



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



**JOSYMAR CARLOS AUGUSTO ARAÚJO E SÁ**

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE *MOHR COULOMB* E *HARDENING SOIL* NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE SOLOS MOLES SOB CARREGAMENTO**

**OURO PRETO - MG**

**2024**

**JOSYMAR CARLOS AUGUSTO ARAÚJO E SÁ**

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE *MOHR COULOMB* E *HARDENING SOIL* NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE SOLOS MOLES SOB CARREGAMENTO**

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

**Orientador:** Prof. Dr. Daniel Silva Jaques (DEMIN/EM/UFOP)

**OURO PRETO - MG**

**2024**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S111c Sá, Josymar Carlos Augusto Araújo e.  
Comparação entre os modelos de Mohr Coulomb e Hardening Soil na análise do comportamento tensão-deformação de solos moles sob carregamento. [manuscrito] / Josymar Carlos Augusto Araújo e Sá. - 2024.  
44 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Daniel Silva Jaques.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Geotecnia. 2. Deformações e tensões - Modelos constitutivos. 3. Solos argilosos - Solo mole. I. Jaques, Daniel Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.131.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Josymar Carlos Augusto Araújo e Sá

### COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE *MOHR COULOMB* E *HARDENING SOIL* NA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE SOLOS MOLES SOB CARREGAMENTO

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

Aprovada em 05 de Abril de 2024

#### Membros da banca

Dr. Daniel Silva Jaques - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. José Fernando Miranda - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. Tatiana Barreto dos Santos - Universidade Federal de Ouro Preto

Daniel Silva Jaques, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/04/2024



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Silva Jaques, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/04/2024, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0701595** e o código CRC **2F56D253**.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha mãe, Darci, e ao meu pai, José Miguel, cujo apoio incondicional foi fundamental para minha jornada acadêmica.

Agradeço também à minha família, pelo constante suporte e incentivo ao longo dos anos.

Aos amigos que fiz durante minha trajetória na UFOP, meu sincero agradecimento por compartilharmos momentos de aprendizado, desafios e conquistas.

Ao professor Daniel, expressei minha sincera gratidão pela orientação durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço à Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto pelo ambiente acadêmico inspirador e propício ao crescimento intelectual.

## RESUMO

No contexto geotécnico, especialmente naquele voltado para a construção de estruturas como barragens para armazenamento de rejeitos ou água, assim como pilhas de estéreis e ou rejeitos, a fundação em solos moles apresenta grandes desafios em relação à construção, operação e estabilidade dessas estruturas. Diante desse contexto, a previsão do comportamento dessas estruturas e da resposta da fundação, seja ela mole ou não, diante das cargas aplicadas, é favorecida pela aplicação de modelos numéricos, utilizando análises de tensão-deformação como uma abordagem adequada para essa avaliação. Este estudo aborda uma situação hipotética em que se planeja construir um aterro de barragem sobre uma camada de solo mole. Para tanto, foram elaborados dois modelos numéricos com características idênticas em termos de litologia, geometria do maciço e etapas construtivas. Nesse sentido, a camada de aluvião mole presente na fundação foi analisada por dois modelos constitutivos diferentes: Mohr-Coulomb e Hardening Soil. Embora os parâmetros geológico-geotécnicos tenham sido obtidos pelos mesmos ensaios, a metodologia de cálculo diferiu devido às características distintas dos parâmetros utilizados por cada modelo constitutivo. Além disso, realizou-se a verificação e calibração desses parâmetros por meio da simulação numérica de ensaios de adensamento, validando os resultados para ambos os modelos constitutivos. Todas as análises foram conduzidas no software PLAXIS 3D, contemplando modelagem, simulação dos ensaios geotécnicos e análise de tensão-deformação. A simulação dos ensaios de adensamento apresentaram resultados semelhantes no que tange a deformação final observada, todavia a linearidade observada na deformação referente a amostra caracterizada pelo modelo constitutivo de Mohr Coulomb não se fez presente no ensaio numérico cuja amostra foi caracterizada com o modelo constitutivo Hardening Soil. Os resultados das etapas construtivas do barramento, em termos de deslocamentos, apresentaram grandes semelhanças nas deformações finais obtidas em ambos os modelos. No entanto, divergências foram observadas nas dimensões dos deslocamentos na primeira etapa de construção do maciço, destacando uma diferenciação nos modelos constitutivos, especialmente em relação à linearidade dos módulos de elasticidade presentes no modelo de *Mohr-Coulomb*, ausentes no *Hardening Soil*.

Palavras-chave: Tensão-deformação; Solo mole; Modelos Constitutivos; *Mohr Coulomb*; *Hardening Soil*.

## **ABSTRACT**

In the geotechnical context, especially those aimed at the construction of structures such as dams for storing tailings or water, as well as piles of waste and/or tailings, foundations in soft soils present major challenges in relation to the construction, operation and stability of these structures. In this context, the prediction of the behavior of these structures and the response of the foundation, whether soft or not, in the face of applied loads, is favored by the application of numerical models, using stress-strain analysis as an appropriate approach for this assessment. This study addresses a hypothetical situation in which a dam embankment is planned to be built on a layer of soft soil. To this end, two numerical models were developed with identical characteristics in terms of lithology, massif geometry and construction stages. In this sense, the soft alluvial layer present in the foundation was analyzed using two different constitutive models: Mohr-Coulomb and Hardening Soil. Although the geological-geotechnical parameters were obtained through the same tests, the calculation methodology differed due to the distinct characteristics of the parameters used by each constitutive model. Furthermore, these parameters were verified and calibrated through numerical simulation of consolidation tests, validating the results for both constitutive models. All analyzes were conducted using PLAXIS 3D software, including modeling, simulation of geotechnical tests and stress-strain analysis. The simulation of the consolidation tests showed similar results in terms of the observed final deformation, however the linearity observed in the deformation referring to the sample characterized by the Mohr Coulomb constitutive model was not present in the numerical test whose sample was characterized with the Hardening Soil constitutive model. . The results of the construction stages of the bus, in terms of displacements, showed great similarities in the final deformations obtained in both models. However, divergences were observed in the dimensions of the displacements in the first stage of construction of the mass, highlighting a differentiation in the constitutive models, especially in relation to the linearity of the elastic moduli present in the Mohr-Coulomb model, absent in Hardening Soil.

**Keywords:** Stress-strain; Soft soil; Constitutive Models; Mohr Coulomb; Hardening Soil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Formatos de malhas empregados nas análises de elementos finitos.....	21
Figura 2: Configurações de malha no PLAXIS 3D.....	22
Figura 3: Curvas de tensão deformação .....	23
Figura 4: Gráficos de comportamentos $\sigma' \times \varepsilon$ .....	24
Figura 5: Superfície de escoamento Mohr Coulomb.....	25
Figura 6: Superfície de escoamento HS .....	26
Figura 7: Tipos de recalques.....	28
Figura 8: Tipos de instabilizações .....	29
Figura 9: Seção típica da estrutura .....	30
Figura 11: Faseamento das análises .....	35
Figura 12: Ensaio numérico de adensamento .....	37
Figura 13: Fase 1 - Deformações totais – Mohr Coulomb .....	38
Figura 14: Pontos de plastificação – Fase 1 - Mohr Coulomb .....	38
Figura 15: Fase 2 - Deformações totais – Mohr Coulomb .....	39
Figura 16: Pontos de plastificação – Fase 2 - Mohr Coulomb .....	39
Figura 17: Fase 3 - Deformações totais – Mohr Coulomb .....	40
Figura 18: Pontos de plastificação – Fase 3 - Mohr Coulomb .....	40
Figura 19: Fase 1 - Deformações totais – Hardening Soil.....	41
Figura 20: Pontos de plastificação – Fase 1 – Hardening Soil .....	42
Figura 21: Fase 2 - Deformações totais – Hardening Soil.....	42
Figura 22: Pontos de plastificação – Fase 2 – Hardening Soil .....	43
Figura 23: Fase 3 - Deformações totais – Hardening Soil.....	44
Figura 24: Pontos de plastificação – Fase 3 – Hardening Soil .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensões aplicadas em fase de carregamento .....	33
Tabela 2: Tensões aplicadas em fase de descarregamento .....	33
Tabela 3: Descrição dos modelos numéricos analisados .....	34
Tabela 4: Descrição dos materiais presentes nas análises .....	34
Tabela 5: Descrição das etapas construtivas dos modelos numéricos .....	35
Tabela 6: Parâmetros de rigidez dos materiais – Mohr Coulomb .....	36
Tabela 7: Parâmetros de rigidez dos materiais – Hardening Soil .....	36
Tabela 8: Deformações máximas observadas nos modelos numéricos analisados .....	45

## LISTA DE SIGLAS

HS: Hardening Soil

APP: Área de Preservação Permanente

SPT: *Standard Penetration Test*

K: Matriz de rigidez

$\sigma'$ : Tensão normal efetiva

$\sigma$ : Tensão normal

$\sigma_1$ : Tensão principal maior

$\sigma_1'$ : Tensão principal maior efetiva

$\sigma_2$ : Tensão principal intermediária

$\sigma_2'$ : Tensão principal intermediária efetiva

$\sigma_3'$ : Tensão principal menor efetiva

$\sigma_3$ : Tensão principal menor

$\sigma$ : Coeficiente de Poisson

E: Módulo de Elasticidade

$\epsilon_p$ : Deformação Plástica

$\epsilon_e$ : Deformação Elastica

K0: Coeficiente de Empuxo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
2.1. OBJETIVO GERAL.....	19
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
3.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	20
3.2. MODELOS CONSTITUTIVOS .....	22
3.2.1. Mohr Coulomb .....	23
3.2.2. Hardening Soil - HS .....	25
3.3. SOLOS MOLES E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS.....	26
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
4.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	30
4.2. PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS.....	30
4.2.1. Mohr Coulomb .....	31
4.2.2. Hardening Soil.....	32
4.3. SIMULAÇÃO DE ENSAIO NUMÉRICO .....	33
4.4. ANÁLISE-TENSÃO DEFORMAÇÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	33
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
5.1. PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS.....	36
5.2. SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO .....	36
5.3. MODELO 1 – MORH COULOMB .....	37
5.3.1. Fase 1 .....	37
5.3.2. Fase 2.....	38
5.3.3. Fase 3.....	39
5.4. MODELO 2 – HARDENING SOIL .....	41

5.4.1.	Fase 1 .....	41
5.4.2.	Fase 2.....	42
5.4.3.	Fase 3.....	43
5.5.	COMPARATIVO DOS MODELOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO .....	44
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das principais atividades econômicas desenvolvidas no Brasil, tendo em vista os grandes depósitos minerários sendo explorados atualmente. É conhecido que essa atividade gera um grande volume de material, que, a priori, não pode ser aproveitado economicamente. Nesse sentido, devido à otimização das operações e a crescente demanda por bens minerais, nota-se uma crescente no número de estruturas construídas para armazenamento desses materiais sem valor econômico, tais como estéreis e rejeitos, se tornando, nesse contexto, uma peça fundamental para o funcionamento das operações mineiras. Além disso, a proximidade desses empreendimentos com centros urbanos ou a presença de Área de Preservação Permanente (APP) nos locais possíveis de sediar tais construções podem tornar tais áreas restritas ou, ainda, as características relacionadas à fundação nas alternativas locais podem não apresentar os atributos ideais para construção dessas estruturas.

Dentre as condições que não são favoráveis para a construção de estruturas geotécnicas cita-se a presença de solo mole no local de construção da pilha ou barragem. De maneira geral, para a construção dessas estruturas é realizada a limpeza do terreno, concomitantemente a remoção de material mole que porventura possa estar presente, contudo, nem sempre é possível realizar a completa, ou parcial remoção de materiais moles, devido às limitações operacionais ou espessura muito grande dessa camada com baixa capacidade de suporte.

Isto posto, nas ocasiões em que se optar por realizar construções de qualquer natureza sobre solos moles, incluindo estruturas geotécnicas, torna-se imperativo a correta caracterização desse material, principalmente quando se realizam análises de estabilidade, seja por método de equilíbrio limite ou por elementos finitos. Tal afirmação se deve ao fato de que devido à baixa capacidade de suporte de solos moles é esperado que haja recalques nessas estruturas em suas fases construtivas, de operação ou até de fechamento da estrutura. Além disso, devido à baixa resistência ao cisalhamento as características constitutivas desse material podem provocar algum tipo de falha dessa estrutura afetando a segurança do empreendimento.

