UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MODELAGEM HIDROMECÂNICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES EM SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS

JAQUELINE COSTA DE SOUZA FREIRE, MSc

ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc
COORIENTADORA: PROF. MARTA PEREIRA DA LUZ, DSc

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-221/2026

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2026

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MODELAGEM HIDROMECÂNICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES EM SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS

JAQUELINE COSTA DE SOUZA FREIRE, M.Sc.

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:

_____

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (Universidade de Brasília) (ORIENTADOR)

_____

MARTA PEREIRA DA LUZ, D.Sc. (Pontifícia Universidade Católica de Goiás) (COORIENTADORA)

_____

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (Universidade de Brasília) (EXAMINADOR INTERNO)

_____

MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHAS, D.Sc. (Universidade Federal de Goiás) (EXAMINADOR EXTERNO)

_____

RAQUEL SOUZA TEIXEIRA, D.Sc. (Universidade Estadual de Londrina) (EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 09 do JULHO de 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

FREIRE, JAQUELINE COSTA DE SOUZA

Modelagem Hidromecânica e Análise Experimental do Adensamento de Grandes Deformações em Sedimentos de Reservatórios de Barragens

[Distrito Federal] 2026
xxii, 149 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2026)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil

1. Adensamento de grandes deformações 2. Sedimentos em reservatórios

3. Modelagem numérica 4. Acoplamento hidromecânico

5. Solos finos compressíveis

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREIRE, J.C.S (2026). Modelagem Hidromecânica e Análise Experimental do Adensamento de Grandes Deformações em Sedimentos de Reservatórios de Barragens. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-221/2026, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jaqueline Costa de Souza Freire

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Modelagem Hidromecânica e Análise Experimental do Adensamento de Grandes Deformações em Sedimentos de Reservatórios de Barragens

GRAU / ANO: Doutor / 2026

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Jaqueline Costa de Souza Freire

Alameda Dom Pedro I, Quadra 152, Lote 31, Setor Faiçalville

74.360-190 - Goiânia/GO – Brasil

AGRADECIMENTOS

A realização desta tese representa a conclusão de uma importante etapa acadêmica e pessoal, marcada por desafios, aprendizados e conquistas. Este trabalho somente foi possível graças ao apoio, à colaboração e ao incentivo de pessoas e instituições que contribuíram de diferentes formas ao longo dessa trajetória.

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Professor Dr. André Luís Brasil Cavalcante, pela orientação segura, pela disponibilidade, pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo do doutorado e, principalmente, pela paciência com todos os percalços que tive durante o desenvolvimento do trabalho. Sua dedicação à pesquisa e sua excelência acadêmica foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese e para minha formação como pesquisadora.

À minha coorientadora, Professora Dra. Marta Pereira da Luz, expresso minha sincera gratidão pelas contribuições técnicas e científicas, pelas sugestões sempre pertinentes e pelo apoio constante durante a condução desta pesquisa, principalmente viabilizando a execução de diversas atividades que foram fundamentais para a qualidade final dessa tese de doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB), agradeço pela oportunidade de realizar este doutorado e pelo ambiente acadêmico que favoreceu meu crescimento profissional e intelectual.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de doutorado Processo nº 140966/2021-8, fundamental para a dedicação e o desenvolvimento desta pesquisa.

À Eletrobras Furnas e à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento PD.0394-1705/2017, agradeço pelo suporte prestado à realização dos ensaios de campo e laboratoriais, essenciais para a execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Goiás (UFG), agradeço pela disponibilização de sua infraestrutura laboratorial, que possibilitou a realização de parte significativa dos ensaios e análises desenvolvidos nesta pesquisa.

Aos professores, técnicos, pesquisadores e colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a construção deste trabalho, compartilho meu reconhecimento e gratidão pelo apoio, pelas discussões científicas e pela convivência enriquecedora ao longo desta jornada.

À minha família, base sólida de todas as minhas conquistas, expresso minha mais profunda gratidão. Aos meus pais, Sergio e Marlene, agradeço pelo amor incondicional, pelos

ensinamentos, pelo exemplo de dedicação e honestidade e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores. Esta conquista também lhes pertence.

Ao meu esposo, Eduardo, agradeço pelo companheirismo, pela compreensão, pelo incentivo constante e pelo apoio inabalável ao longo de todo este percurso. Sua presença foi essencial para que eu mantivesse a motivação e a perseverança necessárias para alcançar este objetivo.

Aos meus filhos, Clara e Davi, que ainda cresce em meu ventre enquanto concluo esta etapa tão especial, dedico um agradecimento repleto de amor. Vocês são minha maior inspiração, a razão de muitos dos meus esforços e a fonte das maiores alegrias da minha vida. Que esta conquista lhes sirva de exemplo de dedicação, persistência e amor pelo conhecimento.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese. Levo comigo o aprendizado, o apoio e a generosidade de cada pessoa que fez parte desta caminhada.

Muito obrigada.

RESUMO

Modelagem Hidromecânica e Análise Experimental do Adensamento de Grandes Deformações em Sedimentos de Reservatórios de Barragens

Esta tese investiga o comportamento geotécnico de sedimentos acumulados nas bordas de reservatórios de barragens, com ênfase no fenômeno de adensamento sob grandes deformações, típico de materiais finos altamente compressíveis e de baixa condutividade hidráulica. A relevância do estudo está associada ao impacto desse processo na estabilidade e na redução do volume útil dos reservatórios, configurando um problema de grande interesse para a Engenharia Geotécnica e a gestão de recursos hídricos. A caracterização geotécnica do material evidenciou comportamento típico de material argiloso de alta plasticidade, com características bimodais compatíveis com solos tropicais lateríticos. Os ensaios experimentais possibilitaram a obtenção de parâmetros representativos das propriedades hidráulicas e mecânicas, fundamentais para a modelagem do adensamento. Foram desenvolvidas abordagens analítica e numérica, utilizando os *softwares Wolfram Mathematica*® e *COMSOL Multiphysics*®, respectivamente. A modelagem analítica baseou-se na solução de Gibson *et al.* (1967), enquanto a modelagem numérica foi implementada via método dos elementos finitos, incorporando relações constitutivas não lineares e acoplamento hidromecânico. A calibração foi realizada com base em dados experimentais e da literatura. A análise de sensibilidade evidenciou a influência significativa dos parâmetros constitutivos na evolução do adensamento. Os modelos *Single Power Function Model* (Somogyi, 1979) e *Extended Power Function Model* (Liu & Znidarcic, 1991) apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais, representando adequadamente as relações entre índice de vazios, condutividade hidráulica e tensão efetiva. A comparação entre as soluções analítica e numérica indicou boa concordância nas tendências gerais, embora o modelo numérico tenha demonstrado maior capacidade de representar efeitos não lineares e variações espaciais, especialmente sob dupla drenagem. Observou-se evolução mais acelerada do adensamento na modelagem numérica, refletindo melhor o acoplamento entre fluxo e deformação. Os resultados demonstram que a integração entre ensaios experimentais e modelagem analítica e numérica constitui uma abordagem robusta para análise do adensamento de grandes deformações. O modelo numérico apresenta potencial para prever a redução do volume útil de reservatórios, subsidiando estratégias de gestão. Recomenda-se, para estudos

futuros, a ampliação da modelagem para condições bidimensionais e tridimensionais, bem como a incorporação de formulações para solos não saturados.

Palavras-Chave: Adensamento de grandes deformações, Sedimentos em reservatórios, Modelagem numérica, Acoplamento hidromecânico, Solos finos compressíveis

ABSTRACT

Hydromechanical Modeling and Experimental Analysis of Large-Strain Consolidation in Sediments from Reservoirs of Tailings Dams

This thesis investigates the geotechnical behavior of sediments accumulated along the margins of dam reservoirs, with emphasis on large-strain consolidation, a phenomenon typical of highly compressible fine-grained soils with low hydraulic conductivity. The relevance of this study is associated with the impact of this process on structural stability and the reduction of reservoir storage capacity, representing a significant issue for geotechnical engineering and water resources management. The geotechnical characterization of the material revealed typical behavior of highly plastic clay, with bimodal features consistent with tropical lateritic soils. Experimental testing enabled the determination of representative hydraulic and mechanical parameters, which are essential for consolidation modeling. Analytical and numerical approaches were developed using *Wolfram Mathematica*® and *COMSOL Multiphysics*®, respectively. The analytical modeling was based on the solution proposed by Gibson *et al.* (1967), while the numerical modeling was implemented using the finite element method, incorporating nonlinear constitutive relationships and hydromechanical coupling. Model calibration was performed based on experimental data and literature sources. Sensitivity analysis demonstrated the significant influence of constitutive parameters on the evolution of consolidation. The *Single Power Function Model* (Somogyi, 1979) and the *Extended Power Function Model* (Liu & Znidarcic, 1991) provided the best fit to the experimental data, adequately representing the relationships among void ratio, hydraulic conductivity, and effective stress. The comparison between analytical and numerical solutions showed good agreement in overall trends, although the numerical model demonstrated superior capability in capturing nonlinear effects and spatial variations, particularly under double drainage conditions. A faster evolution of consolidation was observed in the numerical modeling, reflecting its improved representation of the coupling between flow and deformation. The results indicate that the integration of experimental testing and analytical and numerical modeling constitutes a robust approach for analyzing large-strain consolidation. The numerical model shows potential for predicting reservoir capacity loss, supporting more effective management strategies. Future studies should consider extending the modeling framework to

two- and three-dimensional conditions, as well as incorporating formulations for unsaturated soils.

Keywords: Large-strain consolidation; Reservoir sediments; Numerical modeling; Hydromechanical coupling; Compressible fine-grained soils.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....2

1.2 - JUSTIFICATIVA.....4

1.3 - HIPÓTESE.....5

1.4 - OBJETIVOS 6

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7

2.1 - DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS 7

2.2 - TEORIA DE ADENSAMENTO 9

2.3 - TEORIA DE ADENSAMENTO DE TERZAGHI & PECK (1948) 9

2.4 - TEORIA DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES.....10

2.4.1. SISTEMA DE COORDENADAS 12

2.4.2. FORMULAÇÃO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES....14

2.4.3. LEIS CONSTITUTIVAS 15

2.5 - MODELAGEM DO FENÔMENO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES 17

2.5.1. MODELAGEM DA SOLUÇÃO ANALÍTICA 19

2.5.2. MODELAGEM NUMÉRICA COM *SOFTWARE COMSOL*.....24

2.6 - ENSAIO DE ADENSAMENTO POR PERCOLAÇÃO INDUZIDA.....25

2.6.1. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO PARA ENSAIO HCT.....26

2.6.2. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS CONSTITUTIVOS.....28

2.7 - SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO E LACUNA CIENTÍFICA 29

3 - METODOLOGIA 31

3.1 - ÁREA DE ESTUDO USINA HIDRELÉTRICA ITUMBIARA.....32

3.2 - MATERIAL UTILIZADO E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....34

3.3 - ENSAIOS DE CAMPO.....38

3.4 - ENSAIO HCT 43

3.5 - MODELAGEM DO FENÔMENO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES 46

3.5.1. SOLUÇÃO ANALÍTICA.....47
3.5.2. SOLUÇÃO NUMÉRICA.....49
3.5.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTITUTIVOS.....52
3.6 - INTEGRAÇÃO ENTRE ENSAIOS E MODELAGEM.....53
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....54
4.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....54
4.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA.....54
4.1.2. COMPACTAÇÃO E PERMEABILIDADE.....57
4.1.3. ADENSAMENTO CONVENCIONAL.....58
4.1.4. COMPRESSÃO SIMPLES E TRIAXIAL.....60
4.1.5. CURVA CARACTERÍSTICA SOLO ÁGUA.....65
4.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO.....67
4.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS HCT.....70
4.4 - RESULTADOS DA MODELAGEM DO FENÔMENO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES.....74
4.4.1 - RESULTADOS DA SOLUÇÃO ANALÍTICA.....75
4.4.1.1. AVALIAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS NA SOLUÇÃO ANALÍTICA.....75
4.4.1.2. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO GRAU DE CONSOLIDAÇÃO MÉDIO.....81
4.4.1.3. RETROANÁLISE DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES NA SOLUÇÃO ANALÍTICA.....83
4.4.2 - RESULTADOS DA SOLUÇÃO NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL.....93
4.4.2.1. RETROANÁLISE DE ENSAIO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES NA SOLUÇÃO NUMÉRICA.....93
4.4.2.2. AVALIAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS NA SOLUÇÃO NUMÉRICA.....104
4.4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLUÇÃO ANALÍTICA E A SOLUÇÃO NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL.....114
4.4.3.1. COMPARAÇÃO DOS MODELOS NA AVALIAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS.....116

4.5 - SÍNTESE DOS RESULTADOS 120

5 - CONCLUSÃO 121

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 -	Coordenadas dos pontos e profundidade atingida com ensaio PANDA e Trado.....	41
Tabela 3.2	Índices físicos das amostras analisadas no ensaio HCT.	45
Tabela 4.1 -	Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica para o sedimento da área de estudo.....	55
Tabela 4.2 -	Comparativo entre as propriedades físicas do solo da região da UHE Itumbiara.....	57
Tabela 4.3 -	Resistência à compressão confinada e ao cisalhamento do sedimento.....	61
Tabela 4.4 -	Dados de entrada para as amostras analisadas no ensaio HCT.....	71
Tabela 4.5 -	Parâmetros de saída obtidos para as amostras analisadas no ensaio HCT.....	71
Tabela 4.6 -	Dados de entrada utilizados na modelagem referente aos resultados experimentais obtidos na presente pesquisa e na literatura por Abu-Hejleh *et al.* (1996) e Pinho (2018).....	84
Tabela 4.7 -	Dados de saída utilizados na modelagem obtidos experimentalmente e na literatura por Abu-Hejleh *et al.* (1996) e Pinho (2018).....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fenômeno de deposição de sedimentos ao longo do tempo em materiais compressíveis (Modificado de Imai, 1979)..... 8

Figura 2.2 - Sistema de coordenadas Lagrangiano (Pereira, 2017)..... 13

Figura 2.3 - Equilíbrio de tensões totais considerando adensamento não linear e geométrico (Pereira, 2017)..... 21

Figura 2.4 - Esquema com arranjo tradicional para ensaio HCT com bomba de fluxo (Botelho, 2001)..... 27

Figura 3.1 - Procedimento Metodológico..... 32

Figura 3.2 - Localização da área de estudo (Datum WGS 1984, E 705.196, N 7.965.879, Fuso 22S)..... 34

Figura 3.3 - Esquema do equipamento PANDA (modificado de Guerin, 2011)..... 40

Figura 3.4 - Localização dos pontos escolhidos para ensaios de campo (Datum WGS 1984, Fuso 22S)..... 43

Figura 3.5 - Execução do ensaio PANDA e sondagem a trado manual para coleta de amostras deformadas..... 43

Figura 3.6 - Equipamento utilizado para realização do ensaio HCT..... 46

Figura 3.7 - Condições inicial e de contorno da modelagem numérica do fenômeno do adensamento a grandes deformações..... 51

Figura 3.8 - Geometria da camada em plano 2D axissimétrico com malha extrafina... 52

Figura 4.1 - Resultados do ensaio de limite de liquidez do sedimento..... 55

Figura 4.2 - Curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante do sedimento..... 56

Figura 4.3 - Curva de compactação do sedimento..... 58

Figura 4.4 - Curva de adensamento do sedimento.....

Figura 4.5 - Curva de compressão do sedimento..... 59

Figura 4.6 - Curva de compressão simples do sedimento..... 60

Figura 4.7 - Variação volumétrica durante consolidação de ensaios triaxiais..... 62

Figura 4.8 - Tensão desvio em função da deformação axial durante ruptura de ensaios triaxiais..... 62

Figura 4.9 - Pressão neutra em função da deformação axial durante ruptura de ensaios triaxiais..... 63
Figura 4.10 - Círculos de Mohr e envoltória de ruptura de ensaios triaxiais..... 64
Figura 4.11 - Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais..... 64
Figura 4.12 - Curva Característica Solo Água experimentais nas trajetórias de secagem e molhagem..... 66
Figura 4.13 - Resultados dos ensaios tipo PANDA nos pontos investigados: a) Furo 1; b) Furo 2; c) Furo 3; d) Furo 4; e) Furo 5; f) Furo 6..... 68
Figura 4.14 - Resultados dos ensaios de umidade gravimétrica nos pontos investigados: a) Furo 1; b) Furo 2; c) Furo 3; d) Furo 4; e) Furo 5; f) Furo 6..... 70
Figura 4.15 - Resultado ensaio HCT segundo modelo *Single Power Function Model*: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3..... 73
Figura 4.16 - Resultado ensaio HCT segundo modelo *Extended Power Function Model*: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3..... 74
Figura 4.17 - *Single Power Function Model*: a) Análise de sensibilidade do parâmetro C; b) Análise de sensibilidade do parâmetro D..... 76
Figura 4.18 - Comparativo entre os modelos constitutivos para condutividade hidráulica saturada como função do índice de vazios..... 77
Figura 4.19 - *Extended Power Function Model*: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro Z..... 79
Figura 4.20 - Comparativo entre os modelos constitutivos para índice de vazios como função da tensão efetiva..... 80
Figura 4.21 - Comparação entre a função normal e inversa do modelo constitutivo *Extended Power Function Model*..... 81
Figura 4.22 - Grau de consolidação médio em função do tempo: a) Análise de sensibilidade do parâmetro k; b) Análise de sensibilidade do parâmetro e_0; c) Análise de sensibilidade do parâmetro a_v; d) Análise de sensibilidade do parâmetro h_0..... 83
Figura 4.23 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a condutividade hidráulica saturada em função do índice de vazios: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa..... 86

Figura 4.24 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a tensão efetiva em função do índice de vazios: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa..... 87
Figura 4.25 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para o índice de vazios em função do tempo: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa..... 89
Figura 4.26 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para o índice de vazios em função da profundidade: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa..... 90
Figura 4.27 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a condutividade hidráulica saturada em função do tempo: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa..... 91
Figura 4.28 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a tensão efetiva em função do tempo: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa..... 92
Figura 4.29 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para o índice de vazios em função do tempo: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra3..... 94
Figura 4.30 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para a condutividade hidráulica saturada em função do tempo: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra3. 95
Figura 4.31 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para a tensão efetiva em função do tempo: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra3..... 96
Figura 4.32 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para o índice de vazios em função da profundidade: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra3..... 98
Figura 4.33 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para a tensão efetiva em função da profundidade: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra3..... 99
Figura 4.34 - Distribuição do índice de vazios para Amostra 1: a) Inicial; b) 30 minutos; c) 60 minutos; d) 120 minutos; e) 150 minutos; f) 180 minutos; g) 195 minutos; h) 24 horas..... 101

Figura 4.35 - Distribuição do índice de vazios ao longo do tempo em diferentes posições de profundidade na camada da amostra 1..... 102
Figura 4.36 - Variação da permeabilidade ao longo do tempo aplicando o *Single Power Function Model*, em diferentes posições de profundidade na camada da amostra 1..... 103
Figura 4.37 - Variação da tensão efetiva ao longo do tempo aplicando o *Extended Power Function Model*, em diferentes posições de profundidade na camada da amostra 1..... 104
Figura 4.38 - Variação do índice de vazios com a profundidade: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D..... 106
Figura 4.39 - Variação do índice de vazios em função do tempo: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D; e) Análise de sensibilidade do parâmetro Z..... 108
Figura 4.40 - Variação da condutividade hidráulica saturada em função do tempo - a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro D..... 109
Figura 4.41 - Variação da tensão efetiva com a profundidade: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D; e) Análise de sensibilidade do parâmetro Z..... 111
Figura 4.42 - Variação da tensão efetiva com o tempo: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D; e) Análise de sensibilidade do parâmetro Z..... 113
Figura 4.43 - Comparativo entre as soluções analítica e numérica do adensamento a grandes deformações: a) Lama 01 (Pinho, 2018); b) Amostra A-1 (Abu-Hejleh *et al.*, 1996); c) Amostra 1 presente pesquisa..... 115

Figura 4.44 - Condutividade hidráulica saturada em função do tempo: a) Modelo analítico variando o parâmetro C; b) Modelo numérico variando o parâmetro C; c) Modelo analítico variando o parâmetro D; d) Modelo numérico variando o parâmetro D..... 117

Figura 4.45 - Tensão efetiva em função do tempo: a) Modelo analítico variando o parâmetro A; b) Modelo numérico variando o parâmetro A; c) Modelo analítico variando o parâmetro B; d) Modelo numérico variando o parâmetro B; e) Modelo analítico variando o parâmetro Z; f) Modelo numérico variando o parâmetro Z..... 118

Figura 4.46 - Índice de vazios em função do tempo para diferentes profundidades: a) Modelo analítico; b) Modelo numérico..... 119

Figura 4.47 - Índice de vazios em função da profundidade para diferentes intervalos de tempo: a) Modelo analítico; b) Modelo numérico..... 119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIAÇÕES

GRANDEZA E ABREVIAÇÕES	SÍMBOLO
Agência Nacional de Energia Elétrica	ANEEL
Air-entry value	AEV
Altura de lâmina d´água acima da camada de solo	H_w
Altura dos sólidos	H_s
Altura final do corpo de prova	H_f
Altura inicial da camada ou da amostra	H_0 ou h_0
American Society for Testing and Materials	ASTM
Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico	ANA
Ângulo de atrito efetivo	ϕ'
Área da amostra	A_r
Argila de baixa plasticidade	CL
Associação Brasileira de Normas Técnicas	ABNT
Bidimensional	2D
Carregamento aplicado	q
Carga efetiva inicial uniformemente distribuída	q'_0
Cloreto de potássio	KCl
Coeficiente de amortecimento	d_a
Coeficiente de compressibilidade	a_v
Coeficiente convectivo em forma conservativa	α
Coeficiente convectivo não conservativo	β
Coeficiente de adensamento	c_v
Coeficiente de compressibilidade volumétrica ou compressibilidade	m_v
Coesão efetiva	c'
Condutividade hidráulica na direção vertical z	k_z
Consolidado não drenado	CU
Cone Penetration Test – Ensaio Geotécnico	CTP
Conteúdo de água do solo	S_w
Curva característica solo-água	CCSA

Deformação vertical	ε_z
Densidade relativa dos sólidos ou massa específica dos grãos	G_s
Deslocamento vertical	u_z
Empresa de Pesquisa Energética	EPE
Fator tempo	T_0
Funções constitutivas	$g(e)$ e $f(e)$
Goiás	GO
Grau de consolidação	$f(Z,T)$
Hydraulic Consolidation Test	HCT
Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na faixa de transição	m_L
Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção após o valor de umidade higroscópica do solo	m_S
Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macroporos	n_L
Inclinação da reta que relaciona umidade e sucção dos microporos	n_S
Índice de compressão	C_c
Índice de recompressão	C_r
Índice de vazios	e
Índice de vazios final	e_1
Índice de vazios inicial ou correspondente à tensão efetiva nula	e_0
Índice de vazios na superfície da camada	e_{00}
Índice de vazios dos macroporos	e_{wL}
índice de vazios dos microporos	e_{wS}
Índice de vazios inicial	e_0
Índice de vazios final	e_f
Laboratório de Geotecnia Escola de Engenharia Civil e Ambiental Universidade Federal de Goiás	LABGEO
Lagrangiano-Euleriano Arbitrário	ALE
Massa específica seca máxima	$r_{dmáx}$
Método dos Elementos Finitos	MEF
Minas Gerais	MG

Norma Brasileira	NBR
Parâmetros constitutivos modelos Somogyi (1979), Liu & Znidarcic (1991) e Weibull (1951)	A, B, C, D, Z, F
Parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar dos macroporos	α_L
Parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar dos microporos	α_S
Parâmetros modelo Schiffman (1980)	C_c e C_k
Parâmetros modelo Ren *et al*. (2016)	*C* e *m*
Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté	PANDA
Percentagem média de adensamento	U_m
Permeabilidade	k
Permeabilidade na superfície da camada	k_{00}
Peso específico da água	γ_w
Peso específico do solo saturado	γ
Peso específico dos sólidos	γ_s
Peso seco da amostra	W_{sd}
Pesquisa e Desenvolvimento	P&D
Poropressão de água nos poros	u_w
Poropressão de ar nos poros do solo	u_a
Poropressão total hidrostática	p_{ss}
Poropressão total excessiva ou dissipação do excesso de poropressão	Δp
Poropressão gerada na base HCT	$\Delta\mu$
Posição	z
Posição atual da partícula	ξ
Posição inicial da partícula	a
Razão de Sobreadensamento	OCR
Recalque superficial	$S(T)$
Recalque total da amostra	S
Resistência à compressão não confinada	q_u
Resistência ao cisalhamento não drenado	s_u
Resistência dinâmica à penetração	q_d

Resistência não drenada	c_u
Seepage Induced Consolidation Test Analysis	SICTA
Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens	SNISB
Sistema Unificado de Classificação dos Solos	SUCS
Sucção matricial	ψ
Tempo	t
Tensão efetiva	σ'
Tensão efetiva na base	σ'_f
Tensão efetiva na direção vertical z	σ'_z
Tensão total	σ
Tensão efetiva na superfície da camada	σ'_{00}
Tensão efetiva produzida pelo cabeçote de acrílico e pistão da célula HCT	σ'_t
Tensão efetiva vertical final na base	σ_f'
Tensão efetiva vertical no topo da camada	σ_0'
Teor de umidade natural ou gravimétrica	w
Termo de absorção (ou reação)	a
Termo de inércia (ou armazenamento)	e_a
Termo difusivo	c
Termo fonte conservativo	γ
Termo fonte externo	f
Umidade ótima	w_{ot}
Unconfined Compressive Strength	UCS
Unidimensional	1D
Universidade Federal de Goiás	UFG
Usina Hidrelétrica	UHE
Variável dependente do problema	u
Velocidade de fluxo	v
Volume de controle associado que ocupa a posição $\xi(a,t)$	$\delta\xi$

1 - INTRODUÇÃO

O uso de reservatórios de água, tanto para o abastecimento público quanto para a geração de energia elétrica, possui elevada importância estratégica no planejamento econômico e social de um país. O Brasil destaca-se pelo alto percentual de fontes renováveis em sua matriz energética, incluindo biomassa, energia hidráulica, carvão vegetal, lixívia, biodiesel, energia eólica, solar e biogás. Em 2024, a participação de fontes renováveis na capacidade de geração de energia no Brasil atingiu 50,0%, em contraste com a média mundial de 14,3% (EPE, 2025). Nesse contexto, a energia hidrelétrica contribui com aproximadamente 11,6% em relação à matriz total desse conjunto de fontes limpas e renováveis na matriz energética nacional (EPE, 2025).

Entretanto, a construção de reservatórios destinados à geração de energia hidrelétrica e ao abastecimento hídrico promove a expansão da área superficial dos corpos d'água, resultando na inundação de regiões que, em condições naturais, não estariam submersas. O solo dessas áreas, ao ser exposto à ação do meio hídrico, torna-se suscetível a processos erosivos, especialmente nas margens do reservatório formado. Esses processos erosivos geram sedimentos que, ao serem transportados e depositados ao longo da vida útil do reservatório, provocam o assoreamento, reduzindo gradualmente seu volume útil e, consequentemente, sua capacidade de armazenamento e regularização. Como resultado, podem ocorrer impactos como a diminuição da geração de energia. Além disso, o acúmulo de sedimentos a montante dos reservatórios pode aumentar o risco de inundação durante períodos de cheia (Petkovsek & Roca, 2014).

Diante da elevada participação da matriz hidrelétrica no Brasil e de sua relevância para o planejamento econômico e social do país, torna-se evidente a necessidade de pesquisas em Engenharia voltadas ao estudo e monitoramento do volume útil dos reservatórios, bem como de sua capacidade de geração de energia e de abastecimento público. Essas investigações são essenciais tanto para usinas em operação quanto para o planejamento de novos empreendimentos. Nesse contexto, foi desenvolvido o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado "Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs" (P&D ANEEL 0394-1705/2017). O projeto foi executado pela Universidade Federal de Goiás (UFG), com apoio da Universidade de Brasília (UnB), e financiado pela Eletrobras Furnas em parceria com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Diversos estudos vêm sendo realizados em usinas hidrelétricas localizadas em diferentes regiões, com o objetivo de monitorar a redução do volume útil dos reservatórios decorrente da

deposição de sedimentos. Carvalho *et al.* (2000) apresentam uma compilação de reservatórios afetados por processos de assoreamento e, com base nesse e em outros estudos, estima-se que a sedimentação de materiais seja responsável por uma redução média anual de aproximadamente 1% na capacidade total de armazenamento de reservatórios em escala global (Mahmood, 1987; Carvalho *et al.*, 2000; Petkovsek & Roca, 2014; Dias *et al.*, 2018; Eakin, 2020). Embora esse percentual possa parecer reduzido, o estudo da Eletrobras (1992) indica que ele pode corresponder a perdas da ordem de 2 km³ por ano apenas no Brasil, volume superior ao de muitos reservatórios de médio porte. Dessa forma, a definição de técnicas eficazes para o controle de processos erosivos e para a mitigação de seus impactos na vida útil dos reservatórios depende da compreensão aprofundada da evolução desses processos, porém não serão abordados na presente tese.

A produção de sedimentos que atingem os reservatórios depende de diversos fatores, incluindo o tipo de solo, a cobertura vegetal, a intensidade e a frequência das precipitações, a topografia e as características hidráulicas dos cursos d'água, sendo a erosão hídrica o principal mecanismo responsável (Carvalho *et al.*, 2000). Os agentes hídricos comumente observados — como precipitação, escoamento superficial e variações no nível da água — influenciam a redução do volume útil dos reservatórios em diferentes ordens de grandeza. Esses efeitos estão diretamente relacionados ao porte do reservatório, à intensidade e à duração dos processos erosivos, ao período de análise considerado e à interação entre os diversos fatores envolvidos.

A erosão é um processo físico que envolve o desprendimento, o transporte e a deposição de partículas de solo ou rocha. A deposição dessas partículas ocorre, fundamentalmente, por meio de dois processos simultâneos: a sedimentação e o adensamento (Chammas, 1989). A sedimentação apresenta maior relevância em escalas de curto prazo, enquanto, em horizontes de longo prazo, o adensamento passa a governar o comportamento dos sedimentos depositados nos reservatórios. Para a adequada análise desse fenômeno, torna-se necessária a adoção de teorias de adensamento não linear, como a teoria de grandes deformações, que constitui o foco central desta pesquisa.

1.1 - IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O processo de deposição e adensamento de sedimentos em reservatórios de barragens configura um fenômeno altamente complexo, caracterizado por grandes deformações, variações espaciais e temporais das propriedades hidráulicas e mecânicas, além de um forte acoplamento hidromecânico entre o fluxo de água nos poros e a deformação do meio poroso.

Modelos clássicos de adensamento, como a teoria unidimensional de Terzaghi & Peck (1948), apresentam limitações significativas quando aplicados a materiais altamente compressíveis e submetidos a grandes deformações, como os sedimentos finos depositados em ambientes hidráulicos, uma vez que tais modelos assumem pequenas deformações, propriedades constantes e comportamento linear do meio.

Nesse contexto, evidencia-se uma lacuna na representação adequada do comportamento desses materiais ao longo do tempo, particularmente no que diz respeito à evolução das propriedades geotécnicas dependentes do estado de tensões e da porosidade, bem como à previsão de recalques e à redistribuição de tensões em sistemas de reservatórios.

Dessa forma, torna-se necessário investigar abordagens que permitam representar de maneira mais consistente o adensamento sob grandes deformações, por meio da integração entre modelagem teórica avançada — baseada em formulações não lineares — e evidências experimentais obtidas em laboratório.

Pesquisas sobre a compressibilidade de depósitos de sedimentos em reservatórios de barragens ainda são escassas e, frequentemente, essa propriedade é negligenciada com o objetivo de simplificar as análises. Como consequência, muitos estudos apresentam uma representação limitada do comportamento desses materiais e da evolução da vida útil dos reservatórios. No entanto, análises mais detalhadas indicam que propriedades como peso específico, compressibilidade e permeabilidade variam significativamente com a profundidade, evidenciando um comportamento não linear associado a processos de adensamento sob grandes deformações, análogo ao observado em depósitos de rejeitos de mineração.

O fenômeno de adensamento sob grandes deformações vem sendo estudado há várias décadas, tendo como marco inicial a teoria proposta por Gibson *et al*. (1967), e permanece como tema de investigação em estudos recentes, como os de Wang *et al*. (2015), Cao *et al*. (2018), Liu & Liu (2018), Yuan *et al*. (2019) e Liu *et al*. (2021). Entretanto, observa-se a ausência de estudos específicos voltados à aplicação dessa teoria nas regiões marginais de reservatórios de barragens, onde as condições hidráulicas e geotécnicas podem apresentar características particulares.

O Ministério de Minas e Energia, o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) com a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei 12.334/2010) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) têm realizado investimentos significativos em usinas hidrelétricas nas últimas décadas, com o objetivo de suprir a crescente demanda energética do país. Os reservatórios formados por essas estruturas desempenham papel essencial no armazenamento de água e na regulação de vazões, viabilizando a geração de

energia elétrica. Entretanto, a redução do volume útil desses reservatórios, decorrente da sedimentação oriunda das bacias hidrográficas contribuintes, constitui um problema crítico, que afeta tanto reservatórios recém-implantados quanto aqueles em operação há mais tempo.

1.2 - JUSTIFICATIVA

A compreensão do adensamento de sedimentos em reservatórios de barragens apresenta implicações diretas na gestão da capacidade de armazenamento, na segurança estrutural e na operação de sistemas hidráulicos, uma vez que esse processo afeta o comportamento mecânico dos depósitos e a evolução das condições hidráulicas ao longo do tempo.

Em condições reais de operação, a deposição contínua de sedimentos pode resultar na redução da vida útil dos reservatórios, além de influenciar diretamente a estabilidade das estruturas e o desempenho geotécnico dos depósitos, afetando parâmetros como tensões efetivas, deformações e condições de drenagem.

Apesar dos avanços na modelagem do adensamento, persistem limitações na aplicação de teorias clássicas à materiais que apresentam comportamento altamente não linear e dependente da deformação, como os sedimentos finos submetidos a grandes deformações, nos quais propriedades como permeabilidade e compressibilidade variam significativamente com o índice de vazios.

Nesse sentido, a realização de estudos que integrem análises experimentais e modelagem teórica e numérica contribui para o aprimoramento das ferramentas preditivas e para a redução das incertezas associadas ao comportamento desses materiais, especialmente em relação à evolução temporal das propriedades geotécnicas.

Diante desse contexto, propõe-se o presente estudo com o objetivo de avaliar o comportamento de consolidação dos depósitos de sedimentos com base na teoria do adensamento sob grandes deformações, bem como sua influência na vida útil de reservatórios de barragens. Esta pesquisa integra a Meta 7 do P&D ANEEL 0394-1705/2017, previamente mencionado.

Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e hidráulica do solo da área de estudo, incluindo ensaios de campo e ensaios especiais, com o objetivo de determinar propriedades e relações constitutivas representativas do comportamento dos sedimentos depositados nas bordas de reservatórios de barragens. Adicionalmente, foram desenvolvidas formulações para a solução analítica e numérica do problema de adensamento sob grandes deformações, permitindo a extrapolação dos resultados para outros reservatórios e realizar retroanálises. A solução analítica foi implementada no *software Wolfram*

Mathematica®, amplamente utilizado em computação científica, especialmente para resolução simbólica de equações diferenciais, além de análises numéricas, estatísticas e visualização de dados.

Apesar do amplo uso de simulações numéricas na literatura, frequentemente realizadas em *softwares* geotécnicos tradicionais, propõe-se neste estudo a formulação do problema utilizando também o *software COMSOL Multiphysics*®, baseado no método dos elementos finitos que possibilita a modelagem multifísica de fenômenos acoplados. Essa abordagem permite a representação simultânea de processos hidromecânicos, como o fluxo em meio poroso e a deformação do solo, associados à deposição de sedimentos. Tal enfoque pode proporcionar uma análise mais detalhada e realista das interações envolvidas, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos da sedimentação em reservatórios de barragens.

1.3 - HIPÓTESE

Hipotetiza-se que a consideração de grandes deformações na modelagem do adensamento de sedimentos possibilita uma representação mais fiel do comportamento observado experimentalmente, particularmente no que se refere à evolução temporal das deformações, da estrutura do meio poroso e das propriedades hidráulicas e mecânicas do material.

Adicionalmente, assume-se que a integração entre resultados experimentais e modelagem teórica e numérica permite identificar tendências e parâmetros-chave para a caracterização do processo de adensamento, considerando condições representativas de campo e a variabilidade das propriedades do material ao longo do tempo.

A hipótese principal considera que os sedimentos, ao serem gerados e depositados nas bordas dos reservatórios, caracterizam-se como materiais finos com elevados índices de vazios, alto teor de umidade e elevada compressibilidade, apresentando comportamento que pode ser descrito pela teoria de deformações finitas. Dessa forma, esses materiais podem ser adequadamente representados pela teoria do adensamento sob grandes deformações.

A formulação do modelo proposto baseia-se nas hipóteses clássicas estabelecidas por Gibson *et al.* (1967), amplamente utilizadas na teoria do adensamento sob grandes deformações:

- O meio poroso é inicialmente saturado, constituído por uma matriz de solo deformável e um fluido intersticial incompressível, sendo as partículas sólidas individualmente incompressíveis;

- O escoamento do fluido nos poros ocorre em regime laminar e é descrito pela lei de Darcy (1856);
- O princípio das tensões efetivas de Terzaghi é aplicável ao sistema;
- As propriedades hidráulicas e mecânicas do solo são descritas por relações constitutivas dependentes do índice de vazios, incluindo a permeabilidade e a tensão efetiva vertical;
- O material é assumido como homogêneo ao longo do domínio analisado.

1.4 - OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar o comportamento de adensamento de sedimentos gerados em reservatórios de barragens, considerando grandes deformações, por meio da integração entre análises experimentais e modelagem teórica, visando representar de forma mais realista os processos hidromecânicos envolvidos.

Para alcançar o objetivo principal, são definidos os seguintes objetivos específicos, estruturados de forma a integrar investigação experimental e modelagem do comportamento geotécnico dos sedimentos:

- Realizar ensaios experimentais para a caracterização do comportamento de adensamento de sedimentos, incluindo a determinação de parâmetros hidráulicos e mecânicos;
- Analisar a evolução das propriedades geotécnicas ao longo do processo de deformação, com ênfase na variação do índice de vazios, da permeabilidade e da tensão efetiva do solo;
- Aplicar e avaliar modelos analítico e numérico de adensamento sob grandes deformações, considerando relações constitutivas não lineares;
- Comparar resultados experimentais e numéricos, identificando tendências, limitações e níveis de aderência entre os modelos e os dados observados;

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos essenciais à compreensão do fenômeno de adensamento sob grandes deformações em sedimentos. Inicialmente, são discutidos os processos de deposição e evolução dos sedimentos em reservatórios de barragens, com destaque para sua influência nas propriedades geotécnicas e na resposta mecânica dos materiais ao longo do tempo.

Em seguida, são apresentadas as principais teorias de adensamento, desde a formulação clássica unidimensional de Terzaghi até as abordagens não lineares aplicáveis a grandes deformações, com ênfase na teoria proposta por Gibson *et al.* (1967). São discutidas também as relações constitutivas que descrevem o comportamento hidráulico e mecânico dos materiais, bem como estratégias de modelagem analítica e numérica para a simulação do fenômeno.

Apesar dos avanços observados na literatura, ainda persistem desafios na representação adequada do comportamento de sedimentos altamente compressíveis, especialmente quanto à integração entre parâmetros obtidos experimentalmente e sua incorporação em modelos numéricos. Nesse contexto, este capítulo estabelece a base teórica necessária para o desenvolvimento da presente pesquisa.

2.1 - DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGENS

A variação do nível de água nos reservatórios de barragens, particularmente nas regiões marginais, constitui um dos principais fatores responsáveis pela geração e deposição de sedimentos, associada também à influência do uso e ocupação do solo na bacia contribuinte. Esses fatores, combinados com processos erosivos, favorecem o transporte e a deposição de sedimentos, resultando na redução progressiva do volume útil dos reservatórios.

Segundo Petkovsek & Roca (2014), os sedimentos representam duas principais preocupações na gestão de barragens e reservatórios: a redução da capacidade de armazenamento, com impactos na geração de energia e no controle de cheias, e os riscos à integridade estrutural, devido à possibilidade de obstrução de estruturas hidráulicas. Adicionalmente, o transporte de sedimentos através das turbinas pode causar abrasão dos componentes mecânicos, reduzindo a eficiência operacional e aumentando os custos de manutenção.

A deposição de sedimentos ocorre por meio de dois processos simultâneos: sedimentação e adensamento (Chammas, 1989). A distinção entre esses processos está associada ao desenvolvimento de tensões efetivas no meio. Enquanto as partículas permanecem em suspensão ou sem contato significativo, predomina a sedimentação. Com o estabelecimento

de contatos interparticulares e o surgimento de tensões efetivas, inicia-se o processo de adensamento (Quispe, 2011). Em termos temporais, a sedimentação domina em curto prazo, enquanto o adensamento governa o comportamento a longo prazo.

Sabe-se que o comportamento de solos finos altamente compressíveis, como os sedimentos acumulados em reservatórios, é análogo aos rejeitos de mineração. Materiais de rejeitos depositados em barragens apresentam normalmente comportamento geotécnico distinto daquele observado em solos naturais, iniciando-se frequentemente em estado floculado. Posteriormente, ocorre a sedimentação por peso próprio, seguida pelo processo de adensamento (Chammas, 1989), sendo essas etapas parcialmente sobrepostas no tempo, conforme ilustrado por Imai (1979) na Figura 2.1.

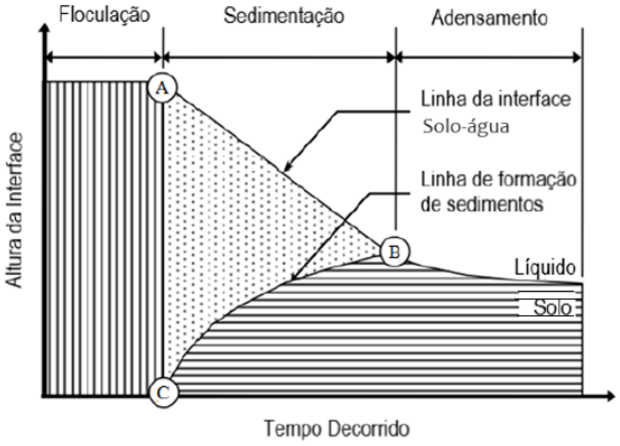


Figura 2.1 - Fenômeno de deposição de sedimentos ao longo do tempo em materiais compressíveis (Modificado de Imai, 1979).

As teorias de sedimentação e adensamento requerem a determinação das curvas de compressibilidade e de condutividade hidráulica dos materiais. Essas relações são expressas, respectivamente, pelas funções índice de vazios–tensão efetiva e índice de vazios–condutividade hidráulica, sendo obtidas por meio de ensaios laboratoriais e, quando possível, complementadas por investigações de campo.

Segundo Ramos (1999), o transporte sólido em reservatórios pode ser classificado em carga de lavagem e carga de fundo. A carga de lavagem é composta predominantemente por partículas finas, como silte e argila, que permanecem em suspensão por longos períodos, enquanto as frações mais grossas podem se depositar em função do tempo de residência e de processos físico-químicos, como a floculação. Já os sedimentos provenientes do leito,

geralmente mais grossos, apresentam maior taxa de deposição, dando início ao processo de adensamento (Carvalho *et al.*, 2000).

Embora os processos de sedimentação e adensamento sejam amplamente compreendidos, a transição entre esses regimes e sua representação em modelos geotécnicos ainda apresentam incertezas significativas, sobretudo em materiais altamente compressíveis, heterogêneos e com comportamento não linear.

2.2 - TEORIA DE ADENSAMENTO

Segundo Villar (2002), o adensamento é um processo caracterizado pela dissipação do excesso de poropressão no solo ao longo do tempo. As teorias associadas a esse fenômeno baseiam-se no comportamento do sistema bifásico solo–água, considerando a interação entre as fases sólida e líquida. Em contraste, as teorias de sedimentação fundamentam-se na continuidade da fase líquida e na conservação da massa de sólidos.

De forma prática, o adensamento corresponde à redução gradual do volume de um solo saturado em decorrência da drenagem da água contida nos poros. Esse processo envolve a dissipação do excesso de poropressão e a consequente transferência progressiva de tensões da fase líquida para o esqueleto sólido, conforme descrito pelo princípio das tensões efetivas. O processo se estende até que o excesso de poropressão, gerado por incrementos de carga ou pelo peso próprio, seja totalmente dissipado, resultando na estabilização das deformações.

2.3 - TEORIA DE ADENSAMENTO DE TERZAGHI & PECK (1948)

A teoria de Terzaghi & Peck (1948) foi desenvolvida para solos finos e saturados submetidos a carregamentos, considerando a evolução temporal do campo de poropressões. Nessa formulação, a deformação do solo é obtida de forma indireta, assumindo-se a equivalência entre o grau médio de dissipação do excesso de poropressão e o grau de adensamento, expresso em termos de recalque ao longo do tempo.

Essa teoria é aplicável a solos que apresentam pequenas deformações, sendo comumente utilizada para materiais com compressibilidade inferior a 20% (Schiffman, 1980). Tal limitação decorre da hipótese de deformações infinitesimais, que caracteriza a formulação clássica de Terzaghi & Peck (1948), impondo restrições associadas às hipóteses simplificadoras adotadas, conforme descrito a seguir:

- O solo é considerado homogêneo e completamente saturado;
- As compressibilidades dos grãos sólidos e da água são desprezíveis em relação à compressibilidade do esqueleto do solo;

- O escoamento do fluido nos poros é governado pela Lei de Darcy;
- O fluxo de água ocorre unidimensionalmente, na direção vertical;
- A deformação do solo é considerada unidimensional;
- As deformações são infinitesimais, permitindo assumir a espessura da camada como constante;
- A condutividade hidráulica e a compressibilidade são constantes ao longo do processo;
- As tensões totais permanecem constantes durante o adensamento.

Segundo Schiffman (1980), as três últimas hipóteses físicas — relacionadas à constância das propriedades do material e da geometria do sistema — constituem as principais limitações da teoria convencional de Terzaghi & Peck (1948). Essa teoria é classificada como linear, tanto do ponto de vista físico quanto geométrico, pois assume propriedades constantes e espessura inalterada da camada de solo ao longo do tempo. Entretanto, tais condições raramente são observadas em materiais naturais. Apesar dessas limitações, a teoria permanece aplicável em situações com pequenas deformações e variações de carregamento. Em cenários mais complexos, torna-se necessária a adoção de formulações não lineares.

Estudos mais recentes incorporam o comportamento não linear dos materiais como uma extensão da teoria clássica de Terzaghi & Peck (1948). Embora essas abordagens permitam deformações mais expressivas, ainda se baseiam predominantemente na hipótese de pequenas deformações, uma vez que adotam um sistema de referência fixo, no qual as fronteiras do domínio permanecem inalteradas ao longo do tempo.

Apesar de sua ampla aplicação, a teoria de Terzaghi apresenta limitações relevantes quando aplicada a materiais altamente compressíveis. Essas restrições motivaram o desenvolvimento de teorias não lineares mais avançadas, capazes de representar grandes deformações e a evolução das propriedades do meio.

2.4 - TEORIA DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES

Para a análise do adensamento de sedimentos depositados em reservatórios de barragens, torna-se necessária a adoção de uma teoria não linear, como a teoria de grandes deformações proposta por Gibson *et al*. (1967), também denominada teoria de deformações finitas. Essa formulação incorpora simultaneamente não linearidades físicas e geométricas. O regime de grandes deformações caracteriza-se por condições em que a variação volumétrica é significativa ao longo da espessura da camada, exigindo a consideração explícita da deformação na formulação governante.

