

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ANÁLISE PRELIMINAR DE UM DIQUE DE PARTIDA DE UMA BARRAGEM DE
REJEITO DE BAUXITA

MARIANA DRUMMOND FERREIRA CONTE SENNA

2020



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE PRELIMINAR DE UM DIQUE DE PARTIDA DE UMA BARRAGEM DE REJEITO DE BAUXITA

MARIANA DRUMMOND FERREIRA CONTE SENNA

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Maria Cascão Ferreira de Almeida

RIO DE JANEIRO

Março de 2020

ANÁLISE PRELIMINAR DE UM DIQUE DE PARTIDA DE UMA BARRAGEM DE
REJEITO DE BAUXITA

Mariana Drummond Ferreira Conte Senna

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA, UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof^a. Maria Cascão Ferreira de Almeida, DSc

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, DSc

Syedhamed Mirmoradi, DSc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2020

Senna, Mariana Drummond Ferreira Conte

Análise Preliminar De Um Dique De Partida De Uma Barragem
De Rejeito De Bauxita / Mariana Drummond Ferreira Conte
Senna – Rio de Janeiro: UFRJ /Escola politécnica, 2020.
xiv, 64 p.:il.: 29,7cm

Orientadora: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso
de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 59-61

1. Introdução 2. Fundamentos Básicos 3. Estudo de Caso
4. Conclusões e Sugestões I. Almeida, Maria Cascão
Ferreira II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola Politécnica, Curso Engenharia Civil III. Título

*Qual a sua responsabilidade na
desordem a qual você se queixa?*
- Freud

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ana Luisa Senna e Marcos Senna por ensinarem o verdadeiro significado de família, sendo fonte de amor incondicional, carinho e suporte. Sem vocês eu não seria nada.

A minha avó Celeste Drummond, a minha tia avó Aparecida Drummond, aos meus tios e primo, Ana Paula Drummond, Alexandre Lima e Rafael Drummond, pela torcida constante e por saberem compreender os momentos de ausência.

A minha orientadora, professora Maria Cascão, por embarcar nessa aventura em tão pouco tempo e pelo conhecimento transmitido não só nas salas da aula, mas principalmente fora dela.

A todos os professores, do colégio e da UFRJ, que fizeram parte dessa jornada e que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente com o meu crescimento. Estendo os agradecimentos ao professor Gilberto Ellwanger e ao DSc Seyedhamed Mirmoradi presentes nessa banca.

Agradeço também aos alunos de pesquisa do laboratório de Geotecnia da COPPE, que auxiliaram incansavelmente com o programa PLAXIS 2D.

Aos amigos, Felipe Costa, Jeison Santos e Marcella Lorena pelos inúmeros momentos divididos ao longo desses anos.

Às amigas, Ianne Camargo e Luanne Ivo, que se juntaram a essa aventura quase no final, mas que sem o apoio nada disso seria possível.

Aos amigos, André Mello e Guilherme Messeder, por compartilharem as muitas sextas, sábados e domingos de trabalho sem perder o entusiasmo.

A toda equipe Geomecânica por tornarem-se uma segunda família nesses dois anos e me apresentarem um ambiente de trabalho sem igual. Em especial, a Angèle Dutra e Arnaldo Muxfeldt, pela oportunidade e por todo o aprendizado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil

ANÁLISE PRELIMINAR DE UM DIQUE DE PARTIDA DE UMA BARRAGEM DE REJEITO DE BAUXITA

Mariana Drummond Ferreira Conte Senna

Março de 2020

Orientadora: Maria Cascão Ferreira de Almeida

As reservas de bauxita foram inicialmente encontradas na região Sul da França, porém atualmente podem ser encontradas em diversas regiões tropicais e subtropicais. O Brasil destaca-se pelos seus enormes depósitos de bauxita de elevada qualidade encontradas em camadas extensas e superficiais. A mineração tem crescido no país e a visão dos empresários prioritariamente nos lucros vem aumentando. A negligência das grandes empresas mineradoras e dos órgãos governamentais em relação a população e o meio ambiente vem sendo visto ao longo dos anos após os rompimentos das barragens localizadas nas cidades de Mariana e Brumadinho. Esse trabalho pretende dessa forma analisar preliminarmente o comportamento em tensões e deformações do dique de partida de uma barragem de rejeitos de minério de bauxita. Por simplificação, foi apenas analisado um único cenário caracterizando a condição de final de construção, estando o reservatório completamente cheio e o aterro compactado. A análise numérica foi elaborada com o auxílio do *software* PLAXIS 2D por meio do método dos elementos finitos. Dois modelos constitutivos (Mohr Coulomb e *Hardening Soil*) foram considerados para a representação dos materiais.

Palavras-chave: barragem; bauxita; análise numérica; PLAXIS 2D; tensão-deformação

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Engineer

PRELIMINARY ANALYSES OF A DIKE FROM A BAUXITE TAILING DAM

Mariana Drummond Ferreira Conte Senna

March 2020

Advisor: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Initial bauxite reserves were located at the South region of France. Currently they can be seen at different tropical and subtropical regions. Brazil detach in this scenario with huge and superficial high-quality bauxite deposits layers. Mining activity has grown in the country; however, the only interest of the great entrepreneurs is in the profits. After Mariana and Brumadinho accidents, it is possible to see negligence from then and from the governmental entities with local population and environment. This work's main purpose is to preliminary analyses strain-stress behavior of a dike from a bauxite-tailing dam. It was only considered one scenario, which represents the final conditional of the reservoir. Numerical analyses were formulated with PLAXIS 2D software based in Finite Elements Method (FEM). Two different constitutive models (Mohr Coulomb e Hardening Soil) were considered to represent the different materials.

Keywords: tailing dam; bauxite; numerical analyses; PLAXIS 2D; stress-strain.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil típico de um subsolo no Brasil para exploração de bauxita (PUC RIO, CERTIFICADO DIGITAL 9824854/CA).....	12
Figura 2 – Representação do método de alteamento a montante (VALERIUS, 2014)..	20
Figura 3 - Representação do método de alteamento a linha de centro (VALERIUS, 2014).....	20
Figura 4 - Representação do método de alteamento jusante (VALERIUS, 2014).....	21
Figura 5 – Comportamento das funções de forma no domínio (PUC RIO, CERTIFICADO DIGITAL 0410284/CA).....	22
Figura 6 – Comportamento perfeitamente elasto-plástico (Brady, 2018)	29
Figura 7 – Representação dos três diferentes módulos de deformabilidade.....	31
Figura 8 – Perfil típico da seção do dique da barragem em estudo	45
Figura 9 – Representação das condições de contorno na base e na lateral da estrutura .	46
Figura 10 – Estrutura discretizada em elementos médios e malha refinada áreas de interesse.	47
Figura 11 – Identificação do Ponto A em estudo na crista da barragem.	48
Figura 12 – Campo de deslocamentos resultantes na direção horizontal	51
Figura 13 - Campo de deslocamentos resultantes na direção vertical.....	51
Figura 14 - Campo de deslocamentos resultantes	52
Figura 15 - Campo das tensões efetivas resultantes na direção horizontal	53
Figura 16- Campo das tensões efetivas resultantes na direção vertical.....	53
Figura 17 – Representação do cenário final pela modelagem	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos do material de fundação.....	40
Tabela 2 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos do material estéril	41
Tabela 3 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos do material estéril compactado .	43
Tabela 4 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos para o rejeito de bauxita.....	45
Tabela 5 – Dados de entrada da análise propsta.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

c_c	Coeficiente de Compressibilidade
c_s	<i>Swelling Index</i>
c'	Coesão Efetiva
δ	Deslocamento Resultante
e_o	Índice de Vazios Iniciais
ε^e	Deformação Resultante Elástica
ε^p	Deformação Resultante Plástica
ε	Deformação Resultante
E	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
E_{50}^{ref}	Módulo de Rigidez de Referência Devido à Tensão Desviadora Inicial
E_{oed}^{ref}	Módulo de Rigidez de Referência Devido à Compressão Inicial
E_{ur}^{ref}	Módulo de Rigidez de Referência Devido ao Carregamento e Descarregamento
Φ'	Ângulo de Atrito Efetivo
G	Módulo Cisalhante
K_o^{nc}	Coeficiente de Repouso na Condição Normalmente Adensada
κ^*	Índice de Compressão Modificado
λ^*	Índice de Descompressão Modificado
p^{ref}	Tensão de Referência
R_f	Razão de Ruptura
σ'_c	Tensão Confinante

σ_t	Tensão de Tração
σ	Tensão Normal Resultante
S_u	Resistência Não Drenada
S_u/σ'_c	Razão de Resistência Não Drenada
ψ	Coefficiente de Dilatância
ν	Coefficiente de Poisson
ν_{ur}	Coefficiente de Poisson para Carregamento e Descarregamento
ω_{nat}	Umidade Natural
γ_{nat}	Peso Específico Natural
$[F^e]$	Matriz das Forças Nodais do Elemento
$[K^e]$	Matriz de Rigidez do Elemento
$[N]$	Matriz das Funções de Forma
$[B]$	Matriz da Primeira Derivada das Funções de Forma
$[D]$	Matriz das Propriedades Elásticas

LISTA DE ABREVIATURAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ANM	Agência Nacional de Mineração
DCE	Declaração de Condição de Estabilidade
DNPM	Departamento de Nacional de Produção Mineral
EPD	Estado Plano de Deformações
FS	Fator de Segurança
HS / HSM	<i>Hardening Soil / Hardening Soil Model</i>
ICOLD	<i>Internacional Commission on Large Dams</i>
MC	Mohr Coulomb
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEL	Método do Equilíbrio Limite
NBR	Norma Brasileira
OCR	<i>Overconsolidation Ratio</i>
PTV	Princípio dos Trabalhos Virtuais
RPA	Razão de Pré-adensamento
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	14
1.3	OBJETIVO DO TRABALHO.....	15
1.4	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL.....	16
2	FUNDAMENTOS BÁSICOS.....	18
2.1	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	18
2.2	ANÁLISE TENSÃO-DEFORMAÇÃO	19
2.3	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	22
2.4	COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	24
2.5	ANÁLISE NUMÉRICA.....	28
2.6	PLAXIS 2D	32
2.7	TRABALHOS ANTERIORES	34
3	ESTUDO DE CASO	36
3.1	INTRODUÇÃO.....	36
3.2	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	38
3.3	ANÁLISE NUMÉRICA.....	45
3.4	RESULTADOS	50
3.5	COMENTÁRIOS FINAIS.....	53
4	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	56
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A bauxita não é uma espécie mineralógica definida. Material heterogêneo que ocorre de forma natural na natureza, é uma rocha de concentrações variadas de óxidos de alumínio e impurezas. Geralmente é encontrada na cor vermelha, mas dependendo das concentrações de ferro, pode ser branca, cinza ou amarela. Sob diferentes texturas, tem seu brilho variando de opaco a terroso.

Identificada pela primeira vez na região sul da França, atualmente é encontrada em regiões tropicais e subtropicais, com forte ação de intemperismo. As jazidas de bauxita podem ser encontradas nas formas de mantos, de bolsões, de depósito de detritos resultantes da erosão da bauxita de outros lugares ou entre camadas de solo e rocha. A composição e o comportamento do mineral é fortemente influenciada pela jazida de origem.

As reservas mundiais conhecidas de bauxita agregam aproximadamente 70 bilhões de toneladas (ABAL, 2017). O Brasil ocupa o terceiro lugar em termos de reservas, com grandes depósitos do minério que podem ser encontrados na forma de mantos ou entre camadas de solo e rocha (Figura 1) Localizados predominantemente nos estados de Minas Gerais e do Pará, em camadas planas, extensas e próximas a superfícies, a bauxita brasileira é de ótima qualidade com elevadas concentrações de óxido de alumínio.

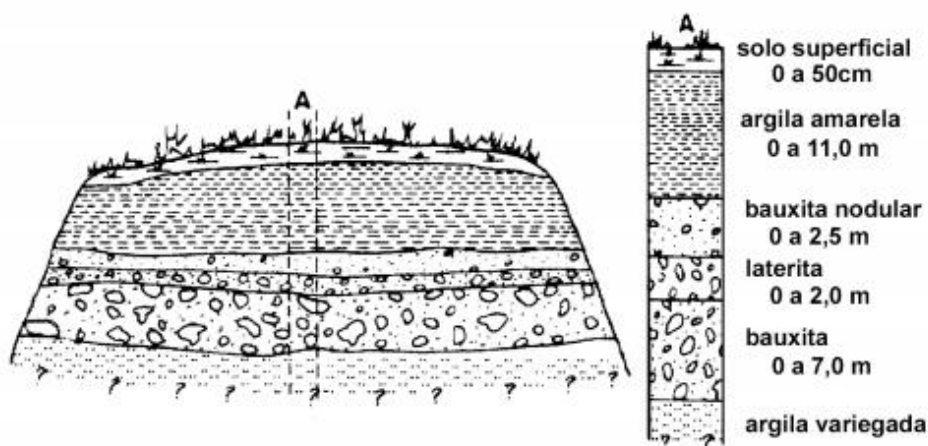


Figura 1 – Perfil típico de um subsolo no Brasil para exploração de bauxita (PUC RIO, CERTIFICADO DIGITAL 9824854/CA)

O principal uso da bauxita é para a produção de alumina em escala comercial. Os métodos de lavra e o processo de beneficiamento do minério variam de acordo com a sua composição e com natureza dos corpos das jazidas.

No Brasil, a lavra da bauxita ocorre a céu aberto segundo o método por tiras (*strip mining*). Todo o solo e vegetação que se encontram acima dos depósitos do mineral são removidos com o auxílio de máquinas. O minério é então extraído, transportado e armazenado. Com o compromisso de recuperar as áreas mineradas, as empresas assumem a responsabilidade de reaproveitar o solo orgânico e reflorestar a flora nativa.