Hoje em dia é amplamente utilizado o modelo constitutivo elasto-plástico perfeito, tal qual o de Mohr Coulomb para caracterização de solos em análises de estabilidade e tensão-deformação, contudo, esse modelo apresenta limitações no que tange a representação do comportamento desse material quando submetido a carregamentos e demais condições de contorno, cabendo considerações quanto a modelos constitutivos não tão populares, mas que, a priori, representam o comportamento de solos de maneira mais próxima a realidade tais como hardening soil, soft soil e Cam Clay.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo geral comparar dois modelos constitutivos quanto à sua representatividade do comportamento tensão-deformação em um solo mole sob aterro.

### **2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Como objetivos específicos, este trabalho compreende:

1. Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos modelos numéricos utilizados para a representação do comportamento tensão-deformação dos solos sujeitos a carregamentos;
2. Simular ensaios geotécnicos para a avaliação de parâmetros constitutivos dos modelos Mohr Coulomb e Hardening Soil;
3. Realizar e validar análises de tensão-deformação por meio de modelos constitutivos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

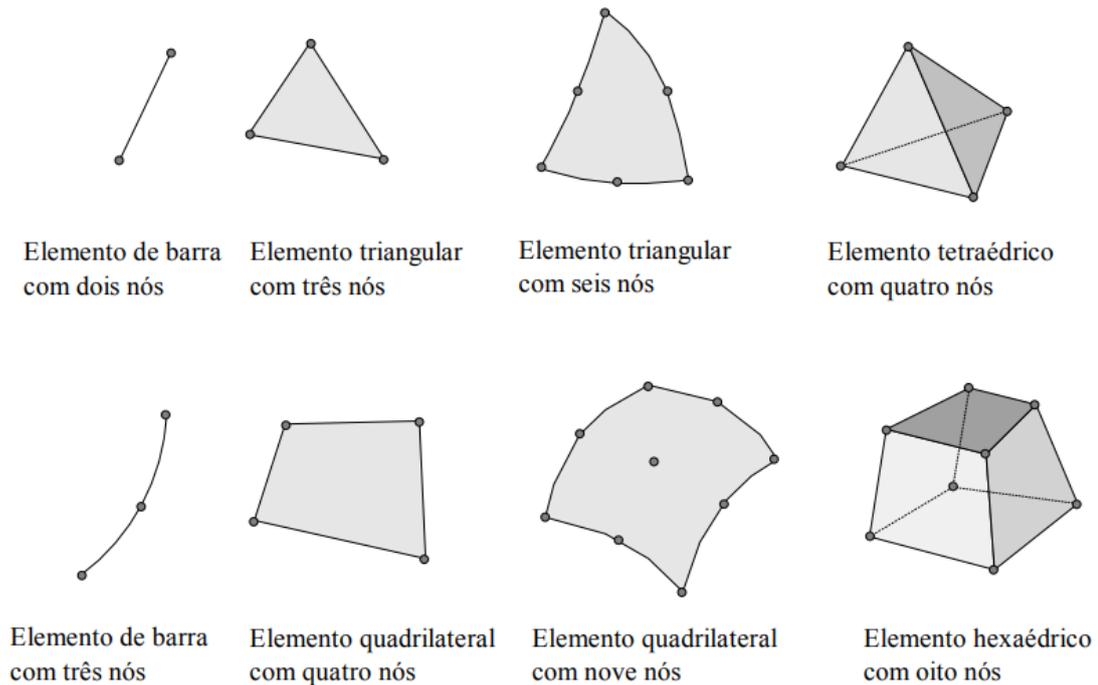
A utilização de modelos de análises computacionais na geotecnia tem um papel crucial no entendimento e na representatividade de comportamento de solos e estruturas, no âmbito da mineração para construção e gerenciamento de estruturas tais como: barragens de rejeito e de água, pilhas de estéril e rejeito filtrado. O comportamento dessas estruturas com o meio que a circunda pode ser analisado e embasado através do método de elementos finitos ou de equilíbrio limite (Silva, 2011).

O método de Equilíbrio Limite é mais conhecido e utilizado, uma vez que foi desenvolvido primeiro e impulsionado pelo avanço computacional. Em contrapartida, ainda conforme (Silva, 2011), o método de elementos finitos tem se tornado uma boa opção devido à sua maior proximidade com a realidade. Essa maior representatividade é decorrente do método de cálculo que avalia as tensões e deformações dos materiais, tal como ocorre na realidade.

Tavares e Padilha (1998) lembra que o método de elementos finitos consiste na divisão de um corpo rígido com dimensões conhecidas, em elementos mais simplificados e contínuos, tais como nós, onde cada nó desse grupamento de elementos responde à estímulos de uma única entidade. Ainda conforme o mesmo autor, essa discretização traz vantagens quando se trata de calcular deslocamento ou outras variáveis de forma individualizada, mas, ainda assim, uma entidade tem influência sobre outra, seja em modelos bidimensionais ou tridimensionais. Ademais, o conjunto desses nós interligados formam uma malha, que pode ter diferentes formatos, tais como: triangulares e quadrangulares. Consonante isso, Souza (2003) entende que tais formulações de geometrias para as malhas tinham a aplicação das formas geométricas dependentes das dimensões, sejam elas em uma, duas ou três dimensões, além do tipo de problema representado no modelo.

Aliado a isso, Souza (2003) descreve que a densidade dos nós é diretamente proporcional a precisão dos resultados e ao esforço computacional necessário para realizar a análise. Ademais, para melhor entendimento, a Figura 1 mostra alguns dos formatos das malhas disponíveis em *softwares* que utilizam desses métodos.

Figura 1: Formatos de malhas empregados nas análises de elementos finitos



Fonte: Souza (2003)

Para Tavares e Padilha (1998), existem alguns passos que são cruciais para uma solução numérica que envolva o método de elementos finitos, quais sejam:

- Divisão do sistema em elementos finitos;
- Para realização dos cálculos da matriz de rigidez  $[K(m)]$  referente a cada elemento finito;
- Para o sistema global, realizar a determinação da matriz de rigidez  $[K]$ ;
- Para o sistema global, realizar a determinação dos vetores das cargas aplicadas ao modelo;
- Para o sistema global, estabelecer o sistema de equações de movimentos;
- Resolução para cada uma das variáveis do sistema, tais como: deslocamento, velocidade, deformação, distribuição das tensões.

O PLAXIS 3D, é um programa que emprega o método de elementos finitos para realização de análise tensão-deformação, cujo único tipo de malha disponível é a triangular, sendo possível a geração de malhas com diferentes densidades de nós, em que o usuário pode optar pelo refinamento da malha em diferentes porções individualizadas do modelo. As

configurações básicas da malha disponibilizada pelo PLAXIS 3D podem ser visualizadas na Figura 2.

Figura 2: Configurações de malha no PLAXIS 3D

The image shows a software dialog box titled "Mesh options". It contains several settings for mesh generation:

- Element distribution:** A radio button is selected, and a dropdown menu shows "Medium".
- Expert settings:** An unselected radio button. Below it are two input fields: "Relative element size" with the value "1.000" and "Element dimension" with the value "0.2291".
- Enhanced mesh refinements:** A checked checkbox. Below it are two input fields: "Global scale factor" with the value "1.200" and "Minimum element size factor" with the value "5.000E-3".
- Swept meshing:** An unselected checkbox.

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Cancel".

Fonte: PLAXIS 3D – Manual de Referência (2023)

Para Brinkgreve e Engin (2013) o método de elementos finitos traz dificuldades no que tange a modelagem, que por sua vez, podem levar a modelos não representativos da realidade e, conseqüentemente, a conclusões e tomadas de decisões errôneas. Estes autores salientam que essas dificuldades são ainda mais perceptíveis quando se trata de modelos de cunho geotécnico, pois, solos são materiais de caráter não linear e heterogêneos, dificultando ainda mais a sua representatividade. Em vista disso, é certo dizer que todo modelo se trata de uma simplificação da realidade, uma vez que por mais complexo que seja o modelo, ele não será capaz prever e representar todo o comportamento do solo e, como resultado, da estrutura analisada.

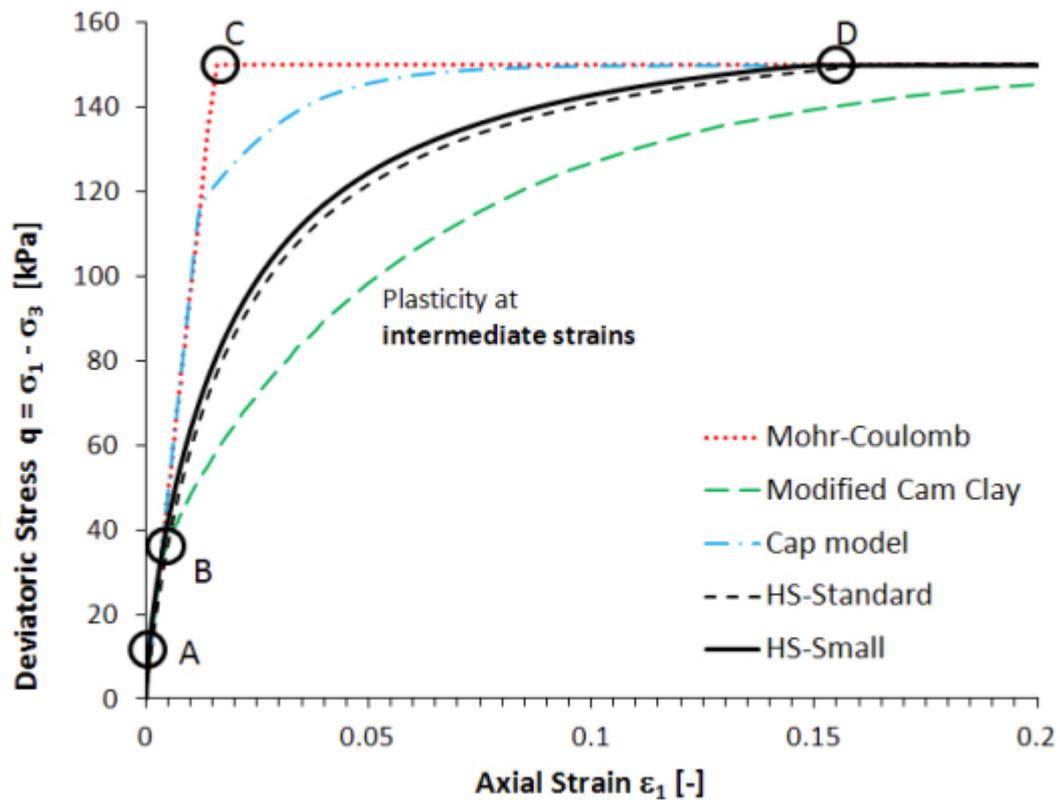
### 3.2. MODELOS CONSTITUTIVOS

Os modelos constitutivos de solos são representações matemáticas que descrevem o comportamento mecânico dos solos em diversas condições de carregamento. No âmbito geotécnico, conforme Wani (2018), os solos são constituídos por grãos que interagem entre si e tem seus vazios preenchidos por ar ou água, nesse sentido, esse material pode ser caracterizado com um comportamento complicado de ser representado, pois apresentam

comportamento não linear quando submetidos às diferentes condições de carregamento, tendo também dependência direta com o tempo e a velocidade da aplicação das forças.

Modelos constitutivos diferentes modelam de maneira diferenciada a deformação do solo quando submetidos a tensões. Nesse sentido, é apresentado na Figura 3 a representação da deformação quando o solo caracterizado por diferentes modelos constitutivos é submetido a tensões.

