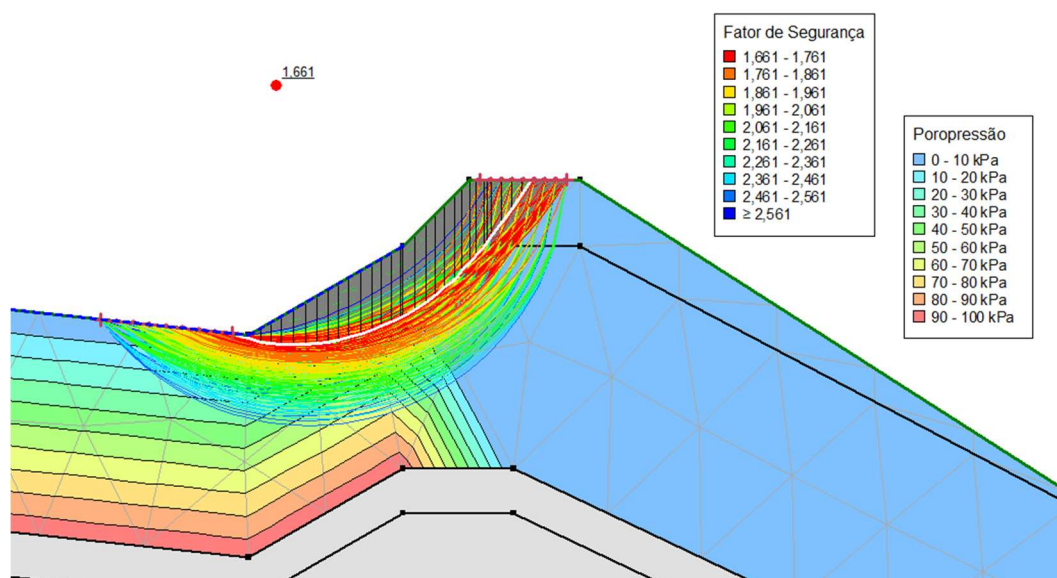
Fonte: Autoral (2025)

Figura 80 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a jusante, NA de acordo com o SPT



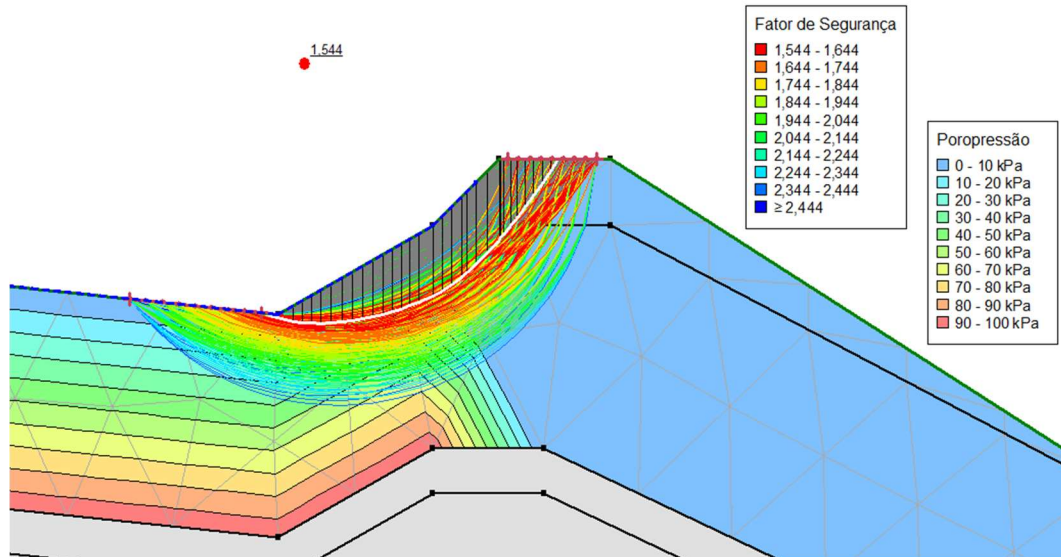
Fonte: Autorial (2025)

Figura 81 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a jusante, NA na altura da crista atual



Fonte: Autorial (2025)

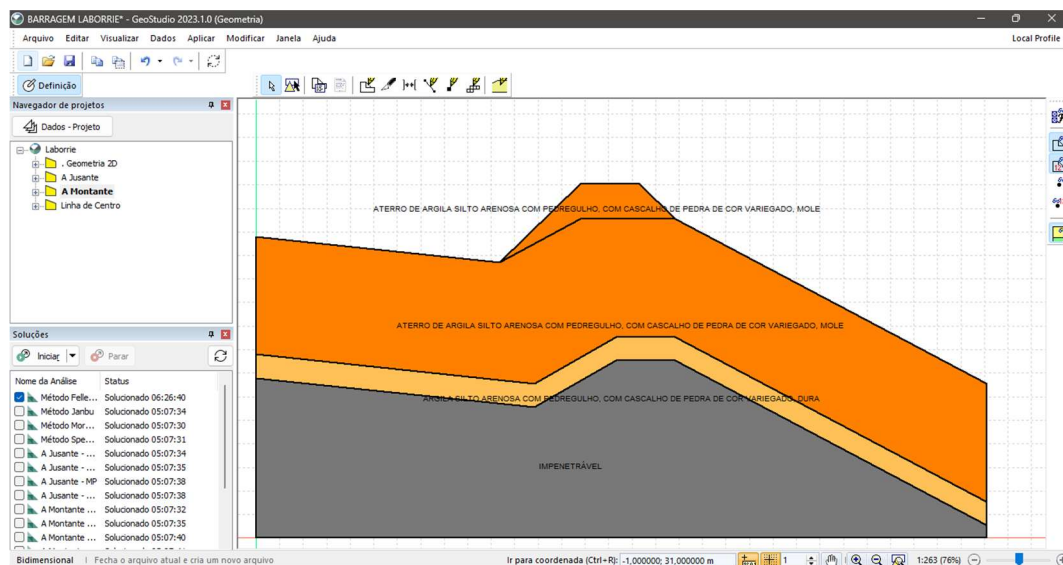
Figura 82 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a jusante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



Fonte: Autoral (2025)

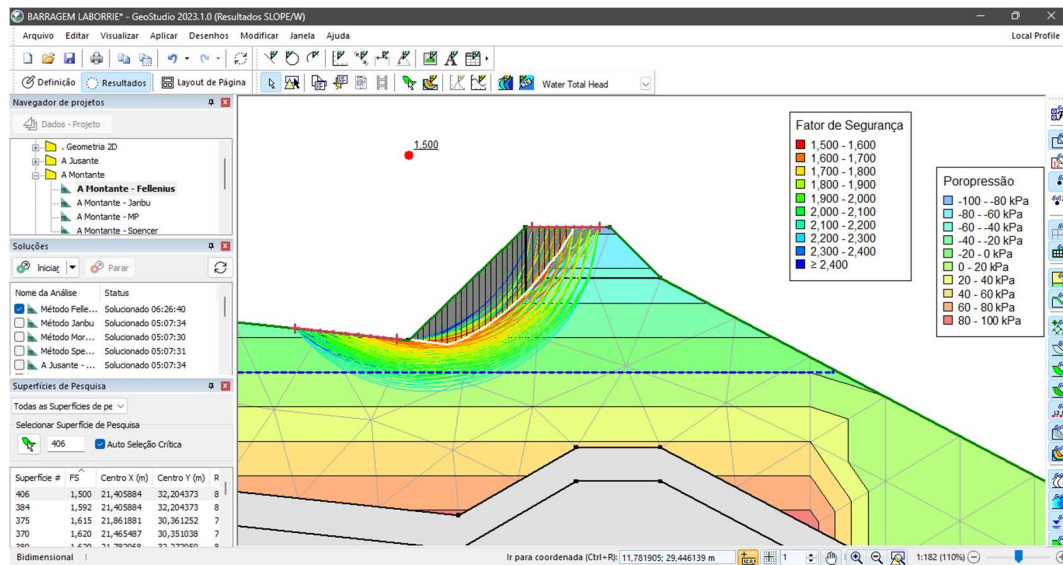
c) *A Montante:* As figuras abaixo contêm a nova geometria do perfil do talude estudado com o alteamento em 3,0 metros e as análises a partir dos métodos até então estudados.

Figura 83 – Interface GeoStudio, com a geometria do perfil da barragem Laborrie alteada a Montante



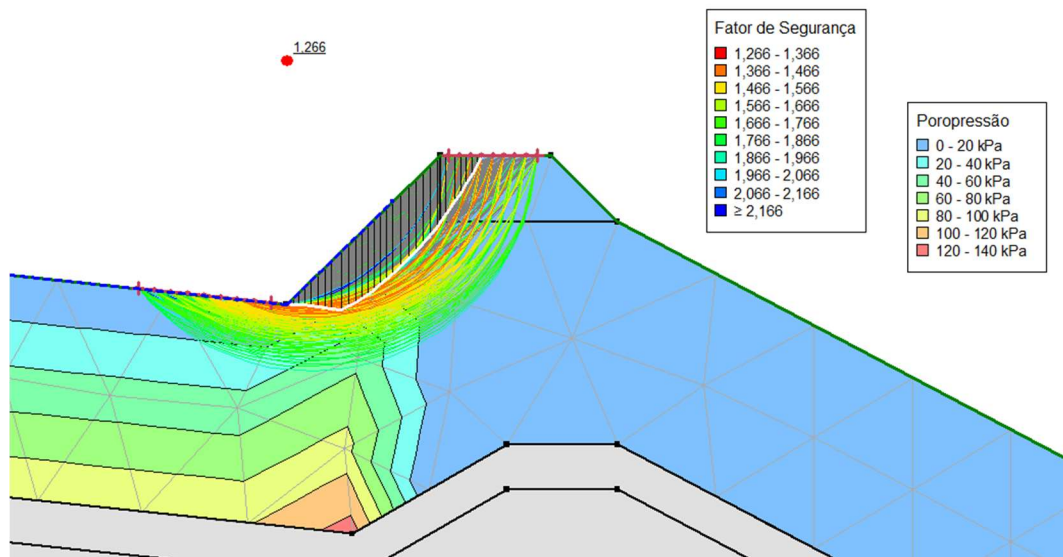
Fonte: Autoral (2025)

Figura 84 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT



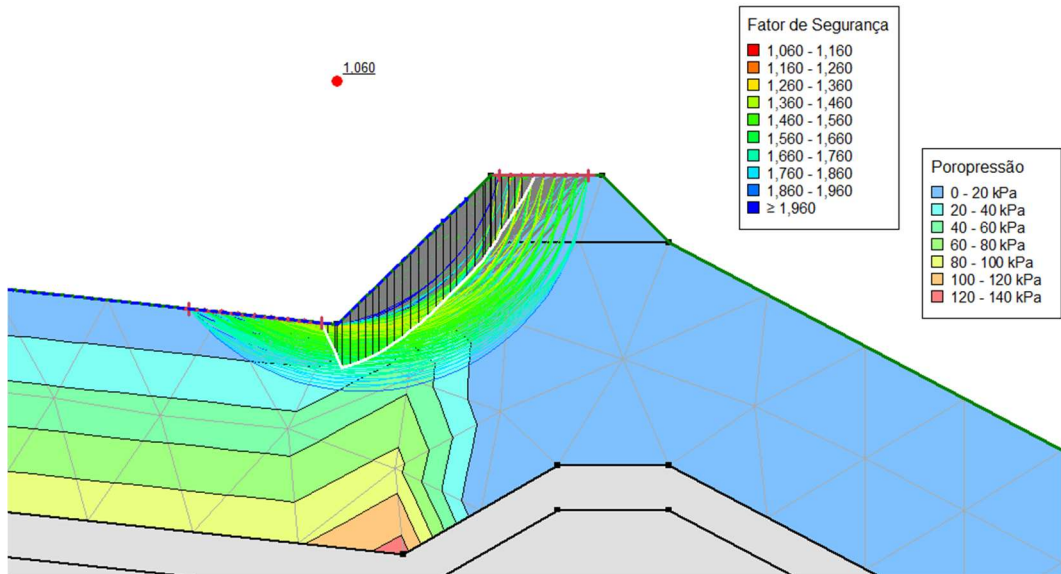
Fonte: Autoral (2025)

Figura 85 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual



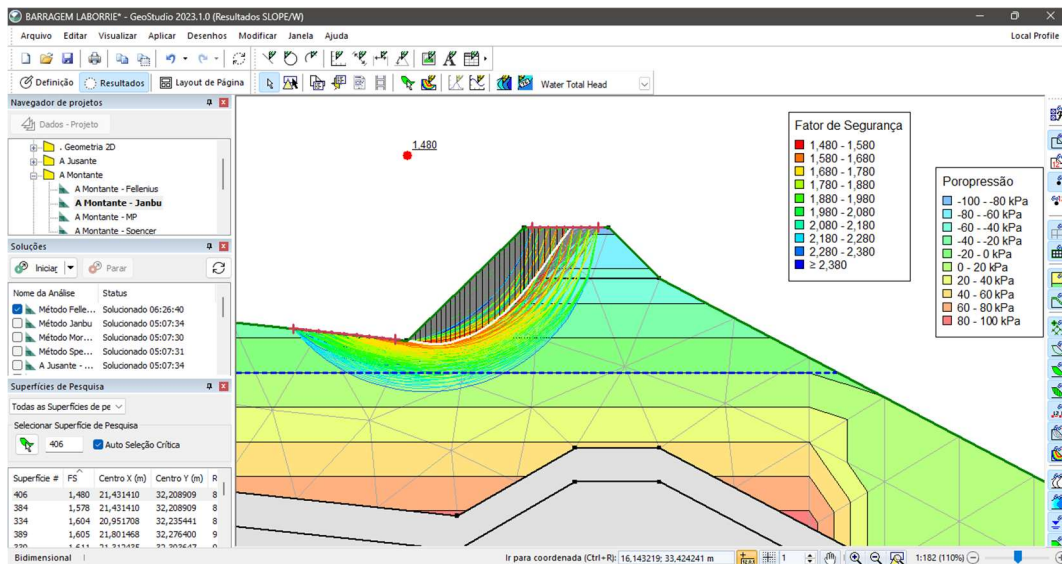
Fonte: Autoral (2025)

Figura 86 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Fellenius – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



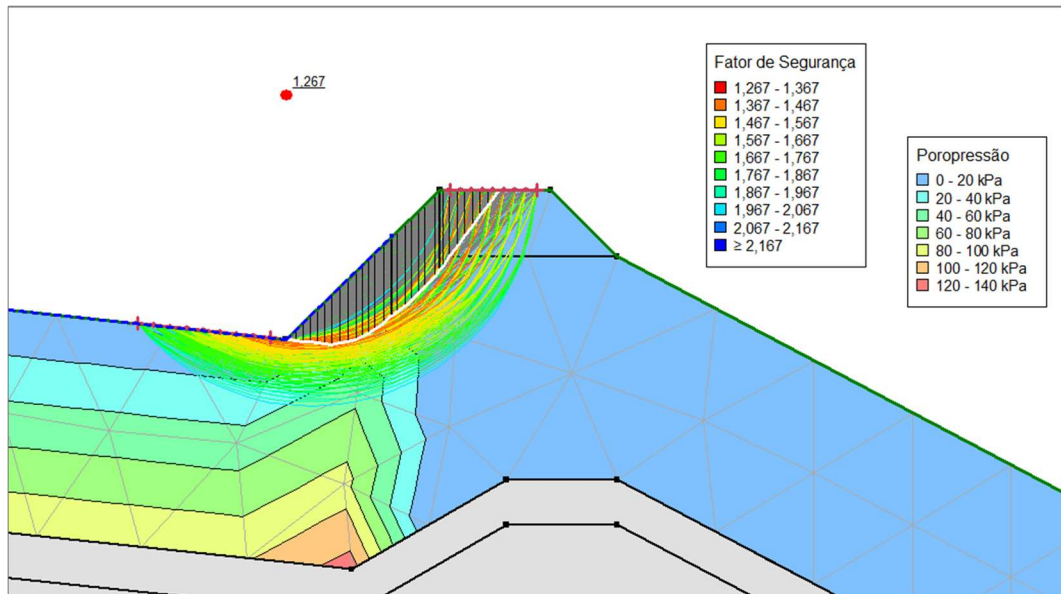
Fonte: Autoral (2025)

