UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSINALDO LEANDRO DE SOUZA

MODELO EM ELEMENTOS FINITOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA HIDROMECÂNICO EM BARRAGENS DE CONCRETO

Recife
2024

JOSINALDO LEANDRO DE SOUZA

MODELO EM ELEMENTOS FINITOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA HIDROMECÂNICO EM BARRAGENS DE CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador (a): Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro.

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Souza, Josinaldo Leandro de.
Modelo em elementos finitos para solução do problema hidromecânico em barragens de concreto / Josinaldo Leandro de Souza. - Recife, 2024.
117f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.
Orientação: Paulo Marcelo Vieira Ribeiro.
Inclui referências e apêndices.

1. Barragens concreto; 2. Elementos finitos; 3. Análise hidromecânica; 4. Análise estática; 5. ABAQUS; 6. Plug-in. I. Ribeiro, Paulo Marcelo Vieira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JOSINALDO LEANDRO DE SOUZA

MODELO EM ELEMENTOS FINITOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA HIDROMECÂNICO EM BARRAGENS DE CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 30/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Raúl Darío Durand Farfán (Examinador Externo)
Universidade de Brasília

JOSINALDO LEANDRO DE SOUZA

MODELO EM ELEMENTOS FINITOS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA HIDROMECÂNICO EM BARRAGENS DE CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.
Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 30/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Raúl Darío Durand Farfán (Examinador Externo)
Universidade de Brasília

AGRADECIMENTOS

Dedico inicialmente à minha família, meu Pai Cícero Leandro de Souza, minha mãe Eloisa Leandro de Souza, meus irmãos, minha sogra e os demais, que na minha vida é como se fossem as propriedades físicas dos materiais, pois sempre me ajudaram a ter disposição, paciência e dedicação para enfrentar cada dia.

À minha bela e amada esposa, Cláudia Rafaela Saraiva de Melo Simões Nascimento, nossa conexão é tão imensa que não existe uma solução exata, apenas é medida por uma solução numérica, sendo a mais indicada nos Elementos Finitos.

Aos meus amigos de todas as esferas, da UFPE, do trabalho e do dia a dia, todos são como elementos de uma solução numérica, cada um com sua posição e conectividade com outros, alguns são de ordem linear e outros de ordem superior, alguns são do tipo triangular e outros são quadriláteros.

Agradeço a todos os professores, técnicos administrativos e demais funcionários da Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, pois as suas demandas são como as solicitações de carregamento de uma análise estrutural.

Expresso minha gratidão ao Professor Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro pela orientação e conhecimentos transmitidos para a elaboração deste trabalho. Todos os ensinamentos e direcionamentos fornecidos foram as principais condições de contorno para o desenvolvimento deste trabalho.

A vida não é feita apenas de momentos, mas também de somatório de forças.
(Professor Bernardo Horowitz).

RESUMO

As barragens como estruturas hidráulicas necessitam do estudo de tensões que consideram todas as ações possíveis, principalmente as hidromecânicas. As metodologias mais modernas de barragem de concreto recomendam o método dos elementos finitos para obtenção dos esforços internos. A modelagem numérica de barragens deve empregar alguns procedimentos: (i) escolha do tipo de elemento, (ii) aplicação das condições de contorno e (iii) ação do carregamento externo. As normas técnicas direcionadas para barragens de concreto sempre indicam a importância de considerar a ação da poropressão no interior da barragem, mas há poucas metodologias que orientem claramente como proceder. O presente trabalho apresenta um estudo focado na obtenção e comparação de modelagens numéricas na situação estática estrutural e a hidrodinâmica acoplada, pois a principal diferença dessas análises é a ação da poropressão no modelo hidrodinâmico. Vários tipos de modelos foram empregados para comparar o procedimento de obtenção da poropressão, incluindo um exemplo prático para o fluxo em meio poroso. As modelagens numéricas foram desenvolvidas pelo software computacional para elementos finitos ABAQUS/CAE. As modelagens foram bidimensionais de forma progressivas iniciando com a comparação de um modelo com seção simples. Em seguida, é estudada a barragem de Jucazinho com vários tipos de camadas diferentes. A modelagem da barragem de Jucazinho foi implementada de várias formas: (i) Modelo Íntegro, (ii) Modelo com camada de concreto convencional na face montante, (iii) Modelo com dreno no interior da galeria de drenagem e (iv) Modelo com camada de concreto convencional e dreno no interior da galeria. As comparações realizadas indicam que os modelos com a consideração da camada de concreto convencional na face montante apresentam os valores das tensões principais mais consistentes que os demais modelos, pelo fato da distribuição interna da poropressão. Por fim, é elaborado um código de programação direcional para ABAQUS para a implementação e cálculo do modelo numérico de barragens de concreto, de forma que o modelo contenha todas as considerações de carregamento, tipo elemento, condições de contorno e o tipo de formulação numérica a ser utilizada.

Palavras-chave: Barragens concreto; elementos finitos; análise hidromecânica; Análise Estática; ABAQUS; *Plug-in*.

ABSTRACT

Dams, as hydraulic structures, require stress analysis that considers all possible actions, particularly hydromechanical ones. The most advanced methodologies for concrete dams recommend the finite element method for determining internal forces. Numerical modeling of dams must follow certain procedures: (i) selection of the element type, (ii) application of boundary conditions, and (iii) implementation of external loading. Technical standards for concrete dams emphasize the importance of accounting for pore pressure within the dam structure. However, there are few methodologies that clearly guide how to proceed in this regard. The present study focuses on the evaluation and comparison of numerical models under static structural conditions and coupled hydrodynamic scenarios. The primary distinction between these analyses lies in the incorporation of pore pressure within the hydrodynamic model. Various types of models were employed to compare the procedure for obtaining pore pressure, including a practical example of flow through a porous medium. The numerical models were developed using the finite element software ABAQUS/CAE. The modeling process was conducted in a two-dimensional, progressive manner, beginning with a comparison of a simple cross-section model. Subsequently, the study focused on the Jucazinho Dam, incorporating various types of layered configurations. The modeling of the Jucazinho Dam was implemented in several ways: (i) Intact Model, (ii) Model with a conventional concrete layer on the upstream face, (iii) Model with a drainage gallery containing an internal drain, and (iv) Model with both a conventional concrete layer and an internal drain in the drainage gallery. The comparisons conducted indicate that models including a conventional concrete layer on the upstream face exhibit principal stress values that are more consistent than those of the other models, due to the internal distribution of pore pressure. Finally, a directional programming script was developed for ABAQUS to facilitate the implementation and calculation of the numerical models for concrete dams. This script ensures that the model incorporates all loading considerations, element types, boundary conditions, and the numerical formulation required for comprehensive analyses.

Keywords: Concrete dams; finite elements; hydromechanical analysis; ABAQUS; Plug-in.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema básico das abordagens a serem consideradas. 20
Figura 2 – Material anisotrópico, com as coordenadas locais coincidentes com as principais direções de estratificação. 29
Figura 3 – Divisão de uma região bidimensional qualquer em elementos triangulares. 30
Figura 4 – Fluxograma do Acoplamento Total. 32
Figura 5 – Fluxograma do acoplamento parcial a) Two Way, b) One Way. 33
Figura 6 – Modelo esquemático em Elementos Finitos para análises de fluxo e tensão acopladas em estado estacionário. 43
Figura 7 – Distribuição da subpressão segundo (FERC, 2016). 44
Figura 8 – Distribuição da subpressão com dreno perto da face a montante segundo (FERC, 2016). 45
Figura 9 – Distribuição da subpressão quando há fissura se estendendo entre a face montante e o dreno segundo (FERC, 2016). 46
Figura 10 – Distribuição da subpressão quando a fissura se estende além da linha de drenagem segundo (FERC, 2016). 47
Figura 11 – Metodologia para aplicar a subpressão na base da barragem. 48
Figura 12 – Dimensões da barragem para o exemplo prático de escoamento em meio poroso. 50
Figura 13 – Resultado do exemplo prático, a) Obtido no ABAQUS, b) Obtido pelo script computacional pelo python, c) Comparação dos resultados Entre o ABAQUS x Script x CADAM. 51
Figura 14 – Resultados obtidos para as tensões verticais (N): a) Script computacional mecânico, b) Acoplamento *One way*. 52
Figura 15 – a) Convergência de malha para os pontos na seção estudada, b) Valores da tensão vertical dos modelos numéricos mecânico, SAP2000, acoplamento One way e CADAM. 53
Figura 16 – Fluxo de trabalho ABAQUS. 55
Figura 17 – Localização dos pontos para teste de convergência na barragem retangular. 56
Figura 18 – Convergência de malha para os pontos na barragem, utilizando o erro na comparação Numérico X Analítico. 57

Figura 19 – Implementação do modelo numérico no ABAQUS, a) Condições de contorno na seção estudada, b) Discretização adotada dos elementos finitos. . 58
Figura 20 – Implementação do Modelo no CADAM. 59
Figura 21 – Configuração das combinações de carregamento no CADAM. 60
Figura 22 – Fluxograma de trabalho no CADAM. 61
Figura 23 – Comparação da Tensão Normal obtidos no ABAQUS e CADAM, a) Na base, b) Na altura 2,5m, c) Na altura de 5,0m e d) Na altura de 7,5m. 62
Figura 24 – Comparação da Tensão Cisalhante obtidos no ABAQUS e CADAM, a) Na base, b) Na altura 2,5m, c) Na altura de 5,0m e d) Na altura de 7,5m. 63
Figura 25 – Contorno da Poropressão (Pa) na análise hidromecânica acoplada no ABAQUS. 64
Figura 26 – Comparação da Poropressão obtidos no ABAQUS e CADAM, a) Na base, b) Na altura 2,50 m, c) Na altura de 5,00 m e d) Na altura de 7,50 m. 65
Figura 27 – Verificação da diferença da tensão ABAQUS (CO) – Poropressão = Tensão Estática Estrutural (UN), a) Na base, b) Na altura 2,5m, c) Na altura de 5,0m e d) Na altura de 7,5m. 66
Figura 28 – Barragem de Jucazinho no município de Surubim-PE, a) Vista à montante, b) vista à jusante. 67
Figura 29 – Seção vertente da Barragem de Jucazinho. 68
Figura 30 – Localização dos pontos no modelo Numérico para teste de convergência. 72
Figura 31 – Convergência de malha para os pontos na barragem de Jucazinho, utilizando a diferença relativa na comparação Numérico X Analítico. 72
Figura 32 – Implementação do modelo numérico da barragem de Jucazinho no ABAQUS, a) Condições de contorno na seção estudada, b) Aproximação para indicar as camadas com propriedades físicas diferentes. 73
Figura 33 – Discretização dos elementos finitos da seção vertente da Barragem de Jucazinho. 75
Figura 34 – Comparação da Tensões Normais σyy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) na Base da barragem, b) 10m. 77
Figura 35 – Comparação da Tensões Normais σyy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m acima da base da barragem. 78

Figura 36 – Comparação da Tensões Cisalhantes τxy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) na Base da barragem, b) 10m. 79
Figura 37 – Comparação da Tensões Cisalhantes τxy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m. 80
Figura 38 – Comparação da Tensões Normais σyy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) na Base da barragem, b) 10m. 81
Figura 39 – Comparação da Tensões Normais σyy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m. 82
Figura 40 – Comparação da Tensões Cisalhantes τxy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) na Base da barragem, b) 10m. 83
Figura 41 – Comparação da Tensões Cisalhantes τxy obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m acima da base da barragem. 84
Figura 42 – Comparação da Poropressão obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) na Base da barragem, b) 10m acima da base da barragem. 85
Figura 43 – Comparação da Poropressão obtidas no CADAM e ABAQUS da barragem de Jucazinho análise Hidromecânica Acoplada, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m. 86
Figura 44 – Poropressão dos modelos numéricos do ABAQUS (Pa), a) ABAQUS Íntegro (CO), b) ABAQUS CCR+ CC (CO), c) ABAQUS + DRENO (CO) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (CO). 87
Figura 45 – Tensão Principal Máxima σmax (Pa) obtida nos modelos numéricos de análise estática estrutural, a) ABAQUS Íntegro (UN), b) ABAQUS CCR+ CC (UN), c) ABAQUS + DRENO (UN) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (UN). 88
Figura 46 – Tensão Principal Mínima σmin (Pa) obtido nos modelos numéricos de análise estática estrutural, a) ABAQUS Íntegro (UN), b) ABAQUS CCR+ CC (UN), c) ABAQUS + DRENO (UN) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (UN). 89
Figura 47 – Tensão Principal Máxima σmax (Pa) obtidas nos modelos numéricos do ABAQUS Hidromecânica Acoplada, a) ABAQUS Íntegro (CO), b) ABAQUS CCR+ CC (CO), c) ABAQUS + DRENO (CO) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (CO). 90

Figura 48 – Tensão Principal Mínima σmin (Pa) obtidas nos modelos numéricos do ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) ABAQUS Íntegro (UN), b) ABAQUS CCR+ CC (UN), c) ABAQUS + DRENO (UN) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (UN). 91
Figura 49 – Deslocamento total absoluto nos modelos numéricos do ABAQUS da barragem de Jucazinho, a) Análise estática estrutural (UN), b) Análise Hidromecânica Acoplada (CO). 92
Figura 50 – Fluxo de implementação do *plug-in* PyADam para o ABAQUS. 93
Figura 51 – Acionar o Plug-in PyADam no ABAQUS. 94
Figura 52 – Interface da aba dos dados de entrada no *Plug-in* PyADam Pré-Processing no ABAQUS. 96
Figura 53 – Interface da aba dos dados físicos dos materiais no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS. 97
Figura 54 – Interface da aba do estágio da solução no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS. 98
Figura 55 – Interface da aba da especificação de carregamento e das condições de contorno no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS. 100
Figura 56 – Interface da aba da configuração e indicação do tamanho da malha no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS. 101
Figura 57 – Interface da aba da criação do arquivo de trabalho no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS. 102
Figura 58 – Interface da Janela do Plug-in PyADam-Processing no ABAQUS. 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade dos materiais utilizados nos modelos. 54
Tabela 2 – Resultados da convergência de malha para os pontos na barragem, utilizando as tensões verticais em kPa e o Erro (%). 57
Tabela 3 – Parâmetros físicos adotados para a barragem de Jucazinho. 70
Tabela 4 – Resultados da convergência de malha para os pontos na barragem de Jucazinho, utilizando as tensões verticais em kPa e o Erro relativo (%). 73
Tabela 5 – Quantidade de elementos e nós por camada de material utilizado na solução numérica da combinação E na análise UN. 75
Tabela 6 – Deslocamento absoluto na crista da barragem em mm e o Discrepância (%). 92

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO, JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO 18

1.2 BREVE REVISÃO DA LITERATURA 20

1.3 OBJETIVOS 23

1.3.1 Objetivo Geral 23

1.3.2 Objetivos Específicos 23

1.4 METODOLOGIA 23

1.5 ABRANGÊNCIA E LIMITAÇÕES 24

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 25

2 SOLUÇÃO COMPUTACIONAL DO PROBLEMA DE FLUXO EM MEIOS POROSOS 26

2.1 FORMULAÇÃO PARA REGIME ESTACIONÁRIO 26

2.1.1 Dedução Geral 26

2.1.2 Discretização dos Problemas utilizando Elemento Finitos 28

2.2 ACOPLAMENTO HIDROMECÂNICO 30

2.2.1 Acoplamento Total 31

2.2.2 Acoplamento Parcial 32

3 METODOLOGIA 34

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO MODELO NUMÉRICO 34

3.2 PROCEDIMENTOS PARA MODELAGENS NUMÉRICAS EM BARRAGENS DE GRAVIDADE DE CONCRETO 35

3.2.1. Importância de seguir Procedimentos de Montagem 36

3.2.2. Considerações Geométricas 37

3.2.3. Consideração do Maciço Rochoso 38

3.2.3.1. Condições de Contorno Definidas Diretamente na Fundação da Barragem 39

3.2.3.2. Rocha considerada implicitamente 39

3.2.3.3. Rocha incluída no modelo numérico 40

3.2.4. Ações de Carregamento 40

3.2.4.1. Cargas de gravidade 41

3.2.4.2. Pressão Hidrostática da Água 41

3.2.4.3. Subpressão da Água. 43

3.3 APLICAÇÃO PRÁTICA DE ESCOAMENTO EM MEIO POROSO 49

3.4 APLICAÇÃO PRÁTICA DO ACOPLAMENTO PARCIAL *ONE WAY* 51

4 MODELO SIMPLIFICADO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO 54

4.1. DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO MODELO NUMÉRICO 54

4.1.1. Estudo de Convergência da Malha 55

4.1.2. Modelo Numérico 57

4.1.3. Descrição da Montagem do Modelo no CADAM para os Resultados de Referência 59

4.2 RESULTADOS DAS TENSÕES OBTIDAS NO MODELO SIMPLIFICADO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO 61

4.2.1 Comparação dos Modelos Numéricos 61

4.2.2 Comparação dos Modelos Numéricos 64

5. BARRAGEM DE JUCAZINHO 67

5.1 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DA BARRAGEM DE JUCAZINHO 70

5.1.1. Estudo de Convergência da Malha na Barragem de Jucazinho 71

5.1.2. Modelo Numérico da Barragem de Jucazinho 73

5.2 RESULTADOS DAS TENSÕES OBTIDAS NOS MODELOS DA BARRAGEM DE JUCAZINHO 75

5.2.1. Comparação dos Modelos Numéricos com a Análise Estática Estrutural da Barragem de Jucazinho 76

5.2.2. Comparação dos Modelos Numéricos com a Análise Hidromecânica Acoplada da Barragem de Jucazinho 80

5.2.3. Tensões Principais dos Modelos Numéricos com a Análise Estática Estrutural da Barragem de Jucazinho 87

5.2.4. Tensões Principais dos Modelos Numéricos com a Análise Hidromecânica Acoplada da Barragem de Jucazinho 89

5.2.5. Variação dos Deslocamento nos Modelos Numéricos na Barragem de Jucazinho 91

6 PROGRAMAÇÃO DIRECIONAL PARA O ABAQUS 93

6.1 PARTICULARIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DO PLUG-IN NO ABAQUS 94

6.2 VISÃO GERAL DOS PRINCIPAIS RECURSOS 95

7 CONCLUSÃO 104

7.1 MODELOS NUMÉRICOS 104
7.2 PLUGIN..... 105
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 106
7.3. LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DOS ESTUDOS REALIZADOS 106
7.3.1. Modelagens numéricas de Barragens de Concreto..... 107
7.3.2. Aplicação do Programação Direcional para o ABAQUS 107
REFERÊNCIAS 109
APÊNDICE A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO EXEMPLO PRÁTICO DE ESCOAMENTO EM MEIO POROSO 115
APÊNDICE B – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO EXEMPLO PRÁTICO PARA ANÁLISE MECÂNICA 116
APÊNDICE C – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO PLUG-IN PYADAM..... 117

1 APRESENTAÇÃO, JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

As barragens são um tipo de infraestrutura hidráulica desenvolvida pela humanidade para controlar água na superfície. Sendo um elemento de alto grau de importância socioeconômico de uma região, seus usos mais comuns são: (i) reservatórios de água para abastecimento público, (ii) geração de hidroeletricidade, (iii) usos para fins industriais, retenção de rejeitos de mineração e (iv) navegação.

Quando utilizado para a retenção de água, um dos principais usos é o controle de inundações extremas e manutenção hídrica e a captação de água em períodos de secas. Por isso, muitas barragens são enormes estruturas que necessitam de acompanhamento visando a prevenção de falhas e minimizando ocorrências de incidentes e acidentes (ANA, 2023).

No Brasil há Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB, estabelecida pela Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (Brasil, 2020) por meio de um documento com periodicidade anual que é o Relatório de Segurança de Barragens – RSB.

A lei tem o objetivo de apresentar à sociedade um panorama da evolução da gestão da segurança das barragens brasileiras, apontando diretrizes para a atuação dos órgãos fiscalizadores de barragens, dos empreendedores e dos órgãos de proteção e defesa civil, além de destacar os principais acontecimentos no ano de referência (ANA, 2023).

Segundo Abdi e Ntzimanis (2022), as barragens devem ser monitoradas e geridas para que se tenha o conhecimento do seu desempenho, evitando problemas de estabilidade e integridade que possam levar ao colapso da barragem. Ao reavaliar a estabilidade estrutural de barragens de concreto, atualmente assume-se que a barragem é um corpo rígido, e o equilíbrio estático é avaliado comparando as forças estabilizadoras e desestabilizadoras que atuam na barragem (Ruggeri, 2004).

No Brasil há 23.978 barragens segundo (ANA, 2023) com vários tipos de materiais constituintes. Dessas 1.244 são exclusivamente de concreto compactado a rolo (CCR), alvenaria, concreto ciclópico, concreto convencional e enrocamento.

A carga hidráulica total em barragens de concreto é difícil de ser mensurada devido a permeabilidade do material que muitas vezes não é considerada, pois o fluxo em regime estacionário tem uma grande influência na deformação, campo de tensões e na estabilidade de estruturas hidráulicas (Khanzaei, 2017).

A utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF) na análise hidromecânica permite mensurar fluxo do regime estacionário para qualquer tipo de material (Moura, 2016), essa abordagem proporciona uma verificação mais abrangente nas tensões das barragens.

Portanto, é de grande importância para a segurança das barragens de gravidade o conhecimento das propriedades mecânicas e hidráulicas de materiais constituintes, da fundação rochosa e a intensidade das tensões atuantes, visando principalmente manter a vida útil da estrutura hidráulica (Sha e Zhang, 2017).

A maioria das pesquisas sobre as barragens de CCR, ou concreto, ou outro material de baixa permeabilidade (Khanzaei, 2017) concentra-se principalmente em três campos distintos, que são: (i) Método de construção, (ii) Tecnologia de materiais, e (iii) Simulação numérica. O foco do presente estudo é a simulação numérica hidromecânica de barragens de CCR.

Basicamente, a resolução de um problema hidromecânico implica resolver as três equações fundamentais das leis do movimento: a equação da conservação da massa e a equação da conservação equilíbrio mecânico, junto com as condições de contorno aplicadas ao fluxo, essas equações definem integralmente o problema do escoamento (Bismarck-Nasr, 1993).

A modelagem em elementos finitos será realizada por meio do software comercial ABAQUS/CAE, da marca SIMULIA, pertencente à Dassault Systemes S.A. que é um programa que realiza cálculos de multifísica para diversos tipos de materiais e forma diferentes. O principal objetivo da simulação é obter deslocamentos, deformações e tensões em qualquer seção estudada, principalmente as informações relacionadas à poropressão.

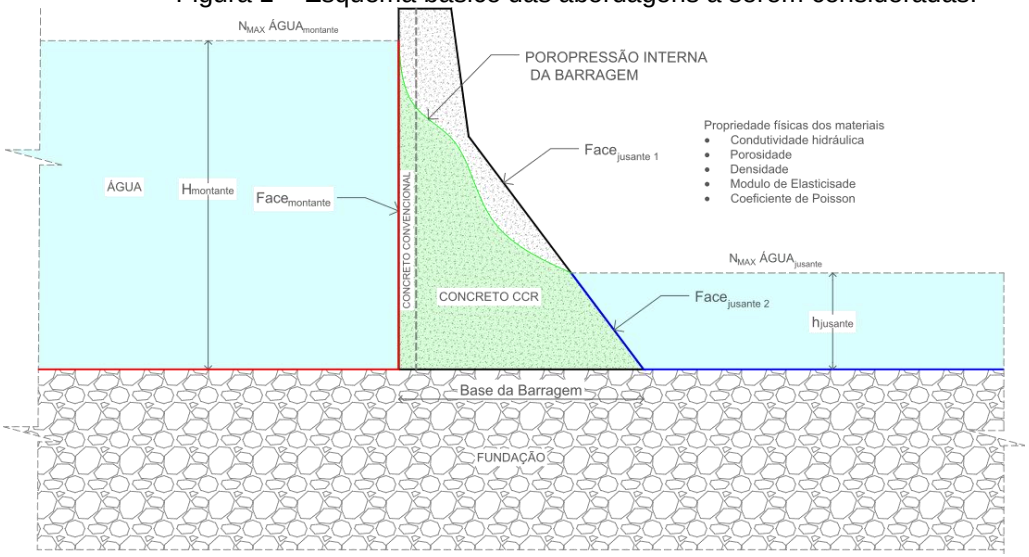
Conforme observado por Gutstein (2011), compreender a transição do problema físico para um modelo matemático é fundamental, especialmente quando a resolução das equações diferenciais é realizada de maneira numérica. Neste contexto, ao utilizar software ABAQUS, é relevante compreender como são consideradas as formulações físicas e matemáticas para problemas estruturais com fluxo de fluido.

Diante das considerações descritas o presente trabalho possui como estímulo o estudo da utilização do modelo hidromecânico nas análises de tensões em barragens de gravidade concreto, onde os materiais com propriedades físicas

diferentes interferem nos resultados. Além disso uma metodologia progressiva é desenvolvida para simplificar a modelagem MEF.

A Figura 1 ilustra o esquema do problema abordado durante toda a dissertação que consiste em verificar e comparar as tensões da barragem de concreto por meio de análise hidromecânica acoplada (CO) e análise estática estrutural (UN).

Figura 1 – Esquema básico das abordagens a serem consideradas.



Fonte: O autor, 2024.

1.2 BREVE REVISÃO DA LITERATURA

O trabalho de Loarte e Sohrabi (2017) utilizou modelos em MEF para simulação da propagação de trincas devido à pressão interna da água em conjunto com ensaios laboratoriais, com o intuito de comparação e conhecimento de todo o processo de fissuração devido à pressão da água.

Khanzaei (2017) verificou o comportamento não linear de uma barragem de CCR com fissuras oriundas de eventos sísmicos e de efeitos térmicos acoplados às solicitações mecânicas, de forma que as manifestações patológicas podem progredir ainda mais sob a ação da pressão de água dentro delas, podendo afetar a estabilidade da estrutura.

Jensen (2013) fez vários modelos MEF no ABAQUS para mensurar o fator de segurança conforme normas e especificações norte americanas, em algumas análises foram consideradas a inclusão de fissuras, drenos na fundação e vários tipos de

materiais na fundação e com permeabilidades diferentes, o foco principal foi na região entre a barragem e a fundação.

Abdi e Ntzimanis (2022) estudaram a influência da poropressão no interior das falhas da rocha, que é fundação de uma barragem em contraforte, as análises numéricas em MEF foram da seguinte forma: (i) a presença de drenagem, (ii) cortina de argamassa e (iii) fraturas da rocha de fundação. Todos os resultados das análises numéricas foram comparadas com medições de campo e resultados analíticos.

Em um contexto nacional o trabalho de Gutstein (2011) reuniu todas as recomendações e procedimentos técnicos para o desenvolvimento de um projeto estrutural de barragens de gravidade em concreto com o uso do MEF. Ao longo do estudo há explicações sobre a necessidade de considerar a deformabilidade da fundação e a subpressão no modelo numérico da barragem.

Recentemente Aguiar (2022) realizou um estudo na barragem de Jucazinho considerando a ação de efeitos de terremotos por meio de metodologias modernas, na qual foram realizadas: (i) análise pseudo-estática, (ii) análise pseudo-dinâmica, (iii) análise transiente no tempo e (iv) análise de não linearidade física dos materiais que compõe a estrutura.

McKay e Lopez (2014) apresentaram uma metodologia para aplicação da subpressão em modelos numéricos em MEF de barragens de concreto, o procedimento consiste em realizar análises acopladas de escoamento em regime estacionário de uma barragem de concreto. Na análise em regime estacionário são aplicadas as solicitações do reservatório referente as águas residuais como condições de contorno do sistema. Na análise de tensões, as pressões hidráulicas obtidas a partir da análise de fluxo são automaticamente convertidas em carga, que pode ser combinadas com outros carregamentos convencionais na barragem, como gravidade, temperatura, solicitações hidrostáticas e hidrodinâmicas.

Dependendo do tipo de verificação segundo Abdi e Ntzimanis (2022), diferentes resoluções do modelo podem ser empregadas como nos casos em que o comportamento não linear do concreto (fissuração e esmagamento) é analisado, podem ser necessários elementos significativamente menores do que em uma análise linear correspondente.

Malm (2016) recomenda que geralmente é melhor utilizar muitos elementos simples, em vez de poucos elementos de ordem superior, enquanto Minera et al.

(2018) indica que ao utilizar camadas muitos pequenas de materiais diferentes é recomendado a utilização de elementos de alta ordem.

Outra situação é usar elementos com integração reduzida, pois há um menor custo computacional, mas existem riscos e desvantagens que são os modos de deformação que ocorrem nos elementos. O principal risco é que essas deformações dos elementos resultem em modos de energia zero, o que subestima a rigidez e as tensões da estrutura (Chaves Junior, 2022).

Partindo da premissa de um problema de hidromecânico de barragens com várias camadas de materiais é recomendado aumentar a precisão da análise por elementos finitos (FE) por meio de uma discretização mais refinada da estrutura, utilizando mais elementos ou optando por elementos de ordem superior (Minera *et al.*, 2018).

A fim de melhorar a precisão da análise numérica Abokwiek et al. (2022) aconselha incrementar o número de elementos ou substituir elementos de ordem inferior (com funções de forma linear) por elementos de ordem superior (com funções de forma quadrática).

Ao desenvolver análises em elementos finitos é recomendado a realização de teste de convergência do resultado. Isso implica que duas análises são realizadas com discretização diferente, por exemplo, com tamanhos de elemento diferentes, ou linear em comparação com elementos quadráticos (Aguiar, 2022).

Se os resultados dessas duas análises forem idênticos, estando dentro da margem de arredondamento ou truncamento, o modelo com o tamanho maior do elemento é considerado suficiente para ser usado nos estudos (Aguiar, 2022; Aguiar, Araújo e Ribeiro, 2021).

Alguns trabalhos (Christoff *et al.*, 2020; Ismail *et al.*, 2022; Omairey, Dunning e Sriramula, 2019; Ye e Wang, 2017) foram realizados com o objetivo de simplificar o desenvolvimento da modelagem numérica por meio do software comercial ABAQUS, onde todos contêm o procedimento semelhante de programação para a montagem dos seus respectivos modelos, mas com aplicação direcionada conforme o uso desejado do código e todos os trabalhos obtiveram resultados consistentes e validados.

1.3 OBJETIVOS

Demonstrar a solução de modelos hidromecânicos acoplados para análise de tensões em barragens de concreto considerando subpressões no modelo numérico que impactam diretamente nos valores dos esforços utilizados para garantir a estabilidade da infraestrutura hidráulica.

1.3.1 Objetivo Geral

Comparar os esforços geradas por diferentes abordagens físicas para barragens de concreto e seus respectivos procedimentos de modelagem para obtenção dos valores de tensões utilizadas para o dimensionamento e otimização do projeto com o emprego de sistemas de controle de infiltração.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

a) Apresentar o estado da arte para o cálculo de tensões em barragens de forma analítica e numérica;
b) Comparar os cálculos nas condições acoplada e desacoplada;
c) Comparar as tensões de uma barragem real em a sua forma íntegra considerando: (i) uma camada a montante de concreto convencional, (ii) a presença de dreno e (iii) combinação dos outros casos anteriores;
d) Desenvolver código de programação direcionado para a modelagem de barragens de concreto considerando efeitos hidromecânico.

1.4 METODOLOGIA

A abordagem metodológica adotada neste estudo, conforme descrito por Azevedo (2020), baseia-se em uma pesquisa teórico-conceitual, compreendendo a comparação entre os resultados analíticos e numéricos, tanto para um modelo simplificado de uma barragem de concreto quanto para o modelo da barragem de Jucazinho.

O processo metodológico abrange os seguintes pontos: (i) detalhamento das dimensões e propriedades físicas do modelo, (ii) descrição do processo de montagem dos modelos numérico e analítico, e (iii) análise da convergência da malha.

Na aplicação conceitual, foi desenvolvida uma abordagem direcional de programação, projetada para ser utilizada no software ABAQUS no contexto do desenvolvimento de barragens de concreto. No transcorrer do estudo são fornecidos uma visão detalhada de toda a metodologia empregada nesta dissertação.

As simulações realizadas neste estudo foram executadas em um computador equipado com um processador Intel Core I7-10750H de 2,60 GHz, que dispõe de 6 núcleos de processamento. Além disso, possui uma memória RAM de 16 GB e conta com uma placa de vídeo GPU NVIDIA GeForce RTX 2060, que oferece 6 GB de memória dedicada.

Os softwares utilizados e suas respectivas versões foram as seguintes: (i) CADAM (*Computer Analysis of Concrete Gravity DAM's*) versão 1.4.14, datada de julho de 2004; (ii) ABAQUS/CAE, na versão 126836, lançada em setembro de 2016; (iii) *Spyder* (Anaconda) versão 5.4.3; e (iv) Python versão 3.11.3 64-bit.

1.5 ABRANGÊNCIA E LIMITAÇÕES

Tendo em vista as principais formas de estudar e verificar barragens de gravidade de concreto, este trabalho abrange os seguintes estudos:

- Diferenciar quantitativamente a particularidade entre a modelagem numérica estática estrutural e a hidromecânica acoplada;
- Indicar as possíveis diferenças de valores que podem ocorrer ao se considerar camadas com propriedades físicas diferentes em barragens de concreto;
- Elaborar programação direcional para o software ABAQUS para o desenvolvimento de modelos numéricos de barragens de concreto, a fim de munir o profissional com uma ferramenta de trabalho para os estudos de tensões em barragens de concreto.

No quesito de limitação o presente estudo apresenta as seguintes ponderações:

- O fluido é homogêneo, invíscido, incompressível, sem escoamento (meio acústico), com movimento irrotacional e com deslocamentos e suas derivadas espaciais pequenos;

- Todas as modelagens desenvolvidas são bidimensionais;
- Não são realizadas análises transientes, inclusão de efeitos térmicos e a consideração de fluência;
- A programação direcional incorporada no *plug-in* é exclusiva para o software comercial ABAQUS.
- A limitação atual do *plug-in* é a criação modelos com várias camadas decorre da versão específica do ABAQUS/CAE 2016, que suporta apenas um tipo de plataforma *Graphical User Interface* (GUI), sendo a *rgs.GUI*. Isso impede a execução parcial ou por abas do script enviado ao kernel para realizar tarefas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo apresenta a introdução com as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos do estudo, a metodologia e a abrangência e limitação.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico para a formulação numérica para o fluxo em meio poroso com exemplo prático.

O capítulo 3 apresenta a metodologia da dissertação com consideração e indicação dos procedimentos para a modelagem numérica de barragens de concreto.

O capítulo 4 apresenta o contexto do problema com o modelo simplificado de uma barragem de concreto, com estudo de convergência, montagem no ABAQUS e CADAM, comparação e os resultados.

O capítulo 5 apresenta a barragem de Jucazinho com a comparação e a demonstração das tensões para todos os tipos de modelos considerados.

O capítulo 6 apresenta a programação direcional de barragens de concreto para o ABAQUS mostrando as particularidades e uma visão geral.

O Capítulo 7 apresenta a conclusão e o direcionamento para trabalhos futuros e aplicações dos estudos realizados.

2 SOLUÇÃO COMPUTACIONAL DO PROBLEMA DE FLUXO EM MEIOS POROSOS

O propósito deste capítulo é apresentar os conceitos e definições fundamentais, tanto físicos quanto matemáticos e de fluxo em meio poroso podendo ser aplicável em barragens de concreto. Isso visa estabelecer a base teórica necessária para esta dissertação.

2.1 FORMULAÇÃO PARA REGIME ESTACIONÁRIO

A formulação desenvolvida neste item é aplicável frequentemente na prática da engenharia para os seguintes problemas físicos segundo Zienkiewicz, O.C.; R.L. (2013): (i) Condução de calor, (ii) Fluxo em meios porosos, (iii) Potencial elétrico (ou magnético), (iv) Torção de eixos prismáticos, (v) Lubrificação de rolamentos de pastilhas etc. Todas as demonstrações são bidimensionais.