Figura 3: Curvas de tensão deformação



Fonte: Rafal F. Obrzud e Andrzej Truty (2018)

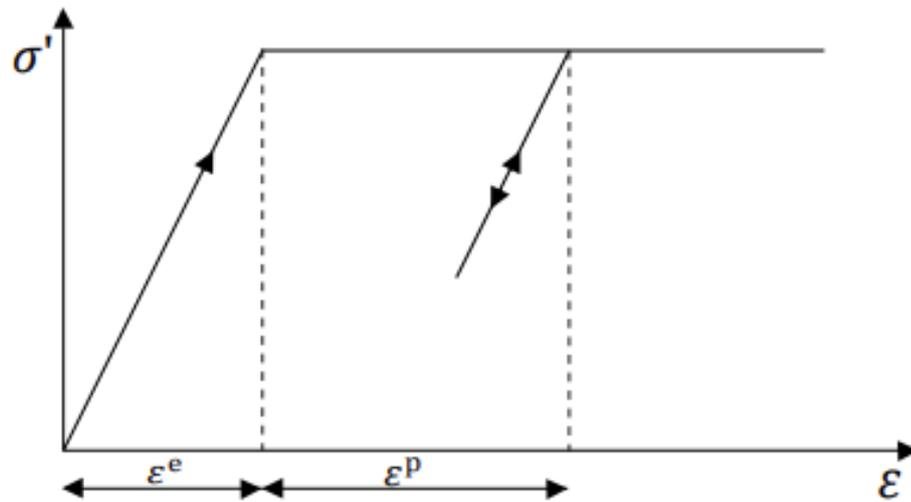
Para melhor entendimento, são apresentados nos próximos tópicos uma breve descrição quanto aos modelos constitutivos abordados na elaboração deste trabalho.

### 3.2.1. Mohr Coulomb

Conforme Ti, Jaafar e Sew (2019), o modelo de Mohr Coulomb pode ser classificado como um modelo linear perfeitamente plástico, se tornando uma alternativa para representar o comportamento de primeira ordem do solo. Isso se deve ao fato de que o modelo considera que as tensões principais são independentes umas das outras, indicando que o modelo não leva em consideração as interações entre as tensões principais.

Para Wani (2018), o modelo de Mohr Coulomb se comporta de maneira linear na fase elástica, ou seja, aquela deformação que pode ser revertida caso as tensões cessem. Posteriormente, existe uma região que é chamada de perfeitamente plástica, ou seja, deformações permanentes. Essas considerações podem ser observadas na Figura 4.

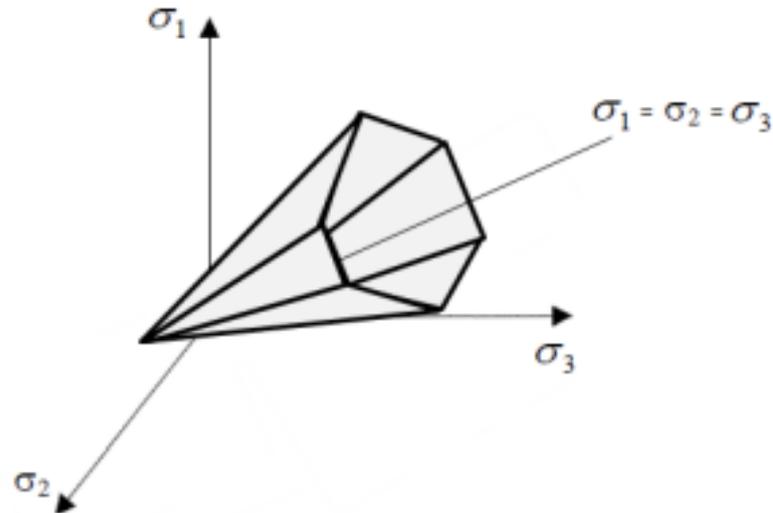
Figura 4: Gráficos de comportamentos  $\sigma' \times \varepsilon$



Fonte: PLAXIS 3D – Modelos de Materiais (2023)

Faria (2022), ressalta que para o modelo de Mohr Coulomb a superfície de escoamento no espaço tridimensional, com base nas tensões principais e seguindo as equações de plastificação e de ruptura deste modelo, resulta em uma pirâmide transversal hexagonal. Tal fato demonstra a linearidade e a não codependência com as dimensões das deformações plásticas. As considerações realizadas podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5: Superfície de escoamento Mohr Coulomb.



Fonte: Faria (2013)

### 3.2.2. Hardening Soil - HS

Conforme Obrzud e Truty (2018), os solos sendo um material multifásico, apresenta comportamento complexo com não linearidades elásticas e plásticas, incluindo deformações plásticas irreversíveis. Ainda reiteram que a rigidez deste material varia conforme a intensidade das forças aplicadas, podendo contrair ou expandir-se. Além disso, as deformações são afetadas pelo histórico de carga e pelo tempo decorrido (Obrzud e Truty, 2018).

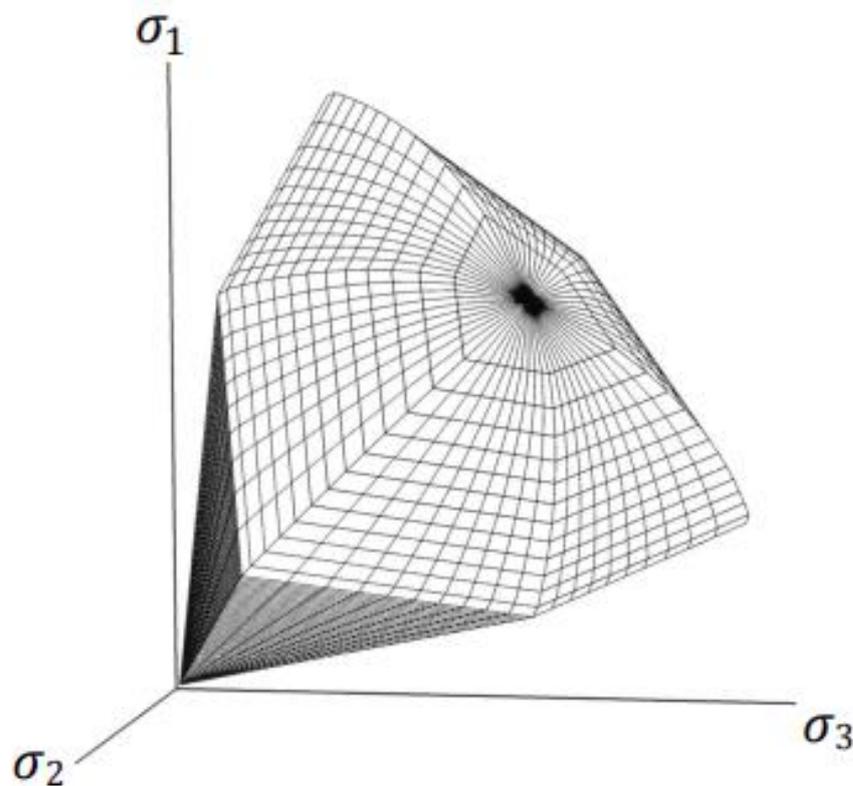
Conforme Kok (2009), o modelo HS traz considerações quanto ao endurecimento do solo quando carregado e descarregado, nesse sentido, esse modelo considera o endurecimento do material de duas formas. A primeira, denominada endurecimento por fricção, é aplicada para simular a deformação plástica de cisalhamento durante o carregamento desviatório primário. Em contraste, o endurecimento por compressão é empregado para representar a deformação volumétrica plástica associada à compressão primária. Esses modos podem ser categorizados como endurecimento por cisalhamento, utilizado para modelar deformações irreversíveis decorrentes do carregamento desviatório primário, e endurecimento por compressão, empregado para representar deformações plásticas irreversíveis provenientes da compressão primária no carregamento do oedométrico e no carregamento isotrópico.

Wani (2018) destaca um outro ponto importante que reside na relação entre os módulos de elasticidade, a qual é sensível à profundidade. Nesse contexto, ressalta-se que os módulos

de rigidez experimentam um aumento proporcional à medida que a profundidade aumenta. Essa dinâmica torna-se um elemento central na compreensão do comportamento do material em análise, evidenciando a interdependência entre a profundidade e a variação dos módulos de rigidez.

Por fim, cabe dizer que a superfície de escoamento deste modelo não é fixa, algo que se opõe ao modelo de Mohr Coulomb. Na Figura 6 é apresentada a superfície de escoamento representada em um ambiente tridimensional.

Figura 6: Superfície de escoamento HS



Fonte: PLAXIS 3D – Manual de Materiais (2023)

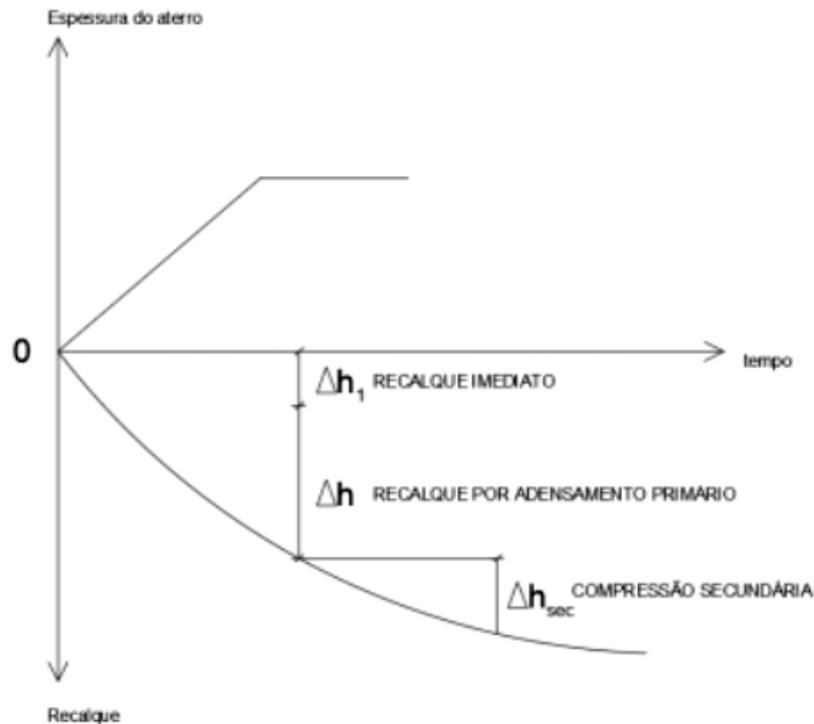
### 3.3. SOLOS MOLES E ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

Conforme Massad (2010) apud OLIVEIRA (2021, p.7), são caracterizados como solos moles aqueles que apresentam dentre suas características uma alta compressibilidade e pouca resistência à penetração. De forma geral, esses materiais são constituídos majoritariamente por argilas moles ou areias de consistência fofa. Ainda, conforme os mesmos autores, a formação dessas camadas de solos se dá através da deposição de material através de transporte fluviais ocorrendo em regiões de alagamentos e várzea de rios, assim como em regiões marinhas ou que já tiveram essa característica. Ademais, os mesmos autores relembram que esses materiais

podem apresentar grande variedade granulométrica, mas também podem guardar grandes variedades de cores e espessuras, variando de 1 a 7 metros para camadas de origem fluvial e acima de 70 metros para solos de origem marinha. Tais fatos, implicam fortemente na heterogeneidade das características geológico-geotécnicas desses materiais, fazendo-se necessária a caracterização individualizada em cada situação.

Dentro do escopo dos solos moles e muito moles, a norma NBR 6484 - Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT – Método de ensaio, cuja última atualização data do ano de 2020, estabelece critérios específicos para essa classificação. A referida norma sugere que, materiais considerados como solos moles compreendem aqueles compostos por argilas e silte argiloso com um índice de resistência à penetração de 3 a 5 golpes em um ensaio de *Standard Penetration Test*. Por outro lado, a categoria de solo muito mole é atribuída quando o índice de resistência à penetração é inferior a 2 golpes no mesmo ensaio. Além disso, conforme Moraes (2020), esses materiais ainda estão sujeitos ao fenômeno de adensamento, devido à baixa permeabilidade que este tipo de solo apresenta, podendo levar a ocorrência de recalques futuros, ou seja, movimentações em períodos posteriores à aplicação do carregamento. Tal colocação vai de encontro ao disposto por Massad (2010) apud OLIVEIRA (2021, p.8), o qual pontua que as deformações podem ocorrer de maneira rápida, ou seja, concomitantemente a aplicação da carga, ou em períodos posteriores. Ainda, Massad (2010) apud OLIVEIRA (2021, p.7) pontuam que a discretização dos eventos de adensamento a longo prazo ocorre através de dois processos distintos, quais sejam: adensamento primário e adensamento secundário. Conforme os autores, o adensamento primário é marcado pela alteração de volume do material, resultante da saída da água dos vazios desse material. Em contrapartida, o adensamento secundário, caracterizado não pela expulsão de água dos vazios do solo, mas sim como uma consequência da tensão efetiva provocada pela carga aplicada. Essas colocações são ilustradas na Figura 7.

