



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANILO MORAIS BRITO CORDEIRO DOS SANTOS

**ANÁLISE NUMÉRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS PROVÁVEIS DE
FISSURAMENTO APLICADA A BARRAGENS CONSTRUÍDAS NO CEARÁ**

FORTALEZA

2023

DANILO MORAIS BRITO CORDEIRO DOS SANTOS

ANÁLISE NUMÉRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS PROVÁVEIS DE
FISSURAMENTO APLICADA A BARRAGENS CONSTRUÍDAS NO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S234a Santos, Danilo Morais Brito Cordeiro dos.
Análise numérica para identificação de zonas prováveis de fissuramento aplicada a barragens construídas no Ceará / Danilo Morais Brito Cordeiro dos Santos. – 2023.
122 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho..
1. Fissuramento. 2. Análise numérica. 3. maciços de terra. 4. variação de rigidez. 5. umedecimento. I.
Título.

CDD 627

DANILO MORAIS BRITO CORDEIRO DOS SANTOS

ANÁLISE NUMÉRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ZONAS PROVÁVEIS DE
FISSURAMENTO APLICADA A BARRAGENS CONSTRUÍDAS NO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 27/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

A Deus.

A minha mãe, aos meus avós e as minhas tias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ser infinitamente bom comigo, sempre.

À minha mãe, Daniela Moraes Feitosa, por ser o alicerce do meu ser, e por todo o amor, tempo e carinho dedicados para comigo.

Aos meus avós, Zué Moraes Feitosa e Antônio Rufino Feitosa, por serem exemplos de luta, garra e perseverança.

Às minhas tias, Gabriela, Adriana, Luciana e Socorro, por todo o amor, tempo e carinho dedicados para comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho, por toda a atenção, tempo e dedicação para comigo e com a pesquisa. Sou infinitamente grato pela paciência e pelos ensinamentos ao longo desses anos.

Aos professores do pós-DEHA, que contribuíram tanto para a minha formação acadêmica, e por todos os ensinamentos e motivações transmitidos ao longo do mestrado.

Aos professores, Anderson Borgghetti e Olavo Francisco, pelo tempo dedicado para a avaliação desse trabalho e por aceitarem participar da banca examinadora desta dissertação.

Aos meus colegas de mestrado, por todo o conhecimento e tempo compartilhados, pela amizade e pelo companheirismo. Afinal, não foi fácil enfrentar uma pandemia ao longo do mestrado.

A todos, que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro ao longo do mestrado.

RESUMO

O fissuramento de maciços é um fenômeno frequentemente observado em barragens de terra, e pode advir de diversas causas, dentre elas, da variação de rigidez provocada pelas mudanças de umidade dos materiais que compõem o barramento. Algumas barragens no Ceará apresentam essa problemática, como é o caso da barragem do Trussu, que tem o seu fissuramento atribuído ao aumento de umidade provocadas pelo enchimento do reservatório do barramento. É nesse contexto, que esse estudo buscou apresentar uma metodologia de previsão de fissuramento para barragens do Ceará, levando em consideração as variações de rigidez que os materiais podem sofrer devido às mudanças dos seus valores de umidade. Para isso, foram utilizados valores usuais das propriedades dos materiais e dos seus parâmetros de deformabilidade em função da sua classificação. As modelagens foram feitas utilizando-se cenários diferentes para cada barramento, considerando que o material mais deformável era o mais susceptível às variações de umidade. Ademais, considerou-se que o umedecimento no maciço era proporcionado pelo enchimento do reservatório, e que a molhagem da fundação era ocasionada pela elevação do nível d'água. A análise numérica foi feita utilizando conjuntamente os *softwares* SLIDE 6.0 e UNSTRUCT (Miranda (1988), modificado por Silva Filho (1998)). Os resultados das modelagens numéricas indicaram que as variações de deformação entre as regiões molhadas e não umedecidas de um barramento pode ocasionar zonas potenciais de fissuramento. Além disso, constatou-se que o funcionamento de um sistema de drenagem de um barramento pode induzir a formação de fissuras devido a diferenças de umidade entre o trecho de montante (mais úmido) e de jusante (menos úmido) de um maciço. Sendo assim, a metodologia empregada nesse estudo mostrou-se eficaz para prever o fissuramento nas barragens avaliadas devido a variações de rigidez dos materiais que compõem a estrutura. Dessa maneira, esse estudo pode torna-se uma ferramenta útil para verificação da formação de fissuras em barragens de terra.

Palavras-chave: Fissuramento; Análise numérica; maciços de terra; variação de rigidez; umedecimento.

ABSTRACT

The cracking of massifs is a phenomenon frequently observed in earth dams and can arise from various causes, including the variation in rigidity caused by changes in the wetting of the materials that make up the dam. Some dams in Ceará have this problem, such as the Trussu dam, whose cracking is attributed to variations in wetting caused by the filling of the dam's reservoir. It is in this context that this study sought to present a crack prediction methodology for dams in Ceará, based on variations in stiffness, with the determination of material properties and deformability parameters based on usual values according to their classification. To do this, different scenarios were used for each bus, considering that the more deformable material was more susceptible to variations in wetting. In addition, it was considered that the wetting of the massif was caused by the filling of the reservoir, and that the wetting of the foundation was caused by the rise in the water level. The numerical analysis was carried out using SLIDE 6.0 and UNSTRUCT software (developed by Miranda (1988) and modified by Silva Filho (1998)). Using the association and numerical analysis of the various types of dams evaluated in this work, it was observed that the variations in deformation between the wet and non-wet regions of a busbar can lead to potential cracking zones. In addition, it was found that the operation of a dam's drainage system can induce the formation of cracks due to differences in wetting between the upstream (wet) and downstream (dry) sections of a massif. Therefore, the methodology used in this study proved to be effective in predicting cracking in the dams evaluated due to variations in the stiffness of the materials that make up the structure. In this way, this study can become a replicable tool for dams with structures similar to the one analyzed

Keywords: Cracking; numerical analysis; earth massifs; stiffness variation; wetting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variados modelos constitutivos utilizados para descrever o comportamento tensão x deformação de uma amostra cilíndrica devido a esforços de compressão	23
Figura 2 - Fissuramento ocasionado devido a diferença de deformabilidade da fundação da barragem.....	27
Figura 3 - Fissuramento ocasionado devido à recalques diferenciais provocados devido à inclinação das ombreiras da barragem e a diferenças nas alturas do aterro	27
Figura 4 - Deslocamentos no maciço em decorrência do primeiro enchimento (seção deformada exagerada).....	28
Figura 5 – a) Fissuramento em barragens de enrocamento que o núcleo é mais rígido que os espaldares; b) Fissuramento em barragens em que os espaldares são mais rígidos que o núcleo	29
Figura 6 – Tipos mais comuns de fissuramento transversal	31
Figura 7 - Trincas transversais no coroamento da barragem do Trussu	34
Figura 8 – Resultado de ensaio duplo edométrico.....	40
Figura 9 – Variação tensão x deformação dos corpos de prova/ Cálculo dos módulos de elasticidade	43
Figura 10 - Mapa de localização do açude Banabuiú da Barragem Arrojado Lisboa	49
Figura 11 - Seção transversal da barragem Arrojado Lisboa.....	50
Figura 12 - Mapa de localização do açude da Barragem Favelas	51
Figura 13 - Seção transversal da Barragem Favelas.....	51
Figura 14 - Mapa de localização do açude da Barragem Frios	52
Figura 15 - Seção máxima da barragem Frios.....	52
Figura 16 - Mapa de localização do açude da barragem General Sampaio.....	53
Figura 17 - Seção transversal da Barragem General Sampaio	53
Figura 18 - Mapa de localização da barragem do Açude Lima Campos.....	54
Figura 19 - Seção máxima da barragem Lima Campos.....	55
Figura 20 - Mapa de localização do açude da Barragem Mundaú	56
Figura 21 - Seção máxima da barragem Mundaú.....	56
Figura 22 - Mapa de localização do açude da Barragem do Orós.....	57
Figura 23 - Seção máxima da barragem do Orós	57
Figura 24 - Mapa de localização do açude da Barragem Patu.....	58
Figura 25 - Seção máxima da barragem Patu.....	59

Figura 26 - Mapa de localização do açude da barragem Edson Queiroz	60
Figura 27 - Seção máxima da barragem Edson Queiroz	60
Figura 28 – Mapa de localização do açude da Barragem do Trussu	61
Figura 29 – Seção máxima da Barragem do Trussu	61
Figura 30 - Seção transversal da barragem Arrojado Lisboa.....	65
Figura 31 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	65
Figura 32 – Seção transversal da Barragem Favelas	66
Figura 33 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	66
Figura 34 – Seção transversal da barragem Frios.....	67
Figura 35 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	68
Figura 36 - Seção transversal da barragem General Sampaio	69
Figura 37 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	69
Figura 38 - Seção transversal da barragem Lima Campos	70
Figura 39 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	70
Figura 40 - Seção transversal da barragem Mundaú	71
Figura 41 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	72
Figura 42 - Seção transversal da barragem Orós	73
Figura 43 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	73
Figura 44 - Seção transversal da barragem Patu.....	74
Figura 45 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	74
Figura 46 - Seção transversal da barragem Edson Queiroz.....	75
Figura 47 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	76
Figura 48 - Seção transversal da barragem Trussu	77
Figura 49 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após a elevação do nível d'água na fundação.....	77

Figura 50 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório	78
Figura 51 – Distribuição de poropressões após o enchimento do reservatório da barragem Banabuiú até a cota da soleira	80
Figura 52 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Arrojado Lisboa	81
Figura 53 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Banabuiú (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	82
Figura 54 – Distribuição de poropressões após o enchimento do reservatório da barragem Favelas até a cota da soleira	83
Figura 55 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Favelas	84
Figura 56 - Deformações obtidas para o cenário estudado (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório da barragem)	85
Figura 57 – Distribuição de poropressões na barragem Frios após o enchimento do reservatório até a cota da soleira.....	86
Figura 58 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Frios	87
Figura 59 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Frios (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	88
Figura 60 - Distribuição de poropressões na barragem General Sampaio após o enchimento do reservatório até a cota de soleira.....	89
Figura 61 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem General Sampaio.....	90
Figura 62 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem General Sampaio (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)	90
Figura 63 - Distribuição de poropressões na barragem Lima Campos após o enchimento do reservatório até a cota da soleira.....	92
Figura 64 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Lima Campos.....	93
Figura 65 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Lima Campos (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	93
Figura 66 – Distribuição de poropressões na barragem Mundaú após o enchimento do reservatório até a cota da soleira.....	94
Figura 67 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Mundaú	95
Figura 68 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Lima Campos (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	96
Figura 69 - Distribuição de poropressões na barragem do Orós após o enchimento do reservatório até a cota de soleira.....	97

Figura 70 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Orós.....	98
Figura 71 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Orós (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	98
Figura 72 - Distribuição de poropressões na barragem Patu após o enchimento do reservatório até a cota de soleira.....	99
Figura 73 – Malha de elementos finitos utilizada na barragem Patu	100
Figura 74 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Patu (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	101
Figura 75 - Distribuição de poropressões na barragem Patu após o enchimento do reservatório até a cota de soleira.....	102
Figura 76 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Edson Queiroz	103
Figura 77 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Serrote (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório).....	103
Figura 78 – Distribuição de poropressões após elevação do nível d’água na fundação.....	104
Figura 79 - Poropressões após o enchimento do reservatório da barragem Trussu até a cota da soleira	105
Figura 80 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Trussu.....	105
Figura 81 – Deformações obtidos para o cenário 1 (variação de rigidez devido a variação do nível d’água no solo de fundação).....	106
Figura 82 - Deformações obtidas para o cenário 2 (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório da barragem do Trussu).....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos materiais que compõem os barramentos analisados	62
Tabela 2 – Módulos de elasticidade estimado dos materiais que compõem as barragens analisadas.....	63
Tabela 3 - Tabela resumo das barragens avaliadas	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos da pesquisa	18
1.3	Metodologia	18
1.4	Estruturação da dissertação	19
2	ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES E FISSURAMENTOS EM MACIÇOS COMPACTADOS	21
2.1	Relação tensão x deformação	23
2.1.1	<i>Modelo elástico-linear isotrópico</i>	24
2.2	Fissuramento em barragens de terra e enrocamento	26
2.2.1	<i>Fissuras transversais</i>	30
2.2.2	<i>Fissuras longitudinais</i>	31
2.2.3	<i>Acidentes e incidentes em barragens de terra envolvendo fissuramento</i>	32
2.3	Resumo e notas conclusivas	34
3	APLICAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDRÁULICAS E DE EQUILÍBRIO (UNSTRUCT)	36
3.1	Utilização do MEF na análise de fluxo e tensão x deformação em barragens de terra	36
3.2	Análise de fluxo a partir do SLIDE 6.0	38
3.3	Análise tensão x deformação com a utilização do UNSTRUCT	38
3.3.1	<i>O programa UNSTRUCT</i>	38
3.3.2	<i>Determinação do estado tensão x deformação</i>	40
3.3.3	<i>Atualização do UNSTRUCT (SILVA FILHO, 1998) - utilização da variação de rigidez para a determinação do estado tensão x deformação</i>	43
3.4	Utilização da associação entre o SLIDE 6.0 e o UNSTRUCT	45
3.5	Resumo e notas conclusivas	46
4	METODOLOGIA NUMÉRICA DA VARIAÇÃO DA RIGIDEZ	48
4.1	Descrição dos barramentos	49
4.1.1	<i>Barragem Arrojado Lisboa</i>	49
4.1.2	<i>Barragem Favelas</i>	50
4.1.3	<i>Barragem Frios</i>	51
4.1.4	<i>Barragem General Sampaio</i>	52

4.1.5	<i>Barragem Lima Campos</i>	54
4.1.6	<i>Barragem Mundaú</i>	55
4.1.7	<i>Barragem do Orós</i>	56
4.1.8	<i>Barragem Patu</i>	58
4.1.9	<i>Barragem Serrote (Edson Queiroz)</i>	59
4.1.10	<i>Barragem do Trussu</i>	60
4.2	Determinação dos parâmetros	62
4.3	Determinação dos módulos de elasticidade	63
4.4	Cenários analisados	64
4.4.1	<i>Barragem Arrojado Lisboa</i>	64
4.4.2	<i>Barragem Favelas</i>	65
4.4.3	<i>Barragem Frios</i>	67
4.4.4	<i>Barragem General Sampaio</i>	68
4.4.5	<i>Barragem Lima Campos</i>	69
4.4.6	<i>Barragem Mundaú</i>	71
4.4.7	<i>Barragem do Orós</i>	72
4.4.8	<i>Barragem Patu</i>	73
4.4.9	<i>Barragem Serrote (Edson Queiroz)</i>	75
4.4.10	<i>Barragem do Trussu</i>	76
5	ESTUDO DO FISSURAMENTO EM BARRAGENS DO CEARÁ	80
5.1	Barragem Arrojado Lisboa	80
5.1.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	80
5.1.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	81
5.2	Barragem Favelas	82
5.2.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	82
5.2.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	83
5.3	Barragem Frios	85
5.3.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	85
5.3.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	86
5.4	Barragem General Sampaio	88
5.4.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	88
5.4.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	89
5.5	Barragem Lima Campos	91

5.5.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	91
5.5.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	92
5.6	Barragem Mundaú	94
5.6.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	94
5.6.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	95
5.7	Barragem Orós	96
5.7.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	96
5.7.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	97
5.8	Barragem Patu	99
5.8.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	99
5.8.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	100
5.9	Barragem Edson Queiroz (Serrote)	101
5.9.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	101
5.9.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	102
5.10	Barragem Edson Queiroz (Serrote)	104
5.10.1	<i>Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0</i>	104
5.10.2	<i>Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT</i>	105
5.11	Resumo e notas conclusivas	107
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	113
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE - SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO	
	DUPLO	118

1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra podem ser construídas com diversas finalidades, dentre elas, para o acúmulo de água para o abastecimento humano. No Nordeste brasileiro, a utilização desse tipo de estrutura com esse objetivo é bastante comum. Dentre as estruturas utilizadas, destacam-se, as barragens de terra homogênea e zoneada, que são escolhidas em função dos materiais disponíveis para formar o maciço e das características dos solos que são necessárias para sua composição.

Nessas estruturas, problemas podem surgir em decorrência da variação da rigidez, provocada pelo umedecimento. Essa variação de rigidez pode ocorrer de maneira desigual entre os materiais que compõem o maciço e o solo de fundação, e ocasionar deformações no barramento. As deformações verificadas no maciço e na fundação, por sua vez, podem ocasionar a formação de fissuras.

Esse processo de fissuramento pode advir de diversos fatores, sendo um deles a variação de rigidez provocada pelas mudanças de níveis de saturação dos materiais do maciço e da fundação do barramento. Essa variação da saturação no maciço pode ocorrer devido ao enchimento do reservatório ou por uma ascensão do nível d'água na fundação, ocasionando níveis de tensões diferentes nas diferentes partes de um barramento.

Dessa forma, a análise numérica pode ser utilizada como uma aliada na previsão de fissuramento em barragens de terra, inclusive, nas situações que consideram as variações de rigidez advindas do umedecimento. Logo, a partir de simulações numéricas é possível prever deformações nessas estruturas, e assim, antecipar o seu fissuramento.

No Nordeste brasileiro, a variação de nível de saturação do maciço e do solo de fundação de uma barragem é frequentemente observado. Esse fato pode advir de inúmeras causas, dentre elas, da variação do nível d'água provocado pelo enchimento do reservatório ou pela mudança de nível d'água no solo de fundação. Essa variação ocasiona modificações nos valores de rigidez dos materiais que compõe o barramento, e com isso, acarreta a formação de fissuras.

Fissuras em barragens de terra da região Nordeste já são observadas, como é o caso do fissuramento longitudinal da crista da barragem do Trussu. Para as trincas longitudinais, Menescal (2005) apontou como causa provável os recalques ocorridos no talude de montante devido à sua saturação provocada pelo enchimento do reservatório da barragem.

A ocorrência de fissuras, pode favorecer o processo de erosão do material que

compõe a barragem, principalmente no período chuvoso, que o processo de erosão é intensificado, com a conseqüente desenvolvimento de cavidades no barramento. O Diário do Nordeste (2008) relata sobre o processo de erosão formado na barragem do Trussu, com feições erosivas com profundidade superiores a 5 m, ocasionados por fissuras longitudinais na parte superior do barramento.

Além da barragem do Trussu, a barragem do açude Lima Campos, localizada em Icó/CE, apresenta formação de fissuras, com a presença de cavidades relacionada ao processo de erosão (Barbosa, 2019). Outro caso de formação de fissuras longitudinais sobre o coroamento da barragem devido a recalques ocasionados pela saturação do talude de montante, após o enchimento parcial do reservatório da barragem é relatado por Menescal (2005), na barragem do açude Monsenhor Tabosa.

1.1. Justificativa

É nesse contexto, que o estudo da previsão de fissuramento em barragens de terra com a utilização da análise numérica se torna importante, tendo em vista que com a modelagem do cenário permite prever a formação de fissuras nessas estruturas, e ações reparativas podem ser realizadas, para evitar o fissuramento, assim como a propagação (de feições erosivas e erosão dos materiais que compõem o maciço).

É através da análise numérica que é possível a simulação de projetos, como é o caso dos projetos de barragens, com a intenção de reproduzir os fenômenos que acontecem na realidade, e para entender os acontecimentos que ocorrem durante e após a construção dessas estruturas. Os *softwares* que realizam a análise do comportamento mecânico e hidráulico de estruturas, como barragens, fazem o uso de alguns métodos, como o, Método dos Elementos Finitos (MEF).

Um *software* que possibilita a análise das deformações em barragens, com a utilização do MEF, e com isso a previsão do fissuramento nesse tipos de estruturas, é o UNSTRUCT, programa desenvolvido por Miranda (1988), e atualizado por Silva Filho (1998). Nessa nova versão do programa é possível determinar deslocamentos em barragens de terra, em função das variações de rigidez dos materiais que compõe uma seção transversal (maciço e fundação).

Dessa forma, por meio da análise numérica com a utilização do UNSTRUCT, é possível determinar as deformações em barragens de terra, em função da variação de rigidez,

provocada pelo umedecimento dos materiais que compõe a seção, através do enchimento do reservatório, ou pela variação do nível d'água na fundação da barragem, e assim prever prováveis zonas de fissuramento em barragens de Terra.

1.2. Objetivos da pesquisa

Esse trabalho tem como objetivo principal: apresentar uma metodologia para previsão de fissuramento em barragens de terra do estado do Ceará, devido a mudanças de rigidez dos materiais que compõem o maciço e a fundação, através de análises numéricas, utilizando a versão do programa UNSTRUCT desenvolvida por Silva Filho (1998).

Ademais, o trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar as deformações em barragens de terra devido a variações de umedecimento entre os materiais que compõe os maciços;
- b) Analisar as relações entre os processos de formação de fissuras e os modelos de barragens analisadas;
- c) Apresentar um modelo de previsão dos parâmetros dos materiais que compõem a barragem em função do tipo de solo;
- d) Avaliar a influência do sistema de drenagem de um barramento no processo de formação de fissuras;

1.3. Metodologia

Essa pesquisa possui como fundamentação: a realização de uma revisão bibliográfica a respeito do tema, a determinação dos parâmetros mecânicos e hidráulicos dos materiais que compõem os barramentos, a realização das análises numéricas, e por fim, os estudos de casos de barragens nordestinas.

Para a revisão bibliográfica, foi realizado o levantamento bibliográfico com estudos e trabalhos acerca do tema abordado.

O trabalho foi feito sem realizar ensaios em amostras indeformadas de solos, devido ao número de barragens de terra analisadas. Com isso, determinou-se os parâmetros hidráulicos e mecânicos dos solos a partir da utilização de dados bibliográficos para barragens de terra reais, com a adoção de valores típicos das propriedades de solos.

Logo após, foi feita a análise numérica do estudo. Para isso, foi necessário a

realização de uma análise associada, com a utilização de dois programas, o UNSTRUCT e o SLIDE 6.0. Na análise associada, o estudo de percolação e de tensão x deformação são feitos de maneira independente e sequencial, desta forma, a análise de fluxo é realizada pelo SLIDE inicialmente, e com os resultados obtidos é feita a análise tensão x deformação no UNSTRUCT.

A análise numérica foi realizada para 10 barragens localizadas no estado do Ceará no Brasil. As barragens apresentam seções transversais distintas, englobando barragens com seção homogênea e zoneada. Materiais de diversas origens foram utilizados para a composição dessas estruturas, em função da disponibilidade dos mesmos nas regiões onde foram construídas. Logo, para a análise do fissuramento nessas barragens, considerou-se duas situações:

- a) Análise do fissuramento em barragens homogêneas: foram considerados dois cenários de variação de rigidez: a) Cenário levando em conta a variação de rigidez no solo de fundação devido a elevação do nível d'água; b) cenários considerando as mudanças de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório das barragens;
- b) Análise do fissuramento em barragens zoneadas: considerou-se apenas um cenário de variação de rigidez no maciço. Cenário 1 ponderando a variação de rigidez no maciço das barragens em função do enchimento dos seus reservatórios.

1.4. Estruturação da dissertação

Esse trabalho foi dividido em seis capítulos, com o primeiro capítulo sendo destinado para a apresentação do tema estudado, objetivando a sua contextualização, mostrando inclusive a relevância da realização dessa pesquisa. Ademais, foram definidos o seu objetivo principal e os seus objetivos específicos, além da exposição da metodologia utilizada e da estruturação do trabalho.

O segundo capítulo foi dedicado para a revisão bibliográfica referente a análise de tensão x deformação e fissuramento em maciços compactados. Nesse capítulo, utilizou-se bibliografias que tratam da variação de deformações e fissuramento em barragens de acordo com o seu tipo, e da composição dos seus materiais, buscando mostrar os diferentes tipos de deformações e as conseqüentes fissuras geradas.

O terceiro capítulo foi utilizado para relatar sobre os dois *softwares* utilizados para a realização da análise numérica desse trabalho. Nesse capítulo, foi realizada uma breve

descrição a respeito do MEF, com a apresentação da sua utilização em problemas da engenharia. Logo após, foi explanado sobre a metodologia do UNSTRUCT, desde a sua versão original, desenvolvida por Miranda (1988), até as modificações feitas por Silva Filho (1998), em especial, as que tratam de variações de rigidez em função de mudanças de umedecimento. Ao final, discorreu-se sobre a utilização do SLIDE nessa pesquisa, e sobre a associação dos dois programas.

No quarto capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada para determinação dos parâmetros dos materiais que compunham os barramentos, assim como dos parâmetros de rigidez utilizados nesse estudo, aqui representados pelo ensaio de adensamento duplo, obtidos a partir de módulos de elasticidade oedométrico usuais, em função do tipo de material.

No quinto capítulo, é apresentado o estudo de caso de 10 barragens do Nordeste brasileiro. Nesse capítulo são apresentadas as deformações obtidas para cada barragem analisada, assim como a relação entre as deformações obtidas e os possíveis fissuramentos dos variados tipos de barragens.

Por fim, no sexto capítulo, são feitas as conclusões a respeito desse estudo, com a apresentação de sugestões para futuros trabalhos.

2 ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES E FISSURAMENTOS EM MACIÇOS COMPACTADOS

Na análise e modelagem de barragens de terra, além do estudo das condições de fluxo e da estabilidade dos taludes do barramento, é importante avaliar o estado de tensão e deformação do maciço. A avaliação do estado de tensões e deformações de uma barragem é fundamental, pois é a partir dela que se analisa a distribuição dos esforços, das deformações e das poropressões do maciço e da fundação da barragem, considerando as diferentes fases de projeto da estrutura. Além disso, esse estudo é importante para se conhecer as consequências da distribuição desse estado de tensão e deformação no comportamento mecânico do barramento (Berrones; Vassilev; Liu, 2001).

As deformações em barragens de terra podem iniciar-se desde o princípio da sua vida útil, a partir do aumento das tensões efetivas provocados pela construção sucessiva de suas camadas e por efeitos de fluência dos materiais que a compõe. Além disso, as deformações podem ser influenciadas por deformações no material de fundação, pela transferência de tensões entre as zonas do maciço, dentre outros fatores. Ademais, após o término da construção da barragem, deslocamentos podem ser desenvolvidos na crista e no corpo da barragem, devido ao primeiro enchimento do reservatório (Chrzanowski; Massiéira, 2004).

Pereira (1986) relata que deslocamentos diferenciais ocorrem em barragens homogêneas de terra devido as distintas características de deformabilidade entre os diferentes materiais que compõem um maciço composto, ou em função do assentamento do maciço em fundações heterogêneas. Para as barragens zoneadas e as barragens de enrocamento, a interação entre os diferentes materiais, produz deslocamentos diferenciais ao longo do maciço, devido a concentração de tensões que ocorre na mudança entre zonas rígidas e deformáveis.

Chrzanowski e Massiéira (2004) expõem que o entendimento de deformações em barragens de terra é importante para analisar e minimizar os seus efeitos adversos, como: rachaduras transversais, fissuras longitudinais, efeitos de arco e concentração de tensão, fraturas hidráulicas, o desenvolvimento de zonas plásticas, e os danos na sua instrumentação.

Algumas considerações são feitas por Berrones, Vassilev e Liu (2001), a respeito da importância de analisar as condições de deformações e deslocamentos em barragens de terra:

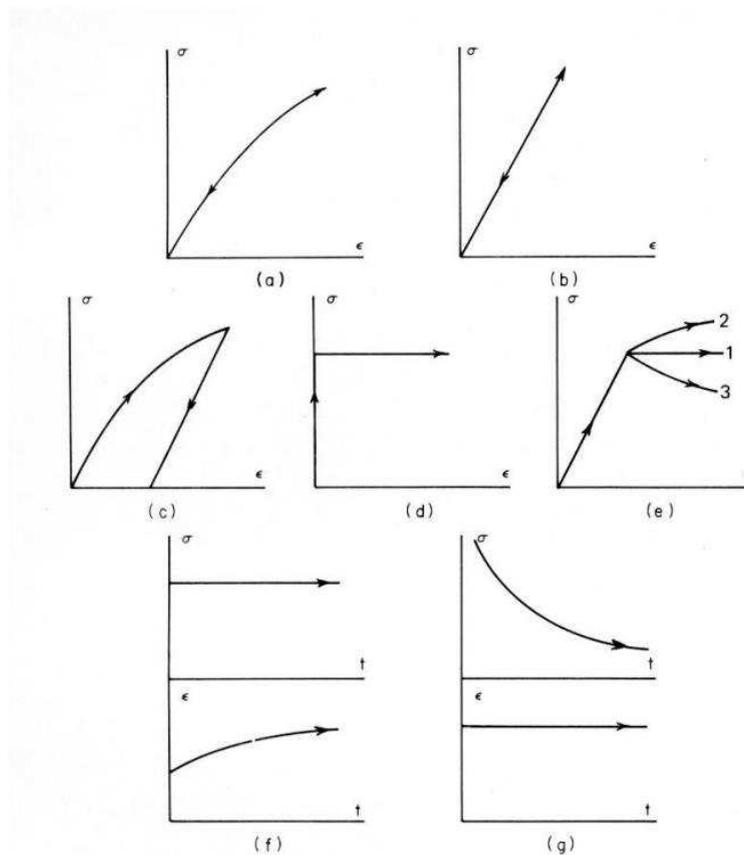
- a) Estimar a magnitude do recalque do coroamento da barragem é fundamental, para estipular a perda de borda livre esperada a curto e a longo prazo, e dessa forma projetar a borda livre e a contraflecha;
- b) As deformações que ocorrem no maciço não são uniformes, e variam tanto na direção transversal, quanto na direção longitudinal. Os deslocamentos provenientes dessas deformações são os principais responsáveis pela ocorrência de rachaduras transversais e longitudinais em barragens de terra. Dessa forma, a análise de deformações provê indicadores diretos do potencial de fissuramento em barragens de terra;
- c) O processo de tensão e deformação também induz alterações no excesso de poropressões quando os materiais estão saturados. A geração e a dissipação das poropressões durante e após a construção do maciço, podem causar mudanças nas condições locais e globais da estabilidade dos taludes. Outro dano que pode ocorrer devido as alterações nas poropressões, é o fraturamento hidráulico do maciço;
- d) A determinação das tensões, deformações e poropressões é um importante instrumento para definição da localização da instrumentação para o monitoramento em barragens de terra. Os instrumentos são instalados para monitorar a variação de diversas variáveis, como, os recalques, deslocamentos horizontais, poropressões, deformações, fluxo de água e tensões, dentre outras. Dessa forma, é importante definir faixas de variação dessas variáveis, para promover uma maior eficiência do programa de monitoramento. É nesse contexto, que entra a análise tensão x deformação, determinando a localização dos pontos críticos, para os equipamentos serem instalados prioritariamente;
- e) As observações realizadas durante a construção do maciço, podem ser utilizadas para processos de retroanálise no projeto da estrutura. Tendo em vista as diferentes condições entre o campo e o laboratório, com as propriedades dos materiais encontradas em laboratório, geralmente diferindo das do campo. Dessa forma, é de extrema importância medir algumas propriedades do solo utilizando um programa de monitoramento. Neste cenário, a análise tensão x deformação se torna uma ferramenta eficiente para realização do estudo paramétrico.

2.1. Relação tensão x deformação

Nos materiais que compõem uma barragem de terra ocorrem deformações devido ao campo de tensões aplicado. Esse estado tensão x deformação tem o seu comportamento dependente do tipo de solo, sendo representado por modelos próprios e particulares. As simulações representam os modelos constitutivos do comportamento dessas estruturas em diversos cenários construtivos (Almeida, 2010).

Os modelos constitutivos são utilizados com o objetivo de descrever o comportamento dos mais diversos tipos de materiais, por meio de equações matemáticas. Dessa forma, é possível prever como um material se comporta em função de um estado de tensão. Na Figura 1 mostra, um esquema de variados modelos constitutivos, utilizados para descrever o comportamento tensão x deformação de uma amostra cilíndrica em decorrência de esforços de compressão.

Figura 1 – Variados modelos constitutivos utilizados para descrever o comportamento tensão x deformação de uma amostra cilíndrica devido a esforços de compressão



Fonte: Desai & Christian (1977)

A Figura 1-a apresenta um material com comportamento elástico não-linear; na Figura 1-b se tem um material com comportamento elástico linear; a Figura 1-c mostra um material com comportamento elasto-plástico; a Figura 1-d representa um material possuindo comportamento plástico perfeitamente rígido; na Figura 1-e são apresentadas três curvas, na primeira é apresentado um material perfeitamente plástico, na segunda um material plástico com endurecimento, e na terceira um material plástico com amolecimento; na Figura 1-f é apresentado um material com comportamento viscoso e visco-elástico, com deformações produzidas em função de um carregamento constante, e na Figura 1-g é mostrado um material viscoso ou visco-elástico que apresentam redução de tensão com deformações constantes (Desai; Christian, 1977).

Em barragens de terra, alguns modelos constitutivos descrevem de forma satisfatória o comportamento tensão x deformação: modelos elástico-lineares, modelos elásticos variáveis e modelos elasto-plásticos. Esses modelos resultam em simulações com resultados aceitáveis, quando ocorre o incremento de tensões (carregamento). Todavia, são menos precisos na representação de situações que envolvem carregamento e descarregamento (Cruz, 1996).

2.1.1. Modelo elástico-linear isotrópico

Um material é considerado elástico quando toda a deformação ocorrida durante o seu carregamento, é recuperada após o descarregamento. Ademais, um material possui comportamento linear quando se tem uma relação linear entre as tensões e as deformações. Esse modelo, em muitas ocasiões gera resultados satisfatórios na previsão de tensões em barragens de terra. Além disso, é um modelo interessante para detectar algumas anomalias nessas estruturas, antes de adotar outros modelos mais sofisticados (Berrones; Vassilev; Liu, 2001).

No modelo elástico-linear, que é o mais difundido pelos projetistas, por conta da sua simplicidade, geralmente considera-se o material como isotrópico, e com isso, as leis constitutivas ficam definidas em função de dois parâmetros: o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

Os materiais classificados como elásticos lineares, têm a sua relação tensão x deformação descrita pela lei de Hooke, de acordo com a equação 2.1.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde:

σ = tensão axial; E = módulo de Young; ε = deformações.

A equação 2.1 é utilizada em casos unidimensionais. Desai & Christian (1977) relatam que nos casos com carregamentos tridimensionais, faz-se o uso da lei de Hooke generalizada, com a existência de 6 componentes independentes de tensão, e 6 componentes independentes de deformação, sendo, preciso portanto, 36 coeficientes para representar de maneira geral um material linear. Ao considerar um material isotrópico, esse número reduz pra 21 incógnitas. A relação tensão x deformação de um material isotrópico, pode ser escrita de acordo com a equação 2.2:

$$\{\sigma\}=[C]\cdot\{\varepsilon\} \quad (2.2)$$

Onde:

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

As barragens, geralmente, são obras geotécnicas em que ocorre o estado plano de deformações, tendo em vista que uma das suas dimensões possui extensão consideravelmente maior do que as outras duas. Desai e Christian (1977) relatam que para esse caso particular, as matrizes de tensões e deformações dos materiais se reduzem, de acordo com as Equações 2.4 e 2.5.

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}] \quad (2.4)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}] \quad (2.5)$$

2.2. Fissuramento em barragens de terra e enrocamento

A ocorrência de fissuras em barragens de terra é um fenômeno comum, até mesmo em maciços bem compactados. Em muitas ocasiões, essas fissuras podem ser as responsáveis pela erosão interna dos materiais de uma barragem de terra, devido ao favorecimento do fluxo de água através dessas aberturas (Marsal; Nuñez, 1975).