Na refinaria, o processo químico de beneficiamento tem como finalidade separar o minério do material sem valor. O mineral é moído e misturado, sedimentado e filtrado, para que as impurezas possam ser eliminadas. A alumina resultante sofre processo de eletrolise e o alumínio é obtido.

O material sem valor resultante da atividade mineradora pode ser dividido em dois tipos. Os resíduos estéreis, resultantes da etapa da lavra, são minérios pobres de minerais úteis que não apresentam aplicação econômica. Geralmente dispostos em forma de aterro na própria região da mina, possuem natureza bastante heterogênea.

O rejeito resultante do beneficiamento é conhecido como lama vermelha (*red mud*). Caracterizado como um material de granulometria fina e de baixo teor de sólidos, apresenta na sua composição elevadas concentrações de soda cáustica e elevada presença de água. Não existem valores exatos sobre produção de rejeitos pela mineração, entretanto a literatura estima que para cada 1t de alumina produzida são gerados de 1 a 2t de lama vermelha (SILVA *et al.*, 2007)

Apesar de não ser considerada um material tóxico, a lama vermelha apresenta elevada alcalinidade e capacidade de troca catiônica, o que exige que a sua disposição seja feita de modo adequado. As barragens de rejeito são as estruturas mais comuns destinadas a receber e armazenar esse tipo de material.

A estrutura funciona como um grande reservatório e representa uma grande fonte de poluição. Geralmente são construídas a partir de um dique de material granular compactado e podem sofrer sucessivos alteamentos com o intuito de aumentar a sua capacidade de armazenamento. A utilização dos materiais estéreis no corpo da barragem

vem se apresentado como uma alternativa a utilização de material granular no corpo da barragem e também como uma alternativa a redução de rejeitos.

Recentemente, dois grandes acidentes ocorridos no Brasil ganharam destaque no cenário internacional. Em 2015, na cidade de Mariana, a barragem de Fundão rompeu-se e aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeitos se espalharam por 605km de extensão, levando a morte 19 pessoas. No início de 2019, um novo rompimento na cidade de Brumadinho, liberou 13 milhões de metros cúbicos de rejeito ocasionando mais de 300 vítimas, entre mortos e desaparecidos.

Apesar das barragens de rejeito de bauxita apresentarem dimensões menores do que as barragens de minério de ferro, os prejuízos causados por uma ruptura são tanto quanto drásticos. As consequências desses acidentes estão relacionadas à topografia do local, ao volume e a natureza do material armazenado, além da proximidade a comunidades (ABAL, 2017).

Segundo ICOLD, International Commission on Large Dams (2001), as principais causas de rupturas de barragens estão relacionadas a problemas de fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle da erosão, deficiências no controle e inspeção pós-fechamento e falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A negligência dos responsáveis em relação aos danos e prejuízos causados pela atividade mineradora no meio ambiente e na sociedade é pertinente. Até hoje, as cidades de Brumadinho e Mariana sofrem com as consequências dos rompimentos das barragens de rejeito de minério de ferro e não percebe-se nenhum sinal de que as grandes empresas tenham interesse em investir na recuperação das cidades.

A omissão não se dá somente em relação aos desastres que já aconteceram e também não é de responsabilidade exclusiva das grandes empresas. Em 2017, o antigo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) publicou a portaria nº 70.389 que, dentre as diversas modificações nas normas de barragem de mineração, cria o Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens (SIGBM).

O SIGBM consiste em um cadastro público das estruturas existentes feito pelo empreendedor e pelo responsável técnico externo. Devem ser informadas as estruturas em construção, em operação e/ou desativadas; devem ser descadastradas as estruturas em fechamento ou em descaracterização e devem ser inseridas as Declarações da Condição de Estabilidade (DCE) para as Inspeções de Segurança Regular e para as Revisões Periódicas de Segurança.

Atualmente o DNPM foi substituído pela Agência Nacional de Mineração (ANM) que se tornou a responsável por receber as DCE de cada estrutura ao longo de cada ano. O prazo final para a emissão e envio da última declaração é no mês de setembro de cada ano. Até o início do mês de outubro do ano passado, 54 barragens de mineração foram interditadas por não terem a sua estabilidade atestada (G1,2020).

Diante desse cenário, a motivação do presente trabalho é pertinente à integridade das comunidades, das cidades e do meio ambiente ao redor de complexos minerários. A apresentação de uma análise por elementos finitos permite o melhor entendimento do comportamento dessas estruturas tão complexas e, por consequência, colabora para o aumento da segurança.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O dique de partida de uma barragem é o elemento de maior importância da estrutura, uma vez que é o responsável por garantir a integridade de todo o armazenamento. A utilização do material estéril da lavra como material constituinte do corpo do dique dos reservatórios vem crescendo como uma forma de diminuição de resíduos da mineração.

O objetivo da presente dissertação é, dessa forma, a aplicação de uma modelagem numérica em elementos finitos de um dique de partida de um reservatório hipotético em fase de projeto de uma barragem de rejeito de bauxita. O material constituinte da estrutura será o material estéril compactado e a análise será realizada com o auxílio do programa computacional PLAXIS 2D (2019).

Por se tratar de um trabalho com fins acadêmicos em nível de graduação, a análise de tensões-deformações será em caráter preliminar e considerará apenas a condição de final de construção com o reservatório de rejeito de minério de bauxita completamente cheio.

Sabe-se que a estimativa dos parâmetros geotécnicos é uma das principais incertezas relacionadas a fase de elaboração dos projetos das estruturas. Durante a execução da obra, as propriedades dos materiais compactados podem ser tornar uma incerteza quando o controle de compactação não for bem executado.

Dois diferentes modelos serão adotados para a representação dos materiais da estrutura em estudo. Diante das incertezas acima apontadas, o aterro compactado do dique será representado pelo modelo constitutivo Mohr Coulomb (MC) e os outros materiais pelo *Hardening Soil* (HS). As análises serão realizadas no âmbito das deformações, dos deslocamentos e das tensões efetivas geradas no corpo da barragem.

1.4 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

O trabalho está dividido em 4 capítulos. O primeiro capítulo aborda uma breve introdução sobre a atividade mineradora de bauxita, a produção de alumínio e o impacto da geração desses rejeitos resultantes da mineração. Acrescenta-se ainda a motivação e o objetivo do presente trabalho.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica a respeito da análise numérica a ser elaborada. Serão apresentados os princípios do Método dos Elementos Finitos (MEF) bem como a funcionalidade do programa PLAXIS 2D. Os principais modelos constitutivos serão apresentados junto com a aplicabilidade mais adequada.

O terceiro capítulo contextualiza o estudo de caso, apresentado o funcionamento do complexo minério idealizado, os materiais constituintes da estrutura e os respectivos parâmetros de projeto. A modelagem numérica elaborada é apresentada assim como os resultados dos comportamentos das tensões e deformações para os dois cenários em estudo.

O último capítulo expõe as conclusões da análise elaborada e as considerações para os estudos de casos. Sugestões e comentários para futuros trabalhos também são apresentados. Ao final, está apresentada a bibliografia que permitiu a elaboração do presente estudo.

2 FUNDAMENTOS BÁSICOS

2.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

O Método do Equilíbrio Limite (MEL) é a ferramenta mais comum utilizada para a análise de estabilidades de taludes. Responsável por introduzir o Fator de Segurança (FS), a integridade da estrutura está diretamente relacionada pela razão entre a resistência ao cisalhamento mobilizada do solo e a resistência ao cisalhamento atuante.

A determinação da superfície crítica leva em consideração a geometria do talude, a geologia estrutural, a presença de trincas de tração, cargas dinâmicas, fluxo de água subterrâneo, condições de drenagem ou não drenagem e as propriedades de resistência. O método assume que o FS é igual ao longo de toda superfície e, em caso de falha, assume também que as tensões de cisalhamento são iguais em todos os pontos.

A análise da estabilidade pode ser feita em relação a toda a superfície ou dividindo-se a massa de solo mobilizada em lamelas (*slides*). O método das lamelas foi desenvolvido por Fellenius em 1936 e aperfeiçoado por diferentes autores ao longo do tempo.

O princípio do método das lamelas está baseado na discretização da zona mobilizada em “n” fatias (ou lamelas) diferentes, analisando cada uma de modo individual. A maioria dos métodos tem em comum a comparação das forças e/ou dos momentos atuantes com as respectivas forças e/ou momentos resistentes. Diferenciam-se entre si na precisão dos resultados apresentados.

Apesar do seu uso ser bastante difundido, o MEL apresenta algumas limitações. O método tem como base uma análise estática, o que não permite levar em consideração a distribuição das tensões e das deformações ao longo da superfície. Considerando as tensões uniformemente distribuídas ao longo da superfície potencial de ruptura, se distancia mais ainda do cenário real, uma vez que desconsidera a possibilidade de regiões com concentrações de tensões.

É importante ressaltar também que os modelos de falha que o método utiliza são muito simplificados. Processos e mecanismos de falha mais complexos, como por exemplo, provenientes da consideração de deformações e deslocamentos progressivos também não conseguem ser reproduzidos pelo Método do Equilíbrio Limite.

Assim sendo, em muitos casos, é necessária uma análise complementar para a previsão das deformações na estrutura. As barragens de rejeito estão cada vez mais altas e os problemas relacionadas às deformações têm se tornado fator de maior preocupação nos projetos geotécnicos. Após a disposição inicial dos rejeitos, os carregamentos provocados pelo peso das camadas superiores levam a redução de volume das camadas inferiores.

Essa redução de volume se traduz em recalques. Os materiais de fundação e os materiais que compõem o maciço da barragem sofrem deformações em função das tensões aplicadas, seguindo leis próprias e particulares. Seus reflexos podem ser vistos diretamente na elevação ou na depressão da crista da barragem.

A ocorrência de recalques diferenciais induz a formação de trincas no corpo da barragem. As trincas surgem quando as tensões de tração superam a baixa resistência a tração do solo e geralmente estão associadas a tendência ao arqueamento do núcleo da barragem. Dessa forma, os recalques devem ser previstos na fase de projeto e minimizados de acordo com as características do maciço e do projeto construtivo.

2.2 ANÁLISE TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Um dos objetivos de uma análise tensão-deformação é a previsão dos recalques. Os diversos materiais que constituem uma barragem de rejeito possuem propriedades e comportamentos singulares de forma que a necessidade de verificar a compatibilidade dessas deformações é fundamental para garantir a integridade e a segurança da estrutura.

A redução da cota da crista da barragem é a consequência direta e mais comum após os recalques da fase construtiva atuarem. A capacidade de armazenamento da estrutura fica reduzida e a capacidade de suportar os eventos extremos, como por exemplo a elevação do nível de água, torna-se comprometida. A consideração do uso dos alteamentos para compensar essas reduções e aumentar a capacidade do reservatório é costumeira.

O aumento da altura da barragem acarreta variações dos campos de tensão no corpo na barragem e na sua fundação. Quando a altura do alteamento é maior do que a altura inicial do dique de partida, a solução mais econômica é a construção de um novo

núcleo e a barragem antiga passa a funcionar como uma ensecadeira. Quando a altura do alteamento for pequena em relação à altura inicial do dique de partida, esse pode ser incorporado diretamente na estrutura.

O método de alteamento de barragens à montante (Figura 2) é o mais utilizado no mundo, além do mais antigo, simples e econômico. Nesse método, o rejeito é lançado hidráulicamente, a partir da crista do dique de partida, em direção à montante da linha de simetria, formando uma praia de rejeitos. As partículas mais grossas ficam próximas ao ponto de descarga e as mais finas predominam à medida que se afasta do ponto de lançamento. Com o tempo, esse material adensa e serve de fundação para os diques de alteamento. O processo pode ser repetido quantas vezes necessárias até atingir a cota final da ampliação.

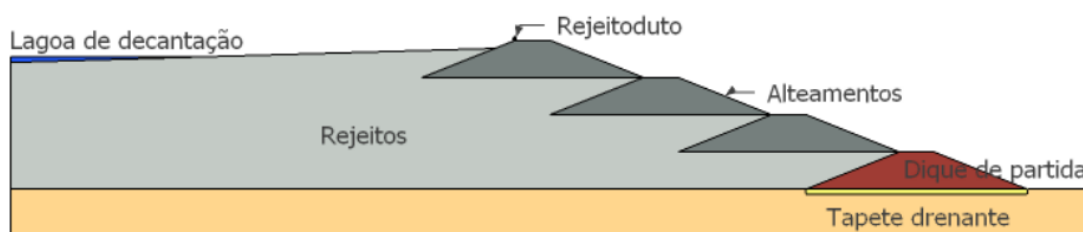


Figura 2 – Representação do método de alteamento a montante (VALERIUS, 2014)

Com a suspensão do uso do método de alteamento a montante pela Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019 pela ANM, o uso dos alteamentos de linha de centro e a jusante devem crescer. O alteamento pelo método a jusante (Figura 3) dá-se em direção a corrente do fluxo de água e permite uma construção independente do material do rejeito, uma vez que a estrutura pode ser construída com o mesmo material do dique de partida. O controle de lançamento e de compactação desse material confere maior segurança a barragem.

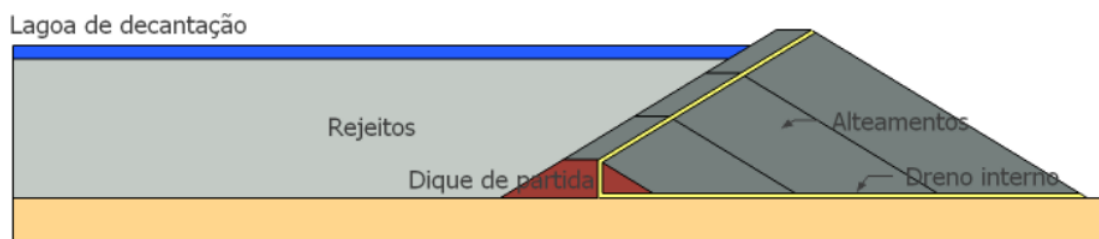


Figura 3 - Representação do método de alteamento a linha de centro (VALERIUS, 2014)

Apesar de contribuir para a estabilidade da estrutura, a necessidade de maior volume de material de empréstimo e de maior área ocupada para a construção dos diques de alteamento, somado ao maior investimento associado ao processo de ciclonagem, torna esse método mais caro e favorece a escolha do alteamento pela linha de centro de centro.