O problema de adensamento, como mencionado, pode ser analisado sob duas abordagens complementares: a constitutiva (ou física), que considera a evolução das propriedades do material ao longo do processo, como compressibilidade, permeabilidade e índice de vazios; e a geométrica, que envolve a variação da espessura da camada de solo e da altura de drenagem ao longo do tempo. Em solos muito moles, como aqueles formados por rejeitos ou sedimentos depositados em reservatórios de barragens, as deformações induzidas pelo peso próprio são significativas, exigindo uma abordagem que incorpore não linearidades tanto nas relações constitutivas quanto na descrição geométrica do problema, especialmente no contexto de grandes deformações.

A teoria de adensamento não linear proposta por Gibson *et al*. (1967), fundamenta-se nas seguintes hipóteses:

- O meio poroso é constituído por uma fase sólida e uma fase fluida incompressíveis, formando um esqueleto deformável;
- A deformação do esqueleto resulta do rearranjo das partículas e do escoamento do fluido intersticial;
- O volume da fase sólida permanece constante ao longo do processo;
- Não há restrição à magnitude das deformações (formulação de grandes deformações);
- O material é considerado homogêneo;
- O solo está inicialmente saturado e normalmente adensado;
- O escoamento e as deformações são unidimensionais;
- O adensamento é induzido por peso próprio e/ou carregamentos externos monotônicos;
- O princípio das tensões efetivas é válido;
- A deformação depende do estado de tensões, sendo independente do tempo em si;
- A permeabilidade (k) e a compressibilidade (m_v ou relações e–σ') são funções do índice de vazios;
- O escoamento do fluido é descrito pela Lei de Darcy;
- As equações de conservação de massa são aplicadas separadamente às fases sólida e fluida;
- As velocidades das fases são suficientemente pequenas para garantir validade das hipóteses de escoamento.

Problemas envolvendo grandes deformações em solos têm sido amplamente investigados na literatura recente, como demonstrado por Wang *et al*. (2015), Cao *et al*. (2018), Liu & Liu (2018), Yuan *et al*. (2019) e Liu *et al*. (2021). Em geral, esses estudos derivam do modelo clássico de grandes deformações de Gibson *et al*. (1967), incorporando extensões e

adaptações. Wang *et al*. (2015) empregaram uma abordagem numérica baseada no método Lagrangiano-Euleriano Arbitrário (ALE) para simular grandes deformações em aplicações como ensaios CPT, interação solo-estrutura e dutos enterrados. Cao *et al*. (2018) analisaram a consolidação unidimensional de solos altamente saturados sob peso próprio. Liu & Liu (2018) propuseram uma formulação não linear via método dos elementos finitos para modelagem de rejeitos carbonáticos. Yuan *et al*. (2019), por sua vez, abordaram problemas geomecânicos acoplados com grandes deformações, utilizando elementos finitos em aplicações como colunas de solo, fundações e ensaios CPT.

O adensamento em regime de deformações finitas corresponde a uma abordagem avançada para modelar a consolidação de solos altamente compressíveis. Sedimentos depositados em reservatórios geralmente apresentam elevados índices de vazios e altos teores de umidade, resultando em intensos processos de adensamento por peso próprio logo após a deposição. Nesse contexto, a formulação de Gibson *et al*. (1967) torna-se mais adequada, especialmente com o advento de ferramentas computacionais e métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, que possibilitam a resolução de problemas não lineares acoplados com grandes deformações.

Embora a teoria de Gibson *et al*. (1967) represente um avanço substancial ao incorporar não linearidades físicas e geométricas, sua aplicação prática está condicionada à definição adequada das leis constitutivas e à calibração de parâmetros experimentais confiáveis, como relações entre índice de vazios e tensão efetiva, bem como permeabilidade em função da estrutura do solo. Esses aspectos ainda representam desafios significativos na modelagem de sedimentos naturais.

2.4.1. SISTEMA DE COORDENADAS

Devido à natureza complexa do movimento das partículas durante o processo de adensamento, é fundamental a adoção de um sistema de coordenadas apropriado para sua formulação matemática. Em situações que envolvem grandes deformações, as variações espaciais da camada de solo tornam inadequada a utilização de sistemas de referência fixos, sendo necessária a adoção de descrições que acompanhem a deformação do meio (Cargill, 1982).

Na análise do movimento de partículas em processos de adensamento não linear, destacam-se dois sistemas de coordenadas: o Euleriano, baseado em um referencial fixo no espaço, e o Lagrangiano, que acompanha o movimento das partículas do meio (Gibson *et al*., 1967; Xie & Leo, 2004). Na formulação de grandes deformações proposta por Gibson *et al*.

(1967), a descrição Lagrangiana é preferida, pois permite representar de forma mais adequada a evolução geométrica do domínio ao longo do tempo (Schiffman, 1980).

Na descrição Lagrangiana, um volume de controle é definido de modo a acompanhar as mesmas partículas materiais ao longo do tempo, sendo delimitado por superfícies que se deformam com o meio. Dessa forma, embora o volume possa variar em forma e dimensão, sua identidade material é preservada. Essa abordagem é particularmente adequada para problemas de grandes deformações, sendo representada esquematicamente na Figura 2.2.

Na formulação Lagrangiana, para um instante de tempo t $(t>0)$, tem-se que a posição de uma partícula é descrita por:

$$\xi(a+\delta a,t)=\xi(a,t)+\frac{\delta\xi}{\partial a}\delta a+\frac{\delta\xi}{\partial t}\delta t \qquad (2.1)$$

onde, t denota o tempo (T), a representa a posição inicial da partícula (L), ξ representa a posição atual da partícula (L) e $\delta\xi$ refere-se ao volume de controle associado que ocupa a posição $\xi(a,t)$ (L³).

As condições de contorno adotadas consideram a base da camada na posição z = 0, o topo da camada em z = H, e a condição inicial definida no instante t = 0, estabelecendo assim os limites espaciais e temporais do problema de adensamento ($\xi(0,t)=0$, $\xi(H(t),t)=H_0$, $\xi(a,0)=a$).

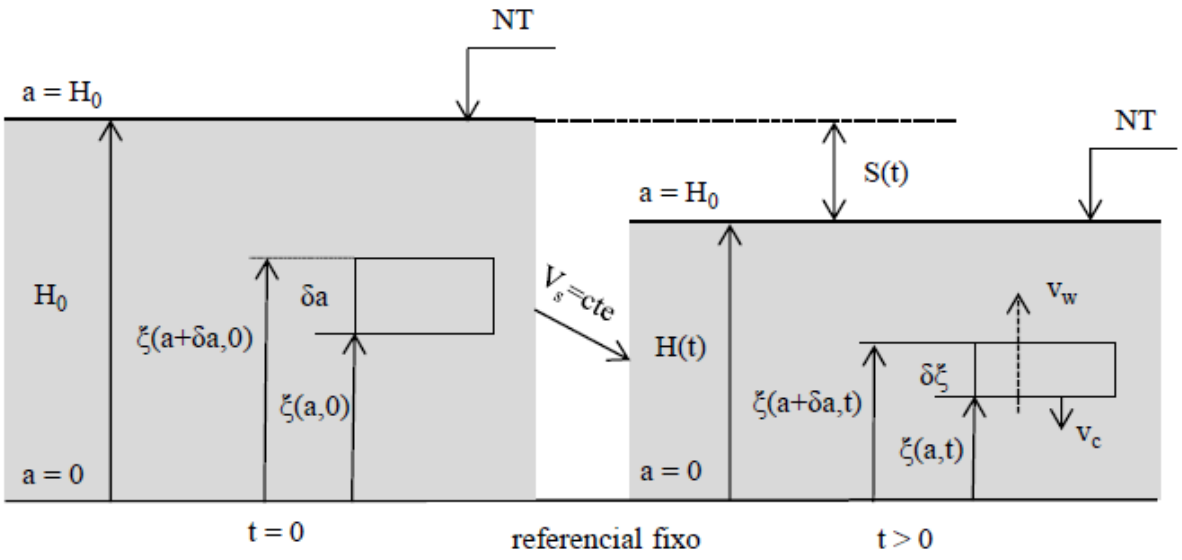


Figura 2.2 - Sistema de coordenadas Lagrangiano (Pereira, 2017).

2.4.2. FORMULAÇÃO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES

A teoria do adensamento de grandes deformações proposta por Gibson *et al.* (1967) baseia-se na hipótese de solo saturado, em que o escoamento do fluido intersticial é descrito pela Lei de Darcy e o comportamento mecânico é regido pelo princípio das tensões efetivas. A formulação inclui explicitamente os efeitos do peso próprio e incorpora não linearidades físicas — relacionadas às leis constitutivas do material — e geométricas — decorrentes da evolução da configuração do meio sob grandes deformações.

Dessa forma, o modelo de adensamento de grandes deformações de Gibson *et al.* (1967) é expresso pela Equação (2.2), formulada em termos do índice de vazios, variável fundamental na descrição da compressibilidade do solo:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[g(e)\frac{\partial e}{\partial z}\right] \pm f(e)\frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial e}{\partial t} \tag{2.2}$$

onde:

$$g(e) = -\frac{k_z(e)}{\gamma_w(1+e)a_v(e)} \tag{2.3}$$

$$f(e) = -\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)\frac{d}{de}\left[\frac{k_z(e)}{1+e}\right] \tag{2.4}$$

e k_z é a condutividade hidráulica na direção vertical z (LT^{-1}), e é o índice de vazios que caracteriza o estado estrutural do solo, γ_w é o peso específico da água ($MT^{-2}L^{-2}$), γ_s é o peso específico dos sólidos ($MT^{-2}L^{-2}$), enquanto a_v o coeficiente de compressibilidade ($LM^{-1}T^2$), podendo variar em função do índice de vazios.

A partir dessas definições, a equação governante do adensamento unidimensional em regime de grandes deformações é descrita por:

$$\frac{\partial e}{\partial t} - \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)\frac{d}{de}\left[\frac{k_z(e)}{1+e}\right]\frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{k_z(e)}{\gamma_w(1+e)}\frac{\partial \sigma_z'}{\partial e}\frac{\partial e}{\partial z}\right] = 0 \tag{2.5}$$

onde, σ_z' é a tensão efetiva na direção vertical z ($ML^{-1}T^{-2}$). Essa equação descreve o comportamento acoplado entre fluxo de fluido e deformação do esqueleto sólido, sendo fundamental na modelagem de processos de consolidação não linear.

A teoria de Gibson *et al.* (1967) foi inicialmente desenvolvida para camadas finas de alguns pés de espessura (cerca de 1 a 2 metros) e homogêneas de argilas saturadas. Posteriormente, verificou-se sua aplicabilidade a camadas espessas (acima de 2 metros), desde que considerados os efeitos do peso próprio do sistema bifásico, incluindo tanto a fase sólida

quanto a fase líquida (Schiffman, 1980). Nesse contexto, a teoria de grandes deformações mostra-se adequada para representar o comportamento de solos altamente compressíveis e sedimentos com elevados índices de vazios, típicos de depósitos em reservatórios de barragens.

2.4.3. LEIS CONSTITUTIVAS

A relação entre o coeficiente de permeabilidade e a tensão efetiva com o índice de vazios é definida por leis constitutivas. Essas leis podem ser estabelecidas com base em resultados obtidos em ensaios de laboratório e de campo, utilizando diferentes metodologias. Em laboratório, podem ser determinadas por meio de ensaios de adensamento convencionais baseados na teoria linear (Imai, 1979; Scully, 1984), ensaios com taxa de deformação constante fundamentados na teoria de grandes deformações (Znidarcic *et al.*, 1992; Lima, 1996), bem como ensaios de adensamento induzido por forças de percolação, como o ensaio HCT (Abu-Hejleh *et al.*, 1996; Silva & Azevedo, 1999). Em campo, essas leis podem ser obtidas por meio de ensaios *in situ* que determinam o índice de vazios e a poropressão de cravação, além de medições realizadas com sondas piezométricas (Azevedo *et al.*, 1999).

Nos últimos anos, diferentes relações constitutivas de compressibilidade e permeabilidade têm sido propostas para materiais moles, particularmente rejeitos de mineração. Além de modelos lineares simplificados, destacam-se formulações não lineares baseadas em funções exponenciais, logarítmicas e de potência, capazes de representar de forma mais realista o comportamento dependente do índice de vazios. A seguir, são apresentadas algumas das principais relações adotadas na literatura para modelagem do adensamento.

Somogyi (1979) propôs uma relação constitutiva do tipo potência, na qual os parâmetros A, B, C e D são obtidos por ajuste de curvas experimentais provenientes de ensaios de adensamento, como o HCT. A acurácia do modelo está diretamente relacionada à qualidade da calibração desses parâmetros. Essa formulação, conhecida como *Single Power Function Model*, é amplamente utilizada para representar a dependência não linear entre permeabilidade, tensão efetiva e índice de vazios:

$$\sigma'(e) = \left(\frac{e}{A}\right)^{1/B} \tag{2.6}$$

$$k(e) = Ce^{D} \tag{2.7}$$

Essa formulação tem se mostrado eficaz na representação das relações de permeabilidade em solos moles, conforme evidenciado por Somogyi (1979) e Al Tabaa & Wood (1987). As leis constitutivas desempenham papel fundamental em análises numéricas,

especialmente em modelos acoplados hidro-mecânicos, permitindo prever o comportamento de materiais sob diferentes condições de carregamento, como aterros sobre solos moles e depósitos de rejeitos.

Schiffman (1980) propôs uma relação constitutiva do tipo exponencial, baseada em dados experimentais de ensaios de adensamento, na qual os valores iniciais de tensão efetiva, índice de vazios e permeabilidade são definidos na superfície da camada (σ'_{00}, e_{00} e k_{00}). Os parâmetros do modelo (C_c e C_k) são obtidos por calibração experimental, permitindo representar a evolução das propriedades do solo ao longo do processo de consolidação:

$$\sigma'(e) = \sigma_{00}\,'\exp^{\left(\frac{e-e_{00}}{C_c}\right)} \tag{2.8}$$

$$k(e) = k_{00}\exp^{\left(\frac{e-e_{00}}{C_k}\right)} \tag{2.9}$$

Liu & Znidarcic (1991) propuseram uma extensão do modelo de potência, introduzindo um parâmetro adicional, Z, que corrige limitações associadas à condição de tensão efetiva nula:

$$\sigma'(e) = \left(\frac{e}{A}\right)^{1/B} - Z \tag{2.10}$$

Essa formulação, conhecida como *Extended Power Function Model*, melhora a consistência matemática do modelo, assegurando que o índice de vazios permaneça fisicamente admissível em todo o domínio de tensões, evitando valores negativos e inconsistências típicas de modelos logarítmicos:

$$e = A\left(\sigma_v^{'} + Z\right)^B \tag{2.11}$$

De maneira análoga, a função de distribuição de Weibull (1951) também tem sido utilizada para modelar a relação entre índice de vazios e tensão efetiva, sendo seus parâmetros (A, B, C e F) obtidos experimentalmente, frequentemente a partir de ensaios HCT. Essa abordagem permite representar comportamentos não lineares complexos observados em materiais altamente compressíveis:

$$e = A - B.\exp\left(-C.s_v^{'F}\right) \tag{2.12}$$

Xie & Leo (2004) propuseram uma formulação constitutiva que considera a presença de uma carga efetiva inicial uniformemente distribuída (q'_0) e a variação do coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v).

$$\sigma'(e) = q'_0 - \frac{1}{m_v}\ln\left(\frac{1+e}{1+e_{00}}\right) \tag{2.13}$$

$$k(e) = k_{00}\left(\frac{1+e}{1+e_{00}}\right)^2 \tag{2.14}$$

O modelo foi desenvolvido para solos argilosos homogêneos, saturados, sem efeitos de fluência, sob condições de consolidação unidimensional monotônica, sendo aplicado na comparação entre teorias de pequenas e grandes deformações:

Ren *et al.* (2016) também propuseram uma equação para representar a relação entre a condutividade hidráulica saturada e o índice de vazios, sendo *C* e *m* constantes determinadas a partir de ajustes das curvas de ensaios de adensamento, semelhante ao *Single Power Function Model.*

Os autores desenvolveram uma relação para a condutividade hidráulica saturada em função do índice de vazios, baseada no modelo de Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1937), porém com adaptações que ampliam sua aplicabilidade a diferentes tipos de solo.

$$k = C\frac{e^{3m+3}}{(1+e)^{\frac{5}{3}m+1}\left((1+e)^{m+1} - e^{m+1}\right)^{\frac{4}{3}}} \tag{2.15}$$

Apesar disso, o modelo apresenta limitações importantes, como a necessidade de estimar parâmetros microestruturais e a incapacidade de representar adequadamente a anisotropia hidráulica e características geométricas dos poros, como tortuosidade e distribuição de tamanhos.

Apesar da ampla variedade de modelos constitutivos disponíveis, não existe consenso quanto a uma formulação universalmente aplicável a diferentes tipos de sedimentos. A seleção do modelo depende da qualidade dos dados experimentais, das condições de carregamento e das características do material, o que pode introduzir incertezas relevantes nas análises, especialmente em modelos numéricos acoplados.

2.5 - MODELAGEM DO FENÔMENO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES

O fenômeno de adensamento de grandes deformações consiste em um problema acoplado entre a mecânica dos meios contínuos deformáveis e o escoamento transiente em meios porosos saturados ou parcialmente saturados. Embora o processo ocorra intrinsecamente em três dimensões, a elevada dimensionalidade implica aumento significativo na complexidade computacional e na quantidade de parâmetros constitutivos requeridos. Por esse motivo, formulações unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D), baseadas em hipóteses simplificadoras, são amplamente empregadas. A complexidade crescente do fenômeno físico

reflete-se diretamente na não linearidade das equações governantes, especialmente em termos de grandes deformações, variação de propriedades hidráulicas e dependência do estado de tensões. Nesse contexto, métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), tornam-se indispensáveis para a resolução de sistemas altamente não lineares, permitindo a obtenção de soluções aproximadas com elevado grau de precisão (Azevedo *et al.*, 1999).

Uma das principais vantagens dos métodos numéricos reside na sua capacidade de tratar problemas governados por equações diferenciais complexas, cuja solução analítica é inviável ou inexistente. O Método dos Elementos Finitos (MEF) destaca-se como uma das principais ferramentas computacionais na análise de problemas de mecânica dos meios contínuos, permitindo a discretização espacial do domínio em elementos finitos interligados por nós. A formulação do MEF baseia-se na aproximação das variáveis de campo (como deslocamentos e pressões) por funções de interpolação, possibilitando a obtenção de um sistema algébrico que representa o comportamento global do sistema. Essa abordagem é particularmente eficaz em problemas envolvendo acoplamento hidromecânico e não linearidades.

A modelagem numérica constitui uma abordagem robusta para a resolução de equações diferenciais parciais que governam fenômenos complexos, como o adensamento de grandes deformações. No âmbito do MEF, o domínio contínuo é discretizado em uma malha composta por elementos finitos, permitindo a aproximação espacial das variáveis de interesse. Essa abordagem possibilita a consideração explícita de não linearidades geométricas (deformações finitas) e físicas (variação de propriedades hidráulicas e mecânicas), além do acoplamento entre fluxo e deformação. Como resultado, obtêm-se soluções numéricas consistentes e capazes de representar adequadamente o comportamento real do sistema (Azevedo *et al.*, 1999; Artamonova & Sheshenin, 2023; Liang *et al.*, 2023).

Atualmente, diversos *softwares* especializados permitem a resolução numérica das equações diferenciais que descrevem o adensamento de grandes deformações, incorporando modelos constitutivos avançados e algoritmos robustos de solução. Entre eles, destacam-se ferramentas clássicas como ACCUMV (Schiffman *et al*., 1992), CONDES (Yao & Znidarcic, 1997), FSCONSOL (GWP *Software*, 1999), além de plataformas multipropósito como o *COMSOL Multiphysics*® (Comsol, 2018), que possibilita a implementação de equações governantes customizadas e o acoplamento multifísico. Esses programas diferem principalmente quanto à flexibilidade na definição de leis constitutivas, estratégias de solução numérica e capacidade de modelagem de problemas acoplados.

As formulações bidimensionais e tridimensionais para o adensamento de grandes deformações, como aquelas implementadas no código Consol2D (Jakubick *et al.*, 2003) e em

estudos tridimensionais mais recentes (Pinho, 2018), ainda apresentam aplicação limitada na prática. Isso se deve, principalmente, à dificuldade de definição de modelos constitutivos representativos para solos com comportamento altamente não linear, à elevada demanda computacional associada à discretização espacial refinada e à instabilidade numérica decorrente de grandes deformações e acoplamento hidromecânico. Além disso, problemas como distorção de malha e necessidade de técnicas avançadas (ex.: remalhamento adaptativo) reforçam os desafios dessas abordagens (Gjerapic *et al*., 2008).

A análise do adensamento de grandes deformações é governada por equações diferenciais parciais não lineares, que incorporam acoplamento hidromecânico, deformações finitas e dependência de propriedades constitutivas. Devido à elevada complexidade dessas equações, soluções analíticas são, em geral, impraticáveis, tornando os métodos numéricos — especialmente o MEF — ferramentas essenciais para a obtenção de soluções robustas e fisicamente consistentes.

A eficácia dos métodos numéricos está intrinsecamente relacionada à escolha adequada das leis constitutivas, que devem representar fielmente o comportamento mecânico e hidráulico do solo, bem como à correta definição das condições iniciais e de contorno. Assim, a confiabilidade das simulações depende não apenas da robustez do método numérico empregado, mas também da qualidade dos parâmetros de entrada, incluindo propriedades dependentes do estado, como permeabilidade, compressibilidade e relações tensão-deformação.

Nesse sentido, a integração entre modelagem numérica e dados experimentais representa um desafio central, especialmente no que se refere à calibração de parâmetros constitutivos e validação dos modelos. A utilização de ensaios laboratoriais e monitoramento de campo é fundamental para reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade das previsões numéricas, promovendo uma abordagem mais realista e aplicável à Engenharia Geotécnica.

2.5.1. MODELAGEM DA SOLUÇÃO ANALÍTICA

A equação proposta por Gibson *et al*. (1967), originalmente apresentada na Eq. 2.2, pode ser reformulada como uma equação diferencial parcial não linear de segunda ordem, que governa o processo de adensamento sob grandes deformações. Essa formulação incorpora simultaneamente os efeitos de não linearidade geométrica e material, sendo expressa conforme a Eq. (2.16), com os termos auxiliares definidos nas Eqs. (2.17) a (2.19), que representam parâmetros dependentes do estado do meio poroso.

$$g_3(e)\frac{de}{d\bar{z}} + g_2(e)\frac{d^2e}{d\bar{z}^2} = \frac{de}{dt} \tag{2.16}$$

onde:

$$g_3(e) = g_1(e) + \frac{dg_2(e)}{d\bar{z}} \tag{2.17}$$

$$g_1(e) = -\left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}\right)\frac{d}{de}\left(\frac{k(e)}{1+e}\right) \tag{2.18}$$

$$g_2(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)}\frac{d\sigma'(e)}{de} \tag{2.19}$$

A solução da variável primária do problema, expressa pelo índice de vazios, permite a obtenção de um conjunto de variáveis derivadas ou secundárias, incluindo a poropressão, as tensões total e efetiva, o recalque superficial e o grau de consolidação. Essas variáveis são fundamentais para a interpretação do comportamento hidromecânico do solo, sendo obtidas por meio de relações constitutivas e equações de equilíbrio associadas ao modelo de adensamento.

A condição de equilíbrio de tensões totais (σ) pode ser estabelecida a partir da análise de um volume de controle infinitesimal no interior da camada de solo $(\delta\xi)$, conforme ilustrado na Figura 2.3. Considerando um instante de tempo específico (t), as equações de equilíbrio (Eqs. 2.20 e 2.21) são derivadas a partir do balanço de forças verticais, incorporando o peso próprio do solo saturado e as variações de tensão ao longo da profundidade, conforme descrito por Gibson *et al*. (1967).

$$\begin{aligned} &-\sigma A_r - \frac{d\sigma}{d\xi}d\xi A_r + \sigma A_r - \gamma A_r d\xi = 0 \\ &-\frac{d\sigma}{d\xi}d\xi A_r - \gamma A_r d\xi = 0 \qquad \left(\times -\frac{1}{d\xi A_r}\right) \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\frac{d\sigma}{d\xi} + \gamma = 0 \tag{2.21}$$

onde γ é o peso específico do solo saturado, expresso em função do índice de vazios (e) e dos pesos específicos da água (γ_w) e das partículas sólidas (γ_s), conforme a seguinte relação:

$$\gamma = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} \tag{2.22}$$

Assim, tem-se que:

$$\frac{d\sigma}{d\xi}+\frac{\gamma_s+e\gamma_w}{1+e}=0 \tag{2.23}$$

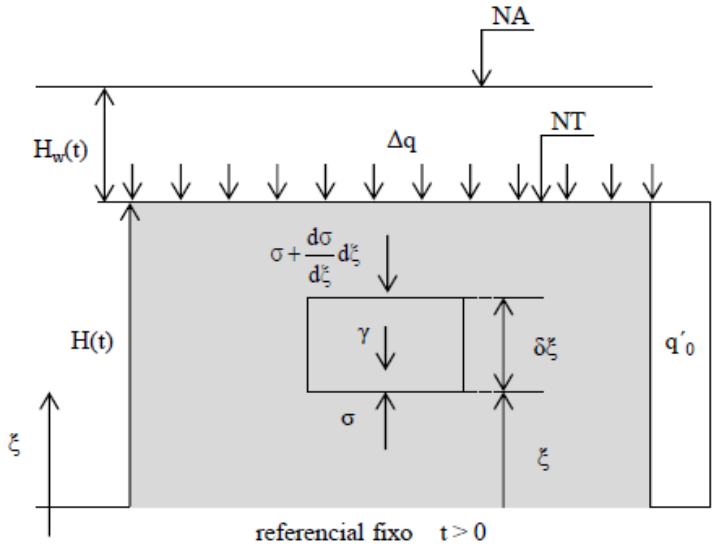


Figura 2.3 - Equilíbrio de tensões totais considerando adensamento não linear e geométrico (Pereira, 2017).

A equação de equilíbrio da tensão total pode ser convenientemente reformulada em termos de uma coordenada espacial normalizada, o que facilita a análise matemática e a implementação numérica do problema. A Eq. (2.24) expressa essa transformação, permitindo a generalização da solução para diferentes espessuras de camada e condições de contorno.

$$\frac{d\sigma}{dZ}=-\left(\gamma_s+\gamma_w e\left(Z,T\right)\right)H_r \tag{2.24}$$

A partir da formulação apresentada, a tensão total pode ser calculada em qualquer posição ao longo da profundidade da camada de solo e para qualquer instante de tempo, conforme descrito pelas Eqs. (2.25) e (2.26). O termo adicional definido na Eq. (2.27) incorpora o efeito da lâmina d'água sobrejacente, contribuindo para a distribuição de tensões totais e influenciando diretamente o processo de adensamento.

$$\sigma\left(Z,T\right)=\sigma\left(Z,0\right)-\int_0^Z\left(\gamma_s+\gamma_w e\left(Z,T\right)\right)H_r dZ \tag{2.25}$$

$$\sigma\left(Z,T\right)=\sigma\left(Z,0\right)-\gamma_s H_r Z-\gamma_w H_r\int_0^Z e\left(Z,T\right)dZ \tag{2.26}$$

onde $\sigma\left(Z,0\right)$ é definido a seguir e H_w representa a altura de lâmina d´água sobre a camada de solo mole, como ilustrado na Figura 2.3:

$$\sigma(Z,0) = q_0\,' + \Delta q + \gamma_w H_w \tag{2.27}$$

A determinação da tensão efetiva baseia-se na adoção de uma relação constitutiva adequada, conforme as Eqs. 2.6 a 2.15, que descrevem o comportamento compressivo do solo. A partir da decomposição da tensão total em suas componentes efetiva e neutra, conforme o princípio de Terzaghi, a poropressão pode ser obtida pela Eq. (2.28), sendo essa relação fundamental para a análise do comportamento mecânico de solos saturados.

$$p(Z,T) = \sigma(Z,T) - \sigma'(Z,T) \tag{2.28}$$

A poropressão total pode ser decomposta em uma componente hidrostática (p_{ss}) e uma componente excessiva (Δp). A poropressão hidrostática, associada ao equilíbrio estático da coluna de fluido, é dada pela Eq. (2.29), enquanto o excesso de poropressão, responsável pelo processo de dissipação durante o adensamento, é definido pela Eq. (2.30).

$$p_{ss}(Z,T) = \gamma_w \left[H(T) + H_w(T) - H_r Z - H_r \int_0^Z e(Z,T)\,dZ \right] \tag{2.29}$$

$$\Delta p(Z,T) = p(Z,T) - p_{ss}(Z,T) \tag{2.30}$$

Sob a hipótese de deformação unidimensional, a deformação vertical (ε_z) é definida como o gradiente do deslocamento vertical ao longo da profundidade, conforme a Eq. (2.31). Essa relação é fundamental para a descrição do campo de deformações em problemas de adensamento, especialmente em condições de carregamento vertical predominante.

$$\varepsilon_z = -\frac{du_z}{d\xi} = -\frac{(1+e_0)}{(1+e)}\frac{du_z}{da} = -\frac{1}{(1+e)}\frac{du_z}{d\bar{z}} = -\frac{1}{H_r(1+e)}\frac{du_z}{dZ} \tag{2.31}$$

onde u_z representa o deslocamento vertical em qualquer ponto da camada.

Assumindo-se que o solo se encontra totalmente saturado e que as partículas sólidas são incompressíveis, estabelece-se uma relação direta entre variações volumétricas e mudanças no índice de vazios, conforme a Eq. (2.32), hipótese frequentemente adotada em análises clássicas de adensamento.

$$\varepsilon_z = -\frac{\Delta e}{(1+e)} \tag{2.32}$$

A combinação das relações de deformação (Eq. 2.31) e variação volumétrica (Eq. 2.32) permite a obtenção de uma expressão para o deslocamento vertical ao longo da camada de solo. As Eqs. (2.33) e (2.34) resultam dessa integração, permitindo a avaliação do campo de deslocamentos associado ao processo de adensamento.

$$\frac{du_z}{dZ} = -H_r \Delta e \tag{2.33}$$

$$u_z(Z,T) = -H_r \int_0^Z \left[e(Z,0) - e(Z,T) \right] dZ \tag{2.34}$$

O recalque superficial, definido como o deslocamento vertical no topo da camada, $S(T)$ é obtido diretamente a partir da integração das deformações ao longo da profundidade, conforme a Eq. (2.35), sendo uma das principais grandezas de interesse em problemas de adensamento.

$$S(T) = u_z(1,T) = -H_r \int_0^1 \left[e(Z,0) - e(Z,T) \right] dZ \tag{2.35}$$

A percentagem média de adensamento (U_m) pode ser expressa em função da dissipação do excesso de poropressão (Δp), conforme a Eq. (2.36), sendo as Eqs. (2.37) e (2.38) responsáveis pela definição dos termos auxiliares. Essa abordagem permite relacionar diretamente o processo hidráulico à evolução do adensamento.

$$U_m(T) = \left(1 - \frac{\Delta p_m(T)}{\Delta p_m(0)} \right) \times 100\% \tag{2.36}$$

onde:

$$\Delta p_m(T) = \sum_{i=1}^{n} \Delta p(Z_i, T) \tag{2.37}$$

$$\Delta p_m(0) = \sum_{i=1}^{n} \Delta p(Z_i, 0) \tag{2.38}$$

O grau de consolidação $f(Z,T)$ também pode ser definido com base na variação do índice de vazios, conforme a Eq. (2.39), representando a fração do adensamento total já ocorrida.

$$f(Z,T) = \frac{e - e_1}{e_0 - e_1} \tag{2.39}$$

onde e_0 e e_1 são os índices de vazio inicial e final, respectivamente.

O grau de consolidação médio pode ser alternativamente obtido por meio da formulação proposta por Gibson *et al*. (1967), conforme a Eq. (2.40), que incorpora o fator tempo adimensional (T_0) definido pela Eq. (2.41), associado à evolução temporal do processo de adensamento.

$$U_m = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 T_0 \right] \tag{2.40}$$

$$T_0 = \frac{g_e t}{h(0)^2} \tag{2.41}$$

2.5.2. MODELAGEM NUMÉRICA COM *SOFTWARE COMSOL*

Conforme discutido anteriormente, o problema de adensamento sob grandes deformações pode ser adequadamente tratado por meio do MEF, sendo o *COMSOL Multiphysics*® uma ferramenta computacional amplamente empregada para esse fim. O *software* utiliza técnicas numéricas avançadas para a discretização e solução de equações diferenciais parciais não lineares, permitindo a modelagem de problemas físicos complexos. Sua estrutura integrada contempla todas as etapas do fluxo de modelagem — definição geométrica, caracterização de propriedades constitutivas, seleção das interfaces físicas, solução numérica e pós-processamento — assegurando consistência e precisão nos resultados obtidos (Comsol, 2018).

O *COMSOL Multiphysics*® constitui um ambiente de simulação interativo amplamente difundido na comunidade científica e na Engenharia Geotécnica, sendo capaz de tratar problemas complexos envolvendo múltiplos campos físicos. Sua arquitetura integrada permite a visualização completa do modelo e o gerenciamento de todas as etapas da simulação em uma única interface. Destaca-se, ainda, pela capacidade de modelagem multifísica, na qual diferentes fenômenos — como fluxo em meios porosos e deformação mecânica — podem ser resolvidos de forma acoplada e simultânea, característica essencial na análise de problemas de adensamento (Comsol, 2018).

Por meio das interfaces físicas pré-definidas e do suporte avançado à definição de propriedades constitutivas, o *COMSOL Multiphysics*® permite a construção de modelos a partir da especificação direta das variáveis físicas relevantes, tais como carregamentos, condições de contorno, fontes e fluxos, dispensando a formulação explícita das equações diferenciais governantes pelo usuário. Essas definições são associadas diretamente aos domínios físicos (sólidos ou fluidos), independentemente da discretização adotada, sendo posteriormente traduzidas pelo *software* em um sistema de equações diferenciais parciais que representa o comportamento do sistema modelado (Comsol, 2018).

As interfaces físicas do *COMSOL Multiphysics*® possibilitam a realização de diferentes tipos de análises, incluindo estudos estacionários, transientes, lineares e não lineares, além de

análises no domínio da frequência. Durante a solução dos modelos, o *software* monta automaticamente o sistema global de equações, resolvendo-o por meio de algoritmos numéricos avançados, como métodos iterativos e diretos. Adicionalmente, incorpora técnicas de refinamento adaptativo de malha (*adaptive mesh refinement*) e estratégias de controle de erro, garantindo maior precisão e estabilidade numérica das soluções obtidas (Comsol, 2018).

O *software* possibilita a criação de sequências de modelagem que registram de forma estruturada todas as etapas do processo, desde a definição da geometria e geração da malha até a configuração das interfaces físicas, estudos numéricos e pós-processamento. Essa abordagem favorece a parametrização do modelo, permitindo a realização de análises paramétricas e estudos de sensibilidade, nos quais alterações em parâmetros de entrada podem ser automaticamente propagadas ao longo de todo o fluxo de simulação.

Neste trabalho, o *COMSOL Multiphysics*® foi empregado como ferramenta numérica para a resolução do problema de adensamento de grandes deformações, possibilitando a implementação das equações diferenciais parciais não lineares que governam o fenômeno. Além disso, o *software* permitiu a simulação de processos acoplados, como o fluxo em meio poroso e a deformação do esqueleto sólido, essenciais para a representação realista do comportamento do solo.

2.6 - ENSAIO DE ADENSAMENTO POR PERCOLAÇÃO INDUZIDA

O Hydraulic Consolidation Test (HCT), proposto por Imai (1979), consiste em um ensaio laboratorial de adensamento hidráulico voltado à caracterização de solos muito moles, no qual o carregamento é aplicado por meio de gradientes hidráulicos. Nesse método, a percolação induzida gera uma força (*seepage*) que atua como um carregamento distribuído ao longo da amostra, sendo progressivamente convertida em tensão efetiva no esqueleto do solo. A medição simultânea de variáveis como poropressão, teor de umidade e velocidade de fluxo permite a obtenção de parâmetros fundamentais, como compressibilidade e permeabilidade dependente do índice de vazios, essenciais para a formulação de modelos constitutivos de adensamento sob grandes deformações.

O ensaio HCT possibilita a determinação experimental das leis constitutivas de compressibilidade e permeabilidade de solos finos, frequentemente oriundos de rejeitos de mineração e sedimentos de dragagem. Devido à semelhança no comportamento mecânico desses materiais com sedimentos depositados em ambientes de baixa tensão, como bordas de reservatórios, o ensaio pode ser estendido a esses contextos. Durante o ensaio, a aplicação de um fluxo descendente, combinada com o efeito do peso próprio, gera gradientes hidráulicos

que promovem o adensamento sob baixas tensões efetivas, reproduzindo condições típicas de campo em materiais altamente compressíveis (Imai, 1979; Znidarcic & Liu, 1989; Znidarcic *et al*., 1992).

Durante o ensaio, são realizados incrementos controlados de carregamento hidráulico, permitindo a obtenção de parâmetros de compressibilidade ao longo de uma faixa ampliada de tensões efetivas. Esse procedimento possibilita a construção de curvas e–σ', fundamentais para a caracterização do comportamento compressivo do solo. A interpretação dos resultados é conduzida à luz da equação geral do adensamento sob grandes deformações, incorporando condições iniciais e de contorno adequadamente definidas, o que assegura a consistência da análise.

Entre as principais vantagens do ensaio HCT estão a significativa redução do tempo experimental e a capacidade de investigar o comportamento do solo em uma faixa de tensões muito baixas (da ordem de 0,01 kPa a 10 kPa), característica relevante para solos extremamente compressíveis. Entretanto, limitações experimentais incluem a variação da altura da amostra durante a coleta de subamostras para determinação do teor de umidade, decorrente da liberação de tensões e confinamento, o que pode induzir distúrbios estruturais. Adicionalmente, o ensaio exige instrumentação específica e elevada sensibilidade operacional, sendo que a qualidade dos dados obtidos depende diretamente da experiência do operador. Essas limitações podem afetar a precisão na determinação das relações constitutivas e–σ' e e–k.

Embora o ensaio HCT seja uma ferramenta valiosa para a determinação de parâmetros constitutivos de adensamento, fatores como a qualidade dos dados experimentais, a sensibilidade a procedimentos operacionais e as condições de amostragem podem introduzir incertezas significativas nos parâmetros estimados. Essas incertezas propagam-se diretamente para as análises numéricas, afetando a confiabilidade das previsões. Nesse contexto, torna-se fundamental a realização de análises críticas, incluindo avaliação de sensibilidade e quantificação de incertezas, para garantir maior robustez na interpretação dos resultados.

2.6.1. EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO PARA ENSAIO HCT

O sistema experimental empregado nos ensaios de adensamento por percolação induzida consiste em uma célula triaxial adaptada, equipada com uma bomba de fluxo para controle de gradientes hidráulicos, um painel de controle de pressão para ajuste das condições de contorno, um transdutor diferencial de pressão para monitoramento da distribuição de poropressões, além de um sistema de carregamento axial com instrumentação para medição de deformações verticais. Todo o conjunto é integrado a um sistema de aquisição de dados,

permitindo o registro contínuo das variáveis hidromecânicas relevantes ao longo do ensaio (Botelho, 2001; Pinho, 2018).

A Figura 2.4 ilustra um esquema representativo do ensaio HCT, fundamentado em um equipamento desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Ouro Preto, cuja concepção original foi proposta por Botelho (2001). Esse arranjo experimental foi projetado para permitir o controle simultâneo de variáveis hidráulicas e mecânicas, possibilitando a reprodução das condições necessárias à análise do adensamento por percolação induzida.

O procedimento experimental inicia-se com a preparação de uma amostra homogênea, composta pelo material sólido e o líquido sobrenadante, visando reproduzir condições iniciais representativas de sedimentos naturais. Após a fase de sedimentação, são aplicados gradientes hidráulicos controlados na base da amostra por meio da bomba de fluxo, induzindo sucção e promovendo o escoamento através do meio poroso. O fluxo é mantido até que se atinja a estabilização da poropressão, momento em que são realizadas medições contínuas de permeabilidade. Em seguida, inicia-se a etapa de adensamento mecânico, com a aplicação de incrementos de carga axial e monitoramento do deslocamento vertical, permitindo a obtenção das curvas constitutivas de compressibilidade (e–σ').

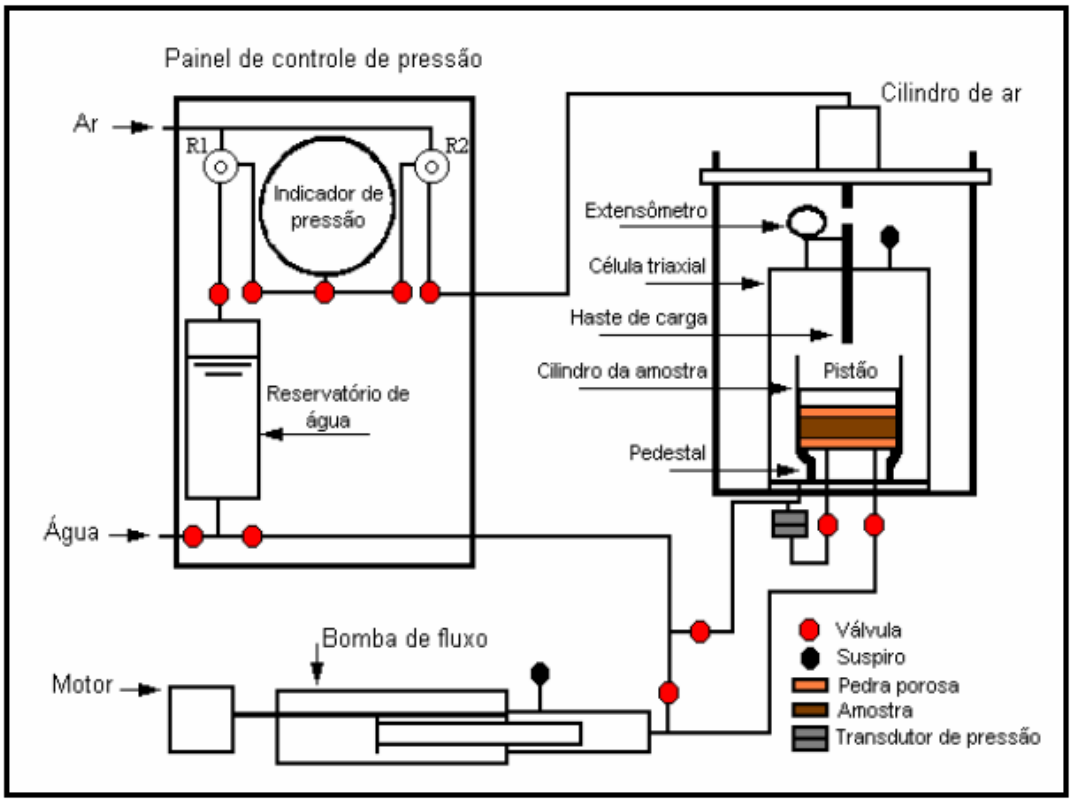


Figura 2.4 - Esquema com arranjo tradicional para ensaio HCT com bomba de fluxo (Botelho, 2001).

2.6.2. DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS CONSTITUTIVOS

O ensaio HCT possibilita a obtenção de parâmetros constitutivos de adensamento associados a modelos empíricos e semiempíricos, como o *Single Power Function* (parâmetros C e D) e a forma inversa do *Extended Power Function* (parâmetros A, B e Z). Esses parâmetros descrevem as relações não lineares entre índice de vazios, tensão efetiva e permeabilidade, sendo essenciais para a calibração e validação de modelos numéricos que representam o adensamento sob grandes deformações.

A determinação dos parâmetros constitutivos baseia-se na medição simultânea da distribuição espacial e temporal da poropressão, do teor de umidade e da velocidade de fluxo através da amostra. Esses dados permitem a obtenção das relações fundamentais do comportamento hidromecânico do solo. Adicionalmente, o acompanhamento contínuo das curvas de poropressão *versus* tempo e deformação *versus* tempo possibilita a análise detalhada da cinética do processo de adensamento e da dissipação de poropressões.

Os dados obtidos no ensaio HCT são usualmente processados com o auxílio do *software* SICTA (*Seepage Induced Consolidation Test Analysis*), desenvolvido por Abu-Hejleh & Znidarcic (1992), que realiza a interpretação dos resultados com base na teoria de adensamento sob grandes deformações. Nesse processamento, as leis constitutivas de compressibilidade e permeabilidade são ajustadas em termos das relações e–σ’ e e–k, utilizando os modelos previamente definidos, o que permite a calibração consistente dos parâmetros do solo.

Para o processamento dos resultados, devem ser determinados os seguintes parâmetros de entrada de dados, conforme apresentado por Cançado (2010):

O processamento dos dados experimentais requer a definição de parâmetros iniciais, conforme descrito por Cançado (2010), apresentados na Eq. (2.42).

$$H_s = \frac{W_{sd}}{G_s.\gamma_w.A_r} \tag{2.42}$$

onde H_s é a altura dos sólidos (L), W_{sd} é o peso seco da amostra (M), G_s é a densidade relativa dos sólidos, γ_w é o peso específico da água (ML^{-3}) e A_r é a área da amostra (L^2). Esses parâmetros incluem propriedades físicas fundamentais da amostra, sendo essenciais para a normalização das variáveis e para a correta interpretação dos resultados experimentais.

A Eq. (2.43) estabelece a relação entre a altura inicial da camada de solo e o índice de vazios associado à condição de tensão efetiva nula, representando o estado inicial do material antes da aplicação de carregamentos hidráulicos ou mecânicos.

$$H_0 = H_s(1+e_{00}) \tag{2.43}$$

onde H_0 a altura inicial da camada (L) e e_0 o índice de vazios correspondente à tensão efetiva nula.

A Eq. (2.44) descreve a tensão efetiva na base da amostra como resultado da combinação entre a tensão total aplicada pelo sistema de carregamento (cabeçote e pistão) e a poropressão desenvolvida na base, refletindo a decomposição clássica da tensão total em suas componentes efetiva e neutra.

$$\sigma'_f = \sigma'_t + (\gamma_s - \gamma_w) Z + \Delta\mu \tag{2.44}$$

onde σ'_f é a tensão efetiva na base ($ML^{-1}T^{-2}$), σ'_t é a tensão efetiva produzida pelo cabeçote de acrílico e pistão da célula ($ML^{-1}T^{-2}$) e $\Delta\mu$ é a poropressão gerada na base ($ML^{-1}T^{-2}$).

A Eq. (2.45) estabelece a relação entre o índice de vazios final e a altura final da amostra após o processo de adensamento, permitindo a quantificação da redução volumétrica e a caracterização da compressibilidade do material.

$$e_f = \left(\frac{H_f}{H_s} \right) - 1 \tag{2.45}$$

onde e_f é o índice de vazios final e H_f é a altura final do corpo de prova (L).

A Eq. (2.46) expressa a permeabilidade do solo com base na velocidade de fluxo, sendo essa relação fundamentada na Lei de Darcy. Essa equação permite a determinação da permeabilidade como uma função dependente do estado do solo, particularmente do índice de vazios.

$$k = \frac{v.H_f.\gamma_w}{\Delta\mu} \tag{2.46}$$

onde k é a permeabilidade (LT^{-1}) e v é a velocidade de fluxo (LT^{-1}).

2.7 - SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO E LACUNA CIENTÍFICA

A revisão da literatura demonstra que o fenômeno de adensamento sob grandes deformações tem sido extensivamente estudado ao longo das últimas décadas, com progressos relevantes na formulação teórica — incluindo modelos baseados em não linearidades geométricas e constitutivas — e no desenvolvimento de abordagens numéricas capazes de representar o comportamento de solos altamente compressíveis.

Apesar dos avanços teóricos e numéricos, a aplicação prática dessas abordagens ainda apresenta limitações significativas, sobretudo na definição de leis constitutivas capazes de representar adequadamente o comportamento não linear de solos moles, bem como na obtenção

de parâmetros experimentais confiáveis e representativos das condições de campo. Tais dificuldades comprometem a robustez das previsões em análises de adensamento sob grandes deformações.