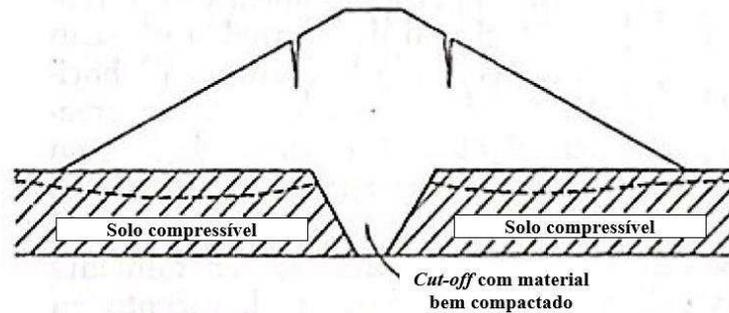
Camapum de Carvalho *et al.* (2015) relatam que a formação de fissuras em barragens de terra está relacionada com as mudanças do estado de tensões, e conseqüentemente, das deformações ocasionadas pelas etapas operacionais de uma barragem de terra durante a sua vida útil: após a construção do maciço, primeiro enchimento, rebaixamento rápido e outras possíveis situações. Além disso, os autores explanam que as fissuras podem ser potencializadas durante o primeiro enchimento do reservatório da barragem, devido à variação dos valores de poropressão no maciço de terra.

Mattsson, Hellström e Lundström (2008) citam que a existência de deformações em maciços de terra, podem originar rachaduras, que por sua vez, tornam o ambiente propício para o processo de erosão. Os autores comentam que o processo de fissuramento em barragens de terra pode ser desencadeado até mesmo para pequenas variações de tensões. Ademais, falam que mesmo que as deformações sejam muito baixas para que rachaduras sejam iniciadas imediatamente, elas podem ocorrer posteriormente devido a fraturas hidráulicas.

Sandroni e Guidicini (2021) relatam que a ocorrência de fissuras em maciços de terra sé resultado da formação e variação de campos de tensões no interior de uma barragem, podendo decorrer das seguintes causas:

- 1) Recalques diferenciais provenientes de:
 - a) Mudanças de deformabilidade dos materiais que compõe a fundação do barramento: nessa situação, a fundação é composta por mais de um material, que apresentam deformabilidades diferentes. Essa diferença de deformabilidade é responsável pela apresentação de recalque diferencial no barramento. Como é o caso das barragens que utilizam trincheira de vedação, com uma fundação mais compressível do que o *cut-off* utilizado, e a partir dessa diferença de deformabilidade, ocorrem recalques diferenciais e conseqüentemente, o fissuramento (Figura 2).

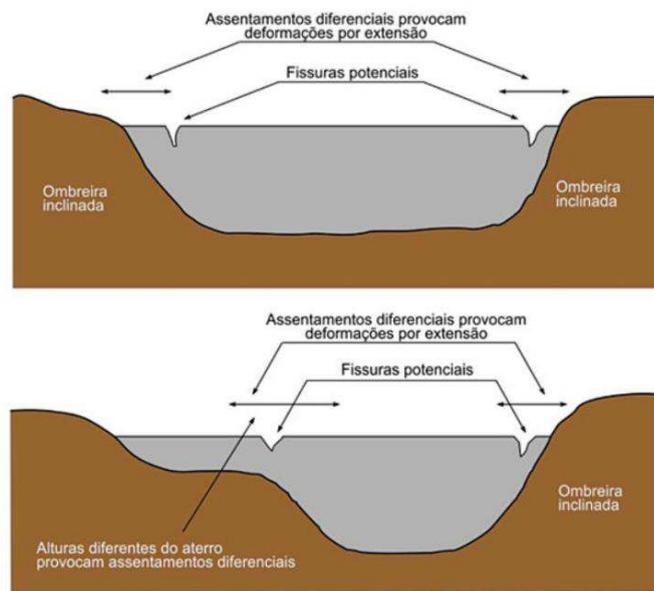
Figura 2 - Fissuramento ocasionado devido a diferença de deformabilidade da fundação da barragem



Fonte: Marsal; Nuñez (1975)

- b) Ocorrência de grandes variações na topografia do terreno de apoio para o maciço: vales estreitos que possuem taludes inclinados podem favorecer a ocorrência de recalques diferenciais nas barragens de terra, e conseqüentemente à formação de fissuras. O encontro entre o aterro e as ombreiras deve ser feito de maneira cuidadosa, devido a possibilidade da inclinação dos taludes das ombreiras tem de proporcionar a ocorrência de fissuras, pois a região central do barramento possui altura superior em relação as suas extremidades (Figura 3).

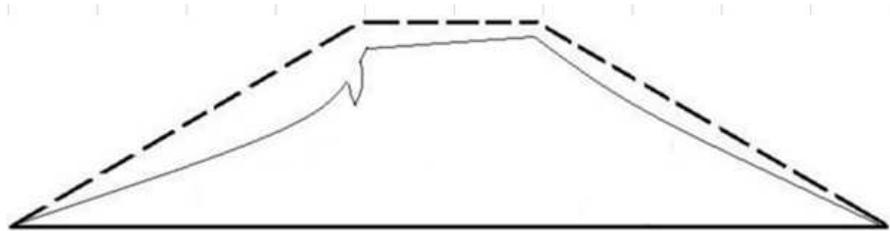
Figura 3 - Fissuramento ocasionado devido à recalques diferenciais provocados devido à inclinação das ombreiras da barragem e a diferenças nas alturas do aterro



Fonte: ANA (2016) adaptado de Mattsson *et al.* (2008)

c) Redução do volume na parte de montante do maciço devido o enchimento do reservatório: No enchimento ocorre a saturação da região de montante e de parte da fundação, enquanto que a região de jusante continua não saturada. Com isso, ocorrem deformações desiguais no maciço (Figura 4) provocando o aparecimento de trincas longitudinais no eixo do barramento.

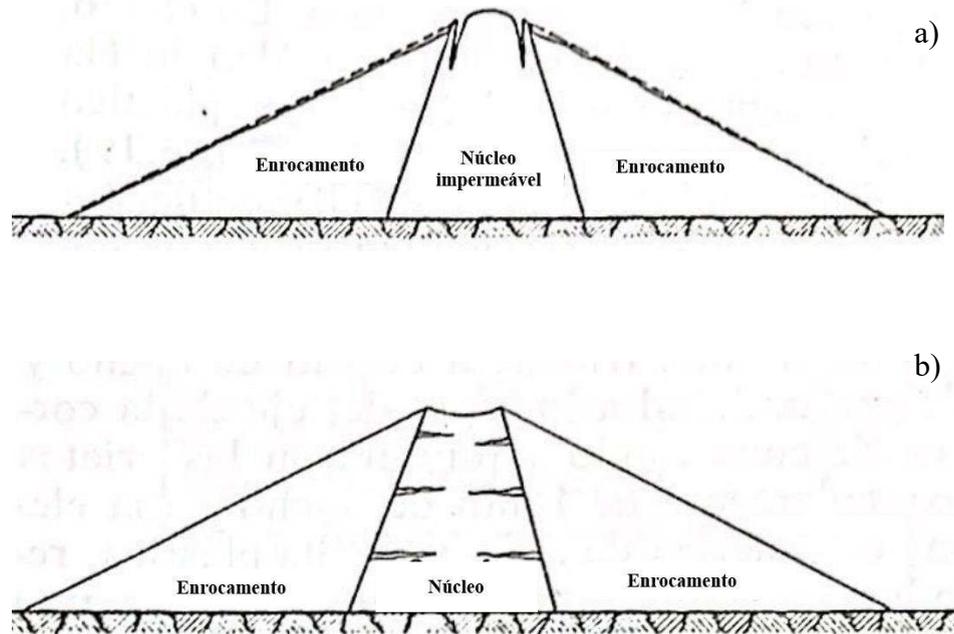
Figura 4 - Deslocamentos no maciço em decorrência do primeiro enchimento (seção deformada exagerada)



Fonte: Maia (2022)

- 2) Contração provocada pelo ressecamento: são resultados do ressecamento provocado pela retração de solos argilosos plásticos. São comuns em regiões secas e áridas, em que o reservatório da barragem fica seco durante a maior parte do ano. Ocorrem, geralmente, na crista da barragem e no paramento de montante, e apresentam forma irregular e alveolada.
- 3) Redistribuição de tensões ocasionada pela:
 - a) variações de rigidez dos materiais que constituem uma barragem do tipo zoneada: essa situação pode ocorrer de duas formas, com o núcleo mais rígido do que os espaldares, ou com os espaldares mais rígidos do que o núcleo. Na primeira situação, a compressão do enrocamento devido ao rearranjo e quebra das partículas de solo originam altas tensões de cisalhamento nos contatos com o núcleo, que podem ser o suficiente para gerar tensões no núcleo, nas proximidades do coroamento, e dessa forma ocasionar fissuras longitudinais (Figura 5-a). Na segunda situação, trincas horizontais atravessando o núcleo podem ser originadas devido ao arqueamento induzido por tensões de cisalhamento existentes no contato com o enrocamento (Figura 5-b).

Figura 5 – a) Fissuramento em barragens de enrocamento que o núcleo é mais rígido que os espaldares; b) Fissuramento em barragens em que os espaldares são mais rígidos que o núcleo



Fonte: Marsal; Nuñez (1975)

- b) variação de rigidez entre o material que compõe o maciço e estruturas em contato com ele, como, por exemplo, galerias, muros e cortinas: devido as diferenças de rigidez entre os tipos de solos e o concreto, essa variação de rigidez possibilita a ocorrência de movimentações diferenciais dos elementos estruturais, favorecendo o processo de formação de fissura.
- c) ocorrência de tensões cisalhantes nas interfaces aterro-ombreira e aterro-muro.

A Agência Nacional das Águas - ANA (2016) relata que se as fissuras não apresentarem grandes profundidades, não afeta, necessariamente a segurança de uma barragem, no entanto podendo influenciar na ocorrência de ravinamento nos maciços e, podendo contribuir para o processo de infiltração da água da chuva, com a conseqüente perda de resistência dos materiais que formam o barramento, podendo levar ao aparecimento de zonas de instabilidade na barragem. Por outro lado, se as fissuras apresentarem maiores dimensões (chegando até 8m de profundidade), posicionando-se, inclusive abaixo do nível do reservatório, podem ocasionar sérios problemas de estabilidade para a estrutura. Essas fissuras podem ser desenvolvidas em um maciço de terra de forma transversal ou longitudinal.

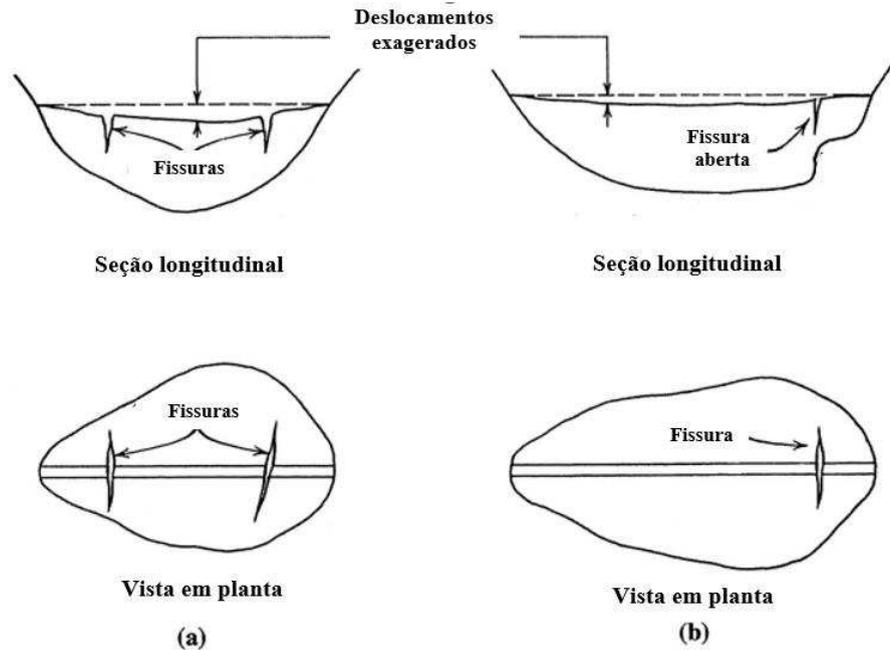
2.2.1. *Fissuras transversais*

As fissuras transversais são consideradas as mais perigosas, e são formadas quando os estratos compressíveis da fundação e as zonas impermeáveis do aterro apresentam, ao longo do eixo do maciço, mudanças abruptas na compressibilidade ou nas dimensões. Também podem ser originadas devido a deslocamentos, provenientes de deformações originadas quando uma seção de fechamento é construída (Marsal; Nuñez, 1975).

Camapum de Carvalho *et al.* (2015) relatam que essas fissuras são vistas como as mais preocupantes, tendo em vista que a partir delas, caminhos preferenciais de percolação podem ser formados, concentrados por meio do núcleo do barramento, e com a possibilidade de ser iniciado o processo de entubamento sequencial.

Na Figura 6 são mostrados os dois tipos mais comuns de fissuramento transversal, ocasionadas devido a recalques diferenciais. Em ambas as situações se observa a presença de trincas na crista da barragem. Isso ocorre, pois as deformações são direcionadas para o fundo do centro do vale, com o aumento das tensões de compressão na região central do barramento, e tensões menores na região de proximidade com as ombreiras, locais favoráveis para o aparecimento de fissuras transversais. Logicamente, inclinações maiores das ombreiras do barramento, elevam a possibilidade de ocorrência de tensões cisalhantes, e por consequência, o aparecimento de fissuras nos pontos acima de onde ocorre essas variações (Mattsson; Hellström; Lundström, 2008).

Figura 6 – Tipos mais comuns de fissuramento transversal



Fonte: Adaptado de Sherard *et al.*, 1963

2.2.2. Fissuras longitudinais

As fissuras longitudinais, geralmente, não são tão preocupantes quando as fissuras transversais. A ANA (2016) expõe que apesar desse tipo de trincamento não apresentar grandes preocupações, não deve ser subestimado, levando em consideração que podem permitir a infiltração de água no maciço, com a perda da resistência, e dessa forma podendo gerar um ambiente favorável para a ocorrência de deslizamentos.

A ocorrência desse tipo de fissuramento, está relacionado a variados casos de deslocamento diferenciais possíveis de ocorrer em uma barragem de terra homogênea ou zoneada.

Um caso frequente de situação favorável para a formação de trincas horizontais, é o que os materiais da fundação de um barramento apresentam deformabilidade diferente, relatado por Sandroni e Guidicini (2021), e mostrado na Figura 2 (situação em que ocorre a variação de deformabilidade entre o *cut-off* utilizado e o aluvião que compõe a fundação do barramento, provoca deslocamentos diferenciais entre a parte central do barramento e as partes de montante e jusante do maciço, e dessa forma, favorecem a ocorrência de fissuras longitudinais).

Para o caso de barragens zoneadas, o fissuramento longitudinal normalmente é iniciado devido as diferenças de rigidez entre os materiais que compõem o núcleo e os enrocamentos, conforme explanado por Sandroni e Guidicini (2021), e mostrado por Marsal e Nuñez (1975) (Figura 5). Esses autores relatam que apesar do fissuramento transversal ser mais perigoso que o fissuramento longitudinal, exceto no caso de estruturas que possuem o núcleo inclinado, o longitudinal é mais frequente, principalmente em barragens que possuem seção composta.

2.2.3. Acidentes e incidentes em barragens de terra envolvendo fissuramento

Existem vários casos relatados na literatura de acidentes em barragens de terra devido à falta de medidas efetivas de controle do fissuramento durante o início da construção de barragens de aterro formado por terra e/ou rocha. Um exemplo dessa situação, é o da barragem de Ei Infiernillo, localizada no México, com altura máxima de 148 m, sendo classificada como uma barragem de enrocamento com núcleo reto. Essa barragem, logo após o primeiro enchimento, apresentou várias linhas finas transversais na sua crista. Outro exemplo, é a barragem de Cougar, com altura máxima de 156 m, localizada nos Estados Unidos, sendo um barramento de enrocamento inclinado com núcleo de argila. É relatado que após o reservatório atingir o nível normal d'água, no segundo ou terceiro dia após o represamento, diversas trincas longitudinais surgiram em toda a extensão do coroamento da estrutura. Esse fissuramento ocorreu, principalmente, na interface entre o material do núcleo, e o material do filtro (Zhang *et al.*, 2022).

Outro caso é citado por Justin (1932) e por Sherard (1953), o da barragem de Apishapa, localizada em Fowler, Estados Unidos. O desastre ocorrido no barramento ocorreu devido ao umedecimento do maciço de terra, que ocasionou deformações excessivas e elevado fissuramento (após o enchimento do reservatório, foram observados deformações e fissuramento ao longo do maciço de terra, além de vazão considerável no pé do talude de jusante). O fissuramento proporcionou ao corpo da barragem caminhos preferenciais de percolação e com isso foi carregado material do maciço. Com isso, formou-se um “túnel” com o formato de um S, provocando o completo colapso da estrutura.

No Brasil, observa-se uma escassez de registros envolvendo acidentes e incidentes em barragens de terra, com diversas barragens implantadas sem registros de projetos. Essa escassez de registros é reafirmada ao analisar as estatísticas documentadas, com cerca de 10

acidentes registrados até a década de 90, do total de 700 barragens construídas. No entanto, desde da promulgação da Lei nº 12.334/2010, a Agência Nacional de Águas (ANA), visa obter o cadastro de todas as barragens construídas no país, através do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, para o maior controle dos acidentes e incidentes envolvendo esses tipos de estruturas (Guidicini; Sandroni; Mello, 2021a).

Em relação a incidentes e acidentes envolvendo o fissuramento de barragens de terra no Brasil, são verificados diversos casos, no entanto não há ocorrência de nenhum desastre associado a essa anomalia diretamente (Sandroni; Guidicini, 2021). Como é o caso da barragem do Vigário, estudada por Vargas e Hsu (1970), que apresentou trinca transversal devido ao seu enchimento, sem a decorrência de problemas mais graves em função dela. Outra barragem analisa pelos autores, é a barragem Euclides da Cunha, que possuía trinca com causa associada a um recalque diferencial ocorrido na região da ombreira esquerda do barramento, devido a sua inclinação elevada. Outras ocorrências de fissuramento são relatadas em Pessoa (1964), barragens de Barreiros, Boqueirão das Cabeceiras e Caxitoré, e em Caproni Jr *et al.* (1997), barragem de Santa Helena, e UHE Corumbá.

No estado do Ceará, são encontrados fissuramentos em algumas pequenas barragens, como é o caso das fissuras longitudinais dos açudes Araras, Trussu, e Monsenhor Tabosa, e das trincas transversais observadas nos açudes Caxiroté e Trapiá II. Ao açude do Trussu é atribuída como causa provável do fissuramento à recalques diferenciais do maciço em função da saturação do talude de montante, provocada pelo primeiro enchimento da barragem (Menescal, 2005). Na Figura 7 são mostradas trincas longitudinais no coroamento da barragem do Trussu, conforme relatos de Menescal (2005)

Figura 7 - Trincas transversais no coroamento da barragem do Trussu



Fonte: Menescal (2005)

2.3. Resumo e notas conclusivas

Nesse capítulo foram apresentados conceitos importantes para o estudo do fissuramento. A princípio foi abordado sobre a importância de se conhecer o estado tensão x deformação de um barramento, tendo em vista que deformações diferenciais podem ocorrer nessas estruturas em função da variação dos materiais utilizados como componentes do maciço e da fundação, e do funcionamento do sistema de drenagem.

Também foram apresentados os modelos constitutivos utilizados para descrever o comportamento dos solos frente à um estado de tensão, seja provocado por um carregamento ou pela percolação no maciço. Foi dado um enfoque principal ao modelo elástico-linear isotrópico, mostrando os seus campos de utilização e as suas limitações, tendo em vista que o UNSTRUCT faz uso desse modelo para descrever o comportamento dos materiais.

Por fim, abordou-se como os diferentes estados tensão x deformação geram a formação de fissuras em maciços de terra, demonstrando como as trincas são originadas em diferentes seções. Com, as barragens homogêneas tendo o seu fissuramento atribuído principalmente as diferenças de umedecimento entre as regiões de montante e jusante, e as barragens zoneadas devido as diferenças de rigidez entre os materiais que compõem o núcleo e os materiais dos espaldares.

No capítulo seguinte é abordado como o Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado para resolver problemas geotécnicos, em especial envolvendo barragens de terra. Também são feitas considerações sobre a análise associada realizada entre os *softwares* SLIDE 6.0 e UNSTRUCT, mostrando aspectos importantes sobre a utilização dos dois programas para o estudo do fissuramento.

3 APLICAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDRÁULICAS E DE EQUILÍBRIO (UNSTRUCT)

Este capítulo busca apresentar e discutir sobre os *softwares*, SLIDE 6.0 e UNSTRUCT, e a associação realizada entre os dois, para o estudo do fissuramento em barragens de terra. Numa análise associada, o SLIDE 6.0 é utilizado inicialmente para definir o fluxo d'água que ocorre pelo maciço, assim como definir os valores de poropressões antes e após o enchimento do reservatório. Com os resultados obtidos no SLIDE 6.0, é feita a análise tensão x deformação com o UNSTRUCT, de maneira sequencial e independente.

Dessa forma, a princípio será discutido neste capítulo sobre o Método dos Elementos Finitos (MEF), e a sua utilização na análise tensão x deformação em barragens de terra. Logo após, será apresentado o *software* SLIDE 6.0, mostrando as suas ferramentas principais para o desenvolvimento dessa pesquisa. Ademais, será apresentado o programa UNSTRUCT, partindo da sua formulação inicial, proposta por Miranda (1988), até as mudanças realizadas por Silva Filho (1998), com foco principal na sua utilização a partir de mudanças de rigidez dos materiais devido ao umedecimento das regiões do maciço e da fundação.

3.1. Utilização do MEF na análise de fluxo e tensão x deformação em barragens de terra

A engenharia geotécnica rapidamente reconheceu a utilidade do Método dos Elementos Finitos (MEF) para solucionar os mais diversos tipos de problemas que desafiavam as soluções convencionais adotadas. Esse método é a principal ferramenta numérica e possui aplicabilidade nos mais diversos problemas geotécnicos, sendo bastante utilizada para análise tensão x deformação e de fluxo em barragens de terra (Desai; Christian, 1977).

Araújo (2006) explana que esse método consiste na divisão do domínio do problema em elementos, formulando o comportamento desses elementos a partir de considerações a respeito das propriedades e da geometria do domínio. Os elementos do problema são conectados em alguns pontos, que podem ser chamados de nós. Esses nós interagem entre si, e a distribuição da variável que representa o problema pode ser aproximada através de uma função, denominada função de interpolação. Dessa forma, a variável nos nós de cada elemento pode ser relacionada por uma equação, obtendo-se o sistema de equações de cada elemento. Sendo assim, ao considerar a conexão desses elementos por meio dos nós, faz-se uma associação entre o sistema de equações de cada elemento e dos elementos adjacentes,

obtendo-se, dessa maneira, um sistema global de equações do problema. Logo após, adiciona-se as condições de contorno, e a resolução do sistema global de equações é feita, obtendo-se, então, o resultado da variável do problema estudado em cada nó da malha utilizada.

Na geotecnia, a princípio, o MEF foi utilizado para a análise de fluxo em meios porosos através de estudos realizados por Mauersberger (1965) e de Zienkiewicz e Cheung (1965). A partir da utilização do MEF foi possível analisar condições de fluxo com regiões possuindo contorno geométrico complexo, além de materiais com graus arbitrários de anisotropia e heterogeneidade, além de condições de contorno complicadas (Alberti, 1988).

Apesar de existirem diversas formas de determinar o fluxo d'água que ocorre através do maciço de uma barragem e pela fundação, como, o traçado manual, os modelos físicos utilizando escalas menores, e as analogias com outros problemas físicos (potencial elétrico, processo de dissipação de calor por condução), o MEF se sobressai em relação aos demais, tendo em vista que existe uma dificuldade em resolver problemas de fluxo em meios porosos, e esse método consegue resolver rapidamente esse tipo de problema com uma boa aproximação (Maia, 2022).

O MEF também se destaca na análise tensão x deformação de um barramento, tendo em vista que a observação das condições de deformação desse tipo de estrutura é um elemento importante para garantir a sua segurança, pois a ruptura de aterros de barragens quase sempre é precedida por sinais observáveis, como: aumento da velocidade de deformações, fissuramento, recalques diferenciais, e desenvolvimento de pressões neutras. Ademais, o método também se destaca por conseguir modelar estruturas complexas, e compostas por diferentes materiais (Pereira, 1986).

Mahler (1974) relata que o método também é um importante aliado para a previsão de fissuramento em barragens de terra. E, apesar de ainda não existirem métodos que simulem o processo de propagação de fissuras, elas podem ser previstas a partir da análise dos campos de tensão x deformação, com a indicação de prováveis zonas de tração e ruptura. A partir dessas determinações, é possível definir o tipo de seção mais adequado para o barramento, definindo os melhores perfis longitudinais e transversais, a disposição do filtro e do núcleo central mais adequados, além das inclinações dos taludes de jusante e montante.

Logo, é inegável a importância e a aplicabilidade do MEF para a engenharia e a geotecnia, tendo em vista que o seu desenvolvimento possibilitou aos projetistas realizarem análises e estudos de maneira rápida, conseguindo modelar problemas complexos, com variadas situações de contorno e compostas por diferentes materiais. No entanto, a eficiência dos seus

resultados depende de alguns fatores, como, os parâmetros adotados no estudo e as condições de contorno do problema.

3.2. Análise de fluxo a partir do SLIDE 6.0

O SLIDE 6.0 é um *software* comercial destinado a análise de estabilidade dos mais diversos tipos de estruturas geotécnicas, como, barragens, taludes, e muros de contenção. O programa permite importação de desenhos do AutoCAD, e nele podem ser feitas análises de equilíbrio limite, de sensibilidade e probabilísticas. Além disso, o método dos elementos finitos pode ser utilizado para análises de percolação.

A análise de percolação é feita a partir de um modelo bidimensional, podendo-se considerar um fluxo d'água estacionário ou transiente, e as camadas de solo como saturadas ou não saturadas. Para a análise do fluxo d'água o principal parâmetro a ser considerado é o coeficiente de permeabilidade das camadas do solo. Logo após a análise, o usuário pode observar como resultado, a linha de fluxo d'água no corpo do barramento, além de informações, como, valores de poropressões.

3.3. Análise tensão x deformação com a utilização do UNSTRUCT

3.3.1. O programa UNSTRUCT

O programa UNSTRUCT em sua versão inicial foi desenvolvido por Miranda (1988), e utiliza o método dos elementos finitos para analisar o comportamento tensão x deformação em solos, apresentando, como uma das suas características principais, a facilidade na obtenção de dados para a análise. Nesse *software* usa-se apenas o ensaio de duplo adensamento de solos como parâmetros de resistência do solo, ensaio facilmente executável em qualquer laboratório de mecânica dos solos (Silva Filho, 1998).

Miranda (1988) objetivava, por meio da utilização do *software* analisar o comportamento de pequenas barragens durante o seu primeiro enchimento. Tendo em vista que no Nordeste brasileiro, devido ao longo período de estiagem, pequenas barragens não eram compactadas de maneira adequada. Dessa forma, durante o primeiro enchimento o estado de tensões dessas barragens era modificado, provocado pelo aumento de umidade no aterro, que ocasionava o aumento de valores de poropressão em diversos pontos do maciço. Com isso,

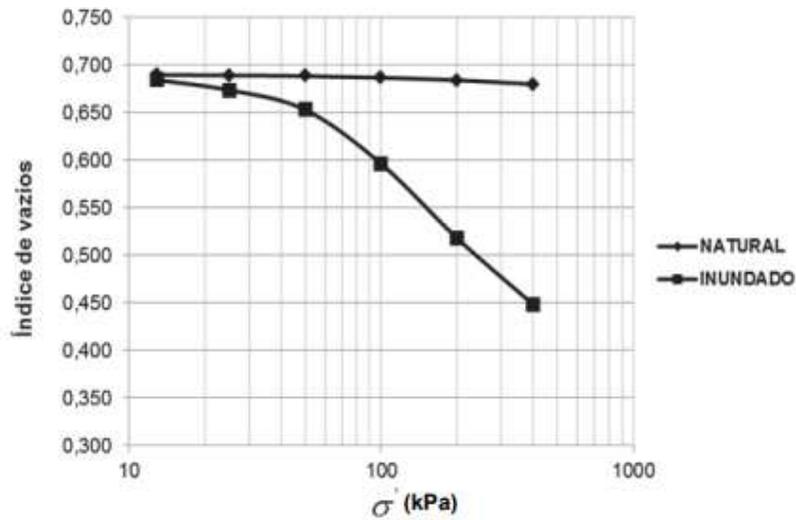
recalques diferenciais são originados, com a formação de fissuras nessas estruturas, e dessa forma podem originar condições propícias para a ocorrência de entubamento, podendo levar até a sua ruptura.

Através do MEF, com a consideração de uma condição de deformação plana, em que uma das dimensões do maciço é bem maior em relação as outras duas dimensões, o UNSTRUCT realiza a análise das tensões e deformações de maciços de terra saturados e não saturados. Na determinação das tensões iniciais, o programa despreza os deslocamentos, e então as equações são resolvidas. Em sequência, os novos estados de tensão x deformação são gerados a partir da introdução de carregamento externo, ou devido às variações do teor umidade, ou pela deformação do solo provocada por variações de rigidez em função do umedecimento, ou pelas forças de percolação, ou devido as forças decorrentes dos empuxos hidrostáticos na zona saturada.

Na versão de Miranda (1988), o programa realiza as análises a partir de uma analogia térmica, que modela os estados de tensões e deformações ao qual o maciço está submetido, a partir de variações de poropressão.

A partir das mudanças de poropressões, O UNSTRUCT, fazendo uso do ensaio edométrico duplo, modela a variação de volume de um solo, num estado plano de deformação. Esse tipo de ensaio foi primeiramente proposto por Jennings e Knight (1957), e consiste na realização de dois ensaios edométricos, uma com a amostra com valor de umidade natural e outra com a amostra previamente inundada. A partir da diferença entre as duas curvas, é possível prever quanto o solo deformou para determinado nível de tensão, em função do seu umedecimento. Na Figura 8 é possível visualizar um resultado comum desse ensaio.

Figura 8 – Resultado de ensaio duplo edométrico



Fonte: Lôbo Neto, 2013

3.3.2. Determinação do estado tensão x deformação

Silva Filho (1998) mostra que para o cálculo do estado tensão x deformação de um maciço de terra, o UNSTRUCT faz uso das seguintes equações diferenciais de equilíbrio para a estrutura antes da sua saturação:

$$\frac{\partial(\sigma_x - u_a)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + b_x = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial(\sigma_y - u_a)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + b_y = 0 \quad (2.7)$$

Em que:

σ = tensão normal total;

τ_{xy} = tensão cisalhante;

u_a = poropressão de ar, considera-se zero;

b_x, b_y = forças de massa por unidade de volume em função do peso próprio do solo ou em função das mudanças no peso específico provocadas pelas variações de umidade do solo.

Na zona saturada, as condições de equilíbrio são determinadas a partir das seguintes equações:

$$\frac{\partial(\sigma_x - u_w)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + b_x = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial(\sigma_y - u_w)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + b_y = 0 \quad (2.9)$$

Onde:

σ = tensão normal total;

τ_{xy} = tensão cisalhante;

u_a = poropressão da água;

b_x, b_y = forças de massa por unidade de volume em função do peso próprio do solo e dos efeitos provocados pela água, dentre eles, as forças de percolação e o empuxo hidrostático.

Por se tratar de um estado plano de deformações, as seguintes relações constitutivas também são utilizadas:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_u} [\sigma_x - u_a - \nu(\sigma_y + \sigma_z - 2u_a)] - \frac{1}{H} (u_a - u_w) \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_u} [\sigma_y - u_a - \nu(\sigma_x + \sigma_z - 2u_a)] - \frac{1}{H} (u_a - u_w) \quad (2.11)$$

Em que:

E_u = módulo de elasticidade em relação a $(\sigma - u_a)$;

H = módulo de elasticidade em relação a $(u_a - u_w)$;

ν = coeficiente de Poisson.

Além disso, para a utilização do programa é necessário a determinação dos módulos de elasticidade, tanto na condição inicial (valor de umidade inicial) – E_0 , como na condição após o umedecimento - E_s , conforme explanado por Jennings e Knight (1957). Os módulos de elasticidade, são calculados conforme as seguintes equações:

$$E_0 = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \frac{(\sigma_v - u_a)_F}{\Delta\varepsilon_{UF}} \quad (2.12)$$

$$E_S = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \frac{(\sigma_v - u_a)_F}{\Delta\varepsilon_{S0} + \Delta\varepsilon_{SF}} \quad (2.13)$$

Onde:

$\Delta\varepsilon_{UF}$ = variação de deformação específica devido à variação de tensão $(\sigma_v - u_a)_F$;

$\Delta\varepsilon_{S0}$ = variação de deformação específica devido ao umedecimento do corpo de prova, até atingir a saturação;

$\Delta\varepsilon_{SF}$ = variação de deformação específica devido à variação de tensão $(\sigma_v - u_a)_F$; após o umedecimento da amostra;

$(u_a - u_w)_0$ = valor de poropressão inicial do corpo de prova, utilizado para determinar o E_0 ;

Além disso, para o cálculo do módulo de elasticidade com a umidade em um valor intermediário, utiliza-se:

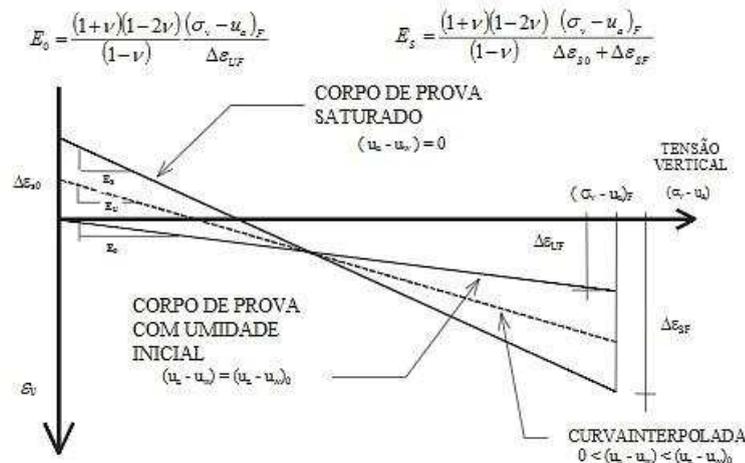
$$E_u = \frac{E_0}{\left(1 - \frac{E_0}{E_S}\right) \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_0} - 1\right] + 1} \quad (2.14)$$

Em que:

$(u_a - u_w)$ = valor de poropressão da amostra para o valor de umidade intermediário;

Na Figura 9 é possível observar a variação tensão x deformação de corpos de prova para os três estados de umidade abordados (corpo de prova completamente saturado, corpo de prova com a umidade inicial e corpo de prova com umidade intermediária), e o cálculo dos seus respectivos módulos de elasticidade.

Figura 9 – Variação tensão x deformação dos corpos de prova/ Cálculo dos módulos de elasticidade



Fonte: Silva Filho, Cerqueira (2004)

Essa versão do programa recebeu o nome de analogia térmica, pois o campo de tensões x deformações do maciço é obtido a partir de uma analogia que determina o vetor de deformações iniciais que entra na lei de Hooke de maneira similar às deformações provocadas pela variação térmica (SILVA FILHO; CERQUEIRA, 2004).

3.3.3. Atualização do UNSTRUCT (SILVA FILHO, 1998) – utilização da variação de rigidez para a determinação do estado tensão x deformação

Silva Filho (1998) propôs algumas mudanças para o programa UNSTRUCT visando tornar as análises das obras geotécnicas mais realistas. Dentre as mudanças feitas, destacam-se: a possibilidade de modelar pequenos carregamentos, a consideração da variação da rigidez, e a possibilidade da aplicação incremental dos carregamentos.

Visando englobar outros fatores que influenciam no estado tensão x deformação de um solo, como, os agentes cimentantes que são responsáveis por estabilizar o contato intergranular, o cálculo do estado tensão x deformação no UNSTRUCT foi complementado. Com as deformações observadas nos corpos de prova não só determinadas a partir da analogia térmica, mas também com a utilização da metodologia de variação de rigidez nos materiais em função das mudanças de umidade.

