

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

ESTUDO TRIDIMENSIONAL DOS EFEITOS DEVIDO A
FORÇAS DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE
ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO

RENATO SANTOS PAULINELLI RAPOSO

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-264/16

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2016

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

**ESTUDO TRIDIMENSIONAL DOS EFEITOS DEVIDO A FORÇAS DE
PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE
DE CONCRETO**

RENATO SANTOS PAULINELLI RAPOSO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

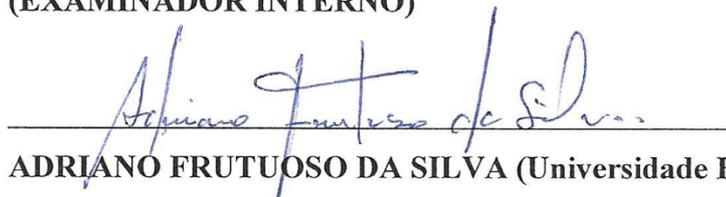
APROVADA POR:



ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (Universidade de Brasília)
(ORIENTADOR)



ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE (Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)



ADRIANO FRUTUOSO DA SILVA (Universidade Federal do Ceará)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 14 de MARÇO de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

RAPOSO, RENATO SANTOS PAULINELLI

Estudo Tridimensional dos Efeitos Devido a Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto [Distrito Federal] 2016

xxviii, 153 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2016)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Barragens

2. Análise tridimensional

3. Força de percolação

4. Face de concreto

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RAPOSO, R.S.P. Estudo Tridimensional dos Efeitos das Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-264/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 153 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Renato Santos Paulinelli Raposo

TÍTULO DA TESE DE MESTRADO: Estudo Tridimensional dos Efeitos das Forças de Percolação em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.

GRAU/ANO: Mestre / 2016

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

Renato Santos Paulinelli Raposo

QI-05 Conjunto-Z Casa 3, Guará I

71.020-254 – Brasília DF – Brasil

(renatopaulinelli@gmail.com)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós João e Déa

aos meus pais, irmãs

à minha namorada

à minha filha do coração

HOMENÁGEM PÓSTUMA

*Ao amigo Simão, que entre outras coisas
me preparou e me orientou
à convivência com meus avós maternos,
missão que abracei de coração
e que me trás grande alegria e crescimento.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por nos oportunizar a vida, o amor, o movimento, a consciência, a perseverança e o livre arbítrio.

Ao professor André Assis, que me orienta desde os primeiros anos de graduação, em assuntos acadêmicos, profissionais, pessoais com as aulas, conversas, esclarecimentos, visitas a obras, sempre com muito respeito, humildade, amizade, alegria e precisão.

Ao professor André Brasil, pela amizade, as discussões matemáticas, acompanhamento e aconselhamentos. Aos professores amigos do programa de pós-graduação em Geotecnia pelas aulas, ensinamentos, orientações que abrem e ampliam a mente dos alunos e nos transforma em mestres e doutores.

Agradeço à família, em especial aos avós e mãe.

À Janny Medina por sempre me trazer alegrias, compreensão, conversas, conselhos e amor.

Aos colegas de tantas horas de estudos, discussões e momentos de confraternização e amizade. Liosber, Francisco, Yasletty, Vinícius, Jader, Cristina, Nelson, Janet, Gabriela, Tânia, Anette, Burgos, Amarillo, Heidy, Joya, Johnny, Jaime, Carlos, Ornelas, Mariela, Michel, Yawar, Marcelo, Gabriel, Roberto, Matheus, Nima, Eliu, Catherin, Nairo, Letícia, Luan, Irvin, Paulo e o pessoal do DNIT, Lucas, Bernardo, Laoana, Jordana, Jaqueline, Cainã e tantos outros colegas que compartilham a amizade dentro e fora do SG-12. São cubanos, colombianos, paquistaneses, iranianos, bolivianos, peruanos, costarriquenhos, brasileiros, cidadãos do mundo.

Ao programa de pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

ESTUDO TRIDIMENSIONAL DOS EFEITOS DEVIDO A FORÇAS DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO

As Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC) são usadas em locais com grandes volumes de escavação obrigatórias em rocha, apresentando baixo custo, grande flexibilidade construtiva e segurança em longo prazo em termos de estabilidade e abalos sísmicos. Melhorias nos critérios de projeto e processos executivos encorajam empreendimentos cada vez mais altos e em vales mais fechados, ou seja, em condições menos favoráveis. Mesmo com os avanços em métodos de simulações numéricas aplicados a projetos, ainda são registrados casos de grandes rupturas na laje de vedação que não foram previstas e surpreendem consultores e especialistas da área. Pelo padrão das rachaduras, são formuladas hipóteses que buscam explicar o fenômeno por meio de resultados de simulações tridimensionais em construção por etapas e as simulações ainda consideram interface entre o enrocamento e o concreto. O presente estudo está embasado no propósito de verificar se as forças de percolação desenvolvidas pela ombreira, formadas com o enchimento do reservatório, tendem ou não a comprimir a barragem como um todo e contribuir para o desenvolvimento de trincas verticais, com o esmagamento do concreto da face de montante dos barramentos, comprometendo assim o seu desempenho. A metodologia é fundamentada em simulações tridimensionais de percolação que fornecem as forças provenientes do fluxo de água posteriormente aplicadas em simulações de tensão-deformação para avaliar o seu efeito sobre a laje. A geometria e os parâmetros da barragem simulada foram embasados em arranjos de BEFC que apresentaram problemas, aplicando algumas variações paramétricas para uma avaliação. Os resultados indicam que o módulo de deformabilidade do enrocamento é o parâmetro mais influente para a formação de esforços na laje e que os maiores esforços de compressão são observados região superior e central da laje com valores entre 58 e 98 MPa. Houve aumento de até 9% na referida compressão com a adição das forças de percolação, com um acréscimo de até 8 MPa. A abertura das juntas foi observada em todo o perímetro, com valores de até 12 cm. Os valores de compressão são muito superiores aos resistentes do concreto e a abertura das juntas tem comportamento diferente do que se imaginava para critérios convencionais de projeto, que reforça a recomendação de estudos tridimensionais BEFCs, principalmente as construídas em vales fechados.

ABSTRACT

TRIDIMENTIONAL STUDY OF THE EFECTS DUE TO SEEPAGE FORCES IN CONCRETE FACE ROCKFILL DAMS

The Concrete Face Rock Fill Dams (CFRD) are relatively inexpensive, has great flexibility construction and very secure in the long run in terms of stability and earthquakes. Improvements in design criteria and executive processes encourage higher constructions in closed valleys, that is, on less favorable terms. With advances in methods of numerical simulation applied to projects, are still reported cases of major disruptions in the sealing slab that were unforeseen and surprising consultants and specialists. From the cracks, assumptions are made that try to explain the phenomenon through results of three-dimensional simulations under construction in stages and simulations still consider interface between rockfill and concrete. This study is grounded in order to verify whether the percolation forces developed by the abutment formed with the filling of the reservoir, tend or not to compress the dam as a whole and contribute to the development of vertical crack in the concrete crushing upstream face of the embankment thus compromising its performance. The methodology for verification is based on three-dimensional seepage simulations that provide the forces from the water flow subsequently applied to the stress-strain simulations to evaluate its effect on the slab. The geometry and parameters of the simulated dam were based on CFRD arrangements that presented problems by applying some parametric variations for a more general evaluation, not sticking to a certain specific project. The simulation results indicate that the Young's modulus of the rockfill is the most influential parameter to the formation of stresses in the slab and the greatest compressive stress are observed upper and central slab with values between 58 and 98 MPa. There was an increase of up to 9% in said compression with the addition of seepage forces, with an increase of up to 8 MPa. The opening of the joints was observed around the perimeter, with values of up to 12 cm. The compression values are much higher than the resistance of the concrete and the opening of the joints have different behavior than previously thought for conventional design criteria, enhancing the importance of three-dimensional studies BEFCs, mostly built in enclosed valleys.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Motivação	1
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Estrutura da Dissertação	3
2	Barragem de Enrocamento com Face de Concreto.....	5
2.1	Projetos de BEFC	5
2.1.1	Maciço de Enrocamento	5
2.1.2	Laje de Concreto.....	6
2.1.3	Plinto e Fundação	7
2.1.4	Simulações Numéricas	8
2.2	casos de Ruptura.....	9
2.3	MEF para Tensão-deformação	12
2.3.1	Funções de Interpolação (N).....	15
2.3.2	Matriz de Jacobiana [J].....	19
2.3.3	Matriz de Operadores [L]	20
2.3.4	Matriz de Deslocamento – Deformações [B]	21
2.3.5	Matriz de Rigidez [K].....	23
2.4	MEF para Percolação.....	24
2.5	Forças de Percolação	27
3	Simulações Tridimensionais	29
3.1	metodologia	29
3.2	Geometria	30
3.2.1	Desenhos em Planta.....	33
3.2.2	Desenhos do Corte Transversal a Barragem.....	35
3.2.3	Desenhos do Corte Transversal ao Vale.....	36
3.2.4	Detalhes Adicionais	38
3.2.5	Partes Geométricas	39
3.2.6	Variações Paramétricas da Injeção	41
3.3	Modelos Constitutivos.....	42
3.3.1	Materiais Geotécnicos	42
3.3.2	Materiais Estruturais.....	43

3.4	Parâmetros dos Materiais.....	44
3.5	Definição da Malha	46
3.6	Interfaces com as Faixas de Lajes	47
3.6.1	Tipo de Elemento.....	47
3.6.2	Definição das Dimensões do Modelo	47
3.6.3	Análise de Densidade da Malha	48
3.7	Fixações das Partes de Concreto	49
3.7.1	Fixação do Plinto na Fundação.....	49
3.7.2	Fixação da Laje no Enrocamento	50
3.8	Condições de Contorno	51
3.9	Carregamentos	52
3.9.1	Tensão-Deformação.....	52
3.9.2	Percolação.....	54
3.10	Solicitação de Resultados	55
3.11	Força de Percolação.....	56
3.11.1	Produto da Velocidade de Fluxo pelos Volumes nos nós	56
3.11.2	Vetores de Força de Percolação.....	58
3.11.3	Inserção nas Análises Numéricas	58
4	Apresentação e Análise dos Resultados.....	59
4.1	Considerações Gerais	59
4.2	Tabela de Resultados	60
4.3	Fluxo.....	63
4.4	Deslocamentos.....	67
4.5	tensões	68
4.6	Estudo Paramétrico.....	69
4.6.1	Tensões Máximas de Compressão.....	70
4.6.2	Aberturas Máximas das Juntas	74
5	Conclusões.....	79
5.1	Conclusões Gerais	79
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	80
	Referências	81
	A – Simulação Piloto.....	83
A.1	Módulo <i>PART</i>	84
A.1.1	Importação da geometria	84

A.1.2	Superfícies de Contato: Fundação	86
A.1.3	Superfícies de Contato: Plinto	87
A.1.4	Superfícies de Contato: Lajes	87
A.1.5	<i>SETS</i> para Condições de Contorno	88
A.1.6	<i>SETS</i> Totais.....	88
A.1.7	<i>SETS</i> de Fixação das Lajes	89
A.1.8	<i>SETS</i> Fundação	89
A.1.9	<i>SETS</i> Enrocamento	92
A.1.10	<i>SET</i> Piloto	93
A.1.11	<i>SET</i> Injeção.....	93
A.2	Módulo <i>PROPERTY</i>	94
A.2.1	Laje e Plinto de Concreto	94
A.2.2	Fundação.....	95
A.2.3	Enrocamento	96
A.2.4	Injeção	96
A.3	Módulo <i>ASSEMBLY</i>	97
A.3.1	<i>SETS</i> Total	97
A.3.2	<i>SETS</i> das Condições de Fronteira.....	98
A.3.3	<i>SET</i> Barragem.....	99
A.3.4	<i>SET</i> de Refinamento da Fundação.....	100
A.3.5	<i>SET</i> Concreto.....	102
A.3.6	Superfícies para Condições de Contorno.....	102
A.4	Módulo <i>STEP</i>	102
A.4.1	Passo da Análise Piloto.....	103
A.5	Módulo <i>INTERACTION</i>	103
A.5.1	Propriedade de Interface.....	103
A.5.2	Plinto/Fundação	104
A.5.3	Plinto/Lajes.....	104
A.5.4	Lajes/Enrocamento	106
A.5.5	Lajes/Lajes.....	106
A.6	Módulo <i>LOAD</i>	107
A.6.1	Restrição de Deslocamento nas Fronteiras	107
A.6.2	Recalque por Peso Próprio	107
A.6.3	Peso do Concreto	108

A.6.4	Peso do Reservatório	108
A.6.5	Cargas Piloto.....	108
A.7	Módulo <i>MESH</i>	109
A.7.1	Tipo de Elemento.....	110
A.7.2	Ferramentas de Seleção	111
A.7.3	Semear Arestas Externas	111
A.7.4	Semear Arestas do Enrocamento	111
A.7.5	Semear Arestas da Injeção.....	112
A.7.6	Semear o Concreto.....	113
A.7.7	Gerar as Malhas	115
A.8	Módulo <i>JOB</i>	117
A.8.1	Criar	117
A.8.2	Verificar o <i>JOB</i>	117
A.8.3	Enviar a Modelagem para o Cálculo	117
A.9	Módulo <i>VISUALIZATION</i>	117
A.9.1	Opções Gráficas.....	117
B	– Simulação de Percolação	119
B.1	Módulo <i>PART</i>	119
B.2	Módulo <i>PROPERTY</i>	119
B.3	Módulo <i>ASSEMBLY</i>	120
B.4	Módulo <i>STEP</i>	120
B.4.1	<i>STEP</i> Percolação.....	120
B.4.2	Solicitação de Resultados	122
B.5	Módulo <i>INTERACTION</i>	123
B.6	Módulo <i>LOAD</i>	123
B.6.1	Campos Iniciais	123
B.6.2	Carregamentos	123
B.7	Módulo <i>MESH</i>	124
B.8	Módulo <i>JOB</i>	124
B.8.1	Renomear.....	124
B.8.2	Verificar o <i>JOB</i>	124
B.8.3	Enviar a Modelagem para o Cálculo	124
B.9	Módulo <i>VISUALIZATION</i>	124
B.9.1	Opções Gráficas.....	124

C – Simulação de Força de Percolação	125
C.1 Exportar Vetores.....	125
C.2 Job-PILOTO.inp para FORCA-PERCOLACAO.inp.....	129
C.3 Exportar Texto dos Nós da Fundação.....	129
C.4 Converter Nós para <i>SETS</i>	131
C.4.1 Conversor dos <i>SETS</i> no EXCEL	131
C.4.2 Documento com a Definição dos <i>SETS</i>	134
C.5 Importar os <i>SETS</i>	136
C.6 Vetores da Força de Percolação.....	136
C.6.1 Conversor EXCEL para os Vetores.....	137
C.6.2 Documento com os Vetores de Força.....	141
C.7 Importar os Vetores de Força	142
C.8 Rodar a Simulação.....	142
D – Refinamento da Malha	143
D.1 Definição das Malhas	143
D.2 Escolha dos Pontos de Controle	147
D.3 Cálculos Numéricos.....	148
D.4 Resultados e escolha da malha	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Casos de grandes trincas e rachaduras na laje de montante	9
Tabela 2.2 – Definição para obtenção das funções de interpolação para elemento C3D4.....	17
Tabela 3.1 – Espessura da laje.	39
Tabela 3.2 – Parametrização da injeção de fundação.....	41
Tabela 3.3 – Parâmetros dos materiais.....	44
Tabela 3.4 – Parametrização dos módulos de Young (MPa).	44
Tabela 3.5 – Parametrização das permeabilidades dos materiais de fundação (m/s).....	44
Tabela 4.1 – Esforços e deslocamentos máximos na laje.	61
Tabela 4.2 – Diferença da compressão máxima entre dois módulos de Young do enrocamento.	70
Tabela 4.3 – Diferença da compressão máxima entre dois módulos de Young na fundação. .	70
Tabela 4.4 – Diferença da compressão máxima com ou sem injeção na crista.	71
Tabela 4.5 – Diferença da compressão máxima entre duas profundidades da injeção.	71
Tabela 4.6 – Diferença da compressão máxima entre três permeabilidades.....	72
Tabela 4.7 – Diferenças médias da compressão máxima entre dois módulos de Young do enrocamento.	72
Tabela 4.8 – Diferenças médias da compressão máxima entre dois módulos de Young na fundação.	72
Tabela 4.9 – Diferenças médias da compressão máxima com ou sem injeção na crista.	73
Tabela 4.10 – Diferenças médias da compressão máxima entre duas profundidades da injeção.	73
Tabela 4.11 – Diferenças médias da compressão máxima entre três permeabilidades.....	73

Tabela 4.12 – Síntese das médias e desvios das diferenças da compressão na direção yy.	74
Tabela 4.13 – Diferença da abertura máxima das juntas entre módulos de Young do enrocamento.	74
Tabela 4.14 – Diferença da abertura máxima das juntas entre módulos de Young na fundação.	75
Tabela 4.15 – Diferença da abertura máxima das juntas com ou sem injeção na crista.	75
Tabela 4.16 – Diferença da abertura máxima das juntas entre duas profundidades da injeção.	75
Tabela 4.17 – Diferença da abertura máxima das juntas entre três permeabilidades.	76
Tabela 4.18 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre dois módulos de Young do enrocamento.	76
Tabela 4.19 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre dois módulos de Young na fundação.	76
Tabela 4.20 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas com ou sem injeção na crista.	77
Tabela 4.21 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre duas profundidades da injeção.	77
Tabela 4.22 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre três permeabilidades.	77
Tabela B.1 – Permeabilidades dos materiais.	119
Tabela C.1 – Linguagem de formatação do texto de saída.	140
Tabela D.1 – Tamanho dos elementos semeados nas cinco malhas.	143
Tabela D.2 – Informações sobre a malha e tempos de processamento.	148
Tabela D.3 – Deslocamentos nos Nós (m).	150

Tabela D.4 – Derivadas em avanço do deslocamento nos Nós pelo número de nós ($\times 10^{-9}$ m).	151
Tabela D.5 – Desvios em avanço do deslocamento nos Nós (%).	152
Tabela D.6 – Derivadas e desvios médios dos 18 nós, ambos em avanço.	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Vista geral das lajes trincadas, UHE Campos Novos (SOBRINHO et al., 2007). 2	2
Figura 2.1 – Mapeamento das trincas da UHE Campos Novos (SOBRINHO et. al, 2007)... 10	10
Figura 2.2 – Relação do Fator A/H^2 (CRUZ et al., 2009)..... 11	11
Figura 2.3 – a) rigidez de uma mola; b) Módulo de Young linear elástico. 13	13
Figura 2.4 – Esquema de resolução do MEF (FARIAS, 2015)..... 15	15
Figura 2.5 – Elemento finito qualquer da malha. 16	16
Figura 2.6 – Elemento finito mapeado. 16	16
Figura 2.7 – Triângulo de Pascal para o tetraedro de quatro nós. 17	17
Figura 3.1 – Metodologia das simulações. 29	29
Figura 3.2 – Relação do Fator A/H^2 do modelo, modificado de CRUZ et al. (2009)..... 31	31
Figura 3.3 – Vista isométrica de todo modelo. 32	32
Figura 3.4– Vista isométrica na região da barragem do modelo..... 32	32
Figura 3.5 – Projeto em planta. Escala 1:25.000..... 33	33
Figura 3.6 – Detalhe 1 do projeto em Planta. Escala 1:5.000. 34	34
Figura 3.7 – Detalhe 1 da planta com subdivisões para a aplicação dos MEF. Escala 1:5.000. 34	34
Figura 3.8 – Corte A com o perfil no eixo de simetria. Escala 1:25.000. 35	35
Figura 3.9 – Corte 1A com o Detalhe 1A perfil no eixo de simetria. Escala 1:6.250..... 36	36
Figura 3.10 – Corte 1A com o Detalhe 1A com subdivisões para a aplicação dos MEF. Escala 1:6.250..... 36	36
Figura 3.11 – Corte B com o perfil no plinto. Escala 1:25.000. 37	37

Figura 3.12 – Corte 1B o Detalhe 1B com perfil no plinto. Escala 1:5.000.	37
Figura 3.13 – Corte 1B com o Detalhe 1B com subdivisões para a aplicação dos MEF. Escala 1:5.000.....	38
Figura 3.14 – Detalhes 2 em planta (a), Detalhes 2A (b) e 2B (c) ou Cortes 2A (b) e 2B (c). Escala 1:500.	40
Figura 3.15 – Vista tridimensional de localização da barragem, com as subdivisões geométricas.	40
Figura 3.16 Vista tridimensional na região da barragem com as nove partes montadas.	41
Figura 3.17 Vista isométrica na região da barragem com as nove partes separadas.....	42
Figura 3.18 – Malha gerada – visão geral.	46
Figura 3.19 – Malha gerada – região da barragem (a) e região do pé do plinto (b).....	46
Figura 3.20 – Requalques a partir do meio da crista da barragem até a fronteira do modelo, transversal ao vale.	48
Figura 3.21 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.....	49
Figura 3.22 – Corte 1B ou Detalhe 1B, com destaque das linhas de fixação da laje. Escala 1:5.000.....	51
Figura 3.23 – Restrições de deslocamento para tensão-deformação. Escala 1:50.000.	52
Figura 3.24 – Esquema da distribuição de pressão do reservatório. Escala 1:6.250.....	53
Figura 3.25 – Destaque em cinza da região de pressão variável do reservatório.....	53
Figura 3.26 – Deformação sofrida por uma seção transversal de uma BEFC:a) final de construção: b) após o enchimentos (MORI, 1999).	54
Figura 3.27 Destaque em cinza da região de poropressão variável à montante.....	55
Figura 3.28 – Destaque em cinza da região de poropressão zero à jusante.	55
Figura 3.29 – Volumes nos nós calculados para uma malha genérica.	57

Figura 3.30 – Explicação do cálculo do volume dos elementos para os nós da Figura 3.29. ...	57
Figura 4.1 – Esforços YY na laje de montante, nas duas faces, de cima (a) e de baixo (b). ...	60
Figura 4.2 – Magnitude dos deslocamentos nas lajes com exagero de 50 vezes.	60
Figura 4.3 – Isosuperfícies de poropressões (Pa), vista de montante.	63
Figura 4.4 – Isosuperfícies de poropressões (Pa), vista de jusante.	63
Figura 4.5 – Vista superior do corte na elevação 100 m com os gradientes Y (materiais F1 e F2).	64
Figura 4.6 – Vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes de fluxo.	65
Figura 4.7 – Detalhe 1 da vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes de fluxo.	65
Figura 4.8 – Detalhe 2 da vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes de fluxo.	66
Figura 4.9 – Detalhe 2 da vista superior da seção na elevação 100 m com os gradientes na direção Y.	66
Figura 4.10 – Magnitude máxima dos deslocamentos sem as forças de percolação (m).	67
Figura 4.11 – Magnitude máxima dos deslocamentos sem as forças de percolação (m).	67
Figura 4.12 – Magnitude (m) dos deslocamentos nas lajes com ampliação de 50 vezes.	68
Figura 4.13 – Tensões máximas na laje de montante, nas duas faces, de cima (a) e de baixo (b).	69
Figura 4.14 – Tensões YY na laje de montante, nas duas faces, de cima (a) e de baixo (b). ..	69
Figura A.1 - Interface do Abaqus ® com destaque no menu principal e na caixa de seleção dos módulos de trabalho.	83
Figura A.2 – Configuração para importação das partes geométricas.	85

Figura A.3 – Partes da geometria importadas para o Abaqus ®.....	85
Figura A.4 – Caixa de seleção das partes.....	86
Figura A.5 – Parte da fundação.....	86
Figura A.6 – Superfícies de contato definidas na parte “LAJE1”.....	87
Figura A.7 – Set-MONTANTE.....	88
Figura A.8 – Set-JUSANTE.....	88
Figura A.9 – Sets para contato do tipo <i>Tie</i> , Lajes 1 e 2.....	89
Figura A.10 – Sets para contato do tipo <i>Tie</i> , Lajes 3 e 4.....	89
Figura A.11 – Set-FUNDACAO, sem barragem e sem a injeção.....	90
Figura A.12 – Set-F1.....	90
Figura A.13 – Set-F2.....	91
Figura A.14 – Set-F3.....	91
Figura A.15 – Set-F4.....	91
Figura A.16 – Set-E1.....	92
Figura A.17 – Set-E2.....	92
Figura A.18 – Set-E3.....	93
Figura A.19 – Ponto para o Set-PILOTO.....	93
Figura A.20 – Set-INJECAO.....	94
Figura A.21 – Sets para a parte “FUNDACAO” definidos até então. <i>Tools, Set, Create...</i>	94
Figura A.22 – Posicionamento do eixo zero.....	97
Figura A.23 – Set-U1.....	98

Figura A.24 – Set-U2	98
Figura A.25 – Set U3.....	99
Figura A.26 – Separar a o material de enrocamento.	100
Figura A.27 – Set-BARRAGEM	100
Figura A.28 – Set-FRONTEIRA.....	101
Figura A.29 – Set-REFINAMENTO1 (Bloco 2 do refinamento da malha)	101
Figura A.30 – Set-REFINAMENTO2 (Bloco 1 de refinamento da malha).....	101
Figura A.31 – Set-RESERVATÓRIO.....	102
Figura A.32 – Interação Tie, Fundação/Plinto	104
Figura A.33 – Configuração dos contatos Plinto/Lajes.....	105
Figura A.34 – Peso do reservatório.	109
Figura A.35 – Exemplo de força piloto.....	110
Figura A.36 – Opções da malha.	110
Figura A.37 – Caixa de seleção das partes para a distribuição da malha.....	111
Figura A.38 – Seleção para semear a malha na injeção.	112
Figura A.39 – Seleção para semear a malha no perímetro da laje.	113
Figura A.40 – Seleção para semear a malha na metade superior da laje.	114
Figura A.41 – Semear a malha na metade inferior, com variação de espaçamento.....	114
Figura A.42 – Malha gerada – visão geral.	115
Figura A.43 – Malha gerada – detalhe da barragem sem as lajes.	115
Figura A.44 – Malha gerada – detalhe da barragem com as lajes.....	116

Figura A.45 – Malha gerada – detalhe da injeção e plinto de pé com as lajes.....	116
Figura B.1– Configuração de permeabilidade do “Material-E1”.....	120
Figura B.2 – Criar o passo de percolação.....	121
Figura B.3 – Configurar o tipo de análise,	121
Figura B.4 – Ajustar os incrementos.	122
Figura C.1 – Criar primeiro vetor para exportação.	125
Figura C.2 – Opções dos resultados.	126
Figura C.3 – Selecionar o <i>set</i> de resultados.	126
Figura C.4 – Visualização dos resultados para a força de percolação na direção x.	127
Figura C.5 – Selecionar os vetores para a exportação.....	127
Figura C.6 – Exportar o campo de vetores para o arquivo de texto.	128
Figura C.7 – Deletar o cabeçalho do arquivo “F1.rpt”.....	128
Figura C.8 – Deletar rodapé do arquivo “F1.rpt”.....	129
Figura C.9 – Buscar o primeiro “Set-FUNDACAO” no arquivo “PILOTO.inp”.....	130
Figura C.10 – Planilha com os nós da fundação.	131
Figura C.11 – “Puxar” os valores de entrada.	132
Figura C.12 – Nomear o primeiro nó.	132
Figura C.13 – “Puxar os demais nós”	133
Figura C.14 – Substituir os “igual” por “=”.....	133
Figura C.15 – Nomear o primeiro <i>Set</i>	134
Figura C.16 – “Puxar” os demais <i>Sets</i>	134

Figura C.17 – Selecionar os <i>Sets</i>	135
Figura C.18 – Valores de entrada.....	138
Figura C.19 – Cabeçalhos de identificação.....	138
Figura C.20 – “Puxar” as forças de percolação.....	139
Figura C.21 – texto das forças em um dos nós.....	139
Figura C.22 – Formatação parcial das forças de percolação nos dois primeiros nós.....	140
Figura C.23 – Formatação final das forças de percolação nos dois primeiros nós.	140
Figura D.1 – Cinco refinamentos de malha, vista geral.	144
Figura D.2 – Cinco refinamentos de malha, detalhe do talude de montante.....	145
Figura D.3 – Cinco refinamentos de malha, detalhe do plinto de pé.	146
Figura D.4 – Nós A para controle de deslocamento.	147
Figura D.5 – Nós B para controle de deslocamento.....	147
Figura D.6 – Nós C para controle de deslocamento.....	148
Figura D.7 – Nós D para controle de deslocamento.	148
Figura D.8 – Tempos de cálculo vs número de nós para as cinco malhas.	149
Figura D.9 – Índice de experiência do <i>Windows</i> , processador e memória instalada.	149
Figura D.10 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.....	150
Figura D.11 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.....	151
Figura D.12 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.....	152
Figura D.13 – Derivadas das médias dos 18 nós pelo número de nós, em avanço.....	153
Figura D.14 – Desvio da média dos 18 nós pelo número de nós, em avanço.....	153

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

A	área da laje de montante da barragem
BEFC	barragem de enrocamento com face de concreto
C3D4	tipo de elemento finito tetraédrico de quatro nós
c_i	incógnita i do sistema linear
E	módulo de Young
E1	enrocamento mais afastado da face de concreto
E2	enrocamento intermediário
E3	enrocamento em contato com a face de concreto
E_c	módulo de Young do concreto armado
F	força
F1	fundação da ombreira, até o nível do pé da barragem
F2	fundação do nível do pé da barragem até o nível do final da injeção
F3	fundação do nível do pé da injeção até cem metros baixo do pé da barragem
F4	fundação do nível de cem metros abaixo do pé da barragem até o fim
f_{ck}	resistência característica do concreto
FFV	fator de forma do vale
FP	força de percolação
FP_i	força de percolação na direção i
g	aceleração da gravidade

H	altura da Barragem
h	altura da barragem medida a partir da base
H_z	altura da barragem medida a partir do topo
h_w	carga hidráulica
h_w^*	carga hidráulica virtual
i	gradiente hidráulico
I1	injeção com vinte metros de profundidade e que não se estende além da crista
I2	injeção com vinte metros de profundidade e que se estende além da crista
I3	injeção com 60 m de profundidade e que não se estende além da crista
I4	injeção com 60 m de profundidade e que se estende além da crista
i^*	gradiente hidráulico virtual
i_i	gradiente hidráulico na direção i
K	rigidez
L	comprimento da crista da barragem
M1 a M5	densidades crescentes de malha
MEF	método dos elementos finitos
m_w	massa de água
N_i	função de interpolação na direção i
P	pressão de água do reservatório (condição de poropressão para o fluxo)
P1	Arranjo de permeabilidade com pouca diferença entre ombreira e fundação
P3	Arranjo de permeabilidade com grande diferença entre ombreira e fundação

P2	Arranjo de permeabilidade com fundação homogênea
$P_i I_i Y_i$	modelo com arranjo de permeabilidade P_i , injeção I_i e módulo de Young Y_i
PTV	princípio dos trabalhos virtuais
q	vazão
t	espessura da laje
u, v, w	deslocamentos nas direções x, y e z, respectivamente
UHE	usina hidrelétrica
V	volume
v	velocidade de fluxo
V_w	volume de água
W	trabalho
x, y, z	coordenadas do espaço real
x_i, y_i, z_i	coordenadas do nó i no espaço real
Y1	arranjo de módulos de Young com valores baixos na fundação e enrocamento
Y2	arranjo de módulos de Young, baixos de fundação e altos no enrocamento
Y3	arranjo de módulos de Young, altos de fundação e baixos no enrocamento
Y4	arranjo de módulos de Young com valores altos na fundação e enrocamento
[B]	matriz deslocamento no nó para deformação no interior do elemento finito
$[B^f]$	matriz carga nos nós para gradiente no interior do elemento finito
[D]	matriz constitutiva de tensão-deformação
[J]	matriz jacobiana

[K]	matriz rigidez
[K^f]	matriz de fluxo
[L]	matriz de operadores
[P]	matriz constitutiva de permeabilidade
γ_e	peso específico do enrocamento
γ_w	peso específico da água
Δ	variação
δ	deslocamento
δ^*	deslocamento virtual
δ_{Ii}	abertura máxima das juntas na laje, direção yy na laje, arranjo de injeções Ii
δ_{Pi}	abertura máxima das juntas na laje, direção yy do arranjo de permeabilidades Pi
δ_{Yi}	abertura máxima das juntas na laje, direção yy na laje, módulos de Young Yi
ε	deformação
ε^*	deformação virtual
ε_l	deformação longitudinal à tensão aplicada
ε_t	deformação transversal à tensão aplicada
ν	coeficiente de Poisson
ξ, η, ζ	coordenadas do espaço mapeado
σ	tensão
σ_{Ii}	compressão máxima, direção yy na laje, arranjo de injeções Ii
σ_{Pi}	compressão máxima na laje, direção yy do arranjo de permeabilidades Pi

σ_{Yi} compressão máxima, direção yy na laje, arranjo de módulos de Young Yi

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Barragens são estruturas utilizadas para criação de lagos artificiais com diversos fins, geração hidrelétrica, irrigação, lazer, armazenamento de rejeitos, entre outros. Suas estruturas principais de barramento da água podem ser construídas com diferentes materiais constituintes, em duas classificações principais, de concreto ou geotécnicas. As barragens de concreto podem ser convencionais ou compactadas com rolo e as geotécnicas de terra ou enrocamento.

O presente estudo aborda o tipo de barragem geotécnico de enrocamento, que são amplamente utilizadas em locais com grande disponibilidade de rocha provinda de escavações obrigatórias ou onde é escassa a disponibilidade de solos impermeáveis, principalmente quando se necessita de reservatórios de grande profundidade. Sua classificação é feita a partir do elemento de vedação obrigatório, pois o maciço de enrocamento é sempre muito permeável. No caso estudado, a impermeabilização é feita a partir de uma laje de concreto na face de montante, sendo este tipo denominado de Barragem de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC).

1.2 MOTIVAÇÃO

As BEFCs são relativamente de baixo custo em arranjos com grande volume de escavação obrigatória em rocha, com grande flexibilidade construtiva e muito seguras em longo prazo em termos de estabilidade e abalos sísmicos. Melhorias nos critérios de projeto e processos executivos encorajam empreendimentos cada vez mais altos e em vales mais fechados, ou seja, em condições menos favoráveis (CRUZ et al, 2009).

Mesmo com os avanços em métodos de simulações numéricas aplicados a projetos, ainda são registrados casos de grandes rupturas na laje de vedação que não foram previstas e que surpreendem consultores e especialistas da área, uma das razões é devido as usuais simplificações das análises numéricas tridimensionais em relação a modelos constitutivos e considerações da laje e da interação da laje com elementos geotécnicos e das juntas entre as faixas de laje, que nem sempre compõe o mesmo modelo tridimensional. Casos históricos recentes chamam à atenção devido a formação de rachaduras muito maiores que as previstas, sendo que os arranjos problemáticos têm uma característica em comum mais evidente: a grande

altura da barragem construída em vale muito fechado. A Figura 1.1 mostra a laje da UHE Campos Novos, que rompeu com o enchimento do reservatório.

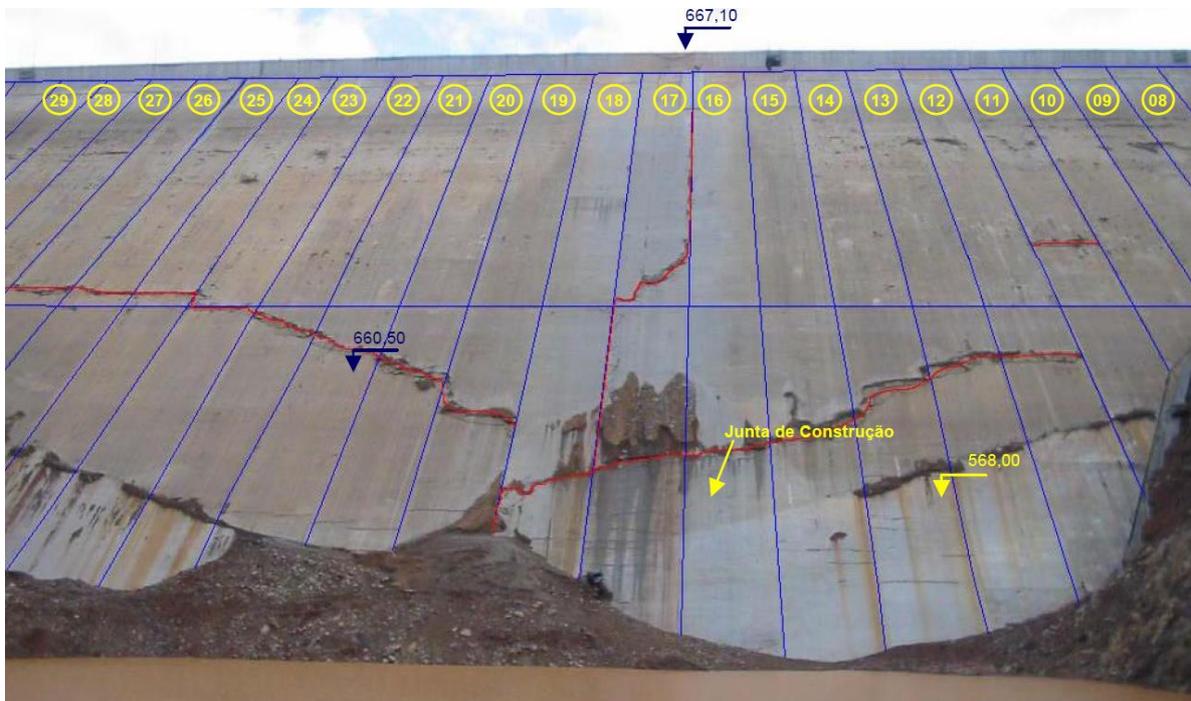


Figura 1.1 – Vista geral das lajes trincadas, UHE Campos Novos (SOBRINHO et al., 2007).