Figura 87 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT



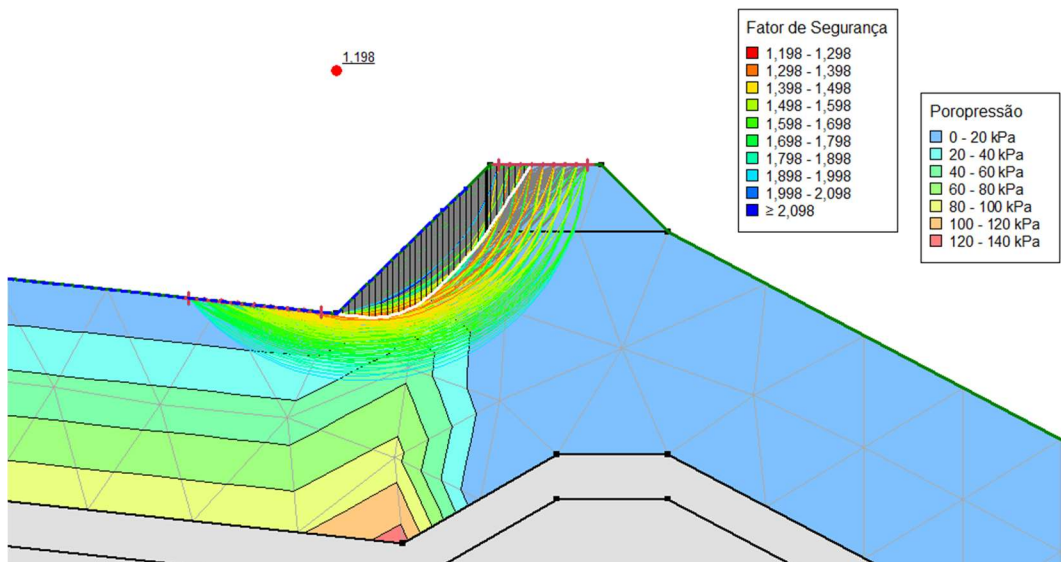
Fonte: Autoral (2025)

Figura 88 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual



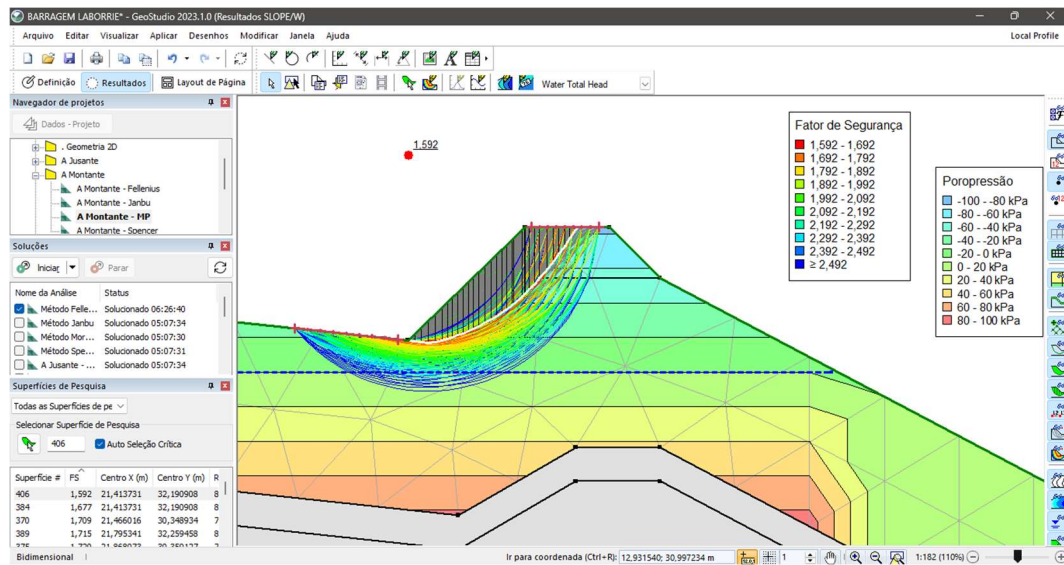
Fonte: Autoral (2025)

Figura 89 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Janbu
 – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre
 de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



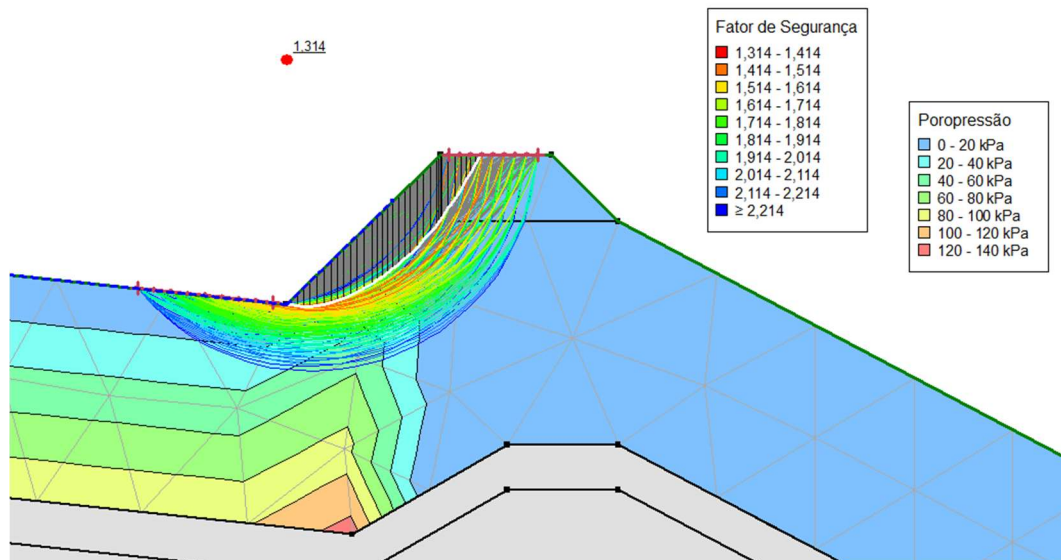
Fonte: Autoral (2025)

Figura 90 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT



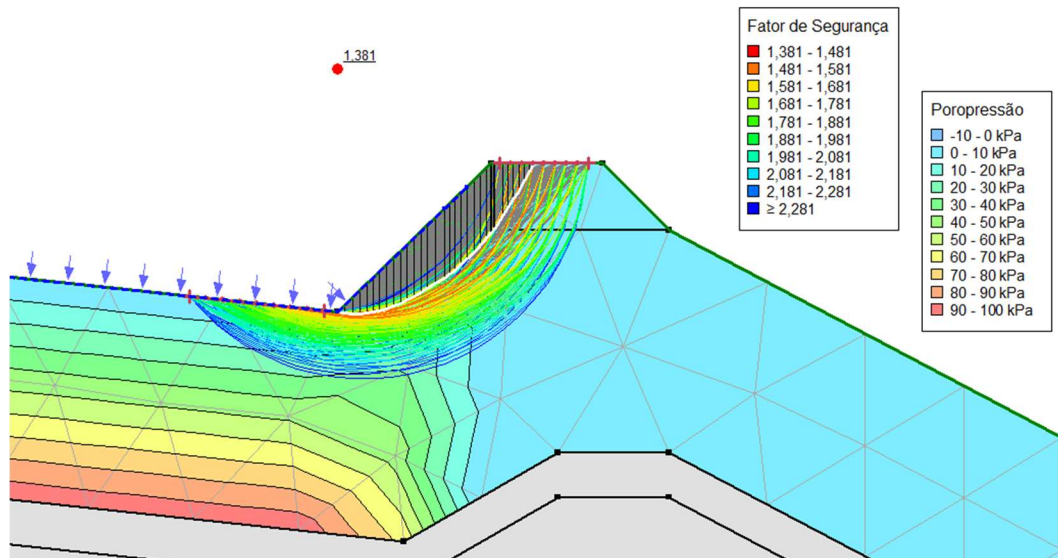
Fonte: Autoral (2025)

Figura 91 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual



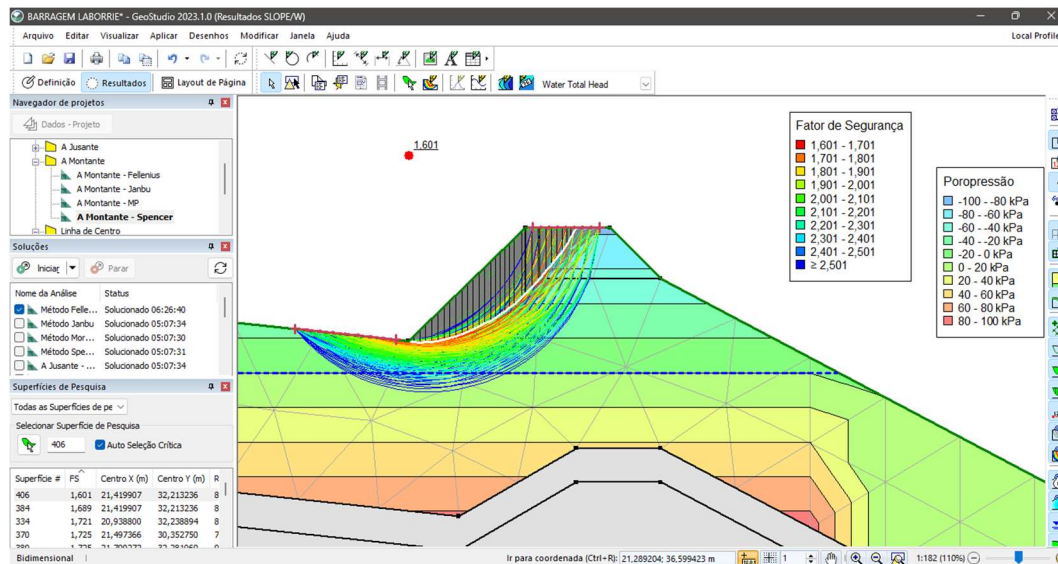
Fonte: Autoral (2025)

Figura 92 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Morgenstern-Price – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista



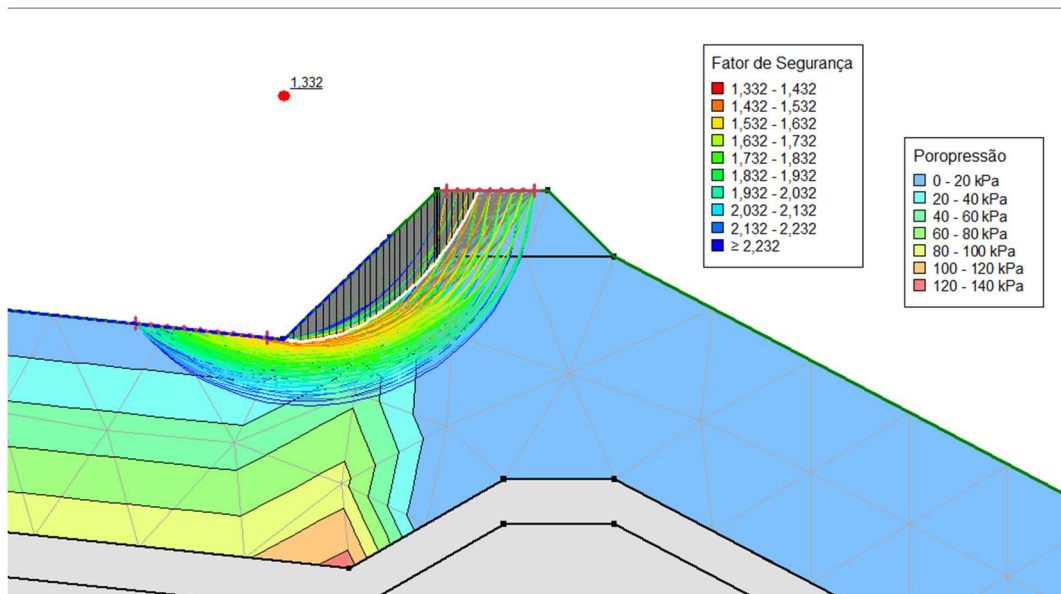
Fonte: Autoral (2025)

Figura 93 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a montante, NA de acordo com o SPT



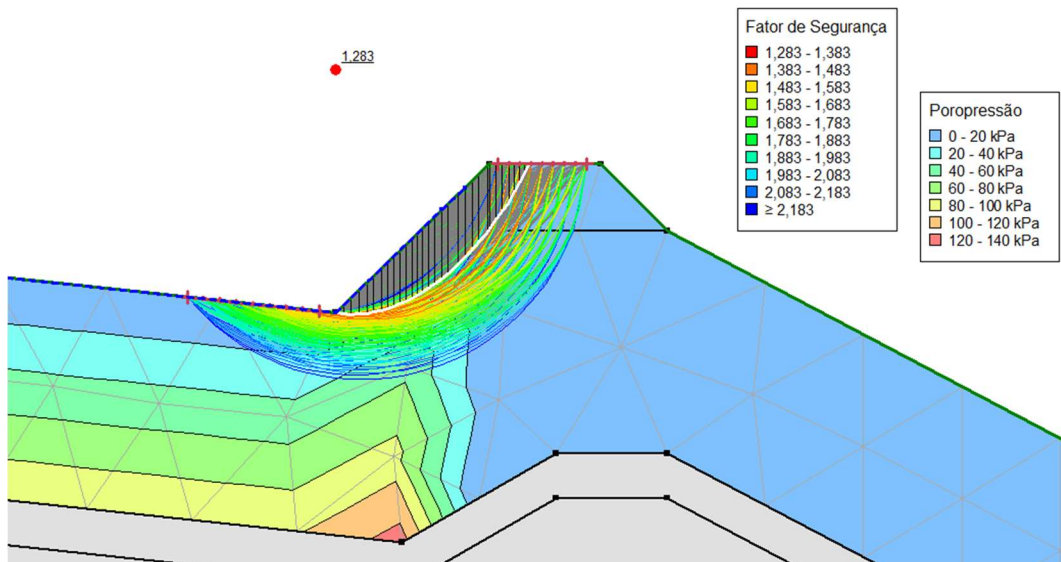
Fonte: Autoral (2025)

Figura 94 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a montante, NA na altura da crista atual.



Fonte: Autoral (2025)

Figura 95 – Análise computacional de estabilidade de talude: Método de Spencer – talude com proposta de alteamento a montante, NA no limite da borda livre de 1,0 metro abaixo da nova altura da crista.



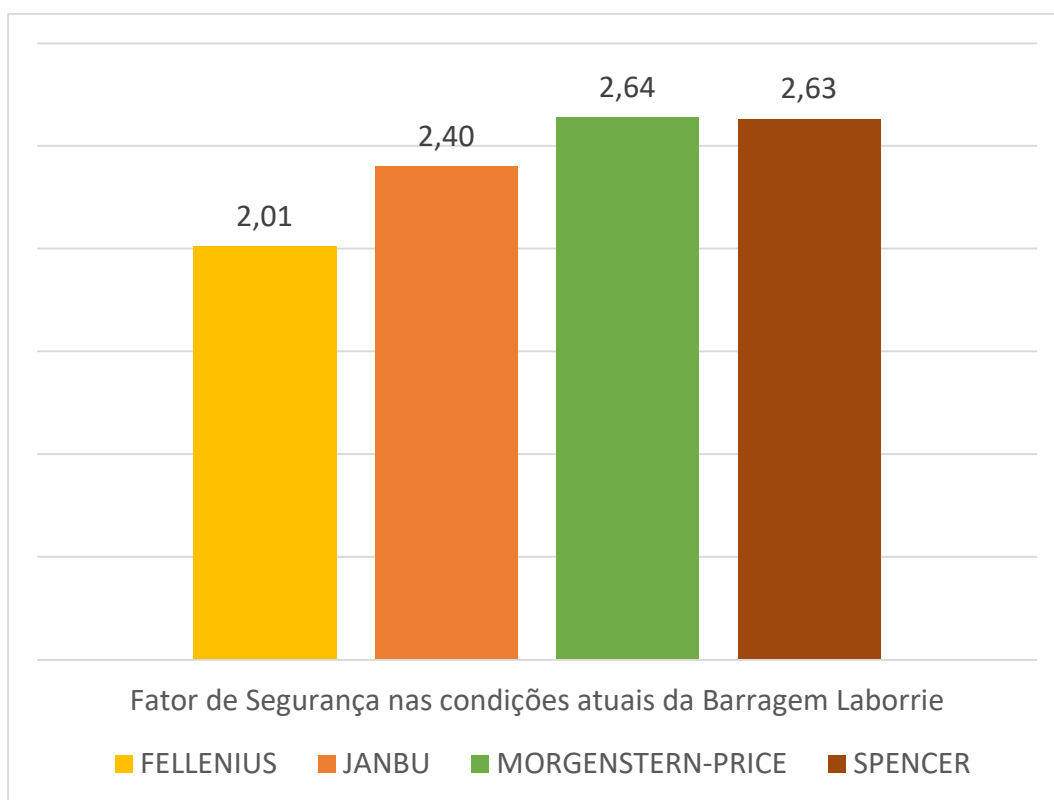
Fonte: Autoral (2025)

5 DISCUSSÃO

Os resultados apresentados através da interação realizada no software para análise computacional serão comparados para a classificação dos índices de acordo com as diferenças entre os métodos.

Nas condições atuais, comprovou-se a estabilidade do talude por todos os métodos avaliados. Dos métodos mais conservadores devido as suas considerações de cálculo, o método de Fellenius foi o que apresentou os menores resultados em todas as interações. Os valores para Morgenstern-Price e Spencer, foram próximos um do outro enquanto o FS para o método de Janbu se aproximou mais destes do que em relação ao primeiro.

Gráfico 5 – Resultado da análise computacional de taludes nas condições atuais para todos os métodos



Fonte: Autoral (2025)

Considerando a NBR 13.028 (ABNT, 2017) o valor de norma estabelecido como parâmetro do índice de fator de segurança para um “talude à jusante operando com rede de fluxo em condição normal”, é de 1,5. Os resultados obtidos na análise da barragem Laborrie, de acordo com as

condições atuais, já apresentam valores satisfatórios de estabilidade (Gráfico 5) para todos os métodos propostos.

