

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIA, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

AUGUSTO VALENTIM PAVEZI
KEMILY LOPES

DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA A
MONTANTE: ANÁLISES DE ESTABILIDADE E TENSÃO DEFORMAÇÃO

PONTA GROSSA

2023

AUGUSTO VALENTIM PAVEZI
KEMILY LOPES

DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA A
MONTANTE: ANÁLISES DE ESTABILIDADE E TENSÃO DEFORMAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do título de bacharel na
Universidade Estadual de Ponta Grossa. Área
de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro
Lautenschlager

PONTA GROSSA
2023

AUGUSTO VALENTIM PAVEZI
KEMILY LOPES

DESCARACTERIZAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA A
MONTANTE: ANÁLISES DE ESTABILIDADE E TENSÃO DEFORMAÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e
aprovado como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Ma. Bianca Penteado de Almeida Tonus
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof. Dr. Lucio Marcos de Geus
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Ponta Grossa 29 de novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos pais, que estiveram conosco, desde os primeiros passos até este momento, que nos apoiaram e incentivaram em todas as nossas decisões e nos compreenderam mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradecemos aos nossos amigos por dividir conosco diversos momentos engraçados, em que estávamos ansiosos, preocupados, felizes, enquanto sonhávamos e quando estivemos realizados.

Agradecemos aos professores do curso de Engenharia Civil pelo conhecimento transmitido ao longo da graduação e, principalmente, ao professor orientador Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschlager que nos apoiou a cada etapa da pesquisa e contribuiu com as revisões, sugestões e apoio.

EPIGRAFE

“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei
no ombro dos gigantes” Isaac Newton

RESUMO

Em 2019 foi publicada legislação proibindo a construção de barragens de rejeito através do método de alteamento a montante, além disso, foi determinado a descaracterização das barragens existentes cadastradas com este método. Essa mudança foi motivada pelos desastres ocorridos em Mariana (2015), quando houve rompimento da Barragem do Fundão; e Brumadinho (2019), com o rompimento da Barragem B1; ambos causando prejuízos humanos, ambientais e econômicos de repercussão nacional. Considerando as mudanças na legislação, e o fato de que atualmente, existe ainda uma quantidade limitada de literatura nacional a respeito de descaracterização e, ainda, prazos determinados pela Agência Nacional de Mineração (ANM) a serem cumpridos pelos empreendedores para descaracterização destas estruturas, este trabalho visa suprir algumas dessas questões o objetivando estudar e analisar processos de descaracterização de barragens alteadas a montante a partir da literatura disponível, demonstrar o avanço das ações de descaracterização das estruturas existentes frente à nova legislação e desenvolver modelagens numérica de estabilidade e deformação trazendo uma solução realística e aplicável à realidade brasileira, a modelagem elaborada foi baseada em dados disponibilizados pela ANM, para compor a sua seção. Na modelagem foi possível notar que com a remoção do material as deformações foram reduzidas, em módulo e os coeficientes de segurança drenado e não drenado aumentaram linearmente durante quase todo o processo. Porém no processo de alteração de método construtivo para jusante os coeficientes de segurança coincidem devido ao fato de a forma de ruptura ser preferencial na condição drenada, com as deformações acumulando-se na superfície do rejeito lançado fino na condição drenada e na crista do maciço na condição não drenada.

Palavras-chave: descaracterização, descomissionamento, método construtivo, rejeitos de mineração, barragens de rejeito.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Relação de barragens a montante no SIGBM. | 13 |
| Figura 2: Distribuição de barragens brasileiras pelo método construtivo. | 15 |
| Figura 3: Método de alteamento a montante. | 16 |
| Figura 4: Método de alteamento à jusante. | 17 |
| Figura 5: Método de alteamento com linha de centro. | 17 |
| Figura 6: Transporte e deposição de rejeito em forma de polpa. | 18 |
| Figura 7: Funcionamento do hidrociclone. | 19 |
| Figura 8: Estimativas feitas para o rejeito granular e fino pelo ensaio CPTu. | 21 |
| Figura 9: Ensaio SPTs utilizados para obtenção dos módulos de elasticidade. | 22 |
| Figura 10: Sequência de eventos que levaram ao rompimento da Barragem do Fundão. | 28 |
| Figura 11: Distribuição das barragens a montante de acordo com a fase atual de descaracterização. | 31 |
| Figura 12: Mapa com distribuição geográfica de barragens a montante cadastradas no Brasil. | 32 |
| Figura 13: Histórico da distribuição de estruturas a montante em função do tempo. | 32 |
| Figura 14: Distribuição da nova configuração geométrica das barragens a montante durante seu processo de descaracterização. | 34 |
| Figura 15: Seção da barragem B1. | 37 |
| Figura 16: Seção realística adotada. | 38 |
| Figura 17: Seção realística adotada - alteamentos. | 39 |
| Figura 18: Seção realística adotada com alteração do método para jusante. | 40 |
| Figura 19: Gráfico S_u x Profundidade. | 42 |
| Figura 20: Análise na condição drenada do décimo alteamento. | 44 |
| Figura 21: Análise na condição não drenada do décimo alteamento. | 45 |
| Figura 22: Análise na condição drenada no dique de partida. | 46 |
| Figura 23: Análise na condição não drenada no dique de partida. | 46 |
| Figura 25: Coeficiente de segurança, nas análises de estabilidade, em função do número de alteamentos. | 47 |
| Figura 26: Deslocamento horizontal na condição drenada. | 48 |
| Figura 27: Deslocamento horizontal na condição não drenada. | 48 |
| Figura 28: Deslocamento vertical na condição drenada. | 49 |
| Figura 29: Deslocamento vertical na condição não drenada. | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 30: Deslocamento horizontal na condição não drenada. | 50 |
| Figura 31: Deslocamento horizontal na condição drenada. | 50 |
| Figura 32: Deslocamento vertical na condição drenada. | 50 |
| Figura 33: Deslocamento vertical na condição não drenada. | 51 |
| Figura 34: Análise na condição drenada na alteração de método para jusante. | 52 |
| Figura 35: Análise na condição não drenada na alteração de método para jusante. | 52 |
| Figura 36: Deslocamento horizontal na condição drenada. | 53 |
| Figura 37: Deslocamento horizontal na condição não drenada. | 53 |
| Figura 38: Deslocamento vertical na condição drenada. | 54 |
| Figura 39: Deslocamento vertical na condição não drenada. | 54 |
| Figura 40: Análise de estabilidade drenada (a) e não drenada (b) para 10 alteamentos. | 61 |
| Figura 41: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada aos 10 alteamentos. | 62 |
| Figura 42: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada aos 10 alteamentos. | 62 |
| Figura 43: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 9 alteamentos. | 63 |
| Figura 44: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 9 alteamentos. | 64 |
| Figura 45: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 9 alteamentos. | 64 |
| Figura 46: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 8 alteamentos. | 65 |
| Figura 47: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 8 alteamentos. | 66 |
| Figura 48: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição não drenada para 8 alteamentos. | 66 |
| Figura 49: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 7 alteamentos. | 67 |
| Figura 50: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 7 alteamentos. | 68 |
| Figura 51: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 7 alteamentos. | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 52: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 6 alteamentos. | 69 |
| Figura 53: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 6 alteamentos. | 70 |
| Figura 54: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 6 alteamentos. | 70 |
| Figura 55: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 5 alteamentos. | 71 |
| Figura 56: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 5 alteamentos. | 72 |
| Figura 57: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição não drenada para 5 alteamentos. | 72 |
| Figura 58: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 4 alteamentos. | 73 |
| Figura 59: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 4 alteamentos. | 74 |
| Figura 60: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 4 alteamentos. | 74 |
| Figura 61: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 3 alteamentos. | 75 |
| Figura 62: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 3 alteamentos. | 76 |
| Figura 63: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição não drenada para 3 alteamentos. | 76 |
| Figura 64: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 2 alteamentos. | 77 |
| Figura 65: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 2 alteamentos. | 78 |
| Figura 66: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 2 alteamentos. | 78 |
| Figura 67: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 1 alteamento..... | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 68: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 1 alçamento..... | 80 |
| Figura 69: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 1 alçamento..... | 80 |
| Figura 70: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para o dique de partida. | 81 |
| Figura 71: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para o dique de partida. | 82 |
| Figura 72: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada do dique de partida. | 82 |
| Figura 71: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para alteração para jusante. | 83 |
| Figura 71: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para alteração para jusante. | 84 |
| Figura 72: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para alteração para jusante..... | 84 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Dados geotécnicos para rejeito granular e fino | 20 |
| Tabela 2: Dados geotécnicos para argila inorgânica | 21 |
| Tabela 3: Ensaio SPTs utilizados para obtenção dos módulos de elasticidade. | 22 |
| Tabela 4: Caracterização de um itabrito compacto do quadrilátero ferrífero..... | 23 |
| Tabela 5: Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração..... | 24 |
| Tabela 6: Classificação da Barragem do Fundão. | 26 |
| Tabela 7: Abalos antes da ruptura e detonações na mina em 05 de novembro de 2015. | 28 |
| Tabela 8: Barragens a montante com obras de descaracterização consideradas finalizadas pelo empreendedor. | 33 |
| Tabela 9: Dados utilizados. | 41 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 12 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 12 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 12 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 13 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | BARRAGENS DE REJEITOS E SEUS MÉTODOS CONSTRUTIVOS..... | 15 |
| 2.1.1 | Alteamento a montante | 15 |
| 2.1.2 | Alteamento a jusante | 16 |
| 2.1.3 | Alteamento com linha de centro | 17 |
| 2.2 | FORMAS DE TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE REJEITOS | 18 |
| 2.3 | CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS | 19 |
| 2.4 | ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE REJEITOS | 23 |
| 2.5 | ROMPIMENTOS DE BARRAGENS: BARRAGEM DO FUNDÃO E B1 | 26 |
| 2.6 | DESCARACTERIZAÇÃO | 30 |
| 2.7 | MÉTODOS DE DESCARACTERIZAÇÃO | 35 |
| 2.8 | MODELAGEM NUMÉRICA | 36 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 37 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 4.1 | REMOÇÃO COMPLETA DA ESTRUTURA | 42 |
| 4.2 | ALTERAÇÃO DO MÉTODO DE ALTEAMENTOS PARA JUSANTE | 51 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 55 |
| | REFERÊNCIAS | 57 |
| | ANEXO 1 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE E DESLOCAMENTOS..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas com a finalidade de impedir o fluxo de um determinado fluido, podendo este ser água, detritos, rejeitos entre outros. Estas podem ser construídas utilizando diferentes materiais, com variações e combinações como solos, rochas e concreto (CBDB, [2019?]).

Cada estrutura é única sendo necessário sempre estudos relacionados ao local em que será construída, materiais que serão contidos, fatores climáticos, ambientais, condições e ocupações das proximidades do barramento, dentre outros (CBDB, [2019?]).

A fim de garantir a estabilidade são aplicados fatores de segurança aos cálculos de dimensionamento, bem como sistemas de monitoramento durante toda a operação da barragem e em alguns casos, como as de rejeitos, mesmo após o fim de suas atividades (CBDB, [2019?]).

As barragens de rejeitos, principalmente as de mineração, possuem duas características principais, sendo a primeira delas a sua forma construtiva, que as diferencia das demais, pois são construídas de forma parcelada, através de alteamentos sucessivos durante sua operação. A segunda é que esses alteamentos podem ser feitos com o próprio material a ser depositado, conforme há a necessidade de aumentar a capacidade de armazenamento de rejeitos (CBDB, [2019?]).

No final de 2015 houve o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, este incidente foi considerado o maior desastre ambiental do Brasil, além do maior do mundo envolvendo barragens de rejeito (Minas Gerais, 2016). Pouco mais de três anos depois deste acidente houve outra ocorrência, desta vez na Barragem I em Brumadinho, Minas Gerais, onde segundo balanço de reparação publicado pela Vale deixou 273 vítimas.

Os graves acidentes ocorridos motivaram a alteração da legislação e em fevereiro de 2019 foi publicada Resolução nº4 (ANM, 2019), que veda a construção e operação de barragens com alteamentos feitos a montante em todo território nacional e estabelece prazos para a descaracterização das barragens cadastradas, as quais constem como construídas por alteamento a montante ou por método construtivo desconhecido, com elaboração do projeto técnico até agosto de 2019 e conclusão da descaracterização até agosto de 2021.

A resolução nº 4 foi posteriormente substituída pela resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019 (ANM, 2019), que estendeu o prazo de conclusão do projeto de descaracterização para dezembro de 2019 e reestabeleceu novos prazos para conclusão da descaracterização conforme a capacidade volumétrica, sendo eles: até 15 de setembro de 2022 para barragens com

capacidade menor ou igual a 12 milhões de metros cúbicos, até 15 de setembro de 2025 para barragens com volume entre 12 e 30 milhões de metros cúbicos e até 15 de setembro de 2027 para barragens com volume superior a 30 milhões de metros cúbicos.

Tendo em vista essas situações e a obrigatoriedade da descaracterização de barragens de rejeito alteadas a montante desde 2019, este trabalho visa ampliar a literatura sobre o assunto no Brasil. Para tanto, busca-se elaborar uma modelagem numérica, nas condições de equilíbrio limite e deformação, da descaracterização de uma barragem brasileira alteada a montante pelo método de remoção total e alteração para alteamento a jusante.

Partindo da análise de relatórios de descaracterização de barragens publicados trimestralmente pela ANM nota-se que, em geral, a descaracterização de barragens segue as etapas sugeridas no artigo segundo da resolução ANM nº 95/2022, sendo elas: Encerramentos das atividades e remoção das infraestruturas; Controle hidrogeológico e impedimento do aporte de águas; Estabilização e Monitoramento e revegetação. Portanto, a modelagem numérica da seção realística a ser estudada no presente trabalho simulará o mesmo procedimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Realizar uma modelagem numérica, visando verificar condições de estabilidade por equilíbrio limite e deslocamentos por elementos finitos em processos de descaracterização de barragens de rejeito, com base em literatura sobre o tema, visando aplicar o conhecimento a realidade brasileira.

1.1.2 Objetivos específicos

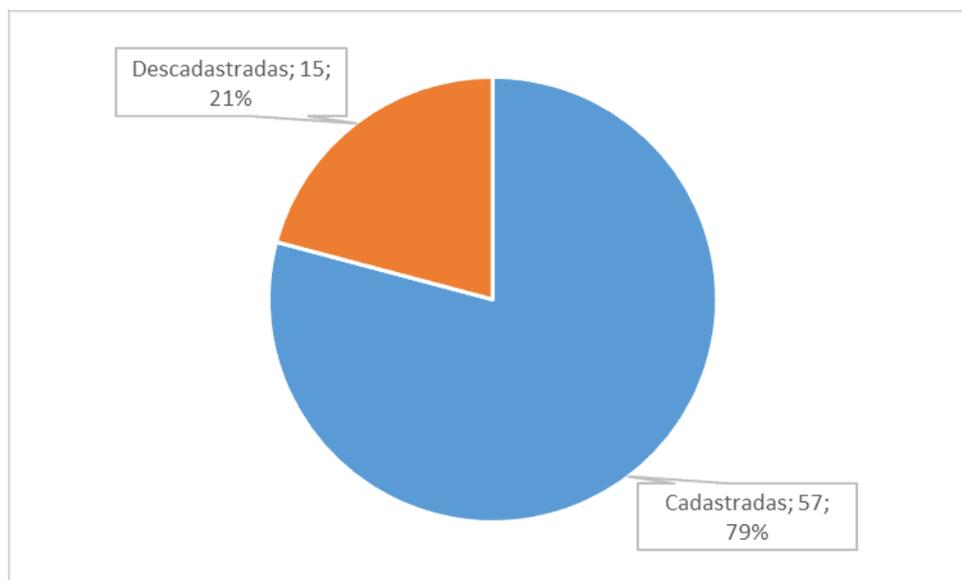
Modelar uma barragem fictícia, com seção baseada e características baseadas em informações disponíveis e estudo realizados em barragens localizadas em Minas Gerais e que contem rejeito vindo de beneficiamento do minério de ferro;

Realizar análises de tensão-deformação e deslocamentos de uma barragem fictícia e representativa da realidade brasileira, para descaracterização por alteração de método construtivo e por remoção total.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo relatório de fevereiro de 2023, publicado pela Agência Nacional de Mineração (ANM), das 74 barragens a montante cadastradas no SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração) em 2019, 14 tiveram o processo de descaracterização concluído e aprovado pela ANM e foram descadastradas do SIGBM. Ainda segundo o relatório, 19 barragens estão em atraso com relação ao prazo previsto no Art. 8º da Resolução ANM nº 13/2019 e, por tanto, as empresas responsáveis foram autuadas. A figura 1 relaciona o número de barragens cadastradas e descadastradas no SIGBM, para efeito comparativo.

Figura 1: Relação de barragens a montante no SIGBM.



Fonte: Adaptado de ANM (2023).

Vale notar que dentro das 74 estruturas classificadas com método construtivo de alteamento a montante ou desconhecido está incluída a estrutura Sr. Pedrinho da Cooperativa de Mineração dos Garimpeiros de Pontes e Lacerda - COMPEL, localizada em Pontes e Lacerda-MT, assim categorizada por desconhecimento geotécnico da estrutura. Portanto, essa estrutura não é contemplada como barragem a montante nos relatórios trimestrais da ANM, tampouco será do decorrer deste trabalho.

Considerando o elevado número de estruturas ainda não descadastradas, fica clara a necessidade de estudos a respeito da descaracterização de barragens de rejeito de minério utilizados no Brasil, assim como seus possíveis desdobramentos futuros, sendo assim a proposta

de um modelo numérico, baseado em seção realística, válida para expor uma solução de descaracterização aplicável para a realidade brasileira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

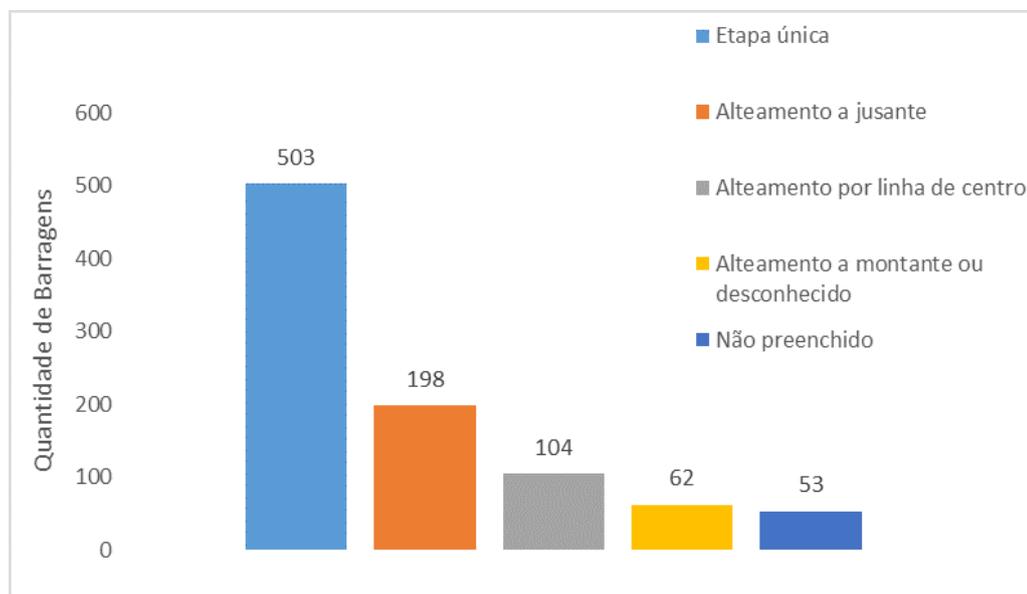
2.1 BARRAGENS DE REJEITOS E SEUS MÉTODOS CONSTRUTIVOS

O Comitê Brasileiro de Barragens define as barragens como estruturas cuja principal finalidade é a contenção e no caso das de rejeito de mineração o material a ser represado é o proveniente desta atividade.

As barragens podem ser construídas de diversas formas e materiais. Comumente as barragens são construídas de forma integral, porém as barragens de rejeito têm a característica de serem construídas de acordo com a demanda, não sendo feitas do começo ao fim e sim através de alteamentos, conforme evolui a lavra dos materiais explorados (CBDB, [2019?]).

Esses alteamentos podem ser feitos de três formas, sendo elas: à montante, à jusante e com linha de centro, a figura 2 apresenta a distribuição de barragens no Brasil pelo método construtivo.

Figura 2: Distribuição de barragens brasileiras pelo método construtivo.



Fonte: BRASIL, ANM (2023).

2.1.1 Alteamento a montante

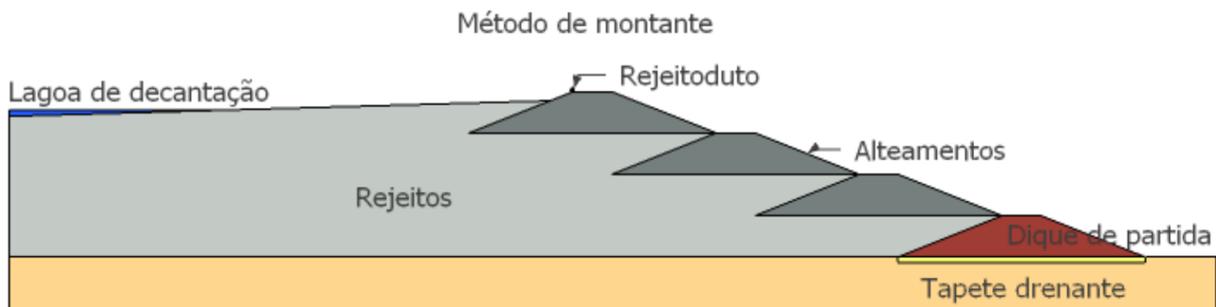
Os alteamentos a montante foram amplamente utilizados na mineração brasileira, devido ao seu menor consumo de material e redução da área degradada, uma vez que esta realiza seus alteamentos sobre o próprio rejeito, como é possível visualizar na figura 3. Este método

em geral utiliza o próprio rejeito como material de construção, como neste método construtivo os alteamentos estarão sobre os rejeitos já depositados é necessário garantir que esses tenham capacidade de suporte, e tenham tempo de adensamento adequado, impondo um limite de alteamento em faixas de tempo e distância de disposição de novos rejeitos (SILVA, 2010).

Como o transporte do rejeito é majoritariamente hidráulico, no projeto da barragem e de seus alteamentos é indicada uma distância mínima de disposição deste material a fim de gerar uma decantação desse rejeito, reduzindo o volume de água próximo do barramento e maior disposição de rejeitos granulares possibilitando os alteamentos, apesar dessas recomendações não é possível saber com certeza o comportamento final desse rejeito (SILVA, 2010).

Devido à natureza do rejeito e à incerteza o rejeito sob os alteamentos está suscetível à liquefação, a qual pode ser induzida por variação de carregamento. Essa variação pode acontecer pelo excesso de carga depositado, mas principalmente por vibrações, por isso em regiões com constantes abalos sísmicos não é recomendado o seu uso. O Chile é um país conhecido por esses fenômenos e proibiu este método em 1970 (CBDB, [2019?]).

Figura 3: Método de alteamento a montante.

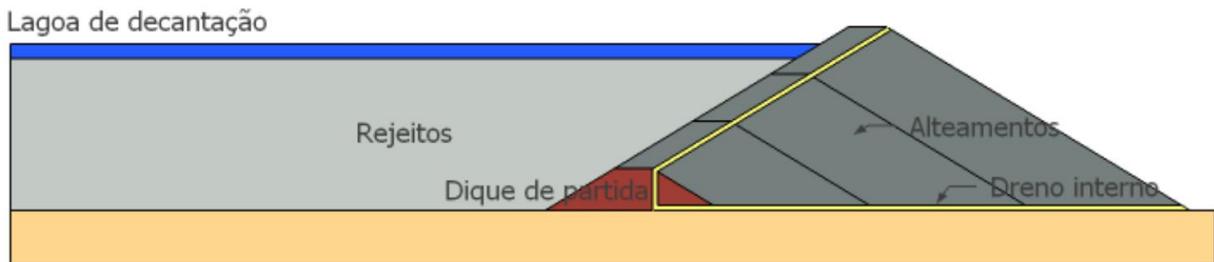


Fonte: Albuquerque, 2004

2.1.2 Alteamento a jusante

Sua construção se dá a partir de uma barragem inicial e seus alteamentos sempre são feitos a jusante da barragem, isto é, ao lado contrário do confinamento dos rejeitos, tornando a barragem mais extensa e volumosa, como é possível observar na figura 4. Portanto entre os métodos de alteamento este se torna o mais caro devido a sua grande demanda de espaço e material.

Figura 4: Método de alteamento à jusante.



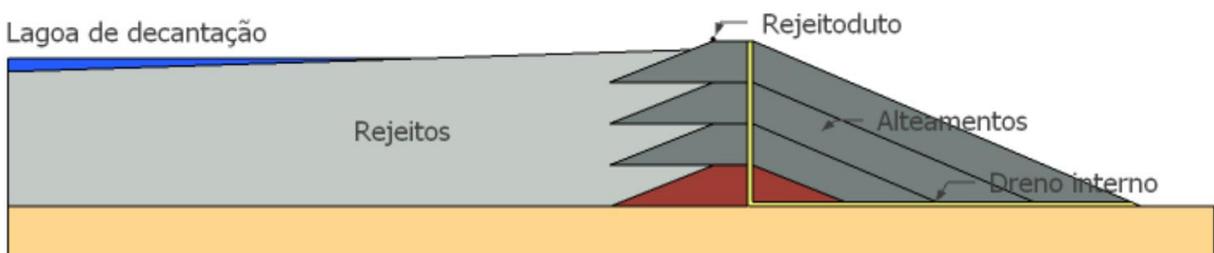
Fonte: Valerius, 2014

Este método foi desenvolvido visando solucionar os problemas mais recorrentes nos alteamentos a montante (SILVA, 2010). Os cuidados com esse tipo de barragem se assemelham muito aos de barragens de solo convencionais, de acordo com o Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens (SNISB, [2019?]). Esse é o método mais comum no Brasil, como exposto na figura 2, portanto, os profissionais estão mais habituados com a sua construção e operação.

2.1.3 Alteamento com linha de centro

Este é um método intermediário entre os dois anteriores, em que os alteamentos estão parcialmente sobre o rejeito e parcialmente sobre o dique inicial com prolongamento a jusante. É possível observar na Figura 5 que os eixos do dique de partida e dos alteamentos coincidem, sendo uma das principais vantagens deste método a facilitação da inserção e prolongamento dos sistemas de drenagens verticais (SILVA, 2010).

Figura 5: Método de alteamento com linha de centro.



Fonte: Valerius, 2014

Haja vista esta disposição dos rejeitos sobre o reservatório, da mesma forma que o alteamento a montante, deve-se tomar cuidado com a distância de disposição dos rejeitos a fim de garantir a decantação.

2.2 FORMAS DE TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE REJEITOS

Segundo Albuquerque Filho que cita Chammas (1988) o transporte dos rejeitos pode ser feito de duas formas, a granel ou pasta sendo esta considerada a forma seca, onde o transporte é feito por caminhões ou esteiras, onde são armazenados em pilhas. Ainda segundo o autor o outro método consiste na disposição líquida, em polpa, na qual o rejeito juntamente com água é transportado por tubulações até o local de deposição final, sendo o segundo o mais comum, visto sua facilidade e menores custos, é possível ver este tipo de disposição de rejeito na figura 6.

Figura 6: Transporte e deposição de rejeito em forma de polpa.



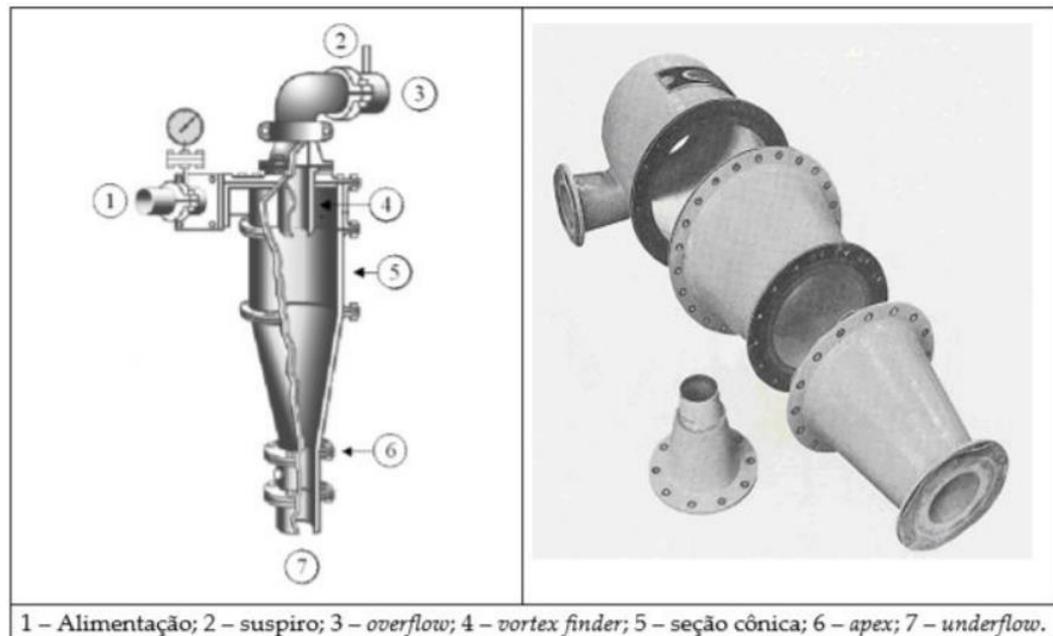
Fonte: Metso (2017).

Quanto às formas de deposição dos rejeitos provenientes das atividades de mineração, existem três formas, sendo elas a deposição subterrânea onde comumente os rejeitos são depositados no local da própria lavra, deposição aquática onde é feita a disposição em corpos d'água ou a disposição superficial que pode ser feita em formas de pilha, pequenos diques e, o objeto do estudo deste trabalho, barragens de rejeito.