A grande maioria das BEFCs que apresentaram rachaduras permanece em operação sem grandes intervenções, pois o maciço de enrocamento não apresenta problemas de estabilidade. O reparo mais comum consiste no lançamento de solo sobre a laje, na região das trincas, que ajuda a colmatar a transição da laje com o enrocamento. Muitas vezes o referido procedimento já reduz a vazão em níveis aceitáveis de operação (CRUZ et al., 2009).

A partir das rachaduras, foram formuladas hipóteses que buscam explicar o fenômeno, como na tese de doutorado de Frutuoso (2007), que simula de forma tridimensional a construção por etapas de BEFCs com a consideração de interface entre o enrocamento e o concreto e verifica no modelo numérico que a laje não deve ser construída concomitantemente com o maciço. O presente estudo está embasado no propósito de confirmar ou refutar a hipótese de que as forças de percolação desenvolvidas pela ombreira, formadas com o enchimento do reservatório, tendem a comprimir a barragem como um todo e contribuir para o desenvolvimento de trincas verticais com o esmagamento do concreto da face de montante dos barramentos, comprometendo o seu desempenho.

1.3 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar os efeitos das forças de percolação sobre a laje de montante de BEFC, a partir de simulações numéricas embasadas em casos históricos de barragens em operação.

Os objetivos específicos são:

- Observar as características gerais de projetos em BEFCs, com atenção especial para os casos de rupturas que possam estar relacionados ao objetivo principal e com enfoque na coleta de informações para definição do modelo numérico;
- Analisar uma BEFC hipotética com variação de parâmetros e da profundidade da injeção, de modo a obter dados de forças de percolação nas ombreiras naturais e os efeitos de propagação destas forças no enrocamento na face de concreto;
- Estudar a influência das variações paramétricas para o aumento ou diminuição dos esforços na laje de montante, com ou sem força de percolação.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos e quatro apêndices, descritos sucintamente a seguir:

O primeiro capítulo faz considerações iniciais sobre o tema, apresenta a justificativa, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, com considerações conceituais de projeto de BEFCs, breve descrição sobre os métodos dos elementos finitos para o problema de fluxo e para tensão-deformação e a teoria de força de percolação.

O terceiro capítulo apresenta a descrição da metodologia das simulações tridimensionais utilizada no presente trabalho para avaliação da força de percolação em BEFC.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações com as análises, discussões e as considerações para critérios de projeto.

O quinto capítulo apresenta as conclusões sobre o trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

Ao final da dissertação, são apresentados cinco apêndices. Os três primeiros (A, B e C) fazem uma descrição detalhada das análises numéricas realizadas com o uso do programa de elementos finitos, o Apêndice D mostra a metodologia e os resultados do refinamento da malha.

2 BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO

2.1 PROJETOS DE BEFC

O bom desempenho de BEFCs construídas em todo o mundo aliado a evolução nos critérios de projetos com o auxílio de ferramentas numéricas computacionais têm possibilitado a construção de BEFCs cada vez mais altas e em vales muito fechados, porém as principais decisões de projetos no dimensionamento continuam por ser prioritariamente empíricas. Segundo CRUZ et al. (2009) o conhecimento atual permite dividir as barragens em função da sua altura:

- BEFCs até 50 m não têm apresentado problemas de qualquer natureza;
- BEFCs entre 50 m e 100 m têm mostrado fissuras e trincas na laje, as quais são facilmente reparadas com o lançamento de material com finos a montante;
- BEFCs entre 100 m e 150 m têm apresentado problemas com vazões resultantes dos deslocamentos da face, mas, no geral, têm um bom desempenho;
- BEFCs entre 150 m e 200 m requerem mais reparos, em razão da maior incidência de trincas e, em alguns casos, da ruptura das lajes;
- BEFCs da ordem de 200 m são poucas e que requerem mudanças nos requisitos de compactação do enrocamento e na especificação das juntas.

As bases para o projeto e construção de BEFCs foram consolidadas por COOKE & SHERARD (1987). Critérios mais complementares podem ser consultados em boletins e artigos publicados no Comitê Brasileiro de Barragens CBDB, Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2010), em livros como de CRUZ *et al* (2009), teses como a de Frutuoso (2007), entre outros.

2.1.1 MACIÇO DE ENROCAMENTO

Em relação ao arranjo geral, os taludes de enrocamento são relativamente íngremes de montante e jusante, que permite uma redução do comprimento do desvio, da adução, do canteiro de obras. Outra vantagem notável de BEFCs é devido à flexibilidade construtiva em épocas chuvosas, que pela ausência de núcleos argilosos, o enrocamento pode ser compactado normalmente e determinados projetos consideram até o galgamento sobre o maciço em uma eventual cheia na calha do rio. Na última década, a otimização do processo construtivo tem possibilitado produções mensais superiores a um milhão de metros cúbicos.

Em BEFCs, todo maciço de enrocamento está localizado a jusante do plano de atuação do empuxo do reservatório e essa característica gera particularidades do comportamento hidráulico e mecânico, pois o empuxo atua diretamente sobre a laje de montante (BASSO, 2007). Segundo o levantamento feito por CRUZ *et al* (2009), a evolução no projeto e nos métodos construtivos do maciço de enrocamento foram suficientes para garantir a estabilidade das BEFCs até a altura de 150 m sem grandes problemas, mesmo com projetos prioritariamente empíricos. O maciço de enrocamento compactado tem se apresentado com ótima estabilidade até em barragens altas submetidas a abalos sísmicos.

O projeto do maciço de enrocamento deve levar em conta fatores como: a forma e a granulometria dos blocos, que quanto mais pontudo, maior é a quebra e o recalque do maciço, especificações de molhagem para compactação, os blocos molhados quebram com mais facilidade e isso reduz muito os recalques após o enchimento (BASSO, 2007).

Em termos de estabilidade de taludes, as rupturas circulares não ocorrem no enrocamento, confirmado pela experiência prática (COOKE & SHERARD, 1987). Em projetos convencionais, os taludes são construídos com $\sim 37^\circ$, mais abatidos que o ângulo de atrito do enrocamento ($\sim 45^\circ$) portanto são estáveis em rupturas no plano paralelo a superfície do talude. Segundo os autores, os métodos clássicos de análise de estabilidade de taludes calculam uma superfície de ruptura fisicamente impossível para um maciço de enrocamento.

Outro fator que impacta no desempenho de BEFCs altas é a combinação do zoneamento com diferentes requisitos de compactação e a compatibilização do tempo de construção da laje de concreto. O enrocamento deve ser mais rígido a medida que esta esteja cada vez mais próximo da face de concreto, e a construção da face de concreto deve ser postergada ao máximo, para que se reduzam os efeitos de aumento de tensões indesejáveis na laje devido o desenvolvimento de deformações no enrocamento.

2.1.2 LAJE DE CONCRETO

O tempo de elevação da laje em relação ao enrocamento é tradicionalmente definido por critérios empíricos, onde a recomendação clássica é que a laje só seja levantada quando o maciço de enrocamento estiver finalizado. Todavia, devido o grande sucesso no desempenho das BEFCs, a recomendação passou a ficar gradativamente mais flexível nas últimas décadas e em alguns casos a laje é construída junto com o maciço de enrocamento e os recalques construtivos no enrocamento transmitem esforços adicionais para a laje.

Importante observar que mesmo com especificações adequadas de projeto e execução rígida no campo com seleção de granulometria, molhagem e compactação com grande energia, os módulos de elasticidade do enrocamento são mais de cem vezes menores que do concreto armado e as tensões induzidas por carregamentos do peso próprio do enrocamento e do reservatório tendem a se concentrar nos elementos mais rígidos, que no caso são as faixas de lajes. Os deslocamentos diferenciais entre os materiais geotécnicos com a laje de concreto podem ser preocupantes em barragens mais altas e a laje de montante fica sujeita a esforços muito maiores que os calculados, então ocorrem as tricas e rachaduras em que não estavam previstas em projeto (CRUZ *et al*, 2009).

Como ressaltado por Frutuoso (2007), até a última década, praticamente todos os projetos que utilizaram ferramentas de simulações computacionais não adicionaram a laje de montante nos seus modelos tridimensionais. Em trabalhos como de Justo & Saura (1981), Saboya (1993), Casarin *et al* (1994), Xia *et al* (2001) e Albertoni *et al* (2003), os autores partiram da consideração que o deslocamento da laje acompanha o enrocamento então não é necessária sua adição no modelo numérico, todavia, alguns acidentes recentes reforçam o fato que as recomendações de projeto devem ser reavaliadas, para os critérios de dimensionamento das lajes.

As premissas básicas para o projeto da laje de BEFCs, descritas por Cruz *et al* (2009) são:

- Todo o maciço de enrocamento está a jusante da laje;
- O carregamento hidrostático total atua na fundação ao longo do plinto;
- O fluxo na fundação deve ser controlado por injeção sob o plinto;
- Estanqueidade, durabilidade e resistência associada a capacidade de deformação.

2.1.3 PLINTO E FUNDAÇÃO

O arranjo de uma BEFC ainda inclui um elemento que serve como apoio para as extremidades da laje e como transição para a fundação, denominado plinto, o qual está presente em todo o perímetro do vale e se estende até a crista da barragem e seu dimensionamento também segue critérios empíricos propostos por Cooke e Sherard (1987). O plinto é a estrutura que funciona como reforço e fundação da laje de concreto e tem função principal de controlar a percolação e os gradientes hidráulicos na fundação. Os gradientes na região tendem a ser elevados, assim o plinto deve ser assentado sobre rocha, dura, não erodível, limpa, tratada e injetada (BASSO, 2007).

O plinto é geralmente ancorado na fundação por chumbadores ou tirantes, com rigorosos critérios limpeza de remoção de camadas aluvionar e de solo até um material geotécnico competente, o cálculo da ancoragem é feito por critérios de escorregamento do empuxo horizontal de água.

A limpeza da fundação se estende para na região do maciço de enrocamento até uma distância que ocorra o uma redução de deformações no enrocamento sob a laje. Nas outras regiões sob o enrocamento, não é incomum até que se mantenham alguns materiais aluvionares. Há muitos casos onde o aluvião é deixado sob o maciço de jusante, desde que não esteja sujeito a liquefação.

2.1.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Mesmo com tantos avanços a utilização de simulações tridimensionais para projetos de BEFCs é uma prática que está se difundindo recentemente. Segundo um estudo realizado por Frutuoso (2007), a maioria dos projetos até então, eram elaborados com simulações bidimensionais e com modelos elásticos lineares. Tal prática acaba por ignorar a influência do efeito das ombreiras e da não linearidade dos materiais geotécnicos.

Segundo Naylor *et al* (1981), o modelo ideal para simular BEFCs seria:

- Não linearidade tensão-deformação;
- Diversas trajetórias de tensões;
- Efeito de tempo, uma parcela de deformações é causada por fenômenos tais como a consolidação e fluência;
- Anisotropia: carregamentos aplicados em direções diferentes resultam em deformações com magnitudes diferentes, especialmente em solos compactados;
- Dilatância: tensões cisalhantes podem causar também aumento de volume;
- Aumento de rigidez do material no carregamento.

Os critérios propostos por Cooke e Sherard (1987) continuam a ser seguidos pela maioria dos projetistas atualmente, quase trinta anos depois das publicações. Os desafios de custo e cronograma têm obrigado a projetos mais ousados e os avanços das análises tridimensionais ajudam para as adaptações nos critérios clássicos.

2.2 ASOS DE RUPTURA

As rupturas em BEFCs que ocorreram na laje não comprometeram a estabilidade global da obra e muitas vezes o fluxo pela laje possui valores aceitáveis para os níveis de operação do barramento. Porém o inconveniente é motivador para diversas pesquisas e para revisão dos critérios clássicos de especificações de projeto e construtivas. Quatro casos chamam a atenção, Tabela 2.1, ressaltados também por autores como Frutuoso (2007) e Cruz *et al* (2009).

Tabela 2.1– Casos de grandes trincas e rachaduras na laje de montante

Barragem	H	L/H	A/H ²	Geologia	Talude de montante	Talude de jusante
TSQ1 (2003/2004)	178	6,2	5,68	Calcário e Argilito	1,4	1,4
Barra Grande (2005)	185	3,59	3,16	Basalto	1,3	1,3
Campos Novos (2005)	202	2,93	2,60	Basalto	1,4	1,4
Mohale (2006)	145	4,14	4,14	Basalto Dolerítico	1,4	1,45

Os autores acrescentam que as perdas de água devido às trincas e rachaduras na laje de montante devem ser medidas e observadas, pois podem representar uma perda econômica. O fenômeno de deformação lenta devido esmagamento e acomodações do enrocamento também deve ser medido, porque pode causar ou agravar danos na laje, aumentando ainda mais a perda de água. Todas as quatro barragens estão em pleno funcionamento, e ressaltando novamente, os problemas da laje não comprometeram suas estabilidades estruturais.

O caso de Campos Novos possui uma documentação ampla, pois o reservatório foi rebaixado para que fosse resolvido outro problema e as rachaduras ficaram expostas. Na ocasião, todas as rachaduras foram mapeadas e tratadas (Figura 2.1).

O estado de tensões desenvolvido no maciço de enrocamento devido a geometria e as especificações construtivas é responsável pelos deslocamentos na vertical e horizontal dos barramentos. Os módulos de deformabilidade decrescem com o aumento das tensões nos materiais que constituem a barragem, onde as barragens mais altas irão deformar mais em termos percentuais (CRUZ *et al.*, 2009).

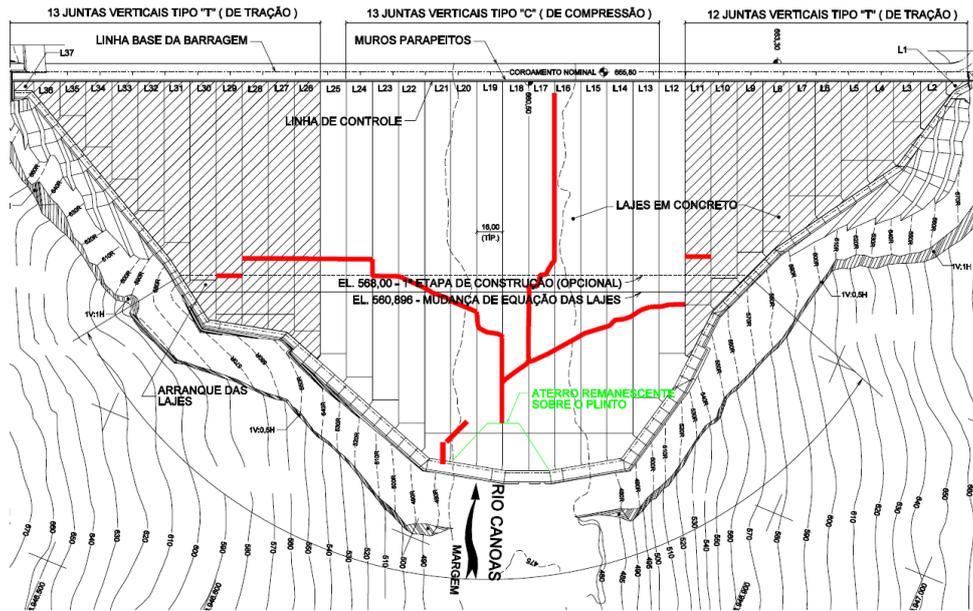


Figura 2.1 – Mapeamento das trincas da UHE Campos Novos (SOBRINHO *et. al*, 2007).

Considerando uma barragem homogênea, o maior recalque pode ser estimado por:

$$\text{Recalque máximo} = \frac{\gamma_e H^2}{4E_e} \quad (2.1)$$

onde:

γ_e = peso específico do enrocamento;

H = altura da barragem;

E_e = módulo de Young enrocamento.

Cruz et al (2009) expõe um gráfico que plotam 18 BEFCs de eixos com indicadores adimensionais (Figura 2.2). No eixo das abcissas o indicador é puramente geométrico, chamado de Fator de Forma do Vale, e dado por:

$$FFV = \frac{A}{H^2} \quad (2.2)$$

onde:

FFV = fator de forma do vale;

A = área da laje de concreto.

No eixo das coordenadas, tem-se um indicador de deformabilidade adimensional que se refere a um indicador do inverso do recalque (IIR), definidos por:

$$IRR = \frac{E_e}{\gamma_e H} \quad (2.3)$$

Cruz *et al* (2009) ressalta ainda que os arranjos problemáticos possuem algumas características semelhantes que relaciona o FFV com o IRR. Destaca-se que as quatro barragens que apresentaram ruptura estão abaixo de uma espécie de linha de segurança (em azul na Figura 2.2), arbitrada pelo conjunto de equações:

$$E_e/(\gamma_e H) = 120 - 20 A/H^2 \quad (2.4)$$

$$E_e/(\gamma_e H) = 30 \quad (2.5)$$

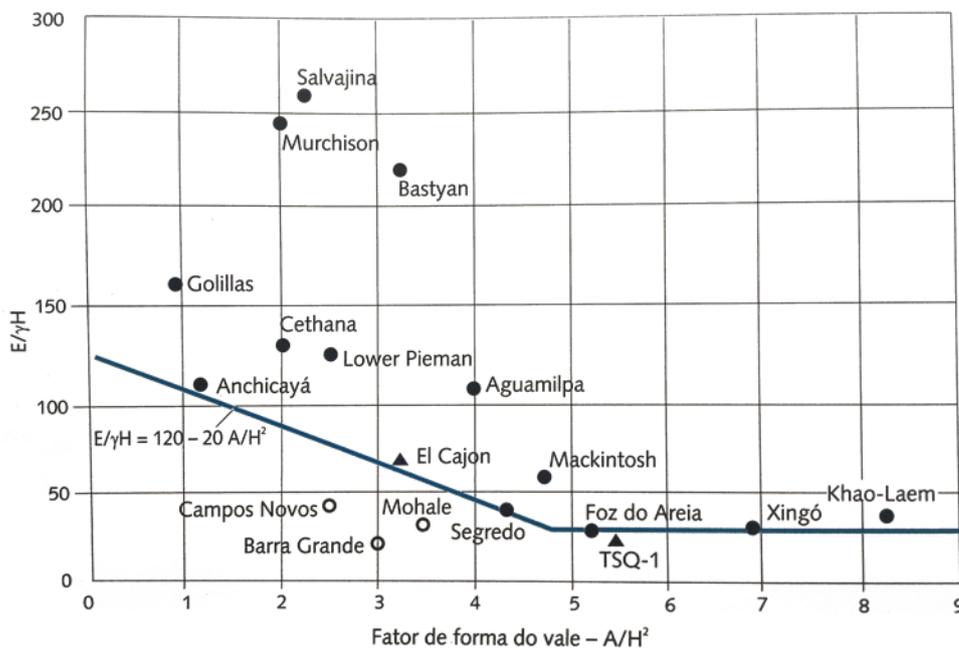


Figura 2.2 – Relação do Fator A/H² (CRUZ et al., 2009).

Um trecho da análise de (PINTO, 2007) sobre quatro dos grandes acidentes nas lajes de concreto até então é apresentado abaixo:

Os métodos numéricos são uma ferramenta promissora ainda em desenvolvimento. Eles representam uma ajuda para o projeto por possibilitarem análises paramétricas e soluções alternativas, mais ainda não alcançam um estágio para tornar-se o instrumento principal do projeto das BEFCs. Considerando a natureza das BEFCs é duvidoso que se possa alcançar tal estágio, a menos que a interpretação dos fenômenos físicos envolvidos seja muito mais desenvolvida. As principais decisões de projeto provavelmente ainda continuarão, por um bom tempo, a depender dos aspectos empíricos.

2.3 MEF PARA TENSÃO-DEFORMAÇÃO

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma das ferramentas de resolução de problemas em meios contínuos, que podem ser implementadas em código computacional para sua resolução numérica. O princípio da utilização de um método computacional é de tentar representar o mais fielmente possível o meio físico através da discretização de um modelo que simplifique o problema até que seja possível sua resolução, mesmo que de forma aproximada.,

A seguir alguns conceitos da formulação de elementos finitos, em uma análise de tensão-deformação com material do tipo linear e elástico. Em uma malha do tipo tetraédrica de quatro nós (C3D4).

Para o caso de um problema estático linear elástico de variações de forças e deslocamentos, tem-se a introdução de uma função que relaciona as grandezas definida como rigidez pode ser definida de forma simplificada unidimensionalmente com a força necessária para um deslocamento unitário, como apresentado na Figura 2.3a. de forma semelhante ao que ocorre em modelo de uma mola ideal em um problema unidimensional exposto por:

$$\Delta F = K \Delta \delta \quad (2.6)$$

onde:

ΔF = incremento de forças;

K = rigidez;

$\Delta \delta$ = incremento de deslocamentos.

O comportamento de um material, de forma análoga a rigidez, é descrita por uma relação entre as Tensões (σ) com as Deformações (ϵ) através de uma lei constitutiva, no caso unidimensional linear elástico pelo Módulo de Young (E), Figura 2.3b.

Na generalização bi ou tridimensional, a relação constitutiva é dada por vetores e matrizes, no caso de um elemento tetraédrico de quatro nós é descrito como:

$$\{\Delta F\}_{12 \times 1} = [K]_{12 \times 12} \{\Delta \delta\}_{12 \times 1} \quad (2.7)$$

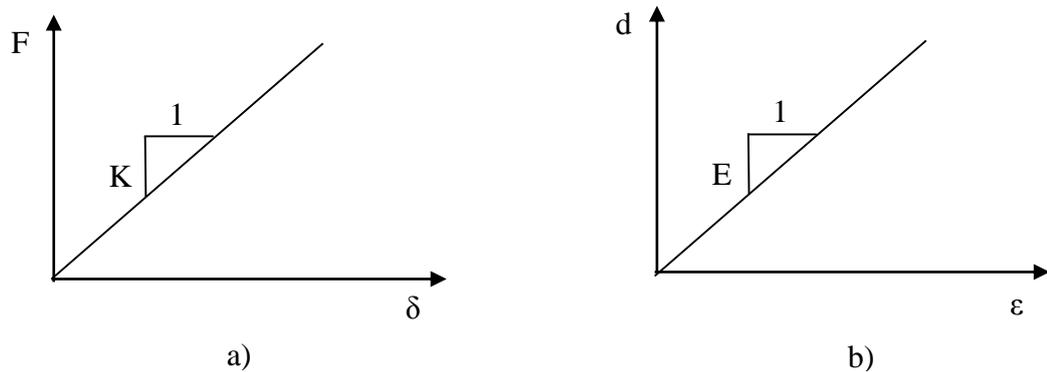


Figura 2.3 – a) rigidez de uma mola; b) Módulo de Young linear elástico.

A dimensão da matriz $[K]$ é obtida pela multiplicação do número de nós pela dimensão do problema, no caso são quatro nós e três dimensões, resultando em uma matriz rigidez 12×12 (doze linhas por doze colunas). De forma análoga, a relação constitutiva é dada por uma Matriz Constitutiva de Deformabilidade que relaciona o acréscimo de tensões com o acréscimo de deformações, a relação é dada por:

$$\{\Delta\sigma\}_{6 \times 1} = [D]_{6 \times 6} \{\Delta\varepsilon\}_{6 \times 1} \quad (2.8)$$

onde:

$\Delta\sigma$ = acréscimo de tensões;

$[D]$ = matriz constitutiva;

$\Delta\varepsilon$ = acréscimo de deformações.

Neste caso, a dimensão da matriz só depende da dimensão do problema, somando os 3 componentes normais com os três cisalhantes, formando uma matriz $[D]$ com dimensão 6×6 . A matriz de deformabilidade é definida como:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & \nu/(1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & \nu/(1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu/(1-\nu) & \nu/(1-\nu) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

onde:

E = módulo de Young;

ν = coeficiente de Poisson.

O coeficiente de Poisson é definido como:

$$\nu = \varepsilon_t / \varepsilon_l \quad (2.10)$$

onde:

ε_t = deformação transversal;

ε_l = deformação longitudinal.

O coeficiente de Poisson é necessário porque os materiais apresentam formação de tensões transversais quando submetidos a esforços longitudinais. Se a gente dividir a matriz [D] em quatro quadrantes, partindo da esquerda acima, o primeiro quadrante corresponde aos esforços normais e, o quarto, a esforços cisalhantes. Os segundo e terceiros quadrantes são nulos, sem nenhuma relação entre esforços e deformações normais e cisalhantes. (ZIENKIEWICZ, 1977).

O princípio de resolução por MEF é a tentativa de igualar forças externas com as forças internas de forma iterativa com uso computacional até que a diferença entre elas se torne admissível, segue como ilustrado na Figura 2.4 e descrito a seguir.

A matriz [D] já foi apresentada na Equação 2.9, que está invertida no diagrama da Figura 2.4 na forma de matriz Compressibilidade $[D]^{-1}$. A partir do diagrama, ainda faltam as definições das matrizes [K] e [B], para tanto, são necessárias as funções de interpolação e mais duas matrizes, [L] e [J]:

- funções de interpolação ($N_i(\xi;\eta;\zeta)$), que relacionam incrementos de deslocamentos nos nós do elemento mapeado para incrementos de deslocamentos em pontos no interior do elemento mapeado;
- matriz [L] chamada de matriz de operadores, que faz uma derivação dos termos, e no caso transforma os incrementos de deslocamentos em incrementos de deformações;
- matriz Jacobiana [J], que relaciona variações no elemento real com variações no elemento mapeado;
- matriz deslocamento-deformação [B], que relaciona o incremento de deslocamentos nos nós do elemento real para incrementos de deformações no interior de um elemento mapeado;
- matriz rigidez [K], que relaciona o incremento de forças externas com incrementos de deslocamentos externos.
- As funções de interpolação ($N_i(\xi;\eta;\zeta)$) também são necessárias para a montagem da matriz [J], desta forma, partimos para definição das mesmas.

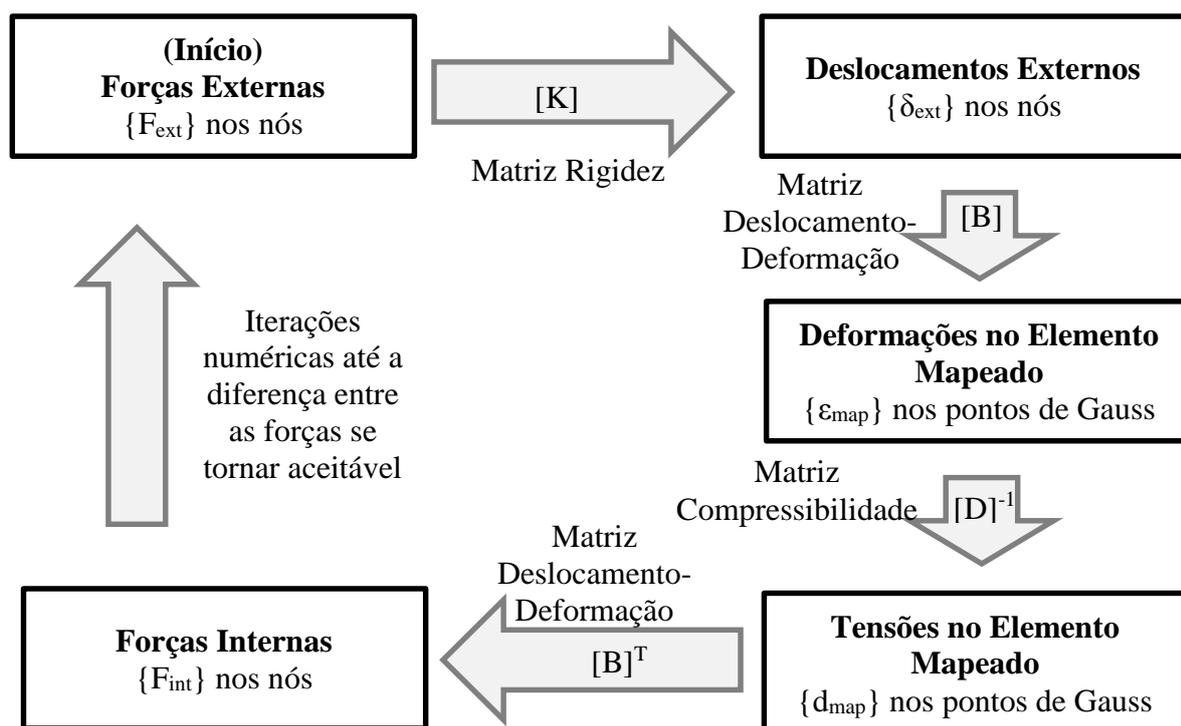


Figura 2.4 – Esquema de resolução do MEF (FARIAS, 2015).

2.3.1 FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO (N)

No desenvolvimento dos MEF, está prevista a utilização de elementos mapeados que possuem tamanho e posição conhecidos e constantes, com o mesmo número de nós do elemento finito do modelo real. Para o caso atual, o elemento finito é um tetraedro de quatro nós (C3D4) no espaço tridimensional dos eixos x, y, z , que corresponde a um elemento qualquer da malha de gerada para o modelo, Figura 2.5. O elemento mapeado é definido em um espaço com eixos ξ, η e ζ , como na Figura 2.6.

A utilização deste artifício de mapeamento do elemento permite a fixação dos pontos de integração para montagem da matriz rigidez, simplificando o processo de cálculo para os pontos de Gauss. A relação de forma entre o elemento real e o mapeado é feita pela matriz jacobiana, definida mais adiante. As funções servem para interpolar valores de qualquer natureza de um ponto interno do elemento para seus nós, ou vice e versa.

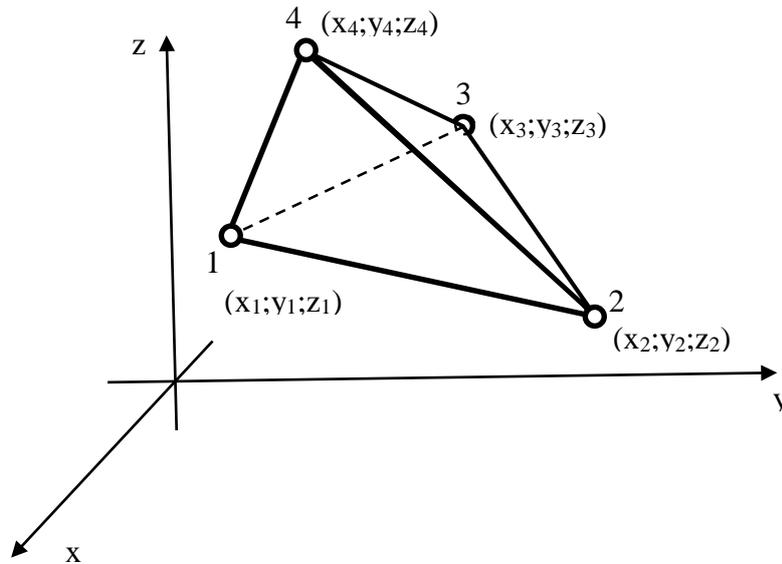


Figura 2.5 – Elemento finito qualquer da malha.

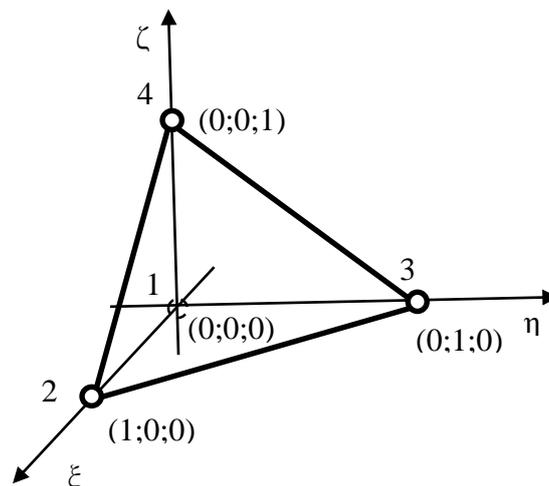


Figura 2.6 – Elemento finito mapeado.

O elemento é mapeado através de funções lineares de interpolação, uma para cada nó. As funções consideram um espaço mapeado de três dimensões onde o primeiro nó do triângulo está situado na origem do sistema $(0,0,0)$ e os demais nós sobre os eixos nas coordenadas $(1,0,0)$, $(0,1,0)$ e $(0,0,1)$. A metodologia está descrita no capítulo 7 do livro (ZIENKIEWICZ, 1977).

A função de interpolação do primeiro nó $(0,0,0)$ é definida de tal forma que o valor no referido nó seja um e zero nos demais. A função do segundo nó $(1,0,0)$ é de tal forma que o valor no referido nó seja 1 e zero nos demais, e assim por diante.

Tabela 2.2 – Definição para obtenção das funções de interpolação para elemento C3D4.

Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4
$N_1(0,0,0) = 1$	$N_2(0,0,0) = 0$	$N_3(0,0,0) = 0$	$N_4(0,0,0) = 0$
$N_1(1,0,0) = 0$	$N_2(1,0,0) = 1$	$N_3(1,0,0) = 0$	$N_4(1,0,0) = 0$
$N_1(0,1,0) = 0$	$N_2(0,1,0) = 0$	$N_3(0,1,0) = 1$	$N_4(0,1,0) = 0$
$N_1(0,0,1) = 0$	$N_2(0,0,1) = 0$	$N_3(0,0,1) = 0$	$N_4(0,0,1) = 1$

A dimensão dos termos das equações pode ser obtida a partir do triangulo de Pascal. Como temos quatro nós, usamos os termos 1, ξ , η , ζ , como destacado na Figura 2.7. A função genérica é definida com quatro coeficientes (c_i) onde seus valores dependem dos nós.

$$N_i = c_1 + c_2\xi + c_3\eta + c_4\zeta$$

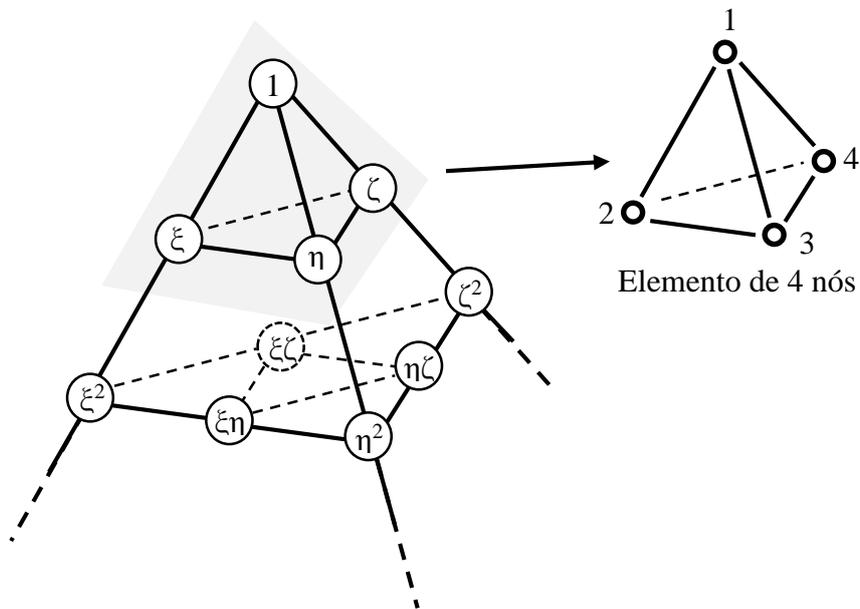


Figura 2.7 – Triângulo de Pascal para o tetraedro de quatro nós.

Aplica-se então, as condições de cada um dos nós a partir de sistemas com quatro equações e quatro incógnitas. Para o primeiro nó, o sistema é apresentado a abaixo no conjunto de equações dadas por:

$$\begin{cases} N_1(0,0,0) = c_1 + c_2 \cdot 0 + c_3 \cdot 0 + c_4 \cdot 0 = 1 \\ N_1(1,0,0) = c_1 + c_2 \cdot 1 + c_3 \cdot 0 + c_4 \cdot 0 = 0 \\ N_1(1,0,0) = c_1 + c_2 \cdot 1 + c_3 \cdot 0 + c_4 \cdot 0 = 0 \\ N_1(0,0,1) = c_1 + c_2 \cdot 0 + c_3 \cdot 0 + c_4 \cdot 1 = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

onde:

N_1, N_2, N_3 e N_4 = funções de interpolação;

c_1, c_2, c_3 e c_4 = incógnitas constantes que a serem encontradas.

Resolvendo os sistemas determina-se $c_1=1, c_2=-1, c_3=-1$ e $c_4=-1$. A função de interpolação para um elemento C3D4 são definidas como dado no conjunto:

$$\begin{cases} N_1 = 1 - \xi - \eta - \zeta \\ N_2 = \xi \\ N_3 = \eta \\ N_4 = \zeta \end{cases} \quad (2.12)$$

onde:

ξ, η, ζ = coordenadas quaisquer no interior do elemento mapeado.

As funções de interpolação também são necessárias para a definição da matriz Jacobiana. Dado um ponto qualquer no interior do elemento finito expresso nas coordenadas internas mapeadas ξ, η e ζ , pode-se expressar as mesmas nas coordenadas internas reais, através do somatório da influência de cada um dos quatro nós e com as coordenadas nodais, dado por:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^n N_i(\xi; \eta; \zeta) x_i \\ y = \sum_{i=1}^n N_i(\xi; \eta; \zeta) y_i \\ z = \sum_{i=1}^n N_i(\xi; \eta; \zeta) z_i \end{cases} \quad (2.13)$$

onde:

n = número total de nós do elemento finito;

i = contador de um dos nós;

x, y, z = coordenadas reais de um ponto qualquer no interior do elemento finito;

x_i, y_i, z_i = coordenadas reais de um dos nós do elemento finito.