O alteamento pelo método da linha de centro (Figura 4) apresenta uma solução intermediária aos outros dois métodos citados. A elevação da crista da barragem é feita na direção vertical sendo o eixo coincidente com o eixo do dique de partida. Assim como no método de alteamento a montante, os rejeitos são lançados da crista do dique de partida por meio de ciclones, formando também a praia de rejeitos. Em oposição ao método de jusante, destaca-se a menor necessidade de volume de material compactado. A atenção para esse método é relacionada ao ângulo de inclinação da face montante, onde podem aparecer problemas de erosão interna.

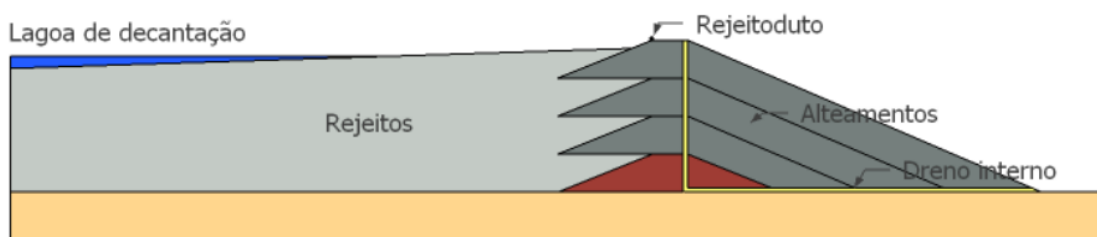


Figura 4 - Representação do método de alteamento jusante (VALERIUS, 2014)

Independentemente da escolha do método de alteamento, a diferença na rigidez, na resistência e na permeabilidade dos materiais recém colocados pode gerar problemas de interface com os materiais já existentes. Essa diferença, já citada anteriormente, atenta para a necessidade de compreender o comportamento das tensões-deformações nessas estruturas.

Ainda com o intuito de assegurar a estabilidade da estrutura, o estudo das tensões e das deformações serve como base para a elaboração do projeto de instrumentação da barragem. O monitoramento por meio da instalação de piezômetros, medidores de nível de água e inclinômetros tornam-se mais assertivos e eficientes quando os pontos mais críticos de atenção podem ser previstos e identificados.

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A determinação do comportamento tensão-deformação de obras de terra é algo complexo e é um dos grandes desafios enfrentados pela engenharia. Os métodos numéricos estão sendo cada vez mais utilizados em obras de terra com o intuito de permitir o melhor conhecimento desse comportamento.

Dentre os métodos numéricos existentes, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é o mais utilizado. Os fundamentos do método já eram conhecidos desde aproximadamente a década de 50, entretanto seu uso só foi difundido com o desenvolvimento de programas computacionais mais modernos.

O método consiste na divisão do domínio do problema em subdomínios, ou seja, discretizada em elementos finitos. O comportamento de cada elemento é expresso em função da própria geometria e das suas propriedades. Considerando a interligação dos elementos adjacentes por meio de nós, determina-se um sistema global para toda a estrutura. A introdução das condições de contorno permite a solução do problema e os valores das variáveis são obtidos para cada nó da malha.

Para uma completa solução dos problemas de tensão-deformação de uma estrutura, as condições de compatibilidade, de equilíbrio de forças e suas derivadas e as leis constitutivas devem ser obedecidas e satisfeitas.

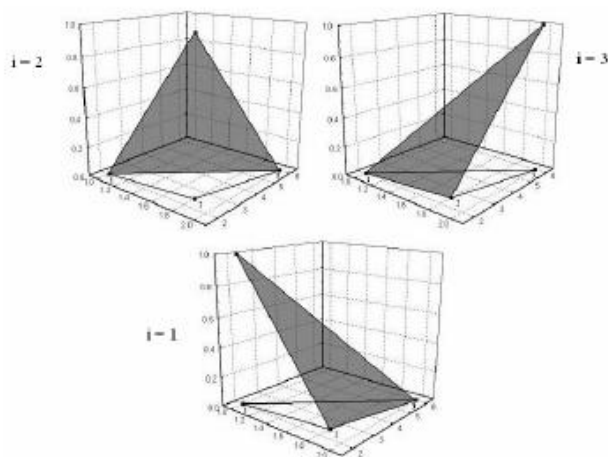


Figura 5 – Comportamento das funções de forma no domínio (PUC RIO, CERTIFICADO DIGITAL 0410284/CA)

A discretização da malha está relacionada com o tipo de função de forma que será utilizada. O refino da malha deve ser suficiente para que a variação da função ao longo do interior seja a menor possível. Como o número de nós está diretamente relacionado a quantidade de incógnitas do problema, a escolha da função mais adequada permite a menor quantidade de elementos para que o resultado convirja.

As funções de forma são funções, sejam elas polinomiais ou uma combinação linear de senos e cossenos, que possuem valor não nulo do subdomínio do elemento finito. (Figura 5). Essa função é a responsável por relacionar o que acontece dentro de cada elemento com os respectivos nós.

Para o particular estudo de tensões-deformação, relaciona-se o deslocamento de um ponto qualquer dentro do elemento com os deslocamentos nodais. Segundo Araújo (2006), a relação pode ser escrita conforme equação 2.1.

$$\{\delta\} = [N]\{\delta\}^e \quad 2.1$$

A relação entre as tensões pode ser obtida por meio da derivada dos deslocamentos. Uma vez os deslocamentos definidos, por meio da matriz das propriedades elásticas do material, o comportamento das tensões é obtido. Ainda segundo Araújo (2006), as equações 2.2 e 2.3 evidenciam essa relação. A equação 2.4 é resultado da combinação das duas outras equações.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad 2.2$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad 2.3$$

tal que,

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e \quad 2.4$$

O Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) define que o trabalho externo realizado por um corpo é igual ao seu trabalho interno. Aplicando o PTV a equação 2.4, obtém-se a equação global do processo (equação 2.5) apresentada.

$$\{F\}^e = [K]^e\{\delta\}^e \quad 2.5$$

Onde

$\{\delta\}$ e $\{\delta\}^e$ são os vetores de deslocamento nodal e no interior do elemento

$\{\varepsilon\}$ é o vetor das deformações no interior do elemento

$\{\sigma\}$ é o vetor das tensões no interior do elemento

$\{F\}^e$ é o vetor das forças normais

$[N]$, $[B]$, $[D]$ são os vetores relacionadas as funções de forma

$[K]^e$ é a matriz de rigidez do elemento

2.4 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

2.4.1 Comportamento Elástico

O comportamento de um material elástico pode ser descrito pela Lei de Hooke. Uma relação única e linear se estabelece entre a tensão e a deformação, de modo que a aplicação e a remoção de um carregamento implicam em deformações totalmente recuperáveis, permitindo o material retornar as suas condições iniciais (equação 2.6)

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad 2.6$$

A constante elástica (E) é chamada de módulo de elasticidade. O coeficiente corresponde a inclinação da curva tensão x deformação e está diretamente relacionada a rigidez do material. Independentemente da intensidade da tensão a qual o material está submetido, o módulo de elasticidade é constante.

Entretanto, essa equação é apenas válida para situações onde o carregamento pode ser considerado unidimensional. Para as situações onde o carregamento atua nas três dimensões, é necessária a aplicação da Lei de Hooke generalizada, com base na matriz de tensões, na matriz de módulos elásticos e na matriz de deformação (DESAI; CHRISTINA, 1977 apud Pereira, 2014). A equação 2.7 exemplifica a escrita matricial.

$$\{\sigma\} = [C].\{\varepsilon\} \quad 2.7$$

O solo pode ser considerado um material homogêneo e isotrópico. Também como premissa, pode ser considerado, que as tensões de cisalhamento não afetam as deformações axiais e que as tensões normais não afetam as deformações cisalhantes. Assumindo válido também a superposição dos efeitos, chega-se a Lei de Hooke generalizada, conforme equação 2.8.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad 2.8$$

As três constantes elásticas que comandam essa relação são o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo cisalhante (G). Entretanto, apenas dois desses parâmetros são necessários, uma vez que eles se relacionam entre si conforme equação 2.9.

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad 2.9$$

No caso particular do estudo das barragens, é possível considerar a estrutura como um sólido prismático entre dois planos indelocáveis e sem atrito. Esse estado pode ser classificado como estado plano de deformação (EDP), onde o carregamento é paralelo ao plano XY e independe da direção Z.

Como o deslocamento na direção z é nulo, a tensão resultante nessa mesma direção é definida em função do coeficiente de Poisson e das tensões nas duas outras direções. As matrizes de tensão e de deformação ficam então reduzidas (equações 2.10 e 2.11).

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\} \quad 2.10$$

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\} \quad 2.11$$

Comportamento elástico linear independe da trajetória de tensão que o material foi submetido e permite que um mesmo estado de deformação seja atingido por meio de diferentes trajetórias de tensões. Por sua vez, o comportamento elástico não linear apresenta essa dependência do incremento de tensão e impõe a necessidade da formulação incremental.

2.4.2 Comportamento Plástico

Diferentemente do comportamento elástico, o comportamento plástico dos materiais apresenta dependência da trajetória das tensões. A irreversibilidade das deformações plásticas está diretamente relacionada com as tensões do processo plástico anterior e não somente às deformações.

O principal aspecto relacionado ao comportamento plástico é o critério de escoamento, limite entre a zona de comportamento elástico e a zona de comportamento plástico. Para um estado de tensão unidimensional, esse limite é definido pela tensão de escoamento. Geralmente é uma tensão suficientemente alta capaz de induzir a deformação plástica no material. A identificação desse ponto nem sempre é direta, uma vez que nem todas as curvas apresentam uma separação marcante entre o fim do comportamento elástico e o início do plástico.

Para um estado de tensões tridimensional, não existe apenas uma tensão atuando em uma direção e a tensão de escoamento então não pode ser definida como um ponto. Nesse cenário, a mudança do estado elástico para o plástico é delimitada por uma superfície. A função que rege essa superfície leva em consideração todas as outras tensões atuantes nas outras direções, sejam elas tensões principais ou invariantes.

Quando o estado de tensão do material encontra-se dentro do limite dessa superfície, o material comporta-se elasticamente. Quando o estado de tensão está localizado na superfície, o comportamento do material é plástico. Uma situação fora dessa superfície é considerada impossível de existir. (Naylor, 1981 *apud* PUC RIO, CERTIFICADO DIGITAL 0921938/CA).

A lei do encruamento do material é outro aspecto relevante relacionado a plasticidade. Esse aspecto indica como o limite do escoamento varia de acordo com as

tensões plásticas acumuladas e com as deformações plásticas de cada etapa. O encruamento do material pode vir acompanhado de endurecimento ou de amolecimento.

Um material cujo comportamento não apresenta encruamento é descrito como “perfeitamente plástico”, ou seja, o limite de escoamento do material é assumido constante ao longo da fase de carregamento. Quando se admite a possibilidade desse limite variar conforme a ocorrência de carregamento, considera-se que o material apresenta um comportamento plástico com encruamento. O limite do escoamento varia de acordo com o comportamento de endurecimento ou de amolecimento do material.

O endurecimento é caracterizado quando a tensão de escoamento aumenta junto com o aumento da deformação plástica. De forma análoga, o amolecimento é caracterizado quando a tensão de escoamento diminui à medida que ocorre o aumento das deformações plásticas.

2.4.3 Comportamento Elasto-plástico

A teoria da plasticidade serve como princípio para descrever o comportamento da relação tensão-deformação dos materiais com resposta elasto-plástica. A configuração dessa resposta consiste na existência dos dois domínios distintos, elástico e plástico, quando submetido a carregamentos externos.

Dentro da região delimitada pela função de escoamento, o material se comporta puramente elástico. A ocorrência de deformações é puramente elástica e reversível (ε^e). Uma vez ultrapassado o limite do escoamento, as deformações inelásticas descrevem a evolução das deformações plásticas (ε^p) por meio da ocorrência, ou não, de endurecimento ou de amolecimento.

De forma generalizada, as deformações no regime elasto-plástico podem ser definidas conforme a equação 2.12.

$$\varepsilon = (\varepsilon^e) + (\varepsilon^p) \quad 2.12$$

2.5 ANÁLISE NUMÉRICA

Modelos numéricos são uma representação matemática de um processo físico real (Almeida, 2010). O principal objetivo é permitir a aproximação do comportamento real de um material a partir de análises de um meio ideal por meio do uso de hipóteses simplificadoras. É desse modo, que algumas teorias já desenvolvidas para materiais bem-comportados, como os metais, são aplicadas a solos e rochas.

O grau de acurácia da modelagem está diretamente relacionado aos modelos numéricos escolhidos, a geometria reproduzida, das condições iniciais e das condições de contorno adotadas em cada estudo. É possível ainda acrescentar a qualidade dos dados disponíveis e a complexidade do modelo proposto.

Além de permitir uma análise qualitativa dos resultados obtidos, a modelagem numérica pode e deve ser utilizada como uma importante ferramenta de estudo. O auxílio no entendimento do processo permite o melhor conhecimento do comportamento previsto além da identificação dos parâmetros governantes do processo. Um refino ou a melhor adequação desses pontos principais permite aperfeiçoar a aproximação da representação à realidade.

A complementação do entendimento do processo pode ser feita por meio da comparação entre diferentes análises modeladas. A facilidade de se programar a mesma situação, porém com modelos constitutivos diferentes e/ou parâmetros variáveis, propicia o melhor entendimento global do processo.