Como este rejeito comumente é transportado em forma de polpa, o mesmo chega ao local de depósito saturado, no caso das barragens que são construídas com o próprio rejeito é necessária uma separação deste material a fim de garantir um material mais competente para composição do maciço e das camadas subjacentes. Essa separação pode ser realizada com um

hidrociclone o qual segundo Gabriel e Nascimento (2018) é um equipamento que gera movimentos espiralados em sentido descendente, fazendo com que as partículas pesadas sejam direcionadas a parte inferior do equipamento, enquanto as partículas leves atravessam e entram no centro dessa espiral a qual possui um movimento ascendente, desta forma separando o rejeito, a figura 7 ilustra o funcionamento do equipamento.

Figura 7: Funcionamento do hidrociclone



Fonte: Gabriel e Nascimento (2018).

Desta forma para garantir a estabilidade da barragem deve-se realizar procedimentos de separação das frações do rejeito, assim é possível elaborar um projeto em que seja utilizada a fração mais grossa no alteamento os quais, de forma similar as barragens de terra, devem ser devidamente compactados, porém enfatiza-se a importância de um sistema mais robusto de drenagem uma vez que, diferentemente das barragens de terra, esta utiliza rejeitos grossos e, portanto, mais permeáveis. Ademais deve-se criar uma praia de rejeito granular a fim de melhorar a drenagem, garantir a distância do nível d'água em relação a crista e apoiar os alteamentos em um solo menos suscetível a liquefação (Robertson *et al.*, 2019).

2.3 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

A fim de garantir a estabilidade das barragens são necessários ensaios e caracterizações dos materiais envolvidos, visando o melhor desempenho dos mesmos, segundo Oliveira *et al* (2021) a metodologia utilizada para caracterizar os materiais envolvidos deve levar em conta a representatividade, além da adequabilidade do método. O rejeito contido nas barragens se

comporta similarmente a um solo mole, portanto o método mais comum para obtenção de dados é o ensaio de penetração por cone com medida de poropressão, CPTu, que é capaz de fornecer diversos dados relevantes para o entendimento deste material, proporcionando condições para um bom dimensionamento. Segundo Albuquerque Filho (2004), alguns dos parâmetros que esse tipo de sondagem é capaz de fornecer são: densidade relativa (D_r), ângulo de atrito efetivo (ϕ'), módulo de deformabilidade ou de Young (E), módulo de deformação confinado ou oedométrico (M), módulo de cisalhamento máximo (G_0), indicação do estado de tensões in situ (σ_h e K_0) e de sua história (OCR).

Em sua dissertação, Coelho (2021) estudou rejeitos de mineração de minério de ferro realizando sondagens a percussão e por penetração de cone com medição de nível d'água, além de ensaios de caracterização granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real dos grãos e triaxiais, alguns dos parâmetros obtidos estão apresentados na tabela 1. O material utilizado por Coelho é proveniente de uma barragem do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, o nome da barragem não foi divulgado pelo autor.

Tabela 1: Dados geotécnicos para rejeito granular e fino

| Material | Peso Específico (kN/m ³) | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (°) | Permeabilidade (m/s) |
|------------------|--------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|
| Rejeito Fino | 19,8 | 19,6 | 32,7 | $1 \cdot 10^{-8}$ |
| Rejeito Granular | 20,8 | 0 | 30,8 | $1 \cdot 10^{-7}$ |

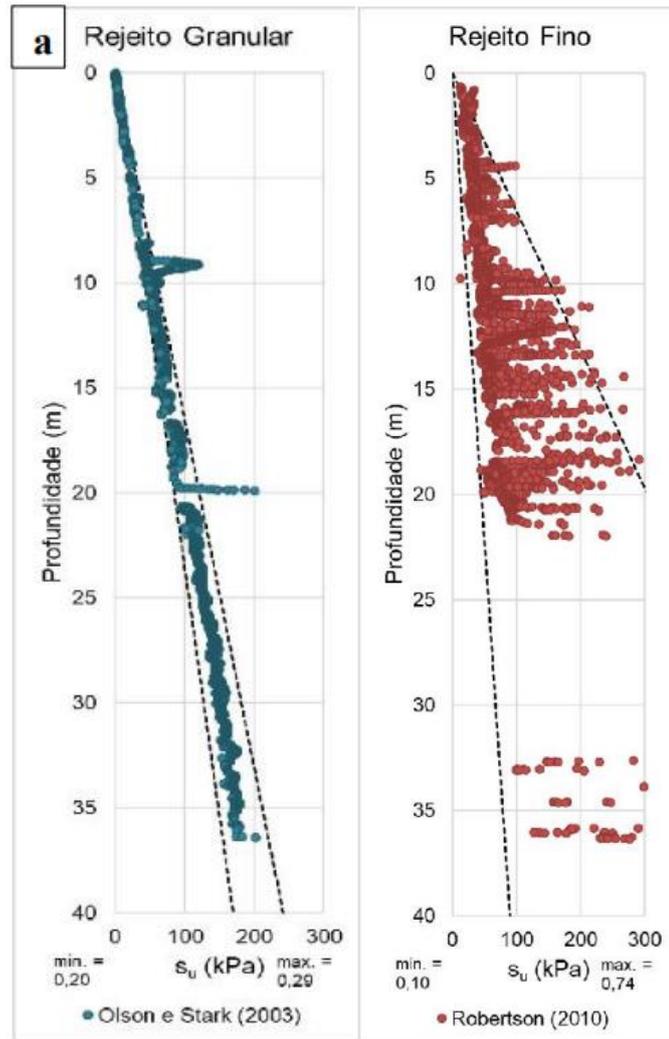
Fonte: Coelho (2021)

Ainda citando a dissertação de Coelho (2021), o autor realizou diversos estudos e ensaios sobre rejeitos de minério de ferro, baseando-se nos estudos de Olson e Stark (2003) para rejeitos granulares e Robertson (2010) para rejeitos finos, Coelho obteve escalas de valores para a resistência não drenada (S_u) em função da profundidade, as equações para estimativa desses parâmetros estão dispostas a seguir, sendo as equações 1 e 2 referentes aos estudos de Olson e Stark e as equações 2 de Robertson. Em sequência os resultados obtidos por Coelho estão dispostos na figura 8.

$$\frac{S_u}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0143 \times (q_{c1}) \pm 0,04 \text{ para } q_{c1} \leq 6,5 \text{MPa} \quad (1)$$

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \quad (2)$$

Figura 8: Estimativas feitas para o rejeito granular e fino pelo ensaio CPTu.



Fonte: Coelho (2021).

O governo de Minas Gerais levantou diversos dados quanto a materiais geotécnicos típicos da região entre eles uma argila inorgânica da qual foram retirados dados a serem utilizados na modelagem para compor o dique de partida, estes podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2: Dados geotécnicos para argila inorgânica

| Coesão (kPa) | Angulo de atrito (°) | Peso específico (kN/m ³) |
|--------------|-------------------------|---|
| 25 | 33 | 18 |

Fonte: Minas Gerais (2005)

Os estudos anteriormente citados não visavam a obtenção do módulo de elasticidade dos rejeitos, porém a dissertação de Coelho apresenta diversos boletins de sondagens SPT, entre

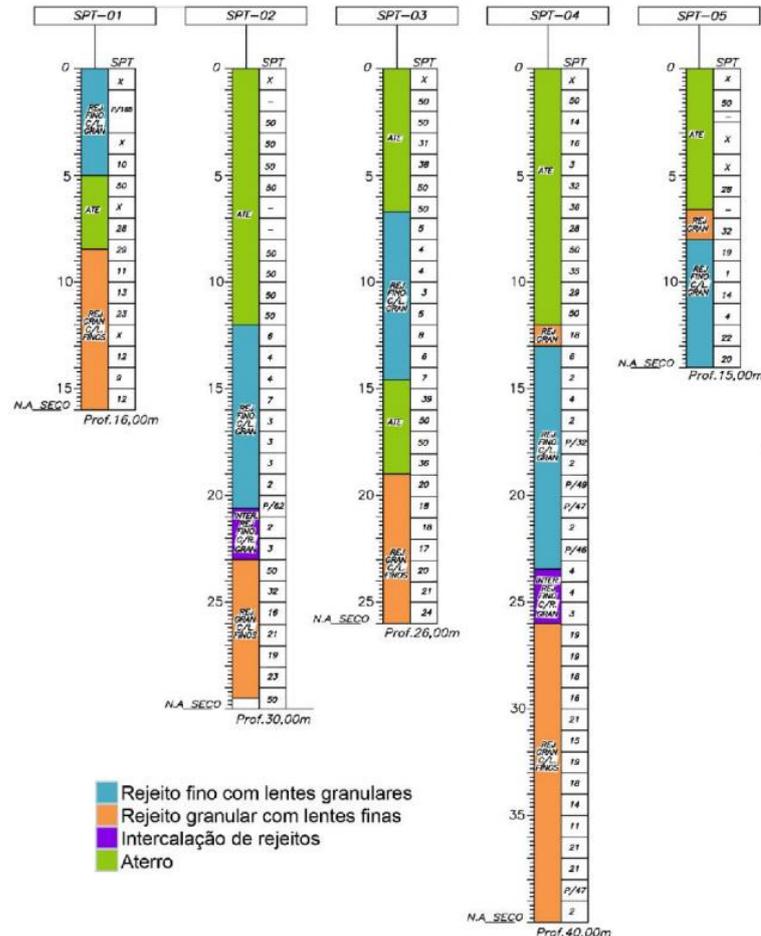
os levantamentos realizados pelo governo de Minas Gerais, estava a Amostra SPT 531, estes testes foram utilizados a fim de estimar o módulo de elasticidade, o método utilizado para tal foi o proposto por Quaresma *et al.* citado por Albuquerque (2020) em seu livro Engenharia de Fundações. A amostra SPT 531, uma imagem ilustrativa dos ensaios SPT realizados por Coelho e as equações de Quaresma estão dispostas a seguir na tabela 3, figura 9 e equações 5, 6 e 7:

Tabela 3: Ensaios SPTs utilizados para obtenção dos módulos de elasticidade.

| Amostra SPT 531 | | | |
|-----------------|----|---|-----|
| 1 | 68 | CL – Argila inorgânica baixa a média plasticidade | 1,3 |
| 2 | 99 | - | |
| 3 | 99 | - | |
| 5 | 99 | - | |
| 10 | 99 | - | |

Fonte: Minas Gerais (2005)

Figura 9: Ensaios SPTs utilizados para obtenção dos módulos de elasticidade.



Fonte: Coelho (2021)

$$E = 3,5 \text{ NSPT em MPa - para areias} \quad (5)$$

$$E = 3,0 \text{ NSPT em MPa - para solos intermediários} \quad (6)$$

$$E = 2,5 \text{ NSPT em MPa - para argilas saturadas} \quad (7)$$

Aplicando a metodologia de Quaresma obteve-se para o rejeito Granular, Rejeito Fino e Dique de partida, respectivamente os seguintes módulos de elasticidade: 70000kPa, 18000kPa e 170000kPa.

Segundo Minas Gerais (2005), xistos, quartzitos, filitos, itabiritos, dolomitos, depósitos lacustres, sedimentos aluvionares, depósitos de tálus, colúvios e coberturas lateríticas como as formações mais comuns do estado de minas. Zacarias (2003) em sua dissertação caracterizou maciços da mina do córrego sendo um deles um Itabrito Compacto, este material foi utilizado no presente trabalho para compor a fundação das barragens analisadas nas modelagens numéricas, os dados obtidos pelo autor foram compilados na tabela 3 a seguir:

Tabela 4: Caracterização de um itabrito compacto do quadrilátero ferrífero.

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Ângulo de Atrito (°) | 30 |
| Coesão (kPa) | 250 |
| Peso específico (kN/m ³) | 29 |
| Módulo de Elasticidade (GPa) | 83 |

Fonte: Zacarias (2003)

2.4 ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE REJEITOS

Para uma estrutura ser considerada estável esta deve prever todas as situações prováveis de ocorrência e ser dimensionada para contê-las, as formas de rompimento de uma barragem podem aparecer em conjunto ou separadamente, sendo necessário avaliá-las na concepção do projeto. Alguns dos mecanismos de ruptura que devem ser avaliados para garantir a estabilidade do maciço são: inclinações dos taludes - causado pela própria geometria da barragem-, risco de liquefação dos rejeitos utilizados como base para futuros alteamentos, *overtopping* - condição na qual o material depositado ultrapassa em altura a seção definida para contê-lo - e *piping* - onde o fluxo interno da barragem não é bem controlado e atravessa o maciço com energia suficiente para carrear os finos do talude (Oliveira *et al*, 2021).

A estabilidade no Brasil é considerada pseudo estática, sendo esta uma metodologia simplificada para a ação de sismos, pouco frequentes no país. Além das definições de projeto o monitoramento da estrutura é de extrema importância, a instrumentação da barragem auxilia

coletando dados os quais subsidiam a validação das premissas de projeto além de verificar o potencial de liquefação estático e dinâmico, fluxo interno da barragem e deformação devido aos carregamentos e ao longo do tempo. Além de embasar as normativas nacionais a respeito de coeficientes de segurança dessas estruturas (Oliveira *et al*, 2021)

Para todas as situações é necessário aplicar coeficientes de segurança os quais devem estar de acordo com a ABNT NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos, a seguir, apresenta-se a Tabela 4 da norma com diversos fatores de segurança que devem ser seguidos para diferentes situações.

Tabela 5: Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.

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

a. Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como “final de construção”, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.

Fonte: ABNT NBR 13028 (2017).

A estabilidade de barragens de rejeitos deve ser analisada em duas condições principais: a situação drenada na qual utiliza-se o método de equilíbrio limite, pelo critério de Mohr-Coulomb e condição não drenada. Para ambas as situações devem ser levados em conta todos os parâmetros citados anteriormente. O ponto diferencial entre as duas condições é a presença de água na qual, considerando a condição drenada, existirá um excesso de poropressão muito reduzido em relação à não drenada.

Na condição não drenada, a elevada poropressão reduz a interação entre os grãos, conforme Caputo (1988), sendo assim a coesão e o ângulo de atrito tornam-se secundários para a análise deste tipo de estabilidade. Ao ser gerada uma variação no carregamento, por exemplo a construção de um alteamento, pode ocorrer liquefação, portanto outro parâmetro de maior influência deve ser levado em conta: o índice de resistência ao cisalhamento não drenada (S_u).

Segundo Caputo (1988) o aumento de poropressão causado pela interação entre água e solo em condição não drenada possibilita a ruptura do material que compõem a barragem em menores tensões, em outras palavras, uma vez que ao diminuir o estado de tensões necessário para o rompimento a envoltória de ruptura pode ser atingida em menores níveis de tensão cisalhante do que em situações com pouco excesso de poropressão, portanto, devem ser tomadas medidas a fim de evitar esta condição.

Vale ressaltar que para cada carregamento calculado, são considerados fatores de segurança, carregamentos e condições da barragem diferentes, o que pode levar a diferentes formas de solicitações do maciço. Para cada situação há um coeficiente de segurança o qual está diretamente relacionado ao tempo em que se espera que esta barragem esteja submetida.

Observando a tabela 4 nota-se que o maior coeficiente de segurança é o da “Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório”, sendo esta a situação drenada; isso ocorre porque durante a maior parte da vida útil da barragem, espera-se que ela esteja nessa condição. Na condição “Operação com rede de fluxo em condição extrema de operação, nível máximo do reservatório”, a qual refere-se à condição não drenada, é possível notar a redução do fator de segurança, já que não é desejável que a barragem trabalhe nessa situação. Mesmo uma situação não sendo a ideal para operação da barragem, esta deve ser considerada e projetada para resistir no caso de ocorrência, porém com exigências menores pela norma.

Parte importante também da estabilidade de barragens é o monitoramento da estrutura, sendo considerada pela resolução 13 da ANM como a última etapa da descaracterização, sendo de suma importância para acompanhar os comportamentos previstos e em caso de inconformidade fornecer subsídio para tomadas de decisão.

O caso do rompimento da barragem do fundão em Mariana, apesar de uma fatalidade poderia ter sido muito pior em termos de perda de vidas humanas, graças ao monitoramento foi possível evacuar a população a jusante da barragem reduzindo drasticamente o número de óbitos quando comparado com o caso da barragem B1 em Brumadinho. Outro caso que demonstra a importância do monitoramento ocorreu dia 10 de novembro deste ano, noticiado pelo jornal O Tempo, em que a ANM visando evitar fatalidades determinou a interdição de três pilhas de armazenamento de rejeitos além de estar avaliando a evacuação dos moradores de Santa Rita Durão, próximo a Mariana, após a companhia Vale não apresentar subsídios que demonstrassem a estabilidade dessas estruturas localizadas acima da barragem onde fica localizada a mina de Fábrica Nova.

2.5 ROMPIMENTOS DE BARRAGENS: BARRAGEM DO FUNDÃO E B1

Dois acidentes de grande repercussão aconteceram no estado de Minas Gerais, um em 2015 e outro em 2019, causando danos ambientais, humanos e materiais e foram grandes motivadores para alteração da legislação nacional a respeito da construção de barragens.

O primeiro foi o rompimento da Barragem do Fundão (BRF), no município de Mariana (MG), que aconteceu em 5 de novembro de 2015 e, segundo relatório publicado pelo governo de Minas Gerais, atingiu 38 municípios, sendo 35 deles em Minas Gerais e outros 3 no Espírito Santo (Minas Gerais, 2016).

Ainda segundo o relatório, a barragem, de responsabilidade da mineradora Samarco, possuía 55 milhões de metros cúbicos de rejeito de mineração, que se espalharam ao longo de 600 quilômetros pelo leito do Rio Doce. A tragédia deixou ainda 17 mortos, mais de 600 pessoas desabrigadas, além de afetar o abastecimento de água e a economia dos municípios atingidos, por conta da interrupção de atividades econômicas que dependiam do rio.

A Tabela 6 resume a classificação da BRF conforme deliberação normativa COPAM (Conselho Estadual da Política Ambiental) nº 62, que dispõe a respeito dos critérios para classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração em Minas Gerais.

Tabela 6: Classificação da Barragem do Fundão.

| Parâmetros (Deliberação Normativa COPAM nº62/02) | Enquadramento da BRF |
|--|---|
| Altura do maciço na data do rompimento (m) | 108 (El. crista igual a 900m) |
| Volume do reservatório (m ³) | 41.000.000 |
| Ocupação humana a jusante da barragem, à época do cadastro | <u>Grande</u> : existem habitações na área a jusante da barragem e, portanto, vidas humanas serão atingidas. |
| Interesse ambiental da área a jusante da barragem | <u>Elevado</u> : a área a jusante da barragem apresenta interesse ambiental relevante |
| Instalações na área a jusante da barragem | <u>Alta concentração</u> : quando existe grande concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de grande relevância socioeconômico-cultural na área a jusante da barragem. (Classificação dada pela equipe de fiscalização). * |
| *: No Relatório Anual de Lavra 2015/2014, enviado ao DNPM, a SAMARCO considerou como MODERADA a concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem. | |

Fonte: Relatório de Análise de Acidente - Rompimento da Barragem de Rejeitos do Fundão em Mariana/MG.

Segundo Botelho e Faria (2018), eventos desde a implantação da barragem e falhas da empresa na correção de fragilidades observadas ao longo da história acabaram por resultar no rompimento da barragem. Junto com a Barragem do Fundão, a Pilha de Rejeitos da Cava do Germano e a Barragem de Rejeitos do Germano integravam o sistema de disposição de rejeitos da Samarco Mineração S.A. na unidade Germano. De acordo com o projeto inicial, a BRF era composta pelos diques 1 e 2, sendo que o dique 1 era reservado à contenção de resíduos arenosos e o dique 2 aos rejeitos finos/lama (Botelho e Faria, 2018).

Quanto aos erros na construção da barragem, a construção do dique 1 foi concluída em outubro de 2008 e logo após o início do lançamento em larga escala de rejeitos arenosos, em abril de 2009, já foram observados sintomas de *piping* - a surgência de finos no talude de jusante, acima do dreno de fundo principal; mais tarde, investigações revelaram erros graves de construção do dreno, inclusive um trecho de saída do dreno que nunca foi concluído (Morgenstern *et al.*, 2016). Além disso, a proporção entre materiais arenosos e finos foi alterada, de modo que o nível de lama ficou mais alto que o de material arenoso, implicando na construção de um terceiro dique - Dique 1A, para contenção adicional de lama (Morgenstern *et al.*, 2016).

Em 2012, aconteceu o desvio de eixo da barragem sem a elaboração de novo projeto ou estudo técnico, sendo considerada apenas a recomendação de que o desvio deveria manter uma praia de rejeitos arenosos a 200m do último talude do recuo (Minas Gerais, 2016); em 2014, foram observadas grandes trincas no barramento, na região do desvio, na ombreira esquerda, que chegaram a 200m de comprimento e 7cm de largura (Botelho e Faria, 2018). Em novembro de 2014 uma empresa de consultoria, contratada pela Samarco, recomendou a redução dos parâmetros de resistência dos rejeitos arenosos usados na construção do barramento - esta recomendação foi ignorada pela empresa contratada para a inspeção anual de segurança e, mantendo os parâmetros anteriores, foi obtido um coeficiente de segurança acima do mínimo exigido pela legislação (Botelho e Faria, 2018).

Ainda no relatório da empresa contratada para consultoria, foi apontada a necessidade de preencher, o quanto antes, o preenchimento da área do desvio - prevendo a necessidade de um ano para a conclusão dessa atividade - mas, em novembro de 2015, ainda faltava muito para que o preenchimento fosse concluído (Minas Gerais, 2016). Em 2015, aconteciam obras na ombreira esquerda da barragem, o que implica na presença de equipamentos pesados; além disso, no dia da ruptura, foram registradas duas detonações e três abalos sísmicos que antecederam o rompimento da barragem, resumidos na tabela 7.

Tabela 7: Abalos antes da ruptura e detonações na mina em 05 de novembro de 2015.

| Hora local | Magnitude de Momento M_w | Distância de Fundão | Identificação |
|------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 13:01:49 | 2,1 | 2,6 km | Detonação na mina |
| 13:06:06 | 2,3 | 2,6 km | Detonação na mina |
| 14:12:15 | 2,2 | < 2 km | Abalo precursor |
| 14:13:51 | 2,6 | < 2 km | Abalo principal |
| 14:16:03 | 1,8 | < 2 km | Abalo secundário |
| 15:45 | | | Ruptura da Barragem |

Fonte: Morgenstern, N.R. *et al.* Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão: Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão. 2016.

A partir dos relatos de testemunhas oculares, foi possível constatar que a ruptura teve início no recuo da ombreira esquerda e que o dique de partida não teve participação no mecanismo de ruptura (Morgenstern *et al.*, 2016). A figura 10 demonstra os eventos que culminaram no rompimento da BRF.

Figura 10: Sequência de eventos que levaram ao rompimento da Barragem do Fundão.



Fonte: Adaptado de Botelho, M. e Faria, M., 2018.

O segundo acidente foi o rompimento da barragem B1, na mina do Córrego do Feijão, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, próximo ao município de Brumadinho (MG). Segundo relatório publicado pela UPC – Universidade Politécnica de Catalunya, a topografia local, após o rompimento, indica que 9,7 milhões de metros cúbicos de rejeito foram liberados pela barragem, o que representa cerca de 75% do total de rejeito da barragem (Robertson *et al.* 2019). Segundo balanço de reparação publicado pela Vale, no segundo semestre de 2022, o acidente fez 273 vítimas, das quais 4 ainda não foram encontradas (VALE, 2022).

Depois do acidente, a Vale requisitou a um Painel de Especialistas uma análise a respeito das causas técnicas que levaram ao rompimento da Barragem B1; esta análise foi desenvolvida entre março e dezembro de 2019. A análise do Painel levou à conclusão de que o rompimento ocorreu devido à liquefação estática. Terzaghi e Peck, no livro *Soil mechanics in Engineering practice* definem liquefação estática como a perda repentina de resistência de solos fofos e, para que ela aconteça é necessário que se cumpram algumas condições: materiais saturados fofos com tendência a rápida contração de volume sob carregamento, altas tensões de cisalhamento, eventos que podem servir de gatilho à perda de resistência dos materiais e um volume suficiente de materiais saturados fofos (Robertson *et al.*, 2019).

Quanto aos aspectos construtivos e de projeto, a Barragem B1 foi concebida com talude íngreme e a barragem inicial tinha características que impedia a drenagem no pé da barragem - além disso, durante a construção dos alteamentos seguintes não foi instalada nenhuma drenagem interna significativa (Robertson, *et al.*, 2019). Depois, em vista de uma infiltração observada na face da barragem acima do pé, foram instalados tapetes drenantes abaixo de alguns dos alteamentos seguintes e 14 drenos verticais, instalados no início de 2018. Após o terceiro alteamento, foi executado um recuo que reduziu a inclinação total da barragem, mas, em contrapartida, moveu a parte superior da barragem para mais perto do lago de decantação (Robertson *et al.*, 2019).

A respeito do material contido pela barragem, por meio de dados históricos dos ensaios de CPTu e pesos específicos e pressões da água apropriados, concluiu-se que os rejeitos eram majoritariamente fofos, saturados e contráteis sob deformações específicas. Testes também apontaram que as amostras fofas acumulariam deformações específicas sob carregamento constante - fenômeno chamado de *creep*. Os testes laboratoriais, realizados em amostras representativas reconstituídas, também constataram que o rejeito apresentou comportamento frágil em relação à perda de resistência e indicaram a presença de cimentação que, por sua vez, tornava os rejeitos rígidos e potencialmente com comportamento frágil (Robertson *et al.*, 2019).

Quanto aos fatores externos, a estação de chuvas do período de outubro de 2018 até a época do rompimento presumivelmente causou uma perda de sucção, resultando em perda de resistência dos materiais não saturados acima do nível da água (Robertson *et al.*, 2019).

Por definição, uma estrutura alteada a montante deve formar uma praia drenante a partir dos rejeitos de granulometria mais grossa, de modo que os rejeitos mais finos sejam depositados mais longe da crista e lamas depositadas na região do lago de decantação

(Robertson *et al.*, 2019). A partir das fotos aéreas e imagens de satélite, o Painel identificou que os comprimentos das praias variaram ao longo dos anos e que mais rejeitos finos foram depositados próximo das cristas anteriores, o que resultou em camadas de rejeitos finos sob a barragem (Robertson *et al.*, 2019).

Assim, as condições anteriormente apresentadas como requisitos para a liquefação estática foram satisfeitas resultando, em última instância, no rompimento da barragem.

2.6 DESCARACTERIZAÇÃO

Segundo Sanchez e Massignan (2022), não há um entendimento coletivo a respeito do termo descaracterização, fechamento e termos relacionados; para fins do presente trabalho será considerada a definição estabelecida pela resolução nº 32 da ANM, que alterou a portaria nº 70.389:

Art. 1º Alterar a Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017, que passa a vigorar com as seguintes alterações:

(...)

VIII - barragem de mineração descaracterizada: estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, de acordo com projeto técnico, compreendendo, mas não se limitando, às seguintes etapas concluídas:

Descomissionamento: encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando, a espigotes, tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura;

Controle hidrológico e hidrogeológico: adoção de medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório;

Estabilização: execução de medidas tomadas para garantir a estabilidade física e química de longo prazo das estruturas que permanecerem no local; e

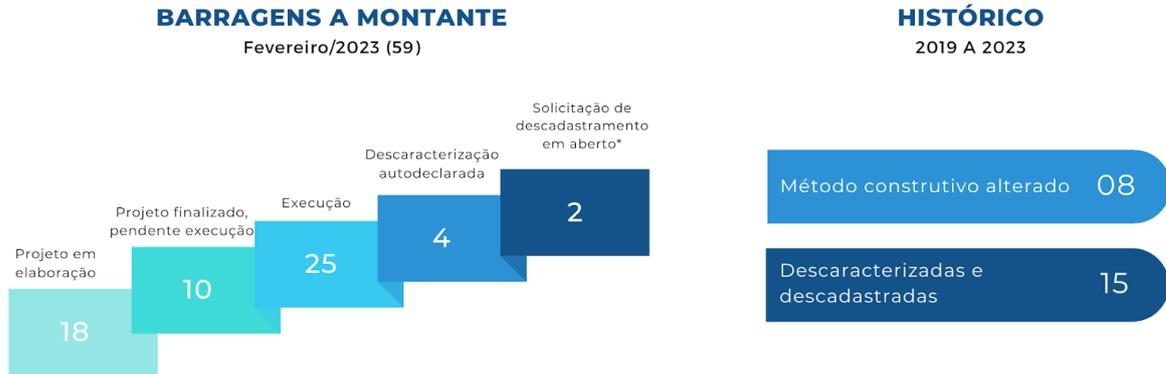
Monitoramento: acompanhamento pelo período necessário para verificar a eficácia das medidas de estabilização.

Conforme Resolução nº 95 de 7 de fevereiro de 2022 (ANM, 2022), o processo de descadastramento de uma barragem por descaracterização depende da apresentação, à ANM, de documento atestando a descaracterização, redigido por profissional habilitado e com revisão de segunda parte, além de acompanhar cópia de documento específico comprovando a descaracterização. A resolução determina ainda que a revisão por segunda parte deve ser feita por consultoria externa, com experiência mínima de 5 anos.

De acordo com relatório trimestral de descaracterização de barragens a montante de maio de 2023, publicado pela ANM, existem atualmente 57 estruturas classificadas como alteadas a montante no Brasil. Ainda de acordo com o relatório, desde 2019, 15 estruturas foram descaracterizadas e descadastradas do SIGBM, 8 tiveram o método construtivo alterado e 6 foram reclassificadas como construídas a montante depois da realização de novos estudos

técnicos. A figura 11 mostra a quantidade de barragens em cada etapa de descaracterização e o histórico de estruturas descadastradas desde 2019.

Figura 11: Distribuição das barragens a montante de acordo com a fase atual de descaracterização.



*dentre as autodeclaradas como concluídas

Fonte: Adaptado de ANM (2023).

A figura 12 apresenta a distribuição geográfica das barragens alteadas a montante no Brasil, sendo que o estado com maior concentração é Minas Gerais, com 38 barragens; seguido de Rondônia e Bahia, com 4 barragens cada, Pará e Goiás, com 3 barragens cada, Rio Grande do Sul e São Paulo com 2 barragens cada e, por fim, Mato Grosso do Sul, com uma barragem.

A figura 13 apresenta o histórico do número de barragens a montante cadastradas no SIGBM desde 2019, ano de publicação da primeira resolução que determinou a proibição do método construtivo e a descaracterização de barragens existentes, até maio de 2023.