2.3.2 MATRIZ DE JACOBIANA [J]

A própria definição da matriz [B] apresentada na

Figura 2.4 é necessária a transformação do elemento real para o elemento mapeado. A relação entre os espaços é feita através da matriz Jacobiana é expressa por:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

onde [J] é a matriz jacobiana.

A Equação 2.14 pode ser reescrita com a substituição das coordenadas x, y e z para as coordenadas ξ , η e ζ é feita com as Equações 2.13, onde para um elemento de C3D4, a matriz jacobiana é escrita por:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_2}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_3}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_4}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Como todas funções de interpolação N_i são lineares para o tetraedro de quatro nós, a matriz [J] é definida somente das coordenadas reais dos nós do elemento finito. Aplica-se então as derivadas nas funções do conjunto de Equações 2.12, com a obtenção da equação expressa por:

$$[J] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

A operação de multiplicação de matrizes é feita para a obtenção final da matriz [J], dada por:

$$[J] = \begin{bmatrix} -x_1 + x_2 & -y_1 + y_2 & -z_1 + z_2 \\ -x_1 + x_3 & -y_1 + y_3 & -z_1 + z_3 \\ -x_1 + x_4 & -y_1 + y_4 & -z_1 + z_4 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2.3.3 MATRIZ DE OPERADORES [L]

Ainda na própria definição da matriz [B] apresentada na Figura 2.4, é necessária a aplicação de um operador matricial, que no caso transforma deslocamento em deformações através de derivações em coordenadas reais, definido por:

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde [L] é a matriz de operadores.

Os nove termos acima representam os operadores de termos normais e os nove termos de baixo operadores cisalhantes e a origem de sua montagem pode ser feita pela própria definição de deformação tridimensional expressa por:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = [L] \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

onde u, v e w são os deslocamentos nas direções x, y e z, respectivamente.

2.3.4 MATRIZ DE DESLOCAMENTO – DEFORMAÇÕES [B]

A matriz [B] mostrada na

Figura 2.4 relaciona o incremento de deslocamentos nos nós do elemento real para incrementos de deformações no interior de um elemento mapeado, definida por:

$$\{\Delta\varepsilon_{mapeada}\} = [B]\{\Delta\delta_{reais\ nos\ nós}\} \quad (2.20)$$

O cálculo da matriz [B] é obtido com operações da matriz [L] com cada uma das funções de interpolação, dada por:

$$[B] = [L]\{N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4\} \quad (2.21)$$

A matriz [B] é expressa por:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial z} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Observa-se na Figura 2.4 que sua transposta também ($[B]^T$) é necessária e tem um significado físico diferente, relaciona incrementos de tensões no elemento mapeado para incrementos de forças internas nos nós do elemento real.

Importante destacar que a Equação 2.22 está com as funções de interpolação em coordenadas ξ , η e ζ mas as derivações estão em relação a x , y e z , desta forma as operações matemáticas precisam ser ajustadas com a utilização da regra da cadeia, como no conjunto de equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} = \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} = \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{cases} \quad (2.23)$$

De forma matricial, a Equação 2.23 é escrita como:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \zeta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Nota-se então, a presença da matriz jacobiana, a equação é dada por:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_2}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_3}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_4}{\partial \zeta} \end{pmatrix} = [J] \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Por fim, a obtenção dos termos é feita com a inversão da matriz jacobiana para que as funções de interpolação sejam derivadas em função de x, y e z, escrita como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_2}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_3}{\partial \zeta} & \frac{\partial N_4}{\partial \zeta} \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

Faz-se a substituição dos termos da Equação 2.26 com a Equação 2.17 para obtenção dos operadores que compõe a matriz [B], dado por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1 + x_2 & -y_1 + y_2 & -z_1 + z_2 \\ -x_1 + x_3 & -y_1 + y_3 & -z_1 + z_3 \\ -x_1 + x_4 & -y_1 + y_4 & -z_1 + z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

2.3.5 MATRIZ DE RIGIDEZ [K]

O processo de montagem da matriz rigidez de um dos elementos depende das características geométricas com a matriz [B] e o determinante do jacobiano |J| e do modelo constitutivo com a matriz [D] integrando no volume do elemento finito mapeado por:

$$[K] = \int_{Vol} [B^T][D][B]|J|dV_{mapeado} \quad (2.28)$$

onde [K] é a matriz rigidez.

O embasamento teórico para a demonstração é o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), igualando o trabalho externo com o trabalho interno. O produto escalar entre forças reais (ΔF) aplicadas nos nós e os deslocamentos virtuais ($\Delta\delta^*$) fornece os trabalhos virtuais externos e a integral no volume do produto escalar entre as tensões reais ($\Delta\sigma$) e deformações virtuais ($\Delta\varepsilon^*$) os trabalhos internos, dado por:

$$\int_{Vol} \{\Delta\varepsilon^*\}^T \{\Delta\sigma\} dV_{real} = \{\Delta\delta^*\}^T \{\Delta F\} \quad (2.29)$$

onde:

$\Delta\varepsilon^*$ = deformações virtuais;

$\Delta\delta^*$ = deslocamentos virtuais.

Substitui-se as tensões pelo produto entre a matriz deformabilidade [D] e os vetores de deformação reais $\{\Delta\varepsilon\}$ obtém-se:

$$\int_{Vol} \{\Delta\varepsilon^*\}^T [D] \{\Delta\varepsilon\} dV_{real} = \{\Delta\delta^*\}^T \{\Delta F\} \quad (2.30)$$

Substituindo ainda as deformações pelo produto entre os deslocamentos com a matriz [B] obtem-se:

$$\int_{Vol} \{\Delta\delta^*\}^T [B]^T [D] [B] \{\Delta\delta\} dV_{real} = \{\Delta\delta^*\}^T \{\Delta F\} \quad (2.31)$$

Os deslocamentos reais e virtuais são constantes e arbitrários, e podem ser retirados da integral. Matematicamente podemos cancelar os vetores de deslocamento virtual da igualdade, pelo fato do referido vetor virtual poder assumir quaisquer valores iguais ou diferentes de zero para seus termos e a igualdade tem que ser mantida, dado por:

$$\left[\int_{Vol} [B]^T [D] [B] dV_{real} \right] \{\Delta\delta\} = \{\Delta F\} \quad (2.32)$$

Encontramos então o termo da matriz rigidez, neste caso ainda não se considera o elemento mapeado, que introduz a matriz jacobiana na Equação 2.28. Para o cálculo da rigidez de um elemento do tipo C3D4, a da matriz [B] e da determinante da matriz jacobiana |J| são constantes e pode ser tirado da integral, pois dependem somente das coordenadas x, y e z dos nós Equação 2.27 e Equação 2.17, respectivamente. A matriz [D] é constante para um problema linear elástico e também pode ser tirados da integral, reescrita por:

$$[K] = [B]^T [D] [B] |J| \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 d\xi d\eta d\zeta \quad (2.33)$$

Sendo assim, como o elemento mapeado tem forma única, a resolução da integral passa também a ser única e igual a um, para todos os elementos finitos, obtem-se então:

$$[K] = [B]^T [D] [B] |J| \quad (2.34)$$

A Equação 2.34 apresenta a montagem da matriz rigidez para um dos elementos finitos C3D4, porém com o MEF é possível a resolução de modelos numéricos com vários elementos, que formam uma malha, e a malha pode possuir diferentes materiais em diferentes condições de carregamento e condições de contorno. Sem maiores detalhes, a montagem da matriz rigidez da malha é feita com a adição das várias matrizes de cada um dos elementos finitos, onde os termos relacionados a nós de elementos adjacentes são somados, esta e outras explicações podem ser encontradas de forma mais detalhadas em livros sobre MEF.

2.4 MEF PARA PERCOLAÇÃO

A análise de fluxo pelo MEF em regime permanente em meio saturado pode ser formulada com uma analogia direta com o MEF implementado para tensão-deformação no caso com elemento do tipo C3D4.

Parte-se da lei de Darcy generalizada como a base para representar o fluxo no estudo de percolação em meios porosos. O fluxo unidimensional pode ser escrito de forma análoga e equivalente a Equação 2.8 de tensões e deformações tridimensionais, como:

$$\{\Delta v\}_{1 \times 3} = [P]_{3 \times 3} \{\Delta i\}_{1 \times 3} \quad (2.35)$$

onde:

Δv = incremento de velocidade de fluxo que faz analogia com incremento de tensões;

$[P]$ = matriz de permeabilidade que faz analogia com a matriz de deformabilidade;

Δi = incremento de gradiente hidráulico que faz analogia com o incremento de deformações.

O equivalente para as vazões pode ser escrito de forma análoga e equivalente com as forças definidas na Equação 2.7. A vazão é dada por:

$$\{\Delta q\} = [K^f] \{\Delta h_w\} \quad (2.36)$$

onde:

Δq = incremento de vazão que faz analogia com incremento de forças;

Δh_w = incremento de carga hidráulica que faz analogia com o incremento de deslocamentos;

$[K^f]$ = matriz de fluxo que faz analogia com a matriz rigidez.

Partindo do princípio dos trabalhos virtuais (PTV) para um “trabalho de fluxo” interno com externo como analogia da Equação 2.29, tem-se a equação:

$$\int_{Vol} \{\Delta i^*\}^T \{\Delta v\} dV_{real} = \{\Delta h_w^*\}^T \{\Delta q\} \quad (2.37)$$

A Equação 2.38 que pode ser reescrita como:

$$\left[\int_{Vol} [B^f]^T [P] [B^f] dV_{real} \right] \{\Delta h_w\} = \{\Delta F\} \quad (2.38)$$

Seguindo a mesma analogia da demonstração da matriz rigidez (Equação 2.32). Com introdução da matriz Carga-Gradiente $[B^f]$ e da matriz constitutiva de percolação $[P]$. As funções de interpolação (conjunto de Equações 2.12) matriz jacobiana (Equação 2.17) são as mesmas do problema de tensão-deformação, mas a matriz (Equação 2.18) de operadores menor, dada por:

$$[L^f] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

onde $[L^f]$ é a matriz de operadores para o fluxo.

O gradiente hidráulico não possui termos cisalhantes, então os termos diagonais são nulos. Desta forma, a matriz de operadores da Equação (2.39) pode ser simplificada para:

$$[L^f] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

A montagem da matriz $[B^f]$ também é definida por:

$$[B^f] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (2.41)$$

E a Equação 2.41 é escrita por:

$$[B^f] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Nota-se que é possível fazer a montagem direta da matriz a partir da Equação 2.27, obtendo-se a matriz $[B^f]$ diretamente por:

$$[B^f] = \begin{bmatrix} -x_1 + x_2 & -y_1 + y_2 & -z_1 + z_2 \\ -x_1 + x_3 & -y_1 + y_3 & -z_1 + z_3 \\ -x_1 + x_4 & -y_1 + y_4 & -z_1 + z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

A matriz constitutiva de permeabilidade, para o caso do problema estudado, a permeabilidade é considerada isotrópica e são consideradas somente o termo normal de fluxo. Desta forma a matriz de só tem um termo para um determinado elemento, escrita como:

$$[P] = k \quad (2.44)$$

onde:

[P] = matriz permeabilidade;

k = permeabilidade.

Por fim pode-se fazer a analogia para a matriz rigidez [K] apresentada na Equação 2.34 com a matriz de fluxo definida por:

$$[K^f] = [B^f]^T k [B^f] |J| \quad (2.45)$$

Onde $[K^f]$ é a matriz de fluxo.

2.5 FORÇAS DE PERCOLAÇÃO

A força de percolação é aquelas formadas devido a dissipação de energia por atrito durante o escoamento, formando os gradientes de carga hidráulica. É comum a assunção de que a variação de poropressão não gere influências no estado de tensões, porém em alguns casos pode ser importante. Regiões com elevados gradientes que podem formar *pipping*, faturamento hidráulico ou deformações excessivas (Rozhko, 2007).

Uma forma simplificada de demonstrar fisicamente a formulação da força de percolação é a partir da conservação de energia, onde o trabalho é proporcional a variação da carga piezométrica em uma determinada direção, como mostrado por:

$$\Delta W = m_w \cdot g \cdot \Delta h_w \quad (2.46)$$

onde:

ΔW = variação de energia;

m_w = massa de água;

g = gravidade;

Δh_w = variação de carga piezométrica.

Infere-se então, que o gradiente da energia é proporcional ao gradiente hidráulico (i_z) naquela direção, dado por:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = m_w \cdot g \cdot \frac{\partial h_w}{\partial z} = m \cdot g \cdot i_z \quad (2.47)$$

onde:

z = direção z ;

i_z = gradiente hidráulico na direção z .

O gradiente da energia tem dimensão de força e é denominada de força de percolação (FP). O produto entre a massa da água (m_w) e a gravidade (g) também tem dimensão de força, este pode ser substituído por:

$$FP_z = \gamma_w \cdot V_w \cdot i_z \quad (2.48)$$

onde:

FP_z = força de percolação na direção z ;

γ_w = peso específico da água;

V_w = volume de controle.

3 SIMULAÇÕES TRIDIMENSIONAIS

3.1 METODOLOGIA

A metodologia para a verificação da hipótese de compressão do barramento como um todo devido Forças de Percolação (FP) nas ombreiras e será feita com uso parametrização de simulações numéricas tridimensional. São elaborados três tipos de simulações, uma de percolação e duas de tensão-deformação. A partir deste capítulo, não foi encontrada muitas referências bibliográficas sobre o assunto e nem em relação ao manual oficial do programa utilizado, por essa razão, as explicações são longas e detalhadas para que seja possível a avaliação aprofundada da metodologia adotada.

O programa utilizado para as simulações de elementos finitos é o Abaqus ®. O esquema da metodologia do presente trabalho é apresentado na Figura 3.1.

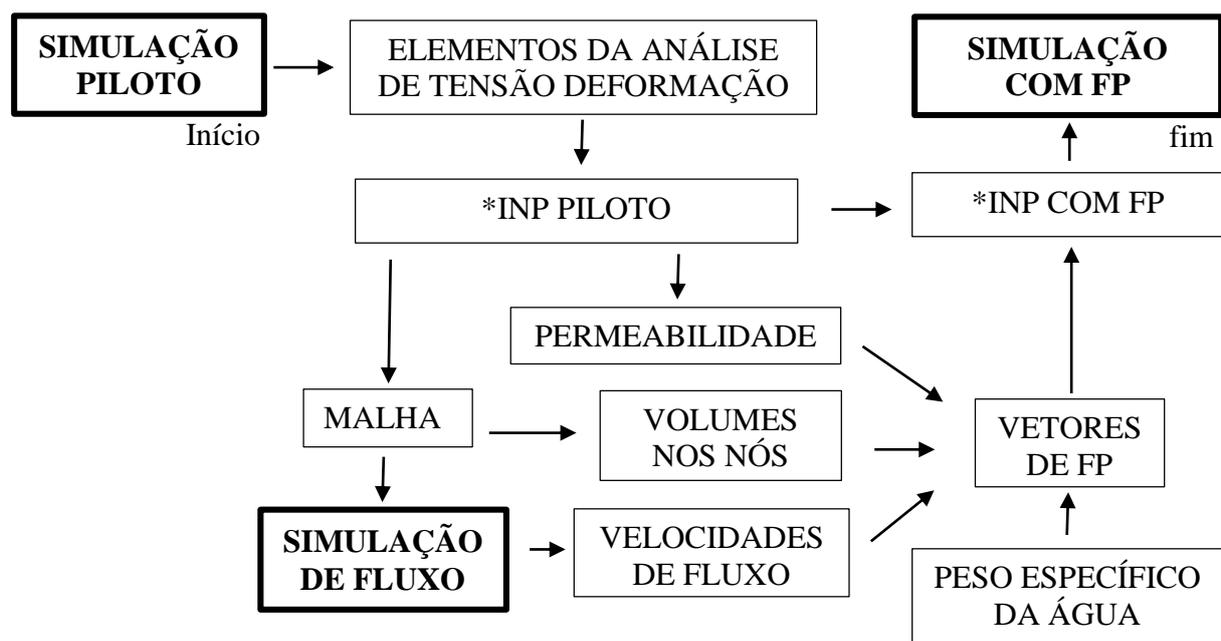


Figura 3.1 – Metodologia das simulações.

A primeira modelagem numérica é do tipo tensão-deformação, montada para que se obtenha o arquivo de entrada piloto (*.inp piloto). A simulação é montada com todos os elementos que compõem o modelo de elementos finitos da barragem: geometria; malha; materiais; condições de contorno; contatos; carregamentos. O Apêndice A mostra o procedimento completo, passo a passo da simulação piloto.

A segunda simulação é chamada de percolação, montada com a mesma malha da simulação piloto com a retirada das estruturas de concreto. As simulações de fluxo têm por objetivo a obtenção das velocidades de fluxo pela fundação em cada nó multiplicada pelo volume do elemento integrado para cada nó. A simulação não considera o fluxo de água pelas trincas da laje, pois o enrocamento é considerado drenante e a água que passar pela laje é encaminhada para jusante sem grande aumento de poropressão. Todo o procedimento da aplicação no programa está no Apêndice B.

Os vetores de velocidade de fluxo que já foram multiplicados pelo volume dos elementos nos nós são divididos pela permeabilidade, multiplicados pelo peso específico da água e escritos com uma formatação de entrada do programa Abaqus ® como vetores de FP. A terceira simulação é rodada pelo texto de entrada da simulação piloto já com a inserção das FP (*inp com FP). Todo o procedimento está descrito detalhadamente no Apêndice C.

Importante ressaltar que não foram considerados esforços geostáticos da fundação e nem a construção por etapas por camadas de aterro, isso porque até o momento não foi encontrada a ferramenta para zerar os deslocamentos para o passo seguinte no programa utilizado, que foi o Abaqus ®. A escolha do programa se baseou devido a calculadora de resultados vetoriais e a possibilidade de entrada das forças em formato texto.

3.2 GEOMETRIA

A geometria é constante para todas as simulações, com variação paramétrica na injeção de fundação. Não será realizado estudo paramétrico como de inclinação do vale, inclinação dos taludes somente da profundidade da injeção e existência de injeção de crista, pois o objetivo principal do trabalho é avaliar a influência das forças de percolação e estas provêm do gradiente hidráulico. Quanto maiores forem os caminhos de percolação, menores são os gradientes. A escolha do arranjo geométrico seguiu alguns critérios esclarecidos neste item.

Os dois indicadores principais que norteiam a escolha da geometria são o Fator de Forma do Vale (FFV) com valor arbitrado próximo a dois e o Inverso do Indicador de Recalque (IIR) arbitrado com valor próximo de vinte, para que seja avaliada uma barragem bastante desfavorável no quesito de aparecimento de trincas e rachaduras na laje de montante, como discutido no item de casos do Item 2.2.

A geometria modelada tem altura de 200 m, crista com comprimento de 500 m, largura da base do vale de 160 m e inclinação do talude em 1V:1.35H, que resulta um FFV de 2,77, mostrado na Equação 2.3. Considerando um módulo de Young de 80MPa e um peso específico de 22 kN/m³ para o enrocamento, tem-se o IIR de 18, Equação 2.4. Os critérios de adoção dos valores para os parâmetros dos materiais são discutidos mais adiante, no Item 3.4. Com os dois indicadores, pode-se inserir um ponto a mais no gráfico de fatores de forma, que posiciona o modelo simulado nas proximidades de Campos Novos e Barra Grande, Figura 3.2.

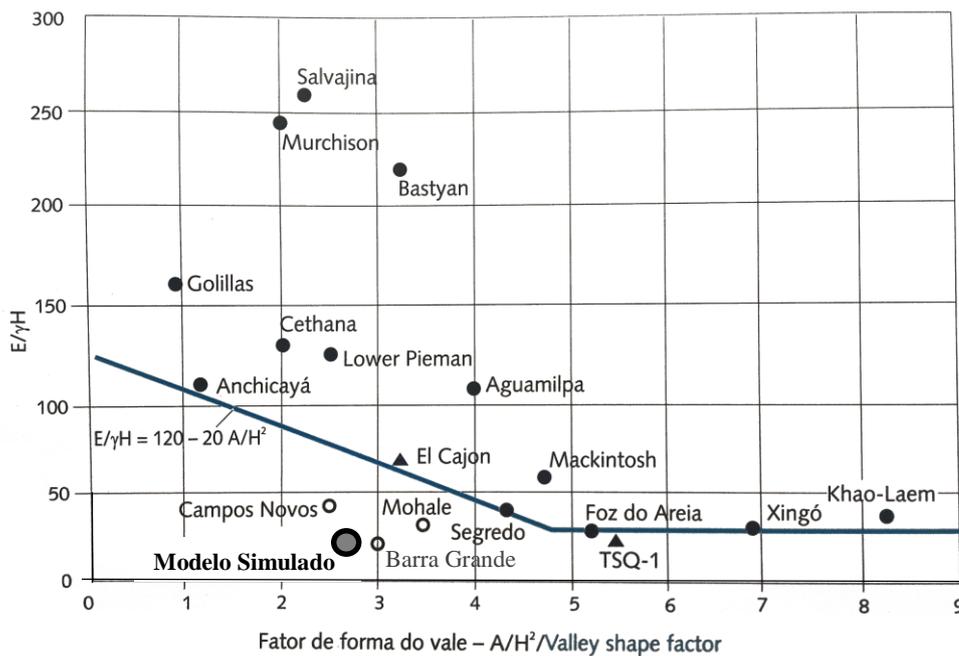


Figura 3.2 – Relação do Fator A/H² do modelo, modificado de CRUZ et al. (2009).

O vale é adotado como simétrico pela seção central da barragem, o que permitiu a redução do tamanho do modelo pela metade. Tal medida foi adotada também para minimizar o tempo de processamento dos cálculos numéricos de resolução para resolução dos modelos. Quanto menor o modelo, menor o número de elementos, o número de nós e também a dimensão da matriz de rigidez, que influencia diretamente no tempo da análise numérica.

Os demais critérios para definição da geometria adotada estão esclarecidos com apresentação os desenhos de projeto do modelo. A primeira Figura 3.3 de é exibe uma vista isométrica do modelo como um todo de forma ilustrativa para fácil entendimento e a Figura 3.4 um detalhe da região da barragem.

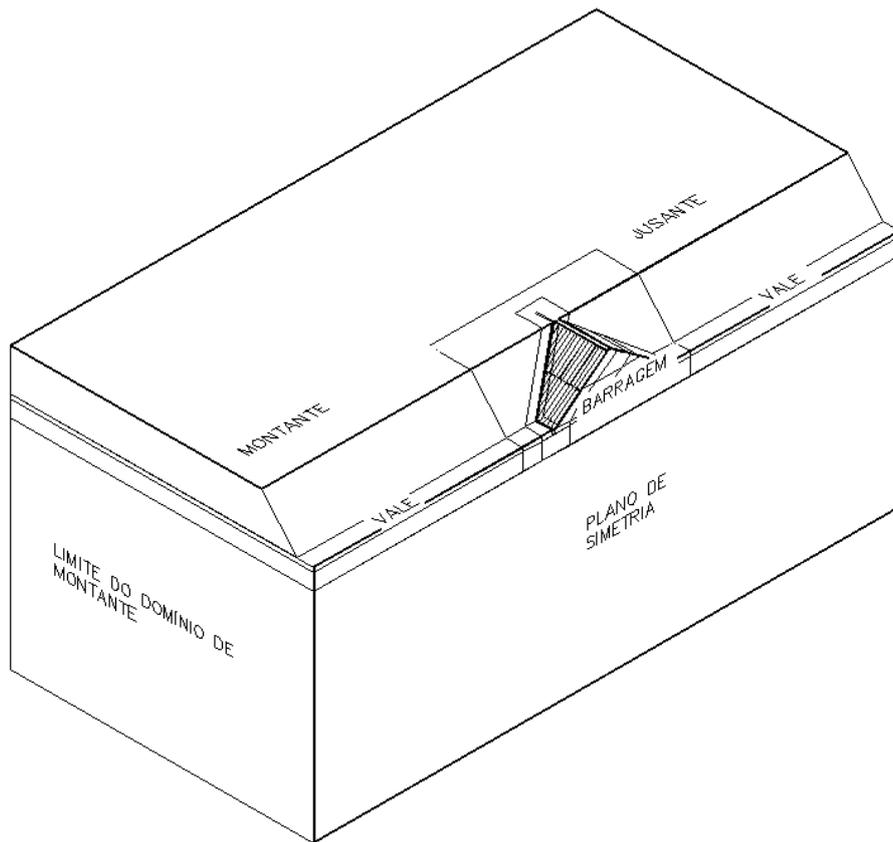


Figura 3.3 – Vista isométrica de todo modelo.

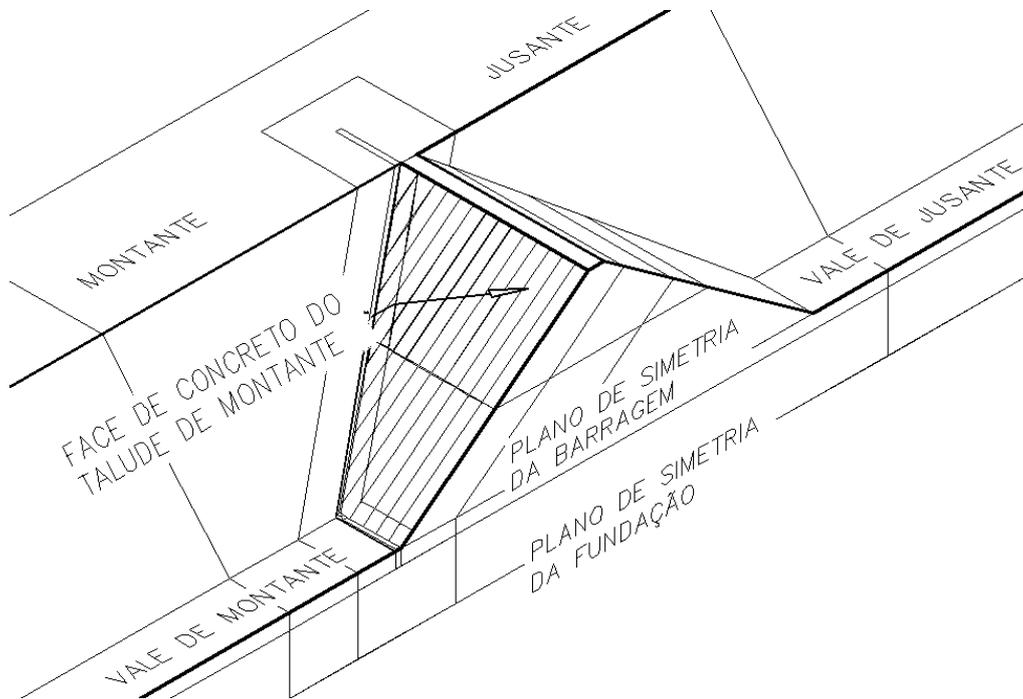


Figura 3.4– Vista isométrica na região da barragem do modelo.

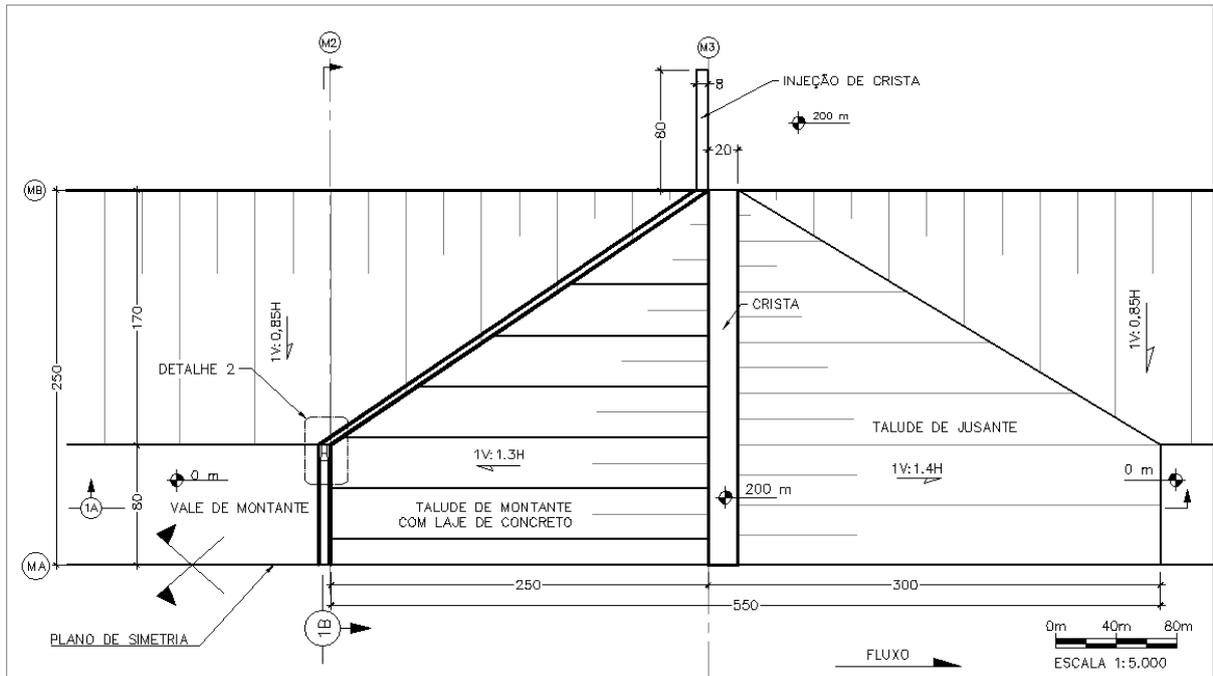


Figura 3.6 – Detalhe 1 do projeto em Planta. Escala 1:5.000.

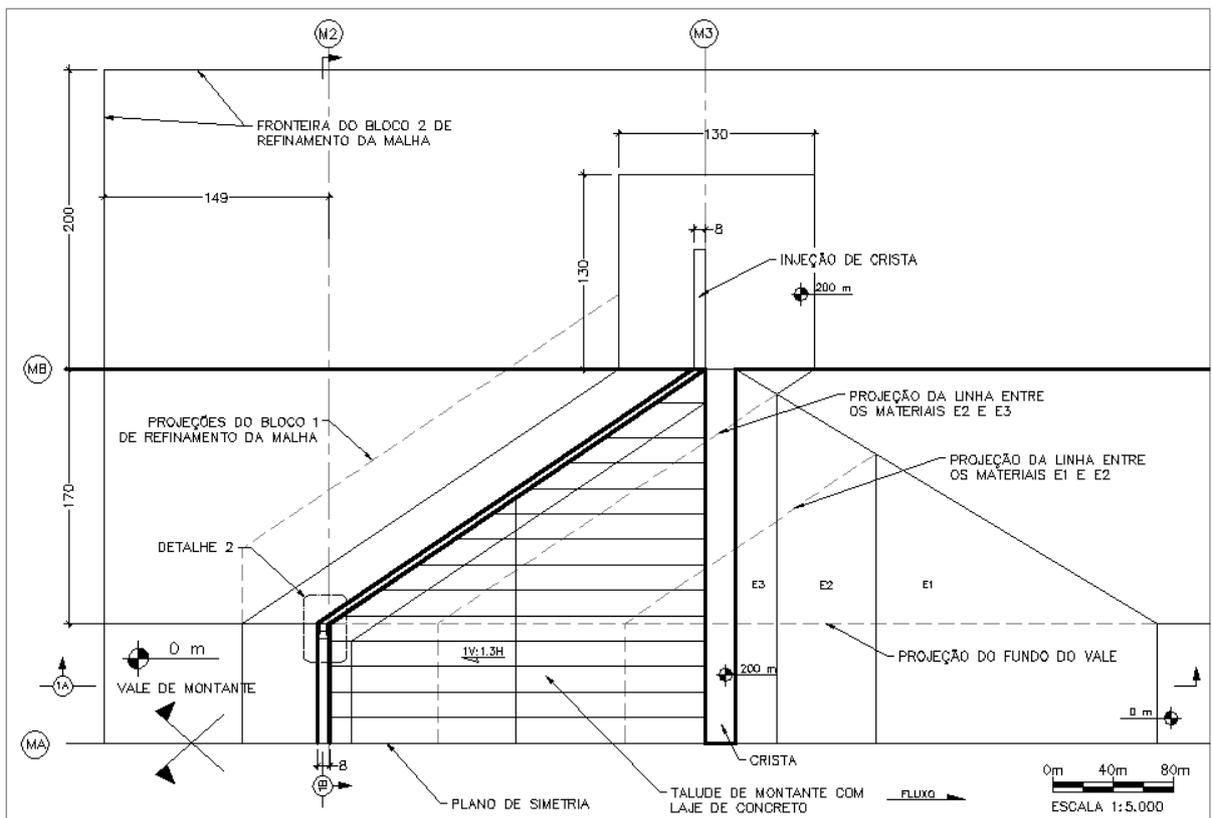


Figura 3.7 – Detalhe 1 da planta com subdivisões para a aplicação dos MEF. Escala 1:5.000.

3.2.2 DESENHOS DO CORTE TRANSVERSAL A BARRAGEM

Os cortes do tipo A passam na seção transversal mais alta da barragem nas proximidades do plano de simetria, apresentados em quatro desenhos: Figura 3.8 com o Corte A, em visão geral do domínio do modelo; Figura 3.9 com o Detalhe 1A (ou Corte 1A) na região da barragem; Figura 3.10 ainda com o Detalhe 1A (ou Corte 1A) mostrando as subdivisões para refinamento da malha; e a Figura 3.14b com o Detalhe 2A (ou Corte 2A) na região do plinto. Os quatro estão em escalas cada vez maiores, 1:25.000, duas 1:6.250 e 1:500 respectivamente.

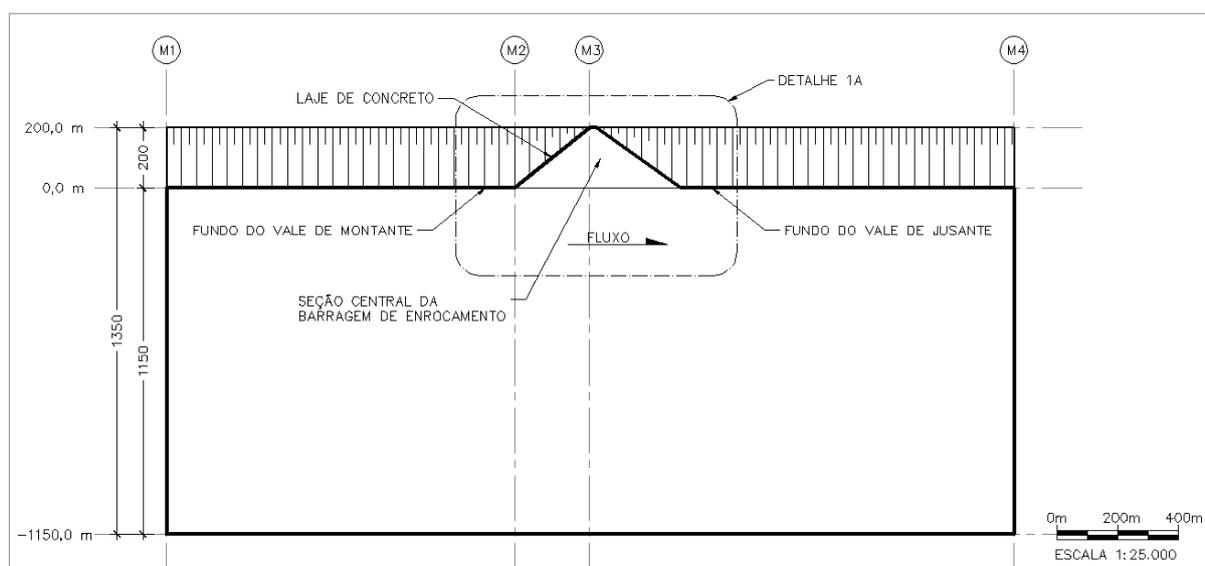


Figura 3.8 – Corte A com o perfil no eixo de simetria. Escala 1:25.000.

A Figura 3.9 apresenta a disposição dos materiais no modelo, onde a barragem de enrocamento possui os materiais E1, E2 e E3, que possuem módulos de Young crescentes a medida que se aproxima da laje de concreto. A fundação tem camadas horizontais, com materiais F1, F2, F3 e F4, que possuem módulos crescentes com a profundidade.

Como citado nos desenhos em planta, a injeção pode ter duas profundidades com ou sem injeção de crista e nos cortes do tipo A, a variação da profundidade da injeção é apresentada nas Figura 3.9 e Figura 3.10 a partir da elevação do plano horizontal de interface entre os materiais F2 e F3, que pode ser de -20 m ou -60 m.

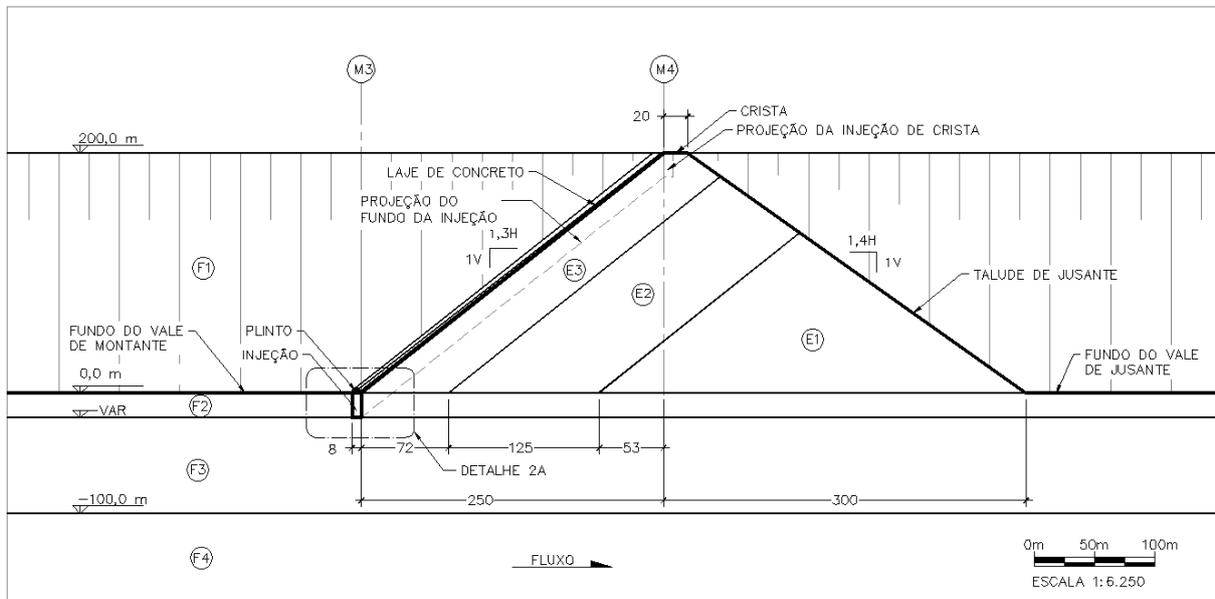


Figura 3.9 – Corte 1A com o Detalhe 1A perfil no eixo de simetria. Escala 1:6.250.

