

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EROSÃO INTERNA NA  
FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM UTILIZANDO  
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL**

**EGÍDIO BARROS MAZZA**

**ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO**  
**COORIENTADOR: FELIPE MARÇAL BARBOSA M. GÓIS**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA-DF, DEZEMBRO DE 2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EROÇÃO INTERNA NA  
FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM UTILIZANDO  
MODELAGEM TRIDIMENSIONAL**

**EGÍDIO BARROS MAZZA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)**

**(ORIENTADOR)**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)**

**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**ISABELLA MARIA MARTINS DE SOUZA, BSc (UnB)**

**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 14 DE DEZEMBRO DE 2020**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MAZZA, EGIDIO BARROS

Avaliação do Potencial de Erosão Interna na Fundação de uma Barragem Utilizando Modelagem Tridimensional

[Distrito Federal] 2020.

xii, 85 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2020)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Percolação

2. Gradiente Hidráulico

3. Modelagem Tridimensional

4. Erosão Interna e *Piping*

I. ENC/FT/UnB

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MAZZA, E.B. (2020). Avaliação do Potencial de Erosão Interna na Fundação de uma Barragem Utilizando Modelagem Tridimensional. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Egídio Barros Mazza

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do Potencial de Erosão Interna na Fundação de uma Barragem Utilizando Modelagem Tridimensional.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2020

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

---

Egídio Barros Mazza

SQNW 310, Bloco B, Apto. 520 – Setor Noroeste

70.687-210 - Brasília/DF – Brasil

## RESUMO

O Brasil possui o terceiro maior potencial hidrelétrico do mundo, perdendo apenas para China e Rússia. Por apresentar um potencial hídrico elevado, o país investiu desde cedo na construção de aproveitamentos hidrelétricos. Atualmente as usinas hidrelétricas correspondem à principal fonte de geração de energia elétrica do país. A construção de barragens se deu inicialmente pelas regiões Sul e Sudeste, que apresentam as maiores demandas, porém, migrou para as regiões Centro-Oeste e Norte à medida que estas regiões também foram se desenvolvendo. A construção de barragens nas regiões Centro-Oeste e Norte representa um grande desafio para a engenharia de barragens já que nessas regiões é comum a presença de condições geológicas desfavoráveis como a existência de rochas sedimentares muito permeáveis, camadas espessas de solos aluvionares e camadas de solos residuais, que podem ser problemáticos para o apoio das estruturas. Quando existem condições geológicas desfavoráveis, é importante que seja avaliado o potencial de ocorrência de erosão interna e *piping* na fundação, já que a erosão é uma das principais causas de rupturas em barragens. Essa avaliação geralmente é feita por simulações de fluxo bidimensionais, onde são calculados os gradientes hidráulicos na fundação, porém, em determinadas situações onde a geometria é mais complexa, pode ser necessária a realização de simulações tridimensionais. Nesse contexto foi feita uma análise de percolação tridimensional através da fundação de uma barragem que apresentava condições geológicas desfavoráveis, onde foi avaliado o potencial de erosão interna na fundação pelo cálculo dos gradientes hidráulicos de saída. Também foi feita uma análise bidimensional do mesmo problema, comparando os resultados de ambas. Foram observados fenômenos de fluxo tridimensionais que não podem ser verificados em análises bidimensionais, como a concentração de fluxo em regiões de menor cota e o acúmulo de fluxo nos vértices geométricos. Além disso, foram modeladas e analisadas algumas soluções de controle de gradientes para as saídas livres. Chegou-se a uma solução composta por laje à jusante da Casa de Força; chanfro ao pé da laje e das estruturas do Muro de Contenção e da Bacia de Dissipação; e filtro invertido com extensão de 15 m à jusante da laje. Acredita-se que essa solução irá minimizar o potencial de erosão na região mais crítica.

Palavras-Chave: Percolação, Gradiente Hidráulico, Modelagem Tridimensional, Erosão Interna e *Piping*.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO.....	2
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	ESCOPO.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	PERMEABILIDADE, FLUXO E FORÇAS DE PERCOLAÇÃO.....	4
2.1.1	Permeabilidade dos solos.....	4
2.1.2	Força de percolação.....	5
2.1.3	Tensões no solo e gradiente crítico.....	5
2.2	FLUXOS BI E TRIDIMENSIONAIS.....	7
2.3	METODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	9
2.4	EROSÃO INTERNA E <i>PIPING</i> .....	10
2.4.1	Processos de erosão interna e <i>Piping</i> .....	11
2.4.2	Erosão por vazamento concentrado.....	14
2.4.3	Erosão Regressiva.....	15
2.4.4	Erosão por Sufusão.....	19
2.4.5	Erosão por contato.....	22
3	CONDIÇÕES GERAIS DA USINA.....	23
3.1	GEOMETRIA DO PROBLEMA.....	23
3.2	BARRAGEM DE TERRA.....	26
3.3	CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO.....	30
4	METODOLOGIA.....	36
5	ANÁLISES E RESULTADOS.....	45
5.1	ANÁLISES DE VALIDAÇÃO DO MODELO.....	45

5.1.1	Influência da extensão do reservatório à montante .....	45
5.1.2	Influência da permeabilidade.....	49
5.1.3	Influência da profundidade “d” do modelo .....	52
5.1.4	Extensão do modelo e estabilização da malha.....	57
5.1.5	Comparação com a análise bidimensional.....	61
5.2	SOLUÇÕES PARA O CONTROLE DO GRADIENTE NA SAÍDA DA CASA DE FORÇA.....	68
6	CONCLUSÃO.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$A$	Área da seção transversal na qual se desenvolve o fluxo;
EDP	Equação Diferencial Parcial;
$F$	Força de arraste;
$H$	Profundidade na qual o solo se encontra;
$h$	Carga hidráulica;
$i$	Gradiente hidráulico;
ICOLD	Comitê Internacional de Grandes Barragens;
$i_{cr}$	Gradiente crítico;
$J$	Força de percolação;
$k$	Coefficiente de permeabilidade;
$L$	Distância ao longo da qual a carga é dissipada;
MEF	Método dos Elementos Finitos;
$Q$	Vazão;
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers;</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation;</i>
$v$	Velocidade de percolação;
$\gamma_{sub}$	Peso específico submerso do solo;
$\gamma_w$	Peso específico da água;
$\sigma'$	Tensão efetiva;

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Estatísticas de Falhas para Barragens de Aterro (ICOLD, 2017) .....	10
Tabela 2-2: Estatísticas Gerais de Falhas em Barragens de Aterro (USBR e USACE, 2019 adaptado de Fell et al. 1998, 2000).....	10
Tabela 3-1: Parâmetros de Classificação de Rochas. ....	34
Tabela 4-1: Coeficientes de Permeabilidade Adotados para os Materiais Utilizados nas Análises. ....	36
Tabela 5-1: Resultado das Análises de Extensão do Reservatório.....	48
Tabela 5-2: Resultado das Análises de Influência da Permeabilidade. ....	51
Tabela 5-3: Resultados das Análises de Influência da Profundidade.....	54
Tabela 5-4: Resultados das Análises de Extensão do Modelo e Estabilização da Malha. ....	58
Tabela 5-5: Resultados dos Gradientes na Casa de Força. ....	76
Tabela 5-6: Resultado dos Gradientes no Muro de Contenção. ....	77
Tabela 5-7: Resultado dos Gradientes na Bacia de Dissipação.....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Percolação na Fundação de Barragens (PINTO, 2011).....	6
Figura 2-2: Fluxo Através de um Elemento (DAS e SOBHAN, 2014). ....	7
Figura 2-3: Erosão Interna pelo Aterro (FELL et al., 2015).....	12
Figura 2-4: Erosão Interna Pela Fundação (FELL et al., 2015). ....	12
Figura 2-5: Erosão Interna do Aterro pela Fundação (FELL et al., 2015). ....	13
Figura 2-6: Destacamento e Transporte de Partículas na Erosão por Vazamento Concentrado (FELL et al., 2015). ....	14
Figura 2-7: Vazamento Concentrado em uma Barragem (FELL et al., 2015).....	15
Figura 2-8: Modelo de Erosão Regressiva por Piping (FELL et al., 2015 adaptado de SELLMUIJER et al., 2011).....	16
Figura 2-9: Cone de Areia à jusante de uma Barragem (ICOLD, 2017).....	17
Figura 2-10: Erosão Regressiva Global em Solos ao Redor de Defeito em Conduto não Pressurizado (FEMA, 2005).....	18
Figura 2-11: Erosão Regressiva Global em Ensaio de Laboratório (FRY, 2016).....	18
Figura 2-12: Curvas Granulométricas de Solos Potencialmente Internamente Instáveis (FELL et al., 2015 adaptado de ZIEMS, 1969).....	19
Figura 2-13: Esquema do Processo de Sufusão (FELL et al., 2015 adaptado de ZIEMS, 1969). ....	20
Figura 2-14: Disposição Espacial das Partículas em Solos Internamente Estáveis e Instáveis (Fell et al., 2015). ....	21
Figura 2-15: Processo de Erosão por Contato (ICOLD, 2017). ....	22
Figura 2-16: Potenciais Consequências da Erosão por Contato (ICOLD, 2017 adaptado de BEGUIN, 2011).....	22
Figura 3-1: Arranjo Geral da Usina.....	24
Figura 3-2: Detalhe das Estruturas. ....	25
Figura 3-3: Seção Típica.....	27

Figura 3-4: Detalhe 1.....	28
Figura 3-5: Detalhe 2.....	29
Figura 3-6: Detalhe 3.....	29
Figura 3-7: Localização das Sondagens Executadas. ....	30
Figura 3-8: Testemunho da Sondagem SM-302.....	32
Figura 3-9: Testemunho da Sondagem SM-305.....	33
Figura 3-10: Seção Geológico-Geotécnica Pelo Eixo da Casa de Força.....	35
Figura 4-1: Edição de um dos Sólidos Estudados no Módulo BUILD3D. ....	38
Figura 4-2: Vista do Último Sólido Analisado com as Estruturas. ....	39
Figura 4-3: Malha de Elementos Finitos Gerada para um dos Sólidos Analisados. ....	40
Figura 4-4: Malha de Elementos Finitos Gerada para um dos Sólidos Analisados - Detalhe das Regiões de Menor Interesse.....	40
Figura 4-5: Malha de Elementos Finitos Gerada para um dos Sólidos Analisados - Detalhe da Região de Maior Interesse. ....	41
Figura 4-6: Resultado de Carga Hidráulica para uma das Análises Realizadas.....	41
Figura 4-7: Resultado de Gradientes Hidráulicos para uma das Análises Realizadas. ....	42
Figura 4-8: Locations Utilizadas para a Geração dos Gráficos - Detalhe 1 .....	43
Figura 4-9: Locations Utilizadas para a geração dos Gráficos - Detalhe 2 .....	43
Figura 5-1: Primeiro Sólido Analisado.....	46
Figura 5-2: Sólido com Reservatório Estendido.....	46
Figura 5-3: Primeiro Sólido Analisado – Corte.....	47
Figura 5-4: Sólido Estendido – Corte.....	47
Figura 5-5: Resultado das Análises de Extensão do Reservatório. ....	48
Figura 5-6: Resultado de Carga Hidráulica Obtido para a Análise de Permeabilidade de $3,1 \cdot 10^{-7}$ m/s.....	50

Figura 5-7: Resultado de Gradientes Hidráulico Obtido para a Análise de Permeabilidade de $3,1 \cdot 10^{-7}$ m/s. ....	50
Figura 5-8: Resultado das Análises de Permeabilidade. ....	51
Figura 5-9: Modelo com Profundidade de 100m.....	53
Figura 5-10: Modelo com Profundidade de 130 m. ....	53
Figura 5-11: Carga Hidráulica para o Modelo de 100 m.....	55
Figura 5-12: Gradiente Hidráulico para o Modelo de 100 m. ....	55
Figura 5-13: Carga Hidráulica para o Modelo de 130 m.....	56
Figura 5-14: Gradiente Hidráulico para o Modelo de 130 m. ....	56
Figura 5-15: Resultados das Análises de Profundidade. ....	57
Figura 5-16: Modelo Estendido na Direção da Barragem da Margem Esquerda.....	58
Figura 5-17: Resultados das Análises de Extensão do Modelo e Regularização da Malha. ....	60
Figura 5-18: Seção Utilizada na Análise Bidimensional.....	61
Figura 5-19: Gradientes Hidráulicos Obtidos na Análise Bidimensional. ....	62
Figura 5-20: Resultado do Gradiente na Saída da Casa de Força. ....	62
Figura 5-21: Comparação Entre os Resultados das Análises Bidimensional e Tridimensional. ....	63
Figura 5-22: Componente na Direção y dos Vetores de Gradiente Hidráulico na Região da Casa de Força. ....	64
Figura 5-23: Componente nas Direções x e z dos Vetores de Gradiente Hidráulico na Região da Casa de Força.....	65
Figura 5-24: Resultado de Carga Hidráulica para o Modelo Final.....	66
Figura 5-25: Resultado do Gradiente Hidráulico para o Modelo Final. ....	66
Figura 5-26: Resultado do Gradiente Hidráulico para o Modelo Final - Detalhe 1. ....	67
Figura 5-27: Resultado do Gradiente Hidráulico para o Modelo Final - Detalhe 2. ....	67
Figura 5-28: Croqui da Primeira Solução Adotada. ....	69

Figura 5-29: Modelagem Tridimensional da Solução 1. ....	69
Figura 5-30: Vista dos Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Primeira Solução. ....	70
Figura 5-31: Corte Passando Pelo Eixo da Casa de Força com os Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Primeira Solução. ....	70
Figura 5-32: Croqui da Segunda Solução Adotada. ....	71
Figura 5-33: Modelagem Tridimensional da Solução 2. ....	72
Figura 5-34: Vista dos Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Segunda Solução. ....	72
Figura 5-35: Corte Passando Pelo Eixo da Casa de Força com os Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Segunda Solução. ....	73
Figura 5-36: Croqui da Terceira Solução Adotada. ....	74
Figura 5-37: Modelagem Tridimensional da Solução 3. ....	74
Figura 5-38: Vista dos Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Terceira Solução. ....	75
Figura 5-39: Corte Passando Pelo Eixo da Casa de Força com os Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Terceira Solução. ....	75
Figura 5-40: Resultados dos Gradientes na Casa de Força. ....	80
Figura 5-41: Resultados dos Gradientes no Muro de Contenção. ....	81
Figura 5-42: Resultados dos Gradientes na Bacia de Dissipação. ....	81

# 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das mais amplas, densas, diversificadas e extensas redes fluviais de todo o mundo. Dispõe de aproximadamente 13% de toda a água doce do planeta e apresenta o terceiro maior potencial hidrelétrico do mundo, perdendo apenas para China e Rússia. A precipitação média anual na América do Sul é de 1.600 mm (aproximadamente o dobro da precipitação média anual nos demais continentes) e, no Brasil, é de 1.800 mm (PEREIRA, 2015). Todos esses fatores levaram o Brasil a investir nos Aproveitamentos Hidrelétricos como sua principal fonte de geração de energia.

Uma das estruturas mais comuns existentes em Aproveitamentos Hidrelétricos são as Barragens, as quais são construídas em cursos hídricos para armazenamento de grandes quantidades de água. Essa água pode ser destinada a diversas finalidades, como consumo humano, irrigação, geração de energia, regularização de rios, controle de cheias, navegação, entre outros. Tais estruturas são classificadas, na maioria das vezes, como sendo de concreto ou de aterro em solo e enrocamento, e são assentes em diferentes tipos de fundação.

A construção de barragens no Brasil se deu inicialmente pelas regiões Sul e Sudeste. Devido à maior demanda energética nessas regiões, à facilidade de acesso e ao alto potencial de geração contido nos rios dessas regiões, desde a década de 60 foram construídos diversos empreendimentos destinados a atender à demanda sempre crescente. Naturalmente, os locais com potencial de geração foram se esgotando e, aliando isso ao desenvolvimento social e econômico das demais regiões do país, começou-se a pesquisar por outros locais viáveis para a construção de barragens, fazendo com que os projetos migrassem principalmente para as regiões Centro-Oeste e Norte (GÓIS, 2015).

Nessas regiões, como é comum das obras de engenharia, foram encontradas diferentes condições de projetos que proporcionaram novos desafios para a engenharia de barragens brasileira. Dos diferentes aspectos que tornam os projetos mais desafiadores pode-se citar, principalmente, as características desfavoráveis de fundação. Nas regiões Centro-Oeste e Norte é comum a presença de rochas sedimentares extremamente permeáveis, como o arenito, e camadas espessas de solos aluvionares. Além disso é comum também a presença de camadas de solos residuais, estes solos, sendo tropicais, podem possuir porosidades elevadas e podem ser colapsíveis, sendo problemáticos como apoio para as fundações.

A construção de barragens sobre fundações que apresentam características geológicas e geotécnicas desfavoráveis constitui um dos mais importantes desafios da engenharia de barragens. Pereira (2020) cita dois estudos realizados sobre rupturas de barragens. O primeiro é um estudo elaborado pelo *United States Bureau of Reclamation* (USBR) em 1983, o qual investigou as causas mais frequentes de rupturas de barragens nos Estados Unidos. Nesse estudo 40% das rupturas estavam relacionadas a problemas na fundação. Outro estudo, *Dam Failures – Statistical Analysis*, elaborado pela Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) em 1995 apontou que:

- Em barragens de concreto, 42% das rupturas são devidas a problemas na fundação;
- Em barragens de terra e enrocamento, 28% das rupturas são devidas a erosão interna do corpo da barragem e 17% à erosão nas fundações; e
- Em barragens de alvenaria, 29% das rupturas são devidas a erosão nas fundações.

Como pode ser visto nos resultados obtidos pelos estudos, a erosão nas fundações é uma das principais causas de rupturas de barragens.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A principal maneira que é utilizada para avaliar o potencial de ocorrência de erosão na fundação das barragens é a realização de simulações de fluxo, onde são calculados os gradientes hidráulicos na fundação. Essas análises geralmente são realizadas de forma bidimensional utilizando programas de elementos finitos. Porém, em determinadas situações onde a geometria é mais complexa, os modelos bidimensionais podem trazer uma série de imprecisões, já que não levam em consideração os efeitos tridimensionais de fluxo que possam surgir. Uma alternativa para tornar mais precisa a análise nesses casos é a realização de simulações tridimensionais.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe-se a realizar uma análise de percolação tridimensional através da fundação de uma barragem, avaliando os potenciais de erosão na região estudada e propondo soluções para o controle dos gradientes nas regiões de saída livre. Propõe-se também realizar análises de percolação bidimensional do mesmo problema, fazendo uma comparação entre os resultados obtidos em ambas as análises.

Como caso de estudo, utilizou-se como exemplo o projeto de um Aproveitamento Hidrelétrico cujas condições geológicas da fundação eram desfavoráveis. As análises de percolação foram realizadas utilizando os programas de elementos finitos SEEP/W e SEEP/3D, que são capazes de realizar simulações bi e tridimensionais.

## **1.2 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma análise de ocorrência de erosão interna através da fundação de uma barragem utilizando modelagem tridimensional. Para isso serão investigados os resultados de gradientes hidráulicos obtidos das análises, avaliando assim o potencial de ocorrência de erosão interna e *piping* nas regiões mais críticas. Será realizada também uma análise bidimensional da mesma região estudada pela análise tridimensional. Os resultados de ambas as análises serão comparados, realizando avaliações qualitativas e quantitativas dos produtos obtidos. A partir do que for verificado, pretende-se apresentar as principais diferenças entre as análises bi e tridimensionais determinado em quais situações elas devem ou não ser utilizadas. Os objetivos específicos são:

- Revisar a teoria sobre percolação em meios porosos, método dos elementos finitos e erosão interna e *piping*;
- Entender o funcionamento do software de elementos finitos, estabelecendo diretrizes para a calibração do modelo; e
- Modelar e verificar a eficácia de algumas soluções de controle de gradiente hidráulico em saídas livres no software tridimensional.

## **1.3 ESCOPO**

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No Capítulo 1 são apresentadas a motivação e os objetivos do trabalho. No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, que contempla a teoria a respeito da percolação em meios porosos, dos elementos finitos e sobre os fenômenos da erosão interna e do *piping*. No Capítulo 3 são apresentadas as condições gerais da usina analisada, como arranjo, seção típica da barragem e condições de fundação. No Capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento das análises. No Capítulo 5 são apresentadas as análises e os resultados obtidos em cada etapa. Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões alcançadas por meio das análises.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo será destinado à revisão bibliográfica a respeito da percolação em meios porosos, sobre o método dos elementos finitos e sobre os principais conceitos relacionados à erosão interna e *piping*. Serão apresentados os principais conceitos relacionados aos temas, essenciais para o entendimento do que será realizado.

### 2.1 PERMEABILIDADE, FLUXO E FORÇAS DE PERCOLAÇÃO

Em análises que envolvem barragens a água é a substância que ocupa a maior parte dos vazios do solo. Quando ela é submetida a diferenças de potencial pode deslocar-se no interior dos maciços. O estudo das condições de percolação nos solos e nas rochas é de extrema importância pois ela intervém em problemas geotécnicos como cálculo de vazões, análise de recalques e nos estudos de estabilidade (PINTO, 2011).

#### 2.1.1 Permeabilidade dos solos

Em 1850 Henry Darcy estudou como diversos fatores geométricos influenciavam a vazão da água em solos. A partir de seus estudos foi desenvolvida a equação que ficou conhecida como Lei de Darcy:

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \quad (2.1)$$

Nessa equação  $Q$  representa a vazão,  $k$  é uma constante para cada tipo de solo, chamada de coeficiente de permeabilidade,  $A$  é a área da seção transversal na qual o fluxo se desenvolve,  $h$  é a carga hidráulica dissipada na percolação e  $L$  é a distância ao longo da qual a carga se dissipa. A relação  $\frac{h}{L}$  recebe o nome de gradiente hidráulico, expresso pela letra  $i$ . Sendo assim a Lei de Darcy assume o formato:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.2)$$

A vazão dividida pela área indica a velocidade de percolação  $v$ . Pode-se então escrever:

$$v = k \cdot i \quad (2.3)$$

A partir da Equação 2.3 é possível notar que o coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente é igual a 1. Quanto menor o número de vazios no

solo, menor será o valor do coeficiente de permeabilidade, ou seja, uma argila terá um coeficiente de permeabilidade menor que um silte, que terá um coeficiente menor que uma areia fina e assim sucessivamente.

### 2.1.2 Força de percolação

A carga hidráulica  $h$  é dissipada por atrito viscoso na percolação através dos vazios do solo. Por ser uma energia dissipada por atrito, ela provoca uma força de arraste na direção do movimento. Essa força atua nas partículas de forma a carregá-las. A força dissipada é dada por:

$$F = h \cdot \gamma_w \cdot A \quad (2.4)$$

Onde  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

Em um fluxo uniforme, a força é dissipada uniformemente em todo o volume de solo. Dessa forma, a força por unidade de volume pode ser dada por:

$$J = \frac{h \cdot \gamma_w \cdot A}{A \cdot L} = \frac{h}{L} \cdot \gamma_w = i \cdot \gamma_w \quad (2.5)$$

Onde  $J$  recebe o nome de força de percolação, que é igual ao produto do gradiente hidráulico pelo peso específico da água. A força de percolação é uma grandeza semelhante ao peso específico, atuando da mesma forma que a força gravitacional. As duas se somam quando atuam no mesmo sentido e se subtraem quando atuam em sentidos contrários.

### 2.1.3 Tensões no solo e gradiente crítico

Quando há percolação no solo, deve ser considerada a força de percolação no cálculo da tensão efetiva. Considerando um fluxo que ocorre na direção vertical, a tensão efetiva  $\sigma'$  pode ser calculada pela expressão:

$$\sigma' = H \cdot (\gamma_{sub} \pm J) \quad (2.6)$$

Onde  $H$  é a profundidade na qual o solo se encontra e  $\gamma_{sub}$  é o peso específico submerso do solo. A expressão assume o sinal negativo se o fluxo for de baixo para cima e positivo se for de cima para baixo.

Caso o fluxo ocorra de baixo para cima, à medida que se aumenta a carga progressivamente, conseqüentemente aumentando o gradiente hidráulico, a tensão efetiva no solo irá diminuir até

se tornar nula, já que a ação da força de percolação se contrapõe à força gravitacional. Quando isso ocorre, as forças transmitidas de grão em grão se tornam zero, ou seja, os grãos não transmitem forças pelos pontos de contato. Em solos não coesivos, quando a tensão efetiva vai à zero o material perde completamente a resistência e ocorre um fenômeno denominado liquefação. O valor de gradiente que conduz à tensão efetiva nula é dado pela expressão:

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (2.7)$$

Esse valor de gradiente é chamado de gradiente crítico. Seu valor é da ordem de 1, já que o peso específico submerso dos solos é da ordem do peso específico da água.

Em barragens, a água do reservatório se infiltra pelas fundações e percorre um caminho horizontal emergindo à jusante, como mostrado na Figura 2-1, nesta figura o barramento é considerado impermeável.

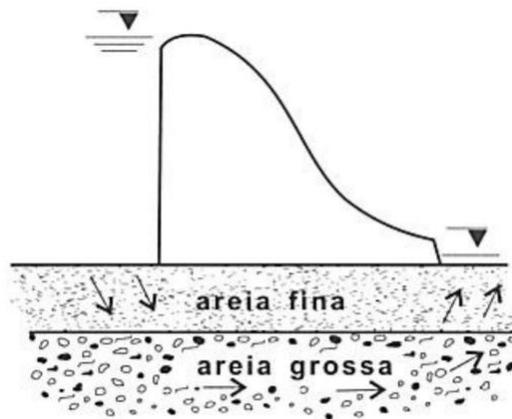


Figura 2-1: Percolação na Fundação de Barragens (PINTO, 2011).

No movimento ascendente da água à jusante, o gradiente pode atingir o valor crítico fazendo com que o material perca resistência, comprometendo assim as condições estruturais da barragem. Quando a perda de resistência se inicia em um ponto ocorre erosão nesse local, o que provoca um aumento do fluxo na região e um aumento do gradiente, causando maior erosão e assim por diante. Esse fenômeno é conhecido como erosão regressiva, e é uma das principais causas de rupturas de barragens. Como os solos são materiais heterogêneos é normal considerar um fator de segurança alto para esse tipo de fenômeno (PINTO, 2011). Os fenômenos da erosão regressiva e do *piping* serão abordados com mais detalhes nos próximos itens.

## 2.2 FLUXOS BI E TRIDIMENSIONAIS

O fluxo visto nos itens anteriores é chamado de fluxo unidimensional, já que ocorre sempre na mesma direção. Quando as partículas de água se deslocam em qualquer direção o fluxo é denominado tridimensional e quando as partículas de água seguem caminhos curvos contidos em planos paralelos o fluxo é denominado bidimensional. Considerando que o elemento de solo com dimensões  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  mostrado na Figura 2-2 é submetido a um fluxo tridimensional.

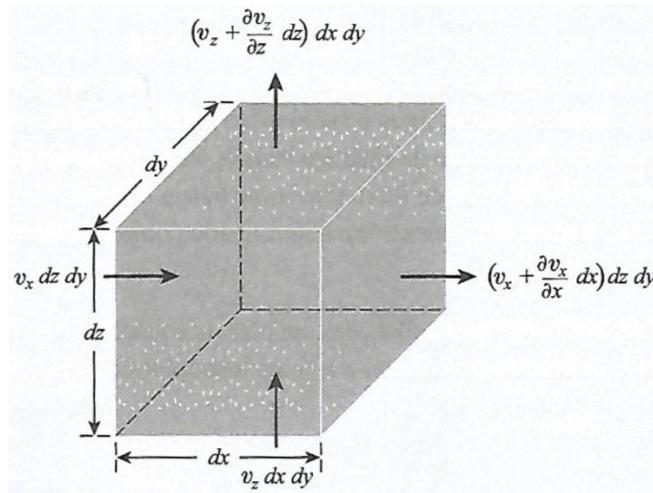


Figura 2-2: Fluxo Através de um Elemento (DAS e SOBHAN, 2014).

$v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  são as componentes da velocidade de percolação nas três direções. A vazão de água para dentro do elemento nas três direções é dada por:

$$v_x dz dy \quad (2.8)$$

$$v_y dz dx \quad (2.9)$$

$$v_z dx dy \quad (2.10)$$

As vazões de saída nas três direções são dadas por:

$$\left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) dz dy \quad (2.11)$$

$$\left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) dz dx \quad (2.12)$$

$$\left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) dx dy \quad (2.13)$$

Considerando que a água é incompressível e que não ocorre alteração no volume do elemento pode-se afirmar que a vazão de entrada deve ser igual à vazão de saída, então:

$$\left[ \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} d_x \right) d_z d_y + \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} d_y \right) d_z d_x + \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} d_z \right) d_x d_y \right] - [v_x d_z d_y + v_y d_z d_x + v_z d_x d_y] = 0 \quad (2.14)$$

Simplificando a equação tem-se que:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

Considerando uma carga hidráulica  $h$  no centro do elemento, pela Lei de Darcy pode-se expressar as velocidades de percolação como:

$$v_x = k_x i_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$v_y = k_y i_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.17)$$

$$v_z = k_z i_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.18)$$

Substituindo as Equações 2.16, 2.17 e 2.18 na Equação 2.15 obtêm-se a equação para o fluxo tridimensional:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.19)$$

Se for considerado que não há percolação na direção  $y$  (fluxo bidimensional) e que o solo é isotrópico ( $k_x = k_y = k_z$ ), a equação reduz-se a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.20)$$

Onde a Equação 2.20 é conhecida como Equação de Laplace. O fato de a equação básica do fluxo bidimensional ser uma Equação de Laplace significa que as linhas de fluxo interceptam ortogonalmente as linhas equipotenciais na formação de redes de fluxo (PINTO, 2011).

### 2.3 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma abordagem numérica para a solução de problemas de valor sobre o contorno, nos quais as variáveis são variáveis dependentes e estão relacionadas à uma Equação Diferencial Parcial (EDP) que governa o problema (GEOSLOPE, 2020). A EDP é geralmente obtida aplicando o princípio da conservação (conservação de massa, por exemplo) em um volume de controle de dimensões finitas. O princípio da conservação relaciona as propriedades armazenadas no interior do volume de controle (massa, por exemplo) com o fluxo (transporte de massa, por exemplo) para dentro ou para fora deste volume. Em problemas de Geotecnia, o domínio trata-se de um volume específico de material geológico com propriedades conhecidas que se deseja estudar, o volume de controle representa o menor volume deste domínio no qual as propriedades do material podem ser definidas, e é chamado de Elemento.

A solução no MEF é o valor das variáveis dependentes em função do espaço (e do tempo em análises transientes). A solução é definida pelas condições de contorno especificadas no entorno do domínio. Segundo *Geoslope* (2020) essas condições de contorno podem ser de três tipos, que são:

- (1) Um valor específico da variável dependente;
- (2) Uma derivada espacial da variável dependente; e
- (3) Uma outra variável que é função da variável dependente.

O MEF é baseado no princípio da discretização, no qual o domínio é dividido em uma série de volumes de controle que são os Elementos Finitos. Quanto maior a quantidade de elementos mais preciso é o resultado. Para cada elemento existe uma Função de forma que especifica como é a distribuição da variável no interior do elemento. Consequentemente, o valor da variável no interior dos elementos será função dos valores da variável nos nós. A discretização do domínio possibilita a solução da EDP de uma maneira semi-contínua, isso é feito por uma série de equações que são resolvidas utilizando álgebra linear.

Segundo *Geoslope* (2020) um passo a passo do Método dos Elementos Finitos pode ser definido como:

1. Discretização do domínio em elementos finitos;
2. Seleção de uma função de forma que descreva como a variável dependente se comporta no interior do elemento;
3. Definição da EDP que governa o problema;
4. Derivação das equações lineares que satisfazem a EDP para cada elemento;
5. Montagem das equações de cada elemento em uma equação global que leva em conta as condições de contorno; e
6. Solução da equação global.

## 2.4 EROSÃO INTERNA E PIPING

A erosão interna é uma das mais importantes causas de rupturas e acidentes em barragens. O Boletim 164 da ICOLD (2017) e o capítulo D-6 do manual *Best Practices for Dam and Levee Safety Risk Analysis* (USBR e USACE, 2019) apresentam estatísticas de acidentes e rupturas relacionados à erosão interna em barragens de aterro. Essas estatísticas são derivadas de uma série de trabalhos realizados por Foster *et al.* (1998, 2000) e Engemoen *et al.* (2009, 2011, 2012) Alguns dos dados apresentados por esses estudos, que mostram a importância da erosão interna em relação a outras potenciais causas de rupturas são mostrados nas Tabelas 2-1 e 2-2.

Tabela 2-1: Estatísticas de Falhas para Barragens de Aterro (ICOLD, 2017)

Mecanismo de Falha	Erosão		Deslizamento do Aterro	
	Erosão Externa ( <i>Overtopping</i> )	Erosão Interna	Instabilidade Estática	Instabilidade Sísmica
Modo de Falha				
% pelo mundo	48%	46%	4%	2%
% pelo mundo	94%		6%	

Tabela 2-2: Estatísticas Gerais de Falhas em Barragens de Aterro (USBR e USACE, 2019 adaptado de Fell et al. 1998, 2000)

Número de Casos		% de Falhas (Se Conhecida)		Probabilidade Média de Falha	
Todas as Falhas	Falhas Durante a Operação	Todas as Falhas	Falhas Durante a Operação	Todas as Falhas	Falhas Durante a Operação
Erosão interna pelo maciço da barragem					
39	38	30	33	3,5E-03	3,5E-03
Erosão interna pela fundação					
19	18	15	15	1,5E-03	1,5E-03
Erosão interna do maciço pela fundação					
2	2	1,5	1,5	2,0E-04	2,0E-04

Na Tabela 2-1 pode ser visto que a erosão interna foi responsável por aproximadamente metade das rupturas em barragens de aterro onde o modo de ruptura é conhecido e é aproximadamente igual em importância à ruptura por galgamento (*overtopping*), causada por mal dimensionamento ou mal funcionamentos das estruturas extravasadoras.

Na Tabela 2-2 é possível notar que o maior número de acidentes ocorreu no aterro das barragens, aproximadamente metade destes acidentes foram associados a condutos que passavam pelo interior do aterro ou a muros que suportavam estes aterros. Foi verificado também que, aproximadamente dois terços das rupturas e metade dos acidentes ocorreram no primeiro enchimento do reservatório ou nos primeiros 5 anos de operação (FOSTER *et al.* 1998,2000 *apud* USBR e USACE, 2019).

O estudo realizado por Engemoen e Redlinger avaliou 220 barragens do *United States Bureau of Reclamation* (USBR). (ICOLD, 2017). Nesse estudo 99 das 220 barragens tiveram algum acidente relacionado à erosão interna (cerca de 45%), desses acidentes um resultou em falha. Dos 99 acidentes, 53 envolveram transporte de partículas, o restante foi relacionado a excesso de infiltração. Dos 99 acidentes 9 foram no aterro da barragem, 70 na fundação, 6 foram do aterro para um conduto que passava no interior do aterro, 5 foram ao longo de um conduto e 11 foram no pé da barragem ou abaixo dos drenos.

Devido à importância que a erosão interna e outros tipos de *piping* tem para a segurança das barragens, nos itens seguintes serão vistos os principais conceitos relacionados a esses fenômenos.

#### 2.4.1 Processos de erosão interna e *Piping*

Fell *et al.* (2015) classificam as falhas e acidentes causados por erosão interna em barragens e suas fundações de três maneiras, que podem ser:

- Erosão interna pelo maciço da barragem;
- Erosão interna pela fundação; e
- Erosão interna do maciço pela fundação ou na fundação (percolação no aterro que erode material pela fundação ou percolação entre o contato da fundação e do aterro que erode material do aterro).

Os autores dividem o processo de erosão interna e *piping* em quatro etapas, que são:

- Início de erosão;
- Continuação de erosão;
- Progressão para formar um tubo; e
- Início da falha.

Nas Figuras 2-3, 2-4 e 2-5 são apresentadas essas quatro etapas de erosão para os três tipos de falhas definidos pelos autores.

