



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**LEONARDO RANGEL DE CARVALHO**

**Avaliação da estabilidade e do comportamento geotécnico de uma  
barragem de rejeitos alteada pelo método linha de centro**

**Ouro Preto**

**2026**

**LEONARDO RANGEL DE CARVALHO**

**Avaliação da estabilidade e do comportamento geotécnico de uma  
barragem de rejeitos alteada pelo método de linha de centro**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Tatiana Barreto dos Santos

**Ouro Preto  
2026**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Leonardo Rangel de Carvalho**

**Avaliação da estabilidade e do comportamento geotécnico de uma barragem de rejeitos alteada pelo método linha de centro**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 22 de abril de 2026

### Membros da banca

Dr<sup>a</sup> Tatiana Barreto dos Santos - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto  
Eng. José Matheus Vieira Matos - Universidade Federal de Ouro Preto

Tatiana Barreto dos Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/04/2026



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/04/2026, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1097861** e o código CRC **51BD9F25**.

## AGRADECIMENTOS

Por toda minha vida, sempre agradei pelos aprendizados, oportunidades e pelas pessoas que cruzaram meu caminho, deixando contribuições valiosas em cada etapa da minha trajetória. Nesse sentido, chegar até aqui foi marcado pelo apoio de todos que fizeram parte dessa jornada, bem como pela determinação em desenvolver este trabalho.

Obrigado a minha mãe, Katiúscia, que, mesmo diante da distância, encontrou forças para me incentivar e apoiar em todos os momentos. Sua coragem e amor foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu pai, Woquiton, por ser exemplo de perseverança, e nunca mediu esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos, estando ao meu lado em cada passo e tornando possível que eu seguisse em frente.

Agradeço aos meus irmãos, Victor, Beatriz, Júlia e Arthur por existirem em meu caminho e deixar tudo mais leve e mais alegre. Vocês são meu porto seguro nos momentos difíceis e minha maior fonte de felicidade.

Ao meu namorado, Tiago, por todo amor, companheirismo, pelo apoio incondicional e por sempre acreditar em mim, vibrando com cada conquista e por nunca me deixar desanimar.

Aos amigos de Guanambi e Ouro Preto, pelas risadas, pela presença e por compartilharem cada momento ao longo desta trajetória.

A todos da Casa 04, pelos anos de convivência e por mostrarem, ao longo desse tempo, o quanto cada um é especial para mim. Todos os momentos compartilhados tornaram essa caminhada mais acolhedora e significativa.

À professora Tatiana, pela orientação e por ser minha fonte de inspiração na área da geotecnia, pela excelência profissional e pelos conselhos valiosos.

Aos professores Hernani e Rosa por fortalecerem em mim a paixão pela Engenharia de Minas e contribuírem para minha formação acadêmica.

À Walm Engenharia por ser minha segunda escola e por proporcionar um ambiente de aprendizado contínuo, essencial para o meu desenvolvimento profissional.

À Universidade Federal de Ouro Preto, à Escola de Minas, aos técnicos e professores do DEMIN, pelo ensino público de qualidade e pelos recursos disponibilizados, minha eterna gratidão pelos melhores e desafiadores dias da minha vida.

À Fundação Gorceix, pelo amparo e pelo incentivo acadêmico proporcionados ao longo desta trajetória.

E, mais importante, a Deus, pela dádiva da vida e por me guiar ao longo de toda essa caminhada.

*“Everything should be made as simple as possible, but not simpler”.*

Albert Einstein

## RESUMO

A segurança de barragens de rejeitos constitui um dos principais desafios da engenharia geotécnica, especialmente em função da complexidade dos processos envolvidos e das consequências associadas a eventuais falhas. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade global de uma barragem de rejeitos alteada pelo método de linha de centro, integrando análises de estabilidade com dados de instrumentação de nível d'água. A metodologia adotada envolveu: (i) a caracterização geotécnica dos materiais; (ii) análise do comportamento das leituras de indicadores de nível d'água (INA); (iii) definição da linha freática máxima por análise de sensibilidade; (iv) realização de análises de estabilidade por meio de métodos de Equilíbrio Limite, considerando os cenários de linha freática máxima e níveis de controle, em superfícies de ruptura circulares e não circulares, sob condições drenadas e não drenadas, além da realização de análises de percolação para a estimativa da superfície de percolação; e (v) definição dos níveis de controle em função dos registros de nível de água dos instrumentos e dos fatores de segurança (FS) a partir da variação da carga hidráulica máxima ( $\Delta h$ ). Os resultados indicaram que a barragem apresenta condições satisfatórias de estabilidade, com fatores de segurança, de modo geral, superiores aos estabelecidos pelas normas vigentes, sendo 1,3 para condições não drenadas e 1,5 para condições drenadas. Verificou-se que a elevação da linha freática exerce influência significativa na redução dos fatores de segurança, sendo a seção G a mais sensível a essas variações, comportamento associado à sua localização central na barragem, presença de materiais com menores parâmetros de resistência ao cisalhamento nessa região. A análise dos incrementos necessários para o atingimento dos níveis de controle indicou que, para o nível de Atenção, são necessárias elevações da linha freática entre aproximadamente 2,6 m e 6,0 m, enquanto para o nível de Alerta os incrementos podem atingir valores da ordem de 10,2 m a 10,9 m, e para o nível de Emergência ultrapassam 15 m. Esses resultados evidenciam que a estrutura opera com margem de segurança significativa em relação aos estados mais críticos, uma vez que tais variações são substancialmente superiores às registradas ao longo do período analisado. Adicionalmente, a análise dos intervalos de fator de segurança associados aos níveis de controle indicou que, para condições não drenadas de pico, os valores obtidos são, em geral, superiores aos limiares estabelecidos pela Resolução ANM nº 95/2022 para enquadramento em níveis de emergência. Tal comportamento está associado ao fato de que os cenários analisados foram definidos com base na linha freática máxima construída a partir de dados reais dos INA, representando condições críticas plausíveis e coerentes com o histórico da estrutura, que não apresenta registros de instabilidade. Dessa forma, conclui-se que a metodologia proposta se mostrou adequada para a avaliação integrada da estabilidade e do comportamento hidráulico da barragem, constituindo uma ferramenta robusta para o monitoramento e a gestão da segurança de estruturas de contenção de rejeitos. Ressalta-se que os níveis de controle definidos possuem caráter complementar aos critérios normativos, especialmente sob a perspectiva operacional, permitindo a integração entre a resposta hidráulica observada nos instrumentos e o desempenho geotécnico da estrutura. Por fim, destaca-se que a análise desenvolvida está restrita ao modo de falha por instabilidade de taludes, não contemplando outros mecanismos relevantes, como galgamento, erosão interna e liquefação.

**Palavras-chave:** barragens de rejeito; estabilidade de taludes; fator de segurança; linha freática; instrumentação geotécnica; níveis de controle.

## ABSTRACT

The safety of tailings dams constitutes one of the main challenges in geotechnical engineering, especially due to the complexity of the processes involved and the consequences associated with potential failures. In this context, the present study aims to evaluate the global stability of a tailings dam raised using the centerline method, integrating stability analyses with water level instrumentation data. The adopted methodology involved: (i) geotechnical characterization of the materials; (ii) analysis of water level indicator (INA) readings; (iii) definition of the maximum phreatic surface through sensitivity analysis; (iv) performance of stability analyses using Limit Equilibrium methods, considering scenarios based on the maximum phreatic surface and defined control levels, with circular and non-circular failure surfaces under both drained and undrained conditions, as well as seepage analyses for estimating the seepage surface; and (v) definition of control levels based on instrument water level records and factors of safety (FS) derived from variations in maximum hydraulic load ( $\Delta h$ ). The results indicated that the dam presents satisfactory stability conditions, with factors of safety generally exceeding those established by current standards, namely 1.3 for undrained conditions and 1.5 for drained conditions. It was observed that the rise of the phreatic surface significantly influences the reduction of safety factors, with Section G being the most sensitive to such variations, a behavior associated with its central location within the dam and the presence of materials with lower shear strength parameters in this region. The analysis of the increments required to reach the control levels indicated that, for the Attention level, phreatic surface rises between approximately 2.6 m and 6.0 m are required, while for the Alert level the increments may reach values on the order of 10.2 m to 10.9 m, and for the Emergency level they exceed 15 m. These results indicate that the structure operates with a significant safety margin relative to the most critical states, since such variations are substantially higher than those recorded during the analyzed period. Additionally, the analysis of the factor of safety intervals associated with the defined control levels indicated that, for peak undrained conditions, the obtained values are generally higher than the thresholds established by ANM Resolution No. 95/2022 for classification into emergency levels. This behavior is associated with the fact that the analyzed scenarios were defined based on the maximum phreatic surface constructed from real INA data, representing plausible critical conditions consistent with the historical behavior of the structure, which has no records of instability. Therefore, it is concluded that the proposed methodology proved to be suitable for the integrated evaluation of stability and hydraulic behavior of the dam, constituting a robust tool for monitoring and managing the safety of tailings containment structures. It is emphasized that the defined control levels are complementary to regulatory criteria, particularly from an operational perspective, allowing the integration of the hydraulic response observed in the instruments with the geotechnical performance of the structure. Finally, it is highlighted that the analysis developed in this study is limited to slope instability failure modes, not encompassing other relevant mechanisms such as overtopping, internal erosion, and liquefaction.

**Keywords:** tailings dams; slope stability; factor of safety; phreatic surface; geotechnical instrumentation; control levels.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.1 – Geometria de uma barragem alteada a montante .....                                | 6  |
| Figura 4.2 – Geometria de uma barragem alteada a jusante.....                                  | 8  |
| Figura 4.3 – Geometria de uma barragem alteada pelo método de linha de centro.....             | 9  |
| Figura 4.4 – Piezômetro de tubo aberto ou Casagrande .....                                     | 10 |
| Figura 4.5 – Indicador de Nível d'água.....  | 11 |
| Figura 4.6 – Régua linimétrica .....   | 12 |
| Figura 4.7 – Decomposição da força P .....   | 16 |
| Figura 4.8 – Divisão em fatias de uma superfície.....  | 18 |
| Figura 4.9 – Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer.....                      | 19 |
| Figura 4.10 – Determinação do Fator de Segurança.....  | 20 |
| Figura 4.11 – Esforços na fatia $n$ .....  | 21 |
| Figura 4.12 - Ações na $i$ -ésima fatia, método de Sarma .....                                 | 23 |
| Figura 4.13 – Representação de superfície de ruptura circular.....                             | 27 |
| Figura 4.14 – Representação de superfície de ruptura não circular.....                         | 27 |
| Figura 5.1 – Plano de ação do estudo .....   | 36 |
| Figura 5.2 – Representação dos materiais locados: (a) seção B, (b) Seção G e (c) seção J ..... | 39 |
| Figura 5.3 – Locação dos instrumentos na estrutura .....                                       | 40 |
| Figura 6.1 – Níveis do reservatório (2022-2025) .....  | 46 |
| Figura 6.2 – Seção B da barragem com o comportamento dos instrumentos no período. ....         | 47 |
| Figura 6.3 – Seção G da barragem com o comportamento dos instrumentos no período .....         | 48 |
| Figura 6.4 – Seção J da barragem com o comportamento dos instrumentos no período .....         | 48 |
| Figura 6.5 – Linha freática com os máximos dos instrumentos da seção B .....                   | 49 |
| Figura 6.6 – Linha freática com os máximos dos instrumentos da seção G.....                    | 49 |
| Figura 6.7 – Linha freática com os máximos dos instrumentos da seção J .....                   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 6.8 – Análises de estabilidade da seção B da barragem .....   | 51 |
| Figura 6.9 – Análises de estabilidade da seção G da barragem .....   | 52 |
| Figura 6.10 – Análises de estabilidade da seção J da barragem .....  | 53 |
| Figura 6.11 – Análise de percolação (Seção B) .....  | 56 |
| Figura 6.12 – Análise de percolação (Seção G).....   | 57 |
| Figura 6.13 – Análise de percolação (Seção J) .....  | 57 |
| Figura 6.14 – Intervalos dos níveis de controle dos instrumentos nas seções da barragem: (a) seção B, (b) seção G e (c) seção J..... | 60 |
| Figura 6.15 – Relação gráfica dos FS obtidos em função dos níveis de controle: Normal, Atenção e Alerta .....                        | 62 |
| Figura 6.16 – Análises de estabilidade para a seção B em função dos níveis de controle: (a) Normal, (b) Atenção e (c) Alerta .....   | 63 |
| Figura 6.17 – Análises de estabilidade para a seção G em função dos níveis de controle: (a) Normal, (b) Atenção e (c) Alerta .....   | 64 |
| Figura 6.18 – Análises de estabilidade para a seção J em função dos níveis de controle: (a) Normal, (b) Atenção e (c) Alerta .....   | 65 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4.1 – Níveis de controle associados aos valores de FS .....                                | 32 |
| Tabela 4.2 – Níveis de controle em função da variação máxima do nível d'água.....                 | 33 |
| Tabela 4.3 – Níveis de controle estabelecidos pela ANM (2022).....                                | 33 |
| Tabela 5.1 – Parâmetros de resistência dos materiais da barragem .....                            | 37 |
| Tabela 5.2 – Cotas características dos INA .....  | 40 |
| Tabela 5.3 – Condições de condutividade hidráulica (k) dos materiais da barragem.....             | 43 |
| Tabela 5.4 – Níveis de controle em função de h.....   | 44 |
| Tabela 5.5 – Níveis de controle em função do FS .....   | 45 |
| Tabela 6.1 – Elevação de referência dos indicadores de nível d'água.....                          | 49 |
| Tabela 6.2 – Fatores de segurança resultantes das análises de estabilidade .....                  | 50 |
| Tabela 6.3 – Variação do nível d'água $\Delta h$ em função das condições observada e crítica..... | 58 |
| Tabela 6.4 – Níveis de controle dos instrumentos em função de h (Seção B).....                    | 59 |
| Tabela 6.5 – Níveis de controle dos instrumentos em função de h (Seção G).....                    | 59 |
| Tabela 6.6 – Níveis de controle dos instrumentos em função de h (Seção J).....                    | 60 |
| Tabela 6.7 – Níveis de controle das seções em função do FS .....                                  | 66 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 4.1 – Modos de falha em barragens (continua)..... | 13 |
|--|----|

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico  
ANM – Agência Nacional de Mineração  
CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica  
CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
FS – Fator de Segurança  
GISTM – Global Industry Standard on Tailings Management  
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração  
ICMM – International Council on Mining and Metals  
ICOLD – International Commission on Large Dams  
IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas  
INA – Indicador de Nível de Água  
MEF – Método dos Elementos Finitos  
NBR – Norma Brasileira  
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens  
PVC – Policloreto de Vinila  
PZ – Piezômetro  
RL – Régua Linimétrica  
UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto  
USACE – United States Army Corps of Engineers

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>2.1 Objetivo geral</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>2.2 Objetivos específicos</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>3. JUSTIFICATIVA</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>6</b>  |
| <b>4.1 Métodos construtivos de barragem</b> .....                                  | <b>6</b>  |
| 4.1.1 Alçamento para montante.....   | 6         |
| 4.1.2 Alçamento para jusante .....   | 7         |
| 4.1.3 Alçamento pela linha de centro .....   | 8         |
| <b>4.2 Instrumentação de barragem</b> .....  | <b>9</b>  |
| 4.2.1 Piezômetros .....  | 10        |
| 4.2.2 Indicadores de nível d'água.....   | 11        |
| 4.2.3 Régua linimétrica.....   | 12        |
| <b>4.3 Modos de falha</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>4.4 Análise de estabilidade</b> .....   | <b>14</b> |
| 4.4.1 Método do Equilíbrio-Limite .....  | 15        |
| 4.4.2 Tipos de carregamento.....   | 25        |
| 4.4.3 Superfícies de ruptura.....  | 26        |
| 4.4.4 Percolação .....   | 28        |
| <b>4.5 Níveis de Controle</b> .....  | <b>30</b> |
| <b>4.6 Aspectos legais e normativos da segurança de barragens de rejeito</b> ..... | <b>33</b> |
| <b>5. METODOLOGIA</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>5.1 Área de estudo</b> .....  | <b>36</b> |
| <b>5.2 Caracterização geotécnica</b> .....   | <b>37</b> |
| 5.2.1.1 Dados considerados.....  | 37        |
| 5.2.2 Instrumentação .....   | 39        |
| <b>5.3 Definição da linha freática máxima</b> .....                                | <b>41</b> |
| <b>5.4 Simulações de estabilidade e percolação</b> .....                           | <b>41</b> |
| 5.4.1 Análises de estabilidade .....   | 41        |
| 5.4.2 Análises de percolação .....   | 42        |
| <b>5.5 Definição dos níveis de controle</b> .....                                  | <b>43</b> |
| <b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | <b>46</b> |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 6.1 | Condições de nível d'água da estrutura .....   | 46 |
| 6.2 | Análise de estabilidade na condição observada (linha freática máxima) .....                                      | 50 |
| 6.3 | Análise de percolação .....  | 56 |
| 6.4 | Definição dos níveis de controle .....   | 58 |
| 6.5 | Análise de estabilidade associada aos níveis de controle.....  | 61 |
| 7.  | CONCLUSÃO .....  | 69 |
|     | REFERÊNCIAS.....   | 72 |
|     | APÊNDICE A - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, DRENADA.....            | 79 |
|     | APÊNDICE B - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, DRENADA.....                | 80 |
|     | APÊNDICE C - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, NÃO DRENADO.....        | 81 |
|     | APÊNDICE D - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, NÃO DRENADO.....            | 82 |
|     | APÊNDICE E - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, DRENADA.....            | 83 |
|     | APÊNDICE F - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, DRENADA.....                | 84 |
|     | APÊNDICE G - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, NÃO DRENADA.....        | 85 |
|     | APÊNDICE H - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, NÃO DRENADA.....            | 86 |
|     | APÊNDICE I - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, DRENADA.....            | 87 |
|     | APÊNDICE J - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, DRENADA.....                | 88 |
|     | APÊNDICE K - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, NÃO DRENADA.....        | 89 |
|     | APÊNDICE L - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, NÃO DRENADA.....            | 90 |
|     | APÊNDICE M - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE NORMAL.....  | 91 |
|     | APÊNDICE N - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ATENÇÃO..... | 92 |
|     | APÊNDICE O - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ALERTA.....  | 93 |
|     | APÊNDICE P - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE NORMAL.....  | 94 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>APÊNDICE Q - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ATENÇÃO.....</b> | <b>95</b> |
| <b>APÊNDICE R - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ALERTA .....</b> | <b>96</b> |
| <b>APÊNDICE S - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE NORMAL .....</b> | <b>97</b> |
| <b>APÊNDICE T - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ATENÇÃO.....</b> | <b>98</b> |
| <b>APÊNDICE U - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ALERTA .....</b> | <b>99</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico e antrópico nas últimas décadas tem intensificado a exploração de jazidas minerais e, conseqüentemente, o volume de rejeitos gerados. Nesse sentido, as barragens são estruturas aplicadas para a destinação desses resíduos, o que implica a desafios técnicos complexos associados a estabilidade geotécnica, ao controle de percolação, à segurança estrutural e ao monitoramento contínuo do comportamento da estrutura (Pulino, 2010).

O setor minerário possui grande relevância no Brasil, com faturamento de cerca de 300 bilhões de reais em 2025, segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). O país é um dos principais fornecedores de minerais críticos e estratégicos no contexto global, possuindo destaque na produção de minério de ferro, bauxita, manganês e nióbio (IBRAM, 2025).

O crescimento da mineração tem implicado no aumento de rejeitos gerados, sendo as barragens de rejeitos o principal meio de destinação aplicado para esses materiais ao longo dos anos (Williams, 2018). Essas estruturas são projetadas para acomodar volumes variáveis de rejeitos ao longo da operação minerária, sendo frequentemente submetidas a alteamentos e modificações ao longo de sua vida útil para ampliação da capacidade de armazenamento (Azam; Li, 2010; ICOLD, 2011). No entanto, tais mudanças, associadas às condições operacionais e ambientais, podem introduzir fatores que comprometem a estabilidade do maciço (Rodríguez *et al.*, 2021).

A análise de estabilidade de uma barragem de rejeitos pode ser influenciada por diversos aspectos, tais como o método construtivo adotado (montante, jusante ou linha de centro), as características geotécnicas dos rejeitos e dos materiais de construção, o controle inadequado da drenagem interna, a elevação da linha freática, a ocorrência de chuvas intensas e a própria evolução geométrica (USACE, 2003).

Dessa forma, a avaliação da estabilidade de barragens de rejeito não deve se restringir a uma única condição, mas contemplar diferentes cenários que possam influenciar o comportamento geotécnico da estrutura (Barreto *et al.*, 2025). A análise conjunta das condições de drenagem, dos níveis de controle e do regime de percolação, das superfícies potenciais de ruptura e dos

carregamentos atuantes permite uma compreensão mais abrangente do desempenho global da barragem.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se analisar o comportamento das leituras de nível d'água, obtidas por meio da instrumentação geotécnica, com o objetivo de realizar análises de estabilidade e a avaliação do desempenho global de uma barragem de rejeitos. Adicionalmente, busca-se utilizar esses dados para a definição da condição freática e, a partir dela, integrar a análise de estabilidade ao monitoramento instrumental, permitindo estabelecer níveis de controle mais representativos para a avaliação da segurança de uma barragem alteada pelo método de linha de centro.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a estabilidade global de uma barragem de rejeitos alteada pelo método de linha de centro, em condição de carregamento estático, a partir da definição da condição freática com base em dados de instrumentação de nível d'água, com vistas à proposição de níveis de controle para a avaliação da segurança da estrutura.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar a estabilidade da barragem de rejeitos considerando superfícies de ruptura circular e não circular;
- Avaliar os fatores de segurança das seções analisadas em condição estática;
- Identificar os cenários mais críticos de estabilidade da estrutura;
- Analisar o comportamento temporal das leituras de nível d'água obtidas pelos instrumentos de monitoramento; e
- Aplicar cartas de controle para estabelecer limites de referência e auxiliar na definição dos níveis normal, atenção, alerta e emergência.

### 3. JUSTIFICATIVA

As atividades minerárias constituem um setor de grande relevância econômica no Brasil, envolvendo a implantação e operação de estruturas de grande porte, como pilhas de estéril, cavas e barragens de rejeito (IBRAM, 2022; ANM, 2021). Tais estruturas apresentam elevada complexidade técnica e representam desafios significativos à engenharia, especialmente no campo da geotecnia. Nesse contexto, a garantia da segurança estrutural torna-se um aspecto central, uma vez que eventuais falhas podem desencadear desastres de grandes proporções, com impactos ambientais, sociais e econômicos severos (ICOLD, 2020).

Os eventos de rompimento das barragens de rejeito ocorridos em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, acarretaram grandes impactos socioeconômicos e ambientais (ANA, 2021; Coelho; Wanderley; Miranda, 2023). Essas ocorrências enfatizaram a necessidade da adoção de legislações e regulamentações com maior rigor técnico quanto às operações associadas às barragens de mineração, destacando-se a lei nº 14.066/2020 e a Resolução nº 95/2022 da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Esses eventos também mostraram a importância da adequada avaliação das condições de estabilidade das barragens de rejeito, uma vez que falhas nesse aspecto estão diretamente associadas às causas das rupturas. Sob a perspectiva da engenharia geotécnica, as análises de estabilidade são essenciais para a adequada avaliação da segurança das barragens de rejeito, contribuindo para a mitigação de riscos e a prevenção de impactos ambientais e humanos.

Nesse sentido, realizar análises de estabilidade e monitoramento nessas estruturas é de extrema importância, visto que elas são complexas e envolvem diversos fatores, como as propriedades geotécnicas dos materiais constituintes, as condições de drenagem, geometria das seções analisadas e as condições atuantes. Além disso, há a influência das incertezas inerentes ao comportamento dos rejeitos e dos solos, as anomalias geológicas e a própria variabilidade do material depositado. Esses aspectos influenciam diretamente a estabilidade, o regime de fluxo interno e, conseqüentemente, o fator de segurança da estrutura. (Duncan; Wright, 2005).

Dessa forma, ao promover a redução de riscos associados a desastres, a proteção de recursos hídricos e o aprimoramento de práticas mais seguras na gestão de estruturas minerárias, este estudo se insere no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da

Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), com destaque para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), além de contribuições ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ao ODS 12 (Consumo e Produção Sustentável).

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

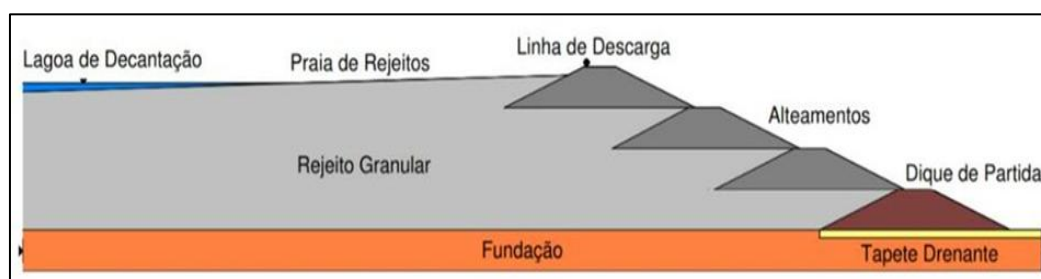
Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e fundamentos teóricos relacionados à análise de estabilidade de barragens de rejeito. São abordados os aspectos geotécnicos que influenciam o comportamento dessas estruturas, os principais métodos de análises de estabilidade fornecendo o embasamento técnico necessário para o desenvolvimento das análises realizadas neste trabalho.

### 4.1 Métodos construtivos de barragem

Barragens são estruturas construídas com a finalidade de conter e acumular materiais líquidos ou polpas resultantes das operações de processamento de minério. Geralmente, o processo de construção é realizado com o próprio rejeito, ou com aterro (ICOLD, 2011). De acordo com a ANM, os métodos construtivos podem ser: alteados a montante, alteados a jusante e alteamento por linha de centro.

#### 4.1.1 Alteamento para montante

No alteamento a montante tem-se a construção de um dique de partida de material argiloso ou enrocamento compactado. Por razões técnicas e construtivas, o rejeito é então lançado a montante da periferia da crista por canhões ou hidrociclones formando uma praia de deposição, que servirá como fundação e fornecerá material para execução dos alteamentos subsequentes, este processo é repetido continuamente até a cota final da barragem (Filho, 2004). A Figura 4.1 apresenta uma seção típica de uma barragem alteada pelo método a montante.



**Figura 4.1 – Geometria de uma barragem alteada a montante**  
Fonte: Filho (2004).

Segundo Vick (1990), esse método de alteamento caracteriza-se pela execução rápida e relativamente simples, apresentando vantagens como a utilização do próprio rejeito como fundação para os alteamentos subsequentes, o menor custo construtivo em comparação a outros métodos e a redução do tempo de execução quando comparado aos outros métodos.

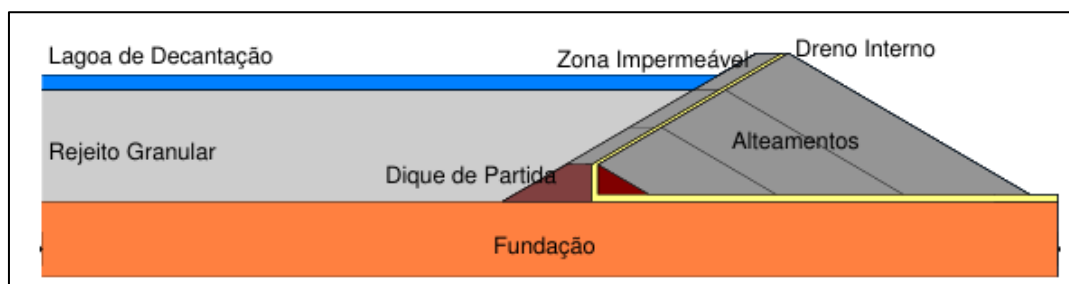
No entanto, possui desvantagens como elevada sensibilidade a eventos sísmicos e baixa capacidade de armazenamento de água, tanto temporária quanto permanente (Vick, 1990). Em condição saturada, rejeitos arenosos com comportamento contrátil ( $e > e$  crítico) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e maior suscetibilidade à liquefação sob carregamentos estáticos e dinâmicos (Olson; Stark, 2002).

Para o método, a dificuldade na implantação de um sistema de drenagem interna eficiente, capaz de controlar o nível d'água ao longo dos alteamentos, aumenta a probabilidade de diferentes modos de falha (Vick, 1990). Além disso, há limitação construtiva de alteamentos superiores a 15 metros por ano (Dias, 2021).

Segundo Filho (2004) há uma série de cuidados a serem tomados ainda na fase de construção da estrutura visando reduzir seu potencial risco. A realização de análises de estabilidade em condição drenada e não drenada durante todas as etapas do alteamento, a limitação da altura da estrutura para evitar a ocorrência de rupturas por cisalhamento na direção de montante e o estabelecimento de uma perfeita integração entre o projeto e a execução da barragem são medidas recomendadas para o aumento da segurança das barragens de rejeitos alteadas para montante (Filho, 2004).

#### 4.1.2 Alteamento para jusante

Esse método tem como etapa inicial o alteamento de um dique de partida, geralmente formado por solo ou enrocamento compactado e os alteamentos posteriores são realizados a jusante do dique de partida, até que a elevação de projeto seja alcançada (Fourie *et al.*, 2010). A Figura 4.2 apresenta uma seção típica de uma barragem alteada a jusante.



**Figura 4.2 – Geometria de uma barragem alteada a jusante**  
 Fonte: Filho (2004).

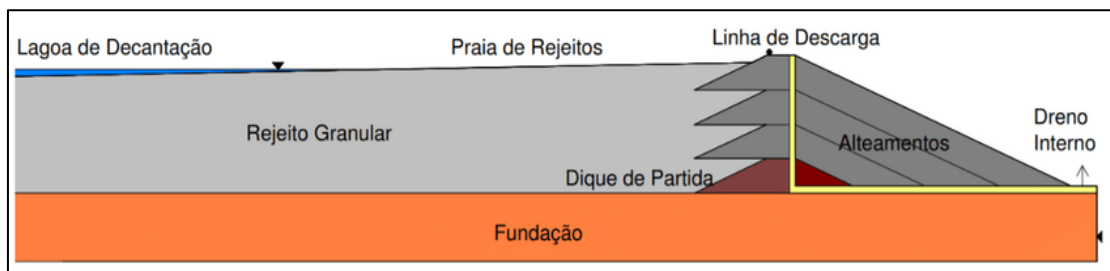
Dentre as técnicas de deposição de rejeito no método, o espigotamento periférico é o mais comum (ICMM, 2016). Rejeitos grossos são espalhados em camadas finas com ciclones ou transportados de um estoque central, depois compactados. Se o volume de rejeitos for insuficiente, podem ser usados materiais de empréstimo, e se houver rochas grossas, é necessária uma membrana impermeável a montante para evitar percolação (Fell *et al.*, 2005).

O método a jusante proporciona um grau de estabilidade que não é encontrado na construção a montante. Tal fato se deve à facilidade de compactação, à incorporação de medidas de controle da superfície freática e ao fato de que as elevações da barragem não dependem estruturalmente dos depósitos de rejeitos para a resistência da fundação (Vick, 1990).

Uma desvantagem importante deste método é o grande volume de material de enchimento necessário para elevar a barragem. Destaca-se que, o aumento do volume de enchimento pode elevar significativamente o custo da construção, além de que elevações a jusante também ocupam uma área relativamente grande, o que pode ser um problema se o espaço disponível for limitado (Vick, 1990; ICMM, 2016; Fourie *et al.*, 2010).

#### 4.1.3 Alteamento pela linha de centro

O alteamento pela linha de centro (Figura 4.3) é o método em que os alteamentos ocorrem no eixo da barragem e se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo parte a jusante e parte a montante em relação à crista da etapa anterior.



**Figura 4.3 – Geometria de uma barragem alteada pelo método de linha de centro**

Fonte: Filho (2004).

A linha central do aterro é mantida à medida que o enchimento e as elevações progressivas são colocados tanto na praia quanto na face a jusante. Os rejeitos colocados na inclinação a jusante devem ser compactados para evitar falha por cisalhamento. O método da linha central oferece algumas vantagens dos outros dois métodos, ao mesmo tempo em que reduz algumas de suas desvantagens (Vick, 1990). Dentre as vantagens, a facilidade construtiva, eixo constante e custos compatíveis, e desvantagens é a menor economia e escorregamentos potenciais (Chammas, 1989).

De acordo com Fell *et al.* (2005), as principais características desse método incluem: i) O aterro deve conter, pelo menos em parte, material permeável, permitindo o controle da pressão piezométrica; ii) o reservatório de água deve ser mantido afastado da borda do aterro, prevenindo o acúmulo excessivo de pressão piezométrica e controlando a erosão interna e o fenômeno de piping; e iii) é essencial que os rejeitos sejam depositados de forma controlada, por espigotagem ou ciclonação.

## 4.2 Instrumentação de barragem

De acordo com Fonseca (2003), a auscultação de uma barragem consiste no conjunto de processos destinados à observação, detecção e caracterização de possíveis deteriorações que possam representar risco à segurança global da estrutura e no seu controle operacional. Cruz (1996) aponta três pontos que são essenciais na instrumentação de barragens: verificar critérios, hipóteses e parâmetros estabelecidos no projeto; verificar se os métodos construtivos estão adequados; e avaliar as condições de segurança das obras.

Cada barragem necessita de um plano específico de monitoramento, como o local em que se encontra, os materiais que a compõe, o método utilizado para a construção e o tipo de operação, e por isso é indispensável a realização de estudos específicos para que a gestão seja eficiente

(Ribeiro, 2003). Nesse contexto, são utilizados diversos instrumentos de monitoramento de nível d'água e poropressão, como piezômetros, indicadores de nível e régua linimétrica para garantir o real entendimento da condição geotécnica da estrutura como mencionados na sequência.

#### 4.2.1 Piezômetros

Os Piezômetros (PZ) são utilizados para medir a poropressão no maciço, podendo operar com diferentes princípios de funcionamento. Entre eles, destacam-se os métodos de medição direta, nos quais a poropressão é determinada pela altura da coluna d'água, como nos piezômetros de Casagrande, e os métodos de medição indireta (Dunnicliff, 1988)

Os piezômetros (Figura 4.4) são constituídos por um tubo PVC em cuja extremidade inferior é acoplada uma célula, na qual é inserida em um bulbo de material drenante e confinada num trecho limitado de 1,0 a 1,5 m por uma camada selante, que é utilizada para vedar o espaço anular entre o tubo e o furo (Fonseca, 2003).