Com essa metodologia, considera-se que o solo acumula deformações compatíveis com as cargas e a rigidez para os níveis de tensões atuantes. Quando ocorre o umedecimento do solo, uma redução de rigidez pode ocorrer, com isso o módulo de elasticidade do material reduz com o aumento do coeficiente de Poisson. Devido à essa redução da rigidez provocada pela variação dos valores de poropressões dos materiais, são consideradas as reduções de rigidez no solo, que ocorrem devido ao umedecimento do maciço. Dessa forma, a estrutura inicial não se mantém estável, provocando a ocorrência de deformações (Silva Filho; Cerqueira, 2004).

A formulação utilizada por Silva Filho (1998) para representar essa situação, com a utilização do MEF, foi dividida em duas partes: A situação inicial, sendo denominada de equilíbrio inicial, e a situação final, após a redução da rigidez do solo, conforme pode ser visualizado a seguir:

- a) Situação inicial: as deformações iniciais são admitidas como estando em equilíbrio com as tensões iniciais aplicadas ao elemento, derivadas de carregamentos aplicados anteriormente.

$$\int_{V_e} B^T \sigma_0 d(vol) = \int_{V_e} B^T D_e \varepsilon_0 d(vol) \quad (2.15)$$

Em que:

σ_0 = estado de tensões compatível com o carregamento aplicado ao solo;

ε_0 = estado de deformações compatível com o carregamento aplicado e com a rigidez do solo;

D_e = rigidez inicial do solo.

- b) Situação final: com a redução da rigidez do material, novas deformações ocorrem no elemento, até que um novo equilíbrio seja atingido.

$$\int_{V_e} B^T \sigma d(vol) = \int_{V_e} B^T \overline{D}_e B d(vol) x a^e - \int_{V_e} B^T \overline{D}_e \varepsilon_0 d(vol) + \int_{V_e} B^T \sigma_0 d(vol) \quad (2.16)$$

Onde:

σ = novo estado de tensões após o umedecimento;

D_e = rigidez final do solo;

a^e = deslocamentos dos nós dos elementos;

ε_0 = deformação compatível com o carregamento aplicado e com a rigidez do solo;

σ_0 = estado de tensões compatível com o carregamento aplicado ao solo.

A nova rigidez, associada ao módulo de elasticidade da situação em que o corpo de prova se encontra, com uma umidade intermediária é calculado:

$$v_u = v_s - (v_s - v_0) \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_0} \quad (2.17)$$

Onde:

$(u_a - u_w)_0$ = poropressão do corpo de prova usada para definir E_0 ;

$(u_a - u_w)$ = poropressão do corpo de prova utilizada para o cálculo de E_s ;

E_0 = módulo de elasticidade para a condição inicial;

E_s = módulo de elasticidade para a condição final;

v_0 = coeficiente de Poisson para a condição inicial;

v_s = coeficiente de Poisson para a condição após o umedecimento.

3.4. Utilização da associação entre o SLIDE 6.0 e o UNSTRUCT

A análise tensão x deformação de um problema geotécnico considerando os efeitos provocados pelo fluxo d'água e pelas variações de poropressões pode ser feita de duas formas: através de uma análise hidromecânica associada, ou por meio de uma análise hidromecânica acoplada. Em uma análise associada, o estudo de percolação e do estado tensão x deformação é feito de maneira independente e sequencial, com os resultados da análise de fluxo obtido primeiramente, para, logo após o estado tensão x deformação ser determinado. Na análise acoplada, as análises são feitas em conjunto, logo, os efeitos do fluxo d'água e do estado tensão x deformação são considerados simultaneamente.

Nessa pesquisa foi feita uma análise associada, em que os efeitos do fluxo d'água sobre o estado tensão x deformação é analisado de forma separada. A princípio, a análise de fluxo foi feita com a utilização do SLIDE 6.0, contemplando dois cenários, com duas situações cada: inicial e final. Na situação inicial, foi considerado o barramento após o final de sua

construção, e a situação considerando as variações de fluxo d'água no barramento (enchimento do reservatório, variação d'água na fundação da barragem).

A associação entre o SLIDE 6.0 e o UNSTRUCT já foi utilizada para o estudo tensão x deformação em outros barramentos. Maia (2022) através de análises numéricas fez uso da associação para identificar zonas potenciais de fissuramento de seções com características variadas de uma barragem hipotética com a utilização de dados de ensaios de laboratório de um solo típico utilizado em barragens de terra. O autor observou que quando os materiais utilizados no barramento eram compactados no trecho seco da curva de compactação, ocorria maiores deformações, e que essa situação era a mais favorável para a ocorrência de fissuras no talude de montante. Também foram verificadas zonas prováveis de fissuramento transversal devido à diferentes seções transversais ao longo do barramento.

Leme (2015) fez uso da associação para avaliar uma metodologia para projeto de pequenas barragens de terra no semiárido. A partir das análises, foi averiguado que maiores deformações ocorreriam para os espaldares do maciço, enquanto que o núcleo da barragem estaria com menores deformações. Esse diferencial de deformação foi ocasionado pelas mudanças de grau de compactação entre os materiais dos espaldares e o material do núcleo. Também foi observado que as deformações não eram propagadas de montante para jusante no maciço.

3.5. Resumo e notas conclusivas

Nesse capítulo foram apresentadas as ferramentas numéricas utilizadas para o desenvolvimento do estudo de fissuramento. Abordou-se no capítulo, primeiramente, sobre o MEF, método numérico amplamente utilizado na engenharia, inclusive, para a avaliação tensão x deformação e de fluxo em barragens de terra.

Em seguida, mostrou-se como uma análise de fluxo é feita com o uso do SLIDE 6.0, e como a análise tensão x deformação é contemplada pelo programa UNSTRUCT. Também foi contemplado nesse capítulo, as formulações necessárias para o uso desse *software*, explicitando como o campo tensão x deformação a partir de variações de umedecimento é obtido por meio dele.

Por fim, discorreu-se sobre como é realizada a associação entre os dois *softwares*. Também foram apresentados estudos que utilizaram a associação para prever o estado tensão x deformação de barragens de terra submetidas a variações de umidade.

No próximo capítulo, é apresentada a metodologia de variação de rigidez utilizada para o desenvolvimento desse estudo. Ademais, são mostradas as barragens de terra localizadas no estado do Ceará avaliadas nesse estudo, além de apontar como a variação de rigidez foi contemplada em cada uma delas.

4 METODOLOGIA NUMÉRICA DA VARIAÇÃO DA RIGIDEZ

Na primeira metade do século XX, devido à grande necessidade de armazenamento de água no Nordeste brasileiro, diversas barragens foram erguidas antes de métodos e princípios advindos da mecânica dos solos serem aplicados a esse tipo de estrutura. Logo, há uma gama de barragens construídas, com as mais diversas seções e com os mais diversos tipos de materiais, tendo em vista que os barramentos eram construídos e logo após, postos a prova (Guidicini; Jardim, 2021).

Levando em consideração os variados tipos de seções de barramento existentes no Nordeste brasileiro, observa-se que essas estruturas se comportam de maneira diversa frente a variações de rigidez provocadas por mudanças de umedecimento em sua estrutura. Dessa forma, nesse trabalho analisou-se cenários diferentes para os barramentos estudados, levando em consideração as suas estruturas e os materiais utilizados, identificando-se o material que apresenta maior deformabilidade em função do umedecimento, e, portanto, maior variação de rigidez.

Para aplicação da metodologia, e para a análise do fissuramento das barragens avaliadas nesse trabalho foi necessário determinar os parâmetros de entrada dos *softwares* UNSTRUCT, parâmetros físicos (porosidade e peso específico seco), e SLIDE 6.0, parâmetros hidráulicos (permeabilidade). Dessa forma, as propriedades dos materiais, que compõem as barragens foram determinadas considerando valores padrões para solos utilizados em barramento, a partir da sua classificação, uma vez que não foram feitos ensaios em amostras indeformadas do material do maciço e do solo de fundação.

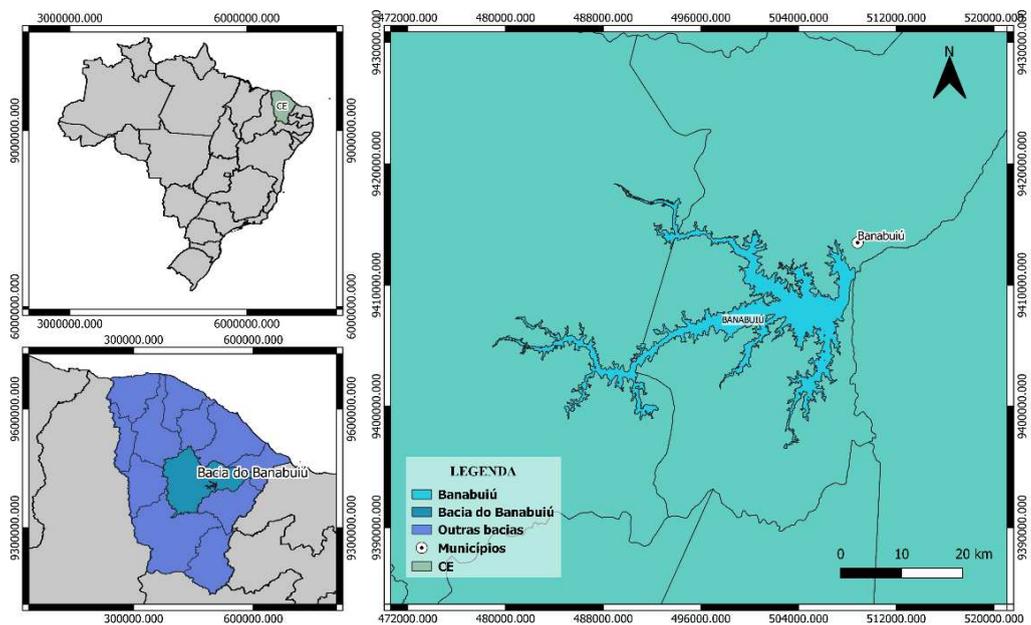
Já a consideração da variação de rigidez nos materiais que compõem o maciço e a fundação do barramento, foi feita através da simulação de ensaios de adensamento duplo, tendo em vista que o programa UNSTRUCT usa os resultados desse ensaio como parâmetro de entrada de deformabilidade dos materiais. Para isso, utilizou-se valores padrões de módulos de elasticidade, em função do tipo de material utilizado.

4.1. Descrição dos barramentos

4.1.1. Barragem Arrojado Lisboa

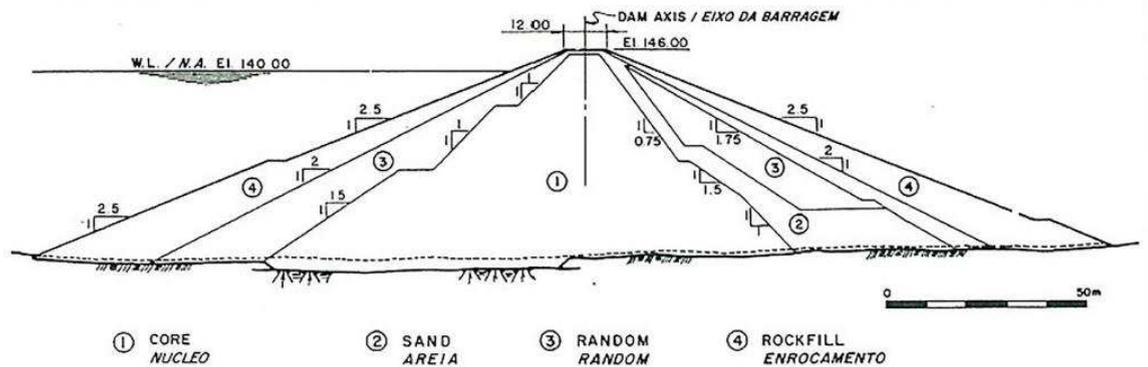
A barragem Arrojado Lisboa, do Açude Banabuiú, encontra-se localizada no município de Banabuiú/CE (Figura 10). Os principais objetivos do barramento são: a irrigação de terras do Baixo Jaguaribe, o controle das cheias do rio Banabuiú, realização da atividade de piscicultura, além do aproveitamento hídrico das regiões de montante. O barramento possui capacidade em torno de 1.700×10^6 m³ de água, e sua bacia hidrográfica compreende uma área em torno de 13.500 km². O maciço da barragem é composto de terra zoneada, com um núcleo de baixa permeabilidade, e zonas de transição a montante e a jusante, com a última parte composta por enrocamento (Araújo, 1990). Na Figura 11 observa-se a seção máxima da Barragem Arrojado Lisboa.

Figura 10 - Mapa de localização do açude Banabuiú da Barragem Arrojado Lisboa



Fonte: Autor (2023)

Figura 11 - Seção transversal da barragem Arrojado Lisboa

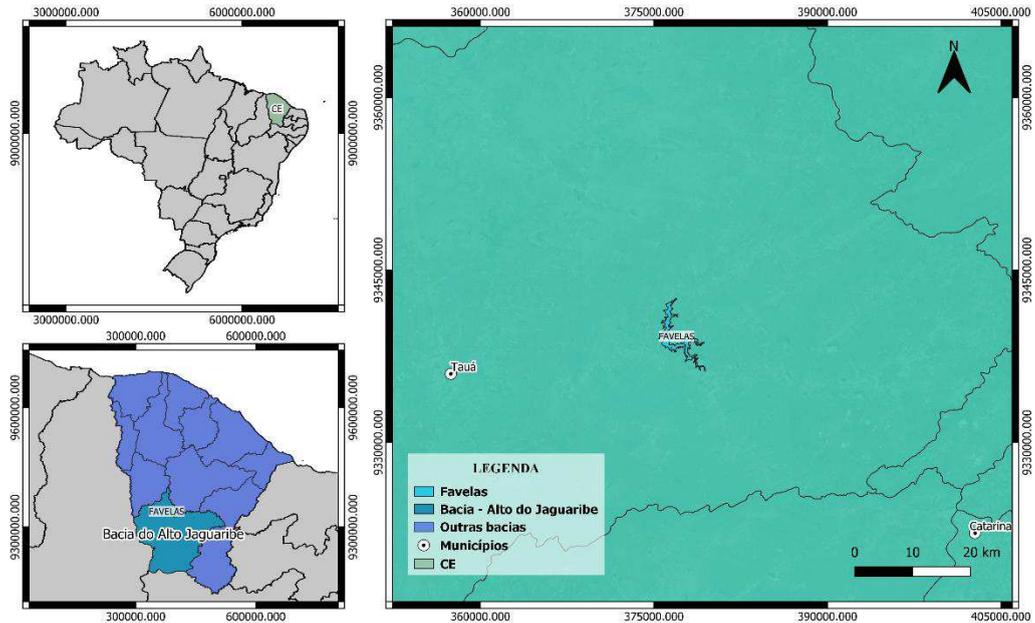


Fonte: Araújo (1990)

4.1.2. Barragem Favelas

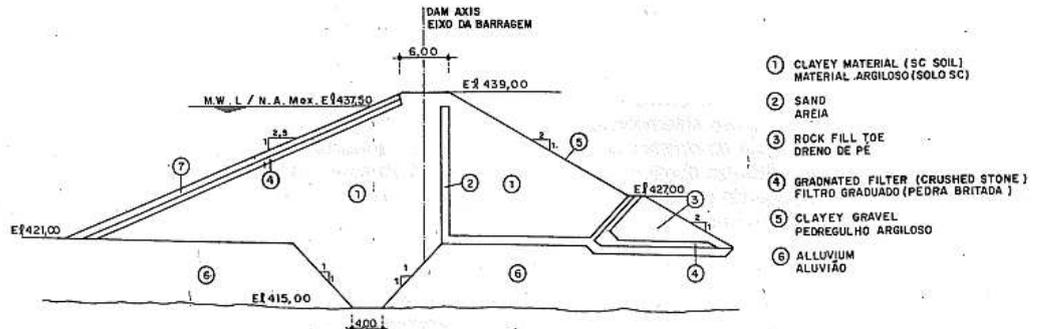
A Barragem Favelas encontra-se localizada no município de Tauá/CE, no estado do Ceará (Figura 12). O açude formado pela barragem tem como principais finalidades a perenização do riacho Favelas, servir de fonte de irrigação das áreas aluvionares a jusante do barramento, além de servir de reforço de água para o Projeto de Irrigação Várzea do Boi. Esse açude tem volume represado na ordem de $30,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, com vazão regularizada em torno de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. A estrutura principal do barramento é composta por um maciço homogêneo, com um sistema de drenagem interno possuindo filtro vertical, tapete drenante e dreno de pé (Araújo, 1990). Na Figura 13 observa-se a seção principal da Barragem Favelas.

Figura 12 - Mapa de localização do açude da Barragem Favelas



Fonte: Autor (2023)

Figura 13 - Seção transversal da Barragem Favelas



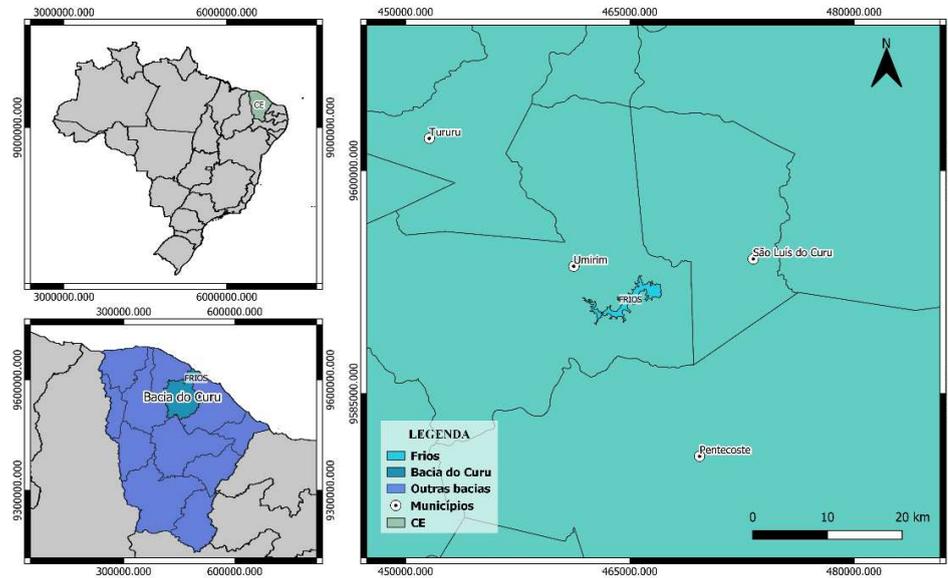
Fonte: Araújo (1990)

4.1.3. Barragem Frios

A Barragem Frios encontra-se na localidade do rio que recebe o mesmo nome, município de Umirim/CE (Figura 14). As suas principais funções, em conjunto com diversos outros barramentos, é realizar a regularização do rio Curu, e a irrigação das terras do vale do Curu. O seu reservatório possui volume acumulado de $33,025 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água, com vazão regularizada de $0,66 \text{ m}^3/\text{s}$. A sua estrutura é composta por um maciço de terra homogêneo, possuindo um filtro de areia, material de transição, além de um enrocamento. Além disso, na

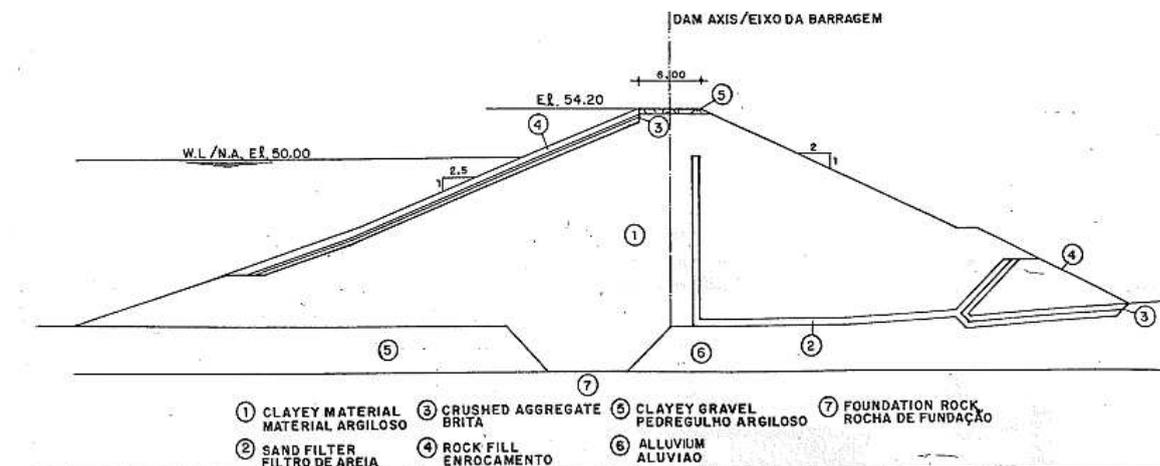
sua fundação há a construção de uma trincheira compactada, de modo a dificultar a percolação pela fundação. (Araújo, 1990) Na Figura 15 se tem a seção máxima da Barragem Frios.

Figura 14 - Mapa de localização do açude da Barragem Frios



Fonte: Autor (2023)

Figura 15 - Seção máxima da barragem Frios



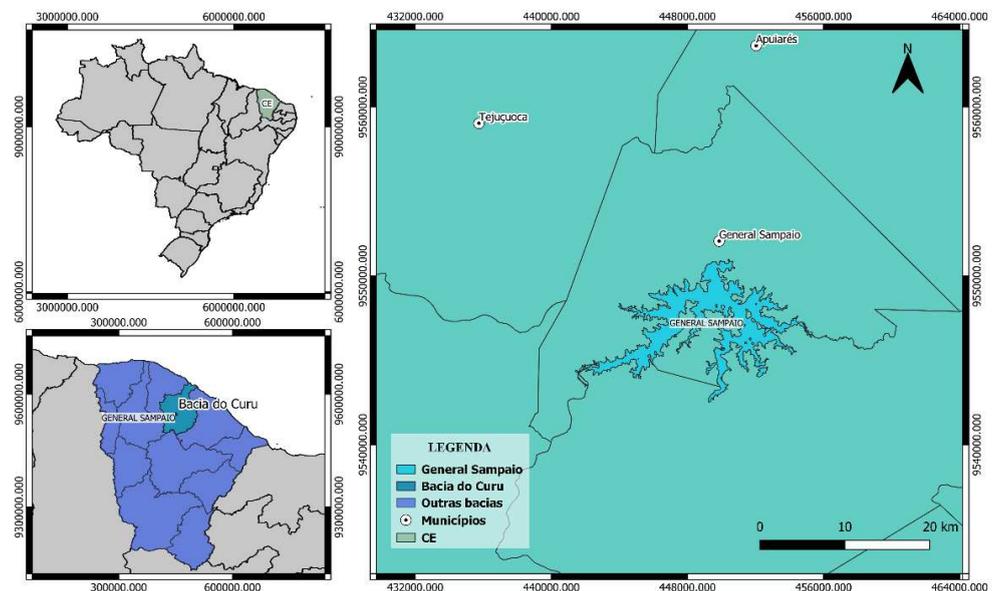
Fonte: Araújo (1990)

4.1.4. Barragem General Sampaio

A Barragem General Sampaio localiza-se no município de mesmo nome (Figura 16). Tem como principais fins, a regularização do do rio do Curu, além do abastecimento da

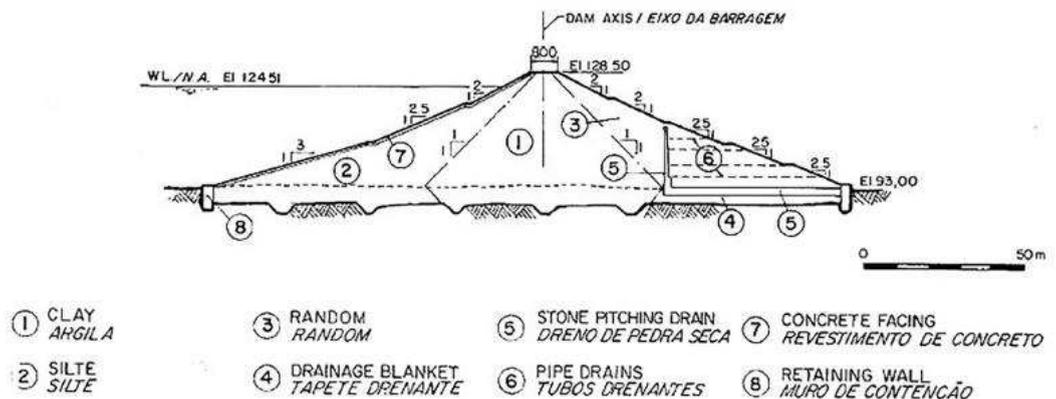
cidade de General Sampaio/CE. A capacidade do seu reservatório é em torno de $322,2 \times 10^6 \text{ m}^3$, possuindo uma bacia hidrográfica em torno de 1.720 km^2 . O barramento é composto por uma estrutura de solo zoneada, com um núcleo impermeável, com espaldares feitos de materiais não selecionados (sem o controle das suas características geotécnicas, escolhidos de acordo com a sua disponibilidade). O seu talude de jusante é protegido da erosão com a utilização de canaletas dispostas ao longo do talude e nas bermas existentes a jusante, enquanto que a proteção do seu talude de montante é feita com a utilização de revestimento de concreto (Araújo, 1990). Na Figura 17 é possível observar a seção máxima da Barragem General Sampaio.

Figura 16 - Mapa de localização do açude da barragem General Sampaio



Fonte: Autor (2023)

Figura 17 - Seção transversal da Barragem General Sampaio

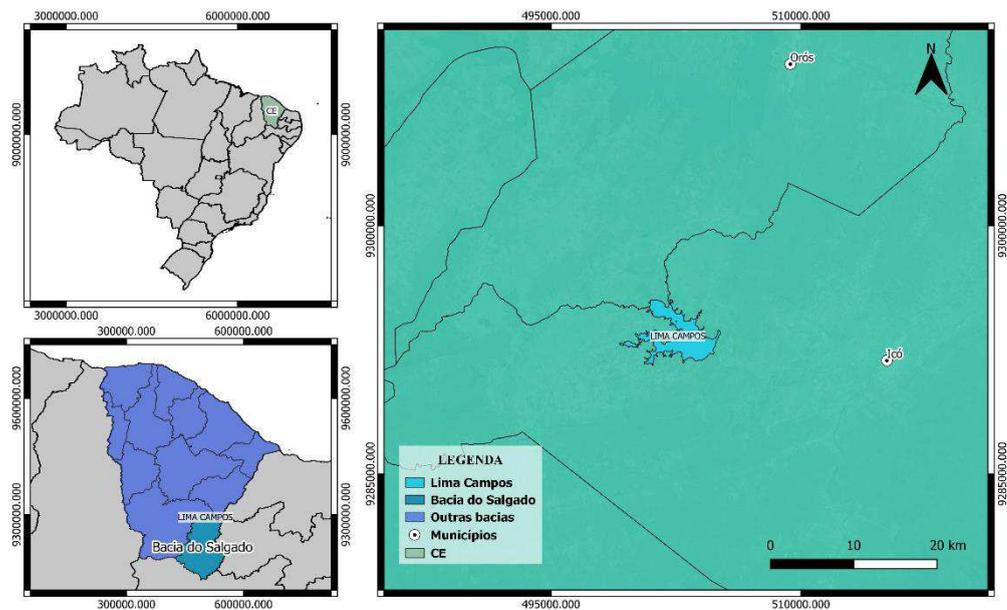


Fonte: Araújo (1990)

4.1.5. Barragem Lima Campos

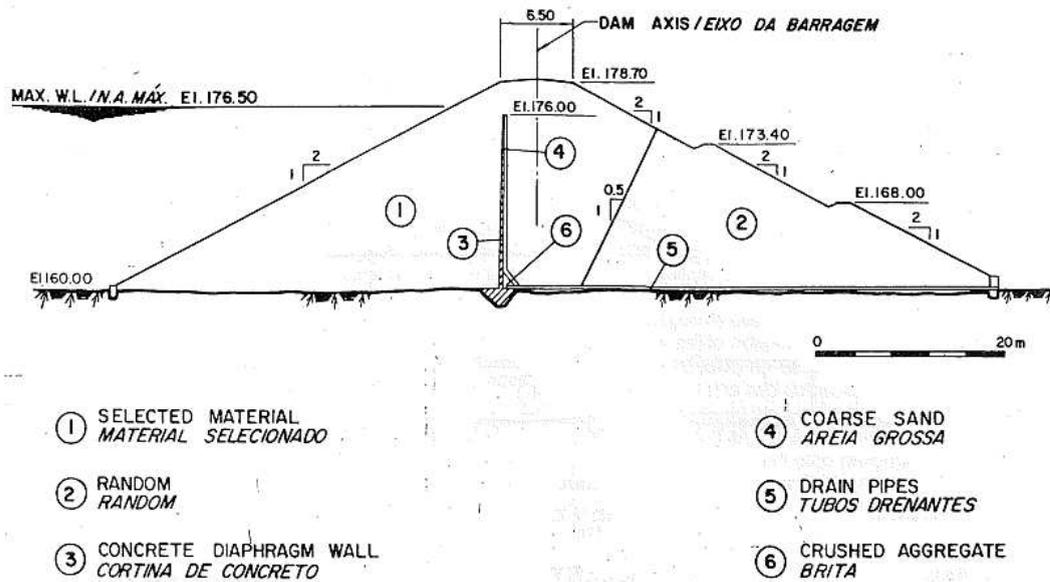
A barragem Lima Campos encontra-se localizada no município de Icó/CE (Figura 18), possuindo como principal objetivo o aproveitamento das várzeas do Icó, para que as terras do Vale do Rio Salgado formassem um sistema de reserva de água e irrigação. O seu reservatório tem como capacidade de acumulação de $66,382 \times 10^6$ m³ de água, com bacia hidrográfica possuindo 340 km². A sua estrutura é composta por um maciço de terra, sendo empregado a montante material argiloso, e a jusante material proveniente do desmonte do vertedouro, além de possuir uma cortina vertical de concreto armado, e um dreno no pé da cortina e manilhas no sentido transversal para realização da drenagem (Araújo, 1990). Na Figura 19 observa-se a seção máxima da Barragem Lima Campos.

Figura 18 - Mapa de localização da barragem do Açude Lima Campos



Fonte: Autor (2023)

Figura 19 - Seção máxima da barragem Lima Campos

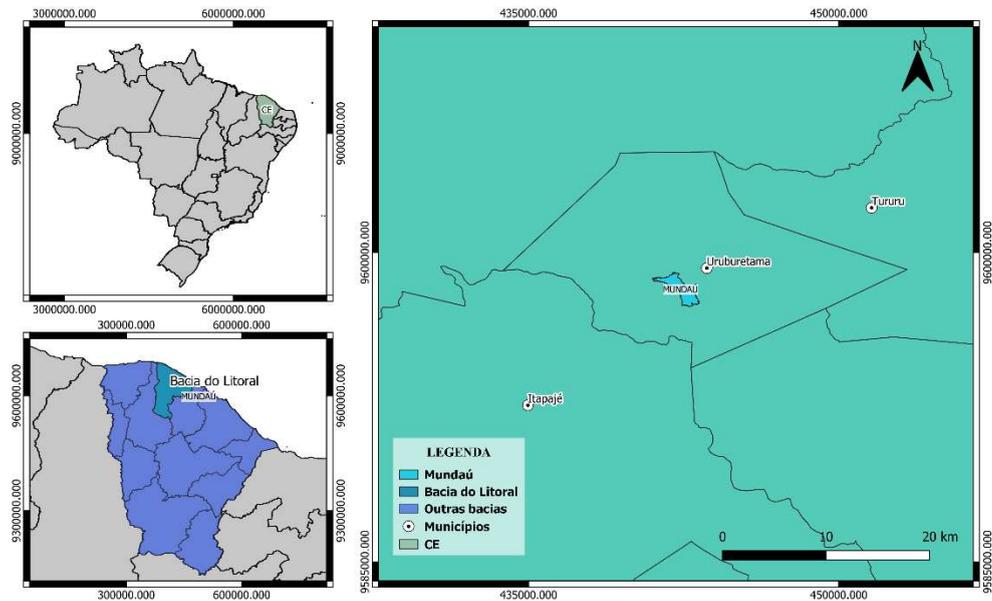


Fonte: Araújo (1990)

4.1.6. Barragem Mundaú

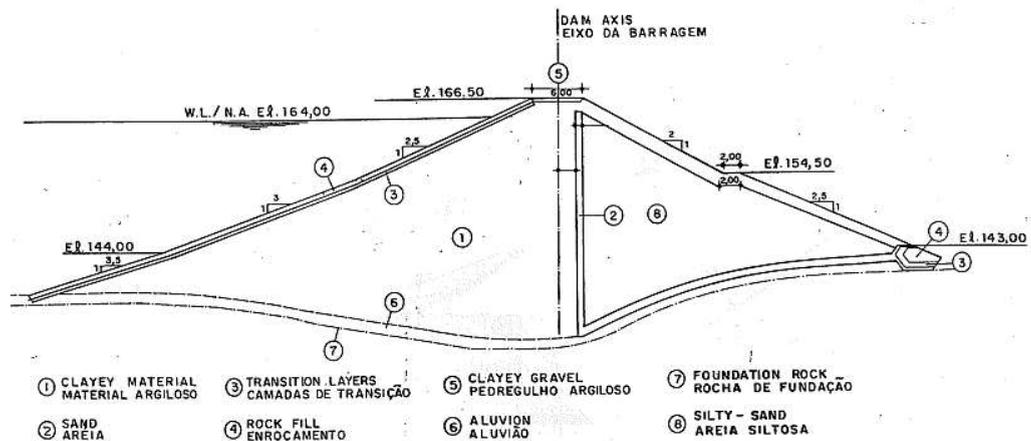
A Barragem Mundaú localiza-se no município de Uruburetama/CE (Figura 20). O local do barramento foi escolhido buscando-se que o boqueirão da estrutura preserve a bacia de irrigação, que se expande a jusante do município de Uruburetama. Ademais, essa escolha foi feita de modo que nenhuma rodovia ou estrada existente fosse inundada por conta da construção da barragem. O reservatório da barragem possui capacidade em torno de $21,308 \times 10^6 \text{ m}^3$, com um nível d'água máximo de 165,00 m. A Barragem Mundaú é uma estrutura de terra homogênea, de material areno-argiloso de baixa permeabilidade, além de possuir filtro vertical, tapete drenante e enrocamento de pé. (Araújo, 1990). Na Figura 21 se tem a seção máxima do barramento.