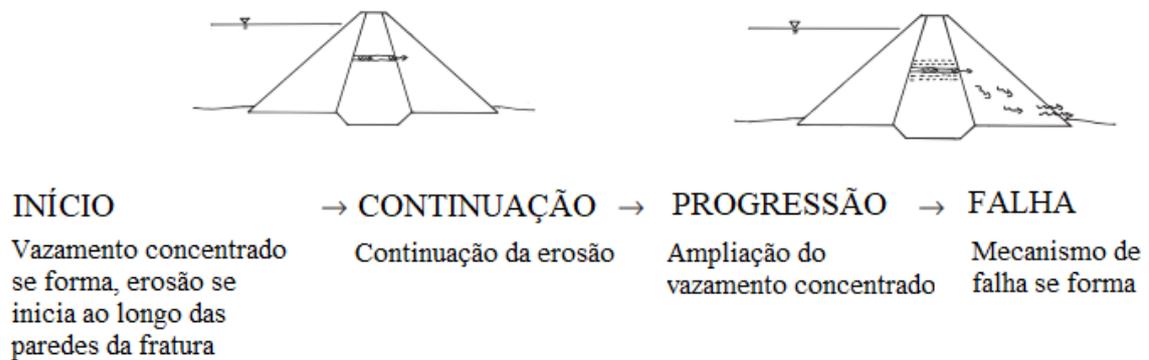


Figura 2-3: Erosão Interna pelo Aterro (FELL *et al.*, 2015).

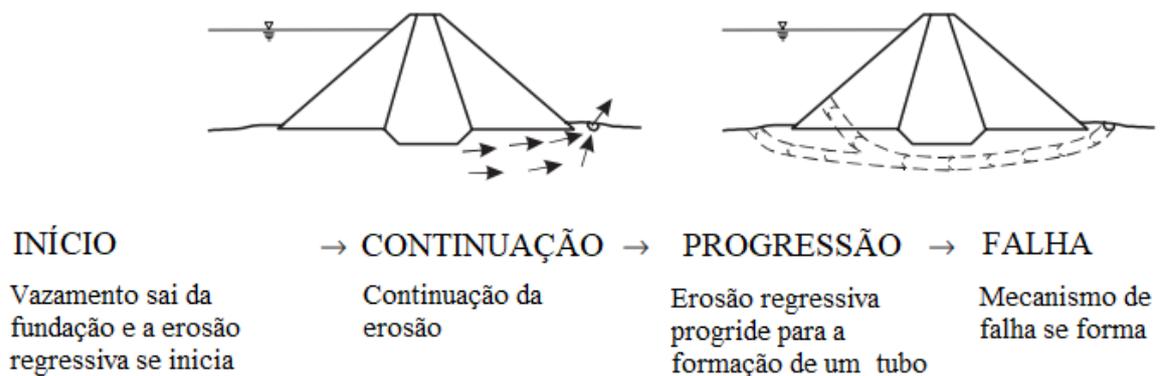


Figura 2-4: Erosão Interna Pela Fundação (FELL *et al.*, 2015).

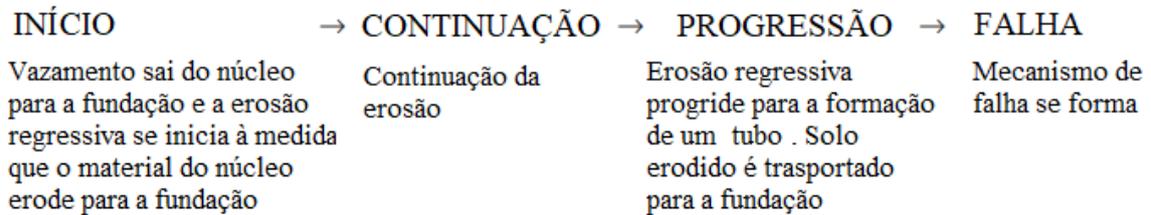


Figura 2-5: Erosão Interna do Aterro pela Fundação (FELL *et al.*, 2015).

Segundo Fell *et al.* a etapa de início de erosão pode ocorrer por quatro mecanismos diferentes, que são:

- Vazamento Concentrado;
- Erosão Regressiva;
- Sufusão; e
- Erosão de Contato.

Esses mecanismos são determinados pelo tipo de solo presente no aterro da barragem ou em sua fundação. Solos não plásticos como areias, siltes, ou misturas de areia, silte e pedregulho são submetidos a erosão regressiva, erosão de contato ou sufusão, dependendo da distribuição do tamanho de suas partículas.

Solos plásticos, como argila ou misturas de argila, são submetidos, geralmente, a vazamentos concentrados ou erosão de contato. Erosão Regressiva e Sufusão geralmente não ocorrem nesses tipos de solo, porém podem ocorrer se os gradientes hidráulicos forem muito elevados (FELL *et al.*, 2015).

Nos itens seguintes serão explorados com mais detalhe esses quatro mecanismos que podem levar ao início da erosão interna.

#### 2.4.2 Erosão por vazamento concentrado

A erosão por vazamento concentrado no aterro da barragem ou em sua fundação é função das tensões às quais os materiais estão submetidos (FELL *et al.*, 2015). Essas tensões podem resultar em trincas nos materiais, a erosão irá então progredir dependendo de critérios geométricos e hidráulicos no interior da trinca, que serão explicados nos parágrafos seguintes.

Para que ocorra erosão por vazamento concentrado é necessário que exista uma fratura/falha no aterro abaixo do nível do reservatório. Essa falha pode ocorrer por recalques diferenciais durante ou após a construção, fratura hidráulica, dessecação, colapso de uma camada de solo mal compactada ou ao redor de um conduto/estrutura que passa pelo maciço da barragem (ICOLD, 2017).

Sabendo que existe a fratura, a erosão se inicia se as forças impostas pela água fluindo na região da fratura forem suficientes para iniciar o transporte de partículas de solo. Se a velocidade do fluxo for suficiente para transportar as partículas que se soltam da fratura a erosão irá progredir formando um tubo. Esse processo pode ser visto na Figura 2-6.

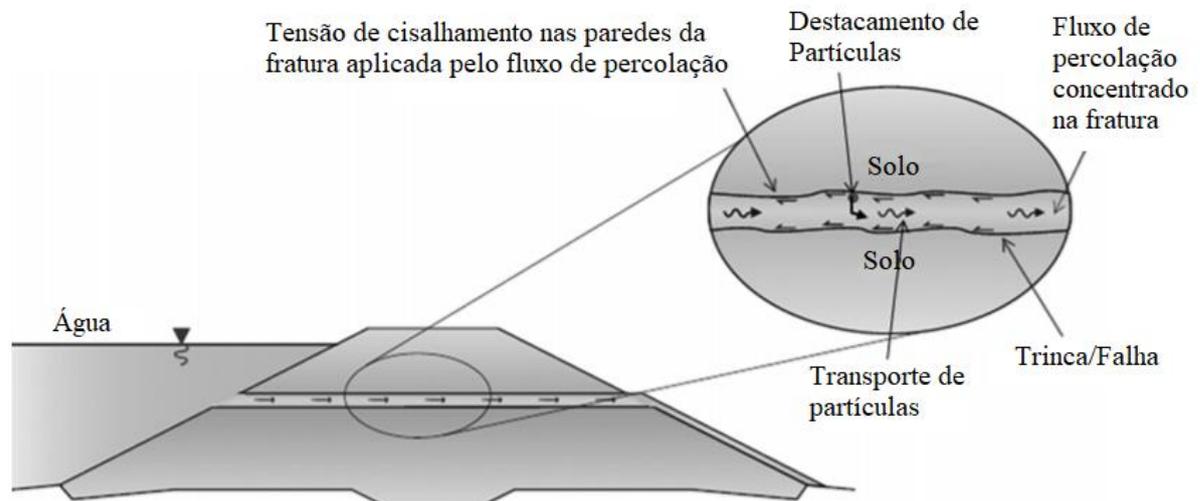


Figura 2-6: Destacamento e Transporte de Partículas na Erosão por Vazamento Concentrado (FELL *et al.*, 2015).

A progressão da erosão pode se dar de duas maneiras. Primeiramente, a água fluindo pela fratura pode fazer com que o solo nos arredores da trinca se expanda reduzindo sua abertura ou então fechando-a e cessando a erosão. De outra maneira, o material pode ser erodido

aumentando cada vez mais as forças de percolação na trinca até que ocorra a formação do tubo, que então aumenta de tamanho até que ocorra a ruptura (FELL *et al.*, 2015).

Um fator importante é a velocidade na qual ocorre o processo de formação de trincas e de formação dos tubos, pois isso irá influenciar se o vazamento será detectado a tempo de serem tomadas medidas que impeçam a ocorrência da ruptura (ICOLD, 2017).

Na Figura 2-7 é mostrada uma erosão por vazamento concentrado que ocorreu no maciço de uma barragem, provavelmente ocasionado por má compactação das camadas do aterro.



Figura 2-7: Vazamento Concentrado em uma Barragem (FELL *et al.*, 2015).

#### 2.4.3 Erosão Regressiva

Segundo ICOLD (2017) existem dois tipos de erosão regressiva: a erosão regressiva por *piping* e a erosão regressiva global.

Na erosão regressiva por *piping* o processo erosivo começa em uma superfície livre (superfície onde há saída livre de água) na região à jusante da barragem, como mostra a Figura 2-8. O

processo se inicia quando os gradientes hidráulicos elevados ao pé da barragem erodem a camada superficial de solo coesivo deixando exposta a camada de solo menos coesivo que estava logo abaixo (FELL *et al.*, 2015).

O processo progride abaixo do maciço da barragem onde as forças de percolação formam um canal de erosão que transporta as partículas erodidas na direção jusante. Para que o canal seja formado é necessário que o aterro, estrutura ou qualquer camada coesiva que se encontra acima do solo erodido forme um teto para o canal. Quando ocorre o fenômeno da erosão regressiva por *piping* geralmente são vistos cones de areia na região a jusante da barragem, como mostrado na Figura 2-9.

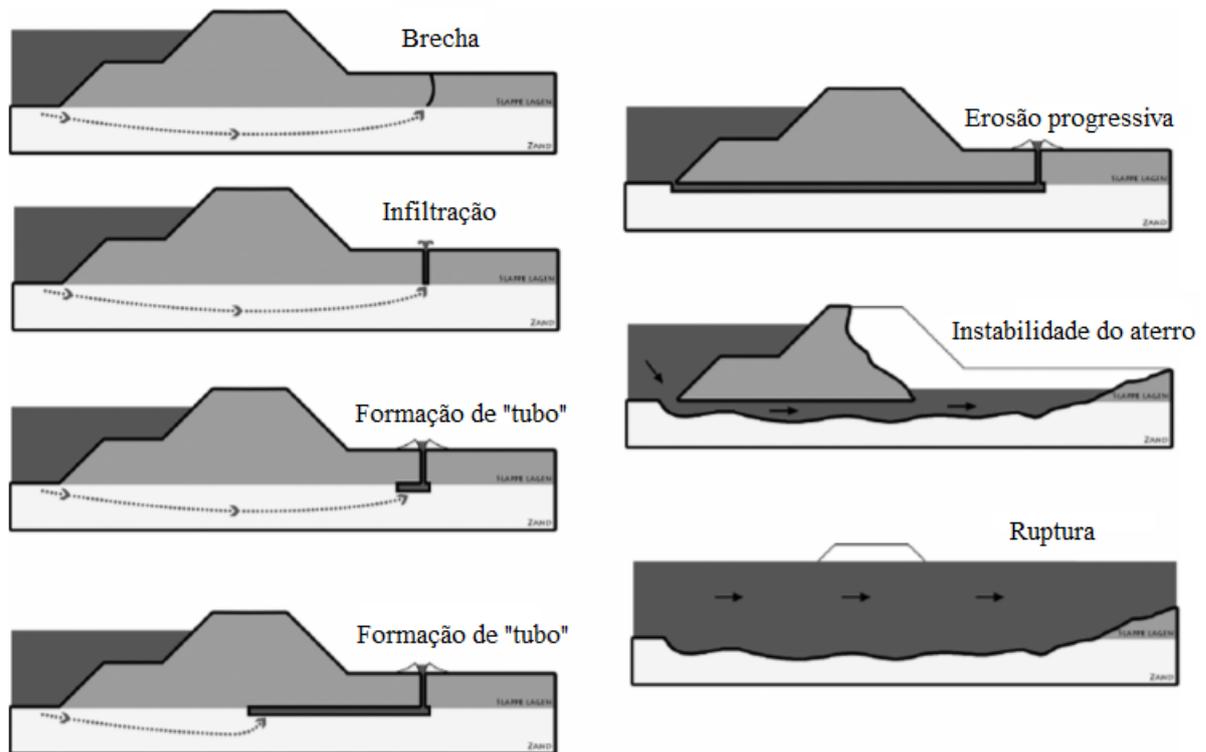


Figura 2-8: Modelo de Erosão Regressiva por *Piping* (FELL *et al.*, 2015 adaptado de SELLMIEJER *et al.*, 2011).



Figura 2-9: Cone de Areia à jusante de uma Barragem (ICOLD, 2017).

A erosão regressiva global ocorre quando o solo acima ou ao redor de um tubo/canal de erosão não é capaz de suportar o peso das camadas superiores e acaba colapsando de maneira progressiva. Nesse caso os canais de erosão se formam de maneira momentânea, já que o solo presente acima deles colapsa logo em seguida resultando em um movimento geral do solo. (ICOLD, 2017). Segundo Silva (2016) duas formas de erosão regressiva global são reconhecidas. Na primeira, cavidades subverticais se formam no núcleo do maciço, como mostra a Figura 2-10. Na segunda, o colapso ocorre na região do talude de jusante do aterro causando o seu deslizamento, como mostra a Figura 2-11.

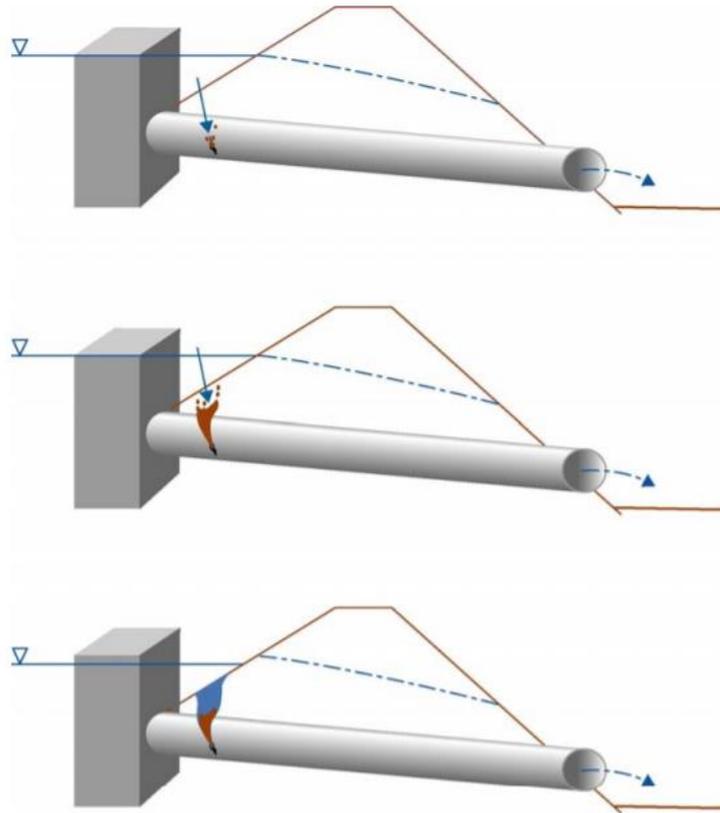


Figura 2-10: Erosão Regressiva Global em Solos ao Redor de Defeito em Conduto não Pressurizado (FEMA, 2005).



Figura 2-11: Erosão Regressiva Global em Ensaio de Laboratório (FRY, 2016).

#### 2.4.4 Erosão por Sufusão

O fenômeno da Sufusão ocorre quando a água percola através de solos internamente instáveis ou através de solos mal graduados não coesivos. Alguns exemplos desses tipos de solo podem ser o aluvião de um grande rio; o colúvio em leitos de rios de regiões montanhosas; núcleos de barragens com solos de origem glacial; ou filtros de barragens que possuam distribuição granulométrica mal graduada ou que apresentem um excesso de finos (ICOLD, 2017).

Solos mal graduados e solos com presença de partículas mais grossas, como os solos mostrados na Figura 2-12 são potencialmente instáveis e podem estar submetidos ao fenômeno da Sufusão.

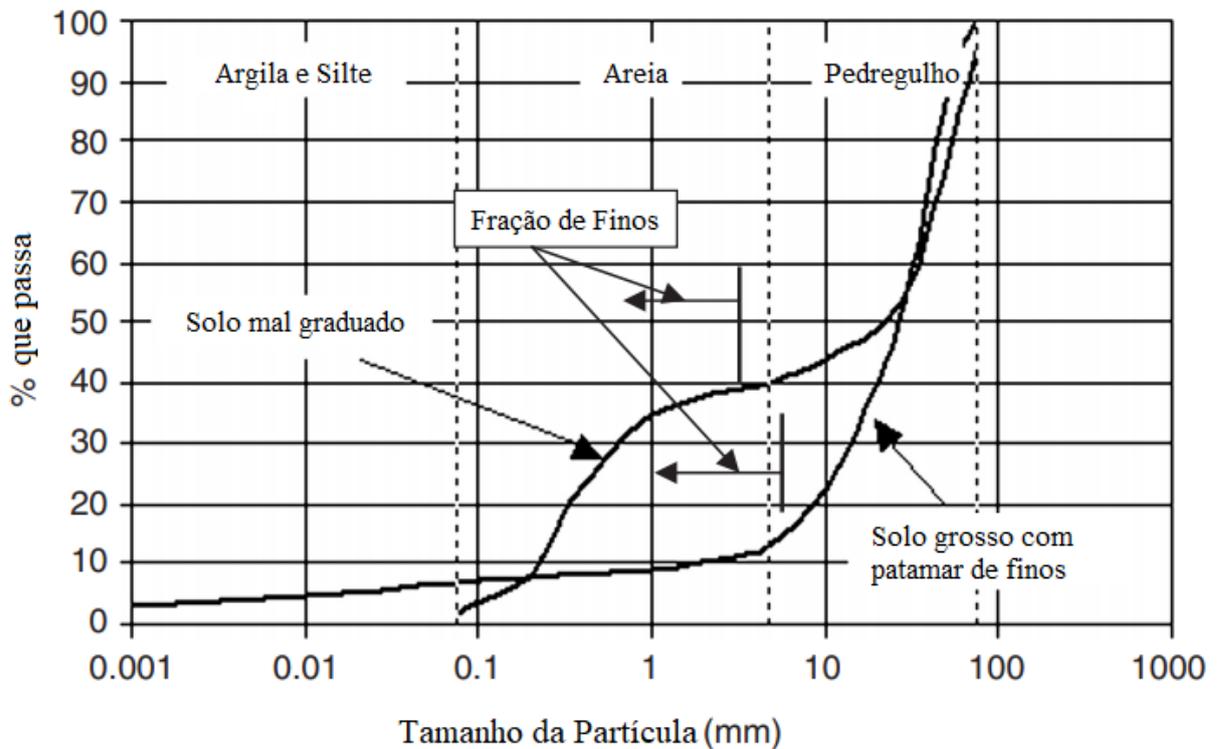


Figura 2-12: Curvas Granulométricas de Solos Potencialmente Internamente Instáveis (FELL *et al.*, 2015 adaptado de ZIEMS, 1969).

Ao contrário do vazamento concentrado, a erosão por Sufusão não requer uma fratura no maciço, tampouco uma superfície livre na qual as partículas são erodidas e carregadas, como no fenômeno da erosão regressiva. Na Sufusão as partículas de finos são transportadas através do próprio solo, entre os vazios deixados pelas partículas mais grossas, como pode ser visto na Figura 2-13.

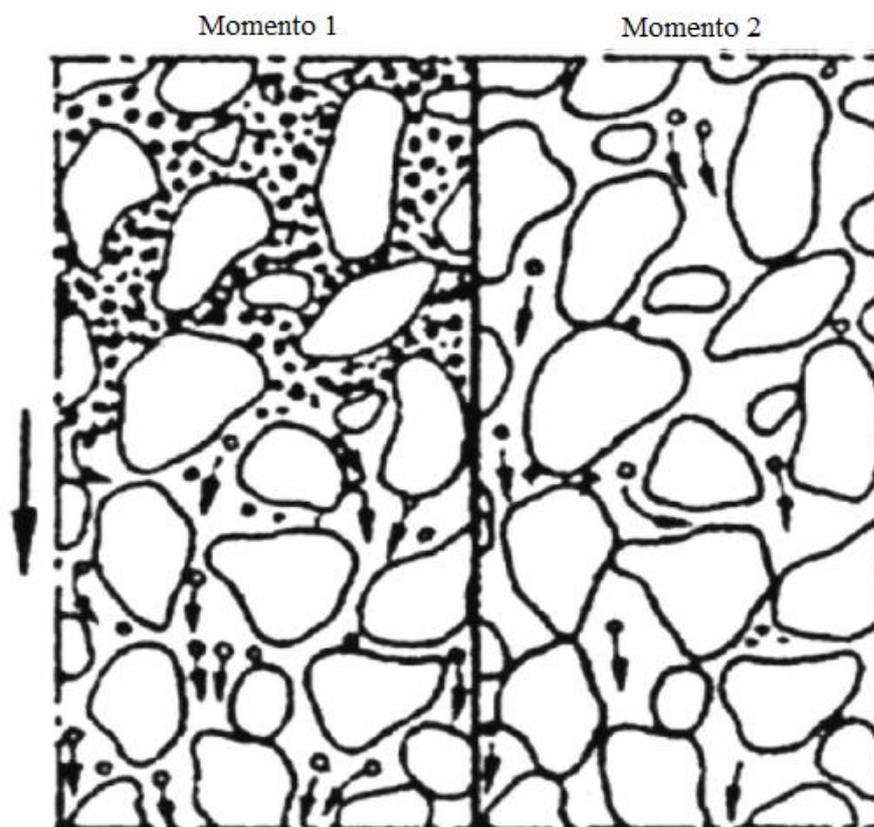


Figura 2-13: Esquema do Processo de Sufusão (FELL *et al.*, 2015 adaptado de ZIEMS, 1969).

Para que ocorra o fenômeno da Sufusão é necessário que sejam cumpridas três situações (ICOLD, 2017), listadas a seguir:

1. Primeiramente, o diâmetro das partículas dos finos presentes no solo deve ser menor do que os espaços existentes entre as partículas mais grossas, como mostra a Figura 2-14(a);
2. Em seguida, a quantidade de finos presente no solo deve ser menor do que o suficiente para preencher completamente os vazios entre as partículas mais grossas, caso contrário as partículas mais grossas ficariam flutuando na matriz de finos, como mostra a Figura 2-14(b); e
3. Por último, as forças de percolação devem ser suficientes para superar as tensões impostas nas partículas do solo mais fino pelo solo mais grosso.

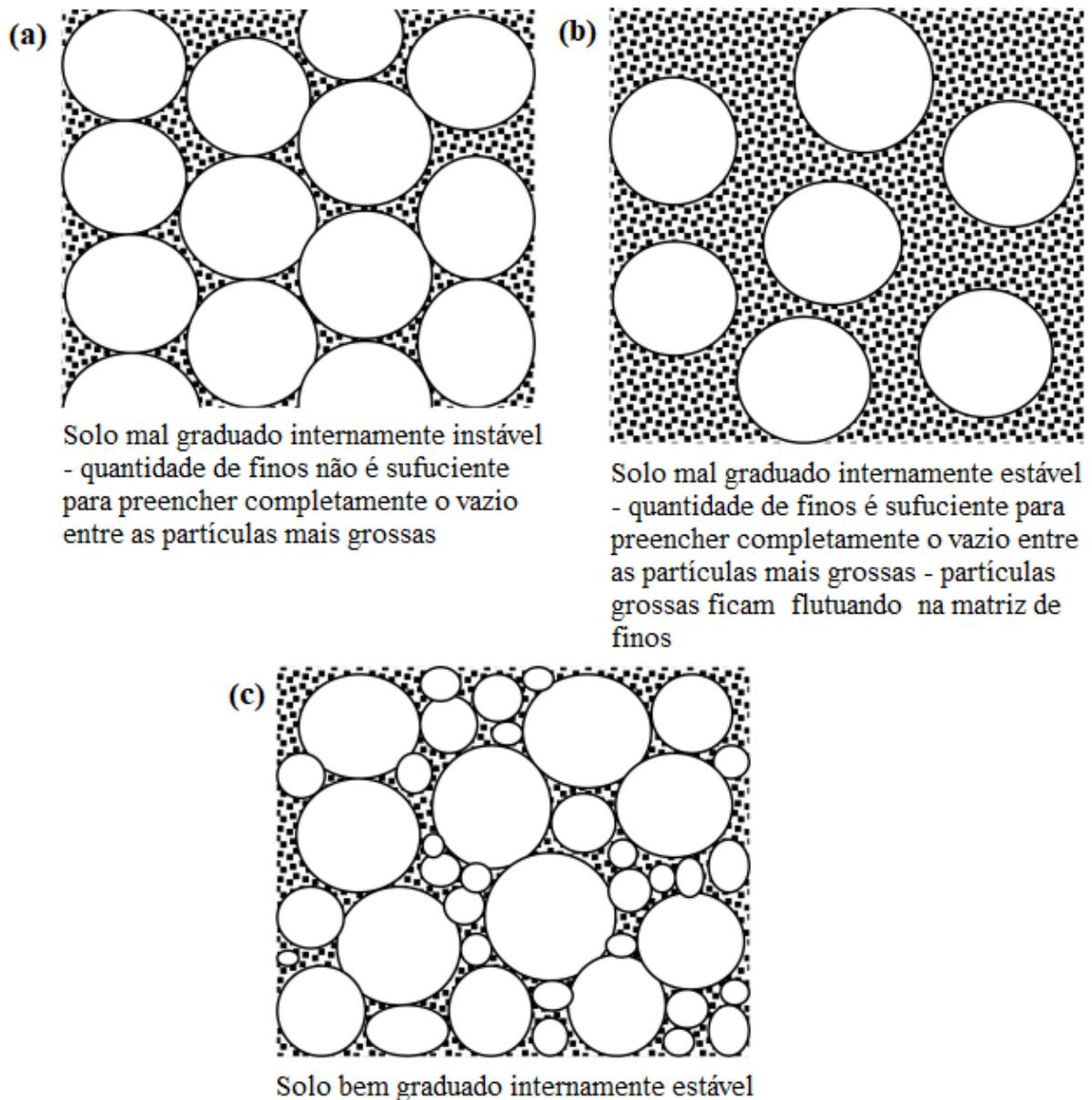


Figura 2-14: Disposição Espacial das Partículas em Solos Internamente Estáveis e Instáveis (Fell *et al.*, 2015).

O fenômeno da erosão por Sufusão resulta em um aumento na permeabilidade, maiores velocidades de percolação e maiores gradientes hidráulicos para os solos remanescentes. Por isso, filtros e transições de barragens construídos com material internamente instável podem apresentar erosão dos finos, deixando-os mais grossos e impedindo a sua ação de proteção do núcleo. Além disso, a Sufusão ocorrendo no aterro da Barragem ou em sua fundação pode levar à ocorrência de recalques diferenciais (FELL *et al.*, 2015).

### 2.4.5 Erosão por contato

A erosão por contato ocorre quando um solo mais grosso está em contato com um solo mais fino. É uma forma de erosão interna onde as partículas mais finas são erodidas no contato com uma camada mais grossa, causada por um fluxo que passa pela camada mais grossa. Refere-se apenas à condição em que o fluxo é paralelo à interface entre as camadas (SILVA, 2016). O processo de erosão por contato é exemplificado na Figura 2-15.

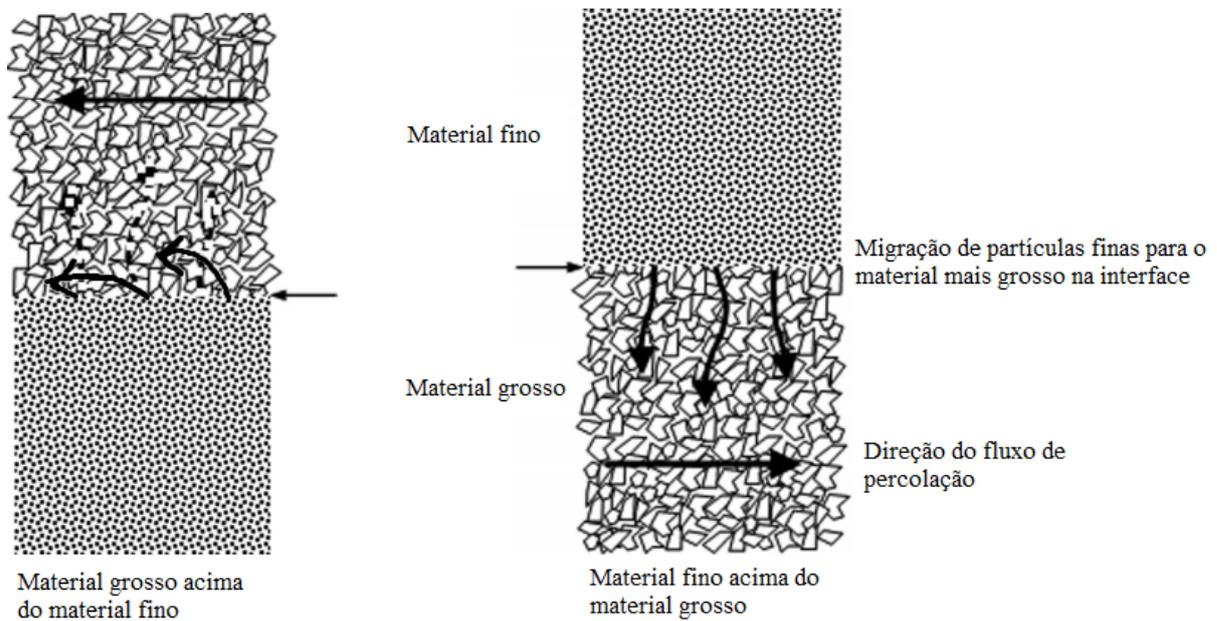


Figura 2-15: Processo de Erosão por Contato (ICOLD, 2017).

Na Figura 2-16, são mostradas as principais consequências da erosão por contato para o aterro de uma barragem.

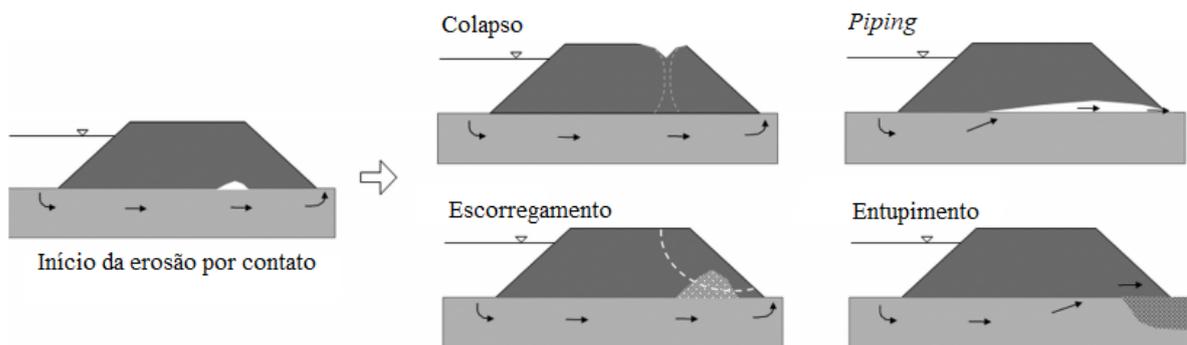


Figura 2-16: Potenciais Consequências da Erosão por Contato (ICOLD, 2017 adaptado de BEGUIN, 2011).

### **3 CONDIÇÕES GERAIS DA USINA**

Neste capítulo serão apresentadas as principais características, geométricas e de fundação, que foram consideradas na elaboração desse estudo. O capítulo é dividido em três partes, na primeira será feita uma breve descrição da usina analisada, apresentando seu arranjo e as condições geométricas do problema. Em seguida será mostrada a seção típica da barragem e seus materiais de construção e, por fim, serão apresentados os ensaios geológico-geotécnicos realizados e serão definidas as condições de fundação utilizadas.

#### **3.1 GEOMETRIA DO PROBLEMA**

A usina estudada trata-se de uma usina com arranjo do tipo compacto. Nos arranjos do tipo compacto, as estruturas de Tomada da Água, Casa de Força e Vertedouro são incorporadas ao barramento e o desnível necessário para a geração de energia elétrica é criado pela própria barragem (PEREIRA, 2015).

O barramento é composto, em sua maior parte, por uma barragem de terra do tipo zonada, que ocupa uma grande área das margens direita e esquerda do empreendimento, com exceção do trecho na margem direita onde estão concentradas as estruturas de concreto. À direita das estruturas, a ligação da barragem da margem direita com a tomada da água é feita por um muro de topo. Para a ligação da barragem da margem esquerda com a estrutura do vertedouro a mesma solução é adotada. O Arranjo Geral da usina, com a indicação de onde estão localizadas as principais estruturas, é mostrado na Figura 3-1.

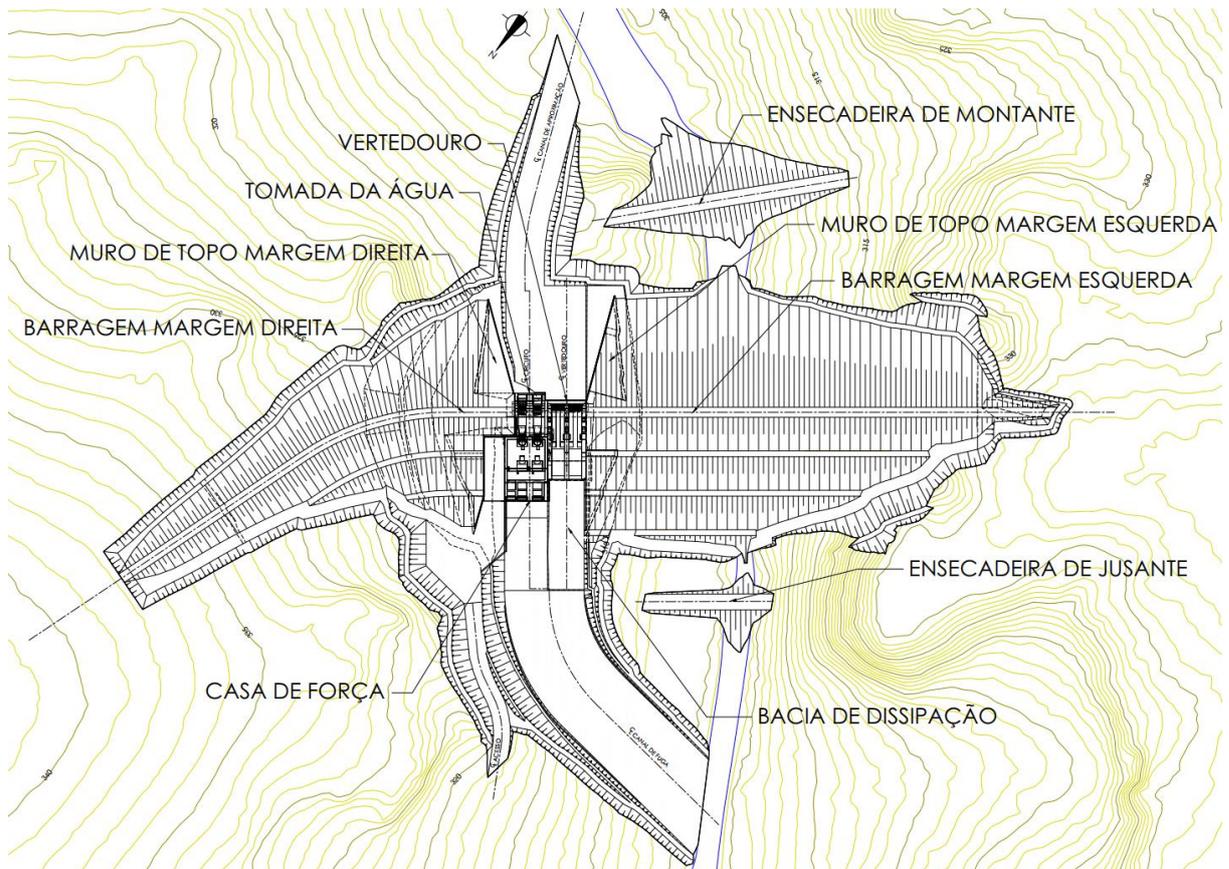


Figura 3-1: Arranjo Geral da Usina.