2.1.1 Dedução Geral

Em muitas situações físicas há preocupação com o fluxo em meios porosos, mas esse mesmo problema também está associado a conservação de calor, massa ou reação química. Em tais problemas o fluxo é dado por unidade de área denominado por q, podendo ser escrito em termos dos componentes cartesianos, conforme a Equação 1.

$$q^T = [q_x \quad q_y] \tag{1}$$

Se a taxa na qual a quantidade é gerada por unidade de volume for Q, então o fluxo em estado estacionário requer estar em estado de equilíbrio ou continuidade, conforme representado na Equação 2.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + Q = 0 \tag{2}$$

A Equação 3 apresenta o operador gradiente,

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y}\right]^T \tag{3}$$

Podemos reescrever a Equação 2 conforme demonstrado na Equação 4,

$$\nabla^T q + Q = 0 \tag{4}$$

Geralmente os fluxos estarão relacionados com os gradientes de quantidade ∅, que podem ser de temperatura, no caso de fluxo de calor, ou etc., mas há uma relação linear geral como indicado na Equação 5.

$$q = \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -k \begin{Bmatrix} \frac{\partial \emptyset}{\partial x} \\ \frac{\partial \emptyset}{\partial y} \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \emptyset}{\partial x} \\ \frac{\partial \emptyset}{\partial y} \end{Bmatrix} = -k\nabla\emptyset \tag{5}$$

Onde k é uma matriz dois por dois, no presente trabalho é permeabilidade do material, geralmente é de forma simétrica. Dependendo da física envolvida pode ser enquadrada na Lei Fourier, Fick ou Darcy. A Equação 5 pode ser substituída na Equação 4, que deve ser resolvido no domínio Ω.

$$-\nabla^T k\nabla\emptyset + Q = 0 \tag{6}$$

Nos limites do domínio é encontrado normalmente as seguintes condições de contorno:

1. Em Γ_ϕ quando carga hidráulica total é informada.

$$\phi = \bar{\phi} \tag{7.a}$$

2. Em Γ_ϕ, a componente normal do fluxo, q_n, é dada como

$$q_n = \bar{q} + \alpha\phi \tag{7.b}$$

Onde α é um coeficiente de transferência (velocidade normal), como:

$$q_n = q^T n \qquad \text{e} \qquad n^T = [n_x \quad n_y]$$

Onde n é um vetor de direção dos cossenos da normal à superfície. Esta condição pode ser reescrita conforme a Equação 7, onde $\bar{q}$ e α são fornecidos.

$$(\mathrm{k}\nabla\phi)^T + \bar{q} + \alpha\phi = 0 \tag{7}$$

Seguindo a forma fraca da Equação 6 para todas as funções de v são zero em Γ_ϕ.

$$\int_{\Omega} v\,(-\mathrm{k}\nabla^{T}\phi + \mathrm{Q})d\Omega + \int_{\Gamma_q} v\,[(\mathrm{k}\nabla^{T}\phi)^{T}n + \bar{q} + \alpha\phi]d\Gamma = 0 \qquad (8)$$

A Equação 8 é resolvida por integração por partes, que resultará formulação fraca que é equivalente e satisfaz as equações governantes e as condições de contorno naturais (Equação 7b)

$$\int_{\Omega}(\nabla v)^{T}\mathrm{k}\nabla\phi d\Omega + \int_{\Omega} v\mathrm{Q}d\Omega + \int_{\Gamma_q} v\,(\bar{q} + \alpha\phi)d\Gamma = 0 \qquad (9)$$

A condição de contorno da Equação 7b ainda precisa ser imposta (Zienkiewicz, O.C.; R.L., 2013).

2.1.2 Discretização dos Problemas utilizando Elemento Finitos

Prosseguindo na suposição de uma expansão de função experimental

$$\phi = \sum N_i a_i = Na \qquad (10)$$

Usando a formulação fraca da Equação 9 (Zienkiewicz, O.C.; R.L., 2013), temos:

$$v = \sum W_i \delta a_i \;\text{ com }\; W_i = N_i \qquad (11)$$

Substituindo a Equação 11 na Equação 9, temos uma formulação típica dando a Equação 12.

$$\left(\int_{\Omega}(\nabla \mathrm{N}_i)^{T}\mathrm{k}\nabla \mathrm{N}d\Omega + \int_{\Gamma_q} \mathrm{N}_i\alpha N\,d\Gamma\right)a + \int_{\Omega} \mathrm{N}_i\mathrm{Q}d\Omega + \int_{\Gamma_q} \mathrm{N}_i\bar{q}\,d\Gamma = 0 \qquad i = 1, \ldots,\mathrm{n} \qquad (12)$$

Com um conjunto de equações discretas padrão da forma da Equação 13

$$-Ha - f = 0 \qquad (13a)$$

Com

$$H_i = -\int_{\Omega}(\nabla \mathrm{N}_i)^{T}\mathrm{k}\nabla \mathrm{N}d\Omega + \int_{\Gamma_q} \mathrm{N}_i\alpha N\,d\Gamma \qquad f_i = -\int_{\Omega} \mathrm{N}_i\mathrm{Q}d\Omega + \int_{\Gamma_q} \mathrm{N}_i\bar{q}\,d\Gamma \qquad (13b)$$

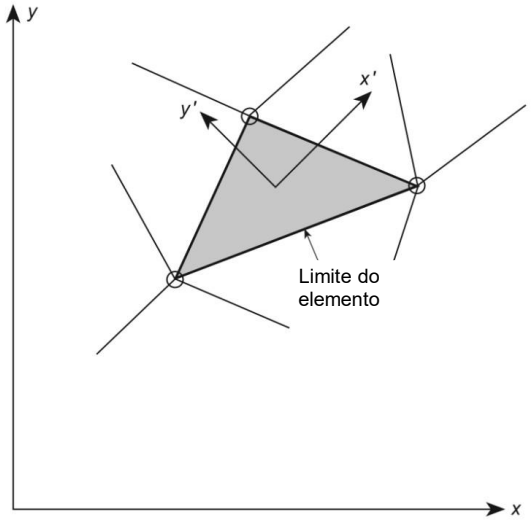
Os valores prescritos de $\bar{\phi}$ devem ser impostos no limite Γ_{ϕ}. Nota-se que agora uma rigidez adicional é introduzida nas fronteiras para as quais uma constante de radiação α é especificada, mas há uma analogia com o problema estático estrutural.

Os programas computacionais realizam as mesmas operações incluindo quantidades análogas as tensões, que são os fluxos.

$$q \equiv -k\nabla\emptyset = -(k\nabla N)a \tag{14}$$

As propriedades dos materiais definidas pela matriz k podem variar de elemento para elemento de maneira descontinua. As propriedades do material são geralmente conhecidas apenas em relação aos eixos principais (ou simetria), e as direções forem constantes dentro do elemento, é conveniente usá-las na formulação dos eixos locais especificando dentro de cada elemento com a Figura 2.

Figura 2 – Material anisotrópico, com as coordenadas locais coincidentes com as principais direções de estratificação.



Fonte: (Zienkiewicz, O.C.; R.L., 2013).

Com relação aos eixos k_x, k_y precisam ser especificados e multiplicados por uma matriz diagonal, sendo necessário na formulação de coeficientes da matriz H negativa demonstrando na Equação 13.

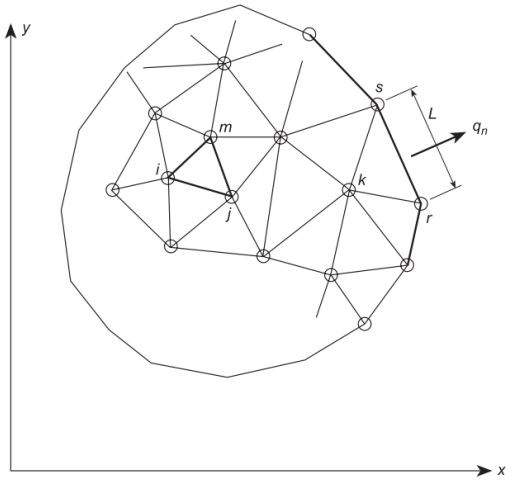
É importante notar que como os parâmetros a, correspondente a valores escalares, nenhuma transformação de matriz computadas em coordenadas locais é necessária antes da montagem das matrizes globais.

Na discretização da Equação 12 uma forma ligeiramente simplificada das matrizes será encontrada, eliminando os termos α e $\bar{q}$ conforme indicado na Equação 15.

$$[H]_{ij}^{e} = \int_{V^e} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x}\frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y}\frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dxdy \tag{15}$$

Para a demonstração de um exemplo prático a ser empregado no próximo item, a formulação será particularizada para um elemento triangular mais simples conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Divisão de uma região bidimensional qualquer em elementos triangulares.



Fonte: (Zienkiewicz, O.C.; R.L., 2013).

A função de forma para um caso particular de um elemento triangular N_i é definida pela Equação 16 (Zhu, 2018), onde Δ é a área do triângulo:

$$N_i = \frac{a_i + b_i x + c_i y}{2\Delta} \tag{16}$$

A matriz de rigidez do elemento é dada pela Equação 17.

$$H^e = \frac{k_x}{4\Delta}\begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_m \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_m \\ b_m b_i & b_m b_j & b_m b_m \end{bmatrix} + \frac{k_y}{4\Delta}\begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_m \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_m \\ c_m c_i & c_m c_j & c_m c_m \end{bmatrix} \tag{17}$$

Os termos b_i, b_j, b_m, c_i, c_j e c_m são as coordenadas cartesianas globais dos pontos de cada elemento triangular. A matriz de carga segue o mesmo padrão semelhante conforme demonstrado na Equação 18.

$$f^e = -\frac{Q\Delta}{3}[1 \quad 1 \quad 1]^T \tag{18}$$

2.2 Acoplamento Hidromecânico

A obtenção das tensões hidromecânicas se dá pela consideração do fluxo em meio poroso, conforme demonstrado no item anterior, e a consideração dos esforços

mecânicos. Existem várias abordagens que podem considerar os efeitos hidromecânicos acoplados em análises geomecânicas. A formulação numérica demonstrada por Lima, Guimarães e Pereira (2021) é um procedimento bastante prático de ser empregado.

Vale salientar que hidroacoplamento mecânico pode ser desenvolvido: (i) análise numérica total onde os cálculos de fluxos e deslocamento são obtidos de forma simultânea no mesmo sistema de equações e (ii) parcialmente acoplada onde é resolvido inicialmente o problema de fluxo e os resultados são adicionados ao modelo de elementos finitos que executa as equações de equilíbrio (Lima, 2019).

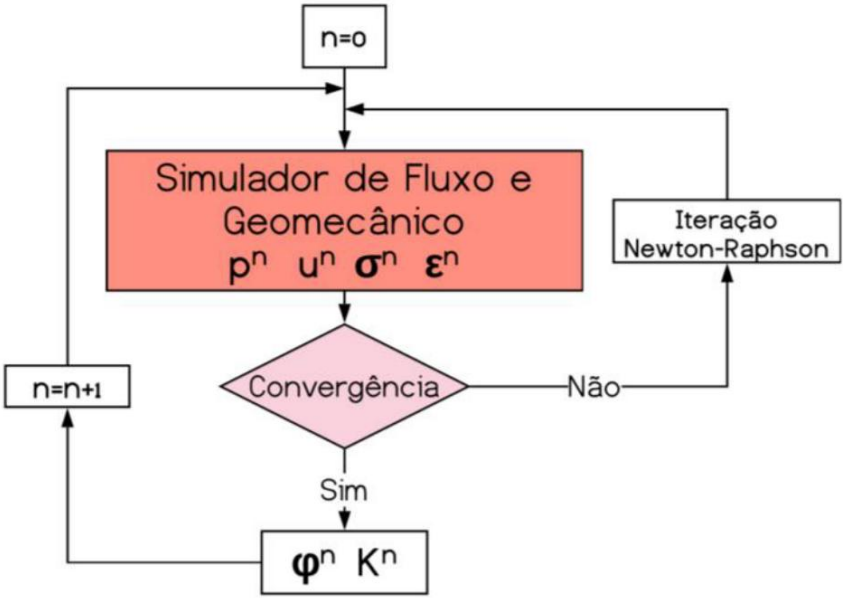
Existem circunstâncias em que o estado de tensão do meio poroso pode ser afetado pelas características físicas dos materiais ou compressibilidade de sólidos, essa situação é denominado de coeficiente de Biot Jesus (2012). No entanto em meios elásticos isotrópicos, homogêneos e lineares, o parâmetro de Biot não interfere no comportamento do meio poroso.

2.2.1 Acoplamento Total

A modelagem numérica utiliza a abordagem de poroelasticidade, onde os resultados do acoplamento total podem ser adquiridos por meio da análise numérica simultânea da equação da continuidade, equação de equilíbrio, princípio das tensões efetivas de Terzaghi, relações tensão-deformação e das condições de contorno segundo demonstrado por (Lima, 2019). A Figura 4 mostra um fluxograma da abordagem de considerar o acoplamento total em uma modelagem numérica.

O ABAQUS utiliza essa abordagem, pois o meio poroso é simulado fixando a malha de elementos finitos à fase sólida, assim o fluido pode escoar por essa malha (ABAQUS, 2014). De modo geral, a parte mecânica do modelo é baseada no princípio da tensão efetiva enquanto o modelo também utiliza uma equação de continuidade para o fluido em uma unidade de volume de controle (ABAQUS, 2014).

Figura 4 – Fluxograma do Acoplamento Total.



Fonte: (Lima, 2019).

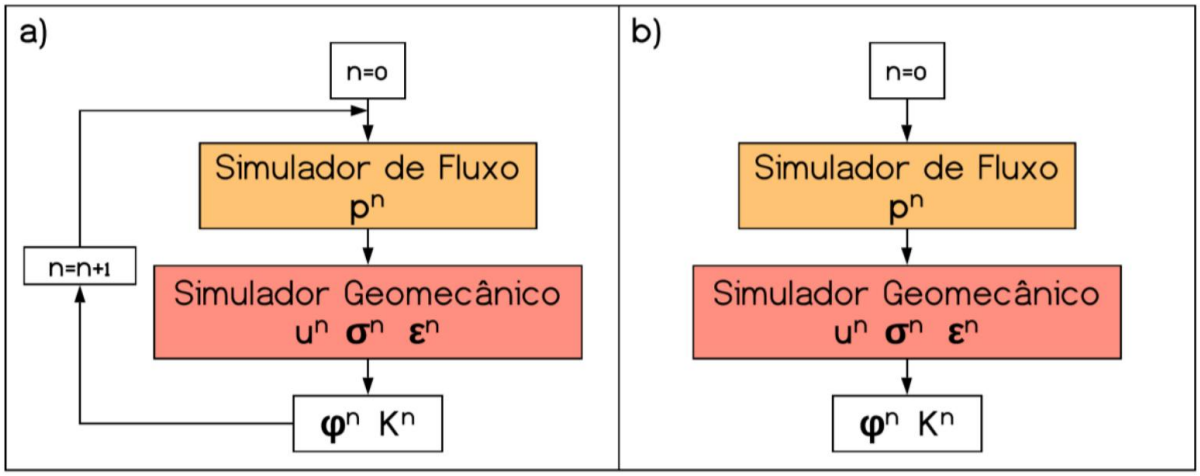
2.2.2 Acoplamento Parcial

Segundo (Lima, 2019) o procedimento do acoplamento parcial, ocorre quando as equações de fluxo e tensão são resolvidas separadamente e de forma sequencial, assim os dois problemas são resolvidos após alguns números de passos de tempo. Esse procedimento apresenta um baixo custo computacional quando comparado ao acoplamento total.

O acoplamento parcial pode ser classificado em dois tipos: (i) *one way* é a abordagem parcialmente acoplada mais simples, em que a distribuição de pressão advinda do simulador de fluxo é introduzida no módulo geomecânico como um carregamento e as modificações na porosidade e permeabilidade do meio em função da variação de tensões não retornam para o simulador de fluxo e (ii) *two way*, as variáveis de fluxo e mecânica são calculadas separadamente e sequencialmente, por um simulador numérico convencional e um programa de análises de tensão, respectivamente. Os parâmetros de acoplamento são trocados entre os simuladores para cada passo de tempo de acoplamento através de um programa gerenciador.

A Figura 5 mostra o fluxograma desenvolvido por (Lima, 2019), que demostra detalhadamente os tipos de acoplamento parcial.

Figura 5 – Fluxograma do acoplamento parcial a) Two Way, b) One Way.



Fonte: (Lima, 2019).

3 METODOLOGIA

Todas as especificações técnicas referentes às barragens de concreto enfatizam a importância de considerar a subpressão nos carregamentos aplicados à estrutura, porém, a maioria dessas especificações indica que a quantificação desse fenômeno é realizada por meio de dados analíticos (Moura, 2016).

O método proposto por FERC (2016) detalha uma metodologia para aplicação a subpressão em barragens de concreto, conforme demonstrado ao final do capítulo. No entanto, esse procedimento é indicado somente para modelos bidimensionais, pois a aplicação em modelos tridimensionais não é recomendada devido à complexidade da superfície que deve receber a carga resultante da pressão da água.

A obtenção das informações desejadas será realizada por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizando o software comercial ABAQUS/CAE, desenvolvido pela SIMULIA, marca da Dassault Systemes S.A (ABAQUS, 2014). O objetivo primordial da simulação é a obtenção precisa dos deslocamentos, deformações e tensões em qualquer ponto da seção em estudo (Helwany, 2007).

O propósito deste trabalho é demonstrar que, ao empregar um procedimento específico, é viável determinar a intensidade da pressão hidráulica dentro da barragem. Este procedimento é prático e facilmente aplicável em modelagens numéricas através de elementos finitos.

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO MODELO NUMÉRICO

Ao desenvolver um modelo numérico usando Elementos Finitos, é importante comparar sua precisão com situações conhecidas. Uma das abordagens recomendadas é a utilização de exemplos simples. Ao adotar esse método segundo Yang et al. (2022), os resultados de referência geralmente são obtidos de forma analítica, o que auxilia na consolidação e domínio das ferramentas empregadas.

Neste contexto, a modelagem do presente trabalho será restrita ao ambiente bidimensional, com o propósito primordial de comparar e consolidar as ferramentas utilizadas. A simulação será baseada em uma barragem de seção transversal retangular. A geometria selecionada pode ser equiparada às formulações de uma viga engastada, onde a base e a altura da barragem correspondem, respectivamente, à altura e ao vão da viga (Abdi e Ntzimanis, 2022).

Utilizando uma ferramenta direcionada para os problemas de barragens de concreto decidiu-se usar o software *Computer Aided Stability Analysis of Gravity Dams* (CADAM-2D) (Leclerc, Léger e Tinawi, 2003), uma ferramenta especializada em barragens de concreto e conhecida por produzir resultados analíticos. O CADAM-2D é um programa projetado para avaliar a estabilidade estática e sísmica de barragens de concreto por gravidade, baseando-se no método da gravidade USBR (1987). Esse software emprega o equilíbrio de corpo rígido e a teoria de vigas para conduzir análises de tensão, calcular comprimentos de fissuras e determinar os fatores de segurança.

As análises numéricas neste estudo têm como foco principal o uso de um solucionador ABAQUS dedicado a solos, apto para análises estruturais. Mas também será utilizado o solucionador estático. A comparação inicial compreenderá a comparação entre os dois tipos de solucionadores utilizados.

O solucionador estático do ABAQUS lida com problemas estruturais complexos, abrangendo análise de fadiga, estabilidade estrutural e comportamento de materiais sob deformação (ABAQUS, 2014). Especificamente voltado para resolução de questões de análise estática de estruturas, será referido neste estudo como análise estática estrutural não-acoplada (UN).

Por outro lado, o solucionador de solos do ABAQUS é empregado para estudar a resposta do solo a cargas aplicadas (ABAQUS, 2014; Helwany, 2007), como fundações de edifícios, estabilidade de taludes e análise de aterros, mas realizado o cálculo da poropressão, um dado importante a ser obtido.

O presente trabalho será destinado a resolver problemas geomecânicos direcionado a barragens de concreto com abordagem semelhante dos trabalhos Abdi e Ntzimanis (2022), Khanzaei, Samali e Zhang, (2017) e Lopes (2020), mas sendo denominado neste trabalho como análise hidromecânica acoplada (CO).

3.2 PROCEDIMENTOS PARA MODELAGENS NUMÉRICAS EM BARRAGENS DE GRAVIDADE DE CONCRETO

O desenvolvimento de projetos de barragens de gravidade de concreto são descritos em detalhes em vários documentos técnicos direcionados para barragem de concreto como por exemplo: (i) Design Manual for Concrete Gravity Dams - Bureau of Reclamation (USBR, 1987), (ii) Gravity Dam Design - Engineering and Design - United

States Army Corps of Engineers (USACE, 1995a), (iii) Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects: Chapter 3 - gravity dams - Federal Energy Regulatory Commission (FERC, 2016), (iv) Guideline for FE Analyses of Concrete Dams - Energiforsk (Malm, 2016), (v) Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRAS, 2003), Dam Safety Guidelines - Canadian Dam Association (CDA, 2013), (vii) Structural Safety of Cracked Concrete Dams - Energiforks (RIDAS, 2019) e (viii) Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2016).

Nesta seção serão abordados sobre a importância de seguir recomendações para montagem de modelos numéricos, a escolha do tipo de elemento, a discretização dos elementos (Minera *et al.*, 2018) e a importância da ação subpressão e poropressão em barragens de concreto, para a utilização das tensões totais e efetivas.

3.2.1. Importância de seguir Procedimentos de Montagem

O desenvolvimento de modelos numéricos deve seguir alguns procedimentos na montagem da modelagem que são pequenos detalhes, mas que podem alterar o valor do resultado na implementação de barragens de concreto (ELETROBRAS, 2003).

Segundo Gutstein (2011) a utilização de ferramentas computacionais via MEF exigem diretrizes mínimas, para auxiliar modelagem e interpretação dos resultados para as verificações de barragem de gravidade de concreto. Mas caso haja a necessidade de averiguar a modelagem numérica Lopes (2020) indica que cada etapa desenvolvida serve de referência para novas etapas não desenvolvidas.

Vale ressaltar que os resultados obtidos pelo MEF podem ser de dois tipos: (i) convergência numérica e (ii) convergência física Gutstein (2011). Ao utilizar procedimentos específicos para a temática de barragem de concreto os resultados confiáveis podem ser uma mescla dos dois tipos de aproximação.

A convergência numérica utilizando MEF se dá pela resolução das equações diferenciais que estão diretamente influenciados pela forma de como o problema foi discretizado, ou seja, pelo refinamento da malha e o tipo de elemento adotado que mais condiz com o tipo da equação diferencial (FERC, 2016; Yang *et al.*, 2022). O resultado aproximado é obtido quando uma iteração e a seguinte ocorrem pouca ou nenhuma variação nos resultados do modelo numérico.

A convergência física utilizando o MEF conforme explicado por Malm (2016), se dá pelas características física do problema abordado. Entre as principais são: (i) dimensões do modelo, (ii) as propriedades dos materiais envolvidos (seus parâmetros, relações constitutivas / comportamento elástico ou elastoplástico), (iii) do tipo de análise (linear, não-linear, estática, dinâmica), (iv) os tipos de carregamentos, (v) as condições de fronteira (vinculações do modelo como apoios fixos e elásticos).

Quanto aos carregamentos na convergência física, as ações atuantes nas estruturas e todo o processo de modelagem é uma aproximação que será tanto mais precisa, quanto melhor forem representadas essas ações, mas, no entanto, é mais difícil de ser obtida (ANA, 2016). O resultado para o problema deve ser inicialmente comparado com uma análise analítica já comprovada (Meena, Praveen e Siva Parvathi, 2020; Moura, 2016).

Quando for possível pode-se comparar com modelos de estruturas reticuladas (FERC, 2016; Malm, 2016). Esses modelos já foram desenvolvidos e empregados exaustivamente com boa aproximação (mesmo podendo escolher um modelo de viga ou de viga-parede ou membrana, de laje ou de casca e assim por diante).

No entanto, para estruturas hidráulicas, como as barragens de gravidade de concreto e outras estruturas contínuas, os modelos numéricos precisam ser estudados e seguindo as recomendações de montagem que serão discutidos a seguir com base nos trabalhos de (Lopes, 2020; Moura, 2016; Silva *et al.*, 2016).

3.2.2. Considerações Geométricas

Barragens de gravidade de concreto possuem no geral uma geometria contínua, consistindo em uma seção transversal constante com juntas de dilatação, com camadas impermeáveis, galeria de drenagem, drenos e tubulações (ANA, 2016). Para esses tipos problemas são indicados realização de análises bidimensionais com base na teoria da deformação plana (Malm, 2016).

Caso a análise seja para considerar o comportamento não linear da estrutura, como por exemplo fissuras devido à retração (Abdi e Ntzimanis, 2022), também é preferível realizar análises bidimensionais com base na teoria da deformação plana para evitar fissuras fora do plano no modelo.

Um aspecto que pode influenciar a precisão do modelo numérico é quanto à grande parte da barragem real que é incluída nas análises (Khanzaei, 2017). Se uma

região muito pequena for incluída, os limites podem afetar o resultado. (Minera *et al.*, 2018) indica que ao utilizar camadas muitos pequenas de materiais diferentes é recomendado a utilização de elementos de alta ordem.

O tamanho do modelo numérico depende do objetivo das análises, quais aspectos precisam descrever. O modelo em MEF deve ser capaz de captar o modo mecânico de ação das peças a serem analisadas. Em muitos casos, pode ser suficiente estudar um monólito, enquanto em alguns casos a barragem inteira (barragens em arco) podem ser implementados (Moura, 2016).

Segundo Habib et al. (2021) em cada projeto, um julgamento de engenharia deve ser feito em relação ao tamanho geométrico do modelo numérico e que o nível de detalhe seja suficiente para capturar os aspectos de interesse.

A Limitação de uma análise que a estrutura contém juntas de contração, que consistem em vários monólitos, vertedouros etc. (Abdi e Ntzimanis, 2022), é suficiente para limitar o modelo para incluir apenas as partes dentro das juntas de contração. Sendo uma suposição válida se a junta de dilatação/contração funcionar como pensado.

Reduzir o modelo numérico com base na simetria contribui na redução do tamanho do modelo numérico (Malm, 2016). Os monólitos de concreto são em geral simétricos ao longo de sua linha central e, portanto, em muitos casos, é suficiente implementar apenas uma das metades simétricas e definir uma condição de contorno de simetria na linha central (Moura, 2016).

Isso não é aplicável nos casos em que as solicitações podem atuar de forma assimétrica na direção lateral sobre o monólito. Não é recomendado o uso de planos de simetria em modelos onde o comportamento não linear do material é considerado, ou seja, a fissuração do concreto (Braun *et al.*, 2019). A razão é que em um modelo com uma simetria onde as fissuras ocorrem perto do plano de simetria resulta em uma superestimação do amolecimento da estrutura.

3.2.3. Consideração do Maciço Rochoso

O maciço rochoso deve ser incluído na análise numérica (Lopes, 2020; Souza, 2017), mas pode ter discretização diferente da barragem, dessa forma é recomendável a utilização de discretização do maciço rochoso mais grosseira em locais mais distante da base da barragem de concreto (Malm, 2016). Em muitos

programas é possível compatibilizar duas superfícies de contato com grandes diferenças na discretização. Assim, é possível gerar uma malha na fundação rochosa de forma mais grossa na interface com a barragem de concreto (Abdi e Ntzimanis, 2022).

A modelagem da fundação rochosa é complicada exigindo muita precisão nos aspectos geotécnicos de barragens de concreto. Um dos mais importantes é identificar de possíveis modos de falha na fundação (Lopes, 2020).

Em geral, quando a fundação da rocha é considerada nas análises de Elementos Finitos (FE) destinadas a verificar a resposta estrutural, admite-se que a rocha se comporta como um contínuo (Gutstein, 2011) e incluir grandes fissuras pode servir como planos de falha potenciais, ou cunhas de rocha que possam influenciar a segurança da barragem.

3.2.3.1. Condições de Contorno Definidas Diretamente na Fundação da Barragem

Em vários tipos de estudos da engenharia civil e estrutural, como pontes e a indústria nuclear, é corriqueiro a desconsideração da fundação rochosa e considerando como uma condição de contorno fixa (Malm, 2016). Ao admitir essa restrição na barragem, proporciona a um comportamento mais rígido (Khanzaei, 2017).

Mas as tensões obtidas serão irreais desencadeando intensificação dos valores de tração no pé a montante devido a restrição imposta, sendo demonstrado por Khanzaei, Samali e Zhang (2017).

Outra desvantagem desse tipo de condição de contorno é que não é possível estudar o efeito da subpressão na superfície de base da barragem, pois quaisquer ações de forças que agem diretamente nos nós que estão sujeitos ao engastamento não afetarão a estrutura (Khanzaei, 2017).

3.2.3.2. Rocha considerada implicitamente

A segunda abordagem é a consideração de molas nos nós da fundação da barragem. As molas podem representar a rigidez da rocha (Malm, 2016), sendo a constante de mola k_{mola} sendo calculada de acordo com a Equação 19:

$$k_{mola} = \frac{EA}{L} \quad (19)$$

onde,

- $k_{mola} \rightarrow$ é a rigidez da mola (N/m);
- $E \rightarrow$ é o módulo de elasticidade da rocha (Pa);
- $A \rightarrow$ é a área de contribuição de cada nó (m^2);
- $L \rightarrow$ é a altura (ou comprimento) da massa rochosa que a nascente está representando(m). Esse parâmetro será descrito no próximo subitem.

Segundo (Souza, 2017), esta definição pode ser empregada em propriedades não lineares das molas e, dessa forma, os efeitos como deslizamento horizontal ou tombamento podem ser simulados.

3.2.3.3. Rocha incluída no modelo numérico

A terceira abordagem com o procedimento adotado nas modelagens do presente trabalho, a rocha é implementada no modelo numérico seguindo algumas regras gerais descritas a seguir (Malm, 2016; Moura, 2016):

- A fundação em rocha modelada abaixo da barragem deve possuir profundidade de pelo menos igual à altura da barragem.
- O comprimento do maciço rochoso nos lados esquerdo e direito da barragem (perpendicular à direção do fluxo) deve ser definido no mínimo igual ao comprimento da barragem.
- Em análises sísmicas com consideração da água, o comprimento do reservatório deve ser pelo menos maior que duas vezes a altura da barragem, a fim de minimizar a reflexão das ondas na borda externa. Assim, o comprimento da rocha deve acompanhar o reservatório.
- A condição de contorno de restrição do movimento é definida nos lados externos do maciço rochoso.

3.2.4. Ações de Carregamento

As recomendações técnicas citadas no início do item, indicam que as ações de carregamento podem ser: (i) Ações permanentes; (ii) Cargas acidentais; (iii) Pressões hidrostáticas; (iv) Pressões hidrodinâmicas; (v) Pressões Intersticiais; (vi) Empuxo de terraplenos; (vii) Cargas Inerciais (sismos), (vii) Dilatação, retração e deformação lenta de estruturas de concreto, (viii) Ondas e (ix) Impactos.

Com base nos carregamentos incidentes na barragem (ANA, 2016; CDA, 2013; ELETROBRAS, 2003; FERC, 2016; Malm, 2016; RIDAS, 2019; USACE, 1995b; USBR, 1987) indicam que podem ser considerados nos estudos de estabilidade e obtenção dos esforços internos as combinações de carregamentos que são: (i) Caso de Carregamento Normal (CCN), (ii) Caso de Carregamento Excepcional (CCE), (iii) Casos de Carregamento de Construção (CCC) e (iv) Condição de Carregamento Limite (CCL).

3.2.4.1. Cargas de gravidade

Cargas de gravidade são as forças de peso próprio dos materiais que compõem o modelo numérico. Assim, são necessários o conhecimento da densidade e a aceleração gravitacional (ANA, 2016). As forças de gravidade são assim calculadas com base no volume da estrutura modelada conforme a Equação 20. A carga de gravidade é aplicada ao informar a aceleração da gravidade que é mais um dado a ser fornecido, além do que é indicado na Equação 21.

$$F_{gravidade} = \sum V\gamma \tag{20}$$

onde,

- $V \rightarrow$ é o volume da estrutura (m^3);
- $\gamma \rightarrow$ é o peso do material (kg/m^3).

Cargas de gravidade de objetos que não estão incluídos no modelo numérico devem ser aplicadas à estrutura da barragem como tensão de carga (FERC, 2016). Nas análises dinâmicas, a massa desses objetos deve ser incluída, pois afeta o comportamento dinâmico da barragem (Malm, 2016).

3.2.4.2. Pressão Hidrostática da Água

Existe a possibilidade de definir uma carga de pressão de forma tridimensional e bidimensional, onde as amplitudes dependem dos eixos horizontais e verticais dependendo do sistema de coordenadas globais adotado.

Nessas abordagens a altura da barragem deve ser definida em relação aos eixos, pois as diferenças de níveis vão definir a pressão no fundo do reservatório em relação ao nível da água no lado a montante (Malm, 2016). A pressão hidrostática é calculada conforme a Equação 21.

$$p_i = \rho g h_i \tag{21}$$

onde,

- $p_i \rightarrow$ é a pressão hidrostática da água em uma profundidade específica h_i (Pa);
- $\rho \rightarrow$ é a densidade da água (kg/m^3);
- $g \rightarrow$ é a constante gravitacional (m/s^2);
- $h_i \rightarrow$ é a profundidade em um ponto específico i (m).

Nos casos em que isso não é possível, geralmente é possível definir que a carga de pressão depende de uma função analítica que define que a amplitude é função da altura da barragem (ELETROBRAS, 2003; Malm, 2016). O mesmo, se aplica ao lado a jusante se a barragem estiver sujeita a águas residuais.

A pressão hidrostática da água costuma ser definida como o nível normal correspondente à cota mais alta onde a água é armazenada. Em situações excepcionais de inundação, é possível que o nível da água ultrapasse a altura da barragem (ELETROBRAS, 2003).

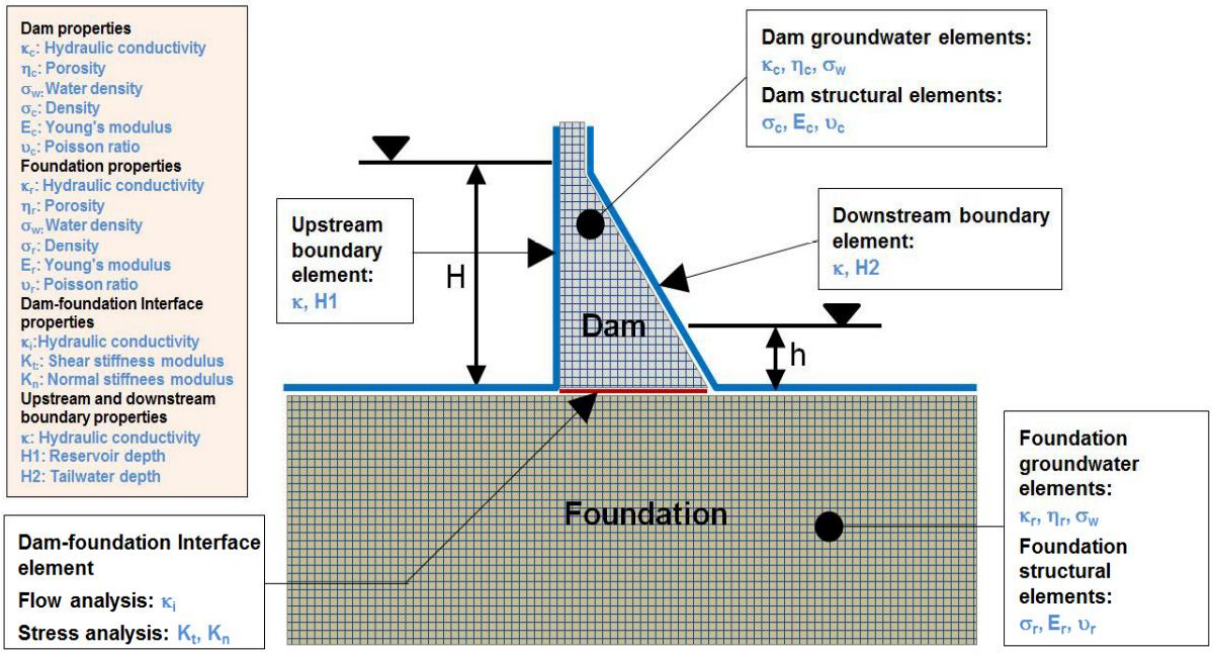
Uma abordagem mais precisa que envolve considerar o efeito da poropressão dentro da barragem e da fundação, ao invés de simplesmente aplicar a pressão da água como uma carga superficial externa (McKay e Lopez, 2014).