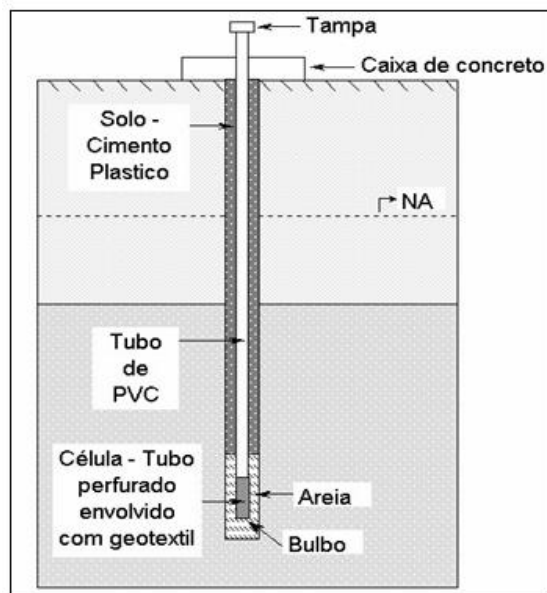


Figura 4.4 – Piezômetro de tubo aberto ou Casagrande

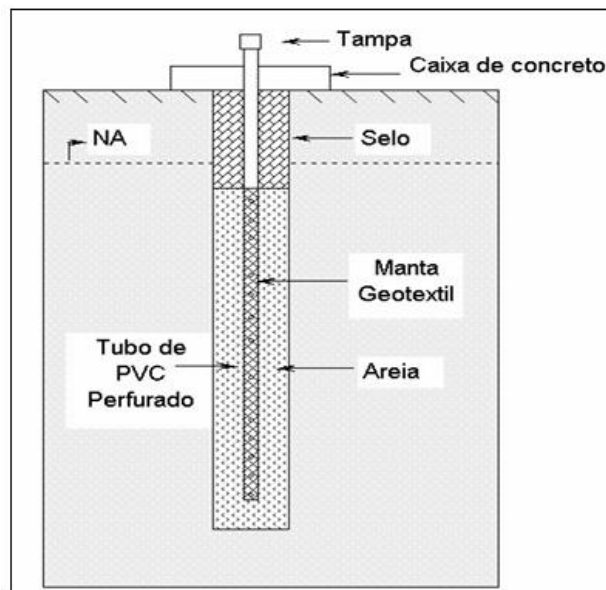
Fonte: Fonseca (2003).

Ainda, de acordo com Fonseca (2003), piezômetros de tubo aberto apresentam como principais vantagens a confiabilidade, simplicidade, durabilidade, baixo custo e a possibilidade de verificação de desempenho. Entretanto, possuem limitações como tempo de resposta elevado

em solos pouco permeáveis, interferência na construção, inadequação para medições durante a fase construtiva, incapacidade de medir pressões negativas e restrições de instalação e acesso. São amplamente utilizados na auscultação de barragens de terra e enrocamento, podendo ser instalados em fundações, ombreiras e no maciço, inclusive em diferentes profundidades no mesmo furo (USACE, 1995; ICOLD, 2012; Fonseca, 2003).

#### 4.2.2 Indicadores de nível d'água

Os Indicadores de Nível de Água (INA), ou medidores de nível d'água, são instrumentos para monitorar os níveis freáticos em barragens, são similares aos piezômetros, mas a diferença está na ausência do bulbo e do selo impermeável acima deste ponto (Fonseca, 2003). Sua estrutura é exemplificada na Figura 4.5.



**Figura 4.5 – Indicador de Nível d'água**  
Fonte: Fonseca (2003).

Os INA são formados por um tubo perfurado de PVC instalado dentro do furo de sondagem e envolto por material filtrante (geotêxtil) e drenante (areia), garantindo a integridade do furo (Fonseca, 2003). Uma camada selante é aplicada para vedar o espaço anular superior entre o tubo e o furo, enquanto uma estrutura de concreto na superfície protege o instrumento contra vandalismo. Os principais fatores que comprometem esses medidores são a obstrução do tubo por detritos e a colmatação dos sistemas filtrante e drenante ao redor (Fonseca, 2003).

O princípio básico dos instrumentos utilizados para medir o nível d'água em maciços de solo ou rocha consiste no acesso direto à água em profundidade, geralmente por meio da execução de furos com trado ou sondagem. A partir disso, determina-se a cota da superfície da água utilizando dispositivos de medição, normalmente compostos por um cabo graduado com sensor elétrico na extremidade inferior e um sinalizador sonoro ou luminoso na superfície (Fonseca, 2003).

Dentre as vantagens de utilizar indicadores de nível d'água incluem o monitoramento contínuo do nível d'água, a detecção precoce de problemas relacionados a alterações que possam indicar vazamentos, percolação anormal ou falhas na barragem, permitindo assim ação preventiva. Além disso, a facilidade de instalação e operação e o custo relativamente baixo comparados a outros instrumentos mais sofisticados.

#### 4.2.3 Régua linimétrica

As Réguas Linimétricas (RL) são instrumentos fundamentais no monitoramento hidrológico, sendo utilizadas para a medição contínua do nível d'água em rios, reservatórios e barragens (Tucci, 2009). A Figura 4.6 apresenta a representação da RL.



**Figura 4.6 – Régua linimétrica**  
Fonte: Adaptado de Brasil de Fato(2021).

De acordo com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2012), as RL consistem em uma escala graduada vertical destinada à medição das variações do nível da água ao longo do tempo, sendo amplamente empregada em estações fluviométricas e estudos de recursos hídricos. Esses dispositivos permitem a obtenção da cota hidráulica, a qual pode ser correlacionada com a vazão por meio de curvas-chave, possibilitando a análise do regime hidrológico dos cursos d'água (ANA, 2012).

### 4.3 Modos de falha

A ruptura de barragens de rejeitos pode ocorrer devido a diversos fatores, como galgamento, instabilidade de taludes, erosão interna, erosão externa, ação sísmica e danos aos sistemas de decantação, entre outros. As causas dessas falhas, bem como suas respectivas medidas corretivas, conforme o Boletim 106 do ICOLD (2001), estão apresentadas no Quadro 4.1.

**Quadro 4.1 – Modos de falha em barragens (continua)**

| <b>Modo de falha</b>            | <b>Causa</b>   | <b>Medida corretiva</b>   |
|---------------------------------|--|---|
| <b>Galgamento (Overtopping)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionamento hidrológico ou hidráulico inadequado;</li> <li>• Perda de bordo livre devido ao recalque da crista.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de gabiões, rejeitos de mina ou material de empréstimo ao redor para elevar rapidamente a crista e aumentar a resistência do maciço;</li> <li>• Abertura de bombas de emergência e vertedouros.</li> </ul>                 |
| <b>Instabilidade de talude</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobretensão do solo de fundação e do maciço;</li> <li>• Controle inadequado da pressão de poros.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reforço do solo e medidas de estabilização;</li> <li>• Instalação de drenos na base do talude de jusante para reduzir a pressão horizontal (filtros evitam entrada de material).</li> </ul>                                    |
| <b>Erosão interna</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle inadequado da percolação;</li> <li>• Sistema de filtros e drenagem inadequado;</li> <li>• Controle construtivo deficiente, resultando em trincas ou vazamentos em condutos.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevação do maciço de jusante com camada drenante;</li> <li>• Instalação de drenos horizontais para alívio de pressão;</li> <li>• Execução de trincheiras profundas em direção ao talude de jusante.</li> </ul>                |
| <b>Erosão externa</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Proteção inadequada do talude e da base.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetação no talude de jusante;</li> <li>• Colocação de material britado no talude de jusante;</li> <li>• Construção de bermas no talude de jusante;</li> <li>• Uso de enrocamento (rip-rap) junto ao pé do talude.</li> </ul> |

**Quadro 4.1 – Modos de falha em barragens (continuação)**

| <b>Modo de falha</b>                                | <b>Causa</b>   | <b>Medida corretiva</b>  |
|---|--|--|
| <b>Ação sísmica</b>                                 | <ul style="list-style-type: none"><li>• Taludes íngreme;</li><li>• Liquefação do maciço e do solo de fundação.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Preenchimento de trincas com material adequado.</li></ul>  |
| <b>Danos ao sistema de descarga (decant system)</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Recalque excessivo;</li><li>• Ataque químico ao concreto/aço.</li></ul>          | <ul style="list-style-type: none"><li>• Abertura de bombas de emergência ou vertedouros.</li></ul> |

Fonte: Adaptado de ICOLD Bulletin 106 (2001).

Dentre os modos de falha apresentados, a instabilidade de taludes destaca-se como um dos mecanismos mais críticos em barragens de rejeitos, uma vez que está diretamente associada à perda de resistência ao cisalhamento dos materiais e ao aumento das pressões neutras no interior do maciço (Vick, 1990). Esse tipo de ruptura pode ocorrer de forma progressiva ou abrupta, sendo frequentemente influenciado por variações da linha freática, condições de carregamento e características geotécnicas dos materiais constituintes. Em barragens de rejeitos, esse cenário torna-se ainda mais relevante devido à elevada suscetibilidade desses materiais à saturação e à geração de poropressões, o que pode reduzir significativamente os fatores de segurança (Terzaghi *et al.*, 1996).

Nesse contexto, a análise da estabilidade de taludes assume papel importante na avaliação da segurança dessas estruturas, o que constitui o foco do presente trabalho. Dessa forma, na sequência, são apresentados os principais métodos de análise de estabilidade aplicáveis a esse tipo de problema.

#### **4.4 Análise de estabilidade**

As análises de estabilidade são essenciais para monitoramento de barragens e taludes, elas visam garantir a segurança da estrutura e das comunidades que estão em sua área de influência (Duncan, 2014). Para realizar a análise de estabilidade é fundamental avaliar o equilíbrio entre as forças atuantes. As forças associadas ao peso do material e à ação da água tendem a promover o movimento da massa (forças mobilizadoras), enquanto a resistência ao cisalhamento atua em sentido oposto, dificultando ou impedindo esse movimento (Fiori, 2015).

Dessa maneira, Silva (2019) faz um comparativo da resistência ao cisalhamento com as tensões mobilizadoras da superfície de ruptura, onde denomina-se o Fator de Segurança (FS) apresentada na Equação 1.

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}} \quad 1$$

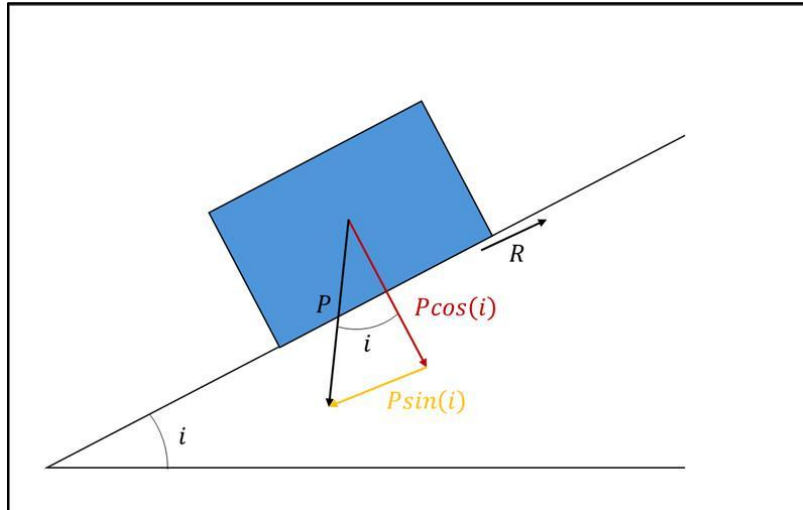
Sendo que:  $\tau_{res}$  são as tensões cisalhantes resistentes; e  $\tau_{mob}$  são as tensões cisalhantes mobilizadoras

Para obter o fator de segurança (FS) o método mais utilizado é o equilíbrio-limite, que são aqueles em que a ruptura ocorre ao longo da superfície e o trecho rompido se comporta como uma massa deslizando (Junior, 1975). Thomaz (1984) destaca que o método do equilíbrio limite tem grande aceitação devido a fatores como simplicidade, nível de acurácia satisfatório dos resultados e o baixo custo para o processo de estimativa dos parâmetros de resistência do solo com a confiabilidade necessária para o funcionamento adequado do método.

#### 4.4.1 Método do Equilíbrio-Limite

Os métodos de equilíbrio-limite levam em consideração algumas hipóteses definidas por Massad (2010): (i) o solo apresenta ruptura súbita, sem sofrer deformações significativas; (ii) são adotados valores médios para os parâmetros de resistência; (iii) o material é considerado homogêneo e contínuo dentro de uma mesma camada; (iv) as equações de equilíbrio estático permanecem válidas até a iminência da ruptura; e (v) o fator de segurança (FS) é assumido como constante ao longo de toda a superfície de ruptura.

De acordo com Fiori (2015) a análise do equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura ou o movimento são exatamente balanceadas pelas forças resistentes. De modo a representar essa constatação, apresenta-se na Figura 4.7 um bloco apoiado num plano inclinado de ângulo  $i$ .



**Figura 4.7 – Decomposição da força P**  
 Fonte: Adaptado de Fiori (2015).

O esquema expressa que o bloco é solicitado pelo seu próprio peso (P) e a componente tangencial ( $P \sin(i)$ ) é o que tende a causar o seu movimento. A componente normal ( $P \cos(i)$ ) atua na perpendicular a base do bloco, que é a superfície de escorregamento e o vetor R representa a força de resistência a movimentação, sendo obtido pela Equação 2.

$$R = \tau \cdot A \tag{2}$$

Sendo que:  $\tau$  é a resistência ao cisalhamento no contato bloco-plano inclinado; e A é área da base do bloco.

Pela Lei de Coulomb a  $\tau$  é obtida conforme a Equação 3.

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi) \tag{3}$$

Sendo que:  $c$  é a coesão; e  $\phi$  é o ângulo de atrito interno no contato bloco e superfície de apoio.

Levando em conta que a tensão é dada pela razão entre a força (F) e a área (A), conforme a Equação 4 a seguir:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{4}$$

tem-se que  $\sigma_n$  é dada pela Equação 5.

$$\sigma_n = \frac{P \cdot \cos(i)}{A} \quad 5$$

Assim, substituindo (5) em (3) e considerando-se que entre o contato do bloco e a superfície de apoio não há coesão, ou seja  $c = 0$ , tem-se a Equação 6.

$$\sigma_s = \frac{P \cdot \cos(i)}{A} \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad 6$$

Assim, pela Equação 2, tem-se que  $A = R/\tau$  e substituindo em (6), obtém se a Equação 7.

$$R = P \cdot \cos(i) \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad 7$$

Em que  $\operatorname{tg}(i) = \operatorname{tg}(\phi)$ .

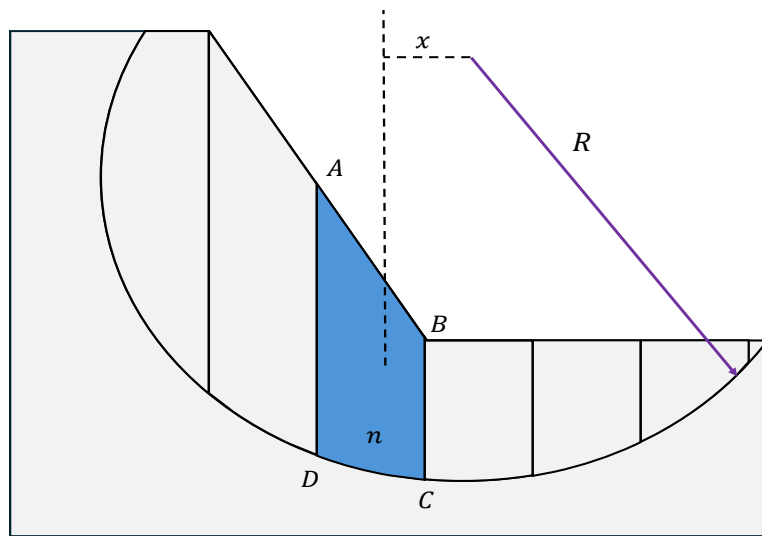
Comparando-se as diferentes condições de equilíbrio-limite, o fator de segurança (FS) é a razão entre o resultante das forças resistente ao escorregamento a resultante das forças solicitantes ou favoráveis ao movimento. Assim, da Equação 1 substituindo os respectivos valores, obtém-se a Equação 8.

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}} \rightarrow FS = \frac{P \cdot \cos(i) \cdot \operatorname{tg}(\phi)}{P \cdot \operatorname{sen}(i)} \rightarrow FS = \frac{\operatorname{tg}(\phi)}{\operatorname{tg}(i)} \quad 8$$

Nesse sentido, de acordo com Fiori (2015) na condição de equilíbrio-limite e com  $c = 0$ , o ângulo de inclinação  $i$  do plano de movimento é igual ao ângulo de atrito interno  $\phi$ . Valores com FS maior que a unidade,  $i < \phi$ , indica que as forças resistentes são maiores que as solicitantes, logo, o talude estará em equilíbrio. No entanto, FS menores que a unidade,  $i > \phi$ , indicam que as forças solicitantes são maiores que as resistentes e o maciço estará em desequilíbrio.

#### 4.4.1.1 Método das Fatias

O método das fatias foi desenvolvido pelo engenheiro sueco Fellenius (1936) e é conhecido como método sueco ou de fatias. Segundo Fiori (2015) ele se baseia na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento de seção circular, e esse volume é dividido em fatias verticais. A Figura 4.8 apresenta a representação da divisão em fatias de uma superfície desenvolvida por Peterson e Fellenius (1936).



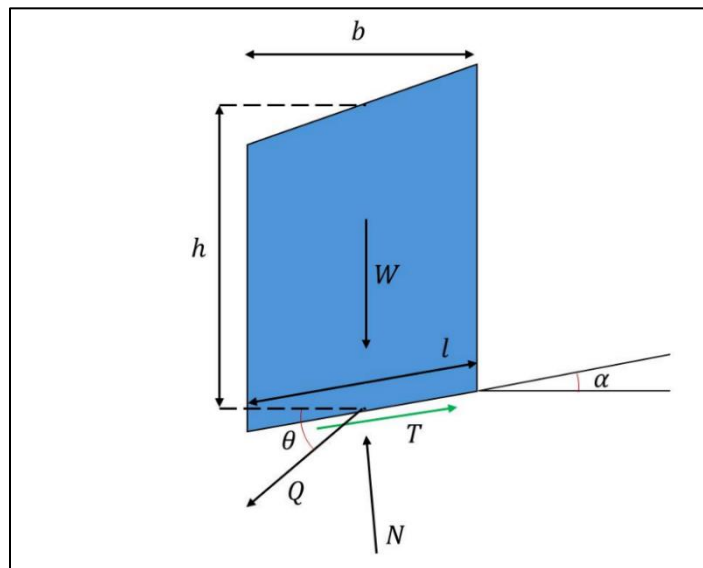
**Figura 4.8 – Divisão em fatias de uma superfície**  
Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016).

De acordo com Duncan, Wright e Brandon (2014), as superfícies de ruptura avaliadas podem ser tanto circulares quanto forma arbitrária (não circulares). Os métodos que consideram rupturas circulares reputam o equilíbrio de momento em relação ao centro do círculo de todo o corpo-livre, composto por todas as fatias. Já os métodos que avaliam rupturas não circulares usualmente consideram o equilíbrio em termos de cada fatia.

Gerscovich (2016), aborda que o método das fatias é o mais utilizado em estudos de estabilidade de taludes, devido não apresentar restrições referentes a homogeneidade do solo, geometria do talude e sobre as tensões efetivas ou totais. Além disso, o método das fatias determina o equilíbrio de uma massa ativa no solo, logo, assume-se que o método de ruptura ocorre ao longo de uma superfície e que todos os elementos dessa superfície alcancem a mesma condição com  $FS = 1$  simultaneamente (Fiori, 2015).

#### 4.4.1.2 Método de Spencer

O método de Spencer (1967) baseia-se nas condições de equilíbrio limite e é, assim como o Método de Morgenstern e Price, considerado o método mais rigoroso em relação as equações de equilíbrio. As forças de interação entre fatias são paralelas formando um ângulo  $\theta$  de inclinação atendendo as três condições de equilíbrio. A Figura 4.9 apresenta a representação das forças atuantes na base da fatia.



**Figura 4.9 – Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer**

Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).

Neste método considera-se as forças de interação entre fatias, sendo substituídas por uma resultante ( $Q$ ), que atua no ponto médio de uma fatia. Com isso, a manipulação das equações dessa resultante é dada pela Equação 9:

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot l}{FS} + \frac{(W \cdot \cos(\alpha) - u \cdot l) \cdot \tan(\phi')}{FS} - W \cdot \sin(\alpha)}{\cos(\alpha - \theta) \cdot \left(1 + \frac{\text{tg}(\phi') \cdot \text{tg}(\alpha - \theta)}{FS}\right)} \quad 9$$

Considerando que não exista forças externas atuando no talude nas componentes verticais e horizontais, tem-se as Equações 10 e 11.

$$\sum Q \cdot \cos\delta = 0 \quad 10$$

$$\sum Q \cdot \sin\delta = 0 \quad 11$$

O método considera que a soma dos momentos das forças externas e das forças entre as fatias em relação ao centro de rotação é nula, levando à simplificação das equações até a condição  $\sum Q = 0$ . Para tornar o sistema solucionável, Spencer (1967) assumiu que as forças entre as fatias são paralelas e que o ângulo  $\delta$  é constante ao longo do talude. A solução final é obtida graficamente, variando  $\delta$  e encontrando o ponto de interseção das curvas, que define o fator de segurança e a inclinação do talude (Figura 4.10).

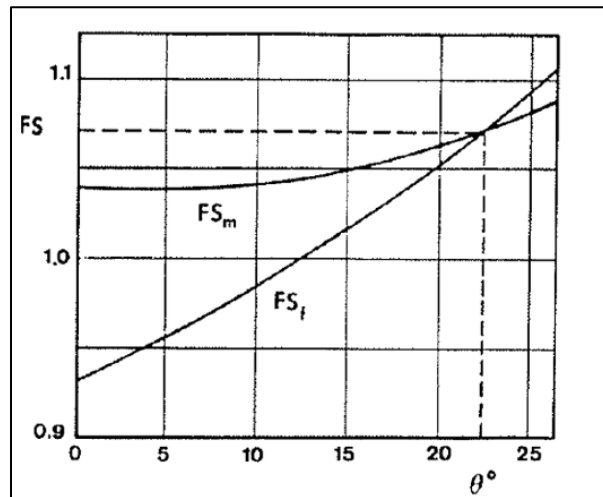


Figura 4.10 – Determinação do Fator de Segurança  
Fonte: Spencer (1967).

#### 4.4.1.3 Método GLE (Equilíbrio Limite Generalizado)

O Método de Equilíbrio Generalizado é, segundo Ferreira (2012), uma extensão dos métodos de Spencer e de Morgenstern-Price uma vez que também recorre a uma função arbitrária  $f(x)$  para determinar as forças de interação entre fatias e a estimativa do FS é feita através do cálculo de dois fatores de segurança, um resulta do equilíbrio de forças  $FS_f$  e outro resulta do equilíbrio de momentos ( $FS_m$ ). Como apresentados nas Equações 12 e 13.

$$FS_f = \frac{\sum(c'\beta\cos\alpha + (N - u\beta)R \cdot \operatorname{tg} \phi' \cos\alpha)}{\sum N \cdot \sin\alpha + D\cos\omega} \quad 12$$

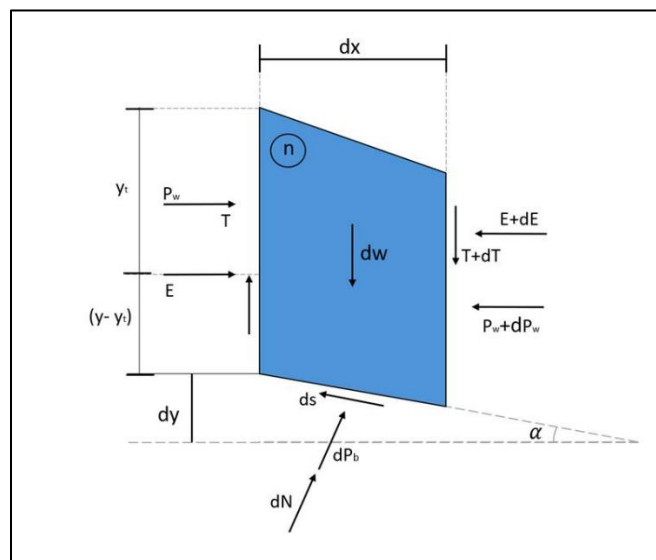
$$FS_m = \frac{\sum(c'\beta R + (N - u\beta)R \cdot \operatorname{tg} \phi' \cos\phi)}{\sum Wx - \sum Nf \pm Dd} \quad 13$$

Onde  $\beta$ ,  $R$ ,  $x$ ,  $f$  e  $d$  são parâmetros geométricos e  $D$  a linha de impulso (linha que contém os pontos laterais onde estão aplicadas as forças de interação entre fatias ao longo do talude). A variável  $N$  define a força normal na base da fatia e é obtida pela Equação 14.

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c'\beta \sin\alpha \cdot \operatorname{tg}\phi'}{(FS_f \text{ ou } FS_m)}}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \operatorname{tg}\phi'}{(FS_f \text{ ou } FS_m)}} \quad 14$$

#### 4.4.1.4 Método das Morgenstern-Price

O método de Morgenstern-Price, proposto em 1965, atende a todas as condições de equilíbrio, sendo classificado como um método rigoroso. Sua aplicação baseia-se em equações diferenciais que descrevem o equilíbrio de momentos e o equilíbrio de forças em cada fatia. Os esforços atuantes em fatias infinitesimais estão ilustrados na Figura 4.11.



**Figura 4.11 – Esforços na fatia  $n$**   
Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016).

Os parâmetros apresentados na Figura 4.11 são dados por:  $dW$  o peso da fatia;  $P_w$  a poropressão no contorno entre fatias;  $dP_b$  a resultante da poropressão na base da fatia;  $d_s$  a resistência na base; e  $E$  e  $T$  os esforços entre fatias atuando em  $(y - y_t)$ .

Assim o equilíbrio de momentos e equilíbrio de forças entre fatias são definidos, respectivamente, pelas Equações 15 e 16.

$$(y'_1 - y_1) \frac{dE}{B} + E_1 \frac{dy'}{b} - X_1 = 0 \quad 15$$

$$\frac{c'}{FS} [1 + tg^2 \alpha] + \frac{tg\phi'}{FS} \left[ \frac{dW}{b} + \frac{dX}{b} - \frac{dE}{b} tg\alpha - u \cdot (1 + tg^2 \alpha) \right] = \frac{dE}{b} + \frac{dX}{b} tg\alpha + \frac{dW}{b} tg\alpha \quad 16$$

Para tornar as Equações 15 e 16 solucionáveis, Morgenstern-Price (1965) considera uma função arbitrária que descreve a variação da relação entre  $X$ ,  $E$  e um fator de escala ( $\lambda$ ) conforme as Equações 17 e 18.

$$\tau = \lambda f(x)E \quad 17$$

Ou

$$tg(\theta) = \frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad 18$$

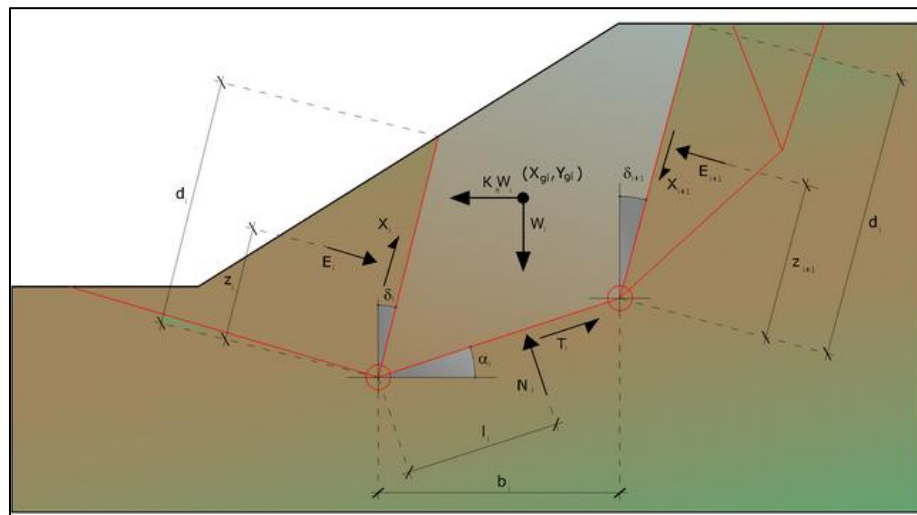
#### 4.4.1.5 Método de Sarma

O método de Sarma (1973) é um método simplificado que deve ser analisado com cautela para análises de estabilidade. Tal método permite determinar a aceleração sísmica horizontal necessária para que a massa de solo, delimitada pela superfície de deslizamento e pelo perfil topográfico, atinja o estado de equilíbrio limite (aceleração crítica  $K_c$ ) e, ao mesmo tempo, obtém-se o fator de segurança, assim como nos demais métodos.

Segundo Ma *et al.* (2025), o método de Sarma divide o solo acima da superfície potencial de ruptura, ao longo da superfície de corte, em várias fatias, sendo que todas devem satisfazer as

condições de equilíbrio estático e de momentos (Figura 4.12). O método obtém uma expressão para o coeficiente de aceleração crítica ao estabelecer as equações de equilíbrio estático das fatias, incorporando as forças de interação entre elas e a resistência ao cisalhamento na superfície de ruptura.

O FS do talude é calculado com base na carga sísmica ou aceleração considerada. O método de Sarma caracteriza-se por sua capacidade de lidar com superfícies de ruptura de formas arbitrárias, incluindo formas não circulares, e por sua capacidade de analisar o efeito da ação sísmica na estabilidade de taludes (Ma *et al.*, 2025).



**Figura 4.12 - Ações na i-ésima fatia, método de Sarma**  
 Fonte: GeoStru (2015).

Dessa maneira, considera-se a condição de equilíbrio na translação horizontal e vertical, conforme as Equações 19 e 20.

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = W_i - \Delta X_i \quad 19$$

$$T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i = KW_i + \Delta E_i \quad 20$$

Na ausência de forças externas na superfície livre, tem-se as seguintes relações, expressas nas Equações 21 e 22, para as forças horizontais e verticais.

$$\sum \Delta E_i = 0 \quad 21$$

$$\sum \Delta X_i = 0 \quad 22$$

Onde,  $E_i$  e  $X_i$  são forças horizontais e verticais na  $i$ -ésima face da fatia ( $i$ ).

A equação do equilíbrio de momentos é definida a partir da adoção do centróide do maciço como ponto de referência. Dessa forma, após a realização de uma série de transformações geométricas, trigonométricas e algébricas, no método de Sarma a solução do problema é obtida pela resolução das Equações 23 e 24.

$$\sum \Delta X_i \cdot tg(\psi'_i - \alpha_i) + \sum \Delta E_i = \sum \Delta_i - K \cdot \sum W_i \quad 23$$

$$\sum \Delta X_i [(y_{mi} - y_g) \cdot tg(\psi'_i - \alpha') + (x'_i - x_g)] = \sum W_i \cdot (x_{mi} - x_g) + \sum \Delta_i \cdot (y_{mi} - y_g) \quad 24$$

Entretanto, a abordagem de solução, neste caso, é completamente invertida: o problema consiste em determinar um valor de  $K$  (aceleração sísmica) correspondente a um determinado fator de segurança. Em particular, busca-se o valor da aceleração  $K$  correspondente ao fator de segurança  $F = 1$ , ou seja, a aceleração crítica.

Assim, tem-se que:

$$K = K_c: \text{aceleração crítica quando } F = 1$$

$$F = FS: \text{fator de segurança em condições estáticas quando } K = 0$$

Encontrando a distribuição de forças internas  $X_i$  e  $E_i$  que permita satisfazer o equilíbrio da fatia e o equilíbrio global do maciço, sem violar o critério de ruptura, tem-se uma solução aceitável para o problema assumindo as distribuições de forças em  $X_i$  como apresentado na Equação

$$\Delta X_i = \lambda \cdot \Delta Q_i = \lambda(Q_{i+1} - Q_i) \quad 25$$

Sendo que:  $Q_i$  é uma função conhecida, na qual são considerados os parâmetros geotécnicos médios na  $i$ -ésima face da fatia  $i$ ; e  $\lambda$  representa uma incógnita.

A solução completa do problema é obtida, portanto, após algumas iterações, por meio dos valores de  $K_c$ ,  $\lambda$  e  $F$ , os quais também permitem determinar a distribuição das forças entre as fatias.

#### 4.4.2 Tipos de carregamento

Na análise de estabilidade geotécnica, os carregamentos podem ocorrer sob condições drenadas ou não drenadas, a depender da capacidade de dissipação das pressões neutras no maciço.

O carregamento em condição drenada ocorre quando o excesso de pressão de poros se dissipa. Nessas condições, os rejeitos tendem a apresentar elevada resistência ao cisalhamento, em razão do alto grau de angularidade de suas partículas. De modo geral, esses materiais possuem ângulo de atrito efetivo entre  $3^\circ$  e  $5^\circ$  superior ao de solos naturais similares, sob a mesma densidade e nível de tensão, conforme observado por Vick (1990). Assim, os rejeitos são, em geral, considerados materiais essencialmente sem coesão.

Segundo Duncan (1996), geralmente se assume, para problemas que envolvem taxas normais de carregamento, que solos com permeabilidades maiores que  $10^{-4}$  cm/s se comportam como drenados, e solos com permeabilidades (condutividades hidráulicas) menores que  $10^{-7}$  cm/s se comportam como não drenados.

A baixa taxa de deformação e a completa saturação da amostra de rejeito em ensaios de cisalhamento direto permitem evitar o aumento da pressão de poros, caso contrário, os resultados do ensaio podem indicar incorretamente a presença de intercepto de coesão. A amostra pode ser totalmente saturada por meio da aplicação de contrapressão em ensaios triaxiais (Vick, 1990).

A condição não drenada ocorre quando o excesso de pressão de poros não pode se dissipar rapidamente do solo. Se a taxa de carregamento for maior do que a taxa de dissipação dessa pressão, não haverá variação de volume em um solo saturado.

Para solos de granulação fina, o excesso de pressão de poros não se dissipa durante a construção ou logo após (condição de curto prazo), de modo que a condição não drenada é aplicável. Já os solos de granulação grossa possuem alta permeabilidade e, sob carregamentos estáticos, a dissipação da pressão de poros ocorre rapidamente, de modo que a condição não drenada

geralmente não se aplica. No entanto, em carregamentos dinâmicos, como terremotos, o processo pode ocorrer tão rapidamente que o excesso de pressão de poros não se dissipa, tornando a condição não drenada aplicável (Zardari, 2011).

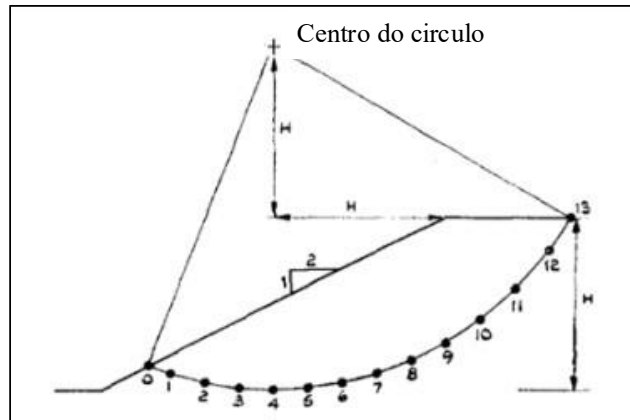
Em laboratório, a resistência ao cisalhamento não drenada é comumente determinada por meio de ensaios triaxiais não drenados consolidados (CU) combinados com procedimentos de normalização da resistência, como o método SHANSEP (Ladd, 1991).