Na Figura 3-2 é apresentado um modelo tridimensional da região onde está localizada a saída da Casa de Força, onde é possível verificar com mais detalhes as estruturas que fazem parte do arranjo. Na saída da Casa de Força vê-se que o fluxo é confinado, pela direita, por um Muro de Contenção cuja finalidade é suportar o aterro que permite o acesso à Área de Montagem. Pela esquerda, o fluxo é confinado pela parede da Bacia de Dissipação. Essa região acredita-se que será a região mais crítica em termos de Gradientes Hidráulicos, pois trata-se da zona de cota mais baixa do projeto (carga hidráulica maior), e oferece os menores caminhos de percolação.

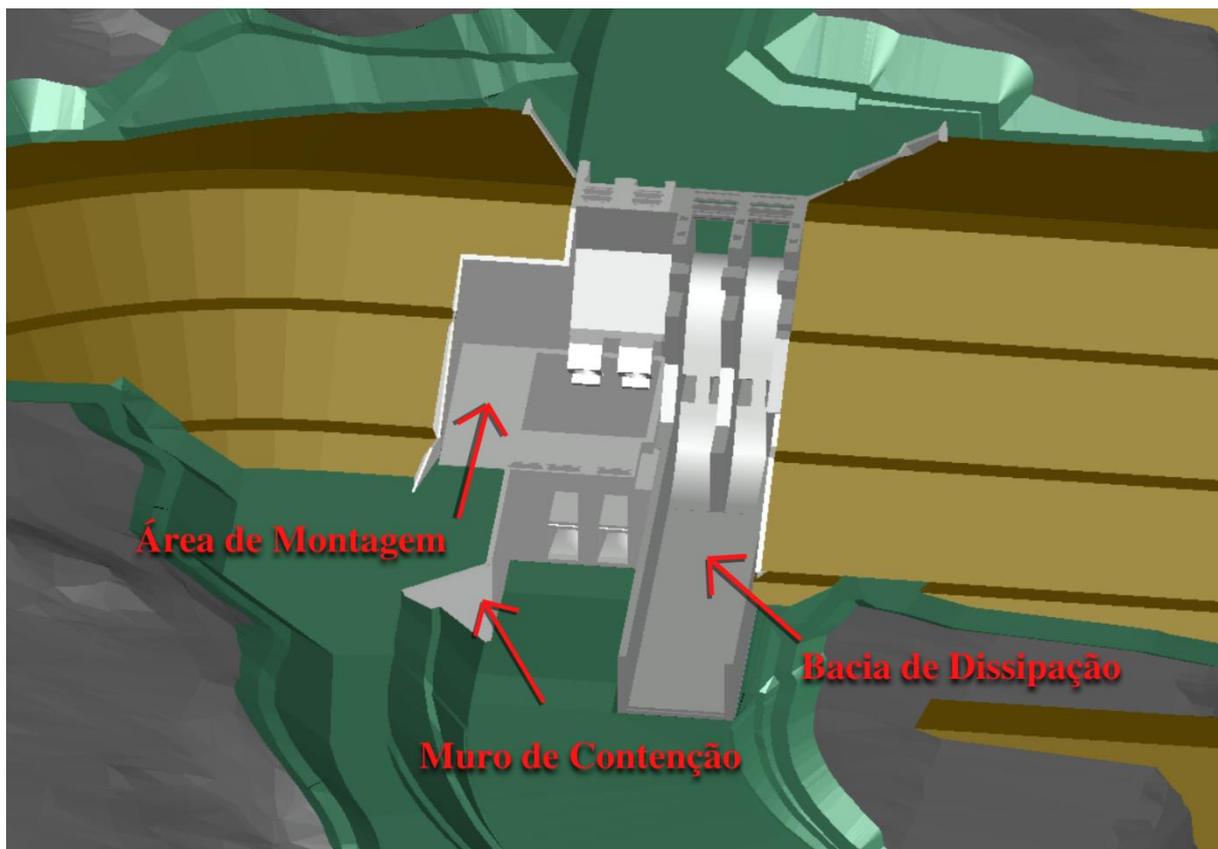


Figura 3-2: Detalhe das Estruturas.

Para determinar as condições às quais se encontram as fundações das estruturas, foram realizadas investigações geológico-geotécnicas detalhadas na região, que permitiram a constatação de condições geológicas bastante desfavoráveis, com predominância de arenitos permeáveis na fundação. Mais adiante, no Item 3.3 (Condições de Fundação), serão apresentadas com mais detalhes as investigações geológico-geotécnicas realizadas, além de ser mostrado como foram feitas as definições das camadas de solo e rocha utilizadas nesse estudo.

As características geológicas do local, aliadas à geometria do arranjo das estruturas, levantaram o questionamento sobre o potencial de ocorrência da erosão regressiva por *piping*, principalmente na região da saída da Casa de Força, onde se encontra o início do Canal de Fuga, a Bacia de Dissipação e o Muro de Contenção. Por apresentar uma geometria bastante complexa, acredita-se que uma simples análise bidimensional desta zona não será suficiente para representar de forma fiel as condições de fluxo que ocorrem na fundação.

### 3.2 BARRAGEM DE TERRA

A extensão total da barragem de terra é de aproximadamente 535 m, com seção do tipo zonada em toda sua dimensão. O fechamento das ombreiras é feito por este tipo de barragem, sem alteração na seção típica. Os comprimentos das barragens da margem direita e margem esquerda são 260 e 275 m, respectivamente. A barragem de terra apresenta altura máxima aproximadamente igual a 39 m no leito do rio.

Os taludes externos possuem inclinação 1,0V:2,0H na face de jusante e 1,0V:2,2H na face de montante e a largura da crista é de 6,0 m. Na Figura 3-3 é mostrada a seção típica, que é do tipo zonada com região de vedação ao centro e filtro inclinado. Na região inferior do espaldar de montante está presente tapete de montante para aumentar o caminho de percolação e auxiliar a vedação da barragem. Na Figura 3-5 é mostrado o tapete drenante, que é do tipo sanduíche de cinco camadas com 1,2 m de espessura total devido à alta permeabilidade da fundação. A jusante, o tapete drenante é protegido com filtro de pé constituído de uma camada de transição fina, que por sua vez é confinada com uma camada intermediária de transição grossa e uma camada externa de enrocamento de proteção, para assegurar que os materiais não sejam erodidos pela ação da água de jusante. Um detalhe do filtro de pé pode ser visto na Figura 3-6.

Os espaldares são compostos por aterro compactado predominantemente arenoso. Em adição, há trincheira drenante, com profundidade mínima de 3,0 m e largura de 0,8 m, escavada no pé da barragem para interceptar percolação de água pela fundação e não captada pelo tapete drenante. Para a proteção do talude de montante contra ondas, foi acrescentada uma camada de *Geoweb* com espessura de 20 cm e preenchido com concreto. As Figuras 3-3, 3-4, 3-5 e 3-6 apresentam a seção típica da barragem assim como os detalhes desta seção.

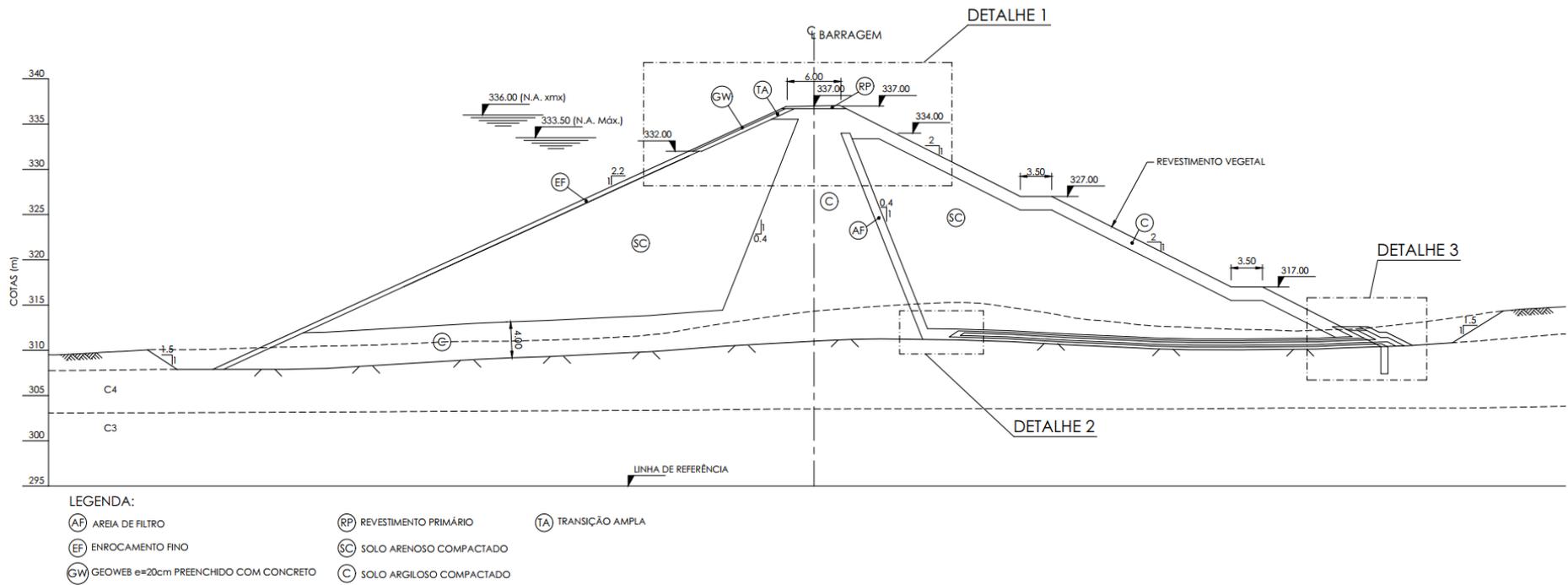


Figura 3-3: Seção Típica.

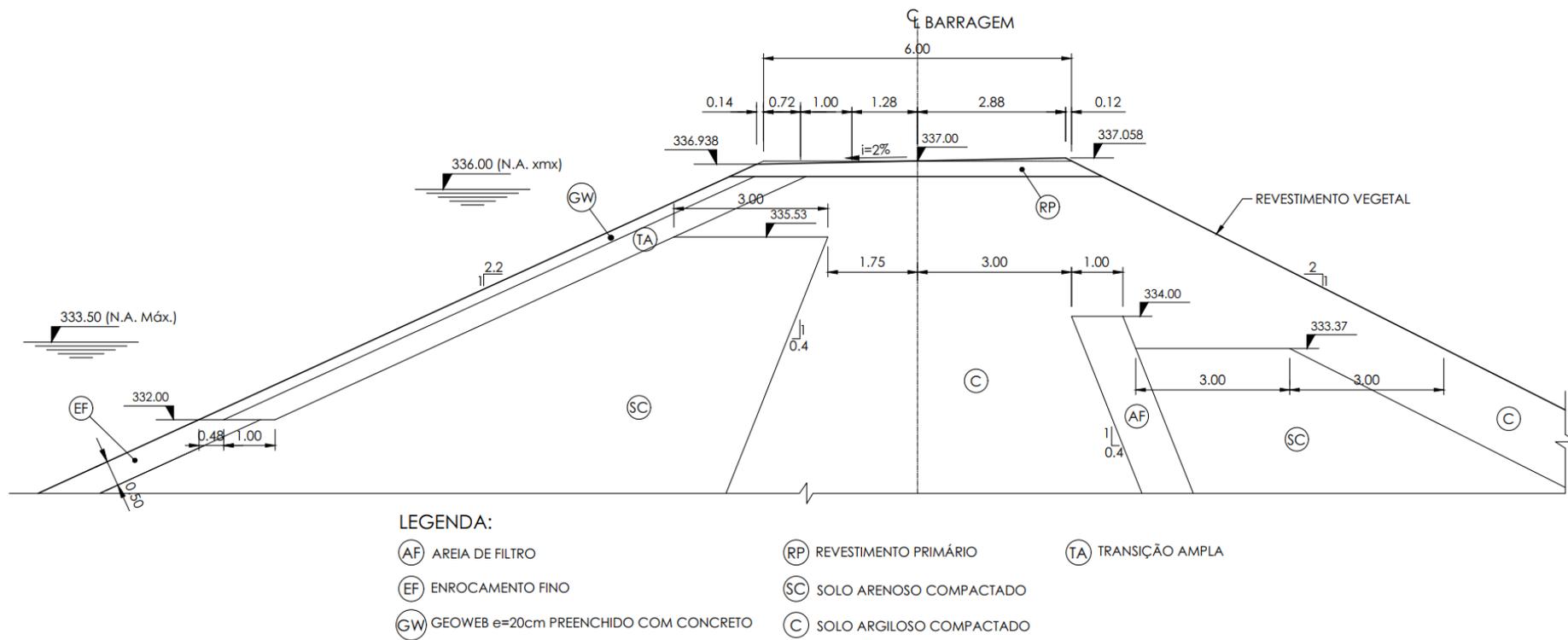
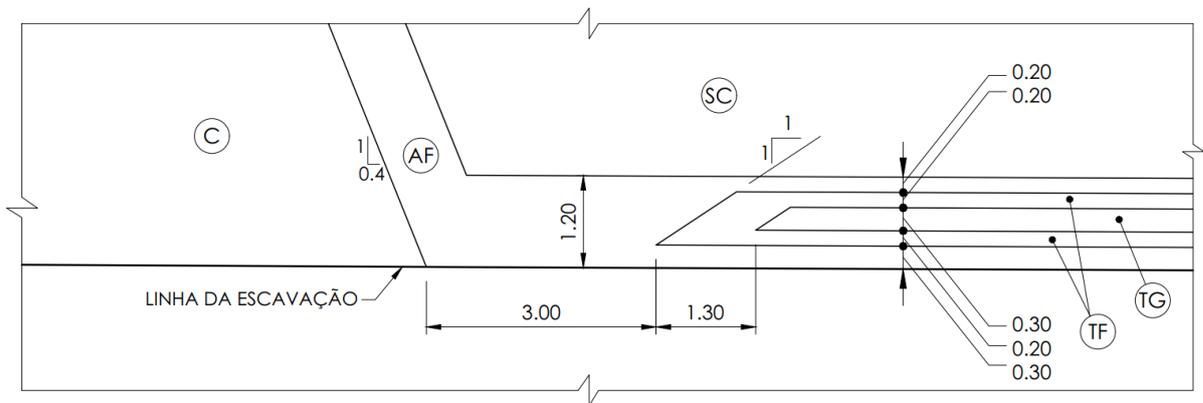


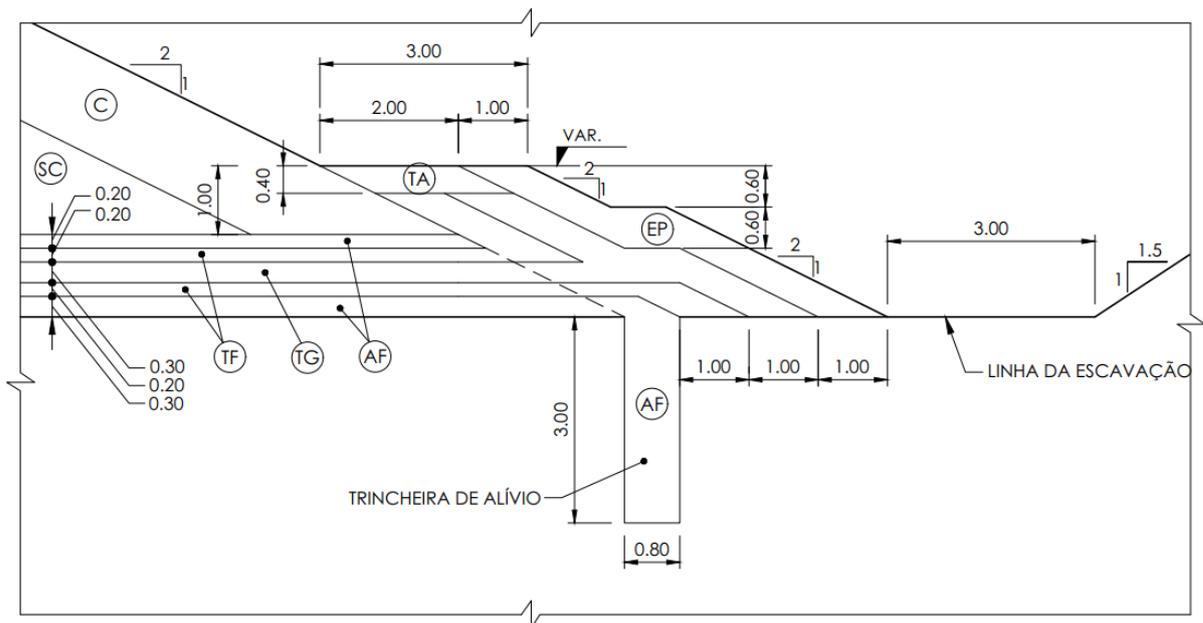
Figura 3-4: Detalhe 1.



LEGENDA:

- |                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| (AF) AREIA DE FILTRO         | (TF) TRANSIÇÃO FINA   |
| (SC) SOLO ARENOSO COMPACTADO | (TG) TRANSIÇÃO GROSSA |
| (C) SOLO ARGILOSO COMPACTADO |                       |

Figura 3-5: Detalhe 2.



LEGENDA:

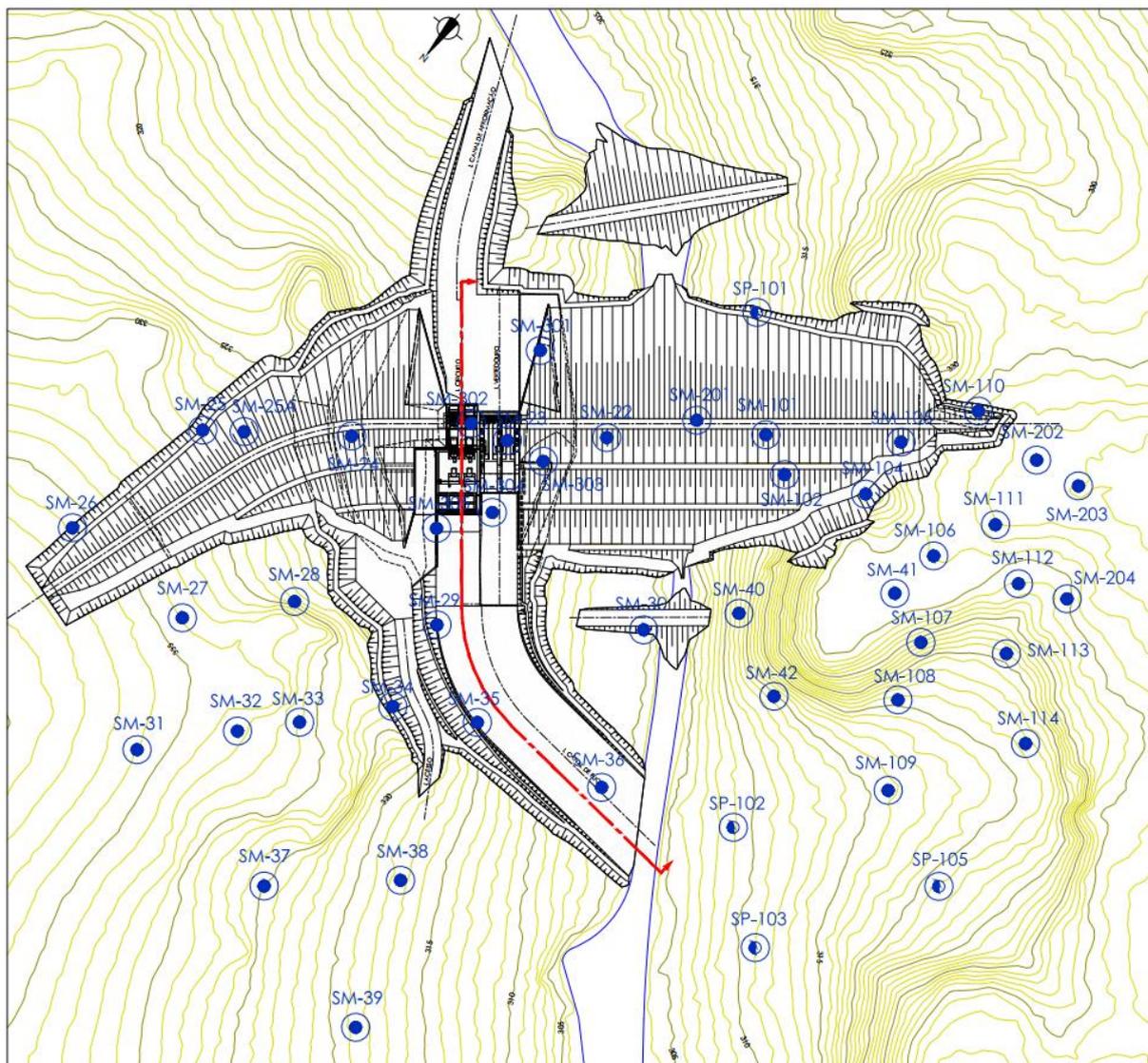
- |                              |                              |                       |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| (AF) AREIA DE FILTRO         | (C) SOLO ARGILOSO COMPACTADO | (TG) TRANSIÇÃO GROSSA |
| (EP) ENROCAMENTO DE PROTEÇÃO | (TA) TRANSIÇÃO AMPLA         |                       |
| (SC) SOLO ARENOSO COMPACTADO | (TF) TRANSIÇÃO FINA          |                       |

Figura 3-6: Detalhe 3.

### 3.3 CONDIÇÕES DE FUNDAÇÃO

Foram executadas um total de 48 sondagens, sendo 4 delas sondagens percussivas e 44 delas sondagens mistas, com um total aproximado de 1.020 m de perfuração. Em alguns dos furos executados foram realizados também ensaios de perda da água, com o objetivo de determinar o coeficiente de permeabilidade dos materiais da fundação.

As investigações executadas e suas localizações são apresentadas na Figura 3-7.



#### LEGENDA:

● SM SONDAAGEM MISTA

--- SEÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

● SP SONDAAGEM À PERCUSSÃO

Figura 3-7: Localização das Sondagens Executadas.

Na Figura 3-7 é possível notar que a localização da maioria das sondagens não está alinhada com o eixo do projeto. Por motivos ambientais, foi necessária a alteração do eixo da barragem para uma localização mais à montante quando já haviam sido executadas as investigações.

As explorações indicaram a presença de rochas areníticas capeadas principalmente por solos de alteração e coluvionar/aluvionar em regiões específicas. O maciço rochoso de arenito ocorre aflorando somente no leito do rio e junto as suas margens, sendo que no leito do rio os afloramentos constituem-se de lajedos descontínuos de arenito. O solo de alteração é constituído por areia fina a média, siltosa e apresenta índices de SPT variando de 1 a 30 golpes/30 cm finais de penetração, mostrando um solo com grande variação de resistência, passando de fofo a compacto.

O maciço rochoso de arenito subjacente apresenta camada inicial de rocha bastante alterada com profundidades variando entre 1,0 e 25,0 m até atingir o maciço rochoso de arenito mais competente. Existe heterogeneidade notável entre os resultados dos furos de sondagem, principalmente em relação à definição do início de maciço mais resistente. Esta grande profundidade da camada de rocha alterada exige um grande aprofundamento das estruturas de concreto, o que gera pouco volume de escavação em rocha sã em quase toda região do aproveitamento.

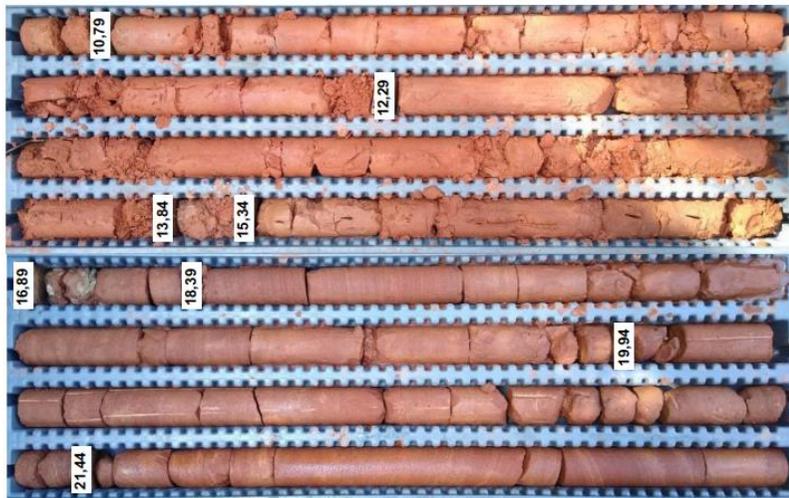
Como referência, nas Figuras 3-8 e 3-9 são mostrados os testemunhos das sondagens SM-302 e SM-305.



SM-302 / CX-01-02



SM-302 / CX-05-06



SM-302 / CX-03-04



SM-302 / CX-07-08

Figura 3-8: Testemunho da Sondagem SM-302.



SM-305 / CX-01-02



SM-305 / CX-05-06



SM-305 / CX-03-04



SM-305 / CX-07-08

Figura 3-9: Testemunho da Sondagem SM-305.

A partir da análise dos testemunhos das sondagens, os materiais encontrados na fundação foram classificados de acordo com sua coerência. Os critérios utilizados são os mostrados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1: Parâmetros de Classificação de Rochas.

Grau	Coerência (C)
1	Rocha Coerente (C1)
	Quebra com dificuldade ao golpe de martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço, somente escavável a fogo.
2	Rocha Medianamente Coerente (C2)
	Quebra com dificuldade ao golpe de martelo, superfície riscável por lâmina de aço, escavável a fogo.
3	Rocha Pouco Coerente (C3)
	Quebra com facilidade ao golpe de martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
4	Rocha Incoerente (C4)
	Quebra com pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

A partir das informações das sondagens, e levando em consideração a classificação dos materiais apresentada na Tabela 3-1, foi elaborada uma seção geológico-geotécnica na área de interesse (Casa de Força), sua localização é mostrada na Figura 3-7, e a seção é mostrada na Figura 3-10. A partir da informação dos ensaios de perda da água foram definidos também os coeficientes de permeabilidade para cada tipo de material (Arenito C2, C3 e C4), esses coeficientes são mostrados na Tabela 4-1.

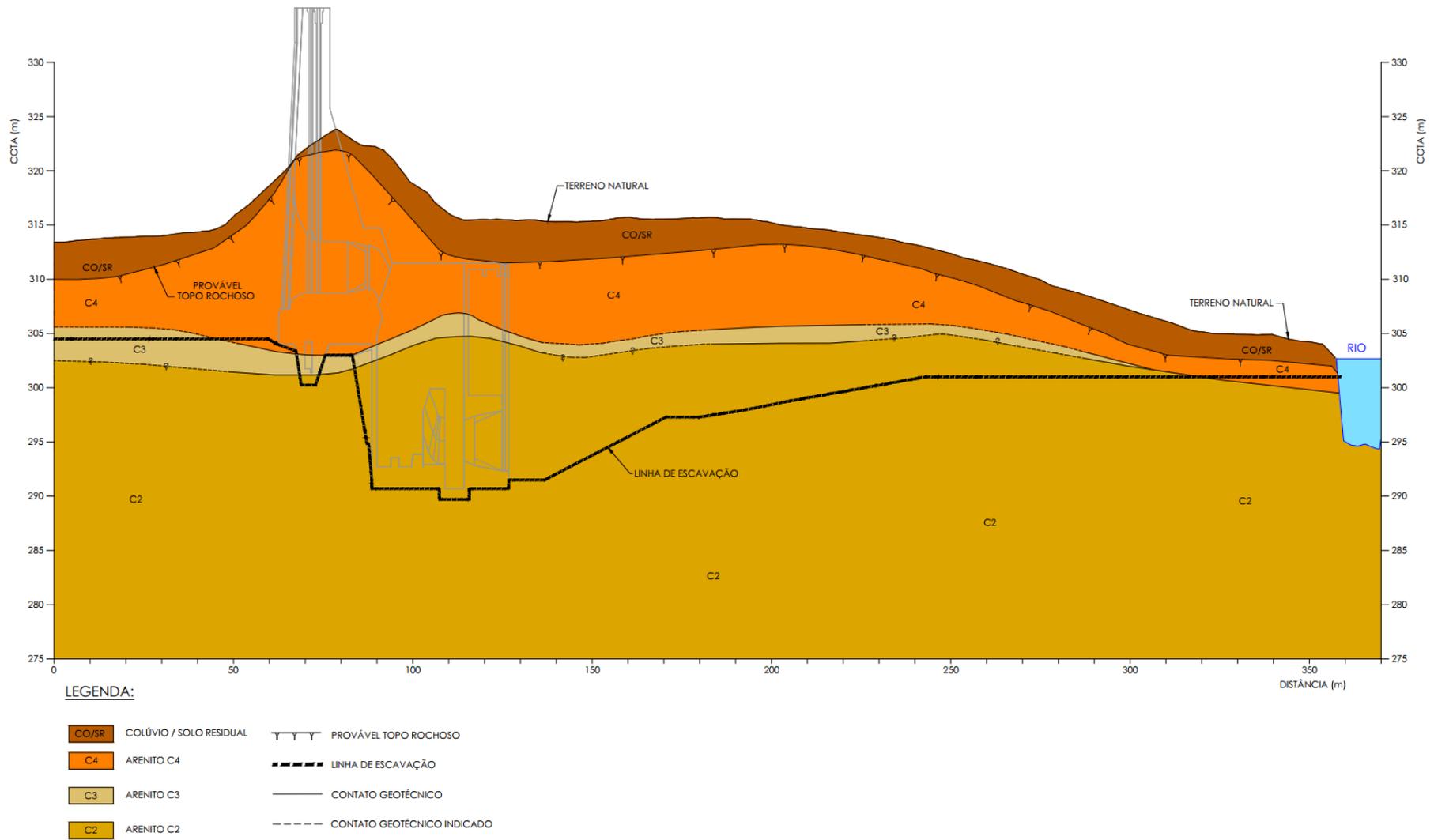


Figura 3-10: Seção Geológico-Geotécnica Pelo Eixo da Casa de Força.

Analisando a seção geológica mostrada na Figura 3-10, vê-se que a escavação onde está localizada a Casa de Força é feita quase que inteiramente em Arenito do tipo C2, ocorrendo escavação em Arenitos dos tipos C3 e C4 apenas no trecho à montante da Tomada da Água, ou seja, a percolação ocorre em sua maior parte pelo Arenito do tipo C2. Considerando esse fato, e o fato de que os coeficientes de permeabilidade dos três materiais são bastante próximos -  $2,6 \cdot 10^{-7}$  m/s,  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s e  $5,1 \cdot 10^{-7}$  m/s para os Arenitos C2, C3 e C4 respectivamente - foram feitas análises com o objetivo de verificar a possibilidade de utilização de apenas um material no modelo, dessa forma, simplificando a elaboração do sólido exportado, já que não seria necessária a divisão dos materiais de maneira tridimensional. Essas análises são mostradas no item 5.1.2.

## 4 METODOLOGIA

Todas as análises deste trabalho foram realizadas utilizando os *softwares* SEEP/W e SEEP/3D. Como o objetivo era avaliar o potencial de erosão do material da fundação, foi analisada somente a variável Gradiente Hidráulico. As análises foram executadas considerando fluxo em regime permanente (*Steady-State*), onde não há variação de níveis ou cargas hidráulicas ao longo do tempo. Foram consideradas três condições de contorno em cada modelagem realizada. A primeira delas foi a condição de carga hidráulica do nível do reservatório (333,5 m), utilizada em todo o trecho à montante da barragem. A segunda condição de contorno utilizada foi a condição de contorno do nível de jusante (304,14 m), aplicada no canal de fuga e à jusante da barragem, e a terceira condição de contorno utilizada foi a condição de saída livre ou *potential seepage face*, aplicada em toda a região de jusante onde não havia nível da água e por onde poderia haver saída de água. Por fim, para os materiais utilizados nas análises, foram consideradas funções constantes para os coeficientes de permeabilidade, os quais são observados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Coeficientes de Permeabilidade Adotados para os Materiais Utilizados nas Análises.

Material	k (cm/s)	k (m/s)
Arenito C2	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$
Arenito C3	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$
Arenito C4	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$
Areia de Filtro	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Transição Fina	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Transição Grossa	$3,0 \cdot 10^0$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
Enrocamento Fino	$5,0 \cdot 10^0$	$5,0 \cdot 10^{-2}$

Como o *software SEEP/3D* apresenta algumas diferenças de operação entre o software bidimensional decidiu-se por apresentar de forma breve o funcionamento do programa. A primeira etapa para a realização de uma simulação de fluxo no *software SEEP/3D* é a definição do tipo de análise que será realizada. Podem ser realizadas análises do tipo Transiente ou do tipo Regime Permanente. Todas as análises realizadas nesse estudo foram do tipo Regime Permanente.

Em seguida, é necessário definir os materiais e as condições de contorno. Por se tratar de uma simulação de percolação, foram definidas somente propriedades hidráulicas para os materiais. Para isso, podem ser utilizados modelos de dois tipos: Somente saturado e Saturado/Não saturado. Nesse estudo foi utilizado o modelo do tipo Saturado/Não saturado, onde foram estimadas funções constantes para os coeficientes de permeabilidade com base nos coeficientes obtidos nos ensaios de perda d'água realizados durante a execução das sondagens. Não foi considerado nenhum tipo de anisotropia nesse estudo.

As condições de contorno utilizadas foram dos tipos Carga Hidráulica Total e Fluxo de Água. A condição de contorno do tipo Carga Hidráulica foi utilizada para a definição dos níveis de montante (nível do reservatório) e de jusante (nível do canal de fuga) da usina. A condição do tipo Fluxo de Água foi utilizada para a definição da situação de saída livre, onde o fluxo foi definido como constante e com valor de  $0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ . Essa condição de contorno foi utilizada nas regiões à jusante do barramento onde poderia haver saída de água e onde não houvesse carga hidráulica.

Após definidos o tipo de análise, os materiais e as condições de contorno, é realizada a definição da geometria. O *software SEEP/3D* possui um módulo denominado *BUILD3D*, onde isso pode ser feito. Na Figura 4-1 é mostrado um dos sólidos utilizados nas análises sendo editado por esse módulo. Praticamente todas as alterações de geometria realizadas no modelo podem ser feitas por essa janela, que possui ferramentas básicas de desenho e de edição onde o sólido pode ser concebido. Uma outra alternativa é a importação da geometria, que pode ser concebida em um *software* terceiro e exportado para o programa utilizando arquivos do formato .stl. Nesse estudo, o sólido foi modelado em um software terceiro e exportado para o *SEEP/3D*, devido à sua complexidade.

Após exportada a geometria é necessária a definição das regiões onde estão presentes as condições de contorno. As condições de contorno são aplicadas nas faces dos sólidos. Na Figura 4-1 podem ser vistas as condições de contorno utilizadas, a condição de contorno do nível do reservatório é representada em azul escuro; a condição de contorno de nível do canal de fuga é representada em azul claro; e a condição de contorno de saída livre é mostrada em rosa. Nessa etapa são designados também os materiais utilizados na geometria, só pode ser definido um tipo de material para cada sólido. Na Figura 4-1 o material Arenito C3 é representado em verde.