Além das estruturas que passaram por fiscalização da equipe técnica o e foram formalmente descadastradas, existem ainda 4 barragens declaradas como descaracterizadas pelos empreendedores responsáveis (ANM, 2023). Nessa fase, as estruturas em questão estão em etapa final de monitoramento e a equipe técnica da ANM realiza uma vistoria no local, para verificar a efetividade da descaracterização e os dados do monitoramento.

A tabela 8 relaciona as barragens com método de alteamento a montante cadastradas no PNSB (Plano Nacional de Segurança de Barragens) autodeclaradas como concluídas pelos empreendedores responsáveis. Vale notar que a Barragem 2, da Mosaic Fertilizantes P&K está com pedido de descadastramento em aberto.

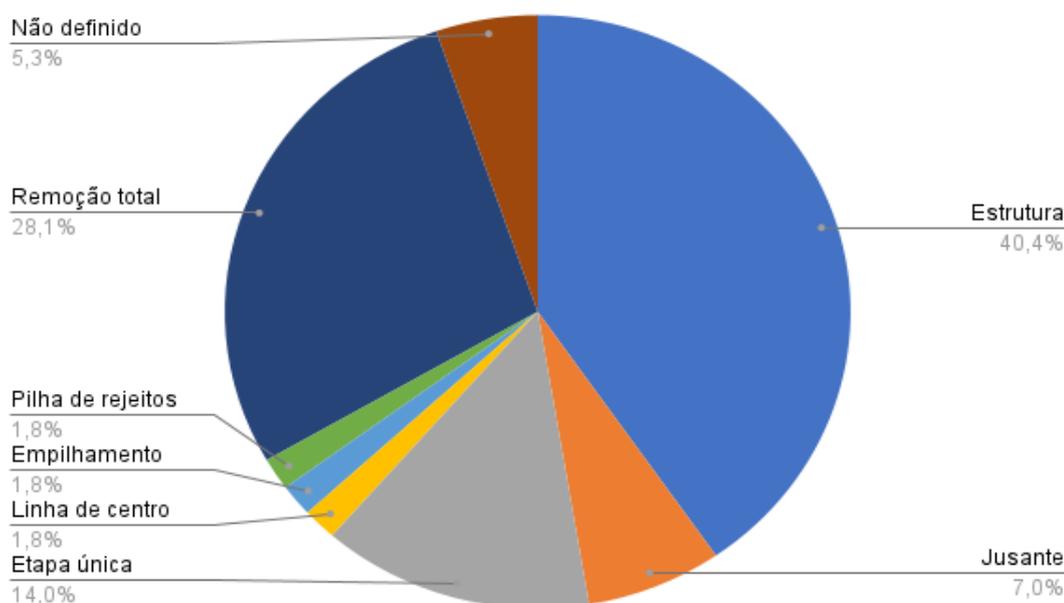
Tabela 8: Barragens a montante com obras de descaracterização consideradas finalizadas pelo empreendedor.

| Nome da Barragem | Empreendedor | Município /Estado | Minério Beneficiado |
|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Barragem 2 | Mosaic Fertilizantes P&K | Cajati/SP | Rocha Fosfática |
| Bacia de Finos da Mina do Cerro | Copelmi Mineração Ltda. | Cachoeira do Sul/RS | Carvão Mineral |
| Pilha 01 | AVG Empreendimentos Minerários S.A. | Sabará/MG | Minério de Ferro |
| Baixo João Pereira | Vale S.A. | Congonhas/MG | Minério de Ferro |

Fonte: Adaptado de ANM (2023).

Segundo relatório de maio de 2023, da ANM, todos os projetos de descaracterização apresentados envolvem alteração de geometria; das 57 barragens alteadas a montante 23 tem previsão para serem transformadas em estrutura geotécnica remanescente sem fins de contenção, de acumulação, decantação ou descarga de rejeitos; outras 4 barragens apresentam planos de alterar sua geometria para jusante, 8 para etapa única, 1 para empilhamento drenado o, 1 para pilha de rejeitos, 16 barragens terão a remoção completa do maciço e rejeito em seus projetos executivos de descaracterização. As estruturas reclassificadas como de método construtivo a montante no relatório de novembro de 2022 ainda não têm concepção de quais alterações geométricas serão feitas para a descaracterização (figura 14).

Figura 14: Distribuição da nova configuração geométrica das barragens a montante durante seu processo de descaracterização.



Fonte: Adaptado de ANM (2023).

Dentre os procedimentos mais importantes para a descaracterização, um deles é impedir o aporte de águas dentro do maciço, visando evitar a saturação do meio e a operação da barragem em situação não drenada. Para isso existem diversas formas de canalizar a água ou reduzir sua infiltração no corpo da barragem. Para definir alguns processos de contorno do aporte de águas é possível observar o caso da descaracterização da barragem B1 no município de Sarzedo em Minas Gerais. Neste processo de descaracterização foram utilizados diversos sistemas de drenagem os quais serão expostos a seguir.

No caso de soluções de descaracterização alterando o sentido dos alteamentos, criando novos a jusante e depois removendo os a montante, podem ser refeitos sistemas de filtragem interna da barragem, utilizando material granular, brita ou enrocamentos, com suas devidas camadas intermediárias entre ela e o restante do material que compõe o maciço, a fim de evitar o entupimento desses drenos, podendo estes serem tanto verticais, quanto horizontais ou no pé da nova seção da barragem.

Para a maioria das barragens é possível utilizar canaletas e coletores nos pés dos taludes e aterros direcionando a água geralmente para as ombreiras onde estas serão depositadas em caixas de drenagem e direcionadas à jusante da barragem. As bermas, se existentes, devem ter inclinação que conduza a água para estas canaletas, sendo o material que as compõem devidamente compactadas gerando o caminho preferencial de escoamento e não infiltração.

Ainda é possível elaborar um extravasor para a barragem, mesmo que a montante da barragem tenha sido feito sistemas de drenagem similares ao de canaletas e coletores citado anteriormente, deve-se garantir que a água que caia diretamente sobre a barragem também seja destinada se necessário. Para isso os extravasores são feitos em uma determinada altitude definida em projeto, assim que for atingido esse ponto o fluxo é desviado, é comum adotar uma das ombreiras para construir esta estrutura.

Considerando o aporte de água que não pode ser evitado, uma vez que este seja feito diretamente sobre a barragem, pode ser adotada a revegetação do local, essa tem a finalidade de reduzir a infiltração além de a longo prazo contribuir para a estabilidade dos taludes, controle de erosão, retenção de sedimentos e controle do fluxo (Ávila; Aragão; Schaper, s.d.).

2.7 MÉTODOS DE DESCARACTERIZAÇÃO

O Art. 58 da Resolução ANM nº 95/2022 traz informações a respeito informações acerca dos prazos e obrigações legais para a descaracterização das estruturas construídas ou alteadas pelo método de montante, como a existência de projeto técnico de descaracterização contemplando sistemas de estabilização ou a existência de estruturas de contenção a jusante.

Uma das alternativas para descaracterização de barragens a montante é a remoção total, que consiste no desmonte total da estrutura com remoção do rejeito e alteamentos anteriormente realizados. Outra alternativa é a alteração de método construtivo, que pode, depois de vistoria técnica da ANM, ser revisto e reclassificado como alteamento a jusante.

Uma das mineradoras que optou pela descaracterização por alteração de método construtivo foi a Itaminas, que apresentou projeto de adequação da barragem B1. Segundo relatório divulgado pela empresa, em novembro de 2022, os alteamentos de montante já foram descaracterizados e a estrutura seguirá ativa depois da finalização das adequações, funcionando como barragem de reservação e captação de água, construída pelo método de jusante.

Para a adequação da barragem B1, as obras iniciaram com rebaixamento de nível d'água do reservatório, limpeza de fundação das áreas onde serão implantadas as obras de terra com retirada de todo material mole, solto, saturado ou considerado, pela fiscalização, como sem capacidade de suporte ou inadequado e drenagem interna da barragem. Em seguida, foram feitas as escavações para implantação do novo maciço e a remoção dos alteamentos (Itaminas, 2022).

Na sequência do presente trabalho serão apresentadas análises simulando essas duas alternativas – remoção total e alteamento a jusante – para uma barragem de seção realística representativa da realidade brasileira atual.

2.8 MODELAGEM NUMÉRICA

No trabalho desenvolvido por Anibele (2020) foram realizadas análises de fluxo, tensão-deformação e estabilidade a partir de modelagem de seções típicas de barragens, utilizando-se do software desenvolvido pela *GeoSlope International*. Nessas análises, foram usadas malhas de, no máximo, 0,15 metros para cada elemento - no trabalho, foi destacada a importância deste refinamento na malha e apresentada a possibilidade de aumentar o número de nós sem a necessidade de redução do tamanho, visando maior precisão.

Para as simulações de drenagem, no estudo de Anibele (2022), foram aplicadas condições de contorno a fim de simular os drenos, que foram colocados em diversas posições a fim de analisar os diferentes comportamentos. Para as análises de tensão e deformação, deve-se definir os limites indeformáveis e as devidas restrições de movimento em relação aos eixos, além de aplicar, também com condições de contorno, os locais de aplicação da carga hidrostática. As análises realizadas pelo autor foram as de tensões iniciais *in situ* e construção e operação dos alteamentos.

Por fim, as análises de estabilidade da barragem alteadas a montante utilizadas por Anibele (2020) foram as de operação e operação com sismo, sendo citada a situação de final de construção, porém não realizada devido a limitação do software utilizado. O autor considera esta limitação tolerável uma vez que esta última análise não seria o fator de inviabilidade da construção da barragem. As análises desenvolvidas no presente trabalho foram de estabilidade drenada e não drenada assim como deformação drenada e não drenada, seguindo alguns dos procedimentos adotados por Aníbele (2020).

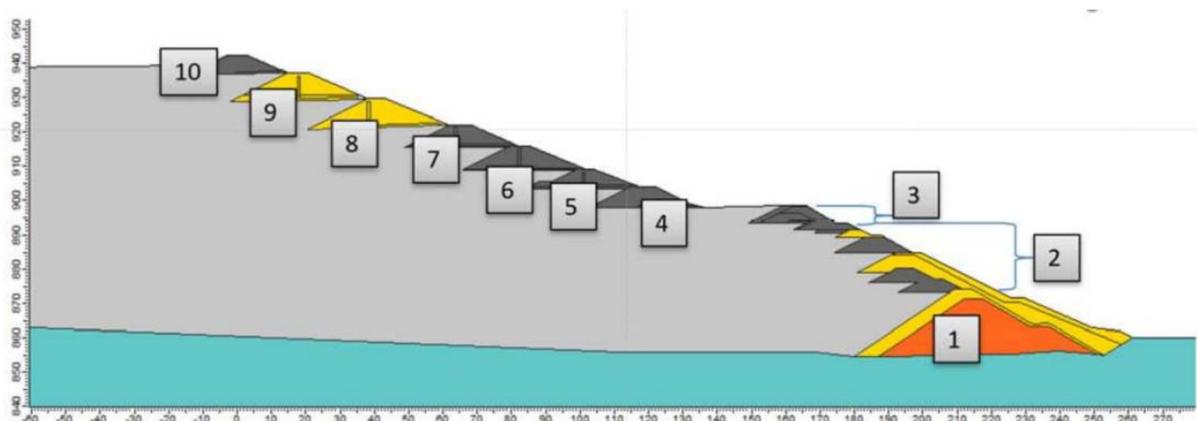
3 METODOLOGIA

As análises realizadas no presente trabalho tiveram como base a metodologia adotada por Anibele (2020) em seu trabalho “Estudo experimental e numérico sobre uso de barreiras geossintéticas poliméricas para controle de percolação em barragens convencionais e de rejeitos”. O estudo foi realizado a partir da seção de uma barragem real alteada a montante, utilizando-se dados e parâmetros provenientes do SIGBM, Projeto Apa Sul RMBH Estudos do meio físico Minas Gerais (2005), Coelho (2002) e Zacarias (2003).

As análises avaliadas foram de equilíbrio limite e tensão-deformação para dois casos principais: remoção completa da estrutura, regredindo os alteamentos e analisando o comportamento da barragem e a estabilização sem remoção de material, com inserção de bermas, alterando o método de alteamento para jusante.

Existe uma limitação quanto à disponibilidade de seções reais divulgadas, sendo uma delas a Barragem B1 de Brumadinho (MG), citada no capítulo 2.5, que será utilizada como referência para a elaboração da seção de estudo - a figura 15 representa essa seção.

Figura 15: Seção da barragem B1.



Fonte: Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão (2019)

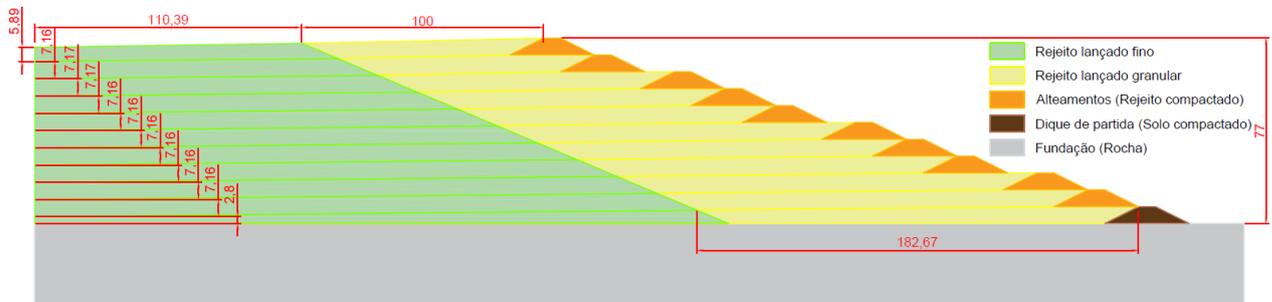
Utilizando a barragem de Brumadinho como referência, foi elaborada uma seção, realística genérica com dados disponibilizados pela ANM, a qual foi utilizada para o desenvolvimento das análises do presente trabalho, os dados levantados levaram em conta a localização estar no quadrilátero ferrífero, mesma região dos parâmetros geotécnicos apresentados no capítulo 2.3. Os critérios envolvidos na escolha desta barragem foram: a) localização: está no estado com maior número de barragens a serem descaracterizadas e próxima à locais onde ocorreram rompimentos de outras barragens; b) capacidade: Entre 12 e 30 milhões de metros cúbicos, portanto, dentro do prazo para descaracterização estabelecido pela ANM e; c) minério beneficiado: trata-se de uma barragem de rejeito de minério de ferro,

que é o mais comum no Brasil (BRASIL, 2023). Por todos os critérios apresentados, pode-se considerar esta seção como um bom representativo da realidade brasileira e, portanto, representa uma análise relevante para o cenário brasileiro e potenciais ações a serem realizadas.

A elaboração da seção foi feita de forma a possuir o volume adequado para estar enquadrada na data limite de descaracterização, obtendo-se os demais dados pelo SIGBM a fim de determinar alturas e comprimentos condizentes com o volume proposto. Utilizando como base a barragem B1 de Brumadinho, determinou-se que a praia de rejeitos mínima deveria contar com 100 metros, na seção elaborada, portanto a praia mínima localiza-se no último alteamento enquanto no dique de partida iniciaria com 180 metros, reduzindo gradualmente.

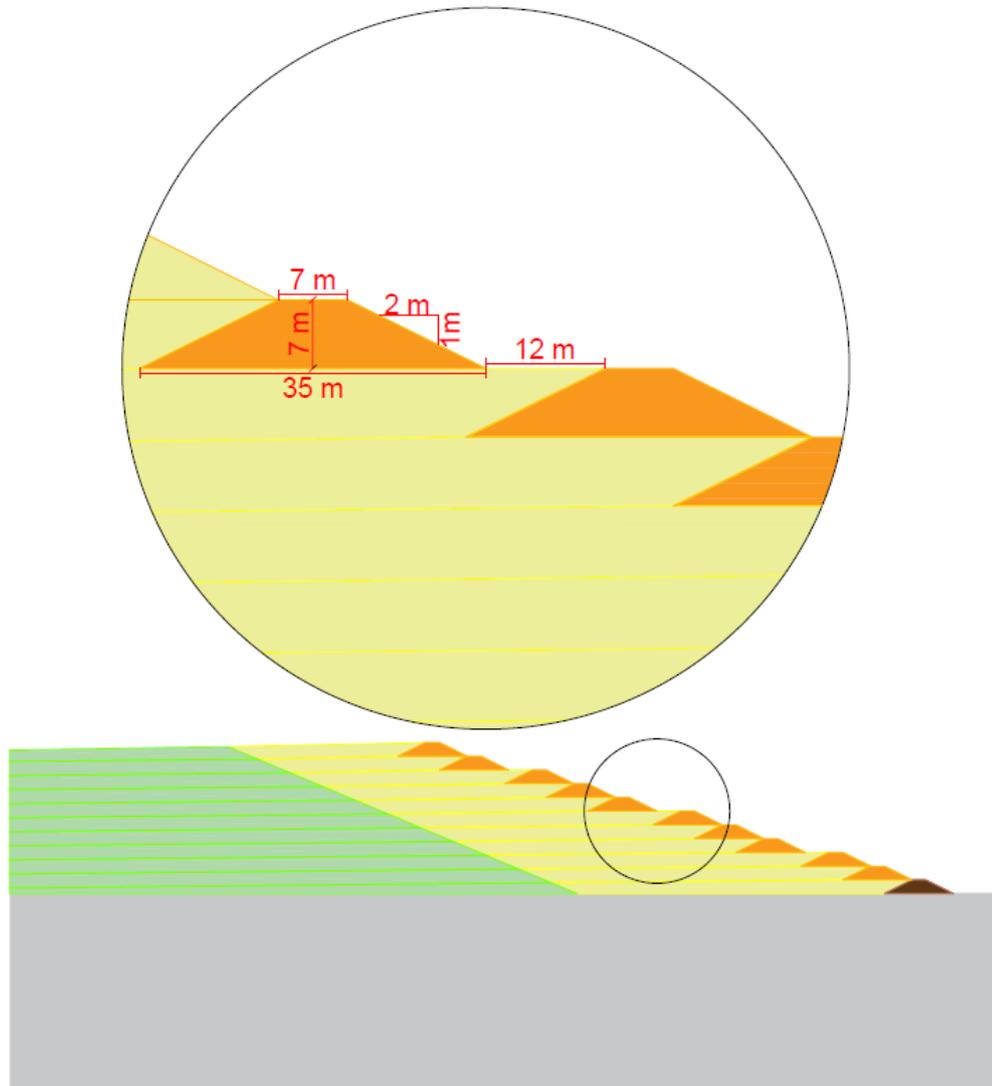
Considerando a altura da barragem foram definidos um dique de partida e dez alteamentos iguais, os quais contam com 7 metros de crista e altura e 35 metros de base, fazendo com que a inclinação dos taludes do dique e dos alteamentos seja 1:2, além disso a cada 21 metros de altura foi considerado um recuo de 10 metros para dentro do reservatório, responsável por reduzir a praia de rejeitos, porém atuando como uma berma. Desta forma a seção elaborada a fim de realizar as modelagens numéricas anteriormente citadas é apresentada nas figuras 16 e 17, com comprimento total, desde o dique de partida até o limite dos rejeitos, de 477,39 metros.

Figura 16: Seção realística adotada.



Fonte: os autores.

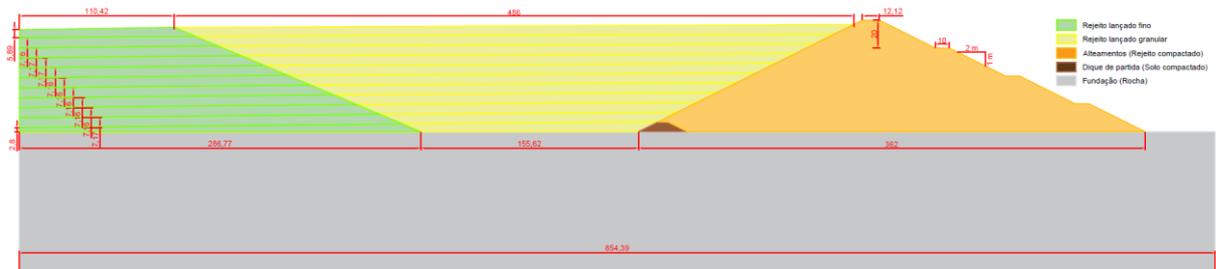
Figura 17: Seção realística adotada - alteamentos.



Fonte: Os autores.

A elaboração da seção com alteração do método de alteamento para jusante levou em conta a conservação do nível dos rejeitos, tendo sua altura alterada para 80 metros a fim de evitar *overtopping*, porém com os rejeitos permanecendo no nível de 77 metros a inclinação dos taludes permaneceu a mesma, 1:2, porém com bermas de 10 metros a cada 20 metros de altura, a extensão da estrutura aumentou para 854,39 metros. A seção elaborada a fim de realizar as modelagens numéricas anteriormente citadas é apresentada na figura 18.

Figura 18: Seção realística adotada com alteração do método para jusante.



Fonte: Os autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

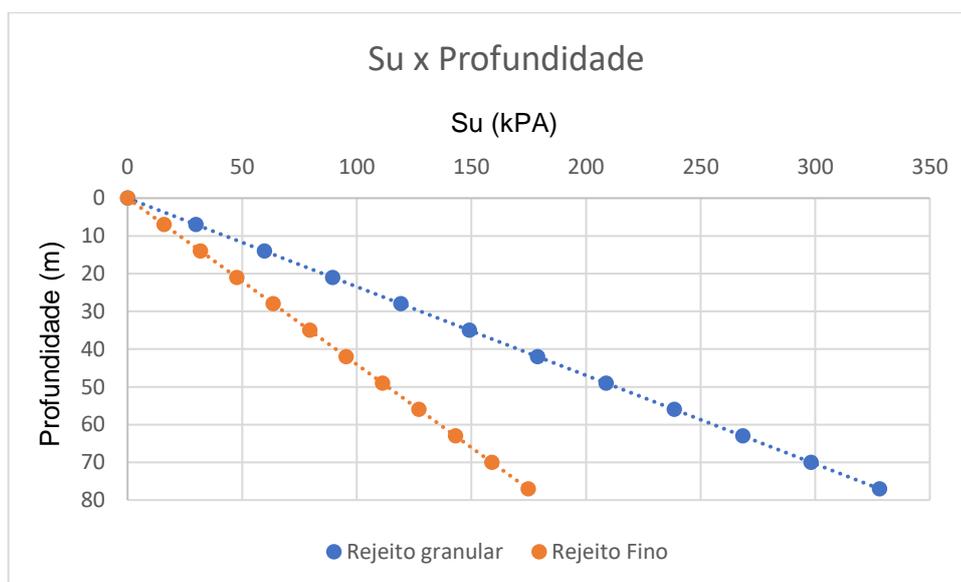
Os dados referentes aos rejeitos lançados, granular e fino, foram retirados dos estudos de Coelho (2002), enquanto os do rejeito compactado são os valores máximos, os dados do solo utilizado no dique de partida são provenientes do Projeto Apa Sul RMBH Estudos do meio físico Minas Gerais (2005), e por fim os valores utilizados na fundação foram obtidos dos estudos de Zacarias (2003) a tabela 9 apresenta esses dados na forma em que foram utilizados para as modelagens numéricas. O valor de S_u para o rejeito lançado é uma extrapolação dos gráficos elaborados por Coelho (2002) utilizando o método de Olson e Stark para rejeitos granulares e Robertson para finos, como este item, varia em função da profundidade este critério está disposto na figura 19 considerando as extrapolações das faixas inferiores para cada granulometria do rejeito. Utilizando as Amostras SPT 531 presentes no volume 4 de geotecnia do Projeto Apa Sul RMBH Estudos do meio físico Minas Gerais (2005) e as sondagens executadas por Coelho, e utilizando as fórmulas propostas por Quaresma citadas no capítulo 2.3 deste trabalho os módulos de elasticidade estimados dos materiais utilizados nas modelagens estão dispostos na tabela 9, o módulo de elasticidade do material da fundação foi obtido diretamente dos estudos de Zacarias (2003).

Tabela 9: Dados utilizados.

| Material | Coesão (kPa) | Angulo de atrito (°) | Peso específico (kN/m ³) | Condutividade Hidráulica (m/s) | Módulo de Elasticidade (kPa) |
|--------------------------|--------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Fundação | 250 | 30 | 29 | - | 83000000 |
| Dique de Partida | 25 | 33 | 18 | - | 170000 |
| Rejeito compactado | 19,6 | 32,7 | 22,7 | - | 70000 |
| Rejeito lançado granular | 0 | 32,7 | 21,3 | $1 \cdot 10^{-7}$ | 70000 |
| Rejeito lançado fino | 19,6 | 30,8 | 22,7 | $1 \cdot 10^{-8}$ | 18000 |

Fonte: os autores.

Figura 19: Gráfico Su x Profundidade.



Fonte: os autores.

As figuras das análises apresentadas nos resultados foram utilizadas a fim de representar o que o comportamento descrito, porém foram realizadas ao total 12 de cada natureza ao total, sendo uma para cada alteamento, uma para o dique de partida e uma para alteração de método para alteamentos a jusante, totalizando portanto 12 análises de estabilidade drenada, 12 de estabilidade não drenada, 12 de tensão deformação drenada e 12 de tensão deformação não drenada, estando todas apresentadas no anexo I.

4.1 REMOÇÃO COMPLETA DA ESTRUTURA

A alternativa de desmonte total da barragem apresenta algumas vantagens, apontados por Gonçalves (2023), como: mitigação dos riscos geotécnicos e hidráulicos, restauração ambiental total da área e melhoria na imagem pública da mineradora responsável.

Para projetar uma descaracterização usando dessa alternativa, é necessário prever as seguintes etapas: esvaziamento do reservatório, desativação e remoção das estruturas usadas na operação, escavação do reservatório e remoção do maciço, implantação do sistema de drenagem superficial e recuperação ambiental.

Segundo Gonçalves (2023), o esvaziamento do reservatório pode acontecer de duas formas, bombeamento ou abertura de brecha no maciço. A autora afirma ainda que toda água

bombeada, ou que sai pela brecha, deve ser tratada antes de lançada ao meio ambiente, devido à presença de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e Sulfato (SO_4^{2-}) que são usados na solubilização do ferro durante o beneficiamento do minério. É recomendado que o sistema de bombeamento seja mantido mesmo após o esgotamento, para bombear eventuais aportes água, como de precipitação.

Para remoção da estrutura, deve acontecer uma triagem e preparação dos materiais resultantes e destinação final. Estruturas de drenagem superficial em concreto devem ser demolidas à medida que o desmonte avança, para garantir a drenagem superficial dos taludes remanescentes do maciço até a remoção total (Gonçalves, 2023). Ainda, é importante prever acessos operacionais, capazes de suportar o fluxo de veículos e maquinário usado nas obras de descaracterização.

A drenagem superficial tem por objetivo captar e conduzir os fluxos de precipitações de forma segura, para diminuir os processos erosivos e preservar o terreno. Alguns dispositivos de drenagem superficial são: canaletas nas bermas, para conduzir escoamentos provenientes da precipitação no maciço até descidas de água ou canais periféricos; descidas de água para captar a contribuição das canaletas e conduzi-las até os canais periféricos; e canais de drenagem centrais, que são responsáveis por receber o escoamento das descidas e áreas adjacentes e conduzi-las para os talwegues naturais (Gonçalves, 2023).

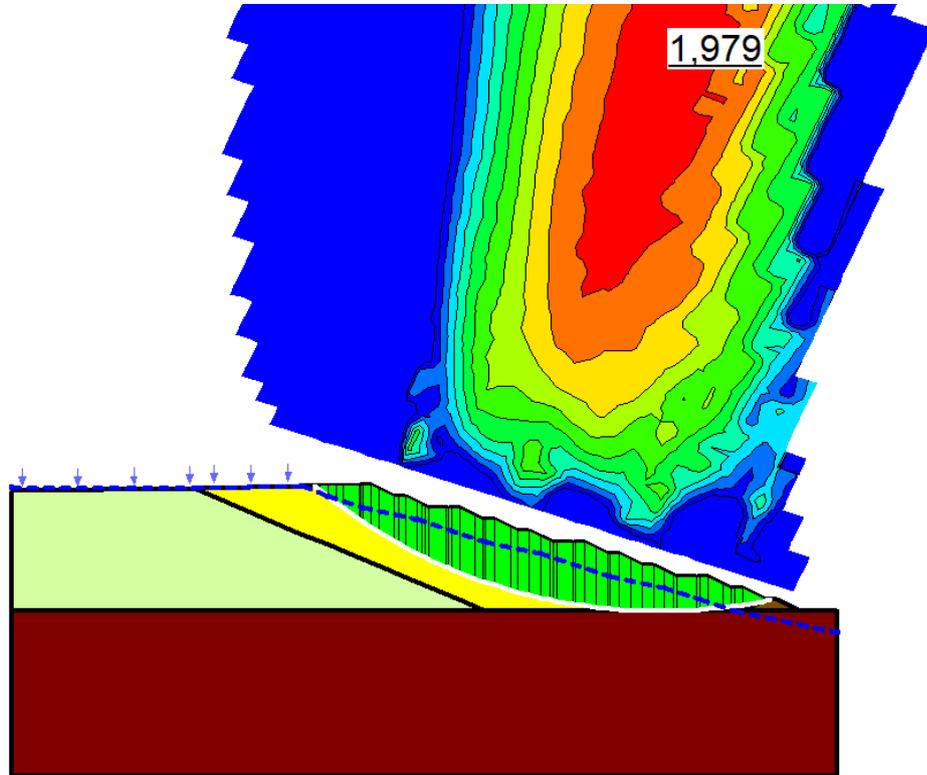
Por fim, toda a área descaracterizada com solo exposto deve passar por revegetação, com o objetivo de reduzir processos erosivos e geração de sedimentos. Existem duas alternativas possíveis de serem adotadas para a recuperação ambiental dessas áreas: hidrossemeadura, que pode ser aplicada em áreas de declividade, e reflorestamento, aplicado em áreas de conformação final (Gonçalves, 2023).

Após realizadas as modelagens numéricas foi possível determinar os coeficientes de segurança para as condições drenada e não drenada, além de determinar os deslocamentos horizontais e verticais para cada uma das situações, é notável o aumento dos valores dos coeficientes de segurança com a remoção dos alteamentos em ambas as situações.