No entanto, essa metodologia é mais complexa e requer inicialmente uma análise de transporte de fluxo para calcular a distribuição de poropressão (Khanzaei, Samali e Zhang, 2017). A distribuição de poropressão calculada é então utilizada como entrada em uma análise mecânica subsequente, onde pode ser convertida em tensões volumétricas na análise estrutural (Abdi e Ntzimanis, 2022).

McKay e Lopez (2014) demonstram um esquema ilustrativo das propriedades necessárias do material e a definição das condições de contorno na análise da poropressão conforme apresentado na Figura 6. O presente trabalho utiliza dessa premissa em todas as verificações, pois as validações dos modelos numéricos desenvolvidos têm essa base conceitual em seus solucionadores numéricos acoplados.

As análises hidromecânicas acopladas oferecem vantagens ao fornecer resultados para a subpressão e permitem um estudo mais detalhado da distribuição da pressão intersticial, considerando elementos como cortina de injeção, drenos, entre outros conforme demonstrado por Meena, Praveen e Siva Parvathi (2020).

Figura 6 – Modelo esquemático em Elementos Finitos para análises de fluxo e tensão acopladas em estado estacionário.



Fonte: (McKay e Lopez, 2014).

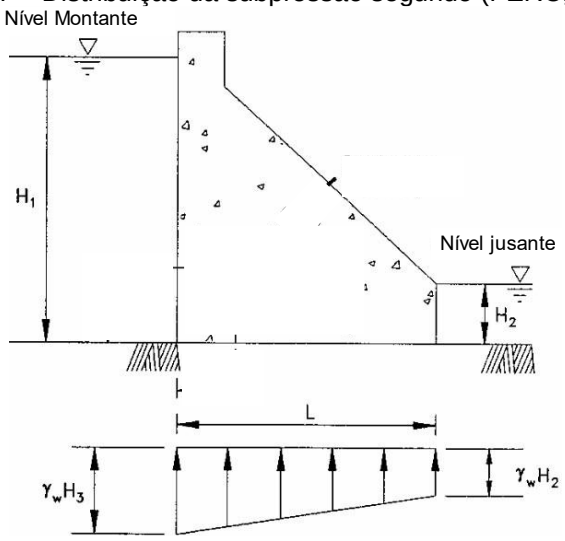
3.2.4.3. Subpressão da Água.

Todas as diretrizes contemplam formulações que levam em conta a subpressão, considerando a presença de dreno, fissuras na ligação entre a barragem e a rocha, e variações com diferentes combinações de situações. Neste estudo, será abordada e utilizada apenas a metodologia da FERC como o ponto de referência para comparar as análises numéricas, pois os parâmetros do CADAM 2D é configurado com essa mesma diretriz.

a) <u>Estruturas sem sistemas de drenagem ou drenos na fundação.</u>

De acordo com (FERC, 2016), para estruturas desprovidas de sistemas de drenagem na fundação ou sem drenos, a pressão na interface fundação-concreto deve ser considerada como uma linha reta, representando 100% da pressão da água na face a montante e 100% da pressão da água residual na face a jusante, aplicada em toda a área da base. Isso é ilustrado na Figura 7 e descrito pela Equação 22.

Figura 7 – Distribuição da subpressão segundo (FERC, 2016).



Fonte: (FERC, 2016).

$$P_{sp} = (H_1\rho + H_2\rho\,)\frac{L}{2} \tag{22}$$

onde,

- $P_{sp} \rightarrow$ é a subpressão em (Pa);
- $\rho \rightarrow$ é a densidade da água (kg/m^3);
- $H_1 \rightarrow$ é o nível a montante da água (m);
- $H_2 \rightarrow$ é o nível a jusante da água (m).
- $L \rightarrow$ é o comprimento da base da barragem (m).

b) Estruturas com sistemas de drenagem ou com drenos na fundação.

FERC (2016) sempre recomenda a adoção de uma galeria de drenagem, por causa de vários aspectos: (i) deixar o topo do dreno na pressão ambiente; (ii) escoar a água que infiltra no interior da barragem e (iii) ser um ponto de inspeção interna da barragem, dessa forma, todos os cálculos de subpressão levam em consideração a existência da galeria de drenagem.

A implementação da subpressão com dreno próximo à face a montante e sem consideração de fissuras requer a galeria estar situada a uma distância mínima de 5% da altura máxima da água na face a montante, segundo FERC (2016), além da necessidade de se conhecer antecipadamente a eficiência do dreno.

Para calcular a subpressão, inicialmente, é necessário determinar o comprimento mínimo do dreno na barragem. Os parâmetros dessa formulação

incluem os níveis máximos de água a montante e a jusante, a eficiência do dreno e a verificação da distância mínima da galeria.

As Equações 23 a 26 descrevem a formulação para o cálculo do comprimento mínimo do dreno, desde que a distância da galeria seja atendida $(x \leq 5\%H_1)$. A Figura 8 ilustra o esquema da distribuição da subpressão.

$$E_{dreno} \geq valor\ em\ \% \quad (23)$$

$$k_{dreno} = 1 - E_{dreno} \quad (24)$$

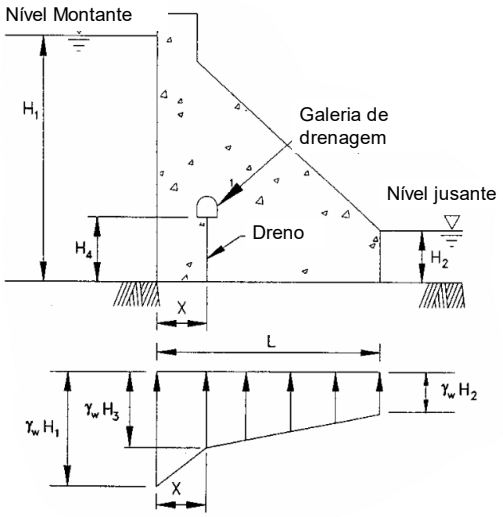
i. Quando a galeria está acima no nível d'água a jusante $H_4 > H_2$.

$$H_3 = k_{dreno}\left[(H_1 - H_2)\frac{(L-x)}{L} + H_2 - H_4\right] + H_4 \quad (25a)$$

ii. Quando a galeria está acima no nível d'água a jusante $H_4 < H_2$.

$$H_3 = k_{dreno}(H_1 - H_2)\frac{(L-x)}{L} + H_2 \quad (25b)$$

Figura 8 – Distribuição da subpressão com dreno perto da face a montante segundo (FERC, 2016).



Fonte: (FERC, 2016).

$$P_{sp,galeria} = \rho\left[(H_1 + H_3)\frac{x}{2} + (H_3 + H_2)\frac{L-x}{2}\right] \quad (26)$$

onde,

- $P_{sp,galeria} \rightarrow$ é a subpressão em (Pa);
- $\rho \rightarrow$ é a densidade da água (kg/m^3);
- $H_3 \rightarrow$ é o comprimento mínimo que o dreno deve possuir [m];

- $H_4 \rightarrow$ é o comprimento do nível da galeria deve ter em relação a base da barragem (m);
- $x \rightarrow$ é a distância da face montante para a galeria de drenagem (m).
- $E_{dreno} \rightarrow$ é a eficiência que o dreno possui em porcentagem;

c) Estruturas com sistemas de drenagem na fundação e fissura se estendendo entre a face montante e o dreno.

A subpressão quando há fissura se estendendo entre a face montante e o dreno segundo FERC (2016) é da seguinte forma: (i) uma linha reta desde a pressão total no calcanhar da barragem até o final da trinca, (ii) a subpressão é reduzida até o dreno e, (iii) a subpressão é reduzida até pressão total da água residual a jusante, as Equações 27 a 29 mostram essa formulação a Figura 9 a distribuição.

$$T \leq x \tag{27}$$

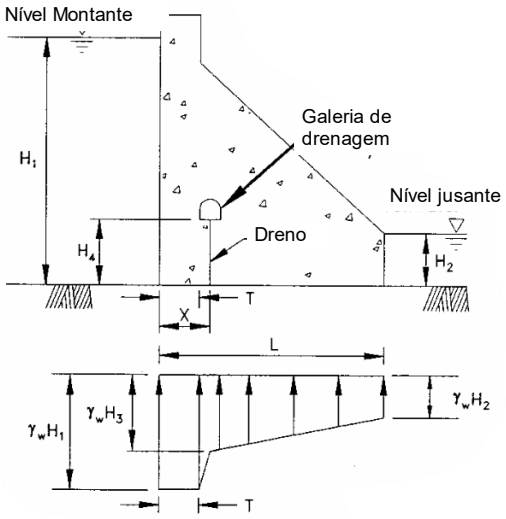
i. Quando a galeria está acima no nível d'água a jusante $H_4 > H_2$.

$$H_3 = K_{dreno}\left[(H_1 - H_2)\frac{(L-x)}{L-T} + H_2 - H_4\right] + H_4 \tag{28a}$$

ii. Quando a galeria está acima no nível d'água a jusante $H_4 < H_2$.

$$H_3 = K_{dreno}(H_1 - H_2)\frac{(L-x)}{L-T} + H_2 \tag{28b}$$

Figura 9 – Distribuição da subpressão quando há fissura se estendendo entre a face montante e o dreno segundo (FERC, 2016).



Fonte: (FERC, 2016).

$$P_{sp,fissura1} = \rho\left[H_1 T + (H_1 + H_3)\frac{x-T}{2} + (H_3 + H_2)\frac{L-x}{2}\right] \quad (29)$$

onde,

- $P_{sp,fissura1} \rightarrow$ é a subpressão em(Pa);
- $T \rightarrow$ é o comprimento da fissura (m).

d) <u>Estruturas com sistemas de drenagem e fissura se estende além da linha de drenagem na fundação.</u>

Segundo (FERC, 2016) quando a fissura se estende além da linha de drenagem e as medições indicam que os drenos ainda são eficazes, são demonstradas nas Equações 30 a 32 mostram essa formulação e a Figura 10 a distribuição.

$$T \geq x \quad (30)$$

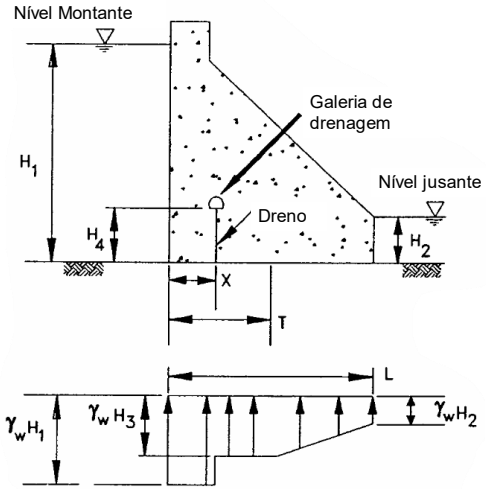
i. Quando a galeria está acima no nível d'água a jusante $H_4 > H_2$.

$$H_3 = K_{dreno}[H_1 - H_4] + H_4 \quad (31a)$$

ii. Quando a galeria está acima no nível d'água a jusante $H_4 < H_2$.

$$H_3 = K_{dreno}(H_1 - H_2) + H_2 \quad (31b)$$

Figura 10 – Distribuição da subpressão quando a fissura se estende além da linha de drenagem segundo (FERC, 2016).



Fonte: (FERC, 2016).

$$P_{sp,fissura2} = \rho\left[H_1 x + H_3(T - x) + (H_3 + H_2)\frac{L-T}{2}\right] \quad (32)$$

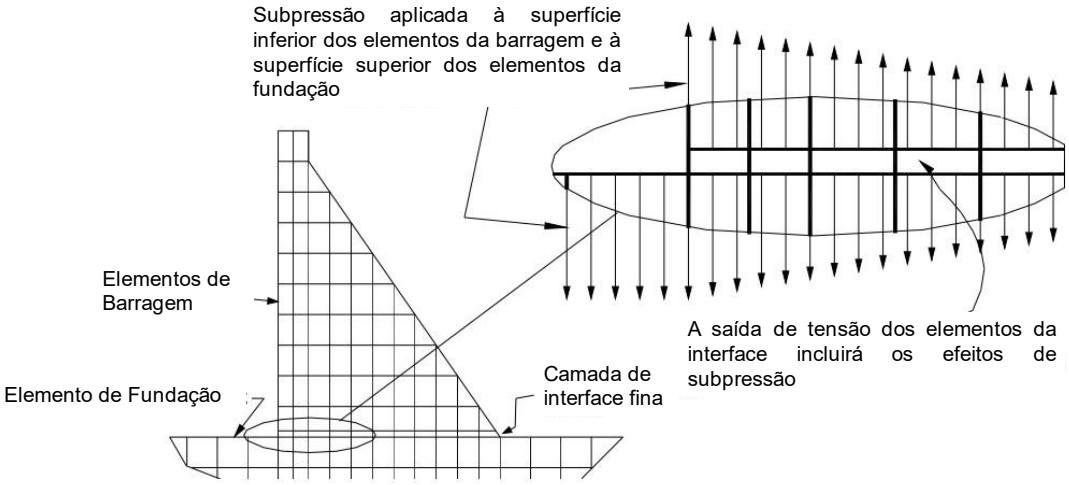
onde,

- $P_{sp,fissura2} \rightarrow$ é a subpressão em (Pa).

e. <u>Metodologia para a aplicação da subpressão em Análises de Elementos Finitos.</u>

A metodologia de FERC (2016) é uma das poucas especificações técnicas que apresenta uma abordagem simplificada de como incluir a subpressão na base da barragem em análises numéricas, essa metodologia é ilustrada na Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Metodologia para aplicar a subpressão na base da barragem.



Fonte: (FERC, 2016).

Nesta abordagem FERC (2016), sugere criar um elemento de interface fino para estabelecer a pressão de subpressão na base da barragem e na superfície superior do maciço rochoso. A resposta de tensão resultante desses elementos de interface abrange os efeitos da subpressão. Embora esse método seja relativamente simples de aplicar em modelos bidimensionais, sua aplicação em modelos tridimensionais é inviável.

Existem diversos softwares comerciais de elementos finitos não lineares que possibilitam a modelagem automática de fissuras e deslizamentos na base, especialmente para análises não lineares.

No ABAQUS (2014), por meio do solucionador de solos é possível obter os valores da tensão de subpressão ao informar como condição de contorno inicial a

intensidade de poropressão em regiões que haverá retenção de água, dessa forma o software calcula a distribuição da subpressão no interior do modelo numérico sendo uma abordagem semelhante ao trabalho de McKay e Lopez (2014).

Para todas as análises desenvolvidas no presente trabalho foram considerados as cargas do peso próprio da barragem e da fundação rochosa, o empuxo devido a água retida a montante. Para análise hidromecânica acoplada, a condição de contorno adicional compreende a pressão hidrostática na face a montante da barragem referente ao reservatório cheio e a situação sem água residual do lado jusante. Ambos os modelos (UN e CO) as combinações de carregamento considerados é a Condição de Carregamento Limite (CCL).

3.3 Aplicação Prática de Escoamento em Meio poroso

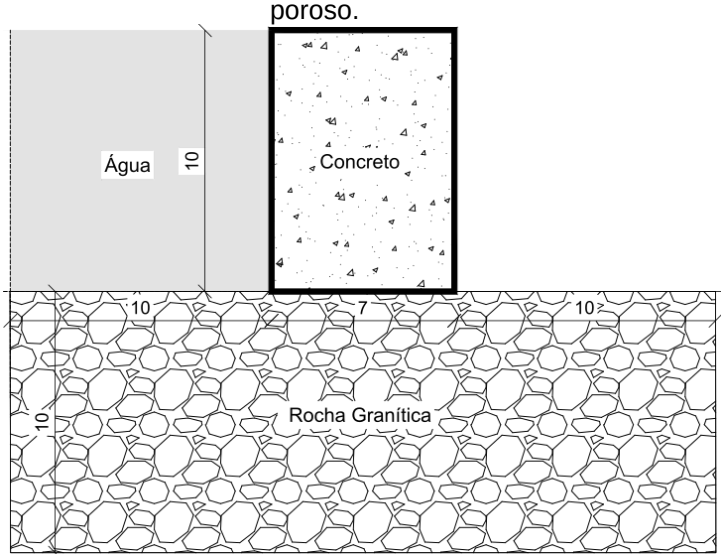
O presente item irá demonstrar um exemplo prático de escoamento em meio poroso por meio de um código computacional em Python, a estruturação da programação seguiu os mesmos passos de Logan (2015) utilizando as formulações demonstradas no capítulo anterior.

A comparação do exemplo prático foi por meio de uma modelagem desenvolvida pelo ABAQUS por meio do solucionador de transferência de calor. Segundo Zienkiewicz e Taylor (2013), o conceito físico entre transferência de calor e o fluxo em meio poroso são diferentes, mas as formulações matemáticas são iguais, dessa forma as formulações numéricas são compatíveis.

O link para o código desenvolvido é apresentado no apêndice A, sendo estruturado em etapas da seguinte forma: (i) Parâmetros iniciais e dados de entrada, (ii) Loop para construção da matriz dos elementos e matriz global, (iii) Aplicação das condições de Contorno, (iv) Solução do Sistema de Equações, (v) Armazenamento dos resultados de forma nodal e por elemento e (vi) Realização do Pós-Processamento no GID.

O exemplo prático consiste em uma barragem retangular de concreto com 7,0 m de largura e 10,0 m de altura, e a base uma rocha granítica de 10,0 m de espessura e 27,0 m de largura. A barragem está sobre a rocha apoiada no ponto médio. Ambos os materiais foram considerados com permeabilidade igual $K_x = K_y = 1x10^{-10}\ \mathrm{m/s}$. A Figura 12 mostra o esquema do modelo do exemplo prático.

Figura 12 – Dimensões da barragem para o exemplo prático de escoamento em meio poroso.



Fonte: O autor, 2024.

O exemplo utilizou 469 nós e 838 elementos triangulares do tipo *Constant Strain Triangle* (CST). As condições de contorno foram o empuxo de água a montante agindo de forma triangular na barragem de concreto, com o valor nulo no topo e máximo na base da barragem, e de forma constante na rocha granítica.

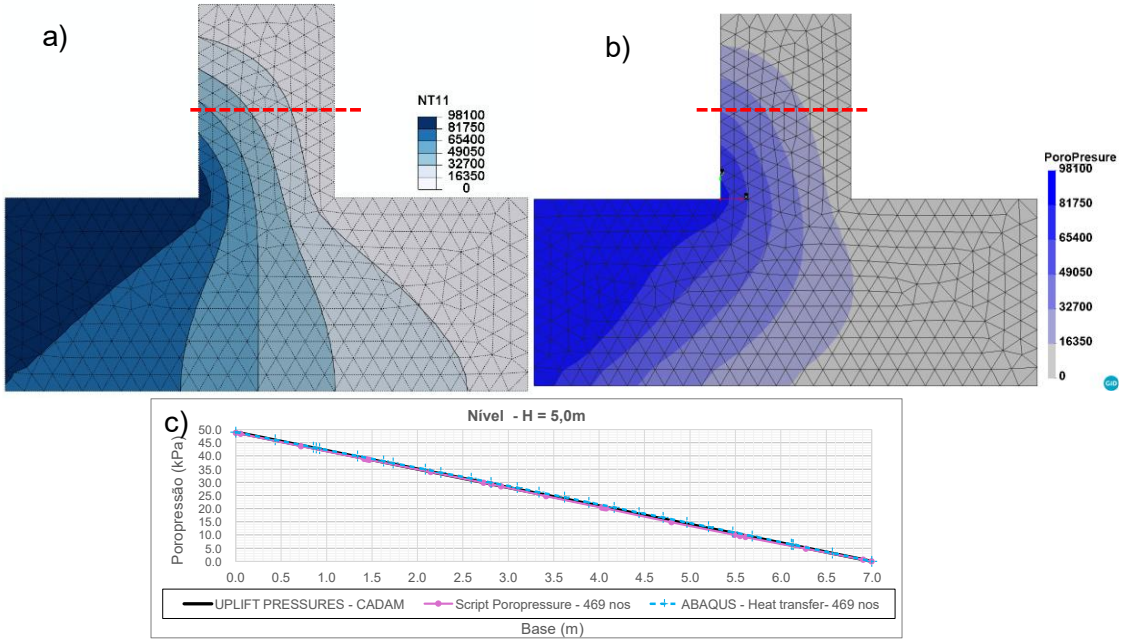
Os resultados obtidos no script são valores nodais do fluxo em meio poroso foi utilizado o software GID para o pós-processamento e a comparação com o resultado ABAQUS. O GID foi projetado para ser um pré e pós-processador de uso geral que as configurações para diferentes análises devem ser realizadas de acordo com as especificações particulares de cada solucionador (Ribó *et al.*, 2024).

A Figura 13 contém duas imagens de isovalores do fluxo em meio poroso obtidos no ABAQUS e no script. Na Figura 13a contém o resultado da modelagem realizada no ABAQUS com o solucionados de transferência de calor e na Figura 13b o resultado plotado no GID, ambas as imagens comprovam que ambos os modelos apresentam a mesmas distribuições de valores, validando o script desenvolvido.

Com o intuito de realizar a comparação do script e modelagem numérica os resultados foram comparados com os valores do CADAM 2d, demonstrado na Figura 13c, todos os valores estão todos convergindo.

Os resultados encontrados são valores nodais, para esse código não foi realizado um estudo de convergência, pois com baixa discretização todos os valores na barragem convergiram rapidamente devido o fluxo ser oriundo do grau de liberdade.

Figura 13 – Resultado do exemplo prático, a) Obtido no ABAQUS, b) Obtido pelo script computacional pelo python, c) Comparação dos resultados Entre o ABAQUS x Script x CADAM.



Fonte: O autor, 2024.

3.4 Aplicação Prática do Acoplamento parcial *One Way*

A segunda aplicação prática consiste em seguir os passos de Logan (2015) para as formulações mecânicas, e os resultados das tensões dos elementos serão adicionados com os valores do fluxo obtido no item 3.3, mas os valores utilizados serão por elementos, dessa forma o valor da poropressão no elemento obtido no script inicial é definido pela média dos valores nodais.

No presente trabalho não haverá dedução das formulações mecânicas tendo em vista que no trabalho Chaves Junior (2022) apresenta uma demonstração clara e prática para a construção do código computacional, mas a metodologia do acoplamento será conforme apresentado por Lima (2019). Esse procedimento consiste na avaliação do fluxo em meio poroso, em seguida é calculado de forma separada a parte mecânica do problema estudado e por fim, faz-se a soma algébrica entre os valores de tensão por elemento da poropressão, com as tensões verticais, horizontais e cisalhamento obtidos na análise mecânica.

Os resultados da análise mecânica foram obtidas por um código computacional em Python, estruturado de forma semelhante à programação do fluxo em meio poroso, diferindo apenas: (i) etapa do loop as formulações são diferentes no qual foram utilizados para um elemento do CST, (ii) a aplicação das condições de contorno é

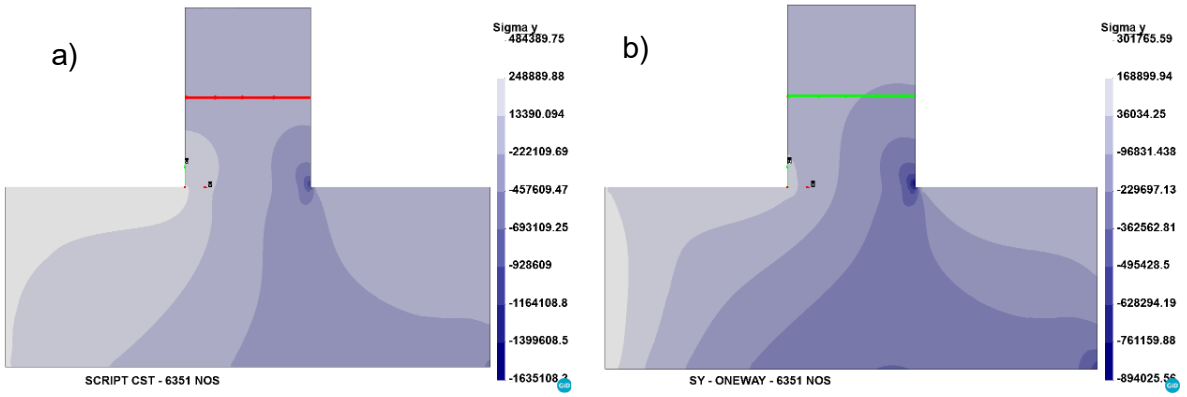
diferente, pois deve ser indicado os nós com restrições de movimento, os nós que as forças estão incidindo e ação do peso próprio nos elementos. O link para o código para análise mecânica desenvolvido está presente no apêndice B.

Foi utilizado a mesma seção do exemplo prático anterior, mas os parâmetros físicos adotados foram: (i) Módulo de Elasticidade $E_{sec} = 24464\ MPa$; (ii) Coeficiente de Poisson $v = 0.2$; (iii) Peso específico do concreto $\gamma_{conc} = 22.1 \frac{kN}{m^3}$. e (iv) Peso específico da água $\gamma_{agua} = 9.81 \frac{kN}{m^3}$. Os resultados obtidos com o código computacional mecânico são os deslocamentos nodais em Δ_x e Δ_y, e as tensões nos elementos em σ_x, σ_y e o cisalhamento τ_{xy}.

Os valores de tensões do modelo acoplado foram obtidos com a utilização dos resultados de poropressão por elemento, com discretização igual a utilizada no modelo mecânico, somados com os valores das tensões σ_x, σ_y e τ_{xy} do modelo mecânico. A comparação dos resultados mecânicos foi realizada com os valores do SAP2000 V.25.2 Compututers and Structures (2024), que é um software análise estrutural mecânica e compatível com elementos do tipo CST e com os dados do CADAM 2D.

A Figura 14 mostra o isovalores das tensões verticais para o modelo mecânico e o modelo com o acoplamento do tipo *One way*. O exemplo mecânico e acoplamento *One way,* utilizou 6351 nós e 12324 elementos do tipo CST, devido as tensões serem derivadas a partir dos deslocamentos, com isso foi necessário realizar um estudo de convergência, para os dados com diferentes tipos de discretização.

Figura 14 – Resultados obtidos para as tensões verticais (N): a) Script computacional mecânico, b) Acoplamento *One way*.



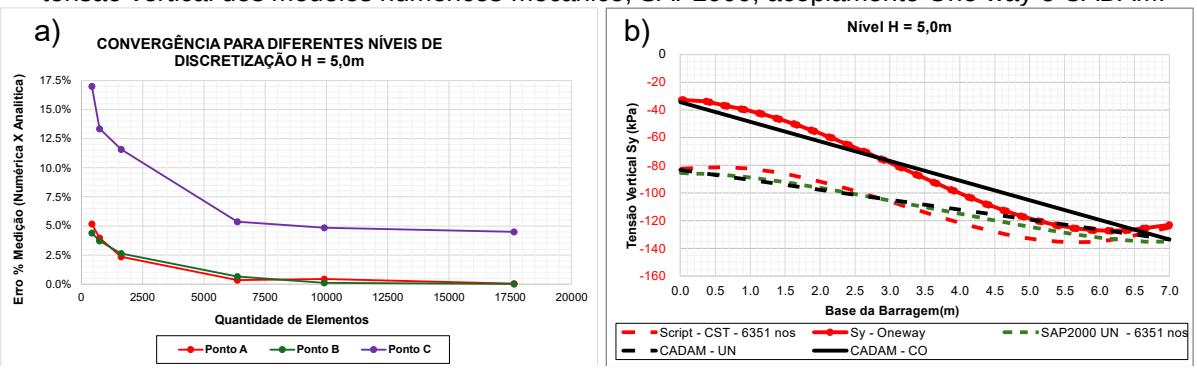
Fonte: O autor, 2024.

A Figura 15a mostra o estudo da convergência da malha para diferentes quantidades de elementos com o erro relativo de cada malha comparados com os

dados analíticos do CADAM 2D, os pontos A, B e C são o início, meio e fim do corte indicado na Figura 14 que fica na altura de 5m acima da base, foi adotado a quarta análise com o elemento de tamanho 0,25, devido os valores convergirem a partir dessa quantidade de elementos.

A Figura 15b é a comparação dos resultados mecânicos da tensão vertical do script desenvolvido com os resultados do SAP2000 e CADAM, além de mostrar os valores do acoplamento do tipo *One way e CADAM,* a comparação entre os modelos mecânicos (linhas tracejadas) convergem conforme demonstrado. A curva do acoplamento *One Way* é obtida com a adição dos dados da poropressão com os valores das tensões σ_x, σ_y e τ_{xy} da análise mecânica.

Figura 15 – a) Convergência de malha para os pontos na seção estudada, b) Valores da tensão vertical dos modelos numéricos mecânico, SAP2000, acoplamento One way e CADAM.



Fonte: O autor, 2024.

4 MODELO SIMPLIFICADO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO

O modelo simplificado de uma barragem de concreto é mesmo do exemplo prático indicado no Figura 12, mas os modelos desenvolvidos nesse capítulo são considerados os materiais da fundação e as condições de contorno associadas ao modelo.

Os parâmetros físicos adotados nos modelos foram selecionados para garantir sua reutilização em outras modelagens do estudo. Outros parâmetros serão inferidos a partir de pesquisas acadêmicas que compartilhem semelhanças com os elementos conhecidos. Os valores dos parâmetros físicos utilizados são detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedade dos materiais utilizados nos modelos.

Material	Densidade (kg/m³)	Módulo de Elasticidade (Mpa)	Coeficiente de Poisson	Permeabilidade (m/s)	Índice de vazios
Concreto	2120[a]	24464 [a]	0.2 [a]	1.00E-10 [b]	1.00 [b]
Granito	2700 [b]	40000 [b]	0.2 [b]	1.00E-12 [b]	1.94 [b]
a = Geotechnique			b = Erik Jensen		

Fonte: (Geotechnique, 2013; Jensen, 2013)

4.1. Descrição da Montagem do Modelo Numérico

O procedimento de criação e solução do modelo utilizando o método dos elementos finitos (MEF) no ABAQUS segue um fluxo de trabalho detalhado por ABAQUS (2014) e Ye e Wang (2017), conforme ilustrado na Figura 16.

Na etapa inicial, é realizada a criação do modelo, definindo as formas e dimensões de cada componente a ser modelado. Na segunda etapa, são estabelecidos os parâmetros físicos essenciais.

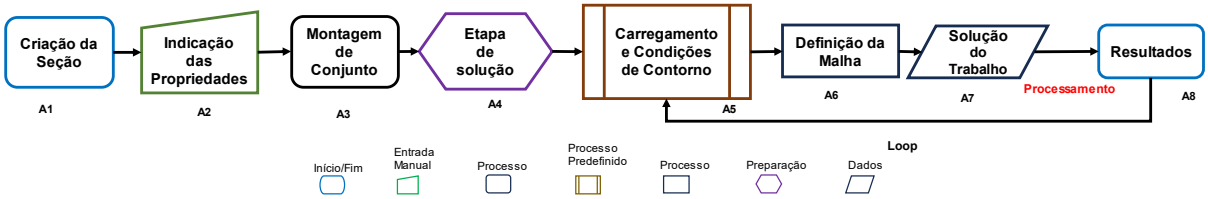
A terceira etapa concentra-se na montagem do modelo como um conjunto representativo da situação em estudo. Posteriormente, na quarta etapa, há a escolha do tipo de solucionador numérico, dependente do problema e da equação diferencial a ser resolvida (Helwany, 2007).

Na quinta etapa, são detalhados os carregamentos aplicados e as condições de contorno. A seleção do tipo de elemento, importante para a solução desejada, juntamente com a criação e refinamento da malha (Ismail *et al.*, 2022), é realizada na sexta etapa.

Na sétima etapa é gerado um arquivo contendo as configurações de processamento da solução, permitindo que o usuário otimize o cálculo ao configurar o processamento do computador (Christoff *et al.*, 2020). Por fim, a etapa final abrange a análise dos resultados obtidos, que podem ser representados nos nós ou nos elementos.

Caso os resultados não atendam às expectativas ou se a convergência desejada não for alcançada, ajustes no modelo devem ser feitos a partir da quinta etapa, repetindo-se os passos até obter uma solução convergente. É recomendável refinar o modelo para alcançar maior detalhamento e precisão nos resultados (Omairey, Dunning e Sriramula, 2019).

Figura 16 – Fluxo de trabalho ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

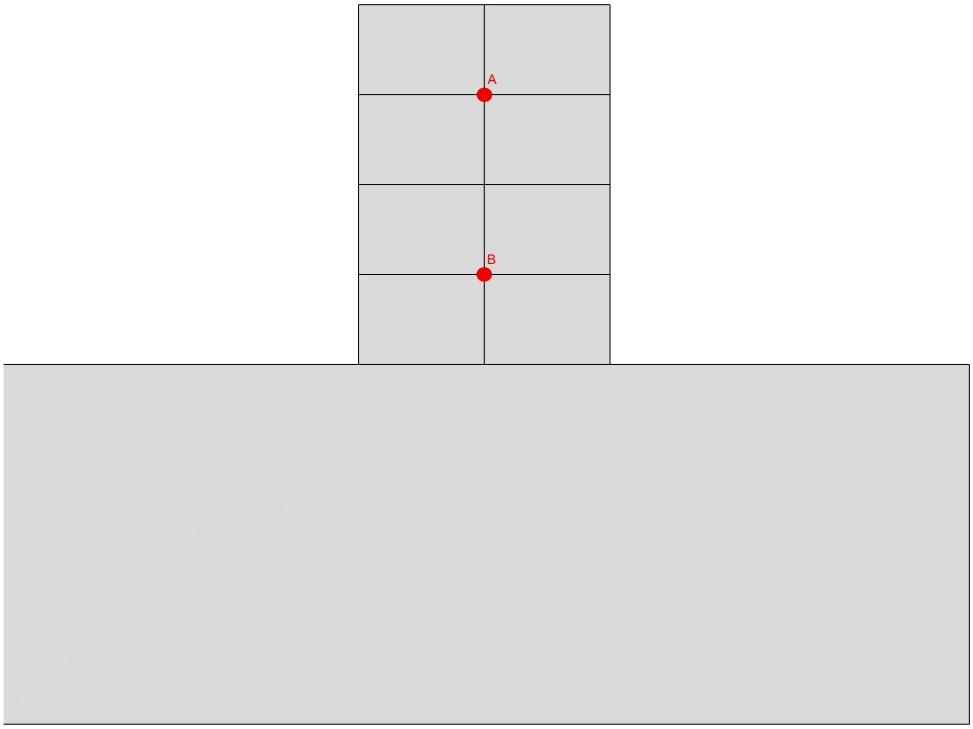
4.1.1. Estudo de Convergência da Malha

A avaliação da convergência da malha desempenha um papel relevante na garantia da precisão dos resultados nos modelos de elementos finitos, minimizando o número de elementos sem comprometer o processamento computacional, assegurando assim a robustez da simulação, como discutido por Chaves Junior (2022).

O processo adotado para a convergência da malha na análise de uma barragem de concreto seguirá uma abordagem similar à proposta por Aguiar (2022), destacando pontos estratégicos da estrutura e avaliando os resultados das tensões verticais em comparação com valores analíticos para distintas densidades de elementos.

A escolha da quantidade de elementos está intrinsecamente ligada ao seu tamanho. Para o modelo simplificado da barragem de concreto, foram identificados os pontos A e B indicados na Figura 17.

Figura 17 – Localização dos pontos para teste de convergência na barragem retangular.