Figura 20 - Mapa de localização do açude da Barragem Mundaú



Fonte: Autor (2023)

Figura 21 - Seção máxima da barragem Mundaú



Fonte: Araújo (1990)

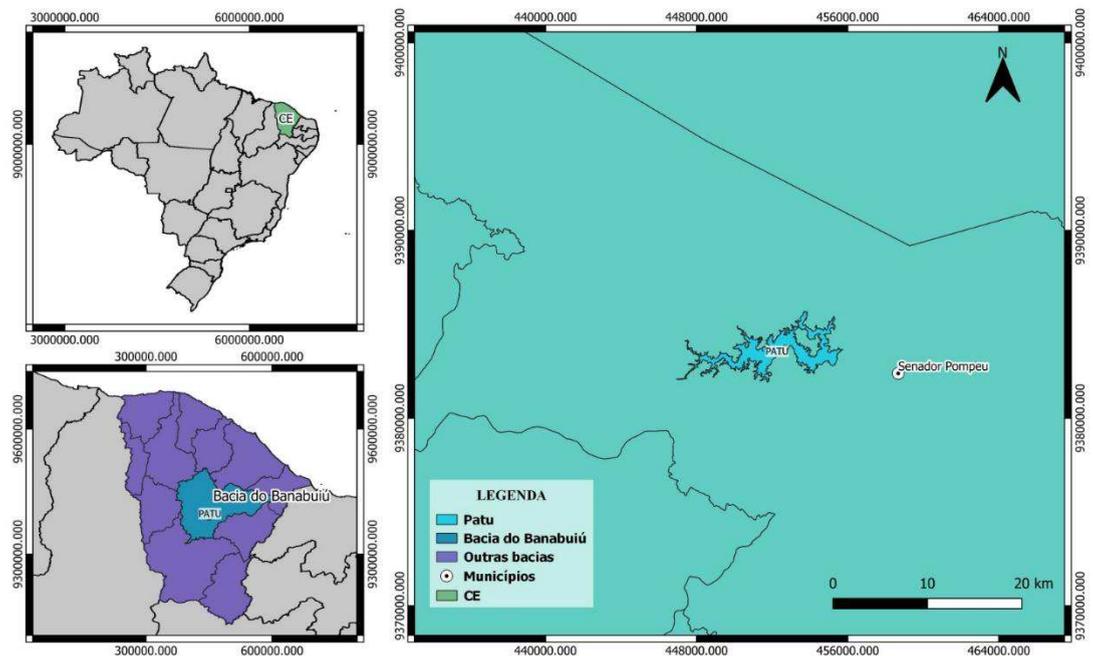
4.1.7. Barragem do Orós

A barragem do Orós, encontra-se localizada no município de mesmo nome (Orós), no estado do Ceará. A sua bacia hidrográfica pertence ao grupo do Alto Jaguaribe (Figura 22). Suas principais finalidades são a perenização do rio Jaguaribe, a irrigação do baixo e médio Jaguaribe, a piscicultura, o aproveitamento da água para culturas agrícolas de áreas de montante,

4.1.8. Barragem Patu

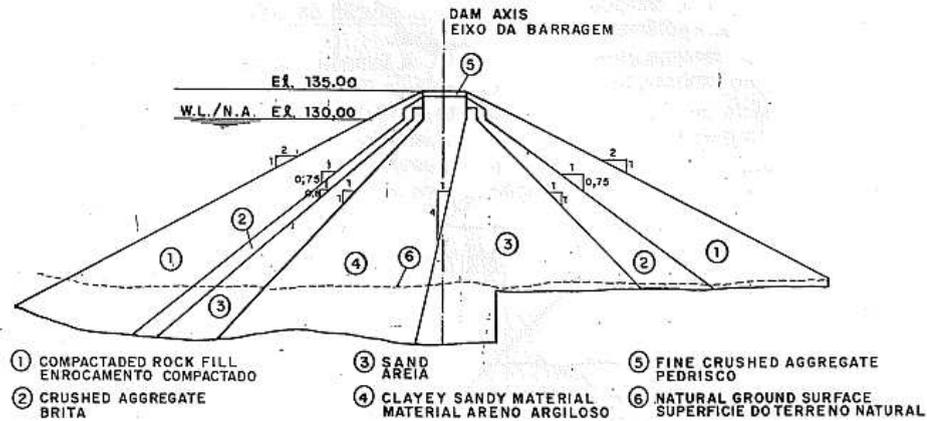
A Barragem Patu localiza-se no município de Senador Pompeu, no Ceará. Sua bacia hidrográfica faz parte do grupo Banabuiú (Figura 24). Possui como principais finalidades: o abastecimento de água da cidade de Senador Pompeu, reforço na regularização da vazão do rio Patu, piscicultura, e o aproveitamento das vazantes provenientes da formação do lago. O seu reservatório possui capacidade de armazenamento de $71,829 \times 10^6 \text{ m}^3$, com uma vazão regularizada de $1,64 \text{ m}^3/\text{s}$. A seção do maciço é do tipo terra/enrocamento, como um núcleo argiloso semi-inclinado para montante, seguido por zonas a montante e a jusante de areia, e logo após essas zonas por britas, por fim são colocados enrocamento constituído de pedras compactadas. Além disso, a estrutura possui um *cut-off* a montante da estrutura do barramento, chegando até o seu talude. (Araújo, 1990) Na Figura 25 encontra-se a seção máxima desse barramento.

Figura 24 - Mapa de localização do açude da Barragem Patu



Fonte: Autor (2023)

Figura 25 - Seção máxima da barragem Patu

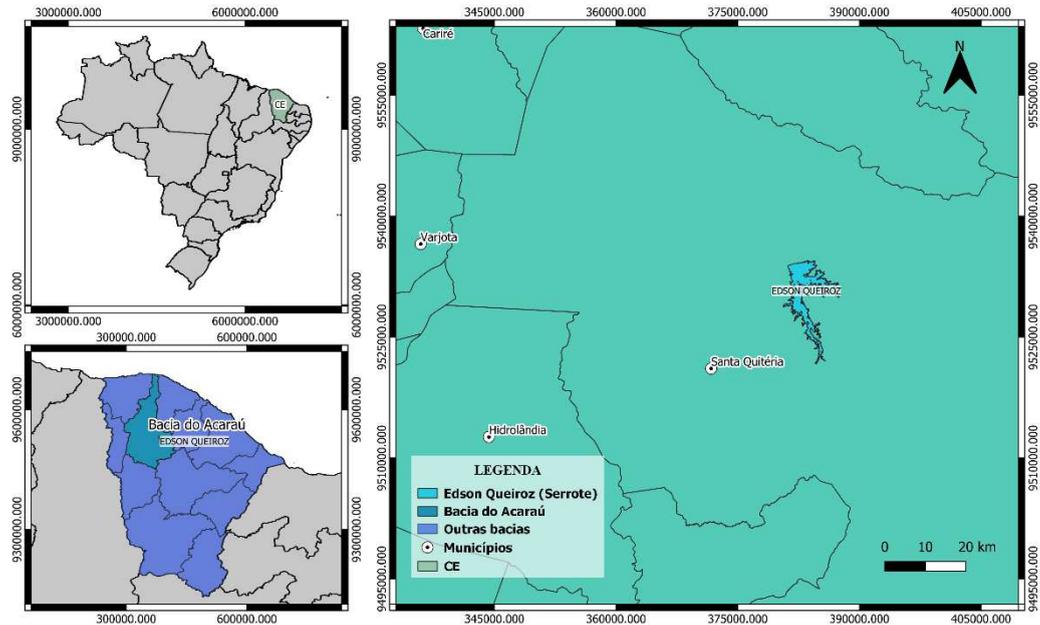


Fonte: Araújo (1990)

4.1.9. Barragem Serrote (Edson Queiroz)

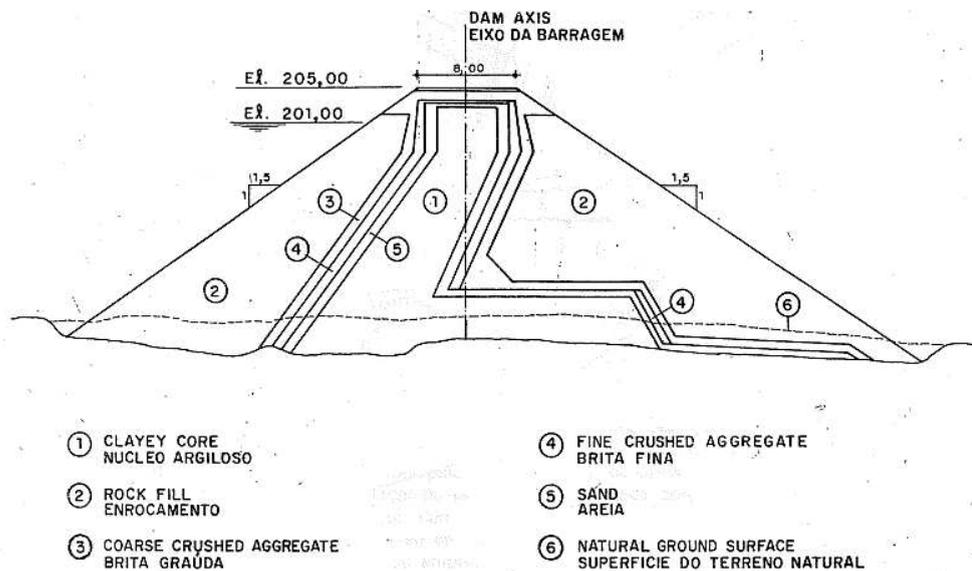
A Barragem Serrote, ou Edson Queiroz, encontra-se localizada no município de Santa Quitéria/CE, a sua bacia hidrográfica pertence ao grupo Bacia do Acaraú (Figura 26). Essa estrutura, é uma das barragens participantes do Plano Diretor de Desenvolvimento do Vale do Acaraú, que tem como finalidade complementar as disponibilidades hídricas do Sistema Araras para implementar uma rede de irrigação que chega até 30.000 há. Além disso, o barramento possui objetivos complementares, como, o controle da cheia do rio Acaraú, o abastecimento d'água ao complexo minero-industrial de urânio, a perenização do rio Acaraú, e a piscicultura. O reservatório formado pela Barragem Edson Queiroz possui um total de $250,5 \times 10^6$ m³ de água represada, com vazão regularizada de 2,46 m³/s. O seu maciço é composto por um núcleo impermeável inclinado para montante, com uma base alongada para jusante com um tapete impermeável. Esse núcleo é protegido por três camadas de transição até o enrocamento. (Araújo, 1990) Na Figura 27 é ilustrada a seção máxima do barramento.

Figura 26 - Mapa de localização do açude da barragem Edson Queiroz



Fonte: Autor (2023)

Figura 27 - Seção máxima da barragem Edson Queiroz



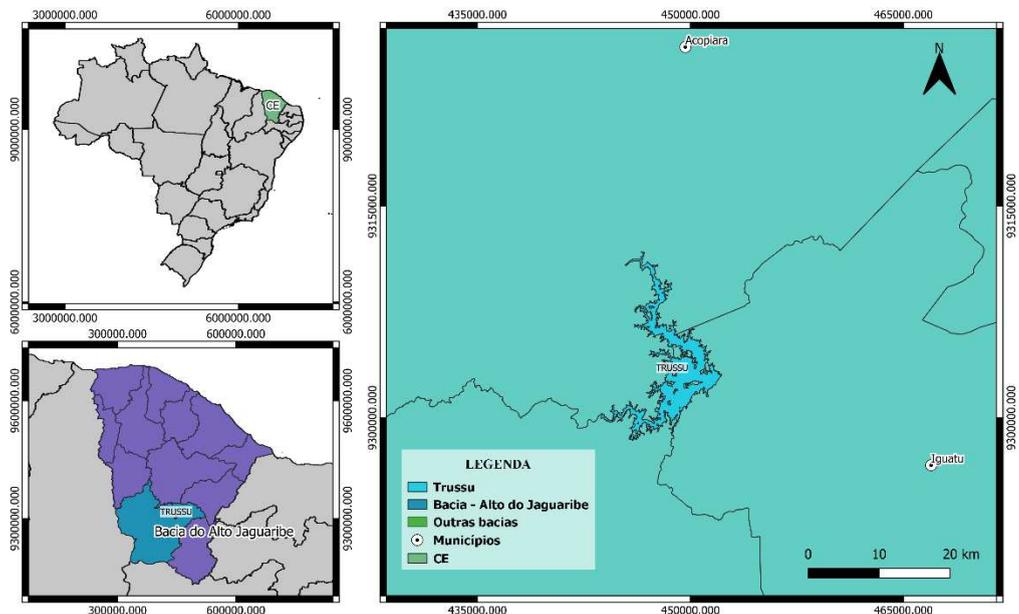
Fonte: Araújo (1990)

4.1.10. Barragem do Trussu

A barragem do Trussu está localizada a cerca de 3,5 km do distrito de Suassurana, na cidade do Iguatu, no estado do Ceará (Figura 28). O açude formado possui como principais objetivos, o aproveitamento hidroagrícola das várzeas do Iguatu, o abastecimento d'água a

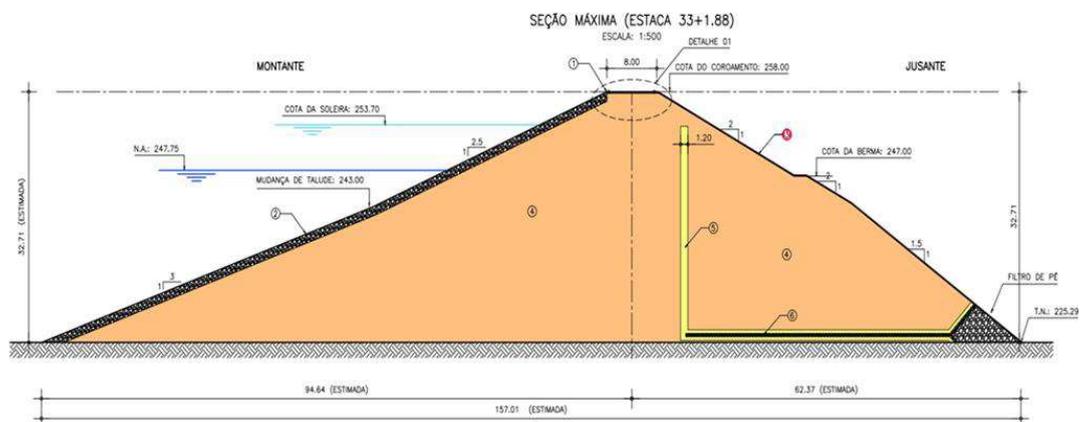
população ribeirinha, e a regularização do trecho de jusante. Esse açude apresenta capacidade de acumulação de $260 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água, e vazão regularizada de $45 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. A barragem principal possui uma estrutura em terra homogênea, formada por material sílico argiloso, possuindo altura máxima de 32,71 m e extensão do coroamento de 1201 m (Araújo, 2003). A seção máxima da barragem do Trussu é apresentada na Figura 29. Na seção representada não se confere a representação da fundação da barragem com trincheira compactada, no entanto sua existência é mostrada por Araújo (2003).

Figura 28 – Mapa de localização do açude da Barragem do Trussu



Fonte: Autor (2023)

Figura 29 – Seção máxima da Barragem do Trussu



Fonte: COGERH (2008)

4.2. Determinação dos parâmetros

Tendo em vista que as barragens analisadas nesse trabalho possuem composição e geometria variada, os materiais do barramento foram agrupados em categorias que apresentam características semelhantes. Com isso, as propriedades dos materiais desses grupos foram determinadas seguindo as recomendações da United States Bureau of Reclamation - USBR, para solos classificados pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos - SUCS, apresentados por Vieira *et al.* (1996). Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades dos materiais que compõem os barramentos analisados nesse estudo.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais que compõem os barramentos analisados

Nº do Material	Descrição	Condutividade hidráulica - k (m/s)	Porosidade	Peso específico seco (kN/m ³)
Material 1	Areia	1.00E-05	0.27	18.64
Material 2	Areia argilosa	3.00E-09	0.32	18.05
Material 3	Areia argilosa/ areia siltosa	3.00E-09	0.29	18.64
Material 4	Areia com alguns pedregulhos	1.00E-05	0.27	18.64
Material 5	Areia grossa/ Tubos drenantes	1.00E-05	0.27	18.64
Material 6	Areia siltosa	7.50E-08	0.32	17.85
Material 7	Argila	8.00E-10	0.36	16.97
Material 8	Argila, silte e areia	3.00E-09	0.32	18.05
Material 9	Brita	1.00E-05	0.33	17.27
Material 10	Concreto	1.00E-15	0.09	19.62
Material 11	Enrocamento/dreno de pé	2.70E-04	0.27	18.64
Material 12	Fundação - aluvião	1.00E-05	0.33	17.27
Material 13	Pedregulho argiloso	3.00E-09	0.32	18.05
Material 14	Randon	2.70E-04	0.27	18.64

Nº do Material	Descrição	Condutividade hidráulica - k (m/s)	Porosidade	Peso específico seco (kN/m³)
Material 15	Rip-rap (montante)	2.70E-04	0.27	18.64
Material 16	Silte	5.90E-09	0.39	16.19
Material 17	Silte-argiloso, com areia e pedregulho	1.30E-09	0.51	12.85
Material 18	Transição (entre areia e pedregulho)	1.40E-04	0.27	18.64

Fonte: Autor (2023)

4.3. Determinação dos módulos de elasticidade

Levando em consideração a variabilidade dos materiais dos barramentos analisados nesse estudo, os mesmos foram agrupados para a determinação dos valores de módulo de elasticidade. Esses módulos foram obtidos a partir de valores padrões mostrados por Briaud (2013), em função do tipo de solo. Com os valores obtidos, foi possível simular os ensaios de adensamento duplo (parâmetro de deformabilidade de entrada do UNSTRUCT). Considerou-se uma variação de 30% a 50% do módulo de elasticidade entre o material seco e o material após o umedecimento. No Apêndice – Simulação Ensaio de Adensamento Duplo, têm-se os gráficos dos ensaios simulados nesse trabalho. Na Tabela 2 são apresentados os valores de módulo de elasticidade dos grupos de materiais dos barramentos analisados.

Tabela 2 – Módulos de elasticidade estimado dos materiais que compõem as barragens analisadas

Material	Descrição	Módulo de elasticidade - E(Mpa)
Material 1	Aluvião	40
Material 2	Concreto	28000
Material 3	Material com características arenosas	65
Material 4	Material com características arenosas e siltosas	40
Material 5	Material com características argilosas	75
Material 6	Material com características argilosas e arenosas	75
Material 7	Material com características argilosas, arenosas e pedregulhosas	70

Material	Descrição	Módulo de elasticidade - E(Mpa)
Material 8	Material com características argilosas, arenosas e siltosas	50
Material 9	Material com características argilosas e pedregulhosas	90
Material 10	Material com características pedregulhosas	90
Material 11	Material com características siltosas	12.5
Material 12	Material com características siltosas, argilosas, com areia e pedregulhos	40

Fonte: Autor (2023)

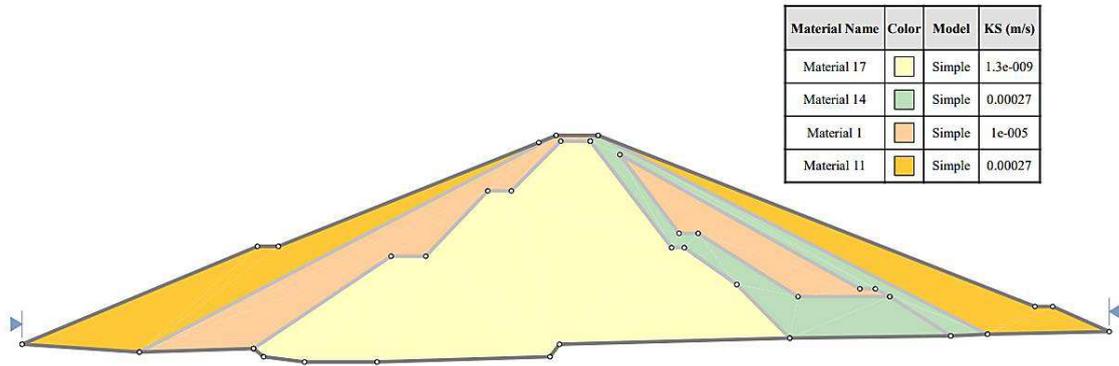
4.4. Cenários analisados

Nesse trabalho, foram estudados diferentes cenários para a análise do fissuramento nos barramentos, em função da variação de rigidez. A consideração das mudanças de rigidez nos materiais foi feita a partir das observações das situações de umedecimento dos elementos do barramento, devido ao enchimento do reservatório ou a elevação do nível d'água, a presença de dispositivos de drenagem, aos materiais utilizados para composição do barramento e tipo de seção transversal utilizada. Nos tópicos a seguir, são descritos os cenários empregados para a análise do fissuramento nas barragens estudadas. Ressalta-se que os valores iniciais de poropressão foram estimados

4.4.1. Barragem Arrojado Lisboa

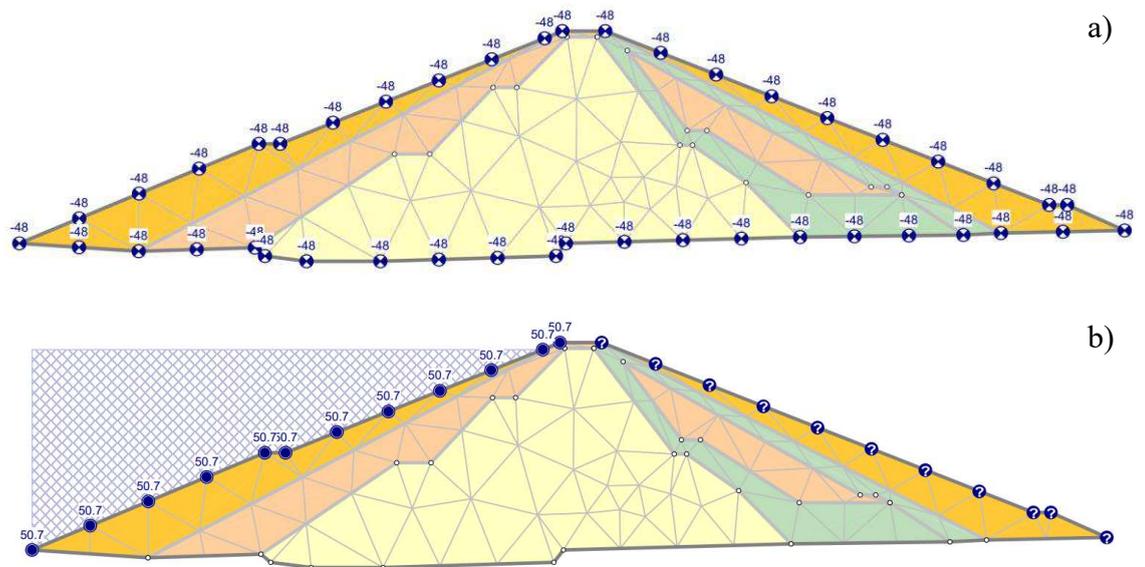
A barragem Arrojado Lisboa (Banabuiú) consiste em uma barragem zoneada com um núcleo impermeável (Figura 30). Para a análise do fissuramento, tendo em vista que o material central (núcleo argiloso) apresenta maior deformabilidade em relação aos demais componentes, considerou-se a variação de rigidez do seu núcleo devido ao umedecimento provocado pelo enchimento do barramento. Na Figura 31 - a e b são apresentados os dois estágios, modelados com o SLIDE 6.0, utilizados para a realização dessa análise: a situação inicial, com a barragem após a finalização da construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto.

Figura 30 - Seção transversal da barragem Arrojado Lisboa



Fonte: Autor (2023)

Figura 31 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório



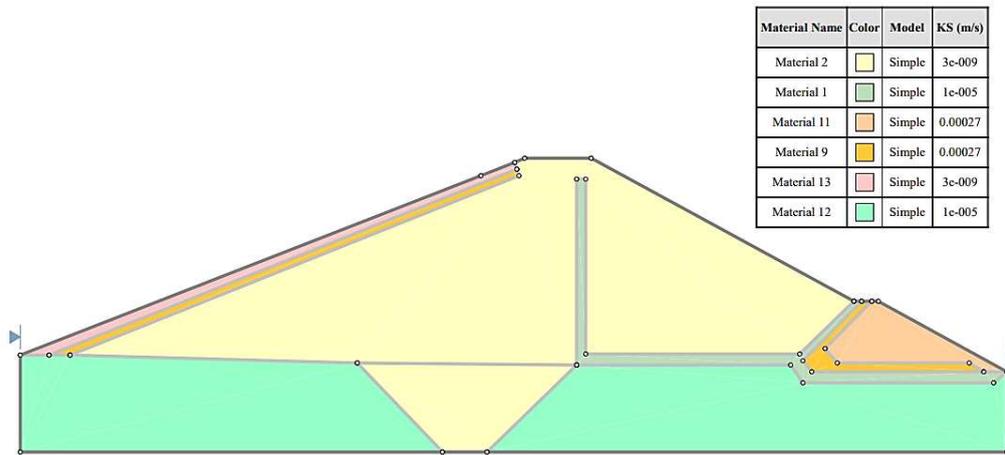
Fonte: Autor (2023)

4.4.2. Barragem Favelas

A barragem Favelas trata-se de uma barragem homogênea com dispositivo de drenagem (Figura 32). Para a análise de fissuramento dessa estrutura, considerou-se que o material predominante em sua estrutura, solo coesivo, apresenta maior deformabilidade do que os outros componentes do barramento. Logo, contemplou-se na análise realizada a variação de rigidez do material sílico-argiloso devido ao umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório do barramento. Na Figura 33 – a e b são mostrados os dois estágios, modelados

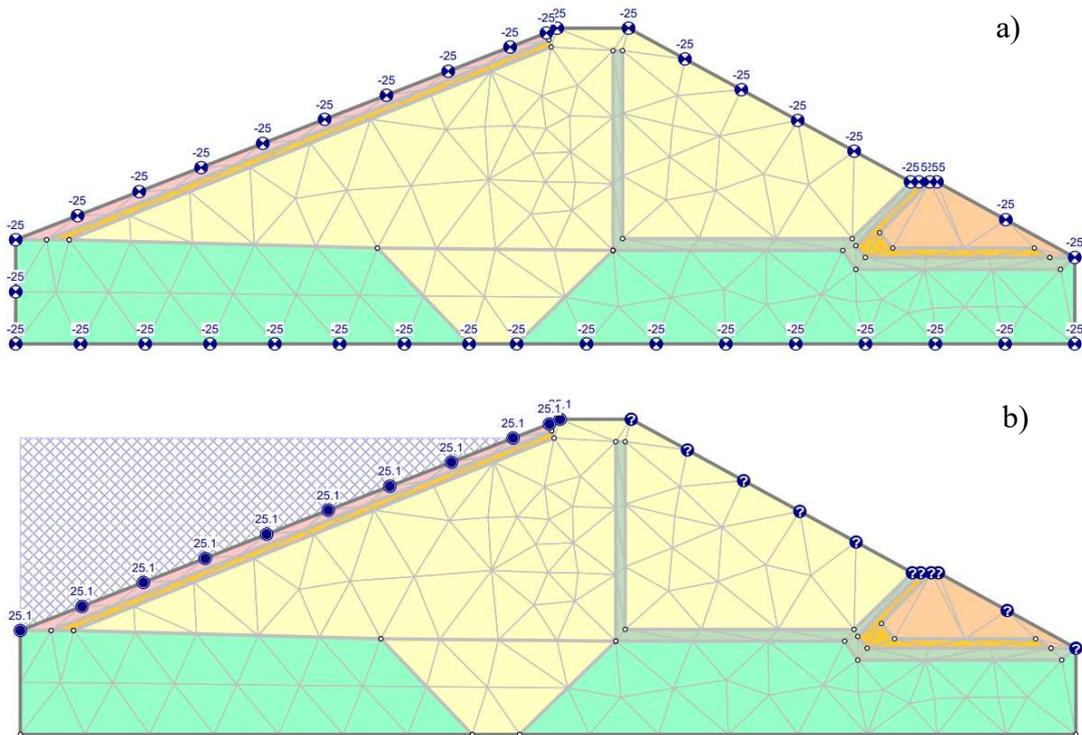
com o SLIDE 6.0, usados para a realização dessa análise: a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto.

Figura 32 – Seção transversal da Barragem Favelas



Fonte: Autor (2023)

Figura 33 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório

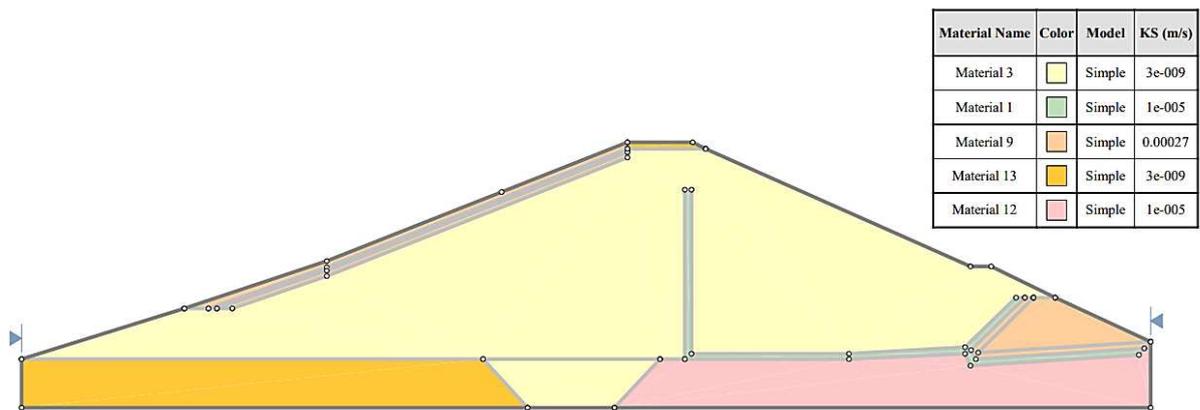


Fonte: Autor (2023)

4.4.3. Barragem Frios

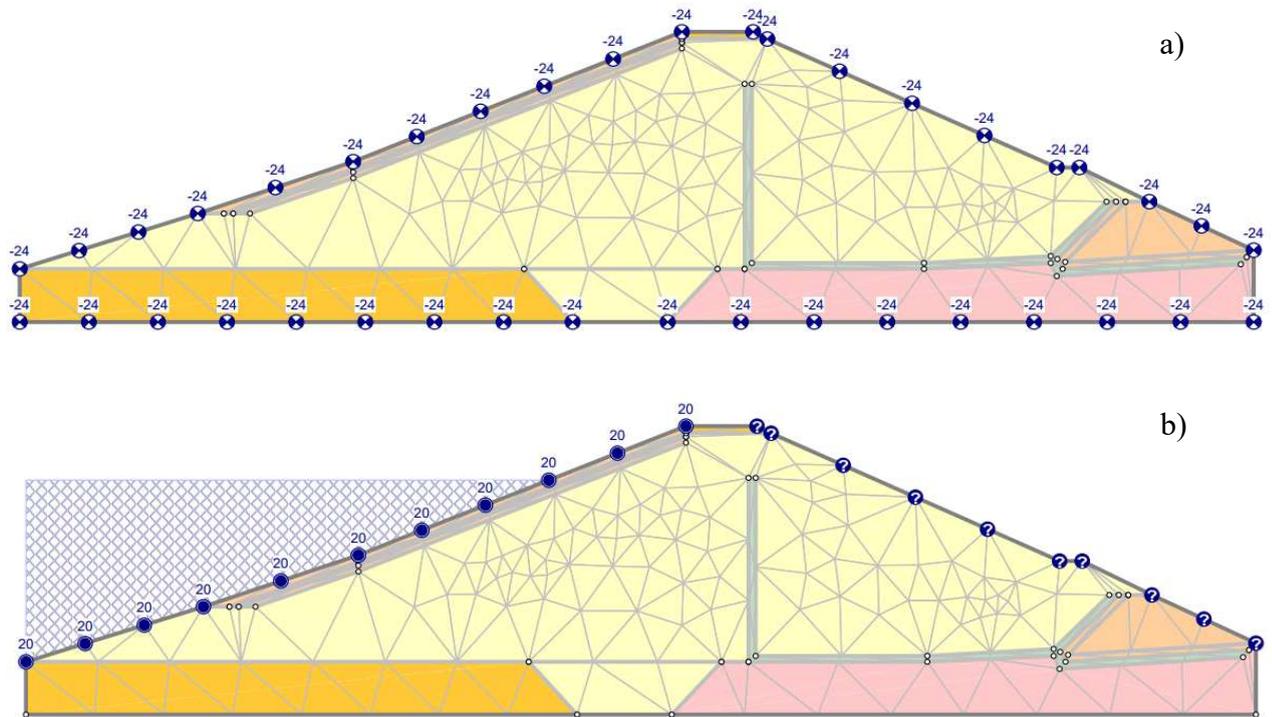
A barragem Frios é uma barragem de terra homogênea, com dispositivo de drenagem, com a fundação formada por três tipos diferentes de materiais (Figura 34). Para a análise do fissuramento nessa estrutura, considerou-se que o seu núcleo, formado por solo com características predominantemente argilosas, apresenta maior deformabilidade do que os outros componentes do barramento. Logo, contemplou-se na análise a variação da rigidez no corpo do barramento, a partir do enchimento do reservatório da estrutura. Nas Figuras 35 – a e b observa-se os dois estágios, modelados com o SLIDE 6.0, utilizados para realização dessa análise: a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto.

Figura 34 – Seção transversal da barragem Frios



Fonte: Autor (2023)

Figura 35 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório

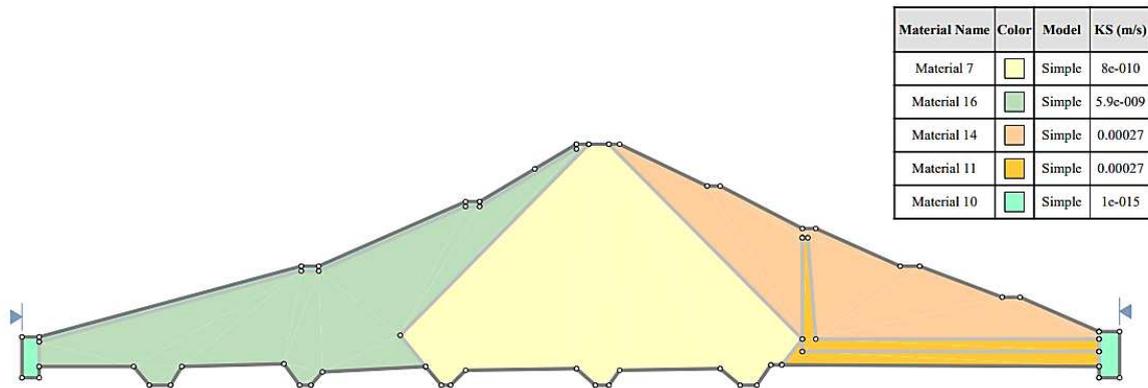


Fonte: Autor (2023)

4.4.4. Barragem General Sampaio

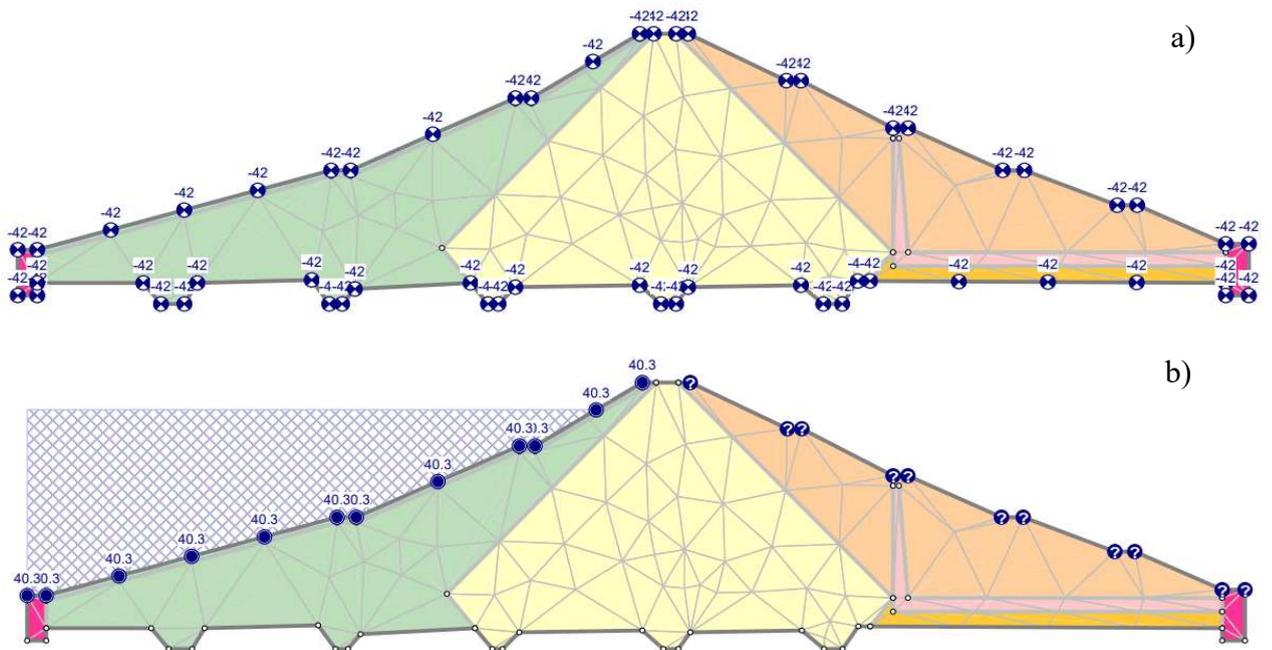
A barragem General Sampaio é uma barragem zoneada, possuindo material argiloso compondo o núcleo, material siltoso a montante, e material granular a jusante (Figura 36). Para realização da análise de fissuramento a partir das variações de rigidez dos materiais, considerou-se que o material de montante (siltoso), por possuir maior deformabilidade, apresenta maior susceptibilidade as mudanças de rigidez. Para esse caso, as variações de rigidez, foram também consideradas a partir do enchimento do reservatório do barramento. Nas Figuras 37 - a e b são mostrados os dois estágios, modelados com o SLIDE 6.0, usados para realizar essa análise: a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto.