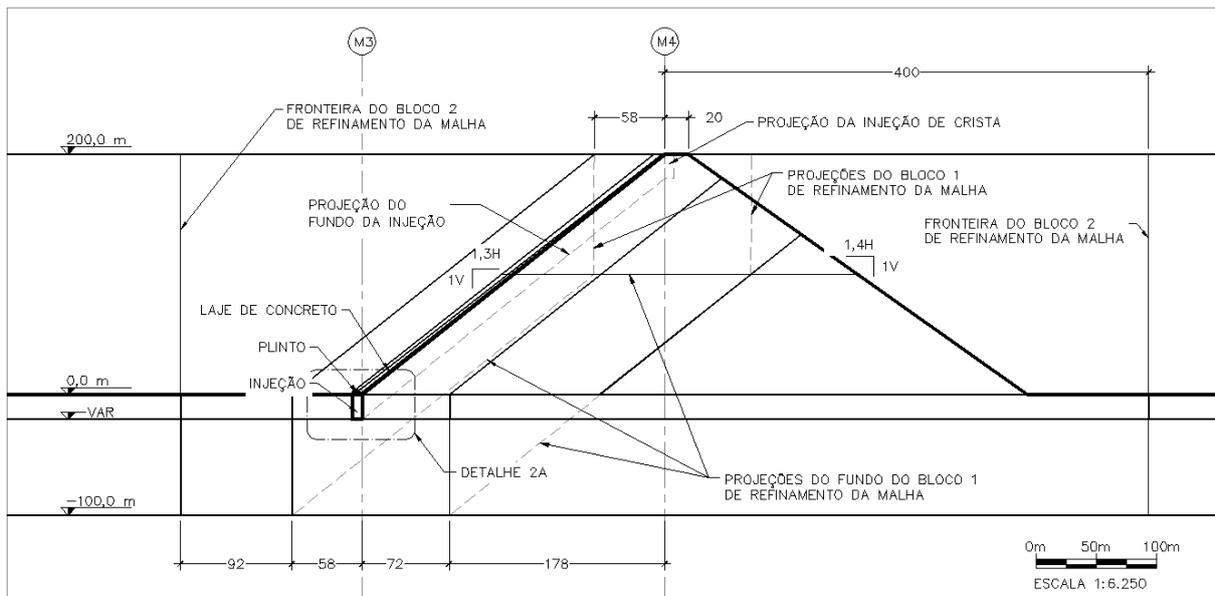


Figura 3.10 – Corte 1A com o Detalhe 1A com subdivisões para a aplicação dos MEF. Escala 1:6.250.

3.2.3 DESENHOS DO CORTE TRANSVERSAL AO VALE

Os cortes do tipo B estão na seção transversal do vale e passa no plinto do pé, mostrados em quatro desenhos: Figura 3.11 com o Corte B mostra uma visão geral do domínio do modelo; Figura 3.12 com o Detalhe 1B (ou Corte 1B) na região da barragem; Figura 3.13 ainda com o Detalhe 1B (ou Corte 1B) mostrando as subdivisões para refinamento da malha; e a Figura 3.14c com o Detalhe 2B (ou Corte 2B) na região do plinto. Os quatro também com escalas cada vez maiores, no caso 1:25.000, duas 1:5.000, 1:2.500 e 1:500, respectivamente.

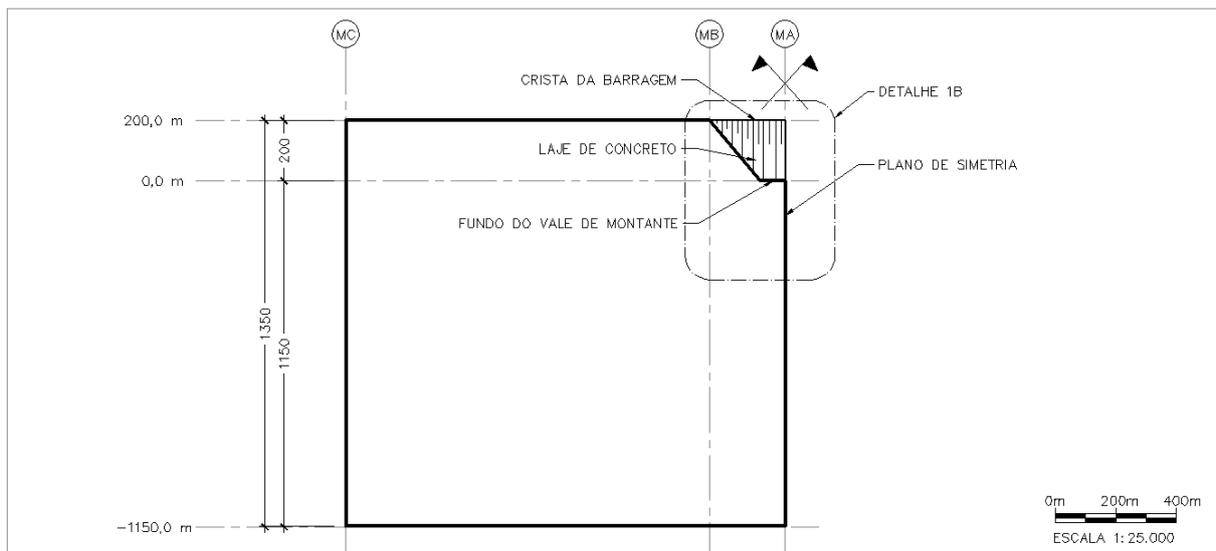


Figura 3.11 – Corte B com o perfil no plinto. Escala 1:25.000.

Ressaltando uma última vez, a injeção pode ter duas profundidades e com ou sem injeção de crista. Nos cortes do tipo B, as variações são apresentadas nas Figura 3.12 e Figura 3.13 de forma semelhante aos desenhos de cortes A, mas com indicações de cotas nas variáveis também na profundidade da injeção da crista (que pode existir ou não).

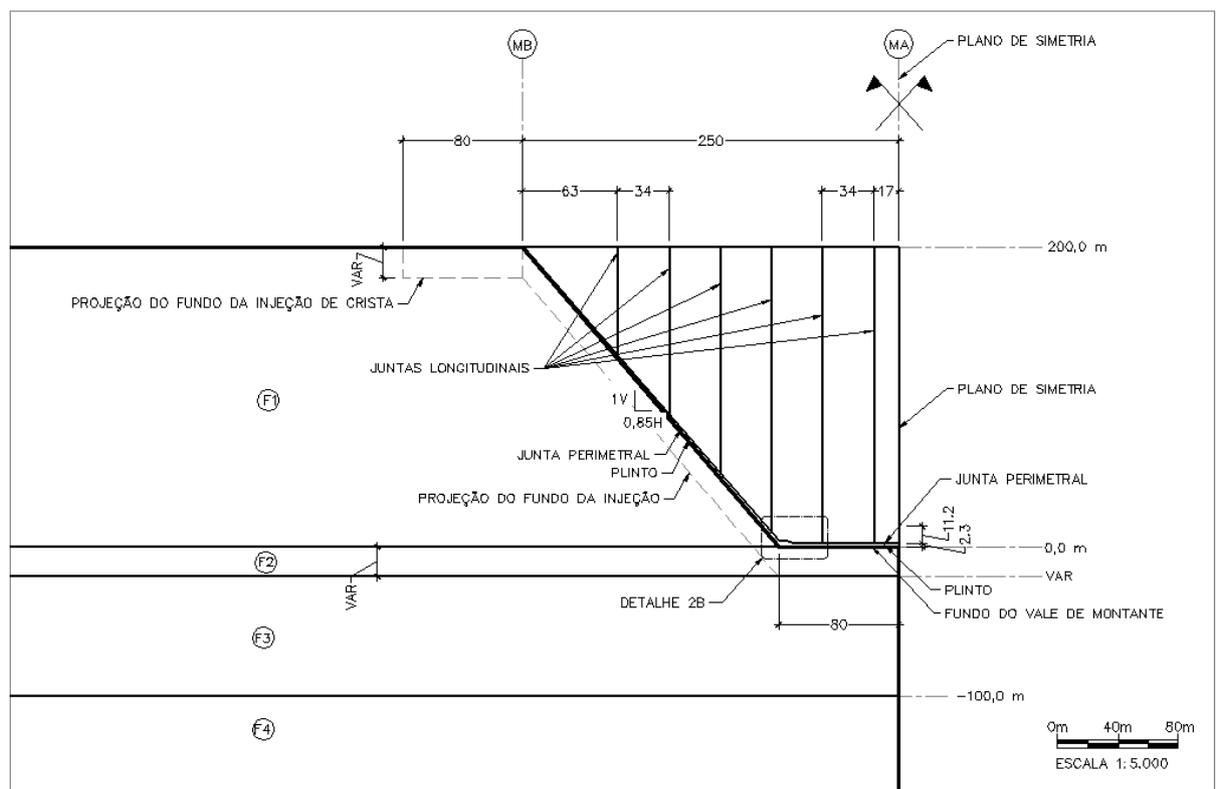


Figura 3.12 – Corte 1B o Detalhe 1B com perfil no plinto. Escala 1:5.000.

Na Figura 3.12, foi definida também o espaçamento entre os planos de laje de montante, arbitrado com 34 m, exceto no encontro final da ombreira, com 63 m. O valor usual de projetos reais é na ordem de 16 m para o espaçamento das juntas, porém o aumento foi arbitrado para evitar excesso de subdivisões e complicação do modelo numérico, visto que não apresentaram diferenças significativas para os esforços de tração que estariam se desenvolvendo sem a consideração das juntas.

O modelo prevê a definição de juntas descontínuas entre as lajes e nos contatos com o enrocamento e o plinto, com a interface configurada para permitir separação, compressão e atrito entre as partes. A laje fica apoiada de forma flutuante com a face inferior no enrocamento com linhas de fixação definidos mais adiante no Item 3.7.2. A Figura 3.13 mostra as subdivisões da laje e dos dois blocos de refinamento da malha.

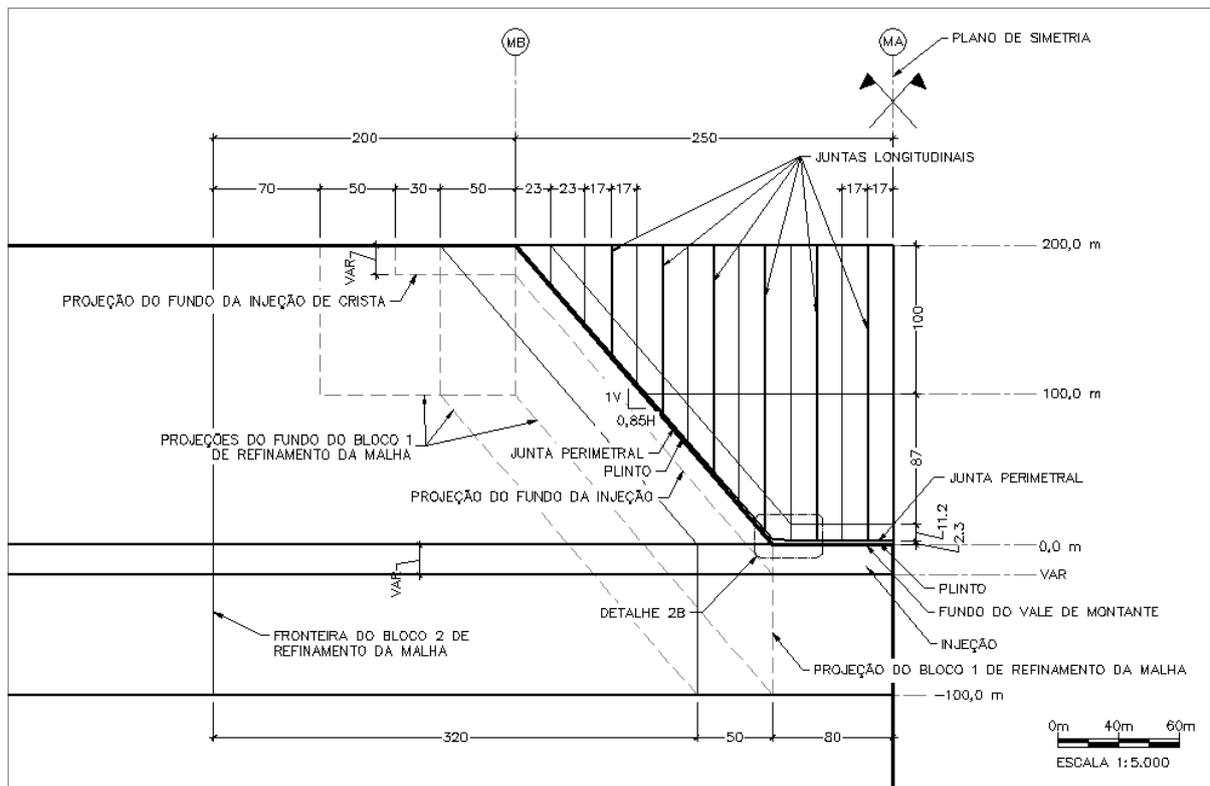


Figura 3.13 – Corte 1B com o Detalhe 1B com subdivisões para a aplicação dos MEF. Escala 1:5.000.

3.2.4 DETALHES ADICIONAIS

A espessura da laje seguiu o mesmo critério empírico adotado para barragens de Campos Novos e Barra Grande que seguem o conjunto de equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} t(H_z < 100 \text{ m}) = 0,30 + 0,002H_z \\ t(H_z > 100 \text{ m}) = 0,005H_z \end{array} \right. \quad (3.1)$$

onde:

t = espessura da laje;

H_z = altura da barragem medida a partir do topo.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de espessura para o topo ($H_z=0$) na elevação 200 m, o meio ($H_z=100$ m) na elevação 100 m e na base do vale ($H_z=200$) na elevação 0 m.

Tabela 3.1 – Espessura da laje.

Elevação (m)	H_z (m)	t (m)
200	0	0,3
100	100	0,5
0	200	1

A largura do plinto é definida com o critério proposto por COOKE & SHERARD (1987) para uma fundação de rocha dura e injetável, com o valor de 1/25 da carga hidráulica do reservatório, o que resulta em uma largura de oito metros ($200 \text{ m} / 25 = 8 \text{ m}$).

A altura do plinto foi arbitrada em pouco mais de dois metros, geralmente adota-se a própria espessura da laje (que seria um metro), mas como o plinto não é objeto do estudo atual, a espessura adotada um pouco maior. Para evitar problemas de esforços excessivos na simulação numérica na inflexão no início do talude da ombreira a espessura foi aumentada para pouco mais de três metros nesta região, Figura 3.14.

3.2.5 PARTES GEOMÉTRICAS

A importação da geometria no programa é feita com nove partes separadas para que seja possível a criação de malhas distintas com as propriedades de interface entre elas, sendo a primeira parte com todos os elementos geotécnicos de fundação, ombreira e injeção, a segunda com o plinto e as demais com as sete faixas de lajes. A Figura 3.15 mostra uma localização da região da barragem, a Figura 3.16 mostra a mesma imagem modificada, agora sem as linhas de subdivisões e ressaltando as nove partes que são inseridas na simulação numérica.

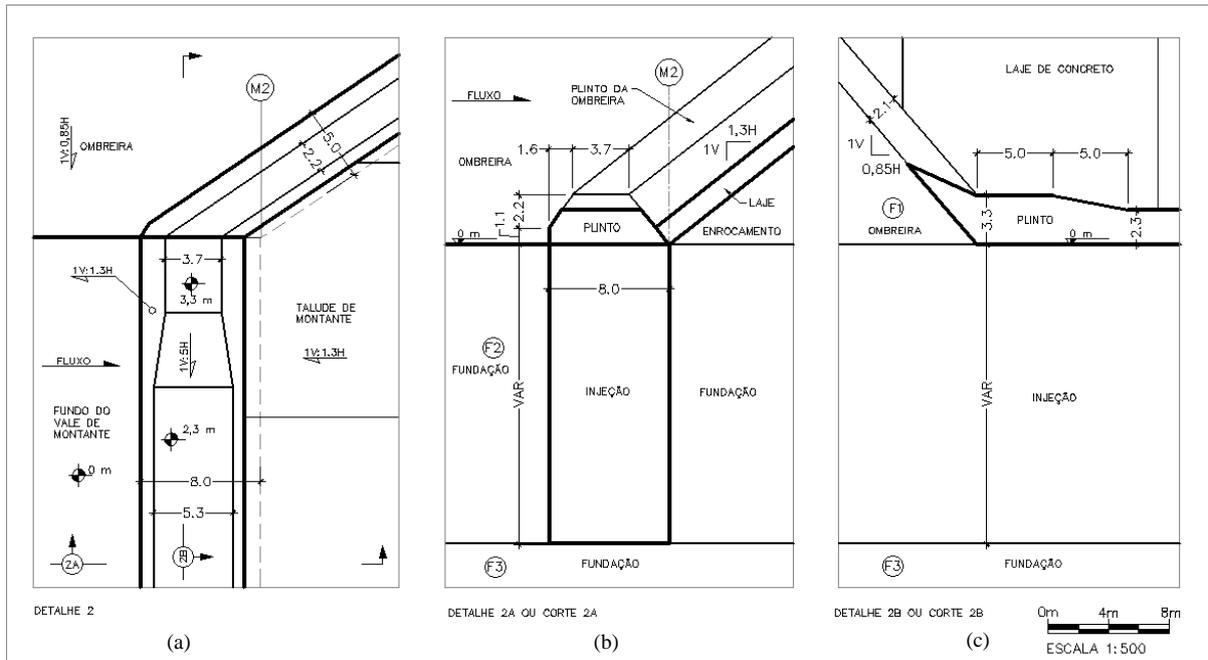


Figura 3.14 – Detalhes 2 em planta (a), Detalhes 2A (b) e 2B (c) ou Cortes 2A (b) e 2B (c).
Escala 1:500.

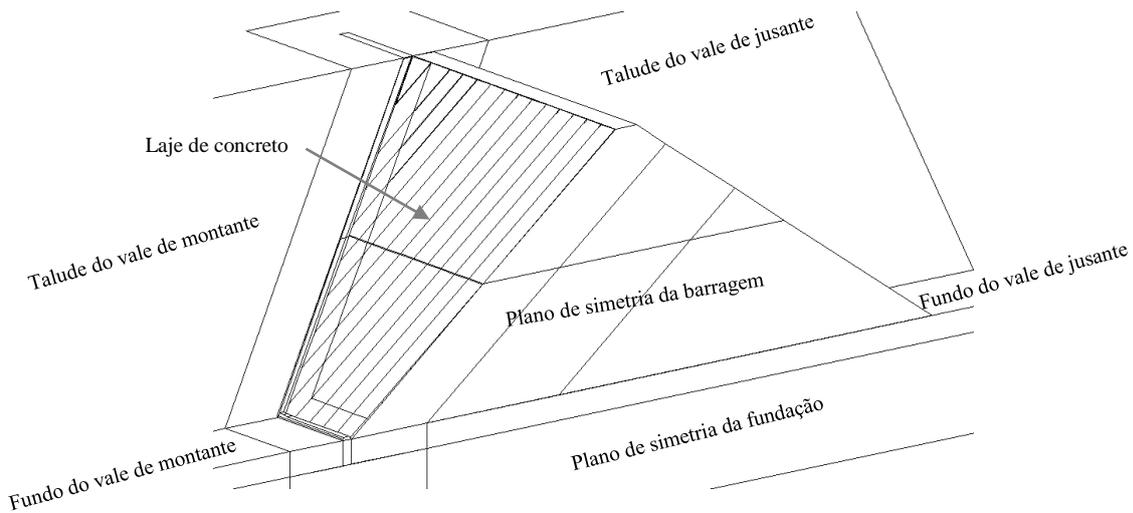


Figura 3.15 – Vista tridimensional de localização da barragem, com as subdivisões geométricas.

Uma terceira imagem foi elaborada com as partes desmontadas e com as estruturas de concreto destacadas em cinza (Figura 3.17). As regiões em cinza são retiradas da simulação de percolação, considerando que o concreto seja completamente impermeável. O procedimento passo a passo de importação da geometria no programa Abaqus® está descrito detalhadamente no Item A.1 do Apêndice A e a retirada do concreto para a análise de percolação no Item B.1 do Apêndice B.

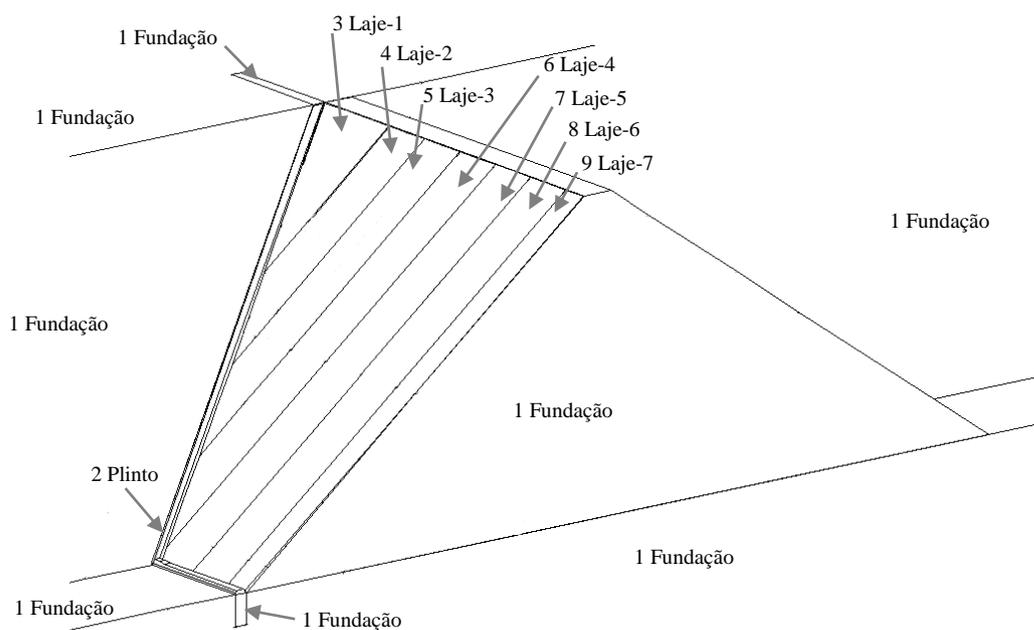


Figura 3.16 Vista tridimensional na região da barragem com as nove partes montadas.

3.2.6 VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS DA INJEÇÃO

As variações paramétricas da injeção foram pensadas para forçar mudanças do caminho de percolação na fundação e ombreira, assim verificar se tais mudanças são representativas para a influência da força de percolação na compressão da laje de montante.

São duas variações de profundidade da injeção, de 20 m e 60 m, onde a maior foi escolhida a partir de recomendações empíricas de projeto, corresponde a um terço da altura da barragem e a menor é mais conservadora, pois quanto menor o caminho de percolação, maiores são os gradientes. Serão feitas mais duas variações, com a presença ou não de injeção que se estende na ombreira no alinhamento da crista, se trata também de uma verificação de sua influência na compressão de ombreira (Tabela 3.2). O comprimento da injeção no alinhamento da crista foi arbitrado em 80 m além da crista.

Tabela 3.2 – Parametrização da injeção de fundação.

Código	Profundidade (m)	Injeção de crista
I1	20 m	Não
I2	20 m	Sim
I3	60 m	Não
I4	60 m	Sim

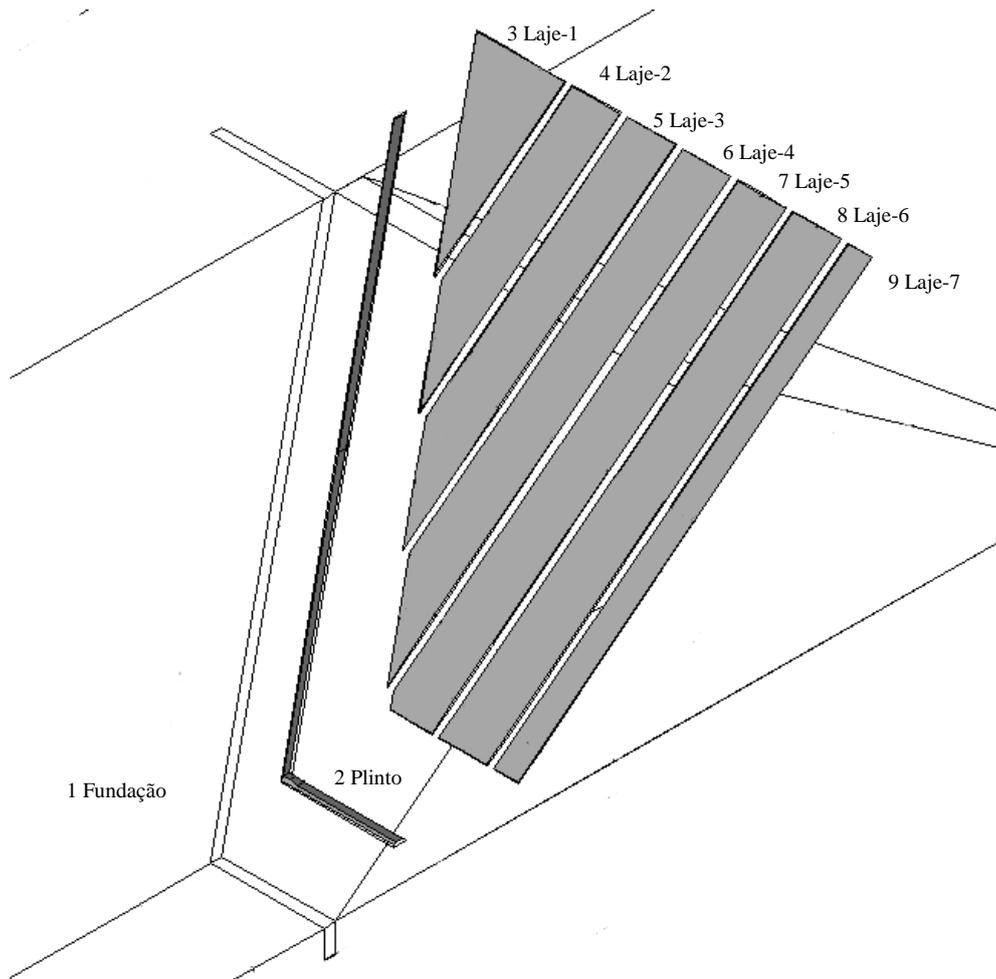


Figura 3.17 Vista isométrica na região da barragem com as nove partes separadas.

3.3 MODELOS CONSTITUTIVOS

3.3.1 MATERIAIS GEOTÉCNICOS

Mesmo que os materiais geotécnicos tenham comportamentos não lineares quando se trata de fluxo e tensões, as simplificações linear e elástica são válidas porque o objetivo do trabalho é de uma avaliação em ordem de grandeza do comportamento com e sem força de percolação dos esforços na laje de montante, sem a necessidade de identificar rupturas de talude ou plastificações excessivas nos materiais geotécnicos.

A adoção de modelos constitutivos complexos sem o conhecimento prévio dos parâmetros pode levar a resultados que ficam ainda mais distantes da realidade da obra em comparação com um modelo simples linear elástico com parâmetros bem escolhidos. É importante ressaltar que para um projeto real ideal, o modelo constitutivo do enrocamento deve considerar plastificação e endurecimento. Os parâmetros do enrocamento são muito difíceis de serem obtidos em

laboratório devido a ordem de grandeza dos blocos de rocha e as grandes dimensões dos equipamentos, mas as estimativas dos parâmetros geralmente são feitas durante e após a construção a partir do monitoramento das instrumentações de obras semelhantes.

As simulações realizadas consideram a parametrização no módulo de deformabilidade do enrocamento com valores máximos e mínimos típicos medidos em campo de obras reais. Desta forma, a precisão é considerada suficiente para o tipo de análise proposta e considerações de plastificação ou endurecimento consumiriam um grande custo computacional. A partir dos indicadores de comportamento, pesquisas ou projetos futuros podem estar mais bem embasados em relação aos parâmetros para um estudo mais direcionados.

Para a simulação de percolação, a opção também é a simplificação para o modelo permanente e saturado, seguindo um comportamento da teoria clássica de fluxo. A escolha também foi escolhida em função da parametria das permeabilidades que já fornece cenários comparativos e ordens de grandeza para o comportamento geral das forças de percolação.

3.3.2 MATERIAIS ESTRUTURAIS

A avaliação do comportamento da laje também é feita a partir dos valores atuantes sem sua plastificação, tal prática é corrente dentre projetistas que estudam estruturas tridimensionais submetidas a carregamentos estáticos, como é o caso. A partir dos esforços, o projetista de concreto avalia a necessidade de alteração na geometria da peça, a quantidade e a disposição da armadura de aço.

As simulações com consideração de plastificação do concreto demandam muito mais custo computacional, usadas somente em projetos que exigem algum tipo de comportamento especial. No caso estudado, uma boa estimativa dos esforços atuantes já é suficiente para verificar se a laje tende a romper ou não e também os locais para as possíveis rupturas.

Para as simulações de fluxo, as estruturas de concreto são consideradas impermeáveis e mesmo que ocorram vazamentos na laje, a consideração é que o enrocamento dissipa as poropressões e encaminha o fluxo para jusante sem grandes dificuldades.

3.4 PARÂMETROS DOS MATERIAIS

As análises de tensão-deformação são do tipo linear elástica e percolação em fluxo permanente em meio saturado, desta forma são dispensados valores de resistência e não saturação do solo. Para a análise de tensão-deformação, temos o módulo de Young, coeficiente de Poisson e a massa específica. Para a percolação o parâmetro é o coeficiente de permeabilidade.

Importante ressaltar que não foram executados ensaios específicos para obtenção nenhum dos parâmetros utilizados nos modelos, todos foram adotados a partir de valores típicos dos materiais de projetos semelhantes. Os arranjos de parâmetros do presente trabalho foram pensados para que o comportamento seja paramétrico, com a avaliação de algumas variações que possam indicar mudanças na compressão da laje de montate.

Os parâmetros são apresentados na Tabela 3.3, que já indica a variação paramétrica no módulo de elasticidade dos enrocamentos e das rochas de fundação (Tabela 3.4) e na permeabilidade na análise de percolação (Tabela 3.5).

Tabela 3.3 – Parâmetros dos materiais.

Material	Módulo Young (MPa)	Poisson (adimensional)	Massa especif. (kg/m ³)	Permeabilidade (m/s)
Enrocamentos	Tabela 3.4	0.25	2200	0.1
Fundação	Tabela 3.4	0.25	2200	Tabela 3.5
Concreto	25.000	0.2	2500	-
Injeção	300	0.25	2200	1x10 ⁻¹⁰

Tabela 3.4 – Parametrização dos módulos de Young (MPa).

Código	F1	F2	F3	F4	E1	E2	E3
Y1	120	200	200	300	30	60	90
Y2	120	200	200	300	60	90	120
Y3	200	300	400	600	30	60	90
Y4	200	300	400	600	60	90	120

Tabela 3.5 – Parametrização das permeabilidades dos materiais de fundação (m/s).

Código	F1	F2	F3	F4
P1	1 x10 ⁻⁶	1 x10 ⁻⁶	1 x10 ⁻⁷	1 x10 ⁻⁷
P2	1 x10 ⁻⁵	1 x10 ⁻⁵	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸
P3	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸	1 x10 ⁻⁸

Os parâmetros do concreto foram estimados a partir da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), que propõe o coeficiente de poisson de 0,2 e o módulo de Young conforme dada por:

$$E_c = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (3.2)$$

onde:

E_c = módulo de elasticidade do concreto em MPa;

f_{ck} = resistência característica do concreto submetido a compressão simples e entra também em MPa.

Foi considerado um concreto de 20 MPa, tem-se o módulo de Young de 25 GPa. Os materiais de concreto não são usados na simulação de percolação porque o concreto é considerado impermeável, como mostrado no Apêndice B.

Os módulos de Young do enrocamento foram sugeridos seguindo as faixas de variações típicas do material em diferentes condições de compactação. Os parâmetros do enrocamento são muito difíceis de serem obtidos por ensaios de laboratório, devido as grandes dimensões dos blocos, na maioria das vezes estes valores são estimados a partir do comportamento mecânico de obras reais construídas com o material.

Nos modelos apresentados neste documento a barragem possui três regiões com propriedades diferentes com a distância da laje de concreto. O enrocamento usado na região mais afastada da laje de concreto (E1) geralmente possui diâmetros maiores, são pouco compactado, com módulos de Young que pode variar de 30 MPa a 60 MPa, já na região mais central da barragem (E2) é melhor compactado, ainda com grandes diâmetros e variação de módulo de 60 MPa a 90 MPa. O enrocamento de diâmetros menores e com ótima compactação é colocado nas proximidades da laje de concreto (E3), com módulos entre 90 MPa e 120 MPa.

As permeabilidades do enrocamento são consideradas constantes, pois apresentam valores sempre muito altos e se comportam como um material drenante.

Os módulos de Young das camadas de fundação foram definidos em faixas de variações de rocha branda ou fraturada, das regiões F1 até F4. As permeabilidades da fundação dependem de vários aspectos geotécnicos, como fraturas, granulometria e podem ter variações naturais muito grandes, para o caso genérico proposto, variam de 1×10^{-6} m/s até 1×10^{-8} m/s.

Por fim os parâmetros da injeção foram baseados em valores para um solo cimento, com baixa permeabilidade.

3.5 DEFINIÇÃO DA MALHA

A escolha da malha depende dos estudos de domínio, do tipo de elemento finito e de seu refinamento, nos itens a seguir. As Figura 3.18 e Figura 3.19 mostram a malha gerada, cujo procedimento passo a passo de sua geração é mostrado detalhadamente no Item A.7 e figuras adicionais no Item A.7.7 do Apêndice A.

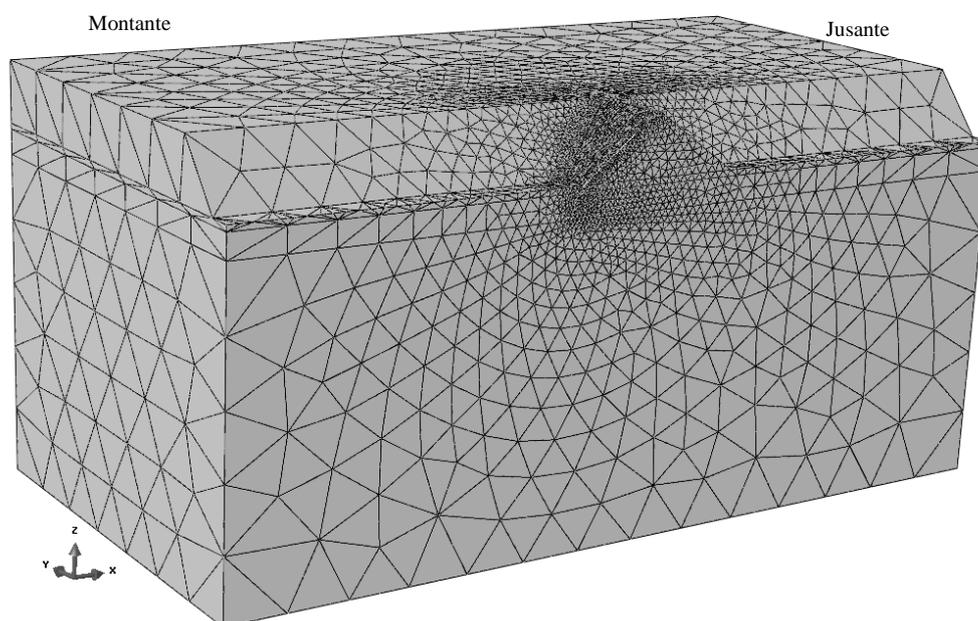


Figura 3.18 – Malha gerada – visão geral.