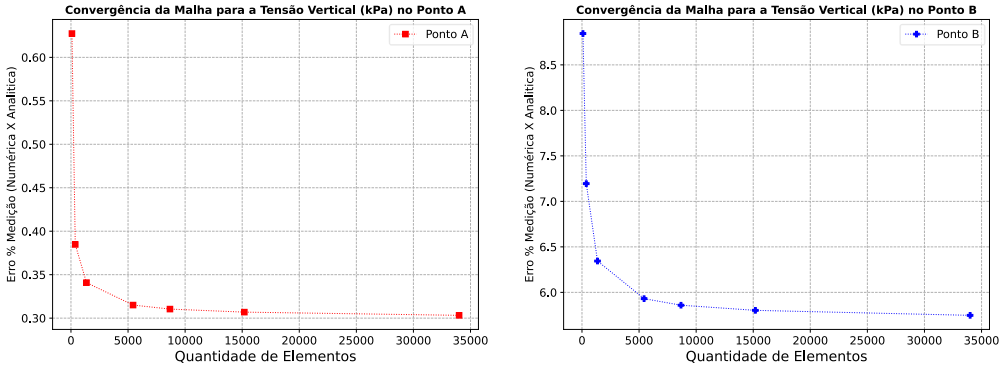
Fonte: O autor, 2024.

Diversas configurações de elementos foram testadas para identificar uma disposição que permitisse observar a convergência das tensões. Na modelagem de convergência utilizou-se um solucionador estático no ABAQUS, considerando o peso próprio da estrutura e a ação do empuxo no nível máximo (CCL). No próximo item será mais bem detalhada a modelagem.

Ao analisar os gráficos da Figura 18, constata-se que, a partir do quarto ponto, os erros relativos praticamente não variam, mesmo com um aumento no número de elementos. Na Tabela 2, são apresentados os valores das tensões verticais nos pontos A e B do modelo, juntamente com os erros relativos em comparação com os valores analíticos obtidos pelo CADAM.

A Tabela 2 indica o tamanho médio dos elementos. Assim, optou-se por adotar, para todas as análises da barragem no modelo simplificado desse capítulo, um tamanho médio de elemento de 0,25m.

Figura 18 – Convergência de malha para os pontos na barragem, utilizando o erro na comparação Numérico X Analítico.



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 2 – Resultados da convergência de malha para os pontos na barragem, utilizando as tensões verticais em kPa e o Erro (%).

# Elementos	Tamanho (m)	Valor de Referência Ponto A = -54.2006 kPa		Valor de Referência Ponto B = -162.601 kPa	
		S22 (kPa)	Erro (%)	S22 (kPa)	Erro (%)
86	2.00	-54.5403	0.627%	-148.2200	8.844%
376	1.00	-54.4088	0.385%	-150.9020	7.195%
1360	0.5	-54.3850	0.341%	-152.2850	6.344%
5440	***0.25***	***-54.3710***	***0.315%***	***-152.9570***	***5.931%***
8672	0.20	-54.3685	0.310%	-153.0740	5.859%
15188	0.15	-54.3666	0.307%	-153.1660	5.802%
34000	0.10	-54.3646	0.303%	-153.2550	5.748%

Fonte: O autor, 2024.

4.1.2. Modelo Numérico

O processo de modelagem começou com um modelo inicialmente linear e íntegro, representando a seção transversal indicada na Figura 4 como seção única, sem subdivisões para os diferentes níveis estudados. Partições foram introduzidas para caracterizar as várias seções que contêm materiais distintos, como concreto e rocha.

O foco da análise foi resolver o problema de tensões e fluxo em regime estacionário em uma barragem de concreto, envolvendo uma abordagem mecânica estrutural e hidromecânica acoplada, com equações diferenciais específicas semelhante aos trabalhos de Khanzaei, Samali e Zhang (201) e Meena, Praveen e Siva Parvathi (2020).

A modelagem numérica da barragem ocorreu em duas etapas distintas: (i) na primeira etapa, foi realizada a simulação da mecânica estrutural utilizando o solucionador do módulo estático; (ii) na segunda etapa, a análise hidromecânica

acoplada foi executada com o solucionador do módulo de solos, conforme Souza e Ribeiro (2022).

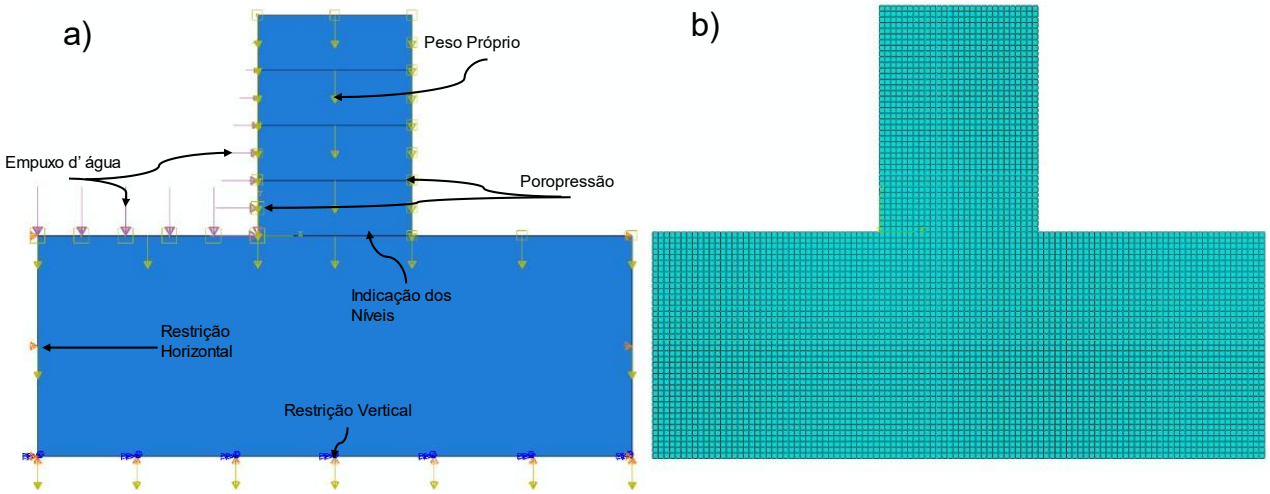
Ambas as etapas utilizaram o mesmo número de elementos e restrições. A principal diferença entre as simulações consiste no solucionador utilizado, nas condições de contorno necessárias para o modelo acoplado e no tipo de elemento empregado.

A representação dos modelos numéricos está detalhada na Figura 19, demonstrando a discretização utilizada em ambas as simulações e as condições de contorno aplicadas nos modelos. Na análise hidromecânica acoplada, uma condição de contorno adicional relacionada à poropressão foi imposta.

Para a verificação da mecânica estrutural, foi utilizado o elemento CPE4 em estado plano de deformação, composto por 4 nós com dois graus de liberdade cada, empregado na obtenção de deslocamento e tensões. Já no modelo hidromecânico acoplado, foi adotado o elemento CPE4P, composto por 4 nós com dois graus de liberdade cada, utilizado para calcular tensões planas e a poropressão (ABAQUS, 2014).

A fundação em rocha é representada por 4320 elementos, enquanto a barragem de concreto é em 1120 elementos, dando um total de 5440 elementos, conforme a quarta discretização mostrada na Tabela 2. As propriedades físicas são detalhadas na Tabela 1. A base da rocha é considerada completamente engastada. No lado esquerdo da barragem (montante), é simulada a presença de água retida até o nível máximo da estrutura, enquanto no lado direito (jusante), não há retenção de água considerada.

Figura 19 – Implementação do modelo numérico no ABAQUS, a) Condições de contorno na seção estudada, b) Discretização adotada dos elementos finitos.



Fonte: O autor, 2024.

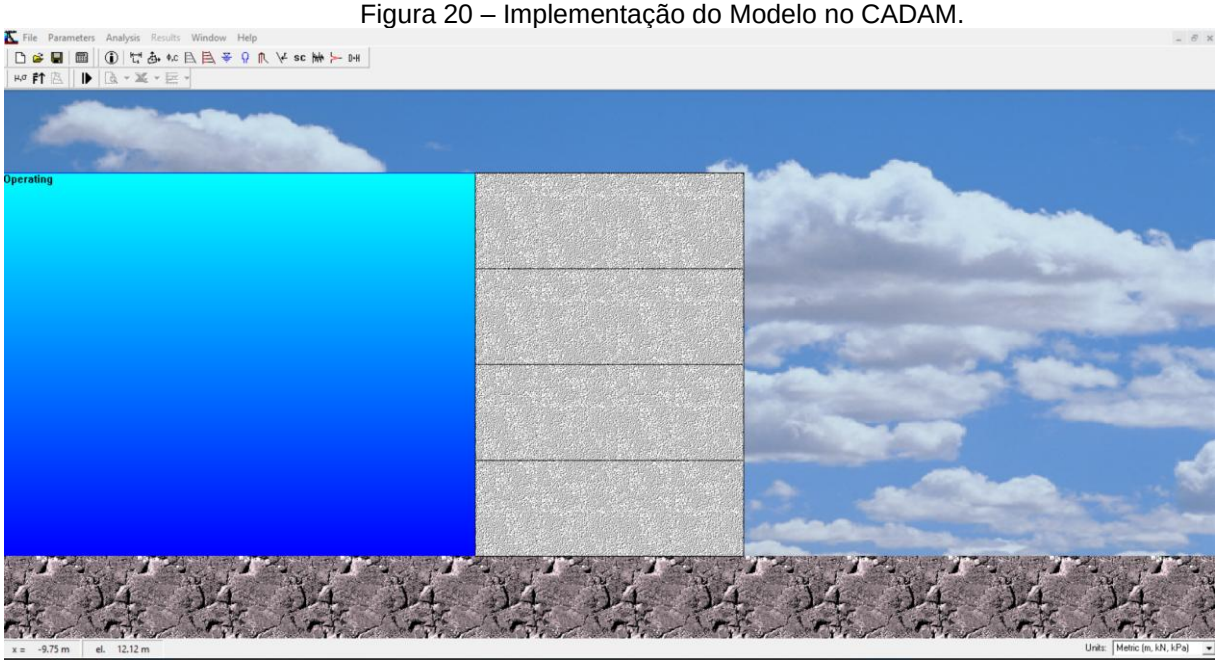
4.1.3. Descrição da Montagem do Modelo no CADAM para os Resultados de Referência

Os valores de referência foram obtidos pelo CADAM, que exigiu a definição dos mesmos parâmetros físicos e dimensões utilizados no ABAQUS. O procedimento adotado no CADAM segue as diretrizes descritas por Leclerc, Léger e Tinawi (2003), começando pela inserção dos dados geométricos do modelo. A segunda etapa, define-se os materiais, incluindo o peso específico e o ângulo de atrito na segunda etapa.

A terceira etapa consiste na criação de cortes horizontais ao longo da seção da barragem para analisar as tensões internas. Para este estudo, foram estabelecidos três planos horizontais a 2,5m, 5,0m e 7,5m de altura em relação à base, como demonstrado na Figura 20.

A quarta etapa implica na definição do carregamento estático, sendo neste estudo a representação do empuxo lateral resultante do contato da água com a parede montante.

Figura 20 – Implementação do Modelo no CADAM.

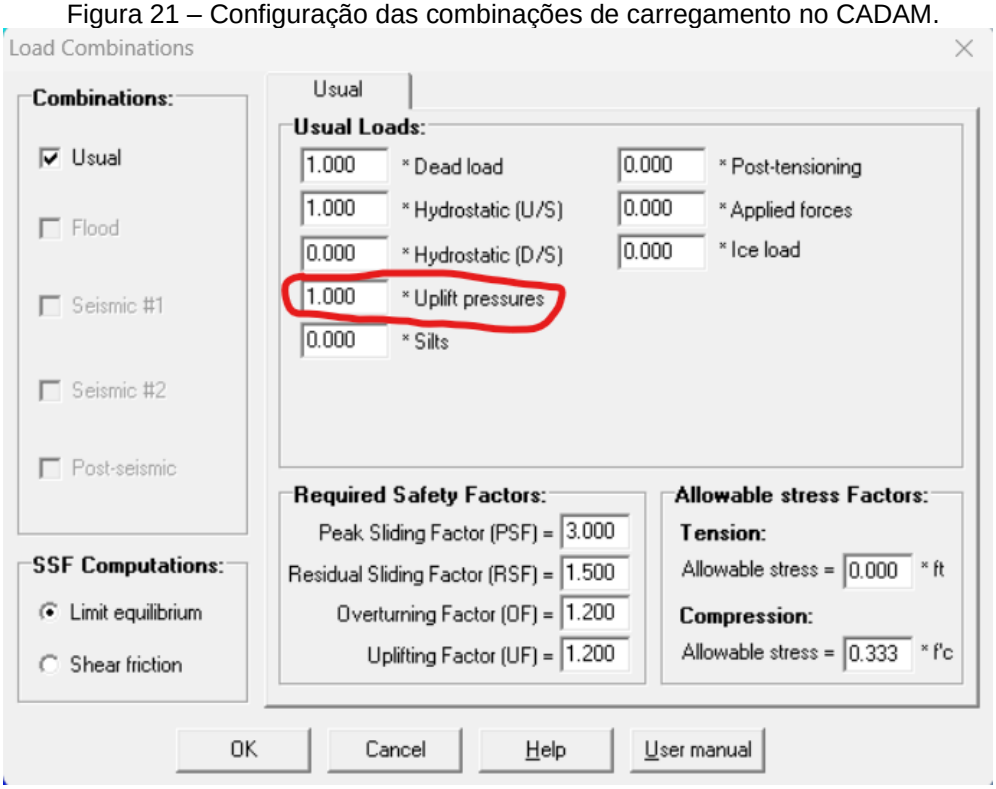


Fonte: O autor, 2024.

Já a quinta etapa envolve a configuração da combinação de carregamentos, considerando apenas o carregamento convencional. Esses parâmetros servirão de base para a comparação entre dois modelos no ABAQUS.

O primeiro modelo (CADAM UN), de natureza estática estrutural, considera o peso próprio do concreto e a pressão hidrostática, com subpressão nula. Enquanto o segundo modelo (CADAM CO), de análise hidromecânica acoplada, incorpora o peso próprio do concreto, a pressão hidrostática e a subpressão, como indicado na Figura 21.

Figura 21 – Configuração das combinações de carregamento no CADAM.

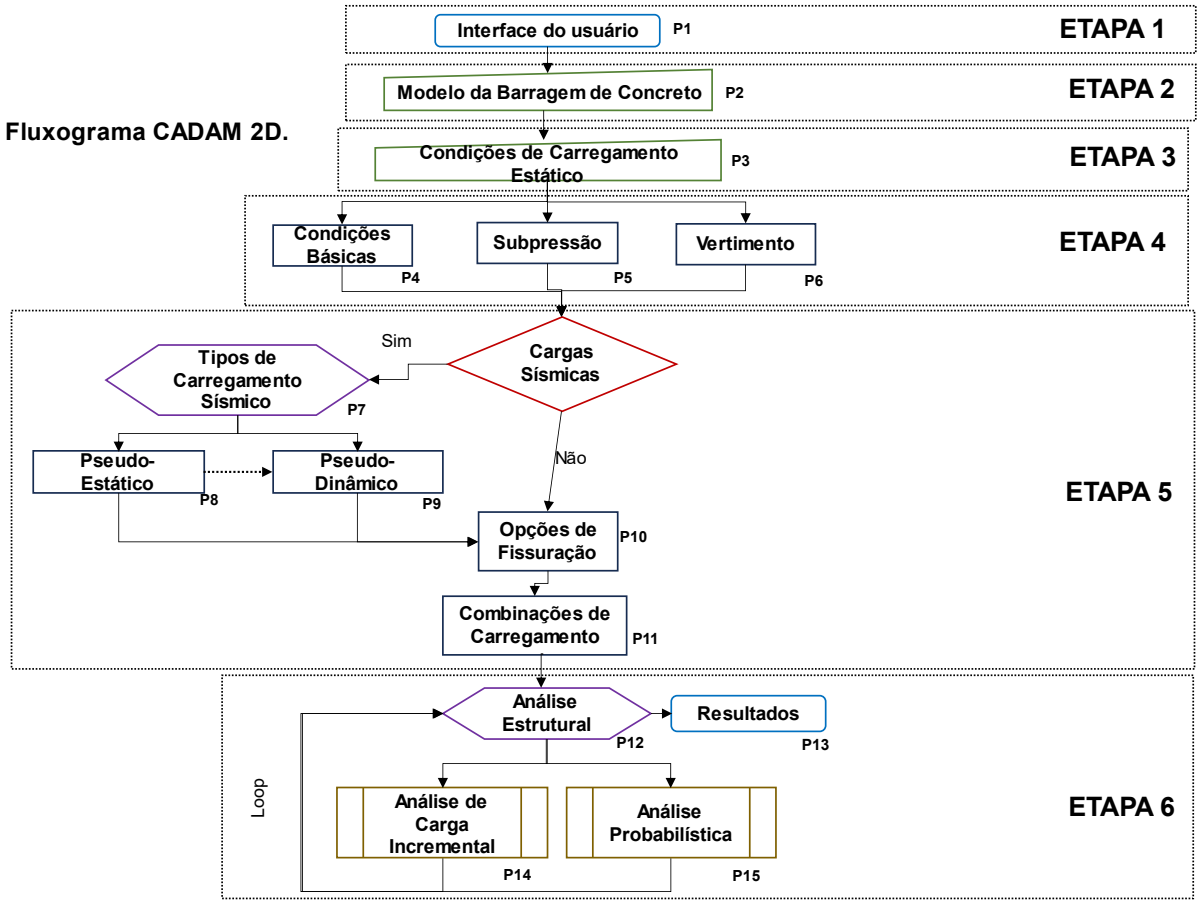


Fonte: O autor, 2024.

Por fim, os resultados obtidos abrangem tensões normais, tensões de cisalhamento e, no caso do modelo acoplado, a subpressão, especificamente nas camadas definidas. Os resultados do CADAM refletem os valores de referência, resultantes das solicitações aplicadas à barragem.

O fluxograma apresentado na Figura 22 oferece uma visão geral do uso do CADAM conforme descrito por Leclerc, Léger e Tinawi (2003). Esses valores serão confrontados com os resultados obtidos nos modelos do ABAQUS.

Figura 22 – Fluxograma de trabalho no CADAM.



Fonte: (Leclerc, Léger e Tinawi, 2003).

4.2 RESULTADOS DAS TENSÕES OBTIDAS NO MODELO SIMPLIFICADO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO

Os resultados das tensões foram separados em dois grupos distintos para apresentação: (i) comparação dos modelos MEF e a (ii) Comparação dos valores da análise estática estrutural (UN) com a análise hidromecânica acoplada (CO).

4.2.1 Comparação dos Modelos Numéricos

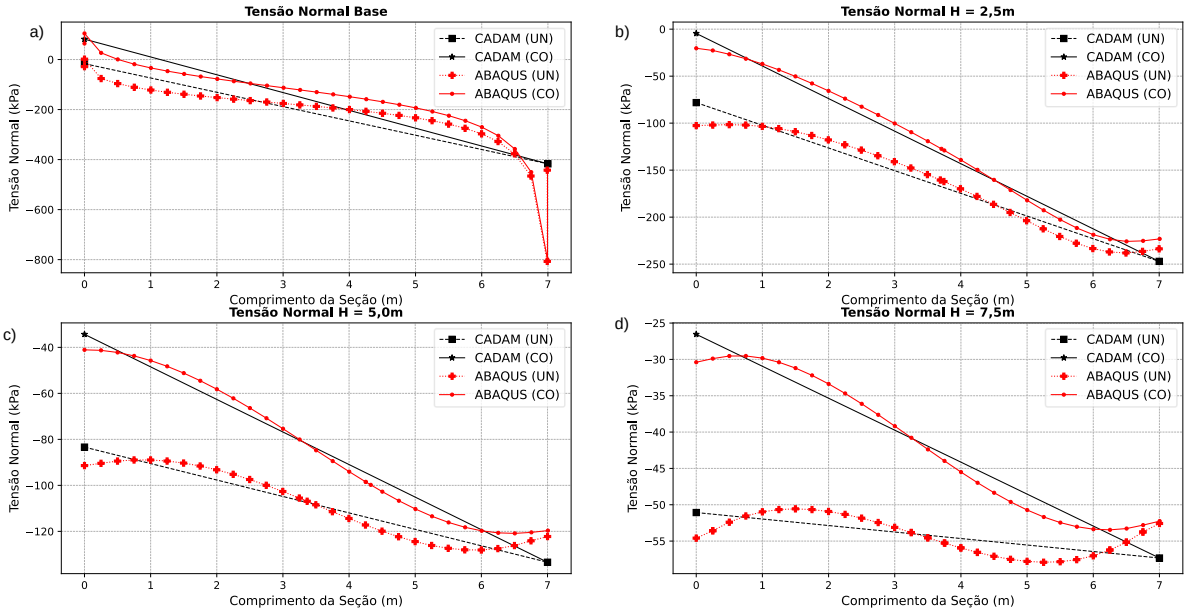
Para comparar as modelagens desenvolvidas, é essencial realizar um procedimento inicial de comparação entre os resultados obtidos no CADAM e no ABAQUS, abrangendo tanto a simulação da mecânica estrutural quanto a análise

hidromecânica acoplada. Um processo de comparação semelhante foi conduzido por Aguiar, Araújo e Ribeiro (2021).

A Figura 23 ilustra os resultados dessa comparação entre os modelos do CADAM e do ABAQUS, considerando as análises mencionadas nos níveis da base, 2,5m, 5,0m e 7,5m de altura. O CADAM fornece as tensões normais, enquanto o ABAQUS apresenta a tensão S22, que, conceitualmente, são comparáveis.

Os valores das curvas na análise estática estrutural (UN) demonstram uma intensidade semelhante nos resultados analíticos e numéricos. No entanto, é importante destacar que os valores do ABAQUS exibem uma distribuição mais ampla devido à sua discretização. Essa mesma observação pode ser aplicada às curvas da análise hidromecânica acoplada (CO).

Figura 23 – Comparação da Tensão Normal obtidos no ABAQUS e CADAM, a) Na base, b) Na altura 2,5m, c) Na altura de 5,0m e d) Na altura de 7,5m.



Fonte: O autor, 2024.

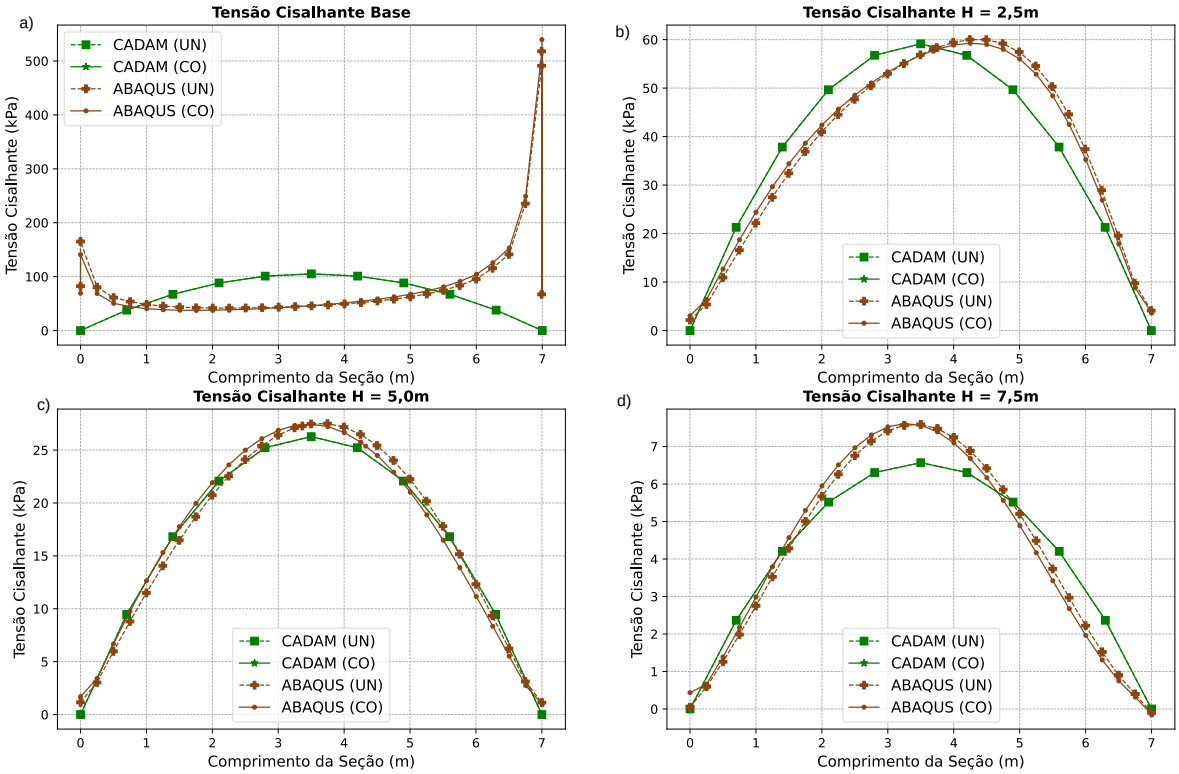
Os valores de cisalhamento nas mesmas camadas são validados e comparados na Figura 24, evidenciando a consistência dos resultados numéricos obtidos pelo ABAQUS em relação aos valores analíticos do CADAM, em ambas as análises realizadas.

É relevante observar que, na região da fundação, os valores obtidos pelo ABAQUS diferem em intensidade e distribuição dos valores do CADAM. Essa discrepância ocorre devido às condições de contorno consideradas por cada

programa. Nos modelos do ABAQUS, a região da fundação é limitada por outro material, que internamente recebe uma distribuição de cisalhamento diferente do modelo conceitualizado pelo CADAM. Este último baseia-se no equilíbrio de corpo rígido e na teoria de vigas, conforme indicado por Leclerc, Léger e Tinawi (2003).

Em todos os outros níveis verificados, os valores foram totalmente coincidentes em todos os modelos. O CADAM fornece as tensões de cisalhamento, enquanto o ABAQUS apresenta as tensões S12, ambas conceitualmente equivalentes.

Figura 24 – Comparação da Tensão Cisalhante obtidos no ABAQUS e CADAM, a) Na base, b) Na altura 2,5m, c) Na altura de 5,0m e d) Na altura de 7,5m.



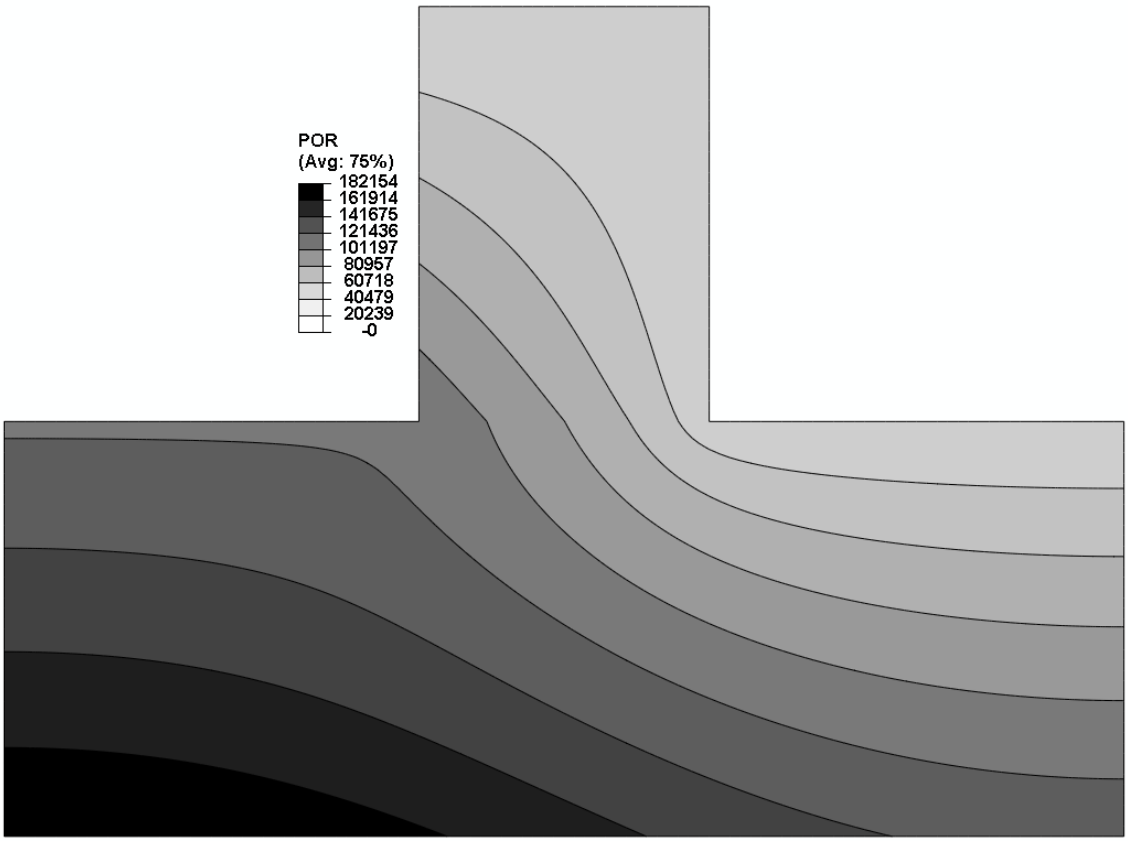
Fonte: O autor, 2024.

A comparação final dos modelos é conduzida com base nos valores de poropressão obtidos nas simulações acopladas, uma vez que esses dados são adicionais em relação à análise estática estrutural.

O entendimento da distribuição interna da poropressão é importante para calcular as tensões efetivas. O CADAM fornece a subpressão conforme a metodologia indicada por FERC (2016), e os resultados são utilizados como valores de referência, por serem analíticos, servem comparar com os dados das análises numéricas.

A Figura 25 ilustra o contorno completo da poropressão obtida na simulação hidromecânica acoplada no ABAQUS. Observa-se que, no lado montante (esquerdo), os valores aumentam do topo para a base, refletindo a representação do acúmulo de água. No lado a jusante, os valores são nulos. Conforme as unidades informadas na Tabela 1 os resultados da tensão são em Pa.

Figura 25 – Contorno da Poropressão (Pa) na análise hidromecânica acoplada no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

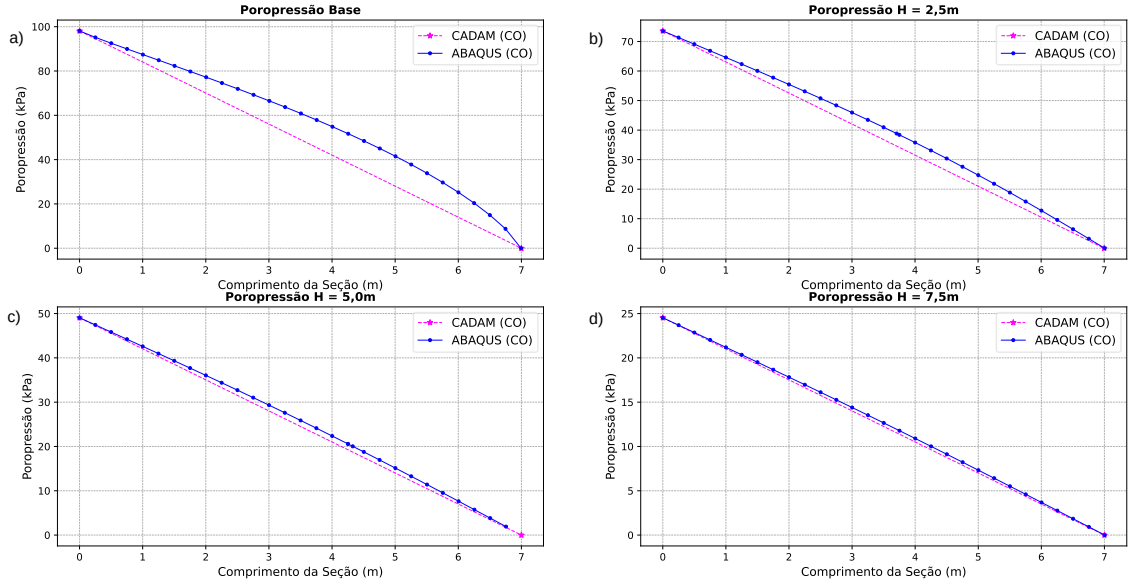
4.2.2 Comparação dos Modelos Numéricos

A comparação entre os models numéricos é uma atividade primordial porque, na análise hidromecânica acoplada, as tensões normais são totais, seguindo a teoria de Terzaghi K. e S. (1943) e a proposta de McKay e Lopez (2014), enquanto na análise estática estrutural, os valores são de tensões efetivas.

A Figura 26 apresenta a distribuição das curvas de poropressão obtidas pelo ABAQUS em comparação com as subpressões obtidas pelo CADAM nos mesmos níveis de base da barragem e 2,5m, 5,0m e 7,5m de altura em relação à base.

Um outro aspecto importante é que a poropressão não exerce influência nos resultados da tensão de cisalhamento. Tanto nos modelos estáticos estruturais quanto nos hidromecânicos acoplados, tanto no CADAM quanto no ABAQUS, os resultados foram totalmente coincidentes. Isso serve como mais uma evidência da comparação dos modelos íntegros da barragem de concreto com a seção simplificada. O parâmetro de Biot não interfere nos resultados devidos características físicas dos materiais, é importante ressaltar que nos modelos numéricos dos ABAQUS considera os vazios totalmente preenchidos por água.

Figura 26 – Comparação da Poropressão obtidos no ABAQUS e CADAM, a) Na base, b) Na altura 2,50 m, c) Na altura de 5,00 m e d) Na altura de 7,50 m.



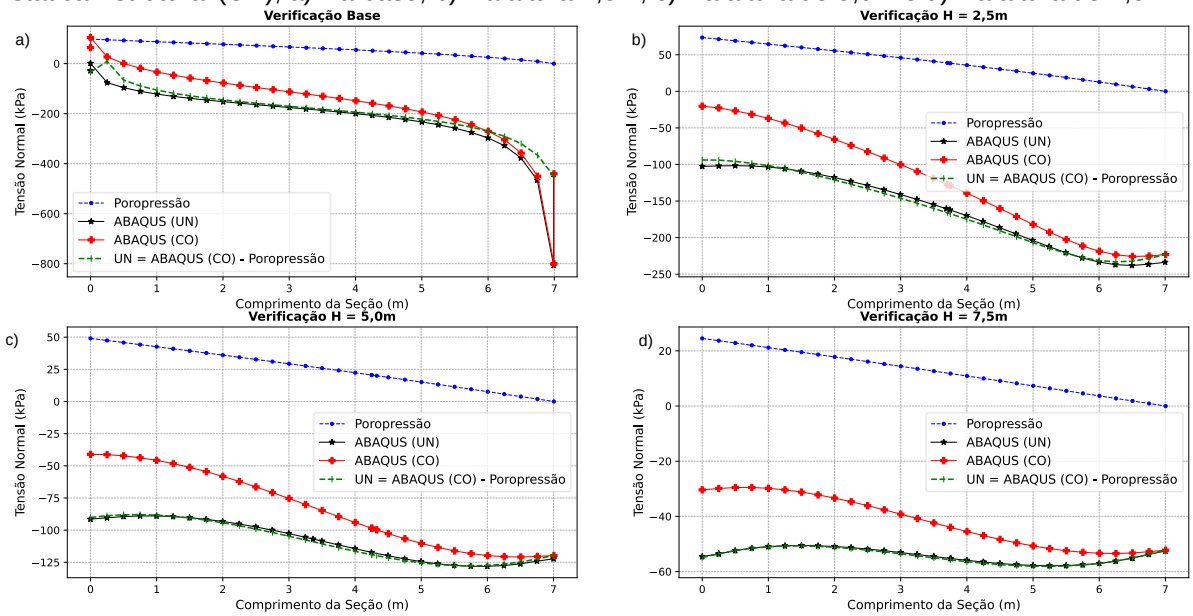
Fonte: O autor, 2024.

As curvas mostram pontos iniciais e finais coincidentes, porém, a curva do ABAQUS apresenta uma pequena distorção ao longo da distribuição devido ao seu nível de discretização em relação aos valores do CADAM. Ao subtrair os valores de tensão normal acoplada (CO) dos valores de poropressão, obtemos os valores de tensão normal não acoplada (UN), validando a teoria de Terzaghi e McKay e Lopez, (2014) , sendo semelhante ao demonstrado por Khanzaei, Samali e Zhang (2017), conforme apresentado na Figura 27.

Semelhante ao que ocorreu no acoplamento One Way em que a diferença entre os valores de tensão a acoplada e a poropressão é obtido a tensão não acoplada, representado pela curva verde, mostrando o resultado converge com a curva não acoplada em todos os níveis estudados.