Figura 7: Tipos de recalques



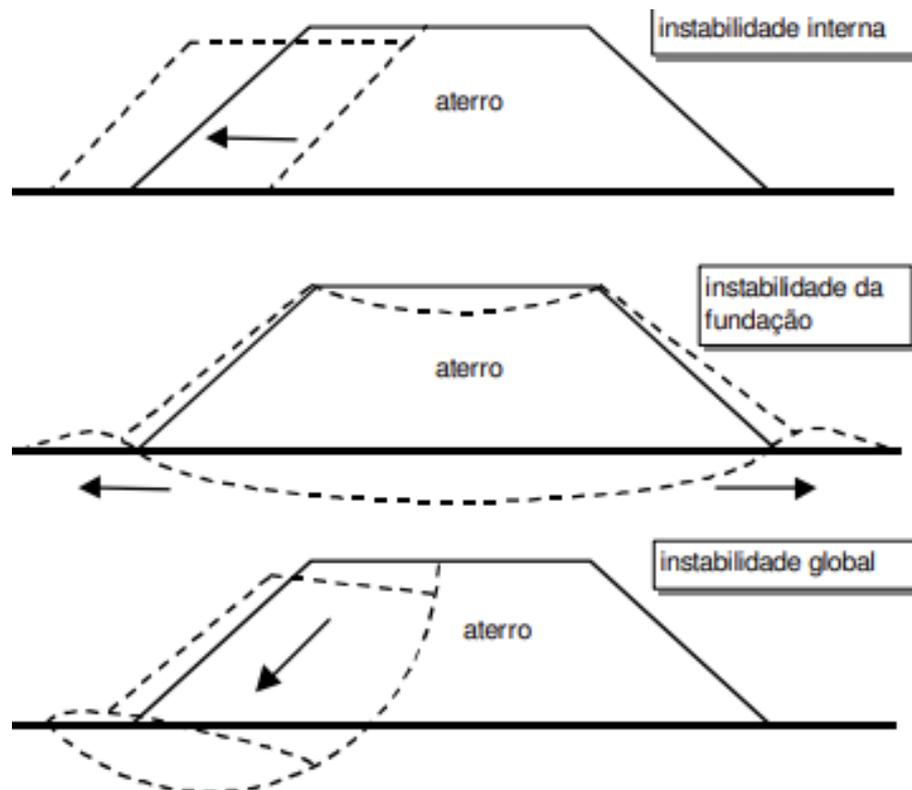
Fonte: Oliveira (2021)

Segundo Almeida (1996) apud PERONI (2003, p.8), tais considerações são relevantes quando se trata da construção de aterros sobre este tipo de material, pois, uma vez que esses materiais são altamente compressíveis podem trazer recalques diferenciais nas estruturas e, porventura, instabilizações que podem ocorrer a partir de três mecanismos.

- Instabilização interna de aterros: refere-se a problemas que afetam exclusivamente a massa do aterro, sem envolver a estabilidade da fundação subjacente.
- Instabilização externa em aterros: está relacionada a problemas que impactam a estabilidade da fundação subjacente, afetando a estrutura como um todo.
- Instabilização global em aterros: refere-se a problemas que afetam a estabilidade geral da estrutura, envolvendo tanto a fundação quanto o aterro.

Tais considerações podem ser visualizadas na Figura 8.

Figura 8: Tipos de instabilizações



Fonte: Almeida (1996)

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia para elaboração deste trabalho foi dividida em três etapas distintas. A primeira delas está relacionada à definição dos parâmetros geológico-geotécnicos das unidades litológicas constituintes da fundação do local, bem como do aterro da barragem e do rejeito disposto. A segunda parte está relacionada com a simulação de ensaios numéricos de adensamento com o aluvião mole caracterizado com os modelos Mohr Coulomb e Hardening Soil. Já a terceira parte, se refere à forma como foi realizada a análise de tensão deformação, incluindo os métodos de cálculo e as condições de contorno impostas.

Contudo, reitera-se que, mesmo se tratando de um problema hipotético os dados geológico-geotécnicos foram obtidos através de investigações e ensaios realizados em campo e em laboratório para execução de outro empreendimento. Todavia, não é apresentado neste trabalho os dados brutos das investigações e, tampouco, os resultados dos ensaios de laboratório realizados devido a confidencialidade dos dados.

#### 4.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

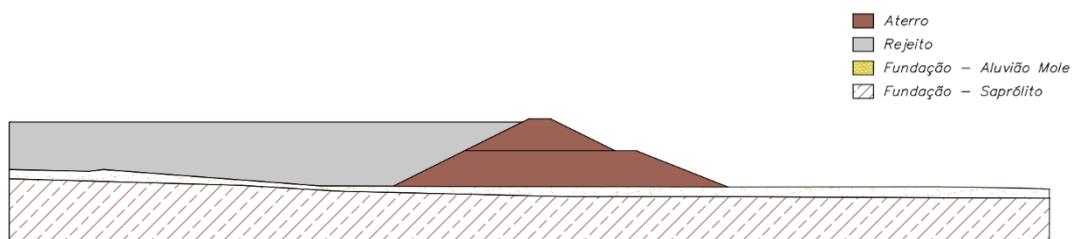
A situação problema descrita neste trabalho refere-se a um cenário hipotético no qual se analisa a viabilidade da construção de uma barragem para a contenção de rejeitos composta por um aterro construído em duas etapas.

Nesse sentido, o local disponível para essa construção se trata do final de um vale, onde o ponto mais alto da estrutura coincide com o fundo do vale. Nesse contexto, o fundo do vale é constituído por uma camada de solo mole, classificada como aluvião, com cerca de 5 metros de espessura, a qual se faz presente por toda a área de jusante, montante e sob o local de construção do barramento.

Já a estrutura projetada é caracterizada por se tratar de um barramento sendo construído por aterro compactado com altura máxima da estrutura é 20 m. Os taludes da estrutura apresentam uma inclinação de, aproximadamente, 2,5H:1V, ou 21°. Por fim, em uma condição em que o reservatório da estrutura estiver completamente preenchido, ele terá uma cota 2 metros abaixo da crista do barramento.

A Figura 9 apresenta a seção mais alta da estrutura com o arranjo final da mesma, com o reservatório em sua capacidade máxima. Além disso, é possível visualizar os horizontes geológicos e seus respectivos contatos.

Figura 9: Seção típica da estrutura



Fonte: Autor

#### 4.2. PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

De forma a definir os parâmetros imputados no programa para caracterização das unidades geológicas, bem como do aterro e rejeito, fez-se necessária a definição dos parâmetros de resistência e compressibilidade dos materiais.

Isso posto, é apresentado a seguir a metodologia utilizada para definição dos parâmetros geológico-geotécnicos a depender do modelo constitutivo.

#### 4.2.1. Mohr Coulomb

O primeiro parâmetro a ser determinado foi o Módulo de Elasticidade do material, uma propriedade mecânica que avalia a rigidez dos materiais, estabelecendo uma relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante. No modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, é tratado como um valor fixo, embora seja conhecido que na prática seu valor varie conforme o nível de tensão ao qual o solo está sujeito.

Em seguida, foi definido o Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), que expressa a relação entre a deformação lateral e a deformação axial. Esse parâmetro é útil para compreender a capacidade do solo de suportar cargas sem deformações excessivas. O Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é uma medida adimensional que correlaciona as deformações em duas dimensões de um material isotrópico e homogêneo.

Considerando o modelo de Mohr-Coulomb, os valores de  $E$  correspondentes a cada tensão ensaiada foram determinados a partir dos gráficos tensão-deformação de dois ensaios triaxiais. Após uma análise gráfica, a Equação 1 foi empregada para calcular o módulo de elasticidade com base nas tensões e deformações obtidas. A média dos resultados encontrados em cada ensaio foi utilizada para definir o módulo de elasticidade de cada material.

Apresenta-se abaixo as equações utilizadas para definição dos parâmetros, as quais são derivadas da Lei de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 1}$$

- $E$ : Módulo de elasticidade;
- $\sigma$ : Tensão avaliada;
- $\varepsilon$ : Deformação obtida.

Já para o coeficiente de Poisson, este foi determinado através da relação elástica ilustrada na Equação 2.

$$\nu = \frac{K0}{1 + K0} \quad \text{Equação 2}$$

- $\nu$ : Coeficiente de Poisson;
- $K0$ : Coeficiente de empuxo.

#### 4.2.2. Hardening Soil

O Hardening Soil é um modelo constitutivo não linear hiperbólico, e considera que o solo apresenta um comportamento dependente do nível de tensão confinante ao qual está submetido, resultando em aumento da rigidez e, conseqüentemente, deformações mais realistas. Nesse sentido, os parâmetros determinados para o modelo constitutivo Hardening Soil são apresentados a seguir.

Parâmetros de rigidez:

- $E_{50}^{ref}$ : Rigidez secante em ensaio triaxial drenado padrão (pode ser considerado  $E_{50}^{ref} \cong 1 \cdot E_{oed}^{ref}$ );
- $E_{oed}^{ref}$ : Rigidez de descarregamento;
- $m$ : expoente de dependência entre rigidez e níveis de tensão, em que para o presente estudo utilizou-se o valor de 1.

Para a definição dos módulos de elasticidade da aluvião mole, interpretou-se os mesmos dois ensaios triaxiais utilizados para definição dos parâmetros do modelo de Mohr Coulomb. A partir do gráfico de tensão-deformação do ensaio triaxial e em posse dos dados de coesão e ângulo de atrito, encontrou-se os valores de  $E$  correspondente a cada tensão ensaiada. No PLAXIS 3D, a partir da inserção do  $E_{50}^{ref}$  no software, os demais módulos de elasticidade são calculados.

Para tanto, fez-se uso da formulação apresentada abaixo, a qual foi obtida no manual de materiais da Bentley Systems (2023).

$$E = E_{50}^{ref} * \{(c * \cos\varphi - \sigma' * \sin\varphi)/(c * \cos\varphi + pref * \sin\varphi)\}^m \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

- $E = E_{50}^{ref}$  quando  $\sigma' = pref$ ;
- $pref$  a tensão de referência;
- $\varphi$ : Ângulo de atrito;
- $c$ : Coesão.

#### 4.3. SIMULAÇÃO DE ENSAIO NUMÉRICO

De forma a verificar e calibrar os parâmetros definidos para caracterização do aluvião mole, tanto para o modelo constitutivo de Mohr Coulomb quanto para o Hardening Soil, foi utilizado a ferramenta *SoilTeste* que simula ensaios de laboratório em ambiente numérico, que também integra o software PLAXIS 3D.

O *SoilTest*, integrado ao PLAXIS 3D, representa uma ferramenta avançada para a simulação numérica de diversos ensaios de laboratório, como triaxiais drenados e não drenados, além de ensaios de adensamento, entre outros. Além de modelar e auxiliar na compreensão do comportamento do solo, o *SoilTest* oferece a possibilidade de calibrar parâmetros, permitindo a comparação dos resultados obtidos nos ensaios numéricos com ensaios realizados em laboratório. Essa capacidade de ajuste contribui significativamente para aprimorar a precisão das simulações, alinhando-as mais realisticamente aos dados experimentais.

Dessa forma, os corpos de prova numéricos foram submetidos às mesmas condições de carregamento e descarregamento, compreendendo tensões apresentadas na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Tensões aplicadas em fase de carregamento

Condição	Tensão (kN/m <sup>2</sup> )									
Carregamento	0	12	25	50	100	200	400	800	1600	3200

Tabela 2: Tensões aplicadas em fase de descarregamento

Condição	Tensão (kN/m <sup>2</sup> )			
Descarregamento	800	200	50	12

#### 4.4. ANÁLISE-TENSÃO DEFORMAÇÃO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para representação da estrutura e apresentação dos materiais de fundação, inicialmente, fez-se a construção de uma seção típica de barragem de rejeitos, a qual representa a geometria da estrutura em sua conformação final, bem como do terreno natural. Além disso, fez-se a construção das unidades geológicas estabelecendo os contatos entre as camadas.