Adicionalmente, a integração entre dados experimentais e modelos numéricos constitui um dos principais desafios na previsão do comportamento de sedimentos altamente compressíveis, especialmente devido às dificuldades associadas à calibração de parâmetros, à representatividade dos ensaios laboratoriais e à transposição de escala entre condições controladas e situações reais de campo.

Diante desse cenário, a presente pesquisa propõe uma abordagem integrada, combinando resultados experimentais provenientes de ensaios de adensamento por percolação induzida com modelagem numérica baseada em equações governantes não lineares. O objetivo é aprimorar a compreensão do fenômeno, identificar tendências de comportamento, os parâmetros-chaves e avaliar limitações associadas à representação do adensamento de grandes deformações em solos altamente compressíveis.

3 - METODOLOGIA

Este capítulo tem por finalidade descrever a área de estudo, os materiais empregados e a metodologia adotada no desenvolvimento desta pesquisa de doutorado. A investigação está estruturada em duas vertentes complementares: (i) uma abordagem experimental, voltada à caracterização do comportamento hidromecânico de sedimentos depositados em zonas marginais de reservatórios de barragens, por meio de ensaios geotécnicos convencionais e avançados — incluindo ensaios de caracterização física, hidráulica e mecânica, ensaios *in situ* e ensaios especiais, como o Hydraulic Consolidation Test (HCT); e (ii) uma abordagem de modelagem, baseada na formulação analítica e na simulação numérica de problemas de adensamento sob grandes deformações (finite strain consolidation), em regime unidimensional e sob condição de saturação. Essa estrutura metodológica permite integrar dados experimentais à modelagem preditiva do comportamento dos sedimentos.

O presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento de adensamento de sedimentos submetidos a deformações finitas, por meio da integração entre resultados experimentais e modelagem numérica. Essa abordagem integrada busca capturar de forma mais realista os mecanismos hidromecânicos envolvidos no processo de adensamento, especialmente em condições em que as hipóteses da teoria clássica de pequenas deformações não são mais válidas.

A metodologia adotada fundamenta-se na integração entre técnicas experimentais, voltadas à determinação de parâmetros constitutivos hidromecânicos dos sedimentos, e a aplicação de modelos teóricos e numéricos para a representação do fenômeno de adensamento sob deformações finitas. Essa abordagem permite avaliar a capacidade preditiva dos modelos empregados, bem como sua aptidão em reproduzir, com consistência, o comportamento observado experimentalmente, contribuindo para a validação e o aprimoramento das formulações utilizadas.

O procedimento metodológico desenvolvido neste trabalho organiza-se em etapas sequenciais e interdependentes (Figura 3.1): (i) seleção e caracterização geotécnica do material com ensaios de laboratório e de campo; (ii) execução de ensaios de adensamento por percolação induzida (HCT), visando à obtenção de respostas hidromecânicas; (iii) determinação e calibração dos parâmetros constitutivos a partir dos dados experimentais; (iv) implementação da modelagem analítica, baseada na formulação clássica de Gibson *et al*. (1967), e modelagem numérica, baseada no método dos elementos finitos; (v) comparação sistemática entre os resultados experimentais e as previsões numéricas; e (vi) análise crítica dos resultados, com foco na avaliação da consistência do modelo e de suas limitações.

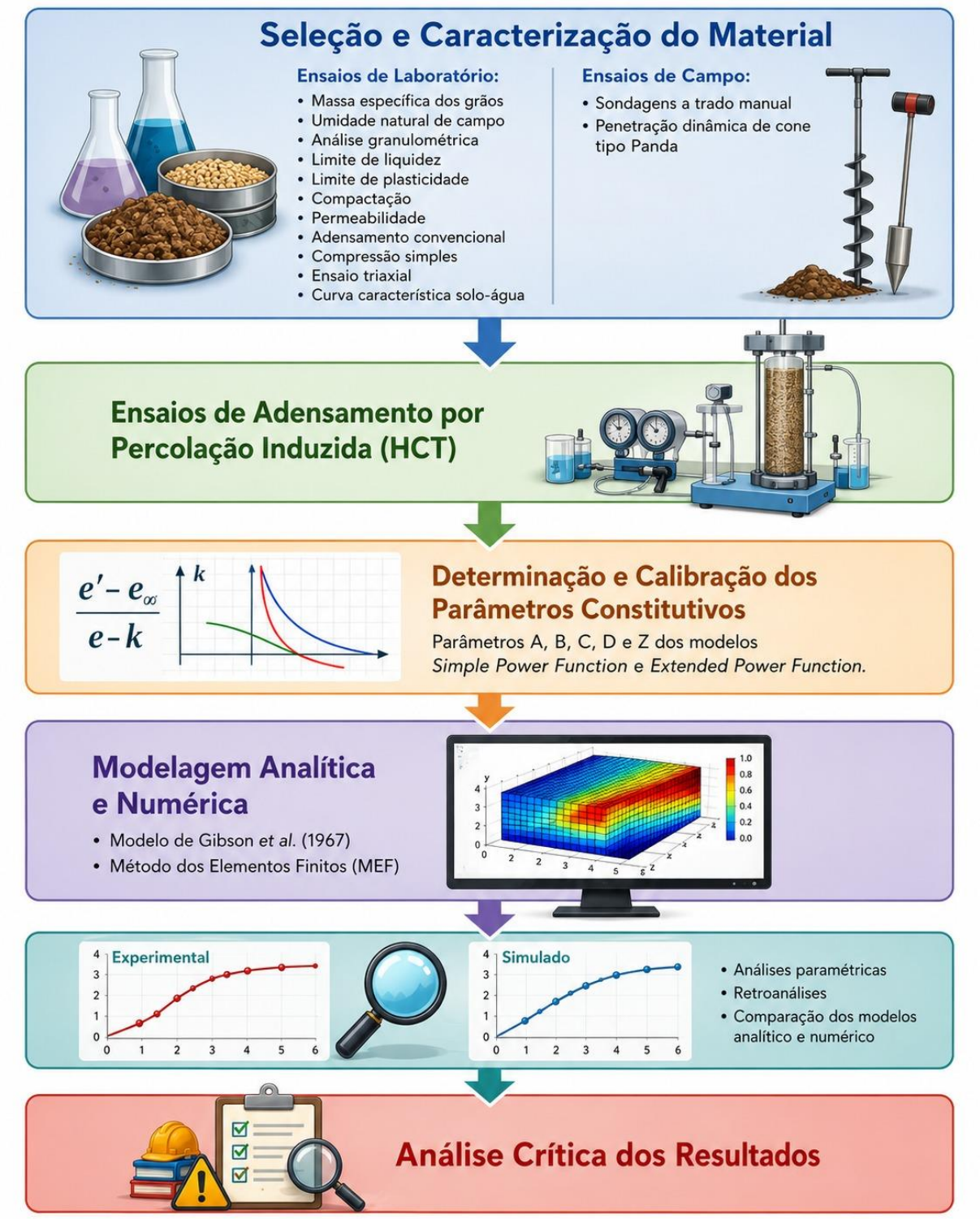


Figura 3.1 - Procedimento Metodológico.

3.1 - ÁREA DE ESTUDO USINA HIDRELÉTRICA ITUMBIARA

A Usina Hidrelétrica (UHE) Itumbiara foi adotada como área de estudo para a investigação detalhada dos processos de deposição de sedimentos em reservatórios. Implantada no Rio Paranaíba, na divisa entre os municípios de Itumbiara (GO) e Araporã (MG), nas

coordenadas 18°24'26,00" S e 49°05'52,86" W, a usina apresenta capacidade instalada de 2082 MW, distribuída em seis unidades geradoras de 347 MW. O reservatório possui volume útil de 12,5 km³, área inundada de 798 km² e regime operacional com níveis d'água variando entre 495 e 521,20 m, sendo 520 m o nível normal de operação. A área de drenagem a montante do empreendimento é da ordem de 5685 km² (Luz *et al*., 2016), o que influencia diretamente os processos hidrossedimentológicos observados.

Os sedimentos presentes nas margens do reservatório da UHE Itumbiara têm sido amplamente investigados em estudos anteriores, como Vilhena *et al*. (2019), Schliewe *et al*. (2021) e Merabet Jr. (2023), que realizaram ensaios de caracterização geotécnica detalhados. De forma geral, esses materiais são classificados como argilas de baixa plasticidade (CL), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e apresentam baixa permeabilidade, tipicamente na faixa de 10^{-6} a 10^{-7} m/s (Das, 2008) para amostras compactadas. Parâmetros físicos, como índice de vazios (e), teor de umidade natural (w) e distribuição granulométrica, demonstram elevada variabilidade entre diferentes campanhas experimentais. Tal comportamento reflete a natureza heterogênea e estruturada dos solos lateríticos, cuja microestrutura agregada e sensibilidade às condições sazonais influenciam significativamente suas propriedades hidromecânicas.

O material selecionado nesta pesquisa foi escolhido por apresentar características típicas de sedimentos finos altamente compressíveis, comumente observados em reservatórios de barragens. Esses materiais são geralmente constituídos por partículas finas, elevada relação de vazios e baixa permeabilidade, o que os torna particularmente suscetíveis a processos de adensamento sob grandes deformações.

A escolha desse material justifica-se pela necessidade de investigar o comportamento em condições críticas, nas quais os efeitos de deformações finitas são predominantes. Nessas condições, as hipóteses da teoria clássica de adensamento unidimensional podem se tornar inadequadas, sendo necessária a utilização de formulações mais avançadas para representar adequadamente o comportamento do material, permitindo uma avaliação mais robusta das teorias empregadas.

Ressalta-se que, embora o material analisado seja representativo de uma classe relevante de sedimentos finos compressíveis, os resultados obtidos devem ser interpretados à luz das condições específicas deste estudo, incluindo características do material, condições de contorno e metodologia empregada. Dessa forma, sua extrapolação para outros tipos de sedimentos ou contextos geotécnicos deve ser realizada com cautela, considerando as limitações inerentes ao modelo e aos dados experimentais.

3.2 - MATERIAL UTILIZADO E ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Em função da elevada variabilidade espacial dos sedimentos na área de estudo e da necessidade de controle rigoroso das propriedades do material empregado na modelagem, foi conduzida uma nova campanha de amostragem para caracterização geotécnica. A área selecionada corresponde a um depósito de sedimentos em ambiente de praia fluvial, localizado na margem direita do reservatório da UHE Itumbiara. Foram coletadas amostras deformadas, utilizadas nos ensaios laboratoriais e como referência para os ensaios de campo. A campanha de amostragem ocorreu no mês de fevereiro, durante o período úmido, condição que influencia diretamente o teor de umidade e o estado estrutural do solo. A localização da área de coleta é apresentada na Figura 3.2, com coordenadas 18°23'13,88"S e 49°3'27,69"W.

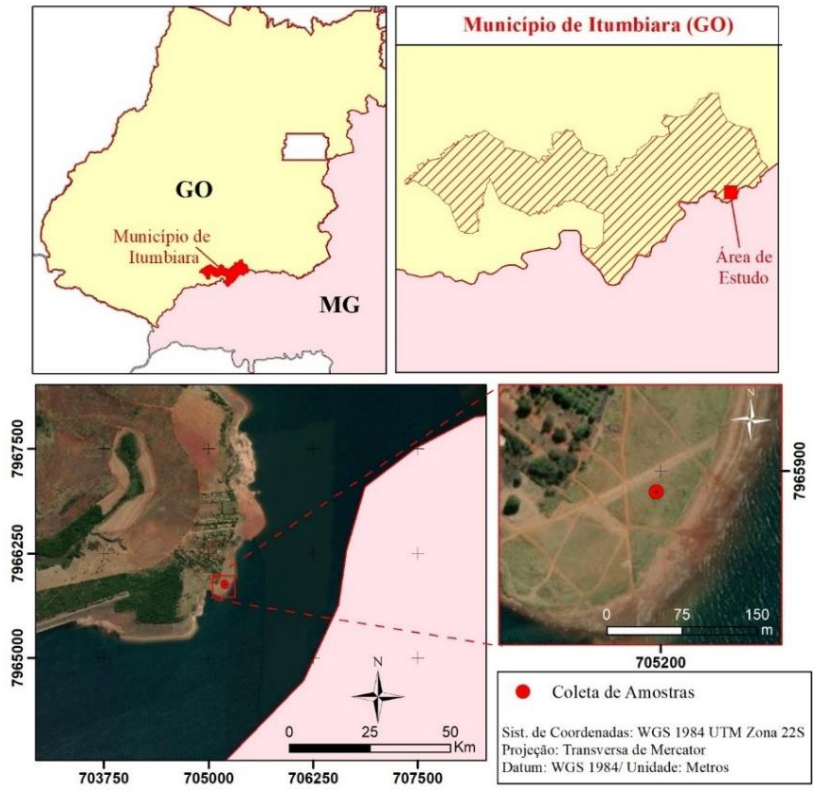


Figura 3.2 - Localização da área de estudo (Datum WGS 1984, E 705.196, N 7.965.879, Fuso 22S).

As amostras deformadas de sedimentos foram coletadas em camada superficial, com profundidade variando entre 10 e 40 cm, representando o horizonte mais suscetível aos processos de deposição recente. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos herméticos, devidamente identificadas para rastreabilidade, e transportadas ao

Laboratório de Mecânica dos Solos da Eletrobras Furnas, onde foram armazenadas em condições controladas até a execução dos ensaios.

Os ensaios de caracterização física, mecânica e hidráulica das amostras coletadas foram realizados nos laboratórios de solos da Eletrobras Furnas. Foram executados ensaios de determinação da massa específica dos grãos, segundo a metodologia da NBR 6458 (ABNT, 2016b), umidade natural de campo NBR 6457 (ABNT, 2016a), análise granulométrica com e sem defloculante NBR 7181 (ABNT, 2016e), limite de liquidez NBR 6459 (ABNT, 2016c), limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 2016d), compactação NBR 7182 (ABNT, 2016f), permeabilidade NBR 14545 (ABNT, 2021), adensamento NBR 16853 (ABNT,2020a), compressão simples NBR 12770 (ABNT, 2022) e triaxial ASTM D 7181-11 (ASTM, 2011).

As amostras para realizar os ensaios de compactação, permeabilidade, adensamento, compressão simples e triaxial foram reconstituídas por compactação estática, com parâmetros próximos às condições de campo (umidade de 15,6% e índice de vazios de 1,0), correspondendo a um grau de compactação de 89%. Essa metodologia foi utilizada visando obter amostras representativas das condições na borda do reservatório analisado e devido a impossibilidade técnica para coleta de amostras indeformadas para realização dos ensaios.

Com isso, como não foram coletadas amostras indeformadas na presente pesquisa, adotou-se o índice de vazios determinado experimentalmente por Merabet Jr. (2023), no qual algumas amostras indeformadas foram coletadas na mesma localização de coleta de amostras para realização de ensaios para caracterização geotécnica do presente estudo, e submetidas ao método da balança hidrostática, seguindo a NBR 16867 (ABNT, 2020b), para a determinação da massa específica aparente, e, consequentemente do índice de vazios de campo.

O ensaio de compactação foi executado conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando energia Proctor normal, cilindro de 4 polegadas de diâmetro (diâmetro de 10,16 cm e altura de 12,24 cm) e sem reutilização de material. O ensaio de permeabilidade de carga variável, NBR 14545 (ABNT, 2021), foi realizado em amostra compactada em 3 camadas e com corpo de prova de 4 polegadas (diâmetro de 10,05 cm e altura de 12,53 cm). O ensaio de adensamento unidimensional, NBR 16853 (ABNT, 2020a), foi conduzido com amostra compactada em uma camada (diâmetro de 10,05 cm e altura de 3,50 cm), sob regime inundado, com aplicação de incrementos de carga e descarregamento, iniciando em 5 kPa. Essa abordagem permite avaliar a compressibilidade e a evolução da deformação volumétrica do material.

O ensaio de resistência à compressão simples não confinada foi realizado conforme a NBR 12770 (ABNT, 2022), utilizando três corpos de prova moldados em 10 camadas (diâmetro

médio de 5,01 cm e altura média de 9,98 cm), com grau de compactação de 89% e teor de umidade inicial de 16%. Os ensaios foram conduzidos sob regime de deformação controlada, com velocidade de aproximadamente 0,50 mm/min, permitindo a determinação da resistência não drenada (c_u) e a avaliação do comportamento tensão-deformação do material, sem dissipação de pressão neutra.

Os ensaios de compressão triaxial foram realizados conforme a ASTM D 7181-11 (ASTM, 2011), na condição consolidado não drenado (CU), com saturação promovida por contrapressão, garantindo elevado grau de saturação ($B \approx 1$), novamente sem dissipação de pressão neutra. Foram ensaiadas amostras compactadas estaticamente nas mesmas condições previamente estabelecidas, em 10 camadas (diâmetro médio de 5,01 cm e altura média de 9,98 cm). Os ensaios foram conduzidos sob deformação controlada, com velocidade de 0,08 mm/min, em quatro níveis de tensão confinante (25, 50, 100 e 200 kPa), mantendo-se uma contrapressão de 300 kPa. A ruptura dos corpos de prova ocorreu por incremento de tensão desviadora, permitindo a obtenção de parâmetros de resistência efetiva e total.

Adicionalmente, foram realizados ensaios para a determinação da curva característica solo-água (CCSA) no Laboratório de Geotecnia (LABGEO) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Para a obtenção da relação entre sucção e teor de água do solo, foram utilizados dois métodos complementares, em conformidade com a ASTM D6836-16 (ASTM, 2016). No intervalo de 0 a 300 kPa, correspondente à sucção matricial, empregou-se o equipamento de placa de pressão; para sucções totais superiores a 300 kPa, utilizou-se o potenciômetro de ponto de orvalho WP4C. A adoção dessa ampla faixa de potenciais permite uma caracterização mais abrangente da estrutura porosa de solos lateríticos, especialmente diante de sua possível distribuição bimodal de poros, conforme discutido por Souza (2020).

Todas as amostras destinadas à determinação da CCSA foram reconstituídas por compactação, mantendo-se condições de moldagem controladas, com índice de vazios de 1,0 e teor de umidade de 16% (amostra para ensaio de placa de pressão com diâmetro de 7,73 cm e altura de 1,23 cm). Foram investigadas trajetórias hidráulicas de secagem e molhagem, de modo a capturar possíveis efeitos de histerese no comportamento solo-água. Na trajetória de secagem, as amostras perderam umidade por evaporação natural ao ar, sendo o controle do teor de água realizado por monitoramento gravimétrico. Na trajetória de molhagem, a umidificação foi promovida por gotejamento controlado. Após atingir a umidade-alvo, as amostras foram seladas e mantidas em repouso por cerca de 24 horas para homogeneização interna da umidade e estabelecimento do equilíbrio hidrodinâmico antes da realização dos ensaios.

O ensaio de placa de pressão fundamenta-se no princípio da translação de eixos, técnica amplamente empregada para a determinação da sucção matricial em solos não saturados. As amostras, previamente saturadas, foram instaladas no interior de anéis de adensamento e posicionadas sobre discos cerâmicos de alto valor de entrada de ar, de forma a garantir a aplicação controlada de pressões sem ruptura da continuidade hidráulica. Com a câmara hermeticamente fechada, a sucção foi imposta por meio de incrementos graduais de pressão de ar, os quais foram progressivamente ampliados até o valor máximo previsto. A metodologia permitiu a obtenção da CCSA em três trajetórias distintas — primeira secagem, molhagem e segunda secagem — viabilizando a análise do comportamento histerético. Esse procedimento foi possibilitado pelo uso de buretas de acumulação, que favoreceram a reintrodução de água durante os alívios de pressão, configurando um ciclo hidráulico controlado. Paralelamente, a variação volumétrica da amostra foi monitorada com extensômetro externo, permitindo associar mudanças de sucção às deformações volumétricas. O tempo de equilíbrio em cada estágio variou entre 2 e 8 horas. Ao término do ensaio, a determinação da umidade final permitiu o cálculo retroativo do teor de água correspondente a cada estágio, possibilitando a construção da CCSA.

O ensaio com potenciômetro foi conduzido no equipamento WP4C Dew Point PotentiaMeter, destinado à determinação da sucção total das amostras. O princípio de funcionamento baseia-se na técnica do ponto de orvalho, em que a sucção é inferida a partir da umidade relativa do ar em equilíbrio termodinâmico com a amostra em uma câmara selada. Previamente aos ensaios, o equipamento foi calibrado com solução padrão de cloreto de potássio (KCl) na concentração de 0,5 mol/kg, assegurando a confiabilidade das leituras. As amostras, inicialmente saturadas, foram submetidas à secagem ao ar até alcançarem a massa correspondente ao teor de umidade de interesse. Em seguida, foram vedadas com plástico filme e armazenadas por 24 horas, visando à uniformização da umidade interna. Posteriormente, foram colocadas na câmara de leitura do equipamento, com tempo médio de estabilização de aproximadamente 15 minutos. Além das amostras submetidas à secagem, também foram avaliadas amostras em trajetória de molhagem, mediante adição controlada de água destilada para obtenção dos teores de umidade desejados.

Para o ajuste matemático da CCSA, foi empregada a Eq. 3.1, proposta por Durner (1994), derivada da formulação clássica de van Genuchten (1980). A adoção desse modelo justifica-se por sua capacidade de representar distribuições bimodais de poros, característica frequentemente associada a solos tropicais lateríticos, nos quais coexistem diferentes escalas de

estrutura porosa. Assim, essa formulação se mostra particularmente adequada para descrever, com maior realismo, o comportamento hidráulico do material estudado.

$$S_w = e_{wL}\left\{\frac{1}{1+\left[\alpha_L\left(u_a-u_w\right)\right]^{n_L}}\right\}^{m_L} + e_{wS}\left\{\frac{1}{1+\left[\alpha_S\left(u_a-u_w\right)\right]^{n_S}}\right\}^{m_S} \qquad (3.1)$$

onde S_w é o conteúdo de água do solo (%), e_{wL} é o índice de vazios dos macroporos, α_L é um parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar dos macroporos, u_a é a poropressão de ar nos poros do solo, u_w é a poropressão de água nos poros, n_L é a inclinação da reta que relaciona umidade e sucção nos macroporos, m_L é a inclinação da reta que relaciona umidade e sucção na faixa de transição, e_{wS} é o índice de vazios dos microporos, α_S é um parâmetro de ajuste relacionado ao valor de entrada de ar dos microporos, n_S é a inclinação da reta que relaciona umidade e sucção dos microporos, e por fim, m_S é a inclinação da reta que relaciona umidade e sucção após o valor de umidade higroscópica do solo.

3.3 - ENSAIOS DE CAMPO

Com o intuito de aprofundar a investigação do comportamento dos sedimentos depositados nas zonas marginais do reservatório, foram conduzidos ensaios de campo voltados à caracterização do perfil geotécnico em função da profundidade, incluindo a interface com o material de fundação. No entanto, devido a inviabilidade técnica não foram realizados ensaios de campo dentro do reservatório, bem como coleta de amostras. Os ensaios foram realizados em regiões marginais, próximas a margem submersa do reservatório, e em épocas de seca do ano, tentando assim, representar áreas para coleta de amostras de sedimentos e ensaios de campo que ficam submersas no reservatório em épocas de cheia/chuva do ano.

Foram realizadas sondagens a trado manual, conforme a NBR 9603 (ABNT, 2015), em diferentes pontos ao longo da margem do reservatório da UHE Itumbiara. Essas sondagens possibilitaram a investigação estratigráfica do sedimento depositado abaixo do nível d'água, bem como a coleta de amostras deformadas destinadas à análise tátil-visual, a determinação do perfil de umidade e a identificação de variações texturais ao longo da profundidade. Essa abordagem é fundamental para compreender a heterogeneidade vertical dos depósitos sedimentares.

Adicionalmente, foram realizados ensaios de penetração dinâmica com cone do tipo PANDA (Pénétromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté) (Gouves, 1991), com o

objetivo de estimar a resistência à penetração das camadas de sedimentos e caracterizar a estratigrafia ao longo da profundidade investigada. O ensaio foi conduzido com o penetrômetro dinâmico de energia variável PANDA 2 TDDP2 (Sol Solution), que permite a determinação contínua da resistência dinâmica à penetração (q_d), a partir da medição simultânea da energia de impacto e da profundidade de cravação. Conforme Camapum de Carvalho *et al*. (2006), trata-se de um equipamento leve e portátil, com aquisição automatizada de dados, os quais podem ser transferidos diretamente para ambiente computacional e analisados por meio de *software* dedicado (PANDAWin), permitindo interpretação rápida e eficiente do perfil geotécnico.

A Figura 3.3 apresenta um esquema do equipamento PANDA, composto pelos seguintes componentes principais: (1) martelo, responsável pela aplicação da energia de impacto; (2) hastes metálicas rosqueáveis, com 14 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento, que transmitem a energia ao sistema; (3) pontas cônicas intercambiáveis, com áreas de 2, 4 e 10 cm², utilizadas conforme a resistência do material; (4) sensor de impacto (capacete instrumentado), que mede a energia efetivamente transmitida pelo martelo; (5) sistema de medição de deslocamento (fita retrátil), responsável pela determinação da profundidade de penetração a cada golpe; (6) microprocessador, que registra e armazena os dados de energia e penetração; e (7) sistema de guia e receptor, que assegura o alinhamento e a estabilidade do ensaio. Essa instrumentação permite a obtenção contínua de parâmetros mecânicos ao longo do perfil investigado.

O ensaio consiste na cravação de uma ponteira cônica no sedimento, mediante a aplicação manual de golpes de um martelo sobre o capacete instrumentado, também denominado cabeça de bater, o qual é equipado com uma célula de carga com sensores elétricos. Esse dispositivo, posicionado no topo do conjunto de hastes, permite a medição direta da energia transmitida a cada golpe, viabilizando o cálculo da resistência dinâmica à penetração (q_d) como função da energia efetivamente aplicada. Dessa maneira, o ensaio possibilita a obtenção direta da resistência do sedimento, dispensando o uso de correlações empíricas, o que representa uma vantagem significativa em termos de precisão e interpretação dos resultados.

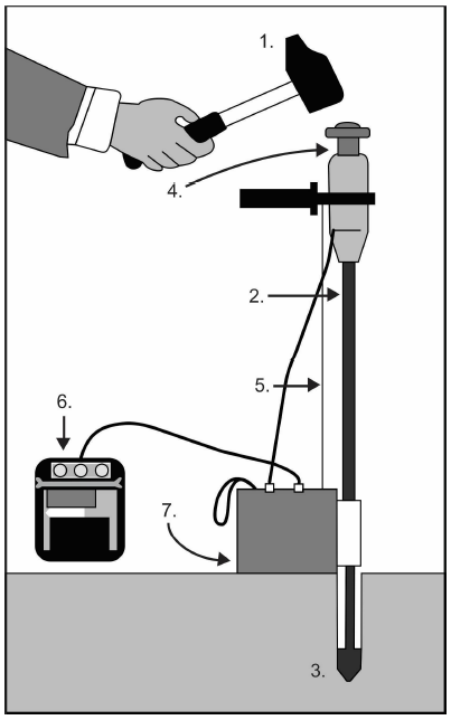


Figura 3.3 - Esquema do equipamento PANDA (modificado de Guerin, 2011).

Os pontos de ensaio foram definidos tomando como referência o local de coleta de amostras para os ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica. A partir desse ponto, estabeleceu-se um alinhamento em direção à margem submersa do reservatório, com espaçamento horizontal de 20 m entre os pontos, totalizando seis posições de ensaio. Essa configuração permitiu a investigação de um gradiente de umidade e condições de saturação, desde a zona não saturada até regiões próximas à lâmina d'água. Os ensaios foram conduzidos até aproximadamente 5 m da borda do reservatório, respeitando as limitações operacionais do equipamento em condições de solo saturado.

Os ensaios de penetração dinâmica com cone tipo PANDA foram executados em cada ponto até a profundidade máxima de 3 m, limitada pelo comprimento das hastes disponíveis, com resolução média de medição de 1 cm, o que proporciona alta definição do perfil de resistência. Em determinados pontos (03 e 04), a continuidade do ensaio foi impedida devido à elevada resistência do sedimento ou à presença de inclusões grosseiras, como pedregulhos, que excederam a capacidade operacional do equipamento. Nesses casos, foram realizados novos ensaios a uma distância de 1 m na direção perpendicular (pontos 03B e 04B), visando contornar essas descontinuidades locais e garantir a continuidade da investigação até a profundidade desejada.

As sondagens a trado foram realizadas com trado tipo copo de 6,5 cm de diâmetro, nos mesmos locais onde foram conduzidos os ensaios PANDA, permitindo a correlação entre os perfis de resistência e as características físicas do sedimento. A profundidade máxima atingida foi de 2 m, limitada por dificuldades operacionais associadas às condições do sedimento. O objetivo principal dessa técnica foi a coleta de amostras deformadas para análise tátil-visual, bem como a determinação do perfil de umidade ao longo da profundidade, contribuindo para a interpretação integrada dos dados de campo.

A Tabela 3.1 apresenta as coordenadas geográficas dos furos executados com o equipamento PANDA, bem como as profundidades máximas atingidas em cada ponto e os níveis de coleta das amostras deformadas obtidas por sondagem a trado. A Figura 3.4 ilustra a distribuição espacial dos pontos de ensaio, permitindo a visualização da relação entre sua localização e a borda do reservatório. Destaca-se que a imagem utilizada foi extraída do *software* Google Earth (julho de 2020), enquanto os ensaios foram realizados em setembro de 2022, podendo haver variações no nível do reservatório entre essas datas. Em razão disso, os pontos F5 e F6 aparecem submersos na imagem, embora estivessem em condição exposta no momento da execução dos ensaios.

Por fim, a Figura 3.5 apresenta registros fotográficos dos ensaios de campo realizados na área de estudo, ilustrando as condições de execução, os equipamentos utilizados e o contexto geotécnico local, contribuindo para a melhor compreensão das atividades desenvolvidas.

Tabela 3.1 - Coordenadas dos pontos e profundidade atingida com ensaio PANDA e Trado.

Ponto	**Coordenadas Datum WGS 198 Fuso 22S**	**Profundidade Ensaio PANDA**	**Profundidade Ensaio Trado**
F1	E 705.198 N 7.965.876	3 m	0,25 m
			0,50 m
			0,75 m
			1,0 m
			1,25 m
			1,50 m
			1,75 m
			2,0 m
F2	E 705.216 N 7.965.870	3 m	0,25 m
			0,50 m
			0,75 m
			1,0 m
			1,25 m
			1,50 m

			1,75 m
			2,0 m
F3	E 705.239 N 7.965.864	0,917 m	Não realizado
F3B	E 705.238 N 7.965.863	3 m	0,25 m
			0,50 m
			0,75 m
			1,0 m
			1,19 m
F4	E 705.258 N 7.965.858	1,748 m	Não realizado
F4B	E 705.258 N 7.965.859	3 m	0,25 m
			0,50 m
			0,75 m
			1,0 m
			1,25 m
			1,53 m
F5	E 705.277 N 7.965.853	3 m	0,25 m
			0,50 m
			0,75 m
			1,0 m
			1,25 m
			1,50 m
			1,75 m
			2,0 m
F6	E 705.299 N 7.965.846	3 m	0,25 m
			0,50 m
			0,75 m
			1,0 m
			1,25 m
			1,50 m
			1,75 m
			2,0 m

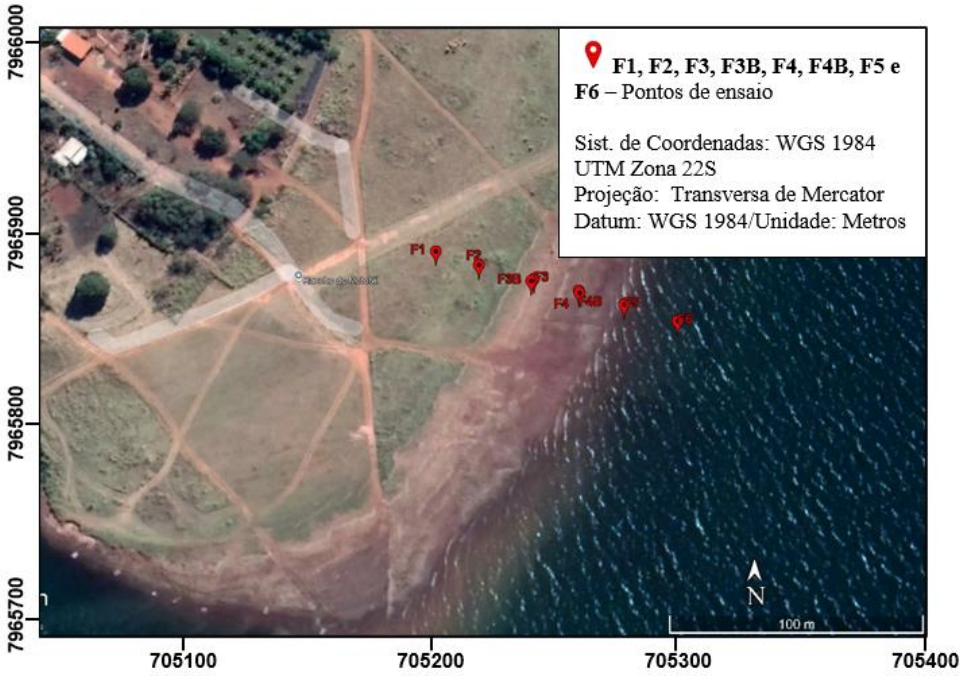


Figura 3.4 - Localização dos pontos escolhidos para ensaios de campo (Datum WGS 1984, Fuso 22S).



Figura 3.5 - Execução do ensaio PANDA e sondagem a trado manual para coleta de amostras deformadas.

3.4 - ENSAIO HCT

As amostras deformadas de sedimentos coletadas na área de estudo foram submetidas a ensaios de adensamento por percolação induzida (Hydraulic Consolidation Test – HCT). A execução dos ensaios foi terceirizada e realizada pela empresa especializada CI&A Lab – Cia de Inovação & Aplicação Tecnologia de Solos e Rejeitos, situada em Nova Lima (MG). A

seleção desse laboratório fundamenta-se na disponibilidade de infraestrutura adequada e na expertise técnica necessária para a condução de ensaios HCT, ainda pouco difundidos no contexto nacional, o que assegura maior confiabilidade aos resultados obtidos.

O ensaio HCT foi selecionado em função de sua capacidade de monitorar continuamente a evolução das propriedades hidromecânicas do material ao longo do processo de adensamento. Trata-se de uma técnica particularmente apropriada para materiais que exibem comportamento não linear e dependente do estado de deformação, possibilitando a investigação de fenômenos associados ao adensamento sob deformações finitas, os quais não são adequadamente representados por ensaios edométricos convencionais baseados na hipótese de pequenas deformações. Adicionalmente, o HCT permite a obtenção simultânea de parâmetros fundamentais, como a evolução do índice de vazios (e), do coeficiente de permeabilidade (k) e das tensões efetivas (σ'), em função do tempo e da deformação. Entretanto, os resultados obtidos devem ser analisados considerando as limitações inerentes ao ensaio, incluindo efeitos das condições de contorno, simplificações experimentais e a variabilidade intrínseca do material.

Foram ensaiadas três amostras com características geotécnicas semelhantes, diferenciando-se apenas pelo índice de vazios inicial, permitindo avaliar a influência dessa variável no comportamento de adensamento. As amostras foram previamente homogeneizadas, e uma fração representativa foi separada para o ensaio. Adicionou-se água ao material até atingir um estado de fluidez correspondente à condição de lama, com teor de umidade superior ao limite de liquidez, garantindo mobilidade suficiente para o processo de sedimentação inicial. Foram realizadas pesagens antes e após a transferência do material para a célula, possibilitando o controle de massa. Uma fração do material remanescente foi utilizada para determinação do teor de umidade e da concentração de sólidos, parâmetros essenciais para a caracterização inicial da amostra.

A Tabela 3.2 apresenta os índices físicos das amostras determinados antes da realização dos ensaios. Foram preparadas amostras com índices de vazios e umidades superiores às de campo visto que o objetivo desse ensaio foi analisar o sedimento com comportamento de lama e, portanto, com grandes deformações visível, tentando simular o comportamento do material na condição submersa no reservatório.

Tabela 3.2 - Índices físicos das amostras analisadas no ensaio HCT.

Índices físicos	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Índice de vazios inicial	2,159	2,708	3,175
Teor de umidade inicial (%)	77,3	96,8	117,2

Inicialmente, foram registradas a altura total da amostra e a área da seção transversal da célula de ensaio, parâmetros fundamentais para o cálculo de deformações volumétricas. O material foi então mantido em repouso por aproximadamente 48 horas, permitindo a sedimentação das partículas e a formação de uma fase sólida consolidada, cuja altura foi posteriormente medida. Em seguida, a célula foi preenchida com água de forma controlada, minimizando distúrbios na estrutura sedimentada. Foram instalados o papel filtro e o cap perfurado superior, previamente calibrado quanto ao peso submerso. Após cerca de 24 horas, considerou-se concluída a etapa inicial de consolidação, sendo registrada a altura final da amostra para posterior análise.

Após a montagem da câmara externa e seu preenchimento com água, o sistema de carregamento foi preparado com a instalação do pistão e do transdutor de deslocamento linear, previamente calibrados e pesados. O pistão foi posicionado até o contato com o cap perfurado, sendo então liberado para permitir o monitoramento da deformação ao longo do tempo, por um período mínimo de 24 horas. Posteriormente, foi imposto um fluxo de sucção na base da amostra, iniciando-se com uma vazão de 0,03 cm^3/min. Durante essa etapa, foram monitoradas simultaneamente a pressão de sucção e a deformação, até a estabilização do sistema. O procedimento foi repetido com incrementos progressivos de vazão, dobrando-se o fluxo a cada etapa, até atingir pressões de sucção na faixa de -1 a -3 kPa, permitindo a avaliação da resposta hidromecânica do material.

Após a etapa inicial, o pistão foi fixado, impedindo variações volumétricas da amostra, de modo a possibilitar a determinação da permeabilidade sob condições de volume constante. Em seguida, foi aplicado um fluxo de sucção correspondente à metade da última vazão utilizada, permitindo a avaliação do coeficiente de permeabilidade do material. O fluxo foi mantido até a estabilização da pressão de sucção, garantindo condições de regime permanente. Esse procedimento foi repetido para níveis de sucção na faixa de -4 a -6 kPa, ampliando a caracterização hidráulica do material.

Na etapa final do ensaio, foi instalada a cangalha na célula, e foram aplicados pesos de forma a impor uma tensão total de 25 kPa sobre a amostra. O transdutor de deslocamento foi zerado, e o pistão liberado, permitindo o monitoramento contínuo da deformação ao longo do

tempo, por um período mínimo de 24 horas ou até a estabilização. Em seguida, o pistão foi novamente fixado para a aplicação de fluxo e determinação da permeabilidade sob nova condição de tensão. Esse procedimento foi repetido com incrementos sucessivos de tensão até atingir 50 kPa, possibilitando a análise da resposta do material sob diferentes estados de carregamento. A Figura 3.6 apresenta o equipamento utilizado, enquanto a Figura 2.4 já apresentada anteriormente, ilustra esquematicamente o procedimento experimental com os componentes principais do ensaio.



Figura 3.6 - Equipamento utilizado para realização do ensaio HCT.

O ensaio HCT foi conduzido com o objetivo principal de possibilitar a determinação dos parâmetros constitutivos de adensamento vinculados aos modelos do tipo *Single Power Function* (parâmetros C e D) e à formulação inversa do modelo *Extended Power Function* (parâmetros A, B e Z). Tais parâmetros desempenham papel essencial na calibração e validação do modelo numérico empregado na resolução da equação de adensamento em regime de grandes deformações, contribuindo para uma representação mais acurada do comportamento hidromecânico do material.

3.5 - MODELAGEM DO FENÔMENO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES

O desenvolvimento metodológico desta tese baseia-se na integração entre investigação experimental e modelagem teórica, por meio da realização de ensaios destinados à caracterização do comportamento de sedimentos depositados nas bordas de reservatórios de barragens, concomitantemente ao desenvolvimento de um modelo analítico e numérico em

condições axissimétricas para descrever o fenômeno de adensamento em regime de grandes deformações. Essa abordagem permite representar de forma mais realista a evolução acoplada entre deformações e fluxo em meios porosos altamente compressíveis.

A integração entre os resultados experimentais e a modelagem numérica foi conduzida a partir da incorporação dos parâmetros constitutivos obtidos nos ensaios HCT como dados de entrada nos modelos computacionais. Essa estratégia possibilita a comparação direta entre as respostas experimentais e as previsões numéricas, permitindo avaliar a capacidade dos modelos em reproduzir o comportamento hidromecânico observado.

Desta forma, os resultados experimentais obtidos nos ensaios de caracterização de laboratório (massa específica dos grãos, umidade natural de campo, análise granulométrica, limites de liquidez e plasticidade, compactação, permeabilidade, adensamento convencional, compressão simples, triaxial e curva característica solo-água), bem como nos ensaios de campo, foram utilizados para caracterizar o comportamento do sedimento depositado na borda do reservatório analisados e que passa por ciclos de secagem e umedecimento ao longo do ano, porém não foram considerados como dados de entrada nos modelos desenvolvidos.

Essa abordagem possibilita avaliar a consistência e a robustez dos modelos adotados, bem como identificar limitações associadas à representação do comportamento do material durante os ensaios HCT, especialmente no que se refere às hipóteses constitutivas e às simplificações inerentes à modelagem de grandes deformações em meios porosos.

3.5.1. SOLUÇÃO ANALÍTICA

A modelagem do adensamento em regime de grandes deformações foi fundamentada na formulação clássica de Gibson *et al*. (1967), que contempla a evolução das propriedades do meio poroso ao longo do processo, incluindo a dependência funcional do índice de vazios. Essa abordagem incorpora não linearidades físicas (associadas às relações constitutivas, como $k(e)$ e $\sigma'(e)$) e geométricas (decorrentes das variações significativas de volume), sendo particularmente adequada para a análise de materiais altamente compressíveis.

Essa abordagem proporciona uma representação mais fiel do comportamento hidromecânico de sedimentos altamente compressíveis, especialmente quando comparada às formulações clássicas baseadas na teoria de pequenas deformações, como a de Terzaghi, que desconsideram variações significativas de geometria e propriedades ao longo do processo de adensamento.

Para a obtenção de uma solução analítica da equação de adensamento em grandes deformações, foram adotadas hipóteses simplificadoras que permitem a linearização da Eq. 2.2.

Primeiramente, assume-se a equivalência entre as densidades do fluido e dos sólidos, o que implica na anulação da função $f(e)$ (Eq. 2.4), eliminando os efeitos associados ao peso específico submerso. Em segundo lugar, considera-se que a função $g(e)$ (Eq. 2.3) é independente do índice de vazios inicial, sendo tratada como constante. Essa hipótese decorre da consideração de condutividade hidráulica vertical saturada constante e da aproximação da derivada da tensão efetiva vertical em relação ao índice de vazios como o inverso do coeficiente de compressibilidade volumétrica (a_v). Sob essas condições, obtém-se a solução analítica expressa por:

$$e(z,t) = e_f + \frac{4}{\pi}(e_0 - e_f)\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^n}{2n+1}\exp\left[-(2n+1)^2\pi^2\frac{g_e t}{H_0^{\,2}}\right]\cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{H_0}z\right] \tag{3.2}$$

onde e_f é o índice de vazios final da amostra após o processo de adensamento, e_0 representa o índice de vazios inicial, enquanto H_0 denota a altura inicial da amostra. Esses parâmetros são fundamentais para a quantificação das deformações volumétricas associadas ao processo.

A Eq. 3.2 pode ser integrada à formulação do recalque associado ao adensamento primário, possibilitando a descrição da evolução temporal das deformações verticais ao longo do processo de adensamento em grandes deformações. Essa integração permite correlacionar diretamente as mudanças no índice de vazios com o recalque observado, conforme expresso por:

$$S(z,t) = \frac{H_0}{1+e_0}\left[e(z,t) - e_0\right] \tag{3.3}$$

onde S representa o recalque total da amostra, associado à redução de volume decorrente da dissipação das pressões neutras e da consequente reestruturação do esqueleto do solo ao longo do processo de adensamento.

Contudo, as hipóteses simplificadoras adotadas introduzem limitações à aplicabilidade da solução analítica. A suposição de equivalência entre as densidades do fluido e dos sólidos leva à negligência dos efeitos do peso próprio, o que pode ser inadequado mesmo para camadas delgadas em determinadas condições. Adicionalmente, a consideração de $g(e)$ como constante pode comprometer a representatividade do modelo em cenários com variações significativas de tensão, nos quais as propriedades hidráulicas e mecânicas apresentam forte dependência do índice de vazios

As formulações desenvolvidas foram implementadas em código aberto no ambiente *Wolfram Mathematica®*, permitindo a resolução analítica das equações de adensamento em grandes deformações. Essa plataforma é amplamente reconhecida na Engenharia por sua

capacidade de manipulação simbólica e numérica, sendo adequada para a modelagem de sistemas complexos e para a análise paramétrica de soluções analíticas.

3.5.2. SOLUÇÃO NUMÉRICA

Como alternativa à solução analítica da teoria de adensamento em regime de grandes deformações, recorre-se à modelagem numérica para a resolução de equações diferenciais parciais, como a Eq. 2.2. No contexto do método dos elementos finitos (MEF), o domínio contínuo é discretizado em um conjunto de elementos finitos interligados por nós, constituindo uma malha computacional. As condições iniciais e de contorno são responsáveis por definir, respectivamente, o estado inicial do sistema e as restrições impostas nas fronteiras do domínio. Essa abordagem permite incorporar de forma consistente as não linearidades físicas (associadas às relações constitutivas) e geométricas (decorrentes de grandes deformações), fundamentais para a representação realista do processo de adensamento.

A solução do problema foi obtida por meio de modelagem numérica baseada no método dos elementos finitos, implementada no *software COMSOL Multiphysics*®. Essa plataforma permite a resolução acoplada de fenômenos físicos, sendo amplamente utilizada para simulação de processos envolvendo fluxo em meios porosos e deformações do esqueleto sólido.

O uso dessa ferramenta possibilita a resolução de equações diferenciais parciais não lineares, permitindo a simulação da evolução temporal do comportamento hidromecânico do material, sob diferentes condições iniciais e de contorno. Essa capacidade é essencial para capturar a resposta dependente do tempo e as interações entre fluxo e deformação no processo de adensamento.

A escolha do método numérico fundamenta-se em sua elevada flexibilidade e robustez para tratar problemas complexos, especialmente aqueles que envolvem acoplamento hidromecânico entre fluxo de fluidos e deformações do esqueleto do solo. Essa característica é particularmente relevante em análises de adensamento em grandes deformações, nas quais há forte interação entre variáveis hidráulicas e mecânicas.

Ao incorporar as formulações constitutivas dos modelos analisados — *Single Power Function* (Eq. 2.7) e *Extended Power Function* (Eq. 2.11) — na Eq. 2.2, a formulação de Gibson *et al*. (1967) passa a incluir explicitamente os parâmetros constitutivos do adensamento, como as relações entre índice de vazios, permeabilidade e tensão efetiva. A Eq. 3.4 constitui a equação governante implementada numericamente no ambiente computacional, sendo responsável por descrever a evolução acoplada do sistema ao longo do tempo.

$$\frac{\partial e}{\partial t}-(G_s-1)\left[\frac{CDe^{D-1}}{1+e}-\frac{Ce^{D}}{(1+e)^2}\right]\frac{\partial e}{\partial z}-\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{C}{A^{\frac{1}{B}}B}\frac{e^{\frac{1}{B}+D-1}}{\gamma_w(1+e)}\frac{\partial e}{\partial z}\right]=0 \tag{3.4}$$

A Eq. 2.2 pode ser resolvida numericamente por meio do *COMSOL Multiphysics*®, uma plataforma computacional baseada no método dos elementos finitos (MEF), que utiliza formulações numéricas avançadas para a solução de equações diferenciais parciais. Nesse *software*, a modelagem é frequentemente realizada por meio da equação genérica na forma de coeficientes (*Coefficient Form PDE*), na qual os termos da equação governante são representados por coeficientes associados a derivadas temporais e espaciais de até segunda ordem, conforme expresso por:

$$e_a\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}+d_a\frac{\partial u}{\partial t}+\nabla\cdot\left(-c\nabla u-\alpha u+\gamma\right)+\beta\cdot\nabla u+au=f \tag{3.5}$$

onde e_a representa o termo de inércia (ou armazenamento), u é a variável dependente do problema, d_a corresponde ao coeficiente de amortecimento, c está associado ao termo difusivo, α representa o coeficiente convectivo em forma conservativa, γ corresponde a um termo fonte conservativo, β é o coeficiente convectivo não conservativo, a representa um termo de absorção (ou reação) e f corresponde ao termo fonte externo. Essa estrutura permite a representação geral de fenômenos de transporte e deformação em meios contínuos.