Para a maioria dos depósitos de rejeitos, o ângulo de atrito em termos de tensões totais situa-se na faixa de 14 a 24°, aproximadamente 15° inferior ao ângulo de atrito efetivo para materiais semelhantes (Vick, 1990). A coesão em termos de tensões totais em rejeitos é geralmente desprezível ou não representativa (Vick, 1990).

#### 4.4.3 Superfícies de ruptura

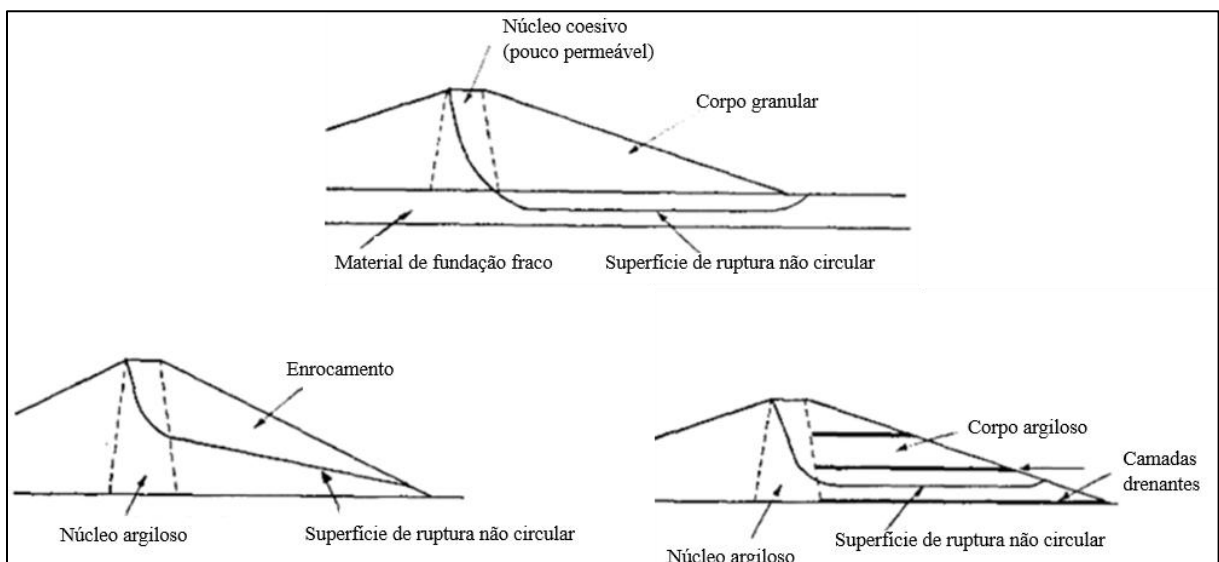
A geometria da superfície são elementos para a compreensão dos mecanismos de instabilidade em taludes. De modo geral, essas superfícies podem apresentar formas aproximadamente circulares ou geometrias irregulares, sendo estas últimas frequentemente associadas a condições mais realistas de campo (Morgenstern; Price, 1965).

As rupturas circulares, Figura 4.13, são caracterizadas por superfícies de deslizamento em forma de arco, definidas por um centro de rotação bem estabelecido. Nesse tipo de mecanismo, a massa de solo tende a se movimentar como um corpo relativamente coeso, girando em torno desse centro, o que resulta em um padrão de deslocamento predominantemente rotacional. A geometria regular da superfície indica que o maciço apresenta comportamento mais uniforme, com distribuição relativamente homogênea das propriedades geotécnicas ao longo do perfil (Morgenstern; Price, 1965).



**Figura 4.13 – Representação de superfície de ruptura circular**  
 Fonte: Adaptado de Morgenstern e Price (1965).

Por outro lado, as rupturas não circulares, Figura 4.14, apresentam superfícies de deslizamento com geometrias complexas e adaptativas. Observa-se que essas superfícies tendem a acompanhar zonas de menor resistência, como camadas de fundação mais fracas, interfaces entre materiais distintos (como núcleo argiloso e enrocamento) ou regiões influenciadas por sistemas de drenagem. Nessas situações, a superfície de ruptura deixa de ser governada por uma forma geométrica simples e passa a refletir diretamente a heterogeneidade do maciço (Morgenstern; Price, 1965).



**Figura 4.14 – Representação de superfície de ruptura não circular**  
 Fonte: Adaptado de Morgenstern e Price (1965).

As figuras apresentam que, em barragens de terra, a presença de estratificação, contrastes de materiais e condições hidráulicas distintas exerce controle sobre a trajetória da superfície de ruptura. No primeiro conjunto de esquemas, por exemplo, a superfície não circular se

desenvolve preferencialmente ao longo de uma fundação fraca ou de zonas com diferentes propriedades, desviando-se significativamente de um arco circular idealizado. Isso demonstra que o mecanismo de ruptura está condicionado à distribuição espacial das resistências no interior do maciço.

Do ponto de vista do comportamento mecânico, há diferenças importantes entre os dois tipos de ruptura. Nas rupturas circulares, o movimento tende a ser mais organizado, com menores deformações internas relativas. Já nas rupturas não circulares, observa-se um comportamento mais complexo, com redistribuição de tensões, desenvolvimento de zonas de cisalhamento localizadas e maior grau de deformação interna, adaptando a superfície de ruptura e às condições reais do meio (Morgenstern; Price, 1965).

#### 4.4.4 Percolação

As análises de percolação são processos de estimativa do nível de pressões neutras a que estarão sujeitos os maciços e a fundação, ou ainda, para avaliar o nível de rebaixamento rápido do reservatório (Terzaghi *et al.*, 1996). Considerando que os solos apresentam vazios em sua estrutura, estes se comportam como meios permeáveis, permitindo o escoamento da água em seu interior. Esse movimento ocorre de regiões com maior energia para regiões de menor energia, sendo governado por gradientes de carga hidráulica (Pinto, 2006).

Nesse sentido, a capacidade de percolação de água solo é devido a sua condutividade hidráulica ( $k$ ), formulada por Darcy (1956) estabelecendo uma relação empírica capaz de quantificar o escoamento em meios porosos. A Lei de Darcy apresenta que a vazão é proporcional ao gradiente hidráulico, sendo expressa, de forma geral, pela relação entre a velocidade de fluxo e a condutividade hidráulica do solo. A Equação 26 apresenta da Lei de Darcy.

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot a = k \cdot i \cdot A \quad 26$$

Sendo que:  $Q$  é a vazão percolada pelo solo ( $m^3/s/m$ );  $k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica ( $m/s$ );  $h$  é a carga que se dissipa na percolação;  $L$  é a distância ao longo da carga que se dissipa;  $i$  é o gradiente hidráulico; e  $A$  é a área do permeâmetro ( $m^2$ ).

A carga hidráulica total pode ser definida pela Equação de Bernoulli somando-se as cargas de pressões, elevação e velocidade, de acordo com a Equação 27.

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad 27$$

Sendo que:  $H$  é a carga total (m);  $u$  é a pressão neutra (kPa);  $\gamma_w$  é o peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);  $v$  a velocidade (m/s);  $g$  aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>); é  $z$  a carga altimétrica (m).

Para as equações de continuidade, Gerscovish (2016) estabelece que a diferença entre a vazão que entra e a que sai de um elemento de solo é igual à variação do volume de água ao longo do tempo. Dessa forma, ao se considerar também a validade da Lei de Darcy, proposta por Henry Darcy, obtém-se a formulação geral que rege o fluxo bidimensional em meios porosos, a qual pode ser expressa pela Equação 28.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + s \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad 28$$

Sendo que:  $k_i$  é a condutividade hidráulica na direção  $i$ ;  $h$  é a carga total;  $e$  é o índice de vazios;  $S$  é o grau de saturação; e  $t$  é o tempo.

O fluxo de água pode ser simplificado utilizando a equação de Laplace considerando algumas hipóteses de acordo com Strufaldi (2004): conservação de energia, conservação de massa, solo homogêneo, vazios completamente preenchidos por água, sem consolidação ou expansão do solo, solo lamilar e validade da Lei de Darcy. Dessa maneira, a Equação 28 pode ser reduzida para a Equação 29.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad 29$$

Existem diferentes maneiras para resolução da Equação de Laplace no contexto de percolação de água em solos, sendo os mais empregados conhecidos como redes de fluxo e métodos numéricos (Gerscovich, 2016).

Gerscovich (2016) elenca que o método redes de fluxo pode ser um processo complexo, visto que a maioria das barragens são compostas por múltiplos materiais que possuem permeabilidades diferentes, no presente trabalho será abordado a solução por Método dos Elementos Finitos (MEF).

Strufaldi (2004) cita que o MEF é realizado em três passos. Inicialmente, tem-se a modelagem do problema, a qual aplica-se o desenho da malha de elementos finitos, determina-se as propriedades dos materiais envolvidos e especifica-se as condições de contorno. O segundo passo é o processamento do modelo através de formulação e solução do sistema de equações de elementos finitos. E o terceiro passo é a interpretação dos resultados, ou seja, as cargas hidráulicas, pressões neutras, gradientes e vazões.

#### **4.5 Níveis de Controle**

Os níveis de controle da instrumentação são níveis que delimitam os limites aceitáveis de auscultação para cada instrumento, ou conjunto de instrumentos, da estrutura visando subsidiar a tomada de decisão para ações preventivas e corretivas. Eles são utilizados como um dos elementos para avaliação de segurança da barragem, devendo ser definido individualmente para cada estrutura através de avaliações de segurança e classificados nos níveis normal, alerta e emergência (ANM, 2022).

Para Montes (2004) a falta de um sistema eficiente de controle do fluxo interno de água se configura uma das principais causas de acidentes e rupturas em barragens. Nesse sentido, o efeito de níveis elevados de água no interior da barragem pode contribuir significativamente para falhas iniciadas por instabilidade de taludes, galgamento e percolação combinados sendo raro que falhas incipientes de talude ocorram sem alguma deformação ou manifestação superficial (Smith; David, 1979).

Dessa maneira, Adamo *et al.* (2020) aborda que o monitoramento de barragens de rejeitos deve cumprir três funções essenciais:

- i. Confirmar que a barragem é segura e que está se comportando de acordo com os critérios e objetivos de projeto.

- ii. Confirmar as premissas de projeto, ajustando o projeto e a construção em andamento quando necessário, com base em observações menos favoráveis do que as assumidas, ou otimizando o projeto e a construção quando as observações forem mais favoráveis do que o previsto.
- iii. Identificar claramente os modos de falha que podem ser detectados pelo programa de monitoramento e aqueles que não podem ser detectados, evitando uma falsa sensação de segurança em relação a estes últimos.

Torna-se necessária a definição de níveis de controle que assegurem a viabilidade e a confiabilidade da segurança na instrumentação de barragens, sendo estes classificados em diferentes níveis quantitativos. A Resolução nº 95/2022 da ANM, embora estabeleça os níveis de controle como requisito obrigatório para a gestão da segurança de barragens, indica que sua definição deve ser fundamentada em avaliações de segurança da estrutura, não especificando, contudo, um método único ou padronizado para sua determinação, especialmente no que se refere à instrumentação.

De acordo com Penna *et al.* (2017), na mineração é comum a utilização de um instrumento denominado “carta de risco” para a definição de níveis de controle, para a instrumentação “piezômetros e indicadores de nível de água”. No entanto, atualmente o termo “carta de risco” tem entrado em desuso, visto que pode induzir o leitor a concluir que o documento trata dos riscos de uma estrutura, quando na verdade ele está mais associado a níveis de controle para instrumentação geotécnica. Nesse sentido, no estudo será utilizado o termo “carta de controle” para se referir os níveis dos instrumentos.

Como metodologia para definição dos níveis de controle, Fusaro (2007) determina duas abordagens, a estatística e a determinística.

A abordagem estatística é derivada da análise do comportamento da série histórica dos instrumentos, ou embasada na consideração de informações da bibliografia técnica e da experiência a respeito de outras barragens semelhantes (Fusaro, 2007). Menga *et al.* (1999) elenca que os principais os métodos estatísticos utilizados são os de dispersão, regressão linear e polinomial, séries temporais e médias móveis.

Para a abordagem determinística, aplica-se modelos matemáticos para definir valores que indicam o nível de segurança da barragem pela comparação entre medições de campo e

previsões analíticas das condições existentes (Fusaro, 2007). Nessa abordagem, simulam-se situações que alteram o nível da linha freática, afetando as poropressões internas da estrutura. Esses cenários permitem relacionar os resultados dos FS, de modo que cada nível de controle corresponda a um valor específico, facilitando a análise da influência da linha freática na estabilidade da barragem.

Com base na metodologia determinística, Ligocki *et al.* (2003) definiu níveis de controle (normal, atenção e emergência) para registros piezométricos, simulando condições de fluxo que refletissem diferentes fatores de segurança e cenários de estabilidade ao elevar o nível do reservatório para uma nova unidade geradora.

De forma semelhante, Velten *et al.* (2016) propuseram um método para elaborar as cartas de controle em barragens de terra-enrocamento, envolvendo quatro etapas: i) análises de percolação; ii) análises de estabilidade com base nos resultados de percolação; iii) análises de estabilidade para superfícies freáticas definidas manualmente; e (iv) determinação dos níveis de controle.

Segundo Penna *et al.* (2017), a definição dos níveis de controle deve ser procedida pela análise de estabilidade, a qual deve ser aplicada para diferentes níveis piezométricos/freáticos no interior do maciço. Essa análise permite obter a linha freática associada aos FS equivalentes a 1,5, 1,3, e 1,1, de forma que os níveis de controle são expressos conforme a Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Níveis de controle associados aos valores de FS**

| <b>Nível de Controle</b> | <b>Intervalo em função de FS</b> |
|--------------------------|----------------------------------|
| Normal                   | $FS \geq 1,5$                    |
| Atenção                  | $1,5 > FS \geq 1,3$              |
| Alerta                   | $1,3 > FS \geq 1,1$              |
| Emergência               | $1,1 > FS$                       |

Fonte: Adaptado de Penna *et al.* (2017).

Mais recentemente há o método proposto por Sabadini *et al.* (2018) para a definição de níveis de controle, dado por quatro etapas. Inicialmente, há a definição da superfície freática normal, a partir dos dados de instrumentação. Sequencialmente se estabelece a superfície freática crítica por meio da análise de percolação, que deve considerar baixa permeabilidade do filtro, de modo

a representar a colmatação da drenagem interna. A terceira etapa consiste em, por meio das etapas anteriores, definir a variação máxima da superfície freática, em cada PZ e INA. Por fim, a partir dessas variações, definem-se os níveis de controle, conforme a Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Níveis de controle em função da variação máxima do nível d'água**

| Nível de Controle | Intervalo em função de $\Delta h$ |
|-------------------|-----------------------------------|
| Normal            | 0% a 20% de $\Delta h$            |
| Atenção           | 20% a 40% de $\Delta h$           |
| Alerta            | 40% a 60% de $\Delta h$           |
| Emergência        | > 60% de $\Delta h$               |

Fonte: Adaptado de Sabadini *et al.* (2018)

A Resolução nº 95/2022 da ANM, por sua vez, estabelece os níveis de controle normal, alerta e de emergência, sendo o de emergência sub-categorizado em 3 níveis (NE-1, NE-2 e NE-3) conforme estabelece a Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Níveis de controle estabelecidos pela ANM (2022)**

| Nível  | Critério em função do FS (drenado) | Critério em função do FS (não drenado de pico)           | Observação  |
|--------|------------------------------------|--|---|
| Normal | —                                  | —  | —   |
| Alerta | —                                  | —  | Definido por anomalias e condições de risco (art. 40), não por FS |
| NE-1   | $1,30 \leq FS < 1,50$              | $1,20 \leq FS < 1,30$ (ou até 1,50 em casos específicos) | Início de comprometimento da segurança                            |
| NE-2   | $1,10 \leq FS < 1,30$              | $1,00 \leq FS < 1,20$                                    | Segurança comprometida  |
| NE-3   | $FS < 1,10$                        | $FS < 1,00$  | Ruptura iminente ou em curso                                      |

Fonte: Adaptado de ANM (2022).

#### 4.6 Aspectos legais e normativos da segurança de barragens de rejeito

As leis e normas assumem um papel relevante na segurança de barragens de mineração, dado que essas estruturas envolvem riscos geotécnicos, ambientais e sociais. Tais normas,

estabelecem critérios técnicos para projeto, construção, operação, monitoramento e descomissionamento das estruturas que visa contribuir para prevenção de falhas e mitigação de impactos associados.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), criada em 2010 passou a ser a legislação específica para a área de barragens em que se aplica a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Essa lei é destinada para barragens com os seguintes requisitos (BRASIL, 2010):

- i) Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- ii) Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);
- iii) Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; e
- iv) Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei.

No âmbito de classificação do material depositado nas barragens e aos danos associados, a Resolução nº 143/2012 do Conselho Nacional de Recurso Hídricos (CNRH) estabelece critérios gerais para a avaliação do dano potencial na área afetada, onde são descritas (BRASIL, 2012):

- i) Existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- ii) Existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- iii) Existência de infraestrutura ou serviços;
- iv) Existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- v) Existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- vi) Natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados; e
- vii) Volume.

Para maior rigor técnico em barragens de rejeito e após o rompimento da Barragem de Fundão, em 2015, e a Barragem de Brumadinho, em janeiro de 2019, foi publicada a Resolução nº

4/2019 da ANM. Esta Resolução estabelece medidas regulatórias para as barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido, assim fica proibida a utilização do método de alteamento de barragens de mineração denominado "a montante" em todo o território nacional (ANM, 2019).

As Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) são conjuntos de diretrizes e normas técnicas destinadas a padronizar métodos referente à elaboração de produtos e serviços no Brasil. Essas normas são elaboradas e publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), sendo fundamentais para garantir a qualidade, segurança e a confiabilidade em distintas áreas da engenharia e da indústria.

Em 2024, foi publicada a norma ABNT NBR 17.188, que estabelece critérios para a avaliação dos impactos potenciais nas áreas a jusante decorrentes da ruptura ou do mau funcionamento de barragens. Essa norma define diretrizes e requisitos mínimos para a elaboração de estudos de ruptura hipotética, os quais fornecem informações essenciais para a delimitação das áreas potencialmente afetadas por eventos dessa natureza (ABNT, 2024).

## 5. METODOLOGIA

De modo a alcançar os objetivos apresentados, propõe-se na Figura 5.1 o plano de ação do estudo com os respectivos passos a serem seguidos.

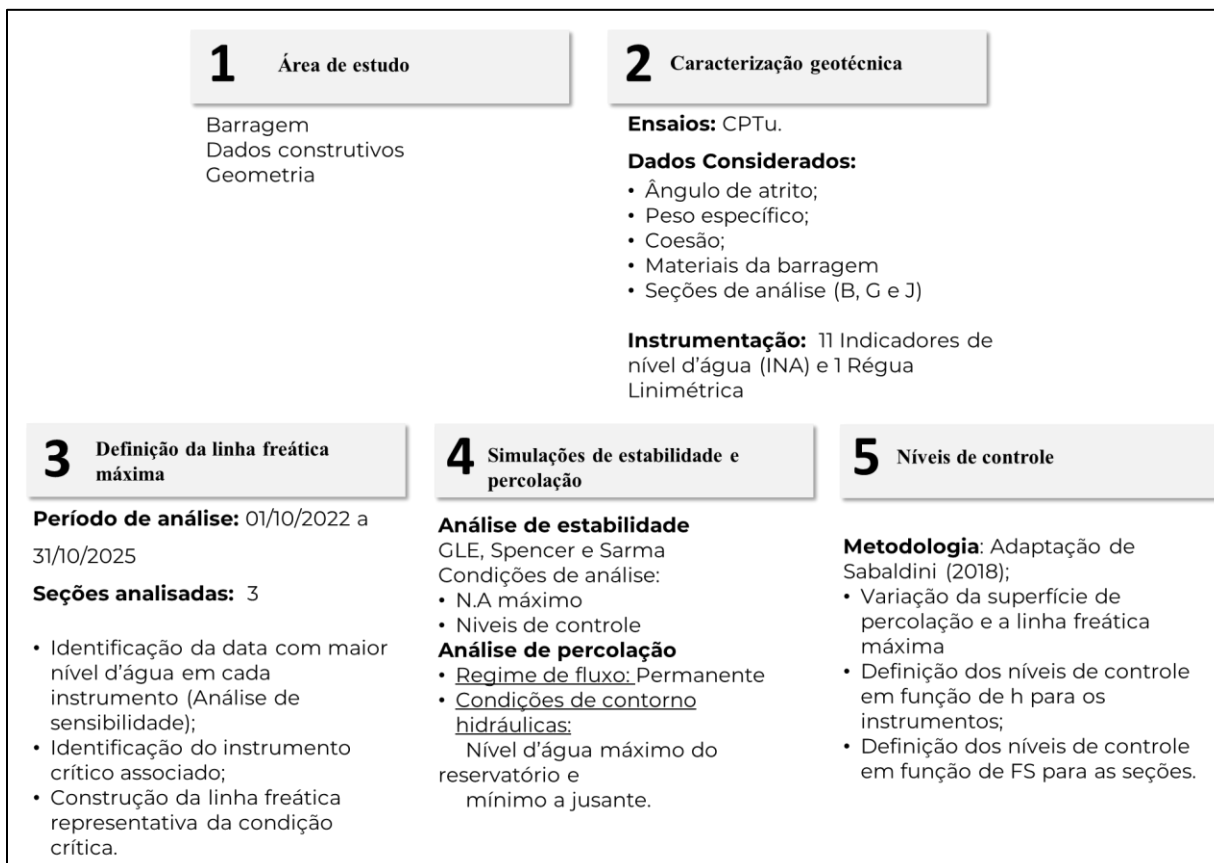


Figura 5.1 – Plano de ação do estudo

### 5.1 Área de estudo

A estrutura tem como finalidade o armazenamento de rejeitos provenientes do processo de beneficiamento, os quais são destinados à produção de insumos para uso agrícola.

A construção da barragem teve início com a execução de um aterro primitivo em solo argiloso, com crista na cota 743,00 m. Posteriormente, foi implantado um alteamento pelo método linha de centro até a cota 763,00 m, dividido em quatro etapas sucessivas, cada uma com 5,00 m de altura.

Em função da necessidade de ampliação da capacidade de armazenamento, foi executada uma segunda etapa de alteamento, elevando a crista da cota 763,00 m para 773,00 m, totalizando

10,00 m adicionais, construída em duas fases pelo método a montante. Na sequência, realizou-se uma terceira etapa de alteamento, também pelo método a montante, com elevação adicional de 5,00 m, resultando na crista final na cota 778,00 m.

A estrutura passou por um processo de adequação geométrica e descaracterização do método construtivo, sendo reconfigurada do método a montante para linha de centro. A barragem possui 1.040,00m de comprimento, 30,00m de largura de crista com altura máxima de 58,00m, o talude a jusante apresenta entre 1V:2,4H e 1V:3,4H (22,6° e 16,4°), com seis bermas de equilíbrio de largura mínima de 5,30m.

## 5.2 Caracterização geotécnica

### 5.2.1.1 Dados considerados

Os parâmetros referentes aos materiais constituintes do corpo da barragem e da fundação foram obtidos a partir de ensaios de CPTu realizados em toda a estrutura da barragem em campanha de investigação geotécnica associada ao empreendimento. Por questões de confidencialidade técnica, não são apresentados detalhes relativos aos relatórios e à origem específica das amostras analisadas.

Em relação aos materiais granulares de alta permeabilidade, especificamente o enrocamento e o filtro, os parâmetros foram determinados de acordo com Duncan e Wright (2005) e Sherard (1963) de forma a representar o comportamento típico desses materiais em estruturas de barragens. A Tabela 5.1 sintetiza os parâmetros definidos para todos os materiais constituintes da barragem.

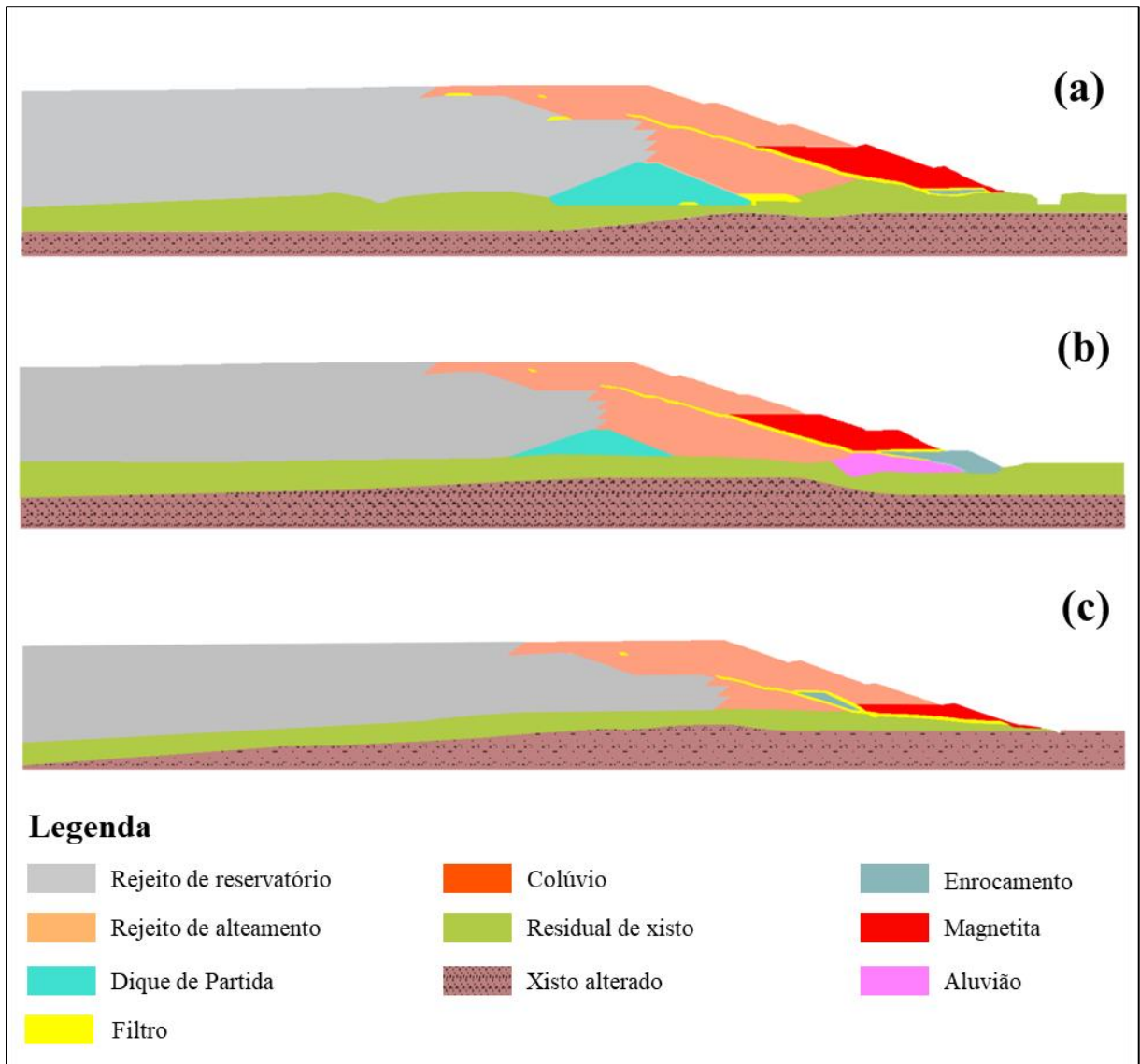
**Tabela 5.1 – Parâmetros de resistência dos materiais da barragem**

| <b>Material</b>  | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$<br>(kPa) | $\varphi$<br>(°) | $\frac{Su_{pico}}{\sigma'v_0}$ | <b>Referência</b>     |
|------------------|----------------------------------|--|---------------|------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Aluvião D        | 15                               | -                                      | 6             | 26               | -                              | CPTu                  |
| Aluvião ND       | 15                               | -                                      | -             | -                | 0,24                           | CPTu                  |
| Colúvio          | 17                               | -                                      | 6             | 26               | -                              | CPTu                  |
| Dique de partida | 21                               | -                                      | 5             | 32               | -                              | CPTu                  |
| Enrocamento      | 22                               | -                                      | 0             | 37               | -                              | Duncan e Wright, 2005 |
| Filtro           | 19                               | -                                      | 0             | 30               | -                              | Sherard, 1963         |

| <b>Material</b>          | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{sat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $c'$<br>(kPa) | $\varphi$<br>(°) | $\frac{Su_{pico}}{\sigma'v_0}$ | <b>Referência</b> |
|--------------------------|----------------------------------|--|---------------|------------------|--------------------------------|-------------------|
| Magnetita                | 27                               | -                                      | 0             | 37               | -                              | CPTu              |
| Rejeito de alteamento    | 20                               | -                                      | 0             | 33               | -                              | CPTu              |
| Rejeito de alteamento ND | 22                               | 22                                     | -             | -                | 0,25                           | CPTu              |
| Rejeito reservatório D   | 20                               | -                                      | 0             | 31               | -                              | CPTu              |
| Rejeito reservatório ND  | 20                               | 22                                     | -             | -                | 0,23                           | CPTu              |
| Xisto alterado           | 22                               | -                                      | 29            | 35               | -                              | CPTu              |
| Residual de xisto        | 20                               | -                                      | 6             | 26               | -                              | CPTu              |

Foi utilizado o critério de Mohr-Coulomb nas análises drenadas e Vertical Stress Ratio para materiais com condição não drenada de pico, ainda, utilizando-se o método de SHANSEP (*Stress History and Normalized Soil Engineering Property*) elaborada por Ladd e Foot (1974) nas regiões dos materiais situados abaixo da linha freática.

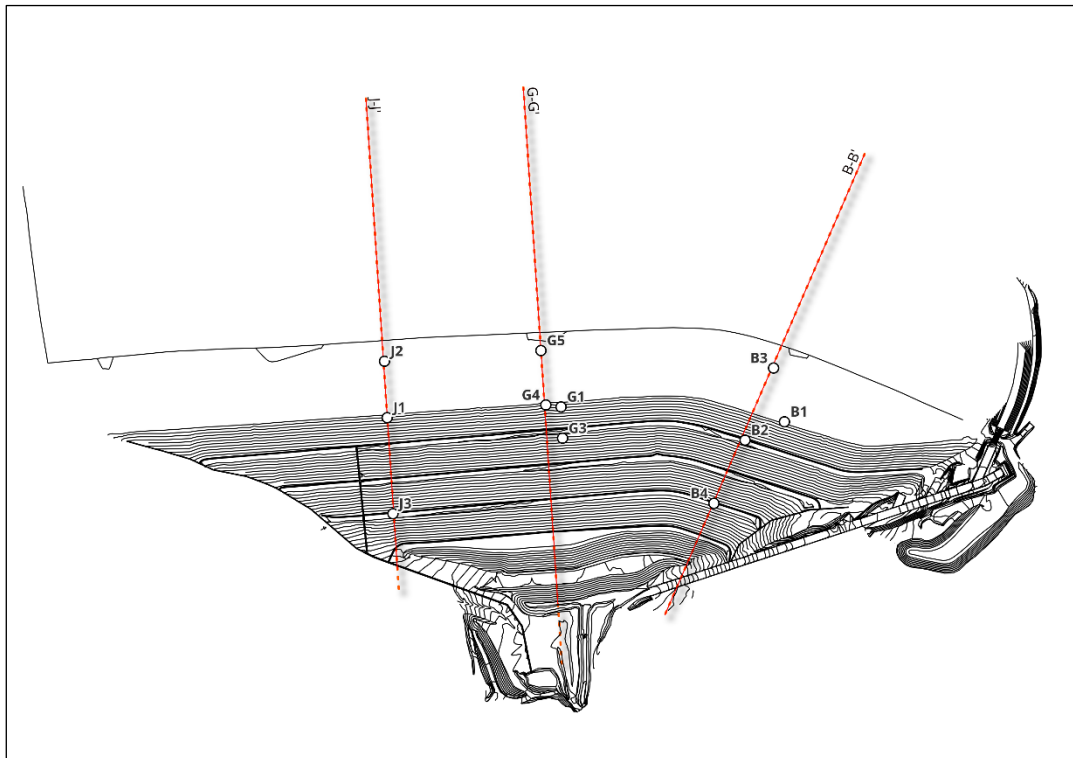
A Figura 5.2 apresenta a locação dos materiais e a instrumentação nas seções B, G e J.



**Figura 5.2 – Representação dos materiais locados: (a) seção B, (b) Seção G e (c) seção J**

### 5.2.2 Instrumentação

Para as análises do presente estudo, foram considerados 11 INA instalados ao longo da barragem, associadas às seções mais críticas, e 1 RL para os registros do nível d'água do reservatório. A Figura 5.3 apresenta a locação desses instrumentos.



**Figura 5.3 – Locação dos instrumentos na estrutura**

A Tabela 5.2 apresenta os valores de cota de topo e de fundo dos instrumentos da barragem, esses valores vão ser balizadores para definição das freáticas e níveis de controle de cada instrumento.

**Tabela 5.2 – Cotas características dos INA**

| <b>Instrumento</b> | <b>Cota de topo (m)</b> | <b>Cota de fundo (m)</b> |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| B1                 | 779,61                  | 735,61                   |
| B2                 | 770,98                  | 723,82                   |
| B3                 | 779,41                  | 744,01                   |
| B4                 | 751,51                  | 721,05                   |
| G1                 | 778,41                  | 729,91                   |
| G3                 | 769,51                  | 733,09                   |
| G4                 | 779,50                  | 742,67                   |
| G5                 | 779,41                  | 744,10                   |
| J1                 | 779,13                  | 749,82                   |
| J2                 | 779,46                  | 746,00                   |
| J3                 | 750,62                  | 731,89                   |

### **5.3 Definição da linha freática máxima**

A linha freática da barragem foi definida por análise de sensibilidade, tendo como base os registros dos indicadores de nível d'água distribuídos ao longo da estrutura, considerando-se um período correspondente a três ciclos hidrológicos (2022 a 2025). Para a análise das condições freáticas, adotou-se como critério a consideração da elevação máxima registrada por cada INA ao longo do período de monitoramento analisado.

Essa abordagem permite representar uma condição conservadora do comportamento hidráulico da estrutura, uma vez que, para cada ponto instrumentado, considera-se a situação mais desfavorável observada historicamente, sendo adequada para análises de estabilidade e definição de cenários críticos.

### **5.4 Simulações de estabilidade e percolação**

#### **5.4.1 Análises de estabilidade**

As análises de estabilidade foram realizadas com o programa computacional Slide2 da Rocscience, versão 9.034. O programa consiste em uma ferramenta bidimensional voltada à avaliação da estabilidade de taludes, permitindo o cálculo do fator de segurança para superfícies de ruptura circulares e não circulares com base no  $\phi$ , por diferentes formulações. Para o presente estudo, foram utilizados os métodos de Spencer, Sarma e GLE/Morgenstern-Price.