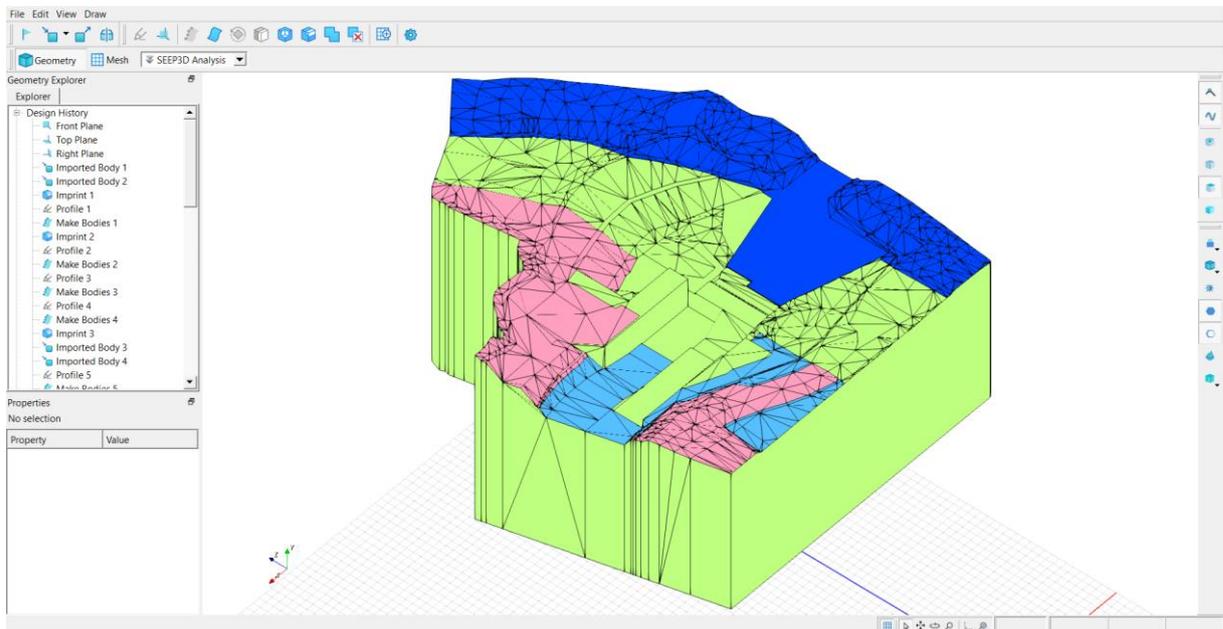


Figura 4-1: Edição de um dos Sólidos Estudados no Módulo BUILD3D.

Como referência, na Figura 4-2 é apresentada a geometria do último sólido analisado, onde são mostradas as posições das estruturas e dos aterros com relação ao sólido confeccionado.

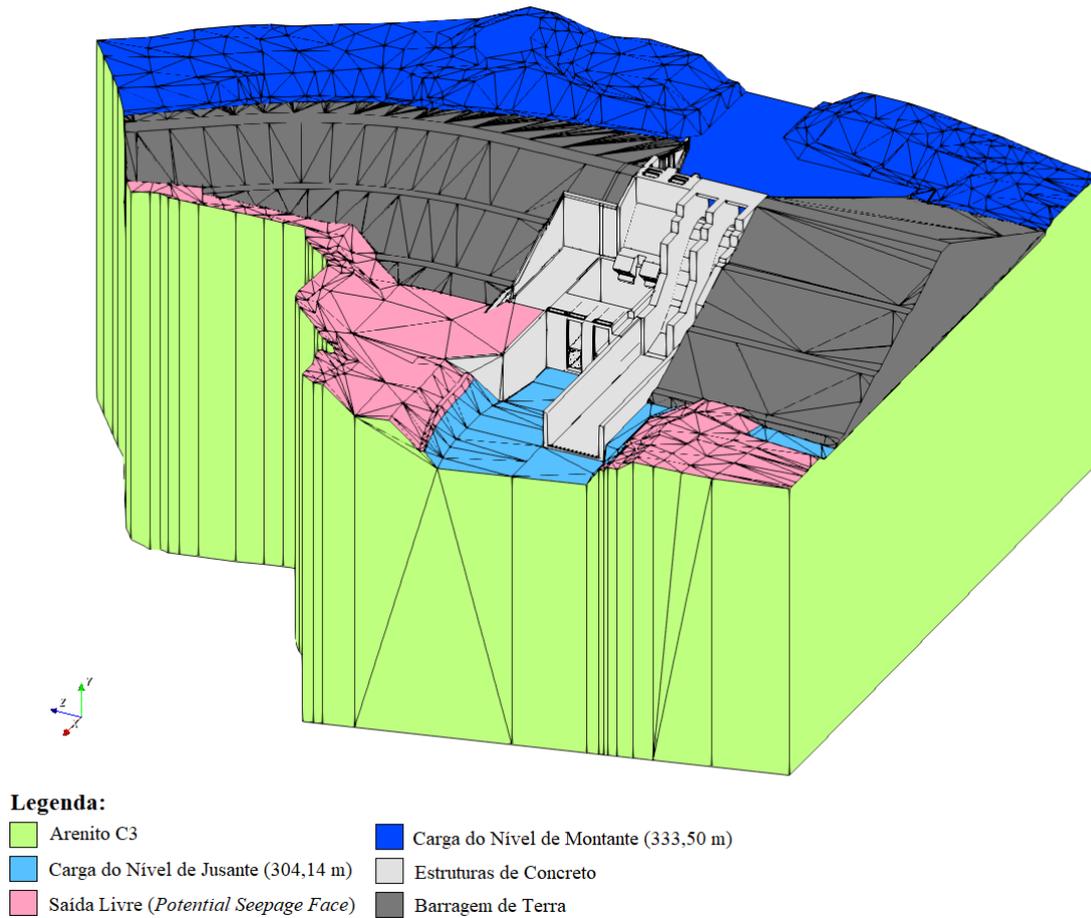


Figura 4-2: Vista do Último Sólido Analisado com as Estruturas.

O *SEEP/3D* funciona por um sistema de coordenadas cartesianas, cujos eixos são denominados x, y e z. Em todas as análises realizadas o eixo y representa as elevações, o eixo x representa a direção de montante-jusante, com sentido positivo para jusante, e o eixo z a direção margem esquerda-margem direita, com sentido positivo para a margem direita.

Após definida a geometria e designadas as condições de contorno e os materiais, deve ser gerada a malha de elementos finitos. Essa etapa também é realizada no módulo *BUILD3D*. O *software* permite escolher um tamanho global de malha, que foi considerado como sendo de 2 m para todas as análises. Além de escolher um tamanho global é possível também definir tamanhos diferentes para diferentes regiões, o que é feito escolhendo tamanhos de malha para determinadas faces do sólido. Esse procedimento foi realizado para refinar a malha em regiões de maior interesse (Figura 4-5) e ao mesmo tempo aumentar o tamanho dos elementos em regiões de menor interesse (Figura 4-4).

No módulo *BUILD3D* é possível também visualizar a qualidade dos elementos gerados, um exemplo dessa visualização é mostrado nas Figuras 4-3, 4-4 e 4-5. Os elementos de maior qualidade são mostrados em verde, enquanto os de menor qualidade são mostrados em vermelho. A qualidade da malha foi verificada em todas as análises realizadas, de forma que a malha na região de interesse ficasse com a melhor qualidade possível.

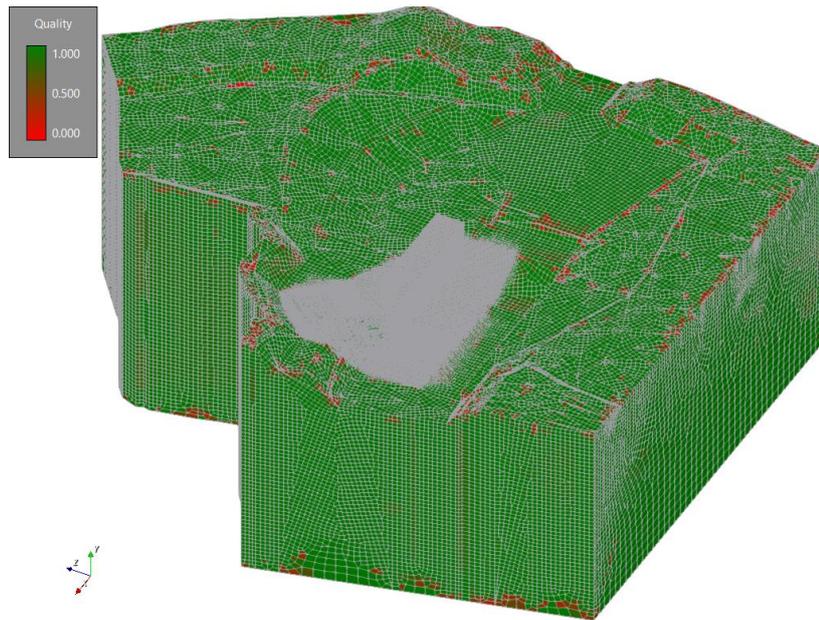


Figura 4-3: Malha de Elementos Finitos Gerada para um dos Sólidos Analisados.

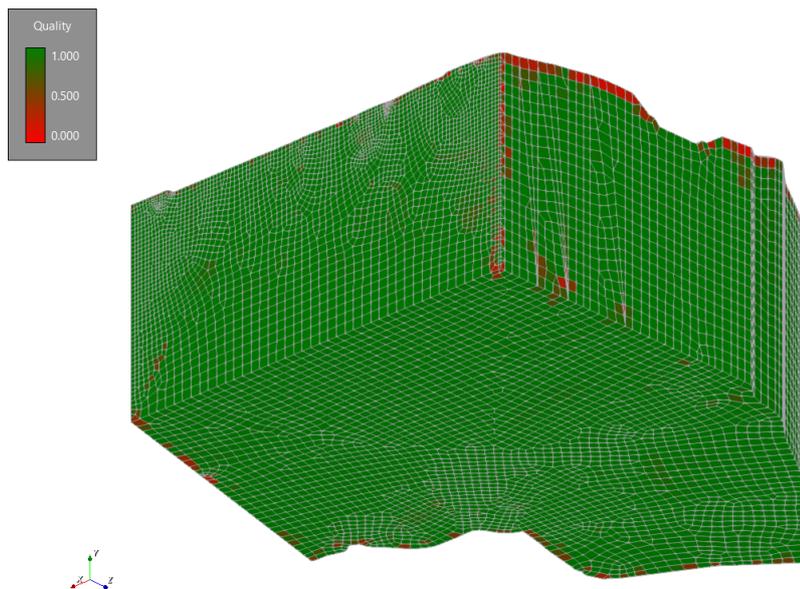


Figura 4-4: Malha de Elementos Finitos Gerada para um dos Sólidos Analisados - Detalhe das Regiões de Menor Interesse.

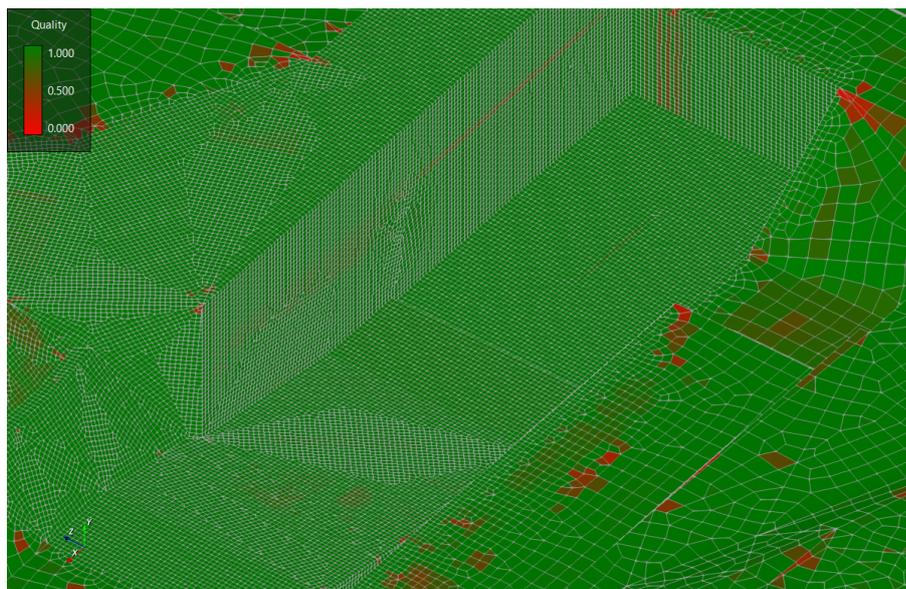


Figura 4-5: Malha de Elementos Finitos Gerada para um dos Sólidos Analisados - Detalhe da Região de Maior Interesse.

Após ser gerada a malha de elementos finitos pode-se partir para o processamento do modelo. Com o modelo processado abre-se a janela de resultados. Nela é possível visualizar o resultado de várias variáveis, como Carga Hidráulica, Poropressão, Gradientes Hidráulicos, entre outros, alguns exemplos de resultados são mostrados nas Figuras 4-6 e 4-7. Na janela de resultados é possível também gerar cortes no sólido para melhor visualização.

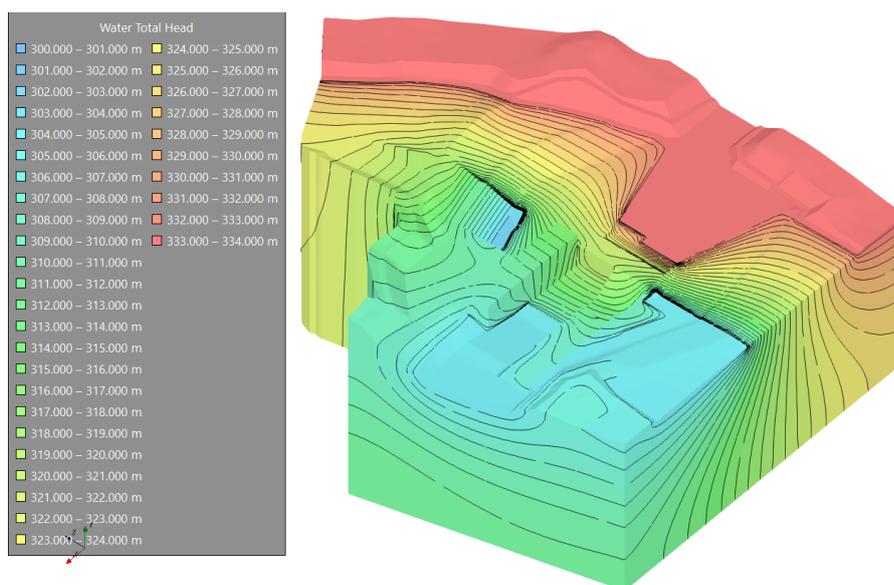


Figura 4-6: Resultado de Carga Hidráulica para uma das Análises Realizadas.

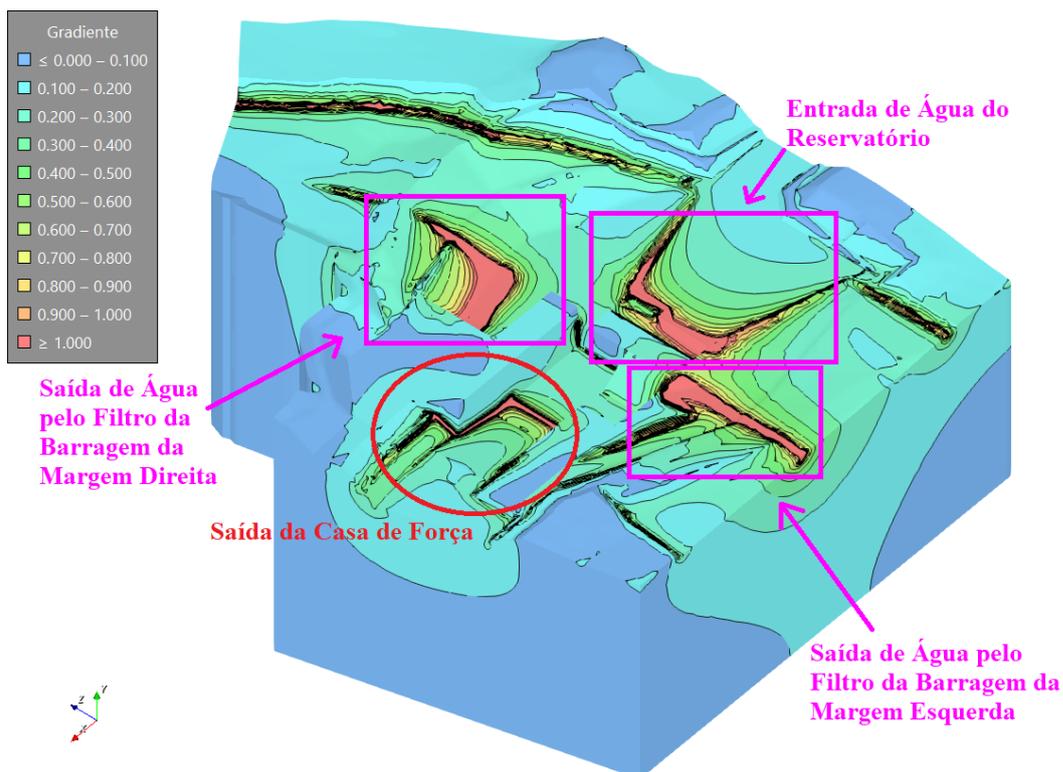
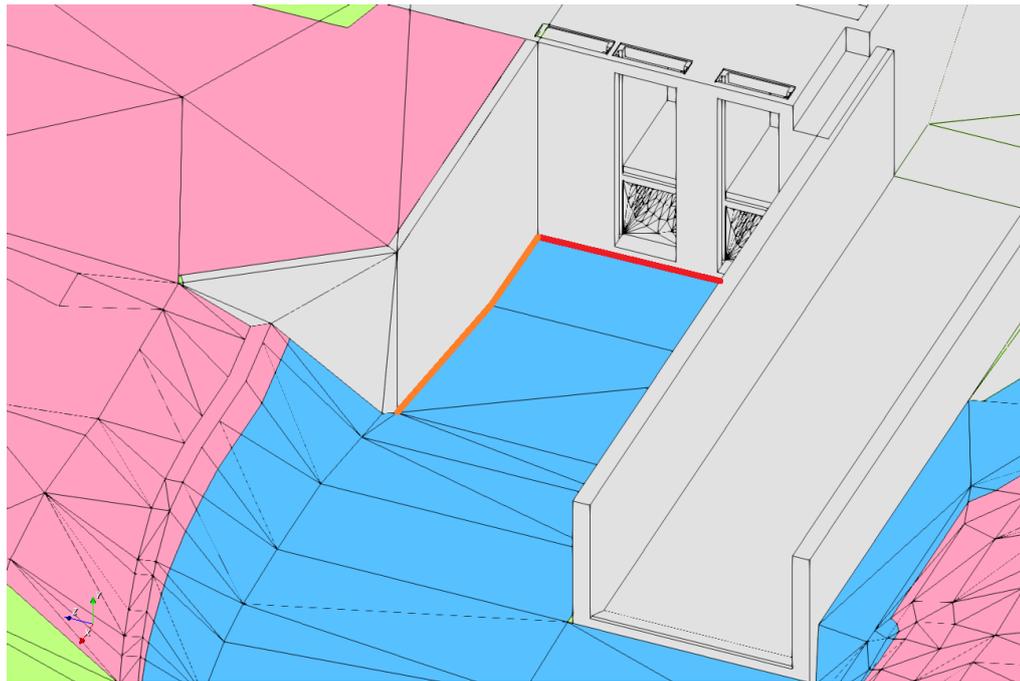


Figura 4-7: Resultado de Gradientes Hidráulicos para uma das Análises Realizadas.

Na Figura 4-7, que mostra o resultado dos gradientes hidráulicos, nota-se que as regiões em vermelho são as que apresentam os maiores valores de gradientes. As regiões destacadas em rosa, apesar de apresentarem gradientes elevados, não oferecem risco de ocorrência de erosão, já que correspondem à região de entrada de água do reservatório e às regiões onde estão presentes os filtros das barragens. Nas regiões do filtro da barragem os gradientes elevados não apresentam risco de erosão já que a água sai de maneira controlada pelo filtro. A outra região que apresenta gradientes elevados, destacada em vermelho, é a região da saída da Casa de Força, nela acredita-se que possa haver algum potencial de erosão.

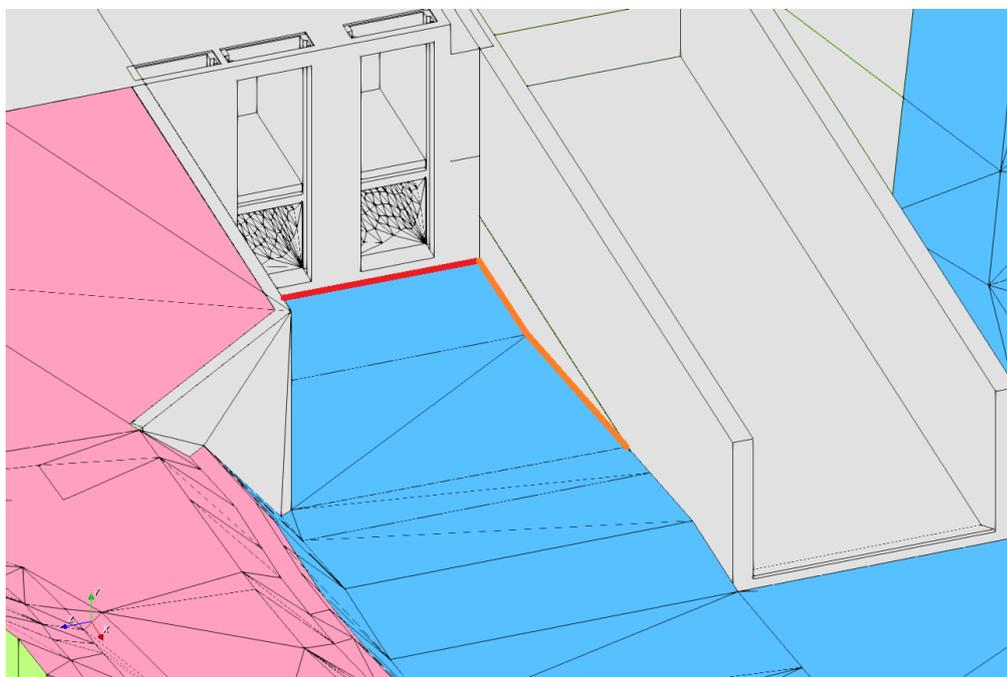
Na janela de visualização de resultados é possível também gerar gráficos dos resultados em regiões de interesse, os gráficos são gerados em geometrias que são denominadas pelo programa de *locations*. Essas *locations* podem ser faces, arestas ou vértices dos sólidos ou então dos elementos da malha. Para esse estudo foram gerados os gráficos nas regiões que apresentavam os maiores valores de gradientes, que correspondem às arestas do sólido onde estão presentes os pés da Casa de Força, do Muro de Contensão e da Bacia de dissipação, como mostram as Figuras 4-8 e 4-9.



**Legenda:**

<span style="color: green;">■</span> Arenito C3	<span style="color: grey;">■</span> Estruturas de Concreto
<span style="color: blue;">■</span> Carga do Nível de Jusante (304,14 m)	<span style="color: red;">■</span> Saída da Casa de Força
<span style="color: pink;">■</span> Saída Livre (Potential Seepage Face)	<span style="color: orange;">■</span> Saída do Muro de Contenção

Figura 4-8: *Locations* Utilizadas para a Geração dos Gráficos - Detalhe 1



**Legenda:**

<span style="color: green;">■</span> Arenito C3	<span style="color: grey;">■</span> Estruturas de Concreto
<span style="color: blue;">■</span> Carga do Nível de Jusante (304,14 m)	<span style="color: red;">■</span> Saída da Casa de Força
<span style="color: pink;">■</span> Saída Livre (Potential Seepage Face)	<span style="color: orange;">■</span> Saída da Bacia de Dissipação

Figura 4-9: *Locations* Utilizadas para a geração dos Gráficos - Detalhe 2

Gerados os gráficos pode-se dizer que a análise está completa, já que foram produzidos todos os elementos necessários para a interpretação dos resultados.

O presente trabalho foi dividido em duas etapas. Inicialmente foram realizadas análises com o objetivo de verificar as influências geométricas do sólido utilizado nos resultados dos gradientes hidráulicos. Nessa etapa foram realizados quatro estudos, que foram:

- Influência da extensão do reservatório à montante;
- Influência da permeabilidade adotada;
- Influência da profundidade do modelo; e
- Extensão do modelo na região da barragem da margem esquerda e estabilização da malha.

Em cada um desses estudos foi analisada alguma característica geométrica do sólido confeccionado que poderia influenciar de alguma maneira o resultado dos gradientes hidráulicos. Nessa etapa, como uma última fase de verificação/validação do modelo tridimensional, foi feita também uma análise bidimensional do mesmo problema, onde os resultados bi e tridimensionais foram comparados.

Na segunda etapa foram propostas e modeladas algumas soluções de controle de gradientes hidráulicos nas regiões que apresentava os maiores valores de gradientes, de forma a evitar/minimizar o fenômeno da erosão regressiva na região da saída da Casa de Força.

Nesse estudo foi feita a consideração de que toda a água que percola no maciço da barragem é captada pelo filtro, ou seja, não há vazão entre o maciço da barragem e a fundação. Essa consideração é válida já que a maior parte da água que percola pelo aterro da barragem sai de maneira controlada pelos filtros, não tendo grande impacto em termos de gradientes hidráulicos na fundação. A consequência dessa consideração para o modelo é que não é necessária a modelagem dos aterros. Porém, mesmo que os aterros não façam parte da modelagem, é necessário conhecer sua geometria para que o modelo represente bem as condições de fluxo e para que as condições de contorno do problema sejam aplicadas de forma correta.

## **5 ANÁLISES E RESULTADOS**

Este capítulo será dividido em duas partes: análises de validação do modelo e soluções adotadas, nas quais serão apresentadas todas as análises executadas no presente trabalho e seus respectivos resultados.

### **5.1 ANÁLISES DE VALIDAÇÃO DO MODELO**

Essas análises foram realizadas com a finalidade de verificar a influência que a geometria do sólido utilizado teria no resultado dos gradientes hidráulicos. O objetivo dessa etapa é definir os parâmetros, geométricos e de material, que representem de maneira mais eficiente as condições da usina. Por eficiente define-se de maneira que ofereça um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o tempo de computação. Também foi realizada uma verificação do modelo utilizado, que foi uma comparação com o resultado da análise bidimensional do mesmo problema. Todos os gráficos gerados nessa etapa correspondem à *location* localizada ao pé da Casa de Força, mostrada nas Figuras 4-8 e 4-9.

#### **5.1.1 Influência da extensão do reservatório à montante**

O objetivo dessa análise foi verificar se a extensão do reservatório à montante da barragem influenciava de alguma maneira os resultados de gradiente hidráulico obtidos. O primeiro sólido analisado foi o sólido apresentado na Figura 5-1.

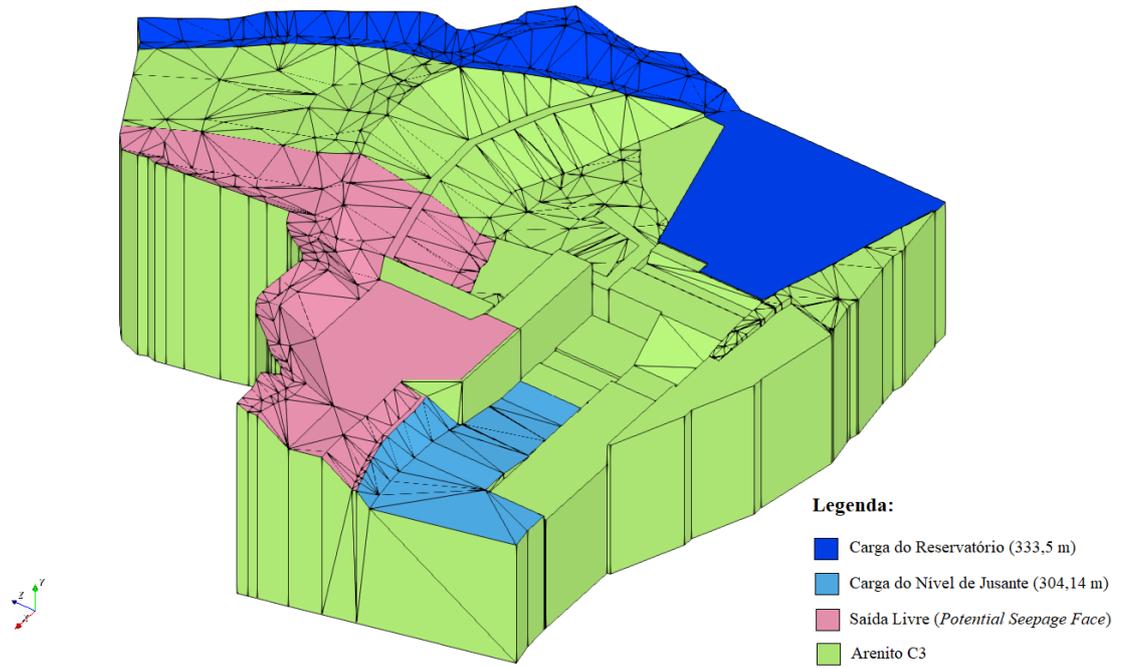


Figura 5-1: Primeiro Sólido Analisado.

Esse sólido foi comparado com o sólido mostrado na Figura 5-2, onde a área englobada pelo reservatório foi estendida 30 m na direção montante.

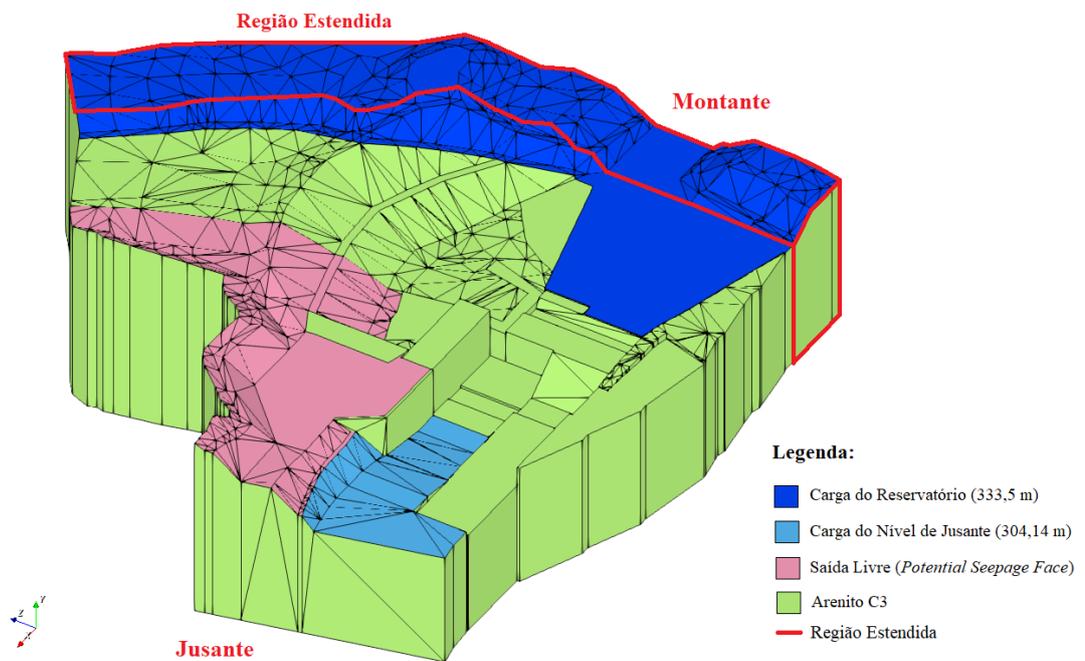


Figura 5-2: Sólido com Reservatório Estendido.

Nas Figuras 5-3 e 5-4 são mostrados dois cortes transversais passando pelo eixo da Casa de Força desses modelos. Neles é possível ver com mais detalhe a região que foi estendida.

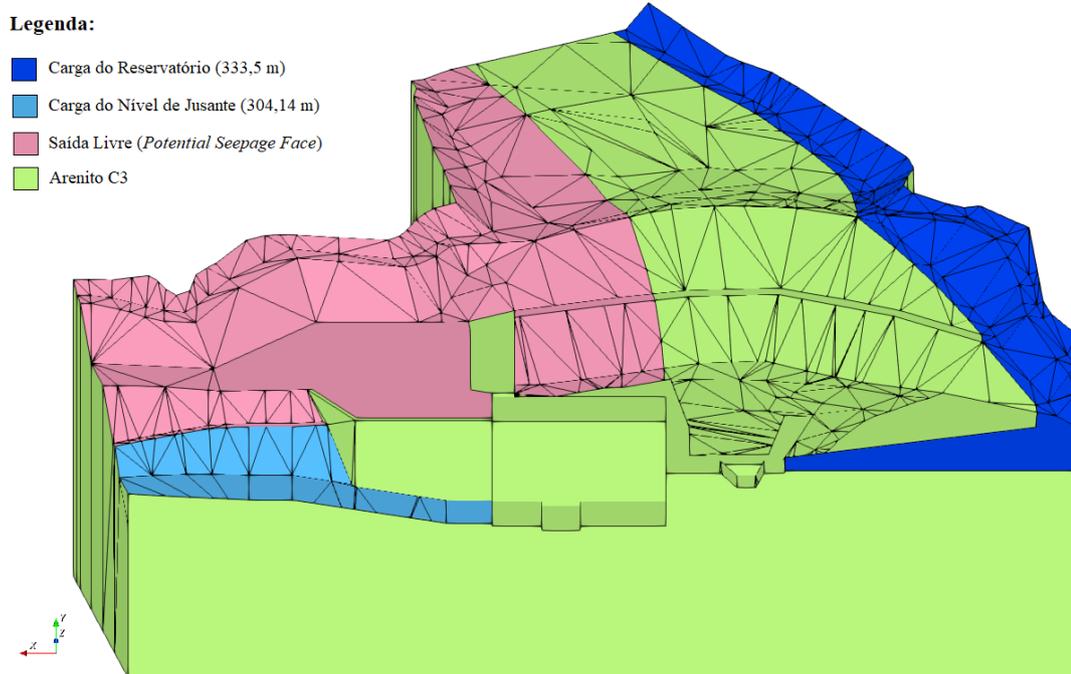


Figura 5-3: Primeiro Sólido Analisado – Corte.

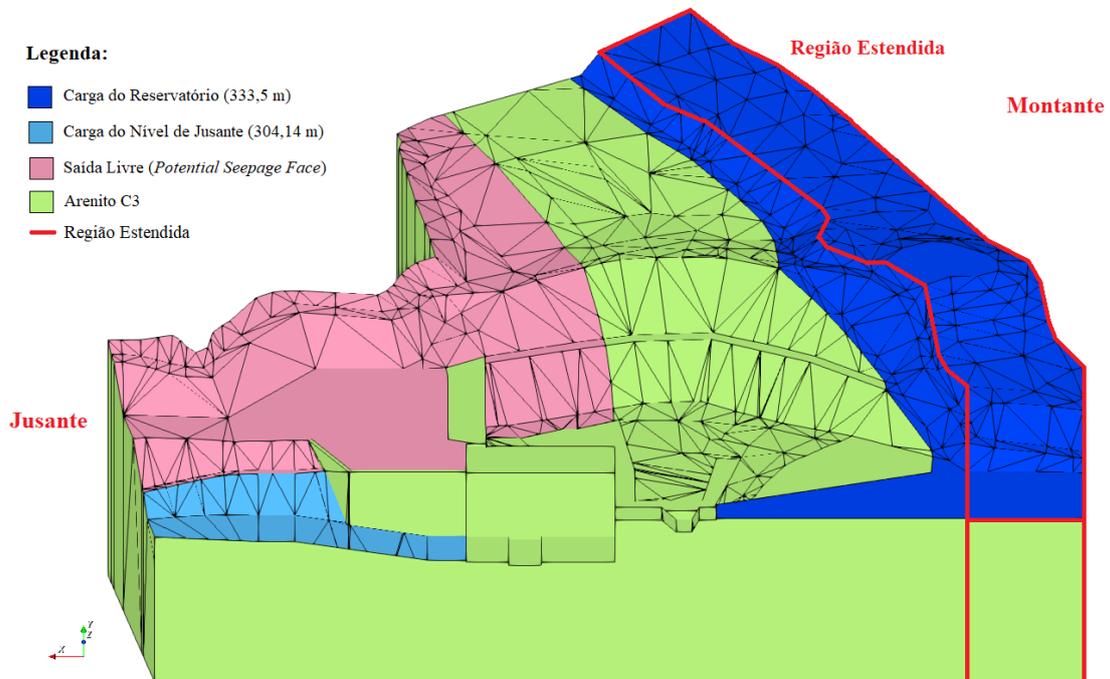


Figura 5-4: Sólido Estendido – Corte.