Cruz (1996, *apud* Almeida 2010) define a existência de três métodos principais para a análise de tensão-deformação em solos: elástico linear (para pequenas deformações), elástico não-linear e elasto-plástico. Quando submetido a carregamentos crescentes e, conseqüentemente, tensões crescentes, qualquer um desses métodos apresentam resultados satisfatórios.

Para a engenharia, as deformações plásticas são aquelas que despertam o maior interesse, uma vez que são resultado de deformações permanentes. Uma vez entendida a coexistência de deformações elásticas (reversíveis) e plásticas (irreversíveis), a aplicação de modelos constitutivos elasto-plásticos tornam-se fundamentais.

2.5.1 Modelos Constitutivos

Os modelos constitutivos são formulações matemáticas que objetivam modelar o comportamento dos materiais, recorrendo a simplificações. Para que um modelo seja adequado, ele deve ser capaz de reproduzir o comportamento do material independentemente do carregamento a qual está submetido, deve ter como base parâmetros identificáveis, além de interpretar a resposta do material em comparação as mudanças de tensão ou deformação.

2.5.1.1 Mohr-Coulomb Model

O critério de ruptura da função de escoamento mais utilizado na geotecnia é o critério de Mohr-Coulomb. A superfície é representada em função da tensão cisalhante e da tensão efetiva normal ao plano de ruptura. O modelo representa um comportamento linear elástico perfeitamente plástico, conforme representado na Figura 6.

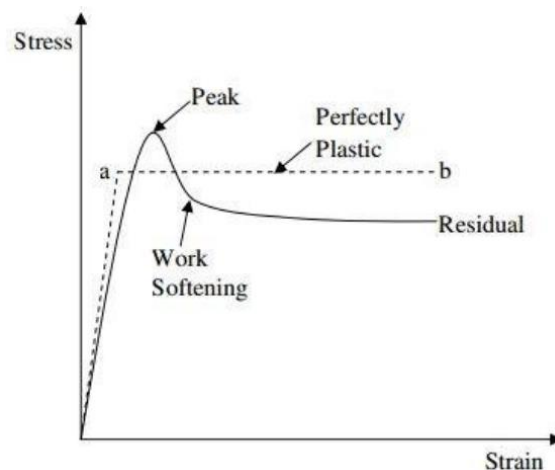


Figura 6 – Comportamento perfeitamente elasto-plástico (Brady, 2018)

Os parâmetros necessários para a aplicação do modelo são o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν), representativos da parte elástica do comportamento do material; o ângulo de atrito (Φ') e a coesão (c'), representativos dos parâmetros de ruptura; e por último, o ângulo de dilatância (ψ), que é utilizado para representar as deformações irreversíveis correspondentes a parcela plástica do comportamento do solo.

O critério de ruptura apresentar melhor funcionamento quando o cenário analisado apresenta carregamento drenado, cujos parâmetros de ruptura são apenas a coesão e o ângulo de atrito. Para simular uma condição de carregamento não drenado, é recomendado que o ângulo de atrito seja nulo e o valor da coesão seja a respectiva resistência não drenada.

A simplificação do modelo de Mohr-Coulomb em supor que o comportamento elástico é linear, não permite que sua aplicação seja amplamente utilizada. Funciona bem como um modelo de “primeira ordem” de forma que os resultados obtidos servem como parâmetro para a escolha de um outro modelo de análise, mais elaborado.

2.5.1.2 Hardening Soil Model

A utilização do Método dos Elementos Finitos possibilita considerar o comportamento não linear dos materiais e, conseqüentemente, obter melhores previsões dos resultados desejados. O *Hardening Soil Model* (HSM) é um dos modelos que permite reproduzir o comportamento de solos que sofrem deformações plásticas.

Em oposição ao modelo Mohr Coulomb, que admite regime elástico como linear e o plástico como constante, o HSM assume que a superfície de escoamento plástica de um material com endurecimento não é constante e que pode expandir em função das deformações plásticas. (PLAXIS, 2019).

O endurecimento do material está relacionado a dois principais fenômenos, cisalhamento e compressão. Quando o endurecimento é proveniente do cisalhamento, as deformações plásticas são provenientes as tensões desviadoras. Quando proveniente a compressão, as deformações são resultantes das tensões uniaxiais e isotrópicas.

O comportamento não linear existente entre as deformações e as tensões permite uma aproximação dessa relação por uma função hiperbólica. Essa aproximação originou o modelo hiperbólico, proposto inicialmente por Konder (1963) e depois difundido por Duncan e Chang (1970), que sofreu modificações até o atual HSM.

A preferência pela teoria da plasticidade em relação a teoria da elasticidade, o atendimento do comportamento dilatante do material e o uso de uma envoltória de fechamento (*yield cap*) na superfície de escoamento tornam o modelo mais bem elaborado em relação aos outros existentes.

A ruptura do modelo HSM leva em consideração os mesmos critérios utilizados no modelo Mohr Coulomb. O ângulo de atrito (Φ'), a coesão (c'), o ângulo de dilatância (ψ) e a tensão de tração (σ_t) são, assim como no modelo elástico linear perfeitamente plástico, parâmetros utilizados como dados de entrada.

Além do apresentado, a principal característica do modelo é a relação de dependência entre as tensões e a rigidez do material. No modelo Mohr Coulomb, a rigidez é considerada única e constante dado o coeficiente de elasticidade. No *Hardening Soil*, a rigidez do material é dada em função de três parâmetros diferentes, conforme Figura 7.

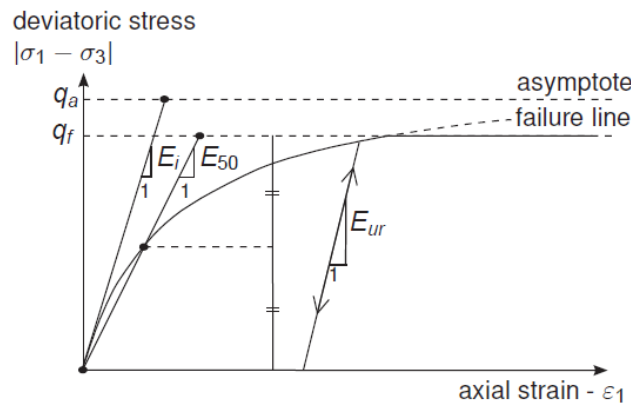


Figura 7 – Representação dos três diferentes módulos de deformabilidade

O módulo de rigidez de referência devido a tensão desviadora inicial (E_{50}^{ref}) corresponde ao valor da reta secante a 50% da máxima tensão desvio resultante do ensaio triaxial realizado com a tensão confinante igual a de referência (p^{ref}). O módulo E_{50} é determinado por meio da equação 2.13.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{(c \times \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi)}{(c \times \cos \phi + p^{ref} \sin \phi)} \right)^m \quad 2.13$$

O módulo de rigidez de referência devido a compressão inicial (E_{oed}^{ref}) refere-se ao módulo tangente odométrico em tensão igual a de referência (p^{ref}). O correspondente E_{oed} é dado pela equação 2.14 abaixo.

$$E_{oed} = \left(\frac{\sigma}{E_{oed}^{ref}} \right)^m \quad 2.14$$

Ambos módulos de rigidez, de cisalhamento e de compressão, estão relacionados ao comportamento plástico do material.

O terceiro parâmetro é o módulo de rigidez de referência relacionado ao descarregamento e a recarga (E_{ur}^{ref}). Esse coeficiente representa a parcela da rigidez elástica do material e pode ser determinado conforme a relação $3 \times E_{50}^{ref}$. O referido E_{ur} é obtido de forma análoga ao E_{50} conforme a equação 2.15.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \times \cos \phi - \sigma'_3 \sin \phi}{c \times \cos \phi + p^{ref} \sin \phi} \right)^m \quad 2.15$$

A complexidade do modelo permite que tanto os solos moles (*soft soils*) quanto solos rijos (*stiff soils*) possam ser representados. A diferença entre os dois comportamentos é expressa por meio do coeficiente (m), cujo valor varia entre 0,50 e 1,0, representando respectivamente os comportamentos rijo e mole.

O coeficiente de Poisson para descarregamento e recarga (ν_{ur}), a tensão de referência para a determinação das rigidez (p^{ref}), o coeficiente de repouso para um estado normalmente adensado (K_o^{nc}), a razão de ruptura (R_f) e a tensão de tração ($\sigma_{tensile}$) são necessários para auxiliar a determinação das grandezas apresentadas. Quando tais valores não estiverem disponíveis, é recomendado pelo PLAXIS (2019) que se adotem os valores padrões (*default*).

2.6 PLAXIS 2D

O PLAXIS 2D é um programa computacional de elementos finitos elaborado para realizar análises de tensões-deformações e de estabilidade em estruturas de solos. Esse programa é baseado na teoria das pequenas deformações, sendo aplicável para análises bidimensionais considerando a hipótese de estado plano de deformações ou axissimétricos.

O programa permite simular análises sob condições drenadas e não drenadas, e diferentes condições de contorno, incluindo prescrição de deslocamentos, cargas concentradas e pressões nos pontos nodais.

O programa conta com quatro subprogramas que se dividem em: atribuição dos dados de entrada, cálculo, obtenção dos resultados e geração e análise das curvas, gráficos e valores encontrados.

A primeira etapa consiste em uma sub-rotina de entrada de dados, chamada de *Input*. Os dados do problema, como geometria, propriedade dos materiais e modelos constitutivos, são implementados. As condições de contorno também são definidas por meio de forças ou deslocamentos previamente conhecidos.

A malha de elementos finitos é definida em seguida. O programa permite escolher entre elementos triangulares com 6 ou com 15 nós. A diferença entre os dois está no grau da função de interpolação. Nos locais que se deseja ter um conhecimento mais detalhado do comportamento das tensões-deformações, por exemplo, pode-se aplicar uma malha mais refinada, aumentando a quantidade de elementos nesse local.

Quanto maior o número de elementos provenientes da discretização do domínio, mais tempo será necessário para o programa calcular as respostas. Além do maior tempo gasto na análise, a maior quantidade de nós gerada está diretamente relacionada com a quantidade de incógnitas que o problema terá. A qualidade dos resultados está diretamente relacionada a escolha da malha.

A segunda sub-rotina chama-se *Calculation* e é nessa etapa que se define o tipo de análise que será elaborada. O PLAXIS 2D permite realizar quatro análises distintas: análise da fase plástica (*plastic*), análise da fase de adensamento (*consolidation*), análise dinâmica e a particular *Phi-c Reduction*.

Diferentemente das outras opções, a *phi-c reduction* permite a comparação entre a resistência ao cisalhamento com as tensões cisalhantes em um determinado ponto. A resistência mobilizada necessária para a estabilidade do solo é então calculada. Esse modelo de análise é fundamental para complementar os estudos pelo Método do Equilíbrio Limite (MEL).

A opção de inserir fases construtivas no PLAXIS 2D reforça a ideia que a análise do comportamento de uma barragem de rejeitos não pode e nem deve ser feita considerando unicamente a condição de final de construção. A atualização da malha de elementos finitos e da poropressão, bem como os intervalos de tempo, auxiliam na acurácia dos resultados.

O terceiro subprograma chama-se *Output*. É nessa etapa que os resultados do comportamento das tensões e das deformações são observados. Podem ser analisadas as tensões efetivas, totais e cisalhantes; as deformações axiais e volumétricas; os deslocamentos verticais e horizontais.

A importância dessa fase está relacionada com a identificação dos pontos críticos da estrutura. Esses pontos podem estar relacionados a deformações mais elevadas do que as esperadas, a concentrações de tensões ou mesmo a presença de trações trativas na estrutura de solo. O conhecimento desses pontos permite a eficiente adoção de medidas mitigatórias.

Para a correta interpretação dos gráficos, é necessário estar atento para a convenção de sinais adotada pelo PLAXIS 2D. Diferente do comumente adotado na geotecnia, as tensões de tração são consideradas positivas enquanto as de compressão, negativas.

Como complemento da etapa anterior, a última sub-rotina é chamada de *Curves*. É nessa etapa que os gráficos de interesse são gerados. Esses gráficos podem ser gerados para qualquer etapa construtiva a partir de qualquer ponto da malha de elementos finitos.

2.7 TRABALHOS ANTERIORES

Aires (2006) apresenta em sua dissertação um estudo do comportamento tensão-deformação na barragem de água por meio de modelagem numérica por elementos finitos. O estudo propôs uma modelagem considerando a inclusão da junta de construção e uma discretização mais otimizada com o aumento das camadas de construção. Os dados de instrumentação conhecidos foram utilizados como dados comparativos para avaliar o desempenho do modelo numérico.

Araújo (2006) acrescenta à literatura um estudo do comportamento de barragens de rejeito alteadas com o próprio material do rejeito. Os resultados foram obtidos no tocante às análises de percolação, análise tensão-deformação e feitos no tocante ao comportamento tensão-deformação, análise de percolação e estabilidade. Além disso, uma análise paramétrica foi avaliada considerando a variação dos parâmetros de rigidez e resistência dos materiais envolvidos.

Almeida (2010) com o auxílio do programa GeoStudio 2007 módulo Sigma, analisa o comportamento em tensões-deformações do processo construtivo de uma barragem de terra e enrocamento. Foi adotado o modelo constitutivo hiperbólico e os parâmetros geotécnicos foram determinados por meio de ensaios drenados de laboratório. Um estudo de sensibilidade do material foi apresentado, tendo por finalidade a verificação dos parâmetros na resistência do material.

Moreira (2015) analisa o comportamento do enchimento de uma barragem de rejeito de minério de bauxita. Os parâmetros foram estimados com base nos ensaios de adensamento e variaram com a profundidade do reservatório em função da sedimentação. Os resultados finais obtidos foram comparados com os dados de batimetria existentes e o *software* utilizado para auxiliar a análise foi o PLAXIS 2D.