Os coeficientes α e c da Eq. 3.5 podem ser associados, respectivamente, às funções constitutivas $g(e)$ e $f(e)$, conforme definidas nas Eq. 2.3 e 2.4. Dessa forma, ao definir o índice de vazios como variável dependente do problema, considerar o coeficiente da igual a 1 e assumir os coeficientes e_a, γ, β, a e f como nulos, obtém-se uma equivalência direta entre a formulação genérica da *Coefficient Form PDE* e a Eq. 2.2. Essa correspondência evidencia a flexibilidade do ambiente computacional na implementação de modelos específicos de adensamento.

A modelagem numérica foi conduzida assumindo um processo de adensamento unidimensional em regime saturado. As condições iniciais e de contorno necessárias para a solução numérica da Eq. 2.2 são ilustradas na Figura 3.7. Como condição inicial, foi adotado um perfil uniforme de índice de vazios ao longo da espessura da camada, enquanto as condições de contorno consideram dupla drenagem, permitindo a dissipação de poropressões tanto na superfície quanto na base do domínio.

Nas fronteiras superior ($z = 0$) e inferior ($z = L$), a tensão efetiva vertical é calculada, respectivamente, pelas expressões:

$$\sigma_0^{'}=q+H_w\gamma_w \tag{3.6}$$

$$\sigma_f^{'} = q + H_w\gamma_w + \int_0^L \gamma_w(G_s - 1)dz \tag{3.7}$$

onde σ_0' representa a tensão efetiva vertical no topo da camada, q corresponde ao carregamento aplicado, H_w é a altura da lâmina d'água acima da camada e σ_f' denota a tensão efetiva vertical final na base. Essas condições de contorno são fundamentais para a definição do estado de tensões no domínio e influenciam diretamente a evolução do processo de adensamento.

Destaca-se que os resultados provenientes da modelagem numérica são fortemente dependentes das leis constitutivas adotadas, bem como dos parâmetros utilizados na sua definição. A escolha dessas relações influencia diretamente a capacidade do modelo em representar o comportamento hidromecânico do material.

Assim, as simulações numéricas devem ser compreendidas como aproximações do comportamento real do material, estando sujeitas a incertezas inerentes tanto à definição dos parâmetros constitutivos quanto às hipóteses simplificadoras adotadas na modelagem. Essas limitações reforçam a importância da validação com dados experimentais e da análise crítica dos resultados obtidos.

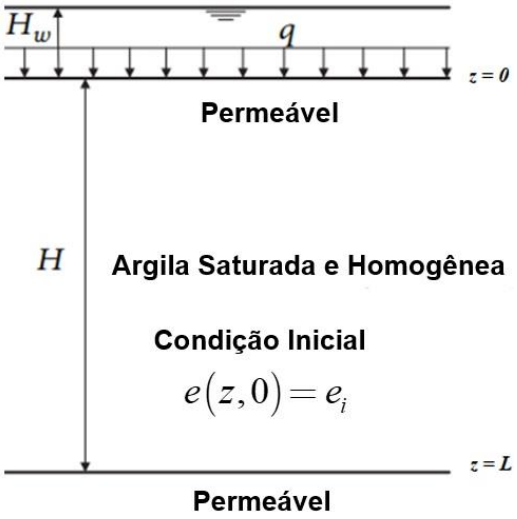


Figura 3.7 - Condições inicial e de contorno da modelagem numérica do fenômeno do adensamento a grandes deformações.

Os valores do índice de vazios nas fronteiras superior, $e(0,t)$, e inferior, $e(L,t)$, são determinados a partir da substituição das expressões de tensão efetiva vertical, definidas nas Eq. 3.6 e 3.7, na relação constitutiva do tipo *Extended Power Function*. Essa abordagem permite estabelecer uma conexão direta entre o estado de tensões e a evolução do índice de vazios nas extremidades do domínio, conforme descrito nas Eq. 3.8 e 3.9.

$$e(\sigma_0^{'}) = A(q + H_w\gamma_w + Z)^B \tag{3.8}$$

$$e(\sigma_f^{'}) = A\left[q + H_w\gamma_w + \gamma_w(G_s - 1)L + Z\right]^B \tag{3.9}$$

A geometria da camada foi modelada em um domínio bidimensional com simetria axial, conforme implementado no ambiente computacional e ilustrado na Figura 3.8. A discretização espacial foi realizada por meio de uma malha de elementos finitos triangulares, adotando-se um nível de refinamento extrafino, com o objetivo de aumentar a precisão numérica e capturar adequadamente os gradientes de deformação e fluxo ao longo do domínio.

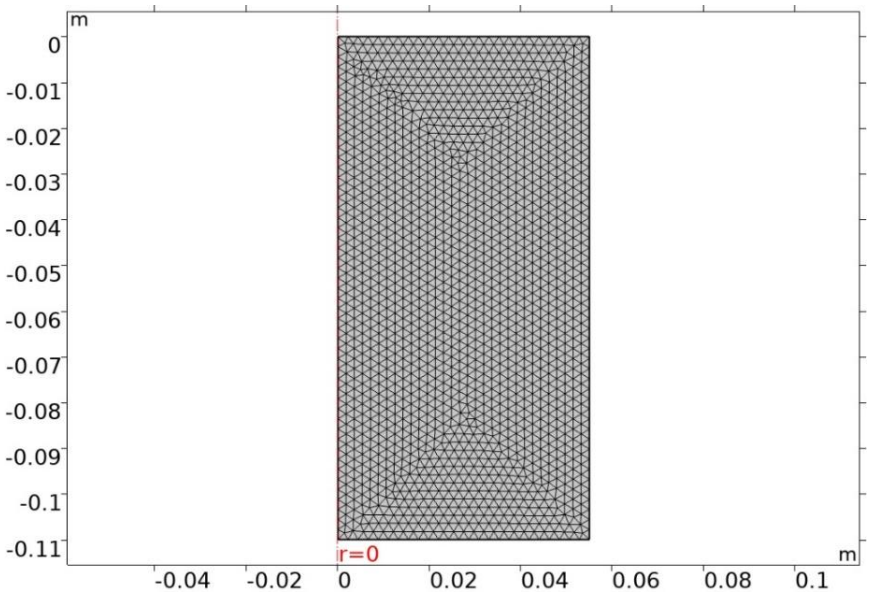


Figura 3.8 - Geometria da camada em plano 2D axissimétrico com malha extrafina.

3.5.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS CONSTITUTIVOS

Os parâmetros empregados na modelagem foram derivados dos resultados experimentais obtidos nos ensaios HCT e calibrados com o objetivo de reproduzir adequadamente as tendências observadas nos ensaios. Esse processo de ajuste permite garantir a consistência entre os dados experimentais e as respostas previstas pelo modelo, contribuindo para uma representação mais fiel do comportamento do material.

As relações constitutivas adotadas, incluindo as funções índice de vazios *versus* tensão efetiva (e–σ') e índice de vazios *versus* permeabilidade (e–k), foram estabelecidas com base nos dados experimentais disponíveis. Essas relações são fundamentais para descrever a evolução do comportamento hidromecânico do material ao longo do processo de adensamento, especialmente em regime de grandes deformações.

Ressalta-se que os parâmetros obtidos são representativos das condições específicas do estudo, sendo fortemente dependentes das características do material, como composição granulométrica e estrutura, bem como das condições experimentais adotadas. Dessa forma, sua variabilidade deve ser considerada em análises mais abrangentes.

Assim, a aplicação desses parâmetros em condições diferentes daquelas consideradas neste estudo deve ser conduzida com cautela, sendo recomendável a realização de novas calibrações ou análises de sensibilidade para garantir a adequação do modelo às novas condições.

3.6 - INTEGRAÇÃO ENTRE ENSAIOS E MODELAGEM

A integração entre os resultados experimentais e a modelagem numérica foi conduzida a partir da incorporação dos parâmetros constitutivos obtidos nos ensaios HCT como dados de entrada nos modelos computacionais. Os ensaios de caracterização geotécnica realizados em laboratório e em campo permitiram uma caracterização efetiva do comportamento dos sedimentos analisados, porém não foram utilizados como dados de entradas nos modelos desenvolvidos, visto que os parâmetros-chaves são fundamentalmente obtidos por meio das relações constitutivas analisadas a partir dos dados obtidos com os ensaios de adensamento por percolação induzida. Porém, esse procedimento ainda assegura a consistência entre a caracterização experimental e a representação numérica do fenômeno, permitindo uma modelagem mais fiel do comportamento do material.

Essa abordagem possibilita a comparação direta entre o comportamento observado experimentalmente e as respostas obtidas por meio da simulação numérica, permitindo avaliar a consistência das formulações teóricas adotadas. Além disso, favorece a identificação de limitações associadas às hipóteses do modelo e às simplificações inerentes à representação do fenômeno de adensamento em grandes deformações.

Dessa forma, a análise integrada entre experimentação e modelagem numérica configura-se como um elemento central desta pesquisa, contribuindo de maneira significativa para a compreensão do comportamento hidromecânico do material em regime de grandes deformações. Essa integração permite uma avaliação mais robusta dos mecanismos envolvidos no processo de adensamento.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo reúne e discute os resultados obtidos ao longo da pesquisa, incluindo a caracterização física e hidromecânica do sedimento depositado por meio de ensaios laboratoriais, bem como investigações de campo realizadas na borda do reservatório da UHE Itumbiara. São apresentados os resultados dos ensaios de adensamento por percolação induzida (HCT), empregados na determinação dos parâmetros constitutivos do material, seguidos pelas análises provenientes das modelagens analítica e numérica do fenômeno de adensamento em regime de grandes deformações. Além disso, são conduzidas avaliações dos modelos constitutivos adotados, análises paramétricas e retroanálises, utilizando tanto dados experimentais quanto informações da literatura. Por fim, é realizada uma comparação sistemática entre as respostas obtidas pelas abordagens analítica e numérica, visando avaliar a consistência e a capacidade preditiva dos modelos.

Os resultados apresentados neste capítulo abrangem diferentes frentes de investigação, incluindo ensaios laboratoriais de caracterização, campanhas de campo, ensaios de adensamento HCT e análises por meio de modelagens analítica e numérica. Essa abordagem multifacetada permite uma compreensão abrangente do comportamento do material sob diferentes condições.

A análise dos resultados é realizada de forma integrada, com o objetivo de interpretar o comportamento geotécnico do material à luz das teorias de adensamento em regime de grandes deformações. São discutidas as implicações físicas associadas aos resultados obtidos, incluindo aspectos relacionados à compressibilidade, permeabilidade e evolução do índice de vazios, bem como as limitações decorrentes das hipóteses adotadas e das metodologias empregadas.

Adicionalmente, são realizadas comparações entre os resultados experimentais e as respostas obtidas por meio das modelagens analítica e numérica, permitindo avaliar a capacidade dos modelos constitutivos em reproduzir o comportamento observado. Essa comparação é fundamental para verificar a adequação das relações constitutivas adotadas e a robustez das abordagens de modelagem empregadas.

4.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

A Tabela 4.1 sintetiza os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica realizados nas amostras de sedimento coletadas na área de estudo, incluindo propriedades físicas fundamentais para a análise do comportamento do material. Adicionalmente, os resultados do

ensaio de limite de liquidez, conduzido conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016c), são apresentados na Figura 4.1, permitindo a avaliação da consistência e repetibilidade dos dados experimentais.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica para o sedimento da área de estudo.

Propriedades físicas do sedimento	**Valor encontrado**
Teor de umidade médio (%)	18,1
Índice de vazios	1,0
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,803
Limite de liquidez (%)	45
Limite de plasticidade (%)	26
Índice de plasticidade (%)	19

Com base na classificação de solos em função do índice de plasticidade, o material da região estudada pode ser classificado como altamente plástico (IAEG, 1979). Em termos geotécnicos, material com elevado índice de plasticidade tendem a apresentar maior compressibilidade e maior suscetibilidade a deformações volumétricas sob carregamento, o que se traduz em maiores recalques, especialmente em condições de adensamento.

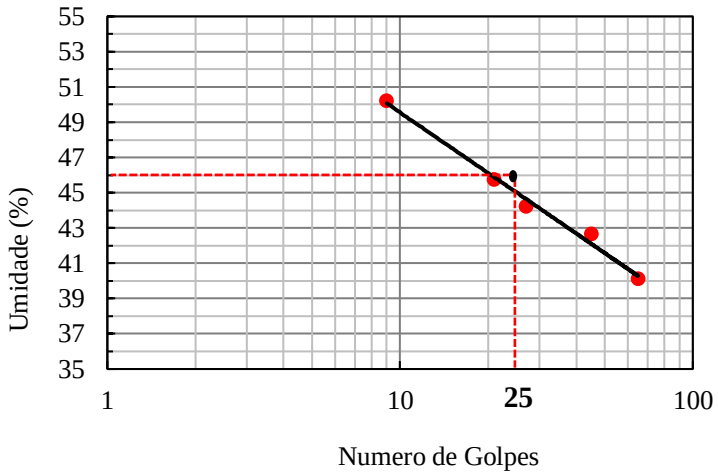


Figura 4.1 - Resultados do ensaio de limite de liquidez do sedimento.

Os ensaios de análise granulométrica foram conduzidos com e sem a utilização de defloculante (hexametafosfato de sódio), em conformidade com a NBR 7181 (ABNT, 2016e), com o objetivo de avaliar o grau de agregação das partículas finas. As curvas granulométricas

resultantes dos ensaios de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação são apresentadas na Figura 4.2. Verifica-se que o defloculante apresentou maior eficácia na desagregação da fração fina, avaliada por sedimentação, o que é consistente com o comportamento típico de solos lateríticos, nos quais há presença de agregados estruturais. Por outro lado, na fração analisada por peneiramento fino, a influência do defloculante foi pouco significativa.

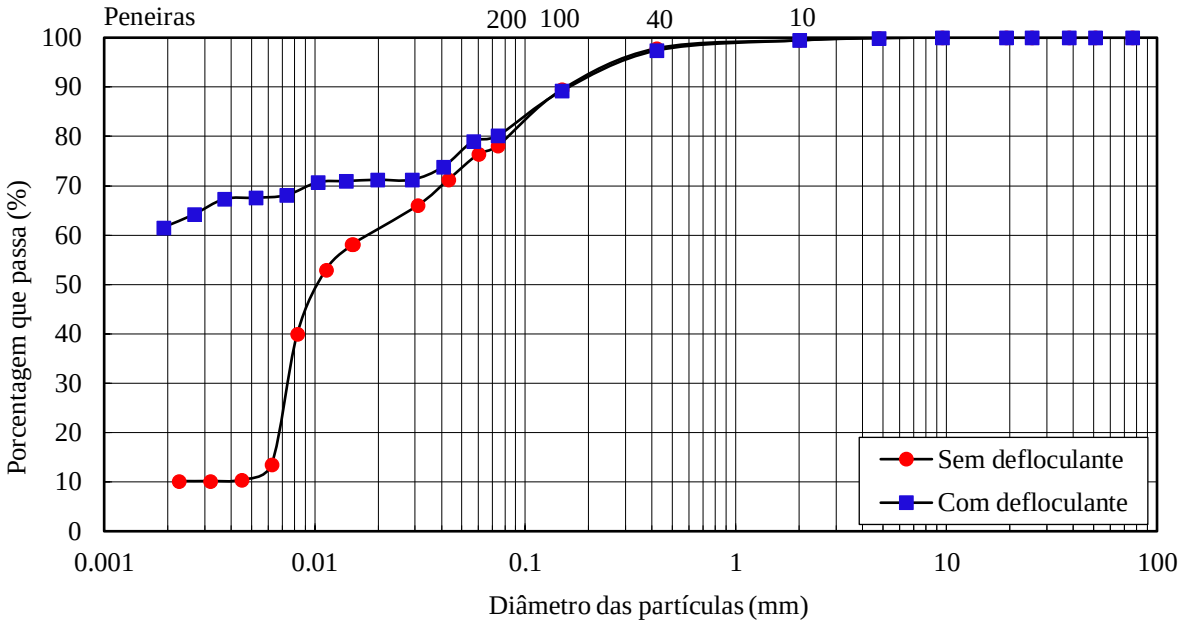


Figura 4.2 - Curvas granulométricas com e sem o uso de defloculante do sedimento.

A partir dos resultados obtidos, o material foi classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como uma argila de baixa plasticidade (CL), independentemente do uso de defloculante. A Tabela 4.2 apresenta um comparativo das propriedades físicas do sedimento da região da UHE Itumbiara com dados de estudos anteriores (Vilhena *et al.*, 2019; Schliewe *et al.*, 2021; Merabet Jr., 2023), destacando possíveis variações associadas à heterogeneidade espacial e às condições sazonais de coleta. A área de coleta de amostras de Schliewe *et al.* (2021) está localizada nas coordenadas 18°23'1,76"S e 49°3'26,02"W, também na margem direita do reservatório, assim como as amostras analisadas por Merabet Jr. (2023), que se localizou mais precisamente nas coordenadas 18°23'13,88"S e 49°3'27,69"W e Vilhena *et al.* (2019), que coletou amostras até a profundidade de 2 m nas coordenadas 18°23'12,2"S e 49°3'25,6"W. As coletas de amostras realizadas por Vilhena *et al.* (2019) e Schliewe *et al.* (2021) ocorreram entre setembro de 2016 e outubro de 2017, enquanto

a coleta realizada por Merabet Jr. (2023) ocorreu em conjunto com a presente pesquisa em fevereiro de 2022.

Os resultados obtidos indicam que o sedimento apresenta comportamento característico de materiais finos altamente compressíveis, em concordância com os valores de índice de plasticidade observados. Esse comportamento evidencia a necessidade de utilização de modelos de adensamento em regime de grandes deformações, uma vez que formulações clássicas baseadas em pequenas deformações podem não capturar adequadamente a evolução das propriedades do material ao longo do processo.

Tabela 4.2 - Comparativo entre as propriedades físicas do solo da região da UHE Itumbiara.

Propriedades físicas	Vilhena *et al*. (2019)	Schliewe *et al*. (2021)	Merabet Jr. (2023)	**Presente pesquisa**
Massa específica dos grãos (g/cm³)	2,88	2,81	2,62	**2,80**
Limite de liquidez (%)	47	49	44	**45**
Limite de plasticidade (%)	29	31	24	**26**
Índice de plasticidade (%)	18	18	20	**19**
Índice de vazios médio de campo	0,46	1,679	0,91	**1,00**
Umidade média de campo (%)	15,8	22,5	15,6	**18,1**
Grau de Saturação de campo (%)	98,9	37,7	44,9	**50,7**
Distribuição do tamanho dos grãos medida com uso de defloculante				
Percentual de pedregulho (%)	2	8,14	0,5	**0,5**
Percentual de areia (%)	31	14,61	25,7	**20,2**
Percentual de silte (%)	18	38,86	17,4	**17,7**
Percentual de argila (%)	49	38,38	56,4	**61,6**
Distribuição do tamanho dos grãos medida sem uso de defloculante				
Percentual de pedregulho (%)	2,0	3,70	0,5	**0,5**
Percentual de areia (%)	34,0	32,87	35	**23,0**
Percentual de silte (%)	64,0	63,44	26,2	**63,3**
Percentual de argila (%)	0,0	0,0	38,2	**10,2**

4.1.2. COMPACTAÇÃO E PERMEABILIDADE

Os resultados do ensaio de compactação Proctor normal, conduzido conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016f), são apresentados na Figura 4.3. A análise da curva de compactação permite determinar a massa específica seca máxima ($\rho_{dmáx}$ = 1,574 g/cm³) e a umidade ótima (w_{ot} = 22,3%), parâmetros fundamentais para o controle tecnológico de obras geotécnicas.

Adicionalmente, o coeficiente de permeabilidade médio foi obtido por meio do ensaio de carga variável, conforme a NBR 14545 (ABNT, 2021), resultando em $k = 6{,}2 \times 10^{-7}$ m/s,

valor típico de solos finos argilosos, caracterizados por baixa condutividade hidráulica devido à reduzida dimensão dos poros e à elevada superfície específica das partículas.

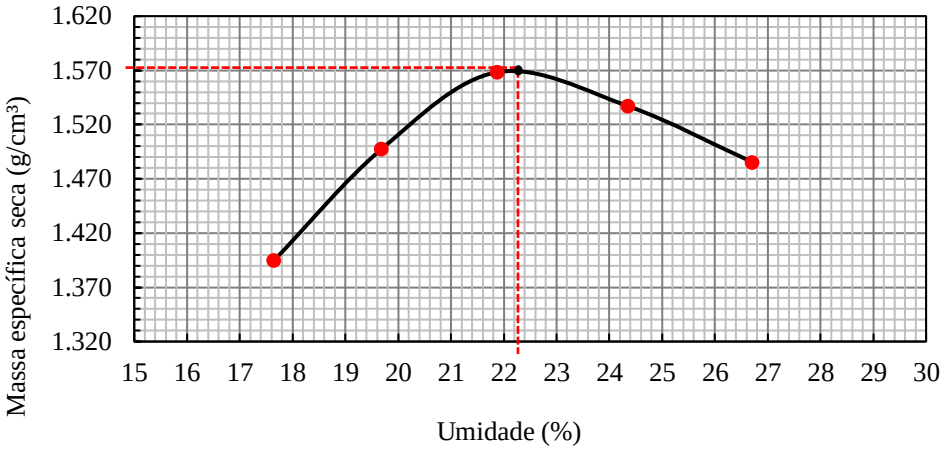


Figura 4.3 - Curva de compactação do sedimento.

4.1.3. ADENSAMENTO CONVENCIONAL

O ensaio de adensamento unidimensional convencional foi conduzido conforme a NBR 16853 (ABNT, 2020a), sendo os resultados apresentados na Figura 4.4 por meio da variação da altura do corpo de prova ao longo do tempo para cada incremento de carga. A representação gráfica foi realizada em função da raiz do tempo, conforme o método de Taylor, o qual permite maior sensibilidade na identificação do trecho inicial de adensamento primário, favorecendo a determinação do coeficiente de adensamento (c_v) a partir da linearização desse segmento.

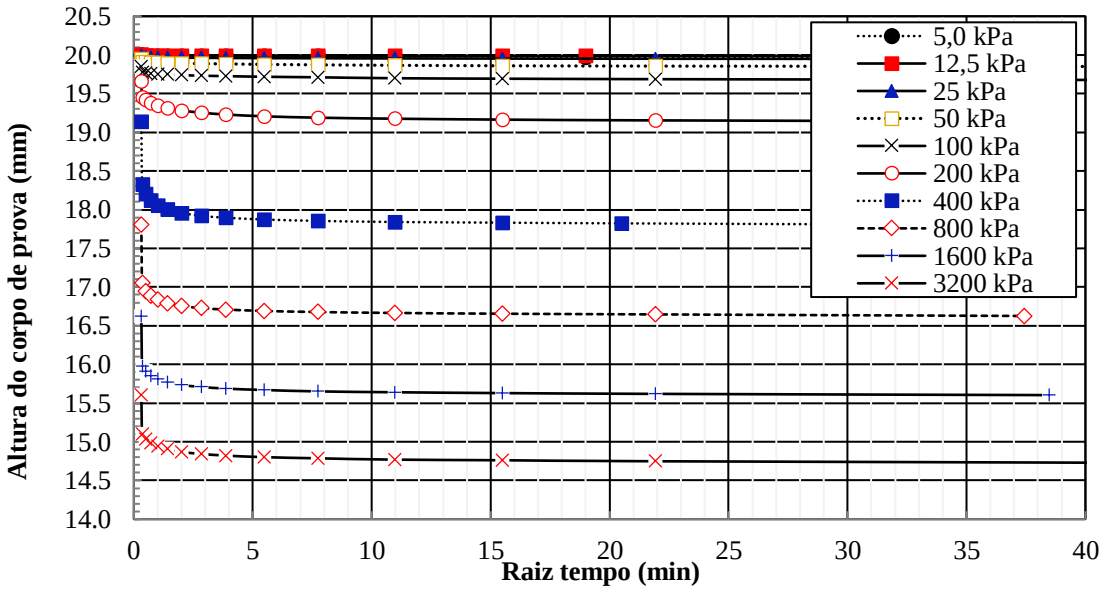


Figura 4.4 - Curva de adensamento do sedimento.

Nos estágios iniciais de carregamento, a amostra apresentou variações volumétricas pouco significativas, sugerindo comportamento elástico ou de recompressão. Entretanto, entre os incrementos de 100 e 200 kPa, observou-se aumento expressivo das deformações, indicando que a tensão de pré-adensamento está situada nesse intervalo. A partir desse nível de tensão, inicia-se o regime de compressão virgem, caracterizado pelo rearranjo estrutural das partículas, com redistribuição granulométrica nos vazios. Além disso, verifica-se que as maiores taxas de deformação ocorrem nos instantes iniciais de cada carregamento, refletindo a predominância do adensamento primário.

A curva de compressão (e-log σ') foi determinada com base nos resultados do ensaio (Figura 4.5), permitindo avaliar a evolução do índice de vazios ao longo dos estágios de carregamento e descarregamento. Observa-se que o aumento da tensão efetiva promove redução do índice de vazios, caracterizando o comportamento compressível do material. Durante o descarregamento, ocorre recuperação parcial do volume, associada à recompressão. A partir dessa curva, foram obtidos os parâmetros de compressibilidade, com índice de compressão C_c = 0,368 (reta de compressão virgem) e índice de recompressão C_r = 0,025 (reta de descarregamento), parâmetros fundamentais para a previsão de recalques.

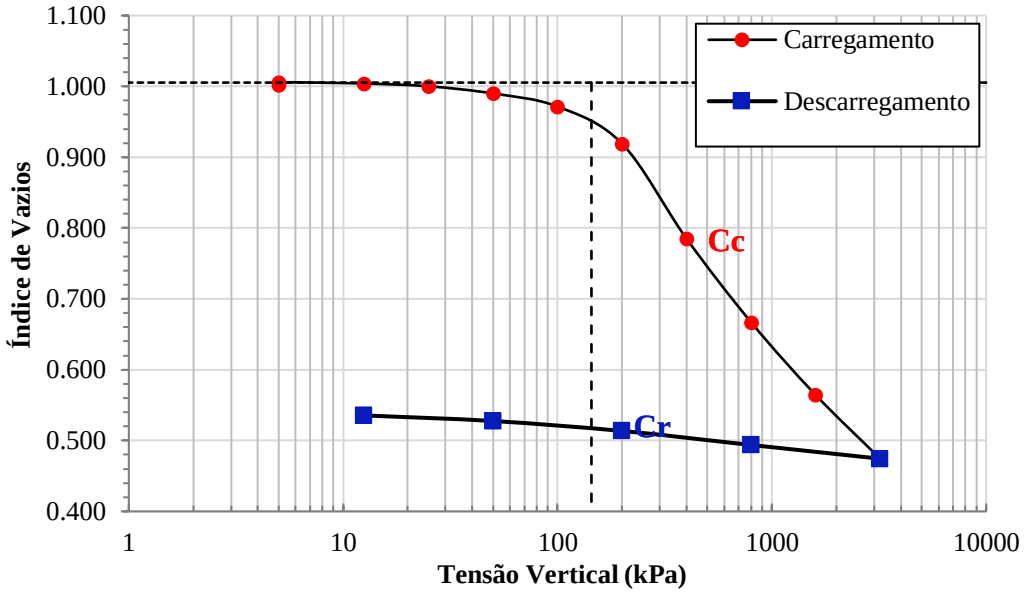


Figura 4.5 - Curva de compressão do sedimento.

A aplicação do método de Casagrande permitiu estimar a tensão de pré-adensamento em aproximadamente 144 kPa, enquanto ao aplicar o método de Pacheco e Silva a tensão de pré-adensamento foi de 132 kPa. Isso indica que o sedimento compactado apresenta histórico de tensões prévias dessa magnitude. Esse comportamento pode estar associado a processos

pedogenéticos típicos de solos tropicais, como cimentação por óxidos de ferro e alumínio e ciclos de secagem e umedecimento. Após a superação da tensão de pré-adensamento, o material entra no regime de compressão virgem, caracterizado por maior inclinação da curva e maior suscetibilidade a deformações volumétricas. Destaca-se, contudo, que possíveis efeitos de amolgamento podem ter influenciado a estimativa desse parâmetro.

A identificação da tensão de pré-adensamento na faixa entre 100 e 200 kPa caracteriza o material como sobreadensado (OCR > 1), indicando que o material já foi submetido a tensões efetivas superiores às atuais. Esse comportamento tem implicações diretas na resposta mecânica do sedimento, especialmente na sua compressibilidade e rigidez, sendo essencial sua consideração em análises de modelagem geotécnica e previsão de recalques.

Destaca-se que efeitos de amolgamento, decorrentes das etapas de coleta, transporte e preparação das amostras, podem ter alterado a estrutura natural do material, influenciando os parâmetros obtidos, em especial a estimativa da tensão de pré-adensamento, que é sensível à integridade estrutural do material.

4.1.4. COMPRESSÃO SIMPLES E TRIAXIAL

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples não confinada (UCS – *Unconfined Compressive Strength*) foram obtidos conforme a NBR 12770 (ABNT, 2022). A Figura 4.6 apresenta as curvas tensão axial *versus* deformação axial, permitindo avaliar o comportamento tensão-deformação do sedimento sob condições não confinadas, bem como identificar a resistência máxima mobilizada.

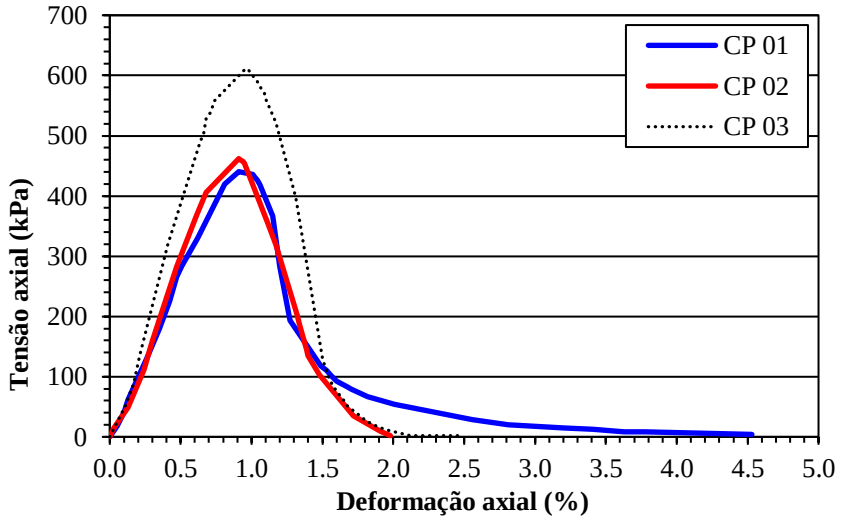


Figura 4.6 - Curva de compressão simples do sedimento.

Analisando os resultados com as amostras em triplicata observa-se que o CP 03 apresentou pico da curva tensão-deformação bem maior que as demais amostras, e por isso, foi desconsiderado nas análises, considerando apenas os CP 01 e CP 02. Isso ocorreu devido possivelmente à alguma inconsistência durante o ensaio ou à presença de alguma inclusão grosseira mais resistente presente nessa amostra compactada.

A resistência à compressão não confinada (q_u), definida como o valor máximo da tensão axial mobilizada (pico da curva tensão-deformação), bem como a resistência ao cisalhamento não drenado ($s_u = q_u/2$), estão apresentadas na Tabela 4.3. Os resultados evidenciam um comportamento com pico de resistência bem definido, caracterizado por elevada rigidez inicial e pequena deformação axial associada à ruptura, típico de solos estruturados ou sobreadensados. Observa-se ainda a ausência de resistência residual significativa após o pico, indicando comportamento frágil sob condições não confinadas. Vale ressaltar que a resistência ao cisalhamento não drenado (s_u) não é um dado confiável.

Tabela 4.3 - Resistência à compressão confinada e ao cisalhamento do sedimento.

Corpo de prova	**Resistência à compressão não confinada – q_u (kPa)**	**Resistência ao cisalhamento – s_u (kPa)**	**Deformação axial específica (%)**
CP 01	440,34	220,17	0,91
CP 02	461,98	230,99	0,91

Os ensaios triaxiais foram conduzidos conforme a ASTM D7181-11 (ASTM, 2011), na condição consolidado não drenado (CU), permitindo avaliar o comportamento do sedimento sob carregamento com controle de tensões e drenagem parcial. Durante a fase de consolidação isotrópica, observou-se redução volumétrica em todos os corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 4.7, que apresenta a evolução da variação volumétrica ao longo do tempo. Essa contração inicial acentuada indica dissipação de poropressões e rearranjo estrutural do material, especialmente nos primeiros instantes de aplicação das tensões confinantes.

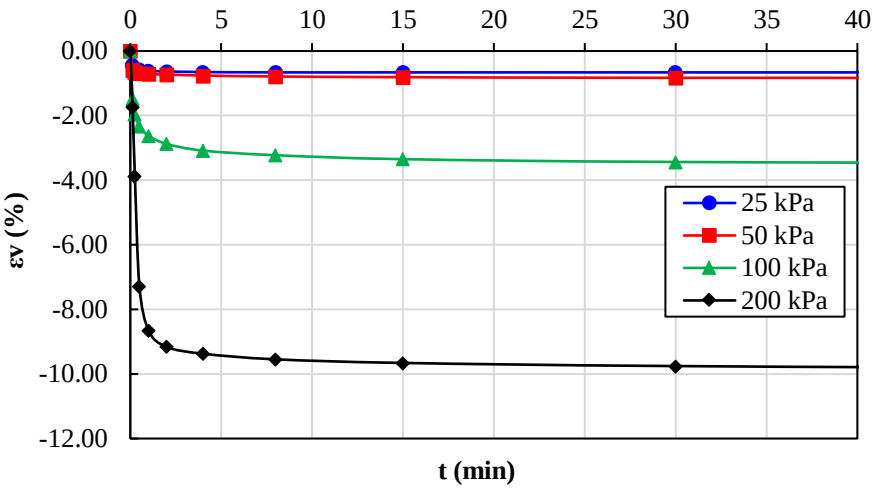


Figura 4.7 - Variação volumétrica durante consolidação de ensaios triaxiais.

Após a consolidação, procedeu-se à fase de cisalhamento não drenado, sendo a resposta tensão desviadora *versus* deformação axial apresentada na Figura 4.8 para diferentes tensões confinantes. Verifica-se a ocorrência de ruptura com pico pronunciado em baixas deformações axiais, característica de solos sobreadensados. Para os corpos de prova submetidos a tensões confinantes de 25, 50 e 100 kPa, inferiores à tensão de pré-adensamento, o comportamento observado é típico de materiais com OCR > 1, apresentando menor contração volumétrica. Em contraste, a amostra ensaiada sob tensão confinante de 200 kPa, superior à tensão de pré-adensamento, apresenta comportamento compatível com solo normalmente adensado, com maior tendência contrativa. Após o pico, observa-se a estabilização das tensões desviadoras, indicando a mobilização da resistência residual, associada ao reequilíbrio estrutural do material.

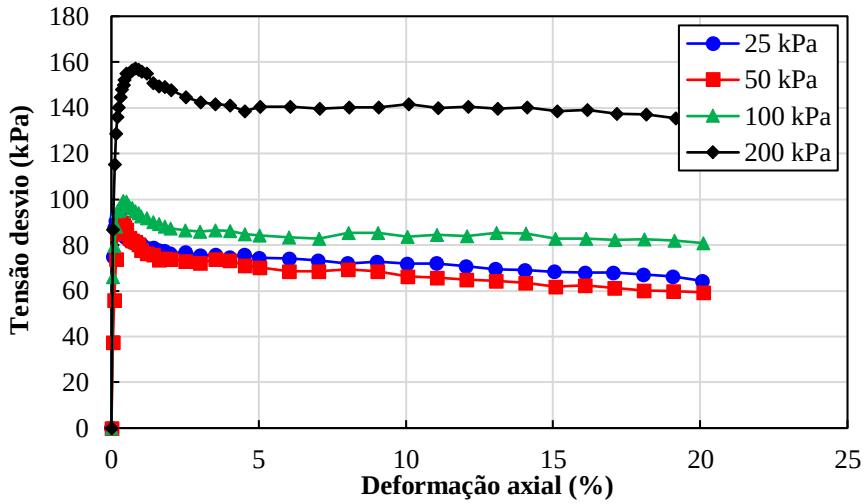


Figura 4.8 - Tensão desvio em função da deformação axial durante ruptura de ensaios triaxiais.

Nos ensaios triaxiais do tipo consolidado não drenado (CU), a aplicação da tensão axial ocorre sob condições de drenagem impedida, o que promove o aumento da poropressão (pressão neutra) no interior do corpo de prova. Esse aumento resulta na redução da tensão efetiva, conforme o princípio das tensões efetivas de Terzaghi, impactando diretamente a mobilização da tensão desviadora. A Figura 4.9 apresenta a evolução da pressão neutra em função da deformação axial, permitindo analisar a geração e dissipação de poropressões durante o carregamento.

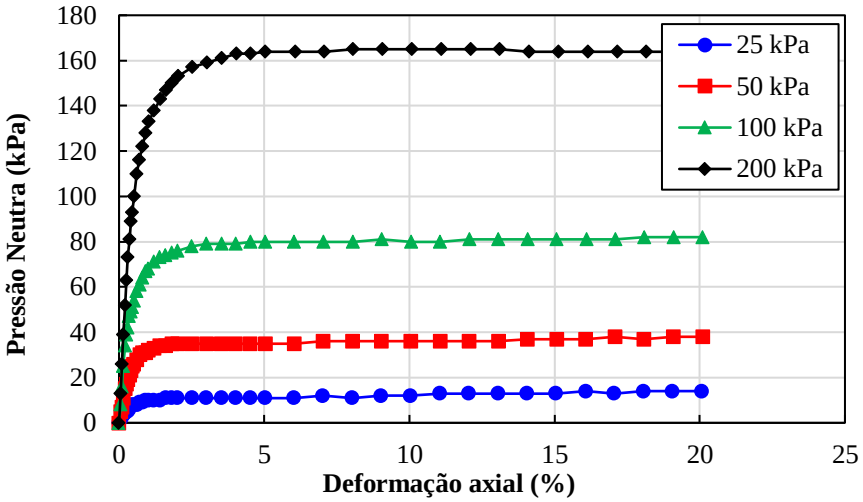


Figura 4.9 - Pressão neutra em função da deformação axial durante ruptura de ensaios triaxiais.

A envoltória de resistência ao cisalhamento foi determinada a partir dos círculos de Mohr construídos com base nas tensões principais efetivas no instante da ruptura, conforme apresentado na Figura 4.10. A envoltória é representada por uma reta tangente aos círculos, conforme o critério de resistência de Mohr-Coulomb. Adicionalmente, a análise da trajetória de tensões foi realizada no espaço de tensões, sendo apresentada na Figura 4.11, permitindo avaliar a evolução do estado de tensões até a ruptura. Nessa análise optou-se por considerar somente as maiores tensões confinantes (100 e 200 kPa) analisadas, mais próximas à tensão de pré-adensamento estimada, visto que considerando todas as tensões confinantes a inclinação da reta ficaria baixa e, consequentemente, o ângulo de atrito encontrado seria também muito baixo, o que seria impraticável e improvável com os valores normalmente encontrados em laboratório.

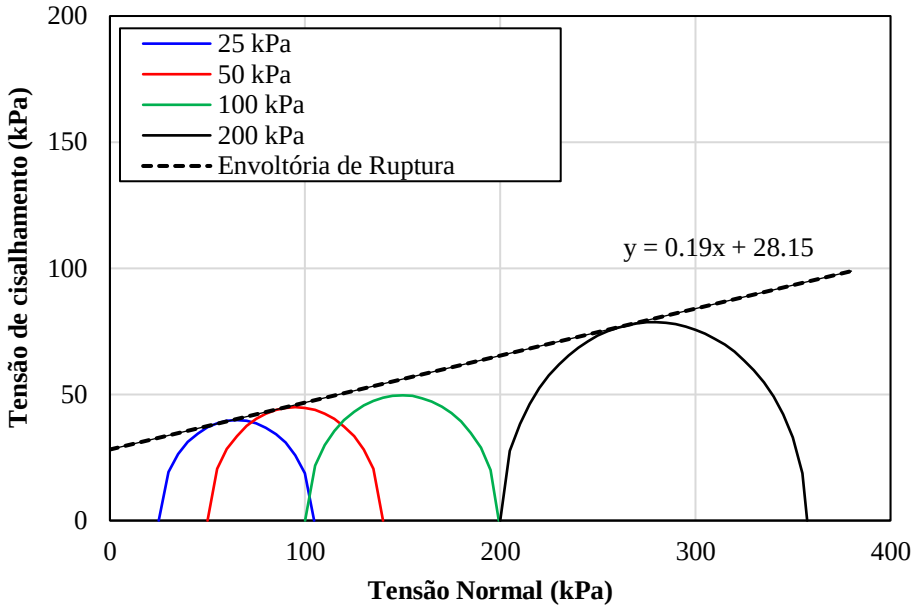


Figura 4.10 - Círculos de Mohr e envoltória de ruptura de ensaios triaxiais.

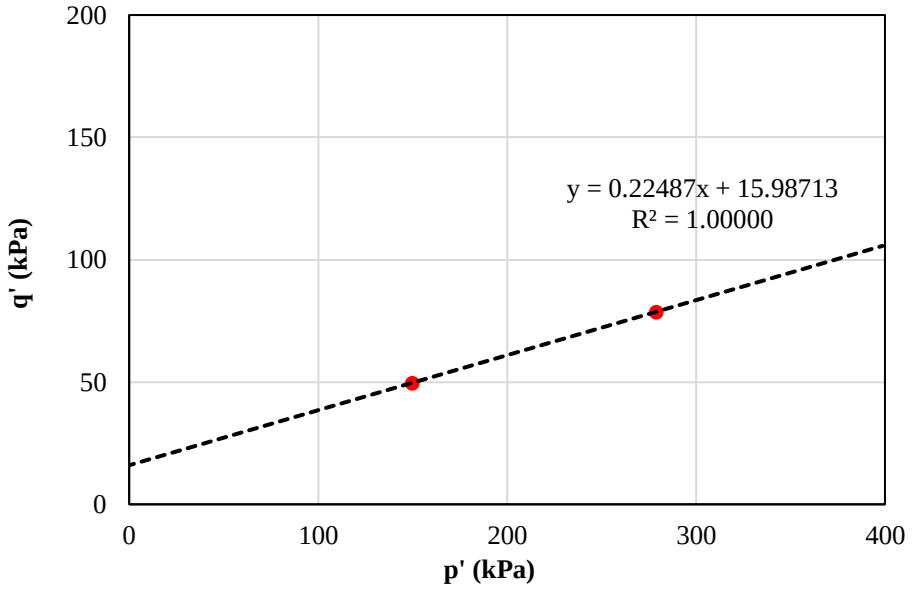


Figura 4.11 - Trajetória de tensões dos ensaios triaxiais.

A envoltória de ruptura apresenta intercepto positivo no eixo de tensões de cisalhamento, caracterizado pelo parâmetro de coesão efetiva (c' = 16,41 kPa), e inclinação associada ao ângulo de atrito efetivo (aproximadamente ϕ' = 13°). O valor de ϕ' ainda assim foi considerado baixo (para solos muito plásticos, espera-se valores superiores a 15°), mas é consistente com a predominância de frações finas e comportamento argiloso do sedimento. O valor de c' encontra-se dentro da faixa típica de solos tropicais brasileiros e pode refletir efeitos de estrutura e histórico de tensões (sobreadensamento). Ressalta-se que, no contexto do modelo

de Mohr-Coulomb, o parâmetro *c'* representa um intercepto matemático da envoltória linearizada, não correspondendo necessariamente a uma coesão verdadeira do material, conforme discutido por Lambe & Whitman (1969).

O comportamento tensão-deformação observado nos ensaios triaxiais, com presença de resistência de pico seguida de estabilização em níveis residuais, é característico de solos sobreadensados, os quais apresentam estrutura mais rígida e tendência à ruptura frágil. Esse comportamento está em concordância com os resultados do ensaio de adensamento convencional, que indicaram a presença de tensão de pré-adensamento significativa.

Os parâmetros de resistência obtidos, como *c'* e ϕ', são essenciais para a caracterização do comportamento mecânico do sedimento e exercem influência direta nas análises de estabilidade e deformação, sendo fundamentais para a calibração e validação dos modelos constitutivos empregados nas modelagens analíticas e numéricas desenvolvidas neste estudo.

4.1.5. CURVA CARACTERÍSTICA SOLO ÁGUA

As curvas características solo-água (CCSA) determinadas experimentalmente são apresentadas na Figura 4.12 para as trajetórias de secagem e molhagem. Durante os ensaios, não foram observadas variações volumétricas significativas, indicando comportamento aproximadamente indeformável no intervalo de sucção analisado. Os valores de sucção até cerca de 300 kPa correspondem à sucção matricial ($\psi = u_a - u_w$), obtida por meio do equipamento de placa de pressão, enquanto valores superiores correspondem à sucção total, determinados com o equipamento WP4C (psicrômetro de ponto de orvalho). Adicionalmente, as curvas experimentais foram ajustadas utilizando a equação bimodal de Durner (1994), adequada para solos com dupla porosidade (Eq. 3.1).

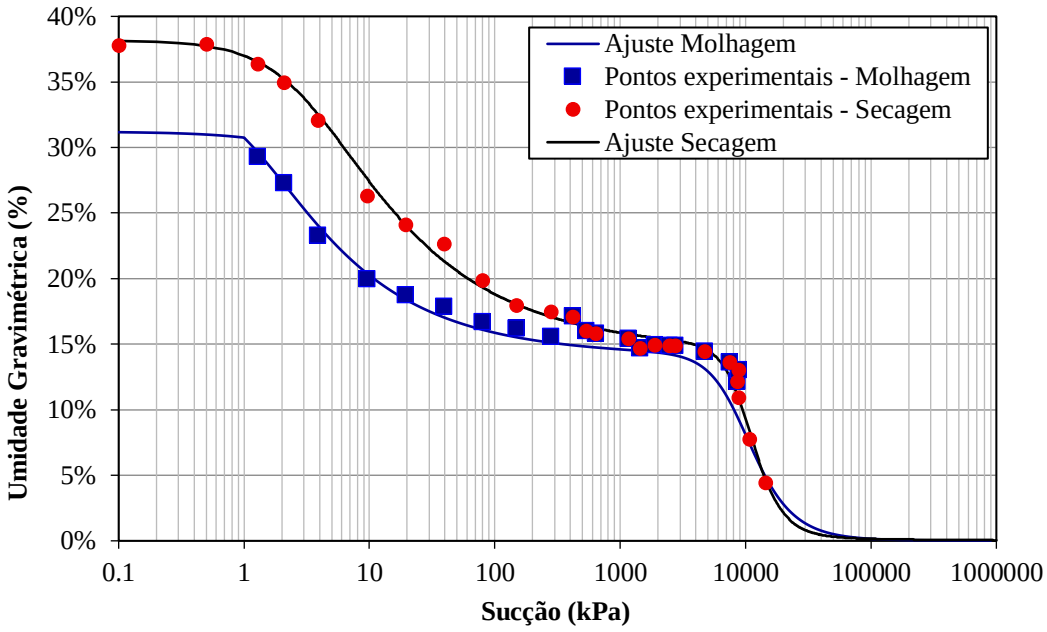


Figura 4.12 - Curva Característica Solo Água experimentais nas trajetórias de secagem e molhagem.