Os parâmetros adotados nas análises foram:

- i) Número de fatias: 50;
- ii) Número máximo de iterações: 75;
- iii) Diferença tolerável no fator de segurança (FS): 0,005.

Os parâmetros adotados seguem valores recomendados pelo software Slide2, os quais são utilizados em análises de estabilidade por equilíbrio limite e refletem precisão numérica e eficiência computacional.

Com base nessas definições, as análises de estabilidade foram aplicadas em dois momentos: (i) uma avaliação do comportamento do maciço sob a condição da linha freática máxima, definida

a partir da análise de sensibilidade apresentada no item 5.3; e (ii) análises associadas aos níveis de controle, considerando superfícies freáticas representativas de cada faixa operacional.

#### 5.4.1.1 Estabilidade na condição da linha freática máxima

Para esta análise, foram adotadas condições drenadas e não drenadas, contemplando superfícies de ruptura circulares e não circulares, utilizando-se, respectivamente, os métodos de busca Auto Refine e Particle Swarm. Essa análise teve como objetivo identificar os cenários mais críticos de estabilidade e compreender a influência das condições hidráulicas, da geometria e das propriedades dos materiais no comportamento global da barragem.

#### 5.4.1.2 Estabilidade associada aos níveis de controle

A partir das superfícies freáticas definidas para cada nível de controle (item 5.5), obtidas com base na análise de percolação (item 5.4.2), foram realizadas análises de estabilidade visando estabelecer a relação entre os níveis operacionais da barragem e os fatores de segurança correspondentes.

Nessa etapa, as análises foram conduzidas sob condição não drenada e considerando superfícies de ruptura não circular, por representarem cenários mais desfavoráveis e compatíveis com o comportamento esperado de barragens de rejeito.

### 5.4.2 Análises de percolação

Para as análises de percolação na barragem, adotou-se o método de análise hidráulica (*Groundwater Steady State FEA*) do Slide2 da Rocscience (2023), em que considera um regime de fluxo permanente. Em seguida, foram atribuídos os valores de condutividade hidráulica aos materiais constituintes da barragem, conforme a Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 – Condições de condutividade hidráulica (k) dos materiais da barragem**

| Materiais             | Condutividade hidráulica (m/s) |          |          |
|-----------------------|--------------------------------|----------|----------|
|                       | B                              | G        | J        |
| Rejeito reservatório  | 3,00E-06                       | 4,00E-06 | 3,00E-06 |
| Rejeito de alteamento | 1,00E-07                       | 5,00E-07 | 1,00E-07 |
| Dique de partida      | 5,00E-09                       | 5,00E-09 | –        |
| Filtro                | 1,00E-08                       | 1,00E-08 | 1,00E-08 |
| Colúvio               | –                              | 7,00E-05 | –        |
| Residual de xisto     | 1,00E-06                       | 4,00E-06 | 1,00E-06 |
| Xisto alterado        | 1,00E-08                       | 1,00E-08 | 1,00E-08 |
| Enrocamento           | 1,00E-08                       | 1,00E-08 | 1,00E-08 |
| Magnetita             | 3,50E-06                       | 3,50E-06 | 3,50E-06 |
| Aluvião               | –                              | 1,00E-06 | –        |

Ressalta-se que os cenários foram construídos considerando-se a colmatção da drenagem interna da barragem, visando a determinação dos níveis de controle, detalhados no item 5.5. Dessa forma, adotou-se os coeficientes de condutividade hidráulica dos materiais constituintes da drenagem interna (filtro e enrocamento) em  $1 \times 10^{-8}$  m/s, conforme aplicado por Ribeiro (2023).

Na sequência, aplicou-se a discretização do modelo, por uma malha triangular para garantir a análise numérica. Foram estabelecidas as condições de contorno hidráulicas a montante e a jusante da barragem, considerando-se, respectivamente, o maior nível registrado no reservatório (obtido por meio da régua linimétrica) e o menor nível observado no instrumento localizado mais a jusante da estrutura (INA B4). Esse critério foi adotado visando a definição dos níveis de controle (item 5.5) em meio a condições críticas.

### **5.5 Definição dos níveis de controle**

A definição dos níveis de controle dos instrumentos da barragem foi realizada conforme o método de Sabadini *et al.* (2018), com adaptações. Essa metodologia estabelece os níveis de controle a partir da comparação entre diferentes condições freáticas associadas aos instrumentos de monitoramento:

- i) Condição observada: Corresponde à superfície freática máxima dos instrumentos, definida no item 5.3; e
- ii) Condição crítica: Corresponde à superfície freática obtida a partir da análise de percolação, que considera a colmatagem da drenagem interna (item 5.4.2).

A partir dessas condições, definiu-se a variação máxima do nível d'água para cada indicador de nível d'água ( $\Delta h$ ), dada pela diferença entre a condição observada e a condição crítica. Com base em  $\Delta h$  e nos critérios apresentados na Tabela 4.2, foram definidos os níveis de controle operacionais da barragem, Normal, Atenção, Alerta e Emergência, em função dos níveis d'água registrados pelos instrumentos ( $h$ ), conforme apresentado Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Níveis de controle em função de h**

| <b>Nível de Controle</b> | <b>Intervalo em função de h</b>                                  |
|--------------------------|--|
| Normal                   | $h \leq (h_{C1} + \Delta h_{20\%})$                              |
| Atenção                  | $(h_{C1} + \Delta h_{20\%}) < h \leq (h_{C1} + \Delta h_{40\%})$ |
| Alerta                   | $(h_{C1} + \Delta h_{40\%}) < h \leq (h_{C1} + \Delta h_{60\%})$ |
| Emergência               | $h > (h_{C1} + \Delta h_{60\%})$                                 |

Sendo que:  $h$  representa o nível d'água medido em cada instrumento de monitoramento;  $h_{C1}$  corresponde ao nível d'água associado à condição observada, adotado como referência inicial para a definição dos níveis de controle;  $\Delta h_{20\%}$ ,  $\Delta h_{40\%}$  e  $\Delta h_{60\%}$  corresponde, respectivamente, aos incrementos de 20%, 40% e 60% da variação máxima do nível d'água.

Esses incrementos são utilizados para estabelecer limites intermediários entre as condições observada e crítica, permitindo a definição progressiva dos níveis de controle operacionais da barragem.

Adicionalmente, as superfícies freáticas associadas a cada nível de controle foram empregadas nas análises de estabilidade (item 5.4.1.2), permitindo a obtenção dos fatores de segurança correspondentes a cada faixa operacional. Dessa forma, foi possível estabelecer uma relação entre os níveis de controle definidos com base na instrumentação e a resposta geotécnica da estrutura.

Com base nos fatores de segurança obtidos, foram definidos intervalos representativos para cada nível, conforme apresentado na Tabela 5.5, possibilitando a interpretação dos níveis operacionais também sob a ótica da estabilidade do maciço.

**Tabela 5.5 – Níveis de controle em função do FS**

| <b>Nível de Controle</b> | <b>Intervalo em função de FS</b>              |
|--------------------------|---|
| Normal                   | $FS > FS_{\Delta 20\%}$                       |
| Atenção                  | $FS_{\Delta 20\%} \geq FS > FS_{\Delta 40\%}$ |
| Alerta                   | $FS_{\Delta 40\%} \geq FS > FS_{\Delta 60\%}$ |
| Emergência               | $FS \leq FS_{\Delta 60\%}$                    |

Sendo que:  $FS_{\Delta 20\%}$ ,  $FS_{\Delta 40\%}$  e  $FS_{\Delta 60\%}$  correspondem aos fatores de segurança obtidos a partir das análises de estabilidade associadas às superfícies freáticas definidas para incrementos de 20%, 40% e 60% da variação máxima do nível d'água ( $\Delta h$ ), respectivamente.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as análises de estabilidade das seções da barragem em conjunto com os níveis de controle analisados.

### 6.1 Condições de nível d'água da estrutura

Em relação ao nível de água do reservatório associado a RL, apresenta-se na Figura 6.1 seu comportamento ao longo do período considerado para análise em conjunto com a pluviometria.

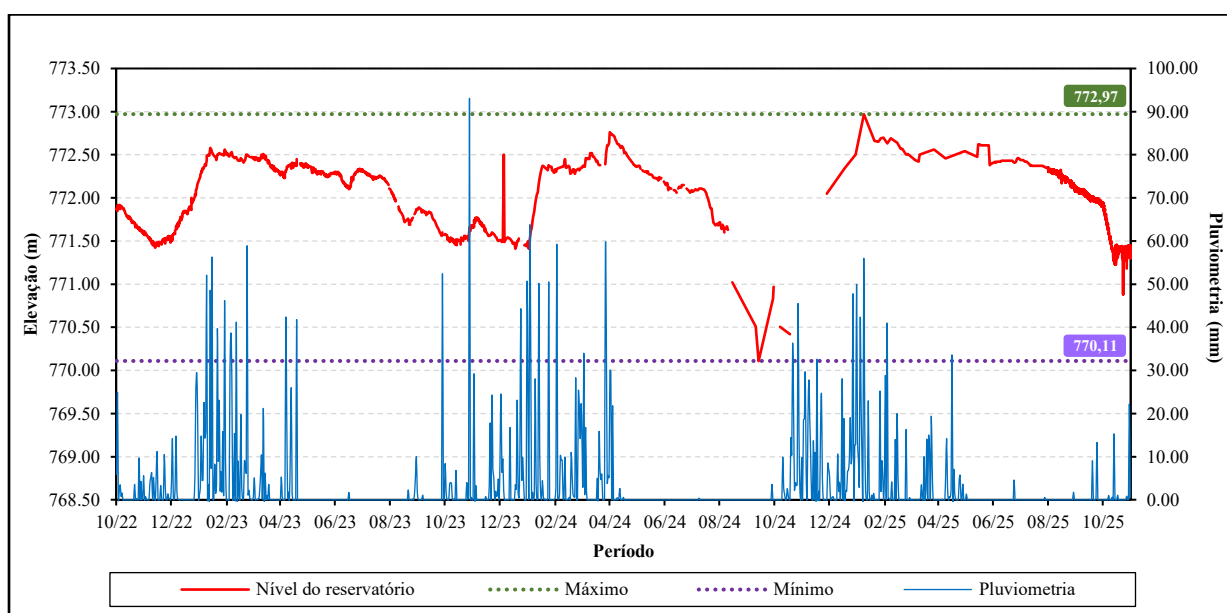


Figura 6.1 – Níveis do reservatório (2022-2025)

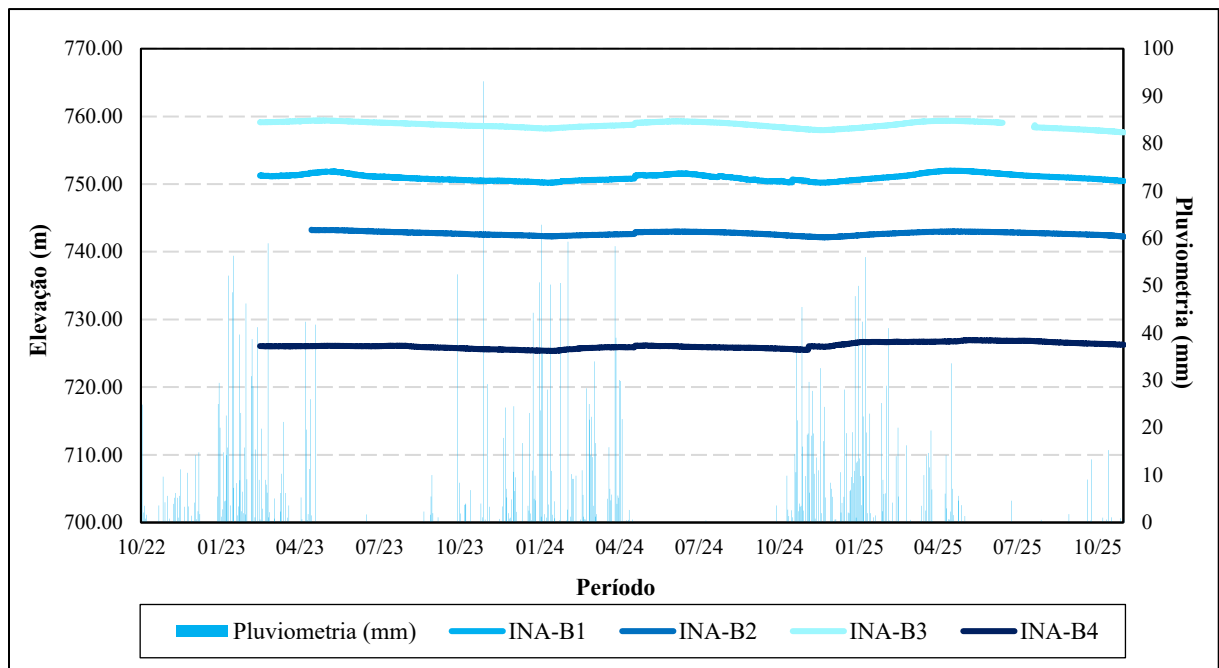
Conforme apresentado na Figura 6.1, ao longo de todo o intervalo analisado, o nível máximo do reservatório registrado foi de 772,97 m e o mínimo de 770,11 m. Embora seja possível observar uma tendência geral de elevação do nível do reservatório associada aos períodos de maior pluviosidade, a análise conjunta dos dados mostra que a precipitação não constitui o único fator das variações observadas.

Nesse sentido, embora a precipitação desempenhe papel relevante, sua influência deve ser analisada em conjunto com outras condicionantes hidráulicas, como o sistema extravasor, suas regras de operação e o tempo de resposta do sistema hidrológico, e geotécnicas, como a infiltração no maciço e a percolação interna.

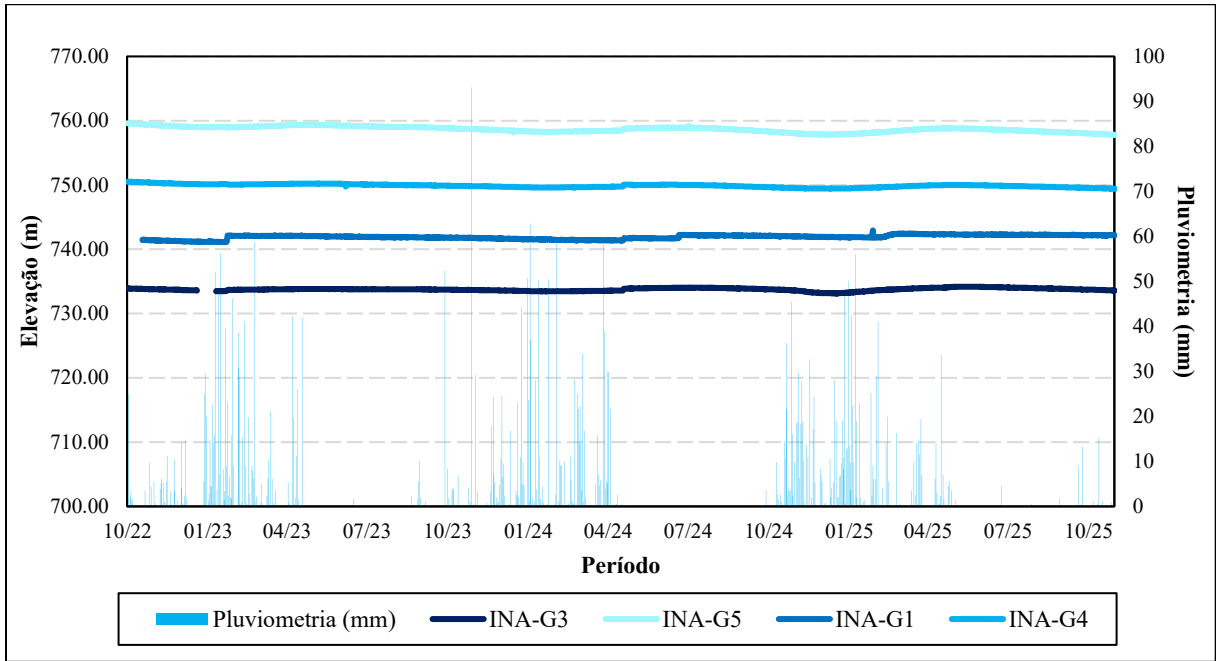
Adicionalmente, verifica-se que, nas proximidades dos valores extremos de nível (máximos e mínimos), há ocorrência de falhas nos registros, o que reduz a continuidade da série nesses intervalos. Essa característica deve ser considerada na interpretação dos resultados.

Ainda assim, a utilização dos níveis do reservatório como variável de referência mostra-se adequada para fins de análise de estabilidade, uma vez que esses níveis refletem os efeitos combinados dos diferentes processos hidrológicos e operacionais atuantes no sistema. Logo, a adoção dos cenários de níveis máximos observados é uma abordagem representativa e conservadora para a avaliação das condições mais críticas da estrutura, permitindo a definição de estados potencialmente desfavoráveis do ponto de vista geotécnico.

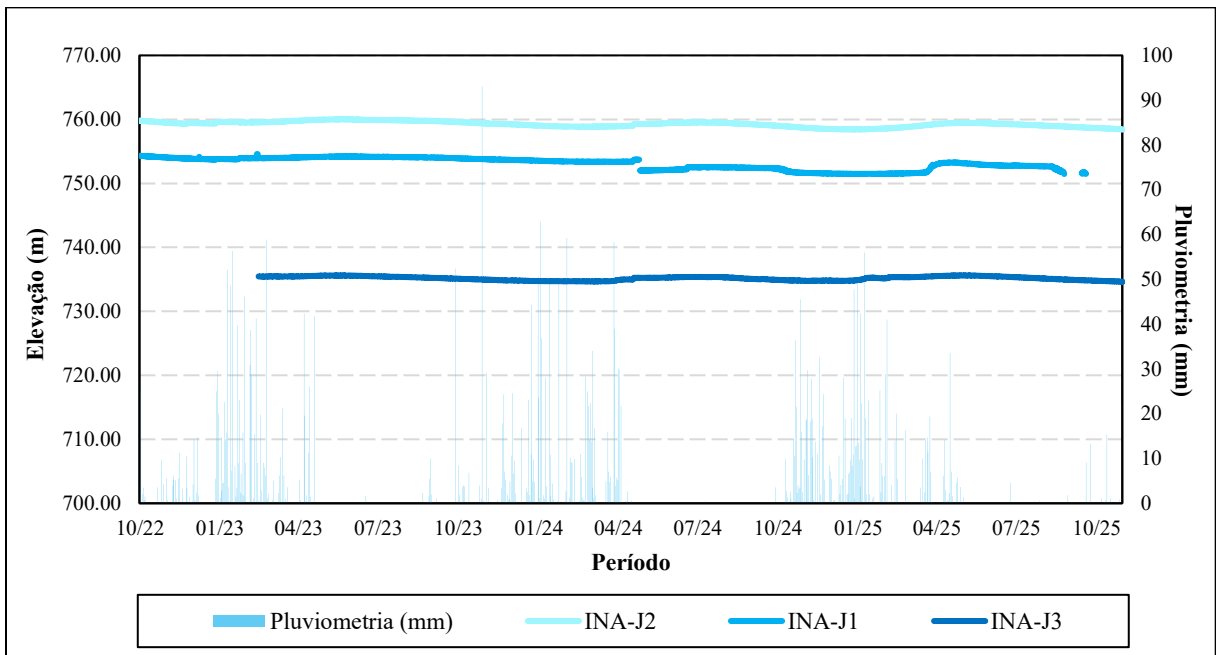
Em relação a análise de sensibilidade da linha freática, apresenta-se entre a Figura 6.2 e a Figura 6.4, respectivamente, as seções B, G e J com os registros das suas instrumentações em relação à pluviometria.



**Figura 6.2 – Seção B da barragem com o comportamento dos instrumentos no período.**



**Figura 6.3 – Seção G da barragem com o comportamento dos instrumentos no período**



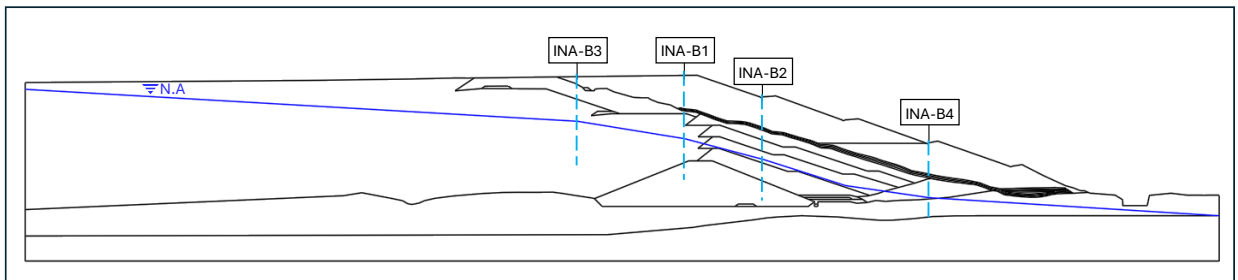
**Figura 6.4 – Seção J da barragem com o comportamento dos instrumentos no período**

Observa-se que o comportamento das elevações dos níveis de água manteve-se estável em todas as seções da barragem, apresentando pequenas variações ao longo do período analisado. Na sequência, para a definição da linha freática, a Tabela 6.1 apresenta os níveis máximos, médios e mínimos dos instrumentos.

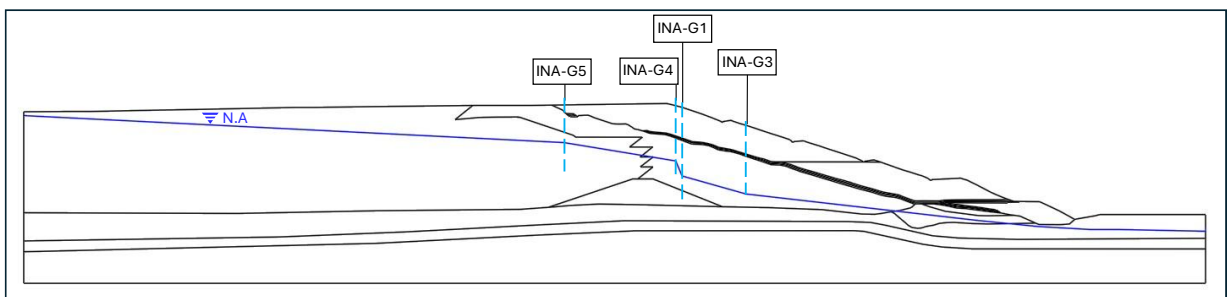
**Tabela 6.1 – Elevação de referência dos indicadores de nível d'água.**

| <b>Instrumento</b> | <b>Mínimo (m)</b> | <b>Médio (m)</b> | <b>Máximo (m)</b> | <b>Data do registro (N.A<sub>máx</sub>)</b> |
|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|---|
| B1                 | 750,20            | 750,98           | 751,99            | 04/2025                                     |
| B2                 | 742,125           | 742,70           | 743,26            | 04/2023                                     |
| B3                 | 757,634           | 758,74           | 759,39            | 04/2023                                     |
| B4                 | 725,358           | 726,12           | 726,94            | 05/2025                                     |
| G1                 | 741,11            | 741,91           | 743,09            | 10/2022                                     |
| G3                 | 733,145           | 733,75           | 734,19            | 05/2025                                     |
| G4                 | 749,403           | 749,88           | 750,52            | 10/2022                                     |
| G5                 | 757,78            | 758,67           | 759,61            | 10/2022                                     |
| J1                 | 751,351           | 753,10           | 754,55            | 02/2023                                     |
| J2                 | 758,426           | 759,26           | 760,02            | 05/2023                                     |
| J3                 | 734,628           | 735,15           | 735,62            | 04/2025                                     |

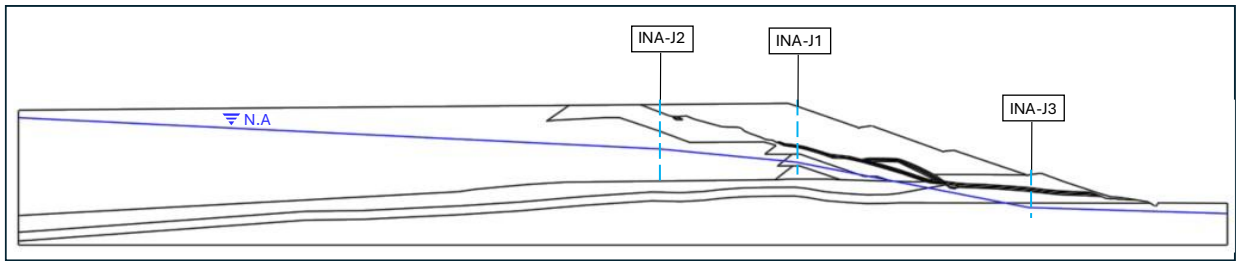
Entre a Figura 6.5 e a Figura 6.7 apresentam-se as representações das linhas freáticas máximas das seções de análise da barragem, com base nos dados levantados.



**Figura 6.5 – Linha freática com os máximos dos instrumentos da seção B**



**Figura 6.6 – Linha freática com os máximos dos instrumentos da seção G**



**Figura 6.7 – Linha freática com os máximos dos instrumentos da seção J**

Dessa forma, a partir das seções geotécnicas definidas (Figura 5.2) e o nível máximo do reservatório e das superfícies freáticas obtidas com base na instrumentação, estabelecem-se as condições hidráulicas e geotécnicas adotadas nos cenários de análise. Esses elementos são a base para a aplicação das análises de estabilidade apresentadas no item subsequente.

## **6.2 Análise de estabilidade na condição observada (linha freática máxima)**

Neste item serão apresentadas as análises de estabilidade com as elevações máximas dos instrumentos em cada seção. Os fatores de segurança estão resumidos na Tabela 6.2, destacando-se os menores observados.

**Tabela 6.2 – Fatores de segurança resultantes das análises de estabilidade**

| Seção | Condição    | Superfície   | FS      |      |       |        |
|-------|-------------|--------------|---------|------|-------|--------|
|       |             |              | Spencer | GLE  | Sarma | Mínimo |
| B     | Drenado     | Circular     | 2,09    | 2,09 | 2,09  | 2,09   |
|       |             | Não Circular | 1,81    | 1,81 | 1,81  | 1,81   |
|       | Não drenado | Circular     | 1,77    | 1,78 | 1,76  | 1,76   |
|       |             | Não Circular | 1,59    | 1,58 | 1,58  | 1,58   |
| G     | Drenado     | Circular     | 2,12    | 2,13 | 2,12  | 2,12   |
|       |             | Não Circular | 2,02    | 1,99 | 2,02  | 1,99   |
|       | Não drenado | Circular     | 1,66    | 1,66 | 1,65  | 1,66   |
|       |             | Não Circular | 1,44    | 1,43 | 1,44  | 1,43   |
| J     | Drenado     | Circular     | 2,32    | 2,32 | 2,32  | 2,32   |
|       |             | Não Circular | 2,2     | 2,2  | 2,2   | 2,20   |
|       | Não drenado | Circular     | 2,33    | 2,33 | 2,33  | 2,33   |
|       |             | Não Circular | 1,91    | 1,9  | 1,91  | 1,90   |

Entre a Figura 6.8 e a Figura 6.10, apresentam-se as análises de estabilidade realizadas para as seções B, G e J, respectivamente, considerando os cenários drenado e não drenado, circular e não circular.

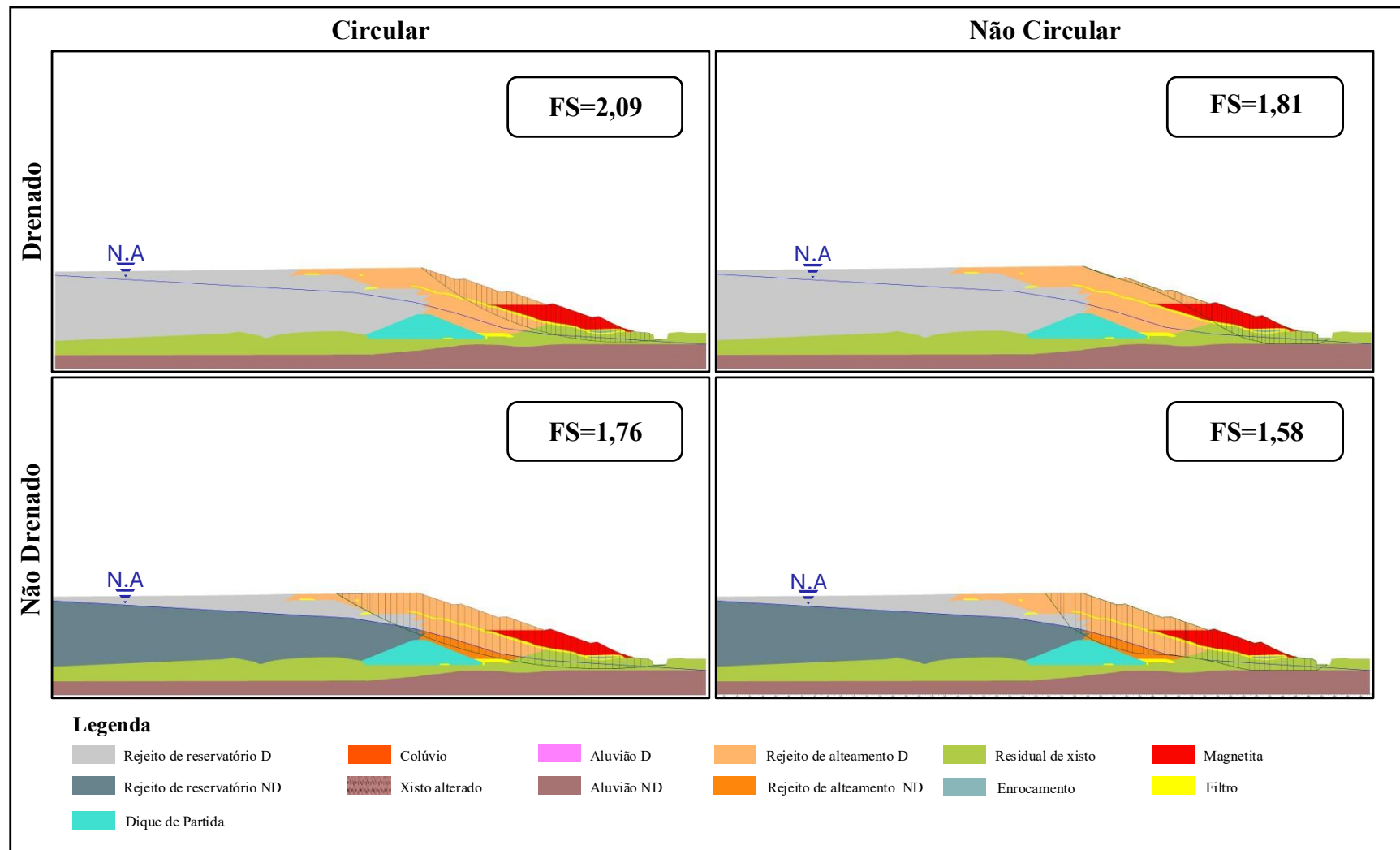


Figura 6.8 – Análises de estabilidade da seção B da barragem

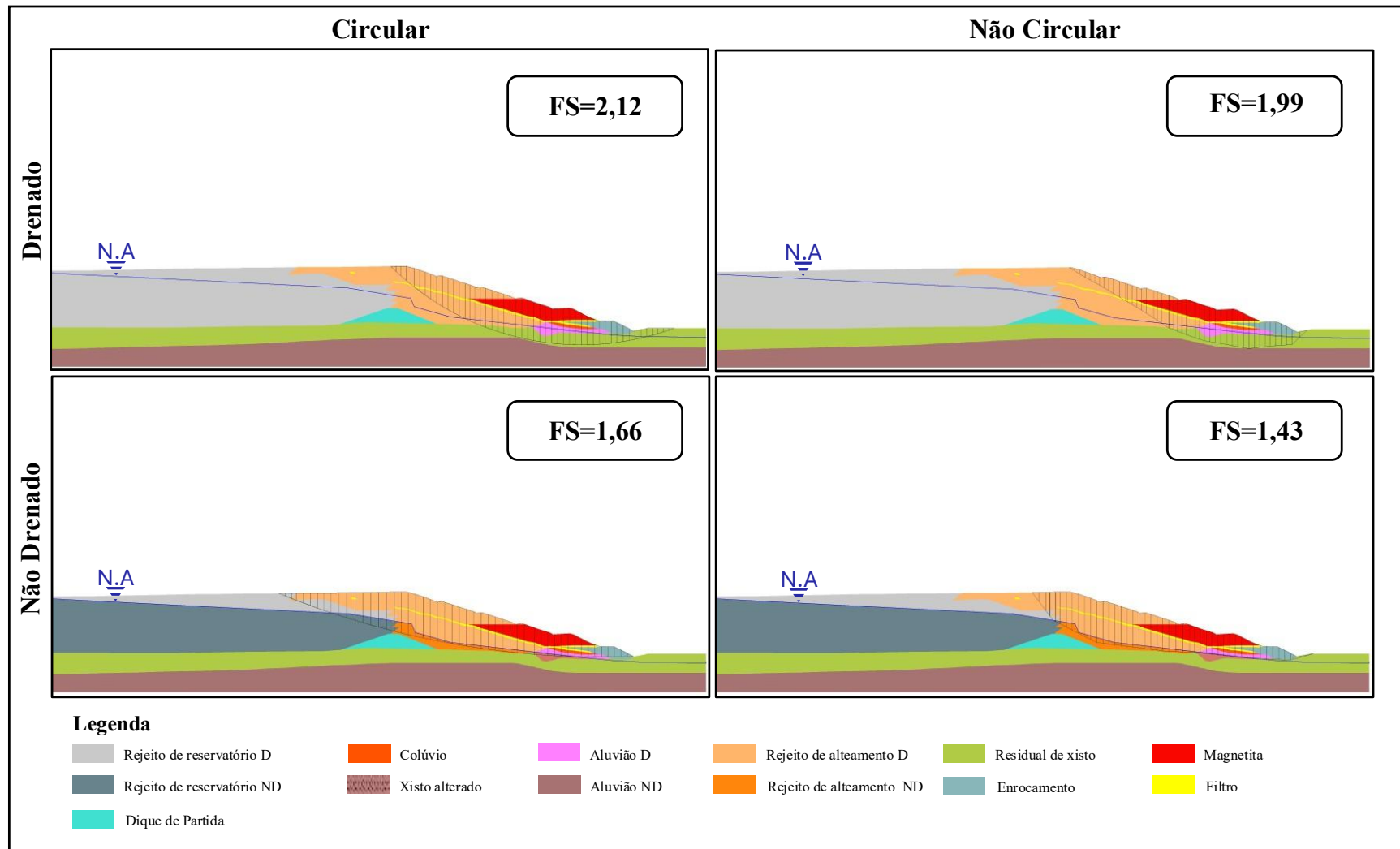


Figura 6.9 – Análises de estabilidade da seção G da barragem

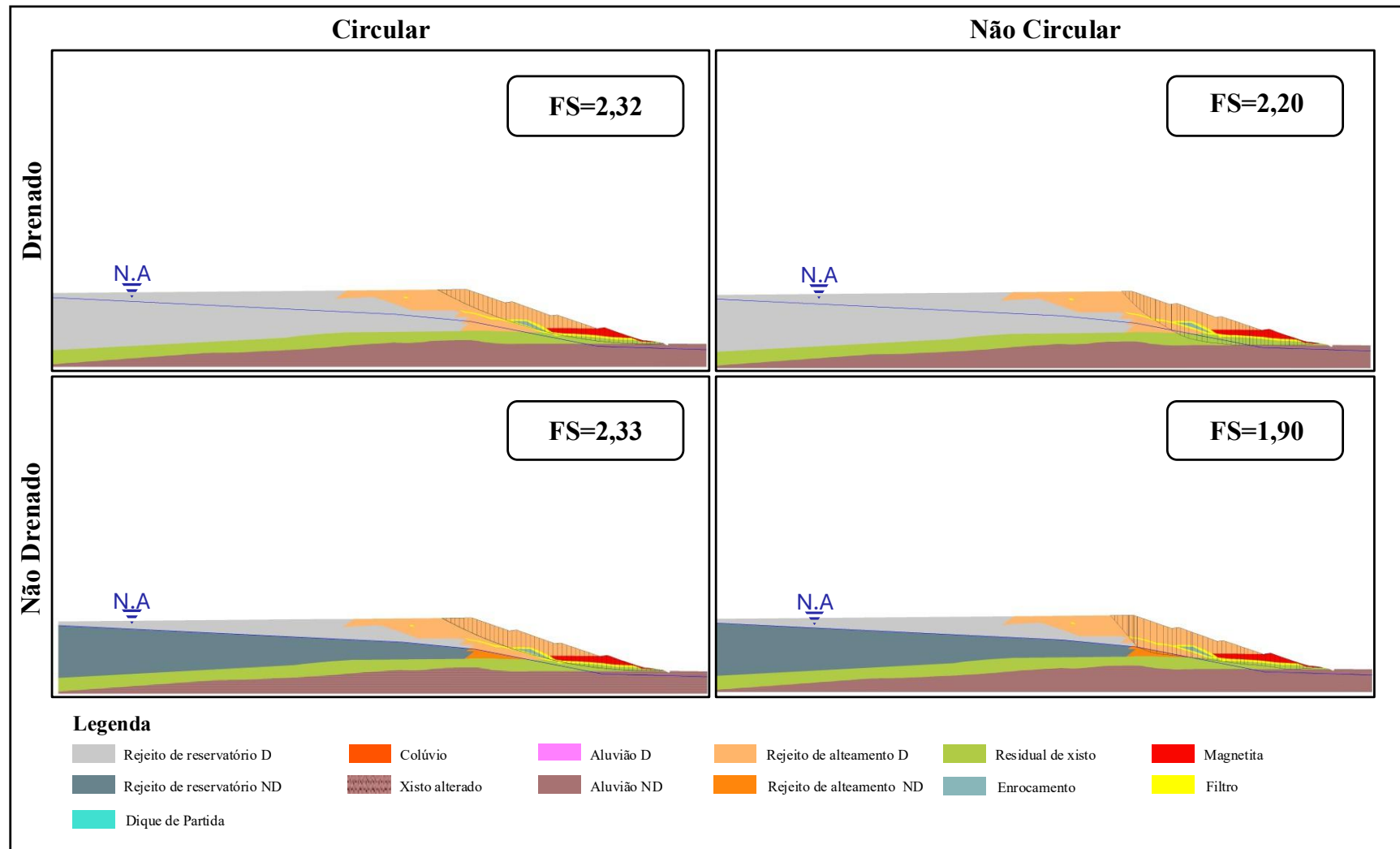


Figura 6.10 – Análises de estabilidade da seção J da barragem

A análise dos resultados de estabilidade das seções B, G e J mostrou que a variação dos fatores de segurança ao longo da barragem está associada à interação entre a posição das seções, as condições hidráulicas e a heterogeneidade dos materiais. Observa-se que a seção G, localizada na porção central do maciço, apresentou o menor fator de segurança em condição não drenada e para superfícies não circulares, enquanto as seções B e J, situadas nas regiões periféricas, apresentaram valores mais elevados, indicando comportamento mais estável.