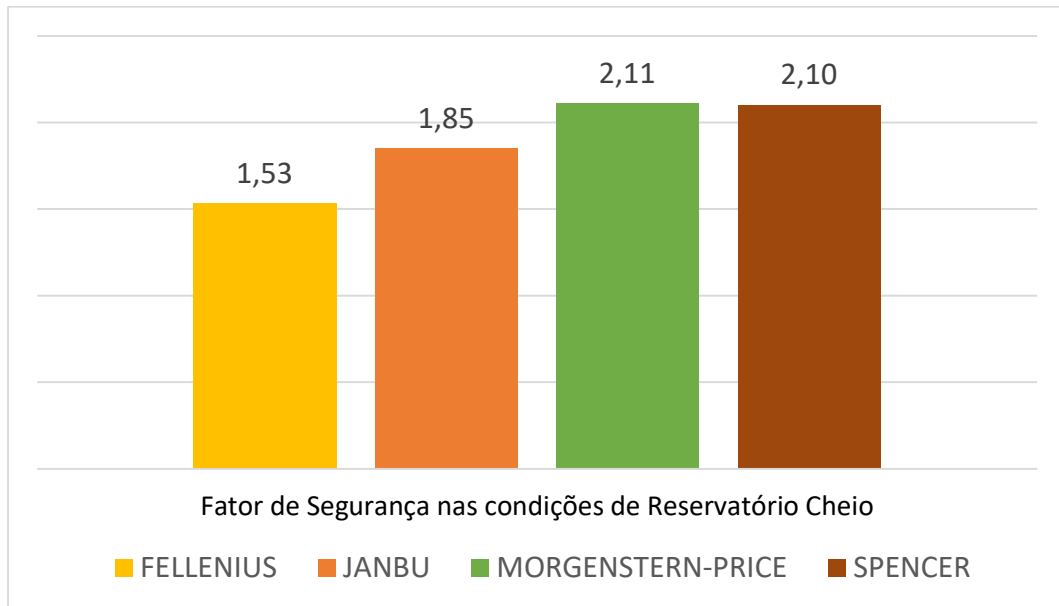
Tabela 13 – Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,3
		Entre bernas	1,5
Solicitação sísmica, com nível máximo reservatório	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1
^a ^a	Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como "final de construção", devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.		

Fonte: ABNT NBR 13.028 (2017), adaptado.

Para o cenário de elevação do nível de água para a condição crítica de Reservatório Cheio, o FS diminuiu em todas as análises, contudo o talude permanece seguro e com índices acima de 1,5, enquanto a NBR 13.028 considera o FS para 1,3 nessas condições extremas. Os métodos Margenstern-Price e Spencer permanecem com valores altos e próximos um do outros. Por Fellenius, mesmo com a queda do índice, o resultado está dentro do parâmetro da norma, assim como para o método de Janbu, mesmo que este tenha sido o método que mais decaiu no valor do FS.

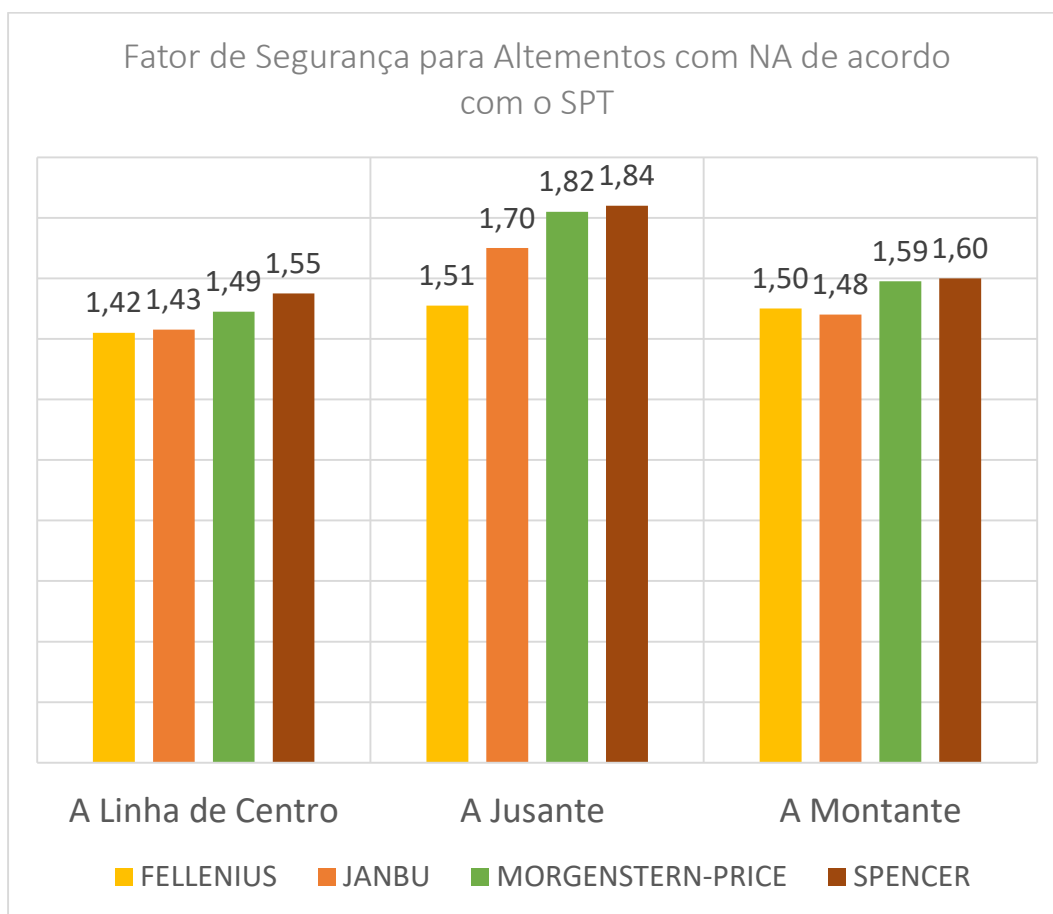
Gráfico 6 – Resultado da análise computacional de taludes nas condições críticas de Reservatório Cheio para todos os métodos



Fonte: Autoral 2025

Quando mudada a geometria do talude prevendo um alteamento mínimo de 3,0 metros, que poderia supostamente solucionar as condições de Reservatório Cheio e criar uma margem de segurança com borda livre, a análise apresentou novos fatores de segurança, porém bem menores que a geometria atual estudada.

Gráfico 7 – Resultado da análise computacional de taludes considerando os três métodos de alteamento nas condições atuais, com NA de acordo com o SPT para todos os métodos



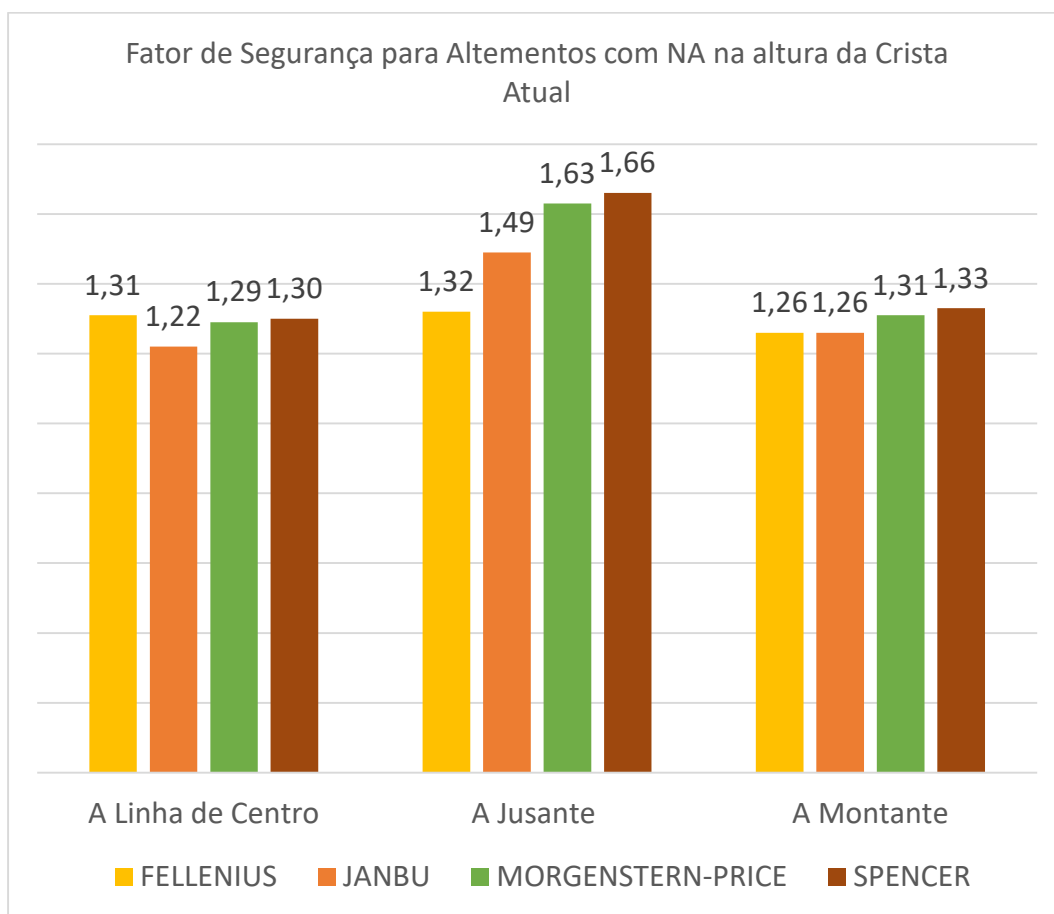
Fonte: Autoral (2025)

Os maiores índices de FS encontrados estão para o método de alteamento a Jusante, sendo o melhor resultado pela análise de Spencer em FS de 1,8. Essa mesma análise, com a geometria atual é 2,6 nas mesmas condições.

O alteamento a Linha de centro resultou na maior queda dos índices, apresentando segurança somente ao cálculo também de Spencer em 1,5, os demais ficaram abaixo do valor de segurança. Para nível de conhecimento, o método construtivo a montante apresentou valores equilibrados e seguros a não ser pela análise de Janbu de 1,4, qual está abaixo do parâmetro de norma.

Foi feito também a análise do talude alteado para a certificação da viabilidade dessa geometria quanto a máxima de cheia atual, que é no nível da crista existente.

Gráfico 8 – Resultado da análise computacional de taludes considerando os três métodos de alteamento nas condições atuais, com NA na altura da crista atual

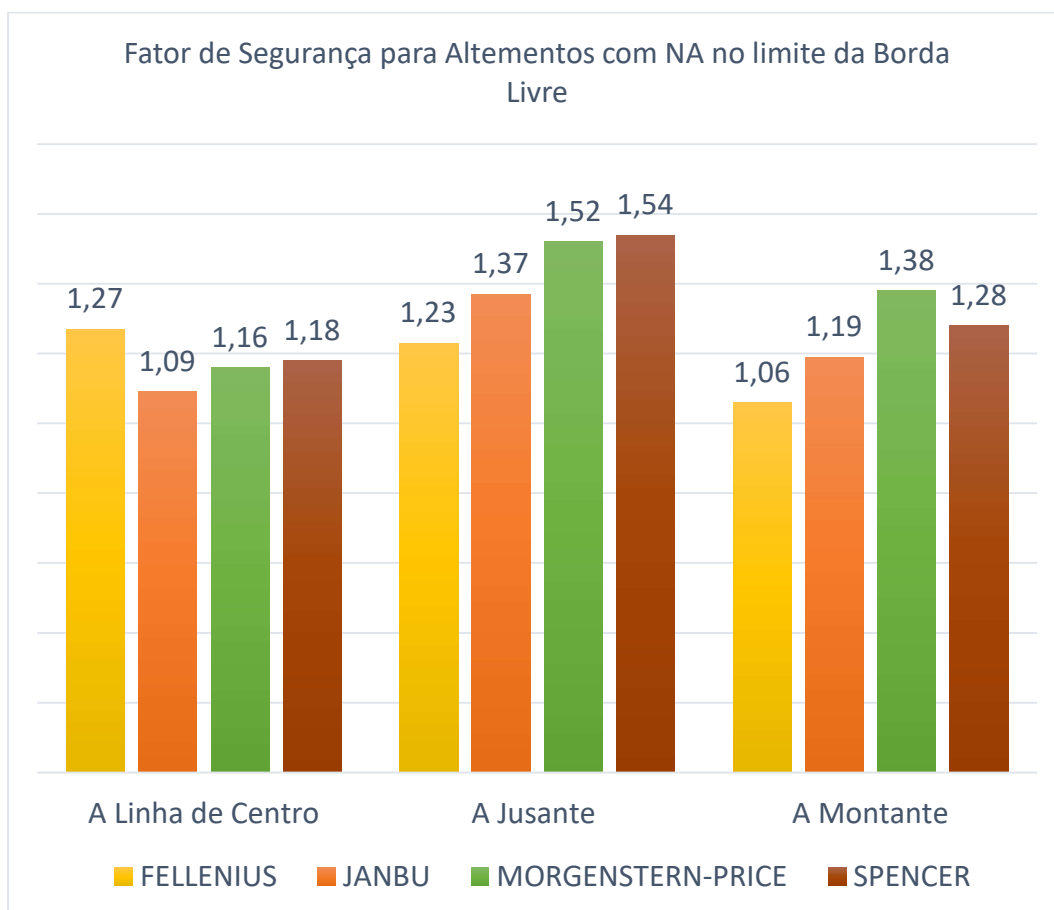


Fonte: Autoral (2025)

Novamente, a análise apresentou novos fatores de segurança menores que a geometria atual estudada mesmo em condições críticas. Os maiores índices de FS encontrados estão outra vez para o método de alteamento a Jusante, sendo o melhor resultado pela análise de Spencer em FS de 1,6, uma unidade de valor abaixo deste mesmo índice em condições atuais – 2,6 conforme visto acima. Para essa análise, fator de segurança de norma volta à 1,5, tornando assim inviável a solução de alteamento para as outras metodologias de construção mesmo que a metodologia a montante fosse permitida no Brasil. Contudo, ainda assim, essa solução só está condicionada para os resultados de dois dos quatro métodos de análises propostos, pois para Fellenius e Janbu, o valor de FS está abaixo de 1,5.

E para a análise da proposta de alteamento mínimo como solução de criação de borda livre de 1,0 metro de acordo com a portaria 70389/2017 da Agência Nacional de Mineração (ANM), os índices de FS foram ainda menores.

Gráfico 9 – Resultado da análise computacional de taludes considerando os três métodos de alteamento nas condições atuais, com NA no limite da Borda Livre



Fonte: Autoral (2025)

Essa análise só se torna viável se considerado a minoração do parâmetro do fator de segurança para 1,3 devido a condição extrema de nível máximo do reservatório. Entretanto, o método mais aceitável não apresenta todos as análises maiores que o valor de norma, o cálculo de Fellenius resultou no FS de 1,2. Para os demais, somente uma análise apresentou valor apto, o método de Janbu com FS de 1,3, contudo está presente na modelagem da geometria a montante.

Relembrando que desde 2019 a legislação brasileira proíbe a execução de talude com alteamento à montante, após o caso de ruptura da barragem de Brumadinho, no ano de 2019 em Minas Gerais. Este método, apresentou os fatores de segurança aceitáveis em algumas das análises propostas, e ainda é corriqueiramente debatido a proibição quanto a sua eficiência entre os engenheiros geotécnicos.

6 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou e comparou o desempenho de métodos convencionais de análise de estabilidade de taludes, fundamentados na teoria do equilíbrio limite, utilizando a ferramenta computacional SLOPE/W, módulo do software GeoStudio, especializado em análises geotécnicas de estabilidade.

A modelagem do objeto de estudo exigiu levantamento de revisão bibliográfica para encontrar a caracterização geométrica do talude, coleta de dados com as propriedades geotécnicas do terreno, analisadas a partir de estudos geotécnicos (SPT ensaios de caracterização, compressão triaxial, adensamento clássico, cisalhamento direto, e permeabilidade).

Com a análise foi possível concluir que os taludes se mostraram estáveis nas condições atuais que se apresentam mesmo em condições de tensões críticas como em casos de cheia do reservatório.

Os métodos mais criteriosos quanto a estabilidade de taludes, Morgenstern-Price e Spencer, foram os que apresentaram os maiores valores dos Fatores de Segurança, 2,6 nas condições atuais e 2,1 com nível de água junto a crista. Janbu teve a maior variação na diminuição de FS de acordo com as condições submetidas, e Fellenius, apesar de mais conservador, apresentou os piores índices, 2 em condições atuais e 1,5 em condição crítica.

A identificação desses valores é importante pressupondo a variação sazonal do nível da bacia hidrográfica local junto às condições climáticas de chuvas intensas que ocorrem no estado e que podem levar à barragem para essas condições críticas. A Barragem Laborrie possui histórico de ocorrência de cheia, logo se torna uma problemática eventual no talude estudado.