Braga (2016) apresenta em seu trabalho uma simulação numérica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) do enchimento de um reservatório de rejeitos de minérios de ferro. Uma comparação entre os modelos Linear Elástico, Hiperbólico e Lade-Kim foi proposta analisando o comportamento das poropressões, deslocamentos horizontais e verticais, deformações e tensões normais e cisalhantes.

As análises numéricas propostas para os diferentes tipos de barragens acima citados apresentaram bons resultados e foram analisados servindo como base para o estudo do presente trabalho. Os respectivos trabalhos estão citados nas referências bibliográficas.

Bedim (2010) e Tinoco (2017) apresentaram em suas teses extensas discussões sobre os comportamentos dos rejeitos da mineração de bauxita provenientes dos estados do Pará e de Minas Gérias, respectivamente. Aspectos como índices físicos, condutividade hidráulica, parâmetros de compressibilidade, de resistência e de deformabilidade, bem como o potencial de liquefação, foram analisados.

Os parâmetros geotécnicos estimados para os materiais no presente trabalho levaram em consideração as análises apresentadas, e comparados com os valores de pesquisa propostos por Bedim (2010) e Tinoco (2017).

3 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo, o presente estudo considera um caso hipotético e generalista de uma barragem de rejeitos de minério de bauxita de forma que pode ser estendido para as mineradoras de bauxita no Brasil. O projeto seguiu as recomendações preconizadas na NBR 13028/17 - Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos.

Será apresentada uma breve contextualização da barragem proposta, incluindo o processo da extração do minério de bauxita e da disposição do rejeito da mineração. O estudo consta com a apresentação dos materiais constituintes do depósito, os modelos constitutivos considerados e os parâmetros de projeto adotados.

3.1 INTRODUÇÃO

O complexo industrial das mineradoras engloba, de forma generalizada, a extração do minério na mina, o transporte até as indústrias, a chegada à estação de beneficiamento, a distribuição final do minério e o conseqüente despejo dos rejeitos nos respectivos reservatórios.

A atividade de exploração do minério é feita a céu aberto. O método de mineração por tiras (*strip mining*) permite que o material estéril seja lançado diretamente em áreas adjacentes da lavra, economizando tempo e investimento no transporte desse material. A alta produtividade é uma das principais características desse método.

O solo que faz parte da camada de cobertura da jazida é removido e transportado para as áreas fora da região da mina. O transporte pode ser feito diretamente por meio de correias transportadoras ou então com o auxílio de caminhões transportadores. Em ambos casos, o material é estocado e preservado para a futura reabilitação da área.

Estudos elaborados por diferentes universidades mostram que a reutilização do solo original no processo de descomissionamento das barragens permite, a longo prazo, o retorno da fauna e da flora local. Diminuindo os impactos causados pela atividade mineradora.

Ainda na região da mina, o material é extraído e esmagado repetidamente até ser transportado para a planta industrial. Uma vez na área industrial, o material é novamente esmagado e lavado até atingir o ponto de ser despachado para a indústria de refino do alumínio. Nesse processo de lavagem, o material fino e grosso constituinte da bauxita é separado do material argiloso (rejeito) sem o uso de reagentes.

O material argiloso sai do processo de lavagem com elevado teor de umidade e consequentemente com baixo teor de sólidos. Após o processo químico de beneficiamento, conhecido como processo Bayer, esse material é acrescido de concentrações de soda cáustica e enfim destinados ao depósito final.

Uma das metodologias de disposição de rejeitos consiste no material ser inicialmente disposto (por um curto período de tempo) em um reservatório até que a água evapore e o teor de sólidos aumente. Uma vez obtida a porcentagem de sólidos determinada pela mineradora, o rejeito é lançado no reservatório final.

Uma segunda metodologia de depósito dos rejeitos é proposta pela mineradora Hydro Alunorte. Com o auxílio de um filtro prensa, a água é extraída possibilitando a disposição de rejeitos de forma compactada. A água extraída é armazenada em bacias e depois levadas para as estações de tratamento.

Entende-se que quanto menor a umidade do rejeito, menor a concentração de soda cáustica e maior a concentração de sólidos, mais segura é a disposição dos materiais. Entretanto, como o filtro prensa trata-se de uma tecnologia nova e ainda exclusiva da mineradora Hydro Alunorte, esse método de despejo não será considerado no presente estudo.

A disposição do resíduo foi considerada em diferentes pontos ao longo da crista da barragem, sendo o despejo feito com o auxílio de hidrociclones (*spigots*). A espessura de cada camada depositada de rejeito deve ser planejada, de modo que o teor de sólidos chegue em aproximadamente 60% no intervalo de tempo entre a primeira deposição do material até a próxima.

O intervalo entre as disposições deve levar em consideração as estações do ano. Durante o período seco, que compreende os meses entre maio e dezembro, o intervalo é estimado em aproximadamente um mês. Durante o período chuvoso, o processo pode chegar a sessenta dias.

Os reservatórios, tanto os de deposição inicial quanto os de disposição final, foram considerados construídos nas antigas áreas destinadas a mineração. Desse modo, a fundação das barragens e reservatórios estão assentes em pilhas de materiais perturbados (pilha de material estéril) da mineração.

Os níveis dos lençóis freáticos nas regiões minerárias brasileiras são considerados abaixo do nível do terreno. Entretanto, como linhas freáticas podem ser encontradas na superfície devido a infiltração proveniente do sistema de operação da planta industrial, por simplificação, foi considerado um nível de água coincidente com a fundação natural do reservatório.

Com base na breve introdução do complexo minerário acima idealizado, é possível descrever os materiais constituintes das estruturas e apresentar, ao final, os parâmetros geotécnicos de projeto. Dentre os diversos materiais constituintes do corpo das barragens, destacam-se a fundação de solo natural, a pilha de estéril e o material estéril compactado.

3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

Para a estimativa dos parâmetros geotécnicos dos materiais, tanto do solo natural, quanto dos rejeitos estéril e *red mud* abordados no presente trabalho, foram levadas em consideração os conhecimentos da autora além dos trabalhos e dissertações e estudos apresentados no acima.

3.2.1 Material de Fundação

O material da fundação foi considerado como um solo residual de caulinita predominantemente argiloso. O solo é predominantemente vermelho, com pequenos pontos de caulim branco e gibbsita. Normalmente, pode ser encontrado em camadas de 20m de profundidade.

Esse tipo de solo residual apresenta porcentagens de partículas finas (argila e silte) em elevadas concentrações, variando entre 60 a 80% dependendo da origem. A plasticidade média do material é estimada em 25%. De acordo com a plasticidade e

granulometria apresentadas, o solo pode ser considerado uma argila de baixa plasticidade.

É permitido ainda considerar o material completamente saturado, uma vez que o nível de água considerado foi assente ao nível do terreno da fundação de solo natural. O grau de saturação foi considerado de aproximadamente 95% e a umidade natural (ω_{nat}) do solo foi estimada em torno de 32% e o peso específico natural (γ_{nat}) em 18kN/m³.

Valores elevados de OCR indicam valores elevados de tensão de pré-adensamento e/ou baixos valores de tensão vertical efetiva. Ambas hipóteses podem ser aplicadas à situação. Elevadas tensões de pré-adensamento são esperadas uma vez que esse material é encontrado em grandes profundidades e uma vez que as camadas de solo acima da fundação são escavadas durante o processo de extração da bauxita, pequenas tensões verticais efetivas são esperadas.

A medida que o enchimento do reservatório for acontecendo, elevadas pressões serão submetidas ao material da fundação. Dessa forma, um OCR (*overconsolidation ratio* ou RPA, razão de pré-adensamento em português) igual a 1 pode ser esperado na situação de final da fase de enchimento e também ao final da construção. Essa análise permite a consideração do material como normalmente adensado.

Para os solos que apresentam comportamento normalmente adensado, é esperado deformações elevadas e irreversíveis. Em relação a compressibilidade do material, os parâmetros médios estimados foram de 0,42 e 0,04 correspondentes, respectivamente, ao índice de compressibilidade (c_c) e ao índice de descompressão (*swelling index*, c_s).

Valores teóricos estimam que, para solos naturais, os valores das resistências dos ensaios de cisalhamento são 30% menores que as dos ensaios de compressão. Os valores obtidos em ensaios geotécnicos de laboratório e divulgados em literatura levaram a valores de resistência dentro desse intervalo, de forma que o S_u/σ'_c foi estimado em 0,27 para o material da fundação.

Em relação aos parâmetros drenados resultantes também de ensaios geotécnicos de laboratório e literatura, foram encontrados elevados valores de coesão efetiva (c') e

ângulo de atrito efetivo (ϕ'). A coesão média ficou estimada em 20kPa, enquanto para o ângulo de atrito, o valor de projeto determinado é de 27°.

Em última análise, o índice de vazios em condição de campo (e_o) do material natural é esperado que apresente pouca variação e que seja baixo, devido ao processo de formação do solo. Dessa forma, o valor médio de 0,90 foi adotado como representativo do material. A Tabela 1 consolida dos parâmetros geotécnicos de projeto considerado para o material de solo natural da fundação.

Tabela 1 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos do material de fundação

Material	w_{nat} (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	e_o	c_c	c_s
Fundação	32,0	18,0	20	27	0,90	0,42	0,040

3.2.2 Pilha de Estéril

O material estéril é um material despejado de forma dispersa ao lado das faixas mineradas que dão origem as paredes dos reservatórios. Como é um material resultante das escavações, é comumente encontrado pedregulhos, pedras, material orgânico, pedaços de galhos e nódulos de bauxita. Diferentemente do solo natural, a pilha de estéril é um material bastante heterogêneo.

A heterogeneidade pode ser indicada de diversas formas. A análise dos índices de vazios iniciais (e_o) dos diferentes ensaios realizados e apresentados nos estudos mostrou uma extensa variação de valores. A faixa dos índices de vazios varia de 0,90 a 1,60.

De forma análoga ao comportamento do índice de vazios, a umidade também apresentou valores variando em grande escala, de 25 a 50%. Uma vez que os índices físicos do solo são sempre passíveis de correlações, pode-se esperar que o peso específico natural e seco do material também apresente grande variação de valores.

Essa dispersão dos resultados dificulta a adoção de parâmetros de projeto que representem, mais fielmente possível, o comportamento do material. Dessa forma, valores bastante conservativos foram adotados, a favor da segurança, mas que mesmo assim podem afastar da realidade do material e acarretar impactos nos custos da construção.

O valor da umidade natural (ω_{nat}) e do peso específico natural (γ_{nat}) adotado como representativo desse material foi de 35% e 17,5kN/m³, respectivamente. A variação do índice de vazios levou a adoção de um valor médio de 1,20. O elevado teor de umidade e o elevado índice de vazios indicam comportamento de material saturado e espalhado.

A análise das curvas de compressibilidade permitiu a obtenção dos parâmetros de deformabilidade do material. De forma análoga a realizada para o material da fundação, os valores do índice de compressibilidade (c_c) e índice de descompressão, (*swelling index* c_s) foram, respectivamente 0,30 e 0,03.

Para esse material, devido a sua natureza dispersa e heterogênea, foi considerado um comportamento plástico com endurecimento (*strain hardening*) com forte tendência a contração quanto submetidos a carregamentos rápidos sob condição saturada.

As considerações acima propostas para a pilha de material estéril levaram a estimativa dos respectivos parâmetros drenados: Uma coesão efetiva (c') baixa de 5kPa em oposição a um ângulo de atrito efetivo (ϕ') elevado de 34°.

Um resumo dos parâmetros geotécnicos adotados para o material estéril disperso é apresentado abaixo na Tabela 2.

Tabela 2 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos do material estéril

Material	w_{nat} (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	e_o	c_c	c_s
Estéril	35,0	17,5	5	34	1,20	0,30	0,030

3.2.3 Pilha de Estéril Compactada

O material que compõe as paredes dos reservatórios é a pilha de estéril compactada. A principal expectativa da compactação do material é atenuar o comportamento do material disperso, diminuindo o índice de vazios e controlando a umidade. Como consequência, um aumento na resistência é esperado.

A classificação do material compactado se assemelha ao do material de origem, de forma que ambos podem ser considerados siltes argilosos com areia e presença de pedregulhos. A sensibilidade dos materiais também foi estimada indicando um comportamento siltoso com elevada plasticidade.

Como um dos problemas frequentemente encontrados em campo de obras geotécnicas é a falta do controle de compactação, esse problema será abordado no presente trabalho como uma forma de prever as possíveis consequências. Essa falta de controle de compactação será representada na escolha dos parâmetros de projeto.

Em comparação ao material disperso, a consideração da má compactação acarretou a uma leve redução no teor de umidade e um leve aumento no peso específico seco e natural. O valor médio de umidade natural (ω_{nat}) foi estimado em torno dos 32% e o respectivo peso específico natural (γ_{nat}) em 17,7kN/m³. Uma redução dos valores dos índices de vazios, após a compactação, foi considerada. A média do índice físico foi estimada em 0,95.

Para os índices de compressibilidade (c_c) e de descompressão (*swelling index*, c_s) foram considerados valores próximos daqueles estimados para o material estéril disperso, uma vez que a compactação não foi eficiente. Dessa forma, os valores adotados foram 0,36 e 0,03, respectivamente.

Devido à consideração do nível d'água coincidente com o nível do terreno da fundação de solo natural, o material estéril compactado não está sob o efeito do nível de nível de água freático ou mesmo das linhas piezométricas locais. Foi considerado como critério de projeto que o material estaria sujeito a apenas condições drenadas.

Como parâmetros de resistência drenados, o ângulo de atrito efetivo (ϕ') foi considerado o mesmo do material estéril disperso. Em termos de coesão efetiva (c'), foi considerado um ganho devido à compactação, mesmo que má executada; assim, foi estimada em 15kPa.