Vale ressaltar que os valores da poropressão utilizados são oriundos do modelo acoplado, e a verificação foi realizada nos níveis indicados, mas os resultados obtidos asseguram que a comparação pode ser realizada em qualquer ponto da barragem simplificada.

Figura 27 – Verificação da diferença da tensão ABAQUS (CO) – Poropressão = Tensão Estática Estrutural (UN), a) Na base, b) Na altura 2,5m, c) Na altura de 5,0m e d) Na altura de 7,5m.



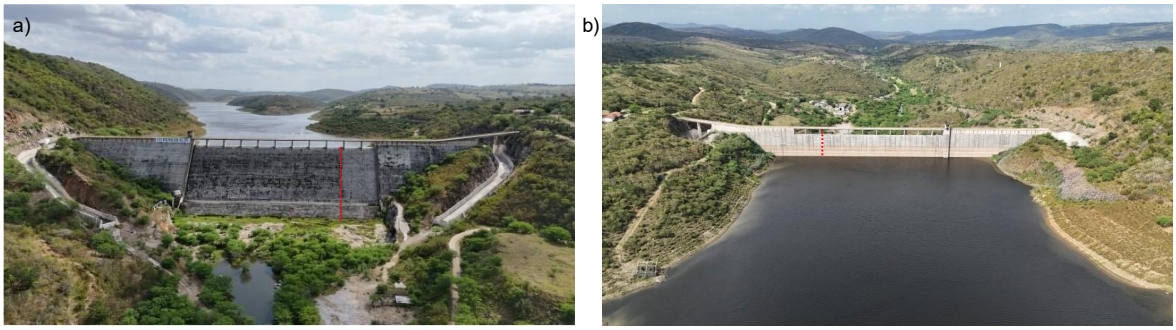
Fonte: O autor, 2024.

5. BARRAGEM DE JUCAZINHO

O presente estudo concentra-se na seção transversal da barragem de Jucazinho, com base nos relatórios técnicos produzidos pela empresa Geotechnique (2013) que fez o levantamento das informações sobre alguns parâmetros físicos e dimensões da barragem.

A barragem de Jucazinho é uma estrutura de barragem de gravidade do tipo Concreto Compactado a Rolo (CCR), com $63{,}20m$ de altura máxima acima da fundação, cota de coroamento de $299{,}00m$, largura de coroamento de $8{,}00m$ e extensão de coroamento de 442,00 m. A primeira cheia ocorreu em 2004, que resultou em um vertimento de $1{,}40\ m$ no vertedouro. A Figura 28 mostra uma vista a montante e jusante da barragem de Jucazinho e a indicação da seção estudada.

Figura 28 – Barragem de Jucazinho no município de Surubim-PE, a) Vista à montante, b) vista à jusante.



Fonte: O autor, 2024.

O volume total do CCR, incluindo o vertedouro, é de $358.479{,}00\ m^3$. Além do CCR, outros tipos de concreto foram empregados em diferentes partes da barragem. Na face montante, foi utilizado Concreto Convencional (CC) com uma espessura de $0{,}80\ m$ da base até a cota $269{,}00m$; a partir dessa cota até a crista, a espessura é de $0{,}60\ m$. A quantidade de cimento nessa camada foi de aproximadamente $300{,}00\ kg/m^3$. O consumo de cimento no traço de CCR variou de $100{,}00\ kg/m^3$ da fundação até a cota $241{,}00\ m$ (piso do trecho central da galeria); a partir dessa cota até a crista, foi reduzido para $80{,}00\ kg/m^3$.

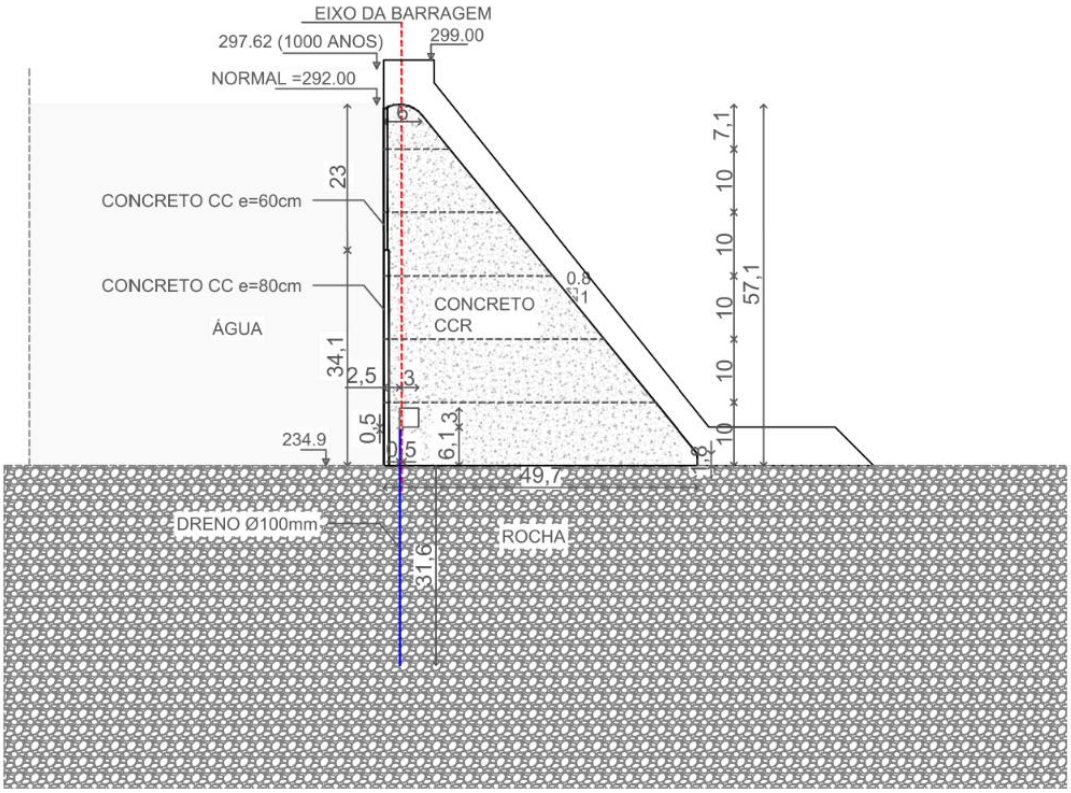
Na galeria interna da barragem, estão presentes drenos de $\emptyset 100mm$, espaçados a cada $30{,}00\ m$, conectando a base da barragem à fundação rochosa. Não

há informações disponíveis sobre o comprimento total dos drenos nos documentos do órgão competente. No entanto, para os modelos a serem considerados, o comprimento do dreno foi estimado conforme as recomendações técnicas descritas por FERC (2016).

As juntas de dilatação foram construídas com veda juntas simples de PVC, do tipo Fungenband 0-35, posicionadas de modo a permitir as deformações decorrentes das variações térmicas do concreto, visando compatibilidade com o clima regional. Entretanto, para os estudos numéricos em questão, essas juntas não serão consideradas.

O vertedor principal da barragem é do tipo *Stepped Spillway*, com a soleira localizada na cota de $292{,}00\ m$ e comprimento de $170{,}00\ m$. Sua capacidade máxima de vazão é de $5.446{,}69\ m^3/s$, medida na cota de $298{,}00\ m$. A Figura 29 detalha a seção vertente da barragem, localizada na estaca 10, sendo essa seção transversal a referência para os estudos a serem conduzidos.

Figura 29 – Seção vertente da Barragem de Jucazinho.



Fonte: (Geotechnique, 2013).

Ourives et al. (2018) investigaram os serviços de recuperação estrutural da barragem, Francisco (2021) fez um estudo voltado para gestão dos recursos hídricos

na barragem, enquanto Aguiar (2022) se concentrou em análises numéricas com métodos modernos de ação sísmica. Este trabalho seguirá uma abordagem bidimensional, empregando os softwares CADAM e ABAQUS, em conformidade com a metodologia anteriormente descrita, e recentemente Oliveira (2024) fez um trabalho totalmente direcionado à política pública de segurança de barragens com o foco especial em Jucazinho.

Neste estudo, os resultados oriundos do CADAM servirão como valores de referência, uma vez que são derivados de análises analíticas. Por outro lado, os modelos do ABAQUS, embora sejam resultados numéricos, oferecerão detalhes mais aprofundados devido à sua discretização mais refinada. Além disso, em comparação com o CADAM, o ABAQUS fornecerá uma gama mais ampla de informações.

O objetivo principal das análises numéricas desenvolvidas, no presente trabalho, vai além da simples comparação do modelo da barragem em relação as formulações analíticas. Envolve também a exploração de tipos de camadas construtivas possíveis em uma barragem, discutindo suas vantagens, desvantagens e os procedimentos práticos para montar a modelagem numérica.

É importante ressaltar que os modelos hidromecânicos acoplados oferecem resultados mais significativos do que os modelos estáticos, fornecendo informações detalhadas sobre os esforços internos da barragem. Esses resultados contribuem para uma compreensão mais profunda do comportamento estrutural diante das ações de carregamento esperadas na estrutura hidráulica.

Os serviços realizados pela Geotechnique (2013) na barragem de Jucazinho se concentraram principalmente em obter os valores relacionados ao concreto CCR, enquanto os parâmetros físicos das demais camadas da barragem foram apenas descritos de forma visual e tátil.

Nos estudos geotécnicos realizados pela consultoria, foram fornecidas informações detalhadas sobre o tipo de rocha na região, complementadas por ensaios de sondagem rotativa, embora não tenham incluído os valores de ruptura dos levantamentos realizados. Entretanto, esses estudos não abrangeram todos os parâmetros físicos requeridos para uma análise completa da área circundante.

Para suprir as informações necessárias para uma análise detalhada das tensões na barragem, recorreu-se a estudos científicos que apresentavam características semelhantes à região da barragem de Jucazinho (Jensen, 2013;

Khanzaei, 2017). A Tabela 3 apresenta os parâmetros físicos necessários para a elaboração dos modelos numéricos.

Tabela 3 – Parâmetros físicos adotados para a barragem de Jucazinho.

Material	Densidade (kg/m³)	Módulo de Elasticidade (Mpa)	Coeficiente de Poisson	Permeabilidade (m/s)	Índice de vazios
Concreto CCR	2120 [a]	24464 [a]	0.2 [a]	1.00E-09 [b]	0.08 [b]
Concreto Convencional (CC)	2325 [b]	25700 [b]	0.2 [b]	1.00E-10 [b]	0.05 [b]
Granito	2700 [b]	40000 [b]	0.2 [b]	1.00E-12 [b]	0.02 [b]
Dreno	1400 [c]	3000 [c]	0.4 [c]	1.00E-02 [c]	0.60 [c]

a = Geotechnique b = Khanzaei = Erik Jensen

Fonte: (Geotechnique, 2013; Jensen, 2013; Khanzaei, 2017).

5.1 Descrição do Modelo Numérico da Barragem de Jucazinho

As simulações numéricas serão realizadas utilizando os softwares ABAQUS e CADAM de duas formas: (i) Análise Estática Estrutural (UN) e (ii) Análise Hidromecânica Acoplada (CO), conforme descrito no capítulo anterior. Para cada análise, serão desenvolvidos modelos numéricos que consideram diferentes camadas construtivas.

Nos modelos do ABAQUS, a fundação será representada por uma camada de granito, de acordo com a recomendação de Malm (2016) e Moura (2016) de que a dimensão da fundação deve ser igual à altura da barragem na montante, na jusante e na profundidade, fixando-se toda a extensão inferior da seção da fundação.

Com base nos tipos de elementos construtivos existentes na Barragem de Jucazinho, conforme demonstrado na Figura 29, foram criadas combinações de modelos numéricos possíveis, descriminados a seguir:

a) CADAM: nesse caso, o modelo da barragem será representado por um único monólito de concreto e com dreno na região da galeria.
b) ABAQUS Íntegro: o modelo será composto por um monólito de concreto CCR juntamente com a fundação de granito.
c) ABAQUS Íntegro – CC: o modelo incluirá o concreto CCR, uma camada de concreto convencional (CC) na face montante e a fundação de granito.
d) ABAQUS Íntegro – DRENO: o modelo terá o concreto CCR juntamente com drenos na galeria e a fundação de granito.

e) ABAQUS Íntegro – CC – DRENO: o modelo incluirá o concreto CCR, uma camada de concreto convencional (CC) na face montante, drenos na galeria e a fundação de granito.

Todos os modelos seguirão com a mesma quantidade de elementos e condições de contorno. As distinções entre eles serão encontradas na descrição e na especificação das propriedades dos materiais empregados em cada camada, delineadas na etapa 2 do fluxo de trabalho do ABAQUS conforme mostrado na Figura 16. A variação entre os tipos de análise, UN ou CO, acarretará pequenas modificações nas etapas 4 e 6 do fluxo de trabalho no ABAQUS.

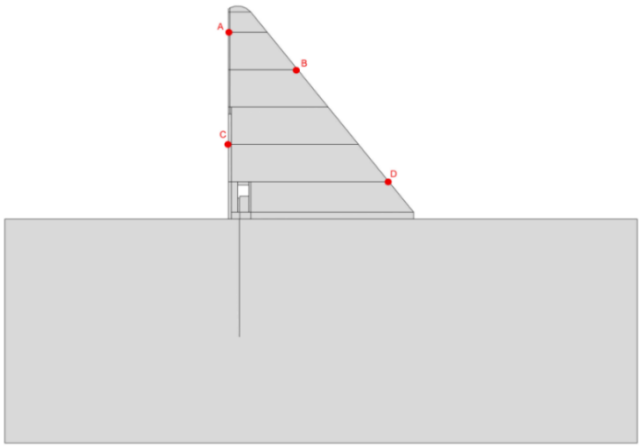
Nos modelos onde as áreas de concreto CC na face a montante, o dreno na região da barragem e a fundação em rocha granítica não são considerados, os elementos e nós correspondentes são automaticamente convertidos em concreto CCR (na região da barragem) ou rocha granítica (na região da fundação) durante o processo de modificação das propriedades físicas mencionado anteriormente. É importante ressaltar que elementos incluem CPE4 e CPE4P para elementos lineares nas análises UN e CO, respectivamente. Para elementos quadráticos, são utilizados CPE8 (com 8 nos bi-quadrático) e CPE8P (com 8 nos bi-quadrático e com poropressão bi-linear), nas análises UN e CO, respectivamente. Todos os elementos empregados nas modelagens numéricas são do estado plano de deformação.

5.1.1. Estudo de Convergência da Malha na Barragem de Jucazinho

No estudo conduzido por Aguiar (2022), foi realizado uma análise de convergência na seção vertente de Jucazinho com base em três pontos selecionados aleatoriamente na seção transversal, porém, sem considerar a influência da fundação no modelo numérico.

Neste estudo atual, realizou-se um estudo de convergência com quatro pontos distintos na seção da barragem, levando em conta a influência da fundação. A Figura 30 ilustra as posições dos pontos utilizados. Os esforços verticais obtidos no ABAQUS a partir de várias configurações de malha foram comparados com os valores analíticos do CADAM.

Figura 30 – Localização dos pontos no modelo Numérico para teste de convergência.



Fonte: O autor, 2024.

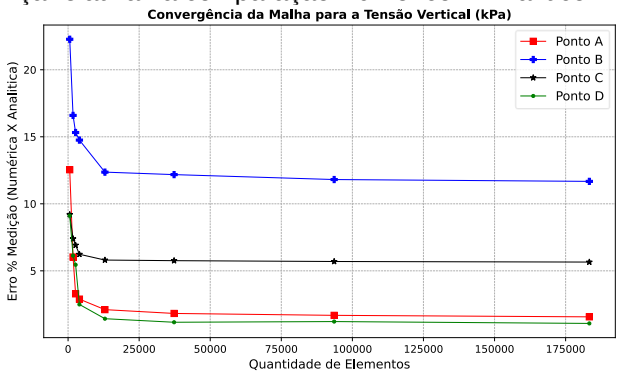
O modelo numérico utilizado no ABAQUS foi o modelo íntegro, utilizando análise estática estrutural com a Condição de Carregamento Limite (CCL). A avaliação da convergência foi realizada com base na diferença relativa, comparando-o com a solução analítica do CADAM.

A Figura 31 ilustra as curvas de convergência para todos os pontos examinados. Todas as curvas demonstram uma tendência de estabilização a partir do quinto ponto, independentemente da quantidade de elementos empregados.

Na Tabela 4, estão apresentados os valores das tensões verticais e os respectivos erros relativos de cada ponto no estudo de convergência da malha para o elemento CPE4P. Essa tabela também oferece o tamanho médio do elemento adotado, considerando a escala métrica da geometria apresentada modelada.

O quinto ponto, indicando a convergência da malha, apresentou resultados semelhantes ao estudo de Aguiar (2022), assim, todos os modelos desenvolvidos neste trabalho adotaram um tamanho médio de elemento de 1,00 m.

Figura 31 – Convergência de malha para os pontos na barragem de Jucazinho, utilizando a diferença relativa na comparação Numérico X Analítico.



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 4 – Resultados da convergência de malha para os pontos na barragem de Jucazinho, utilizando as tensões verticais em kPa e o Erro relativo (%).

		Valor de Referência Ponto A = -153.713 kPa		Valor de Referência Ponto B = -163.681 kPa		Valor de Referência Ponto C = -452.381 kPa		Valor de Referência Ponto D = -563.461 kPa	
# Elementos	Tamanho (m)	S22 (kPa)	Erro (%)	S22 (kPa)	Erro (%)	S22 (kPa)	Erro (%)	S22 (kPa)	Erro (%)
583	5.0	-134.44	12.542%	-200.14	22.277%	-493.97	9.194%	-512.11	9.113%
1751	2.5	-144.45	6.030%	-190.84	16.595%	-485.82	7.392%	-528.92	6.130%
2650	2.0	-148.67	3.284%	-188.75	15.318%	-483.67	6.916%	-532.75	5.451%
3991	1.5	-149.27	2.890%	-187.83	14.754%	-480.59	6.237%	-549.42	2.492%
12961	**1.0**	**-150.48**	**2.104%**	**-183.92**	**12.363%**	**-478.63**	**5.803%**	**-571.51**	**1.429%**
37286	0.5	-150.92	1.821%	-183.61	12.178%	-478.43	5.758%	-556.91	1.163%
93587	0.35	-151.13	1.679%	-183.01	11.810%	-478.15	5.696%	-556.62	1.215%
183341	0.25	-151.31	1.567%	-182.79	11.674%	-477.96	5.654%	-569.52	1.076%

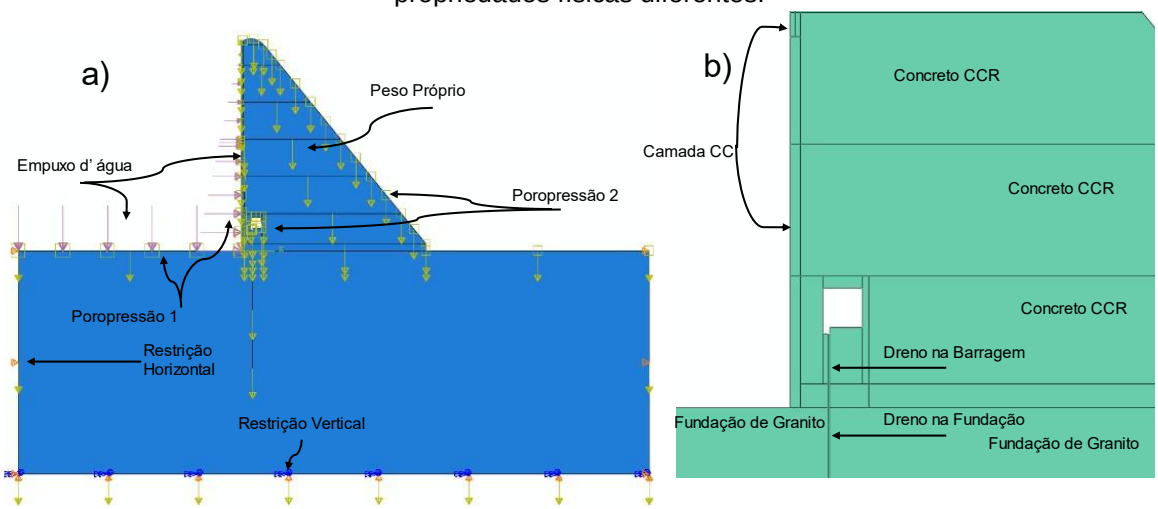
Fonte: O autor, 2024.

5.1.2. Modelo Numérico da Barragem de Jucazinho

Todos os modelos numéricos da barragem de Jucazinho compartilham com a combinação de carregamento tipo CCL. Além disso, consideram o peso próprio da barragem e da fundação. A Figura 32 apresenta uma ilustração de um modelo típico contendo todas as camadas que podem ser implementadas no ABAQUS.

A simbologia das condições de contorno permanece a mesma com a indicada no item 4.1.2 sobre o modelo simplificado. A representação da poropressão é especialmente relevante para as análises hidromecânicas acopladas, é representada a montante na mesma posição que os esforços de empuxo indicado como poropressão 1, e a jusante e na galeria o valor é zero (poropressão 2) para representar a pressão natural externa sem água, em ambas é representando pelo quadrado amarelo.

Figura 32 – Implementação do modelo numérico da barragem de Jucazinho no ABAQUS, a) Condições de contorno na seção estudada, b) Aproximação para indicar as camadas com propriedades físicas diferentes.



Fonte: O autor, 2024.

Na análise estática estrutural e na análise hidromecânica acoplada, além das distintas combinações de modelos, serão empregados diferentes tipos de elementos numéricos, conforme explicado no item 4.1.2 do modelo simplificado. Essa variação ocorre devido às exigências específicas de cada solucionador numérico utilizado, conforme indicado em ABAQUS (2014).

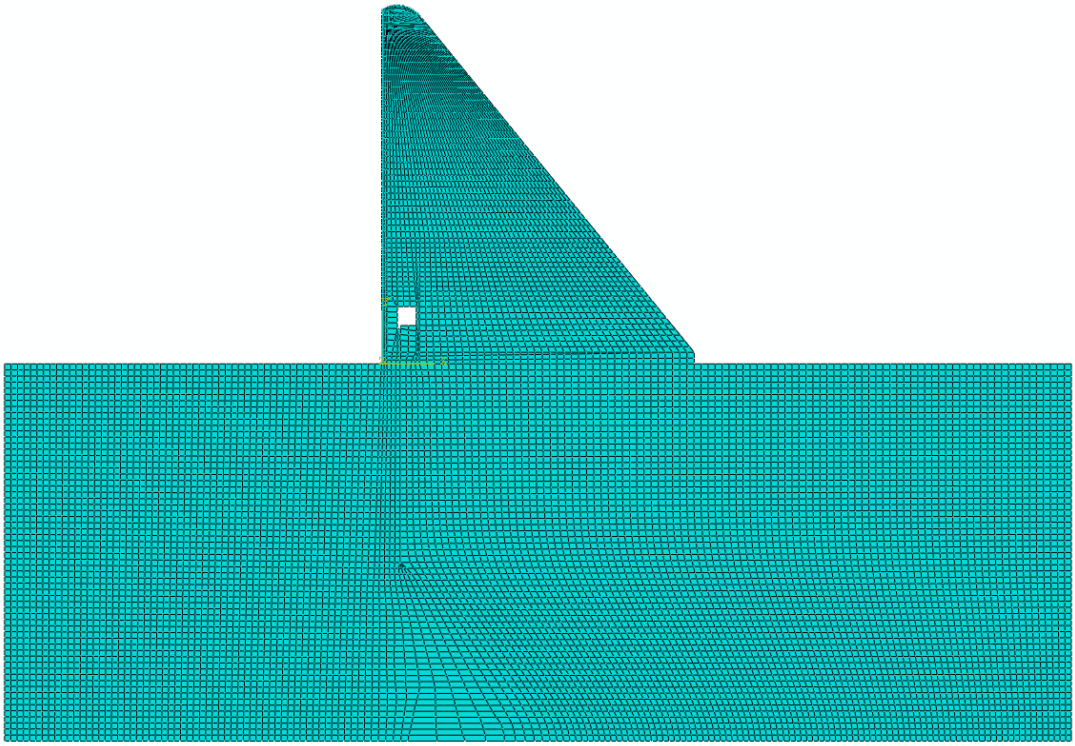
Inicialmente, foi elaborado um modelo contendo todas as possíveis camadas, com diversas partições correspondentes a esses tipos de materiais, conforme mostrado na Figura 29.

A criação de um novo modelo numérico, baseado nas combinações mencionadas e no tipo de análise a ser conduzida, segue o seguinte procedimento: (i) modificação das propriedades físicas da camada na etapa 2 do fluxograma de trabalho no ABAQUS, (ii) especificação do tipo de análise a ser implementada e ajuste na etapa 4, (iii) adaptação das condições de contorno na etapa 5, (iv) seleção do tipo de elemento de acordo com a análise a ser realizada na etapa 6 e (v) finalmente, criação de um arquivo contendo todos os dados de processamento da solução na etapa 7, conforme indicado no 4.1.1.

A Figura 33 ilustra a discretização padrão adotada em todos os modelos numéricos. É importante notar que as camadas de concreto convencional, o dreno que atravessa a barragem de CCR e a própria fundação em rocha têm dimensões consideravelmente menores em comparação com os materiais de CCR e Granito. Em tais casos, (Malm, 2016; Minera *et al.*, 2018) recomendam o uso de elementos de ordem superior. Portanto, foram empregados elementos do tipo CPE8 e CPE8P, para as análises UN e CO, respectivamente, e a galeria é representada como uma área sem elementos onde toda a sua borda são indicadas as condições de contorno de poropressão nula.

A Tabela 5 apresenta a quantidade de elementos e nós no modelo numérico, incluindo as camadas de CCR, CC, Dreno e Rocha Granítica, conforme descrito na combinação E (indicada no item 5.1) para uma análise estática estrutural, mesmo tendo camadas com dimensões muito pequenas primou pela discretização estruturada.

Figura 33 – Discretização dos elementos finitos da seção vertente da Barragem de Jucazinho.



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 5 – Quantidade de elementos e nós por camada de material utilizado na solução numérica da combinação E na análise UN.

Camada	Quantidade Nós	Quantidade Elementos	Tipo de Elemento
Concreto CCR	2.731	2.809	CPE4P
Concreto CC	414	95	CPE8P
Dreno na barragem	60	13	CPE8P
Dreno na rocha	359	96	CPE8P
Rocha Granítica	10.205	9.948	CPE4P
Total	**13.769**	**12.961**	

Fonte: O autor, 2024.

5.2 RESULTADOS DAS TENSÕES OBTIDAS NOS MODELOS DA BARRAGEM DE JUCAZINHO

Os parâmetros a serem confrontados entre o CADAM e o ABAQUS, como parte do processo de comparação do modelo numérico, abrangem: (i) a tensão normal (CADAM) comparada com a tensão S22 (ABAQUS); (ii) a tensão cisalhante (CADAM) comparada com a tensão S12 (ABAQUS); (iii) a subpressão (CADAM) em comparação com a poropressão (ABAQUS).

Dado que nas análises estáticas não são obtidas informações sobre subpressão e poropressão, mas há ação do empuxo hidrostático, uma vez que os

modelos estejam validados, a atenção será voltada para o comportamento das tensões principais e dos deslocamentos ao longo do eixo da barragem. Esses dados são de extrema relevância para os estudos de estabilidade e segurança da estrutura hidráulica.

Para uma compreensão mais aprofundada sobre a distribuição das tensões na barragem, serão examinadas as seguintes elevações: (a) base da barragem, (b) 10 metros, (c) 20 metros, (d) 30 metros, (e) 40 metros e (f) 50 metros. Essa abordagem permitirá uma análise abrangente do comportamento estrutural em diferentes alturas da barragem.

5.2.1. Comparação dos Modelos Numéricos com a Análise Estática Estrutural da Barragem de Jucazinho

Os resultados serão inicialmente apresentados com a comparação dos resultados para as análises estáticas estruturais (UN). Cada gráfico exibirá cinco curvas, representando cada uma das combinações de modelos numéricos possíveis.

A primeira grandeza analisada foi a tensão vertical, comparada com os resultados de todas as simulações numéricas realizadas. Os resultados nos primeiros níveis (base e 10 metros) não são totalmente condizentes com os dados do CADAM, pois a ação subpressão está desativada, uma vez que os modelos do ABAQUS apresentam uma parametrização mais precisa da barragem.

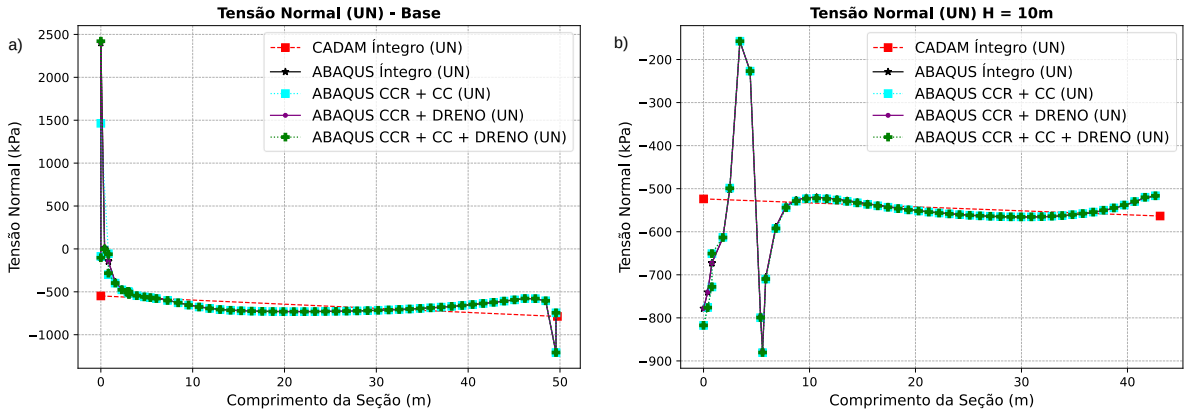
A Figura 34 ilustra os resultados da tensão normal (σ_{yy}) nos níveis da base e a 10 metros, considerando a análise estática estrutural (UN). Nos dois níveis os valores próximos da galeria apresento um pico dos valores por causa do efeito da galeria, e na parte jusante há uma pequena concentração das tensões.

As elevações da base e a 10 metros são regiões suscetíveis à influência da galeria de drenagem, resultando em consideráveis alterações na intensidade da tensão normal em todos os modelos numéricos do ABAQUS. Nesses locais, os valores das tensões exibem picos significativos devido à proximidade com a galeria.

Nos modelos do ABAQUS que incluem o dreno, os valores da tensão normal apresentam uma ligeira alteração adicional em comparação com os demais modelos. Entretanto, a partir de 10 metros após a face montante, todas as curvas de tensão normal coincidem com os resultados fornecidos pelo CADAM.

Em termos gerais, pode-se assegurar que os valores de tensão normal, obtidos por meio da análise estática estrutural, estão validados. Isso se deve ao fato de que, em grande parte da distribuição, os valores coincidem com aqueles obtidos do modelo analítico. Outro fato importante é que o dreno e a camada CC não influenciaram nos resultados, devido os parâmetros de densidade, módulo de elasticidade e Poisson serem da mesma ordem de grandeza.

Figura 34 – Comparação da Tensões Normais σ_{yy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) na Base da barragem, b) 10m.



Fonte: O autor, 2024.

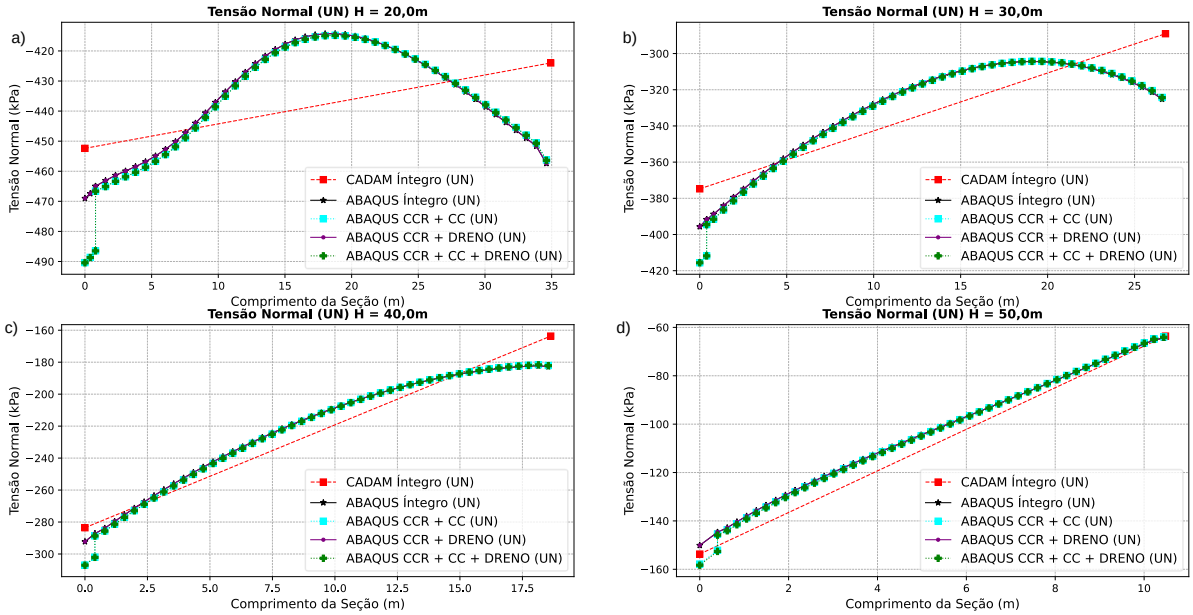
Na Figura 35 o nível de 20 metros acima da base, observa-se uma discrepância nos valores da tensão normal nos modelos que incorporam o concreto convencional, especialmente na região desse material em comparação com outros modelos. Contudo, após essa camada, os valores convergem e coincidem com os demais modelos do ABAQUS.

Este nível ainda é influenciado pela presença da galeria, o que resulta em divergências entre todos os modelos numéricos em relação à distribuição do modelo do CADAM, essas divergências mostram que as curvas são não compatíveis com os dados analíticos.

Nos patamares de 30m, 40m e 50m, as divergências entre as curvas do ABAQUS e do CADAM são significativamente menores. Observa-se um padrão consistente em termos de trajetória, inclinação e intensidade. Contudo, nos modelos que incorporam a camada de concreto convencional, ocorre um pequeno pico de tensão nessa região. Essa discrepância se deve aos parâmetros físicos dessa camada serem maiores do que os do concreto CCR.

Em seguida, todas as curvas mantêm o comportamento e intensidade em todos os modelos. A Figura 35 apresenta em detalhes os níveis de 20m, 30m, 40m e 50m acima da base. Apesar de uma discrepância dos valores dos níveis próximos a galeria em relação aos valores analíticos, a comparação das modelagens é aceitável, considerando os picos de valores e a diferença, que são influenciados pela precisão dos dados físicos, a consideração geométrica de locais específicos da barragem de Jucazinho conforme a discretização adotada.

Figura 35 – Comparação da Tensões Normais σ_{yy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m acima da base da barragem.



Fonte: O autor, 2024.

As tensões de cisalhamento na Figura 36 da base dos modelos numéricos são sensíveis à influência da fundação e da galeria, fatores que impactam nos resultados. A 10 metros, os modelos numéricos do ABAQUS são afetados exclusivamente pela presença da galeria, como evidenciado pelos resultados.