Dentre os parâmetros avaliados para solução do aumento do nível da água (NA) represada, a metodologia construtiva que apresentou maior relevância para as análises realizadas, foi a mudança de geometria pelo alteamento a jusante do talude. Esta se mostrou eficaz em todas as variações do NA que foi submetida, ainda que o FS encontrado seja menor que o de condições atuais.

Os cálculos pelo método de Spencer, foi o que apresentou os maiores índices nas análises com o talude alteado a jusante - 1,8, 1,6 e 1,5 para cada variação do NA. E somente para o método de Fellenius, a geometria

a jusante não atendeu aos parâmetros por apresentar valor de FS de 1,2 em condições críticas quando o valor de FS mínimo deve ser 1,3.

O tipo de solução para estabilidade de taludes que corresponde à alteamento, apesar de sugerida de maneira mínima nesse estudo, deve ser feita de maneira mais criteriosa e submetida a diferenças análises até a eficácia plena da estrutura quanto a sua função.

Quanto a proposta realizada nesse estudo, esta pode ser considerada conservadora para com a altura do alteamento escolhida pois considerou a situação possível de que grandes alturas combinadas a uma espessura considerável do solo superficial em um estado mais crítico, pode alcançar o estado de algum tipo de desequilíbrio do maciço.

Este estudo cumpriu com a pretensão de encontrar resultados de equilíbrio e segurança satisfatórios para uma estrutura já existente de barragem de rejeitos de mineração no Estado do Amapá. É de suma importância destacar que a execução deste estudo só foi possível devido ao número de informações existentes sobre o objeto – local de possível acesso, locação, geométrica conhecida e análise geotécnica – mas que dados fundamentais como o projeto inicial e fonte de empréstimo para a construção do dique de partida, é inexistente. A quantidade de dados complementares para análises geotécnicas entrega maior representatividade do modelo de análise e melhora a confiabilidade dos resultados obtidos.

Como sugestão de estudos futuros possíveis baseados nesta pesquisa:

- Avaliação da estabilidade do talude estudo com as informações de todas as camadas presentes no maciço com os métodos de equilíbrio limite;
- Avaliação dos resultados dos métodos de equilíbrio limite em caso de atribuição de elementos de contenção;
- Adoção de abordagem probabilística em vistas da abordagem determinística do talude da barragem Laborrie;
- Modelagem do talude estado com base nos parâmetros de adensamento obtidos por meios dos ensaios laboratoriais de permeabilidade no SIGMA/W, ao GeoStudio;
- Realizar estudos para uma possível ampliação dos bancos de dados sobre outras barragens de rejeitos de mineração no estado do Amapá;

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. Slope stability and stabilization methods. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). Relatório de segurança de barragens 2023. Brasília: ANA, 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682:2009: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028:2017: Barragens de contenção de rejeitos de mineração - Projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Portaria ANM nº 70.389/2017, de 17 de maio de 2017. Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 fev. 2022. Seção 1, p. 27.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, para atualizar o marco regulatório aplicável à segurança de barragens. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1º out. 2020.

BRASIL. MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Diagnostico do setor mineral do Estado do Amapá. Brasília: MME, 2010

BRASIL. Portaria nº 416 de 3 de setembro de 2012. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança (...). Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 11 dezembro, 2013.

BOBROWSKY, Peter; HIGHLAND, Lynn M. O manual de deslizamento: um guia para compreensão de deslizamentos. Disponível em: https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Deslizamentos_M5DS.pdf .

Acesso em 02 de mar. de 2025.

CABRAL, Raphaela Nogueira. Gestão de riscos e desastres para a segurança de barragens de rejeitos de mineração: o caso Brumadinho. 2022. 84 f. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual de Maringá, 2022, Maringá, PR

CARVALHO, L. Hernani de. Curso de Barragens de Terra: com vistas ao Nordeste Brasileiro. 1. ed. V. 3. Fortaleza: Departament Nacional de Obras Contra Seca – DNOCS, 1983.

CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. A história das barragens no Brasil: séculos XIX, XX XXI: 50 anos do Comitê de Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011

CETEM. LUZ, A. B; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Org.). Tratamento de Minérios – 5ª Edição. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. BRASIL. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

CHAGAS, M. A. A, A geopolítica do Garimpo do Lourenço, Norte do Amapá: Trajetória, Contradições e Insustentabilidade. Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, v. 39, n.2, p. 1-22, 2019.

COSTA, W. D.; Geologia de barragens. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CZAP, M. M. F.; MAQUES FILHO, J.; Análise teórica das abordagens determinísticas e probabilísticas para localização de superfícies de ruptura em taludes. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais v. 17, n. 13, p. 01-21, ano. DOI: [10.55905/revconv.17n.13-123](https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-123).

FERREIRA, J. L. Ferrás. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2012.

FIGUEIREDO BRITO, M. M.; Estudo de caso: Análise de estabilidade de taludes com metodologia numérica e equilíbrio limite em uma ponte em Macapá – AP. 2023. 151 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2023.

GERSCOVICH, Denise M. S. Estabilidade de taludes. 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

IEPA. Diagnostico do setor mineral do Estado do Amapá. Coordenador, Marcelo José de Oliveira. Macapá: IEPA, Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, 2010.

INTERNATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS (2019). Bulletin nº 188. “Statistical Analysis of Dam Failures”. Paris, France: ICOLD. 2019.

KOSSOFF, D.; DUBLIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. Applied Geochemistry, v. 51, p. 229-245, dez. 2014. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

LONDE, P. R; BITAR, N. A. B.; Importância do uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes do lixão desativado no município de Patos de Minas, Minas Gerais”. Perquirere, Patos de Minas, v. 2, n. 8, p. 224-249, dez. 2011.

LUMBROSO, D. et al. Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 21, n. 1, p. 21–37, 2020

MARANGON, M. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. [S.l.]: [s.n.], 2006. Apostila da disciplina de Geotecnia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais. 2006

MATURANO RAFAEL, H. M. A. Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MEDEIROS, H. Lima de. Otimização do parâmetro de forma para utilização no método numérico sem malhas. 2014. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

PEREIRA, R. C.; STUDART, T. M. de C.; Segurança de barragens e borda livre: Uma revisão sistemática das abordagens sob diferentes perspectivas e Finalidades. Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, ABRHidro 25. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. ISSN 2318-0358.

RAMBO, L H.: Avaliação da segurança da barragem Labourrie/AP à luz de diferentes metodologias. 2020. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

SANTOS JUNIOR, A. E. dos.; Análise probabilística da estabilidade de taludes em barragens de terra no estado do Ceará. 2019. 121f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Cratéus, 2019.

SILVA, J. R.; SOUZA, M. F. A gestão de riscos em barragens de rejeitos de mineração: estudo de caso após o rompimento em Brumadinho (MG). REASE, [S. l.], v. 9, n. 11, p. 1-15, 2023. DOI: 10.51891/rease.v9i11.12311.

SNISB. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br> . Acesso em 23 mar. 2025

SOUZA, A. P. L. de; Estudos geotécnicos e de estabilidade de taludes da encosta do alto do padre Cícero no município de Camaragibe, Pernambuco. 2014. 177f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014

SOUZA JUNIOR, T. F. MOREIRA, E. B. HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. HOLOS, Ano 34, [S.l.], v. 5, p. 1-15, 2018. DOI: [10.15628/holos.2018.7423](https://doi.org/10.15628/holos.2018.7423).

VALE S.A. Sobre barragens e rejeitos. Disponível em: <https://vale.com/pt/sobre-barragens-e-rejeitos>. Acesso em 1 mar. 2025

VIEIRA, V. de P. P. Barbosa; GOUVEIA NETO, A.; MIRANDA, A. N. e MALVEIRA, V. T. Roteiro para projetos de pequenos açudes. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia, 1996.

ANEXOS

ANEXO A – RELATÓRIO TÉCNICO: LAUDO TÉCNICO DE SONDAGEM



LAUDO TÉCNICO DE SONDAGEM

Nº. LTS-0016/2020

**G. T. COSTA - EPP.
AMAZON ENGENHARIA & URBANISMO**

**OBRA/LOCAL: ÁREA DE GARIMPO NO
DISTRITO DE LOURENÇO NO MUNICÍPIO DE
CALÇOENE - AP**

RESPONSÁVEL TÉCNICO

Marcelo F. Silva

RESPONSÁVEL TÉCNICO
Marcelo Farinha Silva – Geólogo
CREA: 176860 PA

Assinatura

O documento foi salvo pela última vez: Agora

Macapá - AP

Relatório emitido em: **09/NOVEMBRO/2020**

1. APRESENTAÇÃO

I. SOUZA DA COSTA – ME (PROSPEC), apresenta a seguir o Relatório do serviço de "SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO DE SOLO", realizado no Município de Calçoene - AP.

2. DADOS DO CLIENTE

Nome: **G. T. COSTA – EPP / AMAZON ENGENHARIA & URBANISMO**
CNPJ/MF: 29.575.318/0001-82
Endereço: RODOVIA JUSCELLINO KUBITSCHEK,, 4550
Bairro: JARDIM MARCO ZERO.
CEP: 68.903-197
Cidade/Município: MACAPÁ
Estado: AMAPÁ.

3. ASPECTOS GERAIS

Foi utilizada para o presente a prospecção geotécnica o processo de sondagem a percussão com circulação d'água, em conformidade com as recomendações da NBR – 6484, da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

4. OBJETIVOS

4.1 – Estimar parâmetros geotécnicos por meio de correlações empíricas, a partir da resistência oferecida à penetração de amostrador padronizado através da realização de ensaios de penetração dinâmica do tipo SPT nas diversas camadas de solo.

4.2 – Coleta de amostras deformadas do subsolo para determinação da estratigrafia local através de análise táctil-visual até a profundidade atingida pela sondagem.

5. ATIVIDADE EXECUTADA

Sondagem geotécnica do tipo S.P.T., realizada no(s) dia(s) **07/11/2020**, com a execução de **05 - furo(s)** na área da **OBRA/LOCAL: ÁREA DE GARIMPO NO DISTRITO DE LOURENÇO NO MUNICIPIO DE CALÇOENE – AP.**

6. MÉTODO UTILIZADO

6.1- Sondagem a Percussão

Os procedimentos adotados durante a realização do serviço procuraram seguir ao máximo o método de ensaio NBR-6484/FEV-2001 "SOLO – SONDAgens DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT – MÉTODO DE ENSAIO".

6.2- Equipamentos

1. Torre com roldana e sarilho;
2. Tubos de revestimento com diâmetro interno de 66,50 mm e diâmetro nominal externo de 76mm.
3. Haste de lavagem/ penetração em aço com diâmetro interno de 25,00 mm e massa teórica de 3,23kgf/ml;
4. Amostrador padronizado "TERZAGHI-RAYMOND", com diâmetro de 50,80 mm e diâmetro interno de 34,90 mm;
5. Cabeças de bater em aço;
6. Trépano;
7. Trado Concha com (100+/-5)mm de diâmetro;
8. Trado helicoidal com diâmetro entre 67mm e 73mm;
9. Bomba motorizada e demais equipamentos exigidos pelo método de ensaio.

7. MÉTODO DE EXECUÇÃO DO ENSAIO

7.1 – Processo de Perfuração

- ✓ A perfuração foi executada por meio de trado concha até 1,00m de profundidade, a partir daí a perfuração foi executada com trado helicoidal conforme Perfil Individual de cada furo apresentado neste Laudo Técnico de Sondagem.
- ✓ Durante a perfuração as paredes do furo se mostraram instáveis, procedeu-se a descida do tubo de revestimento até 1,00m para estabilização das paredes do furo.

7.2 – Medição da Resistência à Penetração do Amostrador Padronizado (Ensaio de Penetração Dinâmica)

- ✓ O ensaio consiste na cravação dinâmica de 45 cm do amostrador padronizado por meio de golpes sucessivos de um martelo com peso de 65 kgf, caindo em queda livre de uma altura de 75 cm. Os 45 cm cravados são divididos em três trechos de 15 cm cada, computando-se o número de golpes necessários para a cravação de cada trecho. O índice de resistência à penetração (N-SPT), utilizado nas correlações empíricas para estimativa dos parâmetros geotécnicos, é definido pela soma do número de golpes necessários à cravação dos 30 cm finais, isto é, dos dois últimos trechos de 15 cm.

7.3 – Amostragem

- ✓ As amostras foram colhidas a cada metro de profundidade através do amostrador padrão. As amostras colhidas foram analisadas tátil-visualmente, identificadas e acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados.

8. OBSERVAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA FREÁTICO

Os níveis de água, caso encontrados durante a sondagem a percussão, estão informados no Perfil de cada furo executado, sobretudo, poderá haver variação em relação ao nível d'água especificado na sondagem apresentada, na qual poderá ocorrer em virtude do tempo / período climático em que foi executado.

9. PROFUNDIDADE DA PERFURAÇÃO

A perfuração dos furos, conforme o descrito no item 6.4 da norma NBR 6484, foram paralisados nas seguintes profundidades, por estarem impenetráveis ao amostrador, de acordo com os critérios da A.B.N.T.

10. APRESENTAÇÃO DO RESULTADO

10.1 – Locação e números de furos

A distribuição e a quantidade de furos foram definidas conforme item 4.1.1 da NBR 8036:1983.

10.2 – Planta de Locação

A planta de "Locação da sondagem está apresentada neste Laudo Técnico, sem escala".

11.2 - Tensões Admissíveis (Kgf/cm²)

Estas tensões serão designadas de acordo com os golpes obtidos por cada camada encontrada e seus respectivos furos de sondagem a percussão, bem como as paralisações de cada furo apresentado no Perfil Individual contido neste Laudo Técnico, na qual estão vinculados as tabelas 1 e 2 do Item 11.1 relacionados ao tipo de camada e sua resistência de solo.

12. ANEXOS

12.1 – Registro Fotográfico da sondagem;

12.2 – Perfis Individuais dos Furos de Sondagem.

Atenciosamente,




RESPONSÁVEL TÉCNICO
Marcelo F. Silva – Goiânia
CREA: 17080/P4
RESPONSÁVEL TÉCNICO

10.3 – Perfil Individual

Os perfis individuais dos furos de sondagem estão apresentados em anexo e contêm todas as informações exigidas no item 7.2 do método de ensaio da Norma Brasileira NBR-6484/FEV2001.

Conforme se pode observar nos perfis individuais, a quantidade total de **05 – furo(s) de sondagem a percussão**, com suas metragens e paralisações informadas em cada Perfil de amostragem contido neste Laudo Técnico, cujo ensaio geotécnico foi paralisado na profundidade indicada em cada perfil, em conformidade com os critérios estabelecidos no Item 6.3.12 da NBR - 6484/2001.

11. ESPECIFICAÇÕES

11.1 Quadro de pressões admissíveis

Compacidade e Consistência dos Solos de Acordo com o S.P.T (Standart Penetration Test).

TABELA 1 – ARGILAS E SILTES ARGILOSOS		
Correlação entre penetração e tensões admissíveis do solo Kg / cm ²		
N.º de Golpes SPT	Aparência	Kg/cm ²
≤ 2	Muito Mole	0,25
3 a 5	Mole	0,50
6 a 10	Média	1,0
11 a 19	Rija	2,0
> 19	Dura	4,0

TABELA 2 – AREIAS E SILTES ARENOSOS			
Correlação entre penetração e tensões admissíveis do solo Kg / cm ²			
N.º de Golpes - SPT	Aparência		Fadm – Kgf/cm ²
< 4	Fofa Solta	{ areia fina e média areia grossa	1,0 1,5
5 a 8	Pouco compacta	{ areia fina e média areia grossa	1,5 2,0
9 a 18	Medianamente Compacta	{ areia fina e média areia grossa	2,0 2,5
19 a 40	Compacta	{ areia fina e média areia grossa	4,0 4,5

Anexo: 12.1 - REGISTRO FOTOGRÁFICO – SONDAGEM SPT





ANEXO: 12.2 - PERFIL INDIVIDUAL PARA SONDAGEM DE SIMPLES DE RECONHECIMENTO À PERCUSSÃO (S.P.T.)