Apesar da consideração da má execução da compactação no campo, é esperada uma mudança no comportamento do solo. A pilha de material disperso que esperava-se que apresentasse comportamento contrátil, agora é estimado que apresente comportamento dilatante devido à mudança na sua estrutura.

Ensaio geotécnicos de laboratório e de campo são recomendados durante todo o processo de construção de uma barragem com o objetivo de confirmar as premissas de projeto consideradas. Mudanças nos comportamentos previstos indicam necessidade de revisão de projeto.

Os parâmetros geotécnicos de projeto para o material compactado são apresentados abaixo (Tabela 3).

Tabela 3 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos do material estéril compactado

Material	w_{nat} (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	e_o	c_c	c_s
Aterro	32,0	17,7	15	34	0,95	0,36	0,030

3.2.4 Rejeito de Minério de Bauxita

O comportamento e a natureza dos rejeitos dependem do minério lavrado que deu origem e dos processos de beneficiamento e de refino envolvidos na extração do material com valor econômico. A forma de disposição também influencia no comportamento do material despejado e depois consolidado e deve ser levada em consideração.

A completa caracterização do material requer profundo conhecimento sobre a distribuição granulométrica, densidade e umidade, condutividade hidráulica, características de compressibilidade e resistência ao cisalhamento não drenada. Ainda assim, devido a sua natureza bastante heterogênea e particular, o entendimento do seu comportamento pode ser de difícil compreensão.

A liquefação é o fenômeno relacionado a perda instantânea da resistência ao cisalhamento do material devido ao acréscimo de pressão de água, predominantemente relacionado a solos não coesivos ou granulares os quais tendem a contrair quando submetidos a esforços cisalhantes. A contração é impedida pela velocidade do carregamento e dificultada pela pressão de água (Tinoco, 2017).

As rupturas das barragens das cidades de Mariana e de Brumadinho foram devido ao fenômeno de liquefação associados a elevados níveis de água no interior dos reservatórios. Diante disso, o estudo desse comportamento associados aos rejeitos de minérios vem ganhando interesse e importância.

Como o principal material de estudo desse trabalho é o material estéril compactado, os rejeitos aqui serão abordados de forma simplificada como um material homogêneo e bem-comportado. O potencial a liquefação também não será abordado.

Dessa forma, o rejeito foi considerado um material de cor predominantemente avermelhada com concentração de sólidos de aproximadamente 60% no seu despejo final. Apresenta partículas finas (argila e silte) predominante em relação as partículas grossas (areia e pedregulhos). A plasticidade do material foi estimada em 12%.

A expectativa de que os parâmetros geotécnicos variassem com a profundidade em função do processo de consolidação e de rotatividade de despejo do material também não foi considerada, por simplificação. A uniformidade considerada levou a adoção dos valores de 43% e 18kN/m³ para a umidade natural (ω_{nat}) e o peso específico natural (γ_{nat}), respectivamente. O valor médio dos índices de vazios (e_o) *in situ* foi estimado em 1,35.

Ensaio de adensamento realizados em amostras de boa qualidade permitiram estimar os parâmetros de compressibilidade do material. Para o índice de compressibilidade (c_c) e para o índice de descompressão, (*swelling index* c_s) foram adotados respectivamente 0,20 e 0,015. À medida que o lançamento das camadas de rejeitos vai sendo executado, um comportamento normalmente adensado é esperado.

Em termos efetivos, o ângulo de atrito efetivo (ϕ') adotado foi de 34° e coesão efetiva (c') de 7kPa. A plasticidade do material considerada permitiu adotar um valor de coesão não nulo. Entende-se que a natureza heterogênea do material, somado ao processo de disposição, não permite a adoção de um único parâmetro para coesão e ângulo de atrito que represente o material em todo o reservatório.

De forma análoga a recomendação para o material compactado, ensaios geotécnicos de laboratório e de campo devem ser executados constantemente durante e após o enchimento do reservatório, levando à análise criteriosa dos resultados obtidos e à revisão dos parâmetros de projetos, se necessário.

Ainda a consideração de diferentes parâmetros geotécnicos em diferentes regiões da barragem pode ser proposta de modo a permitir a representação mais fidedigna do comportamento heterogêneo e das diferentes fases de disposição dos rejeitos.

Para fins acadêmicos em nível de graduação somado ao principal interesse de estudo do solo estéril compactado, essas particularidades no material não serão levadas em consideração. A Tabela 4 abaixo consolida dos parâmetros geotécnicos adotados como representativos do material rejeito de minério de bauxita.

Tabela 4 – Consolidação dos parâmetros geotécnicos para o rejeito de bauxita

Material	w_{nat} (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	e_o	c_c	c_s
Rejeito	43,0	18,0	7	34	1,35	0,20	0,015

3.3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.3.1 Seção de Estudo

É comum que diversos reservatórios que constituem uma barragem compartilhem suas paredes. A dispersão do material estéril que compõe a base da barragem, somada a falta do controle de compactação considerada, leva à formação de estruturas frágeis e instáveis.

O perfil abaixo (Figura 8) permite o conhecimento da geometria e dos materiais constituintes da seção idealizada. Foi considerado que a seção representa um perfil típico do reservatório analisado no ponto de maior elevação da crista. O cenário idealizado permite representar a condição mais desfavorável da estrutura.

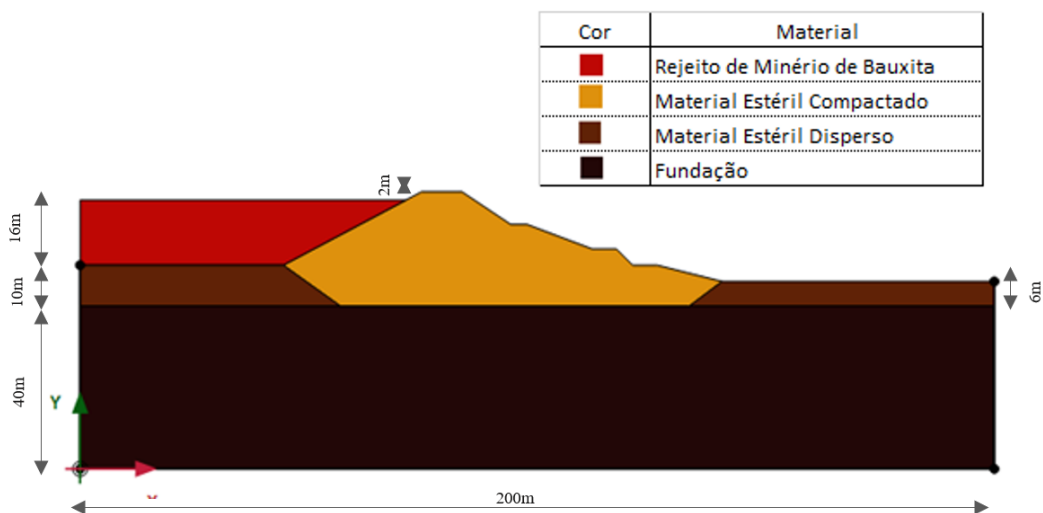


Figura 8 – Perfil típico da seção do dique da barragem em estudo

A camada da fundação foi estimada em 40m de profundidade. A montante do dique de partida, a pilha de estéril apresenta 10m de espessura, enquanto a jusante, apenas 6m. O dique constituído de material compactado parte de uma altura inicial de 28m.

Foi considerada, por simplificação, uma camada linear de 16m de espessura para o rejeito de bauxita. Essa altura permite uma borda livre de 2,0m para casos extremos de elevação do reservatório.

3.3.2 Condições de Contorno

As condições de contorno foram estabelecidas em função dos deslocamentos e podem ser observadas em cinza na Figura 9 abaixo. Os nós da base do reservatório foram prescritos com deslocamentos nulos tanto na direção vertical quando na direção horizontal. Para os nós do contorno da geometria, deslocamentos nulos foram definidos apenas para a direção horizontal.

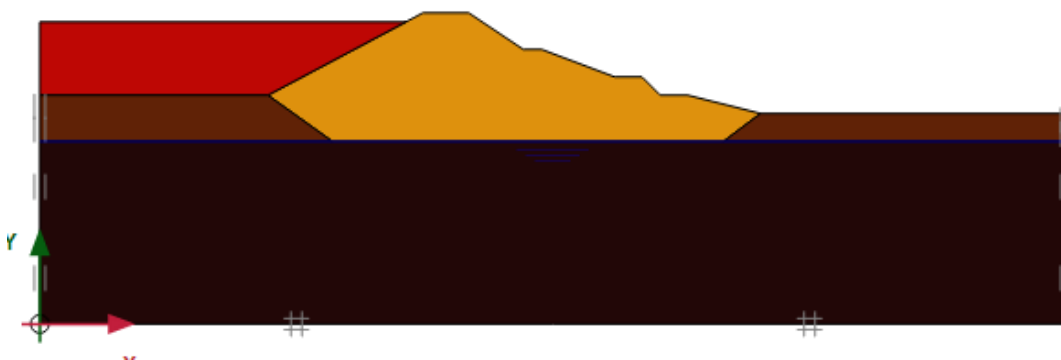


Figura 9 – Representação das condições de contorno na base e na lateral da estrutura

3.3.3 Malha de Elementos Finitos

A geometria da seção submetida a análise foi discretizada em elementos finitos, adotando-se elementos triangulares de 15 nós. A malha foi gerada de forma automática pelo programa com um refinamento médio. Nas áreas de principal interesse (áreas de interface do material da base com o dique, e o próprio dique), a malha foi refinada com a adoção de elementos mais finos. Essa discretização resultou em 7809 nós.

Outros refinamentos de malhas de elementos finitos foram testados e a diferença nos resultados obtidos não foi significativa. Dessa forma, a configuração da malha, conforme indicado na Figura 10, permitiu boa convergência dos resultados esperados e tempo otimizado quando ao rodar as análises.

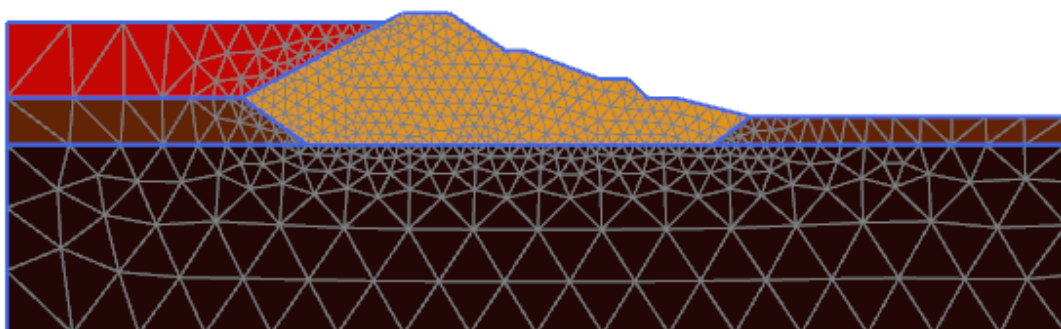


Figura 10 – Estrutura discretizada em elementos médios e malha refinada áreas de interesse.

3.3.4 Condições Iniciais

Depois de gerada a malha, as condições iniciais do problema são definidas. Um único cenário foi proposto. Por simplificação de um trabalho acadêmico em nível de graduação, a condição de final de construção será a única considerada adota do o aterro já completamente compactado e o completo enchimento do reservatório de rejeito de minério de bauxita.

Para a determinação das poropressões, uma condição hidrostática foi considerada. A existência de níveis freáticos locais, que influenciam diretamente o comportamento do solo da fundação e do material estéril, levou à consideração do nível de água coincidente com a superfície do material da base da barragem, representando a situação mais desfavorável.

Assim como os pesos específicos foram considerados constantes e as condições naturais e saturada iguais para cada um dos materiais constituintes do dique, o peso específico da água adotado foi $9,8\text{kN/m}^3$. As tensões verticais efetivas foram determinadas em função desses dois parâmetros.

Foi escolhido um ponto na crista da barragem como sendo um ponto de interesse para a comparação dos resultados obtidos. O ponto foi identificado como A e pode ser visto na Figura 11.

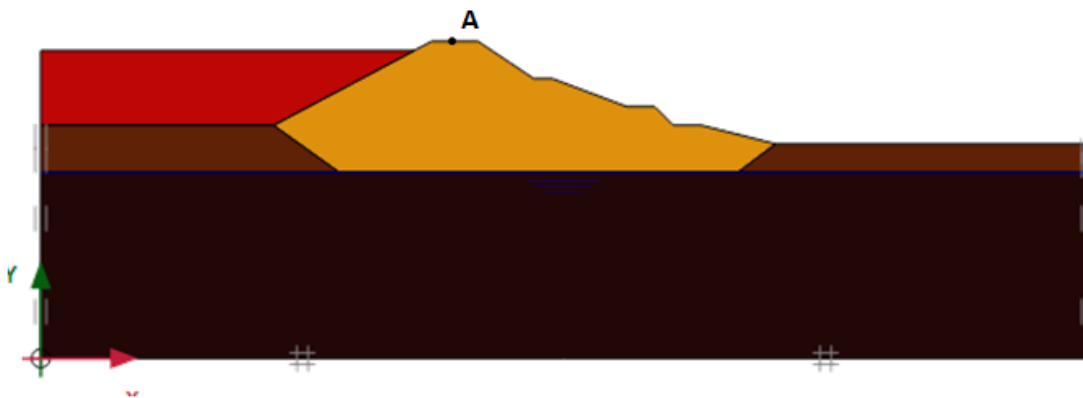


Figura 11 – Identificação do Ponto A em estudo na crista da barragem.

3.3.5 Modelos Constitutivos

O programa computacional PLAXIS 2D possui 6 diferentes modelos constitutivos que permitem representar o comportamento das tensões-deformações dos solos e dos materiais envolvidos. Eles são *Mohr-Coulomb*, *Soft Soil*, *Soft Soil Creep*, *Hardening Soil*, *Jointed Rock* e linear elástico.