As figuras 20 a 23 referem-se à estabilidade drenada e não drenada da estrutura completa e a estrutura com sua descaracterização finalizada, nelas é possível encontrar os coeficientes de segurança críticos, em vermelho, mencionados anteriormente. É possível

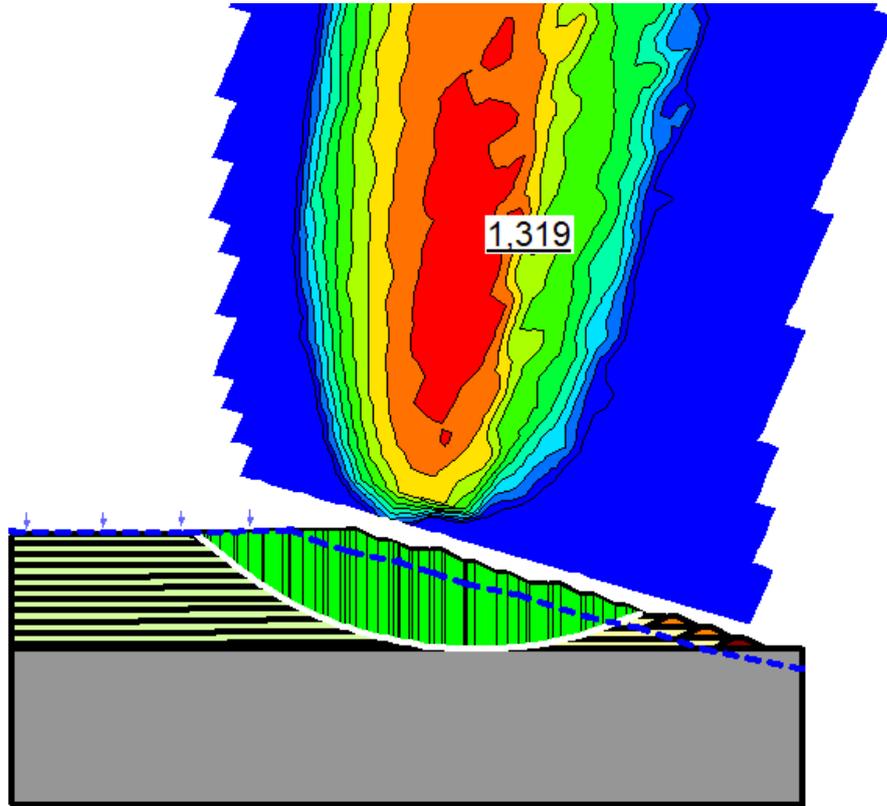
observar também a cunha de rompimento que em todos os casos contempla toda a estrutura, porém na condição não drenada sendo muito mais profunda.

Figura 20: Análise na condição drenada do décimo alteamento.



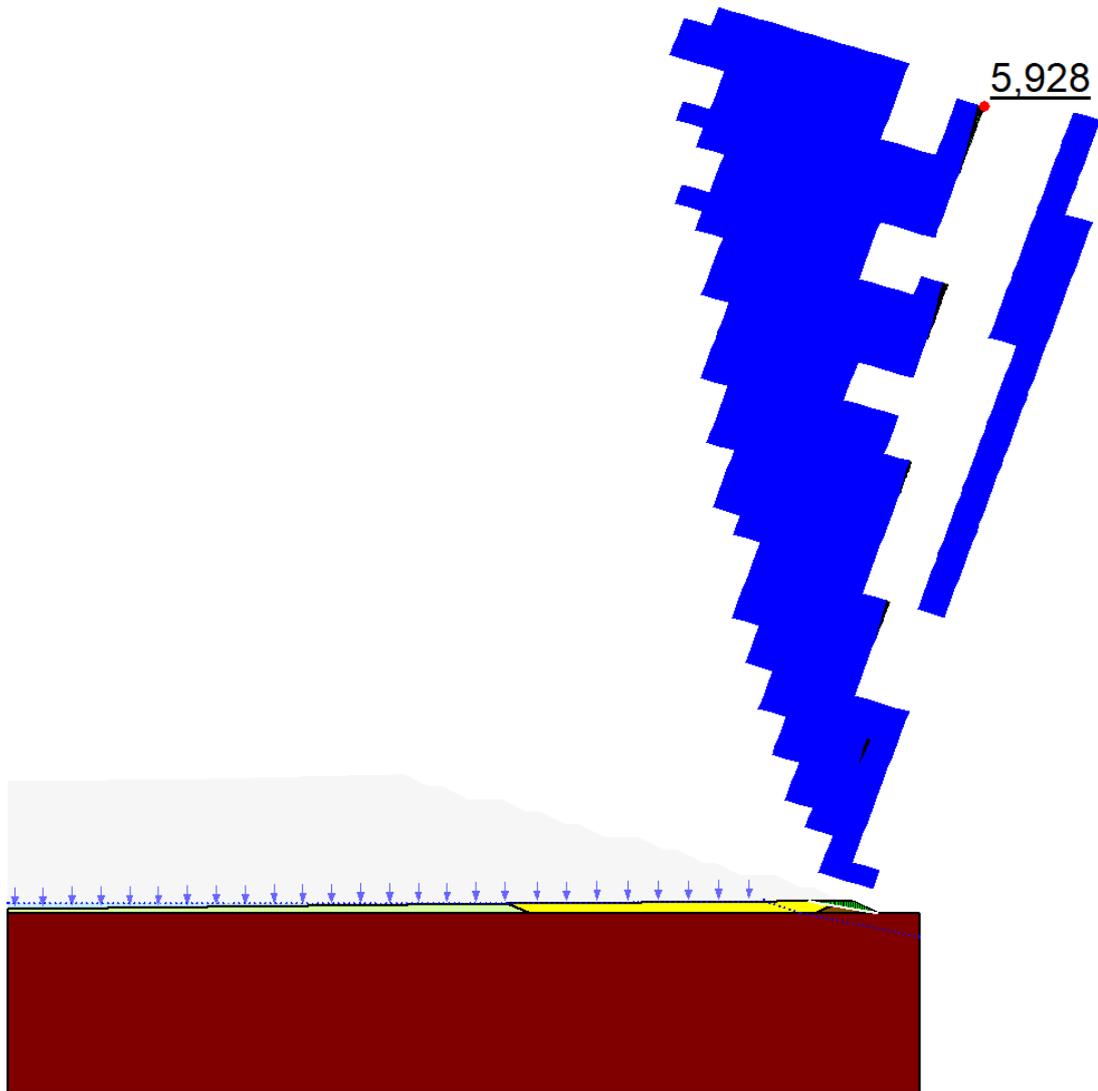
Fonte: os autores.

Figura 21: Análise na condição não drenada do décimo alteamento.



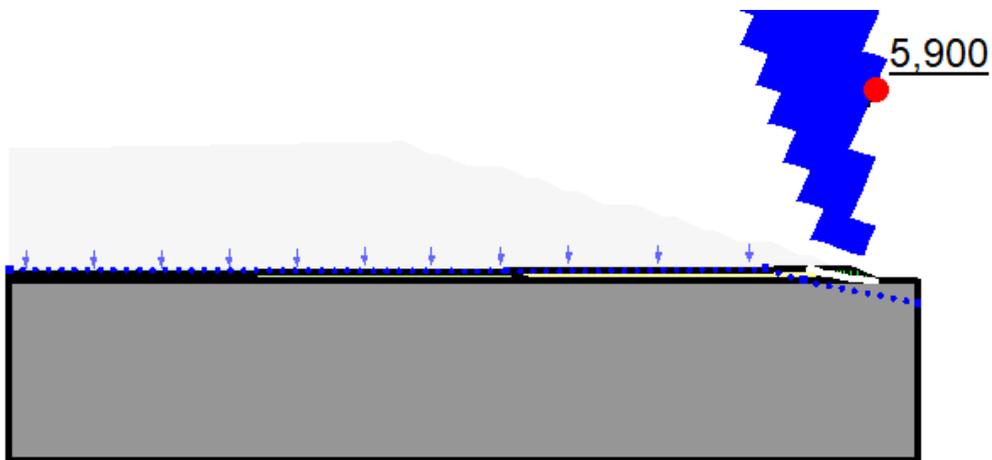
Fonte: os autores.

Figura 22: Análise na condição drenada no dique de partida.



Fonte: os autores.

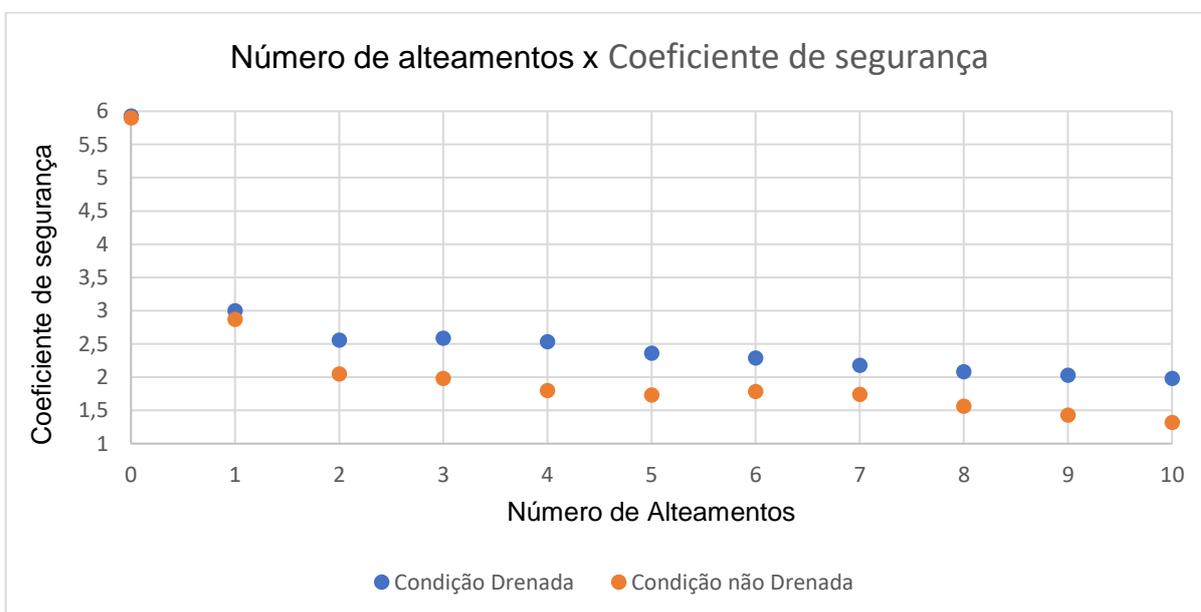
Figura 23: Análise na condição não drenada no dique de partida.



Fonte: os autores.

Analisando as variações entre o segundo e o décimo alteamentos, a fim de eliminar os valores discrepantes do dique de partida e primeiro alteamento, é possível notar tanto na condição drenada, quanto na não drenada, um comportamento aproximadamente linear quando elaborado um gráfico com todos os fatores de segurança, é notável também que ao restar apenas o dique de partida os coeficientes de segurança são muito próximos, evidenciando um rompimento preferencial na condição drenada. É possível observar esse comportamento na figura 25.

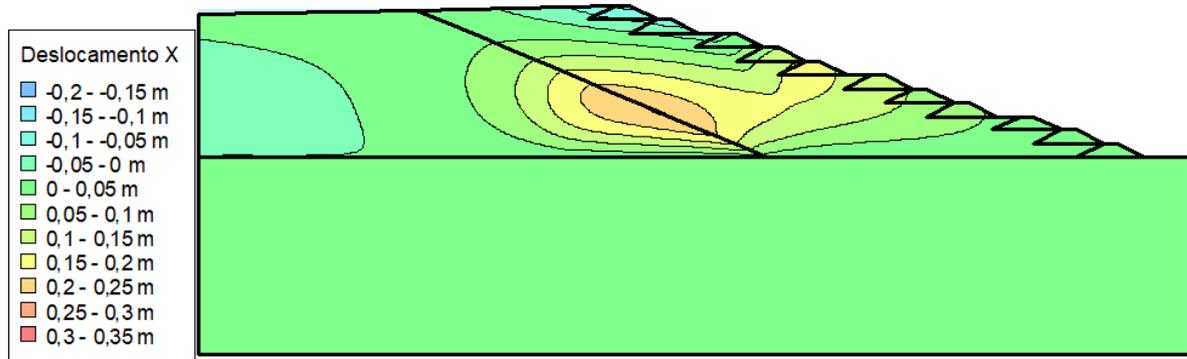
Figura 24: Coeficiente de segurança, nas análises de estabilidade, em função do número de alteamentos.



Fonte: os autores.

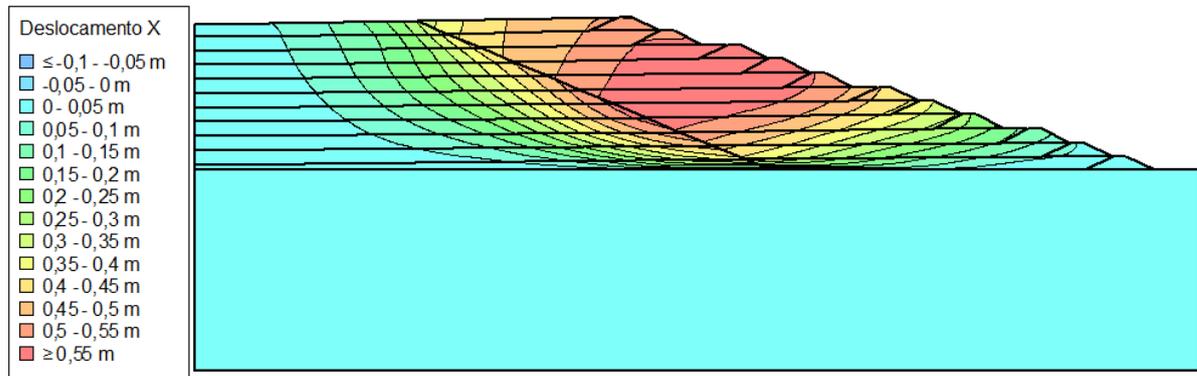
Quanto as análises de tensão-deformação, foi possível notar que os deslocamentos horizontais foram maiores na condição não drenada do que na drenada, enquanto na condição não drenada os maiores deslocamentos concentraram-se na interface dos rejeitos granulares e finos prolongando-se até a crista do sexto ao nono alteamento, os maiores deslocamentos horizontais na condição drenada restringiram-se a interface rejeitos granulares e finos. As figuras 26 e 27 ilustram esse comportamento, a legenda de cores da figura 26 inicia em -0,2 m na cor azul e termina em +0,35 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada cinco centímetros, enquanto a da figura 27 inicia em -0,01 m na cor azul e termina em +0,55 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada cinco centímetros.

Figura 25: Deslocamento horizontal na condição drenada.



Fonte: os autores.

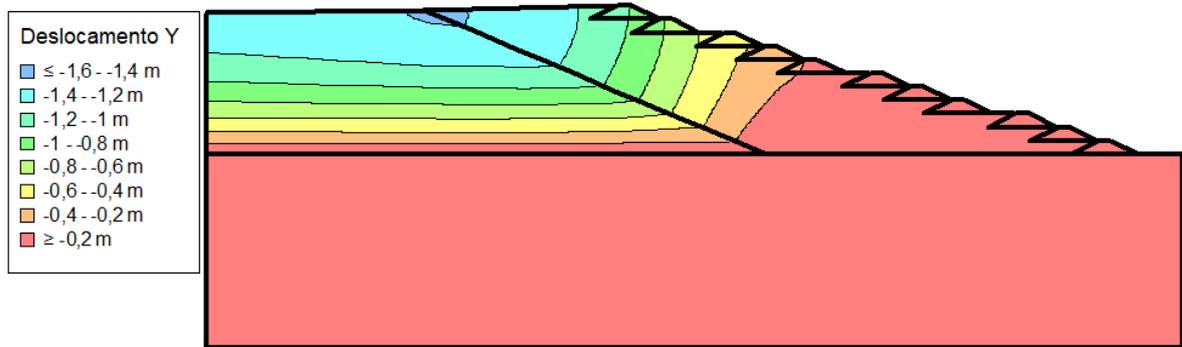
Figura 26: Deslocamento horizontal na condição não drenada.



Fonte: os autores.

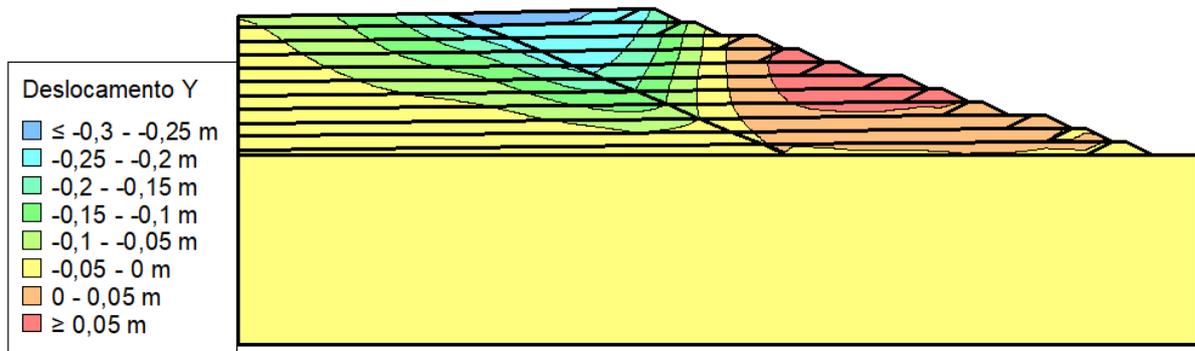
Quando analisados os deslocamentos verticais, nota-se uma inversão do comportamento, onde os maiores deslocamentos apresentam-se na condição drenada quando comparados com a condição não drenada, os maiores deslocamentos em ambas as condições se apresentam na superfície do reservatório na interface entre os rejeitos lançados granulares e finos com deslocamentos negativos, ou seja, direcionado para o fundo da barragem. O ponto diferencial entre as condições concentra-se principalmente nos deslocamentos positivos, ou seja, direcionado para a superfície da barragem, onde na condição drenada localiza-se nas partes inferiores da barragem, enquanto na drenada, localiza-se na região entre o quarto e sétimo alteamento. As figuras 28 e 29 ilustram esse comportamento. A legenda de cores da figura 28 inicia em -1,6 m na cor azul e termina em +0,20 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada vinte centímetros, enquanto a da figura 29 inicia em -0,3m na cor azul e termina em +0,05m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada cinco centímetros.

Figura 27: Deslocamento vertical na condição drenada.



Fonte: os autores.

Figura 28: Deslocamento vertical na condição não drenada.



Fonte: os autores.

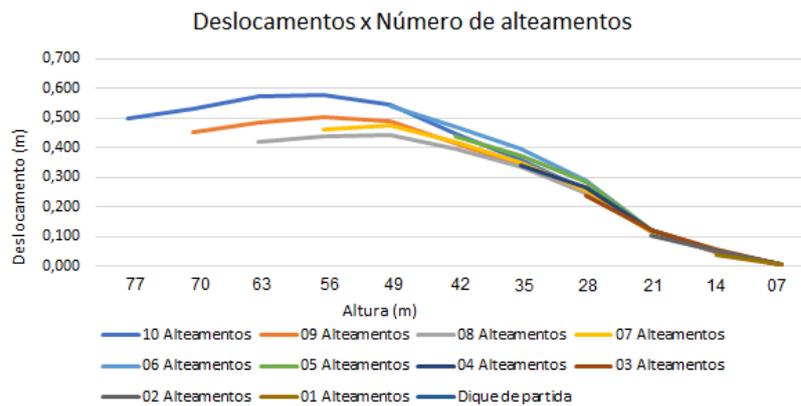
Fixando pontos no centro da crista e verificando os deslocamentos foram obtidos os deslocamentos pontuais e elaborados gráficos a fim de verificar o comportamento em cada direção nas condições drenada e não drenada, esses comportamentos estão expostos nas figuras 30 a 33, sendo possível notar os itens a seguir:

- Os deslocamentos horizontais na condição não drenada nas cristas, todos positivos, reduzem de valor com a remoção dos alteamentos;
- Os deslocamentos horizontais na condição drenada nas cristas, majoritariamente positivos, reduzem de valor com a remoção dos alteamentos, no sétimo alteamento ocorre a inversão do deslocamento de negativo para positivo para os alteamentos superiores, enquanto no oitavo e nono alteamento ocorre o aumento em módulo do deslocamento negativo com a remoção dos alteamentos.
- Os deslocamentos verticais na condição não drenada nas cristas, majoritariamente positivos, reduzem de valor com a remoção dos alteamentos, no sétimo e oitavo alteamento ocorre a inversão do deslocamento de negativo para positivo, enquanto no

oitavo e nono alteamento e no dique de partida ocorre o aumento em módulo do deslocamento negativo com a remoção dos alteamentos.

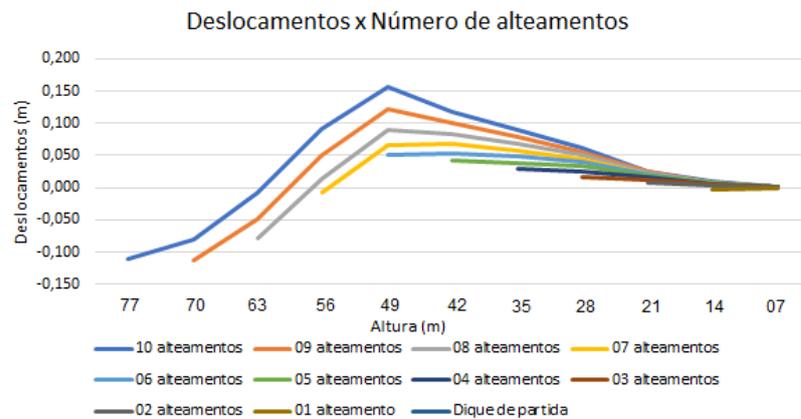
- Os deslocamentos verticais na condição drenada nas cristas, todos negativos, reduzem de valor com a remoção dos alteamentos;

Figura 29: Deslocamento horizontal na condição não drenada.



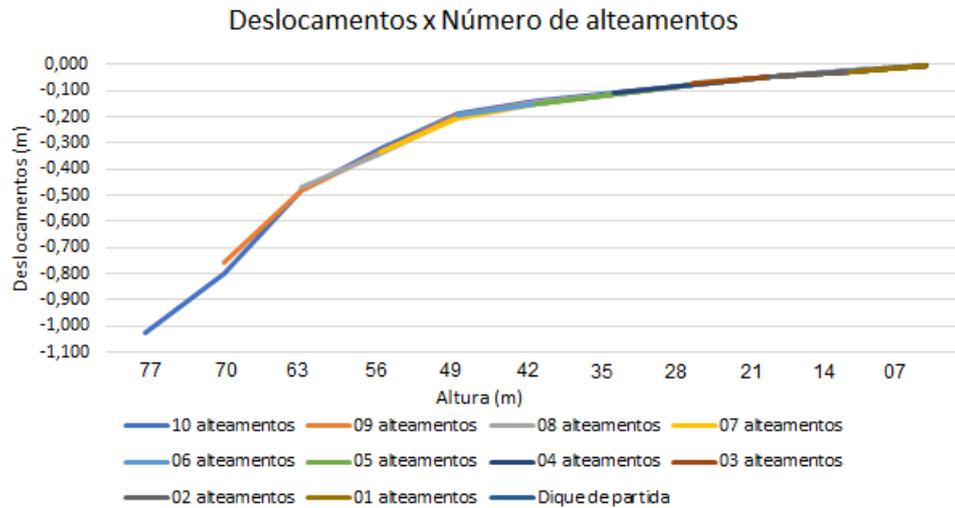
Fonte: os autores.

Figura 30: Deslocamento horizontal na condição drenada.



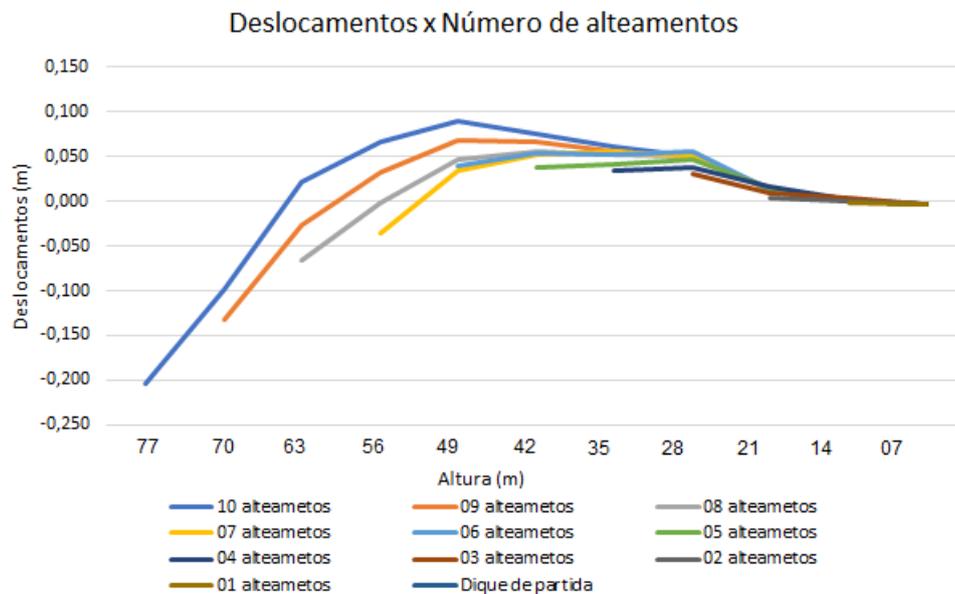
Fonte: os autores.

Figura 31: Deslocamento vertical na condição drenada.



Fonte: os autores.

Figura 32: Deslocamento vertical na condição não drenada.

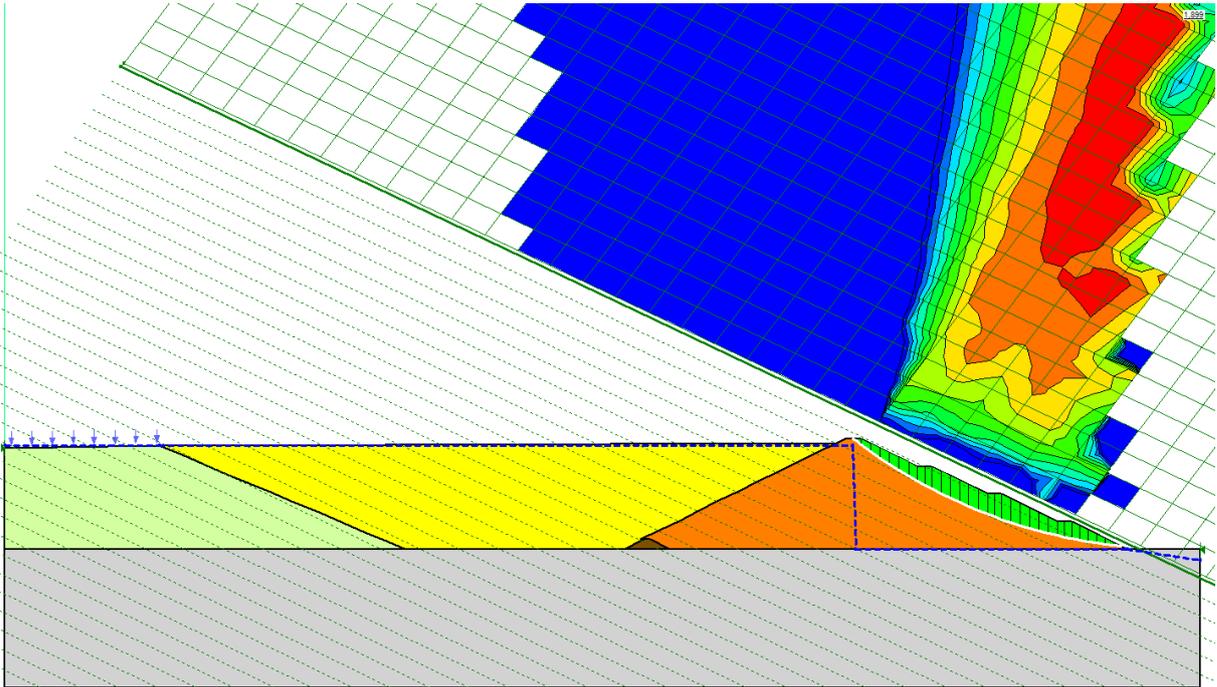


Fonte: os autores.