NBR - 06484/2001

CLIENTE:	G. T. COSTA - EPP. AMAZON ENGENHARIA & URBANISMO	Início da Sondagem:	7-nov-20
LOCAL DA SONDAGEM:	Área do GARIMPO DO DISTRITO DE LOURENÇO - MUNICÍPIO DE CALÇÓENEIAP.	Término da Sondagem:	7-nov-20
Sondagem Número:	SP-03	Revestimento:	100 cm

Cota em relação ao RN (m)	AVANÇO	Índices de penetração	N _{spt}	N. A. (nível d'água)	Números de Golpes: Iniciais: 1ª + 2ª = linha tracejada Finais: 2ª e 3ª = linha cheia	PERFIL GEOLOGICO E ALTERAÇÃO DE CAMADAS	Amostragem (m)	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO UTILIZADO NA EXECUÇÃO
0	TC							- AMOSTRADOR Ø INT. = 35 mm - AMOSTRADOR Ø EXT. = 51 mm - REVESTIMENTO Ø = 88 mm - PESO = 45 kgf - ALTURA DE QUEDA = 75 cm
CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL								
0								Aterro de argila sítio arenosa com pedregulho com cascalho de pedra de cor variado mole.
1	P	2 /15						Idem
	TC	2 /15	Inicial 4					
			Final 4					
2	P	2 /15						Idem
	TC	3 /15	Inicial 5					
			Final 5					
3	P	3 /15						Idem
	TC	2 /15	Inicial 5					
			Final 5					
4	P	2 /15						Idem
	TC	2 /15	Inicial 4					
			Final 3					
5	P	2 /15						Idem
	TC	3 /15	Inicial 5					
			Final 5					
6	P	3 /15						Idem
	TC	3 /15	Inicial 6					
			Final 6					
7	P	1 /15						Idem
	TC	4 /15	Inicial 5					
			Final 5					
8	P	1 /15						Idem
	TC	2 /15	Inicial 3					
			Final 3					
9	P	6 /15						Idem rijo.
	TC	7 /15	Inicial 13					
			Final 16					
10	P	11 /15						Argila sítio arenosa com pedregulho de cor variada dura.
	TC	12 /15	Inicial 23					
			Final 29					
11	P	19 /15						Idem
	TC	20 /15	Inicial 39					
			Final 43					
12								
13								
14								
15								

Observação: 1) A profundidade desta sondagem = 11,95m atendendo os critérios de paralisação contidas na ABNT/NBR-06484/2001; 2) Foram encontrados níveis d'água no local desta sondagem, na qual estão descritos neste perfil, conforme informações contidas no boletim de campo.

Avanço:
 TH - Trado helicoidal
 CA - Circulação de água
 TC - Trado concha
 P - Percussão

Responsável Técnico: *Marcelo F. Silva*
 RESPONSÁVEL TÉCNICO
 ASSINADO
 CREA 11080-PA

Folha: 11	
Operador de Sonda: DARLAN	
PROF. DO NÍVEL D'ÁGUA:	DATA:
INICIAL: 5,55	07/11/2020
FINAL: 5,42	07/11/2020

Fonte: Relatório Técnico – Amazon Engenharia e Urbanismo (2020)

ANEXO B – RELATÓRIO TÉCNICO: INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA DE LABORATÓRIO



UENF
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

**CCT
LECIV**

Relatório-FSAJ/MPSJ nº 036-2021.

Relatório Técnico

Investigação Geotécnica de Laboratório

*Cooperativa de Mineração dos Garimpeiros –
Município de Calçoene – Amapá.*

*Fernando Saboya Jr
Milton Soares Pereira Jr
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA CIVIL - UENF*

Campos dos Goytacazes, Dezembro de 2020/Janeiro 2021.

Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia - Campos dos Goytacazes/ RJ - CEP: 28013-602
Tel.: (22) 2726-1517/538/1599 - Fax: (22) 2726-1517/1538/1599 ramal:24



1. INTRODUÇÃO

Neste relatório são apresentados os resultados obtidos nos ensaios executados para a investigação geotécnica de laboratório realizada para a Cooperativa de Mineração dos Garimpeiros – Município de Calçoene – Amapá.

Os procedimentos de ensaio adotados seguiram às recomendações do cliente, conforme orientação previamente estabelecida e as prescrições das normas técnicas da ABNT.

Foi executada uma campanha de investigação geotécnica em laboratório realizada a partir da amostra indeformada do tipo E loco, entregues em nosso laboratório. A foto abaixo foi fornecida pelos responsáveis pelas coletas e fotos dos blocos após a abertura em laboratório, na sequência.

Local de retirada dos blocos indeformados



*Fotos dos blocos abertos no laboratório da UENF – Blocos de 1 a 4.**Bloco 1**Bloco 2**Bloco 3**Bloco 4***2. PROGRAMA EXPERIMENTAL E EXTRAÇÃO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS**

O programa experimental consistiu na realização de ensaios caracterização completa, ensaios de permeabilidade à carga variável, ensaios oedométricos com Inundação num período de 24hs, ensaio de cisalhamento direto e ensaios compressão triaxial do tipo CIUsat.

Para a realização dos ensaios supracitados foi necessário à retirada de amostras indeformadas em anéis cilíndricos com diâmetros de 50 mm de diâmetro e 19,1 mm de altura (adensamento).



76,2mm de altura e 38,1mm de diâmetro (triaxial), 100 mm de diâmetro, 24,0 mm de altura (cisalhamento) e 100 mm de diâmetro e 110,3 mm de altura (permeabilidade), tomando-se cuidado durante o manuseio da talhagem. O material utilizado para os ensaios de caracterização foi o solo restante das talhagem realizadas nos Blocos.

O quantitativo dos ensaios do programa experimental é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo do programa experimental

<i>Atividade</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Observação</i>
<i>Ensaio de compressão triaxial – CIU sat.</i>	<i>4 ensaios</i>	<i>12 Corpos de prova talhados nos blocos.</i>
<i>Ensaio de adensamento clássico</i>	<i>3 ensaios</i>	<i>Corpos de prova talhados no blocos.</i>
<i>Ensaio de caracterização completa</i>	<i>4 ensaios</i>	<i>Realizadas nas amostras após corte dos corpos de prova</i>
<i>Ensaio de cisalhamento direto rápido</i>	<i>3 ensaios</i>	<i>Corpos de prova talhados nos blocos.</i>
<i>Ensaio de permeabilidade à carga variável</i>	<i>3 ensaios</i>	<i>Corpos de prova talhados nos blocos.</i>

As amostras foram cuidadosamente acondicionadas no Laboratório de Engenharia Civil do CCT/UENF, onde foram armazenadas em câmara úmida até a realização do programa experimental previamente estabelecido.

3 – METODOLOGIAS DOS ENSAIOS

3.1 – Ensaio de Caracterização Completa

Os ensaios de caracterização completa foram realizados nas amostras provenientes das sobras dos materiais conforme descrito anteriormente. Os ensaios foram executados nos Blocos 1 ao 4.

Os ensaios de caracterização completa foram executados segundo as recomendações preconizadas nas normas da ABNT, relacionadas abaixo:



- NBR 7181 – Análise granulométrica
- NBR 6459 – Determinação do limite de liquidez
- NBR 7180 – Determinação do limite de plasticidade
- NBR 6508 – Determinação da densidade dos grãos

Destaca-se que a classificação granulométrica apresentada nos ensaios de caracterização completa adota as prescrições da USCS e o quadro de resultados dos ensaios apresentada nas tabelas abaixo:

Classificação dos solos de acordo com sua granulometria:

<i>Classificação</i>	<i>Diâmetro dos Grãos</i>
Argila	Menor que 0,002 mm
Silte	Entre 0,06 e 0,002 mm
Areia	Entre 2,0 e 0,06 mm
Pedregulhos	Maior que 2,0 mm

Resultados das análises granulométricas:

Quadro de Resultados das Características Granulométricas

<i>Frações Granulométricas e Classificação Unificada (USCS)</i>									
<i>Pedregulho</i>			<i>Areia</i>			<i>Silte</i>	<i>Argila</i>	<i>Classificação (USCS)</i>	<i>Gs</i>
<i>Grosso</i>	<i>Médio</i>	<i>Fino</i>	<i>Grossa</i>	<i>Média</i>	<i>Fina</i>				
-	-	1	5	6	11	47	29	MH	2,79
-	-	3	3	7	13	42	31	MH	2,75
-	1	4	5	8	14	39	29	MH	2,77
-	-	2	1	2	13	51	31	MH	2,75

Legenda:

MH = Silte Inorgânico

Gs = Densidade Real dos Grãos.

As planilhas com as curvas e resultados estão no anexo de 1 a 4.



Fotos sequenciais de todas as fases executivas do ensaio e maquinário.





3.2 Ensaio de compressão triaxial do tipo CIU sat

Foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo CIU em corpos de prova extraídos dos Blocos 1, 2, 3 e 4.

Cada corpo de prova ensaiado foi adensado em um nível diferente de tensão de confinamento (σ_3), sendo, 150, 300 e 600 kPa.

Os ensaios foram realizados com o intuito de determinar a resistência e as relações de tensão-deformação em diversos níveis de confinamento, possibilitando, dessa forma, determinar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e as respectivas trajetórias.

Os ensaios tiveram as seguintes fases: preparação das amostras, saturação, adensamento e cisalhamento. Cada uma delas está descrita na sequência.

3.2.1 Preparação das amostras

As amostras ensaiadas foram cilíndricas e com diâmetro mínimo de 35 mm, sendo aproximadamente 2 vezes a relação entre a altura média e o diâmetro médio de cada corpo de prova.

Os corpos de prova do tipo indeformados foram obtidos através da talhagem e cravação contínua cuidadosa na vertical usando um tubo de parede fina de PVC biselado, também, após a retirada do tubo do interior do bloco indeformado, os excessos de material no topo e na base do tubo eram retirados e a corpo de prova era extraído com o mínimo de perturbação através do uso de um extrator especial, conforme ilustrado nas fotos sequenciais.

A extração foi realizada com uma taxa de deslocamento constante e o movimento de extração do corpo de prova foi realizado no mesmo sentido do movimento de cravação.



Ao término da extração, o corpo de prova era medido e pesado. A determinação do teor de umidade era realizada com parte dos excessos de solo retirados antes da extração do corpo de prova de dentro do tubo.

3.2.2 – Saturação

Com o corpo de prova devidamente posicionado e envolto com membrana e a câmara de ensaio de triaxial sendo completamente preenchida com água, iniciava-se a fase de saturação. Para saturar o corpo de prova foi realizada a percolação de água através do corpo de prova, com um fluxo de água ascendente durante 24 horas, sendo mantido um gradiente de pressão de 3 kPa entre o topo e a base do corpo de prova.

Ao final da percolação iniciava-se a saturação da amostra através da aplicação de incrementos sucessivos de pressão na câmara e de contrapressão na ordem de 50 kPa cada incremento, sendo avaliado ao final de cada incremento o valor do parâmetro B. A aplicação de incrementos de pressão foi realizada até se alcançar uma pressão na câmara igual a 300 kPa. A diferença entre a pressão na câmara e a contrapressão durante o processo de saturação nunca excedeu 3 kPa. A amostra foi considerada saturada quando o parâmetro B foi igual ou superior a 0,98.

3.2.3 – Adensamento

Após a fase de saturação estando concluída, o corpo de prova foi adensado isotropicamente com a sua pressão de adensamento específica. As tensões de adensamento adotadas durante os ensaios foram: 150, 300 e 600 kPa. A amostra foi considerada completamente adensada quando a variação volumétrica do corpo de prova era inferior a 5 mm³ dentro de um intervalo de 2 minutos.

3.2.4 – Cisalhamento

Um carregamento axial foi aplicado no corpo de prova usando uma taxa de deslocamento axial constante suficiente para equalizar a poropressão no interior do corpo de prova durante o cisalhamento. Foi assumida uma deformação axial estimada na ruptura igual a 5% da altura do corpo de prova após o adensamento e um tempo de ruptura de 60 (sessenta) minutos. A taxa de deslocamento axial pôde ser determinada através da seguinte equação:

$$v_{\epsilon} = \frac{0,05 \cdot h}{60} \quad (3.1)$$

Onde:

v_{ϵ} = taxa de deslocamento axial (mm/min);

h = altura do corpo de prova após o adensamento (mm).

Foram registrados os valores de deslocamento, carregamento axial e variação da poropressão do corpo de prova a cada dez segundos durante o processo de cisalhamento. Com esses dados



foi possível definir as curvas de tensão versus deformação e de variação da poropressão versus deformação axial.

Os corpos não apresentaram ângulo de ruptura, denomina-se então ruptura plástica, ocorreram trincas milimétricas na horizontal, só observadas após a secagem em estufa.

Quadro de resultados dos ensaios

Bloco n°	Tensão Confinante (σ_3)	Corpo de Prova	Densidade Aparente Úmida (g/cm^3)	Umidade Natural (%)	Densidade Aparente Seca (g/cm^3)	a' (kPa)	α'	C' (kPa)	φ'
1	150	1	1,767	27,0	1,391	28	25	31	27
	300	2	1,775	27,1	1,397				
	600	3	1,754	26,9	1,382				
2	150	1	1,768	28,6	1,375	30	23	33	26
	300	2	1,715	27,6	1,344				
	600	3	1,691	26,6	1,336				
3	150	1	1,809	28,7	1,406	23	25	26	28
	300	2	1,793	28,5	1,395				
	600	3	1,806	28,3	1,408				
4	150	1	1,802	27,3	1,416	17	26	18	29
	300	2	1,799	27,6	1,410				
	600	3	1,812	27,8	1,418				

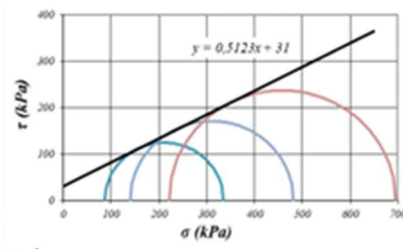
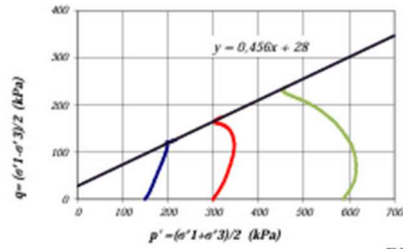
Legenda:

a' (kPa)/ α' Parâmetros obtidos na trajetórias de tensões, p' e q' ;

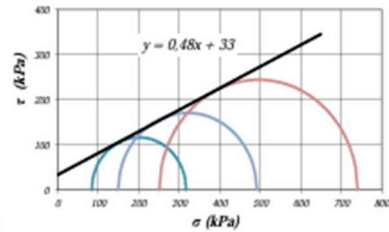
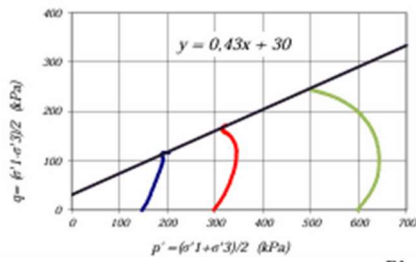
C' (kPa)/ φ' Parâmetros obtidos através das formulações de $C' = a'/\text{tg}\varphi'$ e $\text{sen}\varphi' = \text{tg}\alpha'$.

Os valores de a' (coesão) e α' (atrito), encontrados nas trajetórias de tensões foram usados para a determinação de C' (kPa) e φ' , obtidos através das formulações de $C' = a'/\text{tg}\varphi'$ e $\text{sen}\varphi' = \text{tg}\alpha'$. Esses parâmetros servem apenas para orientação a fim de se verificar de maneira bastante aproximada de um padrão de resistência do material. Neste sentido, recomenda-se que o técnico responsável pela análise do projeto faça a sua própria interpretação dos resultados.

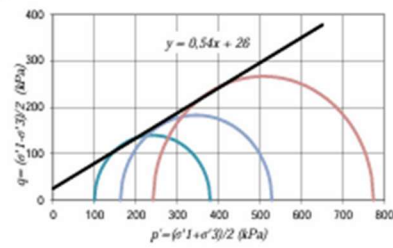
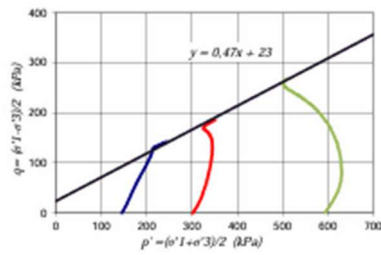
Os gráficos dos respectivos ensaios encontram-se nos anexos de 14 a 25.



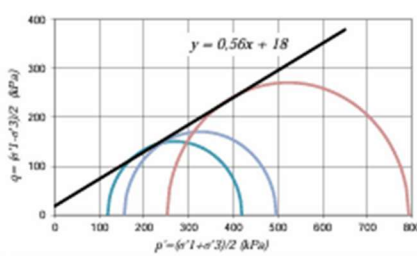
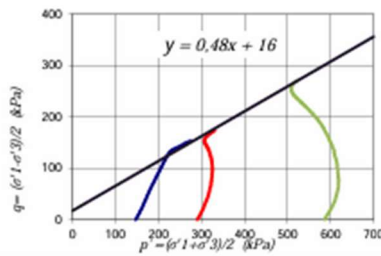
Bloco 1



Bloco 2



Bloco 3

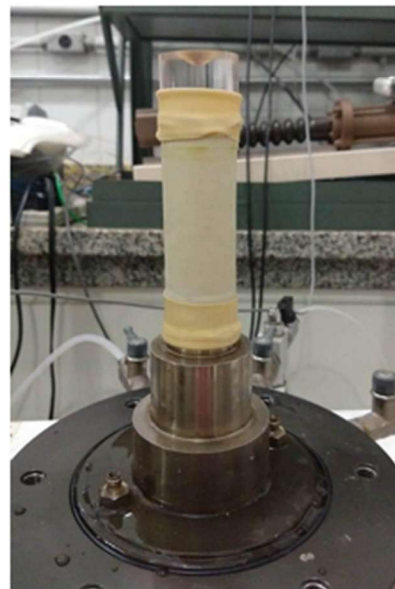


Bloco 4



Fotos sequenciais de todas as fases executivas dos ensaios.