De forma a possibilitar a comparação entre os resultados frente aos modelos constitutivos adotados para caracterização do aluvião mole, utilizou-se de dois modelos distintos para realização das análises, sendo as fases descritas na Tabela 5 idêntica à ambos os modelos. A Tabela 3 mostra os modelos numéricos elaborados e suas respectivas descrições.

Tabela 3: Descrição dos modelos numéricos analisados

Modelo	Descrição
Modelo 1	Todos os materiais foram caracterizados utilizando o modelo constitutivo Mohr Coulomb, incluindo as unidades geológicas, aterro e rejeito
Modelo 2	Todos os materiais foram caracterizados utilizando o modelo constitutivo Mohr Coulomb, com exceção do aluvião mole, o qual foi caracterizado com o modelo constitutivo Hardening Soil

Os materiais que estão presentes nas análises realizadas são descritos na Tabela 4.

Tabela 4: Descrição dos materiais presentes nas análises

Material	Descrição
Aterro	Material argilo-siltoso compactado que constitui o maciço da barragem
Rejeito	Material arenoso desaguado no reservatório proveniente da usina de beneficiamento
Fundação – Saprolito	Material de fundação constituído por material silte arenoso com presença de pedregulhos
Fundação – Aluvião Mole	Material localizado abaixo do maciço da barragem. Caracteriza-se por ser uma material silto-argiloso cuja consistência é mole.

Para desenvolvimento deste estudo foi utilizado o software PLAXIS 3D, que faz uso de uma malha de elementos finitos para realização das análises, cujo método de cálculo foi o de consolidação. O método de consolidação permite modelar o comportamento de estruturas geotécnicas durante processos de consolidação. Ao aplicar cargas e simular o processo de consolidação, o software utiliza o conceito de tensão-deformação para avaliar as respostas do solo, considerando sua rigidez e deformabilidade. A malha de elementos finitos permite dividir uma geometria complexa em elementos mais simples para facilitar a análise, tornando possível obter informações detalhadas sobre o comportamento estrutural em cada nó do modelo. O método de cálculo de consolidação permite ainda realizar análises do desenvolvimento de

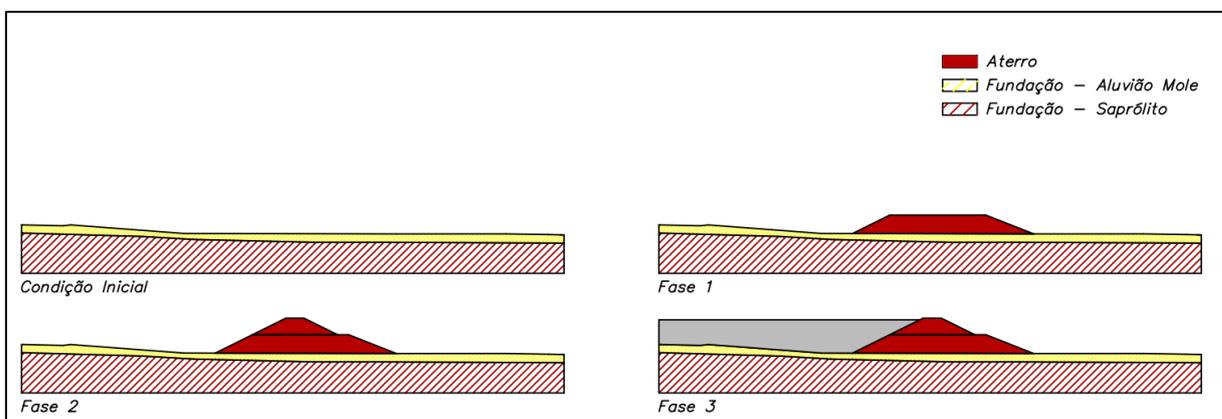
tensões, deformações, dissipação do excesso de poropressão em função do tempo, bem como verificação de zonas de plastificação.

Considerando que este trabalho não visou comparar métodos construtivos de barragens, os volumes que representam o maciço têm uma geometria retangular, com cerca de 10 metros de altura. No contexto da construção do aterro no modelo numérico, o processo ocorreu de maneira gradual. A construção do modelo no ambiente do PLAXIS 3D foi dividida em 4 fases distintas, as quais são descritas na Tabela 5, enquanto a Figura 10 ilustra o sequenciamento da análise.

Tabela 5: Descrição das etapas construtivas dos modelos numéricos

Etapa	Descrição
Inicial	Terreno em sua conformação natural. A linha freática se encontra a, aproximadamente, 2 metros abaixo da superfície do terreno.
Fase 1	Construção da primeira bancada do barramento, cuja duração é de 100 dias. A linha freática se encontra a 2 metros abaixo da superfície do terreno natural.
Fase 2	Construção da segunda bancada do barramento, cuja duração é de 100 dias. A linha freática se encontra a 2 metros abaixo da superfície do terreno natural.
Fase 3	Enchimento do reservatório, com linha freática passando pelo maciço e se mantendo a 1 metro da superfície do terreno natural à jusante do barramento.

Figura 10: Faseamento das análises



Fonte: Autor

## 5. RESULTADOS

São apresentados nos tópicos seguintes os resultados obtidos na determinação dos parâmetros geológico-geotécnicos, seguido dos resultados dos ensaios numéricos realizados e, por fim, os resultados obtidos nos modelos numéricos da construção do barramento.

### 5.1. PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros de rigidez segundo o modelo de Mohr-Coulomb, e a Tabela 7 os parâmetros segundo o modelo HS.

Tabela 6: Parâmetros de rigidez dos materiais – Mohr Coulomb

Material	Modelo Constitutivo	E' (MPa)	$\nu$
Aterro - Maciço inicial	Mohr-Coulomb	40,00	0,32
Rejeito	Mohr-Coulomb	1,00	0,33
Fundação - Saprolito de Xisto Nova Lima	Mohr-Coulomb	120,00	0,24
Fundação – Aluvião Mole	Mohr-Coulomb	6,00	0,3

Tabela 7: Parâmetros de rigidez dos materiais – Hardening Soil

Material	Modelo Constitutivo	E'50	Eoed	Eur
Aluvião Mole	Hardening Soil	3000	3000	9000

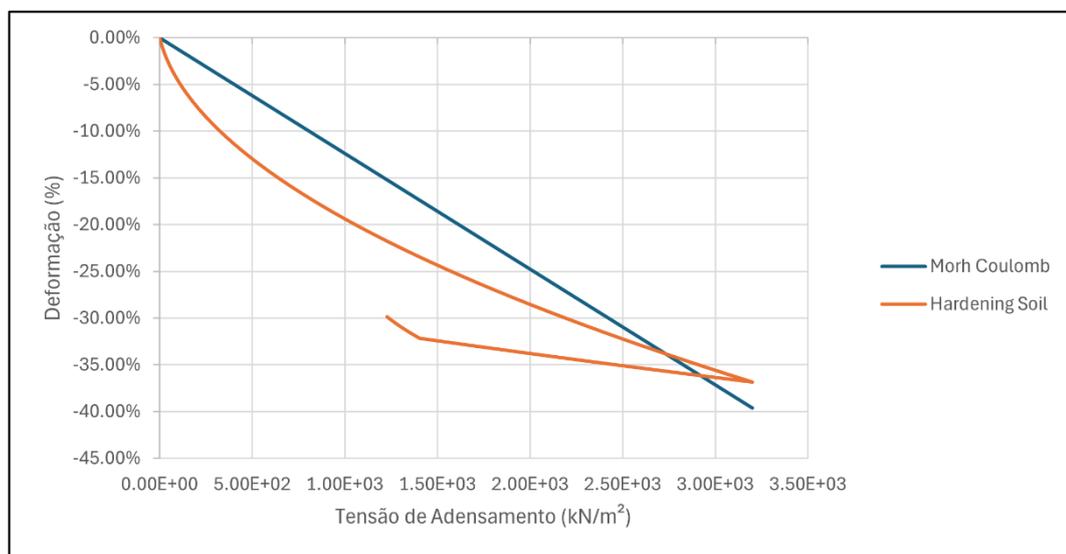
### 5.2. SIMULAÇÃO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO

No que se refere à simulação do ensaio numérico de adensamento, a Figura 11 apresenta o comportamento das amostras numéricas submetidas ao ensaio no ambiente do PLAXIS 3D. Como resultado observou-se uma grande semelhança quanto à deformação máxima alcançada nos ensaios. Nesse sentido, na amostra caracterizada pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, observou-se uma deformação máxima de 39,6% do comprimento total do corpo de prova, enquanto na análise com o modelo constitutivo de Hardening Soil registrou-se uma

deformação máxima de 36,8%, indicando uma relativa similaridade de comportamento quanto às deformações máximas alcançadas, apesar das diferenças dos modelos constitutivos.

Entretanto, nota-se que a curva de adensamento da amostra caracterizada com o modelo de Mohr-Coulomb exibe um comportamento linear, ao passo que essa linearidade não é observada na amostra caracterizada com o modelo de Hardening Soil. Além disso, somente no modelo de Hardening Soil foi possível observar a curva de descarregamento do solo, sugerindo uma possível limitação na representação do comportamento do solo pelo modelo de Mohr-Coulomb frente a carregamentos cíclicos.

Figura 11: Ensaio numérico de adensamento



Fonte: Autor

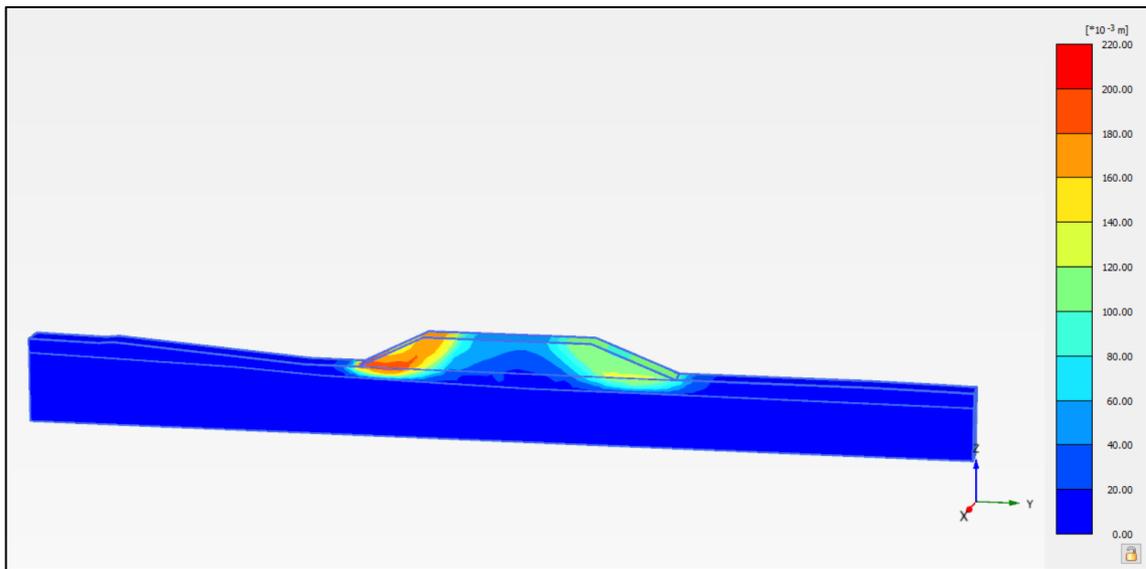
### 5.3. MODELO 1 – MORH COULOMB

Os tópicos seguintes apresentam os resultados obtidos nas análises de construção do aterro.

#### 5.3.1. Fase 1

A fase 1 compreende a construção da primeira bancada do maciço da barragem, que, conforme apresentado na Figura 12, a aplicação dessa carga no modelo ocasionou em deslocamentos máximos de aproximadamente 0,20 metros. Além disso, observa-se que os deslocamentos se concentram, majoritariamente, no contato entre a aluvião mole e na porção a montante do maciço. Para mais, os deslocamentos ocorreram na direção horizontal e na vertical, sendo 0,20 metros e 0,15 metros, respectivamente.