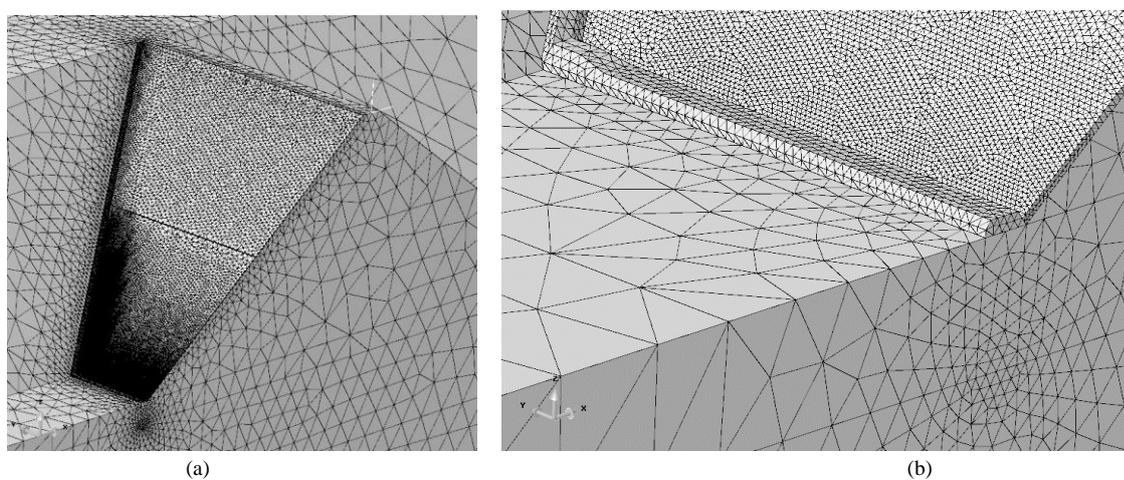


Figura 3.19 – Malha gerada – região da barragem (a) e região do pé do plinto (b).

3.6 INTERFACES COM AS FAIXAS DE LAJES

Segundo a norma Britânica (ISBN, 1996), o valor mínimo para o coeficiente de atrito no contato entre concreto/concreto e concreto/solo granular é de 0,4, desta forma foi adotado o valor de atrito em 0,5.

As interfaces são configuradas de forma que as faixas de lajes possam interagir com o enrocamento (Item A.5.4), com o plinto (Item A.5.3) e umas com as outras (Item A.5.5) de forma mais realista possível. Como se trata de malhas diferentes fixadas em uma linha, todas as faces em contato devem receber definições de interações, por exemplo: a face da laje para o enrocamento teve receber a definição de interação e também da face do enrocamento com a faixa de laje.

O comportamento mecânico dos contatos entre as malhas: as partes podem se separar livremente, atritar com o coeficiente de 0,5 ou comprimir umas as outras sem sobreposição, ou seja, duas malhas não podem ocupar a mesma posição no espaço.

Importante ressaltar que não foram considerados materiais para simular a junta real de borracha que é colocada entre as lajes submetidas à tração. A não consideração da borracha faz com que o modelo numérico se torne mais rígido e ocorre um acréscimo de tensões de compressão transferidas entre as faixas de laje.

3.6.1 TIPO DE ELEMENTO

O modelo possui grande variação de dimensões geométricas, com extensão que parte da espessura de laje com 30 cm até a mais de 1000 m em suas fronteiras. A tipologia que melhor se adaptou para os elementos finitos foi o tetraedro, que além de ser o mais simples disponível, possui uma opção do algoritmo de geração da malha que faz uma ótima distribuição graduais de tamanhos e se adaptam bem as variações dimensionais, Item A.7.7 do Apêndice A. A biblioteca de elementos tridimensionais do programa utilizado, no caso o Abaqus® (SIMULIA, 2010) fornece somente um elemento com essa tipologia, quatro nós, denominado C3D4.

3.6.2 DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DO MODELO

O critério para a definição das dimensões do domínio é de duas vezes o comprimento da base transversal da barragem para cada lado e para baixo, pouco mais de um quilômetro para cada

direção (geometria apresentada no Item 3.2). A dimensão sugerida foi verificada em relação ao recalque, que está praticamente zero nas fronteiras do problema, como mostrado na Figura 3.20.

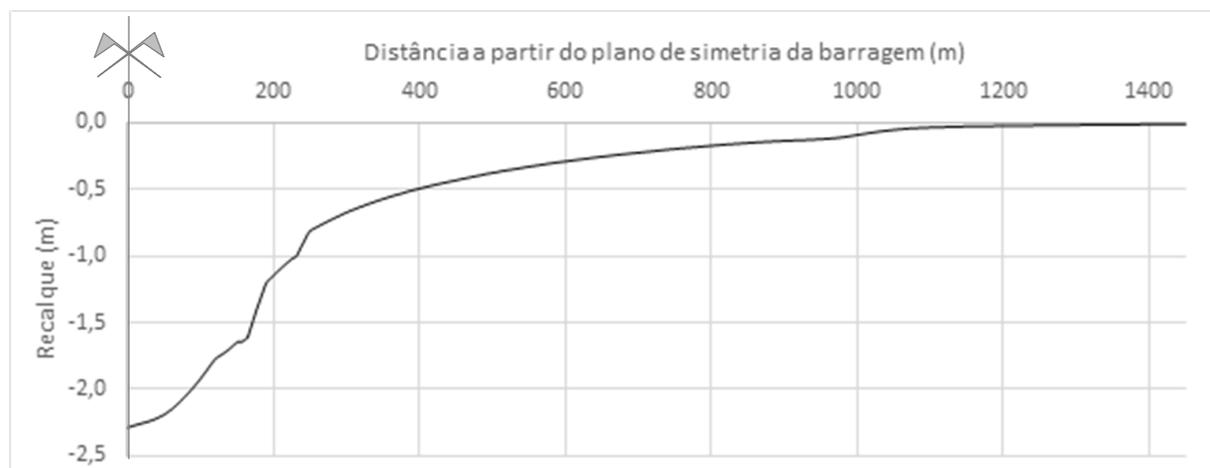


Figura 3.20 – Recalques a partir do meio da crista da barragem até a fronteira do modelo, transversal ao vale.

O domínio tem boa margem se for considerada a profundidade da injeção de fundação, que é de no máximo 60 m para análise de fluxo, uma vez que a barragem de enrocamento só serve como elemento drenante para a percolação das ombreiras e fundação.

3.6.3 ANÁLISE DE DENSIDADE DA MALHA

São testadas cinco densidades de malha, crescentes e denominados M1 até o M5. Os tamanhos médios dos elementos para grupos de arestas do modelo de cada uma delas são mostrados na Tabela D.1. A metodologia para o refinamento da malha está descrita detalhadamente no Apêndice D.

A distribuição do tamanho dos elementos dentro da malha depende da dimensão geométrica da região e do nível de precisão das informações que serão coletadas. Para o estudo de tensão-deformação, a região que será coletada mais informações é na laje de montante, com elementos finitos bem pequenos, para as simulações de percolação já passa a ser a injeção de fundação, que possui o maior gradiente hidráulico da malha e precisa de um refinamento maior. Portanto, as malhas são mais refinadas nestas regiões e aumentam de dimensão a partir daí.

O programa permite a geração de malhas independentes que interagem entre si sem a necessidade que os nós estejam coincidentes. Os elementos finitos de uma faixa de laje não compartilham dos mesmos nós do enrocamento, nem das faixas de lajes vizinhas e nem do plinto e este também não compartilha dos mesmos nós da fundação, logo o tamanho dos

elementos das faixas de lajes em contato com o enrocamento são muitas vezes menores que os elementos do enrocamento em contato com as faixas de lajes.

A propriedade de controle é o deslocamento, medido em 18 nós que coincidem nas cinco malhas. O resultado de um dos nós é apresentado na Figura 3.21, ou Figura D.10 do Apêndice D. De maneira geral, é muito pequena a diferença entre os deslocamentos da malha M4 e M5, ou seja, a partir da densidade da malha M4, o erro pode ser considerado muito pequeno. Importante ressaltar que o tempo de processamento da malha M4 é mais de seis vezes menor que o da malha M5 (processador de oito núcleos reais e frequência de 4.71 GHz, Figura D.9), comportamento que reforça ainda mais a escolha da malha M4 como a ideal para este modelo, a Figura D.8 e a Tabela D.2 mostram todos os tempos.



Figura 3.21 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.

Todas as quatro geometrias paramétricas definidas na Tabela 3.2 seguem o mesmo padrão de sementeira do tamanho dos elementos definidos no Apêndice D. Importante ressaltar a utilização do artifício do plano de simetria, que diminui o número de elementos finitos pela metade e reduz o custo computacional.

3.7 FIXAÇÕES DAS PARTES DE CONCRETO

3.7.1 FIXAÇÃO DO PLINTO NA FUNDAÇÃO

O plinto é a estrutura que faz a transição da laje para a fundação, serve como apoio e também como elemento de adaptação geométrica da vedação da laje para a fundação. Sob o plinto estão

as linhas de injeção que ajudam na impermeabilização da fundação. A estrutura do plinto é sempre fixada na fundação, geralmente com o uso de chumbadores e tirantes para que não descole do fundo em caso de deslocamentos diferenciais.

No modelo, o plinto é fixo na fundação com a interface do tipo *Tie*, que “gruda” as faces entre diferentes partes. O programa permite que os esforços sejam repassados sem a necessidade que os nós das diferentes malhas sejam coincidentes, no caso é entre o plinto e a fundação.

Os detalhes de fixação do plinto na fundação podem ser encontrados no Item A.5.2 do Apêndice A, assim como detalhes para definição das interfaces.

3.7.2 FIXAÇÃO DA LAJE NO ENROCAMENTO

Por mais que o programa permita que as faixas de laje estejam “flutuantes” sobre o enrocamento, o modelo numérico não pode ser resolvido sem alguma fixação pois a laje “escorrega” livremente e ocorre uma inconsistência numérica. A fixação é feita só na metade superior do talude de montante pois se trata do trecho de compressão das ombreiras que tem pouco resultado de flexão e poucos deslocamentos diferenciais entre as lajes comparado com o trecho inferior que incidem maiores pressões do reservatório. A fixação da laje no enrocamento foi definida com o uso de linhas destacadas da Figura 3.22.

A consideração destas linhas de fixação é hipotética, pois testes foram realizados e caso a fixação da linha fosse em todo o comprimento das faixas de laje, seriam formados acúmulos de tensões nos apoios, pois a parte mais abaixo está submetido a tração na direção das ombreiras com grande deslocamento diferencial entre as faixas de lajes e entre as lajes e o plinto.

A fixação está só na linha central da faixa (exceto na faixa de laje mais externa), para que não ocorra acúmulo de tensões entre as faixas de laje, logo os contatos estão livres para se atritar e se deslocar diferencialmente. Os detalhes de fixação dos panos de laje no enrocamento podem ser encontrados no Item A.5.4 do Apêndice A, assim como detalhes para definição das interfaces.

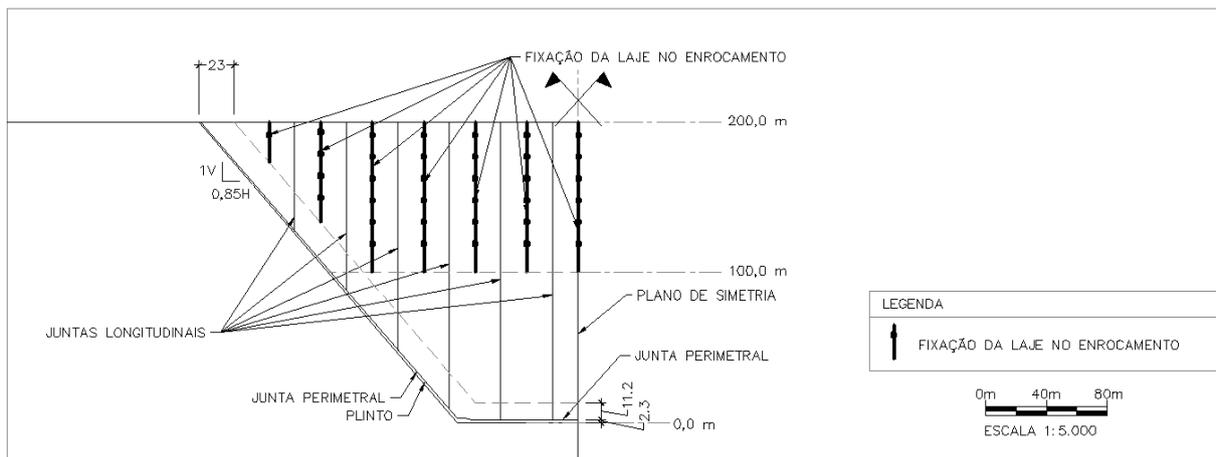


Figura 3.22 – Corte 1B ou Detalhe 1B, com destaque das linhas de fixação da laje. Escala 1:5.000.

3.8 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno para a simulação de tensão-deformação são definidas com as restrições de deslocamentos nas direções normais às faces de fronteira do problema. Este tipo de restrição funciona como um espelhamento da face, motivo pelo qual é importante um afastamento das fronteiras não espelhadas da região da barragem que representa a dimensão do domínio. O plano de simetria recebe a mesma restrição de deslocamento das demais faces de fronteira, com o cuidado de atribuir também na faixa de laje e no plinto.

A Figura 3.23 apresenta as restrições na geometria do modelo, pois as vistas em planta e perfis são muito semelhantes. A descrição detalhada de como definir as condições de contorno no programa pode ser encontrada no Item A.3.2 para a geometria e no Item A.6.1.

As condições de contorno para a percolação é simplesmente a fixação de todos os nós nas três direções, uma vez que as simulações são não acopladas. O passo a passo para inserir tais restrições no programa é mostrado no Item B.6.1 do Apêndice B.

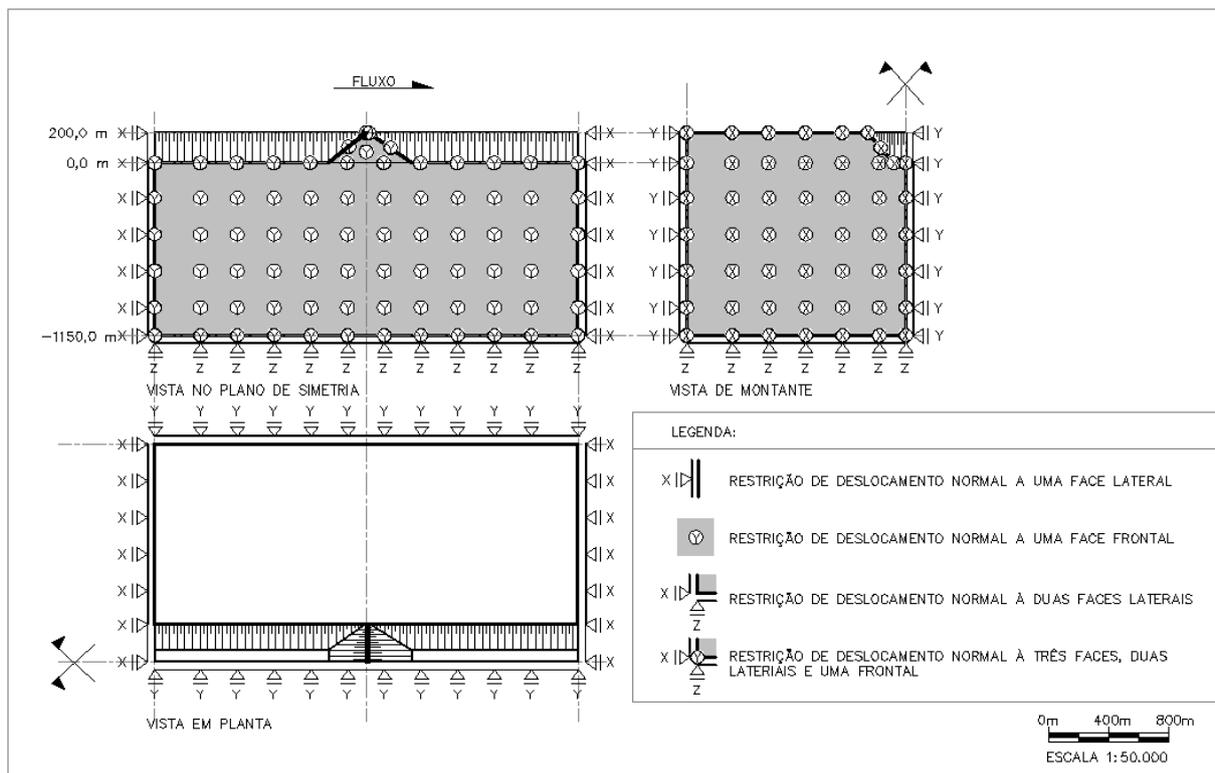


Figura 3.23 – Restrições de deslocamento para tensão-deformação. Escala 1:50.000.

3.9 CARREGAMENTOS

3.9.1 TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Na análise de tensão-deformação são definidos quatro carregamentos: o peso do reservatório; uma parcela do peso próprio da barragem; o peso próprio do concreto e as forças de percolação.

O primeiro carregamento é o peso do reservatório é inserido em toda a face de montante das lajes, do plinto e do vale, com uma função linear que depende da elevação. A elevação zero corresponde ao nível do fundo do vale, e 200 m a crista da barragem. Não foi feito o desconto de borda livre, então a variação da pressão de água do reservatório é dada por:

$$P(h) = (200 - h) \cdot \gamma_w \quad (3.3)$$

onde:

$P(h)$ = pressão de água do reservatório nas paredes de montante (Pa);

h = altura a partir da base da barragem (m);

γ_w = peso específico da água (N/m³).

O carregamento é esquematizado na Figura 3.24 e Figura 3.25.

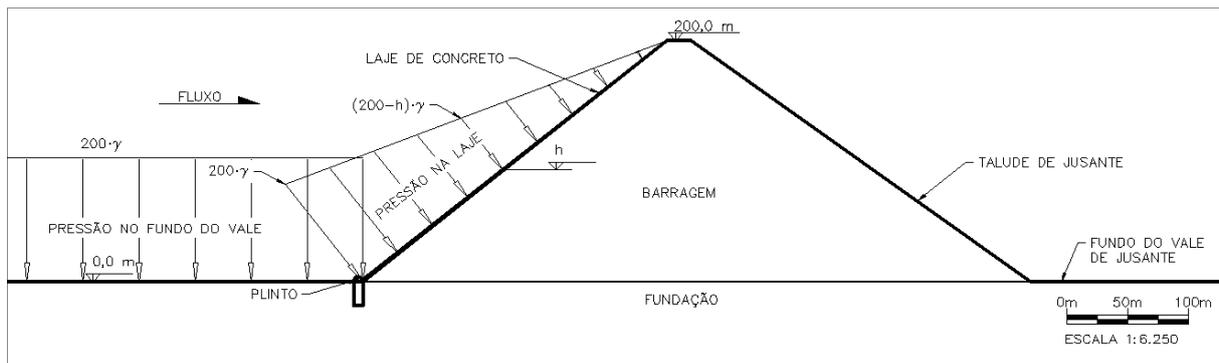


Figura 3.24 – Esquema da distribuição de pressão do reservatório. Escala 1:6.250.

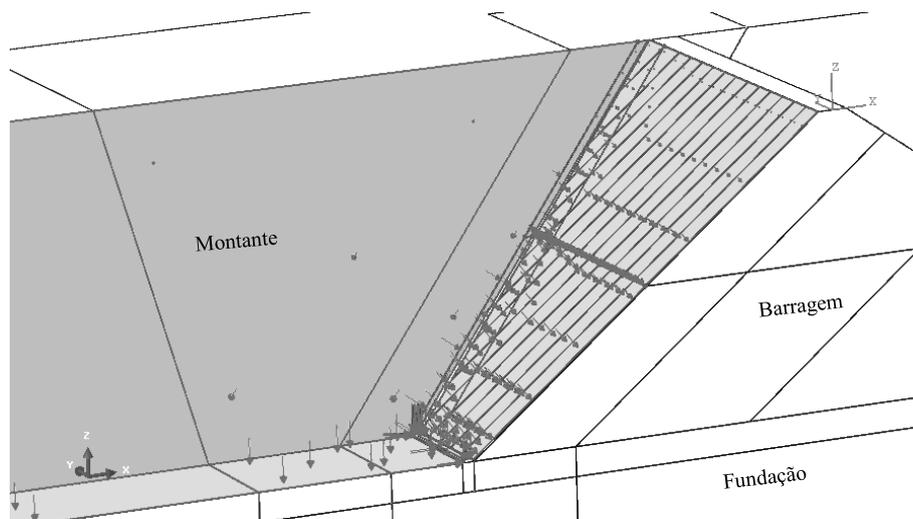


Figura 3.25 – Destaque em cinza da região de pressão variável do reservatório.

O procedimento detalhado da inserção do peso do reservatório no programa Abaqus[®] é apresentado no Item A.6.4 do Apêndice A.

A construção por etapas não foi considerada devido a dificuldade de zerar os deslocamentos do passo anterior de análise no programa Abaqus[®], outro fato importante para não consideração e que todos os materiais foram considerados lineares elásticos, a construção parcial do aterro de enrocamento não traria diferenças no resultado final dos esforços na laje. Deslocamentos horizontais importantes nos espaldares são observados em casos reais de BEFC, Mori (1999), elaborou uma imagens esquemáticas da deformação de BEFC e no final de construção, a metade inferior da barragem se desloca para fora dos dois taludes Figura 3.26a e após o enchimento, os deslocamentos são contrários no lado de montante, Figura 3.26b. Desta forma, o segundo carregamento é inserida uma parcela de gravidade para tentar simular um recalque no enrocamento devido o peso próprio, o valor não é da gravidade real mas de uma parcela que represente o recalque do material.

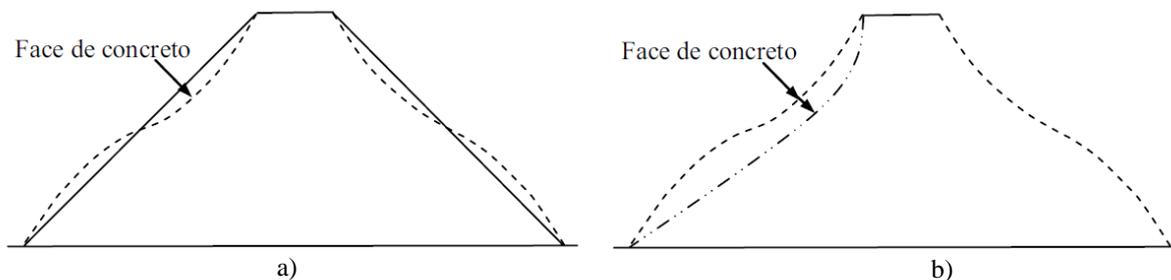


Figura 3.26 – Deformação sofrida por uma seção transversal de uma BEFC: a) final de construção; b) após o enchimentos (MORI, 1999).

O valor é arbitrado a partir da observação da instrumentação de barragens já construídas e as deformações induzidas ajudam a reduzir os esforços de flexão na laje, próximo ao plinto. O valor inicialmente proposto é de 30% da gravidade, ou seja, uma gravidade de 3m/s^2 , o 100% seria o caso em que a laje fosse construída junto com o enrocamento de forma imediata.

O passo a passo para inserção do peso próprio parcial no enrocamento é descrito no Item A.6.2 do Apêndice A.

O terceiro carregamento é o peso próprio dos elementos de concreto, com aplicação da gravidade com aceleração de 10 m/s^2 , desta forma a densidade de 2.500 kg/m^3 é calculada para 25 kN/m^3 . Procedimento apresentado detalhadamente no Item A.6.3 do Apêndice A.

Por fim, o quarto carregamento os vetores de forças de percolação, que são inseridas individualmente em cada um dos nós da malha de fundação, tais forças foram calculadas a partir dos vetores de velocidade de fluxo da simulação de percolação. A descrição resumida de aplicação da força de percolação é apresentada mais adiante, no Item 3.11 e o procedimento completo de obtenção das velocidades é apresentado no Apêndice B, a exportação, conversão e a inserção no programa no Apêndice C.

3.9.2 PERCOLAÇÃO

Os carregamentos de percolação implementados no programa é a poropressão, que para a simulação são dois:

- A montante é inserida a mesma pressão do reservatório nas paredes como explicado no Item 3.9.1 e a Equação 3.3, com a diferença de que a laje de montante e o plinto são retirados, como se o concreto fosse totalmente impermeável (Figura 3.27);
- A jusante é inserida a pressão zero no fundo do vale (Figura 3.28).

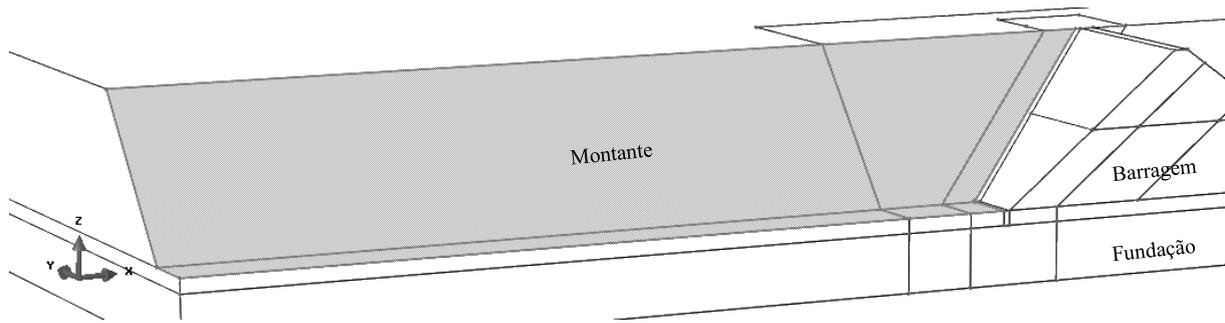


Figura 3.27 Destaque em cinza da região de poropressão variável à montante.

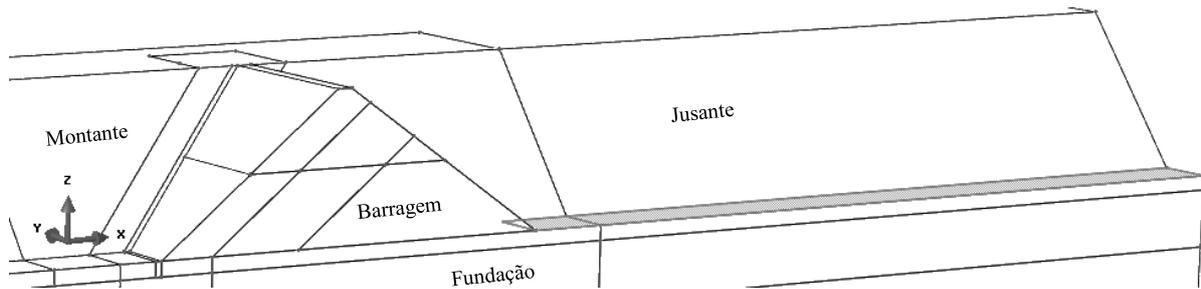


Figura 3.28 – Destaque em cinza da região de poropressão zero à jusante.

O procedimento completo de inserção das poropressões na simulação é apresentado passo a passo no Item B.6.2 do Apêndice B.

Três campos iniciais são inseridos para que a simulação de percolação seja possível no programa Abaqus®, definidos em todo o modelo, a poropressão inicial zero, o grau de saturação de 100% e o índice de vazios iniciais igual a 0,4. Os valores definidos nos campos não geram alteração alguma nos resultados finais, seriam importantes para uma análise não saturada, de análise transiente ou com o acoplamento com tensão e deformação.

3.10 SOLICITAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados solicitados para a simulação de tensão-deformação são aqueles já pré definidos por padrão no programa, sem necessidade de quaisquer alteração de configuração. São as tensões (componentes e invariantes), deformações, deslocamentos, forças de reação nos apoios e de contato.

Os dois resultados necessários para cálculo da força de percolação são a velocidade de fluxo para o cálculo do gradiente e o volume de cada elemento nos nós. Um resultado adicional de poropressão é acrescentado para visualização e avaliação dos resultados obtidos. O procedimento no programa é descrito no Item B.4.2 do Apêndice B.

3.11 FORÇA DE PERCOLAÇÃO

As forças de percolação são calculadas a partir de vetores obtidos dos resultados da simulação de fluxo que posteriormente são transformados em vetores de força. A malha simulada nesta etapa é só da fundação, ombreira e barragem sem a consideração dos elementos de concreto.

O calculo é feito a partir do produto entre a velocidade de fluxo, o volume dos elementos e o peso específico da água, divididos pelas permeabilidades dos materiais. O artifício encontrado para inserção das forças de percolação é através da formatação de seus vetores para a linguagem de texto de entrada do programa, aplicados individualmente em cada um dos nós da malha.

Foram geradas quatro malhas com a análise paramétrica das injeções (Item 3.2.6) e uma delas chega a quase 200 mil nós e como são três direções. Tem-se uma ordem de quase 600 mil forças que devem ser reaplicadas na simulação e cuja metodologia é esclarecida a seguir. O procedimento detalhado, passo a passo é apresentado no Apêndice C.

3.11.1 PRODUTO DA VELOCIDADE DE FLUXO PELOS VOLUMES NOS NÓS

As velocidades de fluxo são multiplicadas pelos volumes dos elementos nos nós através de uma calculadora de vetores já implementada no programa Abaqus®, o volume é multiplicado para cada uma das componentes, em toda malha de uma só vez. Importante destacar que a malha deve ser separada para as diferentes permeabilidades dos materiais para o posterior cálculo das forças de percolação.

O manual do programa não é claro em relação ao cálculo do volume nos nós, mas por verificação de uma malha genérica com o valor dos volumes (Figura 3.29), pode-se observar que é feito a partir da média dos volumes dos elementos adjacentes ao nó, (Figura 3.30).

O volume calculado apresenta uma estimativa matemática muito boa para os volumes nos nós que estão no interior da malha, mas superestima os volumes nos nós externos. Infelizmente esta foi a única forma encontrada para o cálculo das forças de percolação, visto que não se trata de um resultado comumente implementado em programas comerciais.

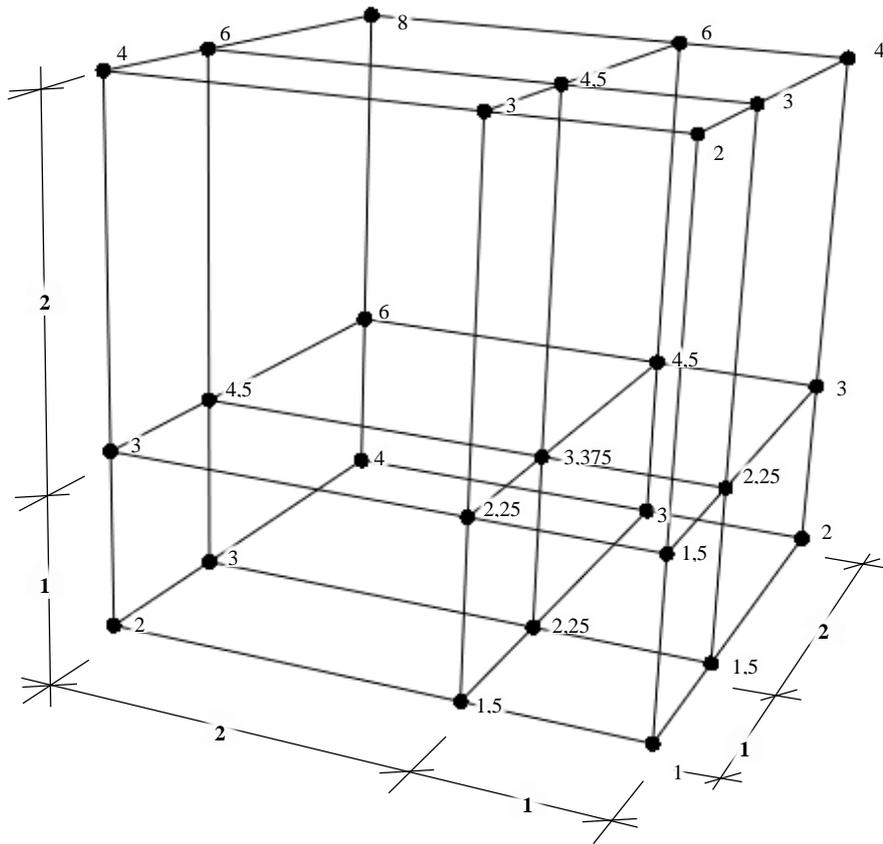


Figura 3.29 – Volumes nos nós calculados para uma malha genérica.

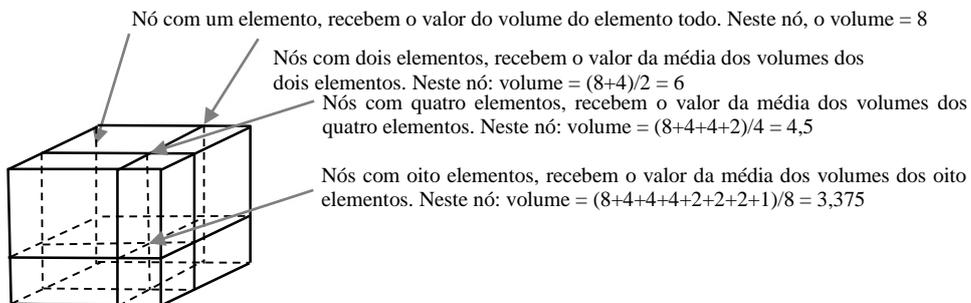


Figura 3.30 – Explicação do cálculo do volume dos elementos para os nós da Figura 3.29.

Em síntese, as forças de percolação calculadas por este método estão maiores que deveriam nos nós de externos, mas com bons resultados nos nós do interior da malha, o que torna a simulação mais conservadora. Quanto mais refinada é a malha, menores são as distorções nestes valores.

O uso da calculadora implementada no programa Abaqus ® está exposto no Item C.1 do Apêndice C.

3.11.2 VETORES DE FORÇA DE PERCOLAÇÃO

As operações de divisão e multiplicação para gerar as forças de percolação foram efetuadas em uma planilha e foram calculadas separadamente para cada permeabilidade de material.

A localização para aplicação de cada força de percolação é referenciada a partir de nomes de grupos geométricos previamente definidos, denominados *Sets*, como as forças são aplicadas nos nós, estes devem receber *Sets* individualmente para cada um. O Apêndice C apresenta a montagem dos *Sets* passo a passo nos itens C.2, C.3 e C.4.

As informações dos *Sets* e das forças são escritas para linguagem de entrada do programa o auxílio de planilhas. O procedimento de montagem das planilhas, importação e exportação do texto formatado está descrito nos itens C.5 e C.6 do Apêndice C.

3.11.3 INSERÇÃO NAS ANÁLISES NUMÉRICAS

O último procedimento para montar a simulação de força de percolação é a inserção do texto formatado com os *Sets* e as forças em cada um dos nós no documento de entrada gerado na simulação piloto. O arquivo modificado é então lido pelo programa para o cálculo da simulação numérica, e o procedimento está detalhado nos Itens C.7 e C.8.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com os resultados das simulações, é possível verificar os indicadores do comportamento do barramento com e sem as forças de percolação em ordem de grandeza, com avaliação dos esforços atuantes na laje, os deslocamentos máximos e da abertura das juntas.

O caso analisado prevê um vale muito fechado onde a relação entre as faixas de laje pode ser tornar preocupante, o comportamento mais expressivo observado em todas as análises da BEFC é justamente em relação a compressão transferida entre as faixas de laje na direção horizontal com o peso do reservatório, desenvolvidas na região central e superior da laje e que gera trincas na vertical.

Todos os valores de compressão analisados ficaram acima de 50 MPa no concreto armado, ressaltando que não foram considerados os alívios de tensão por uma junta de borracha. A força de percolação contribui um pouco em sua majoração, em com acréscimo de até 9% da compressão (8 MPa) e este aumento pode ser determinante para a ruptura da laje, mas se trata de valores ainda muito pequenos em relação ao todo.

A abertura máxima das juntas entre as lajes foi observada na proximidade do plinto e apresentam valores entre 9 a 12 cm com a força de percolação e de 7 a 9 cm sem. Análises mais aprofundadas com modelos constitutivos que consideram plastificação e endurecimento devem apresentar valores mais acurados.

Importante ressaltar que as força de percolação gerou aumento de 1,2 a 4 cm na abertura das juntas, com aumento de 12 a 30% de deslocamento adicional dentre as 48 simulações. O afastamento adicional das faixas de laje pode gerar um aumento significativo no fluxo de água, afetando diretamente o desempenho do barramento.

A exposição e a análise das figuras são feitas em somente uma das amostras pois o comportamento global dos resultados é muito semelhante entre os diferentes arranjos em relação a distribuição dos vetores de fluxo, tensões e deslocamentos, com maiores diferenças na magnitude. Por exemplo, todas as lajes apresentaram compressões na parte superior central, flexão e abertura das juntas próximo do plinto com as distribuições são muito semelhantes, mas diferentes magnitudes.

As figuras apresentadas neste capítulo correspondem aos resultados calculados nas simulações do tipo P1I1Y1, ou seja: permeabilidades P1 (Tabela 3.5); geometria I1 (Tabela 3.2); e os módulos de Young Y1 (Tabela 3.4).

4.2 TABELA DE RESULTADOS

A Tabela 4.1 apresenta as tensões máximas que incidem nas lajes de tração e compressão nas primeiras duas colunas, em seguida as tensões máximas na direção do eixo YY (tração e compressão) e o deslocamento máximo na laje. Todos os resultados são apresentados com ou sem força de percolação (FP), das 48 simulações. Os códigos da primeira coluna são montados a partir das tabelas paramétricas Tabela 3.5, Tabela 3.2 e Tabela 3.4. Na ordem: percolação (P), injeção (I) e módulos de Young (Y).

A Figura 4.1 mostra a posição das compressões e trações máximas na direção yy, em azul escuro e vermelho, respectivamente e a posição da abertura máxima das juntas da laje. Os esforços máximos em qualquer direção da laje também se desenvolvem nas mesmas localizações. A Figura 4.2 mostra a posição dos deslocamentos máximos.