3.4 - Anexos:

Ensaio de caracterização completa..... 1 a 4;

Ensaio de Permeabilidade á carga variável..... 5 a 7;

Ensaio de cisalhamento direto.....8 a 13;

Ensaio de compressão triaxial do tipo CIU sat.....14 e 25;

Ensaio de Adensamento Clássico (Oedométrico).....25 a 31.

Colocamo-nos a inteira disposição para quaisquer esclarecimentos adicionais que se fizerem necessários.

Fernando Saboya de Albuquerque Júnior

UENF – CCT - Laboratório de Engenharia Civil – Setor de Geotecnia

Milton Pereira Soares Júnior

UENF – CCT - Laboratório de Engenharia Civil – Setor de Geotecnia.



3.3- Ensaio de Adensamento Clássico (Oedométrico)

Os ensaios de adensamento realizados nos Blocos 1,2 e 4, foram executados com aplicação em estágios de carga aproximados de 2,5; 5,0; 10,0; 20,0; 40,0; 80,0; 160,0; 320,0 e 640,0, 1280,0 kPa e em estágios de descarga de 320,0; 80,0; 20,0 e 5,0 kPa.

A programação dos ensaios de adensamento foi previamente estabelecida juntamente com o cliente.

A inundação foi de imediato de acordo com a Norma NBR 12007 da ABNT, e foram aguardadas num período de 24 h para dar início ao ensaio.

As medidas para a determinação do K (Coeficiente de permeabilidade) e C_v (Coeficiente de adensamento), foram através da raiz quadrada do tempo correspondente a 90% do recalque para estágios de pressão de 160, 320,0, 640,0 e 1280,0 kPa, respectivamente.

Cada estágio de carregamento foi mantido num período de 24h.

A determinação da porcentagem de adensamento seguiu o procedimento estabelecido por Taylor.

Os corpos de prova para os ensaios oedométricos foram retirados nos pontos onde se obteve uma melhor qualidade. Este procedimento é fundamental para se obter corpos de prova representativos com a condição "In situ".

O procedimento de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de adensamento consistiu na introdução do anel 50,8 por 19,1mm (adensameto). Este procedimento permite a cravação do anel no solo sem amolgamento do corpo de prova. Após a cravação completa do anel faz-se o arrasamento cuidadoso do topo e da base. O material proveniente deste arrasamento (sobra) é os que foram utilizados nos ensaios de caracterização completa e determinação da umidade natural do solo. O sobra de material restante do bloco foi acondicionado em câmara úmida.

Fotos das fases de montagem do corpo de prova para o ensaio.

Os resultados completos dos ensaios estão nos anexo de 25 a 31.



Abaixo, estão apresentadas as tabelas com os resultados dos parâmetros físicos e gráficos:

Parâmetros Físicos da Amostra - Bloco 1

D = diâmetro (cm)	4,99
H _z = altura inicial (cm)	1,91
W _{520,6} = peso de solo+tara+água (g)	127,50
W ₁₂ = peso da tara (g)	60,64
G _s = peso esp. dos grãos (g/cm ³)	2,700
γ _H = peso específico da água (g/cm ³)	1,00
A = Área (cm ²)	19,56
V _T = Volume total (cm ³)	37,35
W _T = peso total do solo (g)	66,86
γ = peso específico úmido (g/cm ³)	1,790
γ _d = peso específico seco (g/cm ³)	1,380
W _s = peso do solo seco (g)	51,53
W _u = peso da água (g)	15,33
V _S = volume de sólidos (cm ³)	18,47
V _V = volume de vazios (cm ³)	18,88
V _H = volume de água (cm ³)	15,33
V _A = volume de ar (cm ³)	3,55
S = grau de saturação (%)	98,39
e _u = índice de vazios	1,022
n = porosidade (%)	50,55
γ _{sat} = peso específico saturado (g/cm ³)	1,885
γ _{sub} = peso específico submer. (g/cm ³)	0,885
P _c = Pressão de Pré adensamento (kPa)	290,0

Parâmetros Físicos da Amostra - Bloco 2

D = diâmetro (cm)	4,99
H _z = altura inicial (cm)	1,91
W _{520,6} = peso de solo+tara+água (g)	127,90
W ₁₂ = peso da tara (g)	60,64
G _s = peso esp. dos grãos (g/cm ³)	2,750
γ _H = peso específico da água (g/cm ³)	1,00
A = Área (cm ²)	19,56
V _T = Volume total (cm ³)	37,35
W _T = peso total do solo (g)	67,26
γ = peso específico (g/cm ³)	1,801
γ _d = peso específico seco (g/cm ³)	1,403
W _s = peso do solo seco (g)	52,40
W _u = peso da água (g)	14,86
V _S = volume de sólidos (cm ³)	19,05
V _V = volume de vazios (cm ³)	18,30
V _H = volume de água (cm ³)	14,86
V _A = volume de ar (cm ³)	3,44
S = grau de saturação (%)	98,39
e _u = índice de vazios	0,960
n = porosidade (%)	48,00
γ _{sat} = peso específico saturado (g/cm ³)	1,830
γ _{sub} = peso específico submer. (g/cm ³)	0,830
P _c = Pressão de Pré adensamento (kPa)	250,0

Parâmetros Físicos da Amostra - Bloco 4

D = diâmetro (cm)	4,99
H _z = altura inicial (cm)	1,91
W _{520,6} = peso de solo+tara+água (g)	127,53
W ₁₂ = peso da tara (g)	60,64
G _s = peso esp. dos grãos (g/cm ³)	2,750
γ _H = peso específico da água (g/cm ³)	1,00
A = Área (cm ²)	19,56
V _T = Volume total (cm ³)	37,35
W _T = peso total do solo (g)	66,89
γ = peso específico (g/cm ³)	1,791
γ _d = peso específico seco (g/cm ³)	1,385
W _s = peso do solo seco (g)	51,75
W _u = peso da água (g)	15,14
V _S = volume de sólidos (cm ³)	18,82
V _V = volume de vazios (cm ³)	18,53
V _H = volume de água (cm ³)	15,14
V _A = volume de ar (cm ³)	3,40
S = grau de saturação (%)	98,39
e _u = índice de vazios	0,985
n = porosidade (%)	49,62
γ _{sat} = peso específico saturado (g/cm ³)	1,882
γ _{sub} = peso específico submer. (g/cm ³)	0,882
P _c = Pressão de Pré adensamento (kPa)	300,0

**UENF**

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

**CCT
LECIV**

Local: Calçoene - Amapá

Bloco: 1

Dados do Corpo de Prova

Dímetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 27,34 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 29,7 %	Peso total da amostra: 66,860 g
Volumen da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 1,02	Peso da amostra seca: 51,532 g
Volumen de sólidos: 18,47 cm ³	Grau saturação inicial: 98,4 %	Peso específico: 17,54 kN/m ³
Volumen de vazios: 18,88 cm ³	Porosidade inicial: 50,6 %	Peso específico seco: 13,52 kN/m ³
Volumen de água: 15,33 cm ³	Umidade final: 26,0 %	Peso específico saturado: 18,48 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_n (kPa)	Altura inicial H_0 (cm)	Altura final H_f (cm)	Variación da altura ΔH (cm)	Altura média H_m (cm)	t_{50} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	-	-	-	-	-	-	-	1,0223	1,000	-	-	-
1	2,5	1,910	1,910	0,000	1,910	-	-	1,0223	1,000	-	-	-
2	4,9	1,910	1,910	0,000	1,910	-	-	1,0218	0,999	2,16E-04	1,1E-04	-
3	9,8	1,910	1,909	0,001	1,909	-	-	1,0213	0,999	1,08E-04	5,3E-05	-
4	19,6	1,909	1,908	0,001	1,909	-	-	1,0203	0,998	9,72E-05	4,8E-05	-
5	39,2	1,908	1,905	0,004	1,906	-	-	1,0165	0,994	1,94E-04	9,6E-05	-
6	78,5	1,905	1,896	0,009	1,900	-	-	1,0073	0,985	2,35E-04	1,2E-04	-
7	156,9	1,896	1,883	0,013	1,889	375	2,02E-03	0,9937	0,972	1,73E-04	8,7E-05	1,71E-08
8	313,9	1,883	1,851	0,032	1,867	735	1,01E-03	0,9599	0,939	2,16E-04	1,1E-04	1,09E-08
9	627,7	1,851	1,772	0,079	1,812	778	8,95E-04	0,8762	0,857	2,66E-04	1,4E-04	1,25E-08
10	1255,5	1,772	1,671	0,101	1,722	913	6,88E-04	0,7693	0,752	1,70E-04	9,6E-05	6,50E-09
11	313,9	1,671	1,697	-0,026	1,684	-	-	0,7968	0,779	2,92E-05	-	-
12	78,5	1,697	1,721	-0,024	1,709	-	-	0,8222	0,804	1,08E-04	-	-
13	19,6	1,721	1,742	-0,021	1,732	-	-	0,8445	0,826	3,78E-04	-	-
14	4,9	1,742	1,767	-0,025	1,755	-	-	0,8709	0,852	1,80E-03	-	-

Local: Calçoene - Amapá

Bloco: 2

Dados do Corpo de Prova

Dímetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 26,95 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 28,4 %	Peso total da amostra: 67,260 g
Volumen da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 0,96	Peso da amostra seca: 52,398 g
Volumen de sólidos: 19,05 cm ³	Grau saturação inicial: 98,4 %	Peso específico: 17,65 kN/m ³
Volumen de vazios: 18,30 cm ³	Porosidade inicial: 49,0 %	Peso específico seco: 13,75 kN/m ³
Volumen de água: 14,86 cm ³	Umidade final: 25,5 %	Peso específico saturado: 18,55 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_n (kPa)	Altura inicial H_0 (cm)	Altura final H_f (cm)	Variación da altura ΔH (cm)	Altura média H_m (cm)	t_{50} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	0,0	-	-	-	-	-	-	0,9904	1,000	-	-	-
1	2,5	1,910	1,910	0,000	1,910	-	-	0,9904	1,000	-	-	-
2	4,9	1,910	1,910	0,000	1,910	-	-	0,9904	1,000	0,00E+00	0,0E+00	-
3	9,8	1,910	1,909	0,001	1,910	-	-	0,9894	0,999	2,06E-04	1,1E-04	-
4	19,6	1,909	1,907	0,002	1,908	-	-	0,9873	0,997	2,06E-04	1,1E-04	-
5	39,2	1,907	1,902	0,005	1,905	-	-	0,9822	0,991	2,62E-04	1,3E-04	-
6	78,5	1,902	1,895	0,008	1,898	-	-	0,9445	0,983	1,96E-04	1,0E-04	-
7	156,7	1,895	1,881	0,014	1,888	265	2,85E-03	0,9301	0,968	1,65E-04	8,4E-05	2,30E-08
8	313,9	1,881	1,847	0,034	1,864	317	2,32E-03	0,8937	0,933	2,34E-04	1,2E-04	2,80E-08
9	627,7	1,847	1,770	0,077	1,812	406	1,72E-03	0,8229	0,857	2,32E-04	1,2E-04	2,14E-08
10	1255,5	1,770	1,680	0,090	1,728	1882	3,36E-04	0,7243	0,754	1,57E-04	9,1E-05	3,00E-09
11	313,9	1,680	1,697	-0,017	1,688	-	-	0,7413	0,772	1,80E-05	-	-
12	78,5	1,697	1,721	-0,024	1,709	-	-	0,7964	0,798	1,07E-04	-	-
13	19,6	1,721	1,747	-0,026	1,734	-	-	0,7931	0,826	4,55E-04	-	-
14	4,9	1,747	1,769	-0,022	1,758	-	-	0,8157	0,849	1,53E-03	-	-

Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia - Campos dos Goytacazes/RJ - CEP: 28013-602
 Tel.: (22) 2726-1517/538/1599 - Fax: (22) 2726-1517/1538/1599 ramal:24



Local: Caçoene - Arapá

Bloco: 4

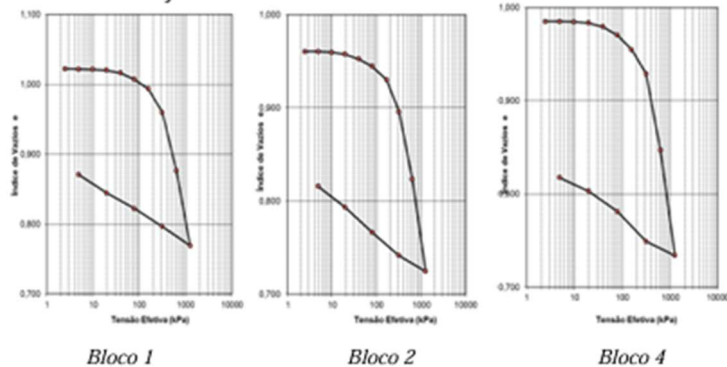
Dados do Corpo de Prova

Diâmetro: 4,99 cm	Área inicial: 19,56 cm ²	Peso específico dos grãos: 26,95 kN/m ³
Altura inicial: 1,91 cm	Umidade inicial: 29,3 %	Peso total da amostra: 66,890 g
Volume da amostra: 37,35 cm ³	Índice vazios inicial: 0,98	Peso da amostra seca: 51,751 g
Volume de sólidos: 18,82 cm ³	Grau saturação inicial: 98,4 %	Peso específico: 17,55 kN/m ³
Volume de vazios: 18,53 cm ³	Porosidade inicial: 49,6 %	Peso específico seco: 13,58 kN/m ³
Volume de água: 15,14 cm ³	Umidade final: 25,6 %	Peso específico saturado: 18,44 kN/m ³

Planilha de Resultados do Ensaio

Est. (no.)	Tensão normal σ_v (kPa)	Altura inicial: H_0 (cm)	Altura final: H_f (cm)	Varição da altura: ΔH (cm)	Altura média H_m (cm)	t_{90} (s)	c_v (cm ² /s)	e	e/e_0	a_v (1/kPa)	m_v (1/kPa)	k (cm/s)
-	0,0	-	-	-	-	-	-	0,9849	1,000	-	-	-
1	2,5	1,910	1,910	0,000	1,910	-	-	0,9849	1,000	-	-	-
2	4,9	1,910	1,910	0,000	1,910	-	-	0,9849	1,000	0,00E+00	0,0E+00	-
3	9,8	1,910	1,910	0,001	1,910	-	-	0,9844	0,999	1,06E-04	5,3E-05	-
4	19,6	1,910	1,909	0,001	1,909	-	-	0,9834	0,998	1,06E-04	5,3E-05	-
5	39,2	1,909	1,905	0,004	1,907	-	-	0,9792	0,994	2,12E-04	1,1E-04	-
6	78,5	1,905	1,896	0,008	1,900	-	-	0,9704	0,985	2,25E-04	1,1E-04	-
7	156,9	1,896	1,881	0,015	1,889	317	2,38E-03	0,9548	0,969	1,99E-04	1,0E-04	2,37E-08
8	313,9	1,881	1,856	0,025	1,869	540	1,37E-03	0,9288	0,943	1,66E-04	8,6E-05	1,15E-08
9	627,7	1,856	1,778	0,079	1,817	614	1,14E-03	0,8472	0,860	2,60E-04	1,4E-04	1,57E-08
10	1255,5	1,778	1,669	0,109	1,723	317	1,98E-03	0,7339	0,745	1,80E-04	1,0E-04	2,02E-08
11	313,9	1,669	1,683	-0,015	1,676	-	-	0,7490	0,760	1,60E-05	-	-
12	78,5	1,683	1,714	-0,031	1,699	-	-	0,7812	0,793	1,37E-04	-	-
13	19,6	1,714	1,735	-0,021	1,725	-	-	0,8030	0,815	3,71E-04	-	-
14	4,9	1,735	1,749	-0,014	1,742	-	-	0,8176	0,830	9,89E-04	-	-

Varição do índice de vazios e com a tensão efetiva





Fotos dos corpos de prova talhados e prontos para os ensaios:





QUADRO DE RESULTADOS DE PERMEABILIDADE

Bloco n°	K (cm/seg)	G _s (g/cm ³)	γ _t (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	w _o (%)	e _o
1	6,7x10 ⁻⁶	2,79	17,97	13,83	29,99	1,02
2	3,7x10 ⁻⁶	2,75	17,70	13,79	28,35	0,99
4	3,9x10 ⁻⁶	2,75	18,08	13,96	29,50	0,97

Legenda:

K (cm/seg) = Coeficiente de permeabilidade

G_s = densidade real dos grãos

γ_t = Peso específico total

γ_d = Peso específico seco

w_o = Teor de umidade inicial

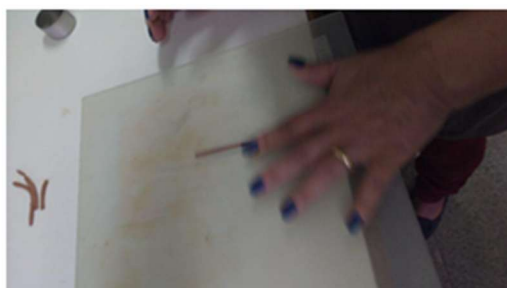
e_o = Índice de Vazios Inicial

Fotos sequenciais das fases executivas do ensaio.





Fotos sequenciais de todas as fases executivas dos ensaios.