As CCSAs apresentam comportamento bimodal, típico de solos lateríticos, refletindo a presença de dois domínios de porosidade (macro e microporos). Observa-se também a ocorrência de histerese entre as trajetórias de secagem e molhagem até aproximadamente 400 kPa, fenômeno associado a efeitos de aprisionamento de ar, molhabilidade e rearranjo estrutural, conforme reportado por Sun *et al.* (2016). Para a trajetória de secagem, o valor de entrada de ar dos macroporos (air-entry value – AEV) ocorre em torno de 1,2 kPa, associado a um teor de umidade de aproximadamente 37%, enquanto na trajetória de molhagem esse valor é de cerca de 1,0 kPa, com umidade próxima de 31%. Já para os microporos, ambas as curvas indicam AEV em torno de 4700 kPa, com teor de umidade de aproximadamente 14,5%, evidenciando a retenção de água em poros de menor dimensão.

Os valores obtidos são consistentes com aqueles reportados por Merabet Jr. (2023) para solos da mesma região, apresentando magnitudes relativamente baixas para materiais classificados como argilosos de baixa plasticidade, conforme discutido por Aubertin *et al.* (1998). Esse comportamento pode ser atribuído ao processo de compactação estática empregado na reconstituição das amostras, realizado com base nos valores de índice de vazios e umidade de campo. Segundo Crispim (2010), esse método tende a gerar uma estrutura mais aberta quando comparada a amostras indeformadas, o que influencia a distribuição de poros, especialmente preservando agregados na faixa de microporos, impactando diretamente a forma da CCSA.

4.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo incluíram sondagens a trado manual, realizadas conforme a NBR 9603 (ABNT, 2015), e ensaios de penetração dinâmica de cone tipo PANDA (Gouves, 1991), permitindo a avaliação preliminar da resistência do sedimento e sua variabilidade espacial. Nos furos mais afastados da borda do reservatório (Furos 1, 2, 3B e 4B), identificou-se uma camada mais resistente entre 1,2 e 2,0 m de profundidade, possivelmente associada a menores teores de umidade e maior sucção matricial. Por outro lado, nos furos 5 e 6, localizados próximos à borda do reservatório, observou-se comportamento menos resistente, com ocorrência de saturação entre 1,5 e 1,7 m, indicando influência direta do nível d'água.

A Figura 4.13 apresenta os perfis de resistência de ponta obtidos com o ensaio PANDA nos seis pontos investigados, permitindo avaliar a variabilidade vertical da resistência do sedimento. No furo mais seco (Furo 1), a resistência elevada restringe-se à camada superficial, sugerindo possível efeito de sucção. No Furo 2, observa-se comportamento heterogêneo, com aumento de resistência em profundidades maiores. Já nos Furos 3B e 4B, os picos de resistência em 1,1 m e 1,5 m, respectivamente, podem indicar mudanças estratigráficas ou presença de materiais mais densos. Nos Furos 5 e 6, a ausência de picos de resistência, associada à saturação ao longo de toda a profundidade investigada, indica redução da resistência efetiva devido à proximidade do lençol freático.

A análise integrada dos perfis de resistência sugere uma variação estratigráfica relacionada à proximidade do reservatório. Em regiões mais afastadas, a camada resistente ocorre em menores profundidades, enquanto em áreas próximas à margem, essa camada encontra-se mais profunda, possivelmente devido ao acúmulo de sedimentos recentes. Esse comportamento pode indicar uma interface entre depósitos sedimentares recentes e o material de fundação, sendo estimada uma espessura de sedimentos superior a 1,5 m nas regiões mais próximas ao reservatório.

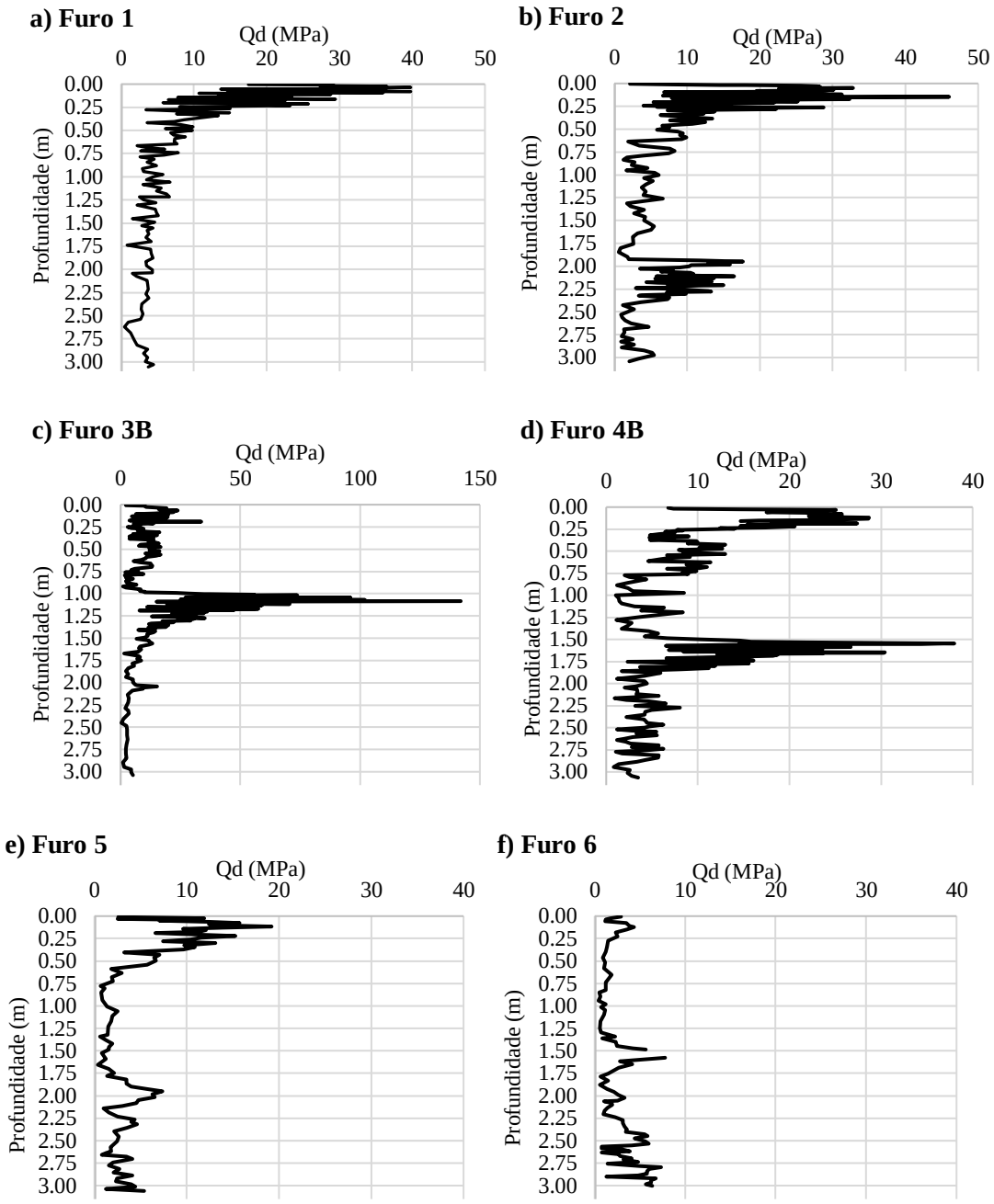


Figura 4.13 - Resultados dos ensaios tipo PANDA nos pontos investigados: a) Furo 1; b) Furo 2; c) Furo 3; d) Furo 4; e) Furo 5; f) Furo 6.

A análise comparativa dos perfis de resistência indica um comportamento aproximadamente linear com a profundidade após a camada superficial mais resistente, sugerindo relativa homogeneidade do material subjacente. Picos localizados de resistência em maiores profundidades podem estar associados à presença de inclusões granulares, como pedregulhos. Os Furos 3B e 4B apresentam picos mais pronunciados, indicando possíveis descontinuidades estratigráficas ou zonas mais densas no perfil.

As amostras deformadas coletadas ao longo da profundidade nas sondagens a trado foram utilizadas para determinação da umidade gravimétrica em laboratório, possibilitando a construção dos perfis verticais de umidade nos pontos investigados. Esses perfis são apresentados na Figura 4.14 e permitem avaliar a variação do teor de água em função da profundidade.

A comparação dos perfis de umidade evidencia um aumento progressivo do teor de água com a profundidade, associado à aproximação do nível freático. No Furo 03B, a redução da umidade a partir de 1,0 m sugere uma possível transição de material ou alteração das condições hidráulicas, em concordância com os dados de resistência obtidos pelo ensaio PANDA. No Furo 04B, a ausência de dados em maiores profundidades limita a análise, devido à elevada resistência do sedimento que dificultou a amostragem.

Os resultados obtidos em campo evidenciam a influência significativa da proximidade do reservatório no comportamento geotécnico do sedimento, refletida nas variações de resistência e teor de umidade com a profundidade. Esse padrão sugere uma estratificação decorrente de processos deposicionais, com camadas de sedimentos recentes sobrepostas ao material de fundação, o que possui implicações relevantes para a modelagem do adensamento, especialmente em análises de grandes deformações.

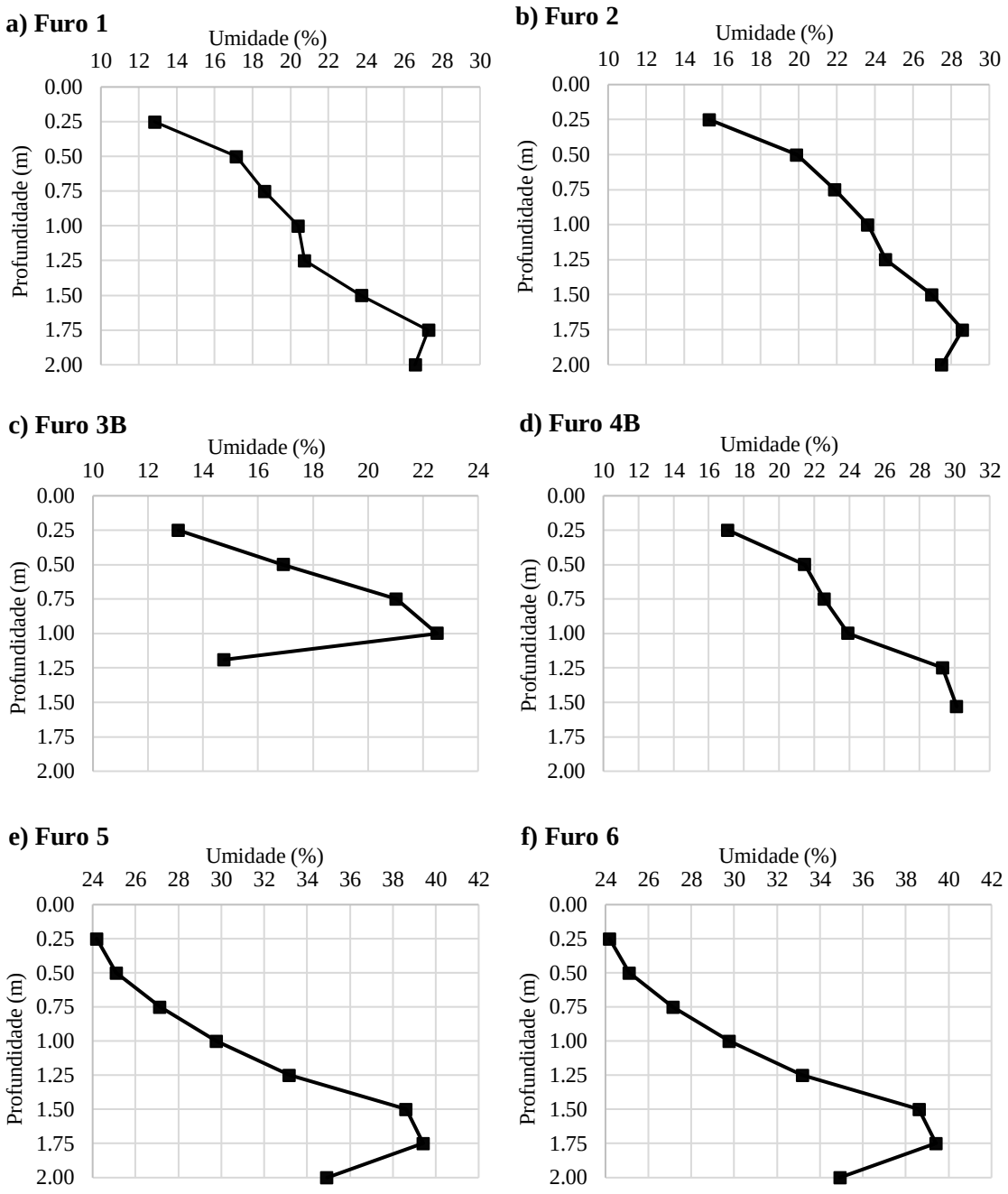


Figura 4.14 - Resultados dos ensaios de umidade gravimétrica nos pontos investigados: a) Furo 1; b) Furo 2; c) Furo 3; d) Furo 4; e) Furo 5; f) Furo 6.

4.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS HCT

Os ensaios HCT (*Hydraulic Consolidation Test*) foram conduzidos com a finalidade de determinar experimentalmente as relações constitutivas do sedimento para cada amostra analisada. Inicialmente, foram avaliados o teor de umidade e a massa específica dos grãos (G_s), obtendo-se valores médios de 8,6% e 2,744 g/cm³, respectivamente. As pequenas discrepâncias em relação aos valores obtidos em campo podem ser atribuídas, sobretudo, à perda de umidade

durante o armazenamento, o que pode influenciar o estado inicial de sucção e, consequentemente, o comportamento hidromecânico do material.

Após a fase de sedimentação, foram aplicados dois regimes de fluxo de percolação de água, com vazão constante de 0,05 cm³/min, seguidos por dois incrementos de carregamento vertical, de 24,8 kPa e 49,8 kPa. Os dados experimentais de entrada, bem como os parâmetros constitutivos ajustados, são apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5. A calibração dos parâmetros foi realizada por meio de ajuste numérico utilizando a ferramenta SOLVER do Excel, com base na minimização do erro entre os dados experimentais e os modelos constitutivos adotados.

Tabela 4.4 - Dados de entrada para as amostras analisadas no ensaio HCT.

Dados de entrada	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**
Peso específico da água [N/m³]	9,81	9,81	9,81
Peso específico dos sólidos [N/m³]	26,92	26,92	26,92
Teor de umidade inicial (%)	77,3	96,8	117,2
Altura inicial da amostra [mm]	110,0	110,0	110,0
Altura dos Sólidos [mm]	34,82	29,66	26,35
Índice de vazios inicial	2,159	2,708	3,175
Tensão efetiva do cabeçote [kPa]	0,766	0,766	0,766
Coeficiente de permeabilidade [m/s]	1,991 E-08	1,859 E-08	1,692 E-08
Altura final da amostra [mm]	66,0	58,0	50,0
Tensão efetiva final na base [kPa]	-29,06	-28,30	-31,10
Índice de vazios final	0,896	0,955	0,898
Tensão efetiva [kPa]	49,8	49,8	49,8

Tabela 4.5 - Parâmetros de saída obtidos para as amostras analisadas no ensaio HCT.

Parâmetros de saída	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**
A	2,53520	2,71420	3,17065
B	-0,26897	-0,27403	-0,32706
C (m/s)	7,46721 E^{-09}	4,83518 E^{-09}	4,76210 E^{-09}
D	5,68081	5,77261	4,57335
Z (kPa)	1,69634	0,89691	0,93809

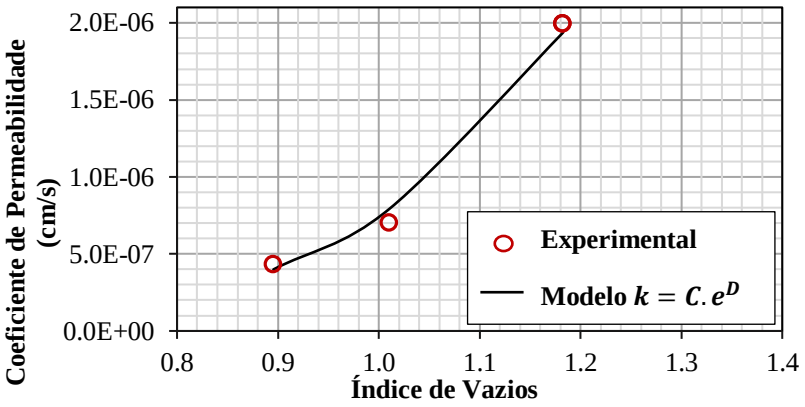
Os parâmetros constitutivos A, B, C, D e Z são amplamente utilizados na modelagem de materiais altamente compressíveis, como lamas e rejeitos de mineração, o que limita a comparabilidade direta com o sedimento estudado, proveniente da borda de reservatório. Ainda assim, as ordens de grandeza dos parâmetros obtidos são compatíveis com valores reportados

na literatura: A (1–14), B (-0,09 a -0,4), C (10^{-11} a 10^{-8} m/s), D (3–6) e Z (0,02–2,0) (Abu-Hejleh *et al*., 1996; Pinho, 2018). Isso sugere comportamento hidromecânico análogo ao de materiais finos altamente compressíveis.

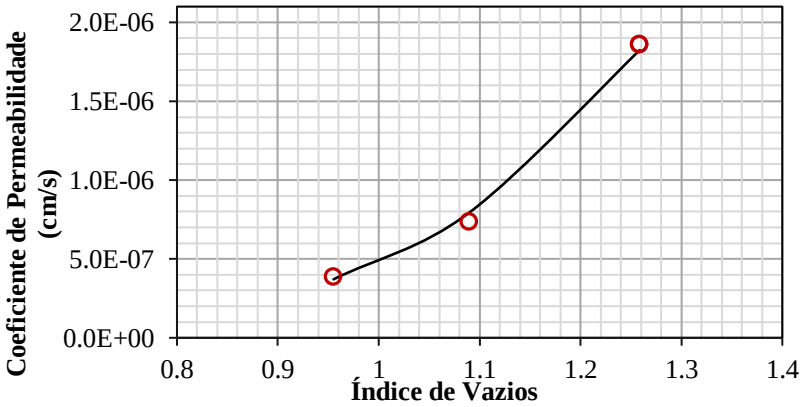
Os resultados experimentais dos ensaios HCT são apresentados por meio de relações constitutivas ajustadas. Na Figura 4.15, observa-se a relação entre o coeficiente de permeabilidade (*k*) e o índice de vazios (*e*), modelada segundo o *Single Power Function Model*, que descreve a variação da condutividade hidráulica com a estrutura do sedimento. Na Figura 4.16, apresenta-se a relação entre o índice de vazios e a tensão efetiva (σ'), ajustada pelo *Extended Power Function Model*, permitindo descrever o comportamento compressível do material sob diferentes níveis de carregamento.

Os ensaios HCT possibilitaram a obtenção experimental dos parâmetros constitutivos, posteriormente utilizados na calibração do modelo numérico desenvolvido para simular o adensamento em regime de grandes deformações. Observou-se baixa variabilidade entre as três amostras analisadas, indicando consistência experimental. Além disso, os parâmetros obtidos apresentaram ordem de grandeza compatível com valores reportados para materiais altamente compressíveis, como rejeitos de mineração, reforçando a validade dos resultados obtidos.

a) Amostra 1



b) Amostra 2



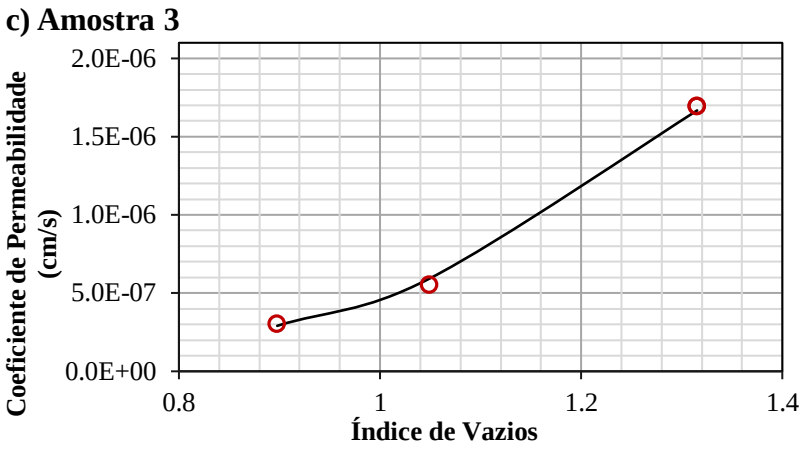
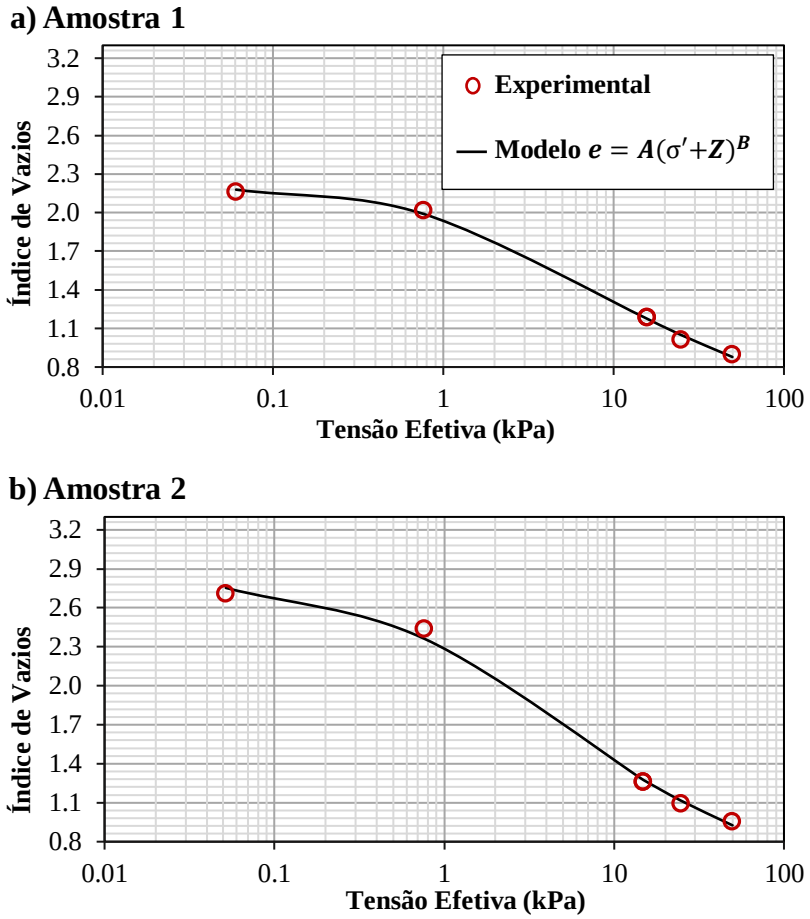


Figura 4.15 - Resultado ensaio HCT segundo modelo *Single Power Function Model*: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.



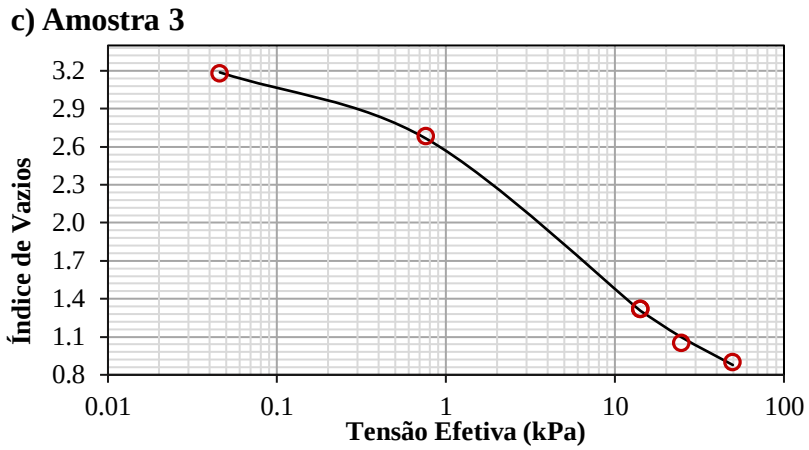


Figura 4.16 - Resultado ensaio HCT segundo modelo *Extended Power Function Model*: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.

A consistência dos resultados obtidos nos ensaios HCT entre as diferentes amostras evidencia baixa variabilidade dos parâmetros constitutivos, o que reforça a confiabilidade dos dados experimentais e a robustez das análises subsequentes, especialmente no contexto da modelagem de adensamento em grandes deformações.

Apesar da consistência observada, os parâmetros constitutivos obtidos estão sujeitos a incertezas inerentes às condições experimentais, como controle de fluxo, homogeneidade das amostras e precisão dos instrumentos, bem como ao histórico do material, incluindo efeitos de amolgamento e variações estruturais.

4.4 - RESULTADOS DA MODELAGEM DO FENÔMENO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES

A modelagem do fenômeno de adensamento em regime de grandes deformações foi desenvolvida em ambiente computacional de código aberto, com uso das linguagens implementadas nos *softwares Wolfram Mathematica*® e *COMSOL Multiphysics*®. Nessa etapa, foi incorporada a formulação de Gibson *et al.* (1967) para deformações finitas, expressa pela Eq. 2.2, juntamente com as relações constitutivas *Single Power Function Model* (Eq. 2.7), empregada para descrever a variação da condutividade hidráulica saturada em função do índice de vazios, e *Extended Power Function Model* (Eq. 2.11), utilizada para representar a dependência do índice de vazios em relação à tensão efetiva. Essa estrutura permitiu integrar o comportamento hidráulico e mecânico do material em uma formulação coerente com o problema analisado.

4.4.1 - RESULTADOS DA SOLUÇÃO ANALÍTICA

Na sequência, são apresentados os resultados e as análises derivados da implementação do código no *software Wolfram Mathematica®*, com base na solução analítica adotada para o problema de adensamento em regime de grandes deformações. Essa etapa permitiu explorar o comportamento do modelo sob diferentes condições e avaliar a influência das relações constitutivas na resposta analítica do sistema.

Foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros associados aos modelos constitutivos, assim como a avaliação do ajuste desses modelos aos dados experimentais disponíveis. Os dados de entrada utilizados nas soluções implementadas foram obtidos a partir dos ensaios HCT, apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5, complementados por dados reportados na literatura especializada, como por Abu-Hejleh *et al*. (1996) e Pinho (2018). Além disso, o código desenvolvido foi empregado em análises paramétricas do fenômeno de adensamento em deformações finitas, com o objetivo de investigar a influência das relações constitutivas e de seus parâmetros na resposta do modelo.

As relações constitutivas adotadas foram utilizadas com o objetivo de avaliar qual delas apresenta melhor capacidade de representação do fenômeno estudado, por meio da calibração de seus parâmetros com base em dados de adensamento em grandes deformações obtidos experimentalmente e em estudos da literatura. A retroanálise da formulação para deformações finitas foi conduzida considerando diferentes relações funcionais de interesse geotécnico, incluindo: a condutividade hidráulica saturada em função do índice de vazios, a tensão efetiva em função do índice de vazios, a evolução temporal do índice de vazios, a variação do índice de vazios com a profundidade, a condutividade hidráulica saturada ao longo do tempo e a evolução temporal da tensão efetiva. Essa abordagem permitiu avaliar, de forma integrada, a capacidade preditiva dos modelos constitutivos frente a diferentes variáveis de resposta.

4.4.1.1. AVALIAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS NA SOLUÇÃO ANALÍTICA

- **Condutividade Hidráulica Saturada como Função do Índice de Vazios**

O comportamento da condutividade hidráulica saturada em função do índice de vazios foi analisado por meio do modelo constitutivo *Single Power Function Model* (Eq. 2.7), conforme proposto por Somogyi (1979). Esse modelo estabelece uma relação funcional do tipo potência entre a condutividade hidráulica saturada (k) e o índice de vazios (e), sendo amplamente empregado na literatura para descrever a evolução da permeabilidade em materiais compressíveis. Na sequência, são apresentados os resultados da análise de sensibilidade dos

parâmetros do modelo, com o objetivo de avaliar sua influência na resposta hidráulica do material.

A Figura 4.17.a apresenta a análise de sensibilidade do parâmetro C, considerando um valor fixo para o parâmetro complementar da equação do *Single Power Function Model* (*D* = 2), enquanto *C* é variado dentro da faixa reportada na literatura. Os valores fixados para todas as análises de sensibilidade foram selecionados conforme os valores médios das faixas reportadas também na literatura. Observa-se que o aumento de *C* resulta em um incremento global da condutividade hidráulica saturada, sem alteração significativa na forma da curva *k*–*e*, indicando que esse parâmetro atua predominantemente como fator de escala. Por sua vez, a Figura 4.17.b apresenta a análise de sensibilidade do parâmetro *D*, mantendo constante o parâmetro complementar ($C = 10^{-8}$ m/s). Verifica-se um comportamento dependente do regime de índice de vazios: para $e < 1$, valores menores de *D* conduzem a maiores valores de *k*; para $e = 1$, a condutividade hidráulica torna-se independente de *D*; e, para $e > 1$, o aumento de *D* implica aumento de *k*. Esse comportamento evidencia o papel de *D* na modulação da curvatura da relação *k*–*e*.

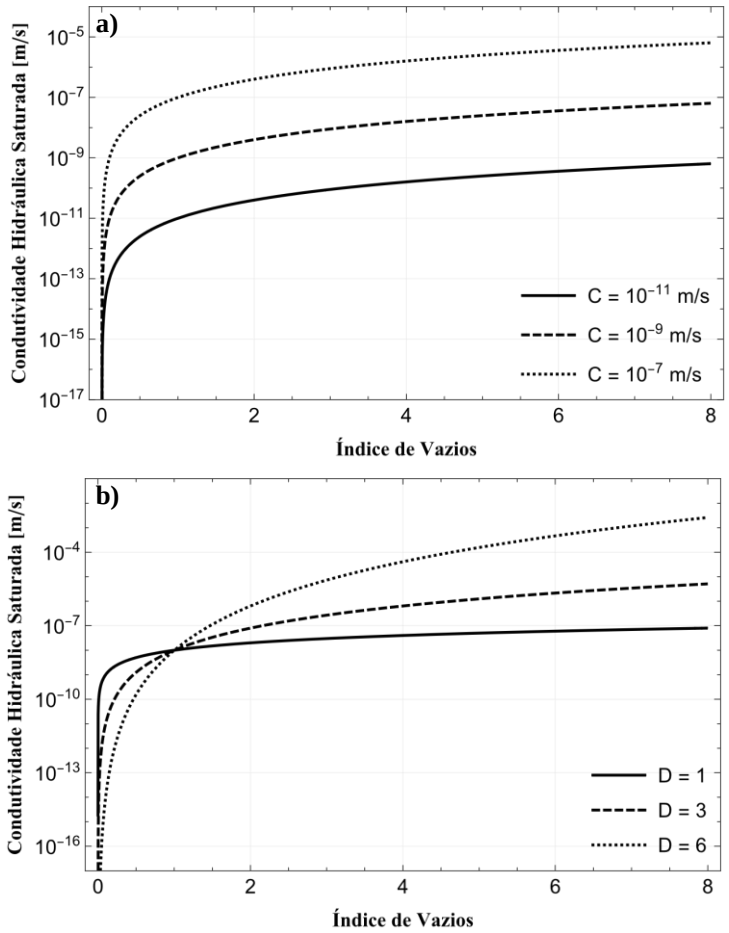


Figura 4.17 - *Single Power Function Model*: a) Análise de sensibilidade do parâmetro C; b)

Análise de sensibilidade do parâmetro D.

Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa entre o ajuste proporcionado pelo *Single Power Function Model* e o modelo proposto por Ren *et al.* (2016), descrito pela Eq. 2.15. Os resultados dessa comparação são apresentados na Figura 4.18. Para a calibração, foram adotados os parâmetros C = 2,80251x10^{-9} m/s e D = 3,88352 no modelo de Somogyi (1979), enquanto o modelo de Ren *et al.* (2016) foi ajustado com os parâmetros C = 4,49997x10^{-8} m/s e m = 0,00999999 cm/s. A análise dos resultados indica que o *Single Power Function Model* apresenta maior aderência aos dados experimentais considerados, sugerindo melhor capacidade de representação da relação entre condutividade hidráulica e índice de vazios no contexto analisado.

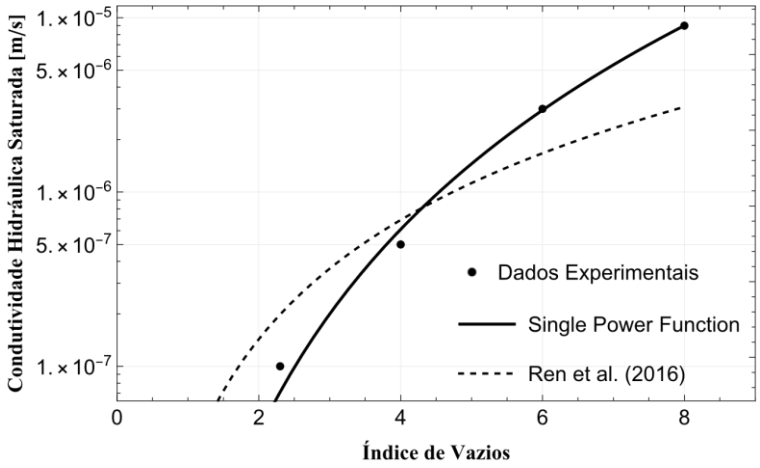


Figura 4.18 - Comparativo entre os modelos constitutivos para condutividade hidráulica saturada como função do índice de vazios.

- **Índice de Vazios como Função da Tensão Efetiva**

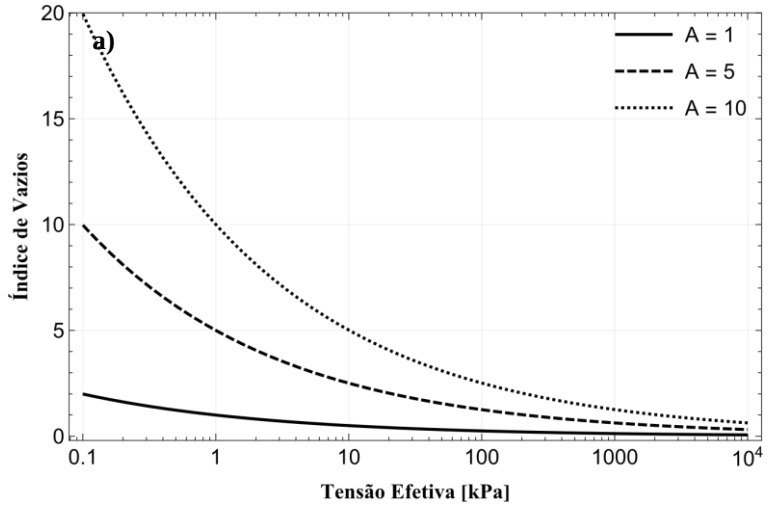
O comportamento do índice de vazios em função da tensão efetiva foi investigado por meio do modelo constitutivo *Extended Power Function Model* (Eq. 2.11), proposto por Liu & Znidarcic (1991). Esse modelo é amplamente utilizado para descrever a compressibilidade de materiais altamente deformáveis, estabelecendo uma relação não linear entre o índice de vazios (e) e a tensão efetiva (σ'). Na sequência, são apresentados os resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, visando compreender sua influência na resposta mecânica do material.

A Figura 4.19 apresenta as curvas de adensamento obtidas a partir da implementação do modelo *Extended Power Function Model*. Na Figura 4.19.a, é realizada a análise de

sensibilidade do parâmetro *A*, mantendo constantes os parâmetros *B* = -0,3 e *Z* = 0 kPa. Verifica-se que o aumento de *A* resulta em um incremento significativo do índice de vazios em baixos níveis de tensão efetiva, indicando maior compressibilidade inicial do material. À medida que a tensão efetiva aumenta, as curvas convergem, sugerindo redução da influência desse parâmetro em regimes de maior confinamento.

Na Figura 4.19.b, é apresentada a análise de sensibilidade do parâmetro B, mantendo constantes os demais parâmetros em *A* = 5 e *Z* = 0 kPa. Observa-se que, em baixas tensões efetivas ($\sigma' < 1$ kPa), valores de *B* próximos de zero resultam em menores índices de vazios, indicando menor compressibilidade inicial. Para $\sigma' = 1$ kPa, o índice de vazios torna-se independente de *B*, caracterizando um ponto de transição no comportamento do modelo. Para tensões efetivas superiores a 1 kPa, valores mais afastados de zero para *B* conduzem a menores índices de vazios, refletindo maior rigidez do material sob carregamento.

Observa-se ainda, na Figura 4.19.c, que a influência do parâmetro Z é mais pronunciada nas fases iniciais do processo de adensamento, especialmente em baixos níveis de tensão efetiva, indicando seu papel relevante na caracterização da compressibilidade inicial do material. À medida que a tensão efetiva aumenta, a diferença entre as curvas tende a diminuir, evidenciando uma redução da sensibilidade do modelo a esse parâmetro em regimes de maior confinamento. Esse comportamento sugere que o parâmetro Z está diretamente associado à estrutura inicial do material e à sua resposta em estágios iniciais de carregamento, tornando-se menos determinante à medida que o material se aproxima de estados mais densificados.



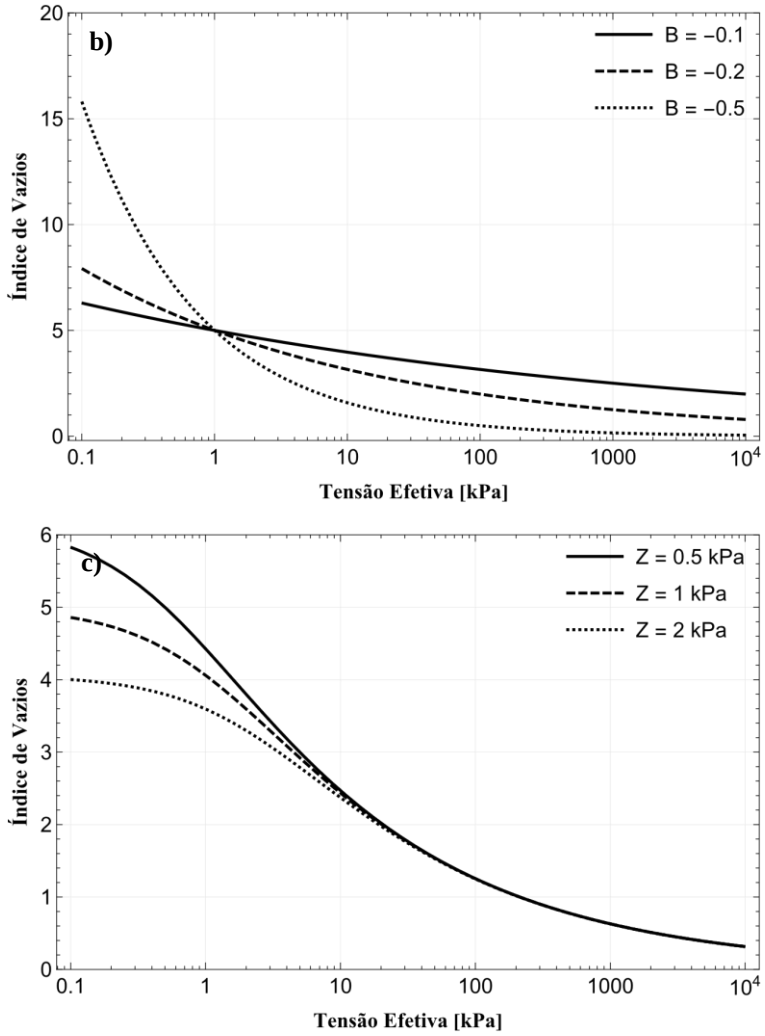


Figura 4.19 - *Extended Power Function Model*: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro Z.

Adicionalmente, foi conduzida uma análise comparativa entre o modelo constitutivo *Extended Power Function Model* e o *Weibull Function Model* (Weibull, 1951), conforme apresentado na Eq. 2.12. Os dois modelos foram calibrados com base em dados experimentais provenientes de ensaios laboratoriais (Amostra 1), sendo os resultados apresentados na Figura 4.20. Verifica-se que ambos os modelos demonstram elevada capacidade de ajuste aos dados experimentais, indicando sua adequação para representar a relação entre índice de vazios e tensão efetiva. Os parâmetros de calibração adotados para o *Extended Power Function Model* foram A = 55,5323, B = -0,999539 e Z = 64,8346 kPa, enquanto o *Weibull Function Model* foi ajustado com os parâmetros A = 0,33, B = -0,54, C = 0,0217005 e F = 1,05298, refletindo a flexibilidade adicional deste último em função do maior número de parâmetros.

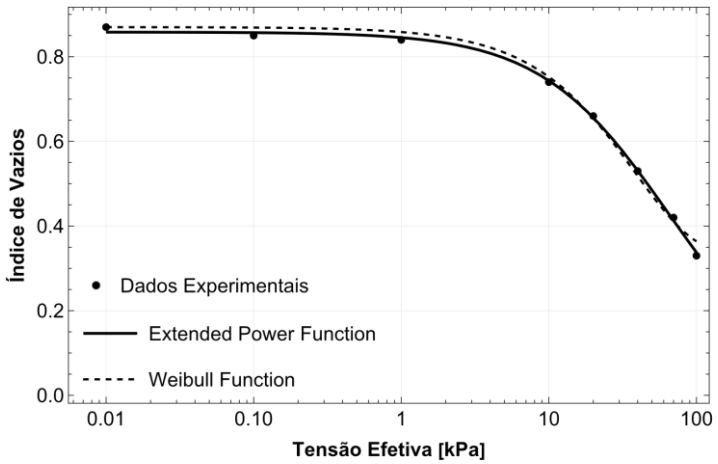


Figura 4.20 - Comparativo entre os modelos constitutivos para índice de vazios como função da tensão efetiva.

Um aspecto adicional de interesse foi a análise da forma inversa do modelo constitutivo *Extended Power Function Model*, na qual a tensão efetiva é expressa como função do índice de vazios (Eq. 2.10). A implementação dessa relação inversa evidenciou que o modelo mantém sua capacidade de ajuste aos dados experimentais, tanto na formulação direta ($e = f(\sigma')$) quanto na inversa ($\sigma' = f(e)$), conforme apresentado na Figura 4.21. Esse resultado indica consistência matemática e robustez do modelo constitutivo, uma vez que a inversibilidade da função não compromete a qualidade do ajuste. Os parâmetros calibrados para essa formulação foram A = 54,5943, B = -1 e Z = 63,2237 kPa.

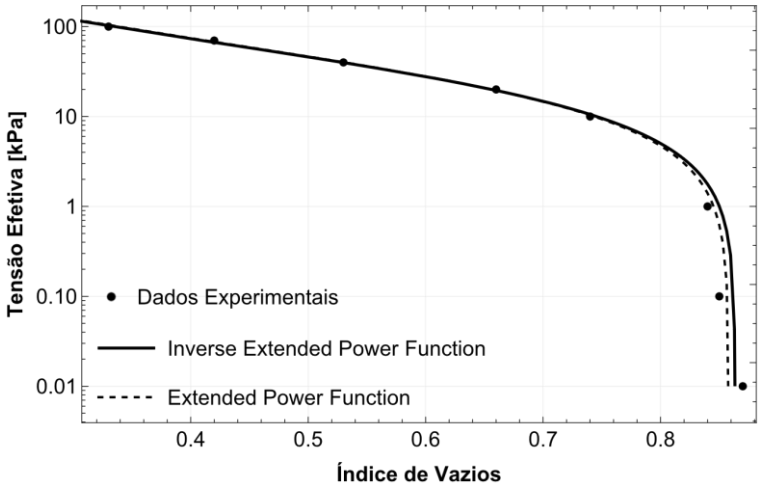


Figura 4.21 - Comparação entre a função normal e inversa do modelo constitutivo *Extended Power Function Model*.

4.4.1.2. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO GRAU DE CONSOLIDAÇÃO MÉDIO

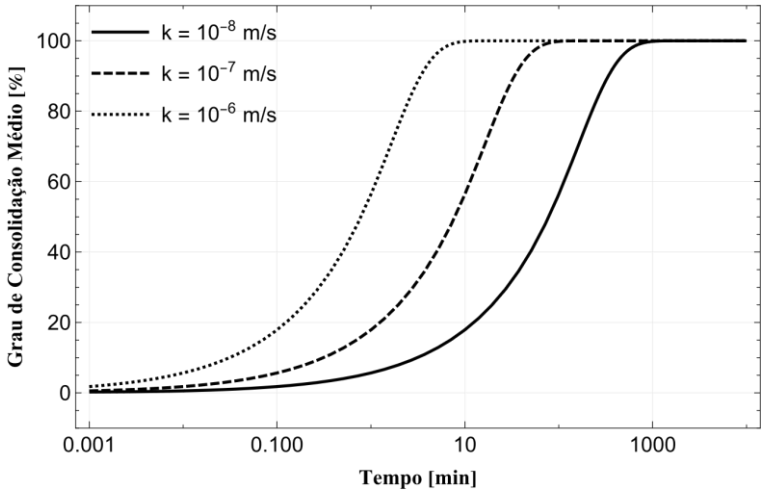
Foram conduzidas análises de sensibilidade dos parâmetros associados à equação de adensamento em regime de grandes deformações proposta por Gibson *et al.* (1967), com o objetivo de avaliar a influência de cada parâmetro na evolução do grau de consolidação médio. A Figura 4.22 apresenta os resultados dessas análises paramétricas. Na Figura 4.22.a, é analisada a influência da condutividade hidráulica (k), mantendo constantes os parâmetros e_0 = 2,159, a_v = 0,0254 kPa^{-1} e h_0 = 0,03482 m, correspondentes aos valores experimentais obtidos por meio dos ensaios HCT para a Amostra 1. Observa-se que o aumento de k acelera o processo de dissipação de poropressões, resultando em uma evolução mais rápida do grau de consolidação médio até sua estabilização em 100%, em concordância com a teoria clássica do adensamento.

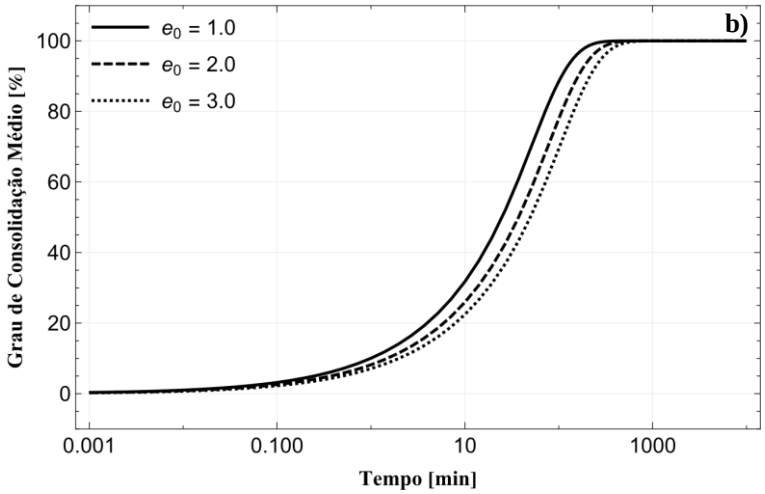
Na Figura 4.22.b, é apresentada a análise de sensibilidade do índice de vazios inicial (e_0), mantendo constantes os parâmetros k = 1,991x10^{-8} m/s, a_v = 0,0254 kPa^{-1} e h_0 = 0,03482 m. Verifica-se que menores valores de e_0 estão associados a uma consolidação ligeiramente mais rápida, uma vez que materiais inicialmente mais densos apresentam menor volume de vazios a ser reduzido durante o processo. No entanto, a influência desse parâmetro mostrou-se pouco significativa no comportamento global do grau de consolidação médio, indicando menor sensibilidade relativa em comparação com outros parâmetros.