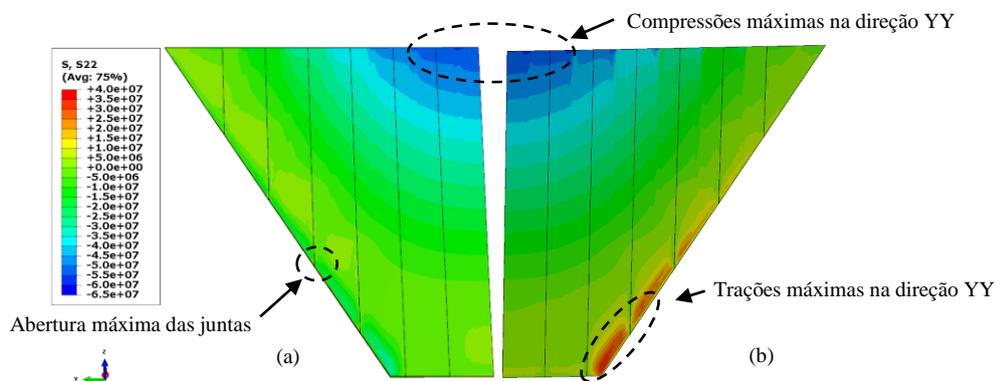


Figura 4.1 – Esforços YY na laje de montante, nas duas faces, de cima (a) e de baixo (b).

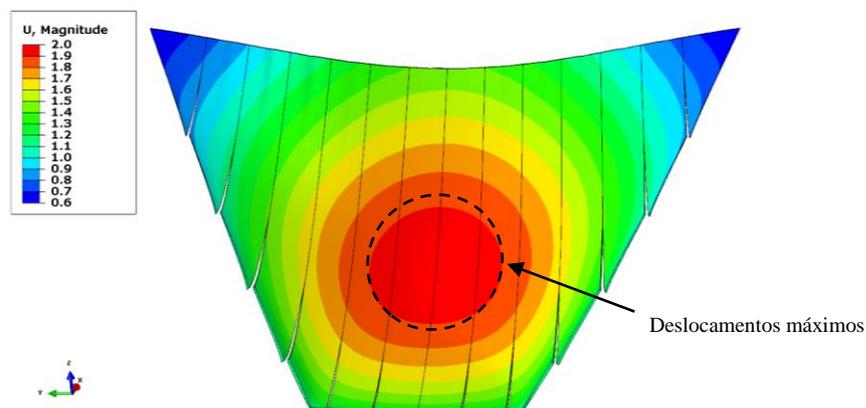


Figura 4.2 – Magnitude dos deslocamentos nas lajes com exagero de 50 vezes.

Tabela 4.1 – Esforços e deslocamentos máximos na laje.

Modelo	Tração Max. (MPa)	Compressão Max. (MPa)	Tração YY Max. (MPa)	Compressão YY Max. (MPa)	Deslocamento Max. (m)	Abertura das Juntas Max. (cm)
P1I1Y1 (FP)	46,5	98,4	43,5	97,8	3,34	11,1
P1I1Y1	47,5	90,6	45,1	90,0	3,28	9,0
P1I1Y2 (FP)	43,4	78,0	39,9	77,1	2,91	9,7
P1I1Y2	44,5	71,9	41,2	70,8	2,84	7,7
P1I1Y3 (FP)	40,6	90,8	39,0	83,9	2,49	10,0
P1I1Y3	41,0	84,5	39,8	77,6	2,46	8,7
P1I1Y4 (FP)	36,0	64,9	35,3	63,7	1,98	8,8
P1I1Y4	36,5	59,3	36,3	57,9	1,95	7,4
P1I2Y1 (FP)	46,5	98,2	43,5	97,4	3,34	10,7
P1I2Y1	48,3	90,6	43,9	89,8	3,28	8,7
P1I2Y2 (FP)	45,3	78,1	39,6	77,2	2,91	9,5
P1I2Y2	46,1	72,1	40,0	71,2	2,83	7,6
P1I2Y3 (FP)	39,2	89,5	38,1	83,6	2,49	9,6
P1I2Y3	39,7	83,4	38,4	77,4	2,46	8,2
P1I2Y4 (FP)	36,5	65,0	34,1	63,8	1,98	8,3
P1I2Y4	37,0	59,5	34,2	58,2	1,95	7,1
P1I3Y1 (FP)	47,9	95,1	45,2	94,2	3,34	12,0
P1I3Y1	48,9	90,8	44,3	89,9	3,28	8,3
P1I3Y2 (FP)	45,5	75,0	41,2	74,1	2,91	10,3
P1I3Y2	46,7	7,2	40,6	71,2	2,84	7,3
P1I3Y3 (FP)	40,5	88,2	39,8	81,9	2,52	11,3
P1I3Y3	40,4	83,5	39,0	78,1	2,49	8,4
P1I3Y4 (FP)	37,5	63,4	35,8	62,1	2,02	9,4
P1I3Y4	37,7	60,2	34,9	58,9	1,98	7,2
P1I4Y1 (FP)	48,2	93,9	45,2	93,0	3,33	12,2
P1I4Y1	48,7	90,6	44,2	89,7	3,26	8,5
P1I4Y2 (FP)	45,3	74,0	41,6	73,0	2,91	10,4
P1I4Y2	46,4	72,1	41,4	71,1	2,83	7,4
P1I4Y3 (FP)	40,8	94,3	39,9	86,8	2,51	11,5
P1I4Y3	40,4	89,9	39,1	82,6	2,48	8,6
P1I4Y4 (FP)	37,7	62,7	35,7	61,4	2,00	9,6
P1I4Y4	37,6	60,1	34,7	58,8	1,97	7,3
P2I1Y1 (FP)	46,5	98,8	43,4	98,2	3,36	11,0
P2I1Y1	47,5	90,7	45,1	90,0	3,28	9,0
P2I1Y2 (FP)	43,4	78,4	39,8	77,5	2,93	9,6
P2I1Y2	44,5	71,2	41,2	70,8	2,84	7,8
P2I1Y3 (FP)	40,5	91,0	38,9	84,1	2,50	9,9
P2I1Y3	41,0	84,5	39,8	77,6	2,46	8,7
P2I1Y4 (FP)	35,9	65,1	35,3	63,9	2,00	8,7
P2I1Y4	36,5	59,3	36,3	57,9	1,95	7,4
P2I2Y1 (FP)	46,6	98,6	43,4	97,8	3,36	10,5
P2I2Y1	48,3	90,6	43,9	89,8	3,28	8,7
P2I2Y2 (FP)	44,3	78,5	39,6	77,6	2,93	9,4
P2I2Y2	46,1	72,1	40,3	71,2	2,84	7,6
P2I2Y3 (FP)	39,2	89,6	38,0	83,8	2,50	9,5
P2I2Y3	39,7	83,4	38,4	77,4	2,46	8,2
P2I2Y4 (FP)	36,4	65,2	34,1	64,1	2,00	8,3
P2I2Y4	37,0	59,5	34,2	58,2	1,95	7,1

Modelo	Tração Max. (MPa)	Compressão Max. (MPa)	Tração YY Max. (MPa)	Compressão YY Max. (MPa)	Deslocamento Max. (m)	Abertura das Juntas Max. (cm)
P2I3Y1 (FP)	47,9	95,5	45,2	94,6	3,36	11,8
P2I3Y1	48,9	90,8	44,3	89,9	3,28	8,3
P2I3Y2 (FP)	45,6	75,5	41,2	74,5	2,93	10,2
P2I3Y2	46,7	72,2	40,6	71,2	2,83	7,3
P2I3Y3 (FP)	40,5	88,3	39,8	82,2	2,53	11,2
P2I3Y3	40,4	83,5	39,0	78,1	2,49	8,4
P2I3Y4 (FP)	37,5	63,7	35,8	62,4	2,03	9,4
P2I3Y4	37,7	60,2	34,9	58,9	1,98	7,1
P2I4Y1 (FP)	48,2	94,4	45,2	93,4	3,35	12,1
P2I4Y1	48,7	90,6	44,2	89,7	3,26	8,5
P2I4Y2 (FP)	45,3	74,4	41,6	72,5	2,93	10,3
P2I4Y2	46,4	72,1	41,4	71,1	2,83	7,4
P2I4Y3 (FP)	40,8	94,4	39,9	86,9	2,52	11,4
P2I4Y3	40,4	89,9	39,1	82,6	2,48	8,6
P2I4Y4 (FP)	37,7	63,0	35,7	61,7	2,02	9,5
P2I4Y4	37,6	60,1	34,7	58,8	1,97	7,3
P3I1Y1 (FP)	46,5	95,9	43,6	95,3	3,27	11,8
P3I1Y1	47,5	90,7	45,1	90,0	3,28	9,0
P3I1Y2 (FP)	43,4	75,6	39,9	74,6	2,85	10,2
P3I1Y2	44,5	71,9	41,2	70,8	2,84	7,8
P3I1Y3 (FP)	40,8	89,5	39,2	82,3	2,45	10,7
P3I1Y3	40,9	84,5	39,8	77,6	2,46	8,7
P3I1Y4 (FP)	36,2	63,3	35,5	62,1	1,94	9,2
P3I1Y4	36,5	59,3	36,3	57,9	1,95	7,4
P3I2Y1 (FP)	46,6	95,7	43,8	94,9	3,27	11,4
P3I2Y1	48,3	90,6	43,9	89,8	3,38	8,7
P3I2Y2 (FP)	50,2	75,7	39,9	74,8	2,85	9,9
P3I2Y2	46,1	72,1	40,3	71,2	2,84	7,6
P3I2Y3 (FP)	39,5	88,2	38,4	82,1	2,45	10,3
P3I2Y3	39,7	83,4	38,4	77,4	2,46	8,2
P3I2Y4 (FP)	36,5	63,5	34,4	62,3	1,94	8,8
P3I2Y4	37,0	59,5	34,2	58,2	1,95	7,1
P3I3Y1 (FP)	47,8	93,1	45,2	92,2	3,25	12,3
P3I3Y1	48,9	90,8	44,3	89,9	3,28	8,3
P3I3Y2 (FP)	45,5	73,1	41,2	72,1	2,84	10,4
P3I3Y2	46,7	72,2	40,6	71,2	2,84	7,3
P3I3Y3 (FP)	40,6	87,1	39,8	80,7	2,46	11,6
P3I3Y3	40,4	83,5	39,0	78,1	2,49	8,4
P3I3Y4 (FP)	37,4	62,1	35,8	60,9	1,97	9,6
P3I3Y4	37,6	60,2	34,9	58,9	1,98	7,2
P3I4Y1 (FP)	48,1	92,0	45,2	91,1	3,24	12,5
P3I4Y1	48,7	90,6	44,2	89,7	3,26	8,5
P3I4Y2 (FP)	45,4	72,1	41,4	71,1	2,83	10,5
P3I4Y2	46,4	72,1	41,4	71,1	2,83	7,4
P3I4Y3 (FP)	40,8	92,2	39,9	85,7	2,45	11,7
P3I4Y3	40,4	89,9	39,1	82,6	2,48	8,6
P3I4Y4 (FP)	37,6	61,6	35,8	60,2	1,96	9,7
P3I4Y4	37,6	60,1	34,7	58,8	1,97	7,3

4.3 FLUXO

A simulação de fluxo é apresentada neste item, com esclarecimentos do comportamento e da magnitude dos vetores de gradiente para força de percolação e de suas influências de forma qualitativa no comportamento da laje de montante.

A Figura 4.3 mostra as poropressões, com valor de dois megapascais em cor verde no vale de montante e de zero em azul no vale de jusante. Não foi inserido os parâmetros não saturados dos materiais, embora o programa considere a sucção como poropressão negativa, neste acaso as velocidades são maiores para o trecho não saturado. A Figura 4.4 mostra uma vista de jusante das poropressões.

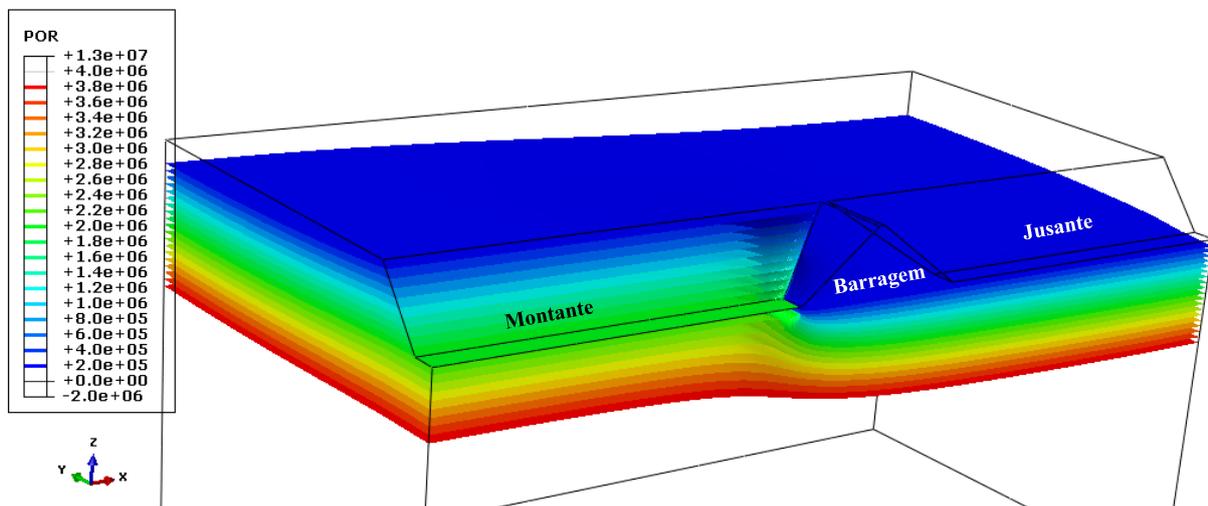


Figura 4.3 – Isosuperfícies de poropressões (Pa), vista de montante.

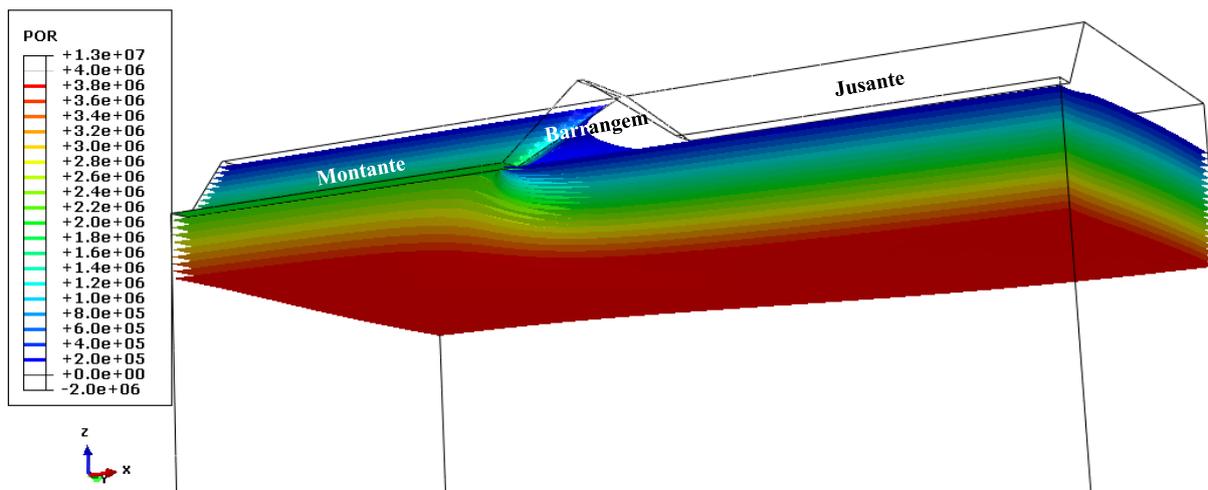


Figura 4.4 – Isosuperfícies de poropressões (Pa), vista de jusante.

Os vetores do gradiente hidráulico, usado para o cálculo das forças de percolação, dependem da carga hidráulica inicial, final e da distância percolada. São duas as categorias de variações paramétricas nos gradientes: primeiro que na injeção mais profunda os gradientes são menores que na injeção mais superficial porque aumenta-se a distância percolada; a segunda é que quanto mais impermeável é a fundação em relação a ombreira, maiores são as velocidades de fluxo na ombreira e conseqüentemente maiores são os seus gradientes de fluxo. A Figura 4.5 mostra a magnitude dos vetores do gradiente hidráulico na direção Y de uma das simulações. A imagem está cortada na metade da barragem, elevação cem metros e apresenta somente a ombreira e a primeira camada de fundação até a base da injeção.

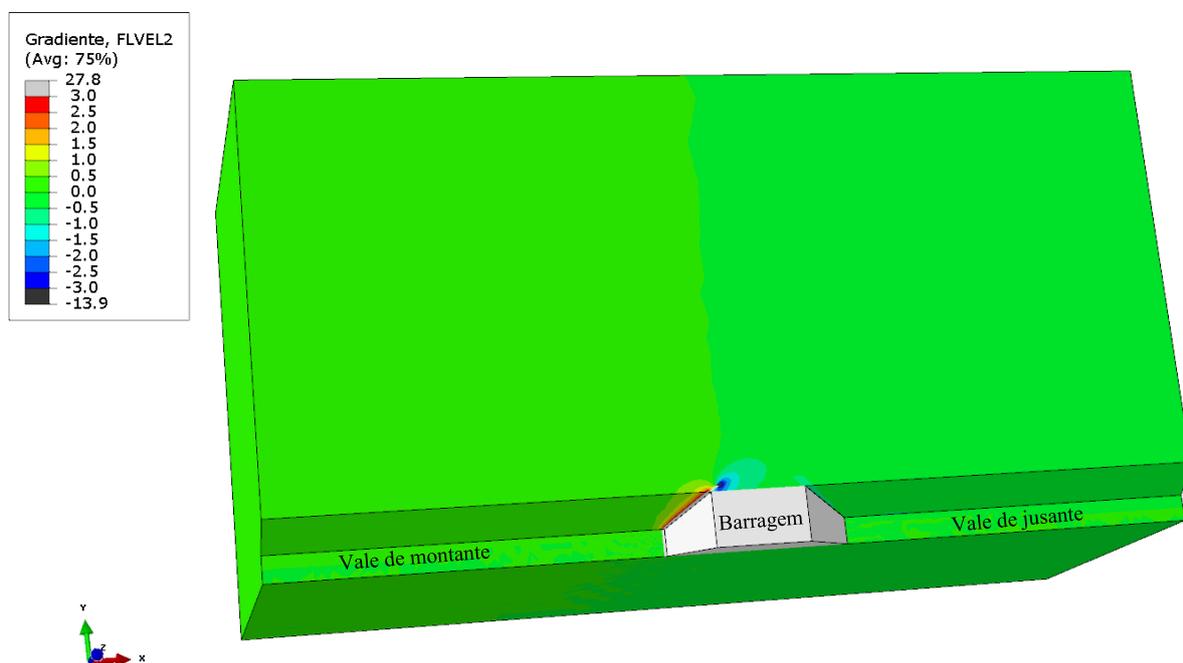


Figura 4.5 – Vista superior do corte na elevação 100 m com os gradientes Y (materiais F1 e F2).

Na Figura 4.6 percebe-se que os vetores de gradiente de fluxo seguem um sentido circular em torno da injeção de fundação e o sentido é de montante de jusante. Os vetores de forças de percolação têm mesmas direções, sentidos e distribuição de módulos dos vetores de gradiente hidráulico para um mesmo material, mas com magnitudes e unidades diferentes.

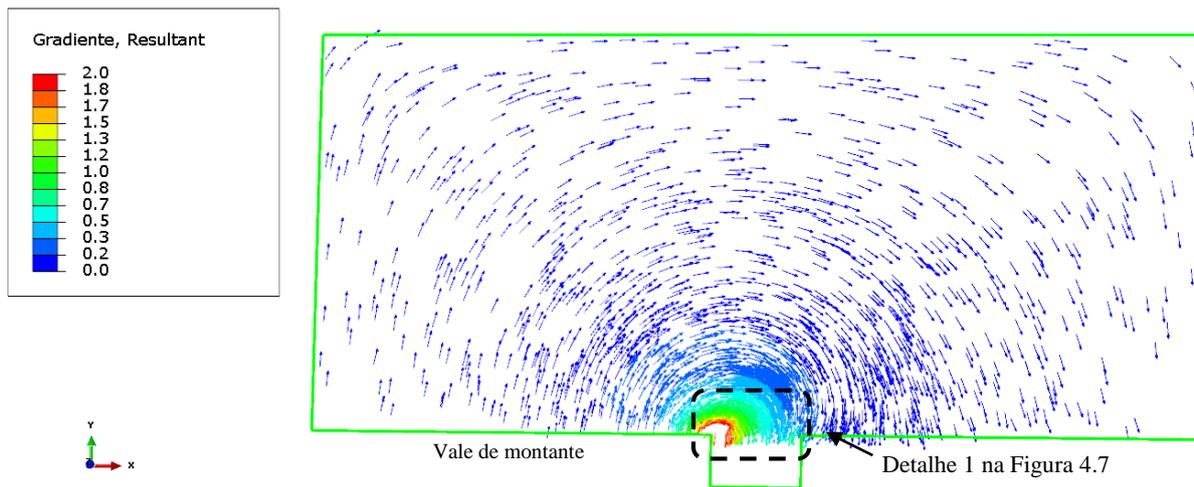


Figura 4.6 – Vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes de fluxo.

Os vetores com maiores módulos se distribuem contornando a região da injeção (Figura 4.7) e analisando como forças de percolação, os vetores empurram o maciço à montante e comprimem o enrocamento à jusante na região do plinto. Em outras palavras, a compressão pelas forças de percolação na direção da ombreira para a barragem não incide diretamente sobre a laje, mas sim por transferência pela compressão no enrocamento, onde parte dos esforços são transferidos para a laje devido o grande módulo de Young em relação ao enrocamento.

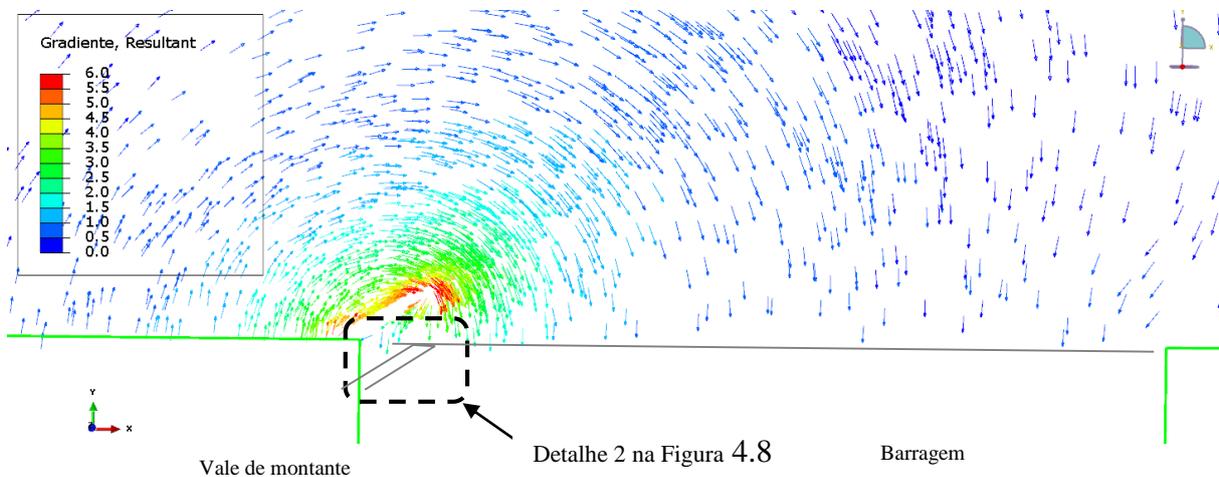


Figura 4.7 – Detalhe 1 da vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes de fluxo.

Para uma avaliação prévia, a força de percolação pode ser estimada por um gradiente médio, onde a diferença máxima de carga hidráulica é de 200 m entre montante e jusante e o comprimento de percolação 40 m temos gradientes na ordem de quatro (caso a injeção tenha 20 m). A multiplicação do gradiente pelo peso específico da água, tem-se a força volumétrica de percolação na ordem de 40 kPa, que distribuídos por 20 m em um dos lados da injeção de tem-se a grandeza de 0,8 MPa que contorna a injeção na região do fundo do vale.

A pressão de água do reservatório que incide na parede de montante é de megapascais na região mais profunda, que somadas aos vetores de força de percolação de montante, fazem com que as juntas entre os panos de laje se abram de 10 a 20% em algumas regiões. A compressão das ombreiras devido o fluxo é transferida pelo enrocamento para a laje em parcelas de até 9%, na região mais altas do talude.

A Figura 4.8 mostra o comportamento dos vetores que pressionam o talude do vale do reservatório e a comprimem a barragem pelo enrocamento e a Figura 4.9 mostra as magnitudes na direção Y, valores positivos tracionam e negativos comprimem.

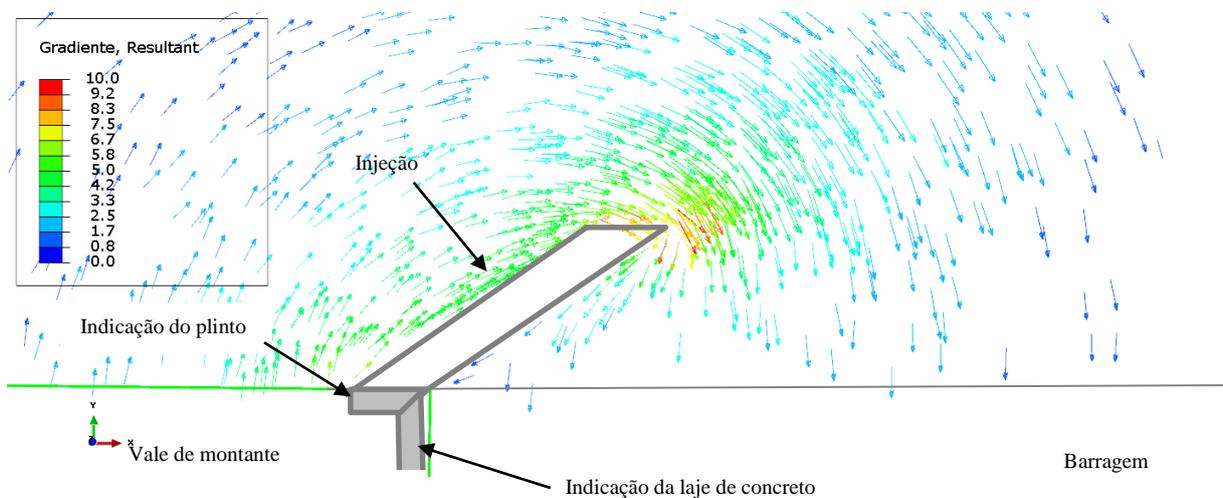


Figura 4.8 – Detalhe 2 da vista superior da seção na elevação 100 m com os vetores dos gradientes de fluxo.

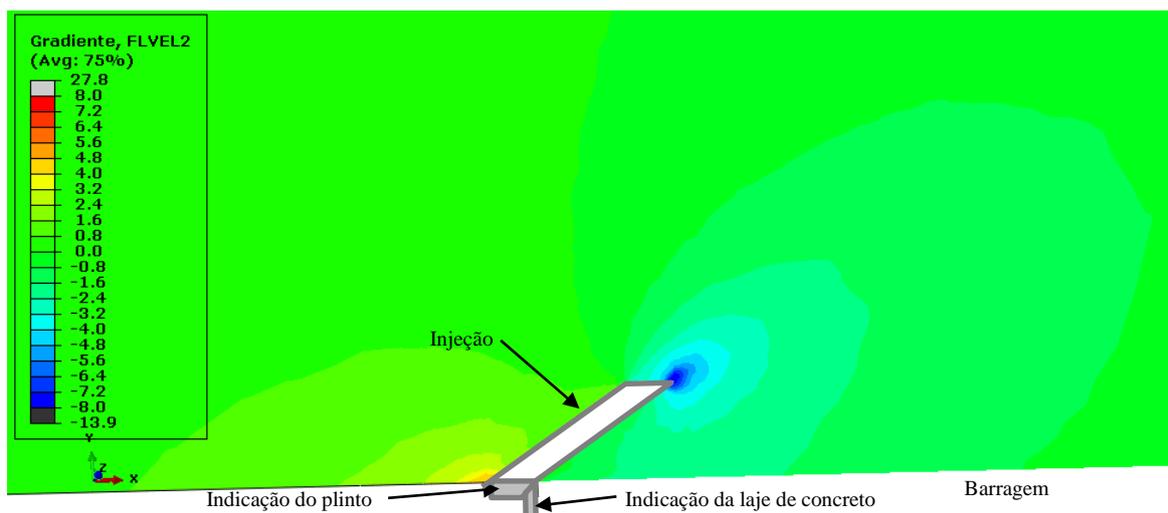


Figura 4.9 – Detalhe 2 da vista superior da seção na elevação 100 m com os gradientes na direção Y.

4.4 DESLOCAMENTOS

Os deslocamentos calculados com o modelo linear elástico não representam em sua plenitude os materiais geotécnicos mas podem fornecer uma ordem de grandeza em relação ao comportamento global. As Figura 4.10 e Figura 4.11 mostram as isolinhas de deslocamentos totais com e sem força de percolação, mantendo a mesma escala da legenda para comparação. Em escala macro, as forças de fluxo deformam o modelo de forma circular em torno da injeção seguindo os vetores de gradiente hidráulico (Figura 4.6).

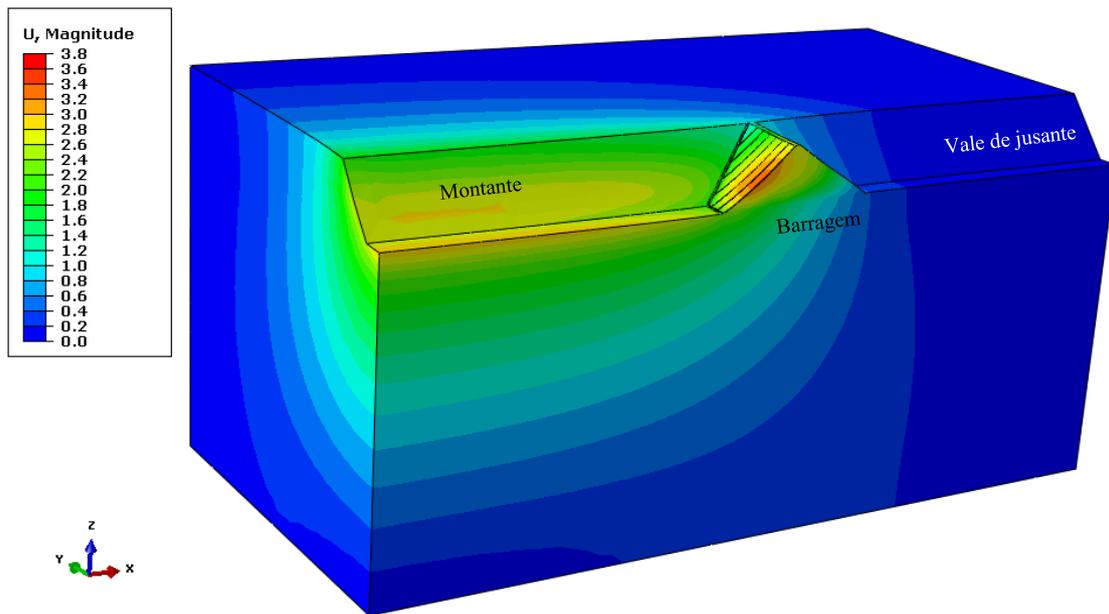


Figura 4.10 – Magnitude máxima dos deslocamentos sem as forças de percolação (m).

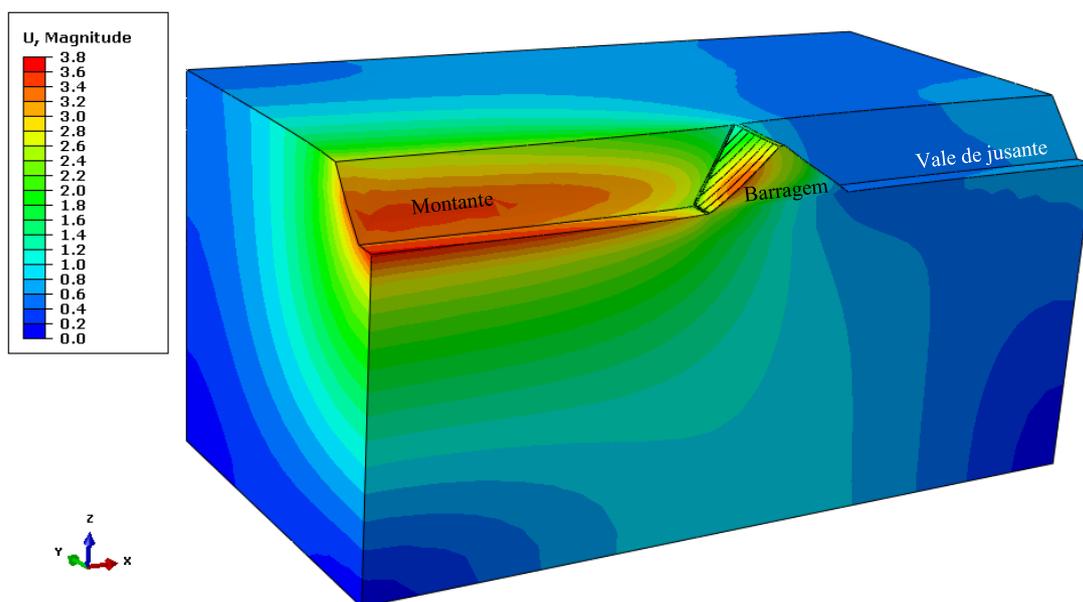


Figura 4.11 – Magnitude máxima dos deslocamentos sem as forças de percolação (m).

As faixas de lajes podem ser isoladas para uma avaliação mais localizada, a Figura 4.12 mostra as isolinhas de magnitude dos deslocamentos máximos em metros, ampliado em 50 vezes. As juntas entre os panos de laje se abrem na parte inferior, enquanto a parte superior permanece em contato com transferência de compressão entre elas. O resultado mostrado na figura inclui as forças de percolação na simulação, que ampliam um pouco a abertura das juntas.

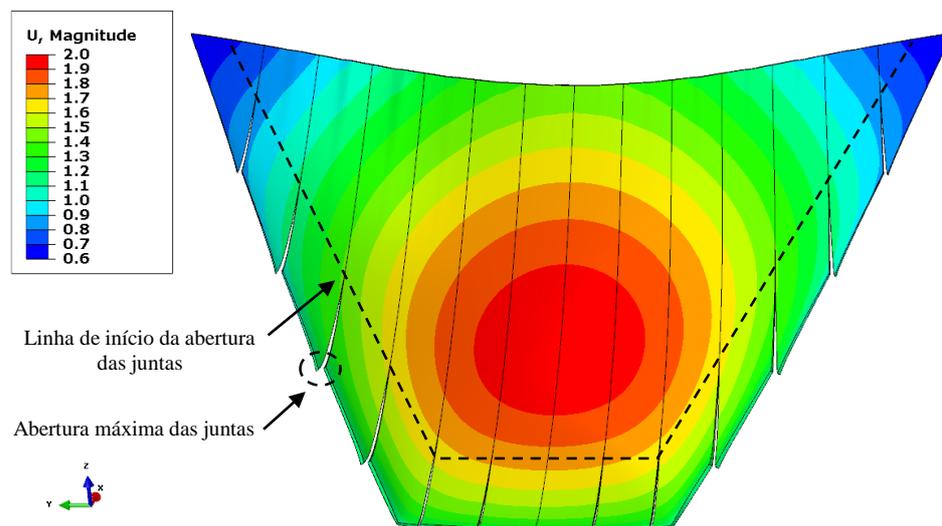


Figura 4.12 – Magnitude (m) dos deslocamentos nas lajes com ampliação de 50 vezes.

Os deslocamentos máximos em todas as simulações paramétricas e a abertura máxima das juntas com e sem força de percolação podem ser consultados na última coluna da Tabela 4.1. Os comentários adicionais sobre a abertura das juntas foram apresentados no Item 4.1.

4.5 TENSÕES

Os esforços que se desenvolvem na laje são completamente dependentes dos efeitos tridimensionais do vale fechado, com compressão na região central da laje perto da crista e efeitos de flexão na base, mais intensas nas proximidades do talude do vale. Os valores negativos são compressão e positivos tração, e as Figura 4.13 e Figura 4.14 mostram os esforços máximos e na direção YY, respectivamente com as mesmas escalas na legenda. As imagens da esquerda são da face de cima da laje e as imagens da direita o lado de baixo, em contato com o enrocamento.

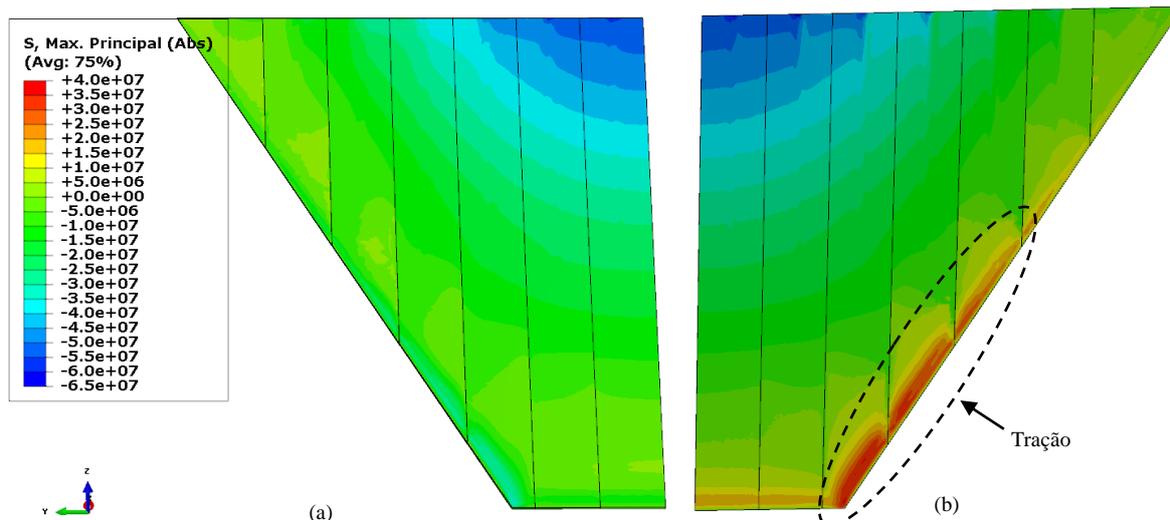


Figura 4.13 – Tensões máximas na laje de montante, nas duas faces, de cima (a) e de baixo (b).