Figura 36 - Seção transversal da barragem General Sampaio



Fonte: Autor (2023)

Figura 37 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório



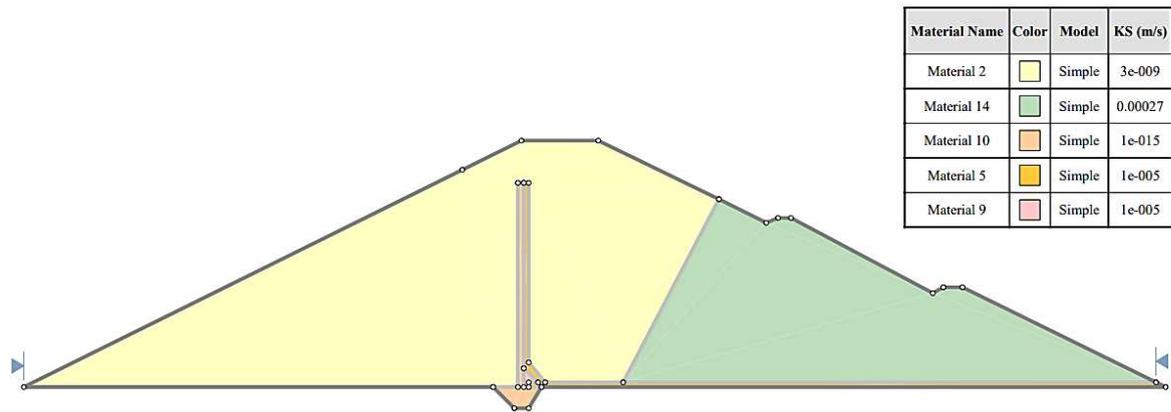
Fonte: Autor (2023)

4.4.5. Barragem Lima Campos

A barragem Lima Campos é uma estrutura composta por uma parte de material argiloso, e outra com material granular, possuindo também um sistema de drenagem e uma parede de concreto central (Figura 38). Nesse barramento, considerou-se a variação de rigidez predominantemente no material de montante, tendo em vista que é o que apresenta maior

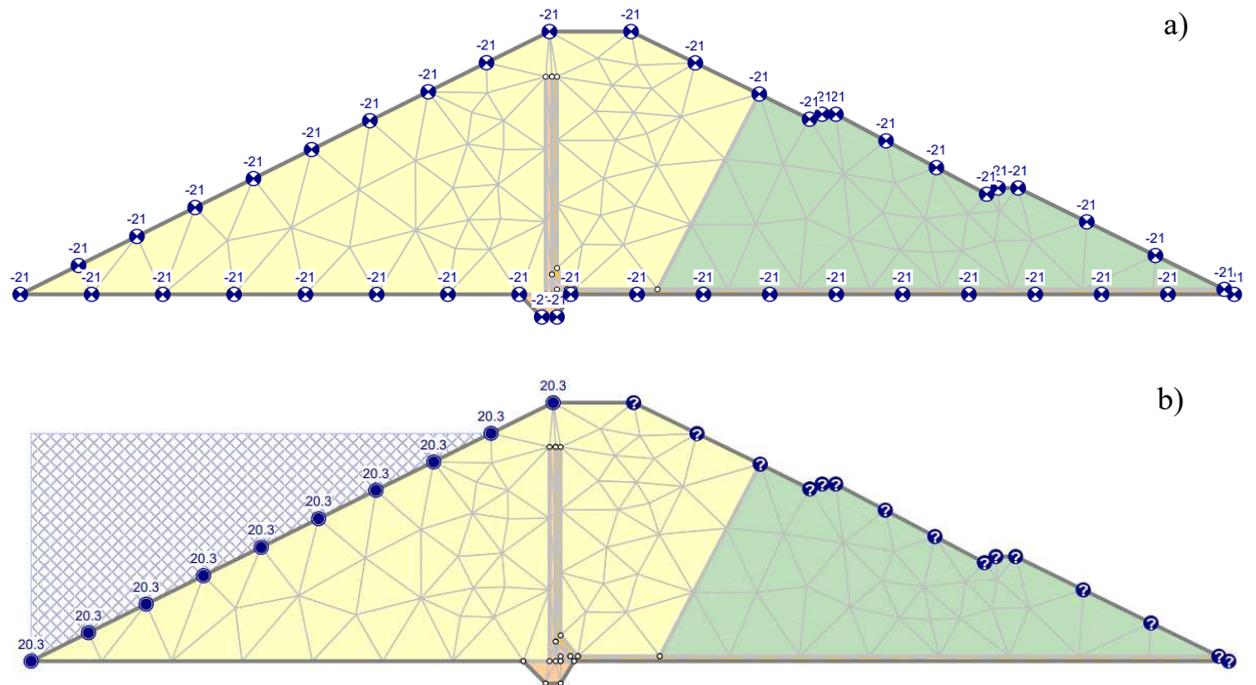
deformabilidade. Logo, para contemplar essa variação de rigidez, considerou-se os efeitos produzidos a partir do enchimento do reservatório, utilizando-se dois estágios: a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto. Nas Figuras 39 – a e b observa-se os dois estágios utilizados, modelados com o SLIDE 6.0 .

Figura 38 - Seção transversal da barragem Lima Campos



Fonte: Autor (2023)

Figura 39 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório

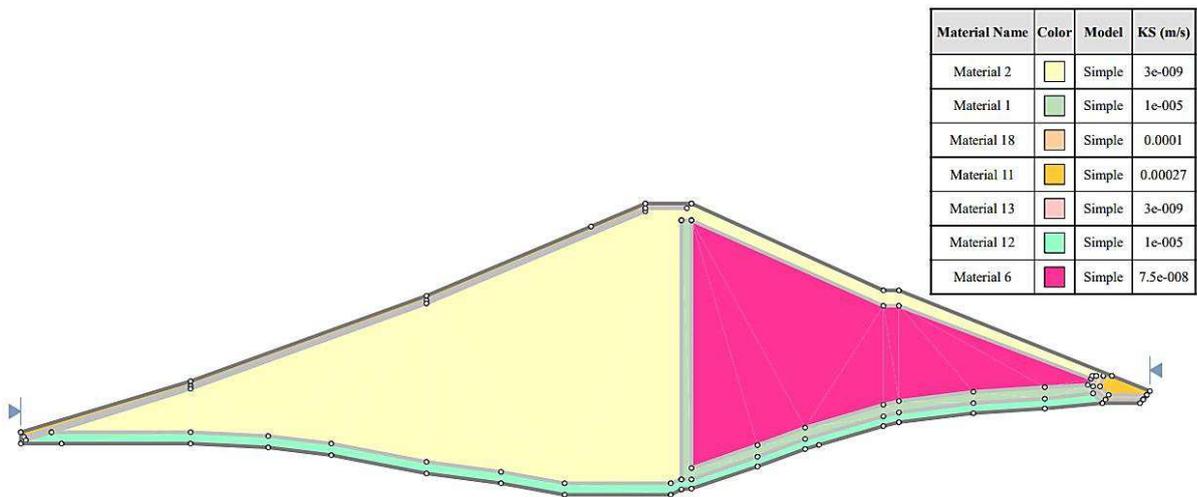


Fonte: Autor (2023)

4.4.6. Barragem Mundaú

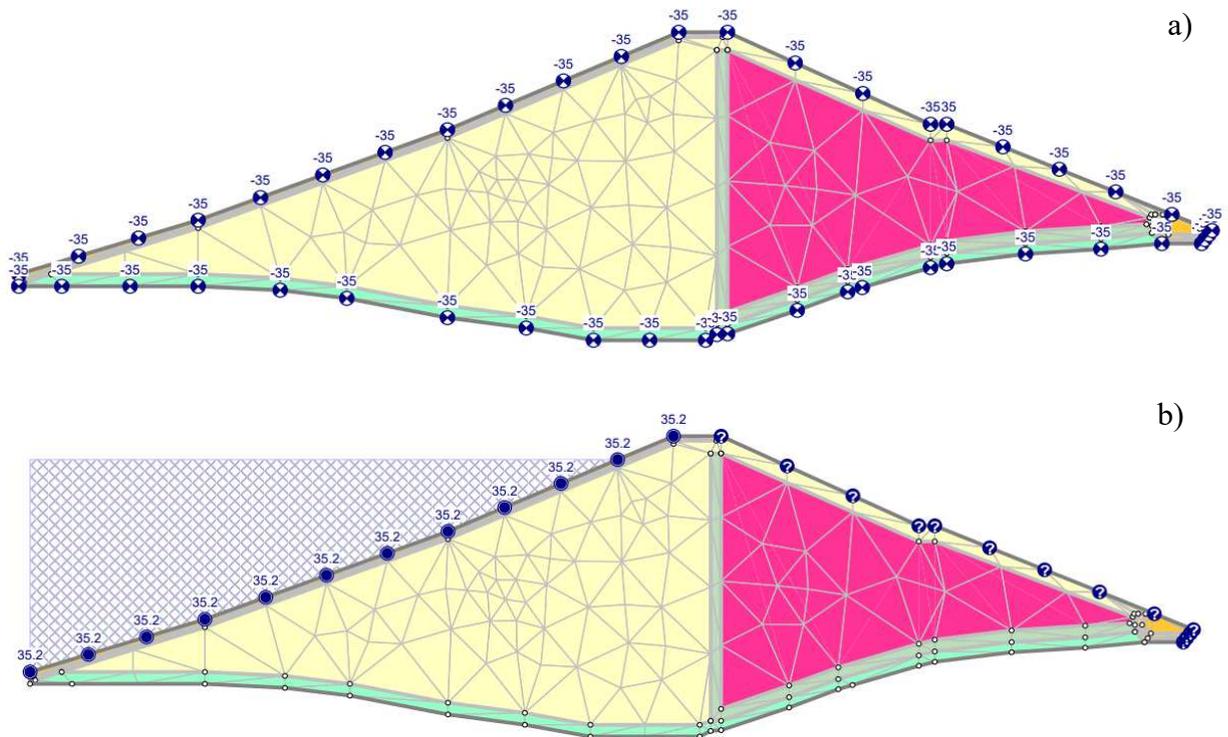
A barragem Mundaú é composta por uma seção zoneada, com a parte de montante possuindo um material com características coesivas, e com o espaldar de jusante com características arenosas e siltosas, além de possuir elementos de drenagem (Figura 40). Para a análise do fissuramento, considerou-se que o material de montante, por se tratar de um solo mais deformável, apresenta maior susceptibilidade as variações de umedecimento, e, portanto, apresenta mudanças consideráveis de rigidez. Logo, para contemplar as variações de rigidez, considerou-se as mudanças provocadas pelo enchimento do reservatório da barragem. Para isso, usou-se dois cenários de análise, modelados com o SLIDE 6.0 : a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto, conforme Figuras 41 – a e b.

Figura 40 - Seção transversal da barragem Mundaú



Fonte: Autor (2023)

Figura 41 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório

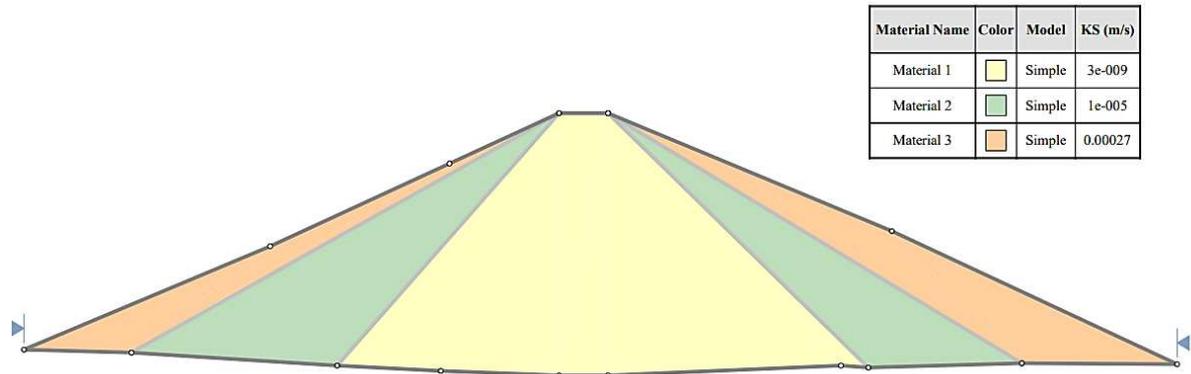


Fonte: Autor (2023)

4.4.7. Barragem Orós

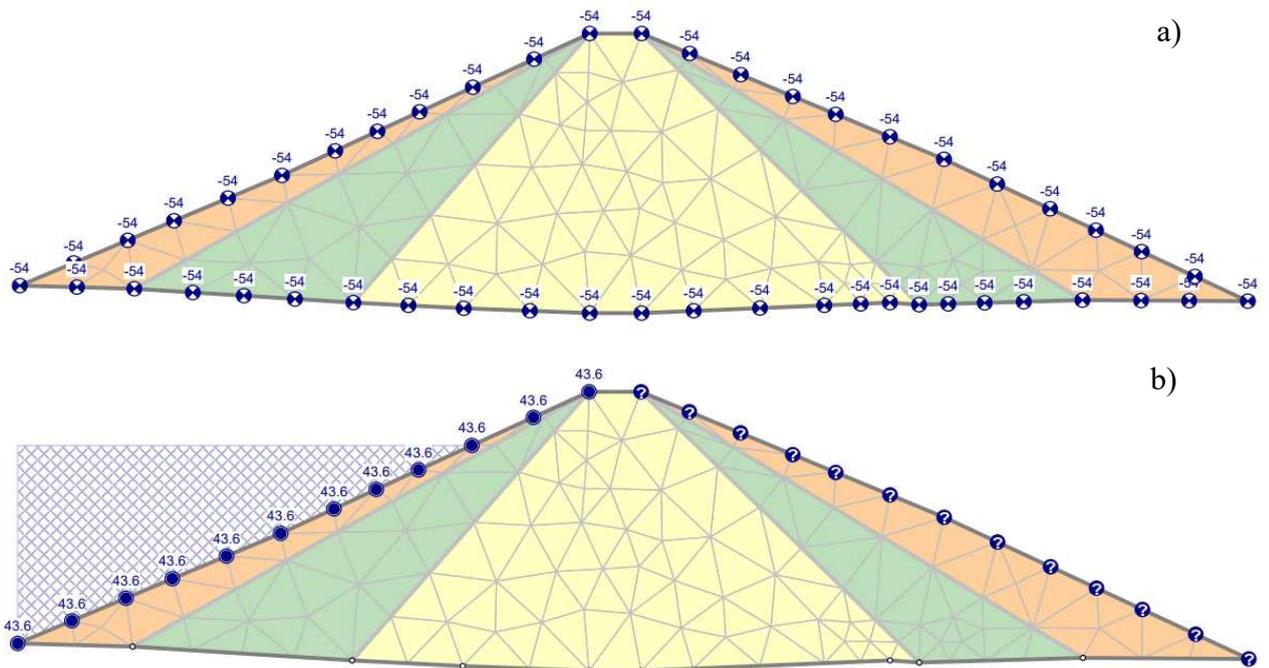
A barragem do Orós é uma barragem de enrocamento, composta por materiais mais permeáveis nas extremidades, materiais com permeabilidade intermediária nos espaldares intermediários e núcleo impermeável (Figura 42). Para a análise do fissuramento nesse barramento, considerou-se que o material central (núcleo) por ser coesivo, e apresentar maior deformabilidade, manifesta variação de rigidez considerável frente as mudanças de umedecimento do maciço. Para isso, avaliou-se o comportamento do maciço devido ao enchimento do reservatório da barragem, com a utilização de dois cenários, modelados com o SLIDE 6.0 : a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto, conforme Figuras 43 - a e b.

Figura 42 - Seção transversal da barragem Orós



Fonte: Autor (2023)

Figura 43 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório



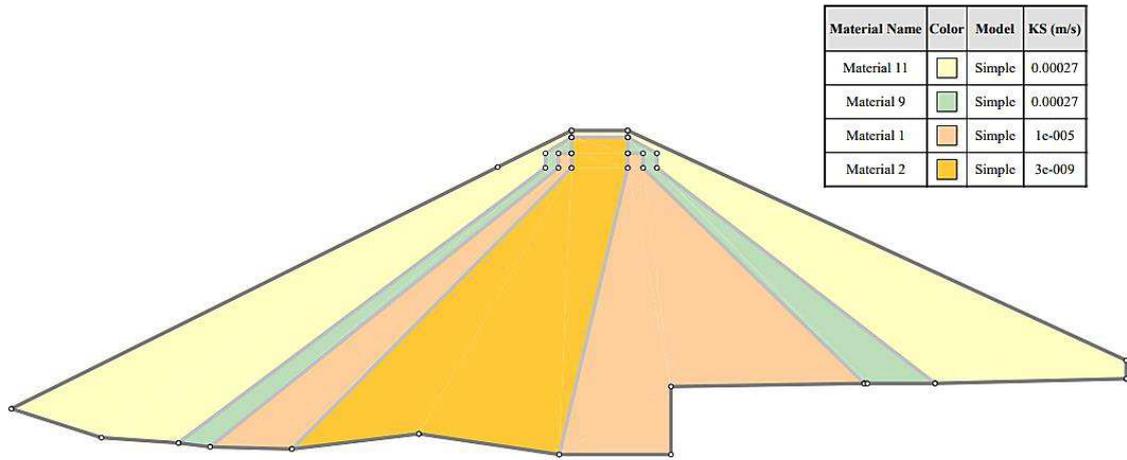
Fonte: Autor (2023)

4.4.8. Barragem Patu

A barragem do Patu também possui uma estrutura em enrocamento, com os enrocamentos externos mais permeáveis que os enrocamentos internos, possuindo um núcleo de material impermeável (Figura 44). Para a análise do fissuramento, considerou-se que os enrocamentos externos apresentavam maior variação de rigidez, devido ao umedecimento

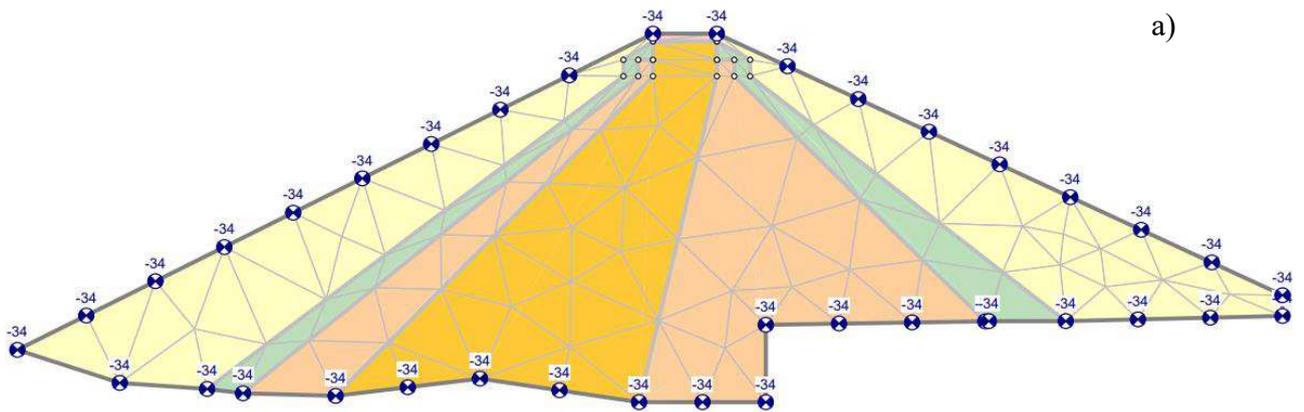
provocado pelo enchimento do reservatório. Logo, foram utilizados dois estágios, modelados com o SLIDE 6.0, para realização dessa análise: a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto, conforme Figuras 45 - a e b.

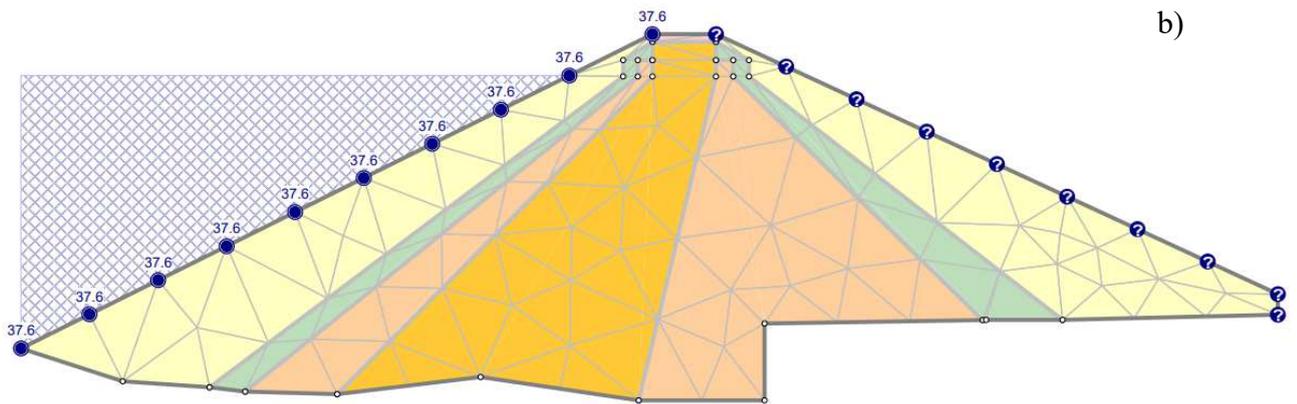
Figura 44 - Seção transversal da barragem Patu



Fonte: Autor (2023)

Figura 45 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório



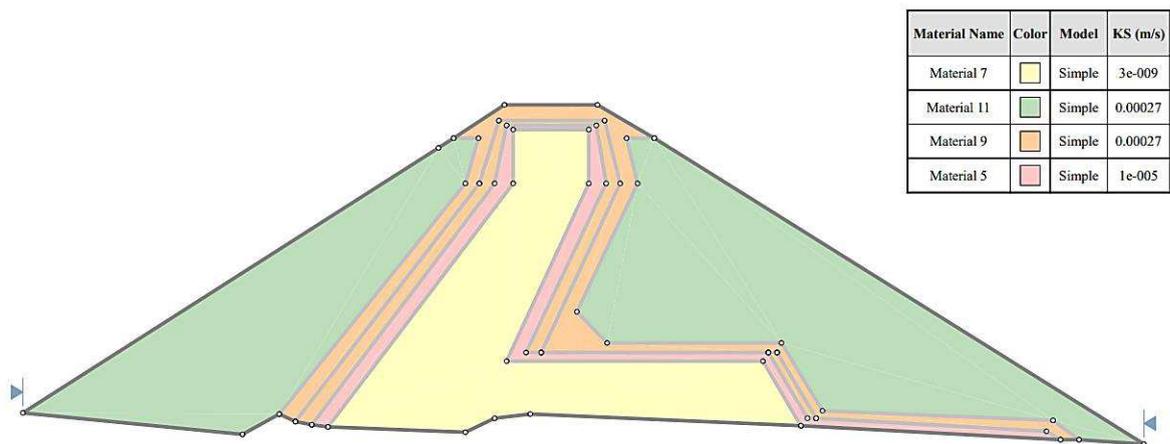


Fonte: Autor (2023)

4.4.9. Barragem Edson Queiroz (Serrote)

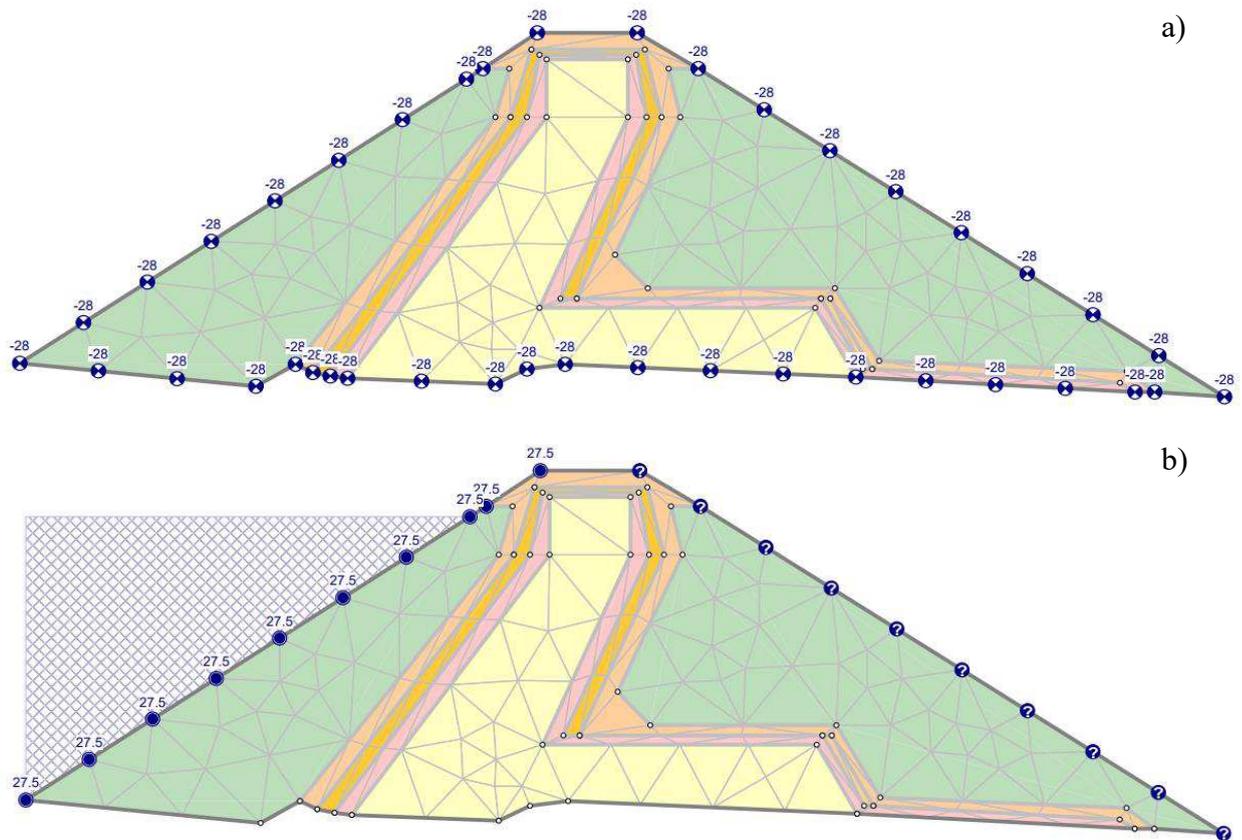
A barragem Edson Queiroz (Serrote), apresenta estrutura em enrocamento, com materiais de transição entre o núcleo e o enrocamento (Figura 46). Para análise do fissuramento, considerou-se que o seu núcleo, composto por material coesivo, por ser mais deformável, apresenta maior variação de rigidez devido ao umedecimento do maciço provocado pelo enchimento do reservatório. Logo, para contemplar essa situação, utilizou-se dois cenários, modelados com o SLIDE 6.0: a situação inicial, com a barragem após o término de sua construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto, conforme Figuras 47 - a e b.

Figura 46 - Seção transversal da barragem Edson Queiroz



Fonte: Autor (2023)

Figura 47 – a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório

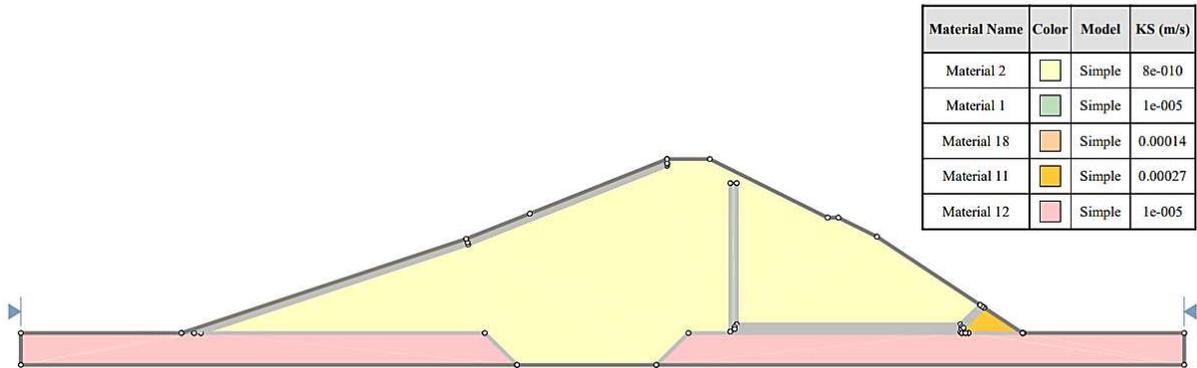


Fonte: Autor (2023)

4.4.10. Barragem Trussu

A barragem do Trussu é uma estrutura de terra homogênea possuindo um sistema de drenagem interno (Figura 48). Para a análise do fissuramento nesse barramento, considerou-se duas situações, modeladas com o SLIDE 6.0: na primeira, o material de fundação denominado aluvião, foi considerado o mais suscetível à variação de rigidez provocada pelo umedimento, tendo em vista que esse material é bastante deformável. Na segunda situação, o material do barramento, argiloso, por ser bastante deformável, foi considerado o mais susceptível as variações de rigidez pelo umedecimento.

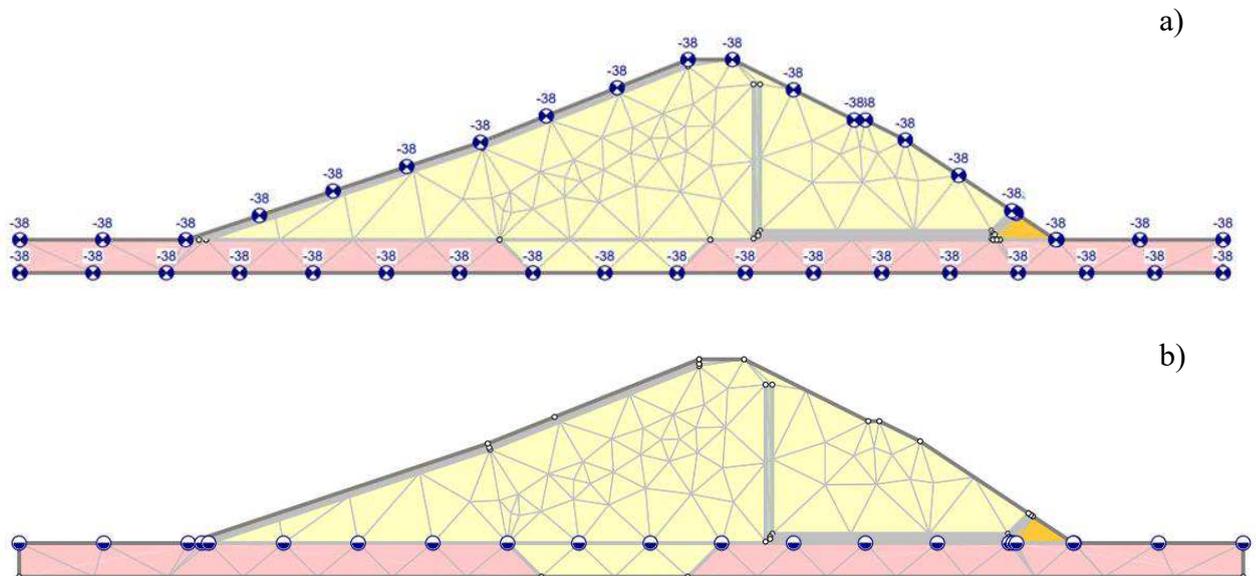
Figura 48 - Seção transversal da barragem Trussu



Fonte: Autor (2023)

Para contemplar a primeira situação, considerou-se o umedecimento da fundação do barramento devido a elevação do nível d'água. Para isso, foram utilizados dois estágios: a situação inicial, com a barragem após a finalização da construção, e a situação final com a elevação do nível d'água até a base do maciço (Figura 49 – a e b).

Figura 49 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após a elevação do nível d'água na fundação

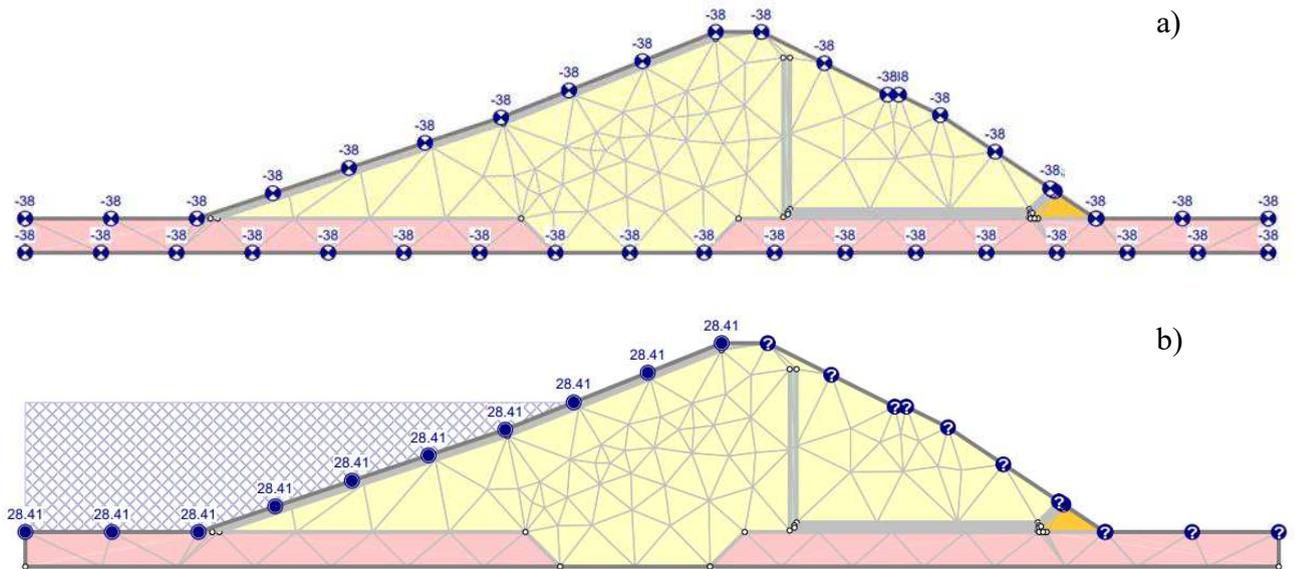


Fonte: Autor (2023)

Para contemplar a segunda situação, considerou-se o umedecimento do maciço devido o enchimento do reservatório. Para isso, foram utilizados dois estágios: a situação inicial,

com a barragem após a finalização da construção, e a situação final contemplando o enchimento do reservatório até o nível máximo de cheia de projeto (Figura 50 - a e b).

Figura 50 - a) Estágio inicial: barragem após a finalização da construção; b) Estágio final: barragem após o enchimento do reservatório



Fonte: Autor (2023)

4.5. Resumo e notas conclusivas

Nesse capítulo foi apresentada a metodologia utilizada nesse trabalho para avaliação das possíveis zonas de formação de fissuras em barragens do Ceará. Primeiramente, as barragens analisadas foram apresentadas, mostrando a variedade de seções transversais utilizadas para construção de barramentos no estado do Ceará.

Logo após, descreveu-se como os parâmetros hidráulicos, físicos e mecânicos dos barramentos foram determinados, tendo em vista que não foram realizados ensaios laboratoriais para o desenvolvimento desse estudo. Os parâmetros físicos e hidráulicos foram obtidos a partir das recomendações da USBR, em função da classificação dos materiais pelo SUCS. Já os parâmetros mecânicos (ensaio de adensamento duplo), foram obtidos a partir de simulações desse ensaio, utilizando os valores de módulo de elasticidade padrões apresentados por Briaud (2013).