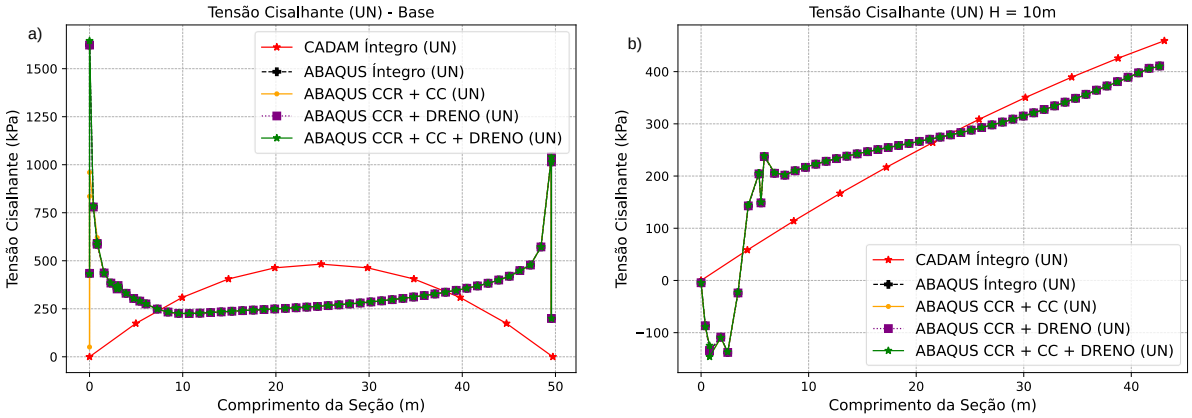
A Figura 36 destaca a comparação da distribuição das tensões de cisalhamento em todas as análises realizadas nos níveis da base e a 10 metros, considerando uma análise estática estrutural. Embora ocorram picos significativos nos modelos que incorporam o dreno na galeria, ao longo da extensão, os valores convergem e se tornam coincidentes com os demais modelos numéricos.

O resultado apresentado na Figura 36a destaca claramente as disparidades entre os resultados do CADAM e do ABAQUS, independentemente do modelo

utilizado. Essa diferença está relacionada à localização da condição de restrição de movimento na fundação: no CADAM, está na base da barragem, enquanto no ABAQUS, está na base da rocha granítica. Assim, a notável descontinuidade nos valores é produzida pela diferença nas condições de contorno da base, esse aspecto não capturado pelo CADAM.

Na Figura 36b, as distribuições das tensões de cisalhamento mostram uma maior concordância. Os resultados obtidos nos modelos do ABAQUS revelam uma variação na região da galeria, mas rapidamente se estabilizam e concordam com os resultados do CADAM. Todos os modelos desenvolvidos pelo ABAQUS exibem as mesmas distribuições e intensidades.

Figura 36 – Comparação da Tensões Cisalhantes τ_{xy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) na Base da barragem, b) 10m.



Fonte: O autor, 2024.

A 20 metros, os resultados dos modelos que incorporam o dreno são comparáveis aos demais modelos numéricos em relação à tensão normal. Entretanto, nos modelos que incluem a camada CC, observa-se uma ligeira variação na região dessa camada, que, no entanto, não impacta a distribuição global das tensões.

Nos outros níveis, todas as distribuições de tensão de cisalhamento apresentam a mesma intensidade, padrão e inclinação em todos os modelos do ABAQUS e CADAM, conforme demonstrado na Figura 37. Esta figura oferece uma visão detalhada das tensões de cisalhamento nos níveis de 20m, 30m, 40m e 50m para uma análise estática estrutural.

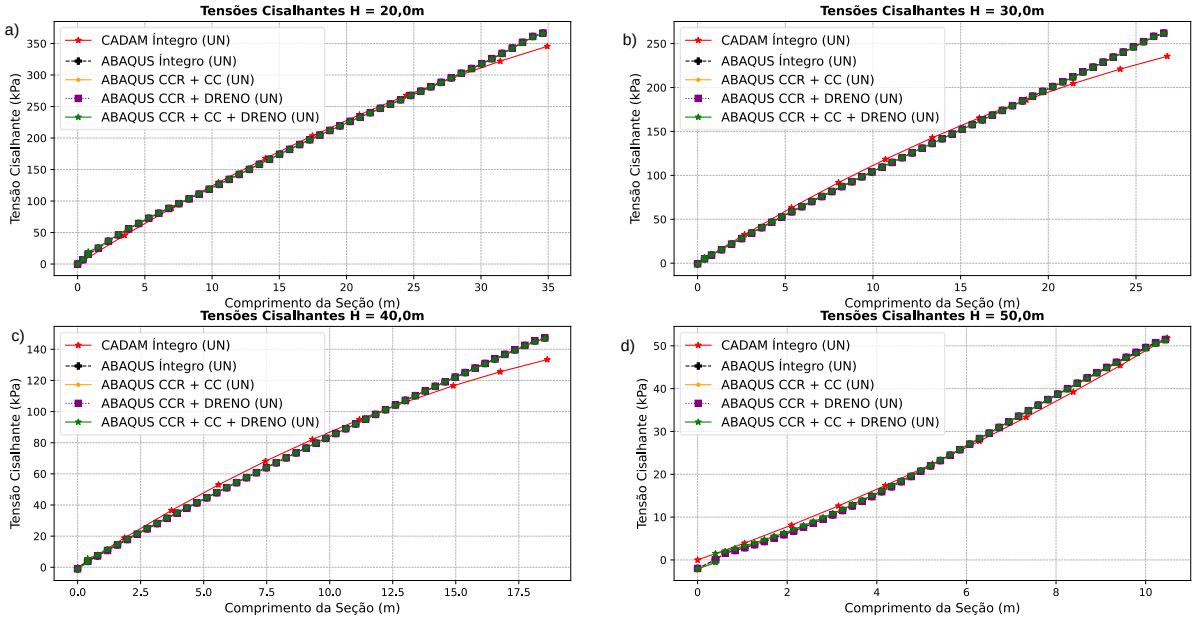
As curvas de tensão de cisalhamento em todos os modelos que consideram a camada de concreto convencional não exibem alterações ao longo da sua distribuição,

mantendo os valores idênticos aos obtidos nos modelos sem a consideração da camada e com o dreno.

Pode-se afirmar que, no aspecto de tensão de cisalhamento, todos os modelos numéricos estão coerentes na maioria dos casos em relação aos dados analíticos.

Todos os resultados obtidos nas análises UN o dreno, galeria e a camada CC, trouxeram pouca influência nos resultados, como esse tipo de verificação não considerada poropressão todos os modelos foram praticamente convergentes.

Figura 37 – Comparação da Tensões Cisalhantes τ_{xy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise estática estrutural, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m.



Fonte: O autor, 2024.

5.2.2. Comparação dos Modelos Numéricos com a Análise Hidromecânica Acoplada da Barragem de Jucazinho

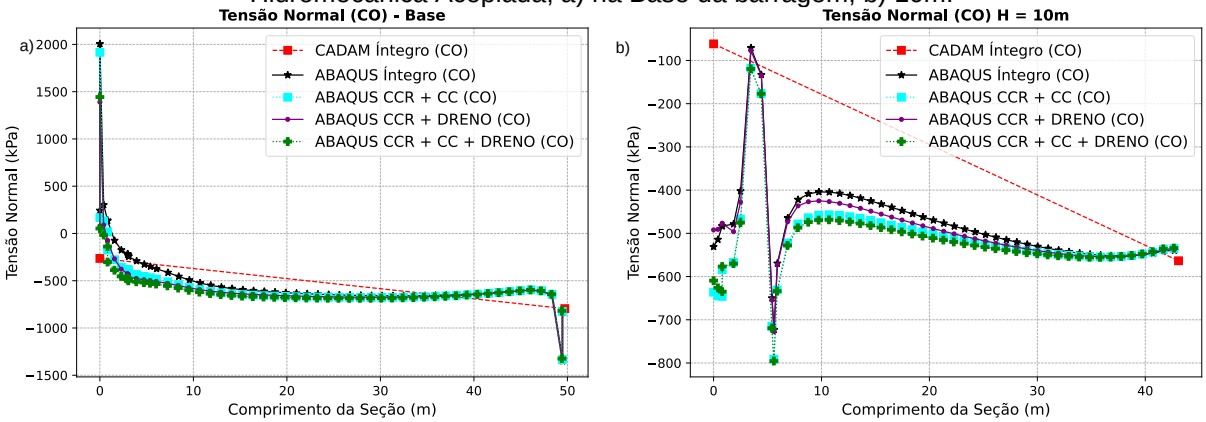
Os resultados das análises hidromecânicas acopladas (CO) serão agora apresentados, vale salientar que o modelo do CADAM considera dreno e subpressão. Cada gráfico exibirá cinco curvas representando cada uma das combinações de modelos numéricos possíveis. Tal como se observou nos resultados da análise estática estrutural para a tensão normal, os níveis da base e a 10 metros sofrem influência direta da galeria.

Nos modelos que incluem o dreno, os valores nessa região são mais intensificados devido à permeabilidade desse material. Essa observação também se aplica à análise hidromecânica acoplada. A Figura 38 mostra a distribuição das

tensões normais nos níveis mencionados acima, nela já é possível ver a influência do dreno em comparação com a Figura 34.

Na Figura 38a, observa-se que no início e fim da barragem, as tensões normais dos modelos ABAQUS apresentam picos de valores desproporcionais com a distribuição, mas isso está relacionado com o tipo de materiais, geometria da barragem e carregamentos. Na Figura 38b, na região da galeria há picos e várias tensões, mas ao longo da distribuição das tensões, em ambos os níveis, as modelagens estão comparadas com os valores analíticos.

Figura 38 – Comparação da Tensões Normais σ_{yy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) na Base da barragem, b) 10m.



Fonte: O autor, 2024.

Em todos os níveis, torna-se evidente que os modelos que consideram o concreto convencional apresentam valores mais elevados de tensão, destacando-se pela divergência dos demais.

Como previamente explicado no capítulo referente ao modelo simplificado de barragem de concreto, a poropressão exerce uma influência significativa nos valores das tensões normais ao se comparar com os valores da análise UN. Esta análise leva em consideração a tensão total, incorporando a contribuição da poropressão, cujo efeito começa a se tornar visível nos resultados obtidos.

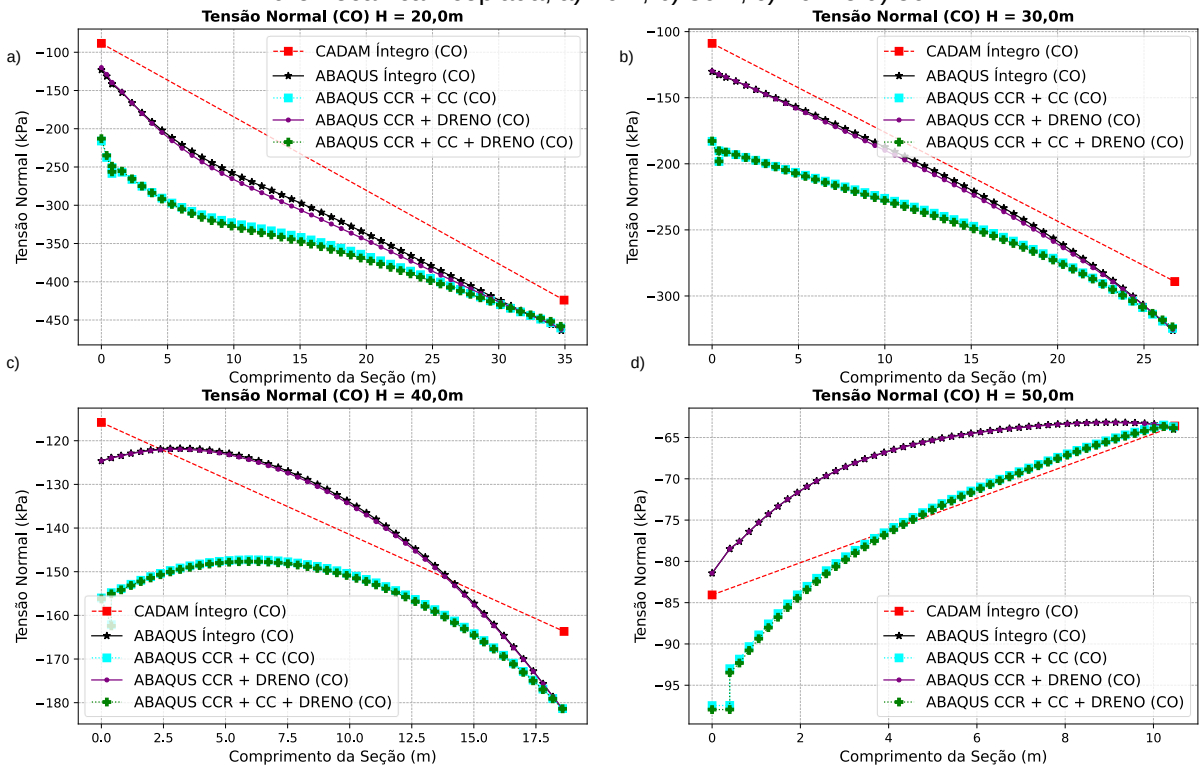
Nos modelos que incorporam a camada de concreto convencional, os valores das tensões normais são superiores em comparação com os demais modelos CO. Tal disparidade se deve à distribuição interna da poropressão, que afeta a magnitude das tensões nessa região. A poropressão exerce uma pressão adicional nos poros do concreto.

Conforme já demonstrado no capítulo do modelo simplificado, em que o comparativo de um determinado modelo para os cenários UN e CO, a consideração da poropressão é relevante para uma análise mais precisa das tensões normais. Nos modelos com camada de concreto convencional, onde ocorre uma menor infiltração de água, essa informação é fundamental para compreender o comportamento e a distribuição das tensões ao longo da estrutura.

Outro ponto a ser observado nos modelos com a camada CC é um pequeno pico de tensão na região da camada em comparação com os demais modelos, decorrente do módulo de elasticidade ser superior ao do concreto compactado a rolo.

A Figura 39 ilustra a distribuição das tensões normais para as elevações de 20m, 30m, 40m e 50m, ressaltando que, nas camadas mais superiores, o dreno não influencia significativamente nos resultados. Os modelos com a camada de concreto convencional não apresenta convergência com o CADAM devido a influência da subpressão ser diferente nesses modelos comparados com os demais, pois camada CC interfere diretamente no fluxo interno.

Figura 39 – Comparação da Tensões Normais σ_{yy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m.



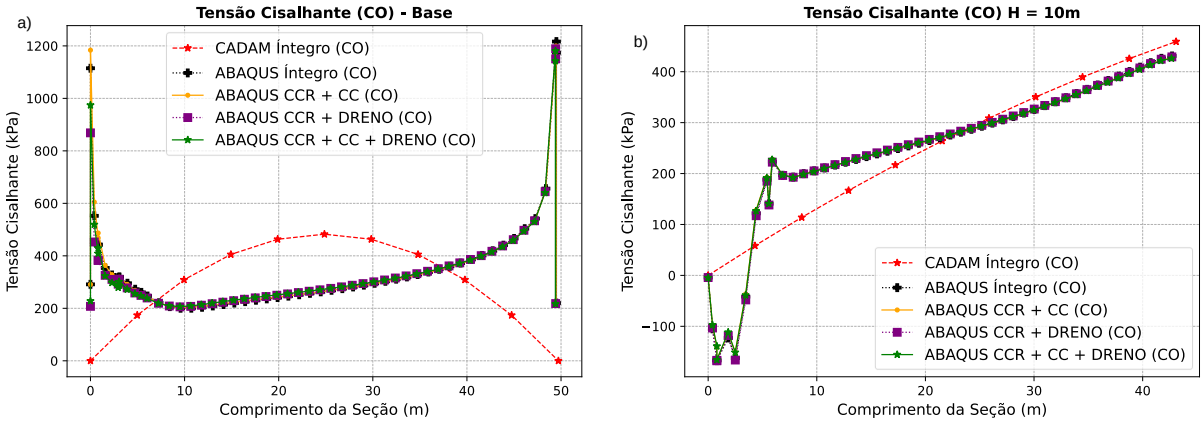
Fonte: O autor, 2024.

As observações realizadas na análise estática estrutural são igualmente aplicáveis à análise hidromecânica acoplada das tensões cisalhantes. O início das distribuições das tensões cisalhantes nos níveis da base e 10 metros apresenta pequenas diferenças, especialmente nos modelos que incorporam a consideração do dreno na região da galeria. Nestas áreas, os valores das tensões cisalhantes são mais intensos devido à presença do dreno.

Contudo, nos demais pontos analisados em cada nível, os valores das tensões cisalhantes coincidem com os obtidos na análise estática estrutural. Isso sugere que as tensões cisalhantes mantêm consistência entre os diferentes modelos numéricos, e os diversos tipos de camadas não interferem nos resultados de cisalhamento, independentemente do tipo de análise conduzida, isso mostra que as Poropressões afetam apenas as tensões normais.

A Figura 40 oferece uma representação visual da distribuição das tensões cisalhantes nos níveis da base e 10 metros acima, evidenciando as variações ao longo da seção transversal da barragem. Essa análise proporciona uma compreensão mais abrangente do comportamento das tensões cisalhantes e sua relação com a presença do dreno e da galeria, que são os fatores mais significativos observados.

Figura 40 – Comparação da Tensões Cisalhantes τ_{xy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) na Base da barragem, b) 10m.



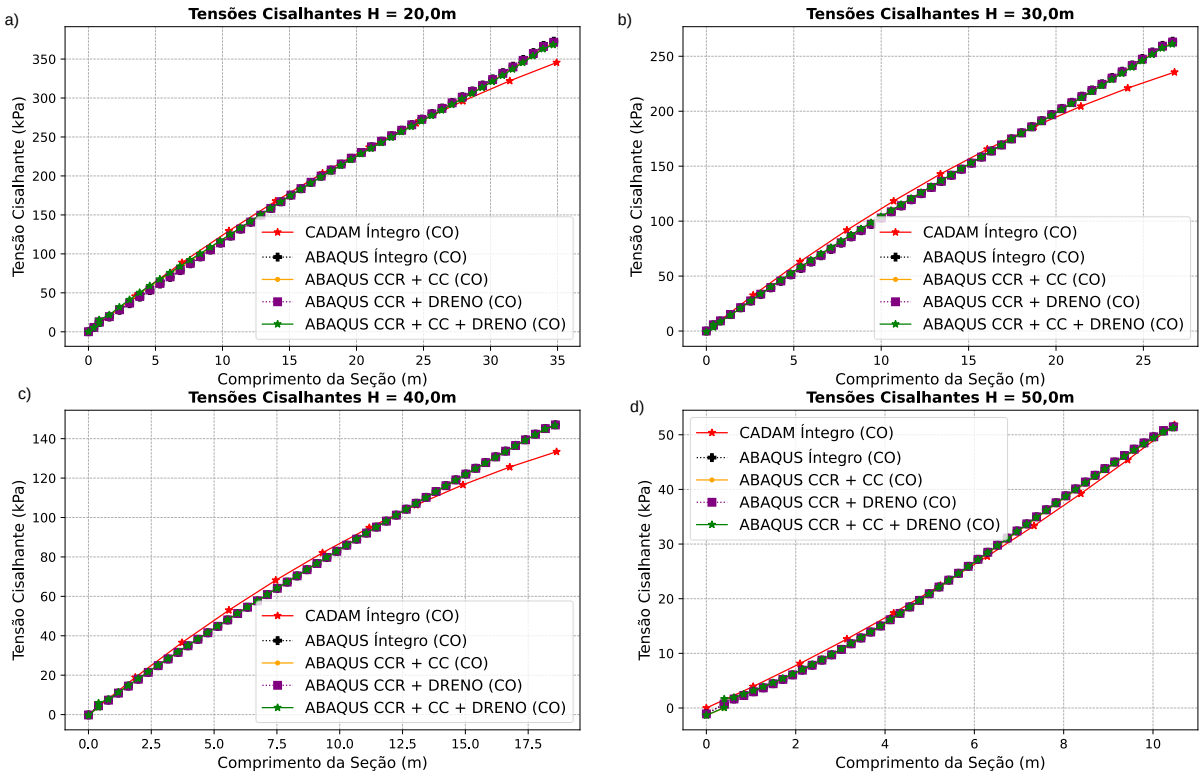
Fonte: O autor, 2024.

Os valores da tensão de cisalhamento nos demais níveis, nos quais a influência da galeria de drenagem e o dreno é mínima, são semelhantes aos obtidos na análise estática estrutural. Essa uniformidade indica que as distintas propriedades físicas dos materiais não impactam nos resultados da tensão de cisalhamento e que as condições de contorno desempenham um papel mais relevante nesse tipo de tensão.

Todas as observações feitas na análise estática estrutural mantêm sua validade nessa análise, uma vez que as curvas de cisalhamento dos diferentes modelos numéricos coincidem. Isso sugere que as variações nas propriedades físicas dos materiais não exercem um impacto significativo nos resultados da tensão de cisalhamento.

A Figura 41 oferece uma visão abrangente da distribuição completa dos valores da tensão de cisalhamento nas elevações de 20m, 30m, 40m e 50m, considerando todos os modelos na análise hidromecânica acoplada. Essa representação visual permite uma compreensão completa da distribuição ao longo da seção transversal da barragem, destacando a consistência dos resultados entre os diferentes modelos numéricos e as análises realizadas com os valores analíticos.

Figura 41 – Comparação da Tensões Cisalhantes τ_{xy} obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m acima da base da barragem.



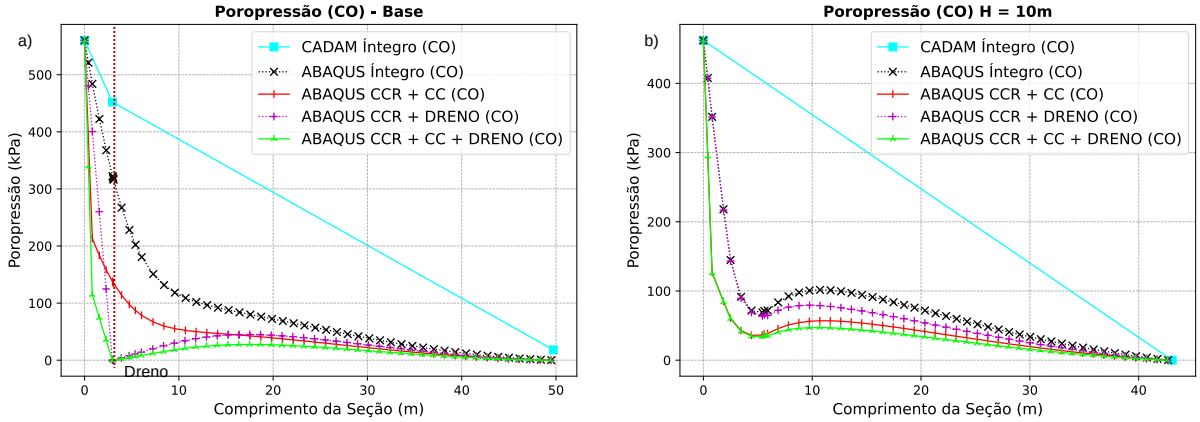
Fonte: O autor, 2024.

A Figura 42 apresenta o comportamento da poropressão nos níveis da base e a 10m, considerando todos os modelos desenvolvidos. Nestes níveis, a distribuição da poropressão não é uniforme, exceto nas extremidades, que são iguais devido às condições de contorno inicialmente impostas.

Na Figura 42a, o resultado obtido pelo CADAM revela um ponto de inflexão na região da galeria, seguido por uma curva com uma inclinação diferente. Isso ocorre porque o modelo leva em consideração a presença do dreno nessa região. Nos modelos do ABAQUS todos mostram que tem influência da condição de contorno na galeria, os modelos com o dreno também contém uma influência da camada. Na Figura 42b, é observado que a presença da galeria e dos drenos interfere na distribuição da poropressão no interior da barragem, pois há uma grande alteração dos valores em comparação com os valores do CADAM.

No entanto, nos modelos com a camada de concreto convencional, são observados valores menores de poropressão em comparação aos outros modelos, ocorrendo uma redução mais significativa nos valores da poropressão em relação aos modelos sem essa camada nos dois níveis demonstrados.

Figura 42 – Comparação da Poropressão obtidas no CADAM e ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) na Base da barragem, b) 10m acima da base da barragem.



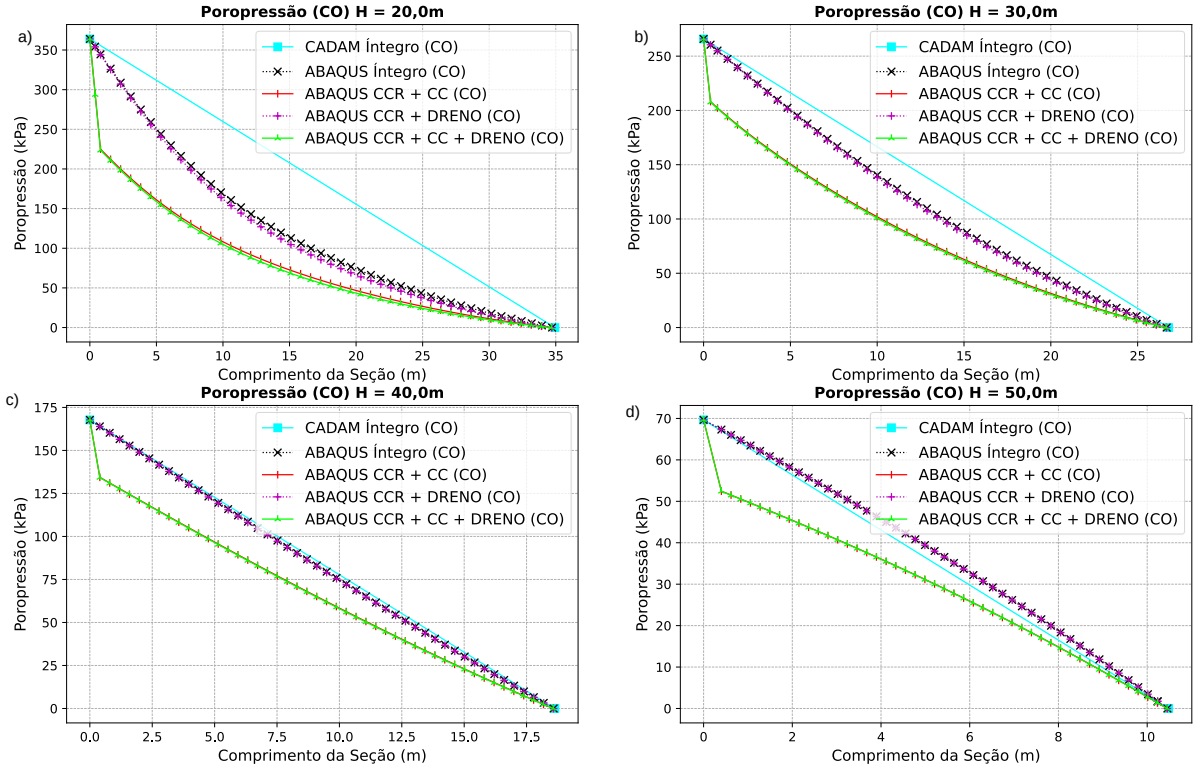
Fonte: O autor, 2024.

Nos níveis restantes da barragem estão demonstrados na Figura 43, é evidente que os modelos que contém a camada de concreto convencional na face montante, divergem dos outros modelos numéricos. Essa discrepância é principalmente atribuída ao parâmetro de permeabilidade do concreto convencional, que é mais baixo, conferindo-lhe uma menor permeabilidade em comparação com os demais materiais utilizados.

Os resultados corroboram que os modelos que incorporam a camada de concreto convencional apresentam valores superiores na tensão normal em comparação com os demais. Isso corrobora para uma maior segurança na integridade da estrutura hidráulica.

A Figura 43 esboça o comportamento da poropressão nas elevações de 20m, 30m, 40m e 50m. No nível de 20m ainda sofre a influência da galeria, mas nos níveis acima essa ação é pouca, mas as propriedades que cada modelo tem o seu destaque.

Figura 43 – Comparação da Poropressão obtidas no CADAM e ABAQUS da barragem de Jucazinho análise Hidromecânica Acoplada, a) 20m, b) 30m, c) 40m e d) 50m.



Fonte: O autor, 2024.

A comparação dos resultados é realizada semelhante ao que foi feito no item 4.2.2, onde a tensão normal CO subtraída do valor da poropressão obtêm-se o valor da tensão normal UN.

A Figura 44 apresenta o isovalores da poropressão para todos os modelos numéricos da barragem em todos os modelos a galeria impõe influência em todas as distribuições de poropressão no interior da barragem.

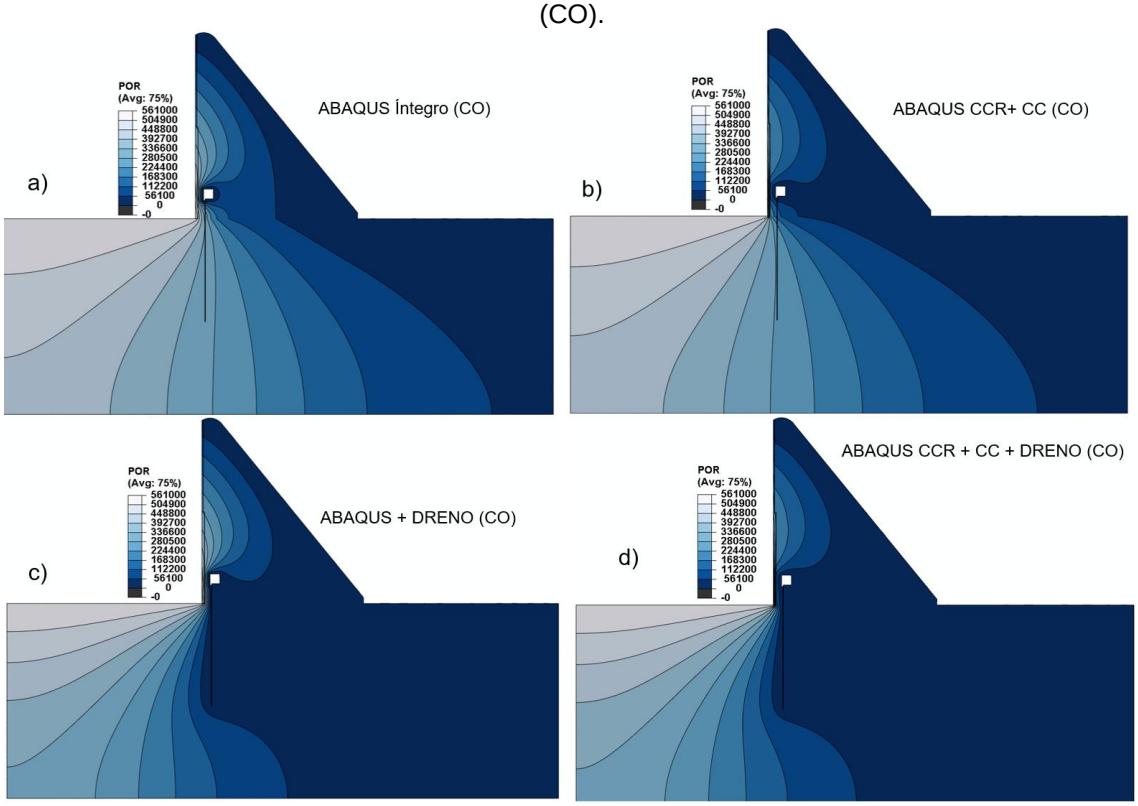
A Figura 44a mostra que na base barragem do lado jusante a galeria diminuiu a ação da poropressão, enquanto, na Figura 44b por causa da camada de concreto convencional a ação da poropressão na base é de menor intensidade em comparação com o modelo integro.

Na figura 44c que é o modelo que contém o dreno é perceptível a grande diminuição da poropressão na base da barragem, já na Figura 44d a distribuição da poropressão em toda a barragem é a menor do que todos os outros modelos, pois a

ação conjunta da camada de concreto convencional e o dreno diminuiu significativamente a ação da poropressão no interior da barragem.

Ao olhar o isovalores demonstrados na Figura 44 em conjunto com a Figura 43, percebe-se que nos níveis acima da galeria não sofrem com a influência dela, destacando que sua importância é maior na base da barragem.

Figura 44 – Poropressão dos modelos numéricos do ABAQUS (Pa), a) ABAQUS Íntegro (CO), b) ABAQUS CCR+ CC (CO), c) ABAQUS + DRENO (CO) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (CO).



Fonte: O autor, 2024.

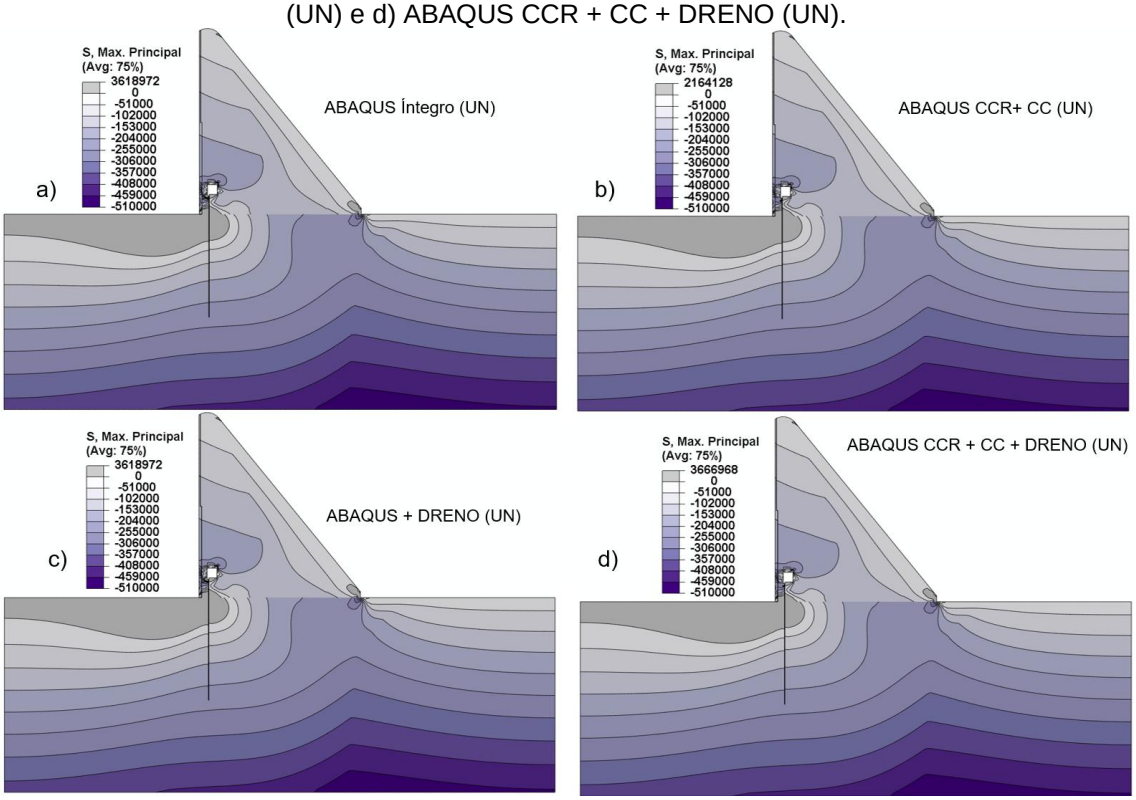
5.2.3. Tensões Principais dos Modelos Numéricos com a Análise Estática Estrutural da Barragem de Jucazinho

As tensões principais máximas na análise estática estrutural revelaram valores de compressão em toda a extensão da seção, em todos os modelos numéricos. No entanto, na região do calcanhar da barragem, foram identificados valores de tração. Além disso, em todos os modelos, pequenos picos de tensão foram observados na região da galeria e na parte a jusante, mas com magnitude bastante reduzida.

A Figura 45 apresenta os valores os isovalores das tensões principais máximas, obtidos em todos os modelos numéricos desenvolvidos para a análise estática

estrutural. Nesse contexto, todos os modelos obtiveram valores convergentes não apresentando nenhuma diferença quando o modelo numérico utiliza alguma camada de material diferente.

Figura 45 – Tensão Principal Máxima σ_{max} (Pa) obtida nos modelos numéricos de análise estática estrutural, a) ABAQUS Íntegro (UN), b) ABAQUS CCR+ CC (UN), c) ABAQUS + DRENO (UN) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (UN).



Fonte: O autor, 2024.

As tensões principais mínimas na análise estática estrutural revelaram predominantemente valores de compressão em todos os modelos numéricos. Foi notado que a região da galeria provoca uma considerável variação na intensidade da tensão, mas à medida que se afasta, os valores se estabilizam, exibindo um comportamento mais consistente.