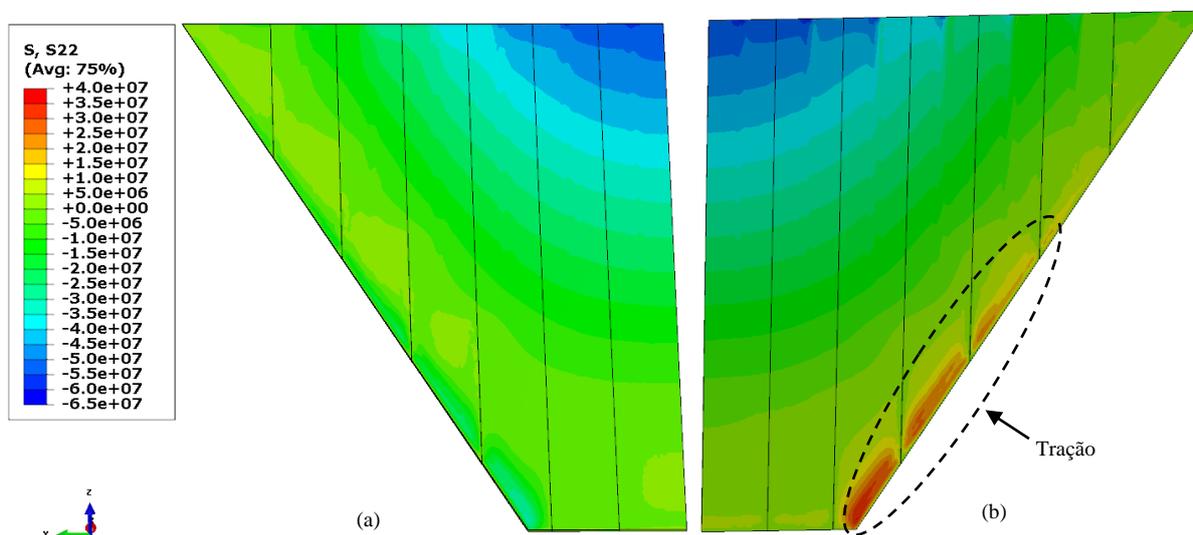


Figura 4.14 – Tensões YY na laje de montante, nas duas faces, de cima (a) e de baixo (b).

As magnitudes de tensões de compressão encontradas nas várias simulações estão na ordem 50 até 100 MPa, as forças de percolação influenciam com acréscimo de somente até 9% desta compressão. As trações estão na ordem de 30 a 50 MPa. Os valores são muito superiores aos típicos de resistência do concreto para compressão e exigiria muita armadura para flexão. As áreas de aço não serão calculadas neste trabalho, há somente a indicação da ordem de grandeza dos esforços que podem ser preocupantes em um vale fechado como este.

4.6 ESTUDO PARAMÉTRICO

O estudo da influência das variações de geometria e de parâmetros é feito em duas partes, primeiro com as diferenças entre os esforços máximos que incidem nas faixas de lajes e

posteriormente com a abertura máxima das juntas, com e sem a força de percolação (FP). Estão apresentadas as diferenças nas variações no módulo de Young, na geometria da Injeção e nas permeabilidades.

4.6.1 TENSÕES MÁXIMAS DE COMPRESSÃO

As Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresentam as diferenças absolutas e percentuais de compressão máxima na direção yy da laje entre as simulações com a variação nos módulos de Young do enrocamento e da fundação, respectivamente. Para o enrocamento, as diferenças são entre as tensões dos arranjos Y1 e Y2 e depois entre Y3 e Y4 e para a fundação, diferenças entre os esforços entre Y1 e Y3 e depois entre Y2 e Y4. A nomenclatura dos arranjos é mostrada na Tabela 3.4. As tabelas apresentam as diferenças dos esforços com e sem forças de percolação.

Tabela 4.2 – Diferença da compressão máxima entre dois módulos de Young do enrocamento.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y2}}$	$\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y2}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}}{\sigma_{Y4}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}}{\sigma_{Y4}}$
P1I1	-19,2	-27,12%	-20,7	-26,85%	-19,7	-34,02%	-20,2	-31,71%
P1I2	-18,6	-26,12%	-20,2	-26,17%	-19,2	-32,99%	-19,8	-31,03%
P1I3	-18,7	-26,26%	-20,1	-27,13%	-19,2	-32,60%	-19,8	-31,88%
P1I4	-18,6	-26,16%	-20,0	-27,40%	-23,8	-40,48%	-25,4	-41,37%
P2I1	-19,2	-27,12%	-20,7	-26,71%	-19,7	-34,02%	-20,2	-31,61%
P2I2	-18,6	-26,12%	-20,2	-26,03%	-19,2	-32,99%	-19,7	-30,73%
P2I3	-18,7	-26,26%	-20,1	-26,98%	-19,2	-32,60%	-19,8	-31,73%
P2I4	-18,6	-26,16%	-20,9	-28,83%	-23,8	-40,48%	-25,2	-40,84%
P3I1	-19,2	-27,12%	-20,7	-27,75%	-19,7	-34,02%	-20,2	-32,53%
P3I2	-18,6	-26,12%	-20,1	-26,87%	-19,2	-32,99%	-19,8	-31,78%
P3I3	-18,7	-26,26%	-20,1	-27,88%	-19,2	-32,60%	-19,8	-32,51%
P3I4	-18,6	-26,16%	-20,0	-28,13%	-23,8	-40,48%	-25,5	-42,36%

Tabela 4.3 – Diferença da compressão máxima entre dois módulos de Young na fundação.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y3}}$	$\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y3}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}}{\sigma_{Y4}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}}{\sigma_{Y4}}$
P1I1	-12,4	-15,98%	-13,9	-16,57%	-12,9	-22,28%	-13,4	-21,04%
P1I2	-12,4	-16,02%	-13,8	-16,51%	-13,0	-22,34%	-13,4	-21,00%
P1I3	-11,8	-15,11%	-12,3	-15,02%	-12,3	-20,88%	-12,0	-19,32%
P1I4	-7,1	-8,60%	-6,2	-7,14%	-12,3	-20,92%	-11,6	-18,89%
P2I1	-12,4	-15,98%	-14,1	-16,77%	-12,9	-22,28%	-13,6	-21,28%
P2I2	-12,4	-16,02%	-14,0	-16,71%	-13,0	-22,34%	-13,5	-21,06%
P2I3	-11,8	-15,11%	-12,4	-15,09%	-12,3	-20,88%	-12,1	-19,39%
P2I4	-7,1	-8,60%	-6,5	-7,48%	-12,3	-20,92%	-10,8	-17,50%
P3I1	-12,4	-15,98%	-13,0	-15,80%	-12,9	-22,28%	-12,5	-20,13%
P3I2	-12,4	-16,02%	-12,8	-15,59%	-13,0	-22,34%	-12,5	-20,06%
P3I3	-11,8	-15,11%	-11,5	-14,25%	-12,3	-20,88%	-11,2	-18,39%
P3I4	-7,1	-8,60%	-5,4	-6,30%	-12,3	-20,92%	-10,9	-18,11%

As Tabela 4.4 e Tabela 4.5 mostram as diferenças absolutas e percentuais de compressão máxima na direção yy da laje entre as simulações com a presença ou não de injeção da crista e com variação na profundidade da injeção, respectivamente. Para a injeção na crista, as diferenças são entre esforços dos arranjos I1 e I2 e depois entre I3 e I4 e para a profundidade, diferenças entre as tensões de I1 e I3 e depois entre I2 e I4. A nomenclatura dos arranjos é mostrada na Tabela 3.2. As tabelas mostram as diferenças dos esforços com e sem forças de percolação.

Tabela 4.4 – Diferença da compressão máxima com ou sem injeção na crista.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{I2} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I2} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I2}}$	$\sigma_{I2} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I2} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I2}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$
P1Y1	-0,2	-0,22%	-0,4	-0,41%	-0,2	-0,22%	-1,2	-1,29%
P1Y2	0,4	0,56%	0,1	0,13%	-0,1	-0,14%	-1,1	-1,51%
P1Y3	-0,2	-0,26%	-0,3	-0,36%	4,5	5,45%	4,9	5,65%
P1Y4	0,3	0,52%	0,1	0,16%	-0,1	-0,17%	-0,7	-1,14%
P2Y1	-0,2	-0,22%	-0,4	-0,41%	-0,2	-0,22%	-1,2	-1,28%
P2Y2	0,4	0,56%	0,1	0,13%	-0,1	-0,14%	-2,0	-2,76%
P2Y3	-0,2	-0,26%	-0,3	-0,36%	4,5	5,45%	4,7	5,41%
P2Y4	0,3	0,52%	0,2	0,31%	-0,1	-0,17%	-0,7	-1,13%
P3Y1	-0,2	-0,22%	-0,4	-0,42%	-0,2	0,00%	-1,1	0,00%
P3Y2	0,4	0,56%	0,2	0,27%	-0,1	0,00%	-1,0	0,00%
P3Y3	-0,2	-0,26%	-0,2	-0,24%	4,5	0,00%	5,0	0,00%
P3Y4	0,3	0,52%	0,2	0,32%	-0,1	0,00%	-0,7	0,00%

Tabela 4.5 – Diferença da compressão máxima entre duas profundidades da injeção.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{I3} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I3} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I3}}$	$\sigma_{I3} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I3} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I3}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$
P1Y1	-0,1	-0,11%	-3,6	-3,82%	-0,1	-0,11%	-4,4	-4,73%
P1Y2	0,4	0,56%	-3,0	-4,05%	-0,1	-0,14%	-4,2	-5,75%
P1Y3	0,5	0,64%	-2,0	-2,44%	5,2	6,30%	3,2	3,69%
P1Y4	1,0	1,70%	-1,6	-2,58%	0,6	1,02%	-2,4	-3,91%
P2Y1	-0,1	-0,11%	-3,6	-3,81%	-0,1	-0,11%	-4,4	-4,71%
P2Y2	0,4	0,56%	-3,0	-4,03%	-0,1	-0,14%	-5,1	-7,03%
P2Y3	0,5	0,64%	-1,9	-2,31%	5,2	6,30%	3,1	3,57%
P2Y4	1,0	1,70%	-1,5	-2,40%	0,6	1,02%	-2,4	-3,89%
P3Y1	-0,1	-0,11%	-3,1	-3,36%	-0,1	-0,11%	-3,8	-4,17%
P3Y2	0,4	0,56%	-2,5	-3,47%	-0,1	-0,14%	-3,7	-5,20%
P3Y3	0,5	0,64%	-1,6	-1,98%	5,2	6,30%	3,6	4,20%
P3Y4	1,0	1,70%	-1,2	-1,97%	0,6	1,02%	-2,1	-3,49%

A Tabela 4.6 exibe as diferenças absolutas e percentuais de compressão máxima na laje na direção yy entre os arranjos de permeabilidades. São mostrados somente as diferenças com a força de percolação, uma vez que as variações são nulas se não for considerada tais forças. São três diferenças entre os esforços de compressão dos arranjos nas três possíveis combinações: Y1 com Y2; Y1 com Y3; Y2 com Y3. As nomenclaturas estão apresentadas na Tabela 3.5.

A parametrização dos módulos de Young possui dois arranjos nos parâmetros do enrocamento e dois na fundação (Tabela 3.4). A Tabela 4.7 mostra as diferenças na compressão entre as variações no enrocamento e a Tabela 4.8 as diferenças da fundação, com e sem força de percolação. Observa-se que os resultados com ou sem força de percolação não mudaram significativamente para esses resultados. O termo σ_{Yi} significa o valor de compressão máxima na direção yy na laje do arranjo de módulos Yi.

Tabela 4.6 – Diferença da compressão máxima entre três permeabilidades.

	$\sigma_{P2} - \sigma_{P1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{P2} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P2}}$	$\sigma_{P3} - \sigma_{P1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{P3} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P3}}$	$\sigma_{P3} - \sigma_{P2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{P3} - \sigma_{P2}}{\sigma_{P3}}$
I1Y1	0,4	0,41%	-2,5	-2,62%	-2,90	-3,04%
I1Y2	0,4	0,52%	-2,5	-3,35%	-2,90	-3,89%
I1Y3	0,2	0,24%	-1,6	-1,94%	-1,80	-2,19%
I1Y4	0,2	0,31%	-1,6	-2,58%	-1,80	-2,90%
I2Y1	0,4	0,41%	-2,5	-2,63%	-2,90	-3,06%
I2Y2	0,4	0,52%	-2,4	-3,21%	-2,80	-3,74%
I2Y3	0,2	0,24%	-1,5	-1,83%	-1,70	-2,07%
I2Y4	0,3	0,47%	-1,5	-2,41%	-1,80	-2,89%
I3Y1	0,4	0,42%	-2,0	-2,17%	-2,40	-2,60%
I3Y2	0,4	0,54%	-2,0	-2,77%	-2,40	-3,33%
I3Y3	0,3	0,36%	-1,2	-1,49%	-1,50	-1,86%
I3Y4	0,3	0,48%	-1,2	-1,97%	-1,50	-2,46%
I4Y1	0,4	0,43%	-1,9	-2,09%	-2,30	-2,52%
I4Y2	-0,5	-0,69%	-1,9	-2,67%	-1,40	-1,97%
I4Y3	0,1	0,12%	-1,1	-1,28%	-1,20	-1,40%
I4Y4	0,3	0,49%	-1,2	-1,99%	-1,50	-2,49%

Tabela 4.7 – Diferenças médias da compressão máxima entre dois módulos de Young do enrocamento.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y2}}$	$\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y2} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y2}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}}{\sigma_{Y4}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y3}}{\sigma_{Y4}}$
Média	-18,8	-26,42%	-20,3	-27,23%	-20,5	-35,02%	-21,3	-34,17%
Desvio Padrão	0,3	0,43%	0,3	0,81%	2,0	3,33%	2,5	4,47%

Tabela 4.8 – Diferenças médias da compressão máxima entre dois módulos de Young na fundação.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y3}}$	$\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y3} - \sigma_{Y1}}{\sigma_{Y3}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}}{\sigma_{Y4}}$	$\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{Y4} - \sigma_{Y2}}{\sigma_{Y4}}$
Média	-10,9	-13,93%	-11,3	-13,60%	-12,6	-21,60%	-12,3	-19,68%
Desvio Padrão	2,3	3,24%	3,3	4,08%	0,3	0,74%	1,0	1,28%

Os módulos do enrocamento podem ser parcialmente controlados na obra, a partir da classificação granulométrica e da energia de compactação e se trata da maior influência nos esforços da laje. Quanto melhores forem os critérios para o maciço de enrocamento, menores são os esforços transmitidos na laje, que no caso destas simulações a redução é de 30%. Os

módulos da fundação já não podem ser controlados no processo construtivo e na fundação mais rígida os esforços diminuem 16% nestas simulações.

A parametrização da geometria de injeção possui dois arranjos no com ou sem injeção na crista e dois na sua profundidade (Tabela 3.2). A Tabela 4.9 mostra as diferenças na compressão máxima na laje com ou sem injeção na crista da barragem e a Tabela 4.10 com as diferenças entre as profundidades da injeção. Com ou sem força de percolação os valores são muito baixos. O termo σ_{Ii} significa o valor de compressão máxima na direção yy na laje do arranjo de injeções Ii.

Tabela 4.9 – Diferenças médias da compressão máxima com ou sem injeção na crista.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{I2} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I2} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I2}}$	$\sigma_{I2} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I2} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I2}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I3}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I3}}{\sigma_{I4}}$
Média	0,1	0,15%	-0,1	-0,07%	1,0	0,82%	0,4	0,16%
Desvio Padrão	0,3	0,41%	0,3	0,32%	2,1	2,16%	2,7	2,64%

Tabela 4.10 – Diferenças médias da compressão máxima entre duas profundidades da injeção.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\sigma_{I3} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I3} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I3}}$	$\sigma_{I3} - \sigma_{I1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I3} - \sigma_{I1}}{\sigma_{I3}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$	$\sigma_{I4} - \sigma_{I2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{I4} - \sigma_{I2}}{\sigma_{I4}}$
Média	0,5	0,70%	-2,4	-3,02%	1,4	1,77%	-1,9	-2,62%
Desvio Padrão	0,4	0,68%	0,9	0,81%	2,3	2,77%	3,3	4,00%

Por fim a parametrização das permeabilidades, variando as diferenças entre as permeabilidades da ombreira e da fundação abaixo da injeção em três arranjos (Tabela 3.5). Sendo o arranjo P1 com pequena diferença, P2 com grande diferença e P3 com fundação homogênea. A Tabela 4.11 mostra as diferenças na compressão entre os três, com força de percolação, os resultados são muito pequenos, menos de dois por cento na média. Como se trata de variações dos parâmetros de permeabilidade, as diferenças sem a força de percolação são todas iguais a zero e por isso não foram mostradas. O termo σ_{Pi} significa o valor de compressão máxima na direção yy na laje do arranjo de permeabilidades Pi.

Tabela 4.11 – Diferenças médias da compressão máxima entre três permeabilidades.

	$\sigma_{P2} - \sigma_{P1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{P2} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P2}}$	$\sigma_{P3} - \sigma_{P1}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{P3} - \sigma_{P1}}{\sigma_{P3}}$	$\sigma_{P3} - \sigma_{P2}$ (MPa)	$\frac{\sigma_{P3} - \sigma_{P2}}{\sigma_{P3}}$
Média	0,3	0,33%	-1,8	-2,31%	-2,05	-2,65%
Desvio Padrão	0,2	0,30%	0,5	0,57%	0,60	0,68%

A Tabela 4.12 mostra uma síntese dos resultados, com as médias e desvios padrão das diferenças, em porcentagem. O título “enrocamento” significam para os resultados percentuais

da diferença entre a compressão máxima na direção yy entre os arranjos que variam os parâmetros do enrocamento e assim por diante.

Tabela 4.12 – Síntese das médias e desvios das diferenças da compressão na direção yy.

	Enrocamento		Fundação		Crista		Profundidade		Permeabilidade	
	Sem FP	Com FP	Sem FP	Com FP	Sem FP	Com FP	Sem FP	Com FP	Sem FP	Com FP
Média	-30,72%	-30,70%	-17,77%	-16,64%	0,48%	0,04%	1,23%	-2,82%	0,00%	-1,55%
Desvio	4,97%	4,74%	4,54%	4,29%	1,56%	1,84%	2,05%	2,83%	0,00%	1,45%

4.6.2 ABERTURAS MÁXIMAS DAS JUNTAS

O segundo estudo de influência das variações de geometria e de parâmetros é feita a partir das diferenças entre a abertura máxima das juntas entre as faixas de lajes. As tabelas são montadas seguindo o mesmo padrão do Item 4.6.1.

As Tabela 4.13 e Tabela 4.14 apresentam as diferenças absolutas e percentuais de abertura máxima das juntas entre as simulações com a variação nos módulos de Young do enrocamento e da fundação, respectivamente. A nomenclatura dos arranjos é mostrada na Tabela 3.4.

As Tabela 4.15 e Tabela 4.16 mostram as diferenças absolutas e percentuais de abertura máxima das juntas entre as simulações com a presença ou não de injeção da crista e com variação na profundidade da injeção, respectivamente. A nomenclatura dos arranjos é mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 4.13 – Diferença da abertura máxima das juntas entre módulos de Young do enrocamento.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{Y2} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y2} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y2}}$	$\delta_{Y2} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y2} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y2}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y3}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y3}}{\delta_{Y4}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y3}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y3}}{\delta_{Y4}}$
P111	-1.3	-16.88%	-1.4	-14.43%	-1.3	-17.57%	-1.2	-13.64%
P112	-1.1	-14.47%	-1.2	-12.63%	-1.1	-15.49%	-1.3	-15.66%
P113	-1.0	-13.70%	-1.7	-16.50%	-1.2	-16.67%	-1.9	-20.21%
P114	-1.1	-14.86%	-1.8	-17.31%	-1.3	-17.81%	-1.9	-19.79%
P211	-1.2	-15.38%	-1.4	-14.58%	-1.3	-17.57%	-1.2	-13.79%
P212	-1.1	-14.47%	-1.1	-11.70%	-1.1	-15.49%	-1.2	-14.46%
P213	-1.0	-13.70%	-1.6	-15.69%	-1.3	-18.31%	-1.8	-19.15%
P214	-1.1	-14.86%	-1.8	-17.48%	-1.3	-17.81%	-1.9	-20.00%
P311	-1.2	-15.38%	-1.6	-15.69%	-1.3	-17.57%	-1.5	-16.30%
P312	-1.1	-14.47%	-1.5	-15.15%	-1.1	-15.49%	-1.5	-17.05%
P313	-1.0	-13.70%	-1.9	-18.27%	-1.2	-16.67%	-2	-20.83%
P314	-1.1	-14.86%	-2.0	-19.05%	-1.3	-17.81%	-2	-20.62%

Tabela 4.14 – Diferença da abertura máxima das juntas entre módulos de Young na fundação.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{Y3} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y3} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y3}}$	$\delta_{Y3} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y3} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y3}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y2}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y2}}{\delta_{Y4}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y2}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y2}}{\delta_{Y4}}$
P1I1	-0.3	-3.45%	-1.1	-11.00%	-0.3	-4.05%	-0.9	-10.23%
P1I2	-0.5	-6.10%	-1.1	-11.46%	-0.5	-7.04%	-1.2	-14.46%
P1I3	0.1	1.19%	-0.7	-6.19%	-0.1	-1.39%	-0.9	-9.57%
P1I4	0.1	1.16%	-0.7	-6.09%	-0.1	-1.37%	-0.8	-8.33%
P2I1	-0.3	-3.45%	-1.1	-11.11%	-0.4	-5.41%	-0.9	-10.34%
P2I2	-0.5	-6.10%	-1.0	-10.53%	-0.5	-7.04%	-1.1	-13.25%
P2I3	0.1	1.19%	-0.6	-5.36%	-0.2	-2.82%	-0.8	-8.51%
P2I4	0.1	1.16%	-0.7	-6.14%	-0.1	-1.37%	-0.8	-8.42%
P3I1	-0.3	-3.45%	-1.1	-10.28%	-0.4	-5.41%	-1.0	-10.87%
P3I2	-0.5	-6.10%	-1.1	-10.68%	-0.5	-7.04%	-1.1	-12.50%
P3I3	0.1	1.19%	-0.7	-6.03%	-0.1	-1.39%	-0.8	-8.33%
P3I4	0.1	1.16%	-0.8	-6.84%	-0.1	-1.37%	-0.8	-8.25%

Tabela 4.15 – Diferença da abertura máxima das juntas com ou sem injeção na crista.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{I2} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	$\delta_{I2} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I3}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I3}}{\delta_{I4}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I3}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I3}}{\delta_{I4}}$
P1Y1	-0.3	-3.45%	-0.4	-3.74%	0.2	2.35%	0.2	1.64%
P1Y2	-0.1	-1.32%	-0.2	-2.11%	0.1	1.35%	0.1	0.96%
P1Y3	-0.5	-6.10%	-0.4	-4.17%	0.2	2.33%	0.2	1.74%
P1Y4	-0.3	-4.23%	-0.5	-6.02%	0.1	1.37%	0.2	2.08%
P2Y1	-0.3	-3.45%	-0.5	-4.76%	0.2	2.35%	0.3	2.48%
P2Y2	-0.2	-2.63%	-0.2	-2.13%	0.1	1.35%	0.1	0.97%
P2Y3	-0.5	-6.10%	-0.4	-4.21%	0.2	2.33%	0.2	1.75%
P2Y4	-0.3	-4.23%	-0.4	-4.82%	0.2	2.74%	0.1	1.05%
P3Y1	-0.3	-3.45%	-0.4	-3.51%	0.2	0.00%	0.2	0.00%
P3Y2	-0.2	-2.63%	-0.3	-3.03%	0.1	0.00%	0.1	0.00%
P3Y3	-0.5	-6.10%	-0.4	-3.88%	0.2	0.00%	0.1	0.00%
P3Y4	-0.3	-4.23%	-0.4	-4.55%	0.1	0.00%	0.1	0.00%

Tabela 4.16 – Diferença da abertura máxima das juntas entre duas profundidades da injeção.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{I3} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	$\delta_{I3} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I2}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I2}}{\delta_{I4}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I2}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I2}}{\delta_{I4}}$
P1Y1	-0.7	-8.43%	0.9	7.50%	-0.2	-2.35%	1.5	12.30%
P1Y2	-0.4	-5.48%	0.6	5.83%	-0.2	-2.70%	0.9	8.65%
P1Y3	-0.3	-3.57%	1.3	11.50%	0.4	4.65%	1.9	16.52%
P1Y4	-0.2	-2.78%	0.6	6.38%	0.2	2.74%	1.3	13.54%
P2Y1	-0.7	-8.43%	0.8	6.78%	-0.2	-2.35%	1.6	13.22%
P2Y2	-0.5	-6.85%	0.6	5.88%	-0.2	-2.70%	0.9	8.74%
P2Y3	-0.3	-3.57%	1.3	11.61%	0.4	4.65%	1.9	16.67%
P2Y4	-0.3	-4.23%	0.7	7.45%	0.2	2.74%	1.2	12.63%
P3Y1	-0.7	-8.43%	0.5	4.07%	-0.2	-2.35%	1.1	8.80%
P3Y2	-0.5	-6.85%	0.2	1.92%	-0.2	-2.70%	0.6	5.71%
P3Y3	-0.3	-3.57%	0.9	7.76%	0.4	4.65%	1.4	11.97%
P3Y4	-0.2	-2.78%	0.4	4.17%	0.2	2.74%	0.9	9.28%

A Tabela 4.17 exibe as diferenças absolutas e percentuais de abertura máxima das juntas da laje entre os arranjos de permeabilidades. As nomenclaturas estão apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 4.17 – Diferença da abertura máxima das juntas entre três permeabilidades.

	$\delta_{P2} - \delta_{P1}$ (cm)	$\frac{\delta_{P2} - \delta_{P1}}{\delta_{P2}}$	$\delta_{P3} - \delta_{P1}$ (cm)	$\frac{\delta_{P3} - \delta_{P1}}{\delta_{P3}}$	$\delta_{P3} - \delta_{P2}$ (cm)	$\frac{\delta_{P3} - \delta_{P2}}{\delta_{P3}}$
I1Y1	-0.1	-0.91%	0.7	5.93%	0.80	6.78%
I1Y2	-0.1	-1.04%	0.5	4.90%	0.60	5.88%
I1Y3	-0.1	-1.01%	0.7	6.54%	0.80	7.48%
I1Y4	-0.1	-1.15%	0.4	4.35%	0.50	5.43%
I2Y1	-0.2	-1.90%	0.7	6.14%	0.90	7.89%
I2Y2	-0.1	-1.06%	0.4	4.04%	0.50	5.05%
I2Y3	-0.1	-1.05%	0.7	6.80%	0.80	7.77%
I2Y4	0.0	0.00%	0.5	5.68%	0.50	5.68%
I3Y1	-0.2	-1.69%	0.3	2.44%	0.50	4.07%
I3Y2	-0.1	-0.98%	0.1	0.96%	0.20	1.92%
I3Y3	-0.1	-0.89%	0.3	2.59%	0.40	3.45%
I3Y4	0.0	0.00%	0.2	2.08%	0.20	2.08%
I4Y1	-0.1	-0.83%	0.3	2.40%	0.40	3.20%
I4Y2	-0.1	-0.97%	0.1	0.95%	0.20	1.90%
I4Y3	-0.1	-0.88%	0.2	1.71%	0.30	2.56%
I4Y4	-0.1	-1.05%	0.1	1.03%	0.20	2.06%

A Tabela 4.18 mostra as diferenças na abertura máxima das juntas entre as variações no módulo de Young do enrocamento, essa variação continua como o fator que mais influencia no comportamento da laje e tem pouco aumento com aplicação das forças de percolação, semelhante ao que foi observado para as tensões máximas de compressão, Tabela 4.7.

Tabela 4.18 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre dois módulos de Young do enrocamento.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{Y2} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y2} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y2}}$	$\delta_{Y2} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y2} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y2}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y3}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y3}}{\delta_{Y4}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y3}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y3}}{\delta_{Y4}}$
Média	-1.1	-14.73%	-1.6	-15.71%	-1.2	-17.02%	-1.6	-17.63%
Desvio Padrão	0.1	0.90%	0.3	2.19%	0.1	1.03%	0.3	2.78%

A Tabela 4.19 mostra as diferenças na abertura máxima das juntas entre as variações do módulo de Young da fundação, importante notar que a aplicação das forças de percolação aumenta significativamente a influência da variação em quase 6%.

Tabela 4.19 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre dois módulos de Young na fundação.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{Y3} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y3} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y3}}$	$\delta_{Y3} - \delta_{Y1}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y3} - \delta_{Y1}}{\delta_{Y3}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y2}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y2}}{\delta_{Y4}}$	$\delta_{Y4} - \delta_{Y2}$ (cm)	$\frac{\delta_{Y4} - \delta_{Y2}}{\delta_{Y4}}$
Média	-0.2	-1.80%	-0.9	-8.48%	-0.3	-3.81%	-0.9	-10.26%
Desvio Padrão	0.3	3.26%	0.2	2.51%	0.2	2.47%	0.1	2.14%

A Tabela 4.20 mostra as diferenças na abertura máxima das juntas na laje com ou sem injeção na crista da barragem e a Tabela 4.21 com as diferenças entre as profundidades da injeção. Nota-se para as profundidades da injeção, a força de percolação muda o comportamento da influência da parametrização, em mais de 10%, na média.

Tabela 4.20 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas com ou sem injeção na crista.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{I2} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	$\delta_{I2} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I2} - \delta_{I1}}{\delta_{I2}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I3}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I3}}{\delta_{I4}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I3}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I3}}{\delta_{I4}}$
Média	-0.3	-3.99%	-0.4	-3.91%	0.2	1.35%	0.2	1.06%
Desvio Padrão	0.1	1.51%	0.1	1.13%	0.1	1.09%	0.1	0.90%

Tabela 4.21 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre duas profundidades da injeção.

	Sem FP		Com FP		Sem FP		Com FP	
	$\delta_{I3} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	$\delta_{I3} - \delta_{I1}$ (cm)	$\frac{\delta_{I3} - \delta_{I1}}{\delta_{I3}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I2}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I2}}{\delta_{I4}}$	$\delta_{I4} - \delta_{I2}$ (cm)	$\frac{\delta_{I4} - \delta_{I2}}{\delta_{I4}}$
Média	-0.4	-5.41%	0.7	6.74%	0.1	0.58%	1.3	11.50%
Desvio Padrão	0.2	2.28%	0.3	2.82%	0.3	3.33%	0.4	3.34%

A Tabela 4.22 mostra as diferenças na abertura das juntas entre os três arranjos de permeabilidade, todos com força de percolação.

Tabela 4.22 – Diferenças médias da abertura máxima das juntas entre três permeabilidades.

	$\delta_{P2} - \delta_{P1}$ (cm)	$\frac{\delta_{P2} - \delta_{P1}}{\delta_{P2}}$	$\delta_{P3} - \delta_{P1}$ (cm)	$\frac{\delta_{P3} - \delta_{P1}}{\delta_{P3}}$	$\delta_{P3} - \delta_{P2}$ (cm)	$\frac{\delta_{P3} - \delta_{P2}}{\delta_{P3}}$
Média	-0.1	-0.96%	0.4	3.66%	0.49	4.58%
Desvio Padrão	0.1	0.47%	0.2	2.13%	0.24	2.20%

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

A metodologia tradicional de dimensionamento do concreto armado da laje é feita com o conceito de faixas isoladas de laje, onde a colocação das juntas de tração e compressão são consideradas suficientes para anular eventuais transferências de esforços entre as faixas. Porém as rupturas por compressão em juntas de lajes foram observadas em de BEFC construídas em vales mais fechados induzem a uma investigação mais atenta dos fenômenos associados aos esforços atuantes.

Os vetores de gradiente da fundação que geram as forças se desenvolvem de forma circular em torno da injeção de fundação e mesmo que ocorra uma compressão do enrocamento, os vetores favoráveis à montante e a pressão do reservatório de aliviam muito os efeitos de compressão sobre a laje de concreto e tendem a aumentar a abertura das juntas entre as faixas da laje.

Com os resultados obtidos na pesquisa, nota-se que as forças de percolação aumentam os esforços de compressão na laje em menos de 10% para os 48 arranjos analisados. Os esforços de compressão excessiva nas juntas centrais das faixas de laje são gerados independentemente das forças de percolação. Já para a abertura das juntas entre as faixas de laje, as forças de percolação induziram um aumento de 12 a 30% no espaçamento entre as faixas, que se não estiverem bem vedadas, pode aumentar significativamente a perda de água do reservatório.

Os resultados mostram que a magnitude dos esforços de compressão entre as faixas centrais da laje, sem juntas para alívio de compressão, pode ser se tornar muito superior à resistência do concreto armado, mesmo sem considerar os efeitos de fluxo pelas ombreiras. A ruptura nessa região deve ser analisada em simulação tridimensional com consideração da laje no modelo, principalmente em vales mais fechados.

A recomendação clássica de projetos de BEFCs é que as juntas centrais estariam submetidas inteiramente à compressão, porém as juntas se abrem em todo perímetro da laje no modelo analisado, portanto é recomendado que a abertura das trincas seja verificada com simulações tridimensionais para barragens construídas em vales fechados. O software utilizado permite a entrada de malhas descontínuas que podem interagir umas com as outras e permitir a compressão, atrito e a abertura da malha. Desta forma é possível estimar os deslocamentos

relativos e especificar os tipos de juntas no projeto por valores realmente calculados por modelos tridimensionais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Verificação da influência da forma do vale para os referidos esforços de compressão, com modelos que variam a inclinação do vale e comparam as diferenças nos esforços resultantes.
- Utilização de modelos constitutivos mais representativos para o material do enrocamento, com plastificação e endurecimento;
- Realizar uma análise mais detalhada em relação a influência das forças de percolação para as tensões adicionais induzidas na laje de concreto.

As dificuldades encontradas para elaboração do trabalho foram principalmente para o cálculo e reaplicação das forças de percolação no modelo, uma vez que é desconhecido qualquer programa que tenha essa ferramenta implementada. A reaplicação das forças de fluxo no Abaqus ® foi implementado forma pouco elegante, até porque não foi encontrado muita documentação sobre o assunto. Por essa razão, houve a decisão de explicar detalhadamente nos apêndices, todas as operações necessárias para montagem das análises. Desta forma é possível uma avaliação crítica na metodologia adotada.

REFERÊNCIAS

- ABNT. (2014). Nbr 6118 - projeto de estruturas de concreto, procedimento. Assoc. Bras. Normas Técnicas.
- ALBERTONI, S.C., XAVIER, L. V., SILVA, L.B., ANTUNES, J., TECEIRA, K.L. & PEREIRA, R.F. (2003). Análises paramétricas em modelos matemáticos 3d das befc campos novos e barra grande. XXV Semin. Nac. Gd. Barragens, Salvador Bahia, 1: 352-363.
- BASSO, R. V. (2007). Estudo tensão-deformação de um enrocamento visando barragens de enrocamento com face de concreto. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 112 p.
- CASARIN, C., SILVEIRA, J.F. & SOUZA, R.J.B. (1994). Barragem de xingó: modelagem numérica e instrumentação. Infogeo 94 - Simpósio Informática em Geotec. São Paulo-SP.
- COOKE, J.B. & SHERARD, J.L. (1987). Concrete face rockfill dam. J. Geotechnical Eng. Div. ASCE, New York, 133 (10): 1113-1132.
- CRUZ, P.T., MATERÓN, B. & FREITAS, M. (2009). Barragens de enrocamento com face de concreto - Concrete face rockfill dam. Oficina de Texto, São Paulo. 448 p.
- FARIAS, M.M. (2015). Notas tomadas na aula da disciplina de métodos numéricos. Universidade Brasília - UnB.
- ICOLD. (2010). Concrete face rockfill dams – concepts for design and construction. Bulletin 141, 408 p.
- ISBN. (1996). Code of practice for falsework. Br. Stand. INSTITUTION, BS 5975, London, 134 p.
- JUSTO, J.L. & SAURA, J. (1981). Behaviour of veneno dam by three-dimensional fe. Proc. 10o Int. Conf. Soil Mech., 3: 449-452.
- MORI, R.T. (1999). Deformações e trincas em barragens de enrocamento com face de concreto. II Simpósio sobre Barragens Enrocamento com Face Concreto, Florianópolis, SC, pp. 27-60.
- NAYLOR, D.J., PANDE, G.N., SIMPON, B. & TABB, R. (1981). Finite element in geotechnical engineering. Pineridge Press.
- PINTO, N.L.S. (2007). Very high cfrd dams – behavior and design features. III Symp. CFRD-Dams Honor. J. Barry Cooke. Florianópolis.
- ROZHKO, A. (2007). Role of seepage forces on hydraulic fracturing and failure patterns (September). 128 p.