4.2 ALTERAÇÃO DO MÉTODO DE ALTEAMENTOS PARA JUSANTE

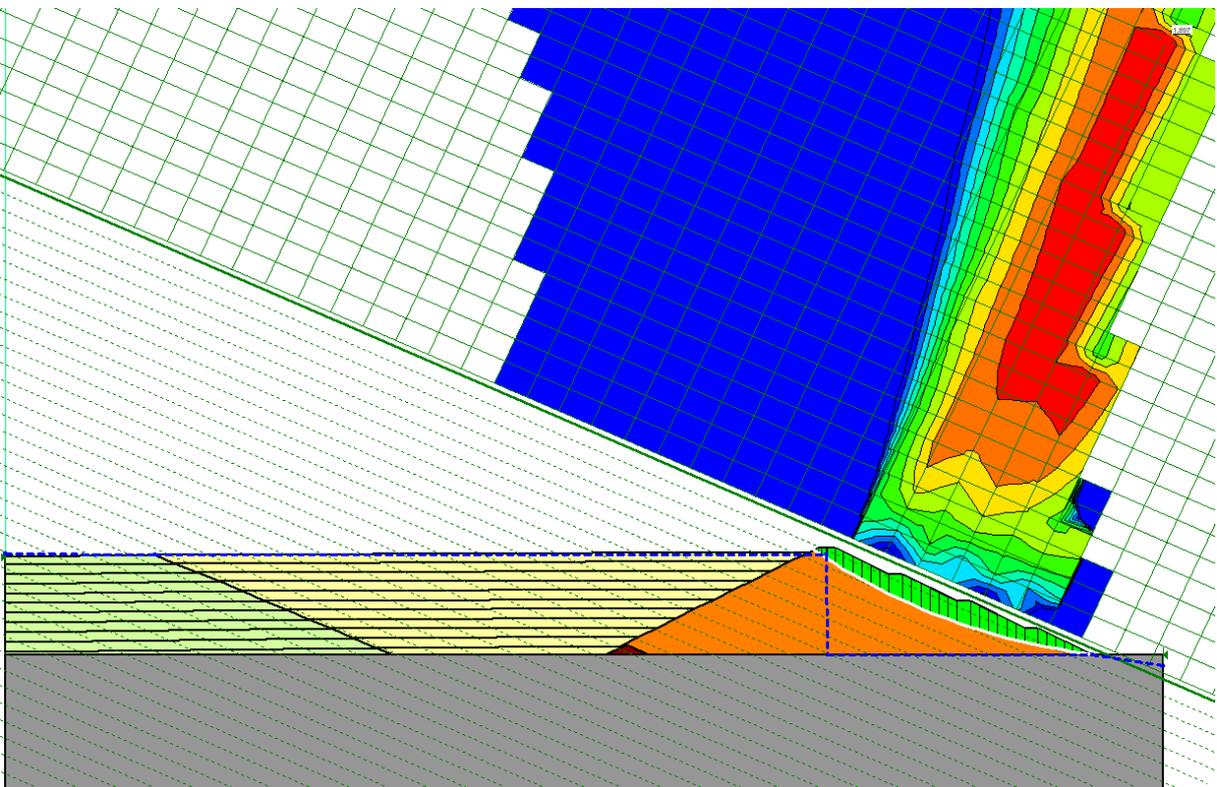
Após realizadas as modelagens numéricas foi possível determinar os coeficientes de segurança para as condições drenada e não drenada, além de determinar os deslocamentos horizontais e verticais para cada uma das situações. Quanto as condições de estabilidade drenada e não drenada é possível notar que as cunhas de rompimento e os coeficientes de segurança possuem formas e valores muito próximos, 1,889 e 1,887 em cada condição respectivamente, é possível observar isso nas figuras 34 e 35.

Figura 33: Análise na condição drenada na alteração de método para jusante.



Fonte: os autores.

Figura 34: Análise na condição não drenada na alteração de método para jusante.

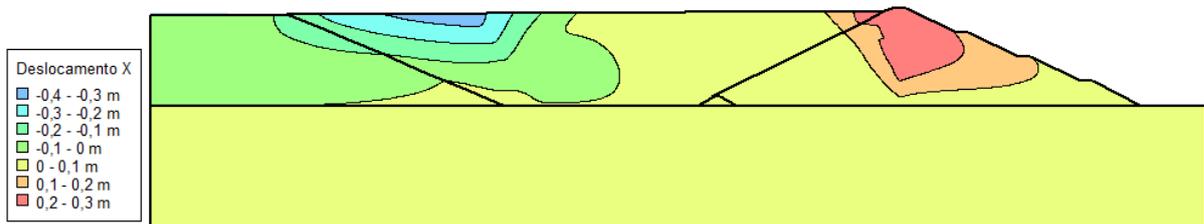


Fonte: os autores.

Quanto as análises de tensão-deformação, foi possível notar que os deslocamentos horizontais na condição não drenada são majoritariamente positivos, direcionados a jusante do

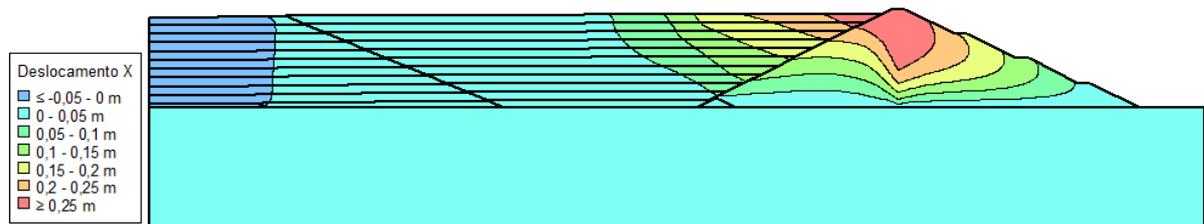
reservatório, concentrando-se na superfície próxima ao talude de montante e no eixo da barragem, enquanto na condição drenada os deslocamentos são majoritariamente negativos, direcionados a montante do reservatório, concentrando-se na superfície sobre a interface dos rejeitos lançados granulares e finos. As figuras 36 e 37 ilustram esse comportamento, a legenda de cores da figura 36 inicia em -0,01 m na cor azul e termina em +0,29 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada cinco centímetros, enquanto a da figura 37 inicia em -0,60 m na cor azul e termina em +0,16 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada dois centímetros.

Figura 35: Deslocamento horizontal na condição drenada.



Fonte: os autores.

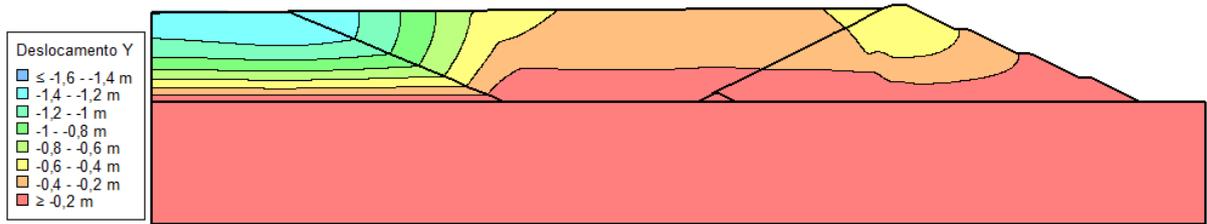
Figura 36: Deslocamento horizontal na condição não drenada.



Fonte: os autores.

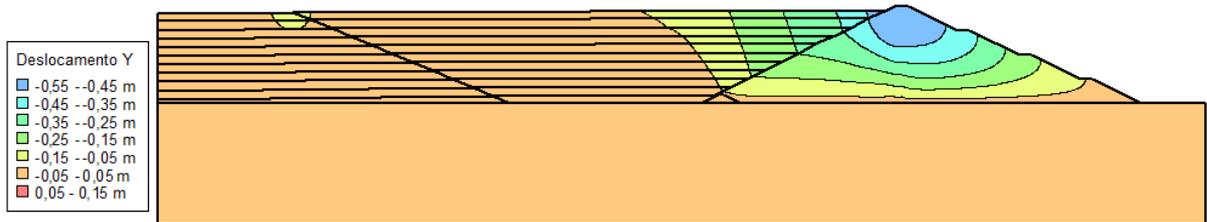
Quanto as análises de tensão-deformação foi possível notar que os deslocamentos verticais na condição não drenada são todos negativos, direcionados para o fundo do reservatório, concentrando-se na superfície dos rejeitos finos se propagando por todo esse material e reduzindo os valores mais acentuadamente nos outros, na condição drenada os deslocamentos permanecem negativos, porém concentrando-se na crista da barragem e reduzindo sua intensidade no restante do maciço e no rejeito granular porém ainda próximo do talude de montante. As figuras 38 e 39 ilustram esse comportamento, a legenda de cores da figura 38 inicia em -2,60 m na cor azul e termina em -0,15 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada cinco centímetros, enquanto a da figura 39 inicia em -0,55 m na cor azul e termina em -0,01 m na cor vermelha, variando a tonalidade a cada dois centímetros.

Figura 37: Deslocamento vertical na condição drenada.



Fonte: os autores.

Figura 38: Deslocamento vertical na condição não drenada.



Fonte: os autores.

5 CONCLUSÃO

Com os resultados observados, no que tange a condições de estabilidade, é possível concluir que na condição de remoção dos alteamentos a estrutura teve o seguinte comportamento: Os coeficientes de segurança referentes as condições de estabilidade drenada e não drenada variaram linearmente, enquanto a estrutura como um todo exigia menos resistência devido a menor carga aplicada com a remoção dos alteamentos os parâmetros de resistência do solo promoviam este aumento.

Ainda nas condições de estabilidade é possível notar que a cunha de rompimento engloba todos os alteamentos presentes, tanto nas análises drenadas quanto não drenadas, isso se deve ao nível d'água está próximo a parte inferior a montante de todos os alteamentos, gerando como ponto de diferenciação a profundidade da cunha e o fator de segurança, muito inferior na condição não drenada, devido à redução de interação entre os grãos.

Quanto aos deslocamentos horizontais observadas no caso de remoção de alteamentos, é possível notar que estes possuem uma origem comum no centro da barragem na interface entre os rejeitos lançados granulares e finos, porém na condição não drenada esses deslocamentos mais acentuados se propagam em direção a jusante com mais intensidade, é justificável esta condição pois estando majoritariamente em rejeito granular não drenado dificilmente os grãos conseguem se manter coesos, gerando maiores deslocamentos e propagações destes.

Por outro lado os deslocamentos verticais preponderantes ocorreram na superfície do reservatório, também na interface dos rejeitos, reduzindo os valores conforme diminuam a cota, é possível entender esse comportamento como sendo acumulativo, onde os rejeitos inferiores sofrem um deslocamento e liberam espaço para os que estão mais acima deslocarem-se mais intensamente, esse comportamento ocorre tanto na condição drenada quanto na não drenada, direcionando esses deslocamentos para o fundo da barragem, porém na condição não drenada devido ao caráter indeformável dos fluidos, existe uma compensação dos deslocamentos mais acentuada nos alteamentos, os quais sofrem um deslocamento direcionado a superfície do reservatório.

Considerando a alteração de método para jusante é notável o mesmo valor numérico para o coeficiente de segurança encontrado para ambas as condições de estabilidade, isso se deve ao fato de não haver parte resistente da estrutura sobre o rejeito em regime não drenado, o que faz com que os fatores de rompimento para este caso sejam os mesmos da condição drenada.

Os deslocamentos observados, tanto horizontais quanto verticais, no caso de alteração do método de alteamento para jusante, ocorrem majoritariamente sobre o maciço na condição não drenada e sobre o rejeito fino na condição drenada, esse efeito é explicado pela presença de água, na condição drenada o caminho preferencial é o material mais mole portanto o rejeito fino, porém na condição não drenada com este material saturado são dificultados os deslocamentos devido a inderfomabilidade dos fluidos, sendo esses deslocados para o maciço local onde o material apresenta menor quantidade de água e portanto maior deformabilidade.

REFERÊNCIAS

- Ação de esclarecimento do CBDB junto à imprensa – Quem é o Comitê brasileiro de barragens. **Comitê Brasileiro de Barragens**. Disponível em: <http://cbdb.org.br/acao-de-esclarecimento-do-cbdb-junto-a-imprensa-quem-e-o-comite-brasileiro-de-barragens-cbdb#:~:text=Barragens%20s%C3%A3o%20estruturas%20utilizadas%20para,%2C%20vazamentos%2C%20enchentes%2C%20etc>. Acesso em: 16 de novembro de 2022
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Relatório trimestral descaracterização de barragens a montante** – Brasília, DF. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 95 de 07 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em 12 de dez. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 32 de 11 de maio de 2020**. Altera a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 e dá outras providências. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-no-32-de-11-de-maio-de-2020.pdf/view. Acesso em 12 de dez. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 13 de 8 de agosto de 2019**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/legislacao-aplicada/anm-resolucao-13-2019.pdf. Acesso em: 10 de nov. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 4 de 15 de fevereiro de 2019**. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. Disponível em: https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Res_4_19.htm. Acesso em 12 de dez. 2022
- ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 192, 2004.

ANIBELE, Rafael. **Estudo experimental e numérico sobre uso de barreiras geossintéticas poliméricas para controle de percolação em barragens convencionais e de rejeitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2020. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/81632>. Acesso em 15 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos**. Rio de Janeiro. 2017.

BRASIL. Agência nacional de mineração. **Quantitativo de Barragens – Método Construtivo**. [Brasília]: ANM, [2023]. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 06 jun. 2023.

COELHO, P. dos S. C. Caracterização de rejeito de minério de ferro por meio de ensaios de campo e laboratório aplicada à análise de susceptibilidade à liquefação. 2021. 217 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. Nota técnica – Barragem Auxiliar do Vigia. 17 de agosto de 2022. Acessado em 2 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.csn.com.br/wp-content/uploads/sites/452/2022/05/NOTA-TECNICA-BARRAGEM-AUXILIAR-DO-VIGIA-FEVEREIRO-A-MAIO-DE-2022.pdf>

do Vale Schaper, D., Aragão, G. A. S., de Ávila, J. P., & de Ávila Consultoria, P. **Considerações Gerais sobre Ações de Revegetação no Fechamento de Barragens de Rejeito**. Sem Data.

ESPÓSITO, J. T. Metodologia probabilística e observacional aplicada às barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. 2000. p. 33 a 37. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Brasília. Brasília.

FONSECA, A. V. da. FONSECA, A. OLIVEIRA, S. Fatores de segurança determinísticos em avaliação de estabilidade de barragens de rejeitos: uma reflexão. **Geotecnia**, Porto, n. 151, p. 53-76, mar. 2021. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/9834/7200> Acesso em: 30 out. 2023.

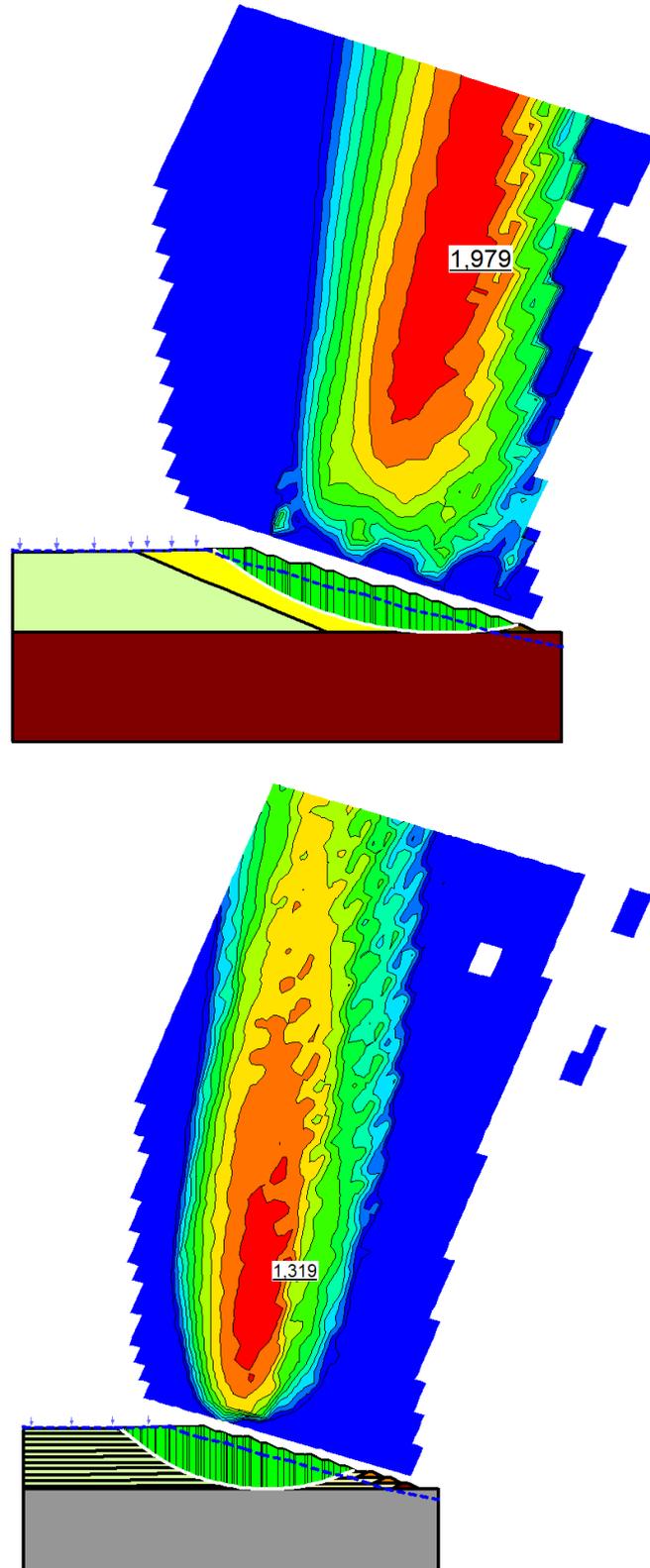
HOMERO PINTO CAPUTO. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio De Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

ITAMINAS. **Projeto de descaracterização/adequação**. Departamento de Meio Ambiente. Relatório. 2022.

- MACHADO, N. C. Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação. 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- MAFRA, J. M Q. **Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeitos no Brasil?**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Belo Horizonte, 2016
- MASSIGNAN, R. S.; SÁNCHEZ, L. E. O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura. São Paulo, v. 27, n 2, 10 páginas, mar/abr 2022. Scielo Brasil.
- METSO. **Redução de custos e economia de água com as novas bombas para minério de ferro em Itaminas**. In: Metso. Parauapebas, PA. 17 abr. 2017. Disponível em: <<https://www.metso.com/pt/insights/blog/mineracao-e-metais/reducao-de-custos-e-economia-de-agua-com-as-novas-bombas-para-minerio-de-ferro/>> Acesso em: 30 out. 2023.
- MINÉRIOS NACIONAL. Nota técnica – Barragem B2A. 17 de agosto de 2022. Acessado em 16 de novembro de 2022. Disponível em: <https://www.csn.com.br/wp-content/uploads/sites/452/2022/08/NOTA-TECNICA-BARRAGEM-B2A-MINERIOS-NACIONAL-junho-a-agosto-de-2022.pdf>
- SILVA, W. P. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). Tese de mestrado em engenharia geotécnica – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. p.53. 2010.
- Tendências, perspectivas e desafios na gestão de barragens e rejeitos de mineração. **Comitê Brasileiro de Barragens**. Disponível em: <http://cbdb.org.br/tendencias-perspectivas-e-desafios-na-gestao-de-barragens-e-rejeitos-de-mineracao>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.
- ZACARIAS, Carlos Marcelo. Classificação de maciços rochosos da mina do córrego do meio aplicada às operações de perfuração. 2003, Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

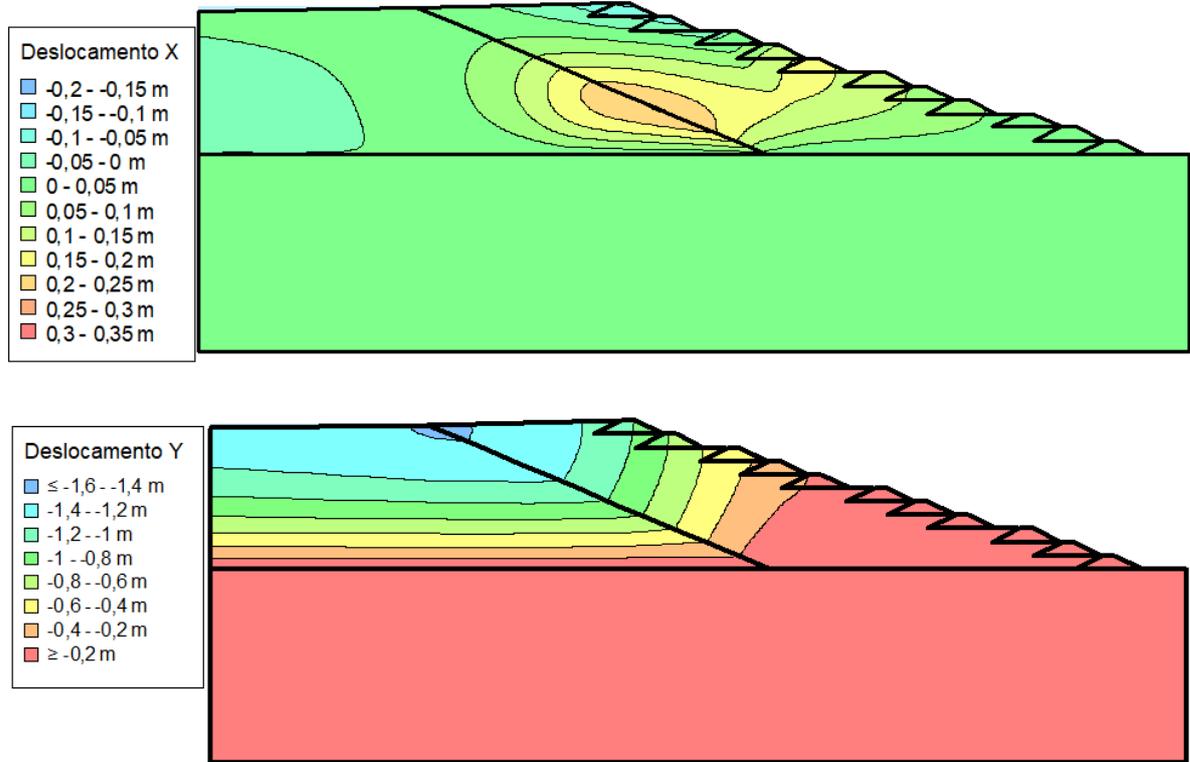
ANEXO 1 – ANÁLISES DE ESTABILIDADE E DESLOCAMENTOS

Figura 39: Análise de estabilidade drenada (a) e não drenada (b) para 10 alteamentos.



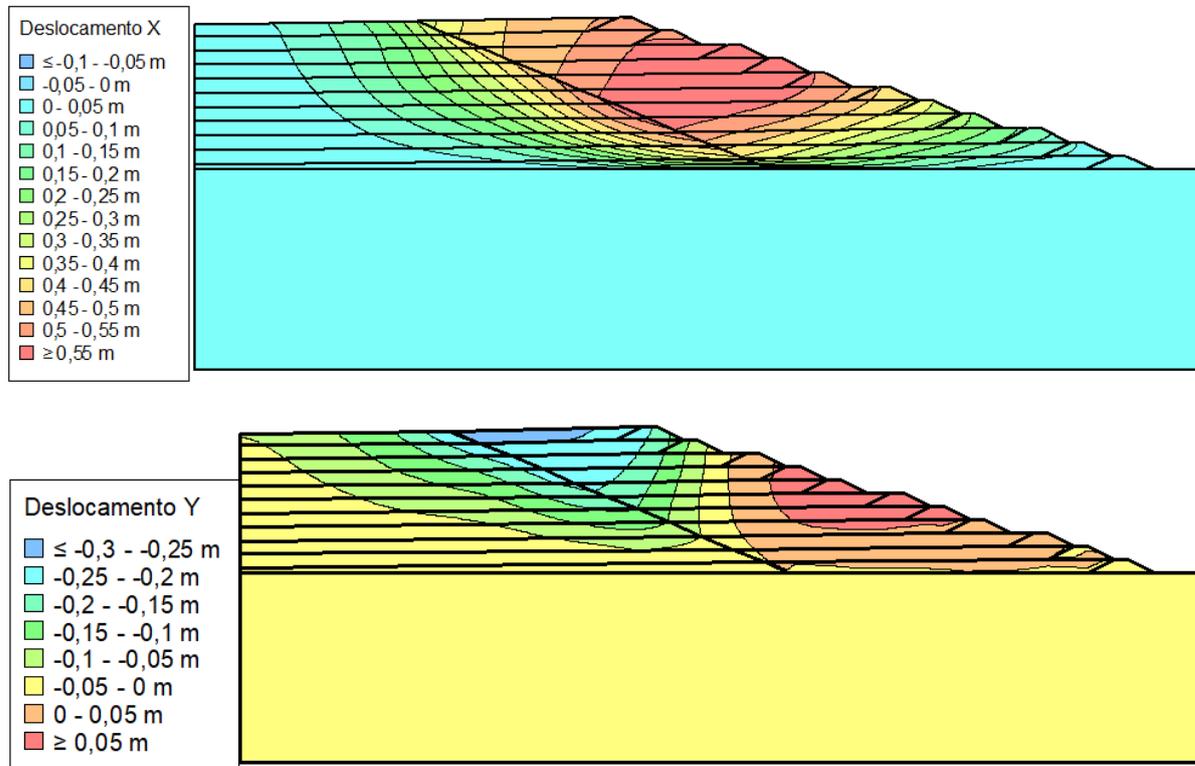
Fonte: os autores.

Figura 40: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada aos 10 alteamentos.



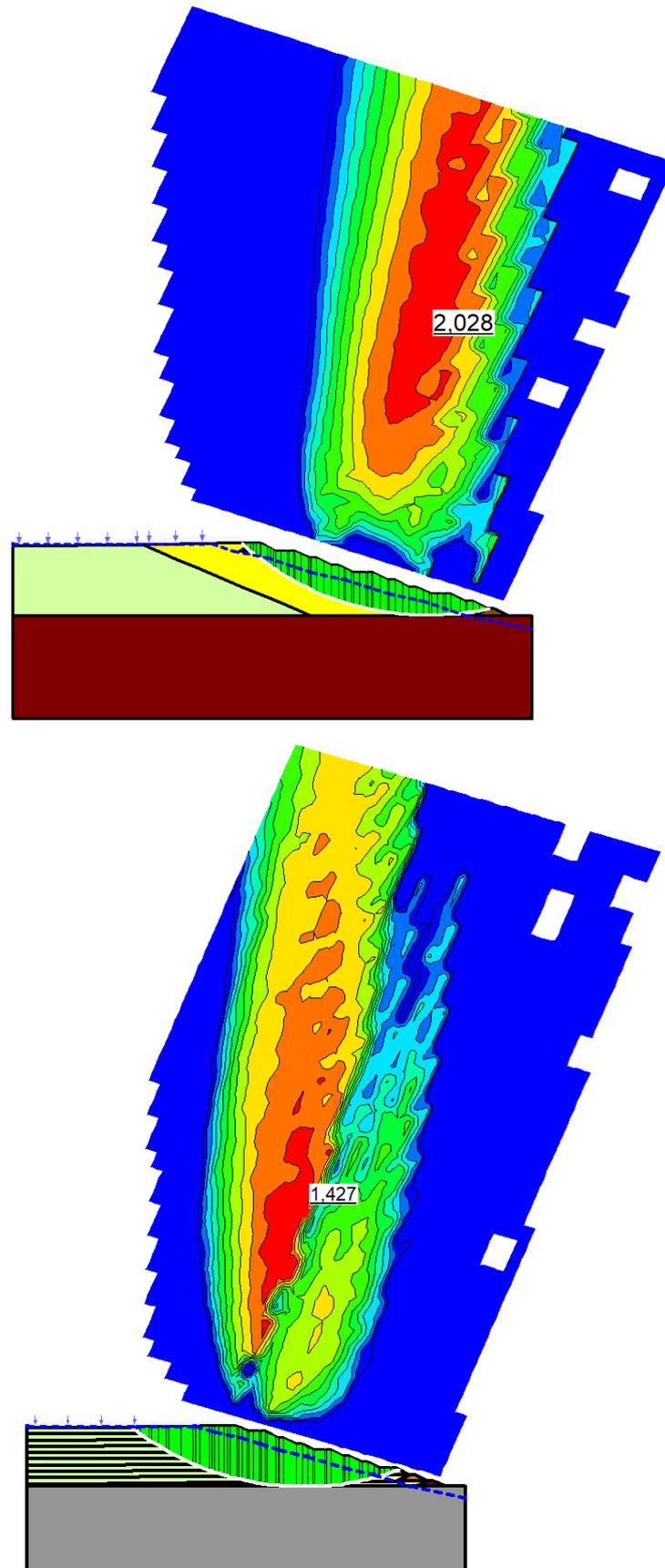
Fonte: os autores.

Figura 41: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada aos 10 alteamentos.



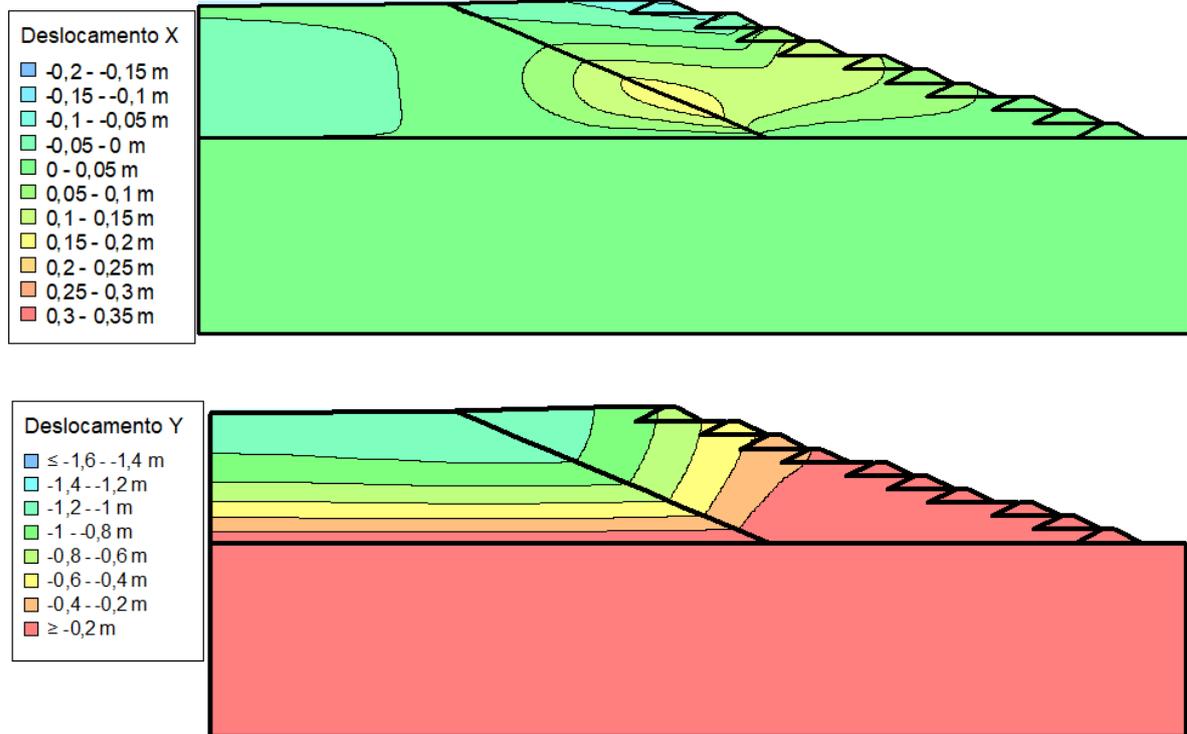
Fonte: os autores.

Figura 42: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 9 alteamentos.