Por fim, foi abordado como as variações de rigidez foram consideradas nesse trabalho: devido a mudanças de umedecimento no maciço e na fundação devido ao enchimento

do reservatório da barragem e de elevação do nível d'água na fundação. Destaca-se que para cada barramento estudado considerou-se que as mudanças de rigidez eram mais susceptíveis nos materiais mais deformáveis.

No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos nesse estudo, são mostrados como a distribuição de poropressões e a variação de deformações ocasionam os diferentes tipos de fissuramento nas barragens de terra homogêneas e zoneadas. Além disso, demonstra-se como o funcionamento do sistema de drenagem, e variação de permeabilidade entre os materiais de uma seção zoneada contribuem para o processo de formação de trincas.

5 ESTUDO DO FISSURAMENTO EM BARRAGENS DO CEARÁ

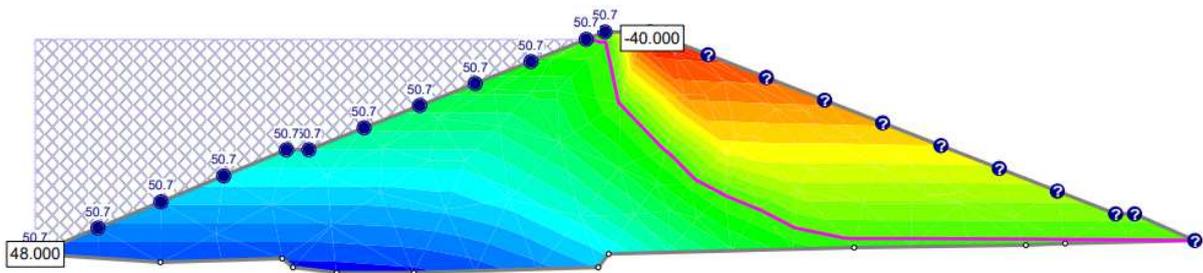
As barragens estudadas tiveram o seu fissuramento previsto a partir da análise do fluxo pelo programa SLIDE 6.0, e do estado tensão x deformação obtido por meio da utilização do UNSTRUCT. Nos tópicos seguintes são apresentadas considerações sobre essas análises, além de discorrer a respeito das relações entre as mudanças de estado tensão x deformação provocadas pelas variações de rigidez dos materiais, e a conseqüente geração de fissuras.

5.1. Barragem Arrojado Lisboa

5.1.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

Para a análise de fluxo da barragem Arrojado Lisboa, considerou-se o cenário avaliado nesse trabalho (variação de umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório e pela percolação no maciço). Na Figura 51 é possível observar a distribuição de poropressões devido o enchimento do reservatório do barramento.

Figura 51 – Distribuição de poropressões após o enchimento do reservatório da barragem Banabuiú até a cota da soleira



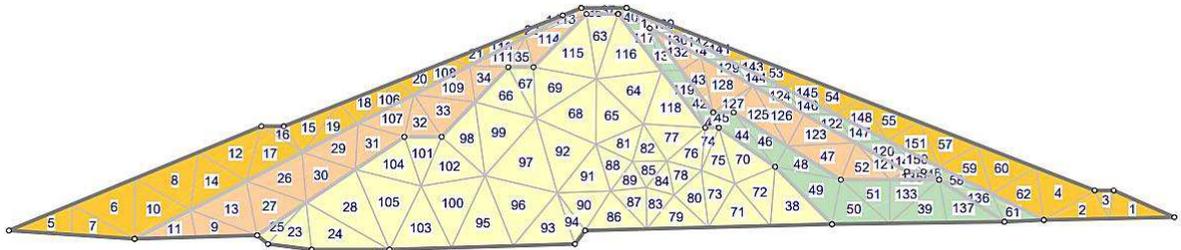
Fonte: Autor (2023)

Analisando a Figura 51, observa-se que a partir do enchimento do reservatório, ocorre o umedecimento dos materiais que se encontram na parte de montante do barramento, aumentando os valores de poropressões nessa parte do maciço, enquanto que a parte à jusante continua com valores próximos aos iniciais, fato explicado pelo uso de materiais mais permeáveis nas extremidades da estrutura. Essa variação de poropressões provoca a variação de rigidez do material umedecido.

5.1.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

A partir do estudo do fluxo do barramento no SLIDE 6.0, considerando-se as variações de rigidez dos materiais umedecidos (materiais mais deformáveis apresentando maiores variações de rigidez em função das mudanças de umidade), para o cenário avaliado, foi feito o estudo do fissuramento na barragem Arrojado Lisboa. A malha de elementos finitos definida no SLIDE 6.0 utilizada para esse estudo é mostrada na Figura 52.

Figura 52 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Arrojado Lisboa

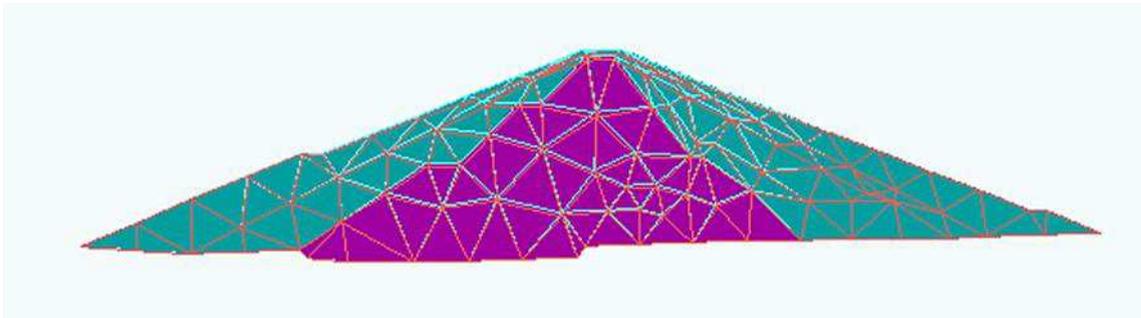


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 52, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Arrojado Lisboa possui 151 elementos triangulares de três nós, com um total de 98 nós, que foram definidos em função das limitações do programa UNSTRUCT, que apresenta um número máximo de elementos e nós a serem inseridos. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Para essa situação, observa-se uma diferença de deslocamentos entre o material que compõe o núcleo (mais deformável) e os materiais dos espaldares (menos deformáveis), com a cor roxa representando o material que sofreu mais deformações e o material azul o material menos deformável. A essa distribuição de deformações atribui-se como causa as variações de umedecimento proporcionada pelo enchimento do reservatório da barragem. Essa deformação é intensificada no núcleo devido às variações de rigidez em função do umedecimento do maciço. As deformações observadas para esse barramento podem ser visualizadas na Figura 53.

Figura 53 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Banabuiú (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

As premissas utilizadas para avaliar o barramento seguem as observações de Mahler (1947) de que o fissuramento de uma barragem pode ser inferido a partir da variação de deformações ao longo do maciço. Com isso, verifica-se que a partir da distribuição de deslocamentos estimada para a barragem Arrojado Lisboa, devido ao umedecimento do maciço pode ser responsável pelo surgimento de fissuras longitudinais na estrutura. Ademais, a diferença de rigidez entre o núcleo do barramento e os seus espaldares pode gerar o aparecimento de trincas longitudinais nas proximidades do coroamento, conforme relatado por Sandroni e Guidinici (2021), e mostrado por Marsal & Nuñez (1975).

Os relatos de Pereira (1986) também podem ser identificados a partir da observação da Figura 53, tendo em vista que a região do núcleo é deformável e os trechos dos espaldares apresentam-se mais rígidos, com a concentração de tensões entre as zonas rígidas e deformáveis podendo ocasionar o aparecimento de trincas.

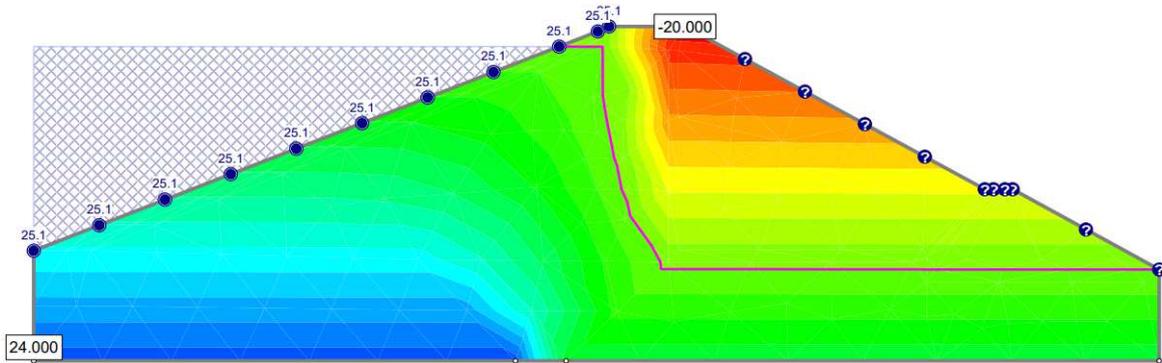
Ademais, infere-se que o fissuramento pode ser intensificado na região de mudança entre o núcleo do barramento e o enrocamento de jusante, tendo em vista que o núcleo foi umedecido, enquanto que o material de jusante encontra-se seco.

5.2. Barragem Favelas

5.2.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

A análise de fluxo feita para a barragem Favelas, considerando-se o cenário (variação de rigidez devido ao enchimento do reservatório e a percolação pelo maciço) avaliado nesse estudo, pode ser visualizada na Figura 54, sendo possível observar a distribuição de poropressões na estrutura.

Figura 54 – Distribuição de poropressões após o enchimento do reservatório da barragem Favelas até a cota da soleira



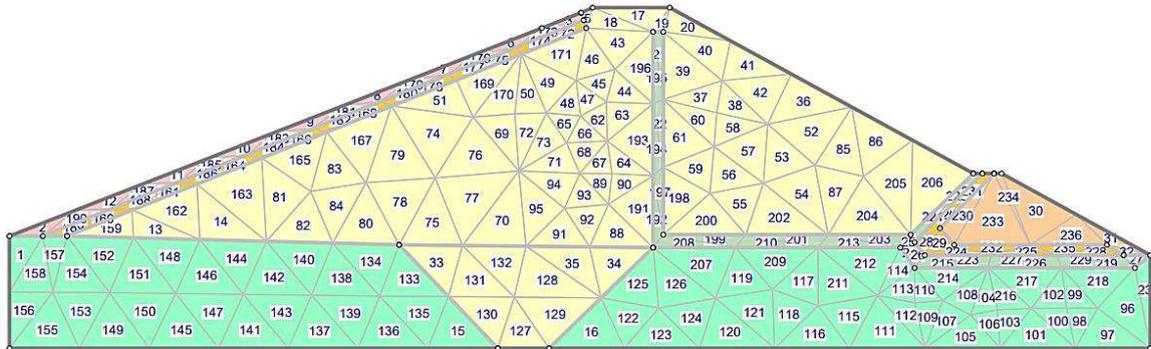
Fonte: Autor (2023)

Verificou-se levando em consideração a análise da Figura 54, que para o cenário estudado as variações de rigidez ocorrem devido ao umedecimento diferencial das regiões de montante e jusante do maciço. Observa-se que há um aumento dos valores de poropressões da região de montante, enquanto que a região de jusante continua com valores próximos aos iniciais. Observa-se na estrutura um rebaixamento da linha freática devido ao funcionamento do sistema de drenagem da barragem. Essa ocorrência que provoca a variação de umedecimento entre a região de montante e jusante do barramento, sendo a responsável pela variação de rigidez dos materiais do barramento.

5.2.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

Levando em consideração o estudo de fluxo realizado com a utilização do SLIDE 6.0, e as variações de poropressões verificadas para a barragem Favelas, além das diferenças de rigidez impulsionadas pelo umedecimento do material, o estudo do fissuramento no barramento foi realizado. A malha de elementos finitos utilizada para as análises realizadas pode ser visualizada na Figura 55.

Figura 55 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Favelas

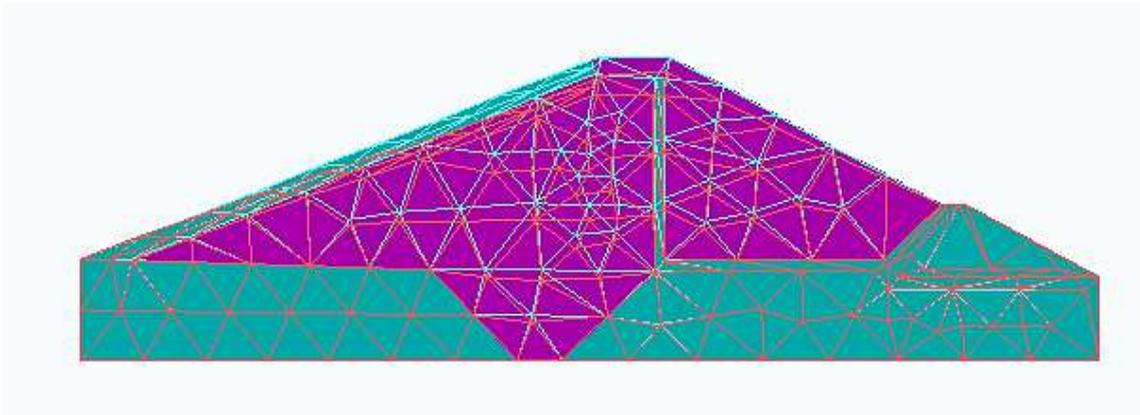


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 55, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Favelas possui 236 elementos triangulares de três nós, com um total de 139 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais, para os outros nós pertencentes a fundação assumiu-se restrições de deslocamentos horizontais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Para o cenário estudado, com a variação da rigidez proporcionada pelo enchimento do reservatório, observa-se um diferencial de deformação entre a região de montante e de jusante da barragem. Esse diferencial ocorre devido ao funcionamento do sistema de drenagem do barramento e ao fluxo d'água por ela, que gera o umedecimento predominante na região de montante, e consequente superior mudança de rigidez nesse trecho. Os deslocamentos encontrados podem ser visualizados na Figura 56.

Figura 56 - Deformações obtidas para o cenário estudado (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório da barragem)



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 56 observa-se que o material pertencente ao núcleo (cor roxa) apresenta maiores deformações que a fundação, e os elementos de drenagem do maciço (cor verde). A variação de deslocamentos entre esses materiais associada ao umedecimento diferencial do barramento, região de montante umedecida enquanto que a região de jusante continua seca, e consequente mudança de rigidez dessa região.

A variação de rigidez do material, associada à variação de deformação entre o material umedecido e o material seco, levando em consideração as observações de Mahler (1974), de que o estado de fissuramento de um barramento pode ser estimado a partir da variação de deslocamento entre as regiões de um maciço, indicam zonas possíveis de formação de fissuramento (coroamento do barramento).

Ademais, levando em consideração os relatos de Sandroni e Guidicini (2021) e a ilustração de Maia (2022) de que a variação de deformação entre a região umedecida e a região seca pode ocasionar o surgimento de fissuras longitudinais em barragens de terra homogêneas. Esses relatos e observações indicam a possibilidade da ocorrência de fissuramento na barragem Favelas devido ao enchimento do reservatório.

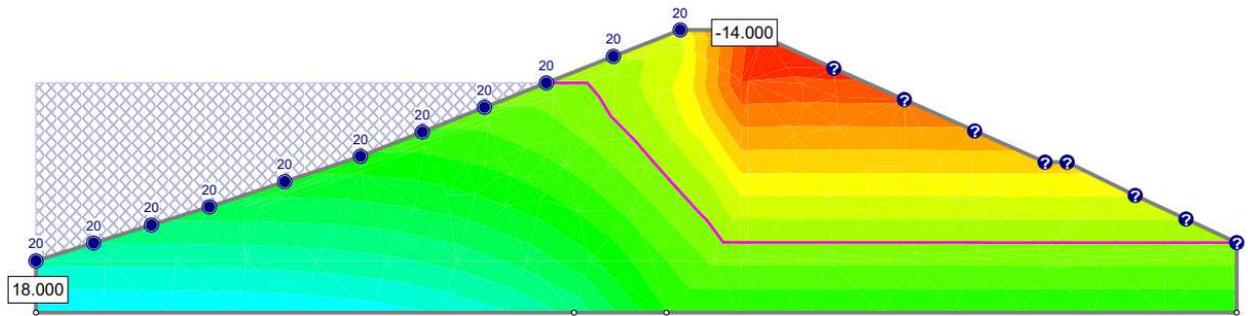
5.3. Barragem Frios

5.3.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

A análise de fluxo feita para a barragem Frios considerou o cenário avaliado nesse estudo, a partir das variações de poropressões decorrentes da elevação do nível d'água no

reservatório da barragem e a percolação pelo seu maciço. Na Figura 57 é possível observar a distribuição de poropressões no barramento após o enchimento do reservatório.

Figura 57 – Distribuição de poropressões na barragem Frios após o enchimento do reservatório até a cota da soleira



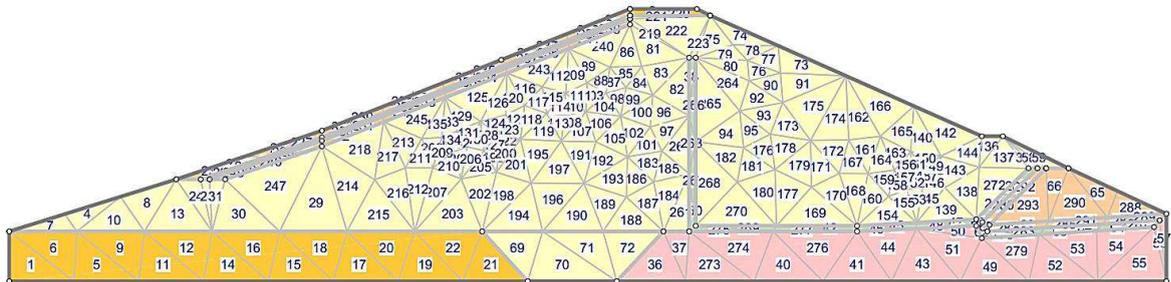
Fonte: Autor (2023)

A partir da análise da Figura 57 é possível verificar que após o enchimento do reservatório ocorreu mudanças de umedecimento dos materiais do barramento, e conseqüentemente, variações de rigidez desses materiais, tendo em vista que no trecho de montante da barragem ocorreu a elevação dos valores de poropressão, enquanto que na parte de jusante os valores de poropressões encontram-se próximos aos iniciais. O uso de dispositivos de drenagem ocasiona o rebaixamento da linha freática no maciço. O funcionamento do sistema de drenagem é o que proporciona as diferenças de umedecimento na estrutura.

5.3.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

Considerando os efeitos do fluxo d'água e as variações de poropressões na barragem Frios, além das mudanças de rigidez nos materiais impulsionadas pelo umedecimento, o estudo do fissuramento nessa estrutura foi realizado. A malha de elementos finitos empregada nos programas utilizados nesse estudo é mostrada na Figura 58.

Figura 58 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Frios

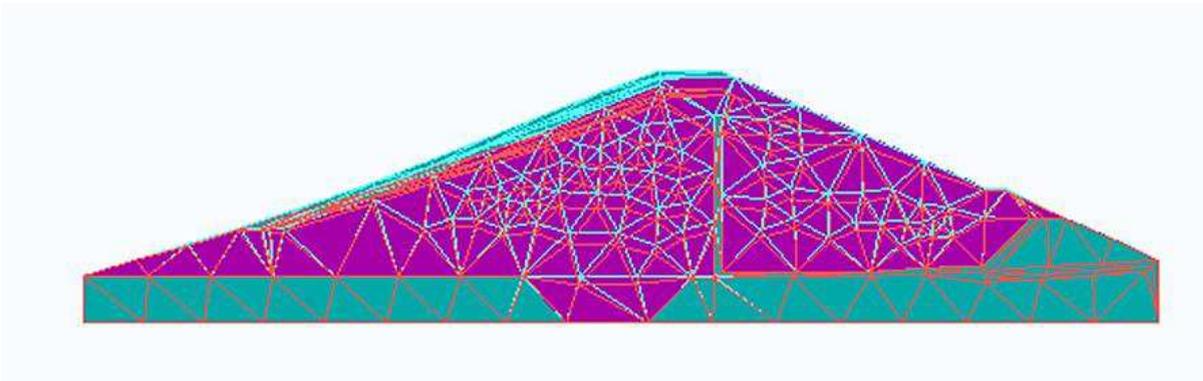


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 58, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Frios possui 293 elementos triangulares de três nós, com um total de 167 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais, para os outros nós pertencentes a fundação assumiu-se restrições de deslocamentos horizontais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Para o cenário avaliado, considerando as variações de rigidez a partir do umedecimento dos materiais do barramento proporcionado pelo enchimento do reservatório, verifica-se que diferenciais de deformação entre os trechos de montante e jusante da estrutura. O funcionamento do sistema de drenagem impulsiona a ocorrência desse recalque diferencial, tendo em vista que há um umedecimento predominante da região de montante, e consequentes maiores alterações de rigidez nesse trecho. As deformações verificadas nessa avaliação podem ser visualizadas na Figura 59.

Figura 59 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Frios (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que o material do maciço (cor roxa) é mais deformável que o material correspondente aos elementos de drenagem e a fundação (cor azul). Ademais, há uma variação de deformação entre a região de montante e jusante, decorrente das mudanças de umedecimento dos materiais, e conseqüente variação de rigidez. Levando em consideração as observações de Mahler (1974), zonas de fissuramento podem ser inferidas a partir do plano de deformações de um maciço.

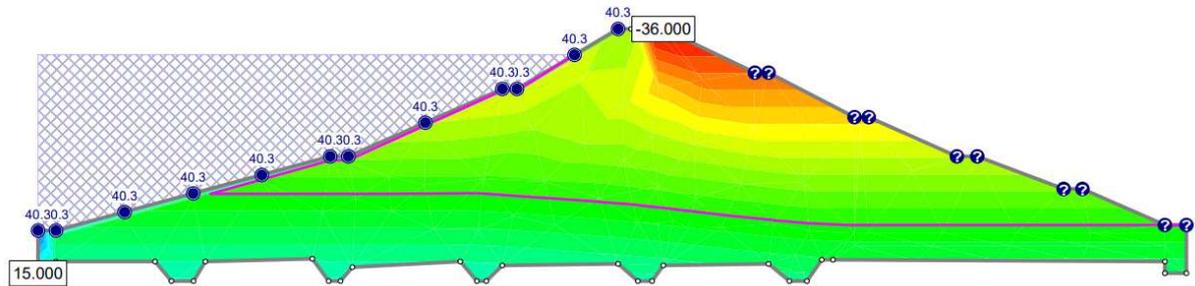
Dessa forma, pode ser atribuída a variação de deformação entre a região de montante e jusante do barramento como responsável pelo surgimento de trincas longitudinais em barragens de terra homogêneas, segundo relatos de Sandroni e Guidicini (2021), e como mostrado por Maia (2022).

5.4. Barragem General Sampaio

5.4.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

Para a avaliação do fluxo e das mudanças de poropressões na barragem General Sampaio, considerou-se o cenário de modelagem em que as variações de rigidez dos materiais advêm do umedecimento deles, provocado pelo enchimento do reservatório. Na Figura 60 tem-se a distribuição de poropressões após o enchimento do reservatório.

Figura 60 - Distribuição de poropressões na barragem General Sampaio após o enchimento do reservatório até a cota de soleira



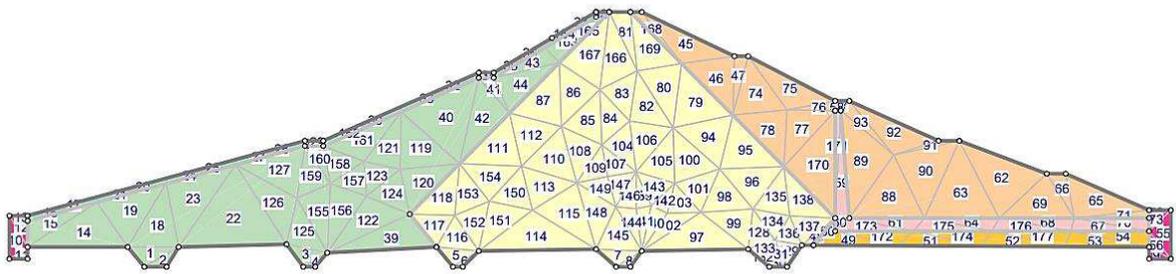
Fonte: Autor (2023)

Verificou-se a partir da análise da Figura 60 que a barragem General Sampaio, a partir da variação de poropressões, gerada pelo umedecimento do material do barramento devido ao enchimento do reservatório, com a região de montante tendo o aumento dos valores de poropressões e a região de jusante continuando com valores próximos aos iniciais. Essa variação, ocorre, principalmente, devido a influência do sistema de drenagem existente, e da diferença de permeabilidade entre os materiais do espaldar de montante e do espaldar de jusante. Vale ressaltar, que para esse barramento, averiguou-se que a linha de fluxo d'água foi rebaixada devido à influência do concreto utilizado como proteção no trecho de montante do barramento. No entanto, apesar da placa de concreto admitir a impermeabilidade do material, a longo prazo não é isso que ocorre, visto que ocorrem infiltrações, que são responsáveis por elevar a linha freática.

5.4.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

A partir da análise do fluxo na barragem General Sampaio, e das mudanças de rigidez ocorridas devido ao umedecimento dos materiais componentes do barramento, o estudo do fissuramento foi feito. Na Figura 61 é apresentada a malha de elementos finitos utilizada nos programas SLIDE 6.0 e UNSTRUCT.

Figura 61 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem General Sampaio

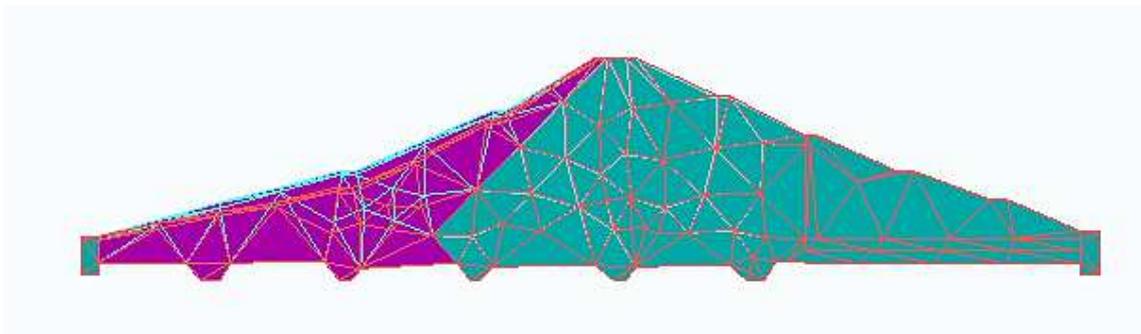


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 61, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem General Sampaio possui 117 elementos triangulares de três nós, com 117 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Nessa situação, o enchimento do reservatório provoca deformações diferenciais entre a região de montante e jusante do barramento, devido a variação de rigidez do material do espaldar de montante do barramento, provocada pela molhagem. Essa variação de deformabilidade pode ser atribuída ao funcionamento do sistema de drenagem e pela diferença de permeabilidade entre o material que compõe o espaldar de montante (maiores recalques) e o material do espaldar de jusante (menores deslocamentos). Na Figura 62 o campo de deformações obtido para a barragem General Sampaio pode ser visto.

Figura 62 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem General Sampaio (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 62 que o material da região de montante sofre maiores deformações (cor roxa) do que o restante do material que compõe o barramento (cor azul). Ademais, observa-se que ocorre uma variação de deformação entre a região umedecida e não umedecida do barramento. Devido a essas mudanças de deformação, zonas de fissuramento podem ser obtidas, como afirma Mahler (1974).

O diferencial de deformações que ocorre devido a variação de rigidez entre o material que compõe a região de montante, intensificada pelo processo de molhagem, e os outros componentes do barramento pode iniciar o processo de formação de fissuras, conforme relatado por Sandroni e Guidicini (2021) e mostrado por Marsal & Nuñez (1975).

Além disso, tendo em vista que o material de montante é mais deformável e o restante do barramento mais rígido, trincas podem ser originadas entre o trecho de montante e o núcleo do barramento, devido a essa mudança de rigidez.

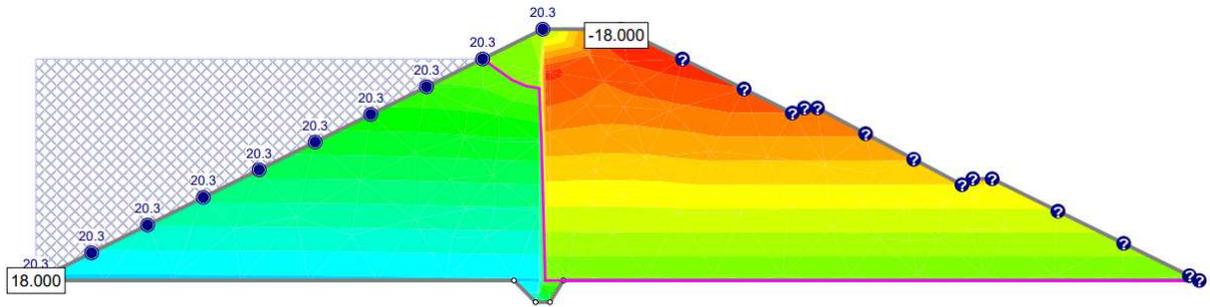
Destaca-se, ainda, que a existência de uma estrutura de concreto protegendo o espaldar de montante dificulta a verificação e análise de deformações no barramento, e dessa forma, não sendo visíveis durante inspeções. Sendo assim, atualmente, prefere-se o uso de rip-rap composto por material granular devido a facilidade em se visualizar as deformações no corpo da estrutura.

5.5. Barragem Lima Campos

5.5.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

A análise do fluxo na barragem Lima Campos foi feita considerando as variações de poropressões no corpo do barramento devido ao enchimento do reservatório e o fluxo d'água pelo maciço. Na Figura 63 é possível visualizar a distribuição de poropressões decorrente do cenário avaliado.

Figura 63 - Distribuição de poropressões na barragem Lima Campos após o enchimento do reservatório até a cota da soleira



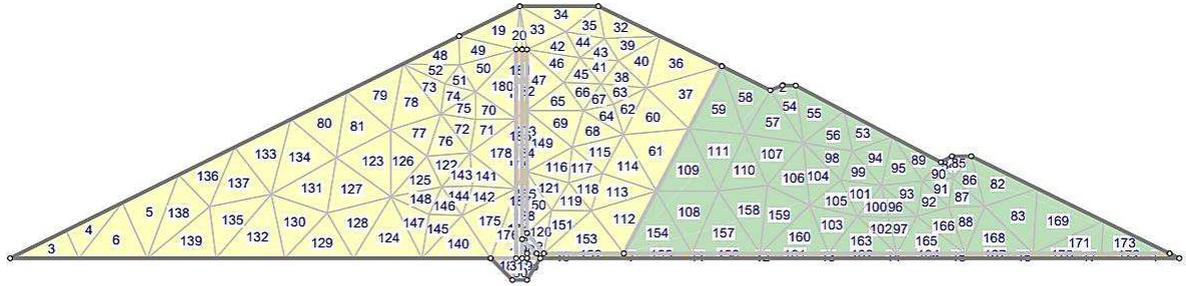
Fonte: Autor (2023)

Nessa situação, a partir da avaliação da Figura 63, percebe-se que o fluxo d'água ocorre apenas na região de montante, umedecendo apenas essa região, devido a existência de uma estrutura central no barramento de concreto, impermeabilizando o trecho. Logo, as variações de rigidez devido a molhagem ocorrem apenas na região anterior ao muro de concreto. Dessa forma, observa-se que no trecho de montante ocorreu o aumento dos valores de poropressões dos materiais, enquanto que na região após o muro de concreto, os valores de poropressões sofreram pequenas variações.

5.5.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

A partir da análise do fluxo no barramento Lima Campos, e da variação de rigidez, provocada pelo umedecimento dos materiais, a avaliação do fissuramento foi realizada. Na Figura 64 tem-se a malha de elementos finitos utilizada nos *softwares* para realização desse estudo.

Figura 64 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Lima Campos

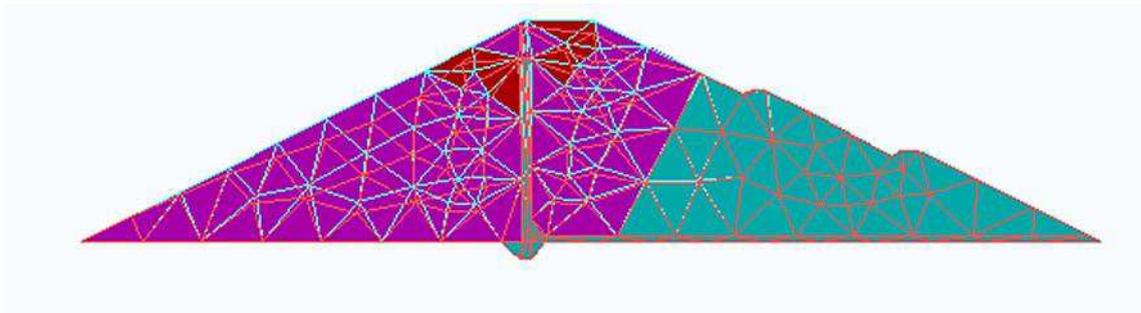


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 64, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Lima Campos possui 190 elementos triangulares de três nós, com um total de 118 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Nesse caso, o enchimento do reservatório provoca o umedecimento do material de montante do barramento, e a conseqüente maior variação de rigidez dessa região, ocasionando o diferencial de deformação entre as regiões da estrutura, como pode ser visualizado na Figura 65. A variação de deslocamentos entre as regiões de montante e jusante do barramento pode ser atribuída ao funcionamento do sistema de drenagem, que contribui para manter a região de jusante com a umidade inicial, e ao muro de concreto utilizado, que impermeabiliza o centro do barramento, impedindo que a região de jusante seja umedecida.

Figura 65 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Lima Campos (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Observa-se que a região de montante (cor roxa) apresenta maiores recalques que o trecho de jusante (cor azul). Ademais, nota-se trechos com tensões de tração (cor vermelha). Essas tensões de tração dão o indicativo de que a ocorrência do fissuramento pode iniciar nesses pontos específicos, podendo, inclusive, se propagarem do topo do barramento até o seu interior.

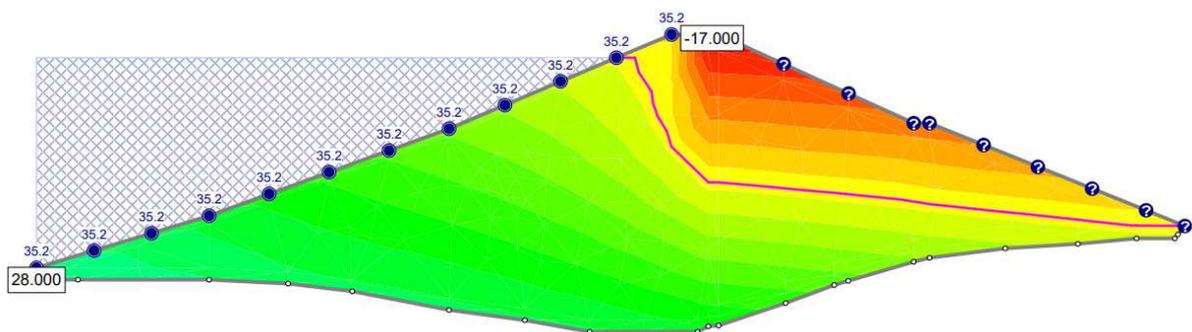
Ademais, nessa estrutura, também pode inferir-se de acordo com as observações de Mahler (1974), que o fissuramento pode ocorrer devido ao diferencial de deformações entre a região de montante e a de jusante, impulsionado pela variação de rigidez induzida pelo umedecimento do trecho de montante, conforme mostrado por Sandroni & Guidicini (2021), e ilustrado por Marsal & Nuñez (1975). Ademais, observa-se que deformações em maior escala foram formadas no material que antecede o muro de concreto, pois a sua impermeabilização promove um excesso de poropressão na região de montante.