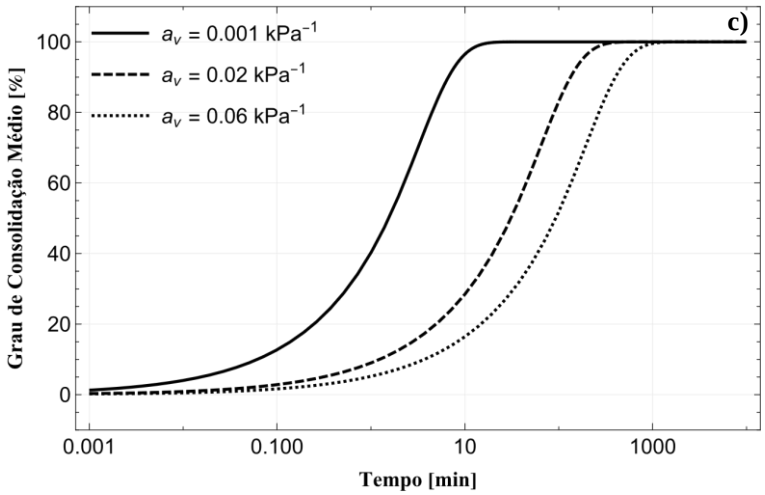
Na Figura 4.22.c, é apresentada a análise de sensibilidade do coeficiente de compressibilidade (a_v), mantendo constantes os parâmetros k = 1,991x10^{-8} m/s, e_0 = 2,159 e h_0 = 0,03482 m. Observa-se que menores valores de a_v, que indicam menor deformabilidade volumétrica do material sob incremento de tensão efetiva, resultam em uma consolidação mais rápida. Isso ocorre porque a magnitude das deformações necessárias para atingir o estado final é reduzida, acelerando o processo de adensamento.

Por fim, a Figura 4.22.d apresenta a análise de sensibilidade da espessura inicial da camada de sedimento (h_0), mantendo constantes os parâmetros k = 1,991x10^{-8} m/s, e_0 = 2,159 e a_v = 0,0254 kPa^{-1}. Verifica-se que menores valores de h_0 resultam em tempos de consolidação reduzidos, uma vez que o caminho de drenagem é encurtado, favorecendo a dissipação mais rápida das poropressões. Esse comportamento é consistente com a teoria do adensamento, na qual o tempo característico do processo está diretamente relacionado ao quadrado do comprimento de drenagem.

a)


k = 10^-8 m/s
k = 10^-7 m/s
k = 10^-6 m/s
Grau de Consolidação Médio [%]
Tempo [min]
0.001
0.100
10
1000
0
20
40
60
80
100


b)
e0 = 1.0
e0 = 2.0
e0 = 3.0
Grau de Consolidação Médio [%]
Tempo [min]
0.001
0.100
10
1000
0
20
40
60
80
100


c)
av = 0.001 kPa^-1
av = 0.02 kPa^-1
av = 0.06 kPa^-1
Grau de Consolidação Médio [%]
Tempo [min]
0.001
0.100
10
1000
0
20
40
60
80
100

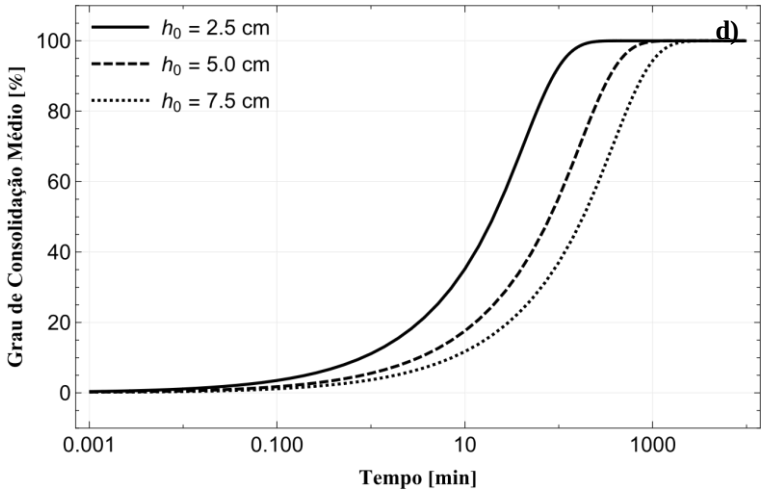


Figura 4.22 - Grau de consolidação médio em função do tempo: a) Análise de sensibilidade do parâmetro k; b) Análise de sensibilidade do parâmetro e_0; c) Análise de sensibilidade do parâmetro a_v; d) Análise de sensibilidade do parâmetro h_0.

Os resultados das análises paramétricas evidenciam que os parâmetros investigados exercem influência consistente sobre o comportamento do adensamento em regime de grandes deformações, em concordância com os fundamentos teóricos da mecânica dos solos. A coerência observada entre os resultados numéricos e os princípios físicos do fenômeno reforça a adequação das formulações adotadas, bem como a robustez dos modelos constitutivos e da equação governante implementada.

4.4.1.3. RETROANÁLISE DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES NA SOLUÇÃO ANALÍTICA

Foi conduzida uma retroanálise dos modelos constitutivos adotados, utilizando dados experimentais provenientes de ensaios HCT, bem como dados reportados na literatura, incluindo os estudos de Abu-Hejleh *et al*. (1996) e Pinho (2018). A retroanálise consistiu na avaliação integrada de relações hidromecânicas fundamentais, tais como a dependência da condutividade hidráulica saturada em relação ao índice de vazios e ao tempo ($k = f(e,t)$), a evolução da tensão efetiva em função do índice de vazios e do tempo ($\sigma' = f(e,t)$), e a variação espaço-temporal do índice de vazios ($e = f(t,z)$). Essa abordagem permitiu investigar a capacidade preditiva dos modelos em diferentes condições e materiais.

Os resultados apresentados incluem a análise dos dados experimentais reportados por Pinho (2018), referentes a um material classificado como silte argiloso, bem como os dados obtidos por Abu-Hejleh *et al.* (1996), associados a ensaios de adensamento em regime de

grandes deformações em argilas fosfáticas. Adicionalmente, foram incorporados os dados experimentais produzidos na presente pesquisa, conforme descrito nas Tabelas 4.4 e 4.5. A Tabela 4.6 sintetiza os principais dados de entrada utilizados na modelagem, enquanto a Tabela 4.7 apresenta os parâmetros constitutivos calibrados empregados na implementação da equação governante de adensamento.

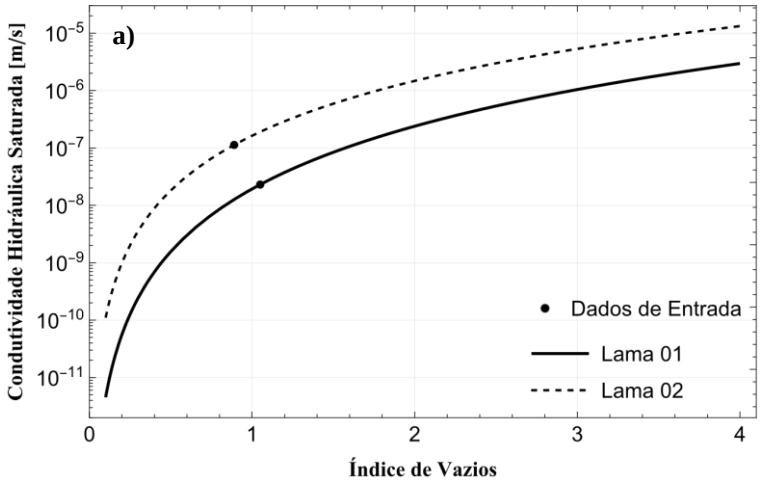
Tabela 4.6 - Dados de entrada utilizados na modelagem referente aos resultados experimentais obtidos na presente pesquisa e na literatura por Abu-Hejleh *et al.* (1996) e Pinho (2018).

Dados de entrada	**Abu-Hejleh *et al.* (1996)**				**Pinho (2018)**		**Presente pesquisa**		
	A-1	**A-9**	**C-1**	**S-1**	**Lama 01**	**Lama 02**	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**
Peso específico da água [N/m³]	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Peso específico dos sólidos [N/m³]	25,51	27,66	28,65	26,59	38,01	38,01	27,97	27,97	27,97
Altura inicial da amostra [m]	0,046	0,034	0,051	0,049	0,035	0,038	0,110	0,110	0,110
Índice de vazios inicial	25,93	18,39	13,07	32,50	2,08	2,63	2,16	2,71	3,17
Tensão efetiva do cabeçote/topo [kPa]	0,10	0,10	0,39	0,10	0,00	0,00	0,77	0,77	0,77
Coeficiente de permeabilidade [m/s]	$0{,}798E^{-09}$	$0{,}648E^{-09}$	$0{,}169E^{-08}$	$0{,}203E^{-09}$	$2{,}300E^{-08}$	$1{,}610\ E^{-08}$	$1{,}991E^{-08}$	$1{,}859E^{-08}$	$1{,}692E^{-08}$
Altura final da amostra [m]	0,0230	0,0275	0,0307	0,0302	0,030	0,029	0,066	0,058	0,050
Tensão efetiva final na base [kPa]	2,29	2,82	2,94	0,47	3,02	3,12	-29,06	-28,30	-31,10
Índice de vazios final	4,68	4,17	4,07	3,11	1,05	1,10	0,90	0,95	0,90
Tensão efetiva [kPa]	50,00	50,00	29,20	99,47	86,06	86,04	49,80	49,80	49,80

Tabela 4.7 - Dados de saída utilizados na modelagem obtidos experimentalmente e na literatura por Abu-Hejleh *et al.* (1996) e Pinho (2018).

Parâmetros de saída	**Abu-Hejleh *et al.* (1996)**				**Pinho (2018)**		**Presente pesquisa**		
	A-1	**A-9**	**C-1**	**S-1**	**Lama 01**	**Lama 02**	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**
A	11,50	12,74	7,75	13,49	1,60	1,76	2,54	2,71	3,17
B	-0,230	-0,285	-0,191	-0,319	-0,095	-0,105	-0,269	-0,274	-0,327
C (m/s)	$0{,}625E^{-11}$	$0{,}361E^{-11}$	$0{,}429E^{-11}$	$0{,}384E^{-11}$	$1{,}930E^{-08}$	$1{,}120E^{-08}$	$7{,}467E^{-09}$	$4{,}835E^{-09}$	$4{,}762E^{-09}$
D	3,14	3,64	4,26	3,50	3,63	3,80	5,68	5,77	4,57
Z (kPa)	0,029	0,277	0,065	0,064	0,066	0,022	1,696	0,897	0,938

A Figura 4.23 apresenta os resultados da retroanálise utilizando o modelo *Single Power Function Model*, considerando dados experimentais provenientes de Pinho (2018) (Figura 4.23.a), Abu-Hejleh *et al.* (1996) (Figura 4.23.b) e da presente pesquisa (Figura 4.23.c). De maneira geral, os resultados mostram coerência com as tendências previamente observadas na análise de sensibilidade apresentada no item 4.4.1.1. Destaca-se a baixa condutividade hidráulica dos materiais analisados, característica típica de solos finos, bem como a forte dependência da permeabilidade em relação ao índice de vazios, refletindo o acoplamento entre estrutura do sedimento e fluxo de água.



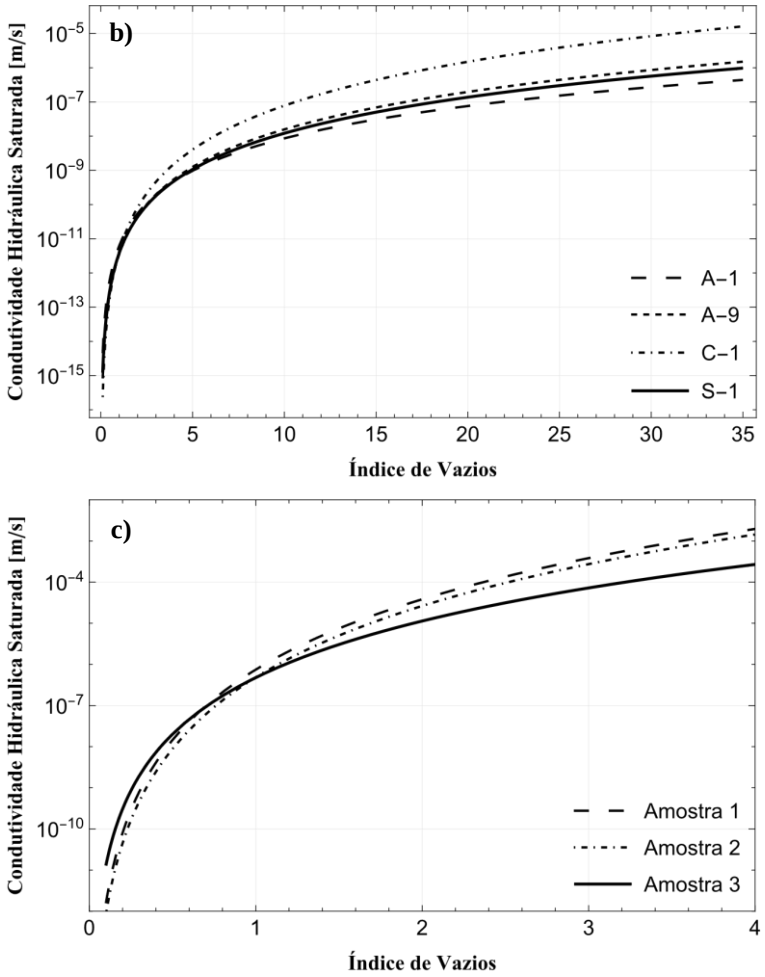


Figura 4.23 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a condutividade hidráulica saturada em função do índice de vazios: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa.

A Figura 4.24 apresenta os resultados da retroanálise utilizando o modelo *Extended Power Function Model* em sua forma inversa ($\sigma' = f(e)$), considerando os dados experimentais de Pinho (2018), Abu-Hejleh *et al.* (1996) e da presente pesquisa. Os resultados evidenciam a elevada compressibilidade dos materiais analisados, característica típica de solos finos e altamente deformáveis, incluindo siltes argilosos, argilas fosfáticas e argilas de baixa plasticidade. Observa-se um comportamento consistente entre os diferentes conjuntos de dados, com redução da tensão efetiva à medida que o índice de vazios aumenta, bem como uma tendência de estabilização do índice de vazios em estados finais, associada à diminuição da variação da tensão efetiva aplicada. Esse comportamento está alinhado com a teoria do adensamento em grandes deformações e com a resposta não linear de materiais compressíveis.

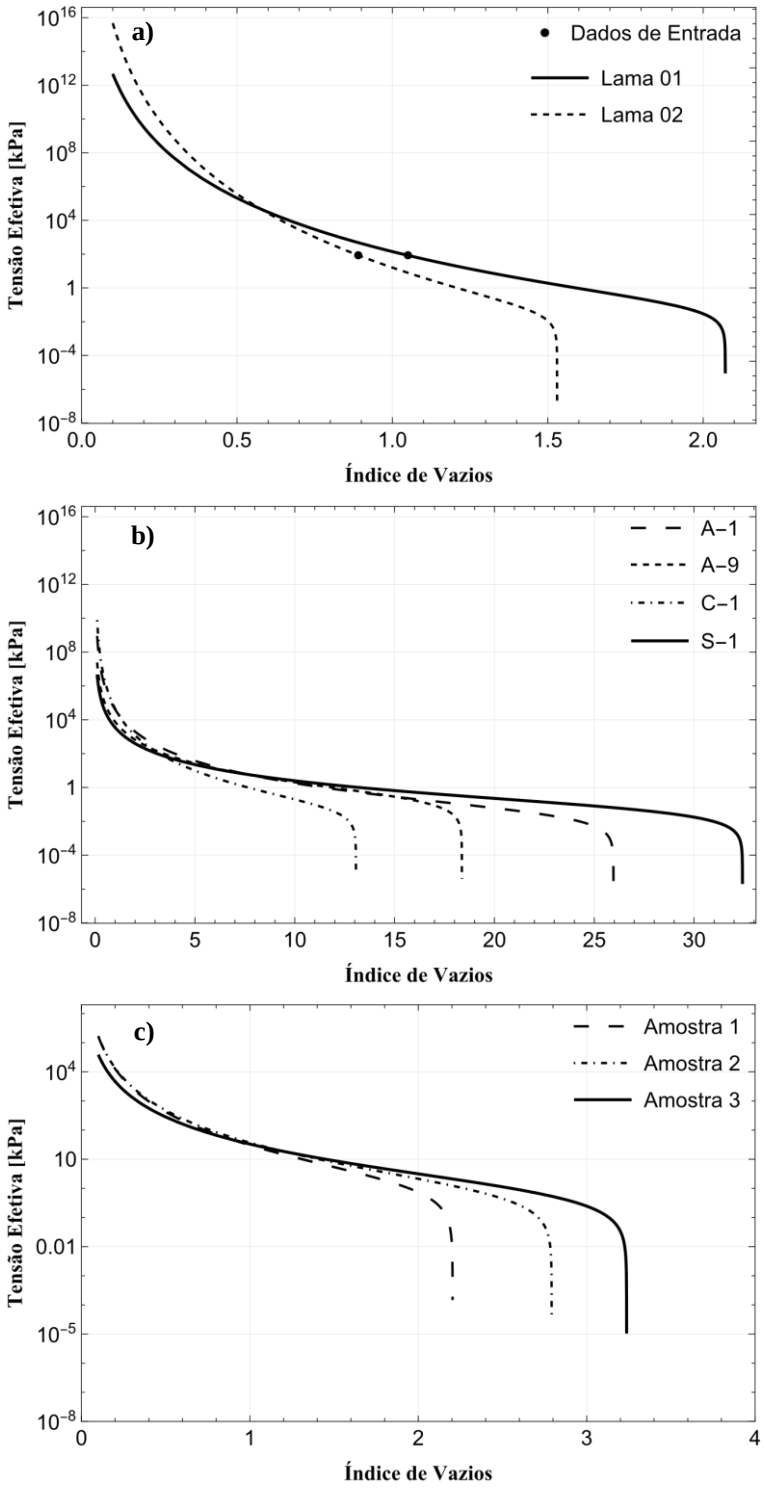
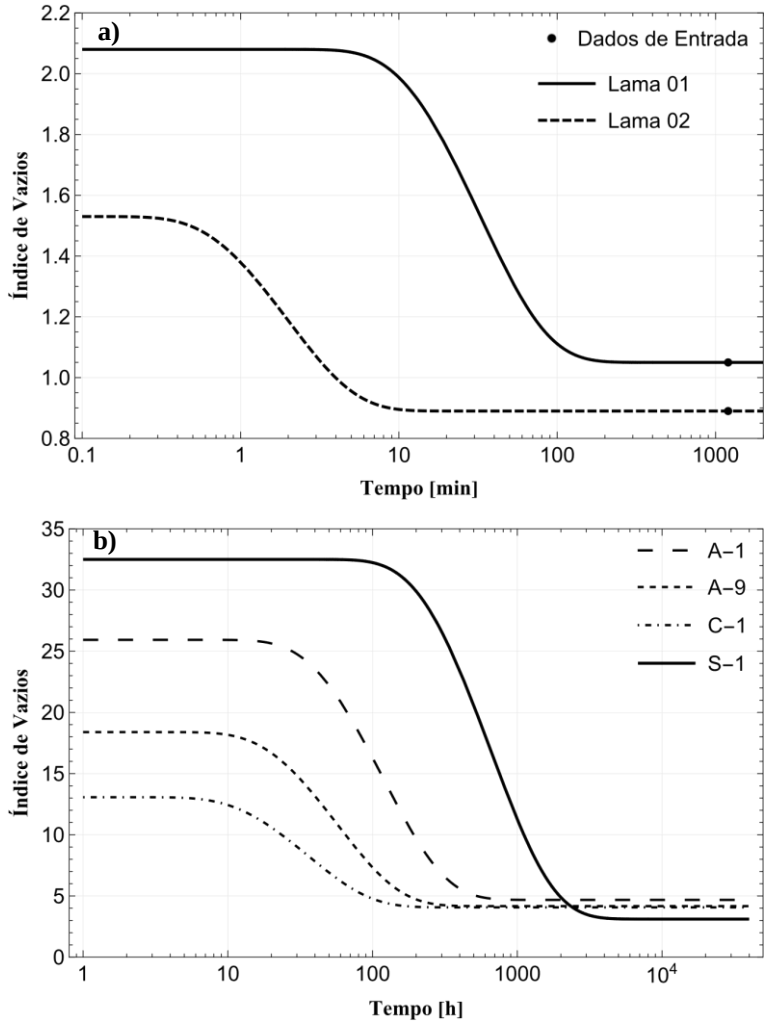


Figura 4.24 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a tensão efetiva em função do índice de vazios: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa.

A Figura 4.25 apresenta os resultados da retroanálise da evolução temporal do índice de vazios ($e = f(t)$), considerando dados experimentais de diferentes fontes. Verifica-se que, para as amostras analisadas por Pinho (2018), ocorre uma rápida redução do índice de vazios nos

estágios iniciais do processo, característica típica de uma fase primária de adensamento mais pronunciada. Em contrapartida, para os dados de Abu-Hejleh *et al.* (1996) e da presente pesquisa, a dissipação das poropressões e a consequente redução do índice de vazios ocorrem de forma mais gradual, ao longo de períodos mais extensos, com tendência à estabilização em tempos da ordem de 2000 horas e 100 horas, respectivamente. Esse comportamento evidencia diferenças na permeabilidade e na compressibilidade dos materiais analisados.



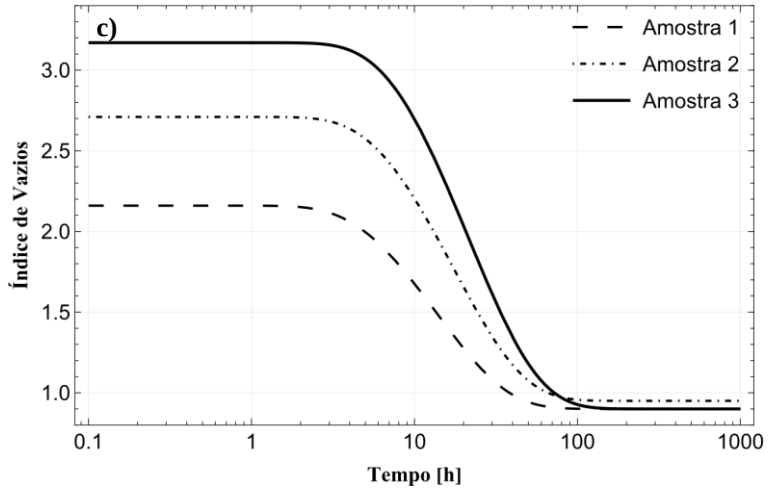
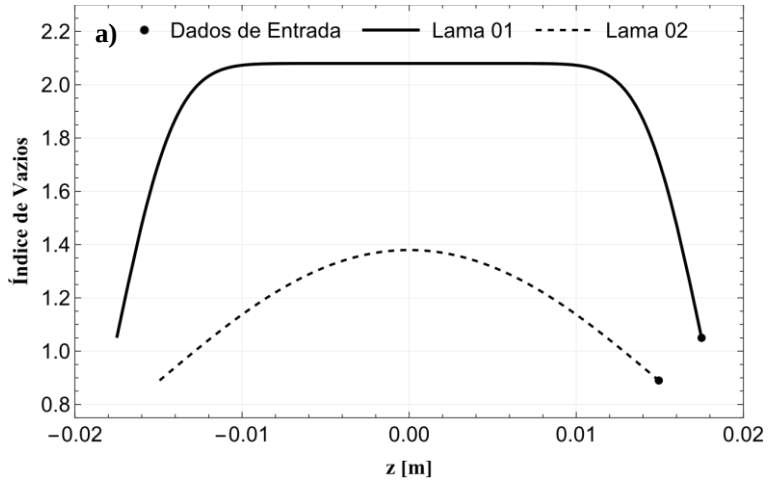


Figura 4.25 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para o índice de vazios em função do tempo: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa.

A Figura 4.26 apresenta a distribuição do índice de vazios ao longo da profundidade ($e = f(z)$), obtida por meio da retroanálise dos dados experimentais considerados. As simulações foram realizadas assumindo simetria da amostra em relação ao plano médio, resultando em perfis espelhados. Observa-se que todas as curvas apresentam formato típico de "sela", indicando maiores valores de índice de vazios nas regiões centrais e menores valores próximos às superfícies drenantes. Esse comportamento é característico de processos de adensamento em que a dissipação de poropressões ocorre a partir das superfícies de drenagem, gerando gradientes de deformação ao longo da profundidade.



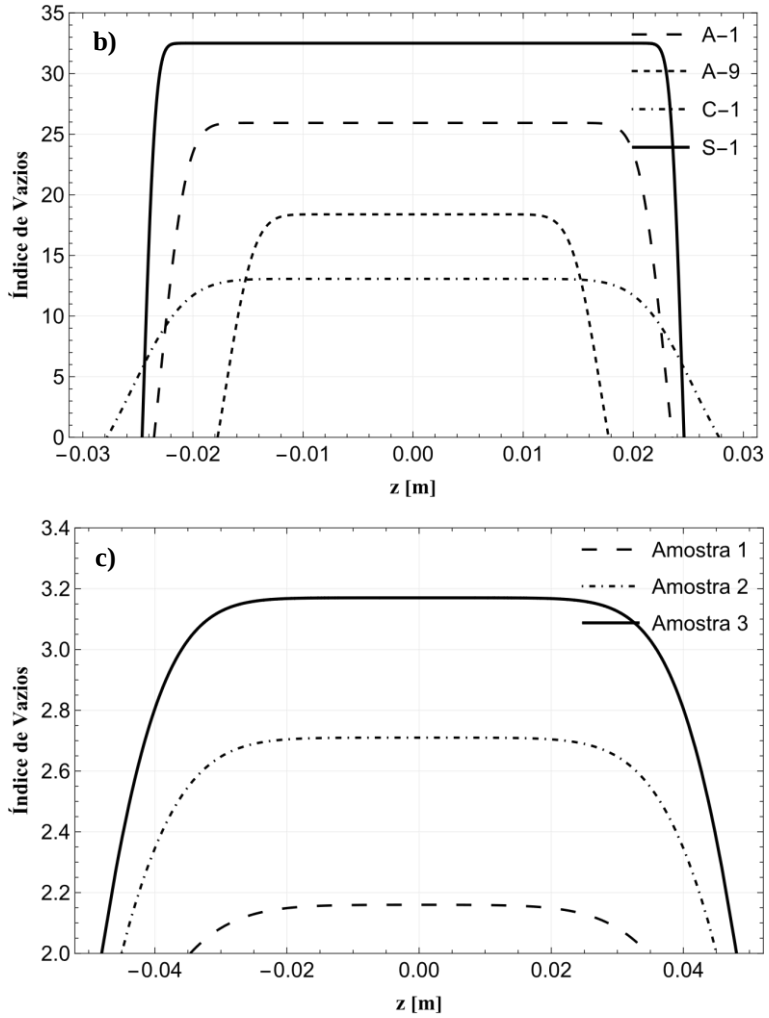


Figura 4.26 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para o índice de vazios em função da profundidade: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa.

A Figura 4.27 apresenta os resultados da retroanálise da evolução temporal da condutividade hidráulica saturada ($k = f(t)$), considerando a formulação acoplada do *Single Power Function Model*. Observa-se uma redução progressiva da condutividade hidráulica ao longo do tempo, associada à diminuição do índice de vazios durante o processo de adensamento. As curvas tendem à convergência, indicando estabilização do sistema em diferentes escalas de tempo: cerca de 100 minutos para os dados de Pinho (2018), 1500 horas para Abu-Hejleh *et al.* (1996) e 50 horas para a presente pesquisa. Esse comportamento reflete a forte dependência da permeabilidade em relação à estrutura do solo e à evolução do estado de tensões.

A Figura 4.28 apresenta os resultados da retroanálise da evolução da tensão efetiva ao longo do tempo ($\sigma' = f(t)$), utilizando a formulação acoplada do *Extended Power Function Model*. Verifica-se um bom nível de concordância entre os dados experimentais e as previsões numéricas, especialmente em regimes de baixa tensão efetiva. Esse resultado indica que o

modelo é capaz de capturar adequadamente o comportamento compressível dos materiais analisados, representando de forma consistente a evolução das tensões efetivas durante o processo de adensamento em grandes deformações.

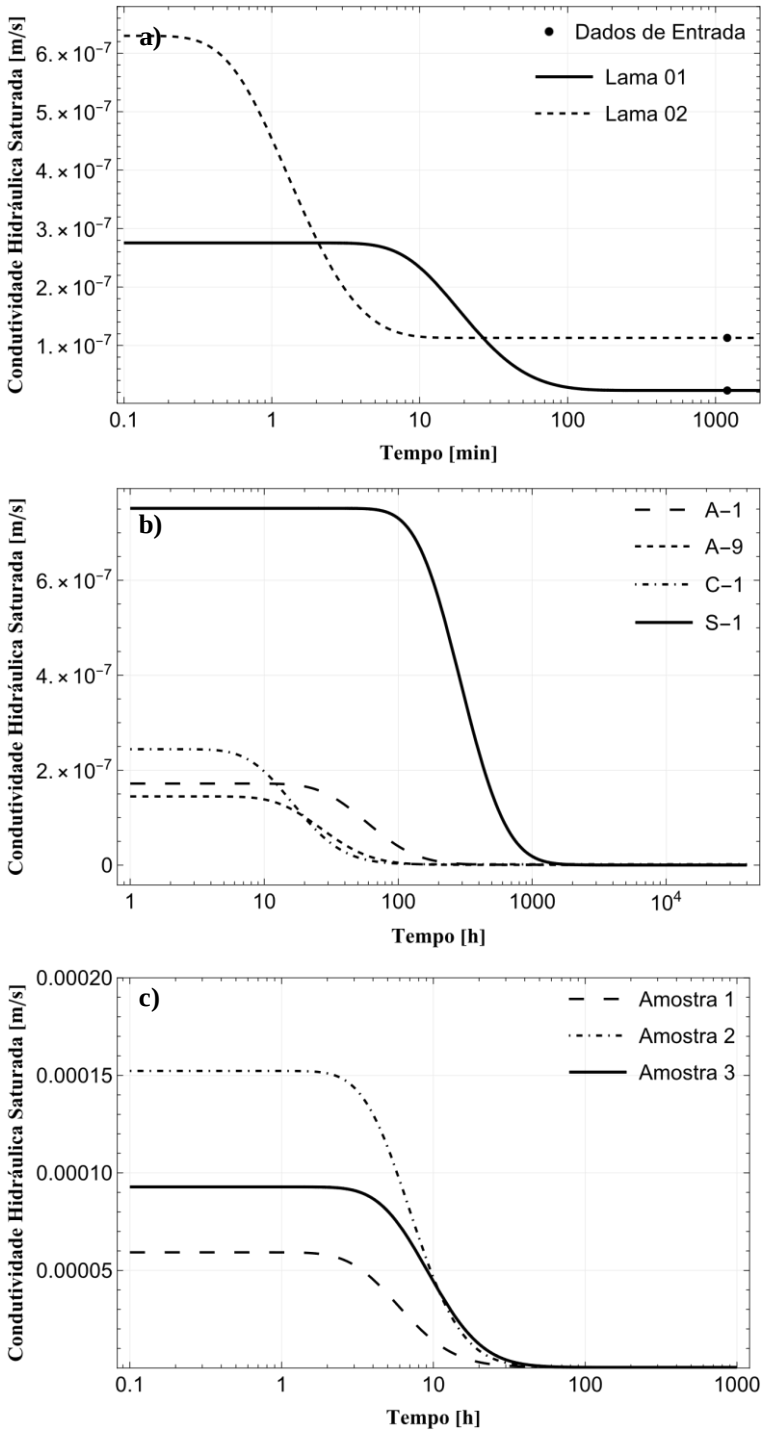


Figura 4.27 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a condutividade hidráulica saturada em função do tempo: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa.

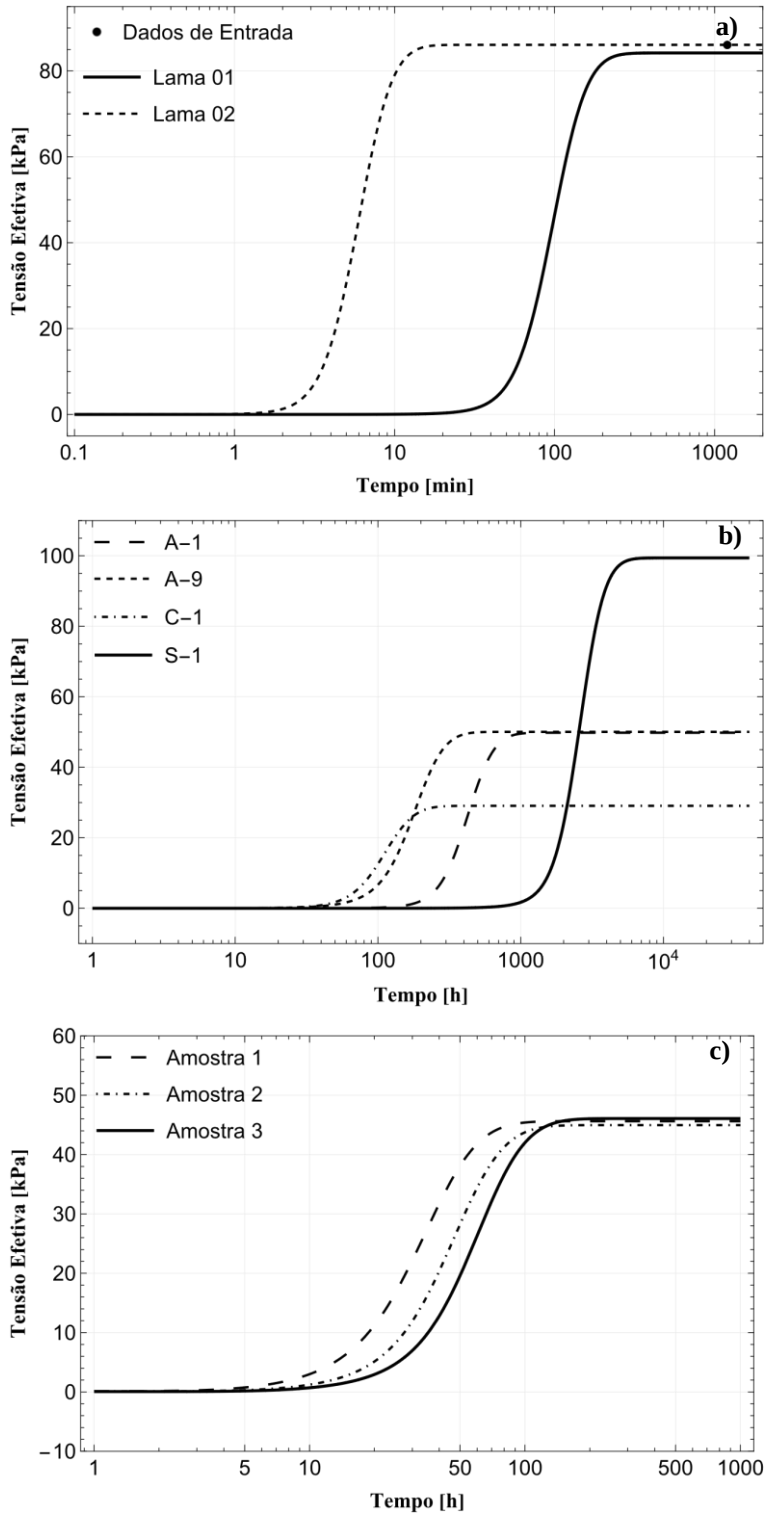


Figura 4.28 - Retroanálise com dados da literatura e experimentais para a tensão efetiva em função do tempo: a) Pinho (2018); b) Abu-Hejleh *et al.* (1996); c) Presente pesquisa.

4.4.2 - RESULTADOS DA SOLUÇÃO NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL

Na sequência, são apresentados os resultados provenientes da modelagem numérica implementada no *software COMSOL Multiphysics*®. As simulações foram conduzidas em um domínio bidimensional com simetria axial, discretizado por meio de elementos finitos triangulares com malha de alta resolução (refinamento extrafino), garantindo maior precisão numérica. As análises foram realizadas no plano médio da camada de silte argiloso ($z = L/2$), permitindo avaliar o comportamento representativo da região central do domínio, especialmente em condições de dupla drenagem.

Os resultados da modelagem numérica evidenciam um comportamento característico de dupla drenagem, no qual o processo de adensamento se inicia nas superfícies drenantes e progride gradualmente em direção ao centro da camada. Esse padrão é consistente com a teoria clássica do adensamento, mesmo quando estendida para o regime de grandes deformações, refletindo a dissipação progressiva das poropressões e a redistribuição das tensões efetivas ao longo do domínio.

4.4.2.1. RETROANÁLISE DE ENSAIO DE ADENSAMENTO DE GRANDES DEFORMAÇÕES NA SOLUÇÃO NUMÉRICA

Adicionalmente, foi conduzida uma retroanálise com base nos dados experimentais da presente pesquisa, avaliando a evolução temporal das variáveis fundamentais do processo de adensamento em grandes deformações, incluindo o índice de vazios (e), a condutividade hidráulica saturada (k) e a tensão efetiva (σ'). Os dados de entrada e os parâmetros calibrados utilizados na modelagem estão apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7, servindo como base para a validação das simulações numéricas.

A Figura 4.29 apresenta os resultados da retroanálise da evolução temporal do índice de vazios ($e = f(t)$) durante o ensaio HCT. As Figuras 4.29.a, 4.29.b e 4.29.c correspondem, respectivamente, às Amostras 1, 2 e 3 da presente pesquisa, permitindo a análise comparativa do comportamento de adensamento entre diferentes condições iniciais.

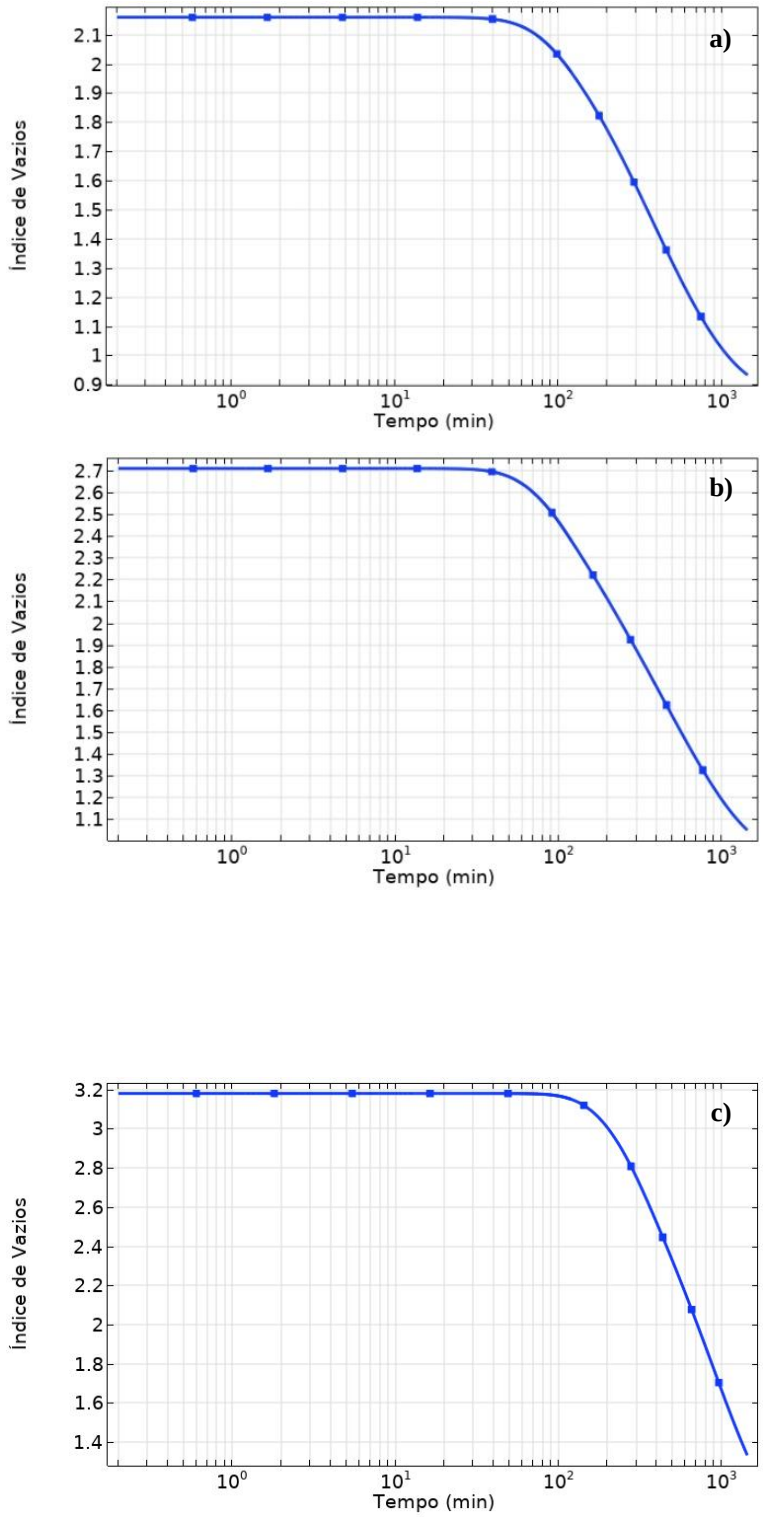


Figura 4.29 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para o índice de vazios em função do tempo: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.

A Figura 4.30 apresenta os resultados da retroanálise da evolução temporal da condutividade hidráulica saturada ($k = f(t)$) para as diferentes amostras analisadas. As Figuras

4.30.a, 4.30.b e 4.30.c correspondem às Amostras 1, 2 e 3, respectivamente, permitindo avaliar a influência do processo de adensamento na redução da permeabilidade ao longo do tempo.

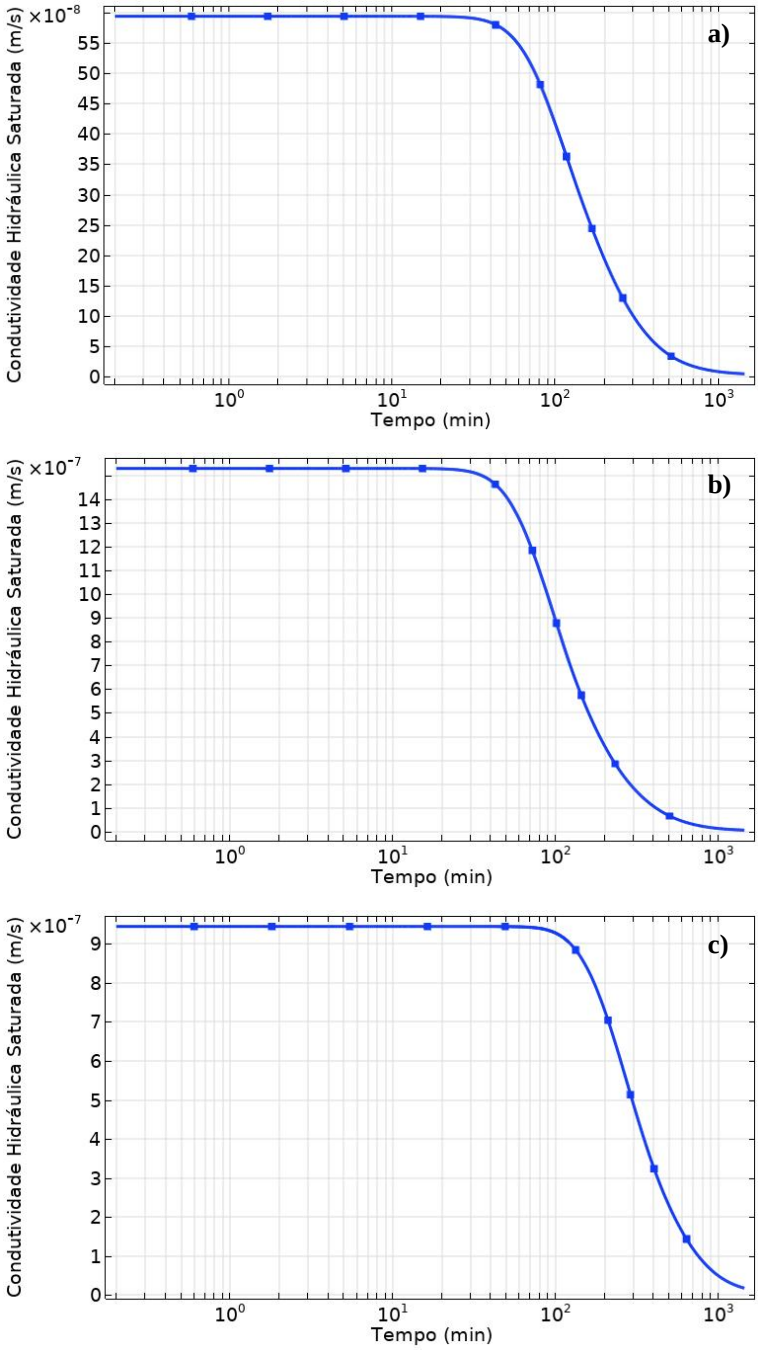


Figura 4.30 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para a condutividade hidráulica saturada em função do tempo: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.

A Figura 4.31 apresenta os resultados da retroanálise da evolução da tensão efetiva ao longo do tempo ($\sigma' = f(t)$). As Figuras 4.31.a, 4.31.b e 4.31.c correspondem às Amostras 1, 2 e

3, respectivamente, permitindo avaliar o desenvolvimento das tensões efetivas durante o processo de adensamento.