A maior criticidade da seção G está associada à elevada variabilidade das propriedades geotécnicas ao longo do maciço. Essa seção intercepta simultaneamente materiais mais frágeis, como aluvião e colúvio ( $c' = 6$  kPa e  $\phi = 26^\circ$ ), e o material mais resistente, xisto alterado, ( $c' = 29$  kPa e  $\phi = 35^\circ$ ), além de materiais granulares com alto atrito, como enrocamento e magnetita ( $\phi = 37^\circ$ ). Essa configuração favorece o desenvolvimento de superfícies de ruptura controladas por zonas de menor resistência.

Em contrapartida, as seções B e J apresentam menor complexidade estratigráfica e maior uniformidade das propriedades de resistência. A ausência de materiais mais compressíveis, como colúvio e aluvião, reduz a probabilidade de formação de superfícies de ruptura extensas e controladas por variações abruptas de resistência. Como consequência, observa-se comportamento mais estável nessas regiões, evidenciando a heterogeneidade dos materiais na estabilidade global.

Esse comportamento é consistente com estudos que consideram a variabilidade espacial das propriedades geotécnicas, nos quais se observa que o aumento da heterogeneidade do maciço conduz à redução da estabilidade e à alteração dos mecanismos de ruptura, conforme demonstrado por Kasama e Whittle (2015). Os autores apresentam que há a diminuição dos índices de estabilidade com o aumento da variabilidade dos parâmetros do solo (Kasama; Whittle, 2015). No presente estudo, o fator de segurança mínimo obtido para a seção G (FS = 1,43) encontra-se coerente com essa tendência, corroborando a redução da estabilidade.

Resultados semelhantes são reportados por Griffiths e Fenton (2004), que demonstram, por meio de análises probabilísticas com campos aleatórios, que a variabilidade espacial das propriedades geotécnicas conduz à formação de superfícies de ruptura preferenciais ao longo de zonas de menor resistência, as quais passam a controlar o mecanismo de instabilidade do maciço.

A influência das condições hidráulicas é evidenciada pela redução dos fatores de segurança nas análises não drenadas. Esse comportamento é associado ao aumento das pressões neutras, que reduz as tensões efetivas e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento dos materiais. Esse efeito também é observado em análises de estabilidade que comparam condições drenadas e não drenadas, nas quais se verifica que, em situações próximas ao regime não drenado, como no rebaixamento rápido, os fatores de segurança são inferiores aos obtidos em condições drenadas, conforme mostrado por Berilgen (2007). No trabalho, esse comportamento é compatível com os resultados obtidos, especialmente na seção G, que apresentou maior sensibilidade às variações da linha freática.

Esse comportamento também é coerente com Jefferies e Been (2015), que demonstram que, em materiais suscetíveis à geração de poropressões, a resistência mobilizada em condição não drenada pode ser significativamente inferior à resistência drenada, favorecendo a ocorrência de instabilidades mesmo sob níveis moderados de carregamento.

No que se refere ao tipo de superfície de ruptura, os resultados indicam que as superfícies não circulares resultaram, de forma consistente, nos menores fatores de segurança, especialmente na seção G. Esse comportamento também foi observado por Cheng e Lau (2001), que apresentaram que superfícies de ruptura não circulares fornecem valores mais críticos em comparação às superfícies circulares. Os autores mostram diferenças que, nos casos analisados, atingem reduções na ordem de aproximadamente 5% a 10% nos FS quando consideradas superfícies não circulares.

Fredlund e Krahn (1977) analisaram casos com propriedades dos materiais tratadas de forma simplificada e com baixa variabilidade, nos quais os fatores de segurança obtidos a partir de diferentes superfícies de ruptura apresentaram diferenças pouco significativas. O que indica que, em condições com menor variabilidade das propriedades geotécnicas, a influência da forma da superfície de ruptura tende a ser reduzida.

Regiões próximas ao pé do talude tendem a apresentar maior suscetibilidade à instabilidade, uma vez que as superfícies críticas de ruptura frequentemente emergem nessa zona, evidenciando seu papel fundamental no mecanismo de ruptura. Conforme discutido por Duncan *et al.* (2014), o pé do talude é a região onde tem-se a definição da superfície potencial de deslizamento, sendo diretamente condicionado pelas tensões mobilizadas nessa região.

De modo geral, os resultados obtidos estão de acordo com diretrizes internacionais recentes, que apontam a variabilidade dos materiais, o controle das condições hidráulicas e o monitoramento contínuo como fatores essenciais para a segurança de barragens de rejeito (ICOLD, 2020; GISTM, 2020).

Além disso, conforme a NBR 13028 (ABNT, 2024), o fator de segurança mínimo recomendado é de 1,5 para condições drenadas e de 1,3 para condições não drenadas. Os resultados obtidos atendem a esses critérios em todos os cenários analisados, indicando estabilidade global do talude de jusante. Ainda assim, a seção G se destaca como a mais crítica em termos relativos, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo, especialmente quanto à evolução da linha freática.

### 6.3 Análise de percolação

Entre a Figura 6.11 e Figura 6.13 apresenta-se a modelagem numérica das condições de percolação com a definição da superfície freática ao longo do maciço para as seções B, G e J, respectivamente. Nas imagens também constam as linhas freáticas definidas entre a Figura 6.5 e a Figura 6.7.

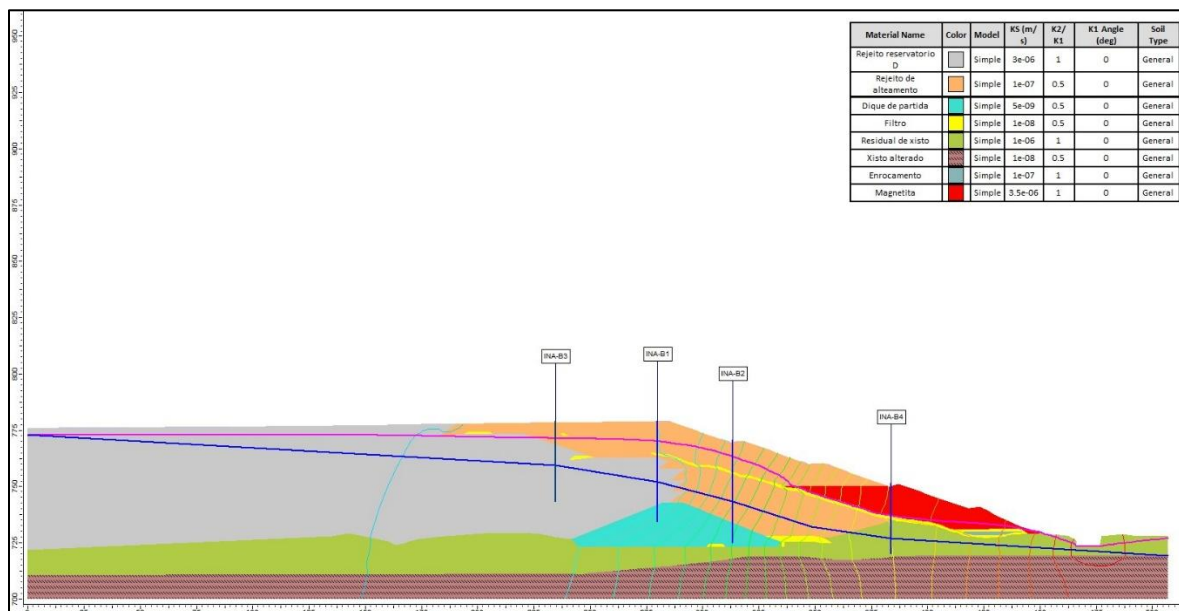


Figura 6.11 – Análise de percolação (Seção B)

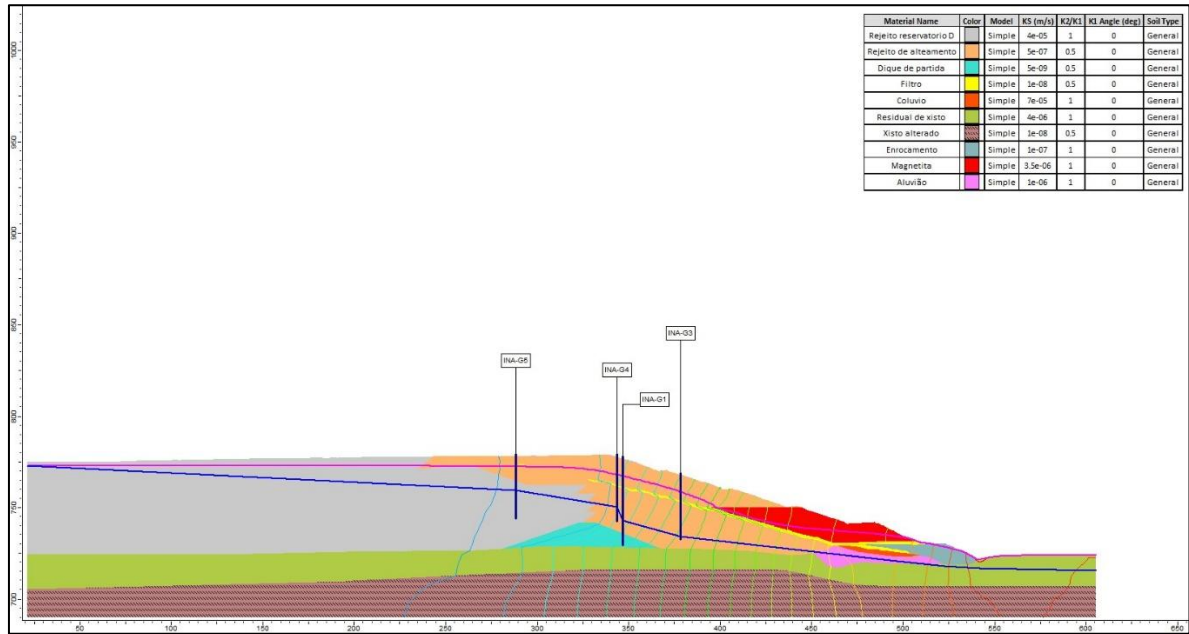


Figura 6.12 – Análise de percolação (Seção G)

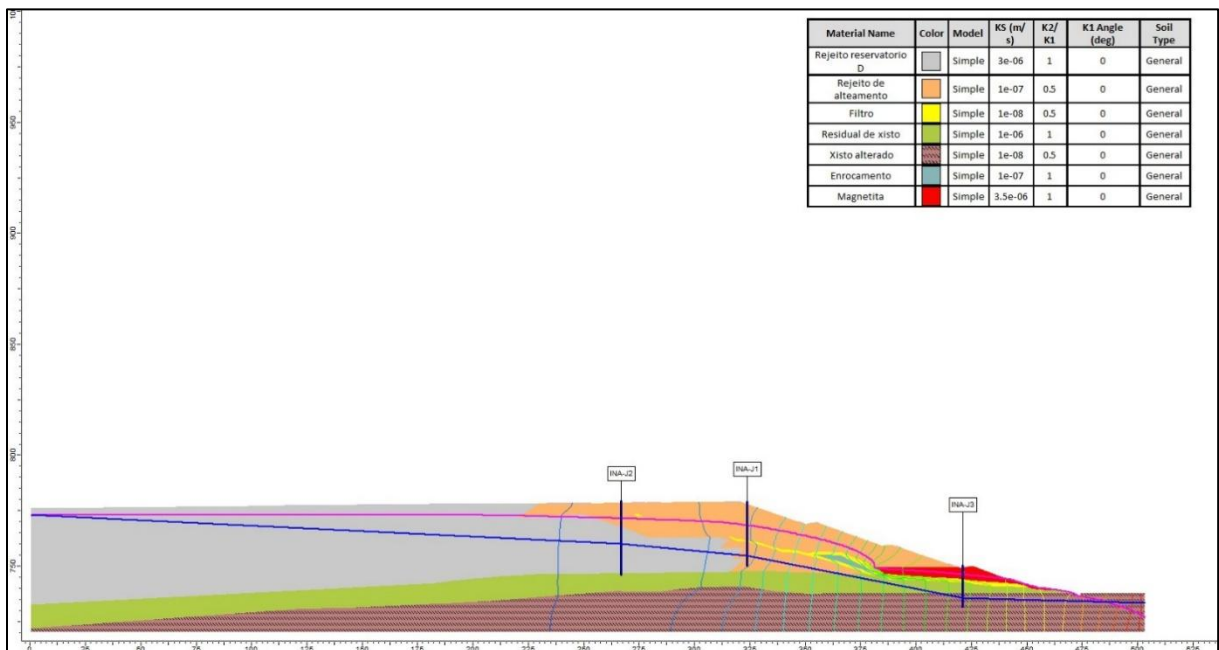


Figura 6.13 – Análise de percolação (Seção J)

A percolação no interior do maciço e a linha freática obtida na simulação mostra o comportamento do fluxo de água no interior da barragem. Esse comportamento é o esperado, visto que as condutividades hidráulicas dos materiais são distintas. Logo, a superfície freática tende a diminuir com o aumento da permeabilidade do material, portanto, os barramentos devem ser construídos utilizando os materiais mais permeáveis disponíveis (Vick, 1990).

Observa-se que o escoamento ocorre de forma lenta, resultando em níveis elevados ao longo do maciço como resposta da colmatação dos filtros e enrocamento da barragem. Esse sistema de colmatação é a redução dos espaços disponíveis para o fluxo de água e sua permeabilidade, o que compromete a eficiência do sistema de drenagem (Remigio, 2006).

#### 6.4 Definição dos níveis de controle

A partir das superfícies freáticas associadas as condições observadas e crítica, prossegue-se para a determinação da variação do nível d'água ( $\Delta h$ ), para obter os níveis de controle. Os resultados são apresentados na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3 – Variação do nível d'água  $\Delta h$  em função das condições observada e crítica**

| Instrumento | Nível d'água  |             | $\Delta h$ (m) |
|-------------|---------------|-------------|----------------|
|             | Observado (m) | Crítico (m) |                |
| B1          | 751,99        | 770,06      | 18,07          |
| B2          | 743,26        | 763,35      | 20,09          |
| B3          | 759,39        | 771,44      | 12,05          |
| B4          | 726,94        | 736,92      | 9,98           |
| G1          | 743,09        | 767,26      | 24,17          |
| G3          | 734,19        | 758,67      | 24,49          |
| G4          | 750,52        | 767,91      | 17,39          |
| G5          | 759,61        | 772,36      | 12,76          |
| J1          | 754,55        | 768,21      | 13,66          |
| J2          | 760,02        | 771,35      | 11,33          |
| J3          | 735,62        | 746,05      | 10,43          |

Observa-se que os valores de  $\Delta h$  variam entre os instrumentos, indicando que a resposta hidráulica da barragem não é uniforme ao longo da estrutura. Entretanto, essa variação não deve ser interpretada apenas em termos absolutos, uma vez que os instrumentos estão locados em diferentes posições e profundidades nas seções analisadas, interceptando porções distintas do maciço e, conseqüentemente, diferentes condições de fluxo.

Ainda assim, nota-se que os maiores valores de  $\Delta h$  se concentram na seção G, especialmente nos instrumentos G1 e G3, o que sugere maior sensibilidade hidráulica dessa região frente à elevação da linha freática em condição crítica.

Por outro lado, instrumentos como B4 e J3 apresentaram menores variações de nível d'água, o que pode estar associado não apenas a uma menor elevação da linha freática, mas também à posição específica desses instrumentos no interior do maciço.

Em conjunto, esses resultados indicam que a seção G apresenta comportamento hidráulico mais sensível, aspecto que se refletirá também nas análises subsequentes de estabilidade e na definição dos níveis de controle.

Com base nesses resultados, apresenta-se entre a Tabela 6.4 e a Tabela 6.6 os intervalos para cada nível de controle associados aos limites obtidos para os instrumentos das seções B, G e J, respectivamente, que foram estabelecidos conforme a Tabela 5.4.

**Tabela 6.4 – Níveis de controle dos instrumentos em função de h (Seção B)**

| INA | Normal (m)   | Atenção (m)              | Alerta (m)               | Emergência (m) |
|-----|--------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| B1  | $h < 755,61$ | $755,61 < h \leq 759,22$ | $759,22 < h \leq 762,83$ | $> 762,83$     |
| B2  | $h < 747,28$ | $747,28 < h \leq 751,30$ | $751,30 < h \leq 755,31$ | $> 755,31$     |
| B3  | $h < 761,80$ | $761,8 < h \leq 764,21$  | $764,21 < h \leq 766,62$ | $> 766,62$     |
| B4  | $h < 728,94$ | $728,94 < h \leq 730,93$ | $730,93 < h \leq 732,93$ | $> 732,93$     |

**Tabela 6.5 – Níveis de controle dos instrumentos em função de h (Seção G)**

| INA | Normal (m)   | Atenção (m)              | Alerta (m)               | Emergência (m) |
|-----|--------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| G1  | $h < 747,92$ | $747,92 < h \leq 752,76$ | $752,76 < h \leq 757,59$ | $> 757,59$     |
| G3  | $h < 739,08$ | $739,08 < h \leq 743,98$ | $743,98 < h \leq 748,88$ | $> 748,88$     |
| G4  | $h < 754,00$ | $754,00 < h \leq 757,47$ | $757,47 < h \leq 760,95$ | $> 760,95$     |
| G5  | $h < 762,16$ | $762,16 < h \leq 764,71$ | $764,71 < h \leq 767,26$ | $> 767,26$     |

Tabela 6.6 – Níveis de controle dos instrumentos em função de h (Seção J)

| INA | Normal (m)   | Atenção (m)              | Alerta (m)               | Emergência (m) |
|-----|--------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| J1  | $h < 757,28$ | $757,28 < h \leq 760,02$ | $760,02 < h \leq 762,75$ | $> 762,75$     |
| J2  | $h < 762,29$ | $762,29 < h \leq 764,55$ | $764,55 < h \leq 766,82$ | $> 766,82$     |
| J3  | $h < 737,70$ | $737,7 < h \leq 739,79$  | $739,79 < h \leq 741,87$ | $> 741,87$     |

A Figura 6.14 apresenta a distribuição dos níveis de controle associados ao comportamento do nível freático em diferentes seções da barragem. Os INA estão representados ao longo do maciço, permitindo a avaliação espacial das condições hidráulicas internas.

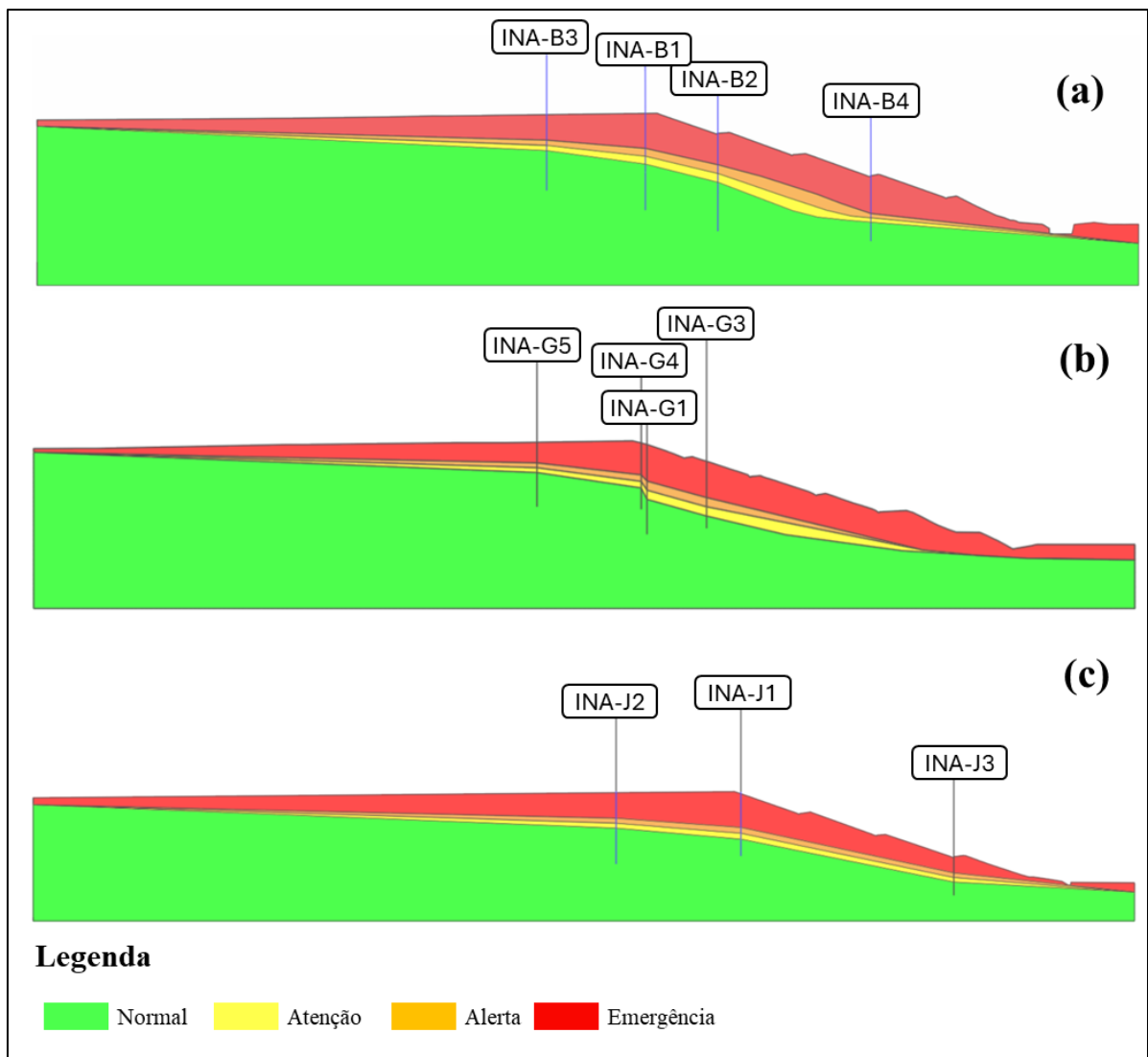


Figura 6.14 – Intervalos dos níveis de controle dos instrumentos nas seções da barragem: (a) seção B, (b) seção G e (c) seção J

Destaca-se que, em função da adoção dos valores máximos registrados pelos INA para a definição da linha freática na condição observada, era esperado que os níveis de controle estabelecidos se posicionassem acima dos registros reais da série histórica. Essa foi uma abordagem conservadora compatível com o comportamento da estrutura, que operou ao longo de todo o período analisado em condição Normal em termos de níveis de controle.

Dessa forma, a análise proposta não se concentra na verificação do eventual atingimento dos níveis de controle, mas na avaliação do comportamento da estrutura em relação a esses limites, em termos da variação da carga hidráulica (h).

Considerando-se a posição média da linha freática nos instrumentos, conforme apresentado na Tabela 6.1, foi possível avaliar, sob uma perspectiva operacional, os incrementos necessários para o atingimento dos níveis de controle.

De modo geral, para o nível de Atenção, os incrementos necessários variam entre aproximadamente 2,6 m (J3) e 6,0 m (G1), indicando que, mesmo para o primeiro nível de controle, não se trata de variações pontuais, mas sim de elevações relevantes da linha freática. Para o nível de Alerta, esses valores aumentam significativamente, atingindo cerca de 10,9 m (G1) e 10,2 m (G3), enquanto, para o nível de Emergência, as elevações necessárias podem ultrapassar 15 m, como observado nos instrumentos G1 e G3, com valores da ordem de 15,7 m e 15,1 m, respectivamente.

Esse comportamento indica que, mesmo considerando a condição de operação média da barragem, a aproximação dos níveis superiores de controle demandaria por grandes elevações da linha freática, significativamente superiores às variações registradas ao longo do período analisado. Dessa forma, essa análise complementar reforça que a estrutura opera com afastamento significativo em relação a cenários associados aos níveis de Alerta e Emergência, corroborando as conclusões obtidas nas análises baseadas nos valores máximos.

### **6.5 Análise de estabilidade associada aos níveis de controle**

Neste item serão apresentadas as análises de estabilidade considerando as linhas freáticas definidas a partir dos limites dos níveis de controle. A Figura 6.15 sintetiza a relação gráfica de todos os FS obtidos.

Destaca-se ainda que o nível de Emergência não foi objeto de análise específica de estabilidade, uma vez que corresponde a uma condição que excede o limite superior do nível de Alerta, representando, portanto, um cenário além dos limites operacionais considerados nas simulações. Além disso, as análises de estabilidade foram realizadas em superfícies não circulares, com carregamento não drenado, considerado a mais crítica, como observado no item 6.2.

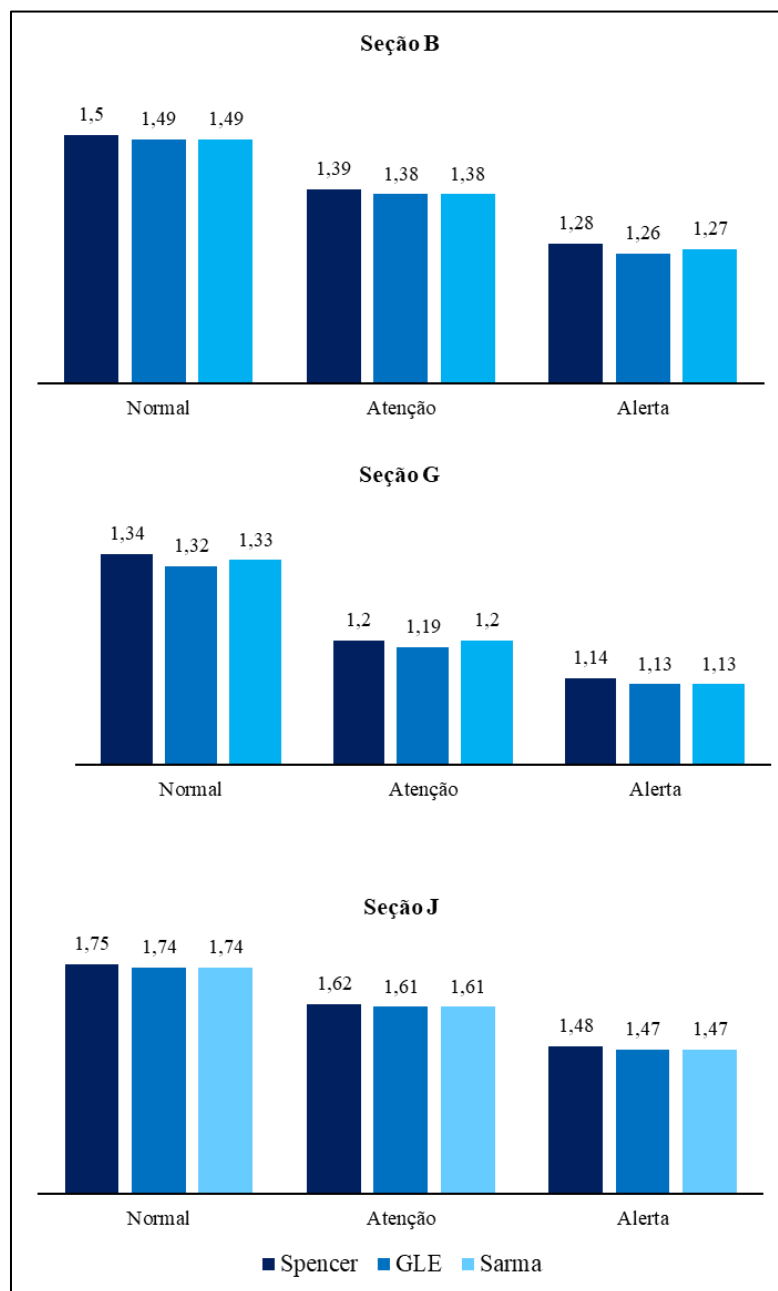


Figura 6.15 – Relação gráfica dos FS obtidos em função dos níveis de controle: Normal, Atenção e Alerta

Nota-se que nos três métodos (Spencer, GLE e Sarma) as análises apresentaram concordância entre os resultados em todas as seções, assim como as superfícies de rupturas. Seguidamente, apresentam-se entre a Figura 6.16 e Figura 6.18 as análises de estabilidade realizadas para as seções B, G e J, respectivamente.