5.6. Barragem Mundaú

5.6.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

A análise de fluxo da barragem Mundaú foi realizada levando em consideração o fluxo d'água pelo maciço, e as variações de poropressões induzidas pelo enchimento do reservatório do barramento. Na Figura 66 é apresentada a distribuição de poropressões na barragem Mundaú resultantes da situação estudada.

Figura 66 – Distribuição de poropressões na barragem Mundaú após o enchimento do reservatório até a cota da soleira



Fonte: Autor (2023)

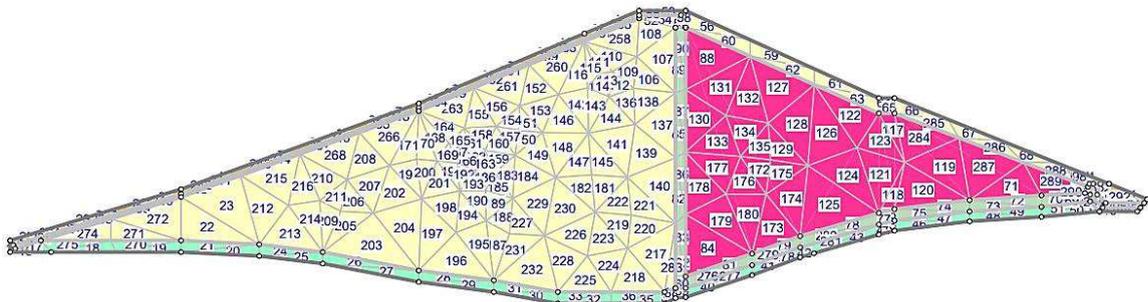
A partir da análise da Figura 66, é possível inferir que a partir do enchimento do reservatório, ocorre o umedecimento da região de montante, e conseqüente variação de rigidez,

devido ao aumento das poropressões nesse trecho, enquanto que na região de jusante os valores de poropressões encontram-se próximos aos iniciais. As diferenças de umedecimento entre as regiões de montante e jusante é proporcionada pelo sistema de drenagem existente no barramento. Essa variação de umedecimento, por sua vez, é a responsável pela maior variação de rigidez do trecho de montante (umedecido).

5.6.2. *Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT*

A partir dos valores de poropressões resultantes da análise de fluxo realizada com o programa SLIDE 6.0, e da variação de rigidez dos materiais impulsionada pelo umedecimento ocorrido devido ao enchimento do reservatório, a avaliação do fissuramento na barragem Mundaú foi feita. Na Figura 67 é apresentada a malha de elementos finitos utilizada para realização dessa análise.

Figura 67 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Mundaú



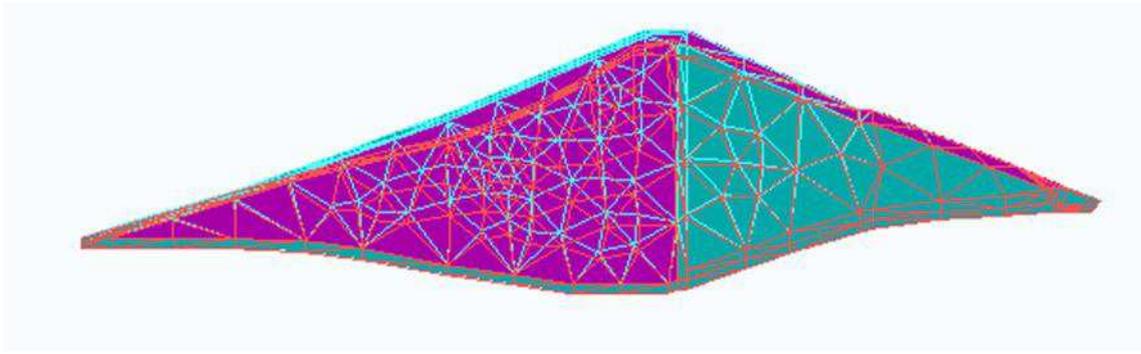
Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 67, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Mundaú possui 296 elementos triangulares de três nós, com um total de 172 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Nessa situação, considerando-se o cenário de umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório, observa-se que a região de montante (molhada), apresenta maiores deformações que a região de jusante (seca). Esse diferencial de deformação é impulsionado

pela maior variação de rigidez da região de montante do barramento, que se encontra mais umedecida que a parte de jusante, devido à influência do sistema de drenagem. Na Figura 68 é possível observar esse diferencial de deformações entre as regiões de montante e jusante da barragem Mundaú.

Figura 68 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Lima Campos (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Observa-se a partir da Figura 68 que o fissuramento, pode ser estimado, levando em consideração as observações de Mahler (1974), notando-se que a região de montante, apresenta-se mais deformável (cor roxa), enquanto que o trecho de jusante, mostra-se menos deformável (cor azul). Outro ponto de observação é a região de variação entre o material mais deformável e o material mais rígido, sendo zonas propícias para a ocorrência de trincas.

Ademais, pode-se inferir que fissuramentos podem ocorrer na barragem do Mundaú devido ao diferencial de deformação entre o trecho de montante e o de jusante, conforme relatado por Sandroni e Guidicini (2021) e ilustrado por Marsal & Nuñez (1975) para barragens zoneadas, tendo em vista que a região de montante tem maior variação de rigidez decorrente do umedecimento.

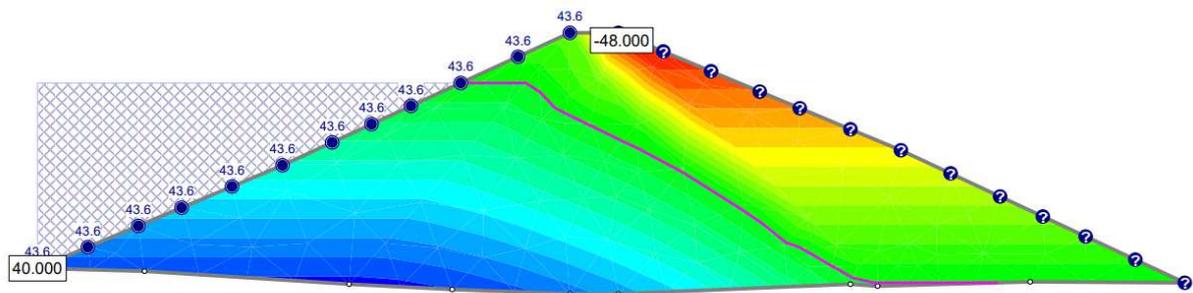
5.7. Barragem Orós

5.7.1. Análise de fluxo pelo SLIDE 6.0

Para a análise do fluxo na barragem do Orós, considerou-se o fluxo de água pelo maciço, além das variações de poropressões proporcionadas pelo enchimento do reservatório

do barramento. Na Figura 69 é apresentada a distribuição de poropressões decorrente do cenário avaliado.

Figura 69 - Distribuição de poropressões na barragem do Orós após o enchimento do reservatório até a cota de soleira



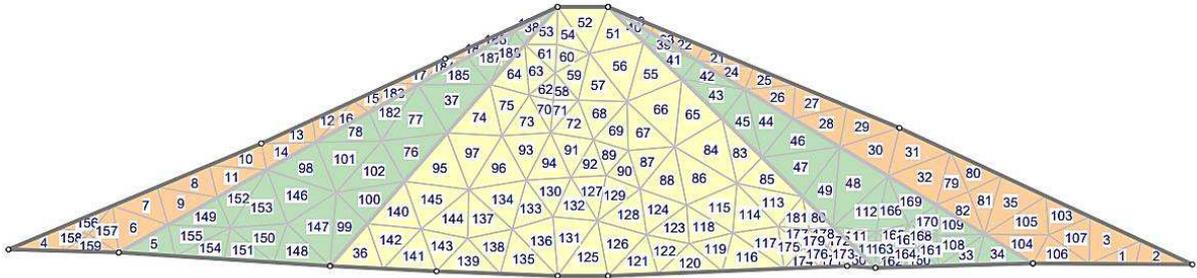
Fonte: Autor (2023)

A partir da avaliação do fluxo d'água na barragem do Orós, levando em consideração a distribuição de poropressões mostrada na Figura 69, percebe-se que ocorre o umedecimento diferencial entre as regiões de montante (molhada) e a região de jusante (seca), gerando um acréscimo de poropressões no trecho de montante. Essa variação de umedecimento no barramento é a responsável por ocasionar variações de rigidez. Ressalta-se que essa situação é proporcionada pela diferença de permeabilidade entre os materiais utilizados no barramento (espaldares mais permeáveis que o material do núcleo), ocasionando o rebaixamento da linha freática na região de jusante.

5.7.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

Levando em consideração a distribuição de poropressões e o fluxo d'água pelo barramento, além das variações de rigidez ocorridas devido à variação de umedecimento entre o trecho de montante e o de jusante, o fissuramento na barragem do Orós foi previsto. Na Figura 70 tem-se a malha de elementos finitos utilizada para esse estudo.

Figura 70 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Orós

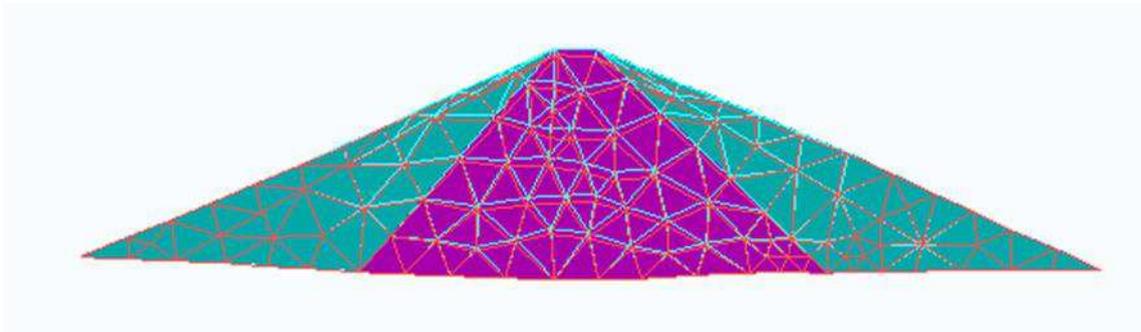


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 70, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Orós possui 188 elementos triangulares de três nós, com um total de 119 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Para a situação estudada, observou-se que devido à variação predominante de rigidez no núcleo do barramento (material mais deformável) devido a molhagem do solo, e em parte da região de montante, ocorre deformações diferenciais entre a região do núcleo e do restante da estrutura, em especial entre o núcleo e o espaldar de jusante. As deformações estimadas para a barragem do Orós podem ser vistas na Figura 71.

Figura 71 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Orós (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Levando em consideração as afirmações de Mahler (1974), o diferencial de recalque estimado entre a região central (cor roxa) e os espaldares (cor azul) do barramento

pode ocasionar o surgimento de trincas longitudinais na superfície da barragem Orós. Essa variação de deformação no corpo do maciço ocorre devido ao processo de umedecimento, com maior variação de rigidez do material do núcleo, que por sua vez pode ser o responsável por iniciar o processo de fissuramento nas proximidades do coroamento do barramento, principalmente na região entre o material coesivo (molhado) e o material granular (seco), conforme explanado por Sandroni e Guidicini (2021), e ilustrado por Marsal & Nuñez (1975).

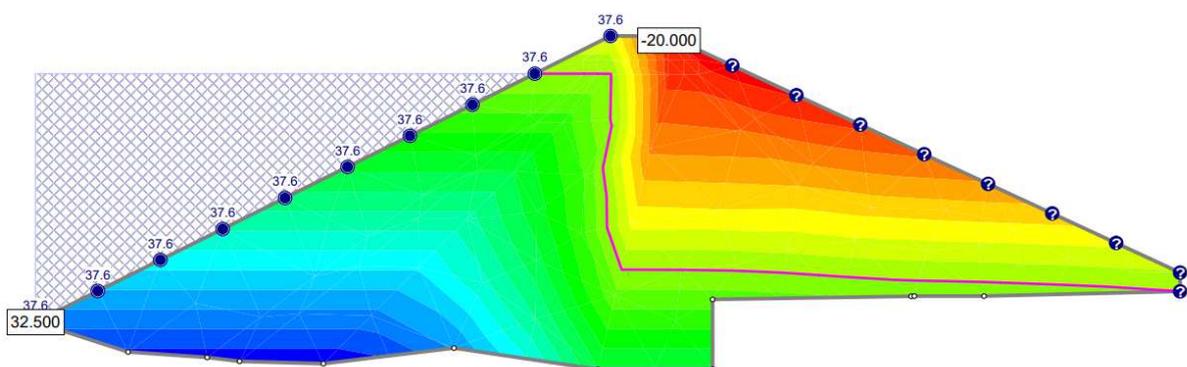
Ademais, devido os espaldares serem mais rígidos que o núcleo, podem ser originadas trincas longitudinais nesses encontros, devido ao excesso de tensão originado nessa região, conforma Figura 5 – a.

5.8. Barragem Patu

5.8.1. Análise do fluxo pelo SLIDE 6.0

Para a avaliação do fluxo na barragem Patu, utilizou-se o cenário estudado nesse trabalho, com a variação do umedecimento na estrutura sendo proporcionado pelo enchimento do reservatório e pelo fluxo d'água pelo maciço, e com isso ocasionando mudanças nos valores de poropressão. Na Figura 72 tem-se a distribuição de poropressões na barragem Patu devido ao cenário estudado.

Figura 72 - Distribuição de poropressões na barragem Patu após o enchimento do reservatório até a cota de soleira



Fonte: Autor (2023)

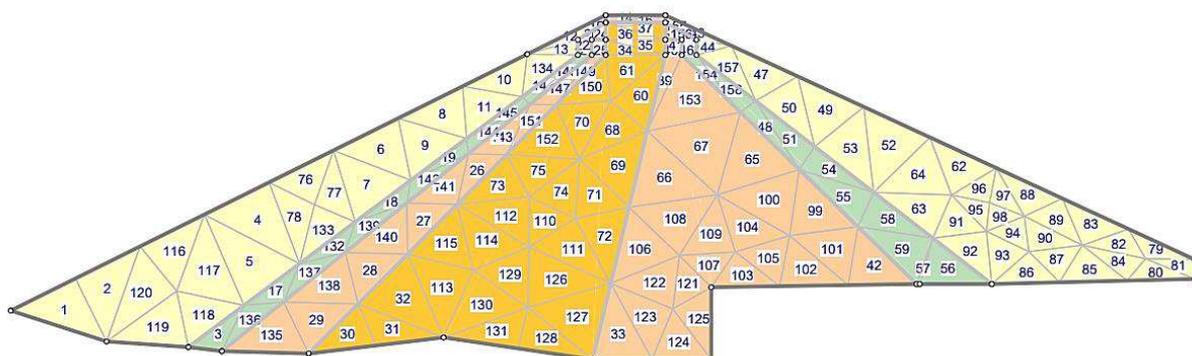
Analisando-se a Figura 72, percebe-se que na região de montante ocorreu um acréscimo de valores de poropressão, enquanto que a região de jusante continua com os valores

próximos aos iniciais. Esse umedecimento preferencial da região de montante é o responsável por maiores mudanças de rigidez nessa região. Destaca-se que essa ocorrência é intensificada devido à diferença de permeabilidade entre o material que compõe o núcleo e os usados nos espaldares, que proporciona o rebaixamento da linha freática no trecho de jusante do barramento.

5.8.2. *Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT*

A partir da análise do fluxo na barragem Patu, e da distribuição de poropressões verificada para essa estrutura, além das considerações de variação de rigidez dos materiais do barramento, o fissuramento no barramento foi previsto. Na Figura 73, a malha de elementos finitos usada para essa análise pode ser visualizada.

Figura 73 – Malha de elementos finitos utilizada na barragem Patu



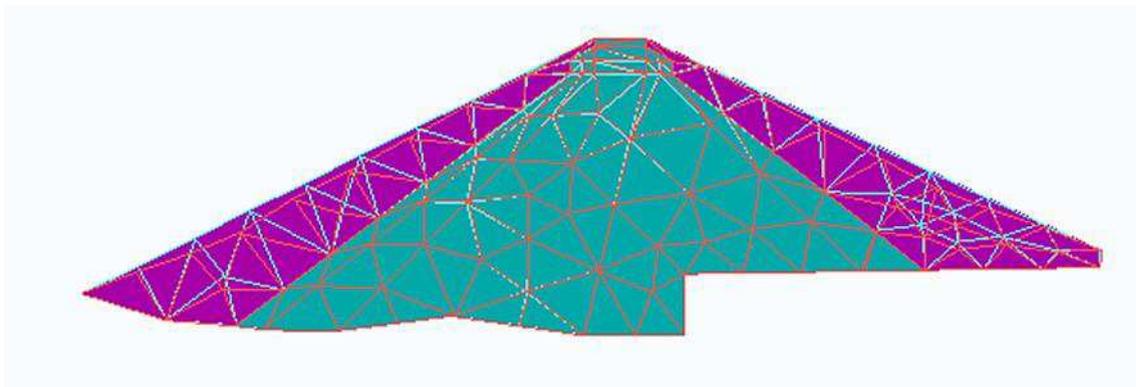
Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 73, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Patu possui 158 elementos triangulares de três nós, com um total de 99 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Nesse caso, considerou-se que o material dos espaldares era mais susceptível às variações de rigidez provocadas pelo umedecimento do barramento, finalizando verificar a situação oposta à analisada para as outras estruturas. Logo, percebeu-se que os materiais dos espaldares apresentaram maiores deformações devido ao umedecimento do que os materiais

centrais, gerando um diferencial de recalque. O campo de deformações obtido para essa estrutura pode ser visto na Figura 74.

Figura 74 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Patu (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Levando em consideração as observações de Mahler (1974), o processo de formação de fissuras pode ser inferido a partir das diferentes deformações observadas no maciço. A partir da análise da Figura 74, observa-se que a região dos espaldares mais externos (cor amarela) se apresenta mais deformáveis que o restante da estrutura (cor verde). A zona de variação entre material mais rígido para material deformável é o local mais propício de iniciar o processo de trincamento.

Nessa situação, observa-se que o fissuramento pode ser iniciado devido ao diferencial de deformações, acarretado pela diferença de rigidez entre os materiais centrais e o material interno do barramento. Essa situação é reiterada por Sandroni e Guidicini (2021) e ilustrada por Marsal & Nuñez (1975), mostrando que a maior variação de rigidez do material dos espaldares em relação ao núcleo pode ocasionar o surgimento de trincas horizontais atravessando o corpo do barramento, podendo gerar, inclusive, o processo de *piping*.

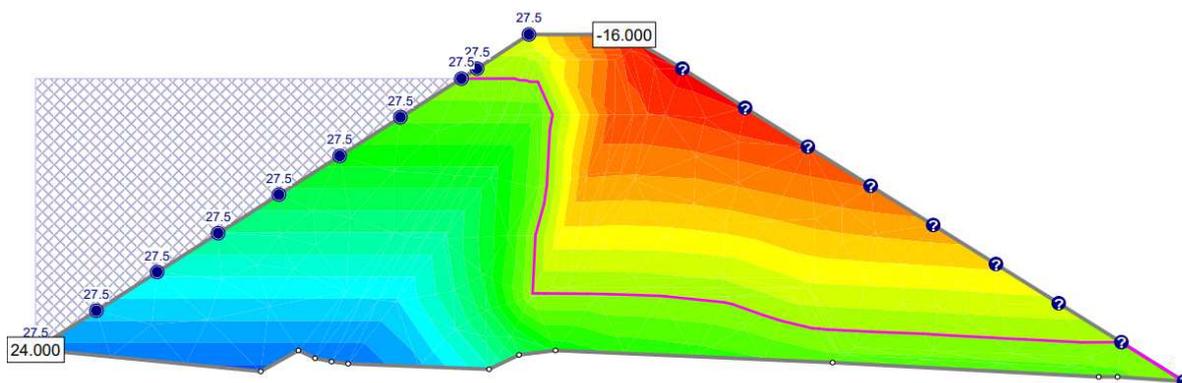
5.9. Barragem Edson Queiroz (Serrote)

5.9.1. Análise do fluxo pelo SLIDE 6.0

Para o estudo do fluxo na barragem Edson Queiroz (Serrote), avaliando o cenário proposto nesse trabalho, considerou-se a linha piezométrica que atravessa o maciço e as

variações de poropressões ocorridas devido ao umedecimento ocasionado pelo enchimento do reservatório da estrutura. Na Figura 75 é ilustrada a distribuição de poropressões no barramento.

Figura 75 - Distribuição de poropressões na barragem Patu após o enchimento do reservatório até a cota de soleira



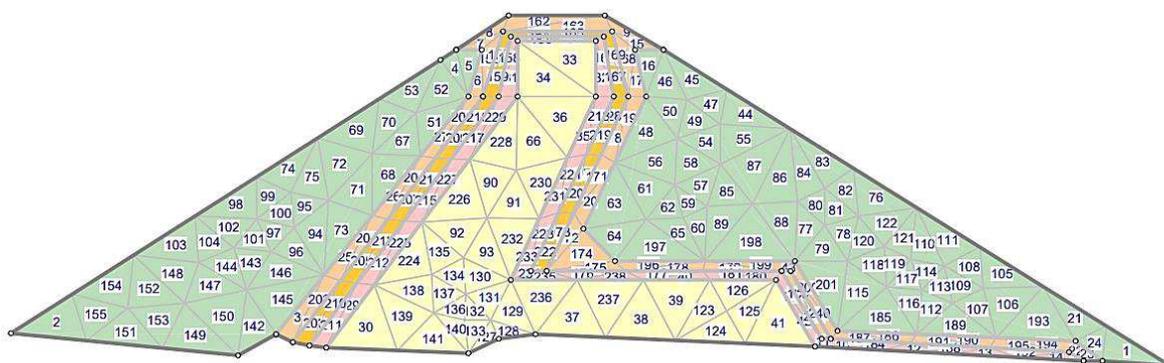
Fonte: Autor (2023)

Ao avaliar a Figura 75, percebe-se que a partir do enchimento do reservatório ocorre o umedecimento diferencial entre as regiões de montante e jusante do barramento. Observa-se que ocorre um acréscimo de poropressão no trecho de montante, enquanto que o trecho de jusante continua com valores próximos aos iniciais. Esse umedecimento diferencial, proporcionado pela utilização de materiais de diferentes permeabilidades na composição da estrutura, ocasiona variações de rigidez, principalmente nas regiões em que os materiais são mais deformáveis, sendo também o responsável pelo rebaixamento da linha freática no trecho de jusante.

5.9.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

A partir da análise do fluxo d'água pelo barramento, e da distribuição de poropressões ocasionada pelo umedecimento diferencial do maciço, e consequente variação de rigidez dos materiais, a avaliação do fissuramento na barragem Edson Queiroz foi realizado. Na Figura 76 é apresentada a malha de elementos finitos usada nesse estudo.

Figura 76 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Edson Queiroz

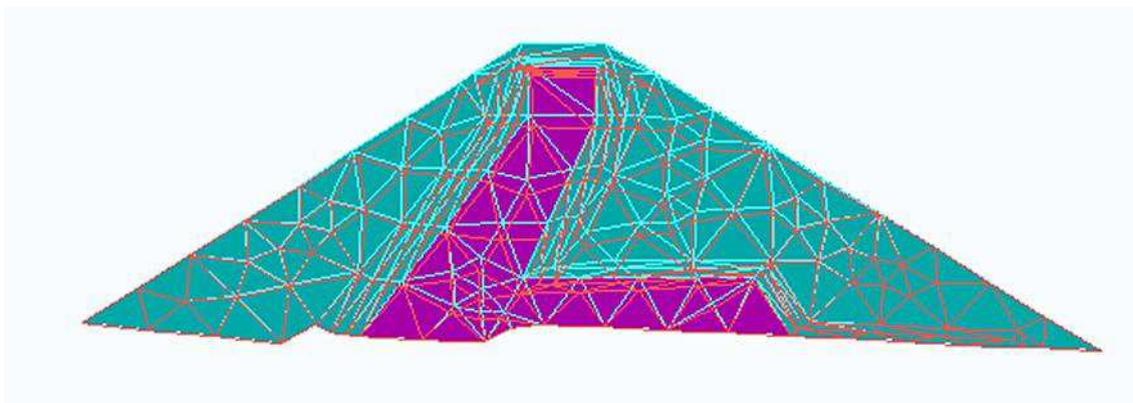


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 76, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Edson Queiroz possui 240 elementos triangulares de três nós, com um total de 141 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Na situação estudada, observa-se que ocorre um diferencial de deformações entre o núcleo do barramento e os seus espaldares. A região de montante e principalmente o núcleo do barramento, por apresentar maior variação de rigidez devido ao umedecimento se apresenta mais deformável que a região de jusante, conforme pode ser observado na Figura 77.

Figura 77 - Deformações obtidas para o cenário analisado na barragem Serrote (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório)



Fonte: Autor (2023)

Levando em consideração as observações de Mahler (1974), infere-se que o processo de formação de fissuras é influenciado pelo diferencial de deformações entre a região central (cor roxa) e os materiais dos espaldares (cor azul), com a região de transição entre material mais deformável para material mais rígido sendo o local mais propício de iniciar o trincamento.

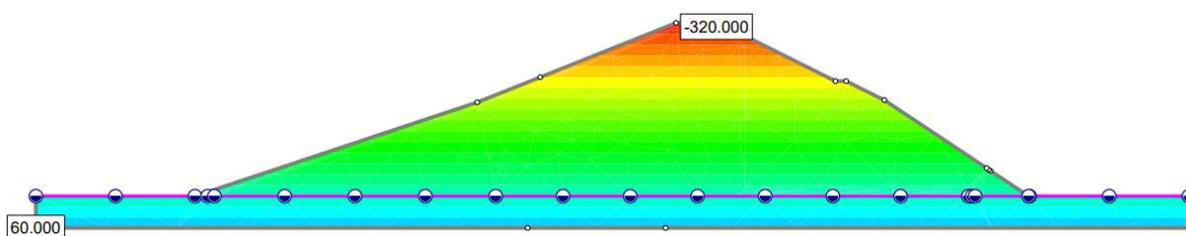
A esse diferencial de deformações entre a região central e os espaldares do barramento atribui-se a possibilidade de ocasionar o surgimento de fissuras longitudinais ao longo da estrutura. A variação da rigidez dos materiais entre o núcleo e os materiais mais permeáveis podem ocasionar altas tensões de cisalhamento no seu contato, gerando esforços na proximidade do núcleo, e dessa forma ocasionar fissuras longitudinais, conforme explicado por Sandroni e Guidicini (2021) e mostrado por Marsal & Nuñez (1975).

5.10. Barragem Trussu

5.10.1. Análise do fluxo pelo SLIDE 6.0

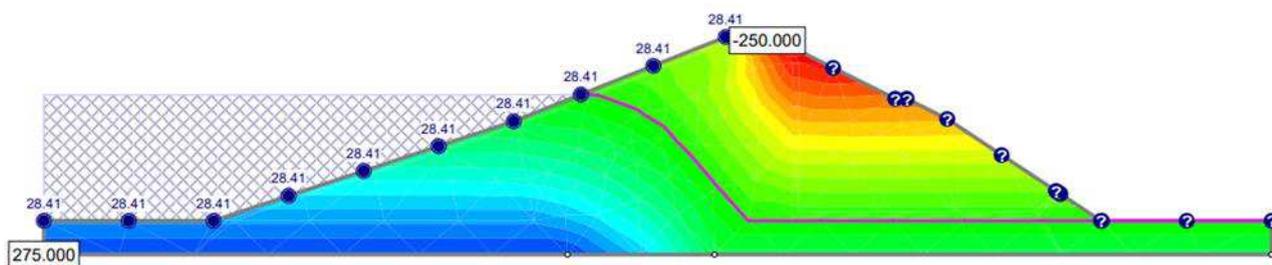
A análise de fluxo para a barragem do Trussu foi feita para os dois cenários avaliados nesse trabalho. No primeiro cenário analisou-se as variações de poropressões devido a elevação do nível d'água até a base da barragem, e no segundo cenário foi feito o estudo considerando o enchimento do reservatório e a percolação pelo maciço. Nas Figuras 78 e 79 é possível observar a distribuição das poropressões devido à elevação do nível d'água e do enchimento da barragem, respectivamente.

Figura 78 – Distribuição de poropressões após elevação do nível d'água na fundação



Fonte: Autor (2023)

Figura 79 - Poropressões após o enchimento do reservatório da barragem Trussu até a cota da soleira



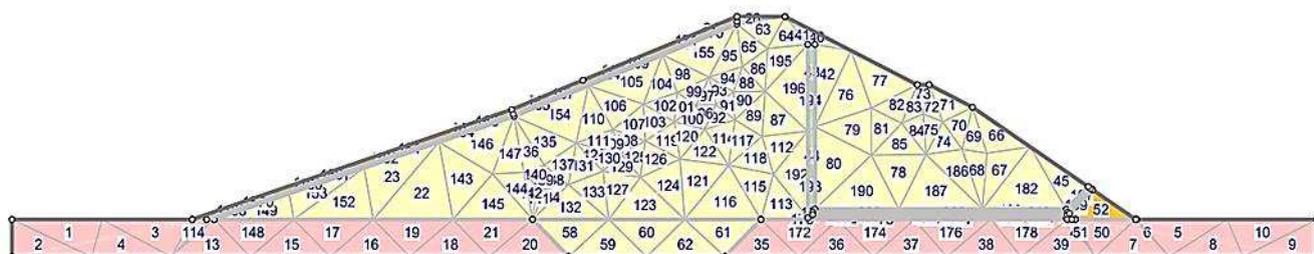
Fonte: Autor (2023)

Verificou-se a partir da análise das Figuras 78 e 79 que para a situação do primeiro cenário ocorreu a variação das poropressões, com o acréscimo dos seus valores, em decorrência da elevação do nível d'água, essa alteração no solo de fundação gera a possível modificação da rigidez do solo de fundação. No outro cenário, considerando o enchimento do reservatório, imagina-se que ocorrem mudanças de rigidez dos componentes do barramento, devido ao aumento das poropressões na parte de montante e na fundação, enquanto que a parte de jusante continua com as pressões iniciais. Essa ocorrência é proporcionada pela existência do sistema de drenagem do barramento.

5.10.2. Análise do fissuramento com a utilização do UNSTRUCT

Para o estudo do fissuramento na barragem do Trussu com a utilização do UNSTRUCT, considerou-se as variações de poropressões obtidas no maciço e na fundação através do SLIDE 6.0 nos dois cenários analisados. A malha de elementos finitos utilizada nos programas é mostrada na Figura 80.

Figura 80 - Malha de elementos finitos utilizada na barragem Trussu

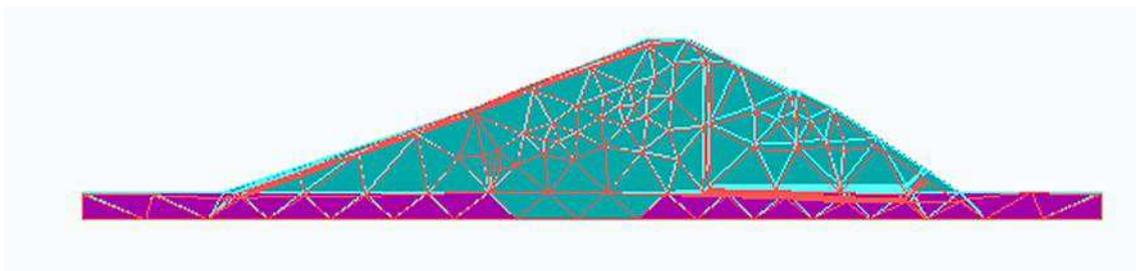


Fonte: Autor (2023)

Conforme observado na Figura 80, a malha de elementos finitos utilizada para a barragem Trussu possui 236 elementos triangulares de três nós, com um total de 139 nós. Como condições de contorno para o barramento adotou-se que os nós inferiores do barramento possuem restrições de deslocamentos horizontais e verticais, para os outros nós pertencentes a fundação assumiu-se restrições de deslocamentos horizontais. Ressalta-se que a seção transversal da estrutura não foi prolongada além dos taludes de montante e jusante, tendo em vista que não era objetivo desse estudo a análise da estabilidade dos taludes da barragem.

Para a primeira situação analisada, observa-se uma diferença de deslocamentos obtidas para o material que compõe o solo de fundação, provocados pela elevação do nível d'água no material de fundação. Nesse caso, obteve-se maiores deformações no material denominado aluvião, do que para o material do *cut-off*. Essa diferença é função da variação de rigidez entre esses materiais, com o aluvião possuindo maior deformabilidade do que o solo compactado utilizado na trincheira após o umedecimento da fundação. Os deslocamentos obtidos nesse primeiro cenário estão ilustrados na Figura 81, mostrando as malhas deformadas e indeformadas para a visualização dos trechos possíveis de fissuramento.

Figura 81 – Deformações obtidos para o cenário 1 (variação de rigidez devido a variação do nível d'água no solo de fundação)



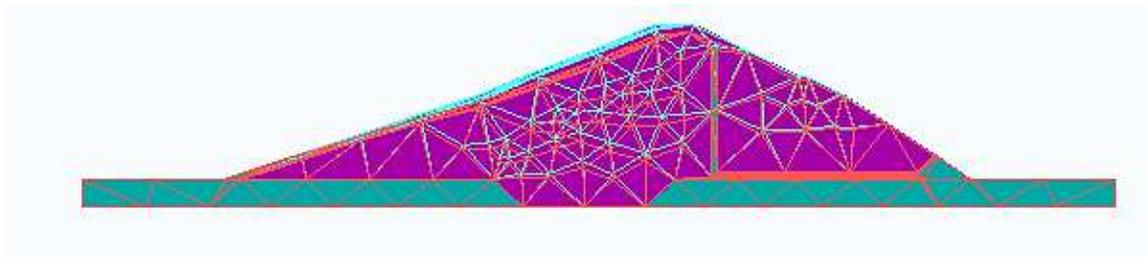
Fonte: Autor (2023)

Essa variação de deformações entre o material da fundação (aluvião com maiores deslocamentos em relação ao *cut-off*, que possui deformações menores) pode provocar o fissuramento longitudinal conforme explanado por Camapum de Carvalho *et al.* (2015) e mostrado por Marsal & Nuñez (1975).

Para a segunda situação analisada, em que há uma variação de rigidez no maciço provocada pelo enchimento da barragem, observa-se um diferencial de deformação entre a região de montante e jusante da barragem. Essa variação ocorre devido ao funcionamento do sistema de drenagem da barragem e ao seu fluxo de água, que gera o umedecimento

predominante da região de montante, e, conseqüente, maior variação de rigidez nesse trecho e no solo de fundação. Os deslocamentos encontrados podem ser visualizados na Figura 82.

Figura 82 - Deformações obtidas para o cenário 2 (variação de rigidez no maciço devido ao enchimento do reservatório da barragem do Trussu)



Fonte: Autor (2023)

A partir das observações de Mahler (1974), o processo de formação de fissuras na barragem do Trussu pode ser identificado. Ao analisar a variação de deformações entre os trechos em roxo e em azul na estrutura, além das variações entre as regiões de umedecidas e não umedecidas, é possível identificar que o fissuramento longitudinal nessa estrutura é proporcionado

Ademais, atribui-se a variação de deslocamentos estimada devido ao umedecimento da região de montante (região de montante possuindo maiores deformações que a região de jusante) a responsabilidade pelo surgimento de fissuras em barragens de terra, de acordo com os relatos de Sandroni e Guidicini (2021), e como mostrado por Maia (2022). Inclusive, fissuramento longitudinal na barragem do Trussu (Figura 7) devido ao primeiro enchimento da barragem já foi registrado por Menescal (2005).

5.11. Resumo e notas conclusivas

Esse trabalho foi realizado levando em consideração a importância da previsão do fissuramento em barragens de terra, tendo em vista que esse processo pode resultar na ocorrência de outros problemas, como, o entubamento. Ressalta-se, também, que estimar zonas de formação de fissuras é essencial para a adoção de ação preventivas, como a utilização de dispositivos de controle para esse tipo de estrutura.

Esse capítulo seguiu as orientações de Berrones, Vassilev e Liu (2001) de que as deformações não ocorrem uniformemente em um maciço, tanto no sentido transversal, quanto

no sentido longitudinal do barramento. Sendo, dessa forma, indicadores do desenvolvimento de fissuras em um maciço, podendo serem utilizados para avaliar o potencial de fissuramento.