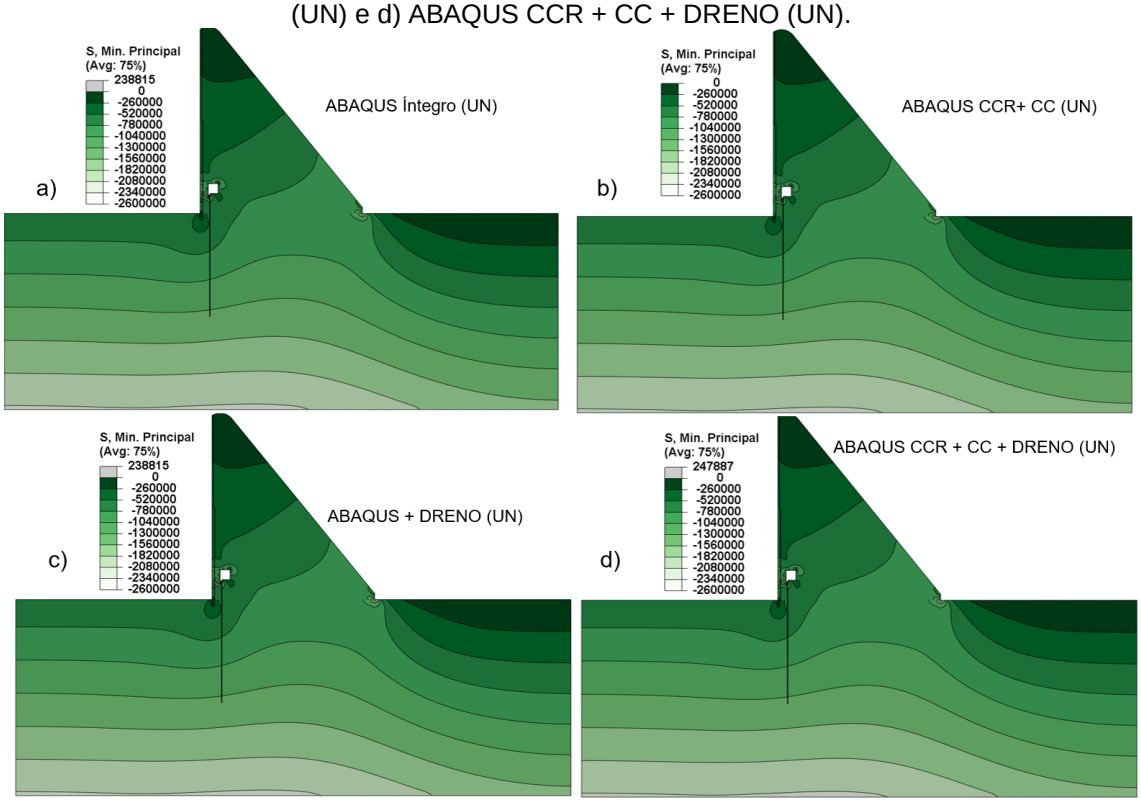
A presença do dreno, da galeria e a camada de concreto convencional não influenciam nos resultados, e todos os modelos demonstram o mesmo comportamento, intensidade e distribuição ao longo de todos os níveis da barragem de Jucazinho

Na região da base a montante e jusante, todos os modelos apresentam pequeno pico de tensão. A Figura 46 mostra os valores das tensões principais mínima de cada modelo numérico desenvolvido no ABAQUS para análise estática estrutural.

É notório que comportamento global para análise estática estrutural no geral, não há nenhuma influência para a utilização de camadas de materiais diferentes visando uma otimização das tensões obtidas em uma barragem de concreto.

Os modelos com a camada de concreto convencional e com dreno os valores da tensão principal mínima convergiram para o mesmo valor do modelo com apenas o concreto CCR.

Figura 46 – Tensão Principal Mínima σ_{min} (Pa) obtido nos modelos numéricos de análise estática estrutural, a) ABAQUS Íntegro (UN), b) ABAQUS CCR+ CC (UN), c) ABAQUS + DRENO (UN) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (UN).



Fonte: O autor, 2024.

5.2.4. Tensões Principais dos Modelos Numéricos com a Análise Hidromecânica Acoplada da Barragem de Jucazinho

Ao examinar os valores dos modelos numéricos deste estudo, nota-se que as tensões principais máximas apresentam valores de tração na região da galeria. Em todos os modelos ocorrem um pico de tensão na região da galeria. Ao se afastar da galeria, todos os modelos apresentam valores que tendem a se aproximar de zero e a partir disso se tornam tensão de compressão.

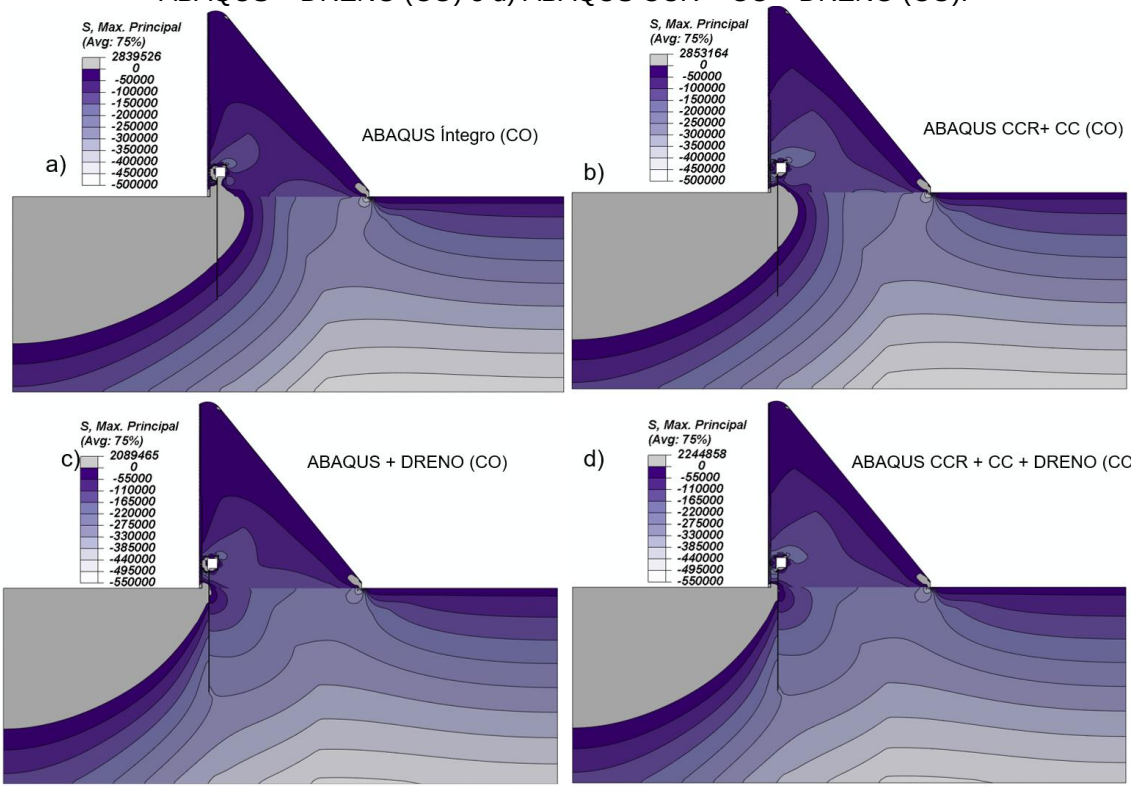
A Figura 47 oferece uma representação visual dos isolinhas das tensões principais máximas para os modelos do ABAQUS na análise hidromecânica acoplada.

No nível de 20 metros acima da base, há a uma influência da galeria, em todos os modelos numéricos exibem diferentes distribuições da tensão principal máxima.

Os modelos que incorporam concreto convencional mostram consistência em seus padrões de curva ao longo de todos os níveis acima da base, mas com intensidades de valores distintas, evidenciando a influência específica da poropressão nos modelos ao verificar a região da galeria.

Nos modelos sem a camada de concreto convencional, a poropressão é mais intensa resultando em valores diferentes da tensão principal máxima em cada ponto no interior da barragem. No entanto, ao comparar os modelos sem a camada CC, os valores são praticamente coincidentes tendo em vista que na parte superior da galeria a influência do dreno.

Figura 47 – Tensão Principal Máxima σ_{max} (Pa) obtidas nos modelos numéricos do ABAQUS Hidromecânica Acoplada, a) ABAQUS Íntegro (CO), b) ABAQUS CCR+ CC (CO), c) ABAQUS + DRENO (CO) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (CO).

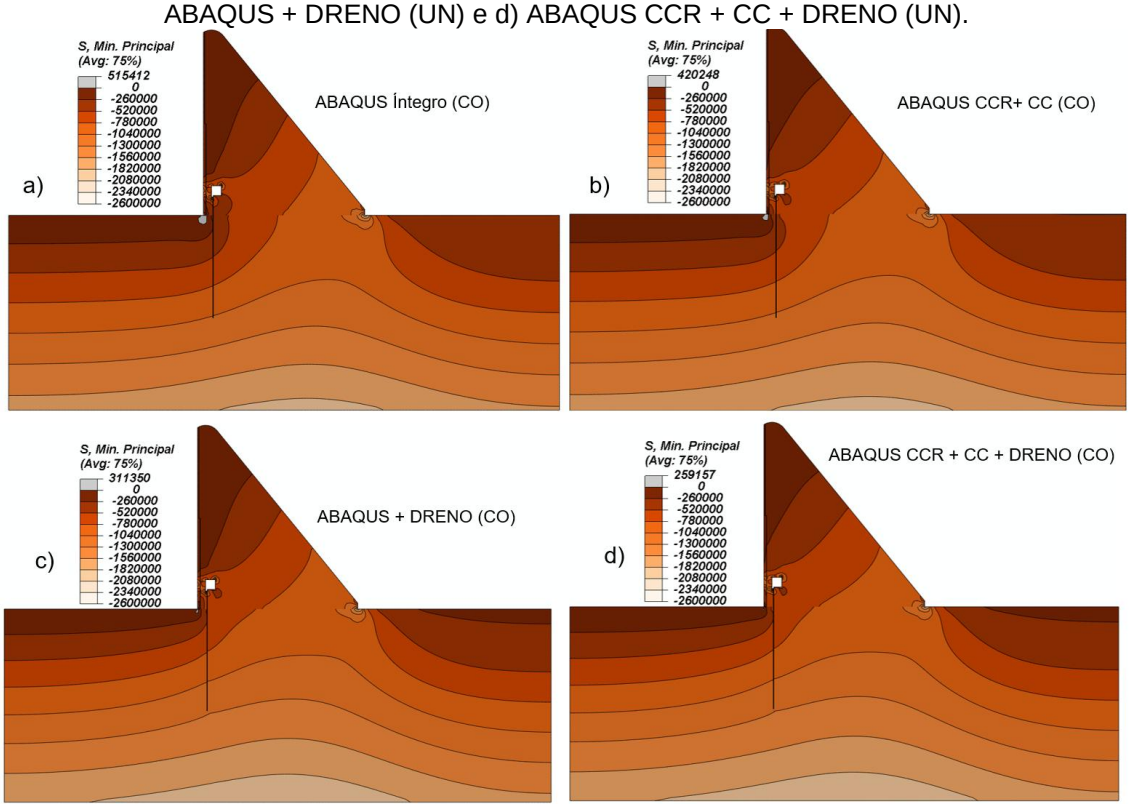


Fonte: O autor, 2024.

A tensão principal mínima, obtida por meio da análise hidromecânica acoplada, é totalmente de compressão em todos os modelos numéricos, como ilustrado na Figura 48. Todas as observações feitas na análise estática estrutural se aplicam igualmente a esta análise, exceto pelas considerações referentes aos modelos com

camada de concreto convencional que possui uma pequena diferença em relação aos demais modelos.

Figura 48 – Tensão Principal Mínima σ_{min} (Pa) obtidas nos modelos numéricos do ABAQUS da análise Hidromecânica Acoplada, a) ABAQUS Íntegro (UN), b) ABAQUS CCR+ CC (UN), c) ABAQUS + DRENO (UN) e d) ABAQUS CCR + CC + DRENO (UN).



Fonte: O autor, 2024.

5.2.5. Variação dos Deslocamento nos Modelos Numéricos na Barragem de Jucazinho

Foram conduzidas análises ao longo do eixo da barragem, conforme indicado na Figura 29, a primeira análise referente ao deslocamento total absoluto na análise estática estrutural (UN) e a segunda na análise hidromecânica acoplada (CO). A Figura 49 apresenta os resultados obtidos em ambas as análises.

Na Figura 49a, observa-se que os deslocamentos nos modelos numéricos do ABAQUS na análise estática estrutural aumentam com a altura da barragem. Entre as alturas de 6m a 9m, há uma descontinuidade nos valores devido à presença da galeria.

Na Figura 45b, apresentam-se os deslocamentos nos modelos numéricos do ABAQUS na análise Hidromecânica Acoplada. Nos modelos em que os valores iniciais de poropressão são menores, observam-se os maiores deslocamentos absolutos.

Na base os modelos com dreno são os que deslocam mais, mas com a inclusão de uma camada mais impermeável resulta em deslocamentos menores na barragem, reduzindo a influência da poropressão no interior da estrutura, contribuindo para uma maior estabilidade e menor deformação, Tabela 6 mostra os valores dos deslocamentos na crista e a discrepância entre as análises Estática e Hidromecânica acoplada.

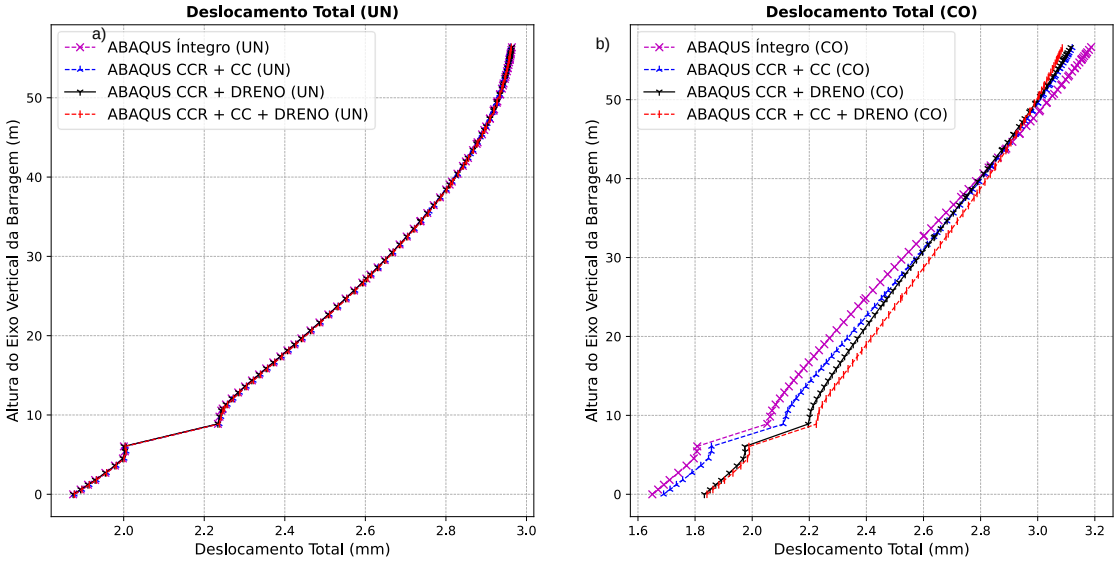
Tabela 6 – Deslocamento absoluto na crista da barragem em mm e o Discrepância (%).

Modelo	Deslocamento na Crista (mm)		Discrepância
	UN	CO	(%)
Integro	2.963	3.187	7.57%
CCR + CC	2.963	3.121	5.34%
CCR + DRENO	2.963	3.116	5.16%
CCR + CC + DRENO	2.963	3.086	4.17%

Fonte: O autor, 2024.

As curvas na Figura 49 demonstram que na análise estática estrutural, a declividade é menor, enquanto na hidromecânica acoplada é maior. A intensidade dos deslocamentos é mínima, mas há diferença entre as análises Estática estrutural e a hidromecânica acoplada.

Figura 49 – Deslocamento total absoluto nos modelos numéricos do ABAQUS da barragem de Jucazinho, a) Análise estática estrutural (UN), b) Análise Hidromecânica Acoplada (CO).



Fonte: O autor, 2024.

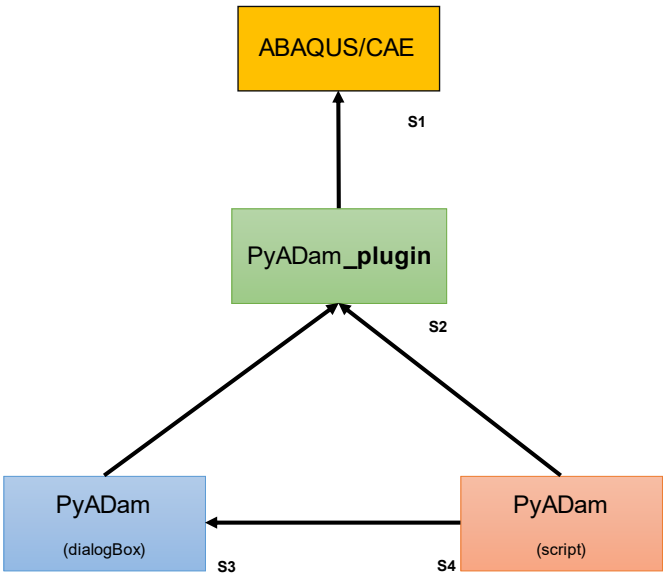
6 PROGRAMAÇÃO DIRECIONAL PARA O ABAQUS

Foi desenvolvido um programa direcional denominado PyADam (Programação em Python via ABAQUS para Barragens de Concreto). O ABAQUS permite a integração de rotinas através da linguagem Python.

O conhecimento sequencial de como realizar modelagens numéricas MEF, utilizando o software ABAQUS/CAE, é importante para a criação de scripts de programação. Esses scripts podem ser valiosos para auxiliar profissionais técnicos em barragens, suprindo lacunas em ferramentas específicas para estudos de tensões e fluxo interno nessas estruturas.

A Figura 50 ilustra o fluxo de trabalho para a implementação de um código direcional (*plug-in*). O ABAQUS reconhece o *plug-in* por meio de dois arquivos com extensões semelhantes, .PY e .PYC, conforme descrito na etapa 2. O arquivo do *plug-in* chama o arquivo contendo a caixa de diálogo e o arquivo com o código direcional. A caixa de diálogo é implementada na plataforma *Graphical User Interface* (GUI) para conectar as funções do código direcional, na extensão .PY. O script contém todas as subfunções criadas especificamente para o propósito do *plug-in*, nas extensões .PY e .PYC. O link para todos os códigos do *plug-in* PyADam estão contidos nos Apêndice C do trabalho.

Figura 50 – Fluxo de implementação do *plug-in* PyADam para o ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

6.1 Particularidade para Implementação do Plug-in no ABAQUS

Recomenda-se que a rotina seja desenvolvida com pequenas funções acionadas por comandos específicos, dessa forma o código funciona de forma mais otimizada e compacta, facilitando o emprego da programação em plataformas específicas conforme explicado por Lim e Ha (2023).

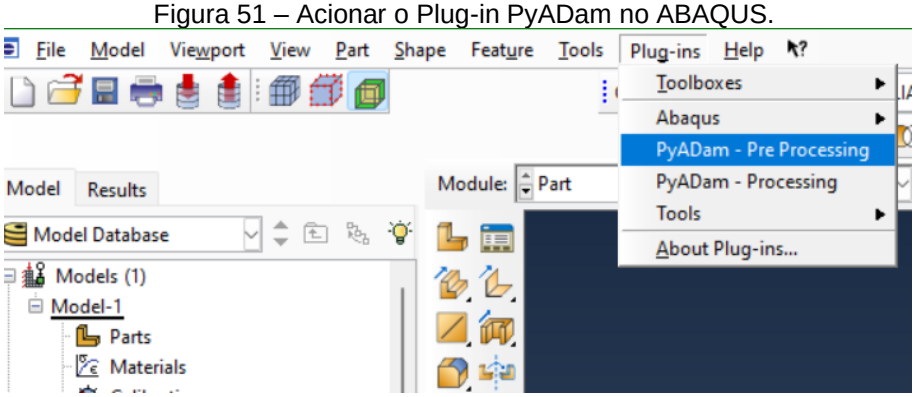
Ao estudar o fluxo de trabalho no ABAQUS conforme indicado na Figura 16 para a implementação do *plug-in*, foi constatado que na etapa 7 não há possibilidade de automatizar em uma única fase a criação do arquivo de trabalho, iniciar o processamento e verificar os resultados, sendo obrigatoriamente módulos distintos.

O plug-in PyADam possui duas partes da seguinte forma: (i) Pré-processamento e (ii) Processamento. Vale ressalta que o *plug-in* não realiza nenhuma atividade de pós-processamento.

O pré-processamento consiste na criação da geometria, indicação das propriedades do material, indicação do ponto de referência global, lançamento dos carregamentos e a indicação das condições de contorno, definição da malha, do tipo de elemento e a criação do arquivo de trabalho. No próximo item será totalmente demonstrado.

A etapa do processamento abrange apenas a realização da ativação do processamento numérico do modelo. Vale ressaltar que esse módulo pode ser utilizado para qualquer outro tipo de modelagem utilizado o ABAQUS, pois consiste em acionar o processamento de um arquivo qualquer ODB não processado. A Figura 51 mostra como acionar o *plug-in* PyADam no ABAQUS.

Figura 51 – Acionar o Plug-in PyADam no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

6.2 Visão Geral dos Principais Recursos

O módulo de Pré-processamento foi dividido em seis abas para diferenciar cada etapa do fornecimento e configuração para o desenvolvimento do modelo numérico de uma barragem de concreto, essa estruturação essa estruturação de montagem do modelo numérico está demonstrado no fluxo de trabalho descrito na Figura 16.

Ao longo desse item serão demonstrados todas as abas do módulo de pré-processamento e explicados todos os recursos que foram implementados de forma automatizados e o módulo de processamento, o link dos códigos de programação estão contidos no Apêndice C.

A primeira aba do *plug-in* corresponde a Etapa 1 do fluxograma do ABAQUS, que é a criação da geometria da barragem, que deve iniciar nomeando a seção transversal a ser criada, em seguida fornecer de forma cartesiana os principais pontos que definem a seção transversal. Vale salientar que a origem da seção deve ser o do calcanhar da barragem e os pontos devem ser sequenciados no sentido anti-horário. Caso exista uma galeria no interior da barragem, devem ser informados os pontos cartesianos. Caso não existam, apenas deixar a tabela vazia.

A plataforma programação em *Python-GUI* aceita pelo ABAQUS comporta no máximo vinte e cinco pontos, que podem ser inseridos de forma manual ou em um arquivo de texto. A Figura 52 demonstra a aba dos dados de entrada.

Com os dados da seção transversal fornecidos são criadas algumas características intrínsecas para o modelo numérico, é necessário a definição de posições e superfícies características para o tipo de modelo numérico a ser confeccionado.

De acordo com Ali et al. (2023), a criação de partições consiste na implementação de um objeto ou parte dele em formas pontuais, lineares, planares ou tridimensionais, podendo ser configuradas de várias maneiras e dimensões.

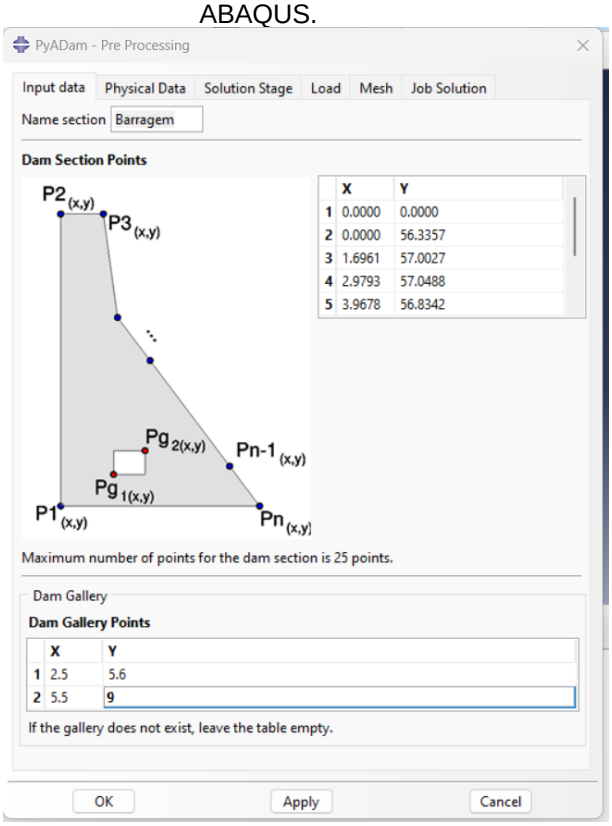
Para um estudo bidimensional de uma barragem de concreto, foi desenvolvida uma função que cria um plano bidimensional referente à seção transversal de uma barragem, onde são necessárias apenas informações sobre o contorno da barragem e, se houver, a galeria, fornecidas de forma cartesiana. A fundação em rocha é automaticamente criada considerando os critérios de Malm (2016) e Moura (2016).

Com várias partições criadas, são acionadas funções automáticas para definir posições e superfícies que serão utilizadas nas abas seguintes. As posições e

superfícies criadas podem estar localizadas no mesmo ponto ou possuir dimensões diversas (pontual, linear, planar ou tridimensional). Esses elementos são fundamentais para desencadear características distintas ao longo de toda a programação, uma vez que serão utilizados nas abas subsequentes para incorporar suas respectivas informações no modelo numérico.

As subfunções automatizadas servem para: (i) Definir a seção geral, (ii) Definir posições em linha, (iii) Definir posição em plano, (iv) Definir superfície em linha, (v) Definir plano de corte e (vi) Particionar a seção com base em um plano de corte. Os resultados dessas subfunções serão utilizados nas próximas abas do *plug-in* PyADam.

Figura 52 – Interface da aba dos dados de entrada no *Plug-in* PyADam Pré-Processing no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

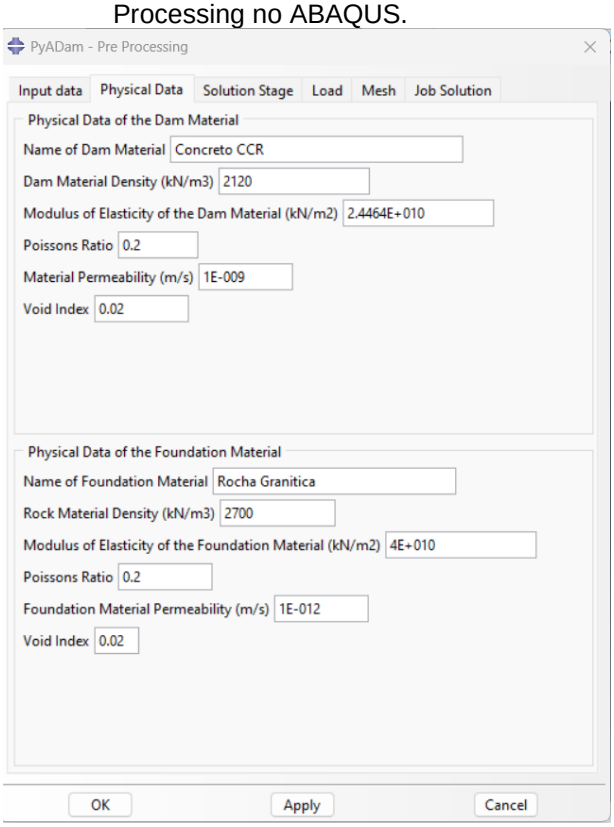
A segunda aba do *plug-in* que é equivalente a etapa 2 no ABAQUS é a indicação das propriedades, que consiste na indicação dos parâmetros físicos de cada material a ser descriminado. Nesse tipo de estudo são necessários indicar as propriedades físicas dos materiais da barragem e da fundação.

Caso a barragem possua camadas com dados físicos diferentes é importante que a região tenha sido criada na etapa inicial. A programação dessa etapa consiste

em utilizar a posição do plano criado e aplicar os parâmetros de densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, Permeabilidade e índice de vazios em cada região. A Figura 53 demonstra a aba dos dados físicos da barragem.

Deve ser digitado o nome do material correspondente a barragem e a fundação, a densidade dos materiais é fornecida em kN/m^3, o módulo de elasticidade é em kN/m^2, o coeficiente de Poisson, a permeabilidade em m/s e o índice de vazios. O ABAQUS trabalha de forma adimensional, mas recomenda-se fornecer os dados em um sistema de unidades, para que os resultados sejam compatíveis.

Figura 53 – Interface da aba dos dados físicos dos materiais no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

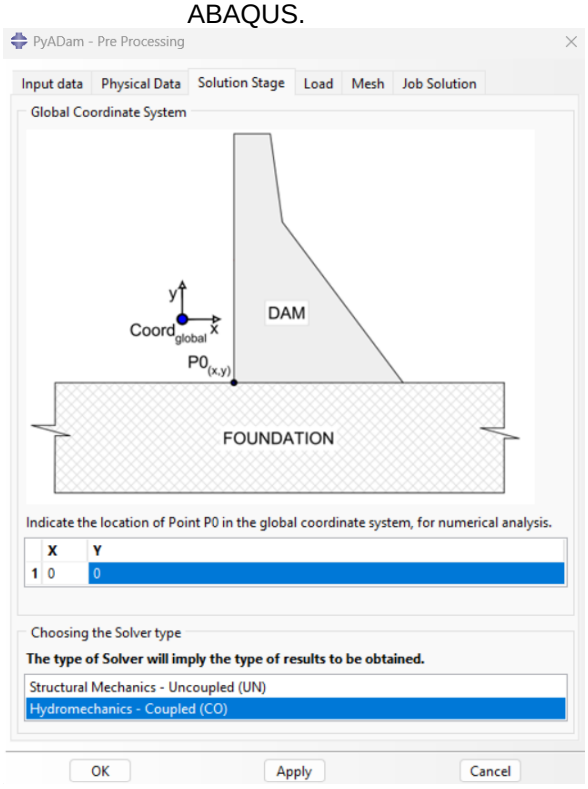
A terceira aba do *plug-in* PyADam refere-se ao estágio da solução, que compreende a montagem do conjunto e a seleção do tipo de solucionador, correspondendo às etapas 3 e 4 do fluxograma ABAQUS. Nesta aba, ocorre a união de todos os objetos modelados, com suas respectivas informações físicas integradas em um único sistema de coordenadas global, formando um domínio unificado. Nesse domínio, é especificado o tipo de solucionador a ser utilizado.

A escolha da origem do sistema global de coordenadas é um critério do analista responsável pelo desenvolvimento do estudo, sendo fortemente recomendado que seja estabelecido no ponto zero. Essa informação é inserida na programação, indicando a coordenada de origem.

Na continuação da terceira aba do *plug-in* PyADam, é feita a indicação da opção do tipo de solucionador. Isso envolve a escolha do tipo de solucionador numérico a ser aplicado na análise numérica. No estudo da barragem de concreto, como previamente apresentado, podem ser utilizados solucionadores do tipo mecânico estrutural (Estático) ou hidromecânico acoplado (Solos). A Figura 54 ilustra a aba referente ao estágio da solução do modelo numérico.

A escolha do tipo de solucionador é realizada através de uma lista booleana, conforme a decisão do analista, é empregado o tipo de solucionador correspondente. Subfunções específicas foram desenvolvidas previamente para aplicar o tipo de solucionador escolhido. Essa escolha influenciará a utilização de determinadas linhas e superfícies que já foram criadas, sendo um aspecto importante para as abas seguintes.

Figura 54 – Interface da aba do estágio da solução no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

A quarta aba do *plug-in* PyADam corresponde à especificação de carregamento e das condições de contorno no modelo numérico, equivalente à etapa 5 do fluxograma do ABAQUS. Nessa aba, são fornecidos como dados de entrada: (i) o nível de água a montante em percentagem, variando de 0% para o reservatório vazio a 100% para o nível máximo de água na barragem; (ii) o nível de água a jusante em metros, sendo importante destacar que essa medida deve ser sempre menor ou igual ao nível a montante; e (iii) a consideração do peso próprio de todo o conjunto a ser modelado.

A indicação do nível de água a montante em termos percentuais é realizada para garantir a condição de carregamento limite, evitando que o operador indique a situação de transbordamento da barragem e o *plug-in* atualmente não considera esse tipo de carregamento. A Figura 55 apresenta a aba referente ao carregamento e às condições de contorno.

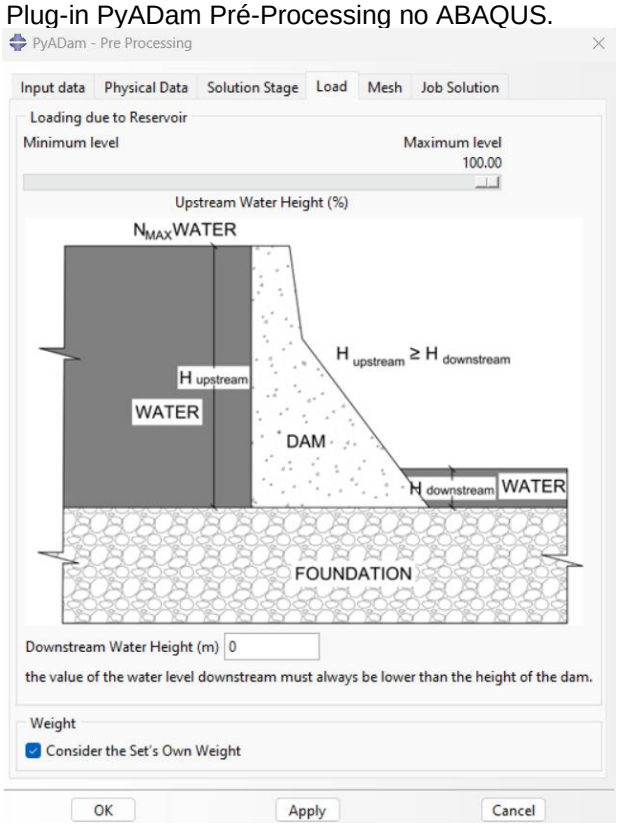
A indicação da condição de contorno de engaste na fundação do modelo, a formulação automatizada do empuxo montante e jusante conforme os níveis indicados e a aplicação do índice de vazios são realizadas de maneira automatizada.

Com base nas informações fornecidas nos dados de entrada, são utilizadas superfícies específicas condizentes com a situação fornecida, especialmente quando são indicados os níveis de água a montante e/ou jusante, pois esses níveis determinam a incidência do empuxo hidrostático. Acima desses níveis, não há incidência de carregamento.

Outra condição relevante ocorre ao utilizar o solucionador hidromecânico acoplado, que requer a utilização das linhas que indicam o posicionamento do nível de água. No caso a montante/jusante, como demonstrado anteriormente nos capítulos anteriores, também é necessário indicar as posições em que não há incidência de água, pois a condição de contorno para a poropressão deve ser nula.

A consideração do peso próprio de todo o modelo numérico fica a critério do analista, pois é uma função booleana: se estiver ativada, aplica-se o peso próprio; se não estiver, não é aplicado.

Figura 55 – Interface da aba da especificação de carregamento e das condições de contorno no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

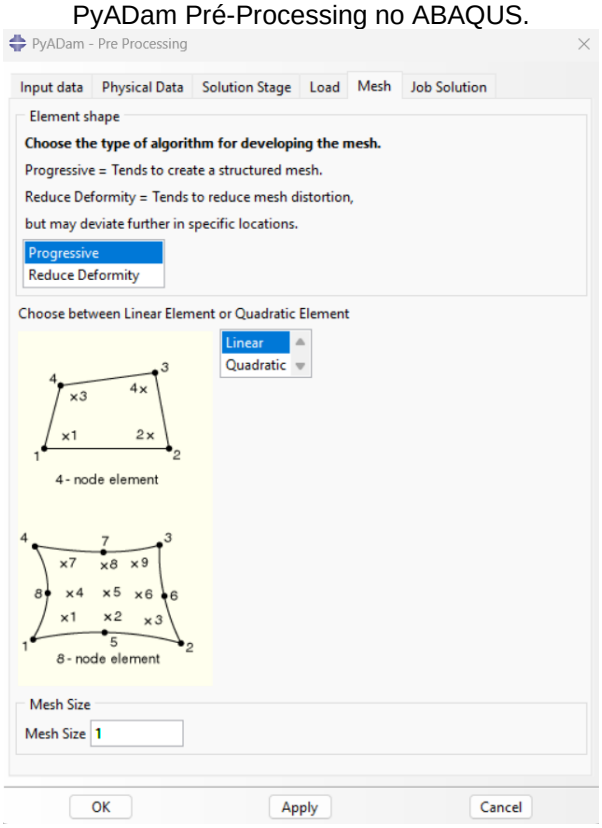
A quinta aba do *plug-in* PyADam refere-se à configuração e especificação do tamanho da malha, correspondendo à sexta etapa no fluxograma do ABAQUS. Neste guia, são selecionados o tipo de algoritmo para a geração da malha, o tipo de elemento e seu tamanho. A Figura 56 exibe a guia de configuração e especificação do tipo de malha.