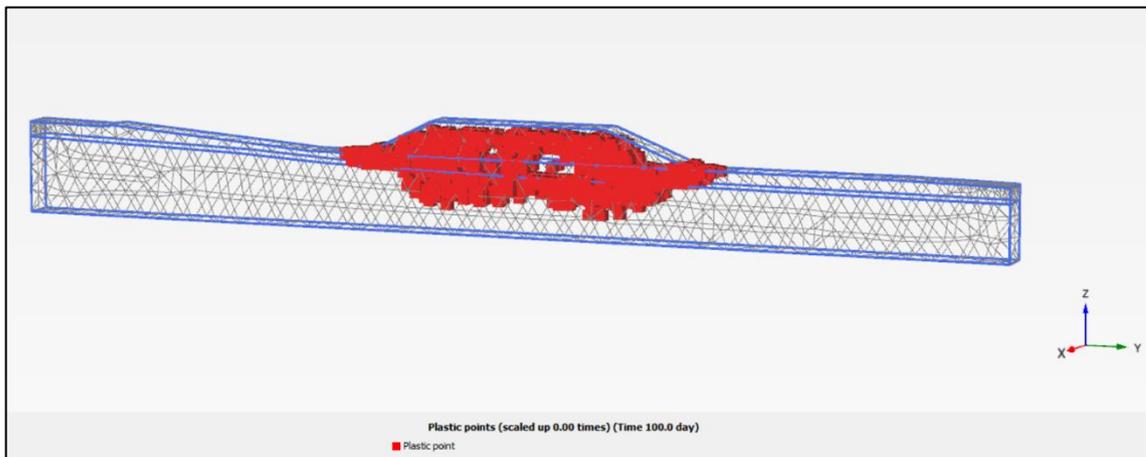
Figura 12: Fase 1 - Deformações totais – Mohr Coulomb



Fonte: Autor

Ademais, outra observação pertinente a ser feita é referente ao comportamento plástico do modelo, que conforme apresentado na Figura 13 observou-se pontos de plastificação no aterro, bem como em pontos abaixo dele.

Figura 13: Pontos de plastificação – Fase 1 - Mohr Coulomb



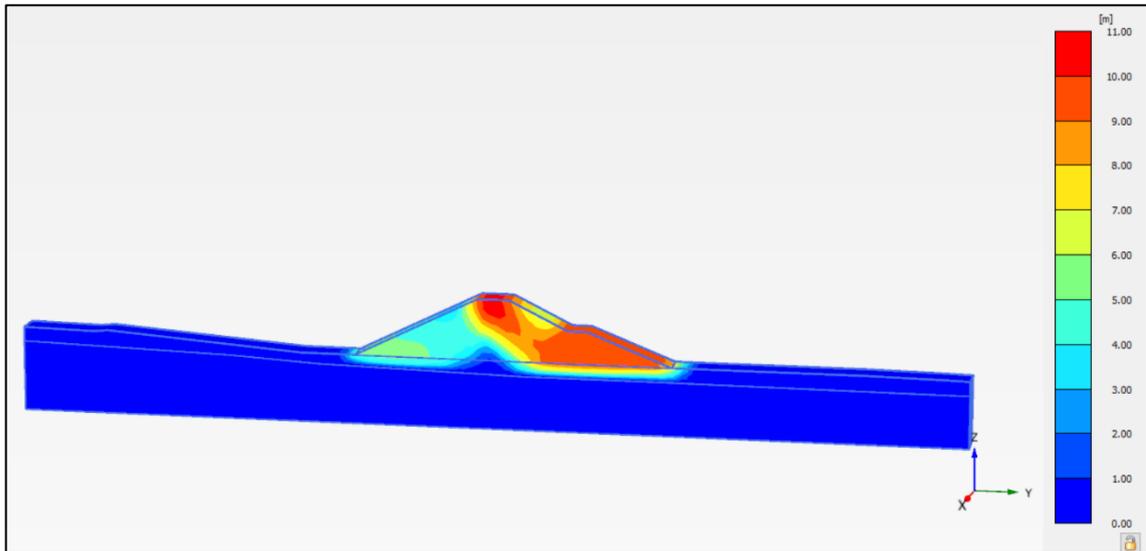
Fonte: Autor

### 5.3.2. Fase 2

Caracterizando a segunda fase construtiva do modelo, conforme apresentado na Figura 14, consiste na aplicação da carga referente a segunda etapa de construção do barramento. A aplicação dessa carga ocasionou em um deslocamento de 10,51 metros, onde os maiores deslocamentos se concentraram no topo do maciço e na região de jusante do maciço. Ademais,

os deslocamentos ocorreram tanto na direção vertical quanto na direção horizontal, sendo, respectivamente, 10,0 metros e 9,0 metros.

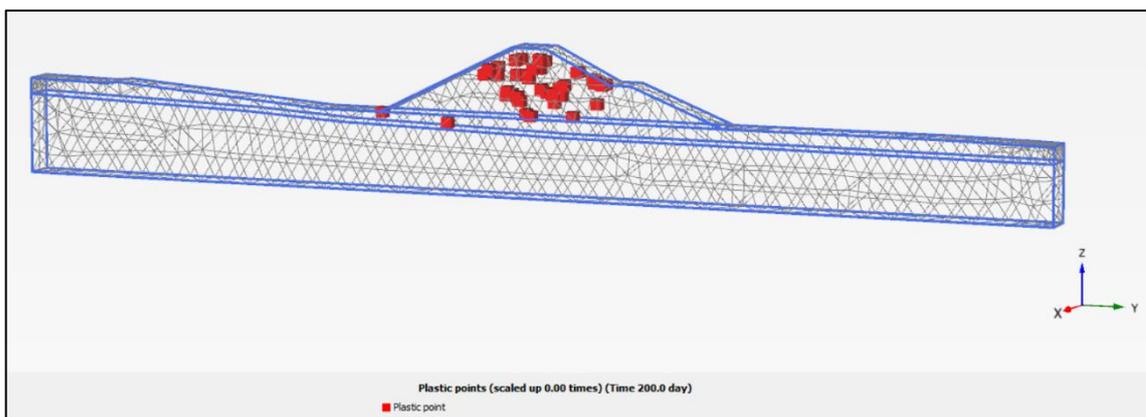
Figura 14: Fase 2 - Deformações totais – Mohr Coulomb



Fonte: Autor

Quanto a pontos de plastificação no modelo, conforme esperado, foi observado pontos de plastificação no interior do maciço, especialmente próximo aos locais onde foram encontrados os maiores deslocamentos. Tal observação pode ser observada na Figura 15

Figura 15: Pontos de plastificação – Fase 2 - Mohr Coulomb



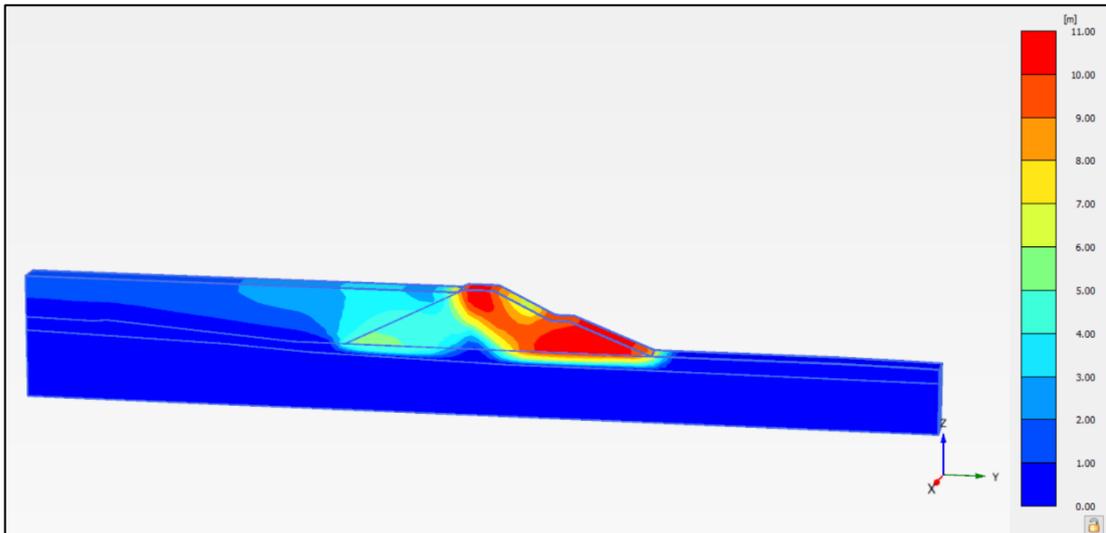
Fonte: Autor

### 5.3.3. Fase 3

A fase 3 consiste no enchimento do reservatório, para verificação de possíveis deslocamentos no maciço bem como deformações na camada de rejeito e de solo mole localizado abaixo dele. Nesse sentido, conforme apresentado na Figura 16, observou que os deslocamentos se mantiveram próximos aos encontrados na fase anterior. Esse comportamento

era esperado uma vez que a camada de aluvião mole se encontraria confinada, havendo uma redução dos deslocamentos possíveis para este material.

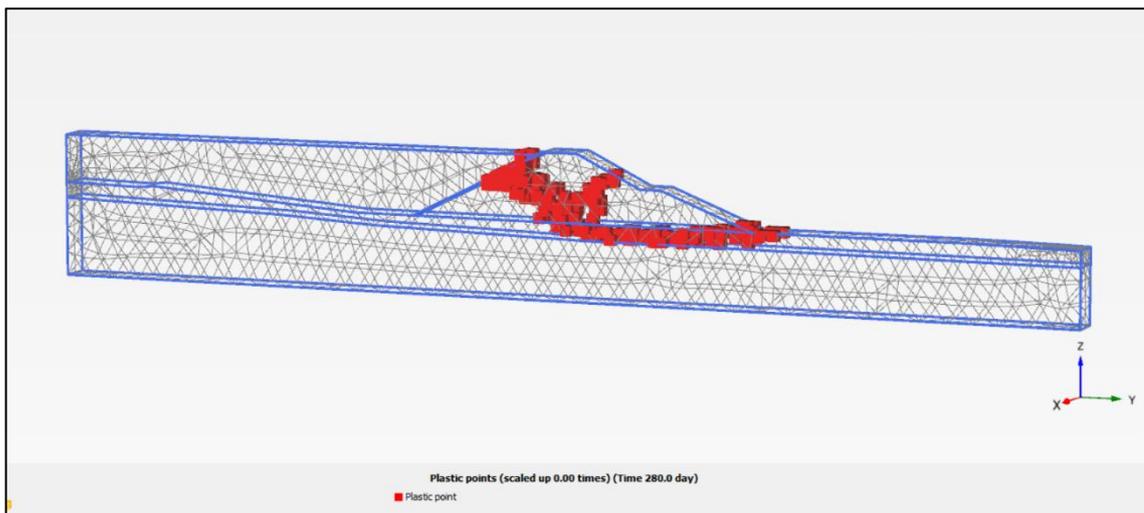
Figura 16: Fase 3 - Deformações totais – Mohr Coulomb



Fonte: Autor

Para mais, referente aos pontos de plastificação verificados no modelo após o enchimento do reservatório, observou-se mais pontos de plastificação se comparado a fase anterior, especialmente no contato do rejeito com o barramento e no interior do barramento. Tais considerações podem ser observadas na Figura 17 apresentada abaixo.