O resultado das duas análises realizadas é mostrado na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Resultado das Análises de Extensão do Reservatório.

Modelo Inicial		Montante +30 m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
47,5	2,86	47,5	3,37
48,4	2,43	48,4	2,84
49,4	2,66	49,4	2,84
50,4	2,69	50,4	2,79
51,4	2,59	51,4	2,67
52,4	2,52	52,4	2,58
53,3	2,47	53,3	2,54
54,3	2,43	54,3	2,50
55,3	2,40	55,3	2,47
56,3	2,37	56,3	2,43
57,2	2,37	57,2	2,43
58,2	2,31	58,2	2,38
59,2	2,31	59,2	2,38
60,2	2,31	60,2	2,38
61,1	2,30	61,1	2,37
62,1	2,30	62,1	2,38
63,1	2,31	63,1	2,39
64,1	2,32	64,1	2,40
65,0	2,35	65,0	2,43
66,0	2,38	66,0	2,46
67,0	2,44	67,0	2,52
68,0	2,51	68,0	2,60
68,9	2,65	68,9	2,75
69,9	2,90	69,9	3,00

A partir dos dados da tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 5-5.

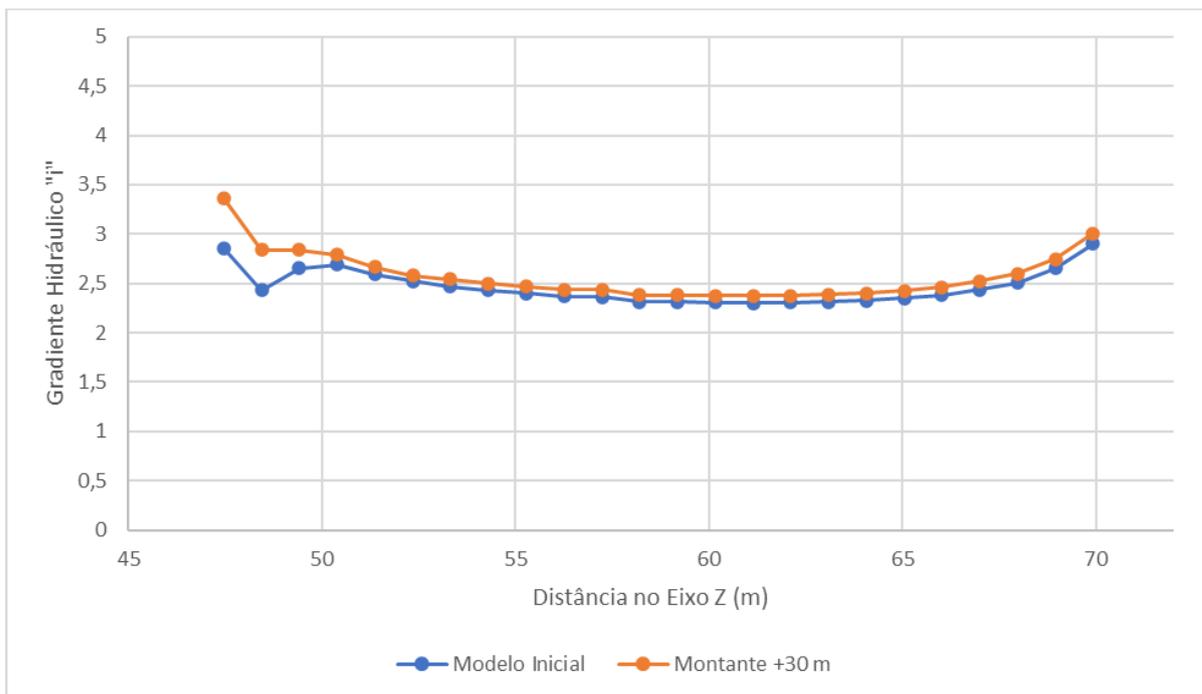


Figura 5-5: Resultado das Análises de Extensão do Reservatório.

Analisando o gráfico da Figura 5-5, é possível notar que o acréscimo de área do reservatório no modelo resultou em um leve aumento do gradiente na saída da Casa de Força. Nas análises seguintes optou-se por utilizar o modelo estendido em 30 m mostrado na Figura 5-2. Não foram realizadas outras análises estendendo ainda mais o modelo pois, já que o aumento do gradiente não foi tão significativo, decidiu-se por reduzir o tempo de processamento e por simplificar a elaboração do modelo sem que houvesse grande prejuízo no resultado.

### 5.1.2 Influência da permeabilidade

O objetivo dessa análise foi verificar se a permeabilidade adotada teria alguma influência nos resultados do gradiente hidráulico. Essa análise foi realizada pois, para poder simplificar o modelo, adotando apenas um tipo de material para todo o sólido, era necessário verificar se haveria algum tipo de mudança quando adotada a permeabilidade do Arenito C2 ( $2,6 \cdot 10^{-7}$  m/s) ou a permeabilidade do Arenito C3 ( $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s). Foram analisadas quatro permeabilidades diferentes  $5,0 \cdot 10^{-6}$  m/s,  $1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s,  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s e  $1,0 \cdot 10^{-7}$  m/s. O sólido utilizado foi o mesmo apresentado na Figura 5-2. O resultado obtido é apresentado na Tabela 5-2. Como referência, nas Figuras 5-6 e 5-7 são apresentadas duas seções passando pelo eixo da casa de força para a análise com permeabilidade de  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s, nelas é possível verificar os resultados de Carga Hidráulica e de Gradiente Hidráulico obtidos pelo *software*, esses resultados são equivalentes aos resultados obtidos para as outras permeabilidades, já que os valores obtidos foram os mesmos.

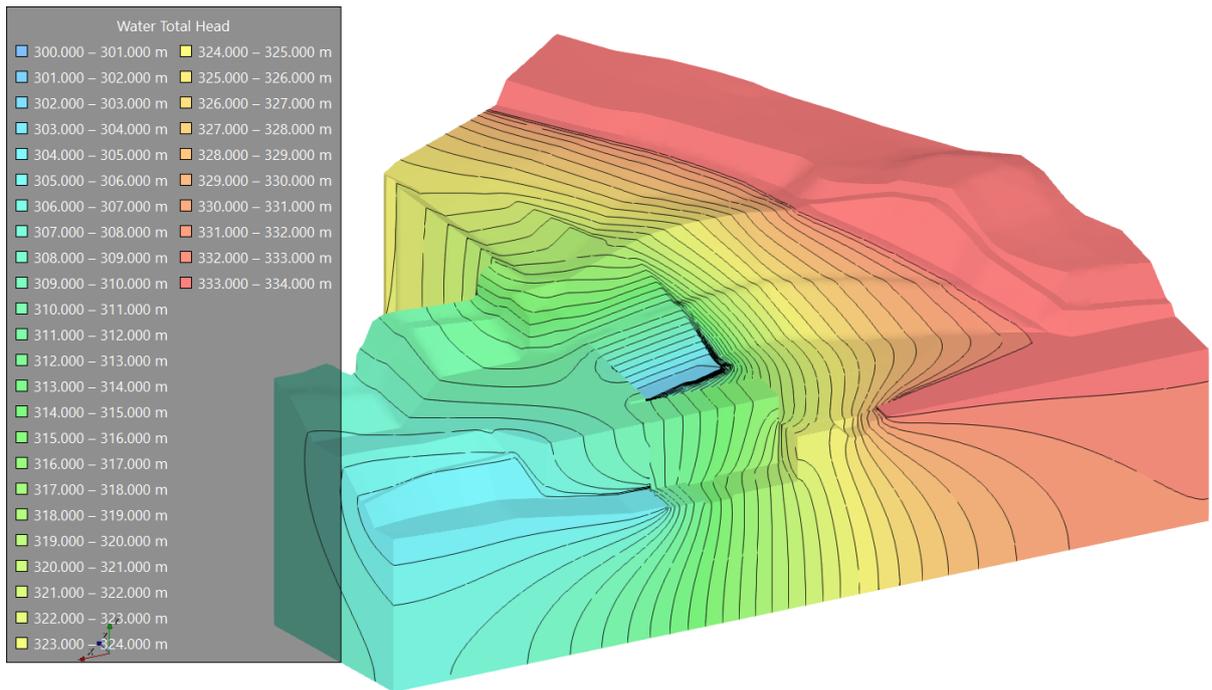


Figura 5-6: Resultado de Carga Hidráulica Obtido para a Análise de Permeabilidade de  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

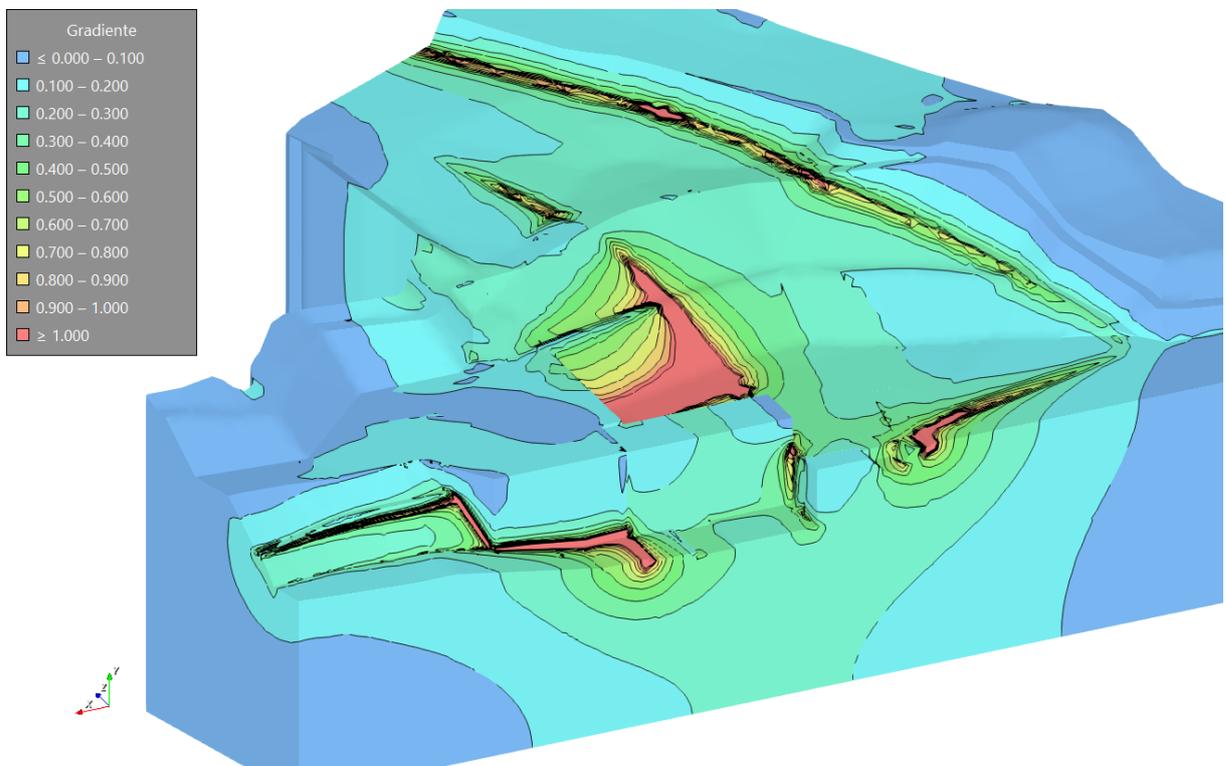


Figura 5-7: Resultado de Gradientes Hidráulico Obtido para a Análise de Permeabilidade de  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s.

Tabela 5-2: Resultado das Análises de Influência da Permeabilidade.

k = 5,0.10 <sup>-6</sup> m/s		k = 1,0.10 <sup>-6</sup> m/s		k = 3,1.10 <sup>-7</sup> m/s		k = 1,0.10 <sup>-7</sup> m/s	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
47,5	3,24	47,5	3,24	47,5	3,24	47,5	3,24
48,4	2,75	48,4	2,75	48,4	2,75	48,4	2,75
49,4	2,94	49,4	2,94	49,4	2,94	49,4	2,94
50,4	2,72	50,4	2,72	50,4	2,72	50,4	2,72
51,4	2,68	51,4	2,68	51,4	2,68	51,4	2,68
52,4	2,57	52,4	2,57	52,4	2,57	52,4	2,57
53,3	2,52	53,3	2,52	53,3	2,52	53,3	2,52
54,3	2,49	54,3	2,49	54,3	2,49	54,3	2,49
55,3	2,45	55,3	2,45	55,3	2,45	55,3	2,45
56,3	2,42	56,3	2,42	56,3	2,42	56,3	2,42
57,2	2,42	57,2	2,42	57,2	2,42	57,2	2,42
58,2	2,37	58,2	2,37	58,2	2,37	58,2	2,37
59,2	2,37	59,2	2,37	59,2	2,37	59,2	2,37
60,2	2,36	60,2	2,36	60,2	2,36	60,2	2,36
61,1	2,36	61,1	2,36	61,1	2,36	61,1	2,36
62,1	2,36	62,1	2,36	62,1	2,36	62,1	2,36
63,1	2,37	63,1	2,37	63,1	2,37	63,1	2,37
64,1	2,38	64,1	2,38	64,1	2,38	64,1	2,38
65,0	2,41	65,0	2,41	65,0	2,41	65,0	2,41
66,0	2,44	66,0	2,44	66,0	2,44	66,0	2,44
67,0	2,50	67,0	2,50	67,0	2,50	67,0	2,50
68,0	2,57	68,0	2,57	68,0	2,57	68,0	2,57
68,9	2,72	68,9	2,72	68,9	2,72	68,9	2,72
69,9	2,98	69,9	2,98	69,9	2,98	69,9	2,98

A partir dos dados da tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 5-8.

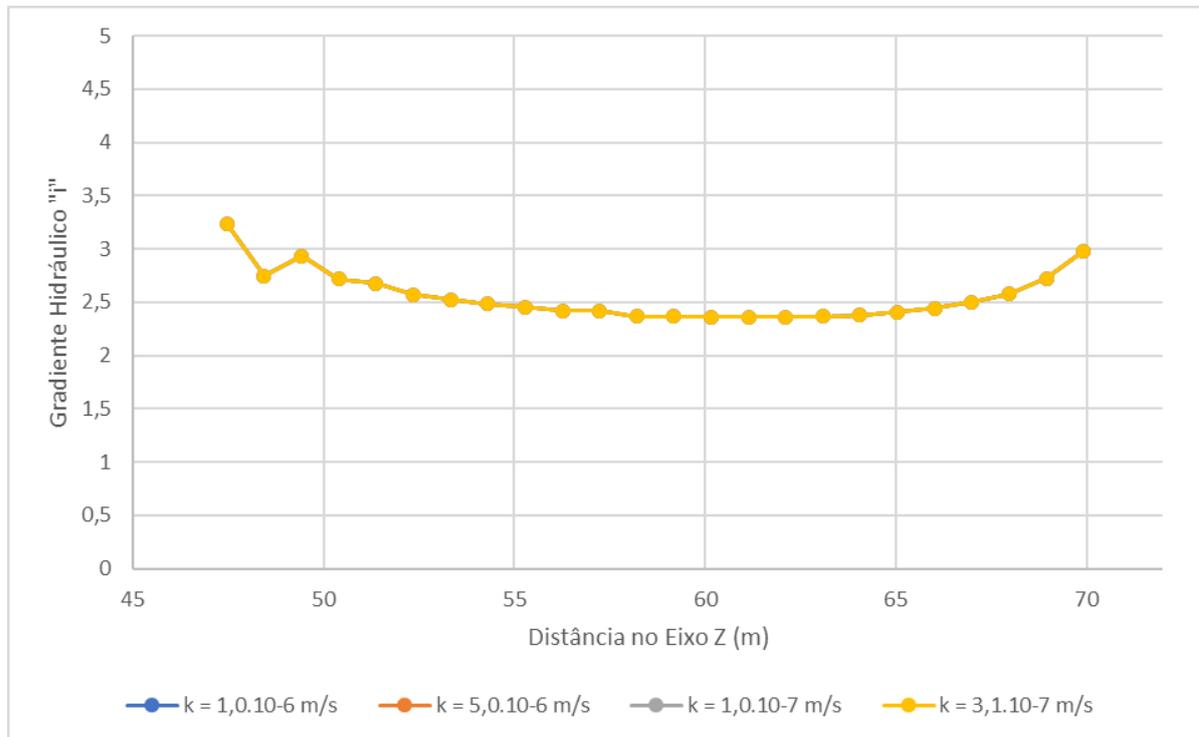


Figura 5-8: Resultado das Análises de Permeabilidade.

A partir da análise do gráfico é possível notar que não há mudança do gradiente hidráulico em função da permeabilidade adotada. Esse resultado pode ser explicado com uma análise da Equação 2.19 apresentada no Capítulo 2. Quando o material é considerado homogêneo, como é considerado nas análises, as variáveis  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  podem ser cortadas da equação e o resultado do gradiente independe dos valores de permeabilidade. A partir dos resultados, e pelo fato das permeabilidades dos três materiais nos quais estão assentes a fundação da barragem serem muito parecidas -  $2,6 \cdot 10^{-7}$  m/s para o Arenito C2,  $3,1 \cdot 10^{-7}$  m/s para o Arenito C3 e  $5,1 \cdot 10^{-7}$  para o Arenito C4 - decidiu-se por utilizar apenas um material nas análises realizadas posteriormente, com isso foi possível simplificar a elaboração do modelo, não sendo necessária sua divisão em camadas.

### 5.1.3 Influência da profundidade “d” do modelo

O próximo passo realizado foi verificar a influência que a profundidade “d” do modelo tem nos resultados dos gradientes. Para isso foram analisados três modelos diferentes, o primeiro foi o modelo apresentado na Figura 5-2, que tem uma profundidade de 50 m. Em seguida foi analisado o modelo mostrado na Figura 5-9, que tem uma profundidade de 100 m e, por fim, o modelo da Figura 5-10, que tem uma profundidade de 130 m. Todas essas profundidades são em relação à cota 303 m.

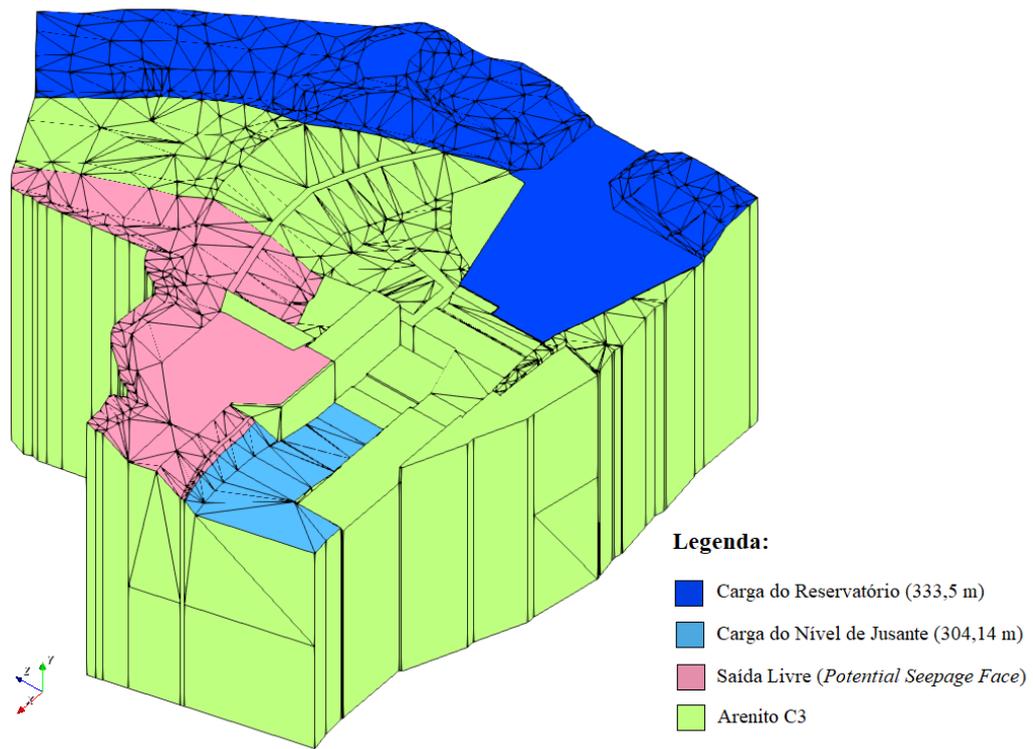


Figura 5-9: Modelo com Profundidade de 100m.

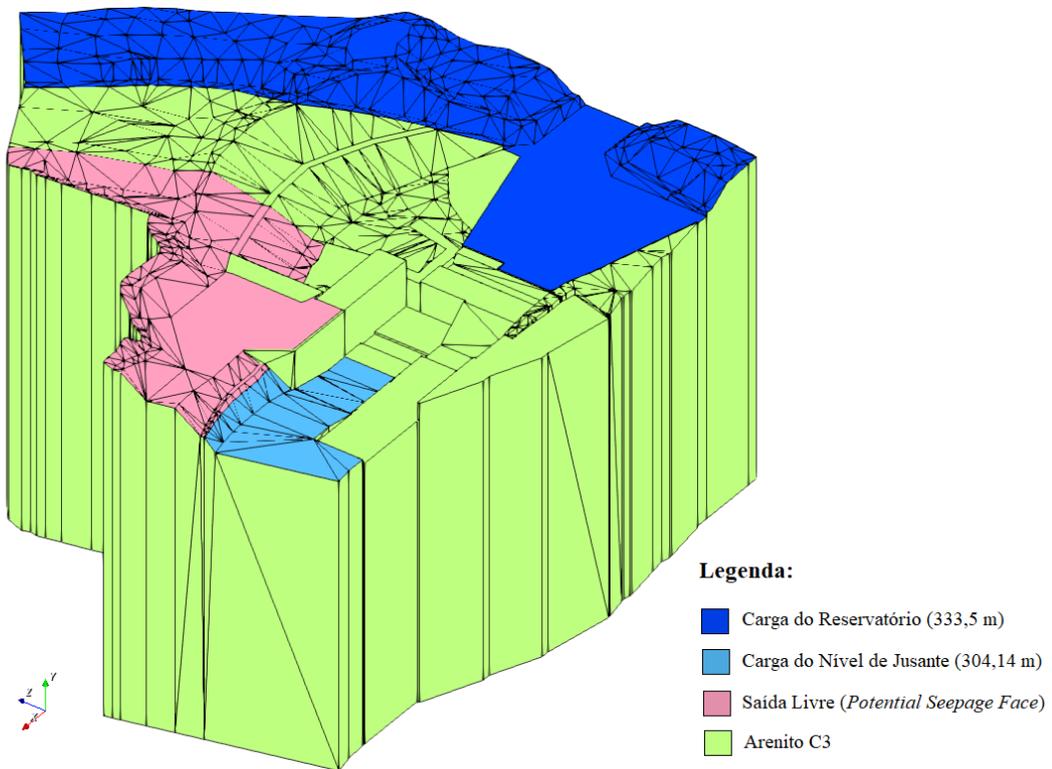


Figura 5-10: Modelo com Profundidade de 130 m.

Os resultados obtidos com as análises são mostrados na Tabela 5-3, são mostrados também, nas Figuras 5-11, 5-12, 5-13 e 5-14, os resultados de Carga Hidráulica e de Gradiente Hidráulico obtidos pelo software para um corte passando pelo eixo da Casa de Força desses modelos. Nessas figuras são mostrados os resultados para os modelos de 100 m e de 130 m, o resultado para o modelo de 50 m é equivalente ao obtido no item anterior, e pode ser visto nas Figuras 5-6 e 5-7.

Tabela 5-3: Resultados das Análises de Influência da Profundidade.

d = 50 m		d = 100 m		d = 130 m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
47,5	3,24	47,5	3,27	47,5	3,82
48,4	2,75	48,5	2,87	48,4	3,26
49,4	2,94	49,5	3,11	49,4	3,29
50,4	2,72	50,6	3,16	50,4	3,25
51,4	2,68	51,6	2,98	51,4	3,09
52,4	2,57	52,6	2,92	52,4	3,01
53,3	2,52	53,6	2,86	53,3	2,96
54,3	2,49	54,6	2,81	54,3	2,91
55,3	2,45	55,6	2,78	55,3	2,88
56,3	2,42	56,7	2,76	56,3	2,84
57,2	2,42	57,7	2,74	57,2	2,85
58,2	2,37	58,7	2,72	58,2	2,79
59,2	2,37	59,7	2,71	59,2	2,79
60,2	2,36	60,7	2,71	60,2	2,79
61,1	2,36	61,7	2,71	61,1	2,79
62,1	2,36	62,8	2,73	62,1	2,79
63,1	2,37	63,8	2,74	63,1	2,81
64,1	2,38	64,8	2,77	64,1	2,83
65,0	2,41	65,8	2,81	65,0	2,86
66,0	2,44	66,8	2,88	66,0	2,90
67,0	2,50	67,8	2,96	67,0	2,98
68,0	2,57	68,9	3,14	68,0	3,07
68,9	2,72	69,9	3,43	68,9	3,25
69,9	2,98	-	-	69,9	3,56

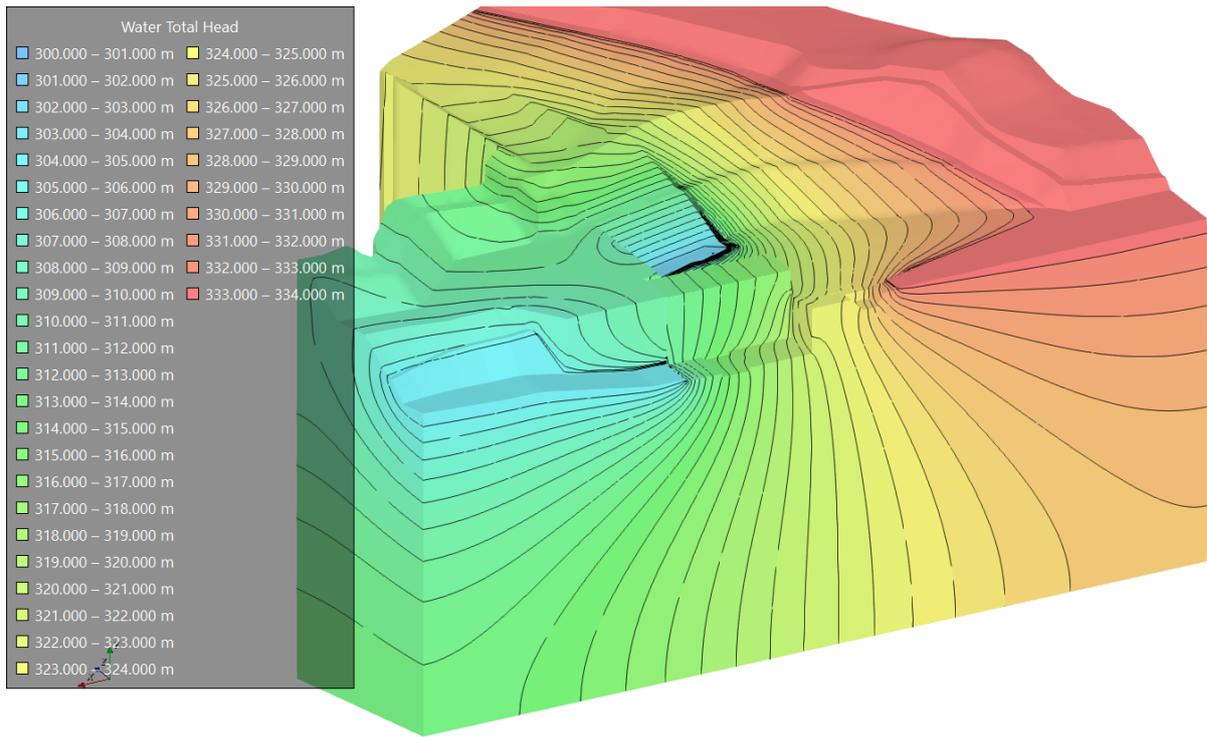


Figura 5-11: Carga Hidráulica para o Modelo de 100 m.

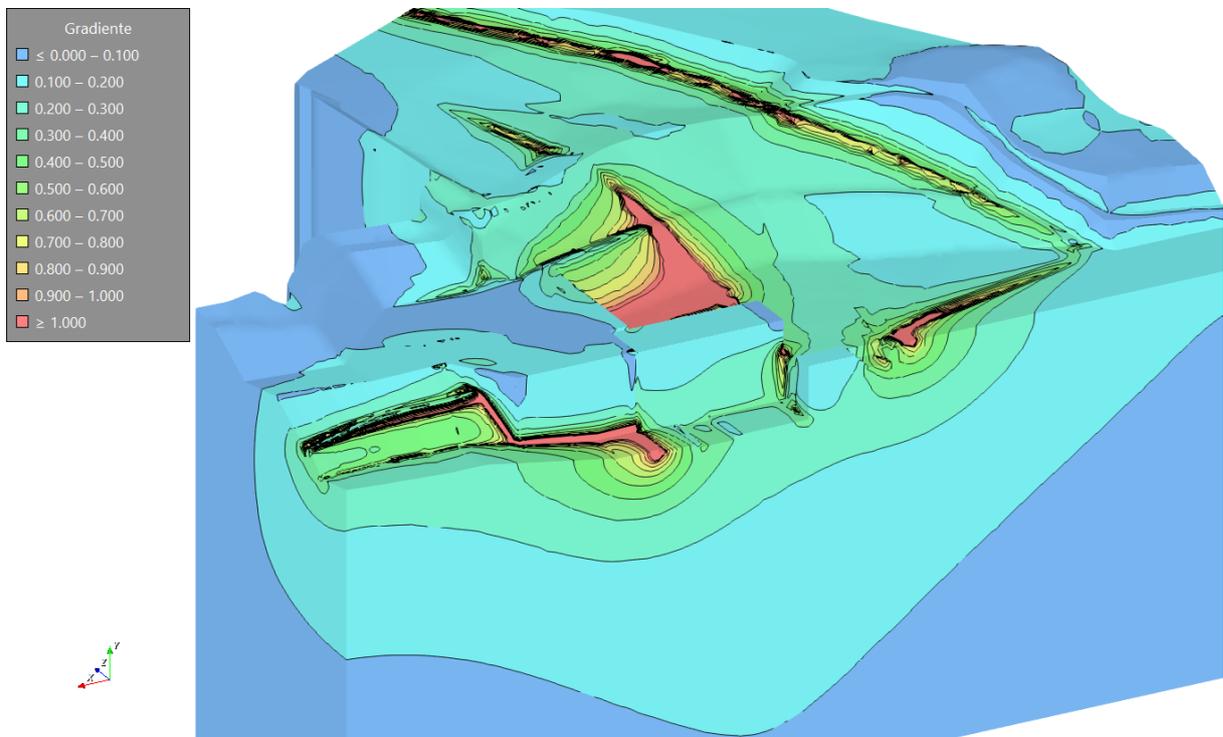


Figura 5-12: Gradiente Hidráulico para o Modelo de 100 m.

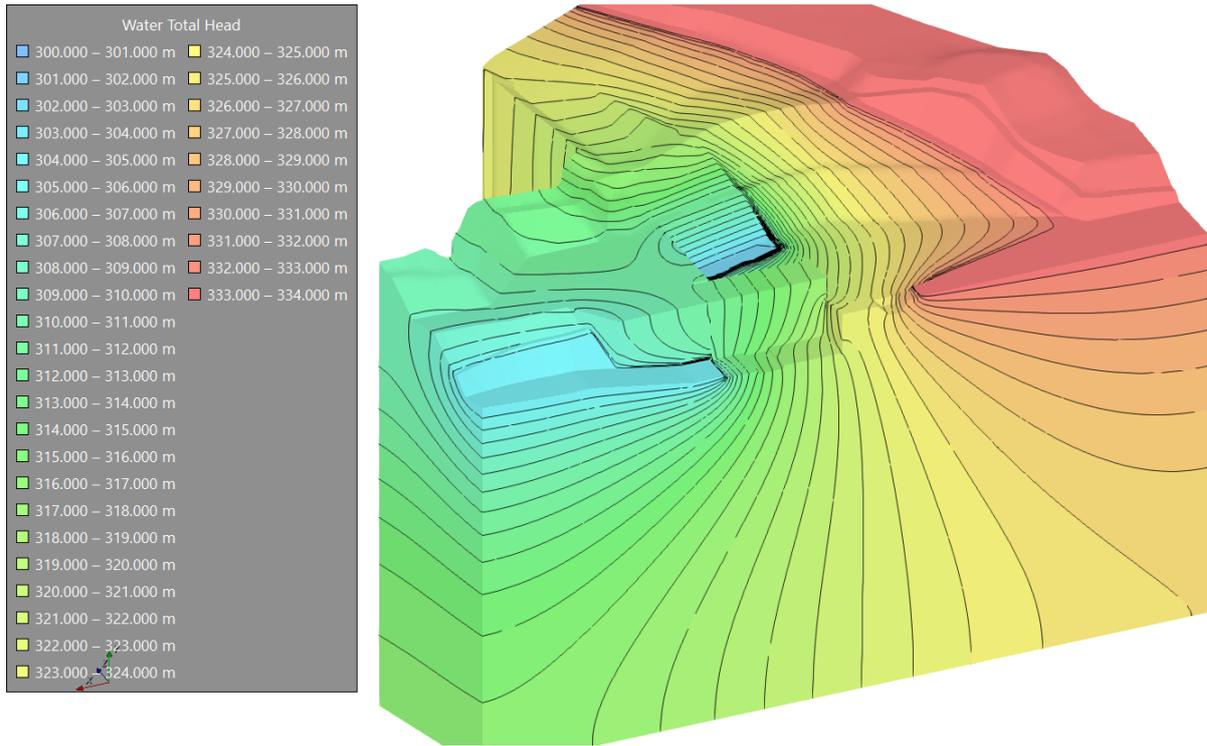


Figura 5-13: Carga Hidráulica para o Modelo de 130 m.

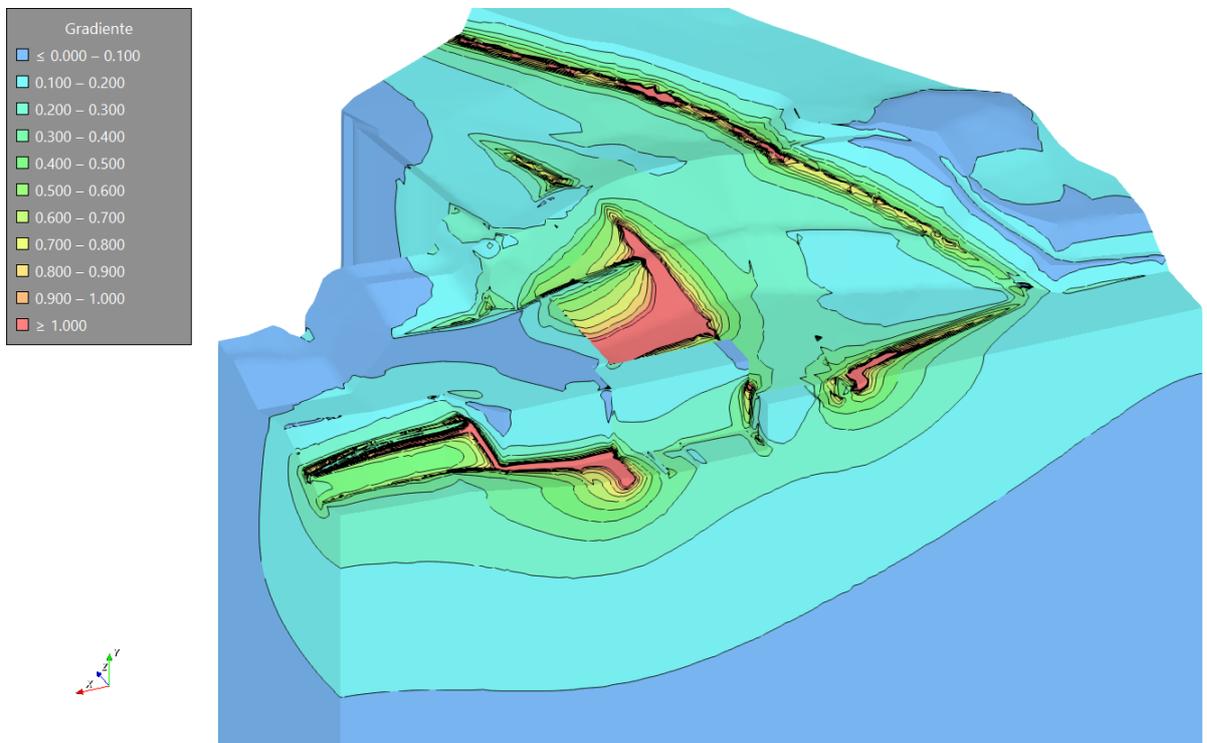


Figura 5-14: Gradiente Hidráulico para o Modelo de 130 m.