O tipo de algoritmo para geração da malha é uma escolha booleana, e existem duas opções disponíveis. O algoritmo Progressivo é o mais comum, pois tende a criar uma malha de forma estruturada, dependendo das dimensões do modelo numérico. O algoritmo de redução da deformação é recomendado apenas para situações em que há distorções geométricas com ângulos agudos.

Os elementos a serem escolhidos, quadrilátero linear ou quadrático, são determinados de forma booleana pelo analista responsável pelo estudo numérico. Os tipos de elementos incluem CPE4 e CPE4P para elementos lineares nas análises UN e CO, respectivamente. Para elementos quadráticos, são utilizados CPE8 e CPE8P, também nas análises UN e CO, respectivamente. O tipo de elemento vai ser o mesmo para a barragem e a fundação.

O tamanho do elemento é fornecido na escala métrica, e não há implementação da opção de escolher o tamanho do elemento com base na face ou aresta do modelo numérico, uma vez que essa abordagem não é aplicável a esse tipo específico de modelagem.

Figura 56 – Interface da aba da configuração e indicação do tamanho da malha no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS.

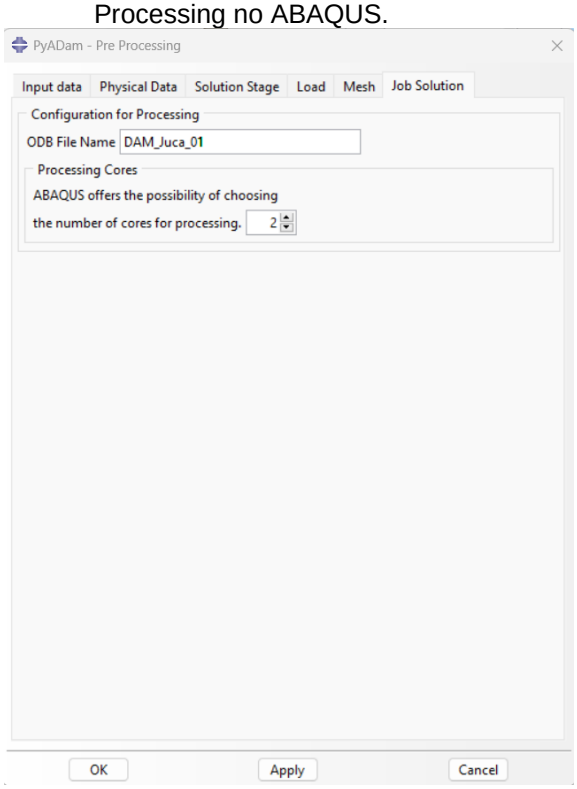


Fonte: O autor, 2024.

A sexta aba do *plug-in* PyADam aborda a criação do arquivo de trabalho, correspondendo a uma parte da etapa 7 no fluxograma de trabalho do ABAQUS. Neste guia, é atribuído um nome ao arquivo de trabalho e são realizadas pré-configurações para o processamento. A Figura 57 ilustra a aba de criação do arquivo de trabalho para a modelagem numérica desenvolvida pelo PyADam.

O arquivo de trabalho é gerado com a extensão .ODB, um formato específico que o ABAQUS utiliza para ler informações de resultados durante o pós-processamento. No estágio de pré-processamento, esse arquivo permanece vazio. O ABAQUS permite a configuração da quantidade de núcleos destinados ao processamento do arquivo ODB, com um limite de até 4 núcleos, mas é uma limitação da versão do ABAQUS e das características da máquina utilizada pelo analista.

Figura 57 – Interface da aba da criação do arquivo de trabalho no Plug-in PyADam Pré-Processing no ABAQUS.



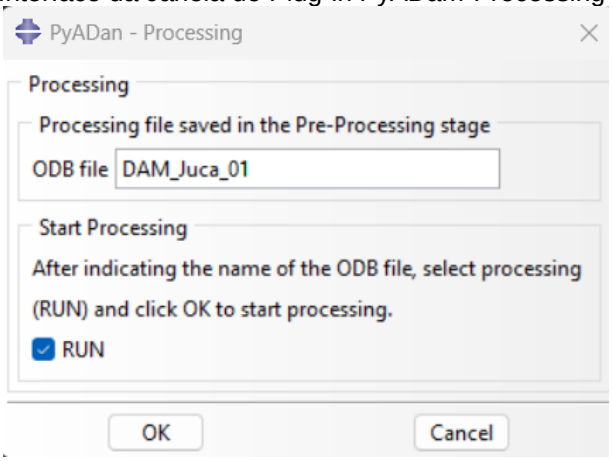
Fonte: O autor, 2024.

Após concluir todas as informações e configurações no *plug-in* PyADam -Pré-Processing, o analista aplica e, em seguida, confirma pressionando o botão "*OK*". Isso resultará na implementação da barragem em questão de segundos, permitindo que o usuário prossiga para a segunda etapa do programa direcional.

A etapa de processamento é representada por uma janela que corresponde à parte final da etapa 7 no fluxograma de trabalho do ABAQUS. Nesta janela, o analista deve fornecer o nome do arquivo .ODB criado na etapa de pré-processamento e confirmar o início do processamento.

O processamento só será iniciado se a opção “*RUN*” estiver marcada; caso contrário, não será iniciado. A Figura 58 apresenta a janela do *plug-in* PyADam-Processing. Como mencionado anteriormente, esta etapa pode ser utilizada para qualquer outro arquivo ODB não processado, em qualquer outro tipo de modelagem numérica, pois foi desenvolvida para complementar a etapa de pré-processamento.

Figura 58 – Interface da Janela do Plug-in PyADam-Processing no ABAQUS.



Fonte: O autor, 2024.

7 CONCLUSÃO

Este capítulo irá detalhar a solução de cada abordagem apresentada, sendo estruturado em: (i) modelos numéricos; (ii) desenvolvimento do plugin; (iii) propostas para trabalhos futuros; e (iv) limitações e aplicações dos estudos realizados.

7.1 MODELOS NUMÉRICOS

A aplicação do método dos elementos finitos, em conjunto com uma análise hidromecânica acoplada, é essencial para obter informações mais precisas sobre a distribuição interna de tensões e deslocamentos, incluindo a poropressão, que desempenha um papel importante nesse contexto.

Nesse sentido, este estudo propôs inicialmente a modelagem simplificada de uma barragem com uma seção transversal retangular, validada de maneira analítica e numérica. As verificações realizadas indicam que ao utilizar o solucionador de solos do ABAQUS os valores das tensões são do tipo total, e o solucionador estático as tensões efetivas são iguais a total pois não tem a consideração da poropressão.

A segunda fase delineada por esta pesquisa concentrou-se na modelagem de uma barragem real existente, especificamente a Barragem de Jucazinho. Esta barragem tem sido objeto de investimentos em intervenções, manutenção e pesquisas visando o entendimento e comportamento dos materiais constituintes, embora nenhuma dessas abordagens tenha considerado uma análise hidromecânica acoplada junto com suas camadas construtivas.

A modelagem da Barragem de Jucazinho foi realizada de diversas maneiras: (i) Modelo Íntegro, (ii) Modelo com camada de concreto convencional na face montante, (iii) Modelo com dreno no interior da galeria de drenagem e (iv) Modelo com camada de concreto convencional e dreno no interior da galeria. Todos esses modelos foram validados em comparação com os resultados analíticos.

Os valores obtidos em todas as análises, nos diferentes modelos numéricos e em vários níveis da seção da Barragem de Jucazinho, visam compreender qual situação se aproxima melhor da realidade da estrutura hidráulica construída.

O procedimento desenvolvido não apenas busca comparar os modelos numéricos, mas também selecionar a situação mais adequada para estudos avançados relacionados à segurança estrutural da barragem. Entretanto, ao empregar

uma camada de material com geometria significativamente menor do que o modelo implementado, torna-se necessário utilizar elementos de ordem superior nessas camadas de dimensões menores para contornar as heterogeneidades materiais, dimensões geométricas e esbeltez.

O modelo que utiliza a camada de concreto convencional e dreno pode ser considerado como referência para a Barragem de Jucazinho. Os valores de tensão normal e cisalhamento não apresentaram alterações significativas em termos de intensidade e distribuição ao longo do perfil estudado, tanto nas análises estáticas quanto nas hidromecânicas, em todos os níveis investigados.

A análise da distribuição interna da poropressão revelou que o modelo que considerou a camada de concreto convencional + dreno apresentou valores de menor intensidade, um dado importante para determinar a tensão efetiva. As tensões principais e os deslocamentos corroboram essa observação, pois essa análise incorpora a contribuição da poropressão à tensão total.

A galeria da barragem de Jucazinho possui grande importância na diminuição da ação da poropressão no interior da barragem, principalmente quando é considerado o dreno, pois as tensões obtidas na base da barragem foram baixa intensidade de poropressão.

A comparação entre o programa analítico CADAM e o numérico ABAQUS, obtiveram valores convergentes, mas a solução numérica obteve resultados mais característicos devido a consideração mais detalhada das dimensões da barragem e das características da galeria.

7.2 PLUGIN

Segundo a ANA (2023), 37,68% das barragens, classificadas como de Alto Risco, necessitam de avaliações periódicas devido às suas características técnicas, construtivas e estado de conservação. O uso de scripts direcionais otimiza significativamente o tempo dos especialistas na obtenção de informações importantes para estudos, conforme destacado por ISMAIL et al. (2022).

O *plug-in* PyADam, desenvolvido neste trabalho, tem a capacidade de implementar um modelo de barragem de concreto no ABAQUS em poucos minutos. Esse processo é projetado para atender a todas as recomendações técnicas atuais,

permitindo que o especialista selecione facilmente os critérios técnicos essenciais para o estudo.

Todas as etapas, desde o fornecimento de informações até a escolha dos critérios técnicos, seguem o já estabelecido fluxograma de manuseio do ABAQUS, com alguns pontos sendo automatizados para atender ao objetivo específico de estudar barragens de concreto. O Apêndice C contém o link para repositório onde Plugin pode ser consultado e baixado.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A consideração dos efeitos do sedimento na face de montante. Os modelos desenvolvidos por Loarte e Sohrabi (2017) abordaram essa condição, embora com foco em ensaios laboratoriais.

Modelagens tridimensionais ou em barragens em arco, os estudos conduzidos por Li et al. (2022) e Zhao et al. (2020) possuem os dados reais, fundamentais para a comparação inicial dos modelos numéricos empregados no presente estudo.

Futuras melhorias para o plug-in incluem a consideração de mais camadas na seção da barragem, análises dinâmicas, análises transitórias, efeitos térmicos, consideração do vertimento na barragem, implementação da etapa de pós-processamento e a capacidade de realizar modelagem tridimensional.

Para a modelagem tridimensional, recomenda-se ajustar o código das funções para aceitar a importação de arquivos na extensão *.SAT*, que é um formato padrão de arquivo de texto que armazena informações de geometria tridimensional, conforme mencionado por Bian (2022), Ismail et al. (2022) e Ye e Wang, (2017) em seus códigos.

7.3. LIMITAÇÕES E APLICAÇÕES DOS ESTUDOS REALIZADOS

Neste item, serão descritas as limitações e aplicações do estudo, abrangendo tanto a seção dos modelos numéricos quanto a do código direcional. Cada aspecto abordado neste estudo possui diversas abordagens, requerendo delimitações conceituais, físicas ou ajustes específicos conforme a ferramenta utilizada.

7.3.1. Modelagens numéricas de Barragens de Concreto

Não houve a realização de simulações numéricas considerando o comportamento temporal e dinâmica. Para incorporar essa abordagem, deve-se seguir os procedimentos propostos por Yang et al. (2022), cujo objetivo foi determinar o tempo necessário para que a análise transiente e alcance valores estáveis.

A inclusão dos efeitos térmicos nas simulações, conforme abordado por Hjalmarsson e Pettersson (2017), Khanzaei (2017) e Wei et al. (2018), requer dados históricos de temperatura na região e no interior das barragens, outro fato importante é que os locais possuem grande amplitude térmica ao longo dos períodos verificados.

O fenômeno de fluência e encolhimento, intrinsecamente dependente do tempo, foi abordado por Paper, Mazighi e Nationale (2017) em um estudo que considerou a situação não linear da barragem, mas que pode ser adaptado aos modelos estudados.

7.3.2. Aplicação do Programação Direcional para o ABAQUS

O *plug-in* PyADam apresenta uma característica importante, que permite a criação rápida de modelos numéricos no ABAQUS, com base nas dimensões e propriedades físicas de uma barragem de concreto. Mesmo que o analista possua pouca experiência no manuseio do software de elementos finitos, o *plug-in* facilita a montagem do modelo em questão em poucos minutos.

A programação direcional incorporada no *plug-in* viabiliza a criação de modelos numéricos com considerações modernas de carregamento, abrangendo as principais recomendações técnicas da área, como as propostas por CDA (2013), FERC (2016), Malm (2016) e RIDAS, 2019). Além disso, proporciona uma maneira ágil de realizar estudos de convergência de malha.

Embora todos os modelos íntegros desenvolvidos neste estudo possam ser implementados pelo *plug-in* PyADam, é importante notar que modelos com múltiplas camadas internas podem ser criados a partir do modelo íntegro, seguindo o procedimento adotado na pesquisa.

A limitação atual do *plug-in* em criar modelos com várias camadas decorre da versão específica do ABAQUS/CAE 2016, que suporta apenas um tipo de plataforma

Graphical User Interface (GUI), sendo a *rgs.GUI*. Isso impede a execução parcial ou por abas do script enviado ao kernel para realizar tarefas.

O código de programação já está preparado para versões mais modernas da GUI, pois todas as etapas do ABAQUS foram programadas em funções ou subfunções que podem ser ajustadas conforme necessário pela biblioteca de interface. No apêndice C contém o link para o repositório do para o acesso ao *plug-in*.

REFERÊNCIAS

ABAQUS. **CAE: User's Manual, version 6.14.** Disponível em: <http://130.149.89.49:2080/v6.14/>. Acesso em: 23 dez. 2023.

ABDI, M.; NTZIMANIS, D. **Numerical simulations of pore pressure on concrete buttress dams**. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2022.

ABOKWIEK, R.; SHARABATI, M. AL; HAWILEH, R.; ABDALLA, J. A.; SABOUNI, R.; HUSSEINI, G. A. A Finite Element Model for the Analysis of Seepage Flow of Water Under Concrete Dams. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 40, n. 5, p. 2823–2841, 2022.

AGUIAR, W. B. DE. **UMA METODOLOGIA PROGRESSIVA PARA A ANÁLISE DE TENSÕES PRODUZIDAS POR SISMOS EM BARRAGENS DE CONCRETO: APLICAÇÃO A BARRAGEM DE JUCAZINHO.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2022.

AGUIAR, W. B. DE; ARAÚJO, N. S. A. DE; RIBEIRO, P. M. V. Safety assessment of the Jucazinho RCC dam in Brazil : an investigation considering intraplate seismicity. p. 1–12, 2021.

ALI, H. Q.; WAGNER, H. N. R.; AKALIN, C.; TABRIZI, I. E.; HÜHNE, C.; YILDIZ, M. Buckling and fracture analysis of thick and long composite cylinders with cutouts under axial Compression: An experimental and numerical campaign. **Composite Structures**, v. 324, n. September, p. 117530, 2023.

ANA. **Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens**Brasília – DF, 2016.

___. **Relatório de segurança de barragens 2022**. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/documentos-e-capacitacoes?tipo=documento&id=121>. Acesso em: 19 dez. 2023.

AZEVEDO, R. C. DE. **METODOLOGIA DA PESQUISA PARA ENGENHARIAS**, 2020.

BIAN, B. F. Development and application of city information modeling technology in urban construction. n. March, p. 90, 2022.

BISMARCK-NASR, M. N. **Finite Elements in Applied Mechanics**, 1993.

BRASIL. **LEI Nº 14.066**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2>. Acesso em: 19 dez. 2023.

BRAUN, M.; ZAPPITELLI, M. P.; IGNACIO VILLA, E.; ROCCO, C. Aplicación de un modelo elástico y lineal al estudio de estabilidad de fisuras en presas de hormigón. **Revista UIS Ingenierías**, v. 18, n. 1, p. 203–212, 2019.

CDA, C. D. A.-. **DAM SAFETY GUIDELINES**, 2013.

CHAVES JUNIOR, C. V. **ACELERAÇÃO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS EM PROBLEMAS DE DINÂMICA ESTRUTURAL E DE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, 2022.

CHRISTOFF, B. G.; BRITO-SANTANA, H.; TALREJA, R.; TITA, V. Development of an ABAQUS™ plug-in to evaluate the fourth-order elasticity tensor of a periodic material via homogenization by the asymptotic expansion method. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 181, n. August, p. 103482, 2020.

COMPUTUTERS AND STRUCTURES, I. **SAP2000 Plus 64-bit**, 2024.

ELETROBRAS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. **Centrais Elétricas Brasileiras S.A. ELETROBRÁS**, p. 279, 2003.

FERC. **Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydroelectric Projects. Chapter III, Gravity Dams**, 2016.

FRANCISCO, I. F. DA S. **Análise dos usos múltiplos da água da barragem de Jucazinho na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, Pernambuco**RecifeUniversidade Federal de Pernambuco, , 2021.

GEOTECHNIQUE, C. E E. L. **Relatório Final e Projeto Executivo - Volume I**, 2013.

GUTSTEIN, D. **PROJETO DE ESTRUTURAS DE BARRAGENS DE GRAVIDADE DE CONCRETO POR MEIO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS: VISÃO GERAL E METODOLOGIA**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2011.

HABIB, A.; HOURI, A. AL; HABIB, M.; ELZOKRA, A.; YILDIRIM, U. Structural performance and finite element modeling of roller compacted concrete dams: A review. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 18, n. 4, p. 1–18, 2021.

HELWANY, S. **Applied Soil Mechanics with ABAQUS**, 2007.

HJALMARSSON, F.; PETTERSSON, F. **Finite element analysis of cracking of concrete arch dams due to seasonal temperature variation**. [s.l.] Lund University, 2017.

ISMAIL, Y.; WAN, L.; CHEN, J.; YE, J.; YANG, D. An ABAQUS® plug-in for generating virtual data required for inverse analysis of unidirectional composites using artificial neural networks. **Engineering with Computers**, v. 38, n. 5, p. 4323–4335, 2022.

JENSEN, E. **Modeling Uplift and Fluid Flow in Fractures to Determine the Failure Probability of Concrete Gravity Dams**. [s.l.] University of Massachusetts Amherst, 2013.

JESUS, S. R. C. B. P. DE. **ANÁLISE HIDROMECÂNICA ACOPLADA CONSIDERANDO COMPRESSIBILIDADE DO FLUIDO E DOS SÓLIDOS**Brasília – DF, 2012.

KHANZAEI, P. **Effects of Thermal and Seepage Actions on Seismic Response of Roller Compacted Concrete Dams**, 2017.

KHANZAEI, P.; SAMALI, B.; ZHANG, C. Coupled and uncoupled seepage-stress analysis of roller compacted concrete dams. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 23, n. 1, p. 92–101, 2017.

LECLERC, M.; LÉGER, P.; TINAWI, R. Computer aided stability analysis of gravity dams - CADAM. **Advances in Engineering Software**, v. 34, n. 7, p. 403–420, 2003.

LI, G.; YANG, J.; ZHANG, A.; CHENG, L. Seepage Finite Element Analysis of Induced Joint Opening of Concrete Arch Dam. **Advances in Transdisciplinary Engineering**, v. 20, p. 760–769, 2022.

LIM, Y.; HA, S. RufGen: A plug-in for rough surface generation in Abaqus/CAE. **SoftwareX**, v. 22, p. 101380, 2023.

LIMA, R. O. **AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE ACOPLAMENTO PARCIAL ENTRE SIMULADORES GEOMECÂNICO E DE FLUXO**Recife, 2019.

LIMA, R. O.; NASCIMENTO GUIMARÃES, L. J. DO; PEREIRA, L. C. Evaluating geomechanical effects related to the production of a Brazilian reservoir. **Journal of Petroleum Exploration and Production**, v. 11, n. 6, p. 2661–2678, 2021.

LOARTE, J. S.; SOHRABI, M. **Crack propagation in concrete dams driven by internal water pressure**. [s.l.] Royal Institute of Technology, 2017.

LOGAN, D. L. **A First Course in the Finite Element Method**, 2015.

LOPES, M. B. **PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE CONCRETO E SEUS EFEITOS NA ANÁLISE DE SUBPRESSÃO E DESLOCAMENTOS**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, 2020.

MALM, R. **Guideline for FE Analyses of Concrete Dams**, 2016.

MCKAY, M.; LOPEZ, F. Practical methodology for inclusion of uplift and pore pressures in analysis of concrete dams. **IPENZ Proceedings of Technical Groups 39 (LD)**, 2014.

MEENA, C.; PRAVEEN, T. V.; SIVA PARVATHI, I. Coupled Seepage–Stress Analysis of Selected Roller-Compacted Concrete Gravity Dam with Upstream Impervious Layer Considering the Seepage Behavior of Interface Thickness. **Indian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 4, p. 634–645, 2020.

MINERA, S.; PATNI, M.; CARRERA, E.; PETROLO, M.; WEAVER, P. M.; PIRRERA, A. Three-dimensional stress analysis for beam-like structures using Serendipity Lagrange shape functions. **International Journal of Solids and Structures**, v. 141–142, p. 279–296, 2018.

MOURA, F. M. P. **Estudo comparativo da verificação da estabilidade de barragens de gravidade de concreto compactado a rolo a partir de modelagem em elementos finitos e de métodos analíticos**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, 2016.

OLIVEIRA, O. F. DE. **DESAFIOS DA GOVERNANÇA NA IMPLEMENTAÇÃO DA POLÍTICA PÚBLICA DE SEGURANÇA DE BARRAGENS: o caso da Barragem de Jucazinho, em Pernambuco**RecifeUniversidade Federal de Pernambuco, , 2024.

OMAIREY, S. L.; DUNNING, P. D.; SRIRAMULA, S. Development of an ABAQUS plugin tool for periodic RVE homogenisation. **Engineering with Computers**, v. 35, n. 2, p. 567–577, 2019.

OURIVES, C. N.; HOLANDA, F.; HOLANDA, RAPHAEL; HOLANDA, RICARDO; CARDOSO, L. E.; VENTURA, B.; MELO, V.; VENTURA, B.; MELO, V. Recuperação da barragem de Jucazinho. **Inspeção e Manutenção Procedimentos, Normas e Estudos para Inspeção, Diagnóstico e Reforço de Estruturas de Concreto**, p. 81–91, 2018.

PAPER, C.; MAZIGHI, H.; NATIONALE, E. STUDY OF UPLIFT PRESSURE EFFECT IN ROLLER United States Society on Dams It ’ s a Small World : Managing Our Water Resources. **37th Annual USSD Conference Anaheim, California, April 3-7, 2017**, n. April, 2017.

RIBÓ, R.; PASENAU, M.; ESCOLANO, E.; RONDA, J. S. P.; GONZÁLEZ, L. F. GiD reference manual. **CIMNE, Barcelona**, v. 27, p. 25, 2024.

RIDAS, E.-. **STRUCTURAL SAFETY OF CRACKED CONCRETE DAMS**, 2019.

RUGGERI, G. Sliding safety of existing gravity dams - Final report. **International Commission on Large Dams**, 2004.

SHA, S.; ZHANG, G. Modeling of Hydraulic Fracture of Concrete Gravity Dams by Stress-Seepage-Damage Coupling Model. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2017, 2017.

SILVA, A. DA; NETO, A. C.; OSAKO, C. I.; COELHO, D. P.; DECHECHI, E. C.; KHOURI, J. H. H. EL; GRAMANI, L. M. **Métodos Numéricos Aplicados a Análise de Segurança de Barragens**Foz do Iguaçu, 2016.

SOUZA, J. L. DE; RIBEIRO, P. M. V. A Computational Model for the Analysis of Uplift Pressures and Fluid Flow in the Jucazinho RCC Dam. 2022.

SOUZA, L. R. DE A. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO ROCHOSO DE FUNDAÇÃO SOBRE A PROBABILIDADE DE FALHA POR DESLIZAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO DE USINAS HIDRELÉTRICAS**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2017.

TERZAGHI K.; S., T. **Theoretical soil mechanics**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1943.

USACE, U. S. A. C. OF E.-. **US Army Corps of Engineers - Gravity Dam Design**, 1995a.

___. **Gravity Dam Design - Engineering and Design**, 1995b.

USBR, U. S. D. OF T. I. B. OF R. **DESIGN MANUAL FOR CONCRETE GRAVITY DAMS**, 1987. Disponível em: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/SmallDams.pdf>

WEI, B.; GU, M.; LI, H.; XIONG, W.; XU, Z. Modeling method for predicting seepage of RCC dams considering time-varying and lag effect. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 25, n. 2, p. 1–14, 2018.

YANG, Y.; ZHANG, Z.; FENG, Y.; WANG, K. A novel method in solving seepage problems implementation in Abaqus based on the polygonal scaled boundary finite element method. **Geofluids**, v. 2022, n. August, 2022.

YE, F.; WANG, H. A simple Python code for computing effective properties of 2D and 3D representative volume element under periodic boundary conditions. 2017.

ZHAO, E.; WU, C.; WANG, S.; HU, J.; WANG, W. Seepage dissolution effect prediction on aging deformation of concrete dams by coupled chemo-mechanical model. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117603, 2020.

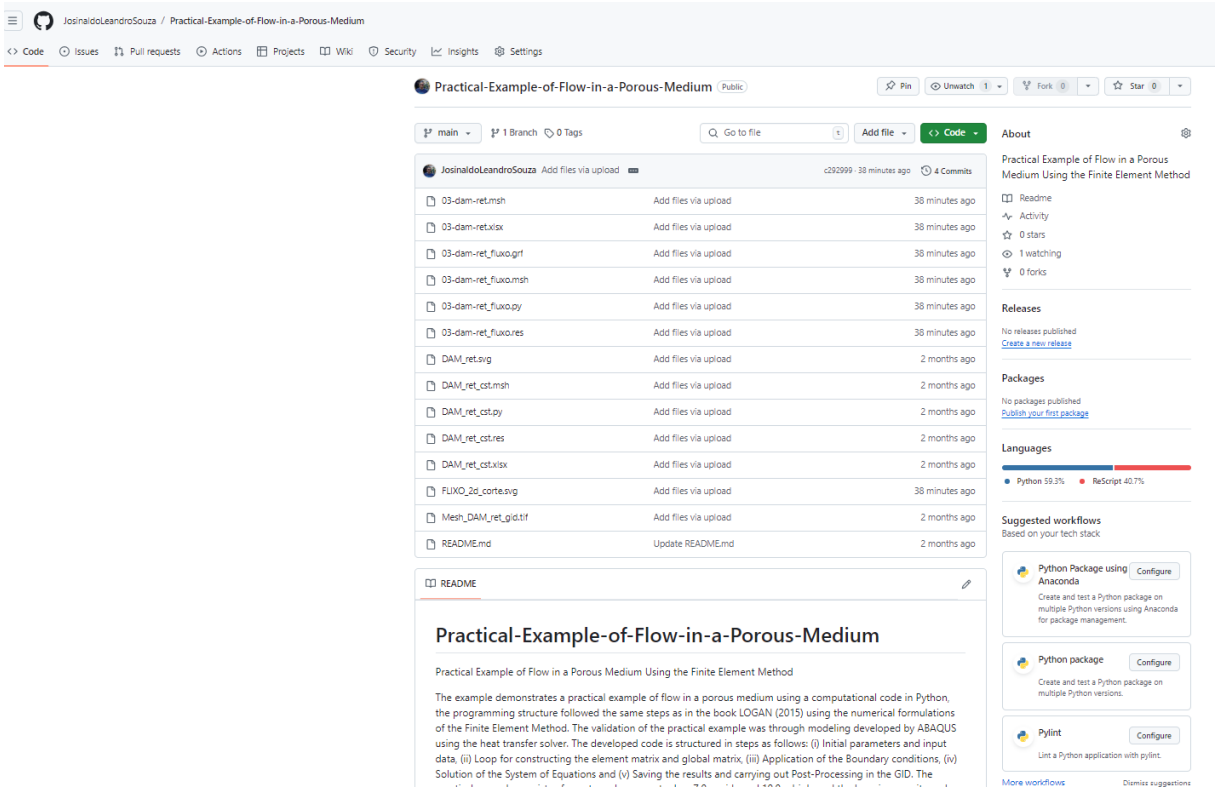
ZHU, B. **The Finite Element Method Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering**, 2018.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method Fifth edition Volume 1: The Basis**. seventh ed. Barcelona, Spain: [s.n.].

ZIENKIEWICZ, O.C.; R.L., T. **The Finite Element Method Fifth edition Volume 1: The Basis**. seventh ed. Barcelona, Spain: [s.n.].

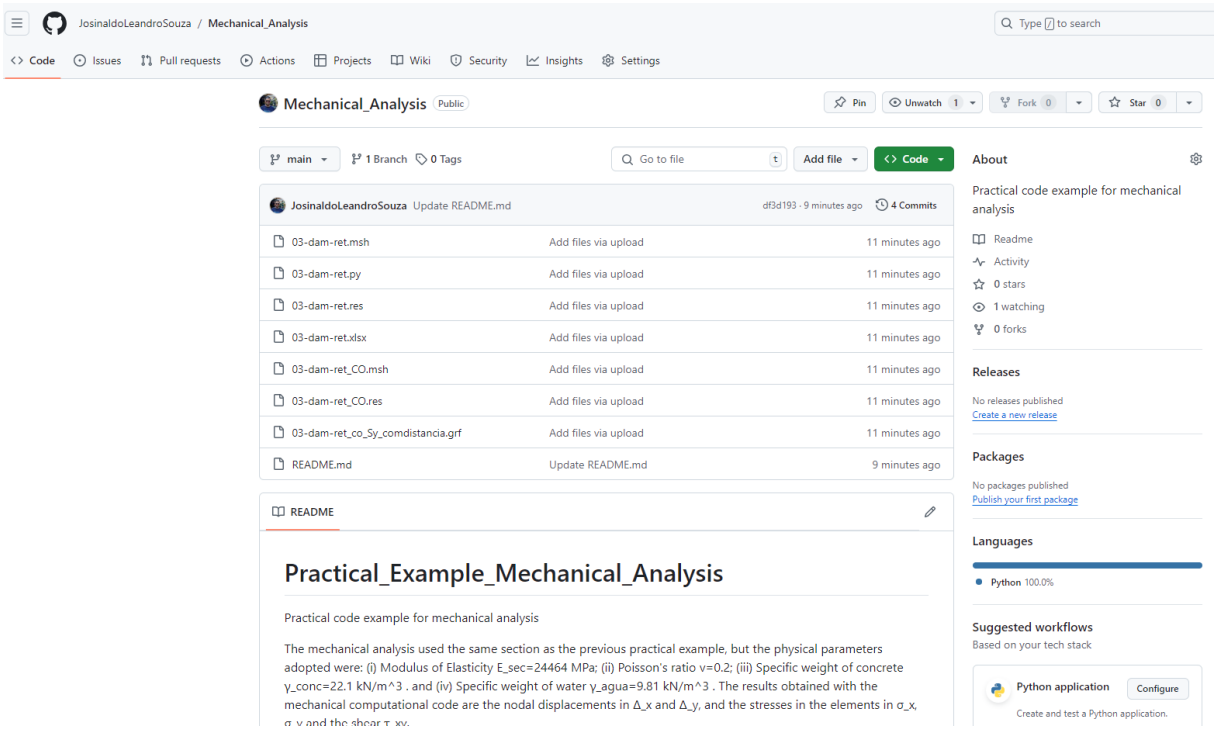
APÊNDICE A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO EXEMPLO PRÁTICO de ESCOAMENTO EM MEIO POROSO

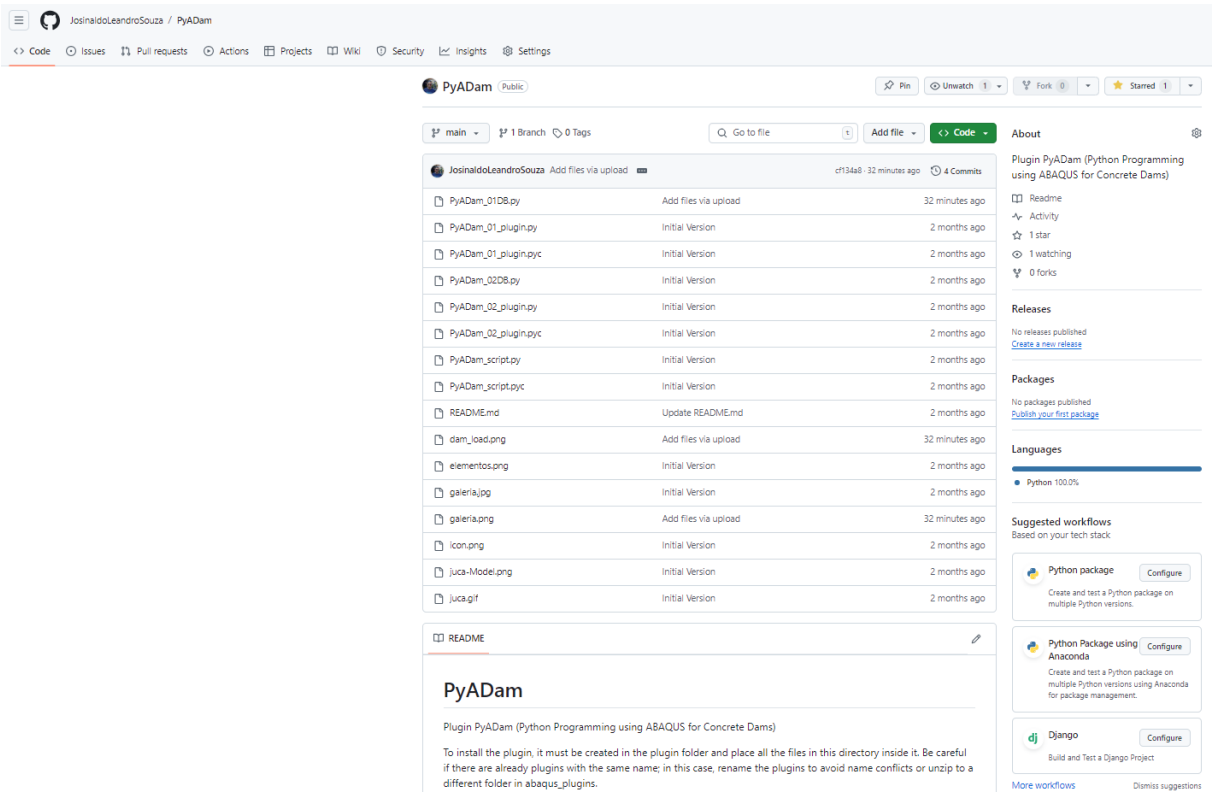
https://github.com/JosinaldoLeandroSouza/Practical-Example-of-Flow-in-a-Porous-Medium.git



APÊNDICE B – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO EXEMPLO PRÁTICO PARA ANÁLISE MECÂNICA

https://github.com/JosinaldoLeandroSouza/Mechanical_Analysis.git



APÊNDICE C – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DO PLUG-IN PYADAM

https://github.com/JosinaldoLeandroSouza/PyADam.git