Figura 17: Pontos de plastificação – Fase 3 - Mohr Coulomb



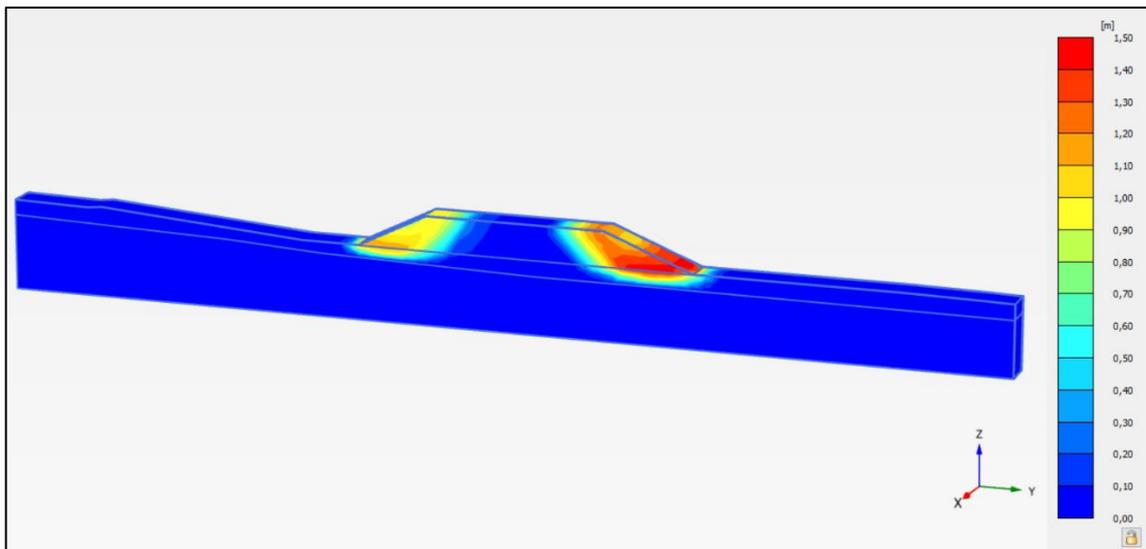
Fonte: Autor

## 5.4. MODELO 2 – HARDENING SOIL

### 5.4.1. Fase 1

Quanto ao modelo que teve a camada de aluvião mole caracterizada com o modelo constitutivo Hardening Soil, a primeira fase de alteamento do maciço tem seus deslocamentos totais apresentados na Figura 18. Conforme observado na Figura 18, os deslocamentos máximos encontrados nessa fase ficaram próximo de 1,50 metros, dos quais, os maiores deslocamentos horizontais ficaram na casa de 1,4 metros enquanto os verticais ficaram próximos de 0,9 metros. As deformações observadas se concentraram nas extremidades do maciço e no contato do mesmo com a fundação.

Figura 18: Fase 1 - Deformações totais – Hardening Soil



Fonte: Autor

Por conseguinte, ainda nessa mesma fase, fez-se a análise dos pontos de plastificação no modelo quando as camadas de fundação foram submetidas ao carregamento desse maciço. Conforme observado na Figura 19, os pontos de falha também ocorreram no maciço assim como na fundação próxima ao barramento, contudo, diferentemente do modelo cuja camada mole foi caracterizada com o Mohr Coulomb, o modelo numérico cuja camada mole foi caracterizada como o Hardening Soil, é possível observar pontos de endurecimento, ou seja, regiões que receberam um ganho de resistência. Tais pontos, podem ser observados por todo modelo, ocorrendo por consolidação normal, ou com o peso do maciço sobre essas camadas.

Figura 19: Pontos de plastificação – Fase 1 – Hardening Soil

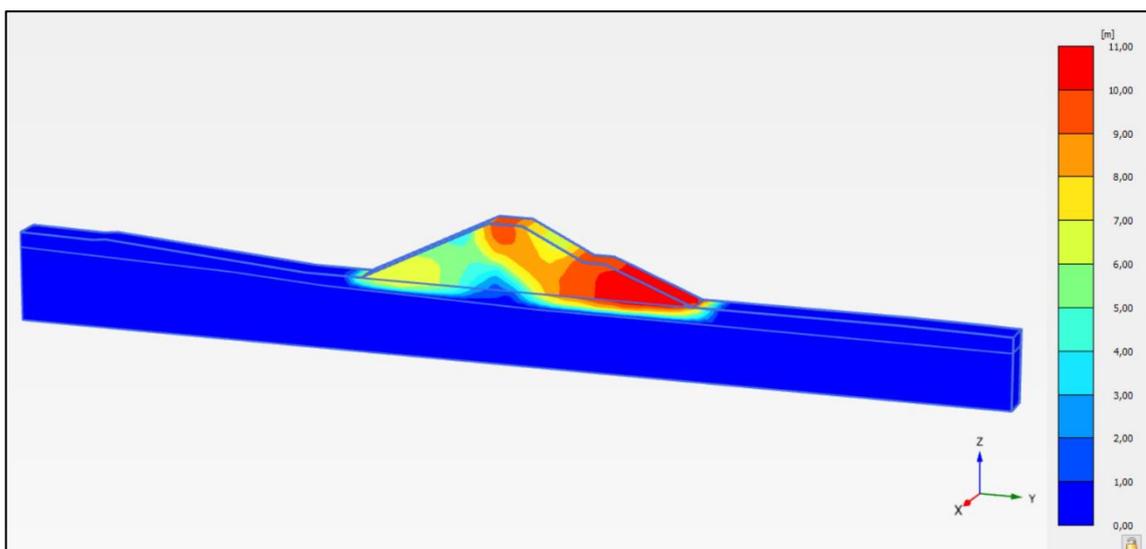


Fonte: Autor

#### 5.4.2. Fase 2

Referente a segunda etapa da análise com a construção do segundo alteamento do maciço, notou-se deslocamentos por toda a estrutura, sendo os mais expressivos localizados na região de jusante da pilha e na crista do barramento. Os deslocamentos totais máximos encontrados foram de 10,85 metros, dos quais em sua totalidade foram na horizontal e 9,6 metros foram na vertical. Tais considerações podem ser observadas na Figura 20.

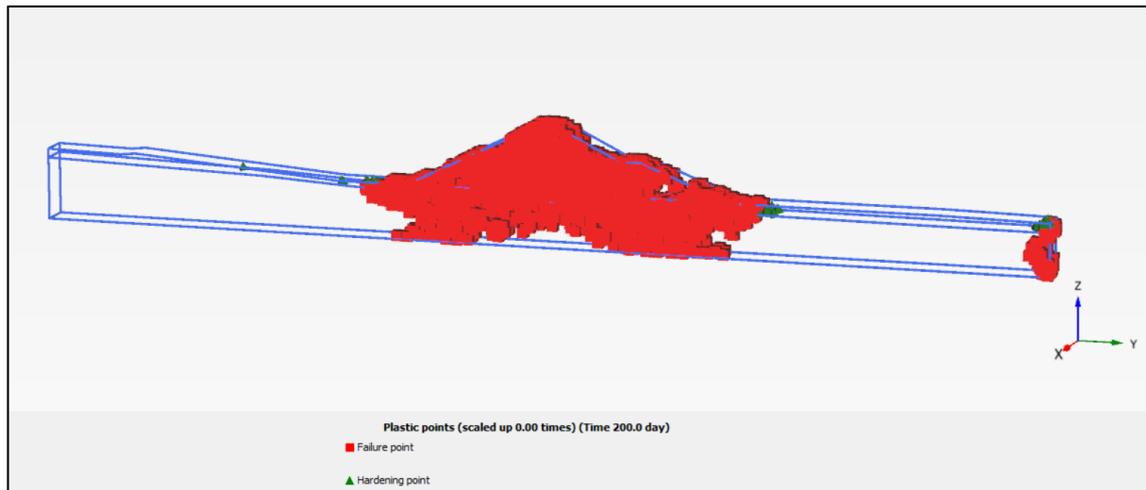
Figura 20: Fase 2 - Deformações totais – Hardening Soil



Fonte: Autor

Ademais, os pontos de plastificação se mostraram em maiores quantidades quando aplicada a carga referente ao segundo alteamento da estrutura. Conforme apresentado na Figura 21, o maciço e a região abaixo dele apresenta muitos pontos de falhas. Por outro lado, pontos de ganhos de resistência também se mostram presentes em outros locais, incluindo na região inferior do maciço.

Figura 21: Pontos de plastificação – Fase 2 – Hardening Soil

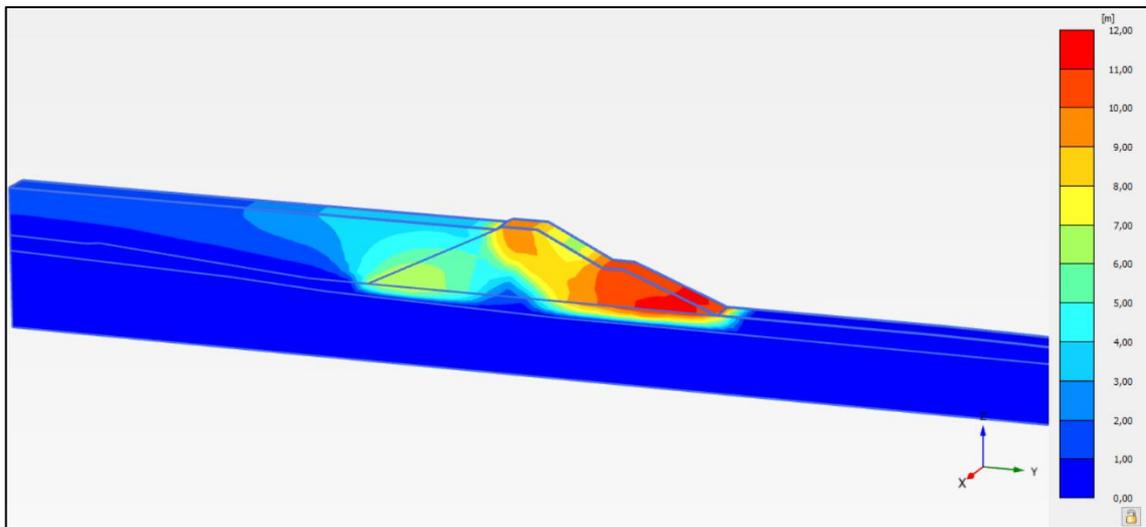


Fonte: Autor

#### 5.4.3. Fase 3

Caracterizando a última etapa construtiva da análise, a aplicação da carga que simula o enchimento do reservatório ocasionou em um pequeno aumento nos deslocamentos máximos encontrados no modelo. Contudo, esses deslocamentos se concentram na mesma região dos verificados na fase anterior, ou seja, na região de jusante da estrutura, especialmente no pé da barragem. A análise apresentou um deslocamento máximo de 11,30 metros, com o aumento de 1 metro de deslocamento, se comparado com a fase dois deste mesmo modelo. O resultado desta etapa é apresentado na Figura 22.

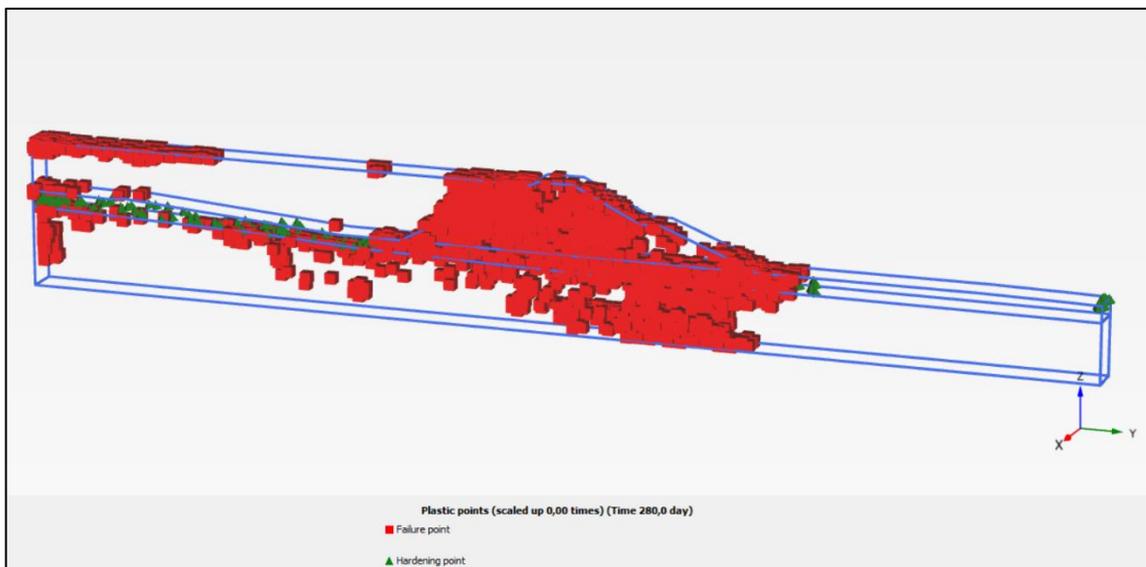
Figura 22: Fase 3 - Deformações totais – Hardening Soil



Fonte: Autor

Referente aos pontos de plastificação, observou-se um aumento no número dos pontos de falha, os quais estão presentes em todas as camadas, se concentrando no maciço, na camada de aluvião mole e no rejeito, em que as duas últimas apresentam uma baixa resistência ao cisalhamento e à compressão, enquanto a primeira está localizada sobre um material mole. Essas considerações podem ser visualizadas na Figura 23.