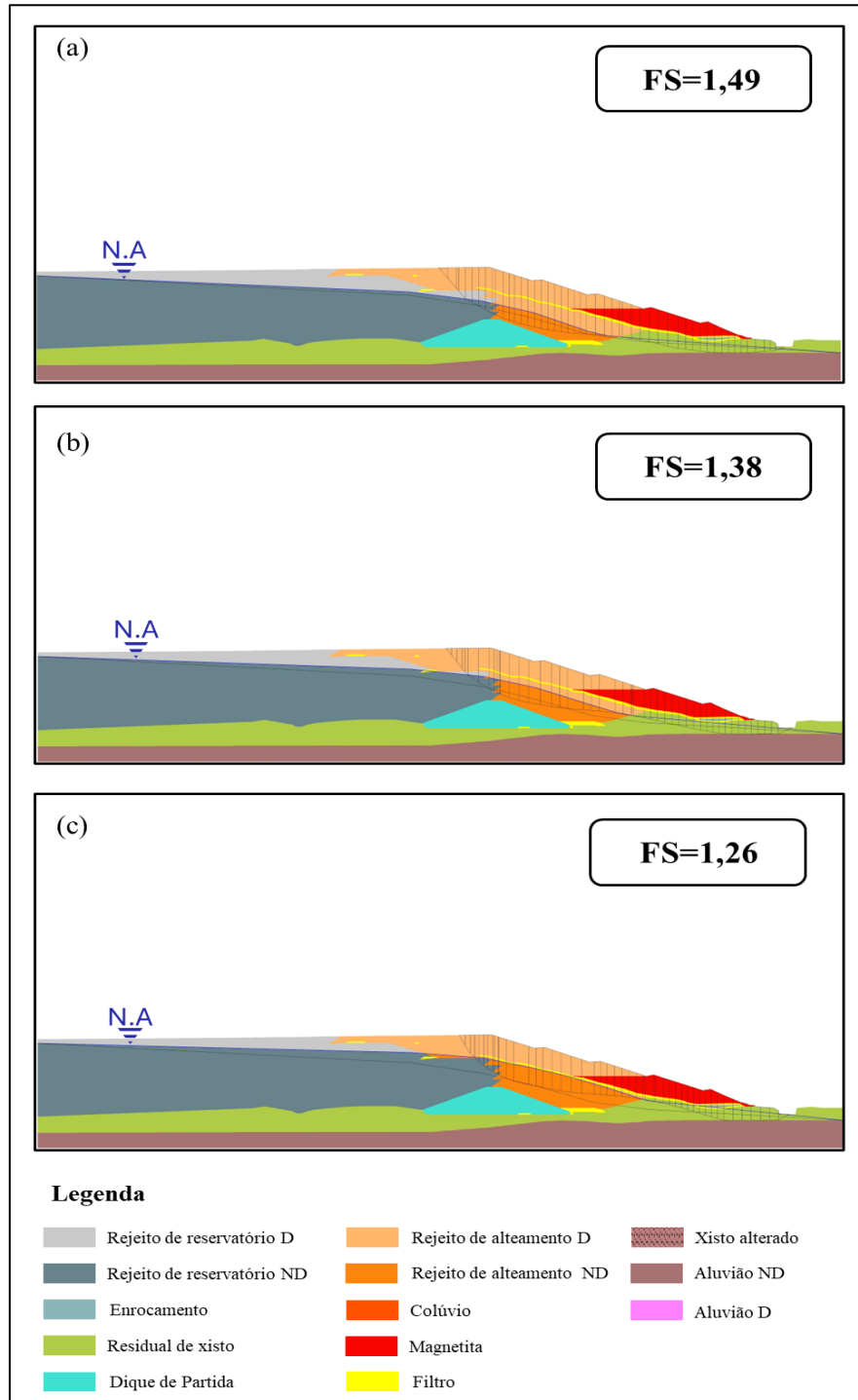


Figura 6.16 – Análises de estabilidade para a seção B em função dos níveis de controle: (a) Normal, (b) Atenção e (c) Alerta

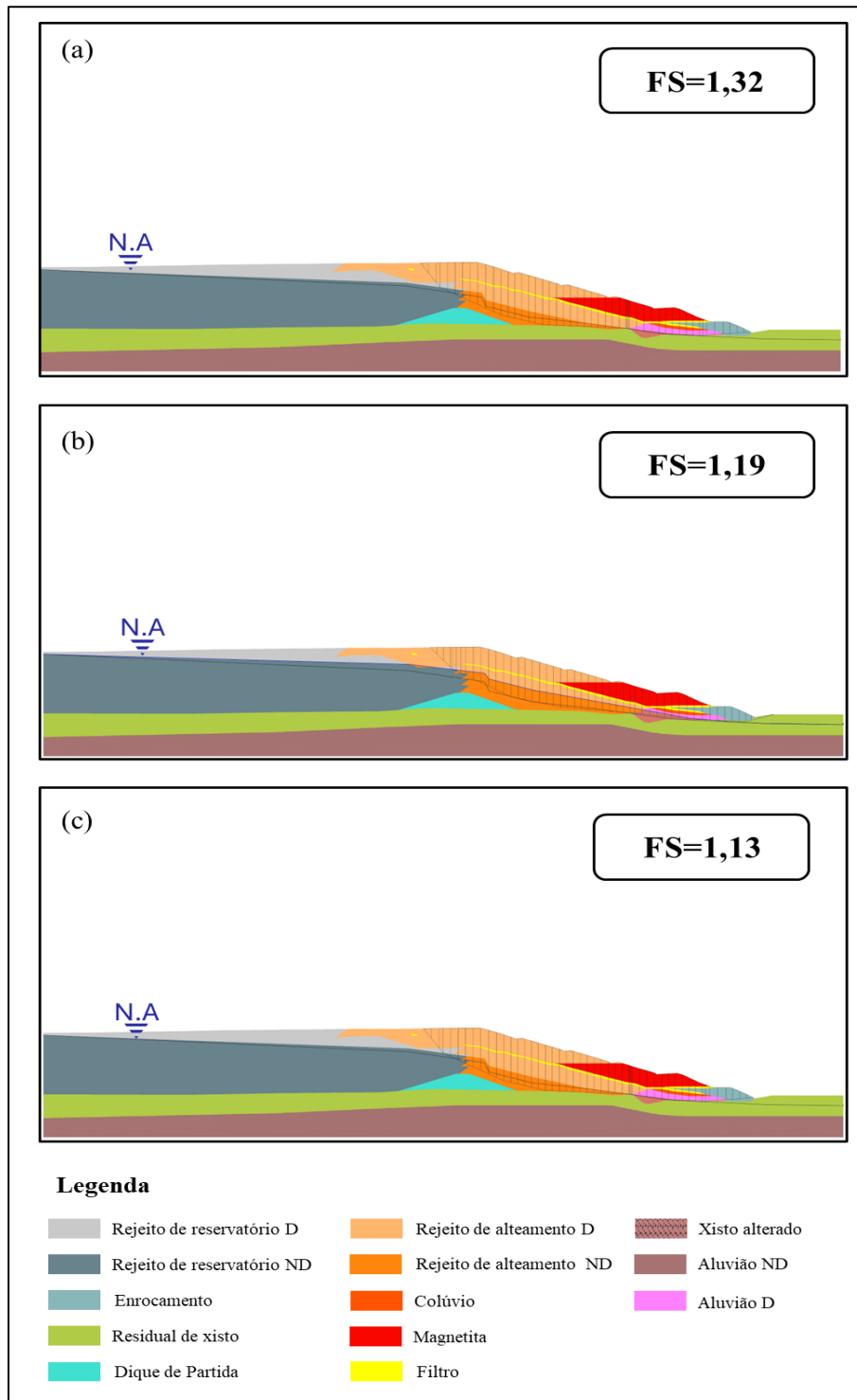


Figura 6.17 – Análises de estabilidade para a seção G em função dos níveis de controle: (a) Normal, (b) Atenção e (c) Alerta

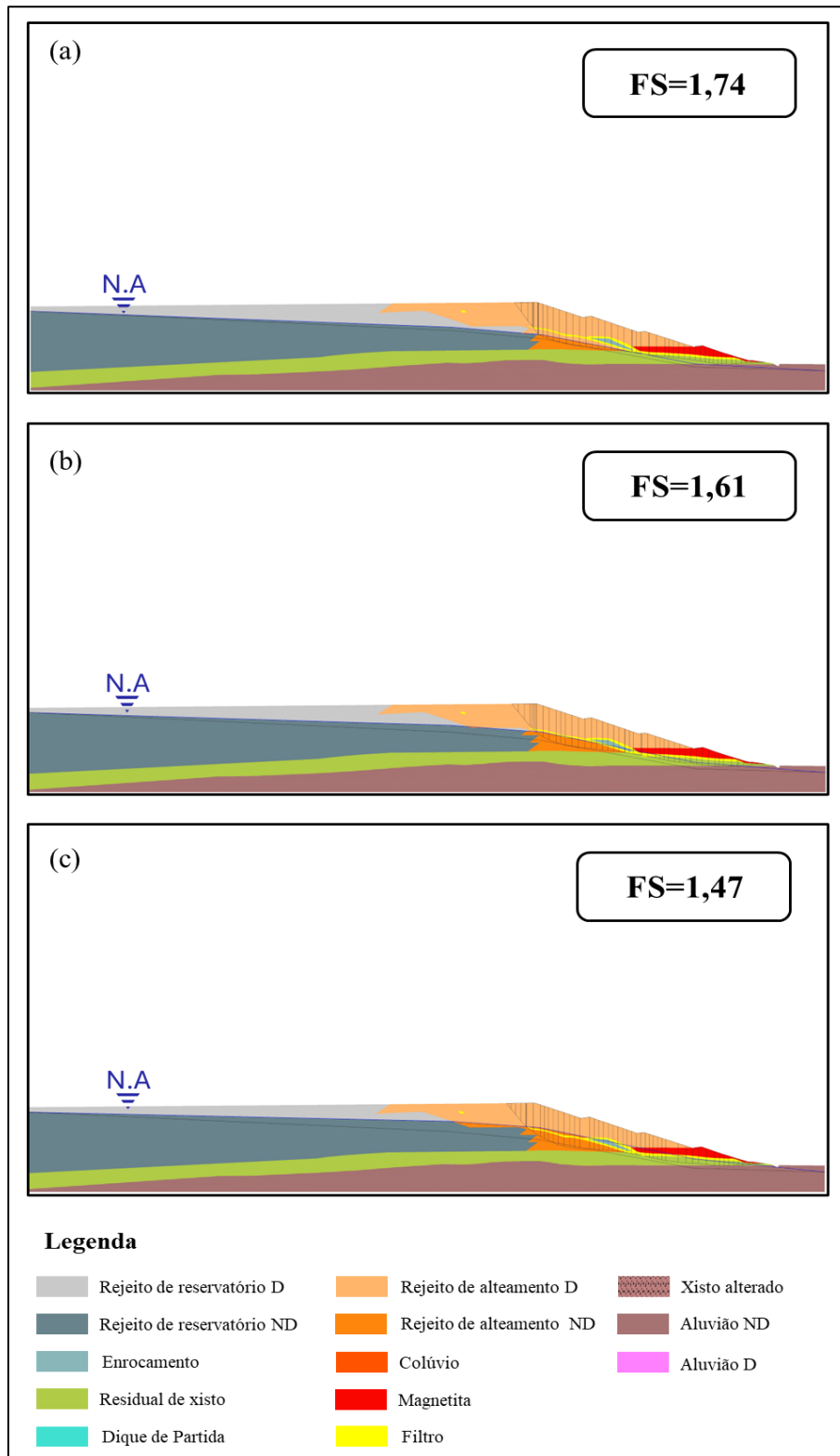


Figura 6.18 – Análises de estabilidade para a seção J em função dos níveis de controle: (a) Normal, (b) Atenção e (c) Alerta

Nos cenários analisados, observa-se que os fatores de segurança apresentaram comportamento consistente, evidenciando a influência direta da elevação da linha freática na estabilidade da estrutura.

Verificou-se que, à medida que as linhas freáticas foram elevadas a partir dos limites definidos para os níveis de controle, houve redução progressiva dos valores de fator de segurança em todas as seções analisadas. Esse comportamento reflete o aumento da carga hidráulica interna e seus efeitos na estabilidade do maciço, confirmando a coerência dos resultados obtidos e a adequação da metodologia adotada.

Na sequência, a Tabela 6.7 apresenta os níveis de controle definidos em função do FS, conforme a análise de estabilidade realizada e nos critérios estabelecidos na Tabela 5.5.

**Tabela 6.7 – Níveis de controle das seções em função do FS**

| Seção | Normal         | Atenção               | Alerta                | Emergência  |
|-------|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| B     | $FS \geq 1,49$ | $1,49 > FS \geq 1,38$ | $1,38 > FS \geq 1,26$ | $1,26 > FS$ |
| G     | $FS \geq 1,32$ | $1,32 > FS \geq 1,19$ | $1,19 > FS \geq 1,13$ | $1,13 > FS$ |
| J     | $FS \geq 1,74$ | $1,74 > FS \geq 1,61$ | $1,61 > FS \geq 1,47$ | $1,47 > FS$ |

Observa-se que a classificação proposta neste trabalho apresenta maior sensibilidade às particularidades hidráulicas de cada seção do que os limites gerais estabelecidos pela ANM para condições não drenadas de pico (Tabela 4.3).

Na seção B, a condição normal ( $FS \geq 1,49$ ) e a faixa de atenção ( $1,49 > FS \geq 1,38$ ) permanecem integralmente acima do limite de 1,30, acima do qual a estrutura se encontra fora das faixas de emergência definidas pela ANM. A faixa de alerta ( $1,38 > FS \geq 1,26$ ) intercepta parcialmente o intervalo de NE-1 ( $1,20 \leq FS < 1,30$ ), enquanto a condição de emergência ( $FS < 1,26$ ) passa a abranger valores enquadráveis em NE-1 e, posteriormente, em NE-2 ( $FS < 1,20$ ). Dessa forma, a seção B apresenta uma antecipação moderada da condição crítica em relação à norma.

Para a seção G, observa-se a maior proximidade entre os limites definidos neste estudo e os critérios da ANM. A condição normal ( $FS \geq 1,32$ ) encontra-se muito próxima do limiar de 1,30, enquanto a faixa de atenção ( $1,32 > FS \geq 1,19$ ) intercepta diretamente o intervalo de NE-1 ( $1,20$

$\leq FS < 1,30$ ). A faixa de alerta ( $1,19 > FS \geq 1,13$ ) situa-se predominantemente dentro de NE-2 ( $1,00 \leq FS < 1,20$ ), e a condição de emergência ( $FS < 1,13$ ) aproxima-se da transição para NE-3 ( $FS < 1,00$ ). Dessa forma, a seção G apresenta a melhor correspondência com os níveis normativos, sendo também a seção mais crítica dentre as analisadas, uma vez que seus intervalos de FS se encontram mais próximos das faixas de comprometimento da segurança estabelecidas pela ANM.

Já na seção J, observa-se uma abordagem significativamente mais conservadora. A condição normal ( $FS \geq 1,74$ ) e as faixas de atenção ( $1,74 > FS \geq 1,61$ ) e alerta ( $1,61 > FS \geq 1,47$ ) permanecem integralmente acima do limite de 1,30, não se enquadrando em nenhum nível de emergência da ANM. Além disso, a condição de emergência ( $FS < 1,47$ ) é definida para valores ainda superiores ao limiar de NE-1, indicando que a metodologia proposta sinaliza criticidade em uma faixa em que, sob a ótica normativa, a estrutura ainda apresentaria condição satisfatória de estabilidade. Assim, a seção J configura-se como a mais segura entre as seções analisadas, ao mesmo tempo em que apresenta a maior margem em relação aos critérios da ANM.

De forma geral, verifica-se que os níveis de controle definidos neste estudo tendem a antecipar a identificação de condições críticas em relação aos critérios normativos, sendo essa antecipação mais pronunciada na seção J e mais aderente à norma na seção G. Essa diferença decorre do fato de que a metodologia adotada foi construída a partir da resposta piezométrica específica de cada seção, considerando a linha freática máxima histórica dos indicadores de nível d'água (INA) e as superfícies de percolação associadas.

Nesse sentido, ressalta-se que os níveis de controle aqui propostos não têm como objetivo substituir os critérios estabelecidos pela ANM, mas sim atuar de forma complementar, especialmente sob o ponto de vista operacional. Enquanto a ANM estabelece limites regulatórios voltados ao enquadramento da segurança da estrutura, os níveis definidos neste trabalho permitem um acompanhamento mais sensível e contínuo da evolução das condições hidráulicas internas da barragem.

Destaca-se ainda que a integração entre os níveis de controle baseados no fator de segurança e aqueles obtidos diretamente a partir dos registros dos INA é uma ferramenta robusta para o monitoramento geotécnico, permitindo associar a resposta hidráulica observada em campo com a estabilidade da estrutura. Essas abordagens favorece a identificação precoce de tendências de

elevação do nível freático e seus possíveis impactos na redução da resistência do maciço, contribuindo para a tomada de decisão em tempo hábil.

Por fim, ressalta-se que a análise desenvolvida neste estudo está restrita ao modo de falha por instabilidade de taludes, não contemplando outros mecanismos de ruptura relevantes em barragens de rejeito, como galgamento, erosão interna (*piping*), erosão externa e liquefação, conforme discutido no item 4.3. Dessa forma, os resultados aqui apresentados devem ser interpretados no contexto dessa limitação, sendo recomendável que a avaliação global da segurança da estrutura considere, de forma integrada, os diferentes modos de falha possíveis.

## 7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade global de uma barragem de rejeitos alteada pelo método de linha de centro, integrando análises geotécnicas de estabilidade com o comportamento das leituras de nível d'água obtidas por meio da instrumentação.

As análises de estabilidade realizadas indicaram que a estrutura apresenta condições satisfatórias de segurança sob o cenário avaliado, mesmo considerando a condição mais crítica, definida a partir dos valores máximos registrados pelos indicadores de nível d'água. Os fatores de segurança obtidos mantiveram-se, de modo geral, acima dos limites recomendados na literatura técnica e em normativas vigentes, evidenciando a estabilidade global da barragem nas condições analisadas.

Observou-se que a elevação da linha freática exerce influência significativa na redução dos fatores de segurança, destacando-se a sensibilidade da estabilidade da estrutura às variações da carga hidráulica. Nesse contexto, as análises evidenciaram que determinadas seções apresentam maior suscetibilidade à elevação do nível d'água, indicando a importância do monitoramento contínuo e do controle da percolação interna como elementos fundamentais para a manutenção da segurança geotécnica.

A comparação entre diferentes condições de análise, incluindo superfícies de ruptura circulares e não circulares, bem como condições drenadas e não drenadas, demonstrou que as situações não drenadas e as superfícies não circulares tendem a resultar em menores fatores de segurança, caracterizando cenários mais críticos. Esses resultados reforçam a necessidade de considerar múltiplas hipóteses de análise na avaliação da estabilidade de barragens de rejeito.

A metodologia proposta para definição dos níveis de controle, baseada na integração entre análises de estabilidade e variações da linha freática ( $\Delta h$ ), mostrou-se consistente e coerente com o comportamento observado da estrutura. Os resultados indicaram que a aproximação aos níveis superiores de controle demandaria elevações expressivas da linha freática, significativamente superiores às variações registradas ao longo do período analisado, evidenciando que a barragem opera com margem de segurança em relação aos estados de Alerta e Emergência.

Adicionalmente, a análise dos incrementos necessários para o atingimento dos níveis de controle permitiu uma interpretação operacional dos resultados, possibilitando a associação

direta entre as leituras de instrumentação e o desempenho geotécnico da estrutura. Essa abordagem contribui para a tomada de decisão no gerenciamento da barragem, permitindo a identificação antecipada de cenários potencialmente críticos.

Dessa forma, destaca-se que a integração entre dados de instrumentação e análises de estabilidade são ferramentas essenciais para a avaliação da segurança de barragens de rejeito, permitindo não apenas a verificação das condições atuais, mas também a definição de limites de controle com base em critérios geotécnicos consistentes.

Nesse contexto, a análise dos intervalos de fator de segurança associados aos níveis de controle definidos apresentou que, para condições não drenadas de pico, os valores obtidos são, em geral, superiores aos limiares estabelecidos pela Resolução ANM nº 95/2022 para enquadramento em níveis de emergência. Tal comportamento está diretamente relacionado à metodologia adotada, uma vez que os cenários analisados foram construídos a partir da linha freática máxima baseada em dados reais dos INA, representando condições críticas plausíveis e coerentes com o histórico da estrutura, que não apresenta registros de instabilidade, mesmo sob condições elevadas de nível freático.

A comparação com os critérios normativos indicou que, embora a barragem não apresente histórico de instabilidade, as análises realizadas permitem identificar diferenças na sensibilidade das seções avaliadas. Nesse contexto, a seção G apresenta maior proximidade com os níveis definidos pela ANM, configurando-se como a condição mais crítica entre as seções analisadas e evidenciando maior suscetibilidade à elevação da carga hidráulica. Por outro lado, a seção J apresentou comportamento mais conservador, com níveis de controle associados a fatores de segurança significativamente superiores aos limiares normativos, indicando maior margem de estabilidade.

Ressalta-se que os níveis de controle definidos neste estudo não têm como objetivo substituir os critérios estabelecidos pela ANM, mas sim atuar de forma complementar, sobretudo sob a perspectiva operacional. Enquanto a norma estabelece limites gerais para enquadramento da segurança da estrutura, a metodologia proposta permite um acompanhamento mais sensível e contínuo da evolução das condições hidráulicas internas da barragem, a partir da integração entre os níveis de controle baseados no fator de segurança e aqueles obtidos diretamente por meio dos indicadores de nível d'água (INA).

Por fim, ressalta-se que, embora os resultados obtidos indiquem condições adequadas de estabilidade, a análise desenvolvida está restrita ao modo de falha por instabilidade de taludes, não contemplando outros mecanismos relevantes em barragens de rejeito, como galgamento, erosão interna, erosão externa e liquefação, conforme discutido na revisão bibliográfica. Dessa forma, recomenda-se que avaliações futuras considerem, de forma integrada, os diferentes modos de ruptura possíveis.

Adicionalmente, a análise está sujeita a incertezas associadas à variabilidade dos parâmetros geotécnicos, às simplificações adotadas na definição da linha freática e à ausência de carregamentos dinâmicos nas simulações. Nesse sentido, recomenda-se que estudos futuros considerem a inclusão de análises sob condições sísmicas, investigações adicionais de campo e a aplicação de abordagens probabilísticas, visando o aprimoramento da avaliação de segurança da estrutura.

## REFERÊNCIAS

ADAMO, N.; AL-ANSARI, N.; SISSKIAN, V.; LAUE, J.; KNUTSSON, S. Dam safety: monitoring of tailings dams and safety reviews. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, v. 11, n. 1, p. 249–289, 2020. DOI: <https://doi.org/10.47260/jesge/1117>.

FILHO, L. H A. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual de procedimentos técnicos para operação de estações hidrométricas. Brasília: ANA, 2012.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de segurança de barragens 2021. Brasília: ANA, 2021.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Relatório anual de segurança de barragens de mineração 2021. Brasília: ANM, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17188: barragens — ruptura hipotética — diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50–53, 2010.

BARRETO, M.; TEIXEIRA, S.; ACEVEDO, A.; CALCINA, A.; KATERENIUK, S. Permeabilidade, drenagem e instrumentação em maciços: estudo e aplicações em barragens. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 11, n. 1, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/36123/20110>.

BERILGEN, M. M. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*, v. 34, n. 2, p. 81–91, 2007.

BRASIL DE FATO. Rio das Velhas, que abastece Grande BH, continua em estado de alerta. *Belo Horizonte*, 27 ago. 2021.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019. Brasília, DF: ANM, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens>.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. Brasília, DF: CNRH, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-cnrh-no-143-de-10-de-julho-de-2012>.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2020.

BRASIL. Senado Federal. Comissão Parlamentar de Inquérito de Brumadinho. Relatório final. Brasília: Senado Federal, 2019.

CHAMMAS, R. Notas de aula do curso de barragens de contenção de rejeitos. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 1989.

CHENG, Y. M.; LAU, C. K. A study on factor of safety evaluation in slope stability analysis. HKIE Transactions, v. 8, n. 1, p. 28–34, 2001.

COELHO, T. P.; WANDERLEY, L. J.; MIRANDA, L. S. Desastres da mineração no Brasil: impactos socioambientais e respostas institucionais. [S.l.]: [s.n.], 2023.

CRUZ, P. T. 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

DIAS, F. Avaliação de estabilidade de barragem alteada pelo método de montante por diferentes metodologias de cálculo de fator de segurança: comparação determinística. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. Soil strength and slope stability. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil strength and slope stability. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

DUNCAN, J. M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. Journal of Geotechnical Engineering, v. 122, n. 7, p. 577–596, 1996.

DUNNICLIFF, J. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. New York: John Wiley & Sons, 1988.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. Geotechnical engineering of dams. London: A. A. Balkema, 2005.

FELLENIOUS, W. Calculation of the stability of earth dams. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS, 2., 1936, Washington. Proceedings of the second congress on large dams. Washington: International Commission on Large Dams, 1936. p. 445–463.

FERREIRA, J. L. F. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2012.

FIORI, A. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FONSECA, A. R. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica: estudo de caso das barragens da UHE São Simão. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FOURIE, A. B.; BLIGHT, G. E.; PAPAGEORGIOU, G. (ed.). Tailings storage facilities. London: CRC Press, 2010.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, v. 14, n. 3, p. 429–439, 1977.

FUSARO, T. C. Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau. 2007. Dissertação (Mestrado em Geotecnia de Barragens) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GEOSTRU SOFTWARE. Método de Sarma (1973). Slope – Help Online. 2015.

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GISTM. Global industry standard on tailings management. London: Global Tailings Review, 2020. Disponível em: <https://globaltailingsreview.org>.

GRIFFITHS, D. V.; FENTON, G. A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 130, n. 5, p. 507–518, 2004.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Informações e análises da economia mineral brasileira 2022. Brasília: IBRAM, 2022.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Setor mineral 2025. Brasília: IBRAM, 2026. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2026/02/02.02.2026-Setor-Mineral-2025.pdf>.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Glossário de termos: gestão de recursos hídricos e meio ambiente. 2. ed. Belo Horizonte: IGAM, 2012.

ICOLD - INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. A review of liquefaction of tailings dams. Bulletin 106. Paris: ICOLD, 2001.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Tailings dams: risk of dangerous occurrences – lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. Paris: ICOLD, 2001.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Tailings dams: risk of dangerous occurrences. Bulletin 181. Paris: ICOLD, 2020.

ICMM – INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. Tailings management: good practice guide. London: ICMM, 2016.

JEFFERIES, M.; BEEN, K. Soil liquefaction: a critical state approach. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

JÚNIOR, L. J. M. Algumas considerações práticas a respeito da estabilidade de taludes. 1975. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

KASAMA, K.; WHITTLE, A. J. Effect of spatial variability on slope stability. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, v. 9, n. 2, p. 73–88, 2015.

LADD, C. C. Stability evaluation during staged construction. Journal of Geotechnical Engineering, v. 117, n. 4, p. 540–615, 1991.

LADD, C. C.; FOOTT, R. Stability of slopes in soft clay. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Proceedings of the specialty conference on performance of earth and earth-supported structures. New York: ASCE, 1974. v. 2, p. 103–131.

LIGOCKI, L. P.; SARÉ, A. R.; SAYÃO, A. S. F. J.; GERSCOVICH, D. M. S. Avaliação de segurança da barragem de Curuá-una com base na piezometria. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., 2003, Salvador. Anais do II CITENEL. Salvador: ANEEL, 2003. p. 207–217.

MA, G.; LIANG, Z.; OU, S.; TAO, Z.; HUANG, B.; CAO, H. Stability analysis and optimization of open pit mine slopes based on the improved Sarma method with nonhomogeneous hydraulic boundary conditions. Scientific Reports, v. 15, 33236, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17972-5>.

MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MENGA, R.; MASERA, A.; BECOCCI, L.; JULIANI, M. Gestão, tratamento e interpretação de dados de monitoração estrutural para controle de barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., 1999, Belo Horizonte. Anais do XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte: CBDB, 1999. p. 329–335.

MONTES, C. C. Estudos piezométricos e análise de estabilidade de taludes da barragem Bico da Pedra. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

OLSON, S. M.; STARK, T. D. Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure cases. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 39, n. 3, p. 629–647, 2002.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PENNA, D. C. R.; et al. Carta de risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO DE RISCOS E SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO, 2., 2017, Belo Horizonte. Anais do II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito. Belo Horizonte: CBDB, 2017. p. 1–20.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PULINO, A. Índices de estimativa de custos de fechamento de pilhas de estéril e barragens de rejeitos. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

REMÍGIO, A. F. N. Estudo da colmatação biológica de sistemas filtro-drenantes sintéticos sob condições anaeróbias. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

RIBEIRO, L. Definição dos níveis de controle piezométricos para uma barragem de contenção de rejeitos. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

ROCSCIENCE INC. Slide2 – 2D limit equilibrium slope stability analysis: user guide. Toronto: Rocscience Inc., 2023. Disponível em: <https://www.rocscience.com>. Acesso em: 5 abr. 2026.

RODRÍGUEZ, R.; MUÑOZ-MORENO, A.; CAPARRÓS, A. V.; et al. How to prevent flow failures in tailings dams. *Mine Water and the Environment*, v. 40, p. 83–112, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00752-8>.

SABADINI, M. F.; MENDANHA, F. O.; RIBEIRO, S. G. S.; CASTRO, J. M. G.; MARQUES, A. A. Níveis de controle para avaliação da segurança de barragens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. Anais do XIX COBRAMSEG. Salvador: ABMS, 2018.

SHERARD, J. L. Critical filters for impervious soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 89, n. SM3, p. 1–24, 1963.

SILVA, V. C. *Desmonte de rochas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SMITH, E.; DAVID, H. The role of water in the failure of tailings dams. In: INTERNATIONAL MINE DRAINAGE SYMPOSIUM, 1., 1979, Denver. Proceedings of the First International Mine Drainage Symposium. Denver: [s.n.], 1979. p. 627–649.

SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, v. 17, n. 1, p. 11–26, 1967.

STRUFALDI, E. G. B. *Retroanálise probabilística: aplicação prática de análise de percolação em uma barragem de terra*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Soil mechanics in engineering practice*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

THOMAZ, J. E. S. *Rotina de geração randômica de superfícies críticas na análise de estabilidade de taludes*. 1984.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Slope stability*. Washington, DC: Department of the Army, 2003. (Engineer Manual EM 1110-2-1902). Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil>.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Instrumentation of embankment dams and levees*. Washington, DC: Department of the Army, 1995.

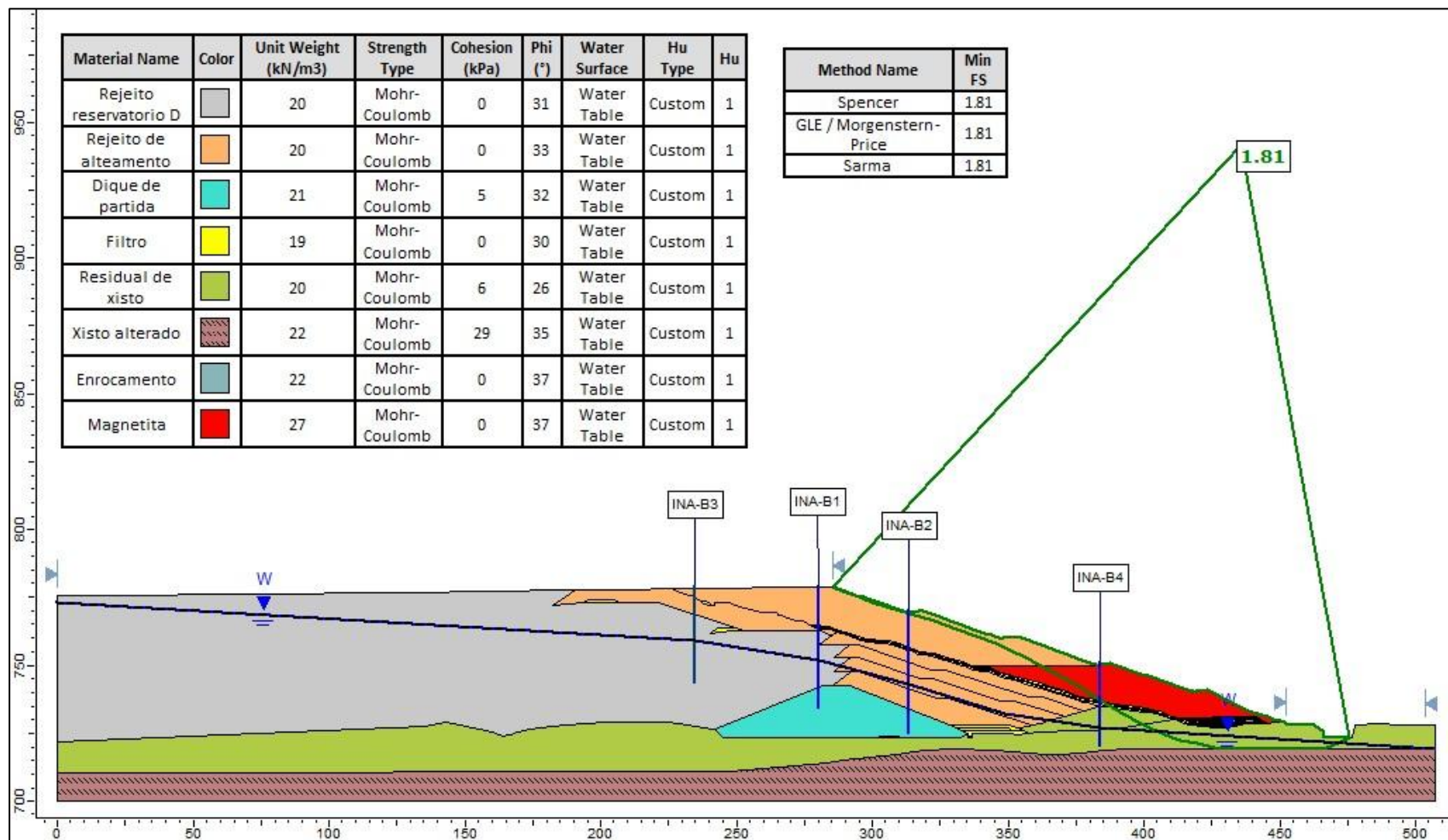
VELTEN, R. Z.; SANTOS, R. D. N.; ELIAN, L. H. R.; RIBEIRO, L. L.; DIAS, M. A. Proposição de metodologia para elaboração de carta de risco de barragens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. Anais do XVIII COBRAMSEG. Belo Horizonte: ABMS, 2016.

VICK, S. G. *Planning, design, and analysis of tailings dams*. Vancouver: University of British Columbia, 1990.

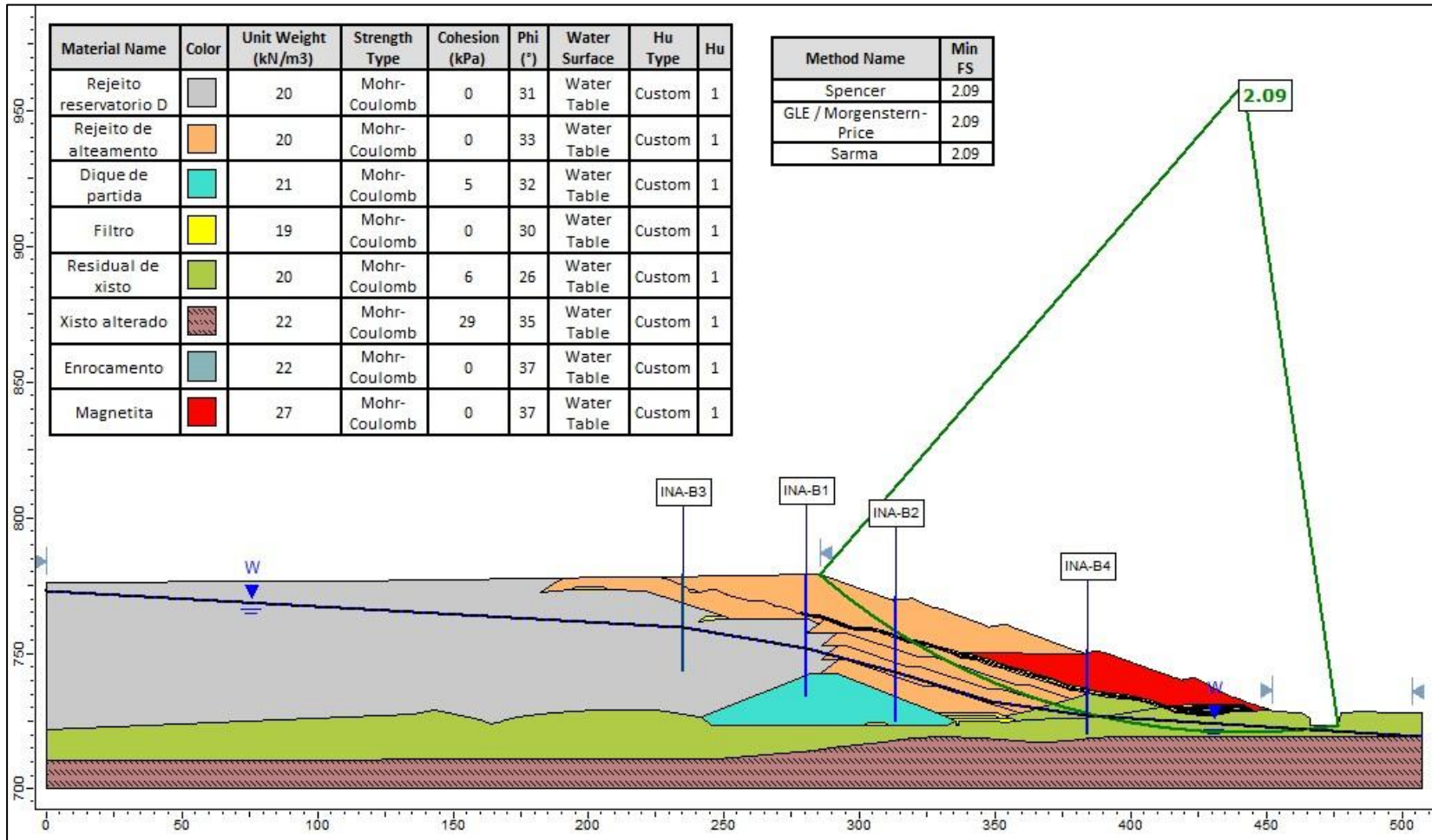
WILLIAMS, D. J. Tailings dam management and sustainability. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON TAILINGS MANAGEMENT, 2018. Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 2018.