É nesse contexto que esse trabalho foi realizado. As barragens avaliadas nesse estudo seguiram as observações de Mahler (1974), considerando que o fissuramento pode ser estimado a partir do campo de deformações da estrutura. Observou-se que as barragens homogêneas com sistema de drenagem, apresentam o seu fissuramento em função da diferença de rigidez entre os materiais da região de montante (umedecida) e o trecho de jusante (seco), conforme os relatos de Sandroni e Guidicini (2021). Já as barragens zoneadas, apresentaram o seu fissuramento em função da diferença de rigidez dos materiais do núcleo e dos espaldares de um barramento, e da ocorrência da saturação dos materiais do núcleo e da região de montante. Nessas estruturas, nota-se que o processo de formação de fissuras é intensificado na região entre o núcleo e o espaldar de jusante, tendo em vista que, na maioria dos casos, o núcleo foi umedecido, enquanto que o trecho de jusante se mantém seco. Na Tabela 3 é apresentado um resumo das análises feitas nesse estudo.

Tabela 3 - Tabela resumo das barragens avaliadas

Barragem	Localização	Seção Transversal	Cenário analisado	Concentração de deformações	Fissuramento provável
Arrojado Lisboa	Banabuiú	Terra zoneada	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Núcleo mais deformável que os espaldares	Fissuramento longitudinal provocado pela diferença de rigidez entre o núcleo e os espaldares/ maiores concentrações de trincas entre o núcleo e o talude de jusante devido ao umedecimento diferencial do maciço
Favelas	Tauá	Homogênea com dispositivo de drenagem interno	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Região de montante com maiores deformações que o trecho de jusante	Trincas longitudinais no coroamento devido à diferença de rigidez entre o material umedecido (montante) e o material seco (jusante)
Frios	Umirim	Homogênea com dispositivo de drenagem interno	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Região de montante com maiores deformações que o trecho de jusante	Trincas longitudinais no coroamento devido à diferença de rigidez entre o material umedecido (montante) e o material seco (jusante)
General Sampaio	General Sampaio	Terra zoneada com espaldares feitos com materiais não selecionados	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Espaldar de montante mais deformável que o restante do barramento	Fissuramento longitudinal devido à diferença de rigidez entre o material de montante e o núcleo/ Fissuras intensificadas nessa região devido à diferença de umedecimento entre o núcleo e trecho de montante

Barragem	Localização	Seção Transversal	Cenário analisado	Concentração de deformações	Fissuramento provável
Lima Campos	Icó	Maciço de terra utilizando dois materiais (montante - material argiloso, jusante - material proveniente do desmonte de vertedouro)	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Região de montante mais deformável que trecho de jusante/ presença de zonas de tração	Trincas longitudinais devido à diferença de rigidez entre o trecho de montante e o de jusante intensificado pela variação de umedecimento entre as regiões/ fissuras em pontos específicos devido as zonas de tração
Mundaú	Uruburetama	Homogênea com dispositivo de drenagem interno	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Região de montante mais deformável que trecho de jusante	Fissuras longitudinais devido à diferença de rigidez entre a região de montante e a de jusante intensificada pelo processo de umedecimento da região de montante
Orós	Orós	Zoneada com espaldares subsequentes de areia e de enrocamento	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Núcleo mais deformável que os espaldares	Trincas longitudinais no coroamento devido à diferença de rigidez entre os espaldares e o núcleo/ Região entre o núcleo e o espaldar de jusante com maior concentração de fissuramento devido ao diferencial de umedecimento
Patu	Senador Pompeu	Terra/enrocamento com núcleo argiloso semi-inclinado para montante	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Espaldares das extremidades de montante e de jusante mais deformáveis que o restante do barramento	Possibilidade de surgimento de trincas horizontais devido à maior deformabilidade do material do espaldar ser mais deformável que os materiais centrais/ Maior concentração de trincas entre o trecho de montante umedecido e parte do núcleo seco

Barragem	Localização	Seção Transversal	Cenário analisado	Concentração de deformações	Fissuramento provável
Serrote (Edson Queiroz)	Santa Quitéria	Zoneada com núcleo impermeável inclinado para montante	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Núcleo mais deformável que o restante do barramento	Fissuramento longitudinal devido à diferença de rigidez entre o núcleo e os espaldares do barramento
Trussu	Iguatu	Homogênea com dispositivo de drenagem interno	Umedecimento provocado pelo enchimento do reservatório	Maiores deformações na parte do barramento apoiada sobre o aluvião	Trincas originadas na superfície do barramento entre as regiões apoiadas sobre o aluvião e a região apoiada sobre o <i>cut-off</i>
			Umedecimento da fundação devido à elevação do nível d'água	Região de montante com maiores deformações que o trecho de jusante	Trincas longitudinais no coroamento devido à diferença de rigidez entre o material umedecido (montante) e o material seco (jusante)

Fonte: Autor (2023)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foi apresentada uma metodologia para previsão do fissuramento em barragens de terra localizadas no estado do Ceará, a partir de variações de rigidez nos materiais em decorrência do umedecimento do maciço. Para isso, foi feito o uso de análises numéricas com a associação entre os programas SLIDE 6.0 e a versão do UNSTRUCT desenvolvida por Silva Filho (1998).

Ressalta-se que nesse estudo não foram realizados ensaios laboratoriais para determinação dos parâmetros de entrada dos programas utilizados, sendo esses definidos a partir de valores usuais para solos classificados pelo SUCS, baseado nas recomendações da USBR, apresentados por Vieira *et al.* (1996). Já os ensaios de adensamento duplo, foram contemplados a partir de simulações realizadas a partir de módulos de elasticidade padrões de acordo com as determinações de Briaud (2013).

A partir das análises numéricas realizadas, foi possível determinar as deformações ocorridas nos maciços avaliados nesse trabalho. Observou-se que a partir do umedecimento, os materiais que apresentam maior deformabilidade, apresentam maiores variações de rigidez, e conseqüentemente maiores recalques. A variação de deformação entre os diferentes materiais que compõe os maciços é a responsável pela formação do fissuramento.

Notou-se também que os fissuramentos são função do tipo de seção transversal utilizado no barramento. Em barragens homogêneas, as trincas são originadas devido ao recalque diferencial proporcionado pela variação de umedecimento entre as regiões de jusante e montante. Já nas barragens zoneadas, a depender dos tipos de materiais, a fissuração é desencadeada devido à diferença de rigidez entre os materiais que compõe o núcleo e os que compõem os espaldares.

Constatou-se a partir dos cenários analisados que o enchimento do reservatório da barragem representa uma situação desencadeadora da formação do fissuramento, levando em consideração que devido ao enchimento do reservatório ocorre a molhagem diferencial do maciço, e conseqüente variação de deformação. Ademais, estudos vinculam a formação de trincas com o primeiro enchimento do reservatório, como é o caso da barragem do Trussu, que tem o seu fissuramento atribuído ao primeiro enchimento do reservatório, conforme relatos de Menescal (2015).

Também foi verificado que o funcionamento do sistema de drenagem de um barramento pode incentivar o início da formação das fissuras, devido ao rebaixamento da linha

freática que ocasiona o umedecimento diferencial das regiões de montante e jusante, mantendo o trecho de jusante com valores de poropressões próximos aos iniciais, enquanto que os valores da região de montante aumentam. As barragens zoneadas tem a variação de umedecimento entre a região de montante e jusante devido a diferença de permeabilidade dos materiais utilizados.

Enfatiza-se que o estudo em questão apresenta algumas limitações, como: a utilização de um modelo elástico-linear, que apesar de apresentar resultados satisfatórios para esse tipo de análise, não representa bem o comportamento de solos; o uso de valores usuais para representação dos materiais que compõem o barramento, tendo em vista que os solos são materiais anisotrópicos e heterogêneos.

No entanto, tornou-se razoável adotar essas premissas, tendo em vista que o objetivo principal desse trabalho era propor uma metodologia simplificada para a previsão do fissuramento em barragens de terra logo após a sua construção, e dessa forma propor ações corretivas e de monitoramento para prevenir o início de formação de fissuras.

Dessa forma, a utilização da versão do UNSTRUCT desenvolvida por Silva Filho (1998) associada ao uso do SLIDE 6.0 mostrou-se promissora para prever zonas de fissuramento em barragens de terra, tendo em vista que simulou os trechos potenciais de fissuramento das estruturas avaliadas nesse trabalho. Destacando-se pela forma simplificada de determinação dos parâmetros de entrada dos *softwares*, podendo avaliar os tipos de seções transversais possíveis para os barramentos já na concepção do projeto.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Finalizando o aprofundamento do estudo sobre fissuramento em barragens de terra, sugere-se as seguintes abordagens para trabalhos futuros:

- Estudo do fissuramento em barragens de terra homogêneas e de enrocamento com a utilização de *softwares* que utilizem uma abordagem acoplada, como, o CODE_BRIGHT, programa já utilizado para o estudo de outras problemáticas, como é o caso da avaliação do comportamento hidromecânico da barragem Cipoada feita por Abreu (2021);
- Utilização de modelos constitutivos elasto-plásticos para representação dos materiais do barramento;

- Análise do fissuramento nas mesmas barragens do Ceará, realizando ensaios laboratoriais para determinação das propriedades dos materiais, e dessa forma, demonstrando os resultados obtidos nesse estudo;
- Análise do fissuramento em barragens considerando uma análise de fluxo transiente, com as variações até o enchimento do reservatório e o rebaixamento rápido, avaliando as mudanças de poropressões a partir dessas variações.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. A. **Análise com acoplamento hidromecânico da barragem Cipoada (CE) considerando a influência de zonas não saturadas no comportamento do maciço compactado**. 2021. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- ALBERTI, Mauro Edson. **Um estudo de percolação em barragens de terra, em regimes transientes e permanente, com a aplicação do Método dos Elementos Finitos**. 1988. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- ALMEIDA, M. M. de. **Estudo tensão deformação de barragens de terra e enrocamento**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragem. **Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem**. Brasília: ANA, 2016.
- ARAÚJO, C. B. de. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ARAÚJO, J. A. de A (coord). **Barragens no Nordeste do Brasil: experiência do DNOCS em barragens na região Semi-Árida**. 2. ed. Fortaleza, DNOCS, 1990. 328 p.
- ARAÚJO, M. Z. T. **Barragens no Nordeste do Brasil: experiência do DNOCS em barragens na região Semi-Árida**. 3.ed.atual. Fortaleza: DNOCS, 2003. 330 p., il.color.
- BERRONES, R. F.; VASSILEV, V. H.; LIU, X. L. (ed.). **Geotecnia en ingeniería de presas**. México: IMTA, 2001. 587 p.
- BARBOSA, H. **Oito açudes estão em situação de alto risco no CE**. 2019. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/metro/oito-acudes-estao-em-situacao-de-alto-risco-no-ce-1.2055826> . Acesso em: 13 maio 2023.
- BRIAUD, J. **Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils**. John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- CAMAPUM de CARVALHO, J. C. de; GITIRANA JÚNIOR, G. de F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. dos A.; SILVA FILHO, F. C. da (org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.
- CAPRONI Jr, N.; d'ARMADA, J.C.R.; DALESSANDRO, P.R. **Barragem de enrocamento do AHE Corumbá: Relato de um pequeno incidente**. 22 Sem Nac. Grandes Barragens. São Paulo, Brasil, 1997.

CHRZANOWSKI, A. S.; MASSIÉRA, M. **Modeling of deformations during construction of a large earth dam in the La Grande Complex, Canada**. Canadian Centre for geodetic Engineering, University of New Brunswick, 2004.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Desenhos esquemáticos de recuperação: Barragem do Trussu**. Governo do Estado do Ceará, 2008.

CRUZ, P. T. da. **100 Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 647p.

DESAI, C. S.; CHRISTIAN, J. T. **Numerical methods in geotechnical engineering**. New York, (USA): McGraw-Hill, c1977. xiv, 783 p. (McGraw-Hill series in modern structures) ISBN 0070165424.

DIÁRIO DO NORDESTE. **Trussu apresenta rachaduras**. 2008. Redação. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/trussu-apresenta-rachaduras-1.550324>. Acesso em: 13 maio 2023.

GUIDICINI, G.; JARDIM, W. D. **Evolução da seção de barragens em açudes no Nordeste dos primórdios até o Orós**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 2021.

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S.; MELLO, F. **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021a. 208 p.

JENNINGS, J. E. B.; KNIGHT, K. **The additional Settlement of Foundations Due to Collapse Structure of Sandy Subsoil on Wetting**. Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, 1, 316-319, 1957.

JUSTIN, J. D. **Earth dam projects**. New York: John Wiley & Sons, 1932.

LEME, R. F. **Avaliação de uma metodologia para projeto de pequenas barragens de terra no semiárido: construção, ensaios e modelagem numérica**. 2015. 223 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

LÔBO NETO, J. B. **Um estudo experimental e numérico de solos compactados colapsíveis: aplicação em uma pequena barragem de terra**. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

MAHLER, C. F. **Estudo e aplicação do método dos elementos finitos a barragens de terra**. 1974. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1974.

MAIA, R. A. G. **Análise numérica de fissuramento em barragens de terra através da técnica de variação de rigidez**. 2022. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MARSAL, R. J.; NUÑES, D. R. **Presas de tierra y enrocamiento**. México: Limusa, 1975.

MENESCAL, R. de A. (org.). **A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: Proágua, 2005. 316 p.

MIRANDA, A. N. **Behavior of Small Dams During Initial Filling**. Tese de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins, 1988.

PEREIRA, J.H.F. (1986). **Simulação da Construção e Primeiro Enchimento do Reservatório de Barragens Zonadas de Terra e Enrocamento pelo Método dos Elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 150 p.

PESSOA, J.C.C.P. **Acidentes em barragens**. Anais do II Seminário Nacional de Grandes Barragens - Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - Sanevia, Rio de Janeiro, n° 26, maio/1964. p. 93-101.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de textos, 2021.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F.; CLEVINGER, W. A. **Earth and earth-rock dams: engineering problems of design and construction**. New York: Wiley, 1963.

SHERARD, J. L. **Influence of soil properties and construction methods on the performance of homogeneous earth dams**. USBR Tech Mem n° 645, 1953.

SILVA FILHO, F. C. da. **Análise numérica de problemas em solos não saturados: modelagem, implementação e aplicações práticas**. 1998. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil, Coope, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SILVA FILHO, F. C.; CERQUEIRA, F. A. Uma proposta de associação de análises de tensão-deformação e fluxo transiente usando elementos finitos. **Revista Tecnologia**, [S. l.], v. 25, n. 2, 2009. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/118>. Acesso em: 30 ago. 2023.

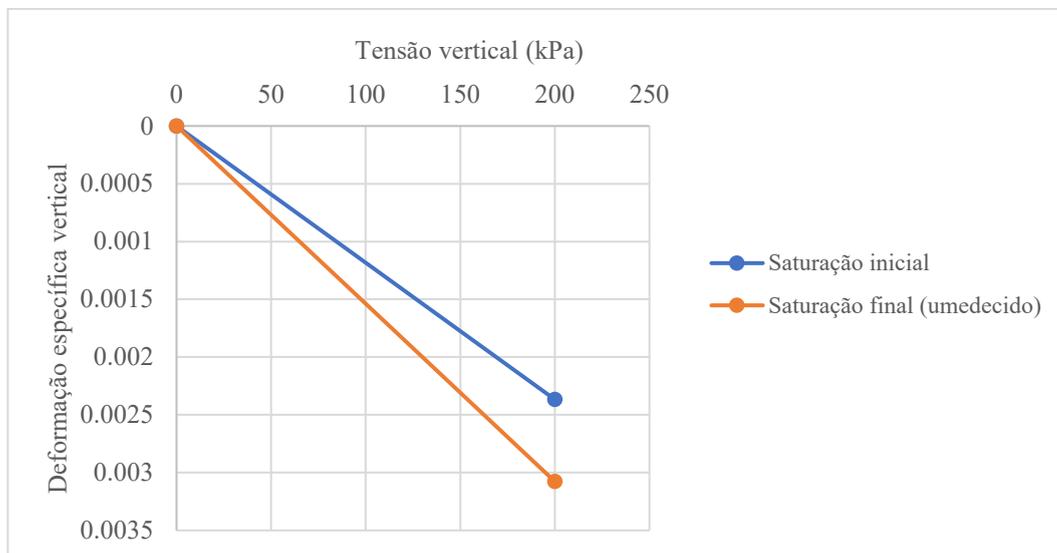
VARGAS, M.; HSU, S. J. C. **The use of vertical core drains in Brazilian earth dams**. X ICOLD Conf. Montreal, vol 01, 1970.

VIEIRA, V. P. P. B.; GOUVEIA NETO, A.; MIRANDA, A. N. de; MALVEIRA, V. T. C. **Roteiro para Projetos de Pequenos Açudes**. Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia, Fortaleza - CE, 1996.

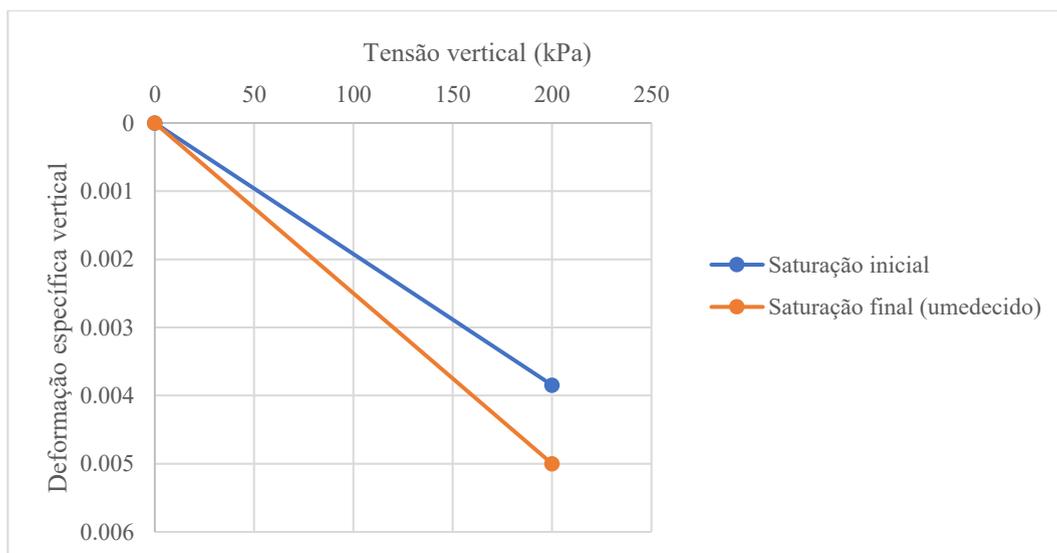
ZHANG, H.; JING, Y.; CHEN, J.; GAO, Z.; XU, Y. **Characteristics and causes of crest cracking on a high core-wall rockfill dam: a case study**. *Engineering Geology*, [S.L.], v. 297, p. 106488, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106488>.

APÊNDICE – SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO DUPLO

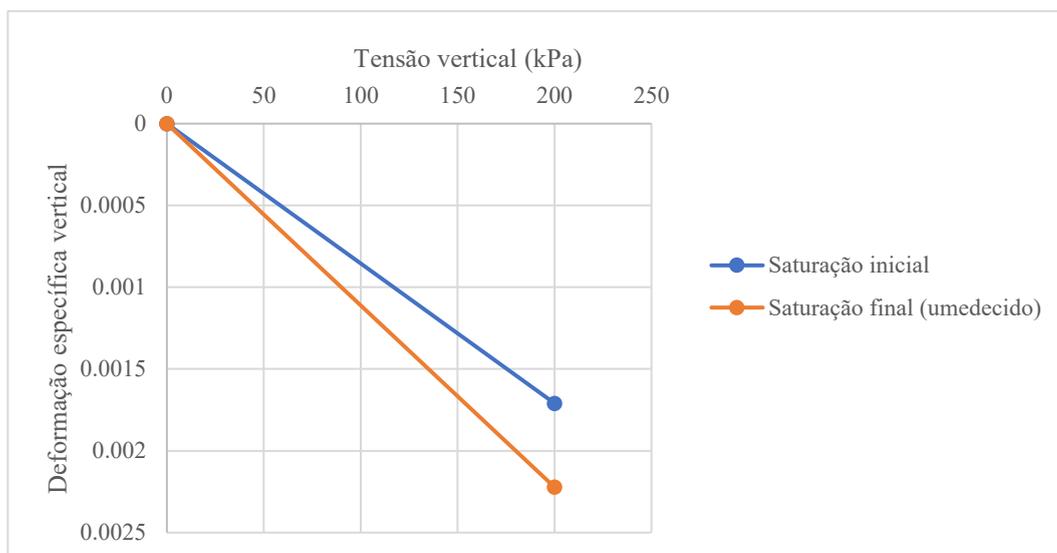
• Material arenoso



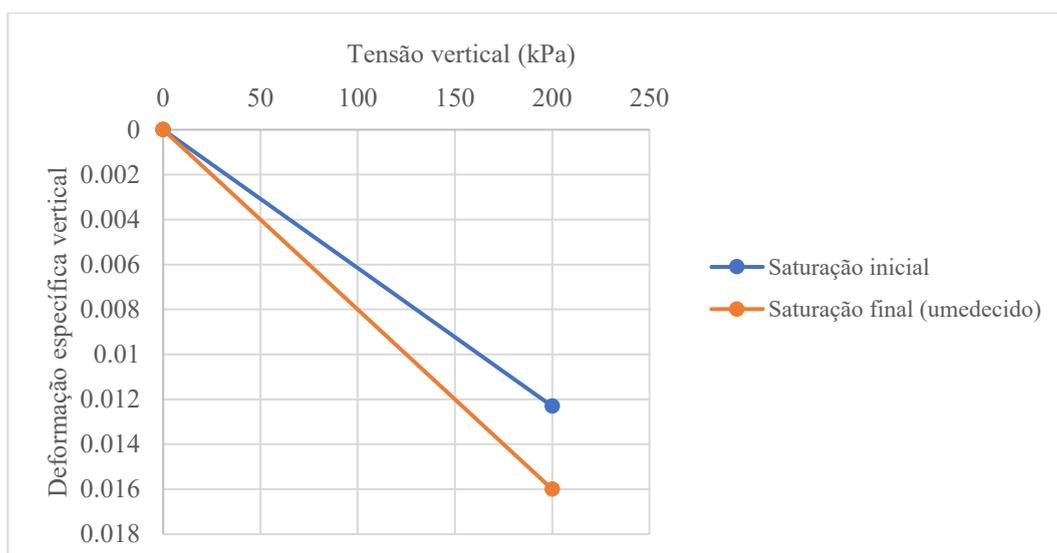
• Material silto-argiloso



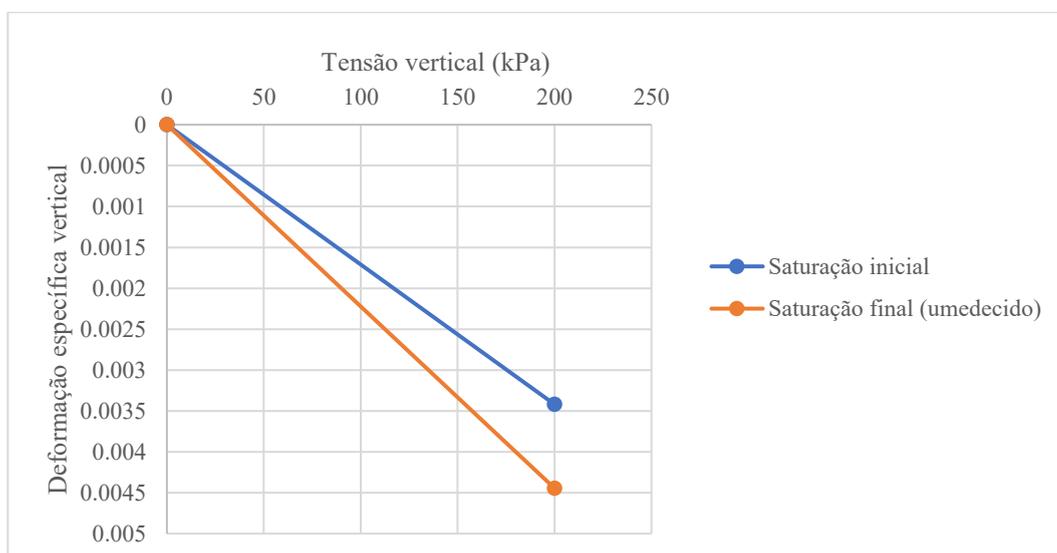
- Material pedregulhoso



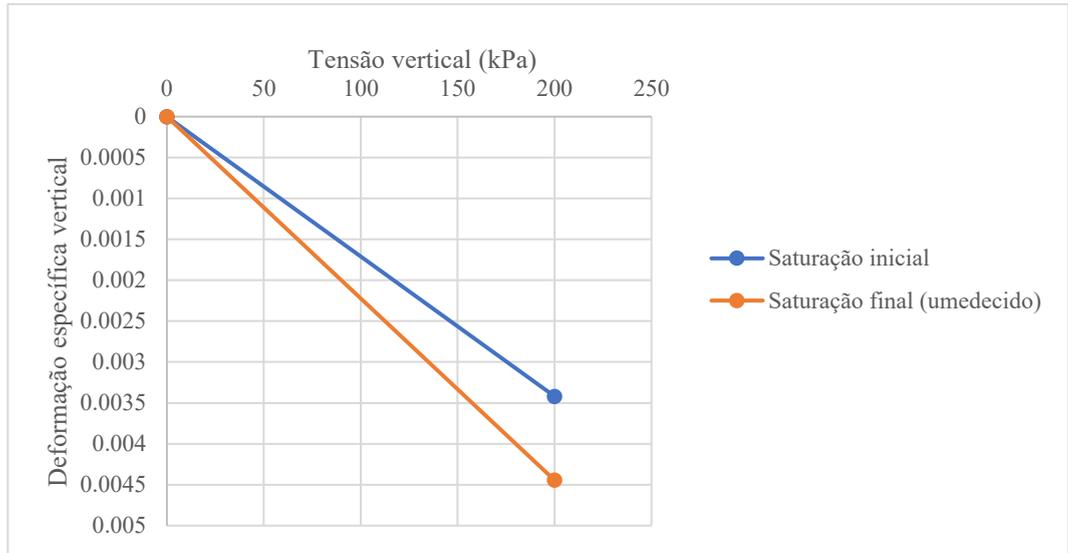
- Material siltooso



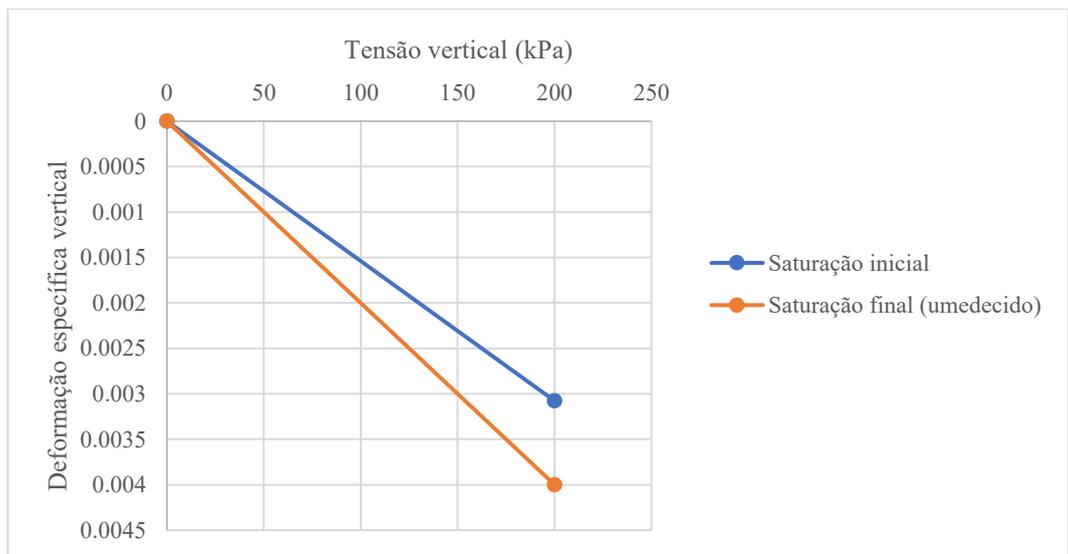
- Aluvião



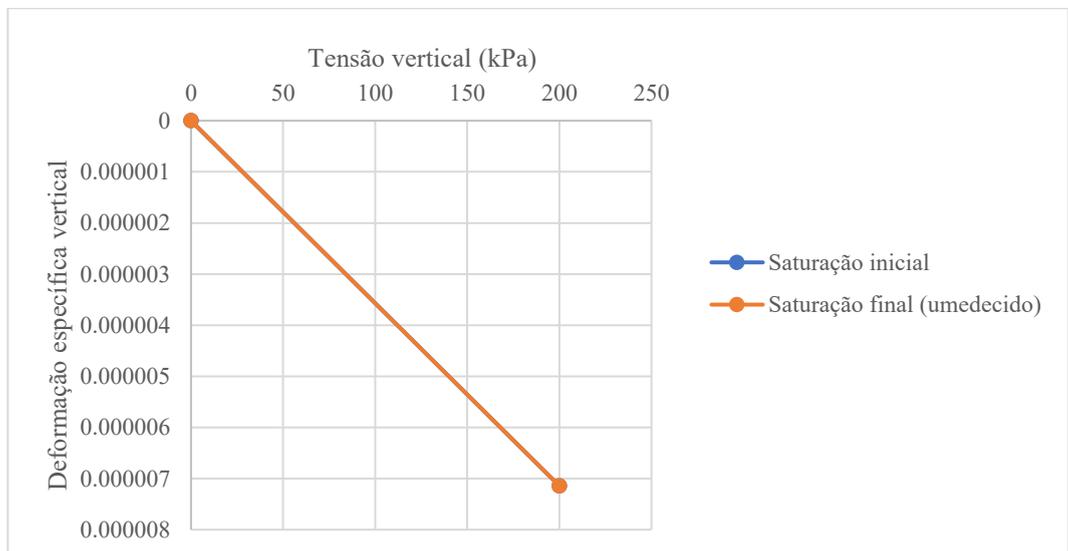
- Pedregulho argiloso



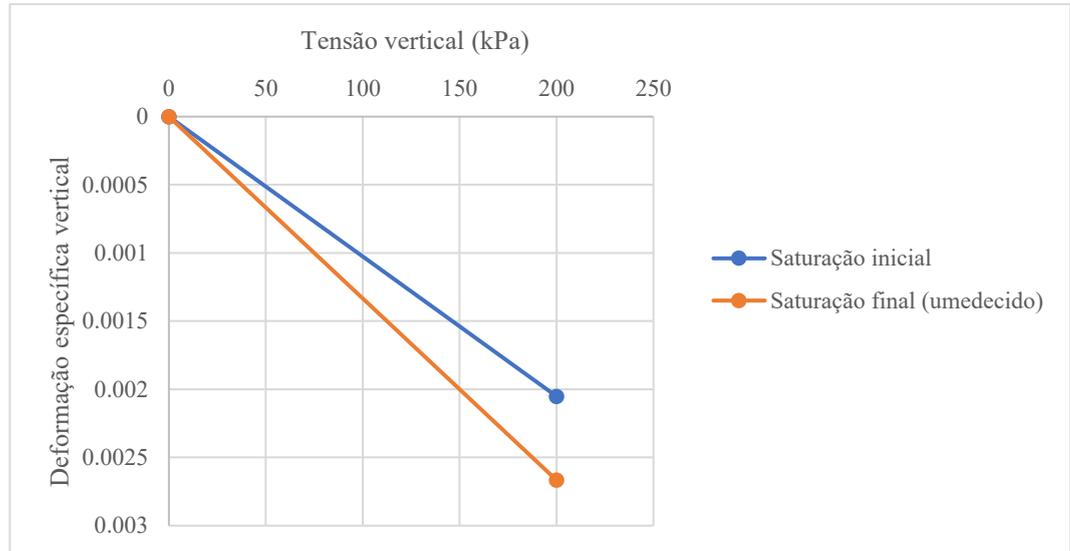
- Material com características argilosas, siltosas e arenosas



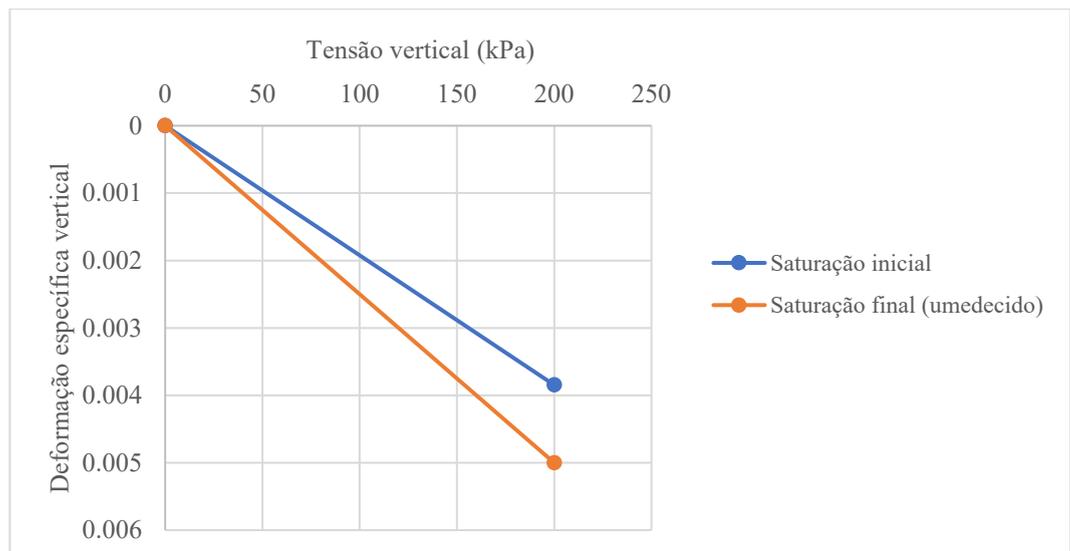
- Concreto



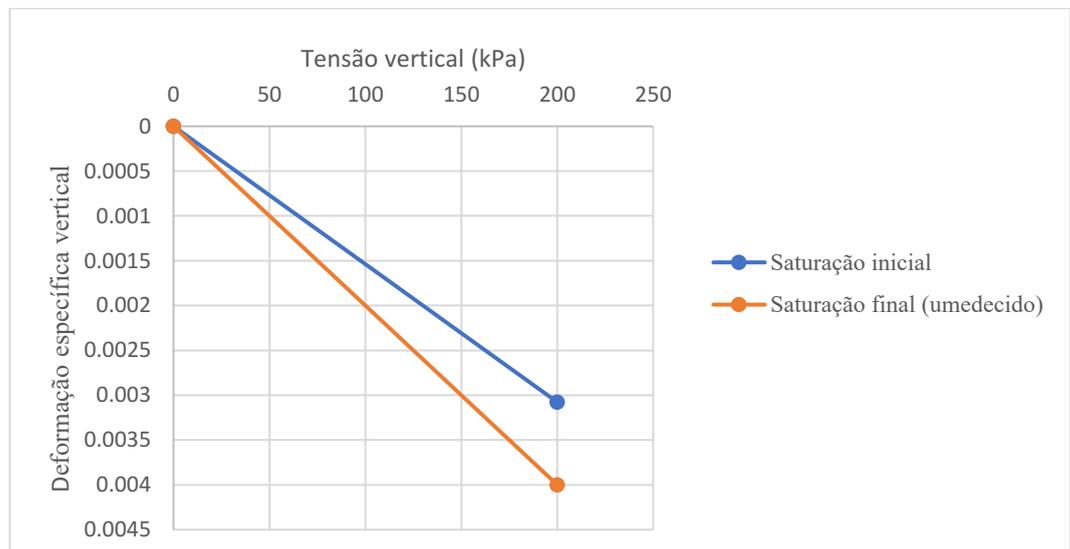
- Material argilo arenoso



- Material areno siltoso



- Material argiloso



- Material argiloso, arenoso e pedregulhoso