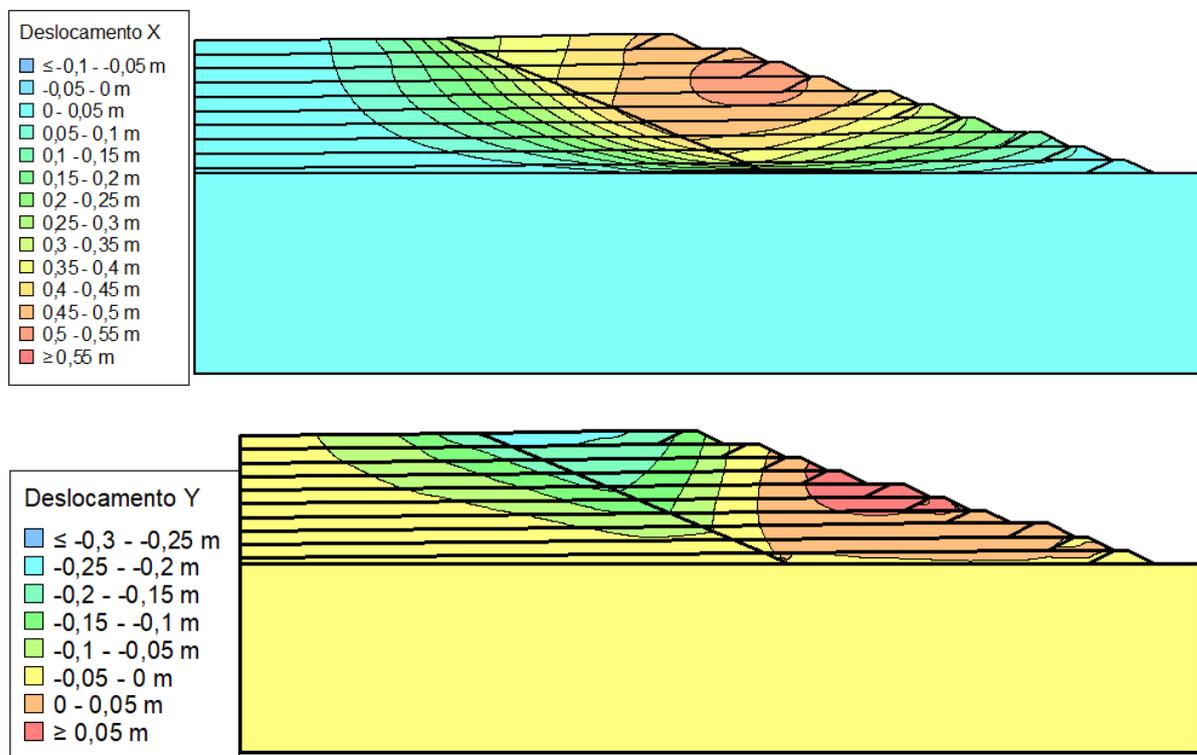
Fonte: os autores.

Figura 43: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 9 alteamentos.



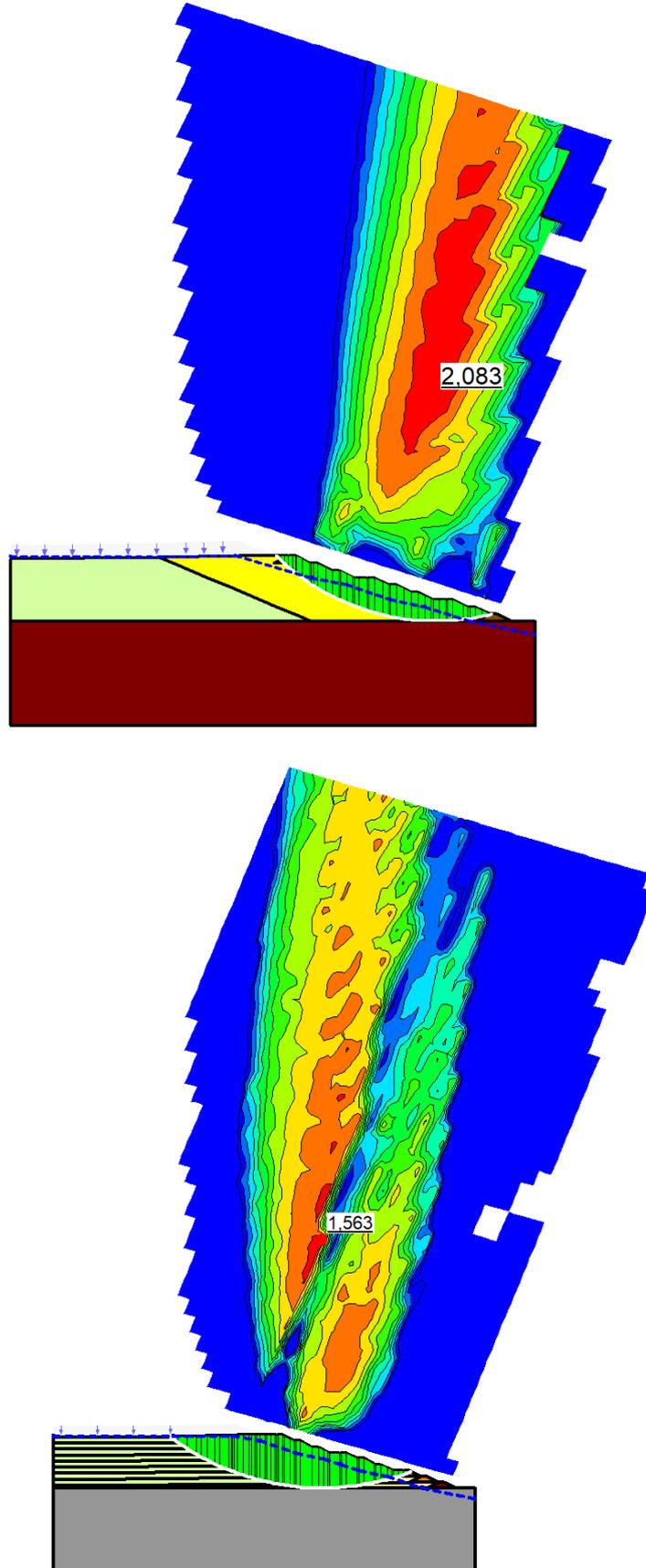
Fonte: os autores.

Figura 44: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 9 alteamentos.



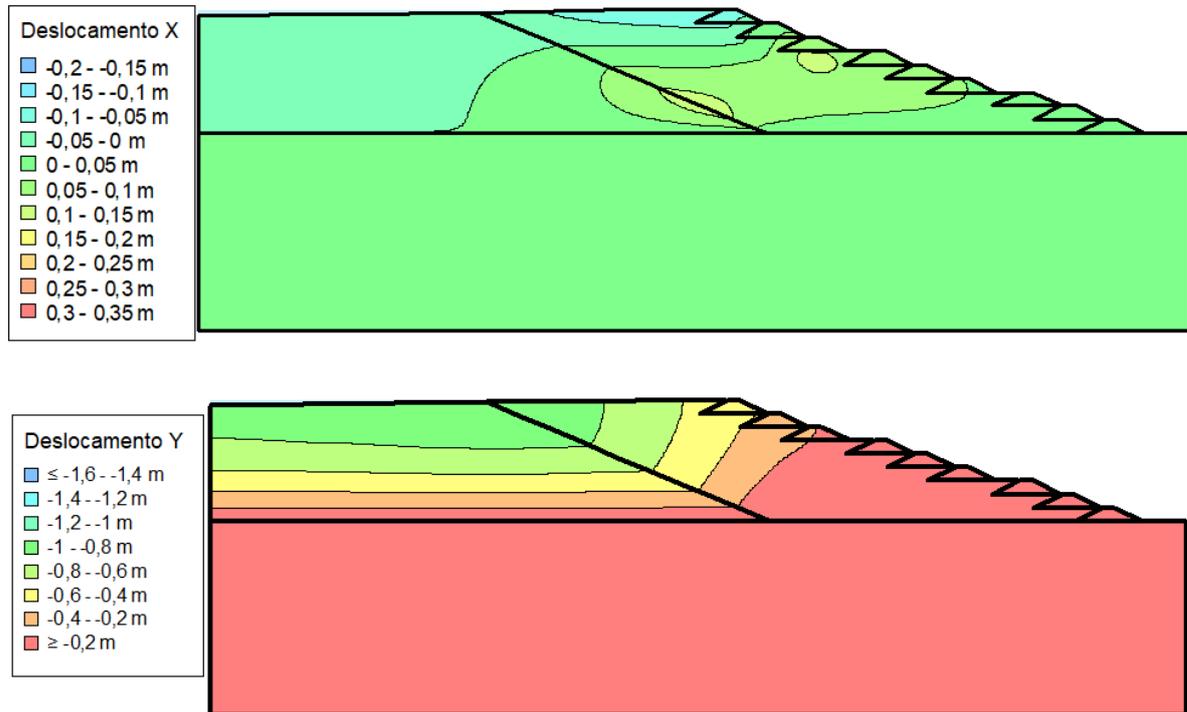
Fonte: os autores.

Figura 45: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 8 alteamentos.



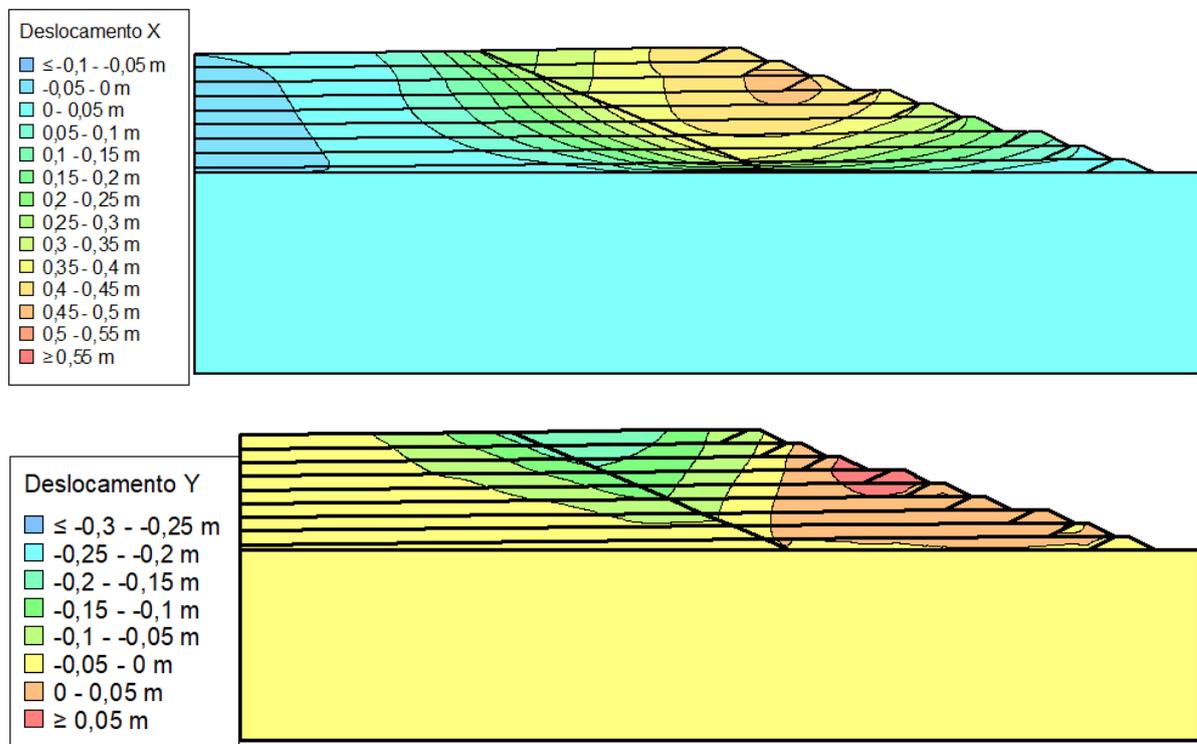
Fonte: os autores.

Figura 46: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 8 alteamentos.



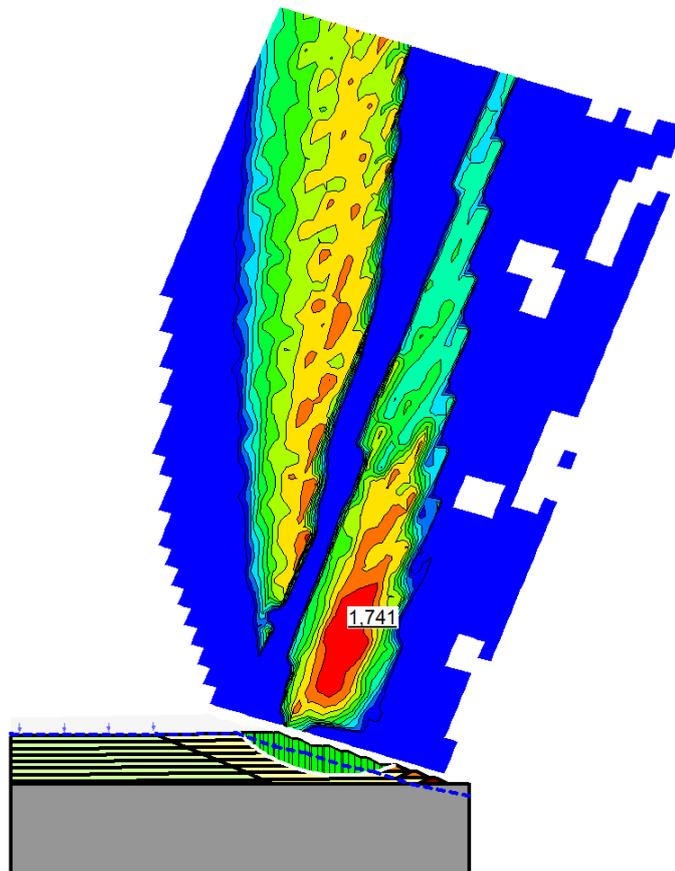
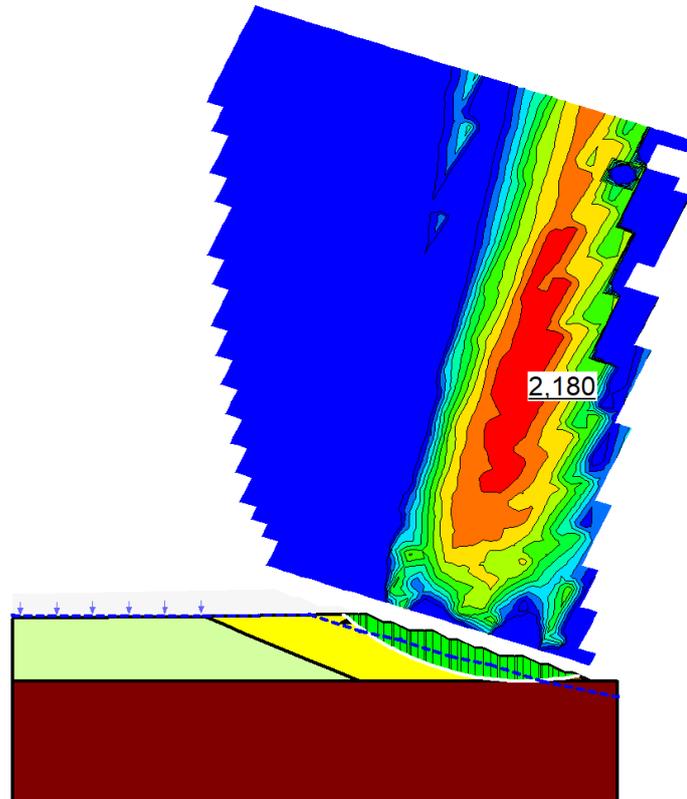
Fonte: os autores.

Figura 47: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição não drenada para 8 alteamentos.



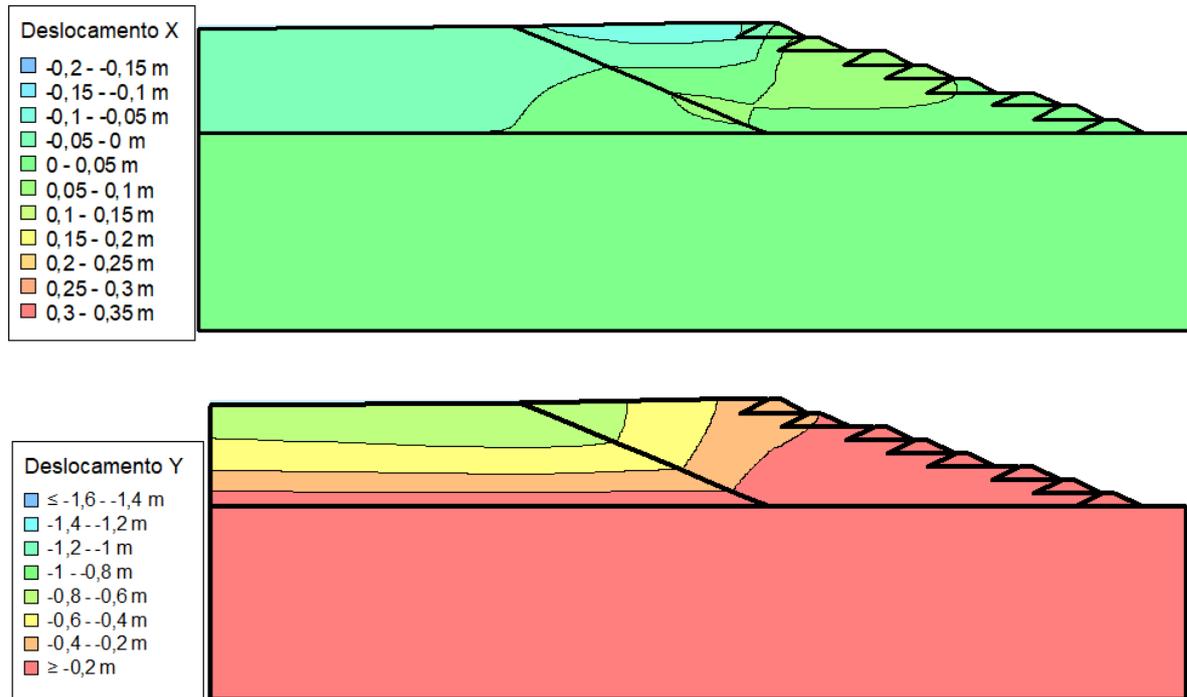
Fonte: os autores.

Figura 48: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 7 alteamentos.



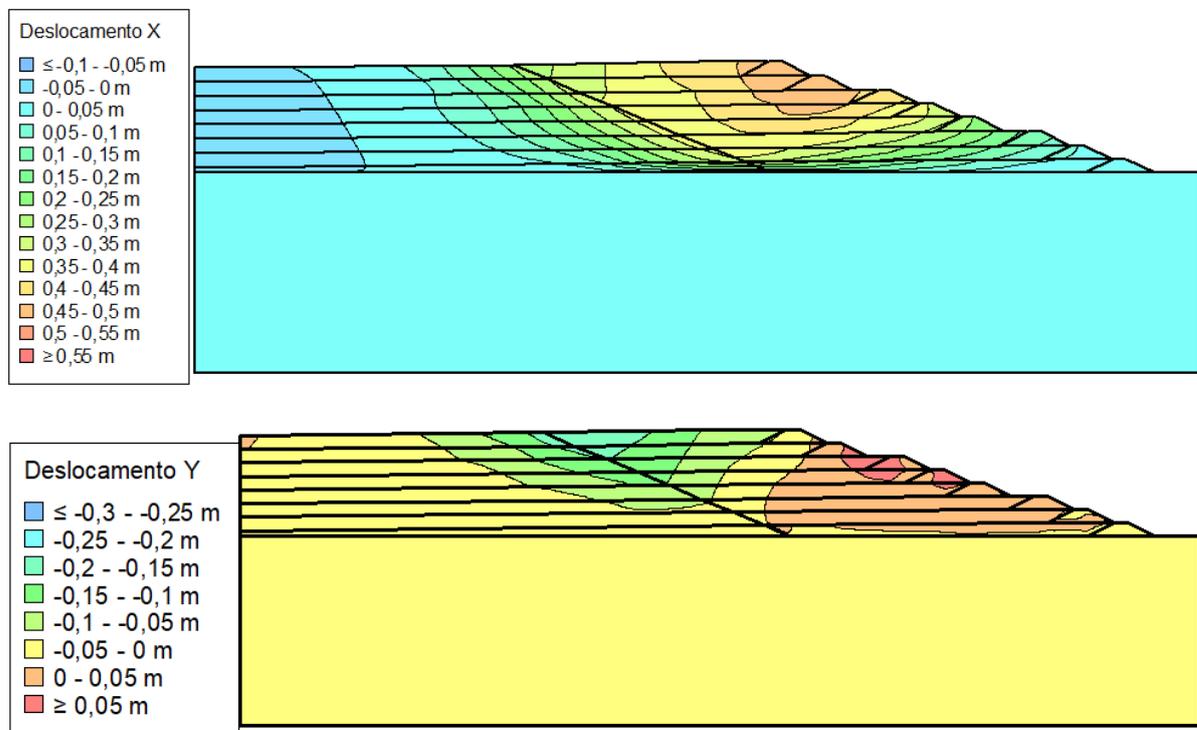
Fonte: os autores.

Figura 49: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 7 alteamentos.



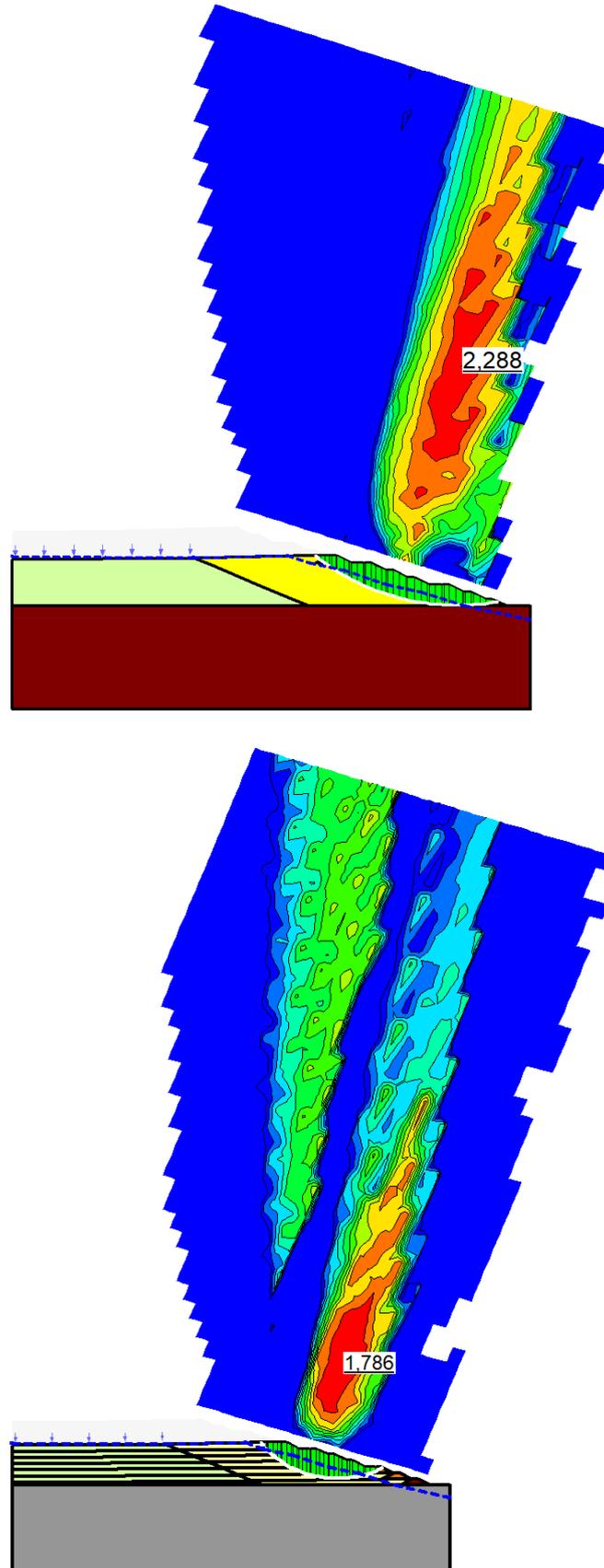
Fonte: os autores.

Figura 50: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 7 alteamentos.



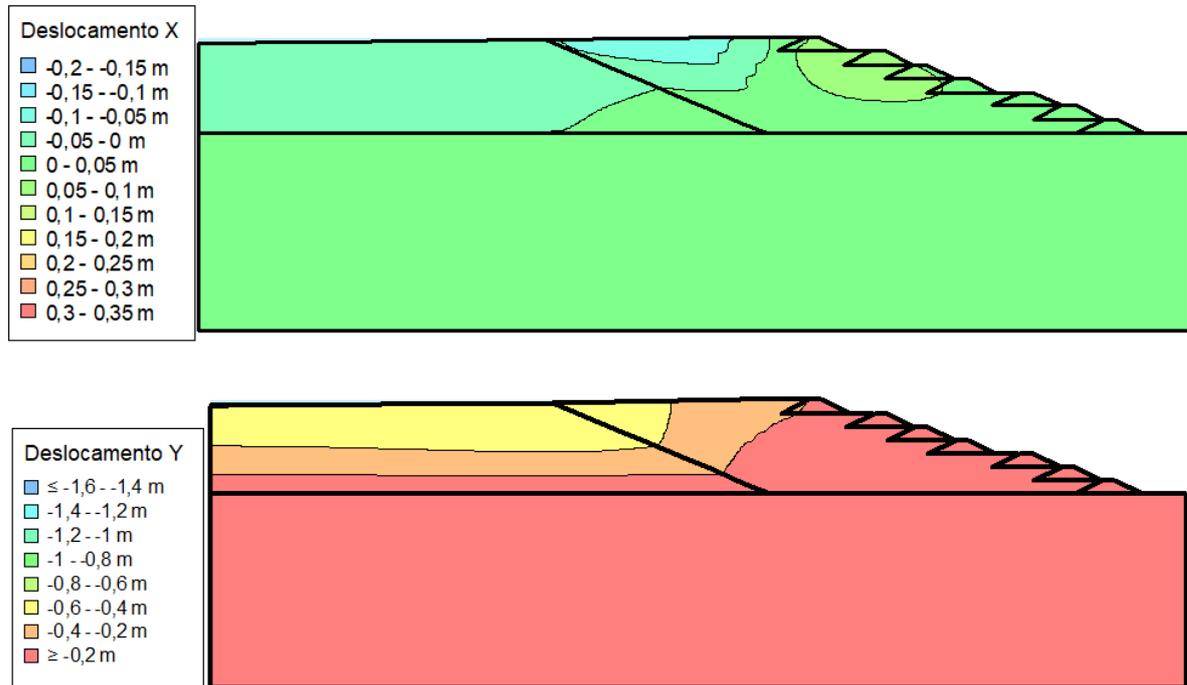
Fonte: os autores.

Figura 51: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 6 alteamentos.



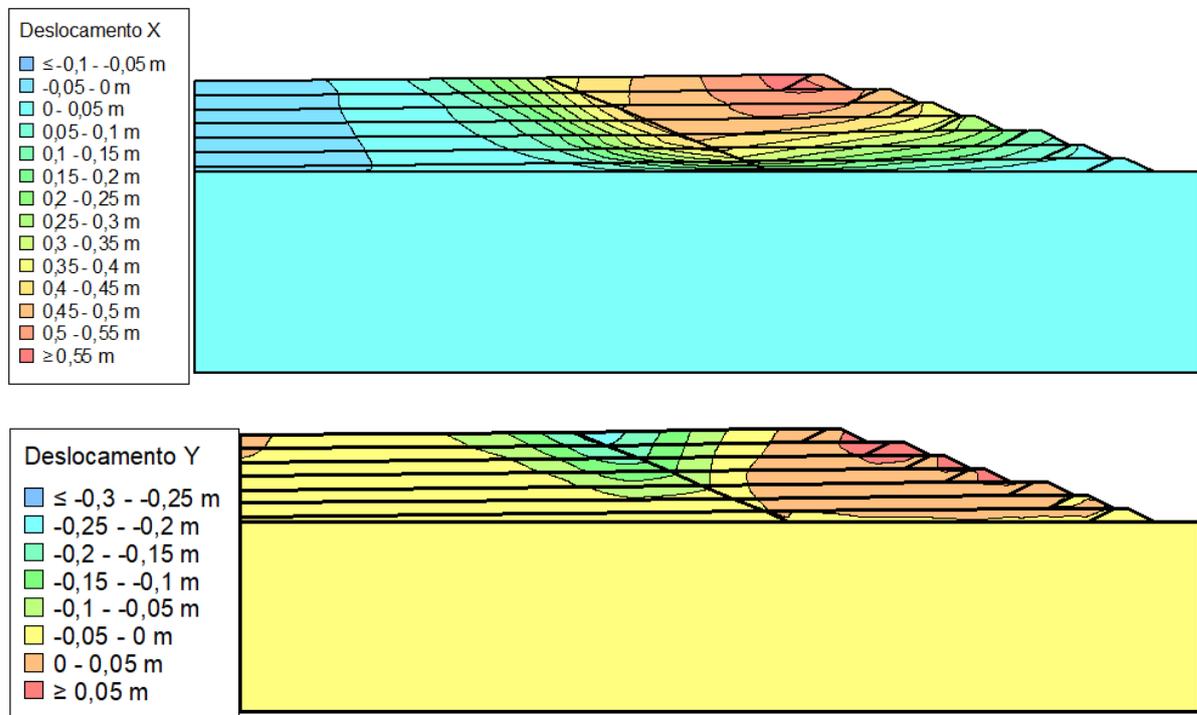
Fonte: os autores.

Figura 52: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 6 alteamentos.