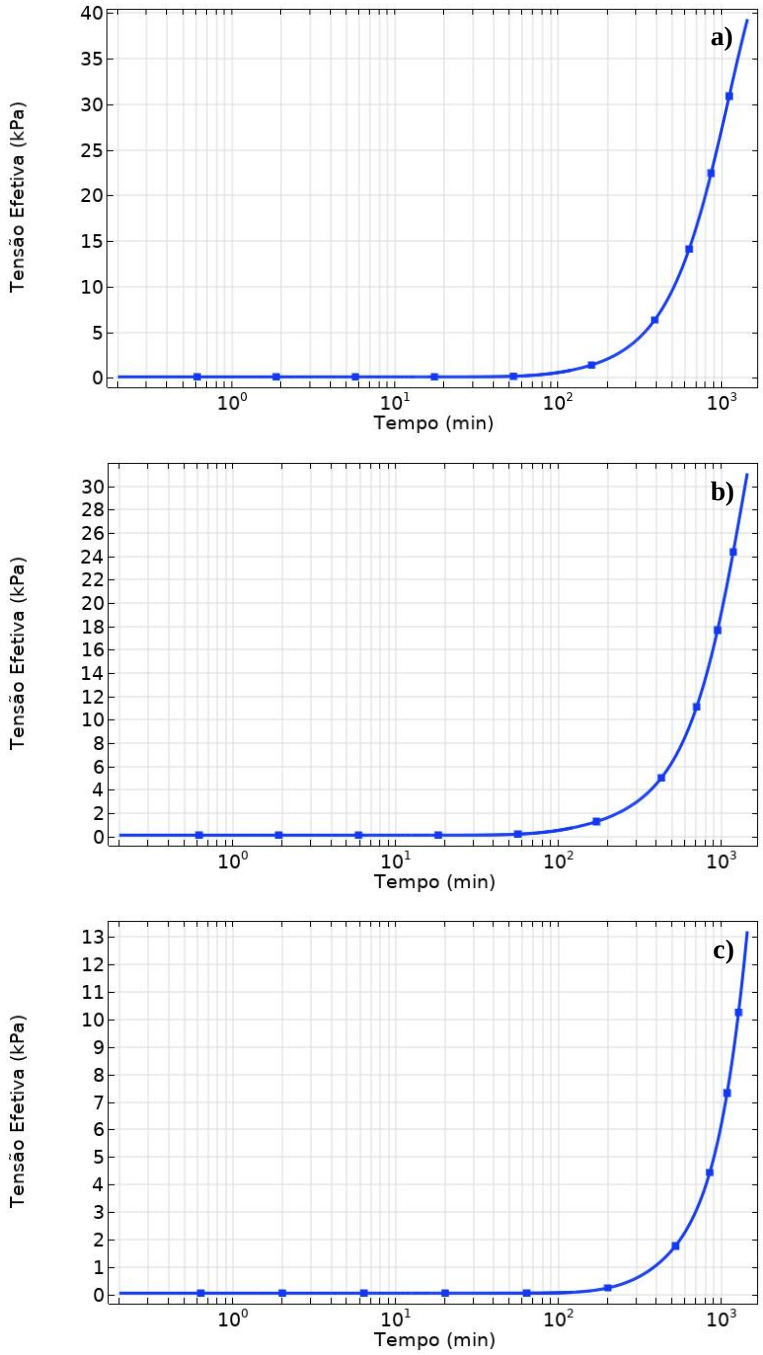


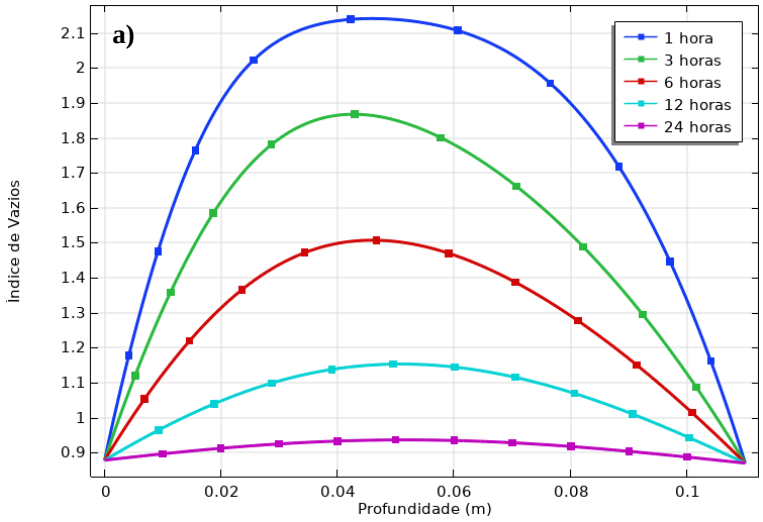
Figura 4.31 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para a tensão efetiva em função do tempo: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.

De maneira geral, a Amostra 1 apresenta uma transição gradual no comportamento hidromecânico a partir de aproximadamente 30 minutos de ensaio, com tendência à

estabilização após cerca de 16 horas. Observa-se uma redução significativa do índice de vazios e da condutividade hidráulica saturada, acompanhada por um aumento expressivo da tensão efetiva nesse intervalo. Esse comportamento é característico da fase primária do adensamento, na qual ocorre intensa dissipação de poropressões e rearranjo estrutural do material.

A Amostra 2 apresentou comportamento semelhante ao observado na Amostra 1, com evolução gradual das variáveis constitutivas no intervalo de aproximadamente 1 a 16 horas. Por outro lado, a Amostra 3 apresentou um atraso no início da fase mais intensa de adensamento, iniciando por volta de 2,5 horas e atingindo estabilização apenas após mais de 30 horas. Esse comportamento sugere diferenças nas propriedades hidráulicas e mecânicas entre as amostras, como menor permeabilidade ou maior compressibilidade na Amostra 3.

Adicionalmente, foi analisada a variação espacial do índice de vazios e da tensão efetiva ao longo da profundidade, considerando diferentes instantes de tempo até 24 horas após o início do processo de adensamento. A Figura 4.32 apresenta os perfis do índice de vazios ($e = f(z)$) para as Amostras 1, 2 e 3, permitindo avaliar a evolução dos gradientes de deformação ao longo da camada.



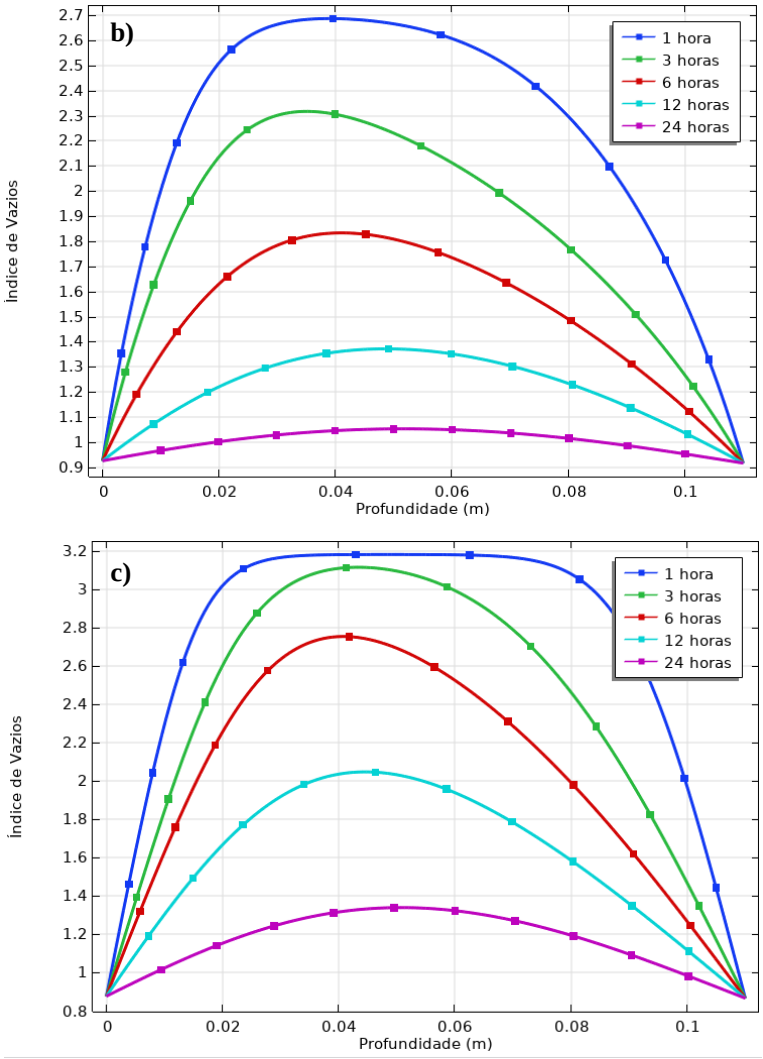


Figura 4.32 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para o índice de vazios em função da profundidade: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.

A Figura 4.33 apresenta os perfis de tensão efetiva ao longo da profundidade ($\sigma' = f(z)$) para as Amostras 1, 2 e 3, permitindo analisar a redistribuição das tensões ao longo da camada durante o processo de adensamento.

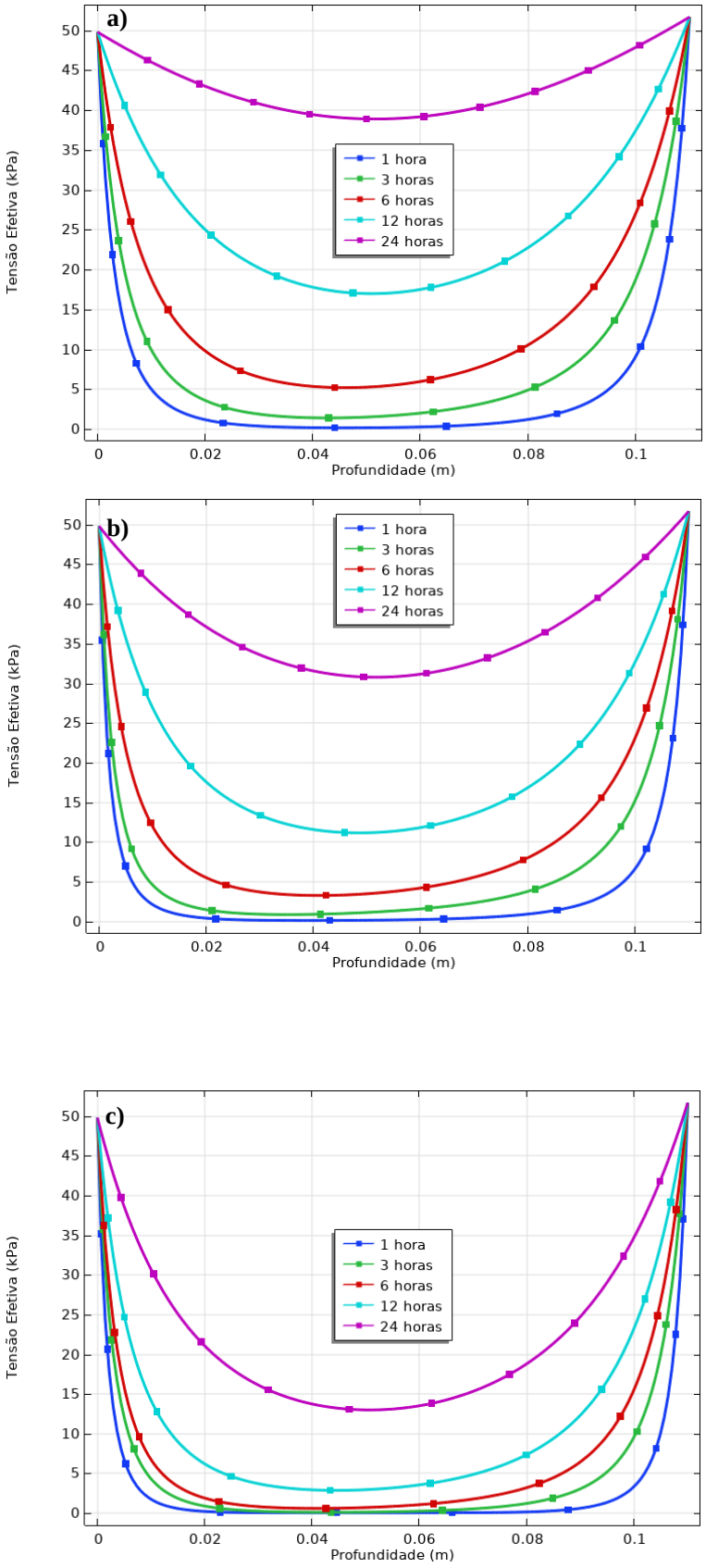


Figura 4.33 - Retroanálise dos dados experimentais da presente pesquisa com o *software COMSOL Multiphysics*® para a tensão efetiva em função da profundidade: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3.

O comportamento espacial do índice de vazios ao longo da camada, ilustrado na Figura 4.32, evidencia a evolução típica do adensamento sob condições de dupla drenagem. Inicialmente, observa-se a formação de um pico no centro da camada, onde o índice de vazios permanece próximo ao valor inicial devido à menor dissipação de poropressões nessa região. À medida que o tempo avança, esse pico é progressivamente reduzido, refletindo o avanço das frentes de drenagem a partir das superfícies, até que o índice de vazios converge para valores próximos ao estado final em toda a camada.

Por outro lado, os resultados apresentados na Figura 4.33 indicam um comportamento inverso para a distribuição da tensão efetiva. Nos estágios iniciais, a tensão aplicada concentra-se nas regiões próximas às superfícies drenantes, sendo gradualmente transmitida para o interior da amostra ao longo do tempo. Esse processo reflete a dissipação progressiva das poropressões e o consequente aumento da tensão efetiva. Contudo, mesmo após 24 horas de análise, a transferência completa da tensão para o centro da camada não é observada, evidenciando limitações na velocidade de dissipação em materiais de baixa permeabilidade.

Adicionalmente, foi conduzida uma análise da evolução espacial do índice de vazios ao longo da camada de sedimento, considerando diferentes instantes de tempo durante o processo de adensamento. As simulações foram realizadas no *software COMSOL Multiphysics*® para a Amostra 1, composta por uma argila de baixa plasticidade. A Figura 4.34 ilustra a evolução temporal da distribuição do índice de vazios, permitindo avaliar o avanço das frentes de consolidação ao longo da profundidade.

No instante inicial, o índice de vazios apresenta distribuição uniforme ao longo da camada (Figura 4.34.a). Após 30 minutos (Figura 4.34.b), observa-se variação ainda incipiente, indicando estágio inicial do processo. Entre 30 e 150 minutos (Figuras 4.34.b a 4.34.e), ocorre o avanço das frentes de drenagem a partir das superfícies, caracterizando o regime de dupla drenagem, no qual as regiões próximas às extremidades atingem mais rapidamente o índice de vazios final, enquanto o centro mantém valores elevados. Progressivamente, essa frente avança em direção ao centro. Aos 180 minutos (Figura 4.34.f), a distribuição torna-se quase uniforme, e, aos 195 minutos (Figura 4.34.g), o sistema atinge condição próxima ao estado final, confirmado após 24 horas (Figura 4.34.h).

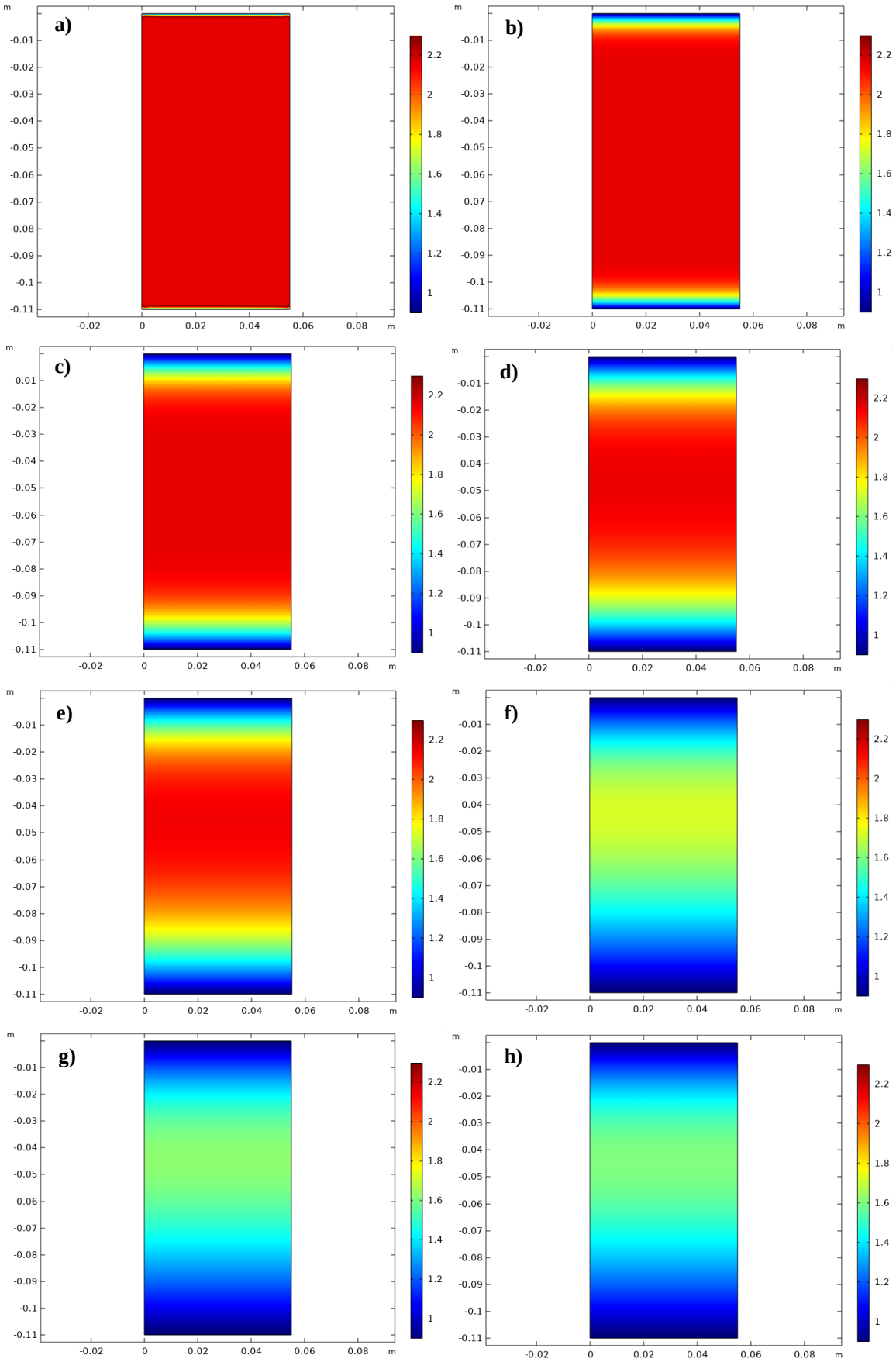


Figura 4.34 - Distribuição do índice de vazios para Amostra 1: a) Inicial; b) 30 minutos; c) 60 minutos; d) 120 minutos; e) 150 minutos; f) 180 minutos; g) 195 minutos; h) 24 horas.

A Figura 4.35 apresenta a evolução temporal do índice de vazios em diferentes posições ao longo da profundidade (25%, 50% e 75%), permitindo analisar a heterogeneidade do processo de adensamento no interior da amostra. Observa-se que, embora as regiões próximas às superfícies apresentem velocidades de consolidação semelhantes, existem diferenças nos caminhos de drenagem ao longo da profundidade. A redução do índice de vazios ocorre inicialmente nas regiões mais próximas às superfícies drenantes, sendo retardada no centro da camada. O estado final é atingido simultaneamente nas três profundidades apenas após aproximadamente 1000 minutos, evidenciando a influência da distância às superfícies drenantes.

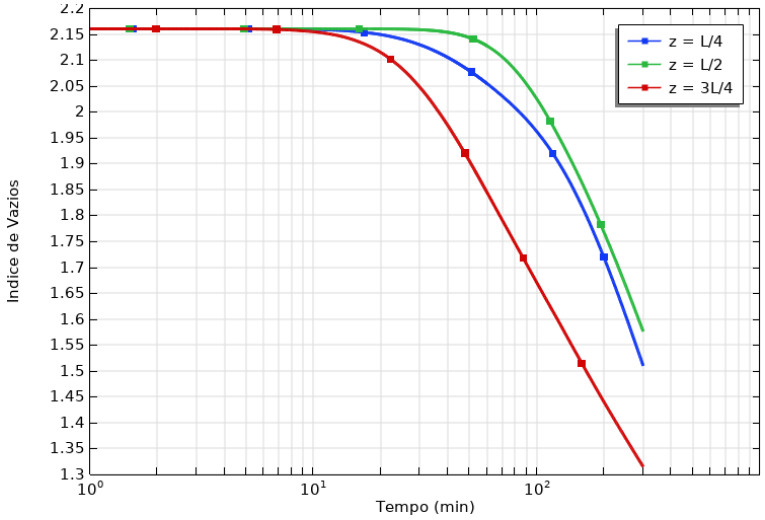


Figura 4.35 – Distribuição do índice de vazios ao longo do tempo em diferentes posições de profundidade na camada da amostra 1.

A evolução temporal da condutividade hidráulica saturada, avaliada nas profundidades relativas de 25%, 50% e 75% da espessura da camada (Figura 4.36), foi modelada por meio do *Single Power Function Model* de Somogyi (1979), amplamente empregado na descrição da dependência entre permeabilidade e índice de vazios em solos finos. Os resultados indicam que a redução da condutividade hidráulica está diretamente associada à diminuição progressiva da porosidade, refletindo a reorganização estrutural do esqueleto do solo durante o adensamento. Esse processo ocorre inicialmente nas zonas de drenagem (superfícies superior e inferior), caracterizando um regime de dupla drenagem, e posteriormente se propaga para o interior da camada. A convergência tardia das curvas (após cerca de 1000 minutos) evidencia o caráter não linear e dependente do estado das propriedades hidráulicas, em consonância com formulações

constitutivas que incorporam a variabilidade do coeficiente de permeabilidade com o índice de vazios.

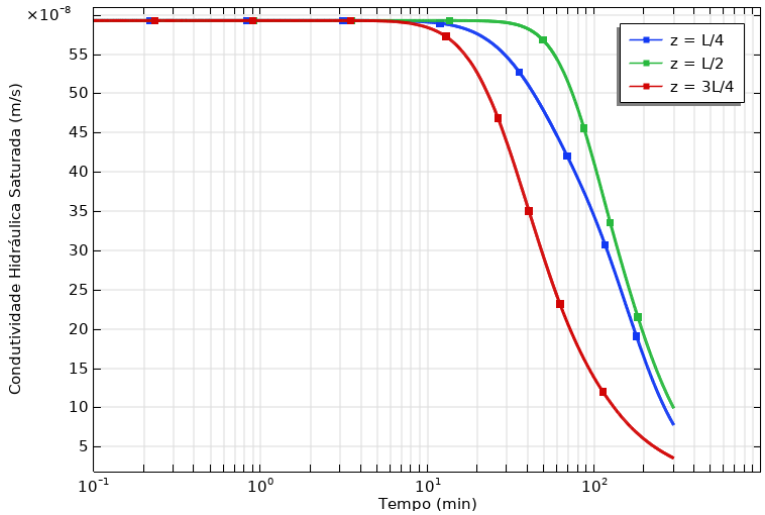


Figura 4.36 - Variação da permeabilidade ao longo do tempo aplicando o *Single Power Function Model*, em diferentes posições de profundidade na camada da amostra 1.

A evolução da tensão efetiva ao longo do tempo, analisada nas profundidades relativas de 25%, 50% e 75% da camada (Figura 4.37), foi descrita com base no *Extended Power Function Model* proposto por Liu & Znidarcic (1991), o qual incorpora a relação não linear entre tensão efetiva e índice de vazios em condições de grandes deformações. Os resultados evidenciam a transferência gradual das tensões totais para o esqueleto sólido do solo, à medida que ocorre a dissipação das pressões neutras. O início mais precoce do aumento da tensão efetiva nas regiões próximas às superfícies drenantes (75% da profundidade) confirma a influência do caminho de drenagem na cinética do adensamento. Além disso, a convergência progressiva das curvas ao longo do tempo indica uma redistribuição contínua das tensões internas, característica de modelos que consideram acoplamento hidromecânico e dependência das propriedades constitutivas ao estado deformacional.

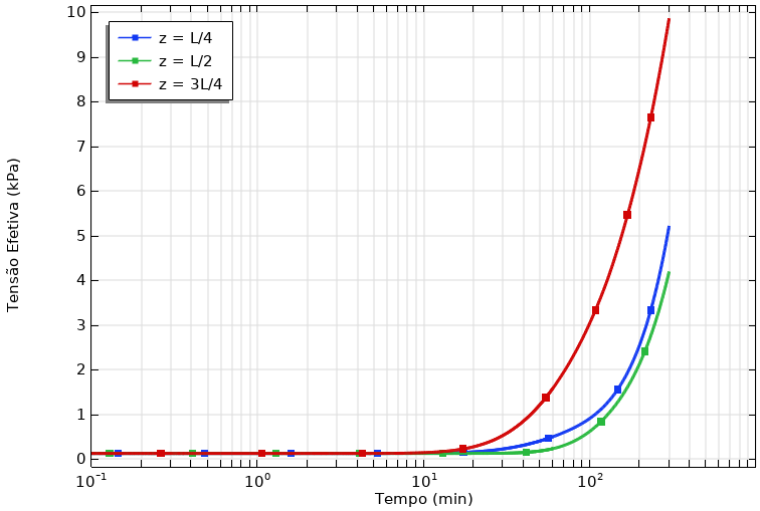
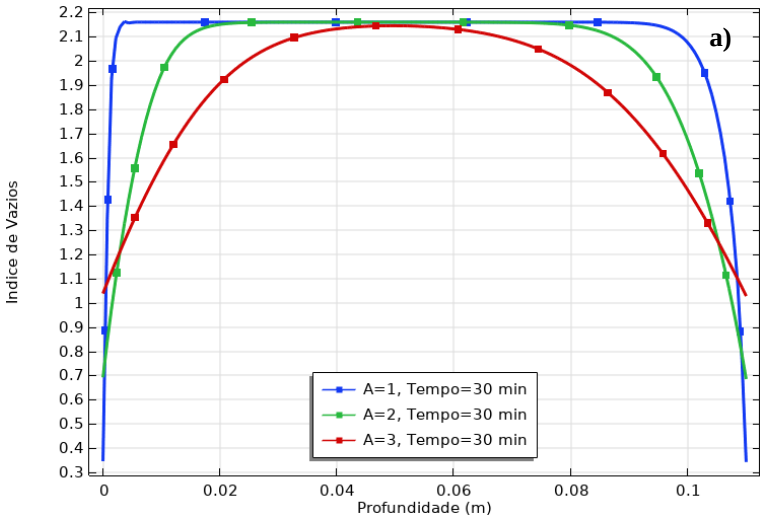
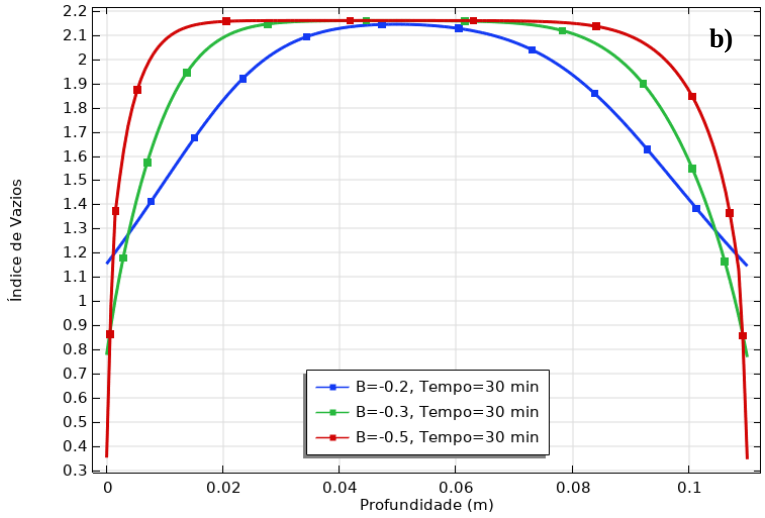


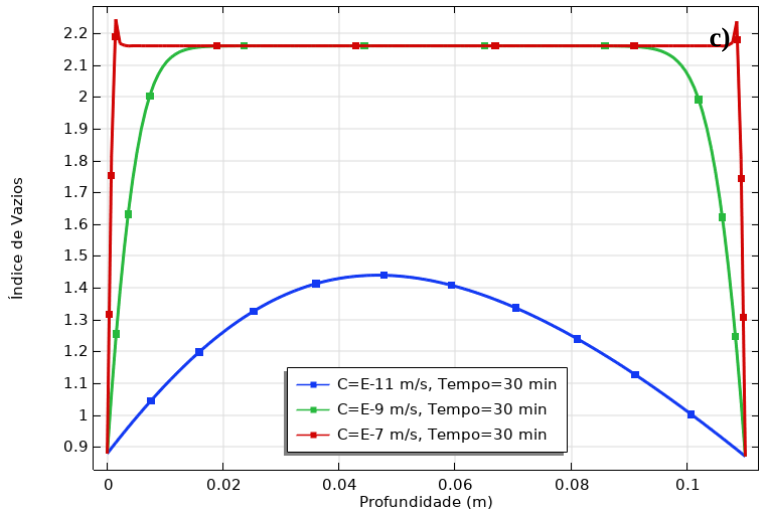
Figura 4.37 - Variação da tensão efetiva ao longo do tempo aplicando o *Extended Power Function Model*, em diferentes posições de profundidade na camada da amostra 1.

4.4.2.2. AVALIAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS NA SOLUÇÃO NUMÉRICA

A avaliação dos modelos constitutivos foi realizada com base em simulações numéricas implementadas no *COMSOL Multiphysics*®, permitindo investigar a influência paramétrica sobre a resposta do sistema em termos espaciais (profundidade) e temporais. Foram conduzidas análises de sensibilidade variando os parâmetros A, B, C, D e Z, os quais governam a forma funcional das relações constitutivas entre índice de vazios, permeabilidade e tensão efetiva. A Figura 4.38 ilustra os perfis do índice de vazios ao longo da profundidade da camada, evidenciando o impacto individual de cada parâmetro na distribuição espacial da compressibilidade do solo, o que é fundamental para compreender a resposta não linear do material sob condições de adensamento de grandes deformações. Assim como nas análises com a solução analítica, foram implementados como dados de entrada no modelo os resultados experimentais obtidos para a Amostra 1 da presente pesquisa.


a)
Índice de Vazios
Profundidade (m)
A=1, Tempo=30 min
A=2, Tempo=30 min
A=3, Tempo=30 min


b)
Índice de Vazios
Profundidade (m)
B=-0.2, Tempo=30 min
B=-0.3, Tempo=30 min
B=-0.5, Tempo=30 min


c)
Índice de Vazios
Profundidade (m)
C=E-11 m/s, Tempo=30 min
C=E-9 m/s, Tempo=30 min
C=E-7 m/s, Tempo=30 min

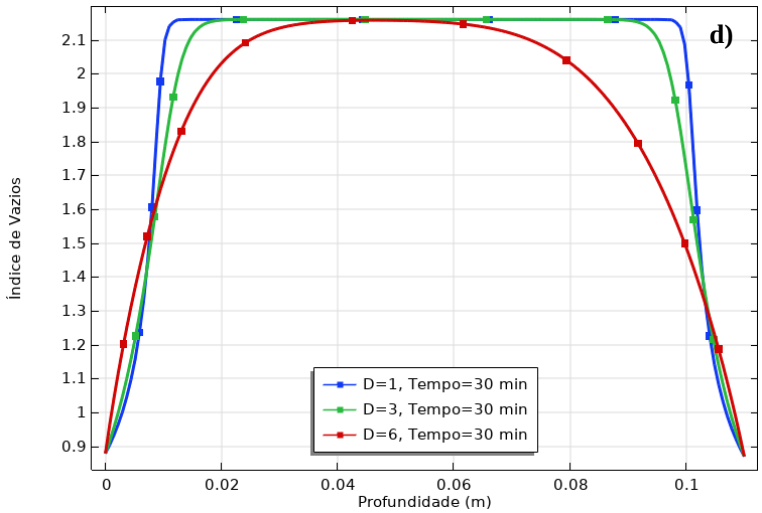
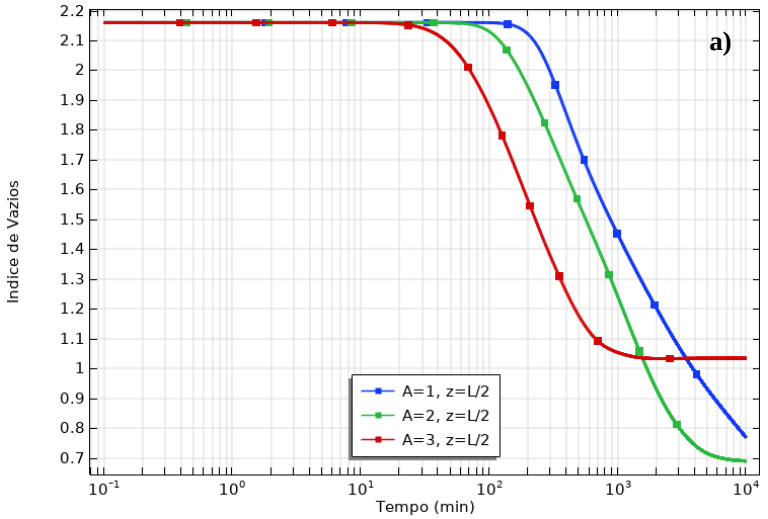
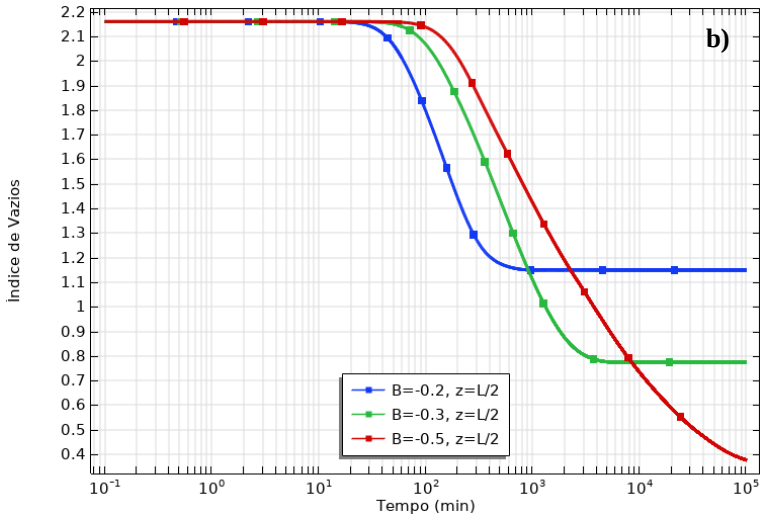
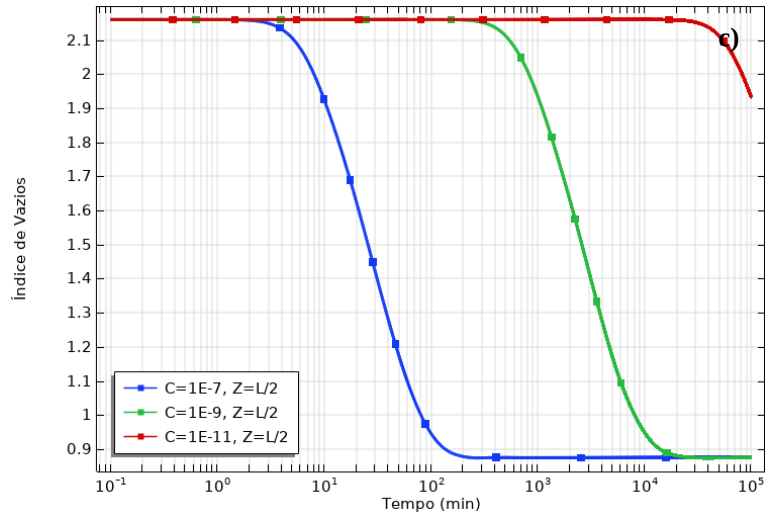


Figura 4.38 - Variação do índice de vazios com a profundidade: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D.

Na Figura 4.39 são apresentados os resultados da evolução temporal do índice de vazios, considerando a variação dos parâmetros A, B, C, D e Z no modelo constitutivo adotado. A análise indica que o parâmetro Z não exerce influência direta sobre a equação constitutiva que descreve o índice de vazios, permanecendo invariável nesse domínio de análise. Sua atuação está restrita à relação constitutiva associada à tensão efetiva, o que justifica a segregação da sua análise gráfica. Esse comportamento sugere que o parâmetro Z está associado a aspectos mecânicos do modelo, possivelmente relacionados à rigidez ou à resposta tensional do material, sem interferir diretamente na evolução volumétrica expressa pelo índice de vazios. Além disso, observa-se que para algumas análises, mesmo estendendo o tempo de análise (10^5 minutos), não foi possível verificar a evolução temporal de alguns parâmetros. Por limitação de tempo de processamento e requisitos computacionais não foi possível estender ainda mais o período analisado.


a)
Índice de Vazios
Tempo (min)
A=1, z=L/2
A=2, z=L/2
A=3, z=L/2


b)
Índice de Vazios
Tempo (min)
B=-0.2, z=L/2
B=-0.3, z=L/2
B=-0.5, z=L/2


c)
Índice de Vazios
Tempo (min)
C=1E-7, Z=L/2
C=1E-9, Z=L/2
C=1E-11, Z=L/2

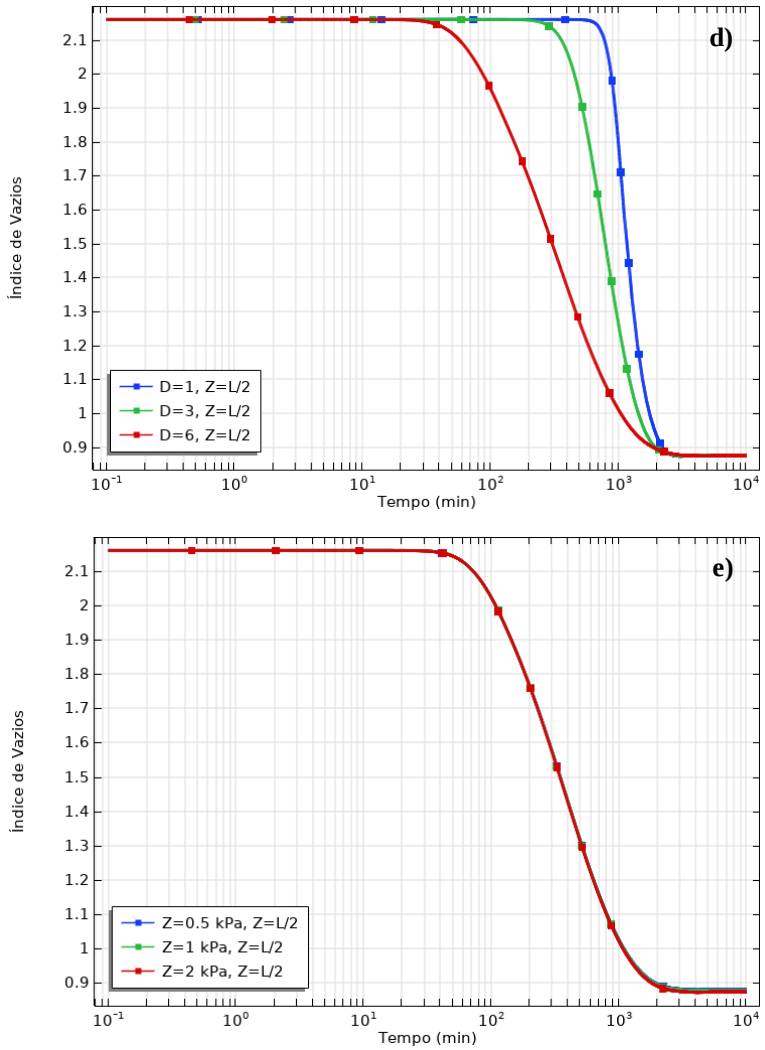


Figura 4.39 - Variação do índice de vazios em função do tempo: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D; e) Análise de sensibilidade do parâmetro Z.

Foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros A, B e D com relação à evolução temporal da condutividade hidráulica saturada, conforme apresentado na Figura 4.40. Esses parâmetros influenciam diretamente a relação entre o índice de vazios e a permeabilidade, refletindo a interdependência entre propriedades hidráulicas e deformacionais do solo. A análise evidencia como alterações nos parâmetros constitutivos impactam a cinética de redução da condutividade hidráulica durante o adensamento, sendo particularmente relevante em modelos que consideram a variabilidade do coeficiente de permeabilidade em função da estrutura do solo.

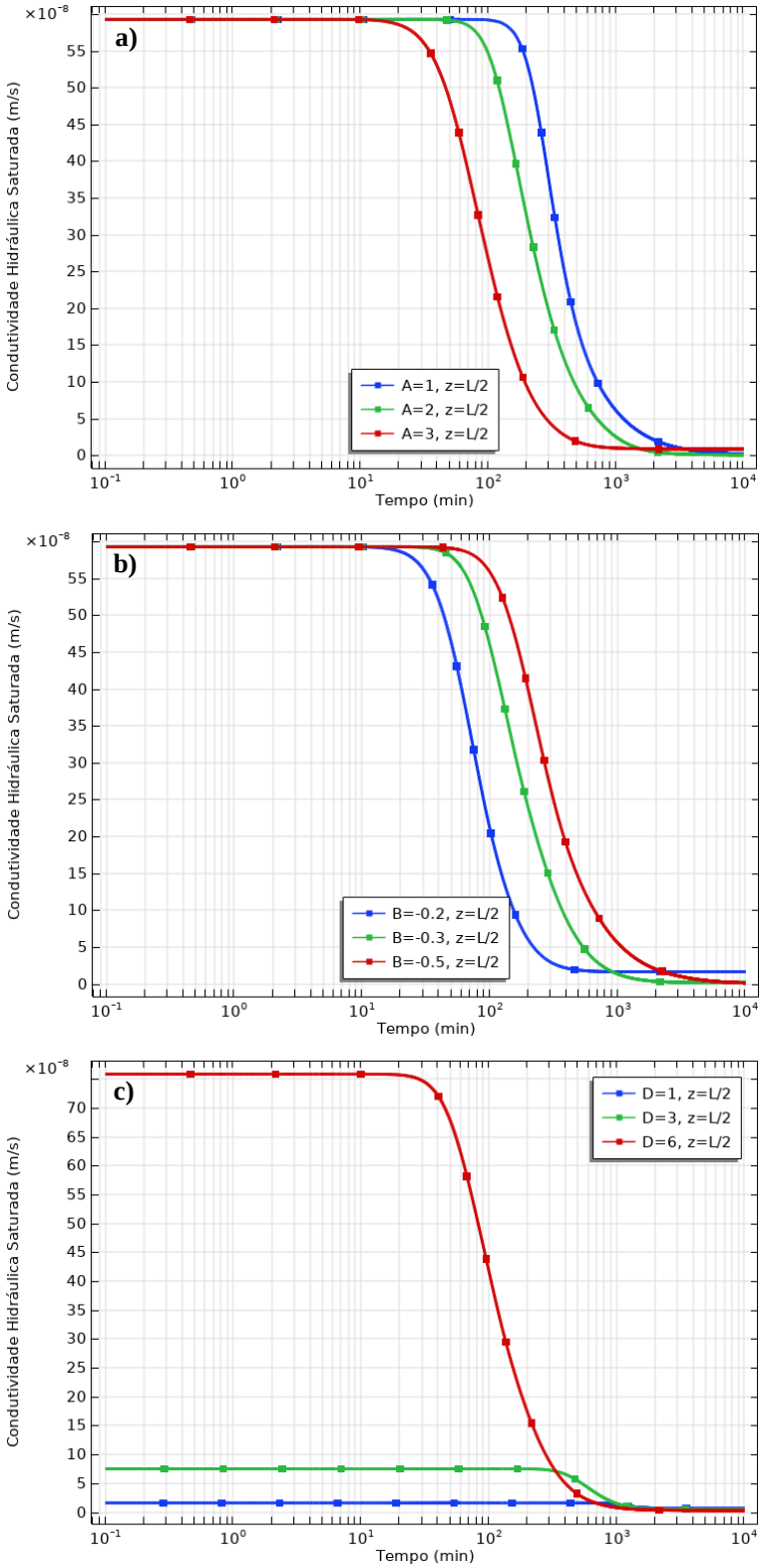
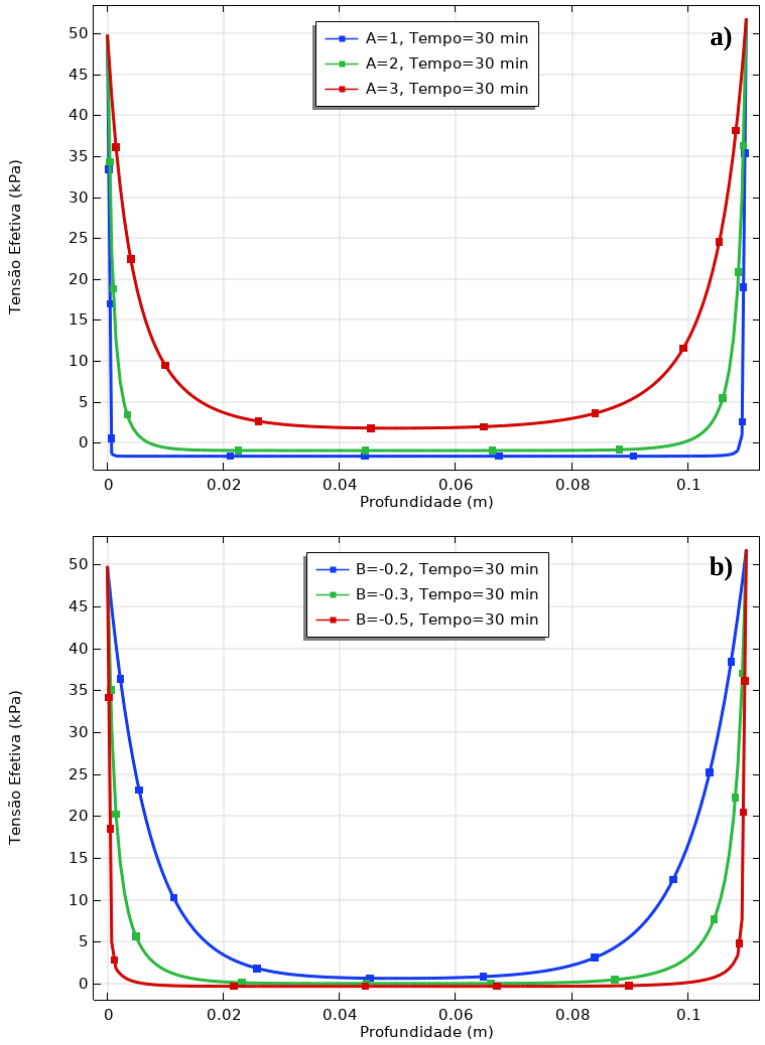


Figura 4.40 - Variação da condutividade hidráulica saturada em função do tempo - a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro D.

Adicionalmente, foi realizada também uma análise de sensibilidade dos parâmetros A, B, C, D e Z considerando a variação da tensão efetiva ao longo da profundidade da camada, evidenciando o impacto individual de cada parâmetro na distribuição espacial do estado de tensões do solo, o que é imprescindível para compreender a resposta não linear do material sob condições de adensamento de grandes deformações. A Figura 4.41 ilustra os perfis da tensão efetiva ao longo da profundidade da camada para cada parâmetro constitutivo. Evidenciou-se novamente o regime de dupla drenagem das amostras, no qual os gradientes hidráulicos promovem uma dissipação mais rápida de poropressões nas regiões próximas às superfícies drenantes. Além disso, observa-se que os parâmetros D e Z praticamente não influenciaram na distribuição da tensão efetiva ao longo da profundidade.