A partir dos dados da Tabela 5-3 foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 5-15.

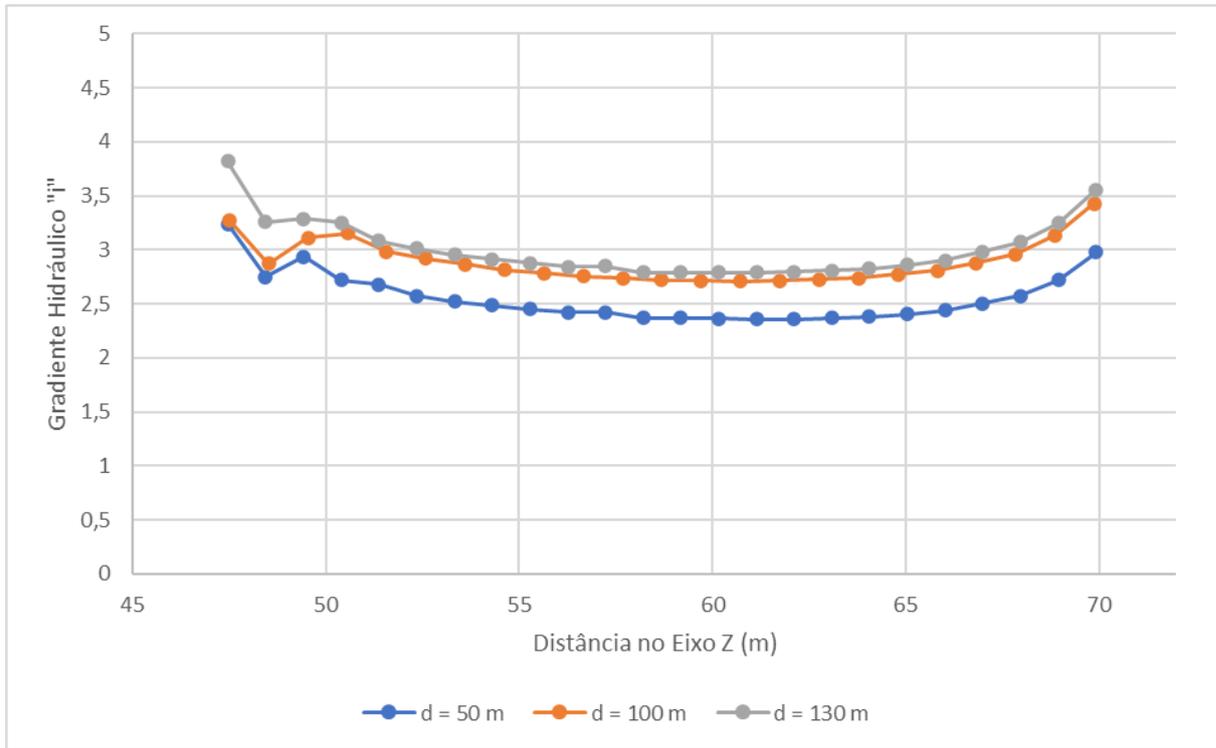


Figura 5-15: Resultados das Análises de Profundidade.

Analisando os resultados, verifica-se que a profundidade utilizada no modelo tem grande influência no resultado dos Gradientes Hidráulicos. Isso é explicado pelo Efeito de Borda. O Efeito de Borda é verificado quando a extensão do domínio tem influência no cálculo das variáveis no interior deste. Fazendo uma extrapolação do que é visto no gráfico, percebe-se que o aumento da profundidade, inicialmente, tem grande influência, porém, a partir de um certo valor, o acréscimo de profundidade não resulta em uma alteração grande no valor do gradiente, como pode ser visto comparando-se os gráficos para  $d = 100$  m e  $d = 130$  m. Dessa maneira, decidiu-se por prosseguir com as análises utilizando uma profundidade de 100 m, de forma a simplificar o modelo sem influenciar de forma significativa os resultados.

#### 5.1.4 Extensão do modelo e estabilização da malha

Esta etapa de validação do modelo foi motivada pelo comportamento inusitado que os gráficos da Figura 5-15 estavam apresentando na extremidade esquerda, que corresponde, no modelo, à

região que está localizada a bacia de dissipação. Decidiu-se então por estender o modelo nessa região em direção à barragem da margem esquerda, como mostra a Figura 5-16.

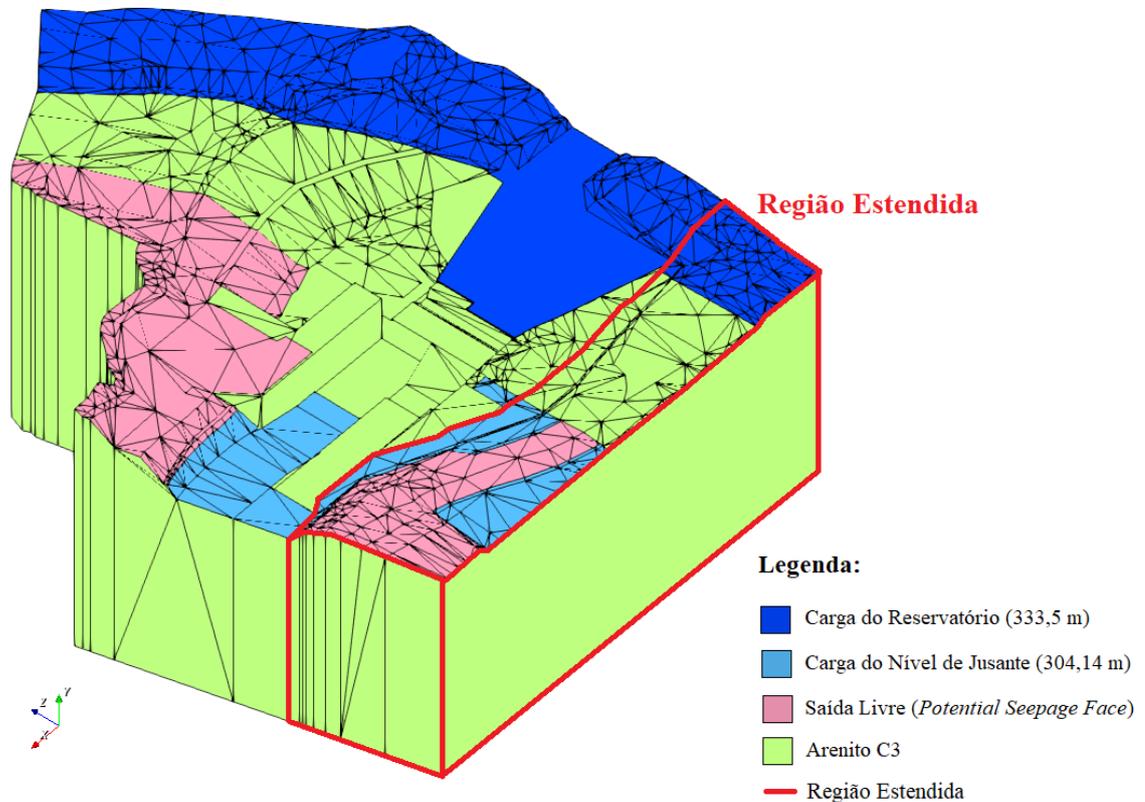


Figura 5-16: Modelo Estendido na Direção da Barragem da Margem Esquerda.

Procedeu-se então ao processamento do modelo, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Resultados das Análises de Extensão do Modelo e Estabilização da Malha.

Modelo Estendido		Modelo Final	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
101,4	2,52	101,4	2,54
101,9	2,29	101,9	2,27
102,4	2,11	102,4	2,10
102,9	2,03	102,9	2,00
103,5	1,97	103,4	1,94
104,0	1,93	103,9	1,90
104,5	1,89	104,4	1,87
105,0	1,87	104,9	1,84
105,5	1,85	105,4	1,82
106,0	1,83	105,9	1,80
106,5	1,81	106,4	1,79

Modelo Estendido		Modelo Final	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
107,0	1,80	106,9	1,78
107,5	1,79	107,4	1,77
108,0	1,79	107,9	1,77
108,5	1,78	108,4	1,76
109,0	1,78	108,9	1,76
109,5	1,78	109,4	1,75
110,1	1,78	109,9	1,75
110,6	1,78	110,4	1,75
111,1	1,77	110,9	1,75
111,6	1,78	111,4	1,75
112,1	1,78	111,9	1,76
112,6	1,78	112,4	1,76
113,1	1,78	112,9	1,76
113,6	1,79	113,4	1,77
114,1	1,80	113,9	1,77
114,6	1,80	114,4	1,78
115,1	1,81	114,9	1,78
115,6	1,82	115,4	1,79
116,2	1,83	115,9	1,80
116,7	1,84	116,4	1,81
117,2	1,85	116,8	1,82
117,7	1,86	117,3	1,83
118,2	1,88	117,8	1,84
118,7	1,90	118,3	1,86
119,2	1,93	118,8	1,88
119,7	1,96	119,3	1,90
120,2	1,98	119,8	1,92
120,7	2,01	120,3	1,94
121,2	2,03	120,8	1,97
121,8	2,07	121,3	2,01
122,3	2,13	121,8	2,05
122,8	2,20	122,3	2,10
123,3	2,29	122,8	2,17
123,8	2,41	123,3	2,26
124,3	2,62	123,8	2,39
124,8	2,98	124,3	2,62
-	-	124,8	2,97

A partir dos dados da tabela foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 5-17.

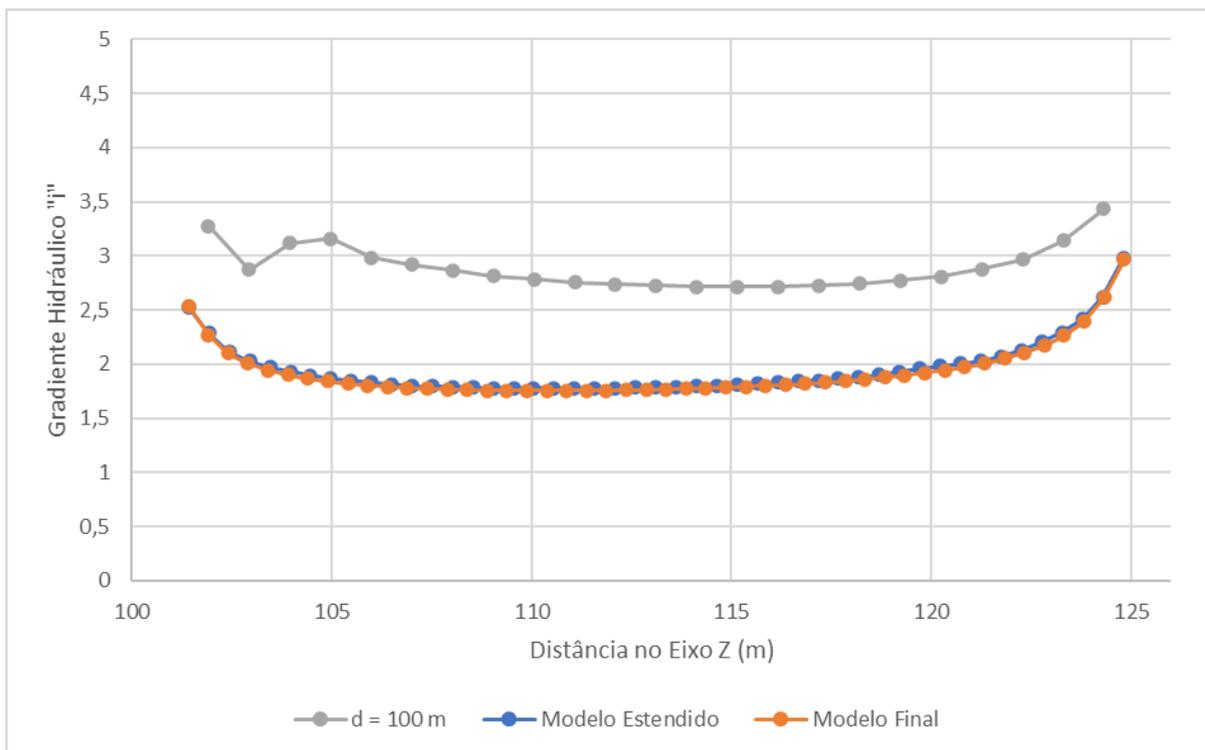


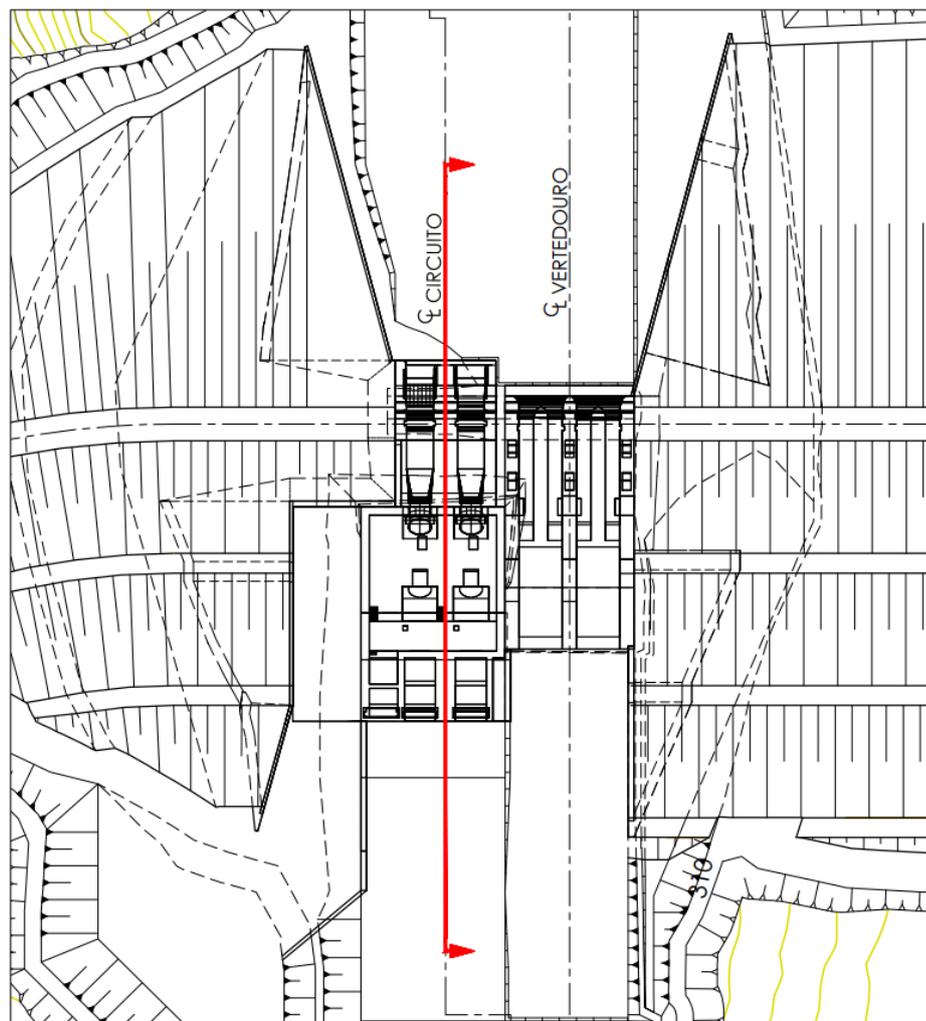
Figura 5-17: Resultados das Análises de Extensão do Modelo e Regularização da Malha.

Neste gráfico são apresentados os resultados do Modelo Estendido e do Modelo Final que correspondem, respectivamente, ao primeiro processamento realizado para essa geometria e ao último processamento realizado após alguns refinamentos na malha. Este último foi considerado como o modelo que seria utilizado para as análises finais, por ter apresentado os resultados mais coerentes. Além disso foi apresentado o resultado da geometria analisada anteriormente, que corresponde ao sólido de 100 m de profundidade do item anterior. Para o modelo utilizado anteriormente ( $d = 100$  m) foi utilizada uma malha com tamanho de 1 metro não região da Casa de força, no Modelo Estendido e no Modelo Final essa malha foi reduzida para 0,5 metros.

Analisando o gráfico da Figura 5-17, é possível notar que a geometria no entorno da região que se deseja estudar e o tamanho da malha utilizada geram um grande impacto no resultado dos gradientes. Dessa maneira, para análises de Gradientes Hidráulicos, é essencial que seja adotada uma malha suficientemente precisa na região estudada e que o profissional responsável pelas análises tenha experiência na confecção do sólido exportado, de forma que este represente bem as condições de fluxo do problema.

### 5.1.5 Comparação com a análise bidimensional

Por fim, como uma última etapa de validação, foi realizada uma análise bidimensional do mesmo problema. A Análise Bidimensional é uma maneira mais comum, tanto no meio acadêmico quanto no profissional, para realizar estudos de percolação em barragens. Por isso, decidiu-se utilizá-la como balizador para a análise tridimensional desse estudo, utilizando os resultados bidimensionais como uma última etapa de verificação/validação do modelo tridimensional. Para isso foi utilizado o *software SEEP/W*. A análise bidimensional foi realizada utilizando os mesmos parâmetros geotécnicos adotados na análise tridimensional. Foi feita uma seção pelo eixo da Casa de Força, como mostrado na Figura 5-18.



**LEGENDA:**

— EIXO DA SEÇÃO ANALISADA

Figura 5-18: Seção Utilizada na Análise Bidimensional.

Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 5-19 e 5-20.

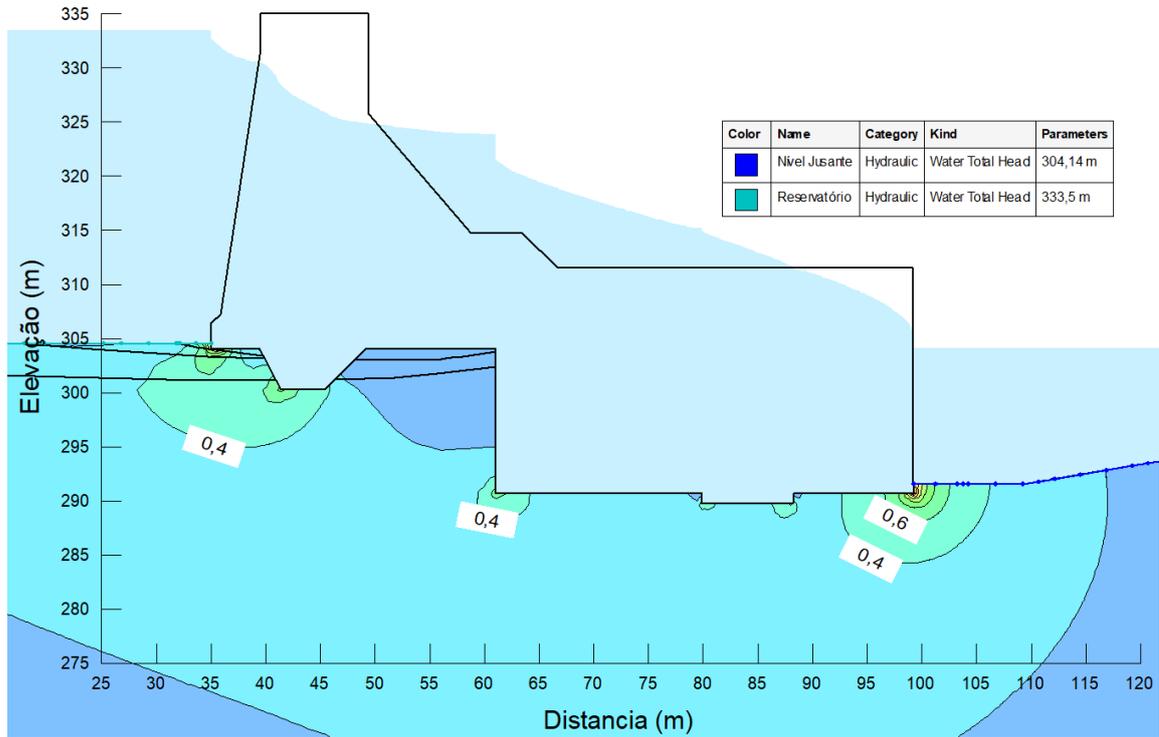


Figura 5-19: Gradientes Hidráulicos Obtidos na Análise Bidimensional.

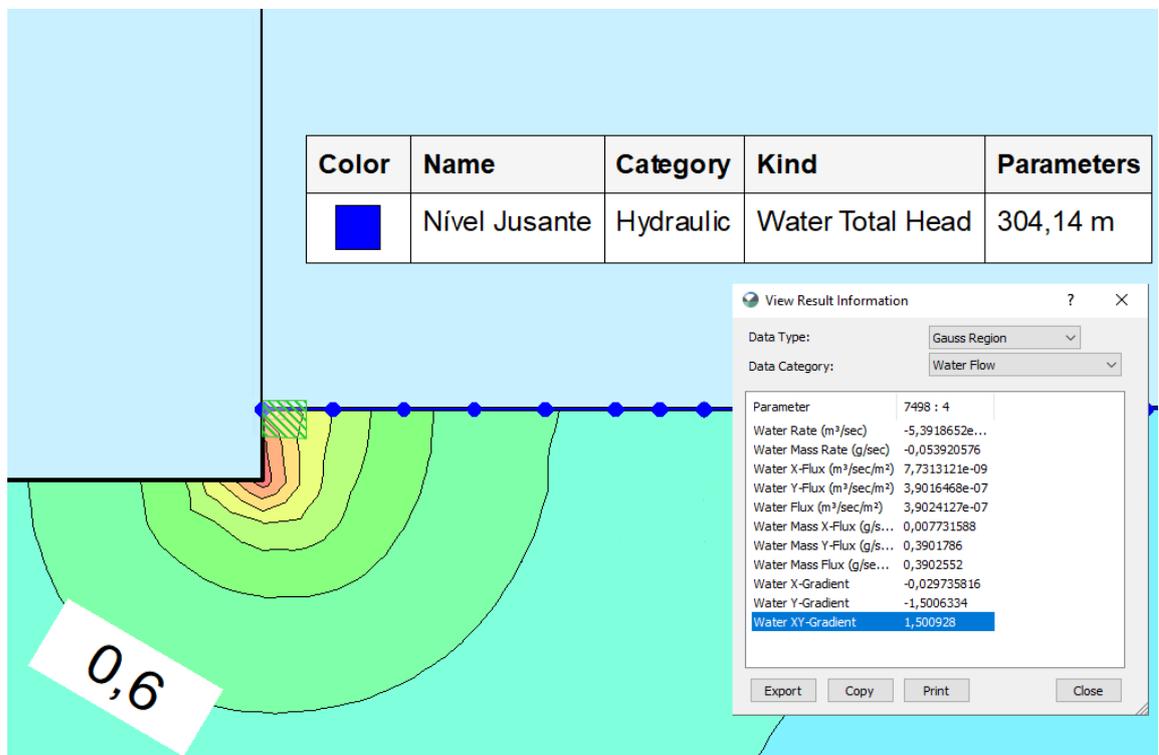


Figura 5-20: Resultado do Gradiente na Saída da Casa de Força.

Como pode ser visto na Figura 5-20, o gradiente resultante na saída da casa de força obtido pela análise bidimensional foi de aproximadamente 1,5009, com componente vertical de 1,5006 e componente horizontal de 0,0297. Esse resultado foi plotado em conjunto com os resultados do modelo tridimensional do Item 5.1.4 e é mostrado na Figura 5-21, aqui representado como uma linha contínua por se tratar de uma informação unidimensional representada em um gráfico bidimensional.

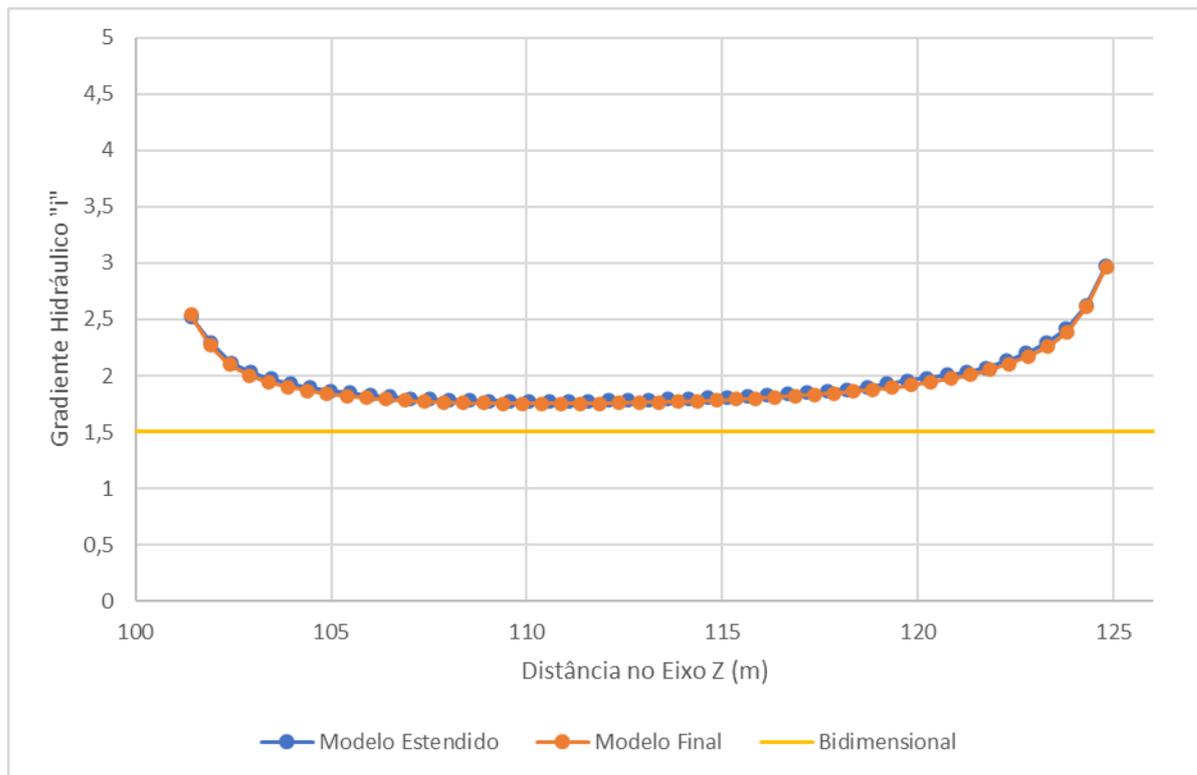


Figura 5-21: Comparação Entre os Resultados das Análises Bidimensional e Tridimensional.

Comparando os resultados, é possível notar que o gradiente obtido na análise bidimensional ficou bem próximo ao gradiente verificado na análise tridimensional no mesmo local. Os gradientes na análise tridimensional são aproximadamente 0,25 acima do valor 1,5009 (valor obtido na análise bidimensional), esse resultado já era esperado, dado que, na análise tridimensional uma maior parte da vazão é direcionada à esta região de menor cota, aumentando o valor do gradiente, o que não é verificado na análise bidimensional.

Além disso, é possível notar nos resultados tridimensionais que ocorre uma concentração de fluxo nas pontas, ou seja, nas regiões onde ocorrem vértices geométricos. Esse fenômeno se

torna importante à medida que se verifica que os gradientes nos vértices são quase o dobro dos gradientes na região central.

Como referência, foram elaborados também os gráficos mostrados nas Figuras 5-22 e 5-23, onde são mostradas as componentes nas direções x, y e z dos vetores de Gradiente Hidráulico na saída da Casa de Força.

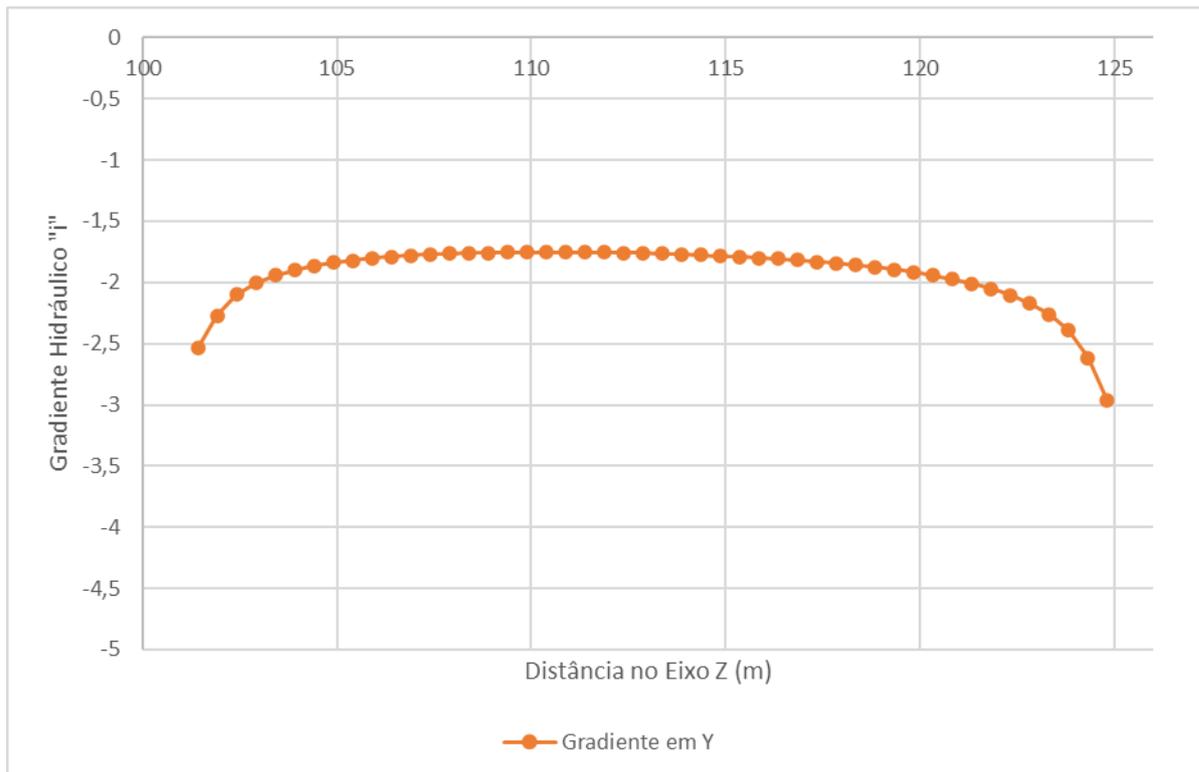


Figura 5-22: Componente na Direção y dos Vetores de Gradiente Hidráulico na Região da Casa de Força.

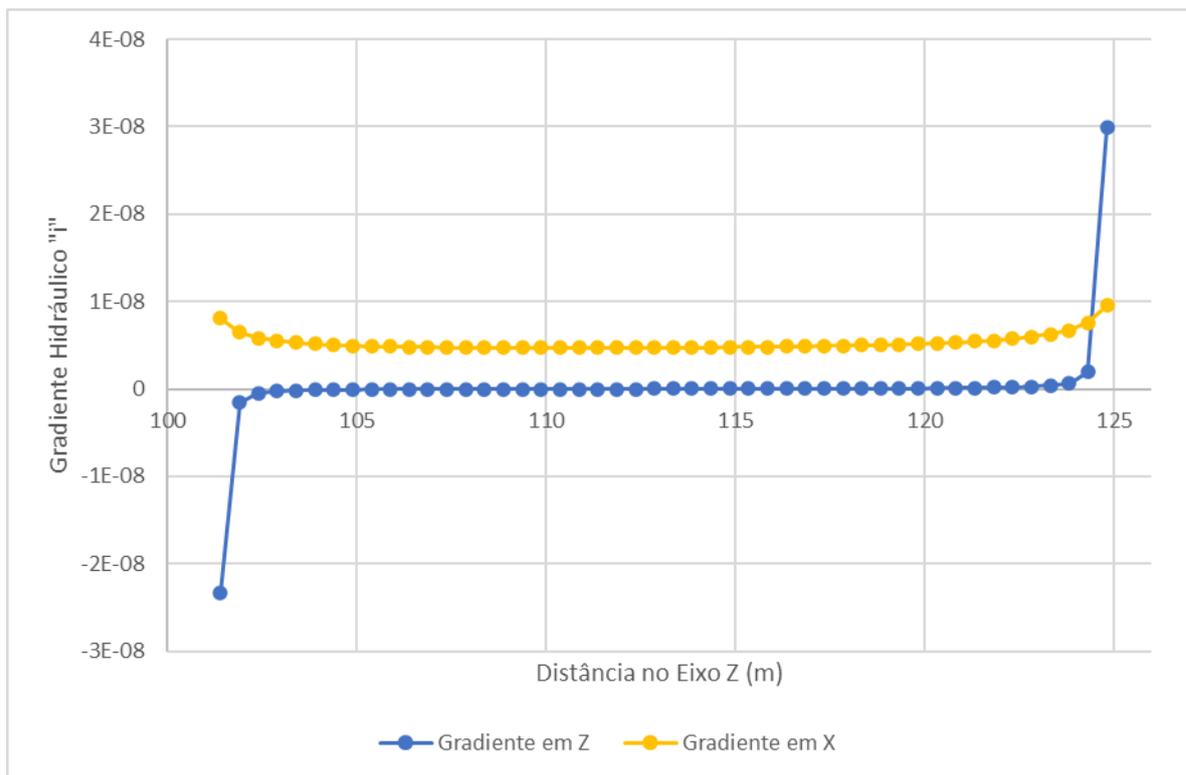


Figura 5-23: Componente nas Direções x e z dos Vetores de Gradiente Hidráulico na Região da Casa de Força.

Nota-se que os valores das componentes x e z são insignificantes em comparação aos valores da componente em y, indicando que a maior parte do fluxo ocorre na direção vertical.

Nas Figuras 5-24, 5-25, 5-26 e 5-27 são apresentados os resultados de Carga Hidráulica e de Gradiente Hidráulico gerados pelo *software* tridimensional, também em um corte passando pelo eixo da Casa de Força.

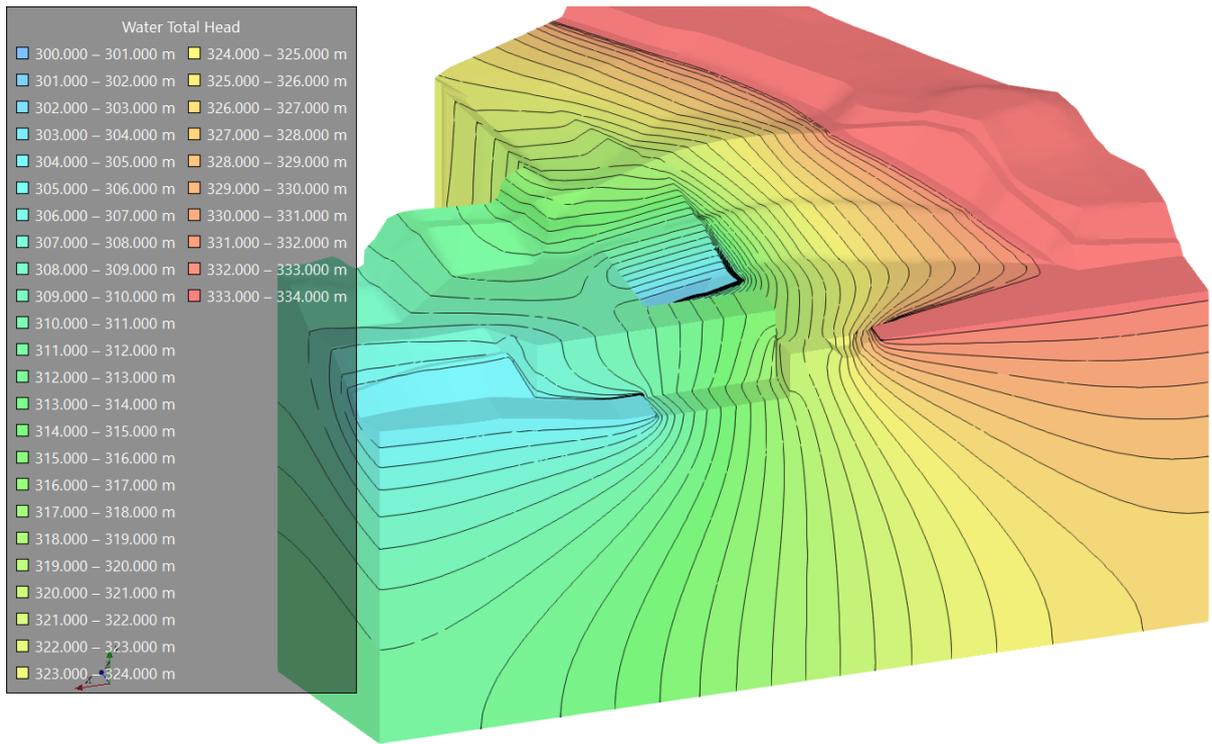


Figura 5-24: Resultado de Carga Hidráulica para o Modelo Final.