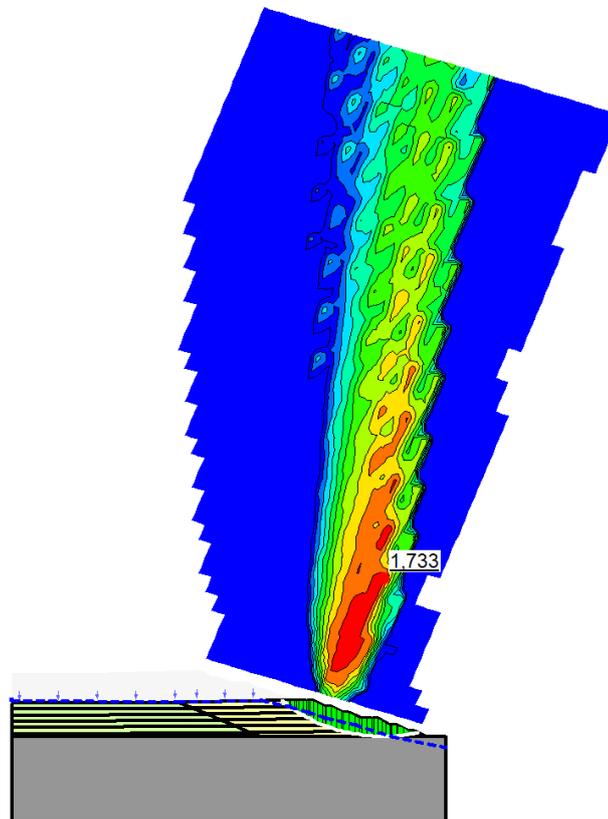
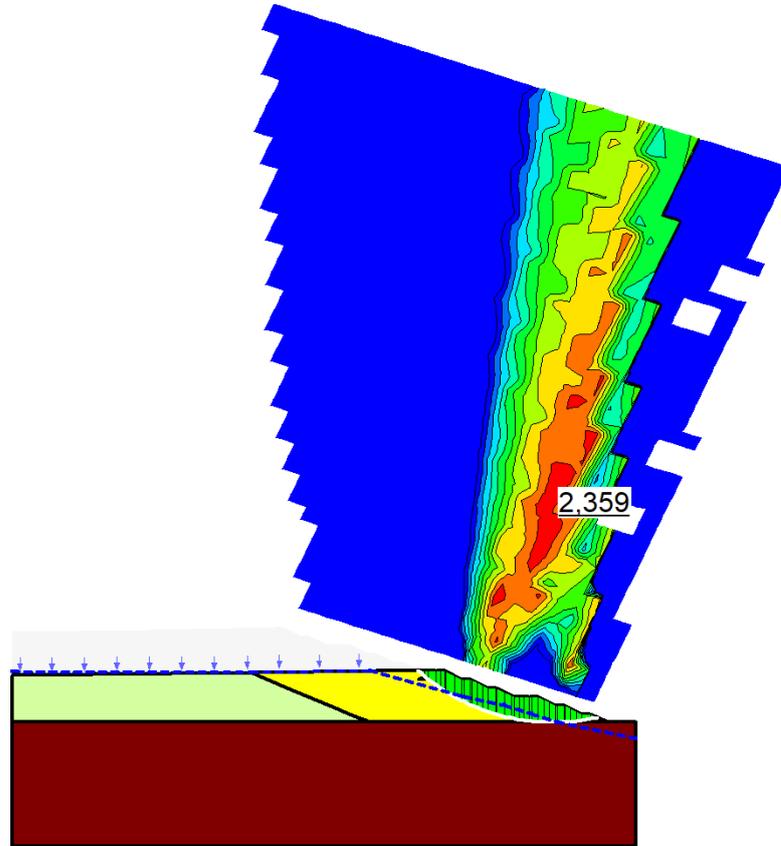
Fonte: os autores.

Figura 53: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 6 alteamentos.



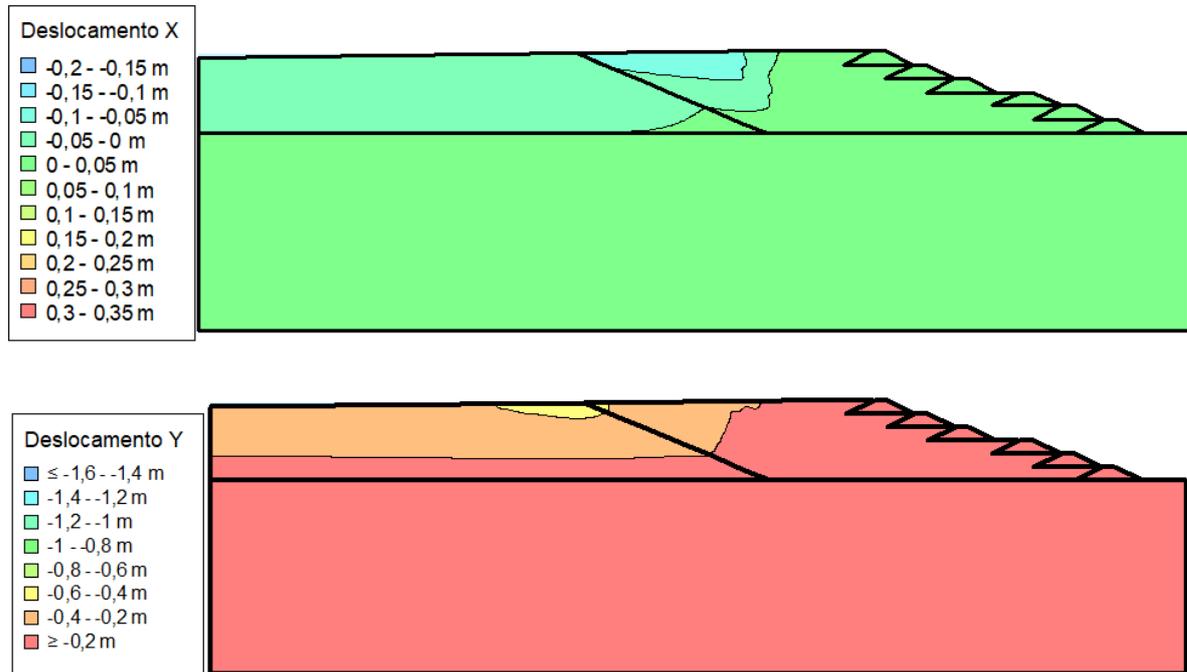
Fonte: os autores.

Figura 54: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 5 alteamentos.



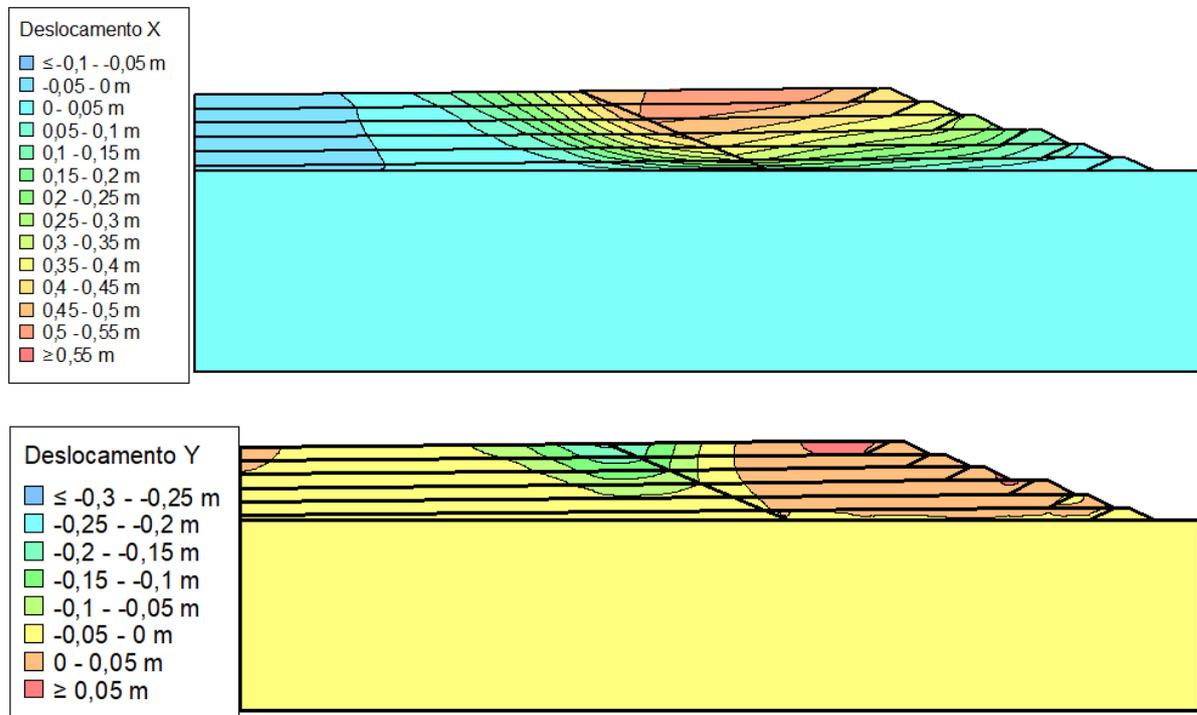
Fonte: os autores.

Figura 55: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 5 alteamentos.



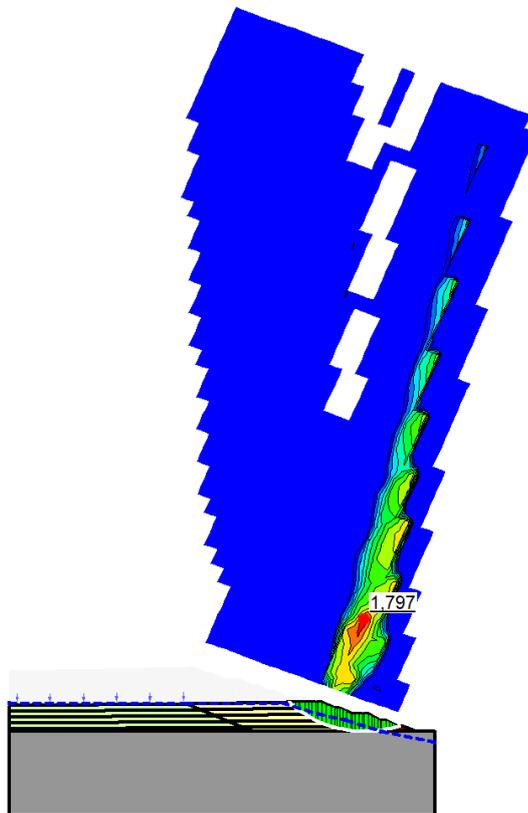
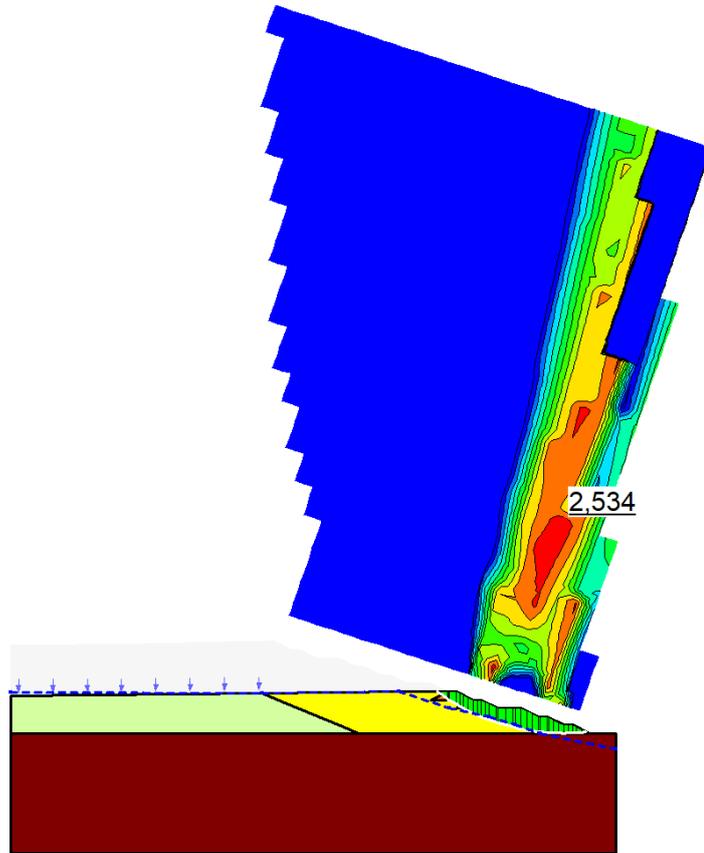
Fonte: os autores.

Figura 56: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição não drenada para 5 alteamentos.



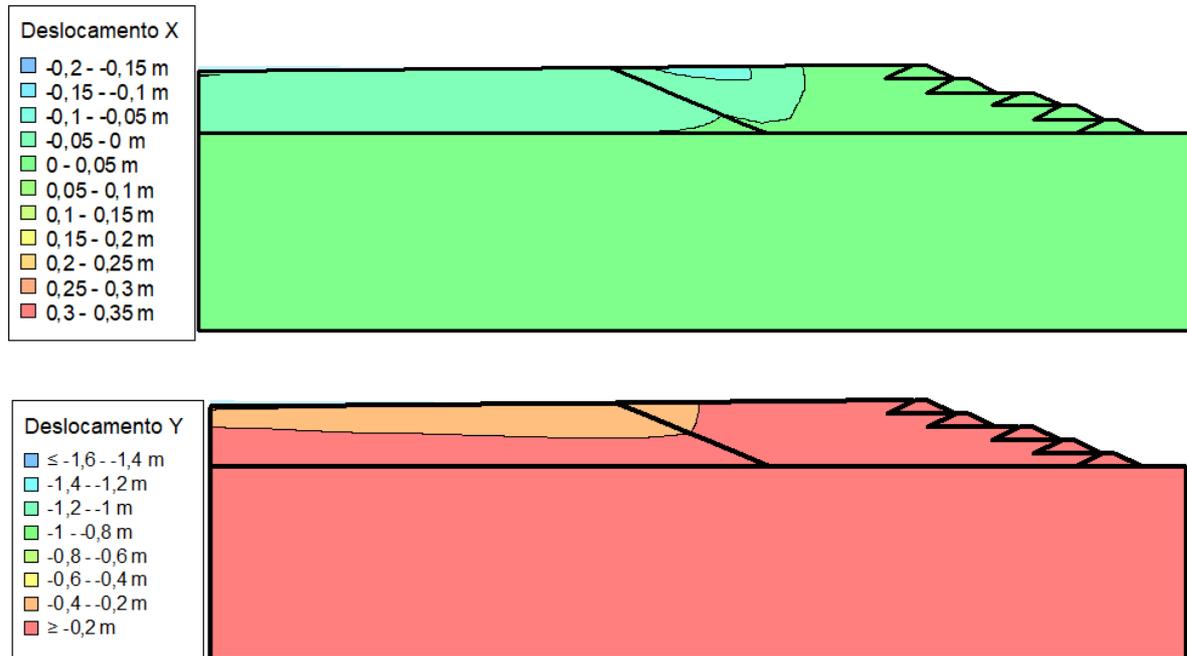
Fonte: os autores.

Figura 57: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 4 alteamentos.



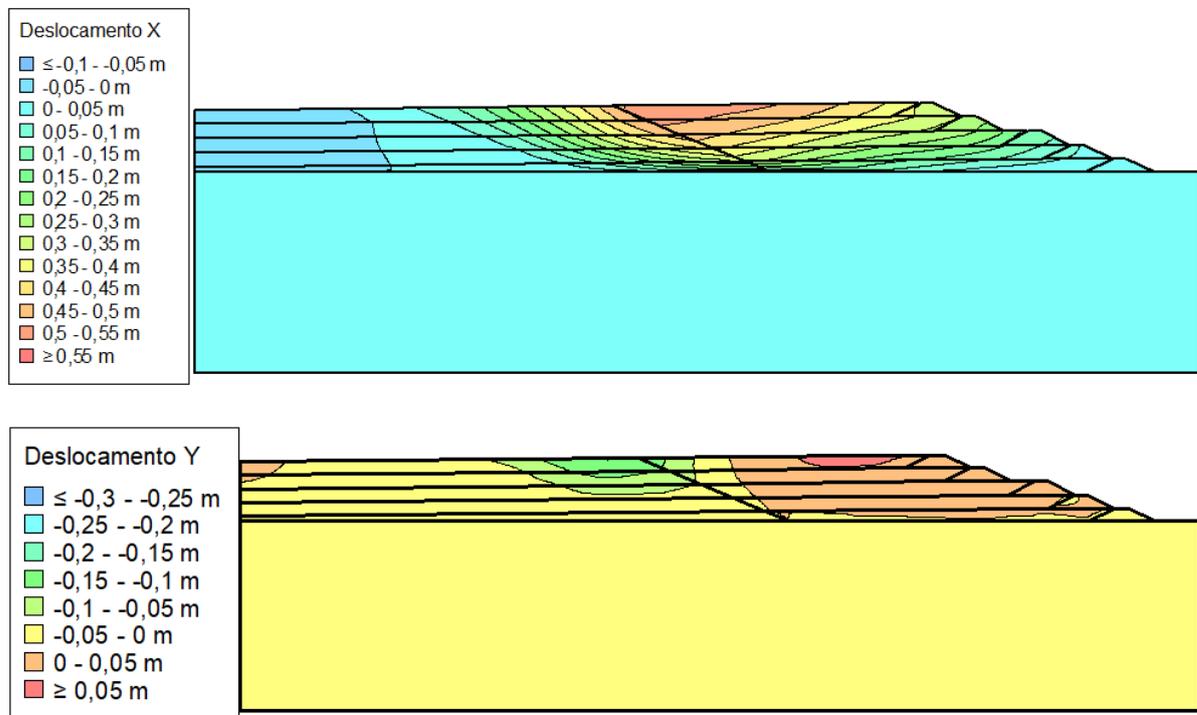
Fonte: os autores.

Figura 58: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 4 alteamentos.



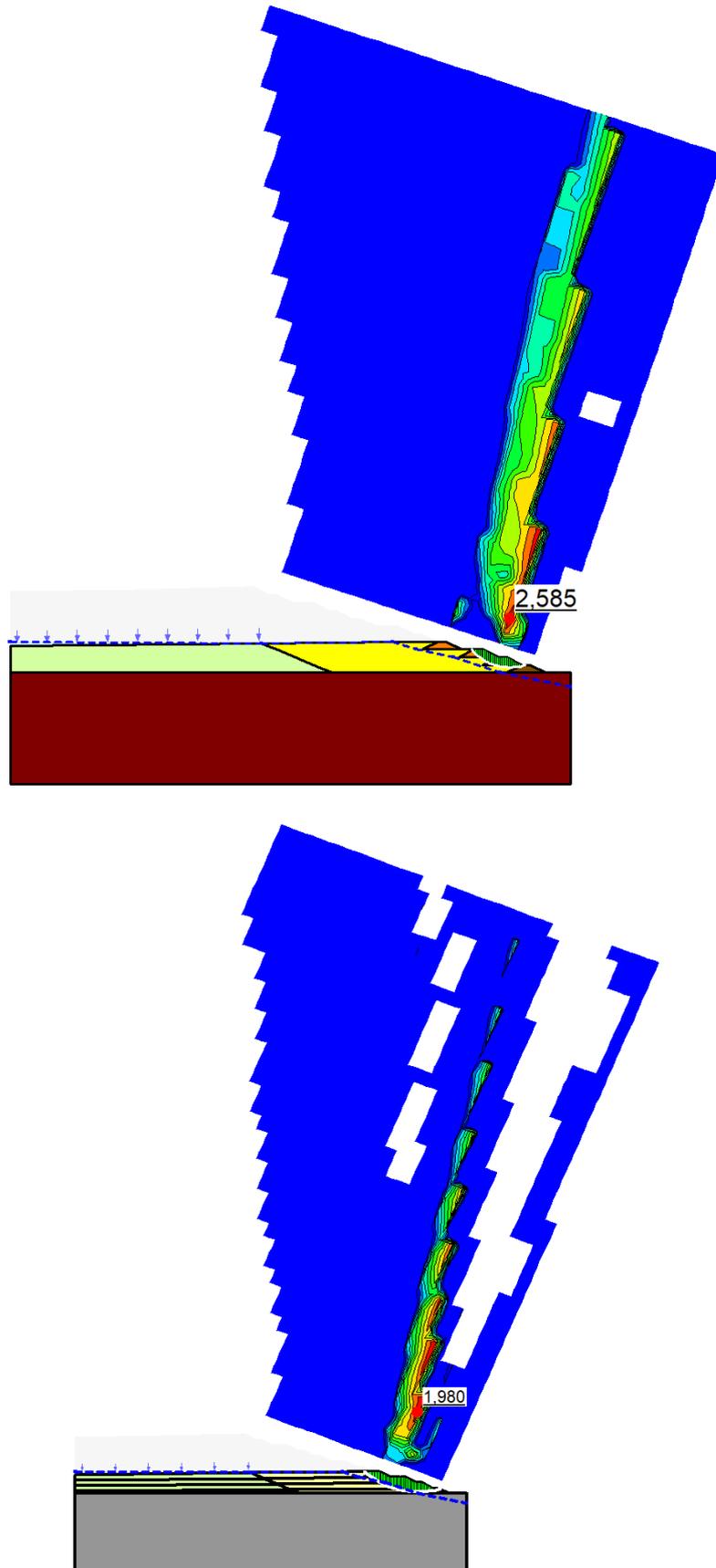
Fonte: os autores.

Figura 59: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 4 alteamentos.



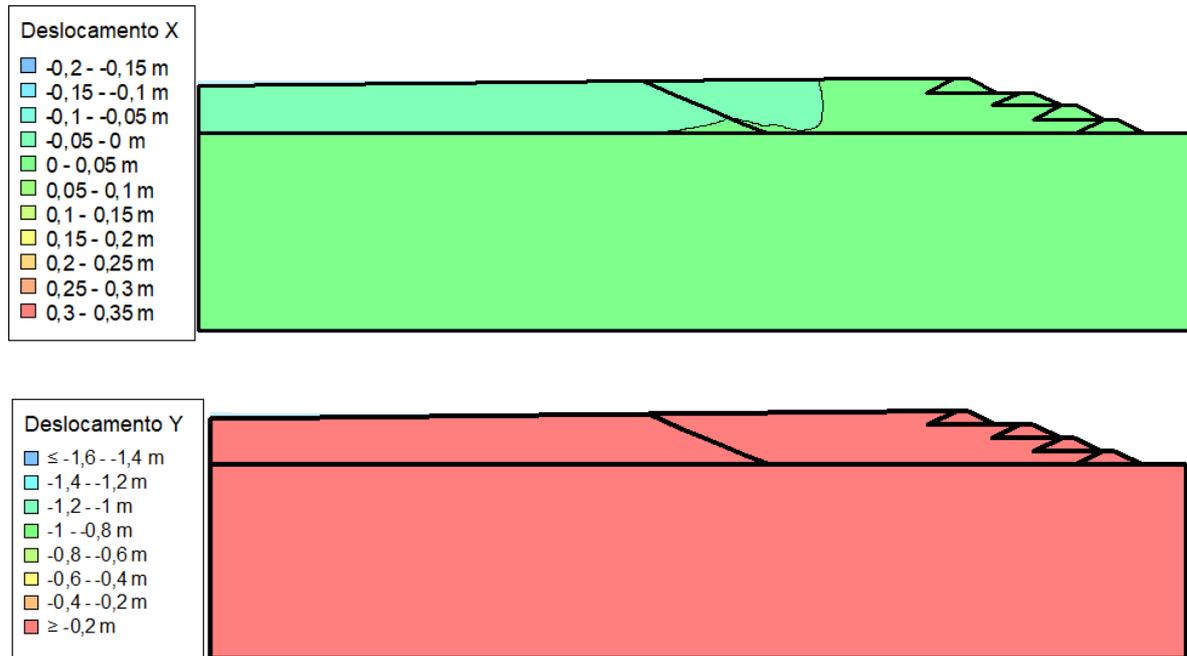
Fonte: os autores.

Figura 60: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 3 alteamentos.



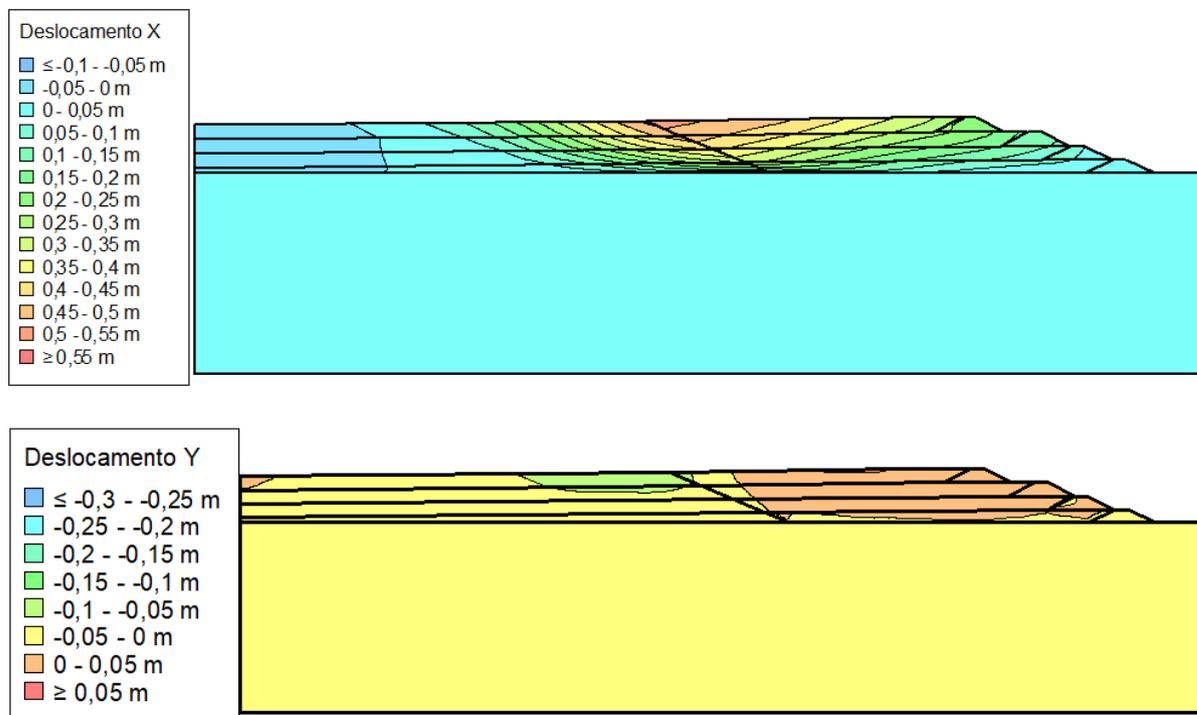
Fonte: os autores.

Figura 61: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição drenada para 3 alteamentos.



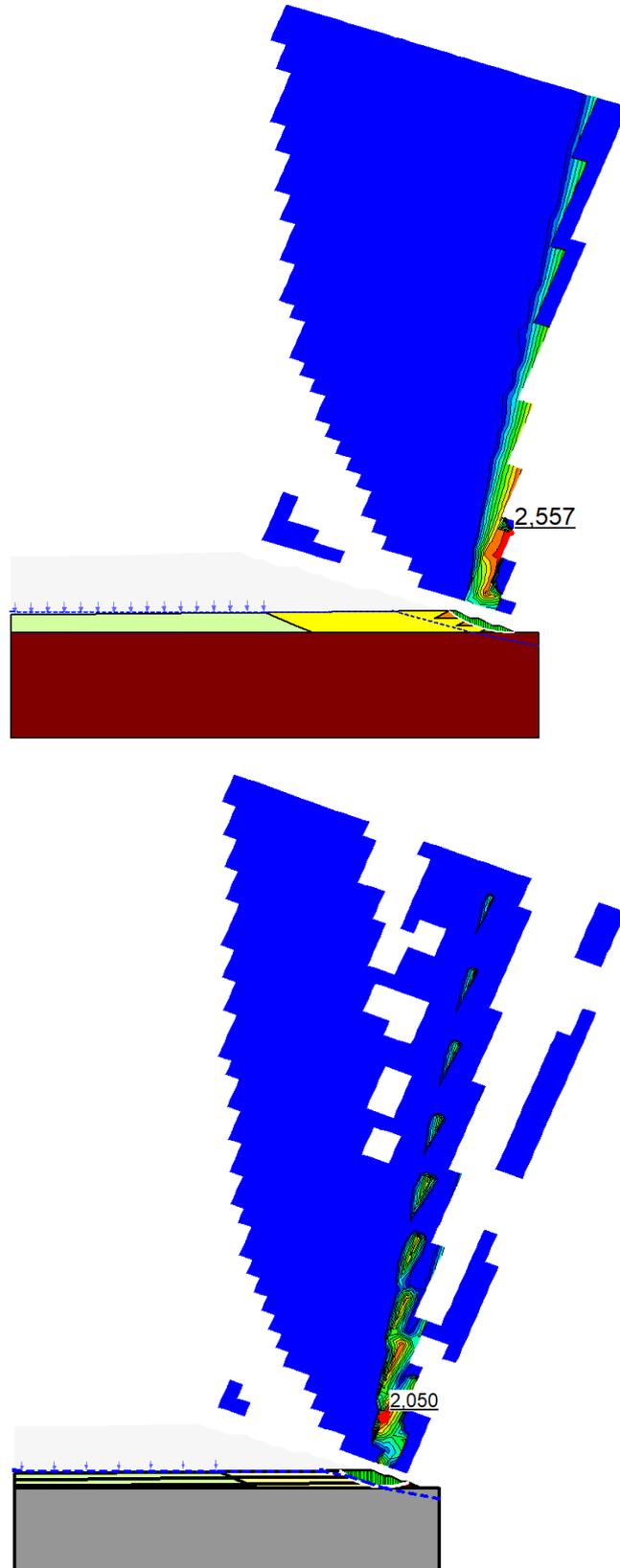
Fonte: os autores.

Figura 62: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) na condição não drenada para 3 alteamentos.