4.3 – Ensaios de Permeabilidade à carga Variável

Os ensaios de permeabilidade à carga variável foram realizados nas amostras dos Blocos 1,2 e 4, moldadas diretamente nos blocos indeformados através de cilindros biselados com os seus parâmetros físicos conhecidos, o critério adotado foi à lei de Darcy, e de acordo com a Norma preconizada pela ABNT, ou seja, NBR- 15545 de 07/200.

Os gráficos de ensaio estão nos anexos de 5 a 7.

Quadros contendo os resultados dos ensaios, fotos ilustrativas e o critério de amostragem do painel de ensaio.



4.4 – Ensaio de Cisalhamento Direto

Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto determinou os parâmetros de resistência, ângulo de atrito e coesão, das amostras de bloco indeformado nº 1, 2 e 4.

Os ensaios foram executados segundo as especificações técnicas da norma ASTM D6528 – 07, Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive de acordo com a norma ASTM D 3080 - 03.



Para a realização dos ensaios foram moldados corpos de prova com comprimento de 100 mm e altura de 24 mm diretamente na célula de cisalhamento, nas condições naturais de umidade e densidade aparente.

Foram realizados ensaios em três amostras de bloco indeformado, totalizando 12 pontos. Os ensaios foram realizados com as amostras montadas na célula e embebidas em seguida durante um tempo de 15 minutos, esse processo de embebição faz com que a coesão e ângulo de atrito apresentem parâmetros que diferem. Em seguida foi submetida ao adensamento prévio até sua estabilização para torná-las mais representativas das suas situações atuais dos diques. As tensões normais utilizadas foram aproximadamente de 100, 200 e 400 kPa. A velocidade de deformação adotada, com base nos ensaios de no coeficiente de adensamento do material, para fase de cisalhamento foi de aproximadamente 0,40 mm/min.

Foi observado que o material ensaiado é um aterro de solo residual, constituído de Silte argiloso, com muita areia fina à grossa, com pedregulhos localizados, de cor variegada.

Destaca-se que os parâmetros, da envoltória de ruptura, apresentados neste relatório são valores característicos e foram obtidos através da possível de ser feita uma vez que o material apresentava consistência rija, e, portanto, em algumas condições, poderiam apresentar comportamento parcialmente drenado ou totalmente não drenado. Estes valores servem apenas para orientação a fim de se verificar de maneira bastante aproximada um padrão de resistência do material. Neste sentido, recomenda-se que o técnico responsável pela análise do projeto faça a sua própria interpretação dos resultados.

Os resultados com todos os gráficos e planilhas estão nos anexos de 8 a 13.

Quadro de resultados dos ensaios na sequência:



Bloco 1 - Prof. 1,50 - 2,00m - Embebido

QUADRO DE RESULTADOS DO ENSAIO - ÍNDICE FÍSICOS

σ_v (kPa)	Gs	γ_r (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω_o (%)	ω_f (%)	e_o
100	2,79	16,97	13,34	27,22	33,64	1,05
196	2,79	16,91	13,06	29,46	36,64	1,09
392	2,79	17,15	13,06	29,47	33,48	1,06

Legenda:

Parâmetros da envoltória de ruptura

σ'_c = Tensão confinante
 G_s = densidade real dos grãos
 γ_r = Peso específico total
 γ_d = Peso específico seco
 w_o = Teor de umidade inicial
 w_f = Teor de Umidade Final após imbebição

$$f = 23,5 \text{ o}$$
$$c' = 29,7 \text{ kPa}$$

Bloco 2 - Prof. 1,50 - 2,00m - Embebido

QUADRO DE RESULTADOS DO ENSAIO - ÍNDICE FÍSICOS

σ_v (kPa)	Gs	γ_r (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω_o (%)	ω_f (%)	e_o
100	2,79	16,97	13,31	27,49	33,64	1,06
196	2,79	16,91	13,21	28,04	34,26	1,07
392	2,79	17,15	13,21	29,42	35,83	1,06

Legenda:

Parâmetros da envoltória de ruptura

σ'_c = Tensão confinante
 G_s = densidade real dos grãos
 γ_r = Peso específico total
 γ_d = Peso específico seco
 w_o = Teor de umidade inicial
 w_f = Teor de Umidade Final após imbebição

$$f = 31,0 \text{ o}$$
$$c' = 14,8 \text{ kPa}$$

Bloco 4 - Prof. 1,50 - 2,00m - Embebido

QUADRO DE RESULTADOS DO ENSAIO - ÍNDICE FÍSICOS

σ_v (kPa)	Gs	γ_r (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	ω_o (%)	ω_f (%)	e_o
100	2,75	18,22	14,07	29,55	35,80	0,92
196	2,75	17,93	13,77	30,17	34,26	0,96
392	2,75	17,96	13,77	31,07	35,25	0,97

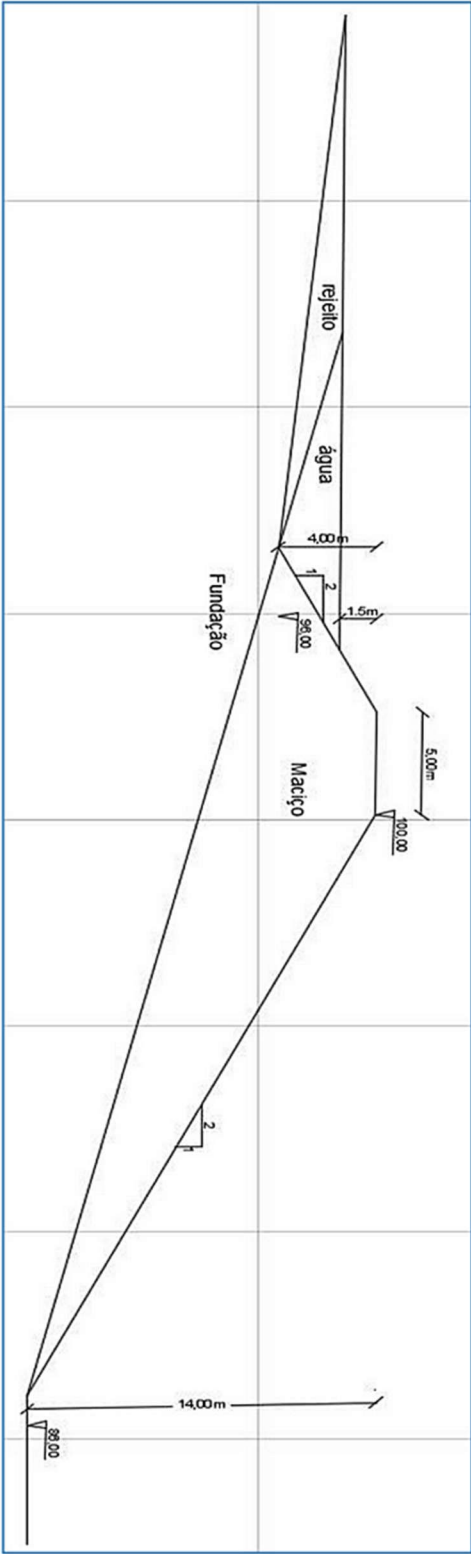
Legenda:

Parâmetros da envoltória de ruptura

σ'_c = Tensão confinante
 G_s = densidade real dos grãos
 γ_r = Peso específico total
 γ_d = Peso específico seco
 w_o = Teor de umidade inicial
 w_f = Teor de Umidade Final após imbebição

$$f = 25,0 \text{ o}$$
$$c' = 29,1 \text{ kPa}$$

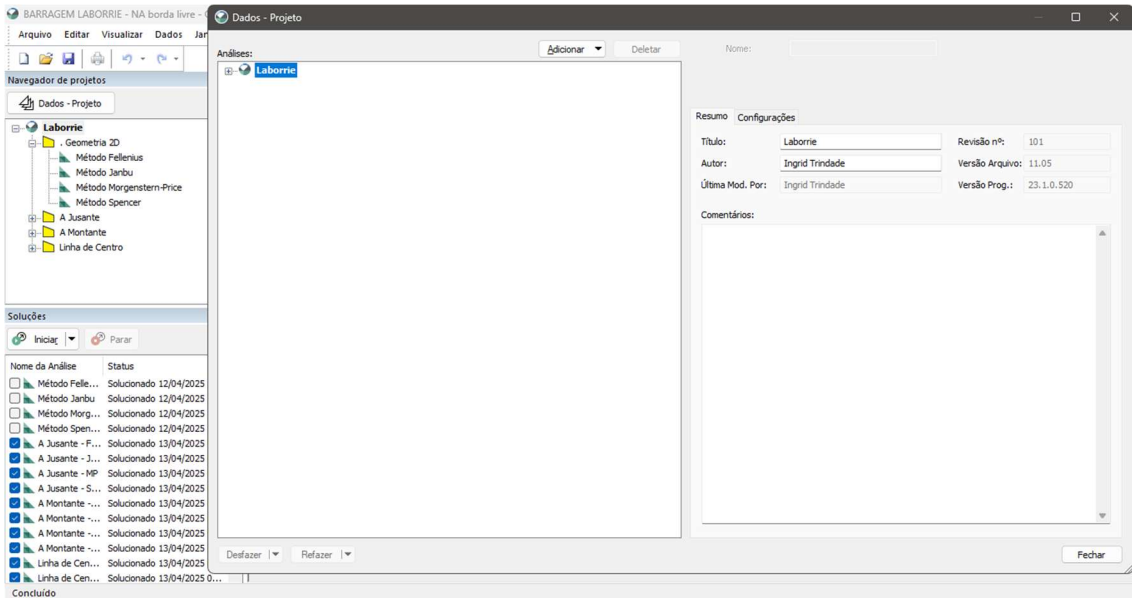
ANEXO C – PERFIL GEOMÉTRICO A PARTIR DAS DIMENÇÕES DA SEÇÃO PELO IMAP (Instituto de Meio Ambiente e Ordenamento Territorial do Amapá)



Fonte: Rambo (2020)

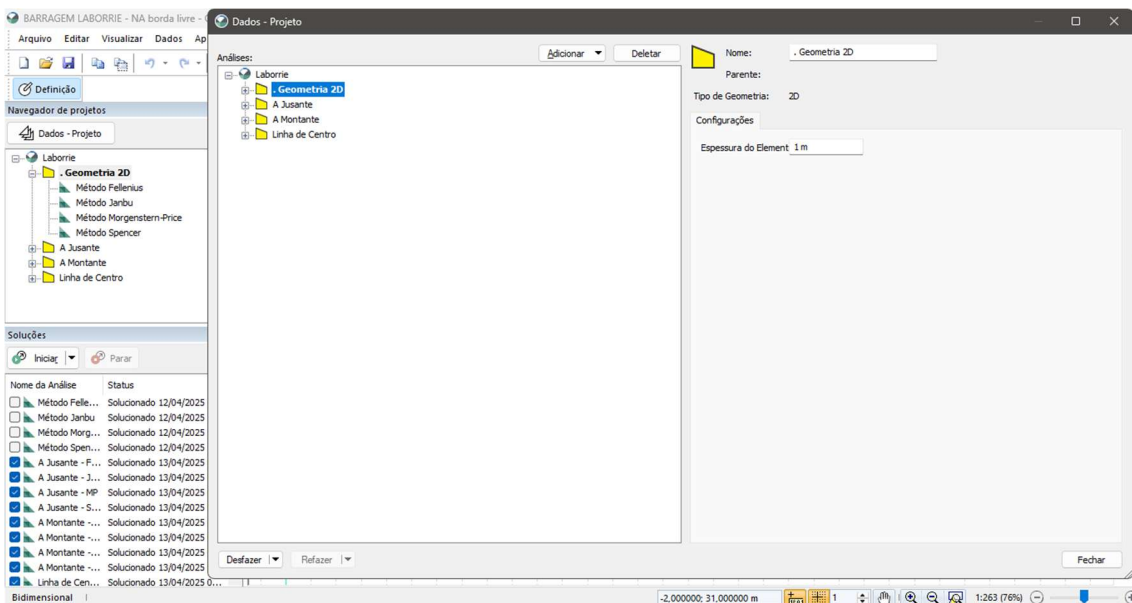
APÊNDICE

APÊNDICE A – GEOSTUDIO, PASSO 1: INCERSSÃO DE DADOS INICIAIS PARA ANÁLISE DO TALUDE ESTUDADO: TÍTULO DA ESTRUTURA E AUTOR



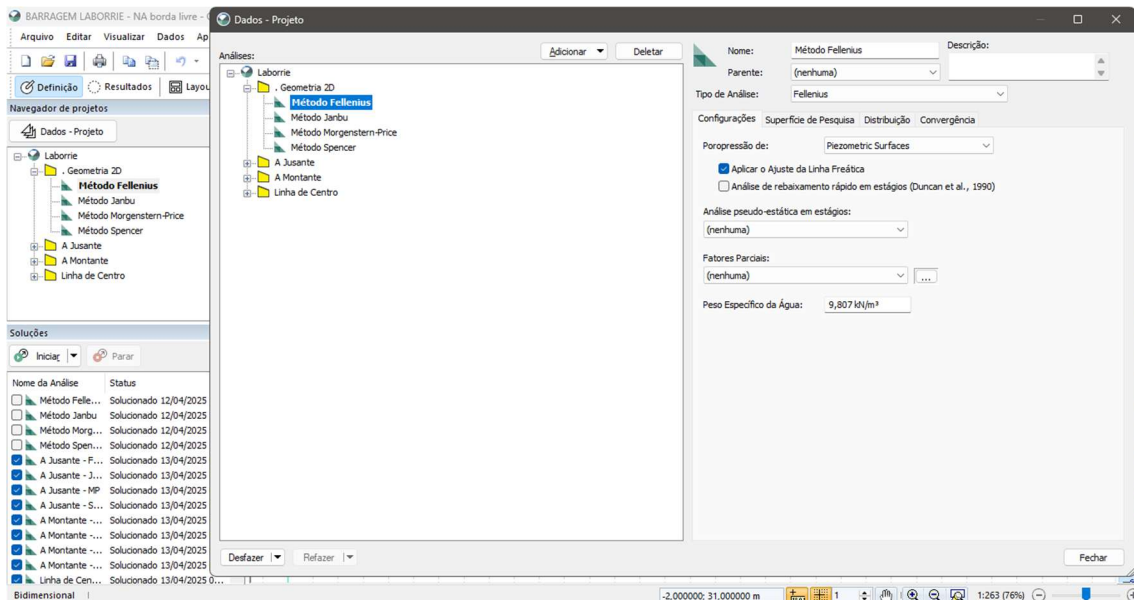
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE B – GEOSTUDIO: PASSO 2: INCERSSÃO DE DADOS INICIAIS PARA ANÁLISE DO TALUDE ESTUDADO: DEFINIÇÃO UNIDADE DE MEDIDA PARA A MODELAGEM EM 2D



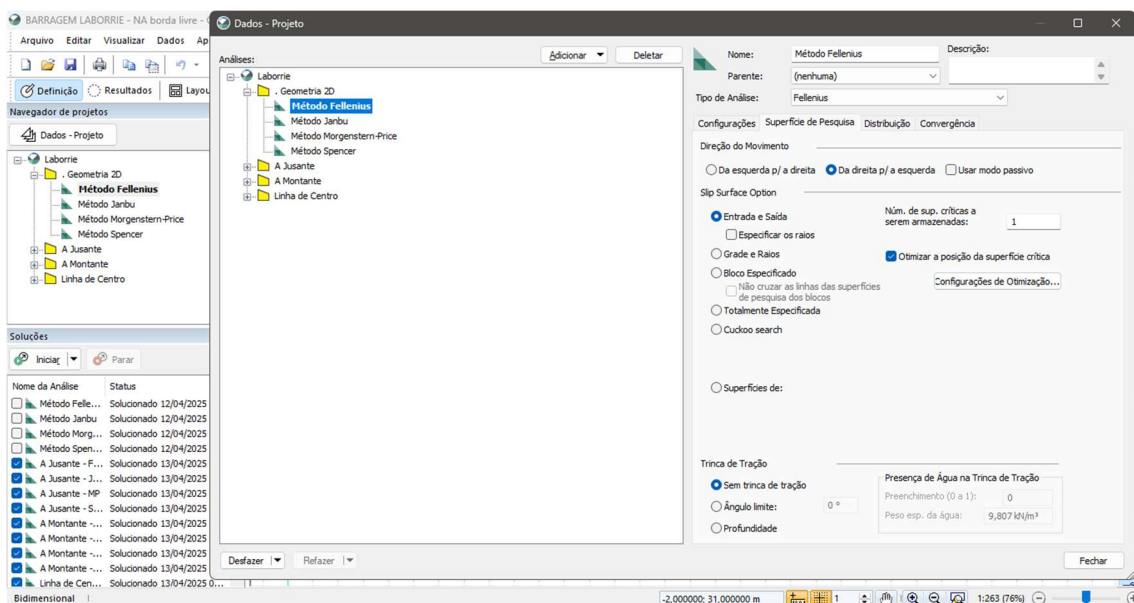
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE C – GEOSTUDIO: PASSO 3: ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE A PARTIR DA METODOLOGIA DE EQUILÍBRIO LIMITE COM AJUSTE PIEZOMETRICO (NÍVEL DE ÁGUA)