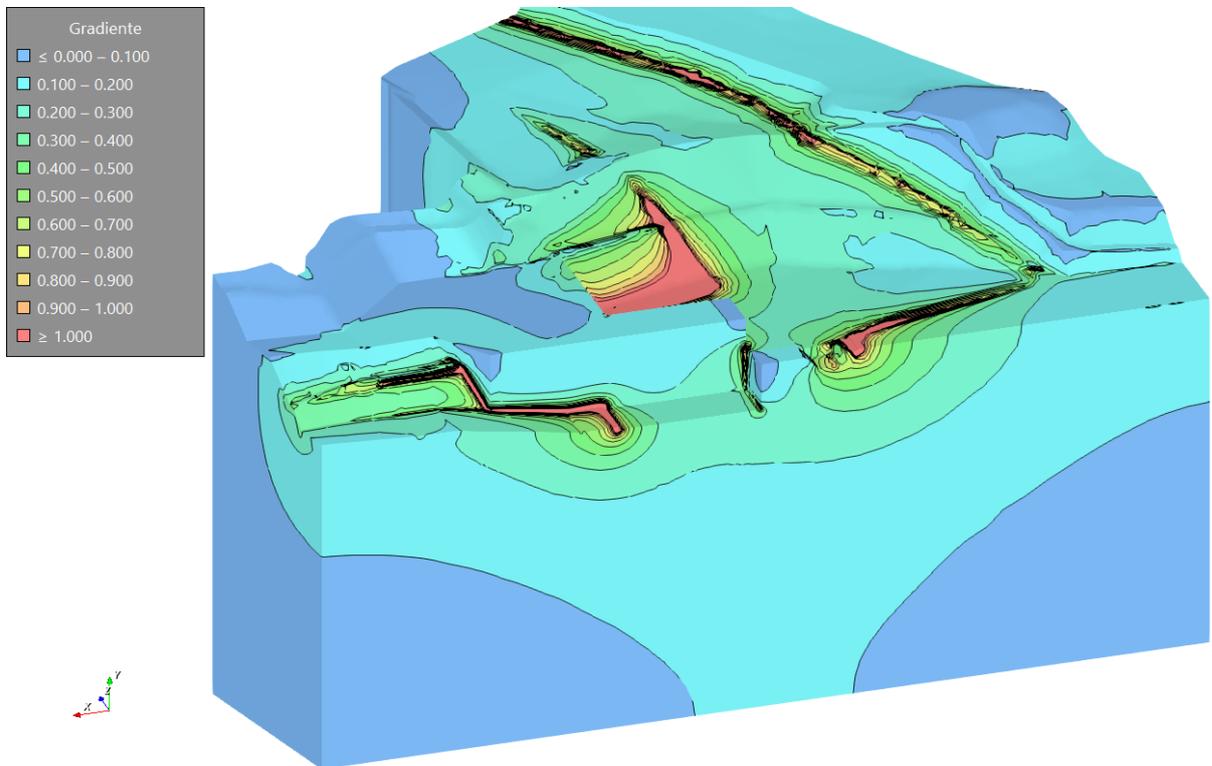


Figura 5-25: Resultado do Gradiente Hidráulico para o Modelo Final.

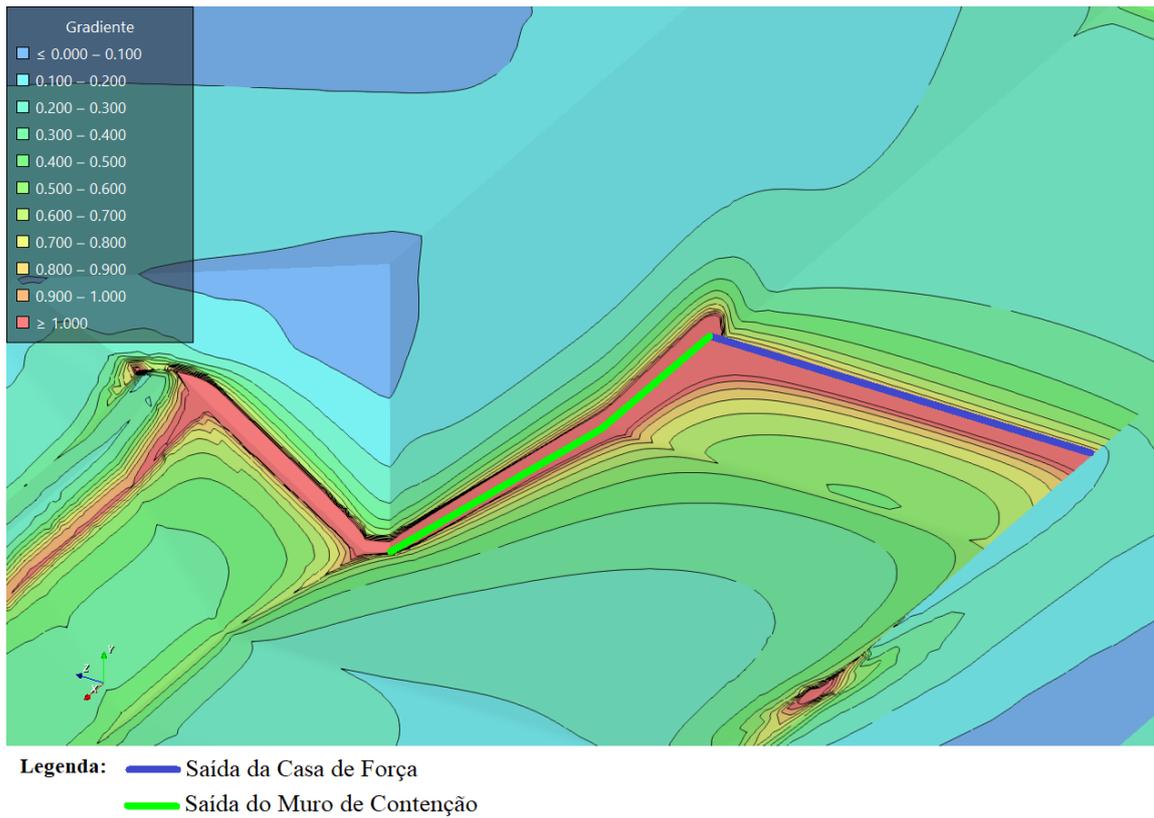


Figura 5-26: Resultado do Gradiente Hidráulico para o Modelo Final - Detalhe 1.

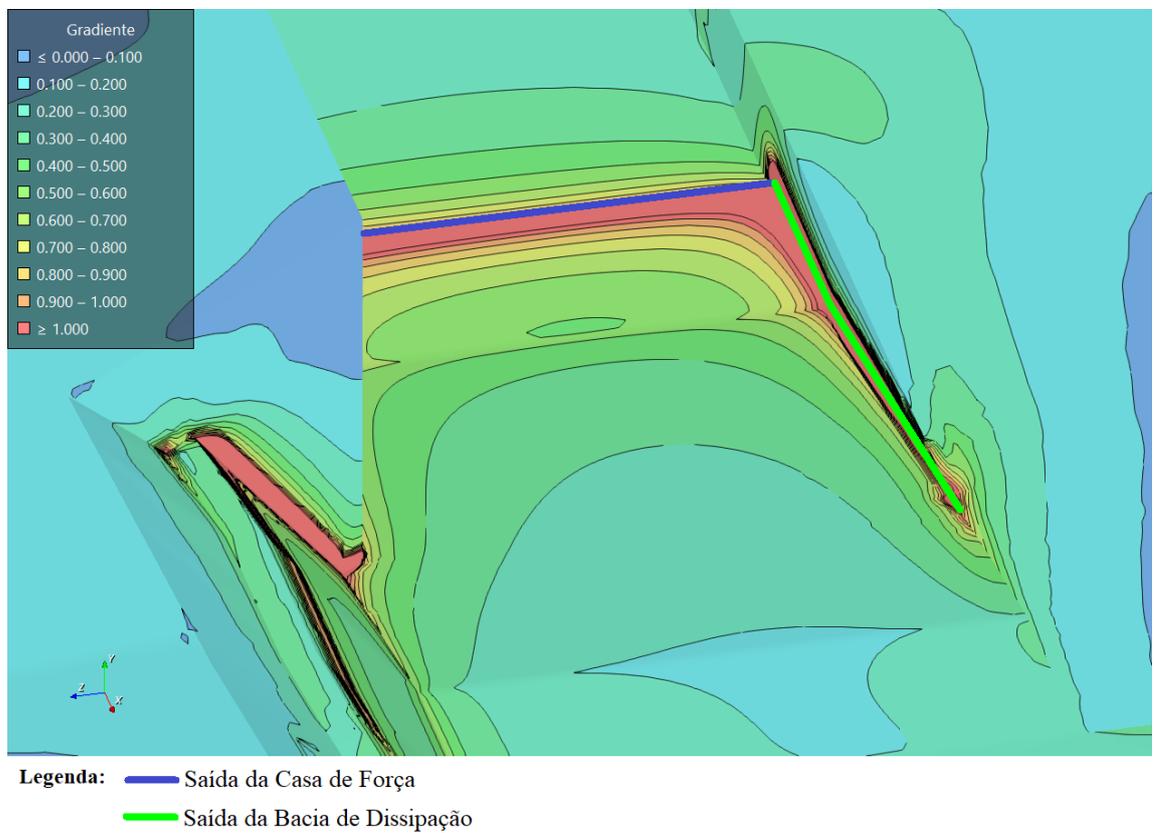


Figura 5-27: Resultado do Gradiente Hidráulico para o Modelo Final - Detalhe 2.

Nas Figuras 5-26 e 5-27 são apresentados os detalhes dos gradientes nas saídas da Casa de Força, do Muro de Contenção e da Bacia de Dissipação. Nelas é possível verificar nitidamente a ocorrência dos fenômenos descritos anteriormente.

A partir desses resultados, o modelo utilizado foi considerado suficientemente representativo para as condições desse estudo. Na sequência, partiu-se para as análises das soluções de controle de gradiente.

## **5.2 SOLUÇÕES PARA O CONTROLE DO GRADIENTE NA SAÍDA DA CASA DE FORÇA**

Nessa etapa foram analisadas e modeladas algumas soluções de Gradientes Hidráulicos que podem permitir a redução dos gradientes de saída, evitando assim, o fenômeno da erosão regressiva na região da Casa de Força.

Se forem analisados os resultados obtidos (Figuras 5-21, 5-26 e 5-27) nota-se que toda a região da Casa de Força, da Bacia de Dissipação e do Muro de Contenção apresenta gradientes hidráulicos elevados, com potencial para ocorrência do fenômeno da erosão interna. Dessa maneira, foram propostas algumas soluções de controle de gradiente a fim de evitar/ minimizar a ocorrência de tal fenômeno.

A primeira solução analisada foi a construção de uma laje com 5 metros de comprimento à jusante da Casa de Força, com um chanfro de concreto em sua extremidade mais à jusante (foi também adotado um chanfro com as mesmas dimensões aos pés das estruturas do Muro de Contenção e da Bacia de Dissipação). Essa solução foi proposta com o objetivo de aumentar o caminho de percolação da água, aumentando assim a perda de carga e diminuindo os gradientes de saída. O comprimento de 5 m foi adotado em função das análises de estabilidade global da Casa de Força, foi adotado o maior comprimento possível de maneira que o aumento dos diagramas de subpressão proporcionados pela extensão da laje não causassem a instabilidade da estrutura. Um croqui dessa solução é mostrado na Figura 5-28. Foi então realizada a modelagem no *software* tridimensional, como mostra a Figura 5-29. Os resultados obtidos com a análise são mostrados na Tabela 5-5 e na Figura 5-40.

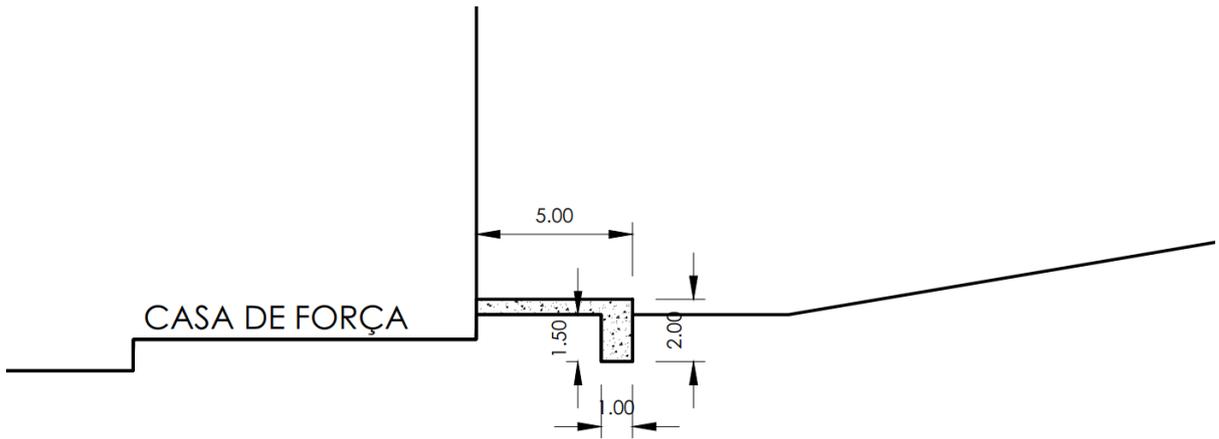
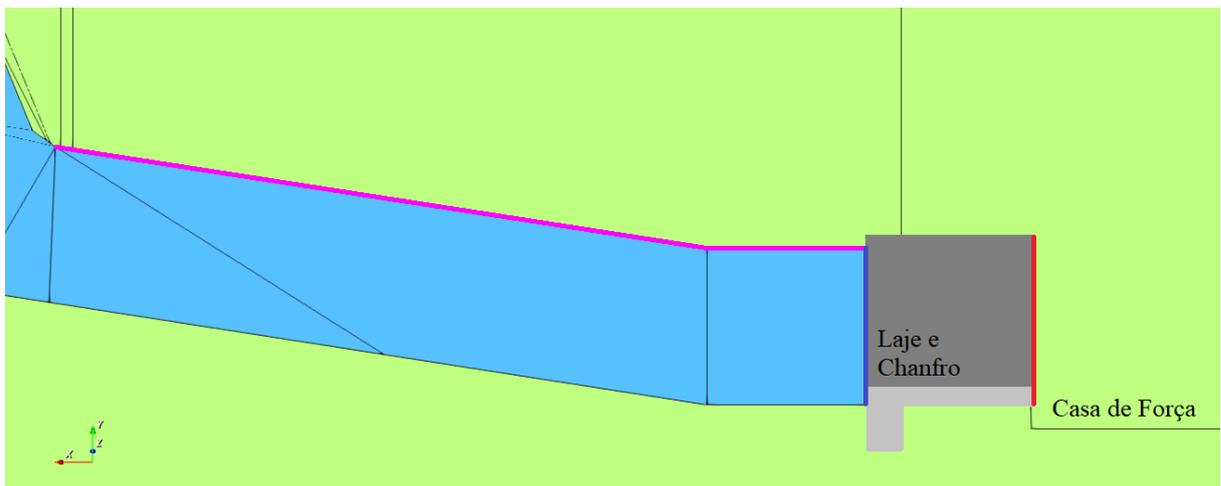


Figura 5-28: Croqui da Primeira Solução Adotada.



- Legenda:**
- Arenito C3
  - Carga do Nível de Jusante (304,14 m)
  - Saída do Muro de Contenção
  - Saída da Casa de Força
  - Saída da Casa de Força no "Modelo Final"

Figura 5-29: Modelagem Tridimensional da Solução 1.

Nas Figuras 5-30 e 5-31 são mostrados os resultados do campo de gradientes Hidráulicos obtidos para essa primeira solução. A Figura 5-30 mostra uma vista superior da região estudada, enquanto a Figura 5-31 mostra um corte transversal passando pelo eixo da Casa de Força.

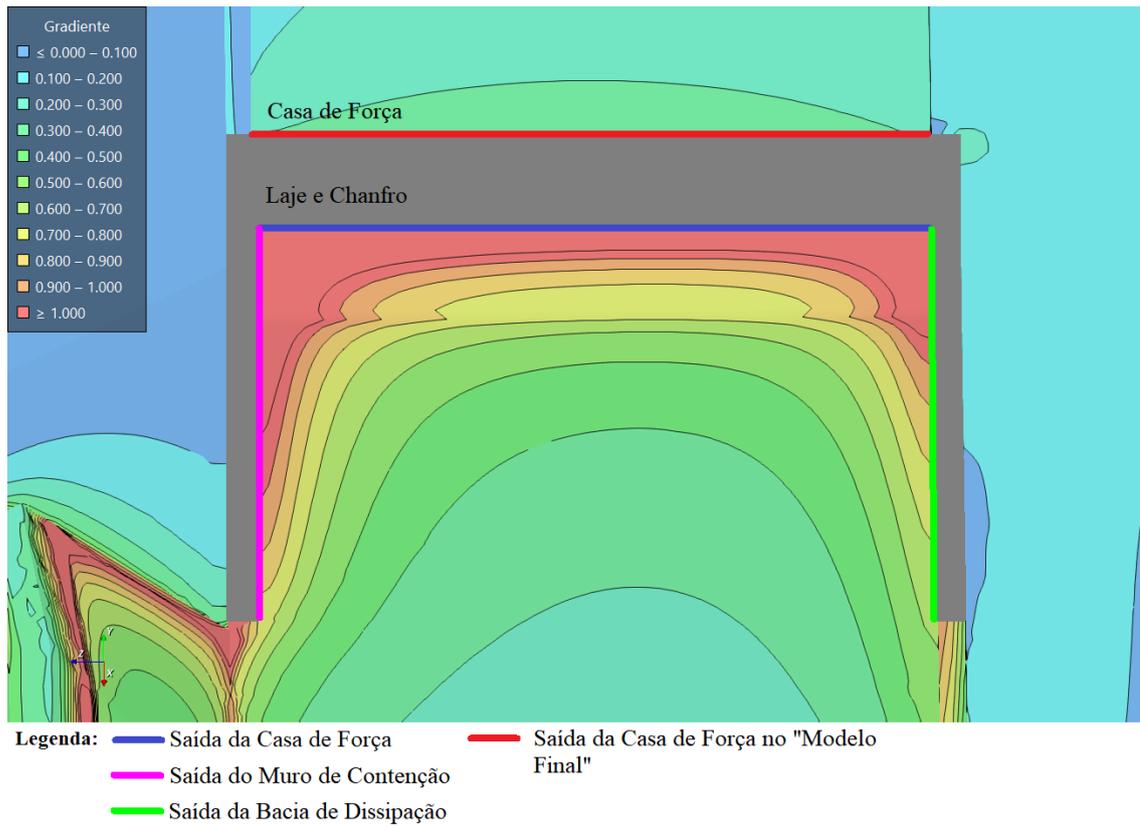


Figura 5-30: Vista dos Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Primeira Solução.

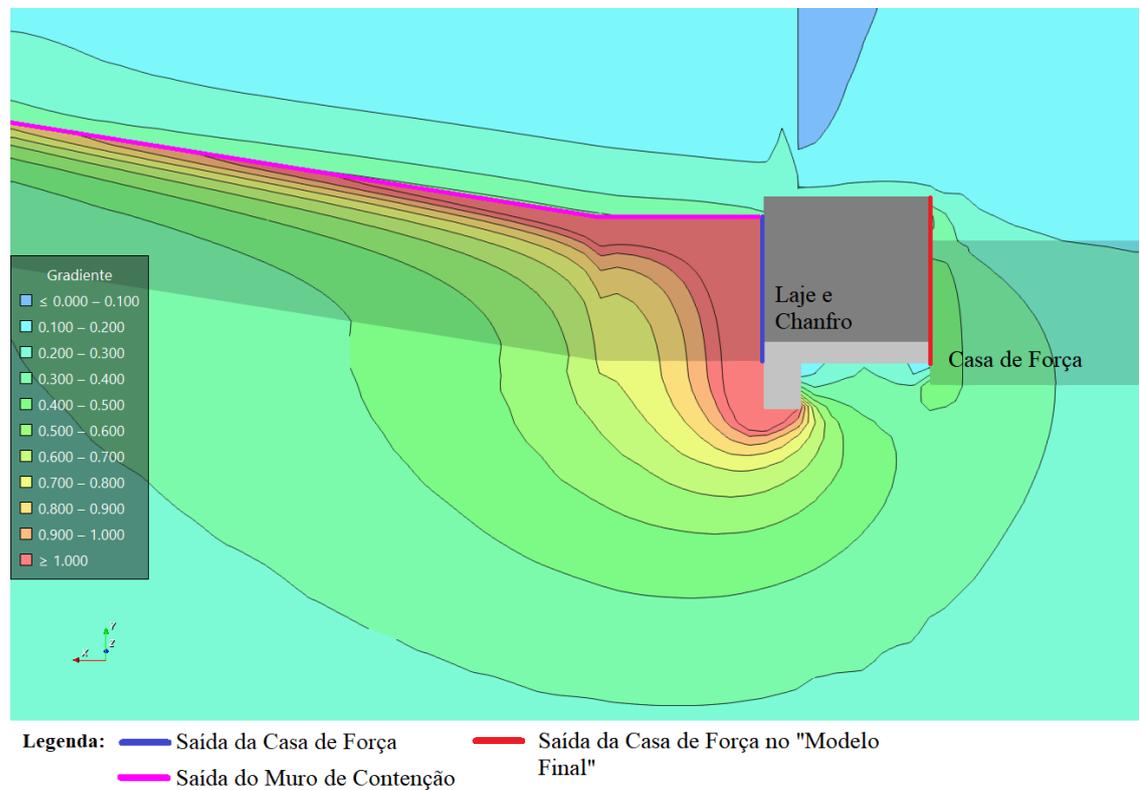


Figura 5-31: Corte Passando Pelo Eixo da Casa de Força com os Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Primeira Solução.

Analisando os resultados, verifica-se que, com a utilização da laje e do chanfro, os gradientes na região da Casa de Força sofreram uma redução considerável, porém, continuam com valor elevado em toda a sua extensão. Decidiu-se então adicionar um Filtro Invertido com 5 m de comprimento na região à jusante da laje. O objetivo desse filtro é captar a água que percola pela fundação permitindo que ela saia de maneira controlada através do Filtro. O Filtro Invertido é composto por Areia em sua camada mais inferior sendo sobreposta por Transição Fina, Transição Grossa e Enrocamento Fino nas camadas superiores, as permeabilidades adotadas para esses materiais são mostradas na Tabela 4-1 no Capítulo 4. Inicialmente foi adotado o comprimento de 5 m, por tratar-se do início da rampa do Canal de Fuga e por acreditar que essa extensão seria suficiente para a redução dos gradientes de saída. O croqui e a modelagem tridimensional dessa solução são mostrados nas Figuras 5-32 e 5-33, respectivamente. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5-5 e na Figura 5-40.

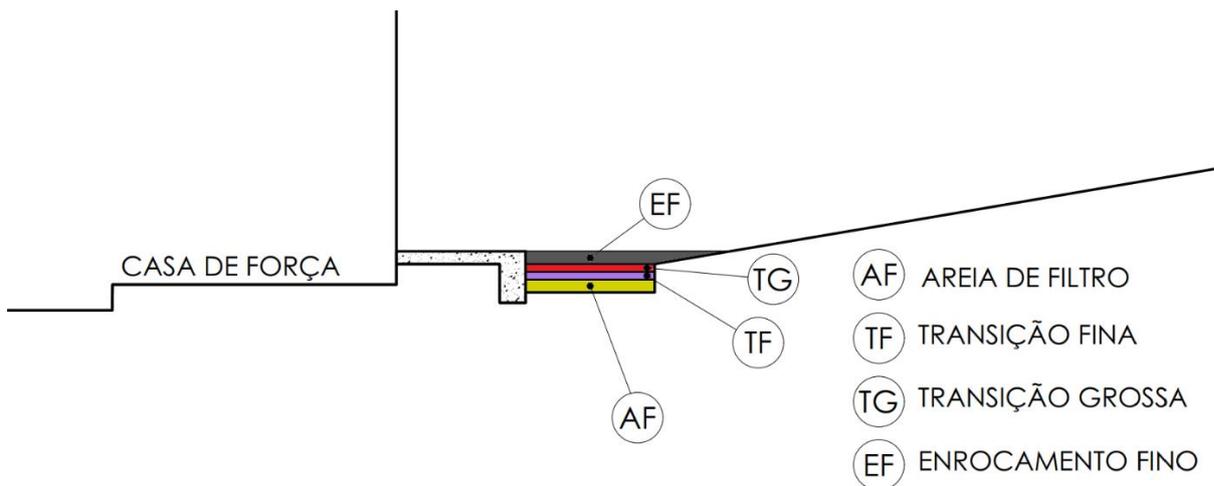


Figura 5-32: Croqui da Segunda Solução Adotada.

Nas Figuras 5-34 e 5-35 são mostrados os resultados do campo de gradientes Hidráulicos obtidos para a segunda solução. A Figura 5-34 mostra uma vista superior da região estudada, enquanto a Figura 5-35 mostra um corte transversal passando pelo eixo da Casa de Força.

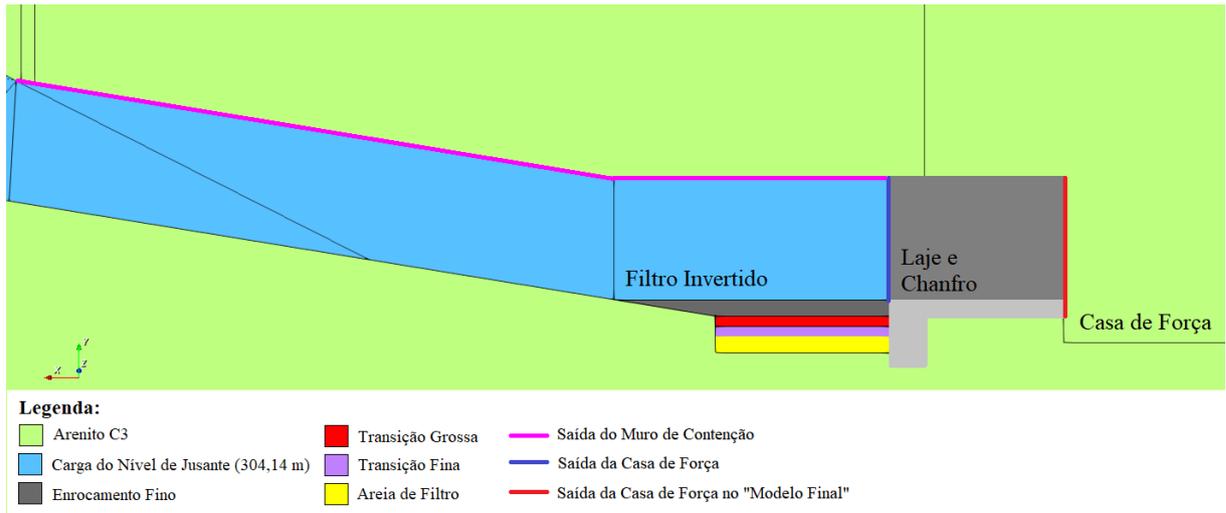


Figura 5-33: Modelagem Tridimensional da Solução 2.

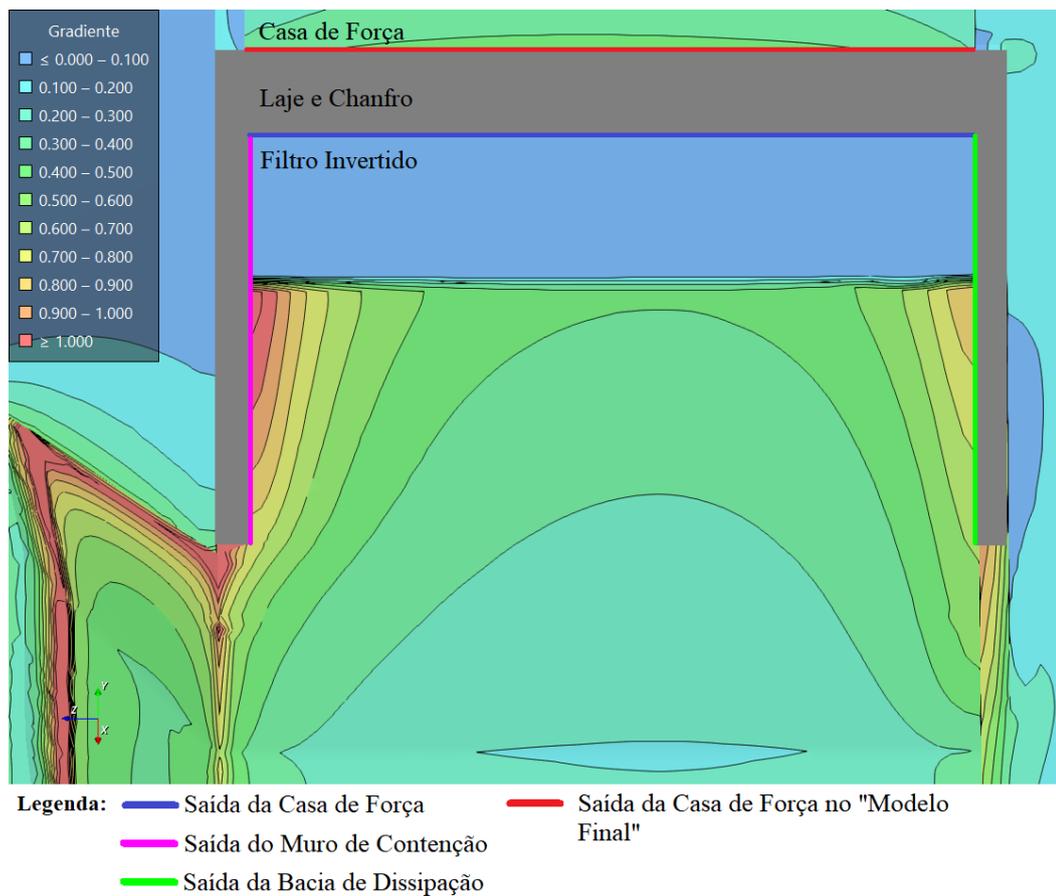


Figura 5-34: Vista dos Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Segunda Solução.

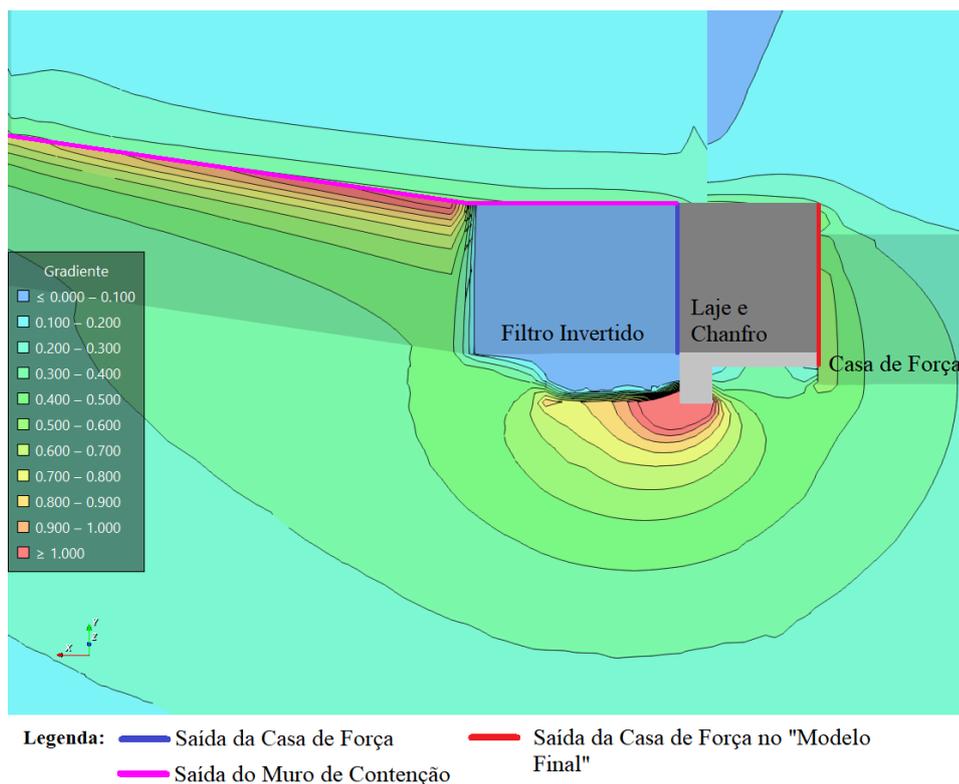


Figura 5-35: Corte Passando Pelo Eixo da Casa de Força com os Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Segunda Solução.

Analisando o resultado dos gradientes na Casa de Força quando adotada a Segunda Solução, percebe-se que os valores dos gradientes nessa região vão para zero. Procedeu-se então a analisar o que ocorria nas regiões do Muro de Contenção e da Bacia de Dissipação. Os valores dos gradientes nessas regiões são mostrados nas Tabelas 5-6 e 5-7 e nas Figuras 5-41 e 5-42. Verifica-se que, na região onde o tapete drenante está presente, o gradiente de saída tem valor nulo, porém, imediatamente após o fim no tapete drenante o gradiente volta a aumentar, tendo o seu valor ainda elevado nessas regiões. Por isso, decidiu-se por estender o Filtro Invertido em 10 m no sentido jusante. Um croqui dessa terceira solução e sua modelagem tridimensional são mostrados nas Figuras 5-36 e 5-37 respectivamente.

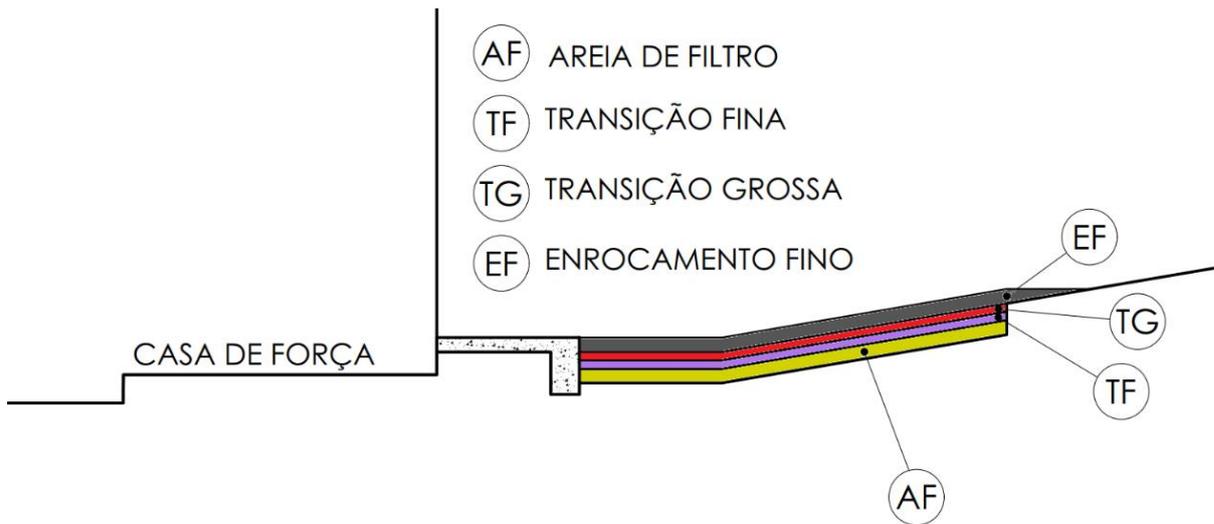


Figura 5-36: Croqui da Terceira Solução Adotada.