Os modelos adotados para a presente análise foram o Mohr Coulomb (MC) e o *Hardening Soil* (HS). Como o principal objetivo do presente trabalho é a análise da integridade do material compactado do corpo da barragem, a escolha de um modelo mais simplificado permite um melhor entendimento em caráter preliminar, uma vez que modelos mais complexos podem levar a resultados equivocados devido às incertezas dos parâmetros de deformabilidade.

Dessa forma, o modelo Mohr Coulomb foi utilizado para representar apenas o material estéril compactado. A análise do comportamento dos materiais da fundação (pilha de estéril e solo natural) assim como do rejeito de minério de bauxita foram feitos com base apenas no modelo *Hardening Soil* (HS). Os parâmetros geotécnicos e as propriedades físicas dos solos foram devidamente apresentados no item 3.2.

Para a definição dos parâmetros de deformabilidade mais adequados, foram analisados os valores de referência provenientes da formulação proposta pelo *software* PLAXIS 2D (PLAXIS 2D, 2019). Os parâmetros obtidos foram comparados com valores encontrados na literatura. A elevada heterogeneidade associadas aos resíduos,

tanto em relação aos rejeitos quanto ao material estéril, dificulta o pleno entendimento do comportamento e a consequente estimativa de parâmetros.

Bhanbhro (2014) apresenta em sua tese características mecânicas de rejeitos suecos, que se aplicam aos rejeitos de forma generalizada. Surarak, *et al* (2012) apresenta parâmetros de rigidez e de resistência aplicados no *Hardening Soil Model* (HSM) para solos argilosos rijos e moles

Com base nos dois estudos citados e em diversos outros trabalhos publicados, entende-se que os valores dos módulos de rigidez estão dentro das faixas de valores encontradas em literatura para *soft soils*. O parâmetro m então foi definido como unitário.

PLAXIS (2019) sugere que, para o caso particular de *soft soils*, os valores de E_{oed}^{ref} e E_{ur}^{ref} podem ser estimados (equações 3.1 e 3.2) com o auxílio do índice de compressão modificado (λ^*) e do índice de descompressão modificado (κ^*), respectivamente.

$$E_{oed}^{ref} = \frac{p^{ref}}{\lambda^*} \quad 3.1$$

$$E_{ur}^{ref} = \frac{2 \times p^{ref}}{\kappa^*} \quad 3.2$$

As equações 3.3 e 3.4 mostram como os respectivos índices modificados podem ser obtidos por meio dos índices de compressão e descompressão (*swelling index*) conhecidos do ensaio de adensamento. As equações levam em consideração também o índice de vazios dos solos. Uma vez que o índice de vazios não é constante, o mesmo é definido pelo índice de vazios inicial.

$$\lambda^* = \frac{Cc}{2,3 \times (1 + e)} \quad 3.3$$

$$\kappa^* = \frac{2 \times Cs}{2,3 \times (1 + e)} \quad 3.4$$

O cálculo dos E_{oed}^{ref} e E_{ur}^{ref} para a pilha de estéril resultou em 1687 e 16867kN/m². Para o material da fundação, os valores encontrados foram 1040 e 10925kN/m² para os respectivos módulos de referência. Os parâmetros encontrados para o rejeito foram respectivamente 2703 e 36033kN/m².

Os valores encontrados foram muito próximos, não só em comparação com os valores de literatura, como também em comparação aos módulos E_{50}^{ref} e E_{oed}^{ref} . Como o comportamento elástico dos materiais está associado a pequenas deformações, é bastante comum a aproximação da reta tangente a reta secante a 50% da tensão desvio máxima. Desse modo, para cada material, os valores para E_{50}^{ref} e E_{oed}^{ref} foram definidos como o mesmo.

A Tabela 5 abaixo consolida os parâmetros utilizados como dados de entrada no programa computacional PLAXIS 2D.

Tabela 5 – Dados de entrada da análise propsta

Material	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ	ν	E (kPa)	m	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)
Estéril	17,5	17,5	5	34	0,00	-	-	1,00	1.700	1.700	17.000
Aterro	17,7	17,7	15	34	0,00	0,30	10.000	-	-	-	-
Rejeito	18,0	18,0	7	34	0,00	-	-	1,00	2.700	2.700	36.000
Fundação	18,0	18,0	20	27	0,00	-	-	1,00	1.000	1.000	11.000

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Deslocamentos Totais

No presente trabalho, entende-se por deslocamentos totais aqueles resultantes da soma vetorial dos respectivos deslocamentos nas direções x (horizontal) e y (vertical). Conforme explicado anteriormente, foi admitido que os deslocamentos na fronteira horizontal estão impedidos tanto na direção horizontal quanto na vertical e que nas fronteiras verticais, impedidos apenas na direção horizontal.

As Figuras Figura 12 e Figura 13 mostram os campos de deslocamentos independentes nas direções x e y, respectivamente. Analisando os deslocamentos na direção x, é possível observar que os maiores deslocamentos estão localizados ao longo de toda a superfície do talude de jusante da estrutura. O ponto A (na crista da barragem) apresentou deslocamento horizontal de 0,25m, aproximando-se bastante dos valores máximos encontrados.

De mesma forma, analisando os deslocamentos apenas na direção vertical nota-se que os deslocamentos mais críticos estão concentrados na região da camada de rejeito mais próxima ao talude de montante e também na crista do dique do reservatório. No ponto A de estudo, o recalque vertical é de 0,08m.

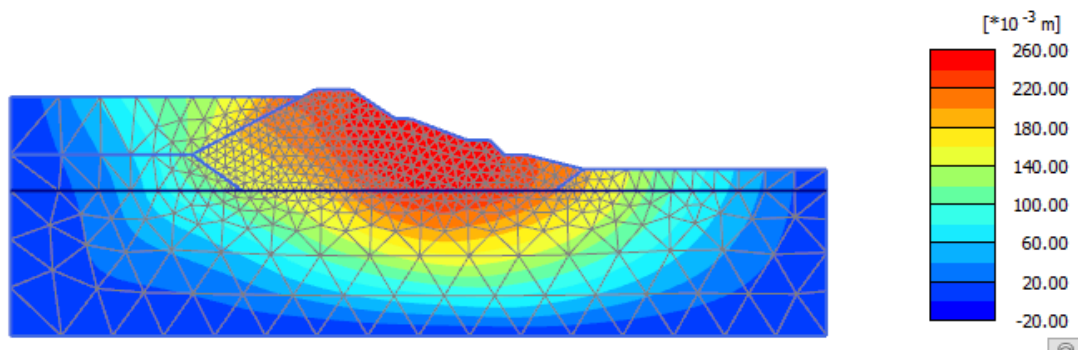


Figura 12 – Campo de deslocamentos resultantes na direção horizontal

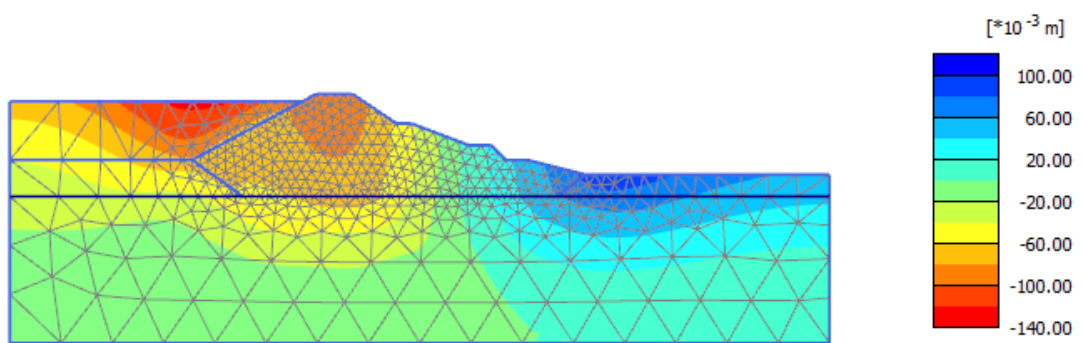


Figura 13 - Campo de deslocamentos resultantes na direção vertical

Os deslocamentos totais (resultantes) estão direcionados para jusante, de modo que a estabilidade da estrutura fica condicionada a essa situação. Os valores dos deslocamentos obtidos estão dentro dos resultados esperados tanto em relação ao projeto quanto em relação ao modelo constitutivo elástico linear perfeitamente plástico utilizado.

A concentração dos deslocamentos na região da crista e no talude de jusante pode ser a principal causa do alívio de tensões observado também na mesma região. A Figura 14 apresenta a malha dos deslocamentos totais e é um grande indicativo da superfície potencial de ruptura.

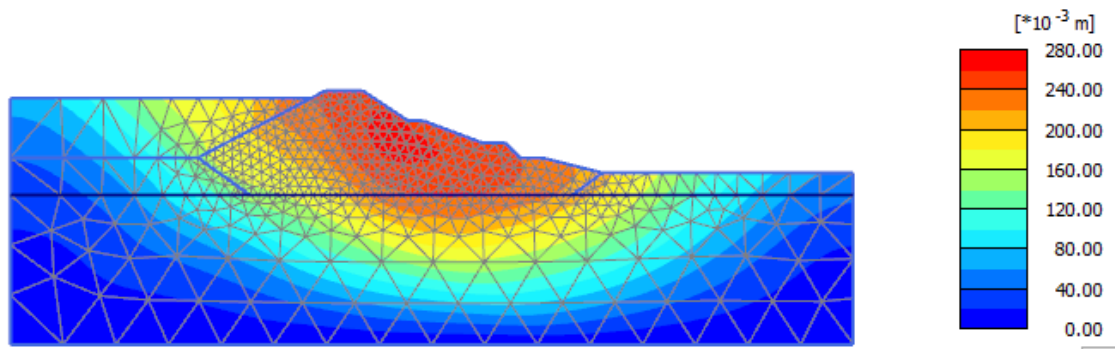


Figura 14 - Campo de deslocamentos resultantes

3.4.2 Tensões Principais Efetivas

Os resultados obtidos para as tensões efetivas podem ser analisados nas Figuras Figura 15 e Figura 16 abaixo. As tensões mais elevadas tenderam a se concentrar na região da fundação da barragem, de forma que os pontos de plastificação podem ser vistos abaixo da camada de rejeito.

É importante ressaltar que o programa PLAXIS 2D utiliza a convenção de sinais conforme a resistência dos materiais, que é diferente da comumente utilizada especialmente pela geotecnia. Dessa forma, valores negativos de tensões indicam compressão, em de acordo com o esperado.

A faixa dos valores das tensões efetivas de compressão variou até aproximadamente 294kN/m² e 737kN/m² para as direções horizontais e verticais, respectivamente. Nas pequenas camadas de solo superficiais e a montante do reservatório pequenas tensões trativas resultantes na direção x foram obtidas da ordem de 2kPa. Apesar da conhecida elevada resistência do solo para esforços de compressão, pequenas tensões de tração não apresentam risco a integridade da estrutura.

A análise das tensões provenientes da carga hidráulica não apresenta grandes novidades, uma vez que a condição de linha hidrostática foi assumida e a condição de fluxo é inexistente. De forma genérica, os valores encontrados cresceram linearmente com a profundidade da lâmina d'água resultando em uma tensão máxima de 454kPa.

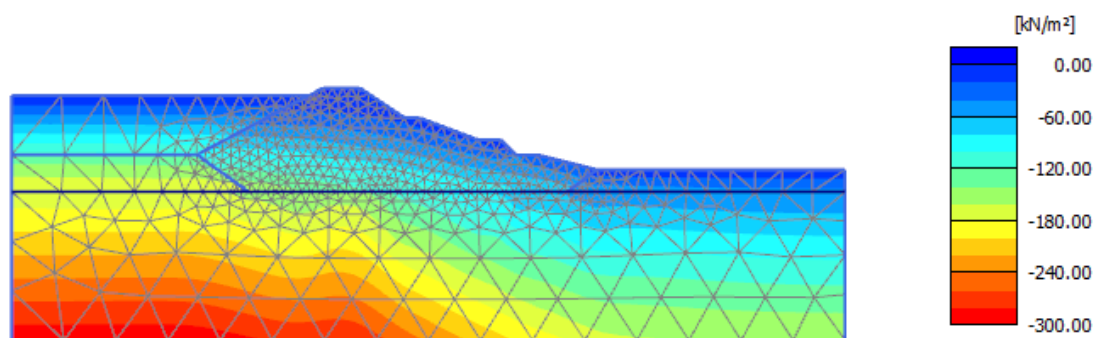


Figura 15 - Campo das tensões efetivas resultantes na direção horizontal

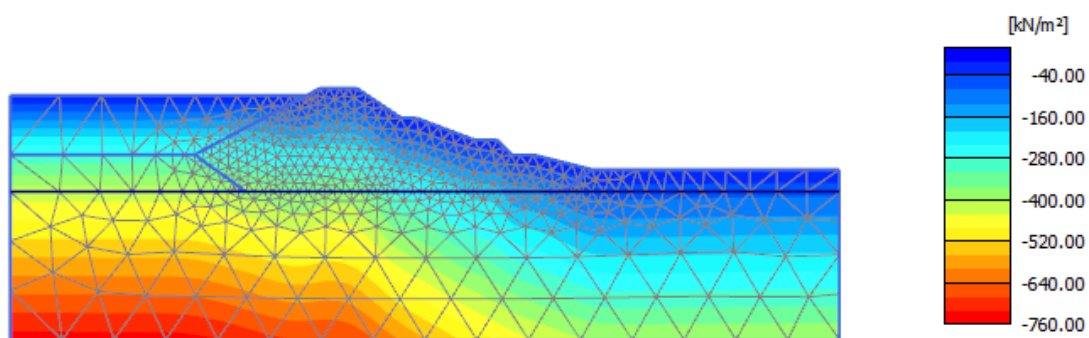


Figura 16- Campo das tensões efetivas resultantes na direção vertical

3.5 COMENTÁRIOS FINAIS

A modelagem realizada com o modelo constitutivo Mohr Coulomb para o material estéril compactado representa uma análise em caráter preliminar. A escolha do modelo simplificado MC devido às incertezas nas estimativas dos parâmetros de deformabilidade mostrou-se pertinente.