ZARDARI, M. A. Stability of tailings dams: focus on numerical modelling. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Luleå University of Technology, Luleå, 2011.

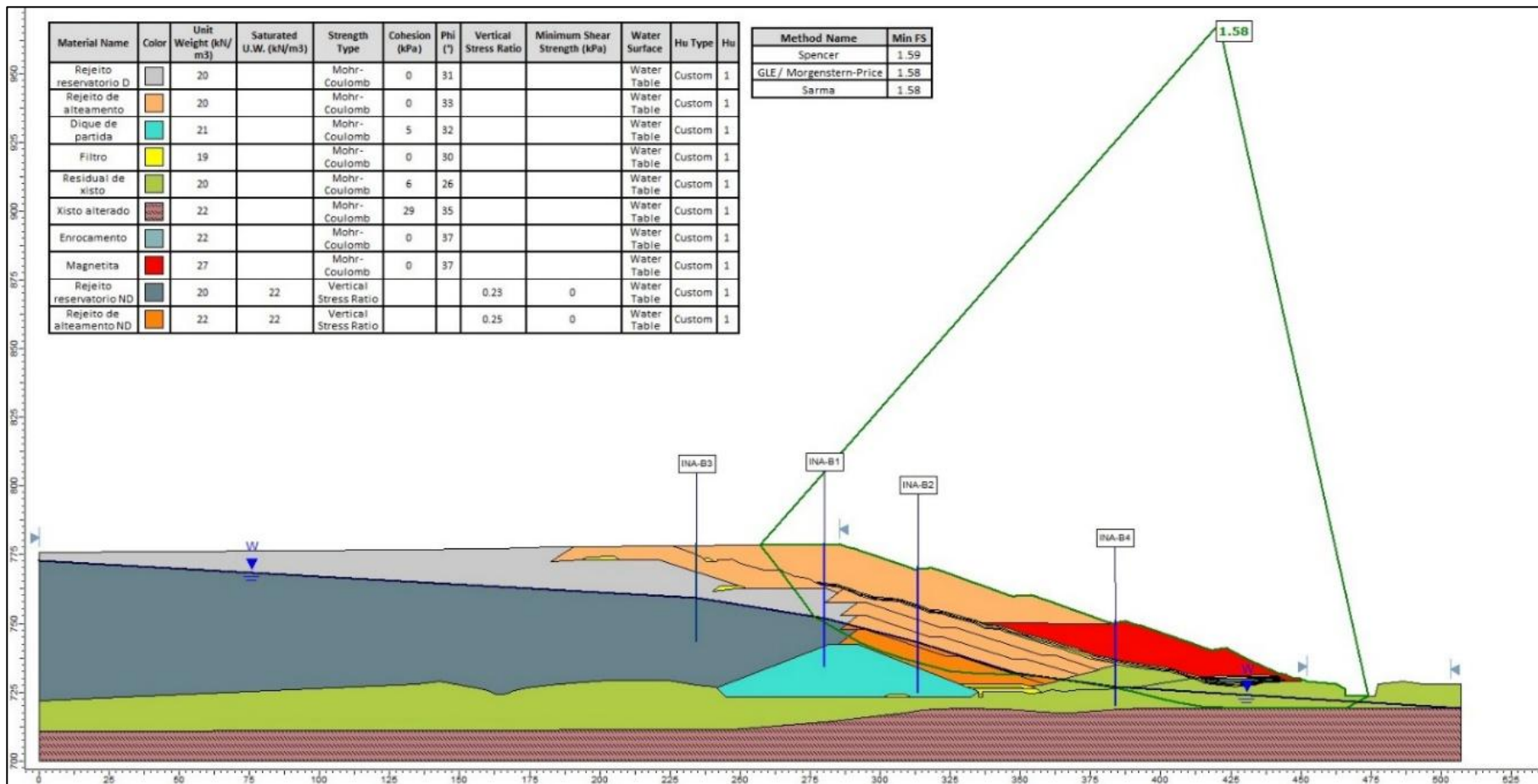
## APÊNDICE A - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, DRENADA



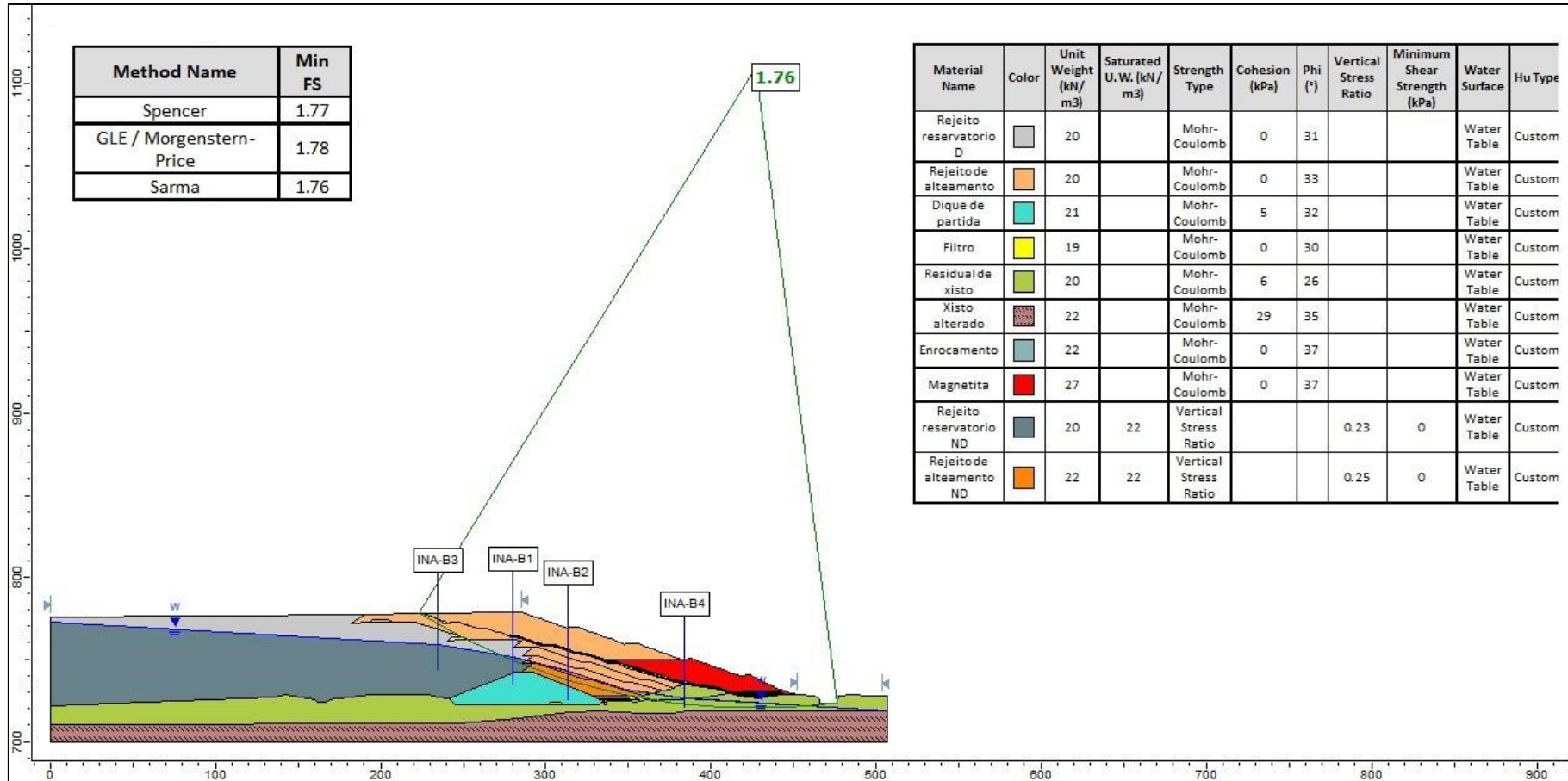
## APÊNDICE B - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, DRENADA



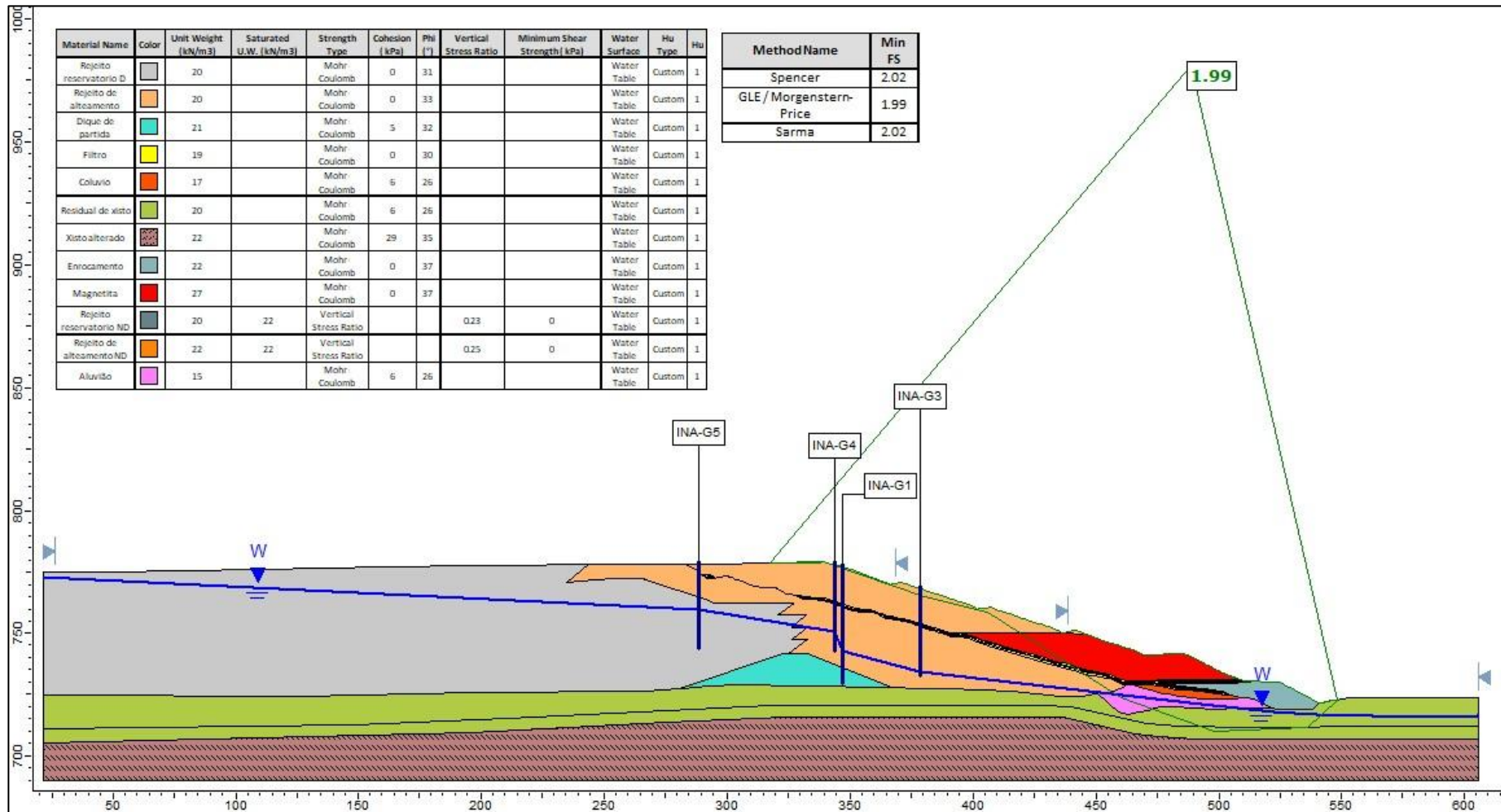
## APÊNDICE C - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, NÃO DRENADO



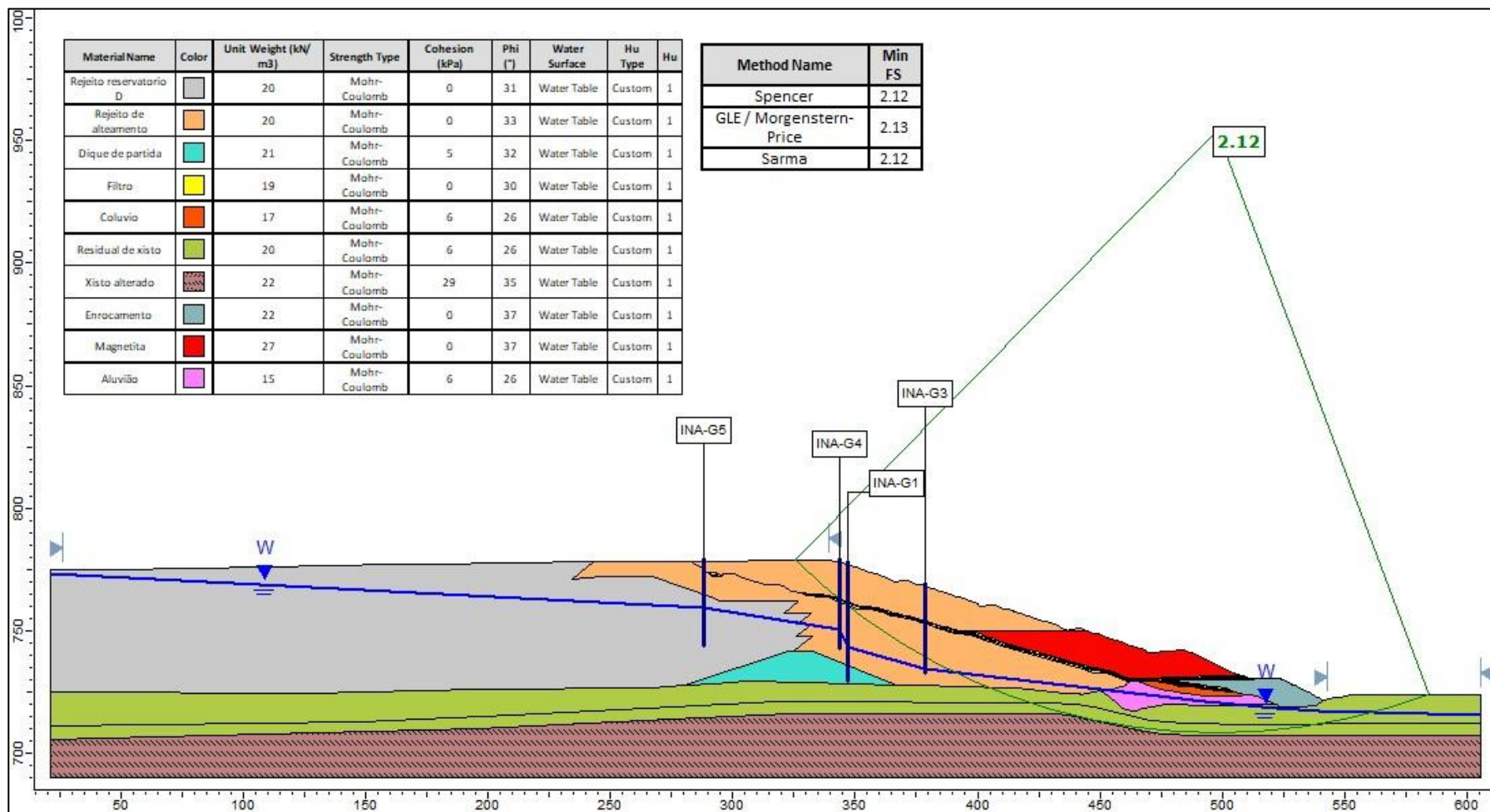
## APÊNDICE D - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, NÃO DRENADO.



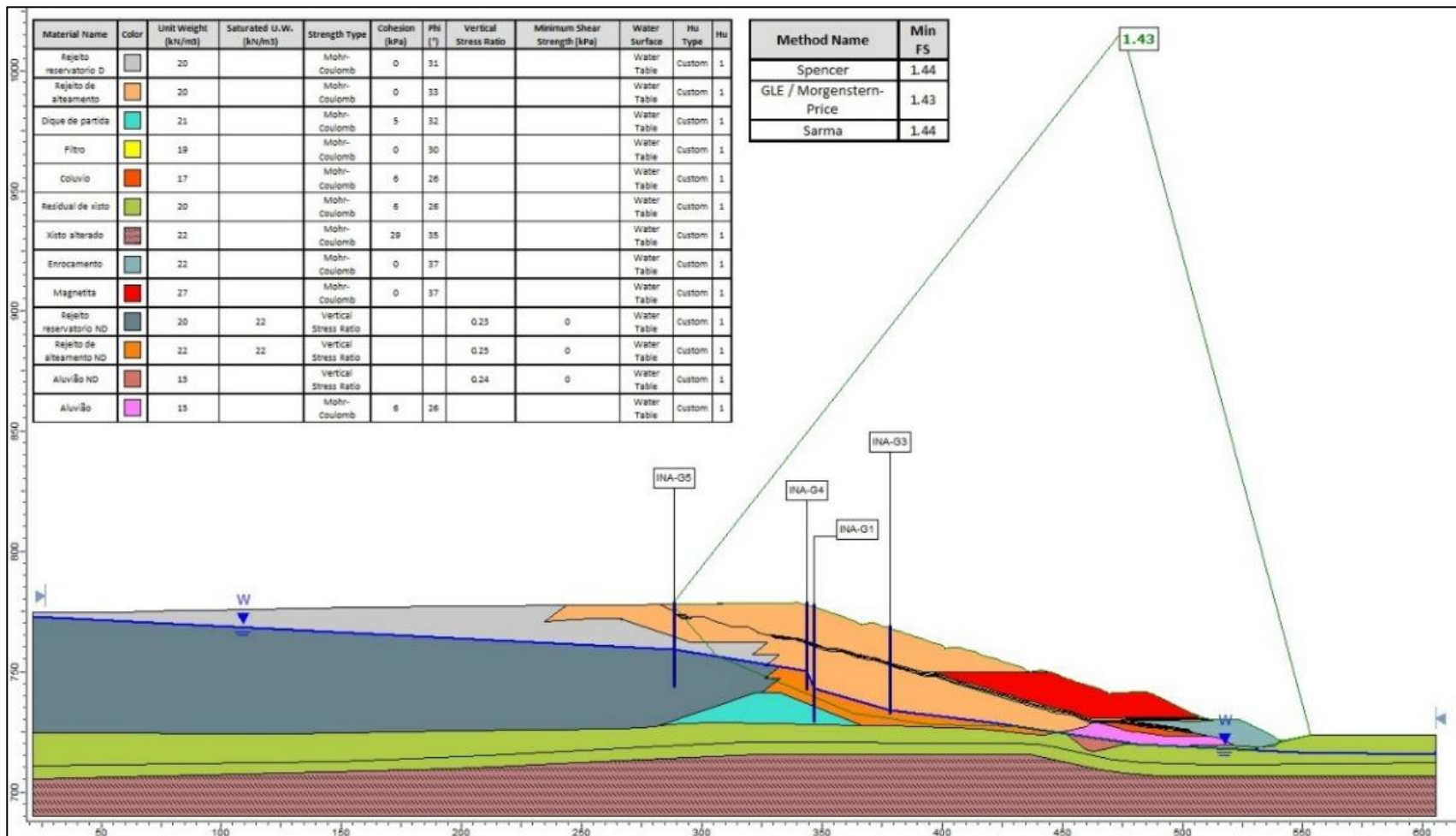
## APÊNDICE E - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, DRENADA



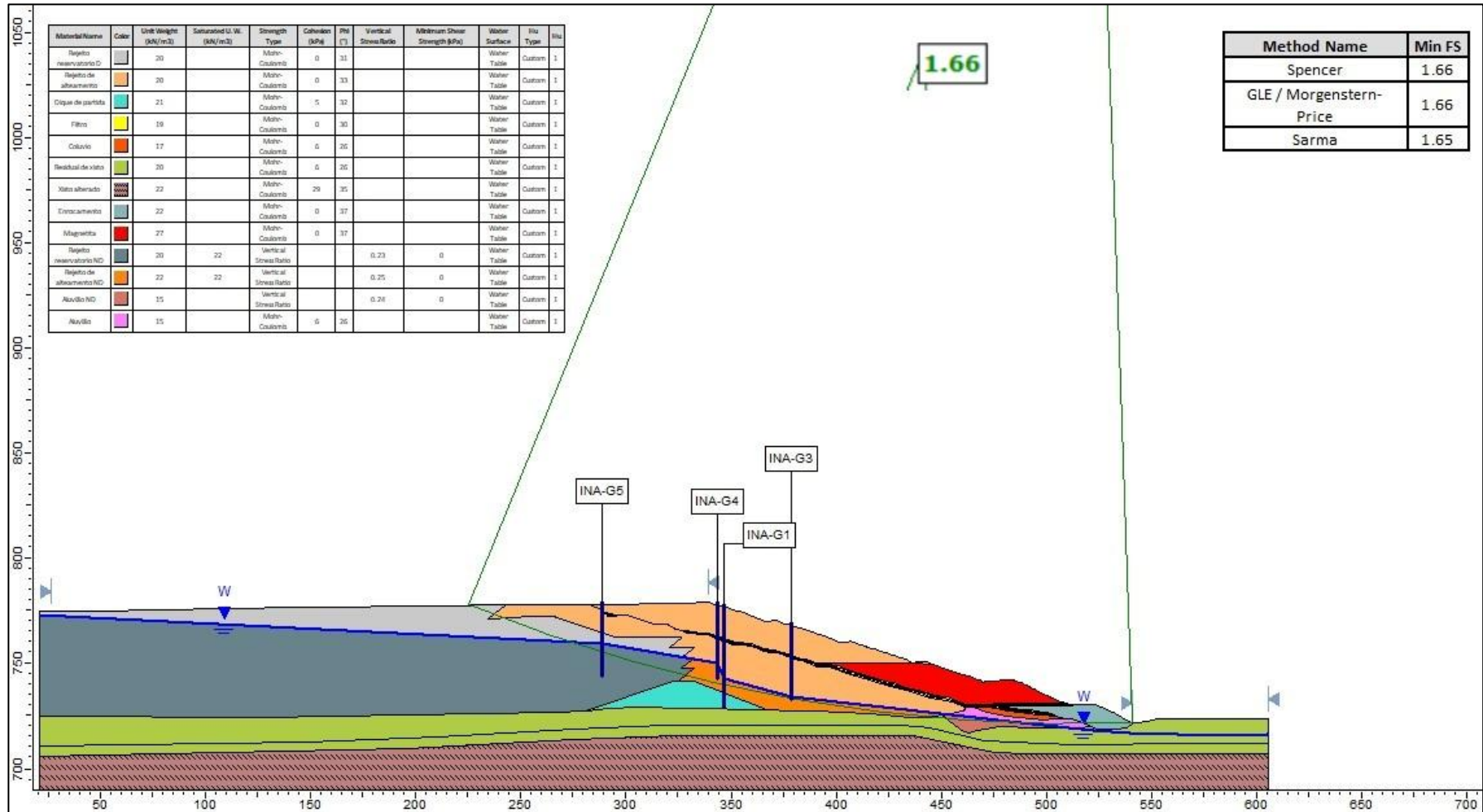
## APÊNDICE F - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, DRENADA



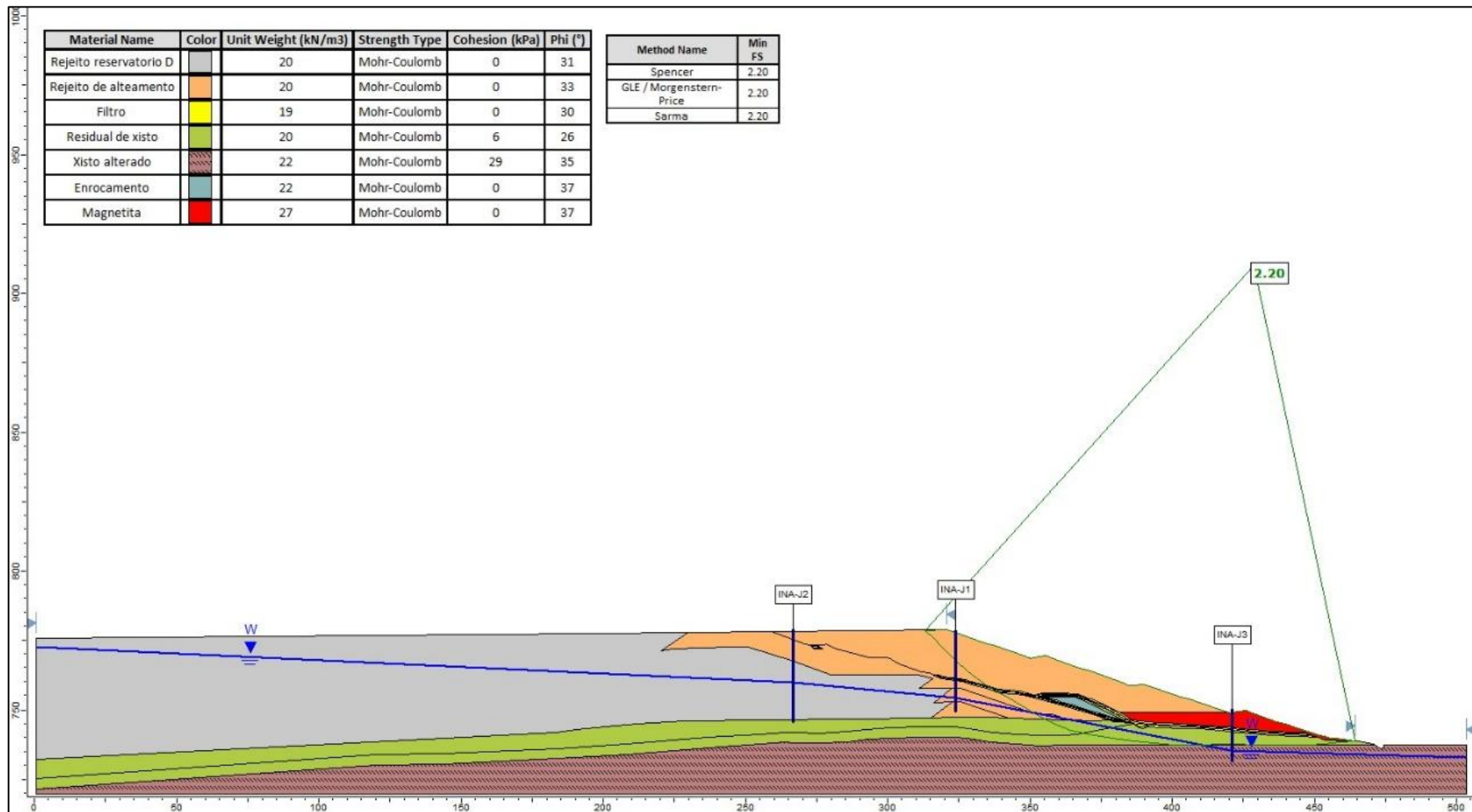
## APÊNDICE G - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, NÃO DRENADA



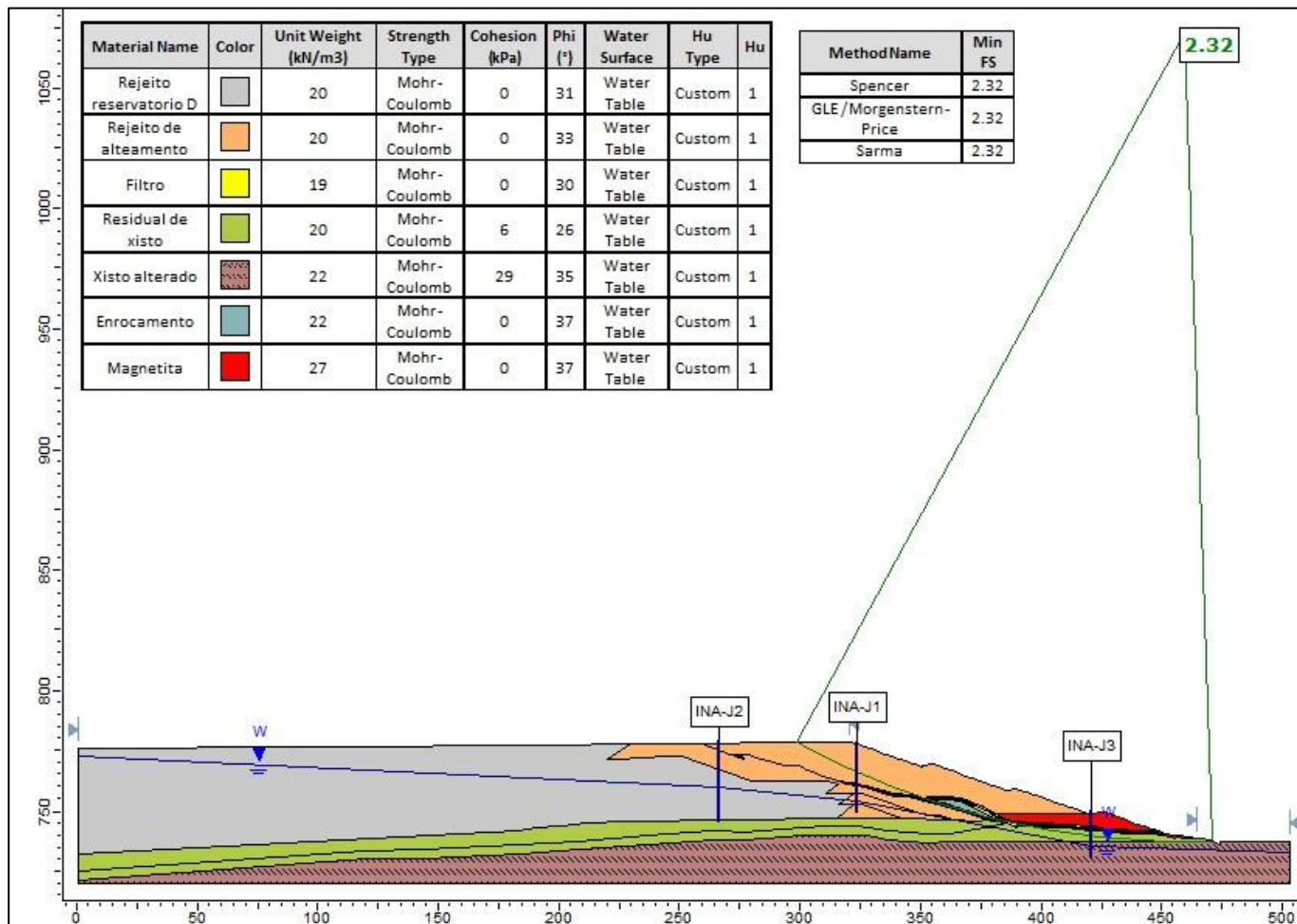
## APÊNDICE H - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, NÃO DRENADA



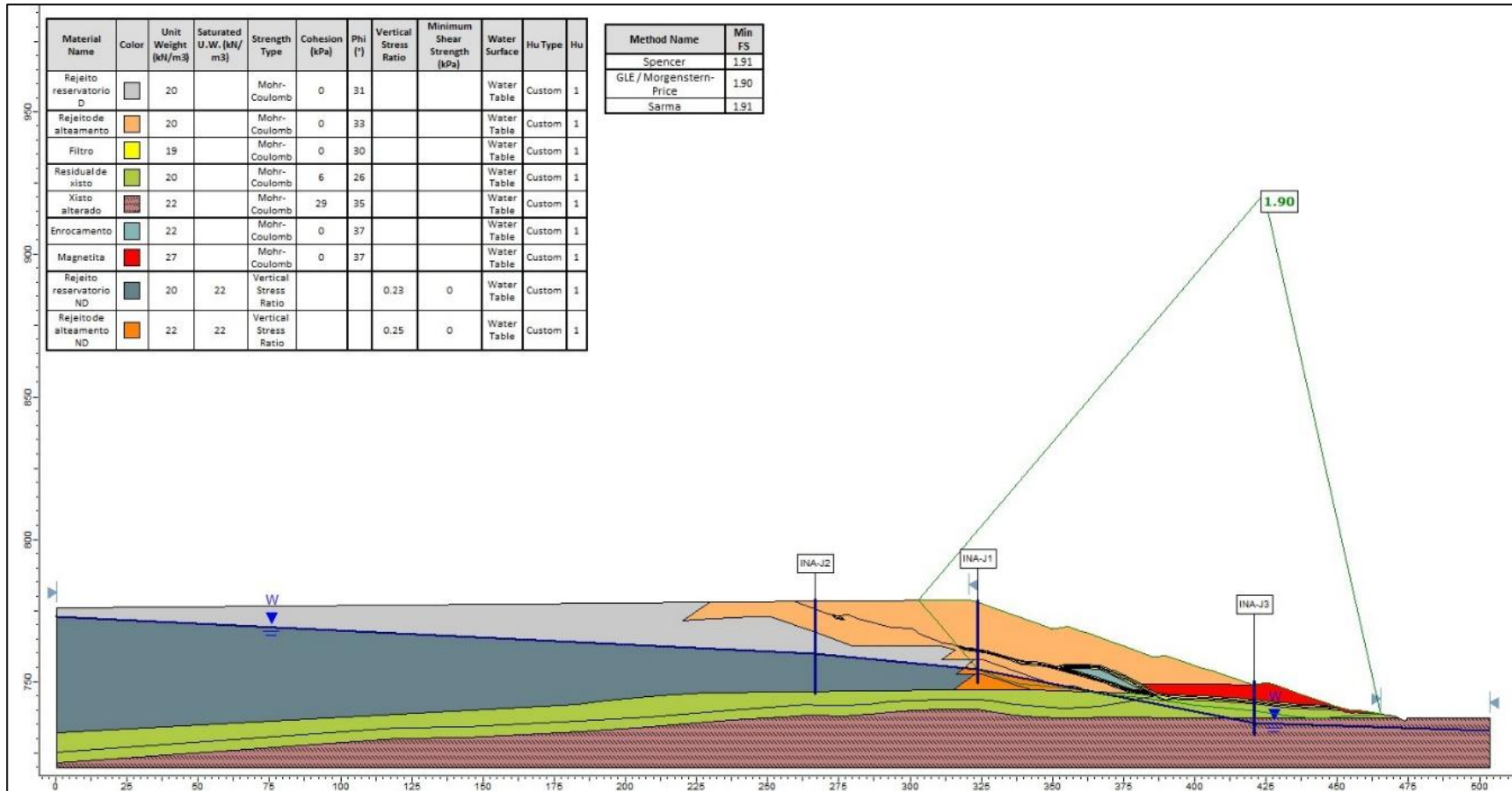
## APÊNDICE I - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, DRENADA