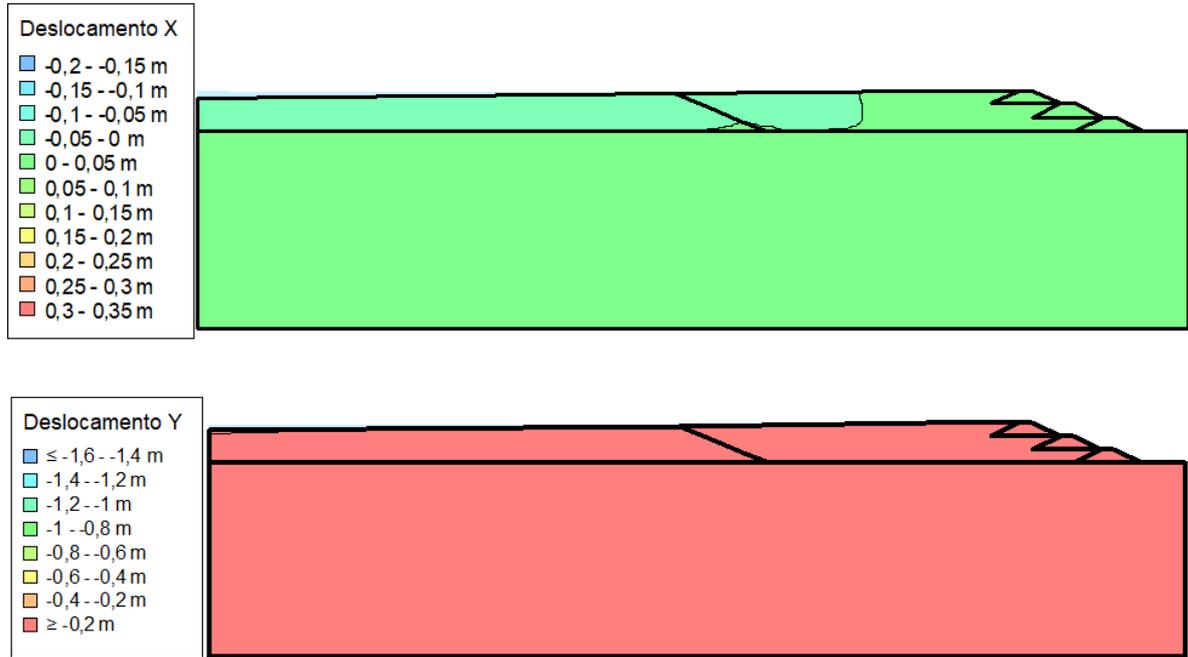
Fonte: os autores.

Figura 63: Análise de estabilidade na condição drenada (a) e não drenada (b) para 2 alteamentos.



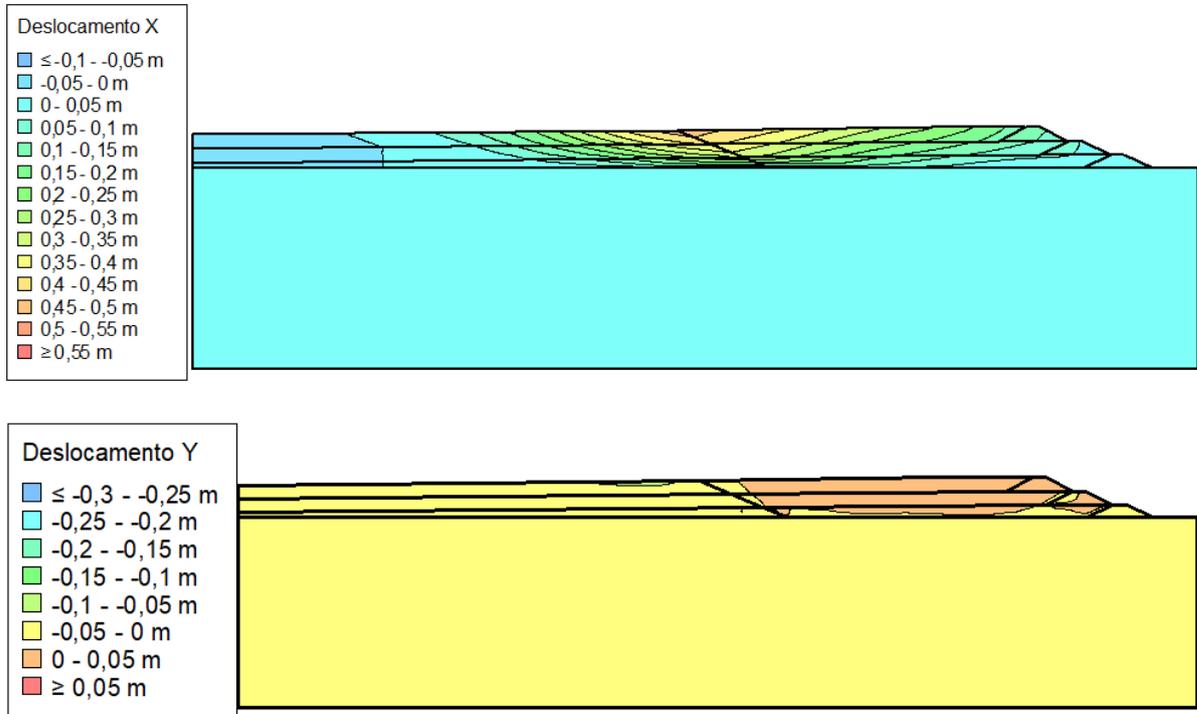
Fonte: os autores.

Figura 64: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 2 alteamentos.



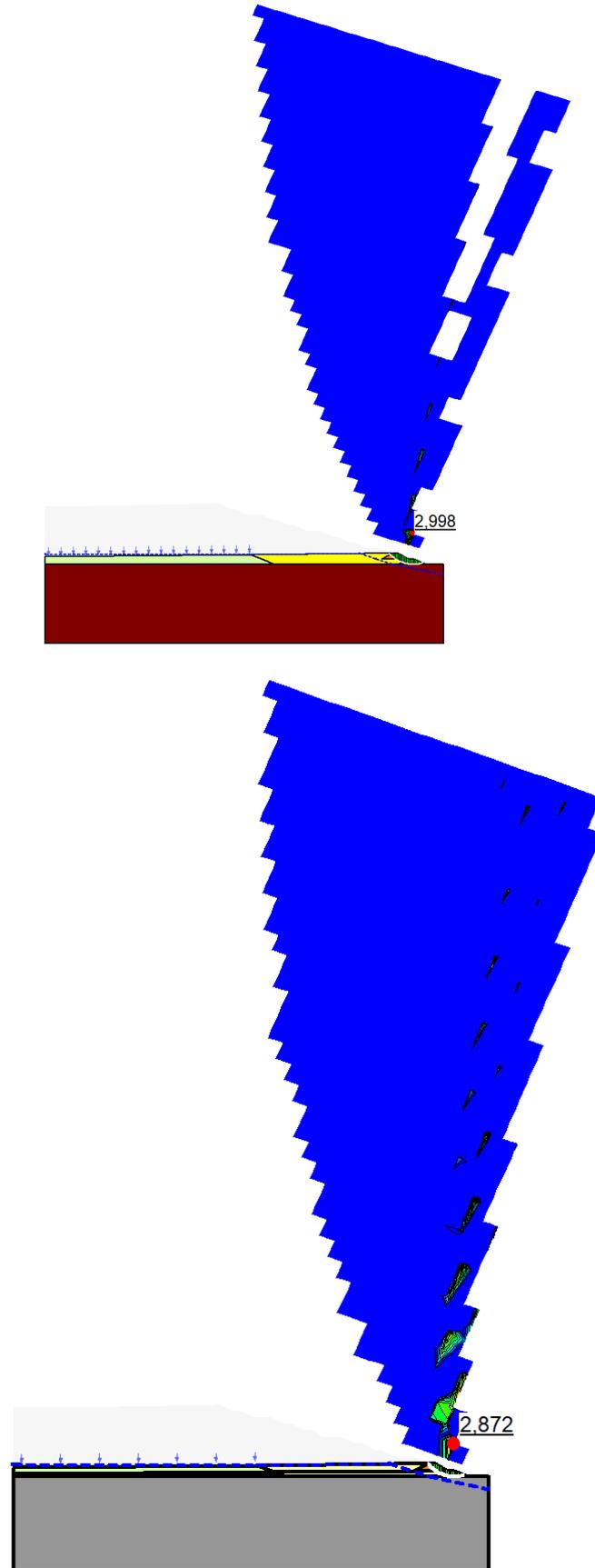
Fonte: os autores.

Figura 65: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 2 alteamentos.



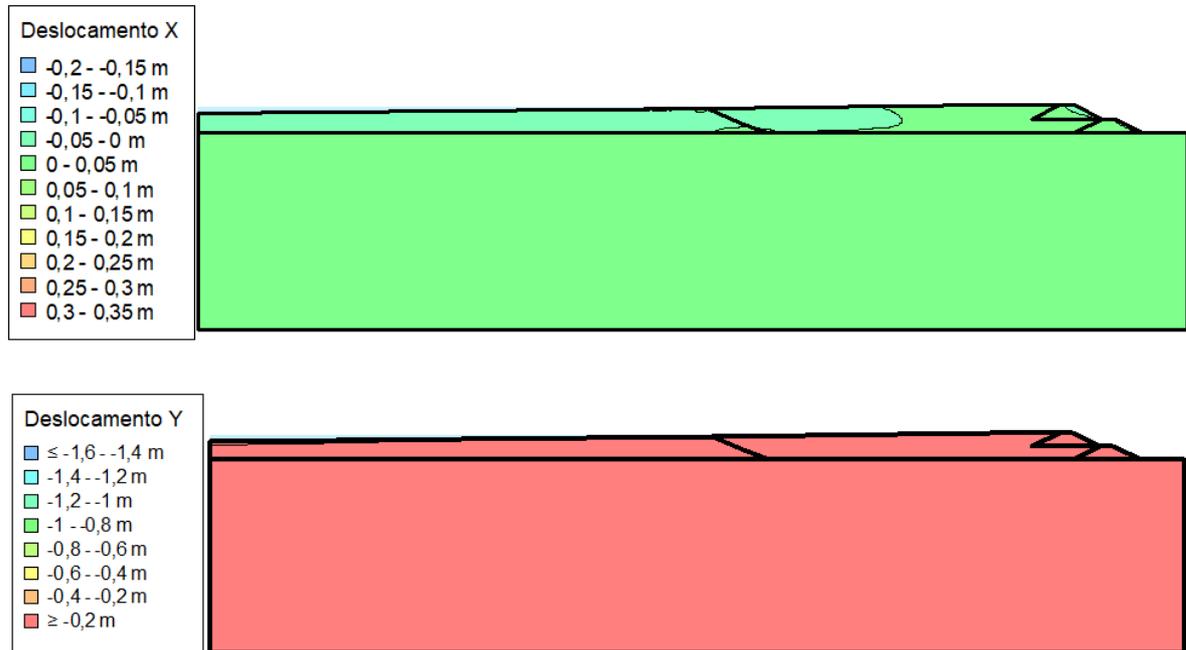
Fonte: os autores.

Figura 66: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para 1 alteamento.



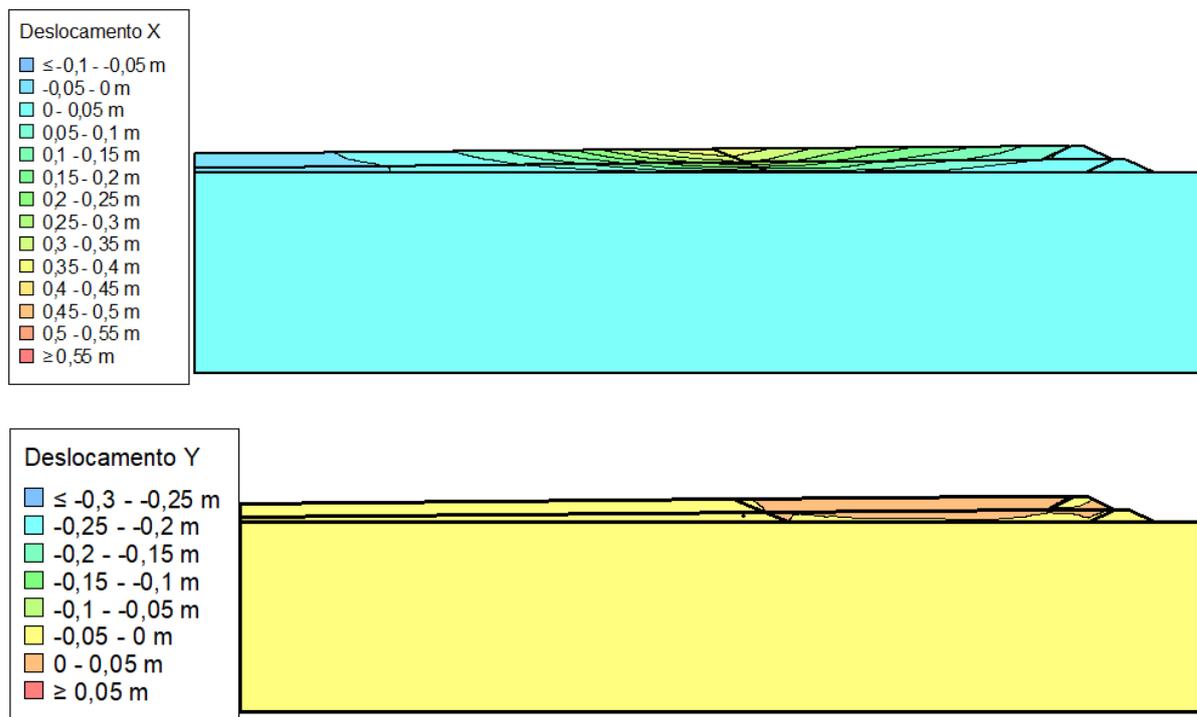
Fonte: os autores.

Figura 67: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para 1 alteamento.



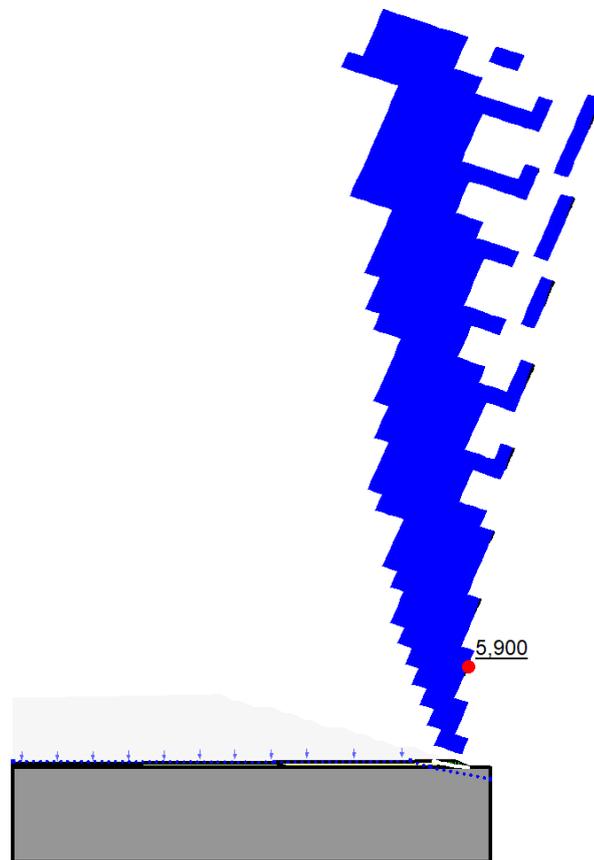
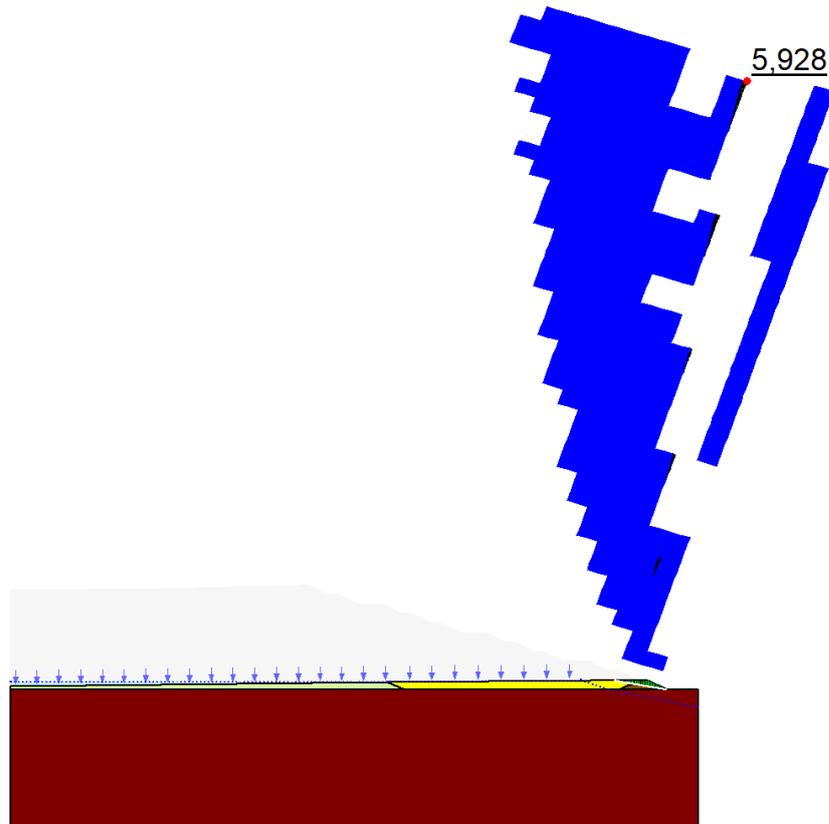
Fonte: os autores.

Figura 68: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para 1 alteamento.



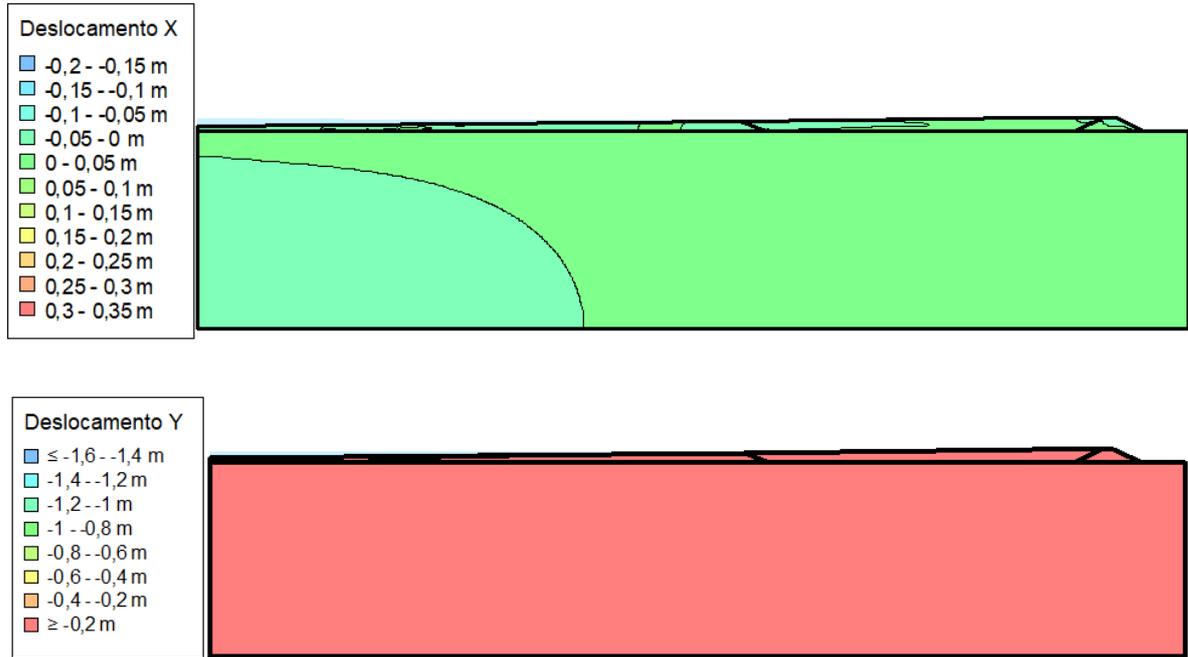
Fonte: os autores.

Figura 69: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para o dique de partida.



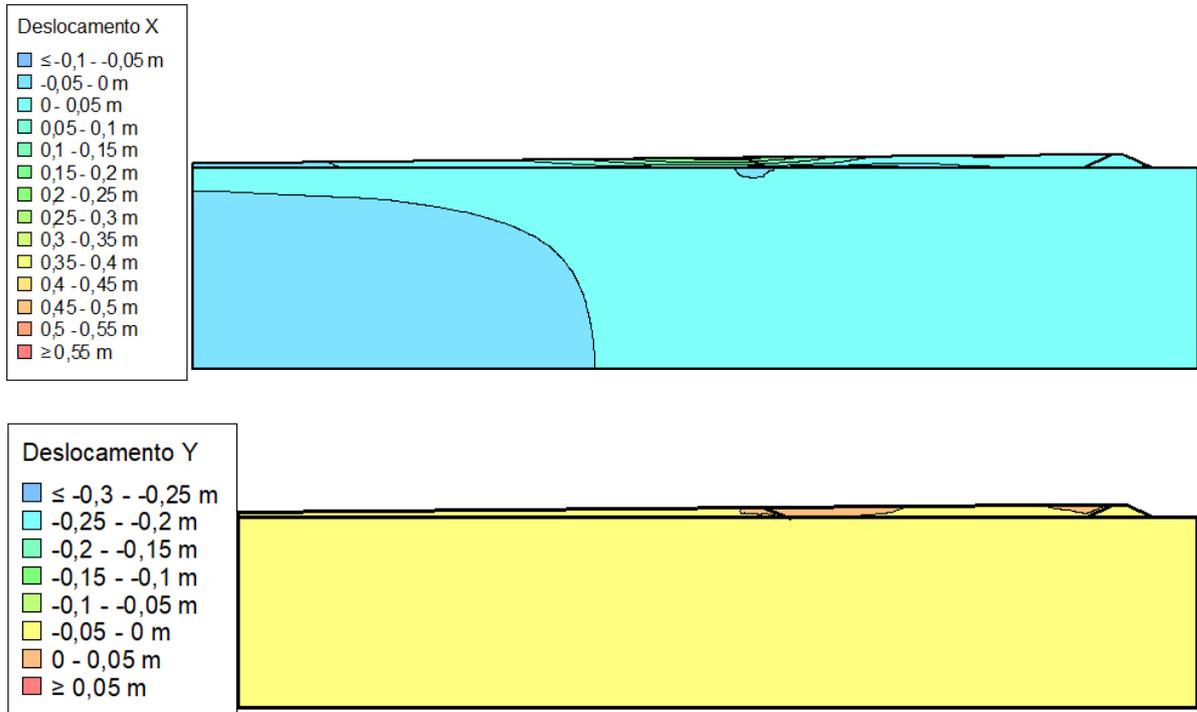
Fonte: os autores.

Figura 70: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para o dique de partida.



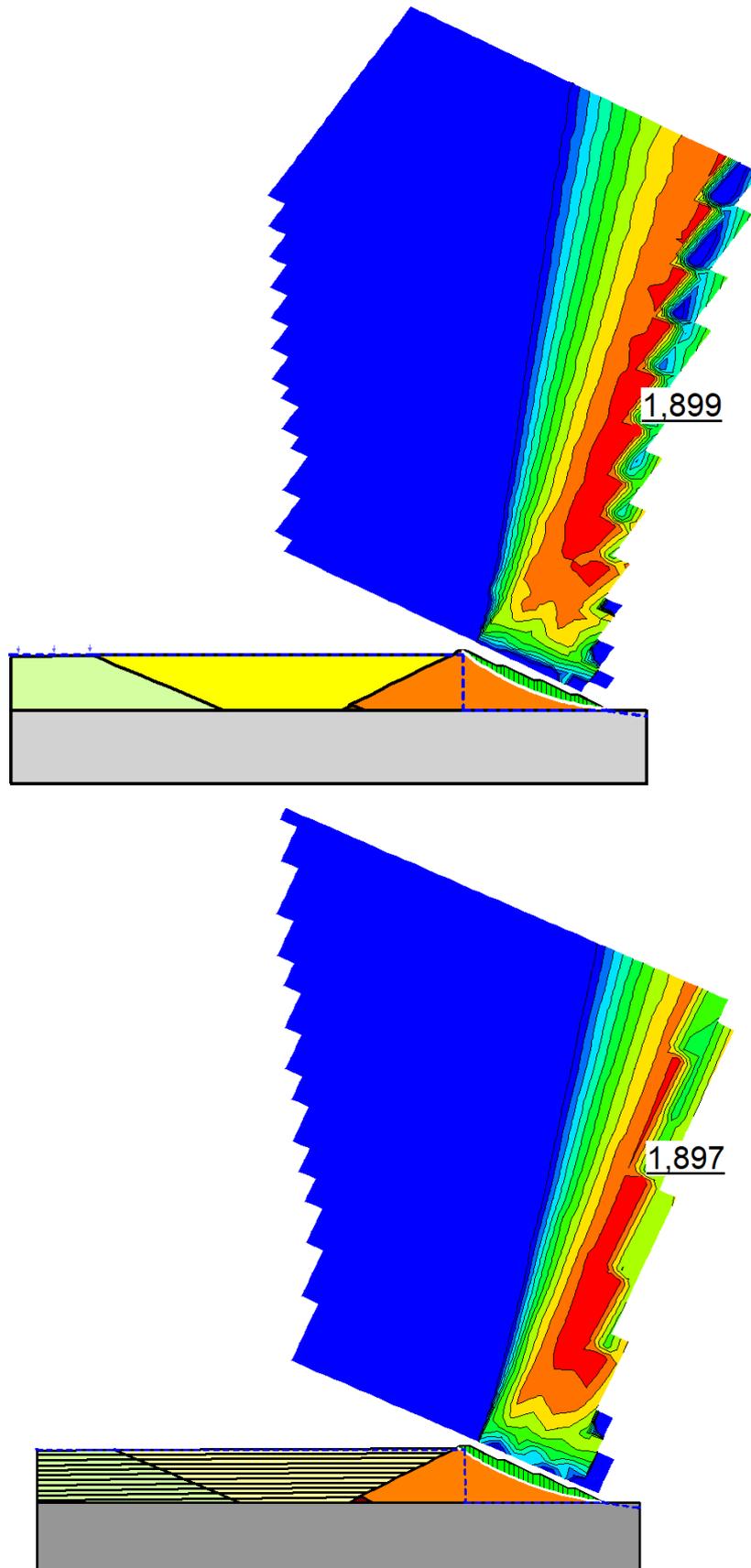
Fonte: os autores.

Figura 71: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada do dique de partida.



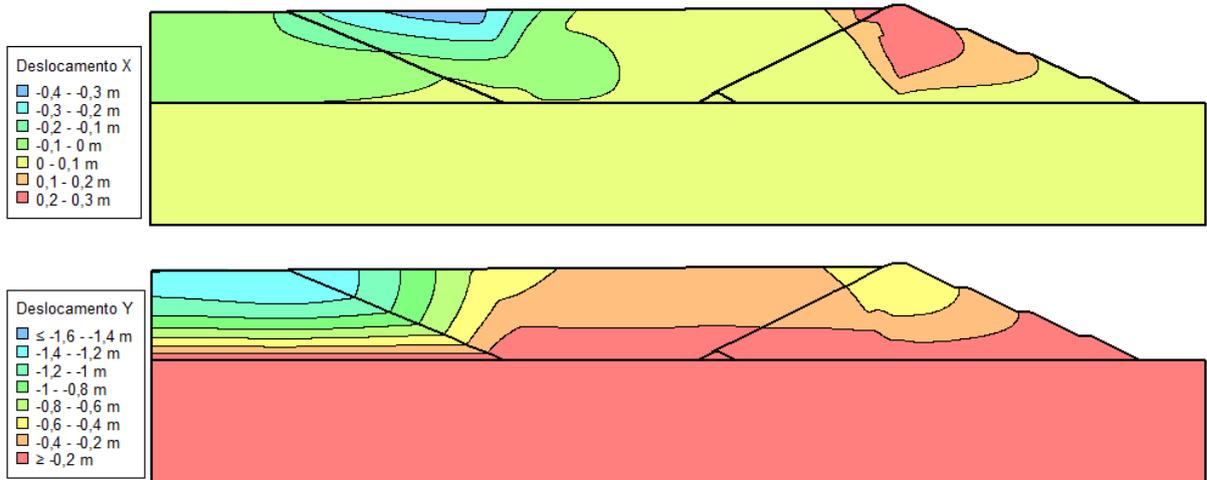
Fonte: os autores.

Figura 72: Análise de estabilidade para condição drenada (a) e não drenada (b) para alteração para jusante.



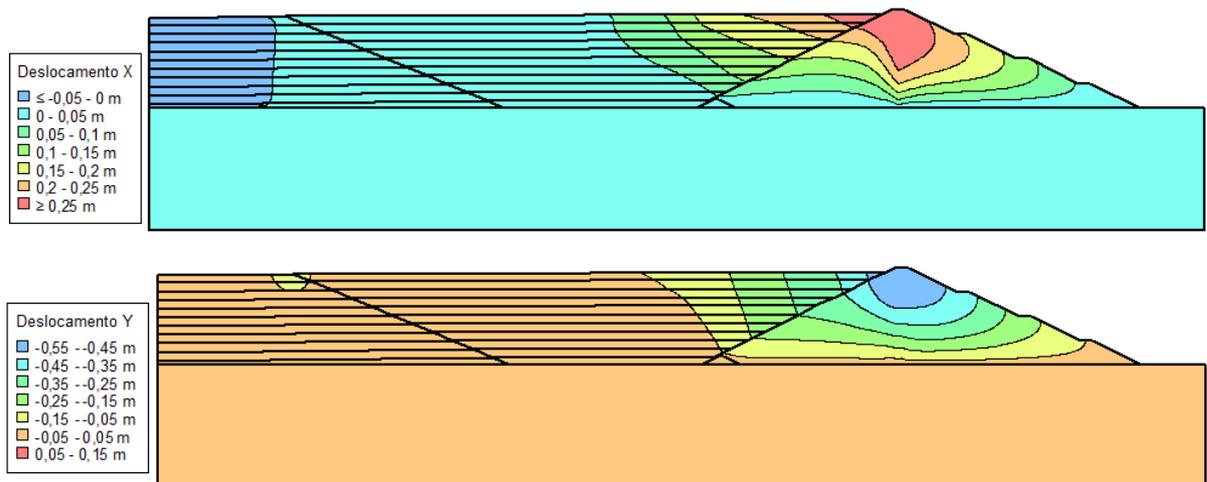
Fonte: os autores.

Figura 73: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição drenada para alteração para jusante.



Fonte: os autores.

Figura 74: Deslocamento horizontal (a) e vertical (b) para condição não drenada para alteração para jusante.



Fonte: os autores.