O extenso campo de deslocamentos associados a valores absolutos menores previstos na análise numérica pelo modelo Mohr Coulomb é resultado da não consideração da dependência entre rigidez e deformações plásticas e da consideração de um único módulo de elasticidade (deformações elásticas) que represente todo o comportamento do material.

Uma vez que as superfícies potenciais de ruptura estão diretamente relacionadas aos deslocamentos apresentados, entende-se que a situação apresentada pela análise proposta chama atenção. A possível ruptura de toda a área em vermelho localizada no corpo do dique na primeira análise levaria ao colapso da estrutura e o rompimento do reservatório.

Em relação aos campos das tensões efetivas verticais e horizontais previstos, as concentrações dos valores críticos de tensão de compressão foram encontradas na região da fundação de solo natural abaixo da camada espessa de rejeito. Os deslocamentos concentrados na região da crista da barragem provocaram um alívio nas tensões nessa mesma região. Esse alívio foi percebido tanto na direção vertical quanto na direção horizontal.

Um leve arqueamento na região do material estéril a jusante do reservatório foi previsto e pequenos valores de tensões de tração foram identificados nessas áreas. Os valores de tração previstos são insignificantes que podem ser desprezados, mantendo a consideração de que solos apresentam majoritariamente resistência à compressão e resistência à tração nula.

A Figura 17 apresenta a configuração final do cenário analisado em concordância com os valores estimados para os campos de deslocamentos totais e tensões verticais e horizontais.

É possível prever uma redução da elevação da crista a barragem e um leve afundamento da base do aterro. As deformações no corpo da barragem resultantes na direção de montante a jusante condicionam a estabilidade da estrutura. O arqueamento do material estéril da fundação a jusante também pode ser identificado por meio das deformações resultantes acima dos limites das condições iniciais.

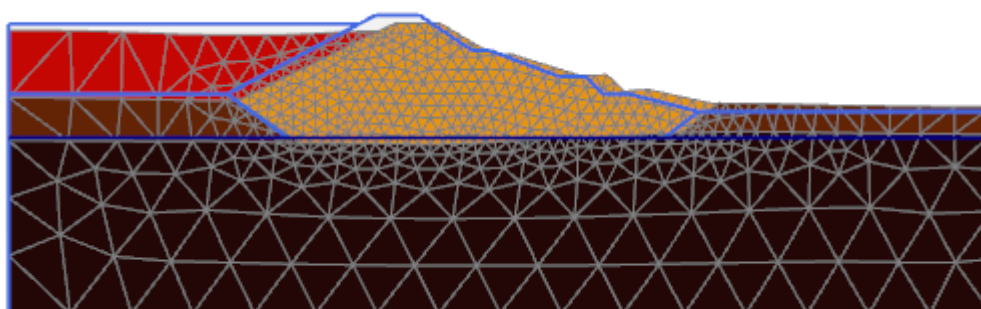


Figura 17 – Representação do cenário final pela modelagem

Enfatiza-se que as considerações aqui apresentadas são em carácter preliminar e simplificadas e tem o objetivo de auxiliar a previsão do comportamento dos materiais ao final da construção. O monitoramento dos recalques e da variação do nível de água por

meio da instalação de piezômetros, medidores de nível de água e inclinômetros devem ser feitos e comparados com os valores previstos.

Da mesma forma, enfatiza-se que campanhas de ensaios geotécnicos de laboratório e de campo devem ser feitas regularmente de modo a confirmar os comportamentos mecânicos previstos para todos os materiais e permitir promover modificações no projeto, se necessárias.

Entende-se que a previsão do comportamento em tensão-deformação por meio de uma análise numérica e a consequente comparação dos valores com a instrumentação e a constante realização de ensaios e campo e de laboratório consistem em boas práticas de engenharia e contribuem para garantir a integridade da estrutura, a segurança das comunidades ao redor e preservação do meio ambiente.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O grande desafio da engenharia está na compreensão do comportamento dos materiais que constituem as obras de arte, tanto durante a fase de construção quanto em final de construção. No caso particular da engenharia geotécnica, o desafio aumenta uma vez que os solos são materiais bastante distintos, com elevada heterogeneidade e comportamento de difícil previsão.

O presente trabalho teve como objetivo a análise do comportamento de um dique de partida de um reservatório de rejeito de minério de bauxita. Por simplificação, o presente trabalho abordou apenas o cenário de final de construção, desconsiderando as etapas construtivas. O crescente desenvolvimento da tecnologia permitiu o desenvolvimento de *softwares* que, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), auxiliam na previsão dos campos de tensões e de deformações.

O programa computacional PLAXIS 2D mostrou-se ser uma ferramenta de fácil interface e de simples entendimento com o auxílio dos manuais e dos tutoriais disponibilizados no próprio *site*. O aprimoramento nos recursos que permitem a modelagem numérica de solos e estruturas forneceu bons resultados nas análises propostas.

A escolha do modelo constitutivo que permita a melhor aproximação do cenário modelado com o cenário real é a dificuldade da análise numérica. O presente trabalho abordou dois diferentes modelos: Mohr Coulomb (MC) e *Hardening Soil* (HS). Os materiais constituintes da fundação da barragem, o estéril lançado e o rejeito de minério de bauxita foram modelados, conforme o *Hardening Soil Model* (HSM).

O material estéril compacto foi modelado apenas com o modelo Mohr Coulomb (MC) em caráter preliminar e simplificado, uma vez que os parâmetros de deformabilidade para o material poderiam acrescentar mais incertezas à análise. A escolha de um ponto crítico A na crista da barragem permitiu a melhor interpretação dos resultados previstos em cada uma das análises.

A representação pelo modelo MC considerou o aterro um material com comportamento linear elástico perfeitamente plástico. A deformabilidade do material está associada somente a um único parâmetro, o módulo de Young. Sob esse comportamento, o material apresentou deformações resultantes bastante reduzidas com

valor absoluto de 0,32m, no ponto A de interesse. A direção resultante do campo dos deslocamentos totais foi no sentido a jusante. As tensões efetivas principais resultantes, tanto na direção horizontal quanto na direção horizontal, concentraram-se na região inferior da fundação abaixo da camada de rejeitos.

A análise pelo modelo HS permitiu a consideração dos diferentes parâmetros de referência da deformabilidade do solo, em função da tensão cisalhante (E_{50}^{ref}), em função da compressibilidade (E_{oed}^{ref}) e em função do descarregamento e da recarregamento (E_{ur}^{ref}). O modelo considera a relação existente entre a rigidez do material e as deformações, de forma que a adequada estimativa dos parâmetros de deformabilidade, que atenda as características geológicas-geotécnicas do material, é o ponto fundamental dessa análise.

Os parâmetros de deformabilidade foram então estimados analisando os dados dos ensaios geotécnicos de laboratório com as formulações propostas pelo próprio programa PLAXIS 2D. Valores encontrados em literaturas diversas foram utilizados como balizadores para a escolha dos respectivos parâmetros dos respectivos materiais.

A falta do controle de compactação é um problema conhecido em campo dessa barragem e a baixa resistência associada à elevada compressibilidade vem proporcionando pequenas rupturas localizadas em outros diques.

O entendimento da existência de deformações elásticas e plásticas nos solos não permite que o mesmo seja retratado de forma adequada por um modelo simplesmente linear elástico perfeitamente plástico. A obtenção de resultados apenas em caráter preliminar é enfatizado.

O presente trabalho tratou apenas da análise do dique de partida de um reservatório de rejeitos considerando a situação final o enchimento do reservatório. Como a estrutura foi considerada em fase de projeto e por se tratar de uma simplificação da situação, o nível de água foi considerado constante assente na elevação do terreno natural. Essas simplificações permitem que algumas sugestões sejam propostas para a continuidade do trabalho.

Os resultados previstos pela modelagem elástica linear perfeitamente plástica são simplificados e não representam o verdadeiro comportamento do material compactado. É sugerido que uma estimativa dos módulos de rigidez do material seja

feita e uma segunda análise com outros modelos constitutivos seja apresentada. Uma comparação dos resultados pode ser apresentada.

A integridade da presente estrutura está diretamente relacionada à qualidade da compactação do material do material estéril componente do corpo do dique do reservatório. Sabendo que a compactação é feita em pequenas camadas em umidade e densidade específicas, a consideração desse processo deve ser levada em conta uma vez que a compactação da camada superior influencia a camada inferior.

O entendimento do comportamento dos rejeitos de minérios de bauxita, e também de todos os outros rejeitos de minérios, por si só já se apresenta como um desafio para a engenharia geotécnica mundial. A consequente tentativa de aproximar o seu comportamento a modelos numéricos acrescenta maiores dificuldades para essas análises. É sugerido também a modelagem do rejeito por meio de outros métodos constitutivos que permitam a comparação dos resultados previstos.

O rompimento das duas barragens de rejeito de minério de ferro em Minas Gérias por liquefação pede que o entendimento do fluxo de água no corpo da barragem seja aprimorado, tanto na fase de construção, quanto na fase de descaracterização. Uma análise de fluxo com o auxílio do programa PLAXIS 2D permite a previsão desse comportamento.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES SAMPAIO, J., CALIXTO DE ANDRADE, M., & JUNQUEIRA BOUDORT DUTRA, A. (2005). *13. Bauxita. Rochas e Minerais Industriais – CETEM*.

ABAL. (2017). *Bauxita no Brasil Mineração Responsável e Competitividade*. Gráfica Mundo.

AIRES, A. D. (2006). *Estudo Tensão-Deformação da Barragem de Irapé*. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

ALMEIDA, M. M. (2010). *Estudo Tensão-Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento. UFOP*. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

ALVES SAMPAIO, J., CALIXTO DE ANDRADE, M., & JUNQUEIRA BOUDORT DUTRA, A. (s.d.). *Capítulo 14 - Bauxita*.

ARAUJO, C. B. (2006). *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro*. COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brail.

AZEVEDO, Á. F. (2003). *Método dos Elementos Finitos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BEDIM, J. (2010). *Estudo do Comportamento Geomecânico de Resíduos de Mineração*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

BEZERRA, D. H. (2018). *Previsão de Recalques Utilizando Metodo dos Elementos Finitos: Exemplo Pratico de Uma Obra de Solo Mole em Santa Cruz, RJ. Escola Politécnica, UFRJ*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

BHANBHRO, R. (Agosto de 2014). *Mechanical Properties of Tailings: Basic Description of a Tailings Material from Sweden*. Sweden: Luleå University of Technology.

BRAGA, A. L. (2016). *Simulação Numérica Acoplada, via MEF, da Construção de um Depósito de Rejeito de Minério de Ferro. UFOP*. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

BRINKGREVE, R., & ENGIN, E. (2014). *Validation of Geotechnical Finite Element Analysis*.

G1. (01 de Março de 2020). *Globo.com*. Fonte: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/10/09/anm-interdita-54-barragens-de-mineracao-sem-estabilidade-no-pais-33-delas-estao-em-minas.ghtml>

HENRIQUE DE OLIVEIRA, G., RIBEIRO RODRIGUES, K., ROMERO PANCOTE, G., & FERNANDO SANCHEZ, P. (Outubro de 2016). *Análise de Tensão e Deformação em Barragens de Enrocamento Visando a Utilização da Geomembrana como Elemento de Impermeabilização*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brsail: COBRAMSEG.

MOREIRA, E. A. (2015). *Comportamento de uma Barragem de Resíduos de Bauxita Durante a Operação de Enchimento*. UERJ. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Obrzud, R. F. (2010). *On the use of the Hardening Soil Small Strain Model in Geotechnical Practice*. Em *Numerics in Geotechnics and Structure*. Elmepress International .

PLAXIS. (2019). *Plaxis Material Models* (Vol. V 20).

PLAXIS. (2019). *Tutorial Manual*.

PUC RIO Certificado Digital 0410284/CA. (s.d.). *Método dos Elementos Finitos*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

PUC RIO Certificado Digital 9824854/C. (s.d.). *Aspectos Gerais Sobre As Bauxitas E Caracterização Geotécnica De Seus Resíduos De Mineração E Processamento*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

ROUT, S., SAHOO, T., & KUMAR DAS, S. (s.d.). *Design of Tailing Dam Using Red Mud*. *Central European Journal of Engineering*.

SILVA FILHO, E. B., ALVES, M. C., & DA MOTTA, M. (2007). *Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas Características, Disposição e Aplicações Alternativas*. *Revista Matéria*, v12 n2, 322 - 338.

SOTO, J. G. (2017). *Estabilidade 2D e 3D de Taludes de Grande Altura em Mina a Céu Aberto*. PUC Rio. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

SOUZA, M. M. (2013). *Estudo Para O Projeto Geotécnico Da Barragem De Alto Iraní*, Sc. Escola Politécnica, UFRJ. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

SURARAK, C., LIKITLERSUAN, S., WANATOWSKI, D., BALASUBRAMANIAM, A., OH, E., & GUAN, H. (Setembro de 2012). *Stiffness and Strength Parameters for Hardening Soil Model of Soft and Stiff Bangkok Clays*. Soils and Foundations.

TI, K. S., B. K. HUAT, B., NOORZAEI, J., JAAFAR, S., & SEE SUW, G. (2009). *A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application*. EJGE.

TINOCO, C. P. (2017). *Caracterização Geomecânica de um Rejeito de Mineração de Bauxita*. São Paulo, São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo.

VALERIUS, M. B. (Setembro de 2014). *Cadastro e Análise do Potencial de Riscos das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás*. Brasília, Distrito Federal, Brasil.

VILLAR, L. F. (Agosto de 2002). *Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.