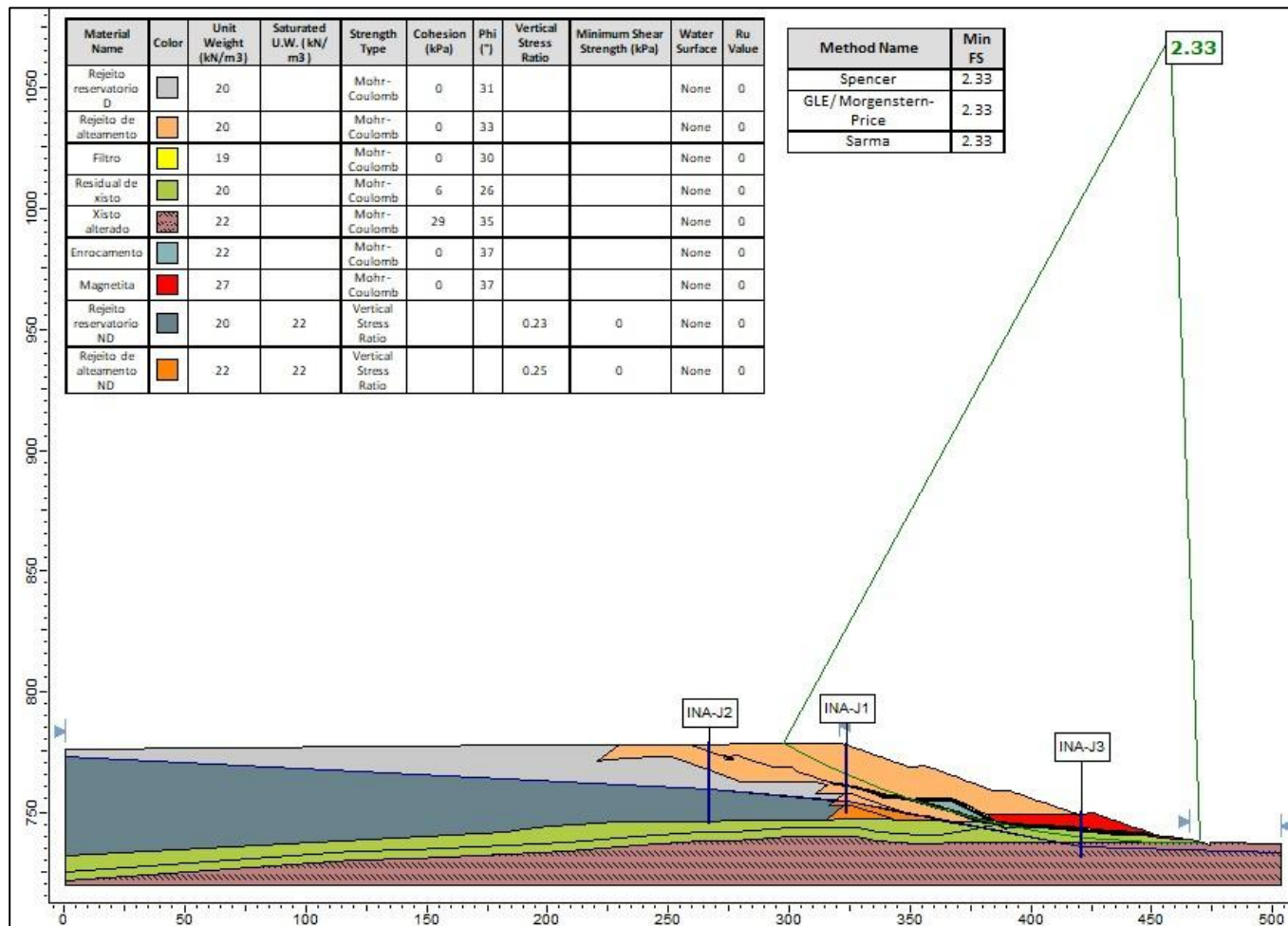
## APÊNDICE J - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, DRENADA



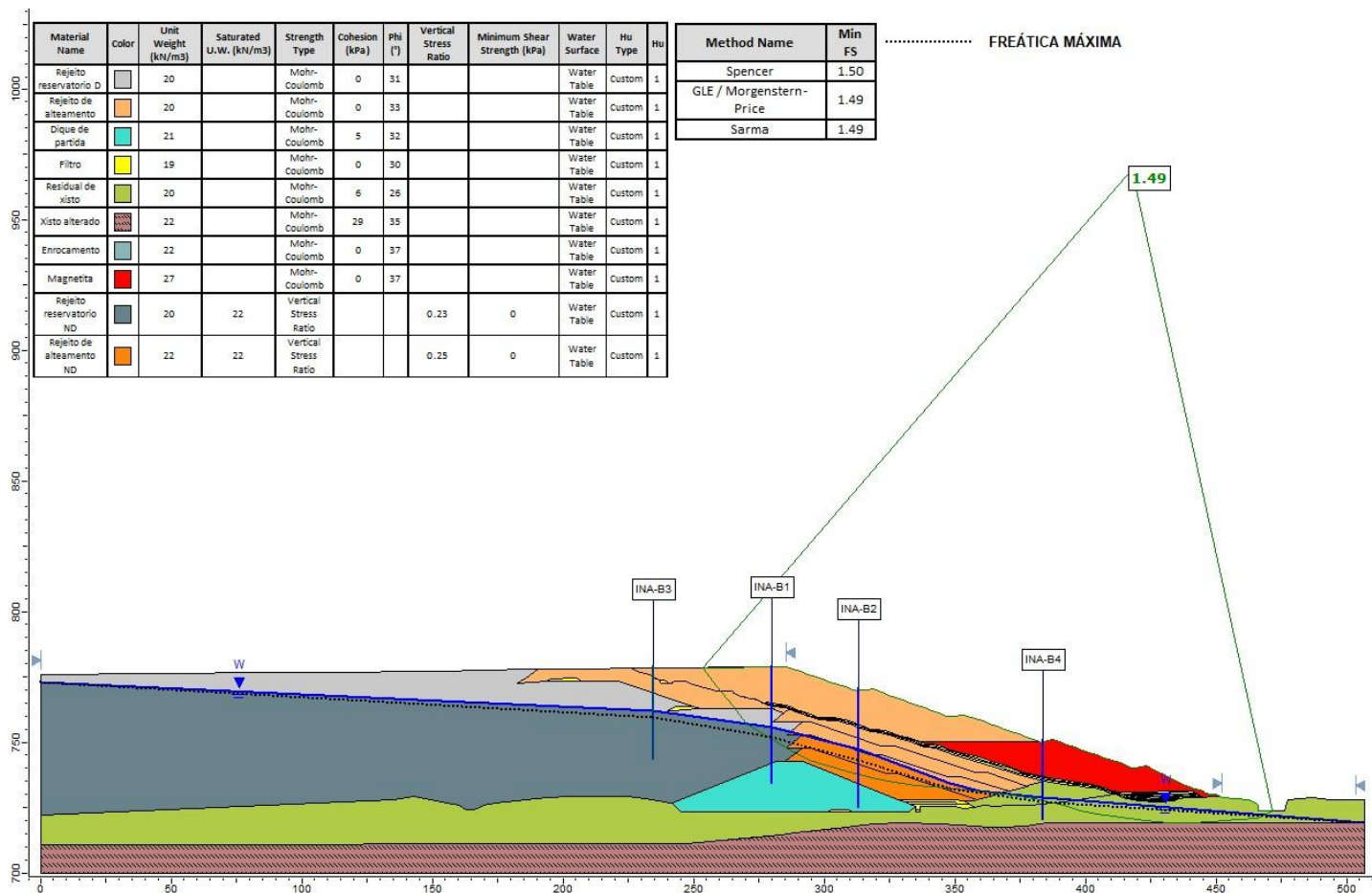
## APÊNDICE K - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE NÃO CIRCULAR, NÃO DRENADA



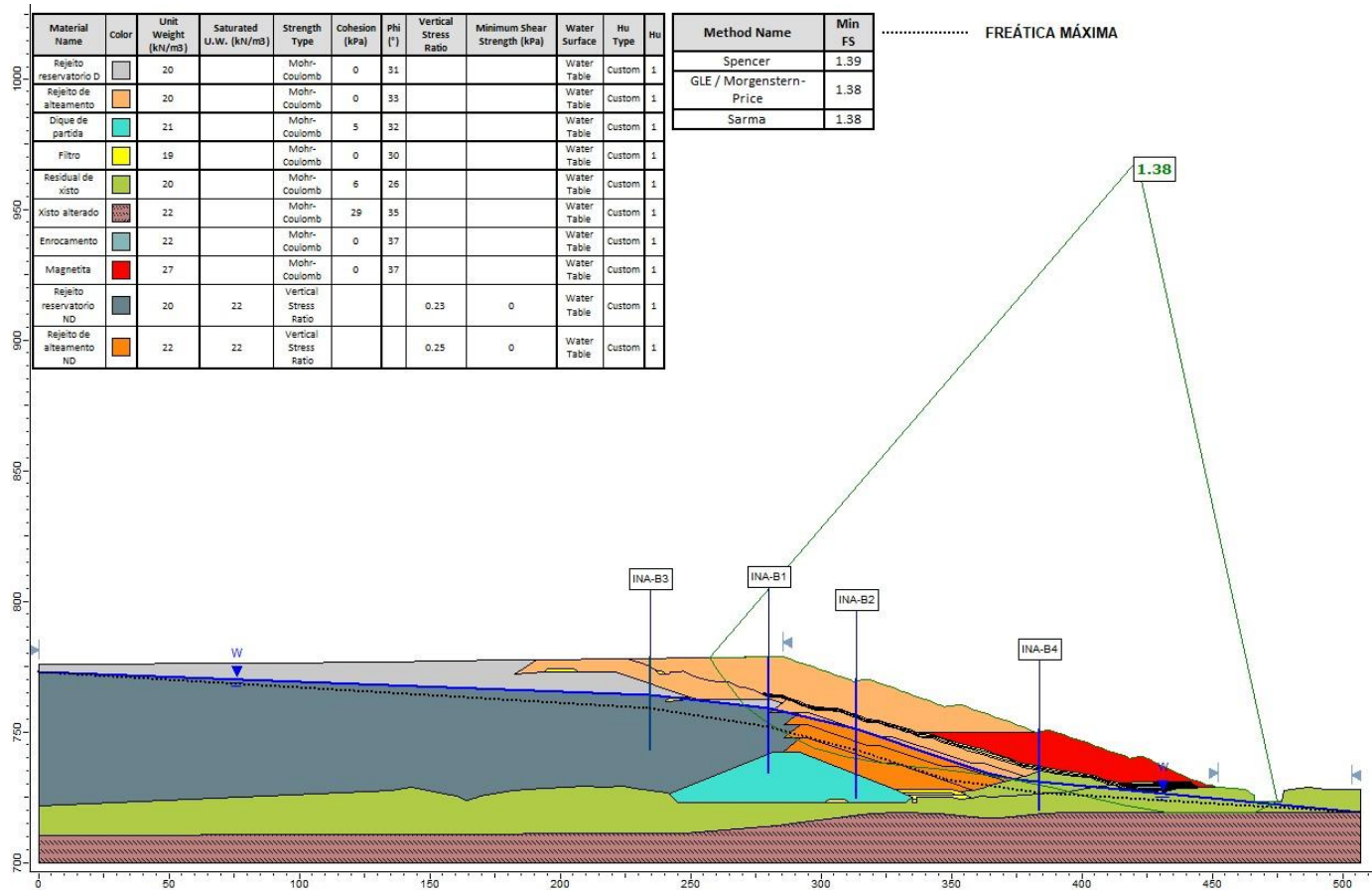
## APÊNDICE L - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM SUPERFÍCIE CIRCULAR, NÃO DRENADA



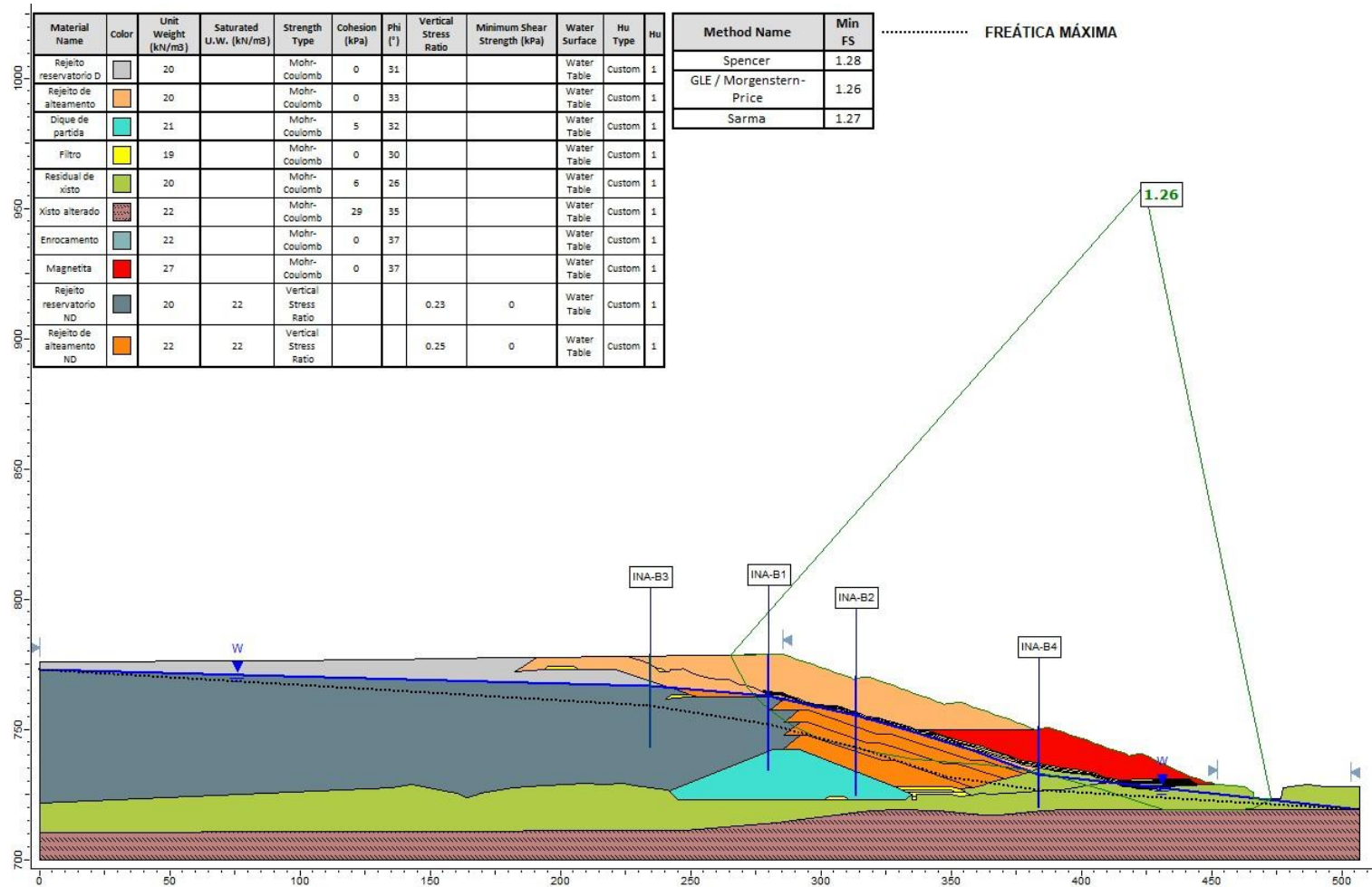
## APÊNDICE M - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE NORMAL



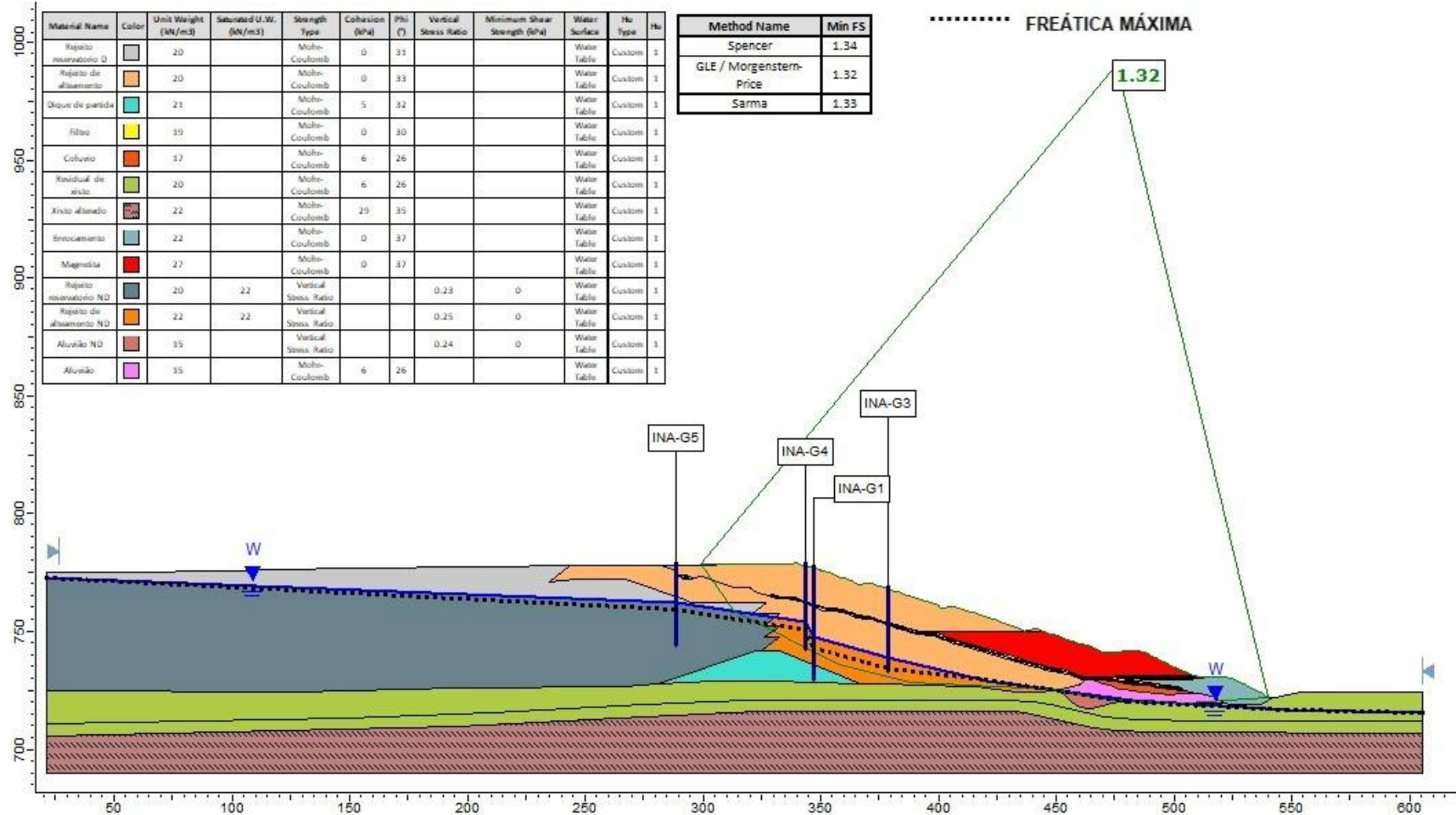
## APÊNDICE N - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ATENÇÃO



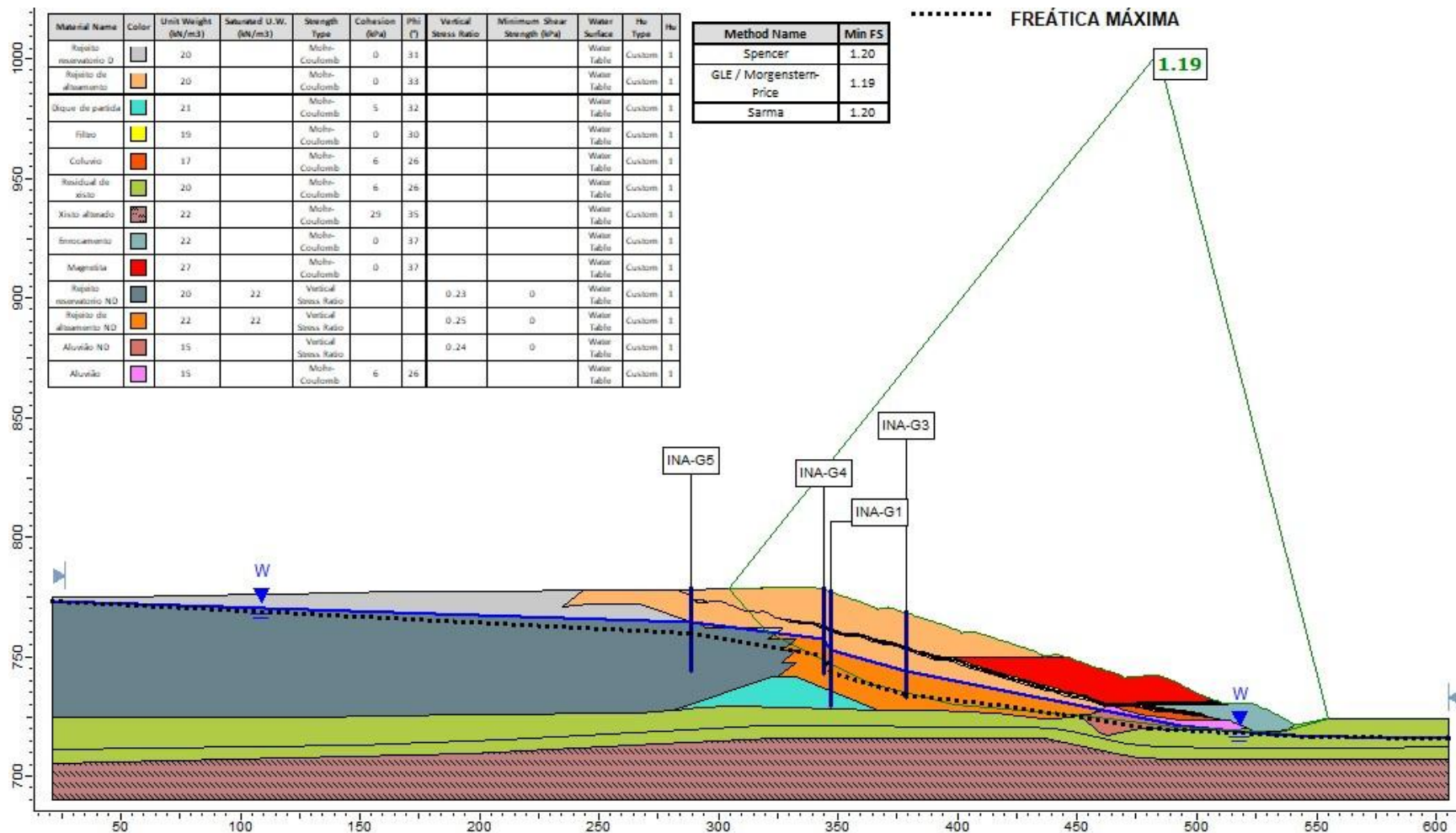
## APÊNDICE O - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO B DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ALERTA



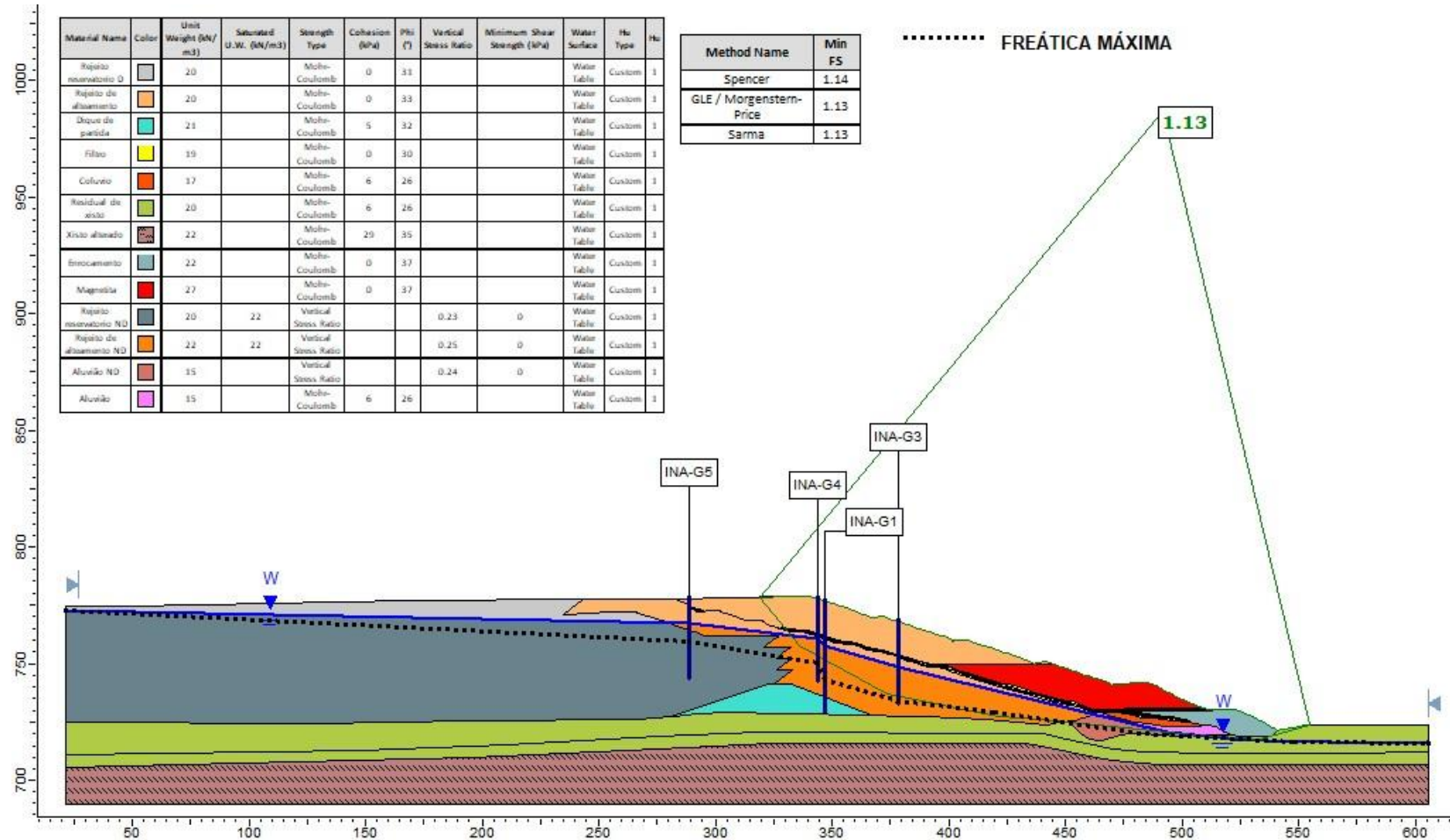
## APÊNDICE P - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE NORMAL



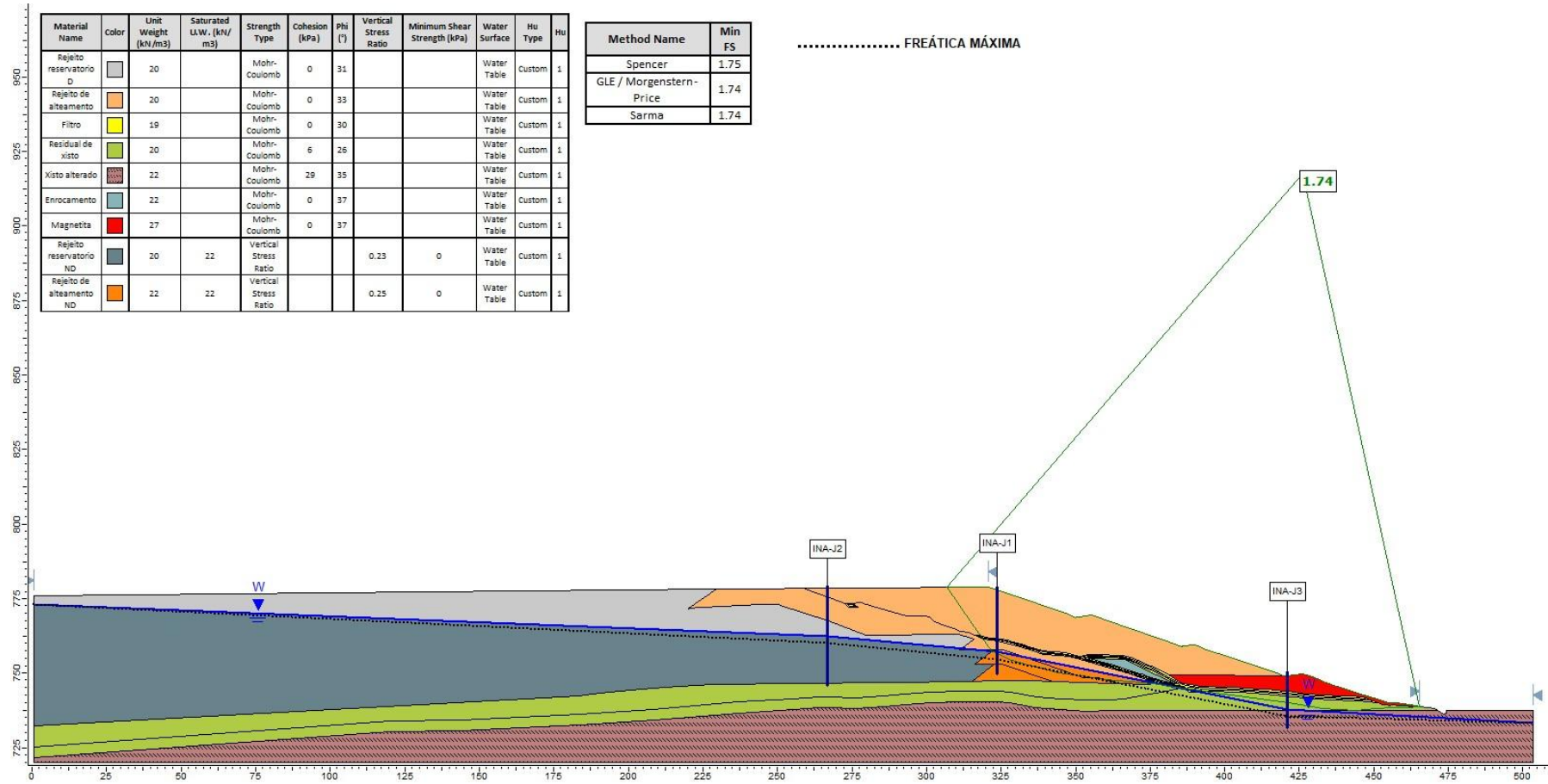
## APÊNDICE Q - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ATENÇÃO



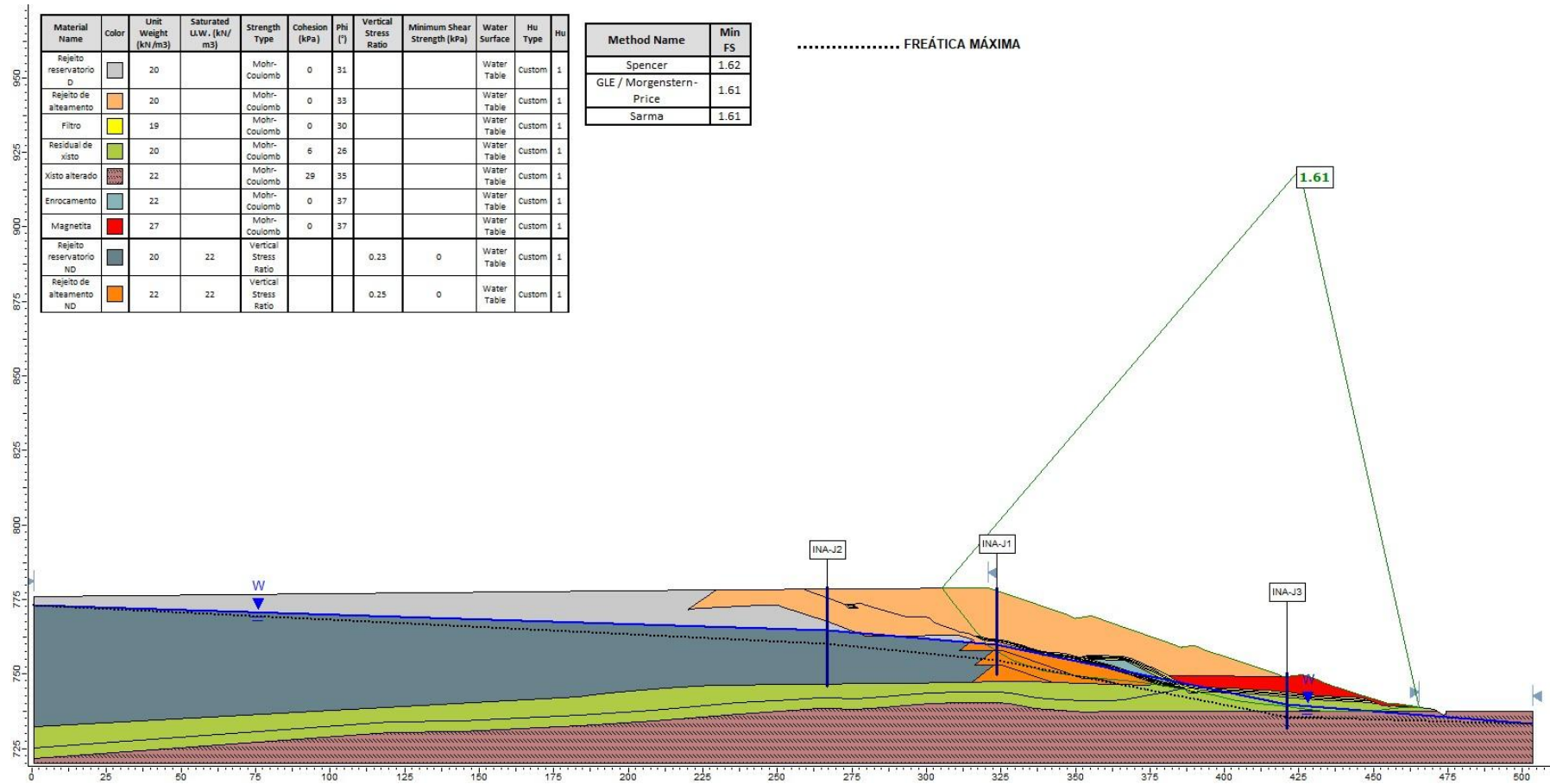
## APÊNDICE R - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO G DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ALERTA



## APÊNDICE S - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE NORMAL



## APÊNDICE T - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ATENÇÃO



## APÊNDICE U - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA SEÇÃO J DA BARRAGEM COM LINHA FREÁTICA DO NÍVEL DE CONTROLE ALERTA