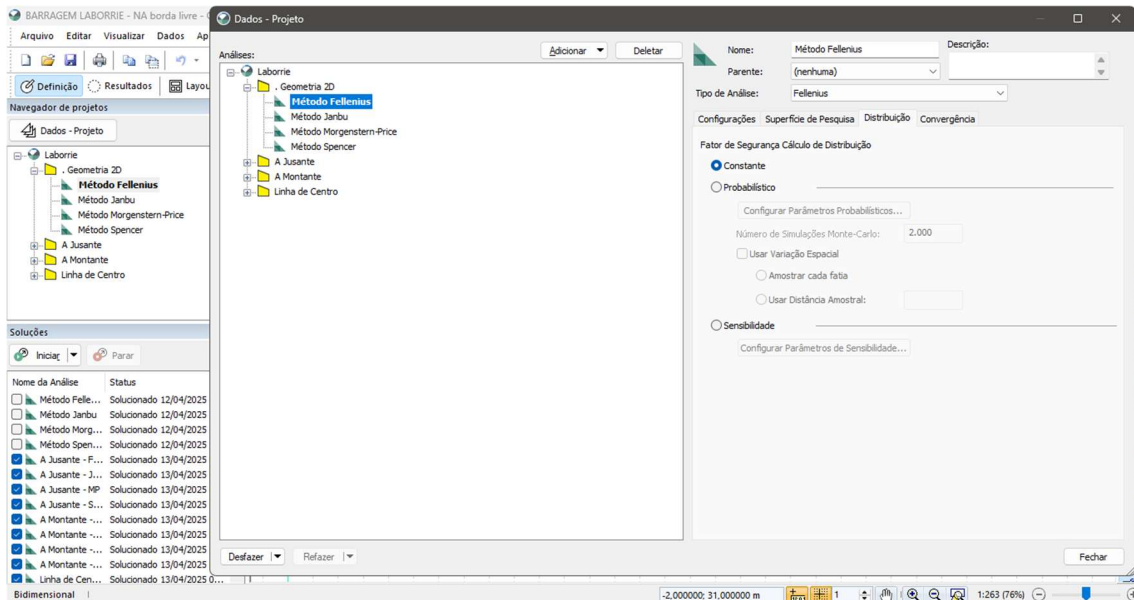
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE D – GEOSTUDIO: PASSO 4: ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE A PARTIR DA METODOLOGIA DE EQUILÍBRIO LIMITE COM AJUSTE DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA SEM FISSURA



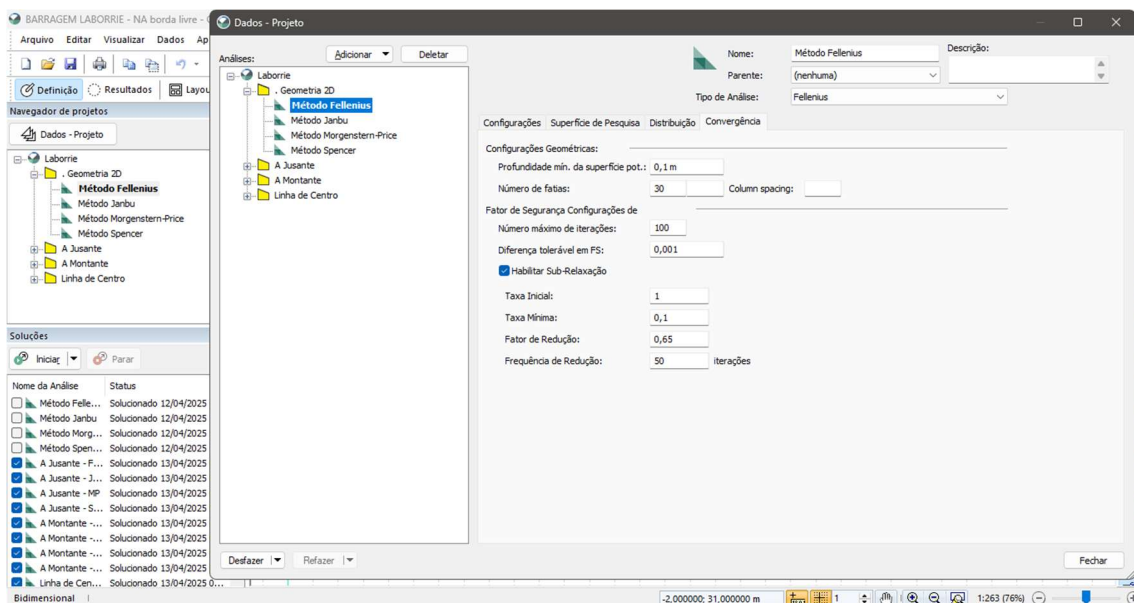
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE E – GEOSTUDIO: PASSO 5: ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE A PARTIR DA METODOLOGIA DE EQUILÍBRIO LIMITE COM DISTRIBUIÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA



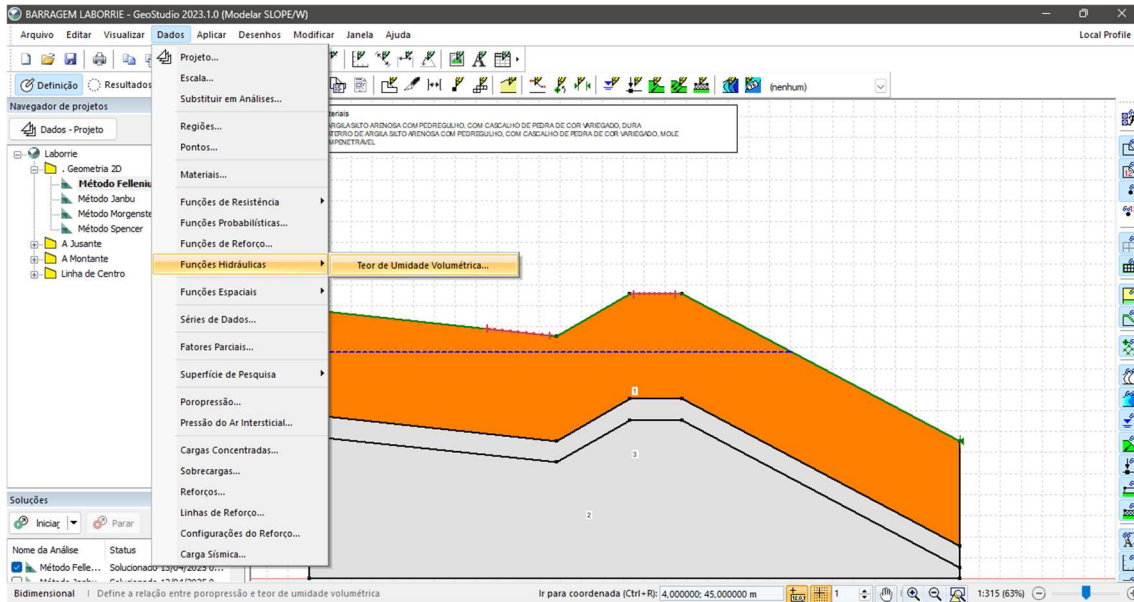
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE F – GEOSTUDIO: PASSO 6: ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE A PARTIR DA METODOLOGIA DE EQUILÍBRIO LIMITE COM DEFINIÇÃO DE CONFIGURAÇÕES NUMÉRICAS



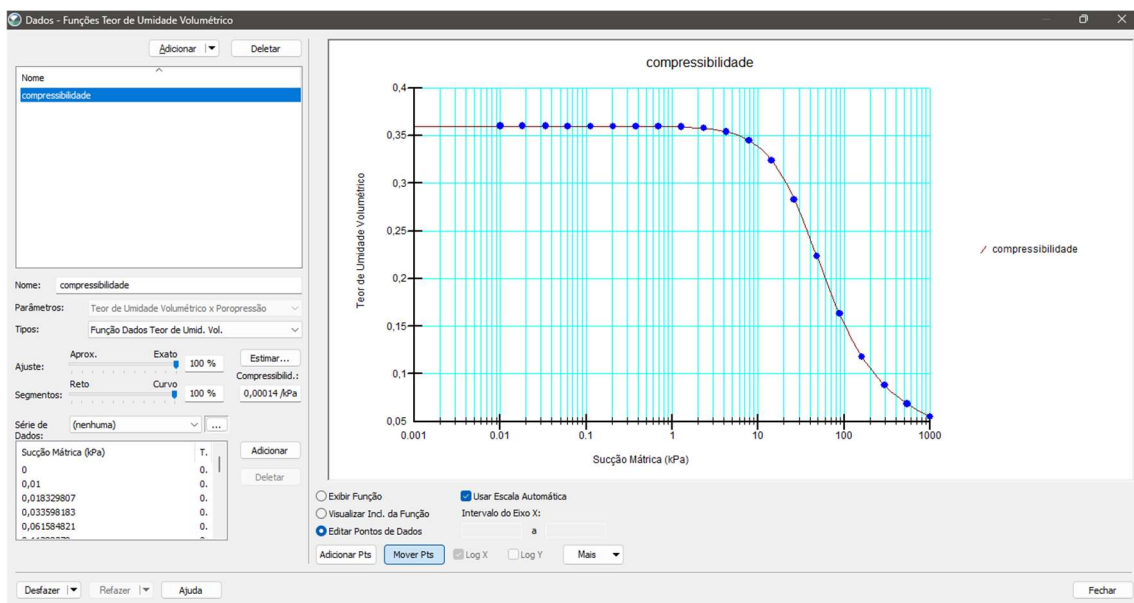
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE G – GEOSTUDIO: PASSO 7: INCLUSÃO DE DADOS DE FUNÇÕES HIDRÁULICAS: TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA



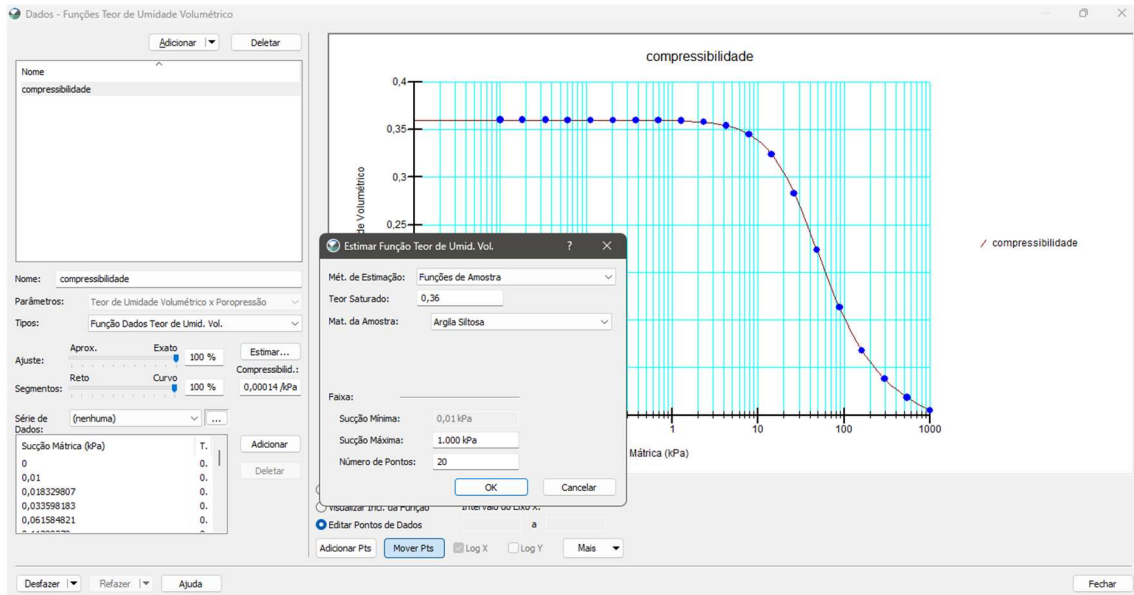
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE H – GEOSTUDIO: PASSO 9: INCLUSÃO DE DADOS DE FUNÇÕES HIDRÁULICAS: TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA: COMPRESSIBILIDADE EM KPA



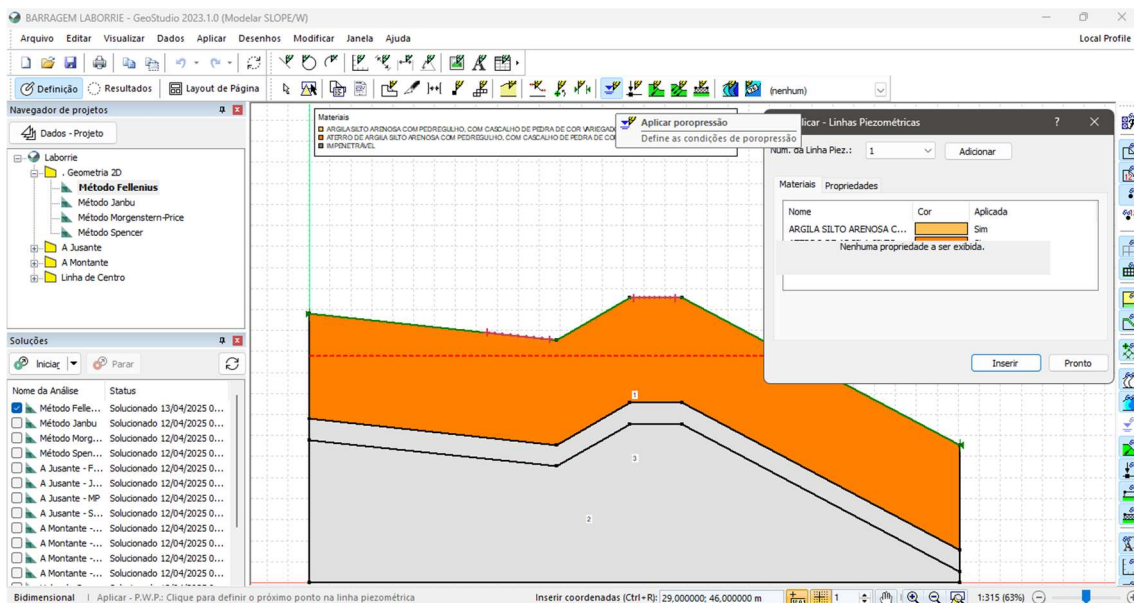
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE I – GEOSTUDIO: PASSO 10: INCLUSÃO DE DADOS DE FUNÇÕES HIDRÁULICAS: TEOR DE UMIDADE VOLUMÉTRICA: ESTIMATIVA DE FUNÇÃO DO TEOR DE UMIDADE A PARTIR DO TEOR SATURADO DO MATERIAL



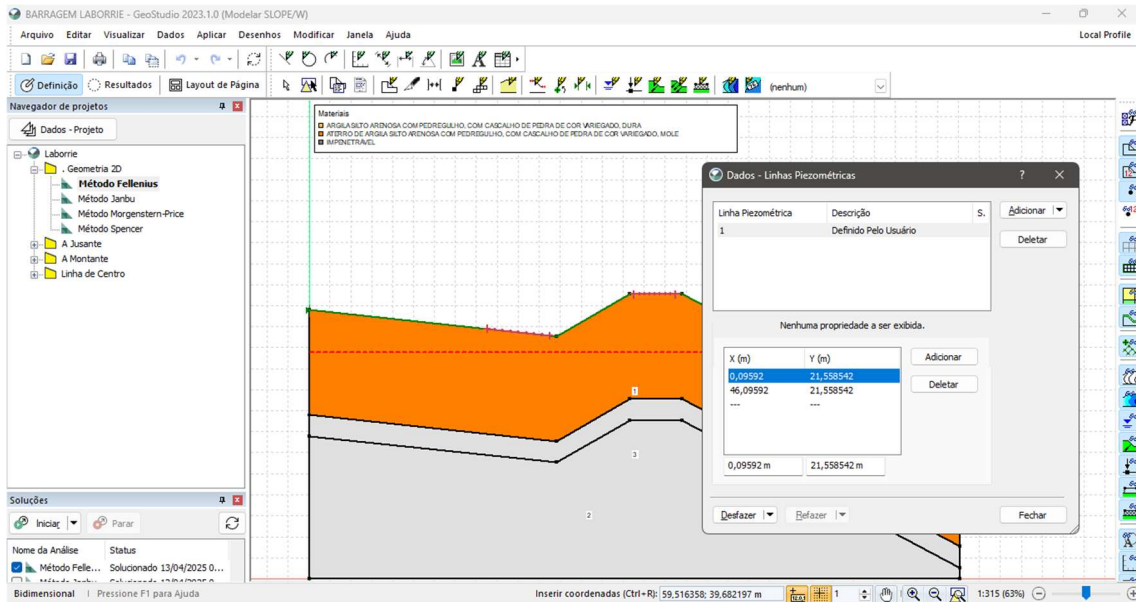
Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE J – GEOSTUDIO: PASSO 10: INCLUSÃO DE DADOS DE LINHA PIEZOMETRICA, NÍVEL DE ÁGUA



Fonte: Autoral (2025)

APÊNDICE K – GEOSTUDIO: PASSO 10: AJUSTE DA DISPOSIÇÃO DA LINHA PIEZOMETRICA NO PLANO, NÍVEL DE ÁGUA



Fonte: Autoral (2025)