Nas Figuras 5-38 e 5-39 são mostrados os resultados do campo de gradientes Hidráulicos obtidos para a terceira solução. A Figura 5-38 mostra uma vista superior da região estudada, enquanto a Figura 5-39 mostra um corte transversal passando pelo eixo da Casa de Força.

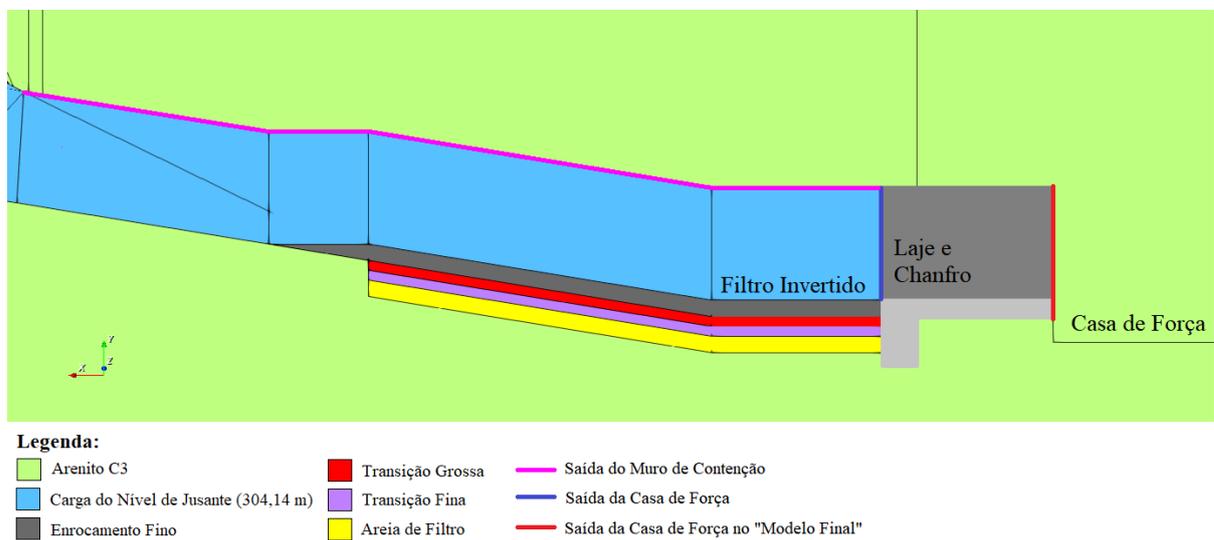


Figura 5-37: Modelagem Tridimensional da Solução 3.

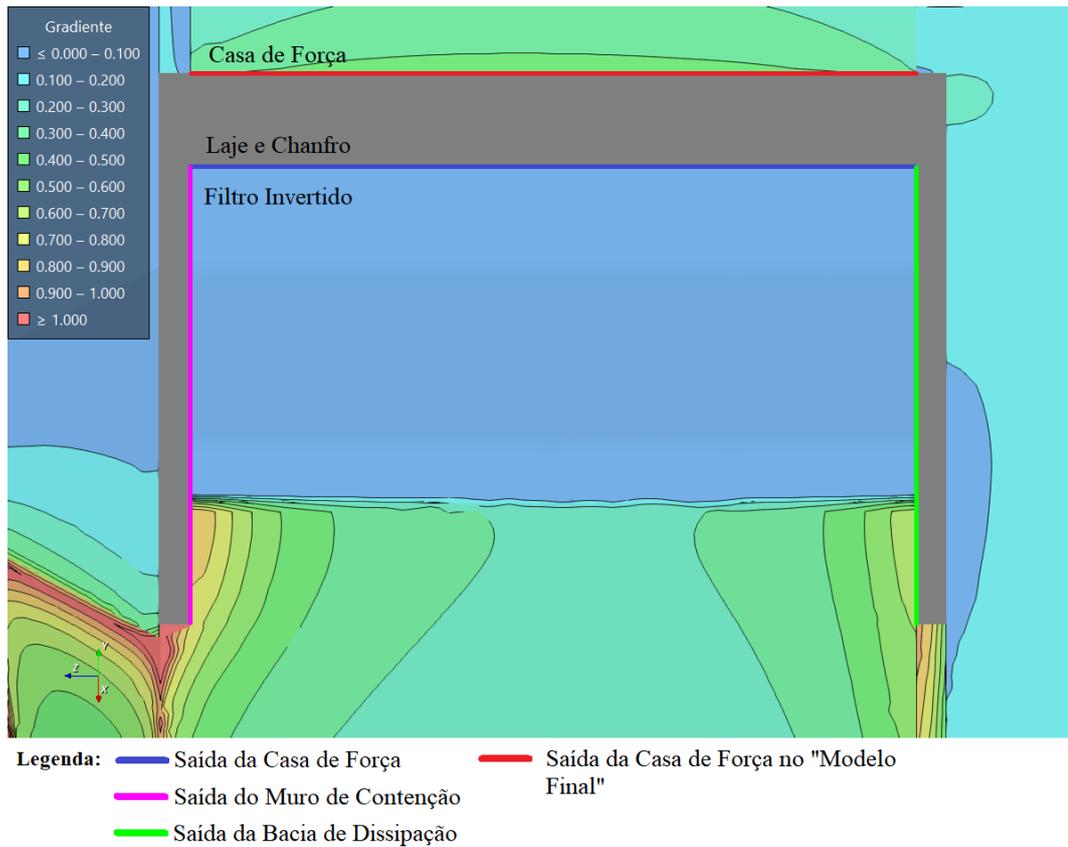


Figura 5-38: Vista dos Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Terceira Solução.

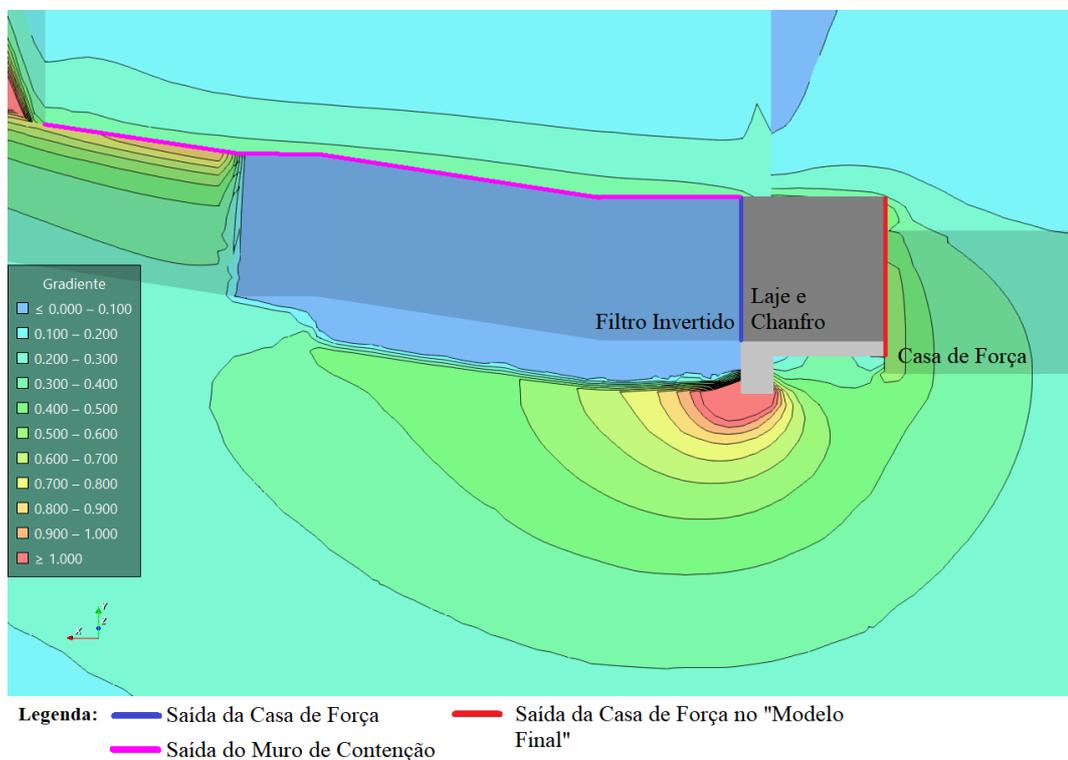


Figura 5-39: Corte Passando Pelo Eixo da Casa de Força com os Resultados de Gradientes Hidráulicos nas Regiões Estudadas para a Terceira Solução.

Os resultados obtidos para essa terceira solução também são mostrados nas Tabelas 5-6 e 5-7 e nas Figuras 5-41 e 5-42. Para a Solução 3 nota-se o mesmo efeito percebido para a Solução 2, porém, com a extensão do tapete, não ocorrem regiões com gradiente elevado. Como visto na Seção 2.1.3, um gradiente que pode ser considerado crítico para que ocorra a perda de resistência em solos não coesivos é da ordem de 1. Como o material da fundação da barragem analisada nesse estudo trata-se de uma rocha que, mesmo possuindo coeficientes de permeabilidade elevados, possui coesão, acredita-se que, com o emprego da terceira solução o potencial de erosão na fundação fica reduzido.

Tabela 5-5: Resultados dos Gradientes na Casa de Força.

Chanfro 150 cm		Chanfro + Tapete 5m		Chanfro + Tapete 15m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
100,9	1,85	100,9	2,02E-05	100,9	1,98E-05
101,4	1,81	101,4	1,95E-05	101,4	1,91E-05
101,9	1,73	101,9	1,79E-05	101,9	1,76E-05
102,4	1,64	102,4	1,63E-05	102,4	1,59E-05
102,9	1,57	102,9	1,50E-05	102,9	1,47E-05
103,4	1,51	103,4	1,42E-05	103,4	1,39E-05
103,9	1,47	103,9	1,36E-05	103,9	1,34E-05
104,4	1,44	104,4	1,32E-05	104,4	1,29E-05
104,9	1,41	104,9	1,29E-05	104,9	1,26E-05
105,4	1,39	105,4	1,27E-05	105,4	1,25E-05
105,9	1,37	105,9	1,25E-05	105,9	1,23E-05
106,4	1,36	106,4	1,24E-05	106,4	1,22E-05
106,9	1,35	106,9	1,23E-05	106,9	1,21E-05
107,4	1,34	107,4	1,23E-05	107,4	1,20E-05
107,9	1,33	107,9	1,22E-05	107,9	1,19E-05
108,4	1,33	108,4	1,21E-05	108,4	1,19E-05
108,9	1,33	108,9	1,21E-05	108,9	1,18E-05
109,4	1,32	109,4	1,21E-05	109,4	1,18E-05
109,9	1,32	109,9	1,20E-05	109,9	1,18E-05
110,4	1,32	110,4	1,20E-05	110,4	1,18E-05
110,9	1,32	110,9	1,20E-05	110,9	1,18E-05
111,4	1,32	111,4	1,20E-05	111,4	1,18E-05
111,9	1,32	111,9	1,20E-05	111,9	1,18E-05
112,4	1,32	112,4	1,21E-05	112,4	1,18E-05
112,9	1,33	112,9	1,21E-05	112,9	1,18E-05
113,4	1,33	113,4	1,21E-05	113,4	1,19E-05
113,9	1,33	113,9	1,22E-05	113,9	1,19E-05
114,4	1,34	114,4	1,22E-05	114,4	1,19E-05
114,9	1,35	114,9	1,23E-05	114,9	1,20E-05
115,4	1,35	115,4	1,23E-05	115,4	1,21E-05
115,9	1,36	115,9	1,24E-05	115,9	1,21E-05
116,4	1,37	116,4	1,25E-05	116,4	1,22E-05
116,8	1,38	116,8	1,26E-05	116,8	1,23E-05
117,3	1,39	117,3	1,27E-05	117,3	1,24E-05
117,8	1,40	117,8	1,28E-05	117,8	1,25E-05

Chanfro 150 cm		Chanfro + Tapete 5m		Chanfro + Tapete 15m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
118,3	1,42	118,3	1,29E-05	118,3	1,27E-05
118,8	1,43	118,8	1,31E-05	118,8	1,28E-05
119,3	1,45	119,3	1,33E-05	119,3	1,30E-05
119,8	1,47	119,8	1,34E-05	119,8	1,32E-05
120,3	1,50	120,3	1,37E-05	120,3	1,34E-05
120,8	1,52	120,8	1,40E-05	120,8	1,37E-05
121,3	1,56	121,3	1,43E-05	121,3	1,40E-05
121,8	1,60	121,8	1,47E-05	121,8	1,44E-05
122,3	1,64	122,3	1,53E-05	122,3	1,50E-05
122,8	1,70	122,8	1,61E-05	122,8	1,58E-05
123,3	1,78	123,3	1,72E-05	123,3	1,69E-05
123,8	1,88	123,8	1,88E-05	123,8	1,84E-05
124,3	2,00	124,3	2,09E-05	124,3	2,05E-05
124,8	2,10	124,8	2,28E-05	124,8	2,24E-05
125,3	2,15	125,3	2,37E-05	125,3	2,33E-05

Tabela 5-6: Resultado dos Gradientes no Muro de Contenção.

Chanfro 150 cm		Chanfro + Tapete 5m		Chanfro + Tapete 15m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
163,2	2,15	163,2	2,37E-05	163,2	2,33E-05
163,7	2,10	163,7	2,29E-05	163,7	2,24E-05
164,2	1,99	164,2	2,09E-05	164,2	2,05E-05
164,7	1,86	164,7	1,89E-05	164,7	1,84E-05
165,2	1,76	165,2	1,73E-05	165,2	1,68E-05
165,7	1,68	165,7	1,64E-05	165,7	1,57E-05
166,2	1,62	166,2	1,61E-05	166,2	1,50E-05
166,7	1,58	166,7	1,67E-05	166,7	1,46E-05
167,2	1,55	167,2	1,87E-05	167,2	1,45E-05
167,7	1,54	167,7	2,19E-05	167,7	1,51E-05
168,2	1,60	168,2	1,70E-05	168,2	1,64E-05
168,7	1,46	168,7	5,10E-06	168,7	1,42E-05
169,2	1,40	169,2	5,49E-06	169,2	1,30E-05
169,7	1,35	169,7	6,43E-06	169,7	1,24E-05
170,2	1,32	170,2	6,90E-06	170,2	1,20E-05
170,7	1,30	170,7	7,10E-06	170,7	1,18E-05
171,2	1,27	171,2	0,77	171,2	1,16E-05
171,7	1,26	171,6	1,16	171,7	1,15E-05
172,1	1,24	172,1	1,16	172,2	1,13E-05
172,6	1,22	172,6	1,15	172,7	1,12E-05
173,1	1,20	173,1	1,14	173,2	1,11E-05
173,6	1,19	173,6	1,14	173,7	1,10E-05
174,1	1,17	174,1	1,13	174,2	1,09E-05
174,6	1,16	174,6	1,12	174,7	1,08E-05
175,1	1,14	175,1	1,11	175,2	1,08E-05
175,6	1,13	175,6	1,10	175,7	1,08E-05
176,1	1,12	176,1	1,09	176,2	1,11E-05
176,6	1,11	176,5	1,08	176,7	1,18E-05
177,0	1,09	177,0	1,07	177,2	1,32E-05
177,5	1,08	177,5	1,06	177,7	1,44E-05
178,0	1,07	178,0	1,05	178,2	9,44E-06

Chanfro 150 cm		Chanfro + Tapete 5m		Chanfro + Tapete 15m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
178,5	1,06	178,5	1,04	178,7	3,49E-06
179,0	1,05	179,0	1,03	179,2	4,09E-06
179,5	1,03	179,5	1,02	179,7	4,87E-06
180,0	1,02	180,0	1,01	180,2	5,30E-06
180,5	1,01	180,5	0,99	180,7	5,47E-06
181,0	0,99	181,0	0,98	181,2	0,59
181,4	0,98	181,4	0,97	181,6	0,89
181,9	0,97	181,9	0,96	182,1	0,89
182,4	0,95	182,4	0,94	182,6	0,89
182,9	0,94	182,9	0,93	183,1	0,88
183,4	0,93	183,4	0,91	183,5	0,88
183,9	0,91	183,9	0,90	184,0	0,87
184,4	0,90	184,4	0,89	184,5	0,85
184,9	0,88	184,9	0,87	185,0	0,84
185,4	0,86	185,4	0,85	185,4	0,82
185,9	0,84	185,9	0,83	185,9	0,80
186,3	0,82	186,3	0,81	186,4	0,78
186,8	0,80	186,8	0,79	186,9	0,76
187,3	0,78	187,3	0,77	187,3	0,75
187,8	0,76	187,8	0,75	187,8	0,73
188,3	0,80	188,3	0,79	188,3	0,78

Tabela 5-7: Resultado dos Gradientes na Bacia de Dissipação.

Chanfro 150 cm		Chanfro + Tapete 5m		Chanfro + Tapete 15m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
163,2	1,85	163,2	2,02E-05	163,2	1,98E-05
163,7	1,80	163,7	1,95E-05	163,7	1,91E-05
164,2	1,71	164,2	1,77E-05	164,2	1,73E-05
164,7	1,59	164,7	1,59E-05	164,7	1,55E-05
165,2	1,50	165,2	1,45E-05	165,2	1,40E-05
165,7	1,43	165,7	1,37E-05	165,7	1,30E-05
166,2	1,37	166,2	1,33E-05	166,2	1,23E-05
166,7	1,32	166,7	1,37E-05	166,7	1,20E-05
167,2	1,29	167,2	1,53E-05	167,2	1,19E-05
167,7	1,28	167,7	1,79E-05	167,7	1,22E-05
168,2	1,33	168,2	1,27E-05	168,2	1,29E-05
168,7	1,21	168,7	6,43E-06	168,7	1,12E-05
169,2	1,15	169,2	4,48E-06	169,2	1,04E-05
169,7	1,11	169,7	5,12E-06	169,7	9,88E-06
170,2	1,07	170,2	5,49E-06	170,2	9,47E-06
170,7	1,05	170,7	5,62E-06	170,7	9,23E-06
171,2	1,02	171,2	0,61	171,2	9,03E-06
171,6	1,00	171,6	0,91	171,7	8,86E-06
172,1	0,98	172,1	0,90	172,2	8,69E-06
172,6	0,96	172,6	0,89	172,7	8,57E-06
173,1	0,95	173,1	0,88	173,2	8,45E-06
173,6	0,93	173,6	0,87	173,7	8,34E-06
174,1	0,91	174,1	0,86	174,2	8,23E-06
174,6	0,90	174,6	0,85	174,7	8,13E-06
175,1	0,89	175,1	0,84	175,2	8,11E-06

Chanfro 150 cm		Chanfro + Tapete 5m		Chanfro + Tapete 15m	
Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico	Distância no Eixo Z (m)	Gradiente Hidráulico
175,5	0,87	175,5	0,83	175,7	8,13E-06
176,0	0,86	176,0	0,82	176,2	8,28E-06
176,5	0,85	176,5	0,81	176,7	8,73E-06
177,0	0,84	177,0	0,80	177,2	9,71E-06
177,5	0,82	177,5	0,79	177,7	1,05E-05
178,0	0,81	178,0	0,78	178,2	6,81E-06
178,5	0,80	178,5	0,77	178,7	2,64E-06
179,0	0,79	179,0	0,76	179,2	2,99E-06
179,4	0,78	179,4	0,76	179,7	3,61E-06
179,9	0,77	179,9	0,75	180,2	3,90E-06
180,4	0,76	180,4	0,74	180,7	4,04E-06
180,9	0,75	180,9	0,73	181,2	0,44
181,4	0,74	181,4	0,72	181,7	0,66
181,9	0,73	181,9	0,71	182,2	0,66
182,4	0,73	182,4	0,71	182,7	0,66
182,8	0,72	182,8	0,70	183,2	0,66
183,3	0,71	183,3	0,69	183,7	0,65
183,8	0,70	183,8	0,68	184,2	0,65
184,3	0,69	184,3	0,68	184,7	0,64
184,8	0,68	184,8	0,67	185,2	0,64
185,3	0,68	185,3	0,66	185,7	0,63
185,8	0,67	185,8	0,65	186,2	0,63
186,3	0,66	186,3	0,65	186,7	0,62
186,7	0,65	186,7	0,64	187,2	0,62
187,2	0,65	187,2	0,63	187,7	0,61
187,7	0,64	187,7	0,63	188,2	0,60
188,2	0,63	188,2	0,62	188,7	0,60
188,7	0,63	188,7	0,61	-	-

Na Figura 5-40 é mostrado o resultado dos Gradientes Hidráulicos na saída da Casa de Força para cada solução adotada. O gráfico em azul mostra o Modelo Final, apresentado na Seção 5.1.4, como referência. O Gráfico em laranja mostra a primeira solução analisada. Nota-se que, com o emprego da primeira solução, houve redução do gradiente hidráulico de saída ao pé da Casa de Força, porém, os valores encontrados foram considerados como ainda sendo elevados para o material presente na fundação. Os gráficos cinza e amarelo mostram os resultados quando foi adotada a segunda solução e a terceira solução, respectivamente, que consistem na combinação da laje à jusante da Casa de Força com o chanfro ao pé das estruturas e o emprego do Filtro Invertido, percebe-se que os gradientes de saída vão para próximo de zero ao pé da Estrutura, o que indica que a água saí de maneira controlada sem causar a erosão do material da Fundação.

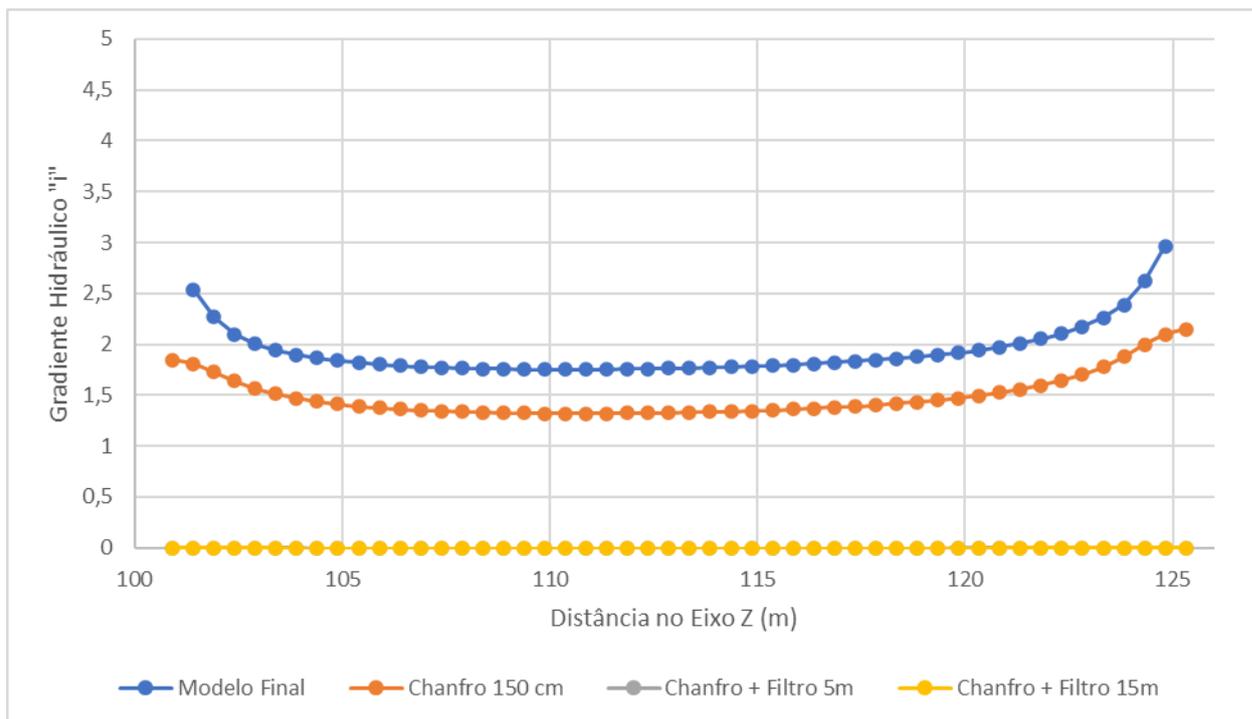


Figura 5-40: Resultados dos Gradientes na Casa de Força.

Nas Figuras 5-41 e 5-42 são mostrados os resultados dos gradientes hidráulicos no pé do Muro de Contenção e da Bacia de Dissipação para as diferentes soluções analisadas. As linhas azuis correspondem ao Modelo Final, como referência. As linhas laranjas correspondem aos gradientes quando adotada a primeira solução, que consiste no emprego de uma Laje com cinco metros de comprimento à jusante da Casa de Força e à construção de um chanfro ao pé das estruturas. Nota-se que, apenas a adoção do chanfro ao pé das estruturas não é suficiente para reduzir os gradientes de saída nessas regiões para valores considerados aceitáveis. Com a adoção do Filtro Invertido, na segunda e na terceira solução, percebe-se que, nas regiões onde o filtro está presente o gradiente é reduzido para zero, aumentando novamente imediatamente ao fim do Filtro. Na Figura 5-41 nota-se que, com a adoção do filtro com 5 m de comprimento ainda existe uma região ao pé do muro de contenção que possui gradientes elevados. Quando o tapete foi estendido para 15 m de comprimento essa área é anulada.

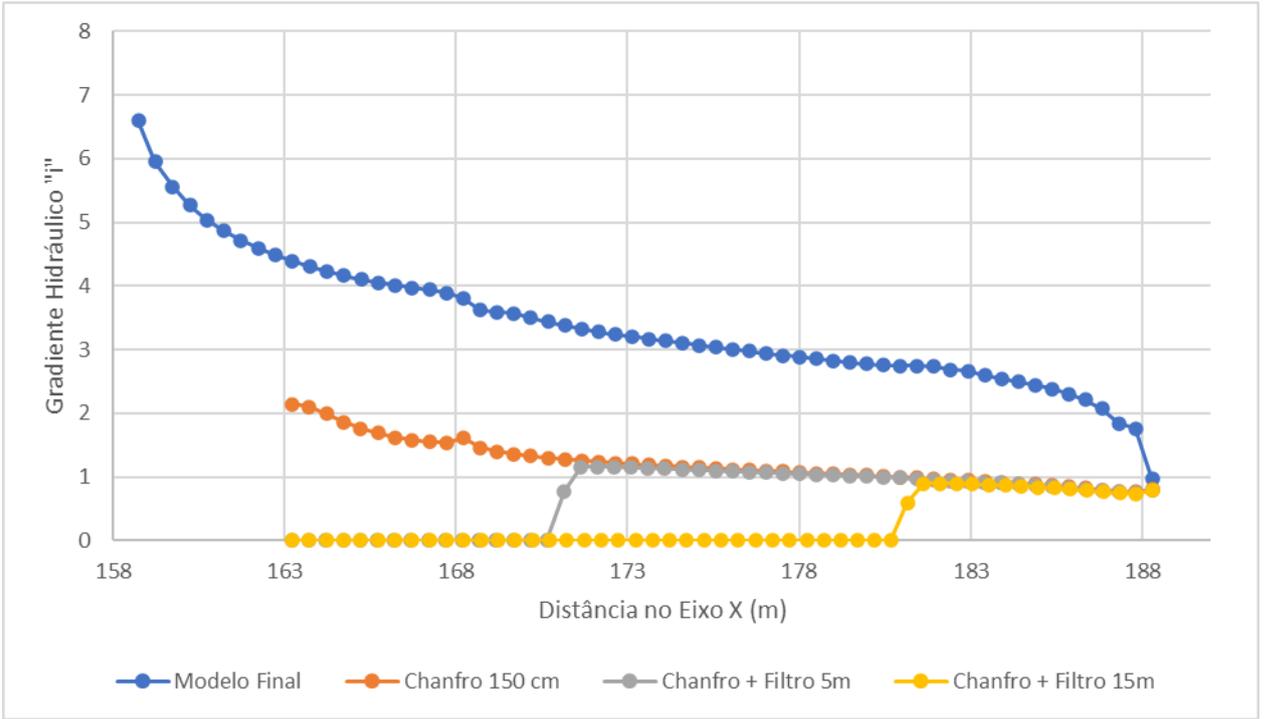


Figura 5-41: Resultados dos Gradientes no Muro de Contenção.

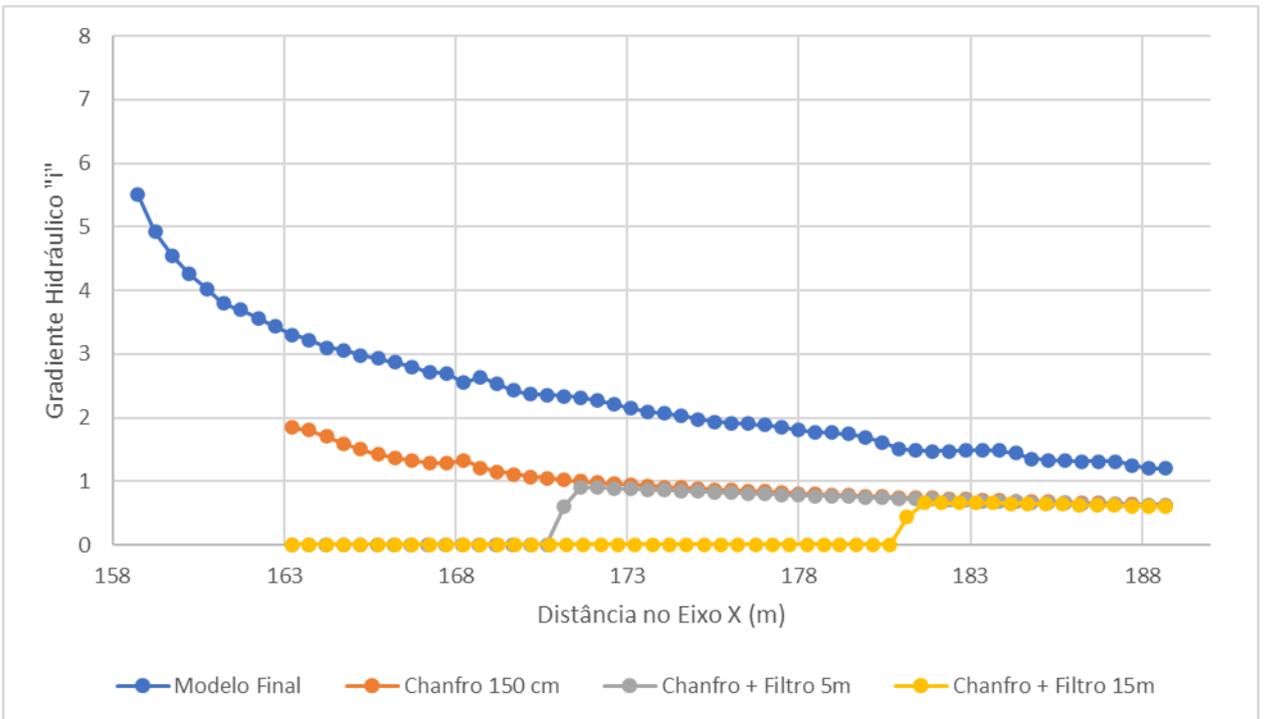


Figura 5-42: Resultados dos Gradientes na Bacia de Dissipação.

## 6 CONCLUSÃO

Como visto anteriormente, o fenômeno da Erosão Interna e *Piping* é uma das mais comuns causas de rupturas de barragens. Por esse motivo é essencial que sejam feitas análises de percolação que minimizem o risco de ocorrência desse problema. Em escritórios de projetos, é muito comum que as análises de percolação sejam feitas em *softwares* bidimensionais, porém, em algumas situações, como é o caso do estudo apresentado nesse projeto, essas análises podem não ser suficientes para representar de forma precisa as condições de fluxo que ocorrem no problema.

Nas análises tridimensionais realizadas, foi possível notar que o fluxo que percola através da fundação se concentra onde existem regiões de cotas mais baixas, aumentando os gradientes hidráulicos nessas regiões e, conseqüentemente, aumentando o potencial de erosão. Tal fenômeno não pode ser previsto/contabilizado quando são realizadas apenas análises bidimensionais, já que não é contabilizado no modelo bidimensional o fluxo que ocorre do entorno para dentro da seção.

Além disso, analisando o gráfico do Modelo Final (Figura 5-21), foi possível notar que ocorre uma concentração de fluxo nos vértices geométricos do Modelo. Esse fenômeno se torna importante à medida que se verifica que os gradientes nos vértices são quase o dobro dos gradientes na região central. Isso significa que, quando são realizadas análises bidimensionais, não são consideradas as concentrações de fluxo nas regiões de menor cota, tampouco o fenômeno de concentração de fluxo que ocorre nos vértices.

Pode-se dizer então que, na maioria dos projetos onde o arranjo das estruturas se dá de forma mais complexa que o usual, e quando são realizadas apenas análises bidimensionais, o projetista não consegue ter ideia do real valor dos gradientes que ocorrem na fundação.

Os fenômenos citados nos parágrafos anteriores são intuitivos e os projetistas já sabiam que eles ocorriam antes mesmo de começar a utilizar análises bidimensionais em projetos. Porém, não era possível ter ideia da ordem de grandeza desses fenômenos de maneira simples. Por esse motivo, nos projetos, já eram considerados fatores de segurança maiores para levar em consideração tais efeitos.

Com o advento de novas tecnologias e com o aumento do poder de computação, é esperado que a análise tridimensional seja cada vez mais utilizada, dessa maneira será possível ter uma ideia mais clara da ordem de grandeza dos fenômenos de fluxo mostrados nesse trabalho.

A partir da verificação desses fenômenos e dos valores de gradientes encontrados nas saídas livres foram propostas soluções de controle de gradientes para as regiões que apresentavam os gradientes hidráulicos mais críticos. A solução final adotada consistiu em uma solução composta por Laje à jusante da Casa de Força, Chanfro ao pé de todas as estruturas e Filtro Invertido com extensão de 15 m à Jusante da Laje. A partir da análise tridimensional dessa solução verificou-se que os gradientes hidráulicos nas regiões mais críticas foram reduzidos de maneira a minimizar o potencial de erosão nessas regiões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEGUIN, R. **Etude multi-échelle de l'érosion de contact dans les ouvrages hydrauliques**. Thèse de l'Université Joseph Fourier Grenoble. 2011.
- DAS, Braja M. e SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução Noveritis do Brasil, revisão técnica Roberta Boszczowski. Cengage Learning. São Paulo. 2014.
- FELL, Robin *et al.* **Geotechnical Engineering of Dams**. 2. ed. Sydney, Australia: CRC Press/Balkema, 2015.
- FEMA. **Conduits through Embankment Dams**. Best practices for design, construction, problem identification and evaluation, inspection, maintenance, renovation and repair. US Federal Emergency Agency. 2006.
- FOSTER, M.A. e FELL, R. **A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods**. *UNICIV Report No. R-377*. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales. 1999.
- FRY, J. **Lessons on internal erosion in embankment dams from failures and physical models** (Keynote). In: ICSE 2016 (8th International Conference on Scour and Erosion), 12-15 September 2016, Oxford, UK. 2016.
- GEOSLOPE International Ltd. **Heat and mass transfer modeling with GeoStudio 2020** (First Edition). Calgary, Alberta, Canada. 2020.
- GÓIS, F. M. B. M. **Sistemas de Controle de Percolação em Maciços Permeáveis com Ênfase em Soluções de Jet Grouting**. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PFAA003/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104 p. 2015.
- ICOLD. **Internal erosion of existing dams, levees, and dikes, and their foundations**. International Commission on Large Dams, Paris. Bulletin 164. 2017.
- PEREIRA, Geraldo Magela. **Acidentes e rupturas de barragens de armazenamentos de água**. São Paulo: ABGE, 2020.
- PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos** em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVA, Dayana Santos. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. 2016. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

USBR e USACE. **Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis**. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation e U.S. Army Corps of Engineers. 2019.