Figura 23: Pontos de plastificação – Fase 3 – Hardening Soil



Fonte: Autor

## 5.5. COMPARATIVO DOS MODELOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Referente à simulação do ensaio de adensamento, apesar da semelhança na deformação máxima alcançada nas simulações dos ensaios, observou-se uma diferença significativa na

forma como a deformação da amostra ocorreu com os modelos constitutivos de Mohr Coulomb e Hardening Soil. No primeiro modelo, a deformação foi linear, enquanto no segundo a deformação se deu de maneira não linear. Tal comportamento era esperado, já que o modelo de Mohr Coulomb é classificado como um modelo elástico perfeitamente plástico, enquanto essa classificação não se aplica ao Hardening Soil.

Além disso, uma diferença observada que também deve ser ressaltada é quanto a não apresentação da curva de descarregamento no modelo de Mohr Coulomb, sugerindo uma possível limitação quanto a representatividade desse modelo em análises que apresentem carregamentos cíclicos. Contudo, essa característica não teve influência nos resultados obtidos na análise de deformação do aterro, uma vez que não houve carregamentos cíclicos aplicados ao aluvião mole na análise realizada.

Referente aos modelos numéricos da construção do aterro sobre a camada de aluvião mole, para se realizar a comparação dos resultados obtidos através dos modelos numéricos, cuja camada de aluvião mole foi caracterizada com Mohr Coulomb e Hardening Soil, é apresentado na Tabela 8 o resumo das deformações obtidas em ambos os modelos nas etapas construtivas analisadas.

Tabela 8: Deformações máximas observadas nos modelos numéricos analisados

Cenário	Deformação Máxima Observada (m)	
	Mohr Coulomb	Hardening Soil
Fase 1	0,20	1,50
Fase 2	10,51	10,85
Fase 3	10,74	11,30

Comparativamente, analisando a primeira fase construtiva do modelo, observou-se que os deslocamentos se concentraram na mesma região em ambos os modelos, se restringindo principalmente no contato entre o aterro e a fundação e nas extremidades do maciço, de jusante e de montante. Em contrapartida, a magnitude dos deslocamentos observados foi significativamente maior quando o aluvião mole foi caracterizado com o modelo Hardening

Soil. Tal resultado pode ser atribuído a linearidade com que as deformações são caracterizadas no modelo de Mohr Coulomb, algo que não ocorre quando analisamos o modelo Hardening Soil. Outro ponto, é relacionado aos pontos de endurecimento obtidos no modelo cujo solo mole foi caracterizado com o Hardening Soil, que por sua vez se mostraram em poucas quantidades, propiciando o maior deslocamento.

Referente a segunda fase, a semelhança entre os modelos foi maior, haja vista que os deslocamentos se concentraram nas mesmas regiões em ambos os modelos. Além disso, os valores medidos nos deslocamentos se mostraram relativamente próximos, em vista da magnitude das movimentações observadas.

Para mais, caracterizando a terceira e última fase construtiva dos modelos, a qual consiste no enchimento do reservatório, os deslocamentos ainda se mantiveram muito próximos comparando os dois modelos, em que a diferença dos maiores deslocamentos observados foi menor que 1,0 metro. Por fim, em ambos os modelos analisados pode-se dizer que o enchimento do reservatório não trouxe deslocamentos adicionais de grandes magnitudes.

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma análise comparativa entre os modelos constitutivos Mohr-Coulomb e Hardening Soil, cujo principal objetivo era comparar os dois modelos constitutivos quanto à sua representatividade do comportamento tensão-deformação em solo mole sob construção de aterro. Para tanto, construiu-se uma situação hipotética em que se objetivava construir um aterro sobre uma camada de aluvião mole e verificar o comportamento dessa unidade, bem como do aterro construído.

Inicialmente, para a definição dos parâmetros geológico-geotécnicos utilizados em cada um dos modelos constitutivos, fez-se a interpretação de ensaios triaxiais e os devidos cálculos para determinação de cada parâmetro para cada modelo constitutivo. Por conseguinte, fez-se uso da ferramenta *SoilTest*, que integra o pacote de software PLAXIS 3D, para a verificação dos parâmetros utilizados em ambos os modelos constitutivos, em que se realizou a simulação de um ensaio numérico de adensamento, sendo verificado o comportamento das amostras diante do carregamento e descarregamento simulados.

Como resultado, observou-se que a deformação máxima alcançada pelas amostras apresentou uma diferença de 3%, mostrando que os parâmetros, apesar de diferentes devido à natureza de cada modelo constitutivo, representaram de forma similar o comportamento das amostras numéricas sob tensão. Contudo, observou-se que o ensaio simulado realizado com a amostra cujo modelo constitutivo era o de Mohr-Coulomb não apresentou a curva de descarregamento da amostra, indicando que o modelo de Mohr-Coulomb pode apresentar limitações na representatividade do comportamento do solo quando submetido a carregamentos cíclicos, uma vez que não representa a fase de expansão do solo quando descarregado. Entretanto, entende-se que essa limitação não impactou de forma significativa na análise do modelo numérico do aterro, visto que não foram aplicados carregamentos cíclicos sobre essa camada nas análises realizadas. Por outro lado, realizando a simulação do ensaio de adensamento na amostra caracterizada com o modelo Hardening Soil, foi possível observar a curva de descarregamento e expansão do solo.

Por conseguinte, partindo da situação hipotética em que se desejaria construir um aterro sobre uma camada de solo mole, fez-se uso de dois modelos numéricos que se distinguiam apenas quanto ao modelo constitutivo utilizado para caracterizar a camada de aluvião mole, sendo todas as outras condições as mesmas para ambos os modelos. Durante as fases construtivas, que incluíam a construção do primeiro alteamento, seguido da construção do

segundo alteamento e, por fim, o preenchimento da região a montante do maciço com rejeito, verificaram-se as deformações e os pontos de plastificação nos modelos. Nesse sentido, observou-se uma significativa diferença nas deformações da primeira fase ao fazer um comparativo entre os modelos numéricos cuja camada de aluvião mole foi caracterizada com Mohr-Coulomb e Hardening Soil; contudo, ao final de todas as fases construtivas dos modelos, observou-se uma convergência dos valores, apresentando uma diferença pouco significativa. Referente aos pontos de plastificação, observou-se também grandes semelhanças em ambos os modelos constitutivos, contudo, somente o modelo Hardening Soil apresentou pontos de endurecimento, fato esperado, uma vez que este modelo possui como um de seus aspectos a representação desse tipo de comportamento, diferentemente do modelo de Mohr Coulomb.

Por fim, pode-se dizer que a construção de aterros sobre solos moles é uma obra de engenharia que deve ser realizada com grande cautela, uma vez que a característica de grande deformabilidade, que não necessariamente acontece imediatamente após o carregamento, pode acarretar recalques diferenciais, propiciando escorregamentos e o acontecimento de acidentes. Ainda, tal resultado reforça a necessidade de se realizar o tratamento da fundação em momento anterior à construção dessas estruturas, que por vezes, consiste na retirada total de camadas de solos com baixa capacidade de suporte, tais como solos aluvionares e coluvionares. Além disso, quando realizadas análises em tensão-deformação, a escolha do modelo constitutivo adequado consiste em uma etapa fundamental para se construir modelos numéricos o mais representativos possíveis da realidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6484: Solos - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. 2020. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

BENTLEY SYSTEMS. **Material Models Manual 3D: PLAXIS 3D**. [S. l.: s. n.], 2023. 670 p. Disponível em: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>. Acesso em: 10 mar. 2024.

BENTLEY SYSTEMS. **Reference Manual 3D: PLAXIS 3D**. [S. l.: s. n.], 2023. 670 p. Disponível em: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>. Acesso em: 10 mar. 2024.

BRINKGREVE, R. B. J.; ENGIN, E. Validation of geotechnical finite element analysis. In: **Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. 2013. p. 677-682.

DE SOUZA, Remo Magalhães. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003, p 1-40. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Remo-De-Souza/publication/326331671\\_O\\_Metodo\\_dos\\_Elementos\\_Finitos\\_Aplicado\\_ao\\_Problema\\_d\\_e\\_Conducao\\_de\\_Calor/links/5b466378aca272c609377a4b/O-Metodo-dos-Elementos-Finitos-Aplicado-ao-Problema-de-Conducao-de-Calor.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Remo-De-Souza/publication/326331671_O_Metodo_dos_Elementos_Finitos_Aplicado_ao_Problema_d_e_Conducao_de_Calor/links/5b466378aca272c609377a4b/O-Metodo-dos-Elementos-Finitos-Aplicado-ao-Problema-de-Conducao-de-Calor.pdf). Acesso em: 10 mar. 2024.

FARIA, André de Oliveira. **Avaliação comparativa de modelos constitutivos para um rejeito de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. 2022. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

MORAIS, Letícia Pereira de; ARAÚJO, Amanda Eduarda Soares; LOPES, Bruna de Carvalho Faria Lima; NETO, Manoel Porfírio Cordão. Análise De Sensibilidade Da Permeabilidade Horizontal No Comportamento De Solos Mole. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [S. l.], p. 1-8, 15 set. 2020. Disponível em:

<https://www.academia.edu/download/97314415/cobramseg.2022.0144.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.

Obrzud, R. F., & Truty, A. (2018). **The hardening soil model - A practical guidebook. Switzerland**. Disponível em: [http://www.zsoil.com/zsoil\\_manual\\_2018/Rep-HS-model.pdf](http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf). Acesso em: 01 mar. 2024.

OLIVEIRA, Bianca Lopes de. **Construções de aterros sobre solos moles**. São Paulo: Editora Saraiva, 2021. E-book. ISBN 9786589881797. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786589881797/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

PERBONI, Jane Paula. **Análise de estabilidade e de compressibilidade de aterros sobre solos moles - caso dos aterros de encontro da ponte sobre o Rio dos Peixes (BR 381)**. 2003. 140 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

SILVA, João Paulo Moreira Da. **Os Métodos De Equilíbrio Limite E Dos Elementos Finitos Na Análise De Estabilidade De Taludes**. 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto - Departamento de Engenharia Civil, [S. l.], 2009. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62106/1/000149997.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2024.

TAVARES, João Manuel Ribeiro Silva; PADILHA, Armando Jorge Monteiro Neves. **Introdução ao método dos elementos finitos**: Comunicação Interna. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, [S. l.], p. 1-105, maio 1998. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/515/2/41092.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2024.

TI, Kok Sien; JAAFAR, Bujang B.K. Huat, Jamaloddin Noorzaei, Moh'd Saleh; SEW, Gue See. **A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application**. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, [S. l.], p. 1-19, 1 jan. 2019.. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Bujang-Huat/publication/228565882\\_A\\_Review\\_of\\_Basic\\_Soil\\_Constitutive\\_Models\\_for\\_Geotechnical\\_Application/links/598d5d2faca272e57ad3bcb6/A-Review-of-Basic-Soil-Constitutive-Models-for-Geotechnical-Application.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bujang-Huat/publication/228565882_A_Review_of_Basic_Soil_Constitutive_Models_for_Geotechnical_Application/links/598d5d2faca272e57ad3bcb6/A-Review-of-Basic-Soil-Constitutive-Models-for-Geotechnical-Application.pdf). Acesso em: 10 mar. 2024.

WANI, K. M. N. S.; SHOWKAT, Rakshanda. Soil constitutive models and their application in geotechnical engineering: a review. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 7, n. 4, p. 137-145, 2018. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/59436213/soil-constitutive-models-and-their-application-in-geotechnical-engineering-a-review-IJERTV7IS04012920190529-80349-jnb9vw.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2024.