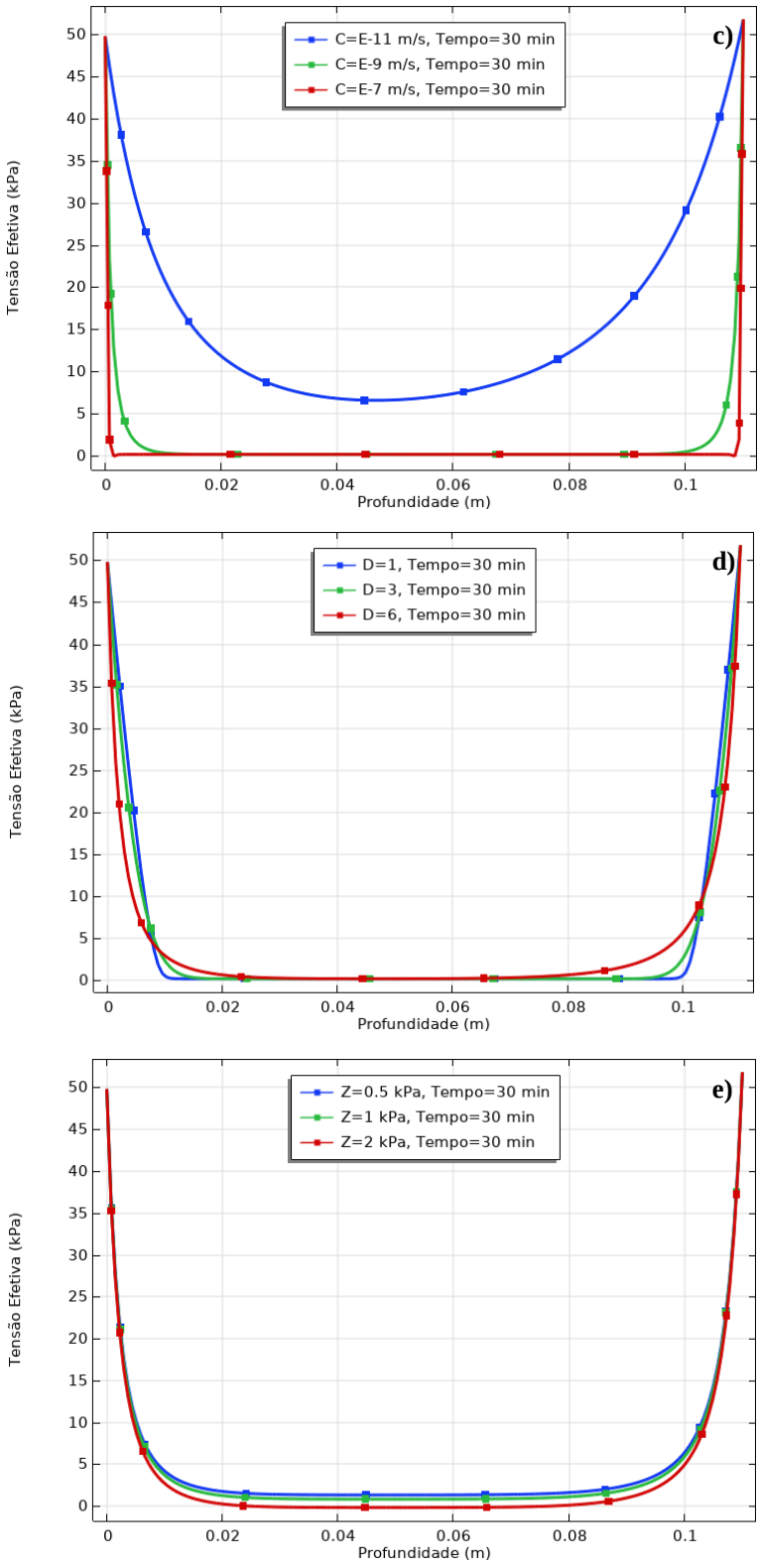
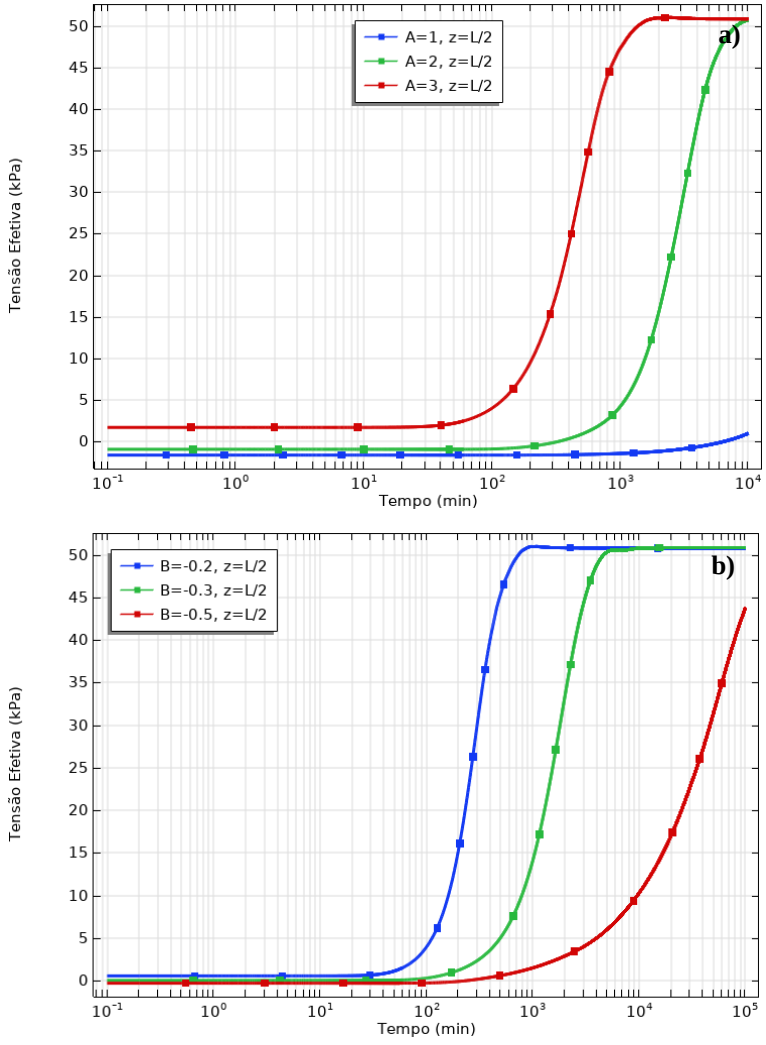


Figura 4.41 - Variação da tensão efetiva com a profundidade: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D; e) Análise de sensibilidade do parâmetro Z.

Por fim, na Figura 4.42 é apresentada a análise de sensibilidade dos parâmetros constitutivos considerando a evolução temporal da tensão efetiva. Ao contrário da condutividade hidráulica, a análise dos resultados evidencia como alterações nos parâmetros impactam no aumento significativo da tensão efetiva na amostra com o tempo. Novamente, para a variável tensão efetiva, o tempo considerado para análise se mostrou insuficiente, mas devido as mesmas limitações citadas anteriormente, não foi possível estender as análises por um período de tempo maior.



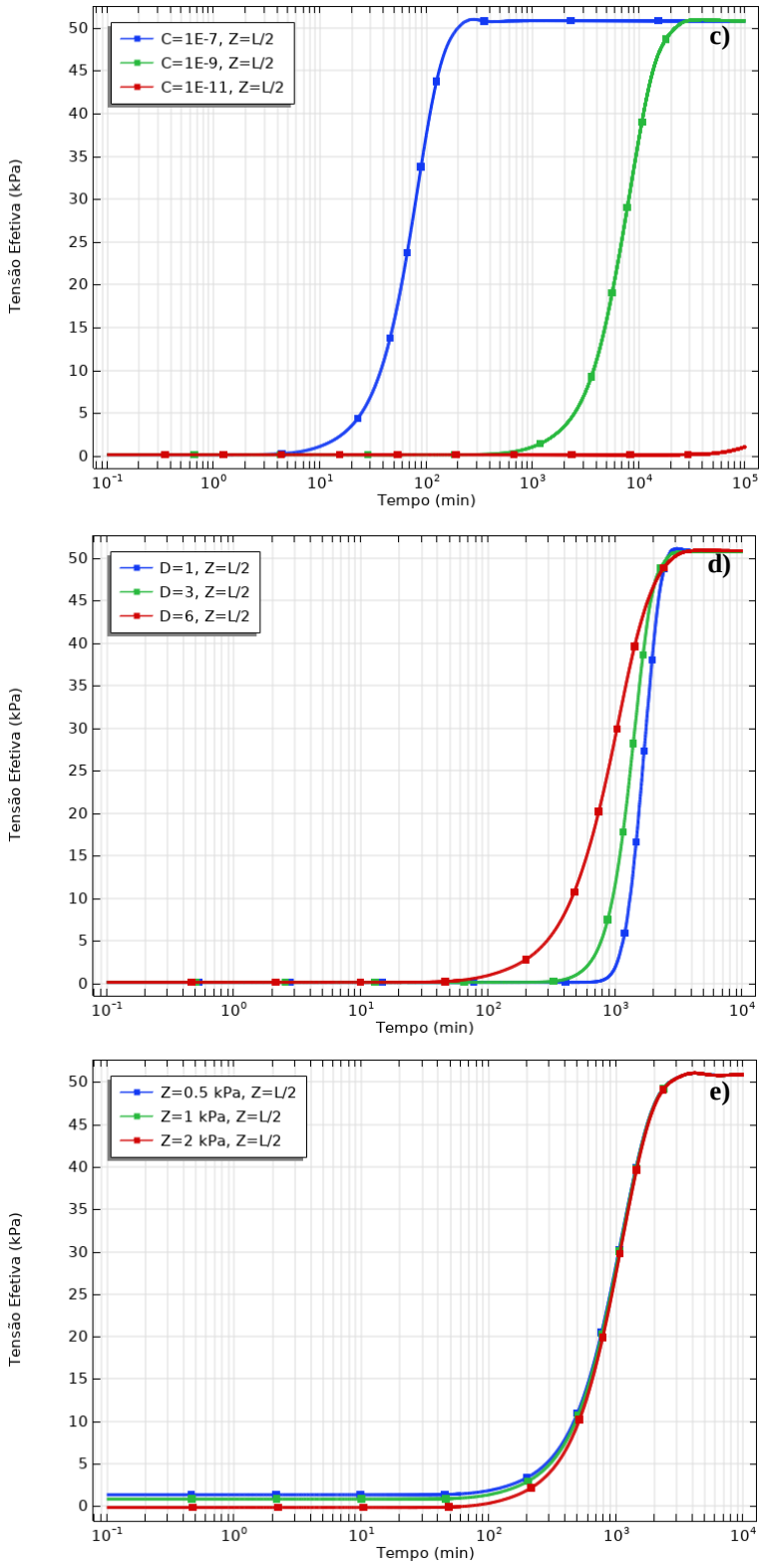


Figura 4.42 - Variação da tensão efetiva com o tempo: a) Análise de sensibilidade do parâmetro A; b) Análise de sensibilidade do parâmetro B; c) Análise de sensibilidade do parâmetro C; d) Análise de sensibilidade do parâmetro D; e) Análise de sensibilidade do parâmetro Z.

4.4.3 - COMPARAÇÃO ENTRE A SOLUÇÃO ANALÍTICA E A SOLUÇÃO NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL

Com o objetivo de validar a solução numérica implementada, procedeu-se à comparação com a solução analítica clássica de Gibson *et al.* (1967), conforme expressa na Eq. 2.2, considerando o comportamento no ponto central da camada. Na formulação analítica, a relação entre a tensão efetiva vertical (σ'_v) e o índice de vazios (e) é linearizada por meio do coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v), assumido constante e igual a 0,006 kPa^{-1} neste estudo. As simulações contemplaram três conjuntos de dados experimentais distintos: Lama 01 (Pinho, 2018), Amostra A-1 (Abu-Hejleh *et al*., 1996) e Amostra 01 desta pesquisa, permitindo avaliar a consistência do modelo em diferentes condições geotécnicas e níveis de plasticidade.

Cabe destacar que a solução analítica de Gibson *et al.* (1967) fundamenta-se em hipóteses simplificadoras necessárias para a obtenção de uma forma linearizada das equações de adensamento em grandes deformações. Entre essas hipóteses, destaca-se a equivalência entre as densidades do fluido e dos sólidos, o que implica a negligência dos efeitos do peso próprio na evolução das tensões efetivas em camadas de pequena espessura. Adicionalmente, assume-se que a função $g(e)$, que representa a relação constitutiva entre propriedades hidráulicas e o índice de vazios, é independente do estado inicial e pode ser considerada constante. Essa aproximação limita a capacidade do modelo em capturar a não linearidade inerente ao processo de adensamento quando submetido a grandes incrementos de carga, evidenciando restrições na sua aplicabilidade para materiais com comportamento fortemente dependente do estado.

A análise comparativa apresentada na Figura 4.43 evidencia diferenças relevantes entre as respostas dos modelos analítico e numérico. Observa-se que o modelo numérico preserva o índice de vazios inicial por um intervalo temporal mais extenso, refletindo uma representação mais realista da dissipação gradual das pressões neutras. Em contrapartida, a redução do índice de vazios ocorre de maneira mais abrupta, característica típica de formulações não lineares que consideram a dependência das propriedades constitutivas com o estado de deformação. A defasagem temporal no início da compressão, quando comparada à solução analítica, pode ser atribuída às simplificações inerentes ao modelo de Gibson *et al.* (1967). Adicionalmente, as diferenças observadas entre as amostras (Figuras 4.43.a, 4.43.b e 4.43.c) sugerem a influência da plasticidade, estrutura e compressibilidade do sedimento na cinética do adensamento, indicando maior sensibilidade em materiais com comportamento mais compressível.

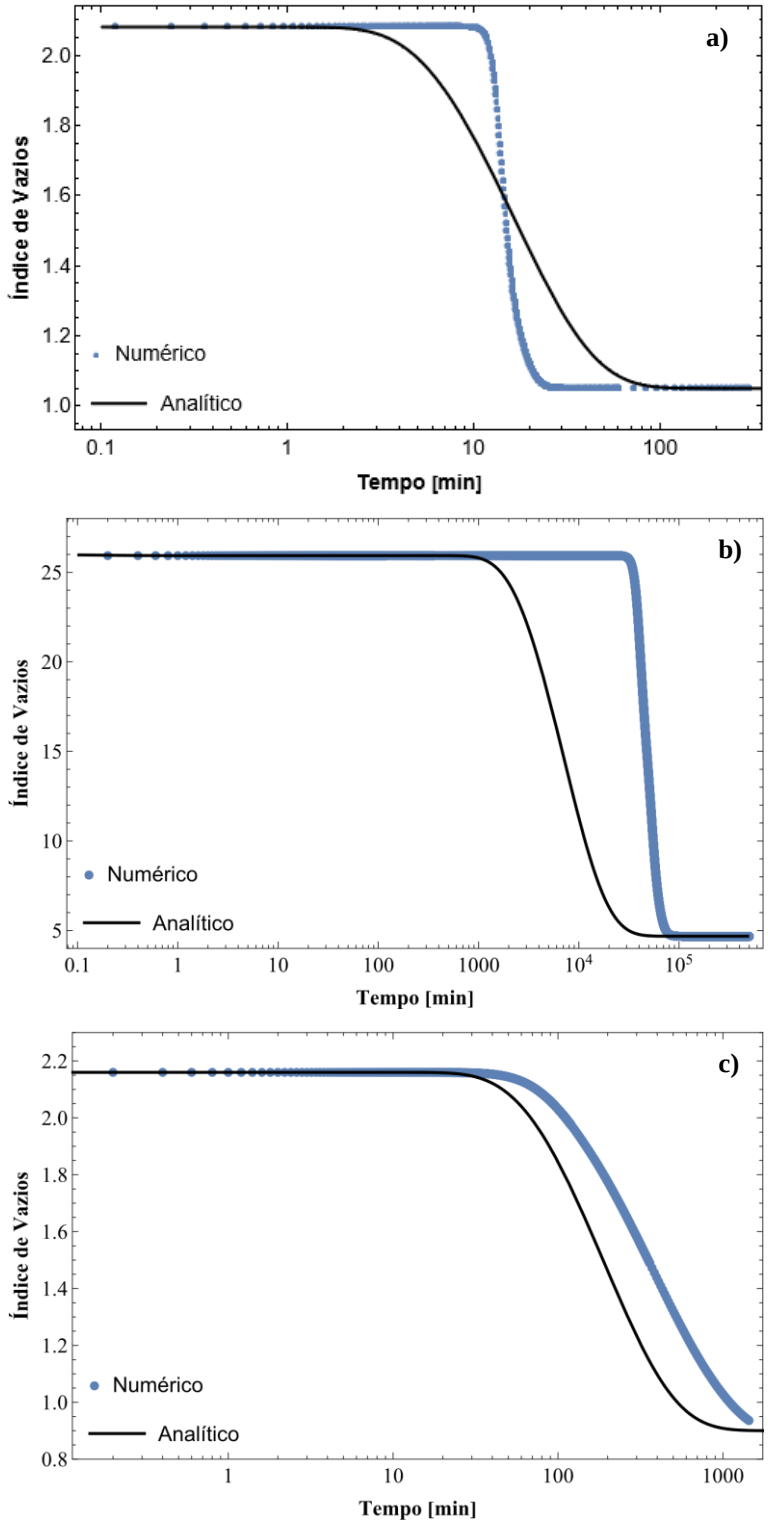


Figura 4.43 - Comparativo entre as soluções analítica e numérica do adensamento a grandes deformações: a) Lama 01 (Pinho, 2018); b) Amostra A-1 (Abu-Hejleh *et al.*, 1996); c) Amostra 1 presente pesquisa.

A comparação entre as soluções analítica e numérica demonstra que, embora ambas sejam capazes de reproduzir as tendências globais do processo de adensamento, a solução

numérica se destaca por sua capacidade de representar comportamentos não lineares associados à evolução das propriedades hidráulicas e mecânicas do solo. Essa capacidade decorre da consideração explícita do acoplamento hidromecânico e da dependência das relações constitutivas com o estado de deformação, aspectos frequentemente negligenciados em soluções analíticas linearizadas.

As discrepâncias observadas entre os resultados dos modelos analítico e numérico podem ser atribuídas, principalmente, às hipóteses simplificadoras da solução analítica, que desconsidera a variabilidade das propriedades do sedimento ao longo do processo de adensamento. Em particular, a não consideração da dependência da condutividade hidráulica e da compressibilidade em relação ao índice de vazios limita a capacidade da solução analítica de representar adequadamente o comportamento real do material, especialmente em condições de grandes deformações.

4.4.3.1. COMPARAÇÃO DOS MODELOS NA AVALIAÇÃO DOS MODELOS CONSTITUTIVOS

Nesta etapa final, realiza-se a comparação sistemática entre os resultados provenientes do modelo analítico, implementado no *Wolfram Mathematica*®, e do modelo numérico, desenvolvido no *COMSOL Multiphysics*®. A análise é restrita aos parâmetros comuns às duas abordagens, garantindo consistência metodológica na comparação. Tal estratégia permite avaliar diretamente as diferenças associadas às formulações analítica e numérica, especialmente no que se refere à representação de comportamentos não lineares e à capacidade de captura da evolução temporal das variáveis de interesse.

A Figura 4.44 ilustra a comparação entre as respostas dos modelos analítico e numérico para a evolução da condutividade hidráulica saturada ao longo do tempo, utilizando o *Single Power Function Model* (Somogyi, 1979). A análise de sensibilidade dos parâmetros C e D (Figuras 4.44.a–d) evidencia diferenças importantes entre as abordagens. No modelo numérico, observa-se a interseção das curvas, o que sugere uma resposta não linear mais pronunciada e dependente do estado, associada à variação simultânea das propriedades hidráulicas com o índice de vazios. Esse comportamento indica que o aumento dos parâmetros C e D acelera a redução da condutividade hidráulica de forma mais complexa do que previsto pela solução analítica, refletindo o acoplamento hidromecânico presente na formulação numérica.

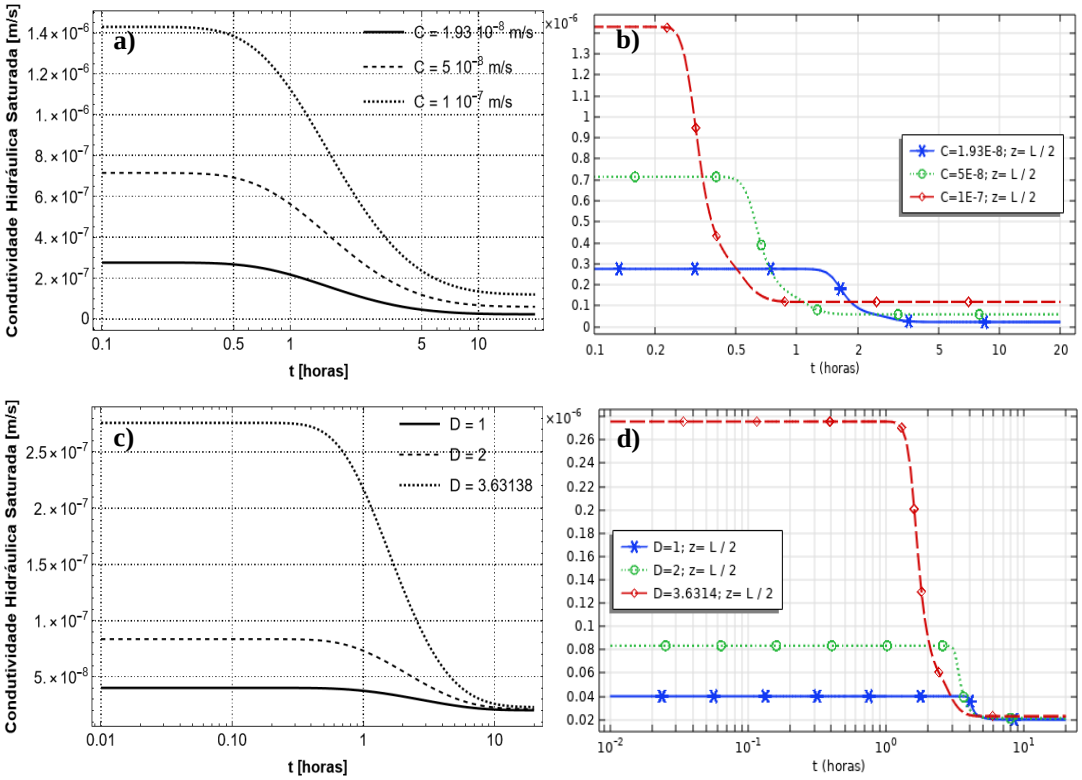


Figura 4.44 - Condutividade hidráulica saturada em função do tempo: a) Modelo analítico variando o parâmetro C; b) Modelo numérico variando o parâmetro C; c) Modelo analítico variando o parâmetro D; d) Modelo numérico variando o parâmetro D.

A Figura 4.45 apresenta a análise comparativa entre os modelos analítico e numérico para a evolução temporal da tensão efetiva, utilizando o *Extended Power Function Model* (Liu & Znidarcic, 1991). A avaliação da sensibilidade dos parâmetros A, B e Z (Figuras 4.45.a–f) revela diferenças significativas na resposta dos modelos. No modelo numérico, observa-se um atraso no início do incremento da tensão efetiva, seguido de uma estabilização mais rápida, o que pode ser atribuído à consideração explícita da dissipação de poropressão e do acoplamento hidromecânico. Esse comportamento indica que o modelo numérico é capaz de representar de forma mais realista a redistribuição de tensões ao longo do processo de adensamento, especialmente em condições de grandes deformações e propriedades dependentes do estado.

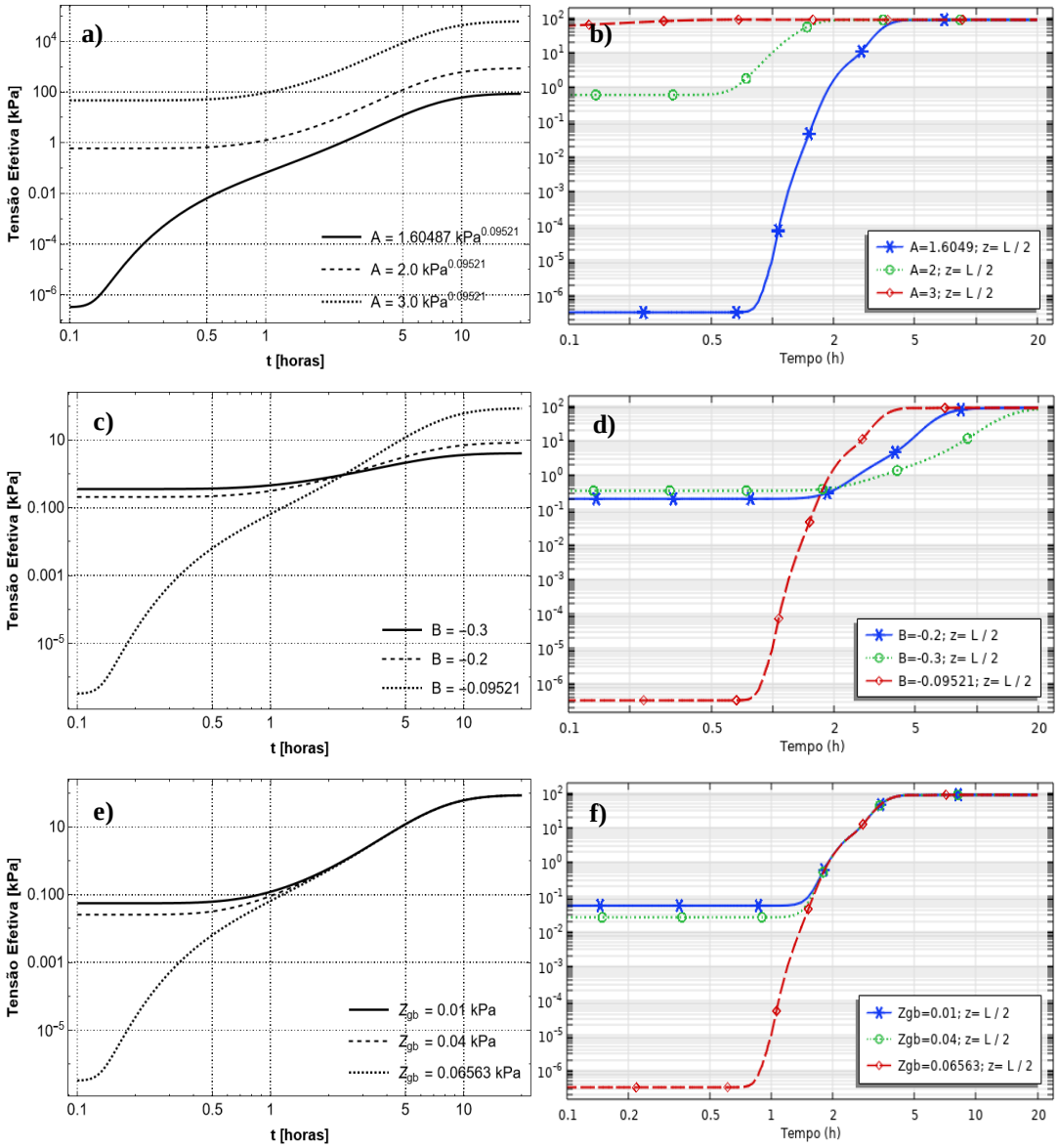


Figura 4.45 - Tensão efetiva em função do tempo: a) Modelo analítico variando o parâmetro A; b) Modelo numérico variando o parâmetro A; c) Modelo analítico variando o parâmetro B; d) Modelo numérico variando o parâmetro B; e) Modelo analítico variando o parâmetro Z; f) Modelo numérico variando o parâmetro Z.

A Figura 4.46 ilustra a comparação entre as soluções analítica e numérica para a evolução temporal do índice de vazios, ambas obtidas sob a hipótese de propriedades constantes, especificamente a condutividade hidráulica saturada (k_s) e o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v). Essa simplificação conduz a uma formulação linearizada do problema de adensamento, permitindo uma comparação direta entre os modelos. Os resultados evidenciam boa concordância no formato geral das curvas, o que indica consistência entre as abordagens. No entanto, a antecipação no início da variação do índice de vazios na

solução numérica sugere maior sensibilidade do modelo numérico à redistribuição inicial de tensões e à dissipação de poropressões, ainda que sob hipóteses simplificadas.

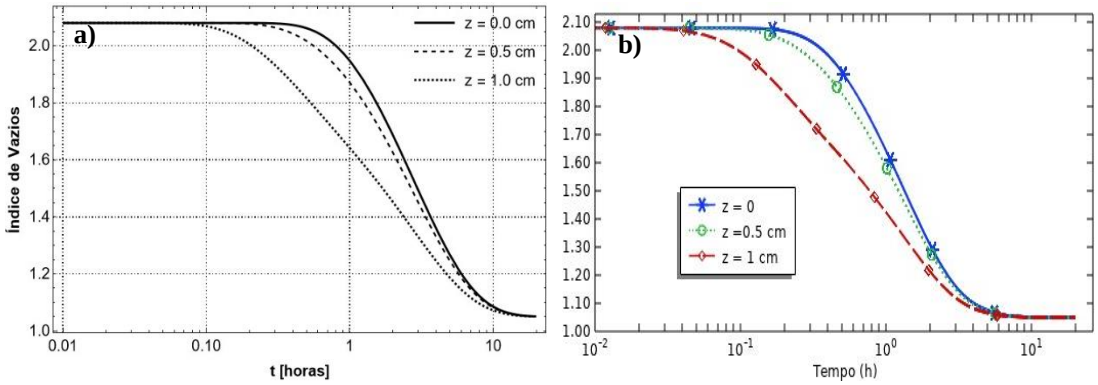


Figura 4.46 - Índice de vazios em função do tempo para diferentes profundidades: a) Modelo analítico; b) Modelo numérico.

A Figura 4.47 apresenta a distribuição espacial do índice de vazios ao longo da profundidade da camada, para diferentes instantes de tempo, conforme obtido pelas soluções analítica e numérica. A comparação revela que o modelo numérico atinge a estabilização do índice de vazios em menor intervalo de tempo, o que pode estar associado à sua maior capacidade de representar a propagação do processo de adensamento ao longo da camada, mesmo sob hipóteses simplificadas. Esse comportamento sugere que, mesmo quando adotadas propriedades constantes, a formulação numérica pode capturar de forma mais eficiente os gradientes hidráulicos e a redistribuição de tensões ao longo da profundidade.

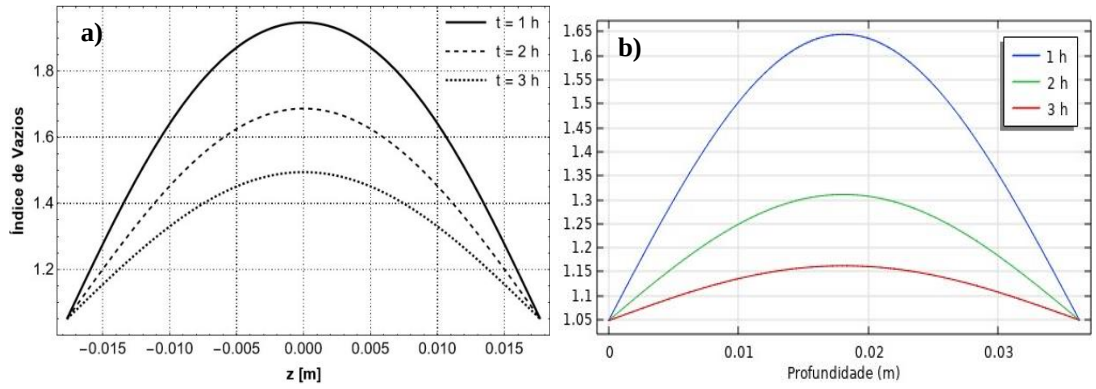


Figura 4.47 - Índice de vazios em função da profundidade para diferentes intervalos de tempo: a) Modelo analítico; b) Modelo numérico.

4.5 - SÍNTESE DOS RESULTADOS

De forma geral, os resultados desta pesquisa evidenciam que o comportamento do material estudado é dominado por sua elevada compressibilidade volumétrica e baixa condutividade hidráulica, atributos característicos de materiais finos coesivos. Os ensaios experimentais de campo e laboratório foram fundamentais para a caracterização do comportamento geotécnico dos sedimentos analisados. Além disso, essas propriedades exercem influência direta na cinética do adensamento, afetando tanto a dissipação de poropressões quanto a evolução do índice de vazios ao longo do tempo.

Os ensaios experimentais dos ensaios HCT apresentaram elevada consistência nos resultados, possibilitando a determinação de parâmetros geotécnicos representativos para a modelagem constitutiva. Esses parâmetros refletem adequadamente as propriedades mecânicas e hidráulicas do material, garantindo maior confiabilidade na calibração dos modelos utilizados.

As abordagens analítica e numérica mostraram-se capazes de reproduzir adequadamente as tendências globais do processo de adensamento, ainda que apresentem diferenças decorrentes das hipóteses simplificadoras da solução analítica e da maior complexidade da formulação numérica. Em particular, a solução numérica se destaca por incorporar relações constitutivas não lineares e acoplamento hidromecânico, permitindo uma representação mais fiel do comportamento do sedimento.

A integração entre os resultados experimentais e as simulações numéricas proporcionou uma compreensão mais aprofundada do fenômeno de adensamento sob grandes deformações, evidenciando a relevância da adequada seleção e calibração dos parâmetros constitutivos. Os parâmetros como índice de vazios inicial (e_0) e densidade dos grãos (G_s) ou massa específica dos sólidos foram os que apresentaram maior relevância na consideração do estado inicial das amostras implementadas na modelagem, assim como os parâmetros constitutivos A, B, C, D e Z dos modelos analisados.

Essa integração é essencial para garantir a representatividade dos modelos, especialmente em problemas onde as propriedades do material variam com o estado de deformação e com a evolução do índice de vazios.

5 - CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo central a investigação do comportamento geotécnico de sedimentos acumulados nas zonas marginais de reservatórios de barragens, com foco no adensamento sob grandes deformações, típico de depósitos formados por materiais finos de elevada compressibilidade. Esse fenômeno possui elevada importância na Engenharia Geotécnica, pois afeta diretamente a redistribuição de tensões, a dissipação de poropressões e, consequentemente, a estabilidade global e a eficiência operacional dos reservatórios.

A caracterização geotécnica evidenciou que o material analisado apresenta comportamento típico de materiais argilosos de alta plasticidade e baixa condutividade hidráulica, propriedades que controlam significativamente sua resposta ao adensamento. Adicionalmente, identificou-se um comportamento granulométrico bimodal, característico de solos tropicais lateríticos, indicando a presença de diferentes frações estruturais que contribuem para a complexidade das interações hidromecânicas e para a variabilidade das propriedades ao longo do processo.

No contexto da modelagem, foram implementadas abordagens analítica e numérica, empregando os *softwares Wolfram Mathematica*® e *COMSOL Multiphysics*®, respectivamente. Essas abordagens integraram dados experimentais dos ensaios HCT desta pesquisa e informações consolidadas da literatura, permitindo a simulação do adensamento sob grandes deformações com elevado grau de consistência. A calibração paramétrica desempenhou papel fundamental na adequação dos modelos às condições reais, assegurando a representatividade das relações constitutivas e a confiabilidade das previsões.

A análise de sensibilidade paramétrica evidenciou que as variáveis constitutivas exercem influência direta e coerente sobre a resposta do sistema, em conformidade com os princípios físicos do adensamento. Os modelos *Single Power Function Model* (Somogyi, 1979) e *Extended Power Function Model* (Liu & Znidarcic, 1991) destacaram-se por apresentar melhor ajuste aos dados experimentais, demonstrando elevada capacidade de capturar as relações não lineares entre índice de vazios, condutividade hidráulica e tensão efetiva.

A validação dos modelos foi conduzida por meio da comparação com dados experimentais próprios e com resultados reportados na literatura, conferindo maior robustez e confiabilidade às análises. Verificou-se boa concordância entre os resultados, particularmente na representação das tendências de evolução do índice de vazios, da condutividade hidráulica e da tensão efetiva, o que reforça a consistência das abordagens adotadas.

As simulações analíticas evidenciaram a interdependência entre a redução do índice de vazios e a diminuição da condutividade hidráulica, além do aumento progressivo da tensão

efetiva mobilizada no esqueleto do solo. Em contrapartida, as simulações numéricas possibilitaram uma análise mais detalhada da evolução espaço-temporal do processo, destacando o regime de dupla drenagem, no qual os gradientes hidráulicos promovem uma dissipação mais rápida de poropressões nas regiões próximas às superfícies drenantes.

Adicionalmente, observou-se que a evolução do adensamento é mais rápida na modelagem numérica, o que evidencia sua superior capacidade de representar efeitos não lineares, variações espaciais e o acoplamento hidromecânico entre fluxo e deformação. Essa característica torna o modelo numérico mais adequado para a simulação de processos complexos em solos altamente compressíveis.

Sob a perspectiva aplicada, o modelo numérico desenvolvido apresenta potencial significativo como ferramenta preditiva para a avaliação da redução do volume útil de reservatórios devido ao acúmulo e adensamento de sedimentos. Sua aplicação pode subsidiar a tomada de decisão em estratégias de gestão, planejamento de dragagem e monitoramento, contribuindo para a sustentabilidade e segurança operacional dessas estruturas.

De forma geral, os resultados demonstram que a integração entre investigação experimental e modelagem numérica/analítica constitui uma abordagem robusta para o estudo do adensamento sob grandes deformações em sedimentos finos. Essa integração permite não apenas a calibração adequada dos modelos, mas também uma compreensão aprofundada dos mecanismos físicos envolvidos e de suas implicações em aplicações de Engenharia.

Como perspectiva futura, recomenda-se a expansão da modelagem para abordagens bidimensionais e tridimensionais, incorporando variações espaciais na direção horizontal e condições de contorno mais complexas. Além disso, a inclusão de formulações para meios não saturados, com consideração da sucção matricial e curvas características solo-água, permitirá uma representação mais realista das condições de campo, particularmente em zonas de borda de reservatórios sujeitas a variações hidrológicas.

Por fim, recomenda-se também o desenvolvimento do ensaio em coluna instrumentada em escala apropriada para representação experimental do fenômeno de adensamento de grandes deformações de sedimentos depositados em bordas de reservatórios, possibilitando assim a validação da modelagem numérica desenvolvida na presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR 9603: Sondagem a Trado - Procedimento. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016a). NBR 6457: Amostras de solo -Preparação para ensaios de compactação e caracterização, com secagem prévia. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016b). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016c). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016d). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016e). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016f). NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020a). NBR 16853: Solo - Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020b). NBR 16867: Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas - Método da balança hidrostática. Rio de Janeiro, RJ. 5 p

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro.

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 12770: Solo - Determinação da resistência à compressão não confinada de solos coesivos. 4p. Rio de Janeiro.

ABU-HEJLEH, A. N., & ZNIDARCIC, D. (1992). User manual for computer program SICTA. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 101 p., Boulder, Colorado.

ABU-HEJLEH, A. N., ZNIDARČIĆ, D., & BARNES, B. L. (1996). Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays. Journal of geotechnical engineering, 122(4), 295-301.

AUBERTIN, M., RICARD, J.-F., & CHAPUIS, R.P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines, Canadian Geotechnical Journal, 35: 55-69.
Al-Tabbaa, A., Wood, D. M. (1987). Some measurements of the permeability of kaolin. Geotechnique 37 (4): 499–503.

ARTAMONOVA, N. B., & SHESHENIN, S. V. (2023). Finite element implementation of a geometrically and physically nonlinear consolidation model. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 35(4), 1291-1308.

ASTM: American Society for Testing Materials. (2011). ASTM D 7181-11: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. West Conshohocken.

ASTM: American Society for Testing Materials. (2016). ASTM D6836-16.: Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA.

AZEVEDO, R. F., SILVA, W. S., & SANTOS, D. D. (1999). Disposição de resíduos sob a forma de lama: modelos de análise e obtenção de parâmetros. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental–REGEO, 212-224p.

BOTELHO, A. P. D. (2001). Implementação de Metodologia de Ensaios para Determinação de Relações Constitutivas de Processos de Fluxos em Solos com a Utilização da Bomba de Fluxo. Dissertação de Mestrado, UFOP.

CAMAPUM DE CARVALHO, J., FERNANDES, A.J.C., GOURVÈS, R.P.H. & REZENDE, L.R. (2006). Avaliação do pressiômetro Pencel e do penetrômetro PANDA para uso em pavimentação. 37ª Reunião anual de pavimentação – 11º Encontro nacional de conservação rodoviária – 37ª RAPv / 11º ENACOR. Goiânia/GO, Brasil. 10p.

CANÇADO, N. L. (2010). Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios HCT com o uso da bomba de fluxo.

CARGILL, K. W. (1982). Consolidation of Soft Layers by Finite Strain Analysis. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.

CARVALHO, N. D. O., FILIZOLA JUNIOR, N. P., SANTOS, P. D., & LIMA, J. E. F. W. (2000). Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas.

CARMAN, P.C. (1937). Fluid flow through a granular bed. Transactions of the Institution of Chemical Engineers 15, 150-156p.

CAO, Y., YANG, J., XU, G., & XU, J. (2018). Analysis of large-strain consolidation behavior of soil with high water content in consideration of self-weight. Advances in Civil Engineering.

CHAMMAS, R. (1989). Barragens de Contenção de Rejeitos. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), UFOP, Ouro Preto, MG.

COMSOL, A. (2018). Comsol multiphysics® v. 5.4. www.comsol.com. Stockholm, Sweden. COMSOL AB.

CRISPIM, F. A. (2010). Influência de variáveis de compactação na estrutura dos solos: caracterizações geotécnica, química, mineralógica e microstrutural. 2010. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DARCY, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes a suivre et des formules a employer dans les questions de distribution d'eau; ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux et a la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tole et de bitume. Victor Dalmont.

DAS, B.M. (2008). Advanced Soil Mechanics. Taylor & Francis: Oxford, UK, pp. 172-173. ISBN 0-203-93584-5.

DIAS, V. D. S., DA LUZ, M. P., MEDERO, G. M., & NASCIMENTO, D. T. F. (2018). An overview of hydropower reservoirs in Brazil: current situation, future perspectives and impacts of climate change. Water (Switzerland) 10.

DURNER, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resources. Research., v. 30, n.2, p. 211–223.

EAKIN, H. M. (2020). Silting of Reservoirs 1. In Environmental Geomorphology and Landscape Conservation (pp. 87-102). Routledge.

ELETROBRÁS, CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (1992). Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros. Relatório do IPH/UFRGS. Rio de Janeiro, RJ.

EPE: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. (2025). Balanço Energético Nacional 2025: Ano base 2024. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 320p.

GUERIN, G. (2011). Estimation dês paramètres de comportement des sols latéritiques à partird'essais de pénétrationem place. Trabalho de Conclusão de Curso. Polytech Clermont-Ferrand. Département Génie Civil. 120p.

GIBSON, R. E., ENGLAND, G. L., & HUSSEY, M. J. L. (1967). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: 1. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. Géotechnique, 17(3), 261-273.

GJERAPIC, G., JOHNSON, J., COFFIN, J. & ZNIDARCIC, D. (2008). Determination of Tailings Impoundment Capacity via Finite-Strain Consolidation Models. GeoCongress, Nova Orleans, Lousiana.

GOUVES, R. P. H. (1991). Le PANDA: Pénétromètre dynamique léger à energie variable pour la reconnaissance des sols. Université Blaise Pascal.

GWP SOFTWARE (1999). FSConsol User's Manual, GWP Sofware Inc.

IAEG (1979). Classification of Rocks and Soils for Engineering Geological Mapping Part 1: Rock and Soil Materials. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 19, 355-371.

IMAI, G. (1979). Development of a new consolidation test procedure using seepage force. Soils and Foundations, 19(3), 45-60.

JAKUBICK, A., MCKENNA, G. & ROBERTSON, A. M. (2003). Stabilization of Tailings Deposits: International Experience, Proc. Mining and the Environment III, 25-28 Maio, Sudbury, Ontário, Canadá.

KOZENY, J. (1927). Uber kapillare Leitung des Wassers im Boden. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien 136, 271-306p.

LAMBE, W. T. & WHITMAN, R. V. (1969). Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 548 p.

LIANG, W., ZHAO, J., WU, H., & SOGA, K. (2023). Multiscale, multiphysics modeling of saturated granular materials in large deformation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 405, 115871.

LIMA, P. P. (1996). Ensaios oedométricos com taxa de deslocamento constante em solos muito moles. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 110p.

LIU, S. J., SUN, H. L., PAN, X. D., SHI, L., CAI, Y. Q., & GENG, X. Y. (2021). Analytical solutions and simplified design method for large-strain radial consolidation. Computers and Geotechnics, 134, 103987.

LIU, J. C., & ZNIDARČIĆ, D. (1991). Modelling 1-D compression characteristics of soils. Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), 162-169.

LIU, Z., & LIU, R. (2018). A fully implicit and consistent finite element framework for modeling reservoir compaction with large deformation and nonlinear flow model. Part I: theory and formulation. Computational Geosciences, 22(3), 623-637.

LUZ, M. P., BEEVERS, L. C., CUTHBERTSON, A. J., MEDERO, G. M., DIAS, V. S., & NASCIMENTO, D. T. (2016). The mitigation potential of buffer strips for reservoir sediment yields: The itumbiara hydroelectric power plant in Brazil. Water, 8(11), 489.

MAHMOOD, K. (1987). Reservoir sedimentation: impact, extent, and mitigation. Technical paper (No. PB-88-113964/XAB; WORLD-BANK-TP-71). International Bank for Reconstruction and Development, Washington, DC, USA.

MERABET JR., J. C. F. (2023). Estudo da erosão pluvial em solo laterítico por meio de ensaios laboratoriais com simulador de chuvas e medição de sucção e umidade. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

PEREIRA, R. D. (2017). Análise numérica de problemas de adensamento unidimensional não linear através do método das diferenças finitas. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 95p.

PETKOVSEK, G., & ROCA, M. (2014). Impact of reservoir operation on sediment deposition. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 167, No. 10, pp. 577-584). Thomas Telford Ltd.

PINHO, M. Q. (2018). Aplicação de análises tridimensionais de adensamento a grandes deformações na disposição de rejeitos em cava de mineração.

QUISPE, L. M. C. (2011). Consolidação de um rejeito de mineração de areia e modelação do enchimento de um reservatório para sua disposição. Universidade de São Paulo.

RAMOS, C. L. (1999). Critérios indicativos para a caracterização da potencialidade do assoreamento em reservatórios urbanos. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte. CDrom. 1-15.

REN, X., ZHAO, Y., DENG, Q., KANG, J., LI, D., & WANG, D. (2016). A relation of hydraulic conductivity-void ratio for soils based on Kozeny-Carman equation. Engineering Geology, 213, 89-97.

SCHIFFMAN, R. L. (1980). Finite and infinitesimal strain consolidation. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 106 (2), 203-207.

SCHIFFMAN, R. L., SZAVITZ-NOSSAN, V., & MCARTHUR, J. M. (1992). ACCUMV - Non-linear Large Strain Consolidation, Computer Code Manual, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Colorado, Boulder.

SCHLIEWE, M. S., de MENEZES, A. V., MARQUES, T. A., dos ANJOS MASCARENHA, M. M., VASCO, J. R. G., da LUZ, M. P., & SALES, M. M. (2021). Experimental study of erosion by waves on the lakeshore of lateritic soils. Journal of Hydrology, 603, 127004.

SCULLY, R. W. (1984). Determination of consolidation properties of phosphatic clay at very high void ratios. M. S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Colorado, Boulder, Colo.

SILVA, W. S., & AZEVEDO, R. F. (1999). Ensaio de adensamento hidráulico. In Proc. of 4 o Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 225–232.

SOMOGYI, F. (1979). Analysis and prediction of phosphatic clay consolidation: implementation package. Lakeland: Florida Phosphatic Clay Research Project (Technical Report).

SOUZA., J. C. (2020). Avaliação da relação entre a curva granulométrica e a curva característica solo-água para um solo residual bimodal sob variados graus de desagregação. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO.

SUN, D., YOU, G., ANNAN, Z. & DAICHAO, S. (2016). Soil-water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 75, n. 2, p. 781-791.

TERZAGHI, K., & PECK, R. B. (1948). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.

van GENUCHTEN, M. TH. (1980). A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of saturated soils. Soil Science of America Journal, v. 44, p. 892-898.

VILLAR, L.F. (2002). Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita, Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 483p.

VILHENA, R. M., MASCARENHA, M. M. A, SALES, M. M., ROMÃO, P. A. & LUZ, M. P. (2019). Estimating the Wind-Generated Wave Erosivity Potential: The Case of the Itumbiara Dam Reservoir. Water, (11): 342. DOI: 10.3390/w11020342.

WANG, D., BIENEN, B., NAZEM, M., TIAN, Y., ZHENG, J., PUCKER, T., & RANDOLPH, M. F. (2015). Large deformation finite element analyses in geotechnical engineering. Computers and Geotechnics, 65, 104-114.

WEIBULL, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. Journal of Applied Mechanics, 18, 293-297.

XIE, K. H., & LEO, C. J. (2004). Analytical solutions of one-dimensional large strain consolidation of satured and homogeneous clays. Computers and Geotechnics, 31 (4), 301-314.

YAO, D. T. C. & ZNIDARCIC, D. (1997). Crust Formation and Desiccation Characteristics for Phosphatic Clays - Users' Manual for Computer Program CONDES0, Florida Institute of Phosphate Research (FIPR), n°. 04- 055-134.

YUAN, W. H., ZHANG, W., DAI, B., & WANG, Y. (2019). Application of the particle finite element method for large deformation consolidation analysis. Engineering Computations.

ZNIDARCIC, D., & ABU-HEJLEH, A. N., FAIRBANKS, T. E ROBERTSON, A. (1992). Seepage induced consolidation test, equipment description and users manual. Reported Prepared for Florida Institute of Phosphate Research, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 63 p, Boulder, Colorado.

ZNIDARCIC, D., & LIU, J. C. (1989). Consolidation characteristics determination for dredged materials. In Proc (Vol. 22, pp. 45-65).