- SABOYA, F. (1993). Análise de barragem de enrocamento com face de concreto durante o período de construção e enchimento. DEC/PUC - Rio de Janeiro. 225 p.
- FRUTUOSO, A. (2007). Análises tridimensionais de barragens de enrocamento com face de concreto com objetivo de otimizar os critérios de projeto. Universidade de Brasília. 169 p.
- SIMULIA. (2010). Abaqus analysis user's manual.
- SOBRINHO, J.A., XAVIER, L. V., ALBERTONI, S.C. & PEREIRA, R.F. (2007). Usina hidroelétrica campos novos - barragem de enrocamento com face de concreto - relato do desempenho, ocorrências e recuperação na face da barragem. XXVII Semin. Nac. Gd. Barragens, pp. 1–15.
- XIA, L., XINGZHENG, W., JUNXIA, X. & HANGONG, T. (2001). Three-dimensional stress and displacement analysis of yutiao concrete faced rockfill dam. Second Int. Symposium Flood Defence, Beijing, China.
- ZIENKIEWICZ O. C. (1977). The finite element method. 3a edn. McGraw-Hill, Berkshire, Inglaterra. 787 p.

A – SIMULAÇÃO PILOTO

Serão feitas três simulações, uma de percolação e duas de tensão-deformação. A primeira modelagem numérica é chamada piloto, de tensão-deformação, montada para que se obtenha o arquivo de texto de entrada com o enchimento da barragem e uma força piloto que será substituída pelas forças de percolação.

A segunda simulação é de fluxo, montada a partir da análise piloto, com retirada do concreto e modificações sutis para obtenção das velocidades de fluxo pela fundação em cada nó multiplicada pelo volume do elemento integrado para cada nó.

A terceira modelagem numérica é feita com a adição das forças de percolação no documento de texto de entrada da simulação piloto.

Os procedimentos apresentados são simplificados, baseando-se principalmente na inserção de dados através do “Menu principal” e na caixa de seleção dos vários “Módulos” que estão destacados na Figura A.1. O menu muda para cada seleção de módulo, o apêndice segue a ordem como apresentada no programa.

A geometria do problema foi apresentada no Item 3.2. O presente apêndice não descreve a metodologia de desenho da geometria, mas no caso foi importada em formato “.sat”, formato exportado do desenho tridimensional dos sólidos no programa AutoCAD.

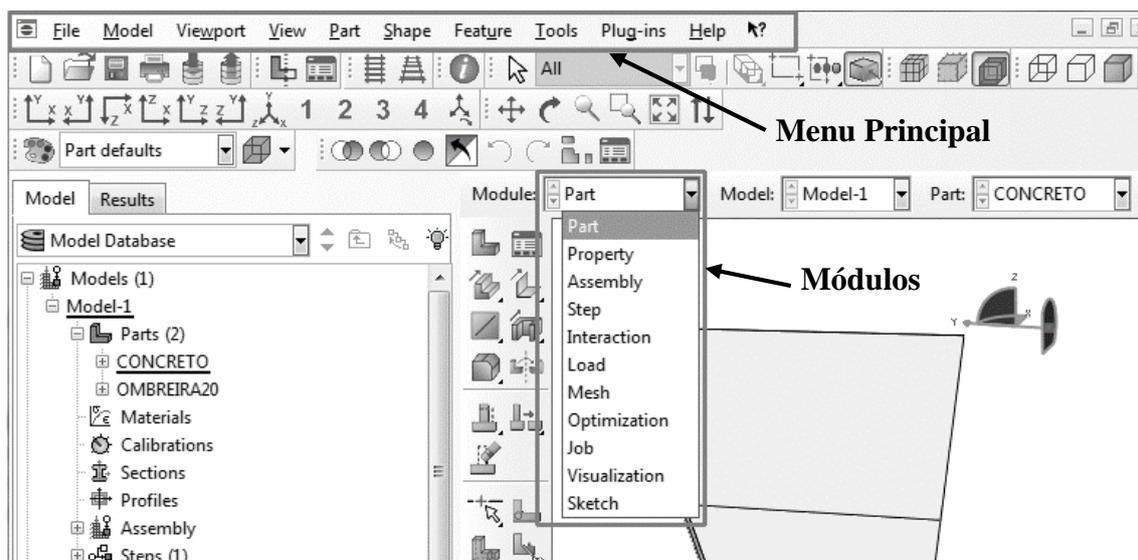


Figura A.1 - Interface do Abaqus ® com destaque no menu principal e na caixa de seleção dos módulos de trabalho.

Os primeiros passos é abrir o programa Abaqus ®, dizer qual a pasta de trabalho e salvar o documento com um nome, no caso “PILOTO.cae”:

File, Set Work Directory..., seleciona a pasta onde serão salvos os arquivos de trabalho.

File, Save e salva o arquivo na mesma pasta, no caso com o nome “PILOTO.cae”.

A.1 Módulo *PART*

O módulo de partes geométricas apresenta as ferramentas para importação e configuração da geometria, definição de conjuntos geométricos, superfícies, entre outras coisas. Na caixa de seleção de módulos: ***Part***.

A.1.1 Importação da geometria

A geometria é importada com as partes de concreto separadas uma das outras e uma das outras, como mostrado na Figura 3.17. A parte da fundação inclui a injeção e o maciço de enrocamento. A importação da geometria é feita independente com o seguinte procedimento:

File, Import, Part..., importar a geometria da fundação, no caso “FUNDACAO.sat”.

File, Import, Part..., importa a geometria do plinto, no caso “PLINTO.sat”.

File, Import, Part..., importa a geometria da primeira fatia de laje, no caso “LAJE1.sat”.

File, Import, Part..., importa a geometria da segunda fatia de laje, no caso “LAJE2.sat”.

Assim por diante, até última fatia de laje. Para as importações das partes, importante marcar as opções: ***Combine into single parts*** e ***Retain intersecting boundaries (for solids)***, Figura A.2.

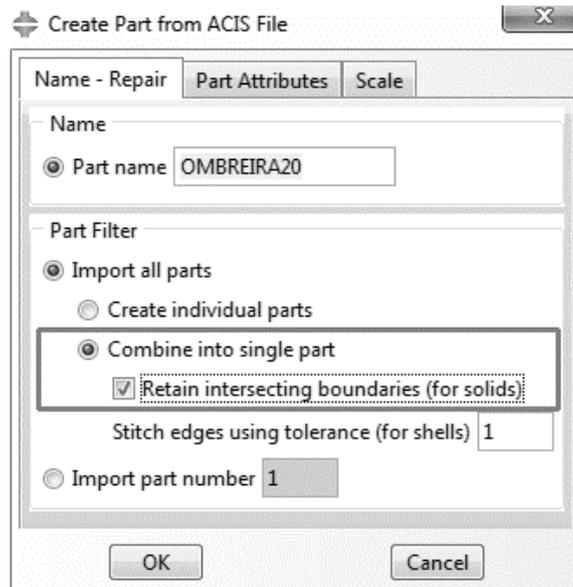


Figura A.2 – Configuração para importação das partes geométricas.

Abrindo a opção **Part, Manager...**, podemos visualizar todas as partes que foram importadas. Figura A.3.

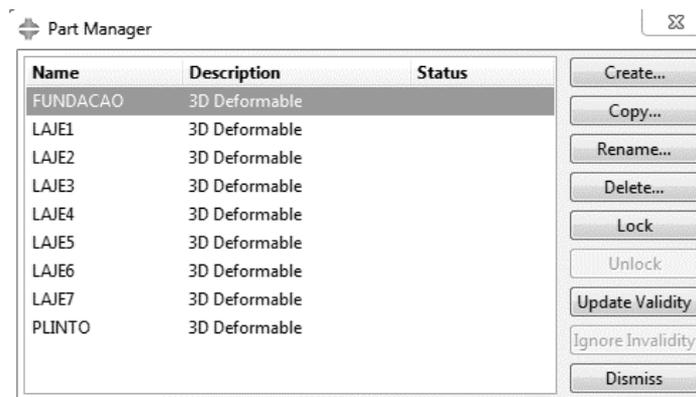


Figura A.3 – Partes da geometria importadas para o Abaqus ®.

A partir de agora, a seleção das partes será feita pela caixa de seleção localizada logo acima da janela de navegação, Figura A.4. Selecionando a “FUNDAÇÃO” aparece a imagem da mesma na janela de navegação, Figura A.5.

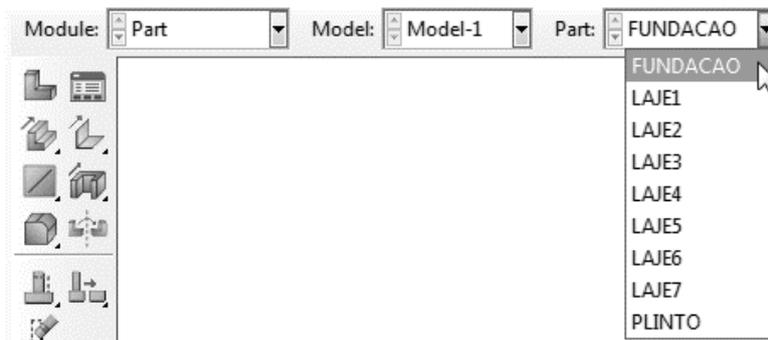


Figura A.4 – Caixa de seleção das partes.

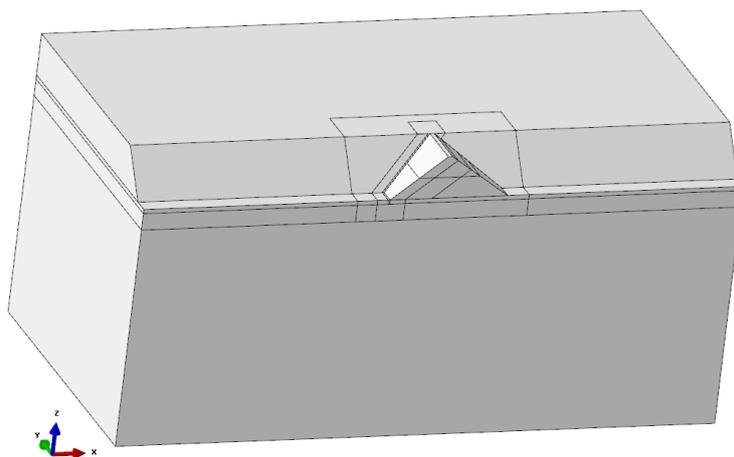


Figura A.5 – Parte da fundação

A.1.2 Superfícies de Contato: Fundação

A definição é feita com o módulo **Part** selecionado.

Com a parte “FUNDACAO” selecionada, criamos as superfícies de contato com o plinto e as faixas da laje:

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-PLINTO”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com a parte “PLINTO” e clica **Done**.

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-LAJE”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com as lajes de concreto e clica **Done**.

A.1.3 Superfícies de Contato: Plinto

Com a parte “PLINTO” selecionada, criamos as superfícies de contato com as partes “FUNDACAO” e as faixas da laje:

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-FUNDACAO”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com a parte “FUNDACAO” e clica **Done**.

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-LAJE”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com as lajes de concreto “LAJE” e clica **Done**.

A.1.4 Superfícies de Contato: Lajes

Com a parte “LAJE1” selecionada, criamos as superfícies de contato com a parte “PLINTO”, a “FUNDACAO” e sua faixa de laje adjacente, no caso “LAJE2”:

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-FUNDACAO”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com a parte “FUNDACAO” e clica **Done**.

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-PLINTO”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com a parte “PLINTO” e clica **Done**.

Tools, Surface, Create..., no caso “Surf-LAJE2”, **Continue...**, seleciona a superfície de contato com a parte “LAJE2” e clica **Done**.

Podemos visualizar todas as partes que foram importadas. Figura A.6.

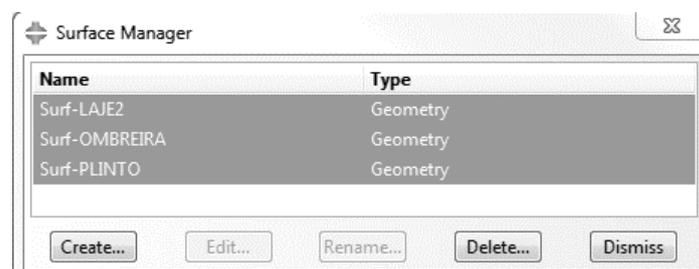


Figura A.6 – Superfícies de contato definidas na parte “LAJE1”.

Com a parte “LAJE2” selecionada, criamos as superfícies de contato com a parte “PLINTO”, a “FUNDACAO” e suas faixas de lajes adjacentes, no caso “LAJE1” e “LAJE3”, depois para as demais faixas de laje até que todas as superfícies estejam definidas.

A.1.5 SETS para Condições de Contorno

Serão definidos *sets* para aplicação da poropressão de montante e de jusante. “Set-MONTANTE” e “Set-JUSANTE”, (Figura A.7 e Figura A.8) respectivamente. **Tools, Set, Create...**

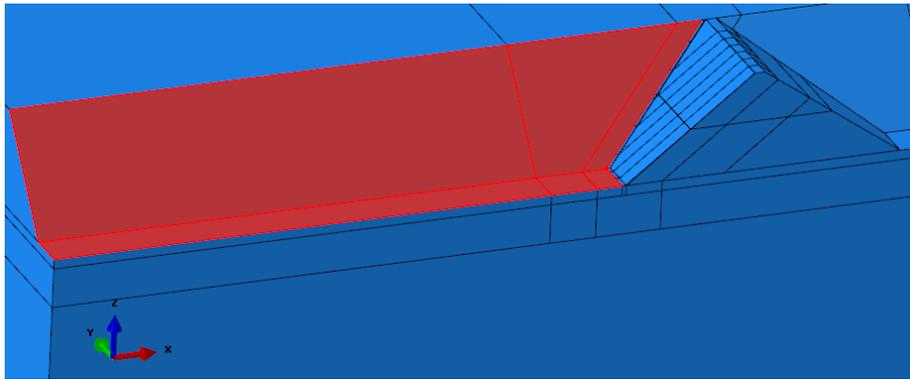


Figura A.7 – Set-MONTANTE

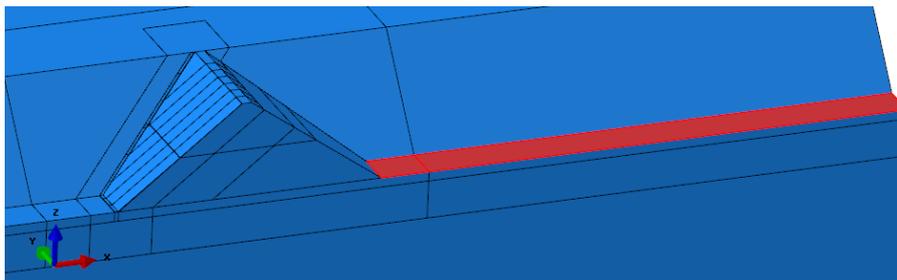


Figura A.8 – Set-JUSANTE

A.1.6 SETS Totais

Para cada parte importada, será definida um *set* para formação da malha, colocação dos materiais, entre outras funções. O procedimento é o mesmo para todas as partes.

Tools, Set, Create..., adicionar o nome, no caso “Set-TOTAL”, **Continue...** seleciona toda a geometria e **Done**.

Embora o nome seja o mesmo “Set-TOTAL”, o caminho para acessar cada um dos *sets* é feito automaticamente com o nome da parte antes, por exemplo: “FUNDACAO.Set-TOTAL”.

A.1.7 SETS de Fixação das Lajes

A fixação das lajes no modelo será feita a partir de linhas que estejam “grudadas” na malha da “FUNDACAO” com contato do tipo *Tie*, esta conexão faz com que as partes se movam juntas onde está definida. Estas linhas serão definidas com um offset de 20m em relação ao plinto (Figura 3.13), definidas na parte inferior das lajes com o nome “Set-TIE” (Figura 3.22).

Tools, Set, Create..., no caso “Set-TIE”, **Continue...**, a linha como nas Figura A.9 e Figura A.10, depois clica **Done**.

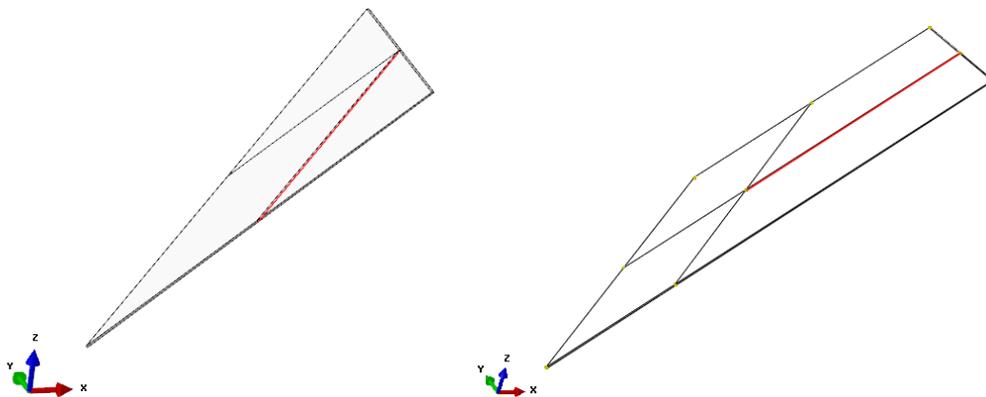


Figura A.9 – Sets para contato do tipo *Tie*, Lajes 1 e 2.

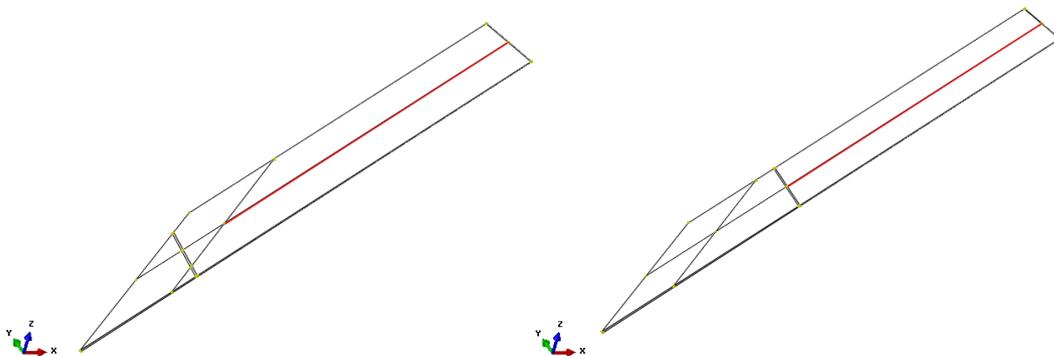


Figura A.10 – Sets para contato do tipo *Tie*, Lajes 3 e 4.

A.1.8 SETS Fundação

No módulo **Part**, na parte “FUNDACAO”, serão definidos os *sets* para a fundação, primeiro com a fundação toda, em um set denominado “Set-FUNDACAO”, depois para cada uma das quatro camadas, o procedimento padrão para criar é o mesmo do item anterior, porém

selecionando somente as partes de interesse. As figuras a seguir apresentam a criação dos *sets* da fundação, primeiro com toda a geometria Figura A.11 e em seguida com os materiais F1, F2, F3 e F4, que correspondem: Figura A.12, Figura A.13, Figura A.14 e Figura A.15, respectivamente.

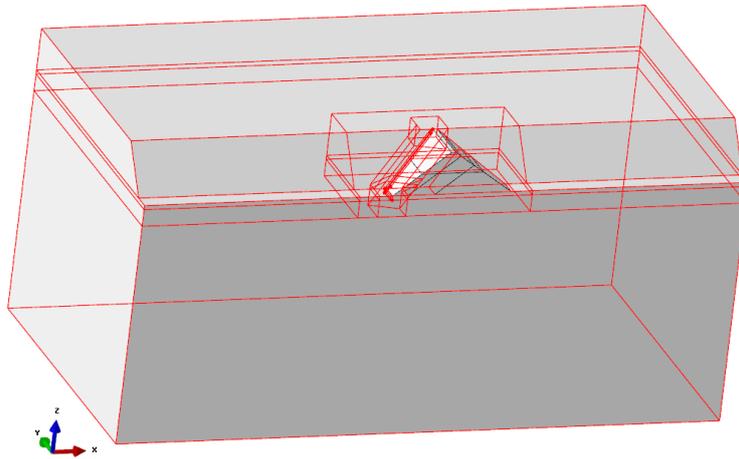


Figura A.11 – Set-FUNDACAO, sem barragem e sem a injeção

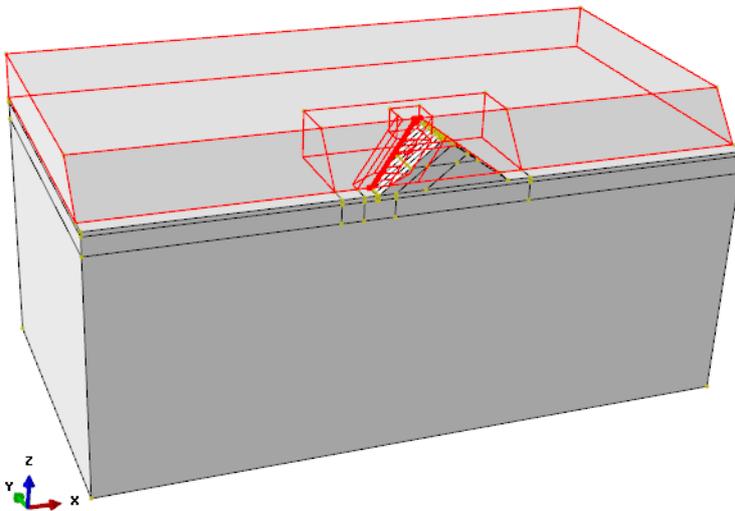


Figura A.12 – Set-F1

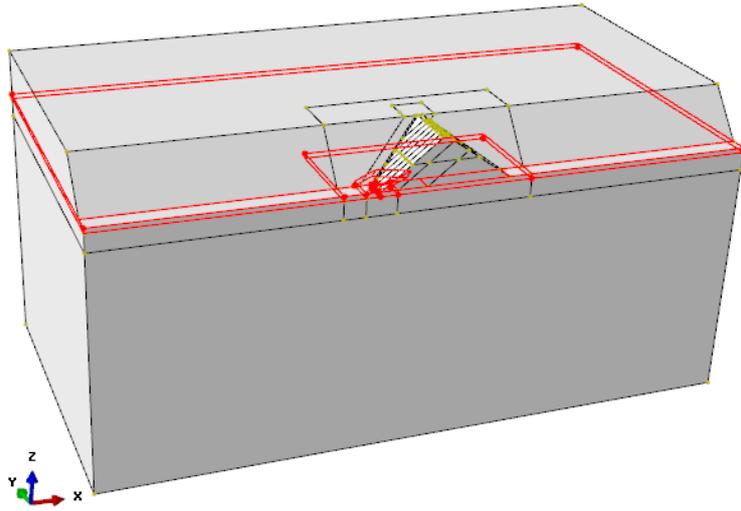


Figura A.13 – Set-F2

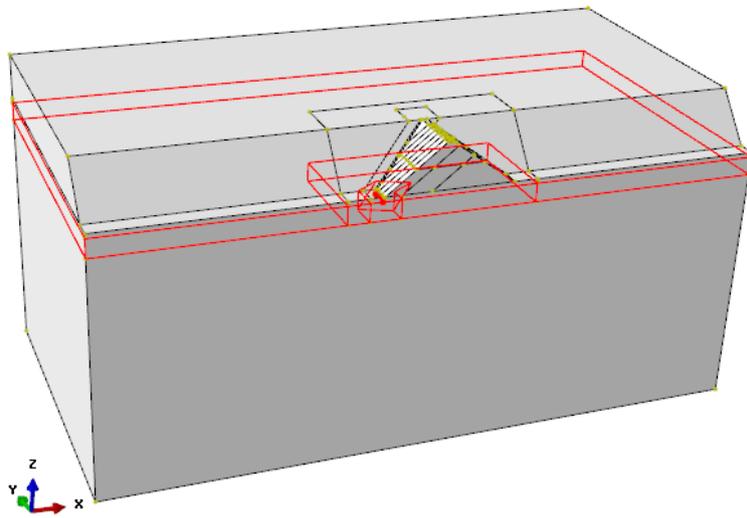


Figura A.14 – Set-F3

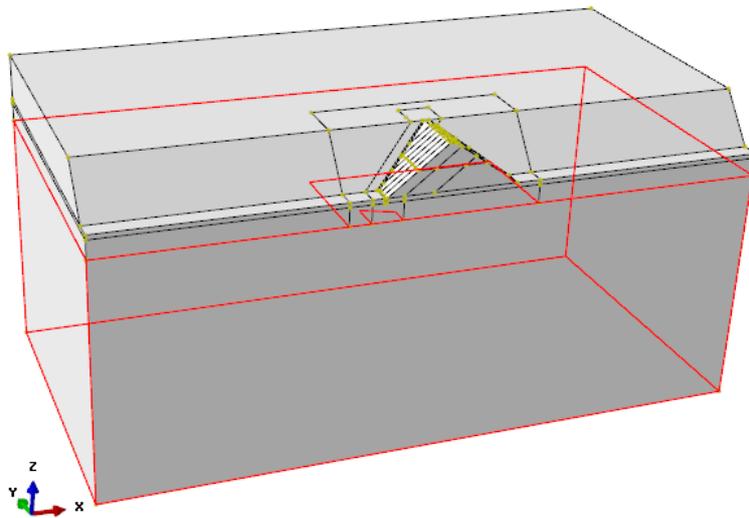


Figura A.15 – Set-F4

A.1.9 SETS Enrocamento

Ainda no módulo **Part**, na parte “FUNDACAO”, serão definidos os *sets* para o enrocamento, primeiro com a barragem toda, em um set denominado “Set-ENROCAMENTO”, depois para cada uma das três camadas. As figuras a seguir apresentam a criação dos *sets* da fundação, primeiro com todo o maciço, “Set-ENROCAMENTO”, e para os materiais E1, E2 e E3 apresentados nas: Figura A.16, Figura A.17 e Figura A.18, respectivamente.

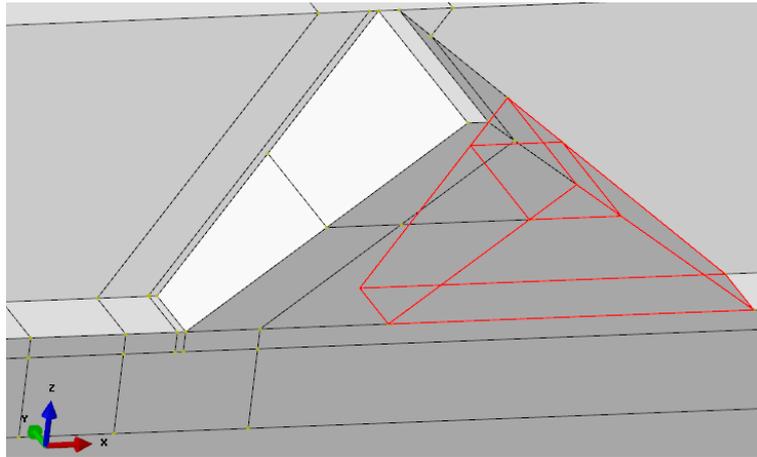


Figura A.16 – Set-E1

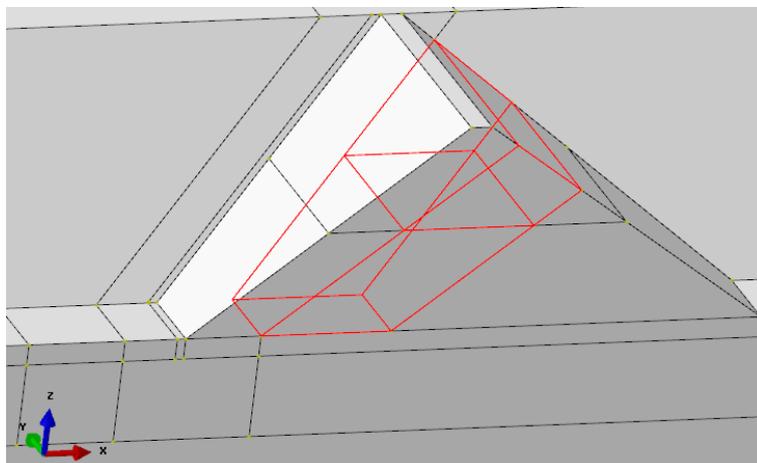


Figura A.17 – Set-E2

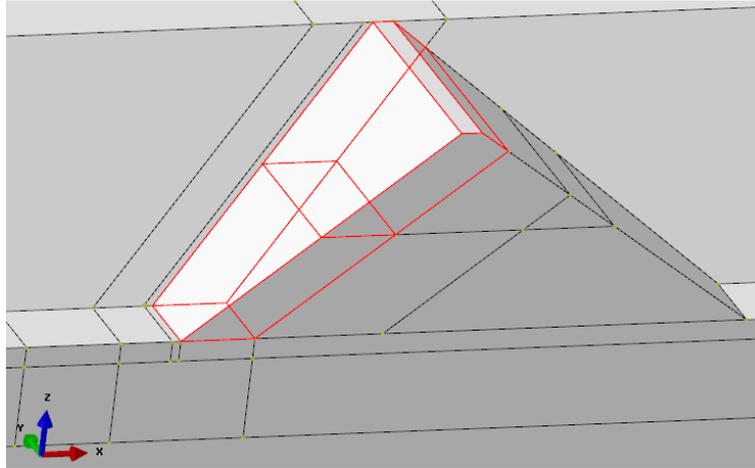


Figura A.18 – Set-E3

A.1.10 SET Piloto

O “Set-PILOTO” será usado para orientar a inserção das forças de percolação. Definido em qualquer ponto da parte “FUNDACAO”, Figura A.19.

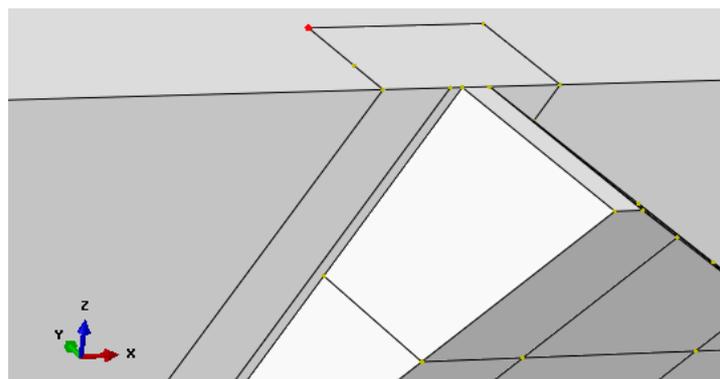


Figura A.19 – Ponto para o Set-PILOTO

A.1.11 SET Injeção

Ainda no módulo **Part**, na parte “FUNDACAO”, será definido o *set* para a injeção, denominado “Set-INJECAO”, conforme Figura A.20.

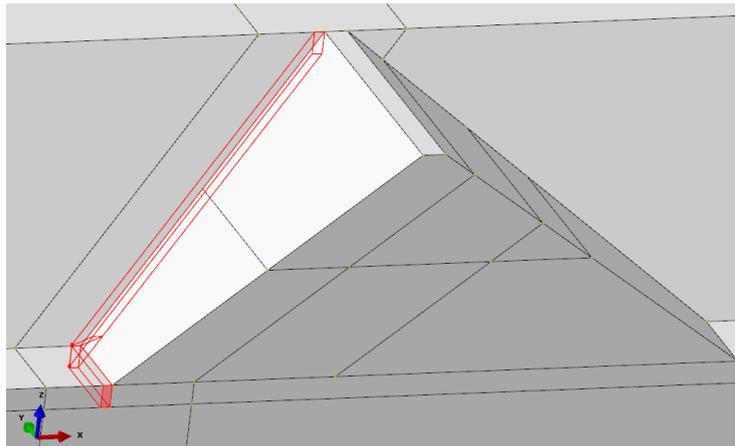


Figura A.20 – Set-INJECAO

Todos os *Sets* inseridos até agora são apresentados na Figura A.21.

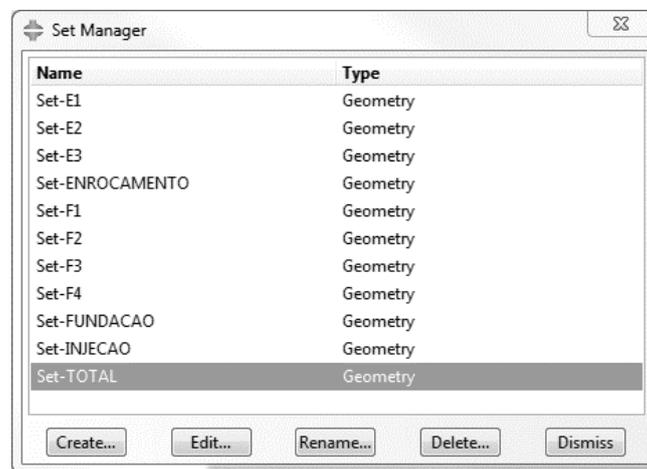


Figura A.21 – *Sets* para a parte “FUNDACAO” definidos até então. **Tools, Set, Create...**

Demais partes serão acrescentadas à medida que as propriedades, materiais, malhas e condições de contorno forem sendo aplicadas no decorrer da montagem da análise.

A.2 Módulo **PROPERTY**

O módulo de propriedades, como o nome já diz, apresenta as ferramentas para definição dos modelos constitutivos, seções geométricas ligadas a rigidez e aplicação dos materiais na geometria. Na caixa de seleção de módulos: **Property**.

A.2.1 Laje e Plinto de Concreto

No módulo **Property**. O material de concreto é único para todas as suas estruturas.

Material, Create..., *name*: “Material-CONCRETO” e criar as propriedades conforme a Tabela A.1, mostrados no Item 3.4.

Tabela A.1 – Propriedades mecânicas do concreto.

Propriedade	Parâmetro	Valor	Unidade SI
General, Density	Mass Density	2500	Kg/m ³
Mechanical, Elastic	Young’s Modulus	25e9	Pa
	Poisson’s Ratio	0.2	-

Para cada material será definido uma seção:

Section, Create..., *name*: “Section-CONCRETO”, manter as opções **Solid, Homogeneous, Continue...**. Selecionar o material “Material-CONCRETO”, **OK**.

A aplicação do material na malha é feita a partir esta seção criada, seguindo o procedimento a seguir. O procedimento é repetido para cada uma das partes “PLINTO” e “LAJE1” até a “LAJE7”.

Section, Assignment Manager..., **Create** selecionar a opção **Sets**, selecionar o “Set-TOTAL”, **Continue...**, selecionar o “Section-CONCRETO”.

A.2.2 Fundação

No módulo **Property**. Para a fundação, será definido um material para um dos quatro *sets*. Os materiais serão definidos a partir de uma cópia de outro já previamente definido, com o seguinte procedimento:

Material, Manager..., **Copy...**, muda o nome e edita as propriedades conforme em **Edit...** conforme a Tabela A.2, como já apresentado nos parâmetros do Item 3.4, referente ao material Y1, para os demais arranjos, basta mudar os valores conforme a Tabela 3.4.

Tabela A.2 – Propriedades mecânicas dos materiais de fundação.

Material	Módulo de Young (Pa)	Densidade (Kg/m ³)	Poisson
Material-F1	120e6	2200	0.25
Material-F2	120e6	2200	0.25
Material-F3	200e6	2200	0.25
Material-F4	200e6	2200	0.25

Da mesma forma, para cada material será definida uma seção, no caso do “Material-F1”:

Section, Create..., name: “Section-F1”, manter as opções **Solid, Homogeneous, Continue...**
Selecionar o material “Material-F1”, **OK**. Assim por diante para os três materiais.

A aplicação do material na malha é feita a partir das seções criadas. Para o “Set-F1” define-se a seção “Section-F1”, assim por diante.

Section, Assignment Manager..., Create selecionar a opção **Sets**, selecionar o “Set-F1”,
Continue..., selecionar o “Section-F1”.

A.2.3 Enrocamento

No módulo **Property**. Para o enrocamento, será definido um material para cada um dos três *sets*. Novamente, os materiais serão definidos a partir de uma cópia de outro já previamente definido, com o seguinte procedimento:

Material, Manager..., Copy..., muda o nome e edita as propriedades conforme em **Edit...** conforme a Tabela A.3, mostrados no Item 3.4, referente ao material Y1, os demais arranjos são motados mudando tais valores conforme a Tabela 3.4.

Tabela A.3 – Propriedades mecânicas dos materiais de enrocamento.

Material	Módulo de Young (Pa)	Densidade (Kg/m³)	Poisson
Material-E1	30e6	2200	0.25
Material-E2	60e6	2200	0.25
Material-E3	90e6	2200	0.25

Da mesma forma, para cada material será definida uma seção, no caso do “Material-E1”:

Section, Create..., name: “Section-E1”, manter as opções **Solid, Homogeneous, Continue...**
Selecionar o material “Material-E1”, **OK**. Assim por diante para os três materiais.

Para o “Set-E1” define-se a seção “Section-E1”, assim por diante.

Section, Assignment Manager..., Create selecionar a opção **Sets**, selecionar o “Set-E1”,
Continue..., selecionar o “Section-E1”.

A.2.4 Injeção

No módulo **Property**. Para a injeção, será definido um material. Seguindo os procedimentos já descritos nos itens anteriores agora com o nome Material-INJECAO, com as seguintes propriedades conforme a Tabela A.4, mostrados no Item 3.4.

Tabela A.4 – Propriedades mecânicas do material de injeção.

Propriedade	Parâmetro	Valor	Unidade SI
General, Density	Mass Density	2200	Kg/m ³
Mechanical, Elastic	Young's Modulus	300e6	Pa
	Poisson's Ratio	0.25	-

A seção para o material é chamada “Section-INJECAO”, que será aplicada no “Set-INJECAO” já previamente definido.

A.3 Módulo ASSEMBLY

O módulo de montagem do modelo possui ferramentas para definir o arranjo geométrico das partes que foram importadas. Como todas as partes já foram desenhadas com suas posições corretas no espaço, a montagem fica simplificada. Na caixa de seleção de módulos: **Assembly**.

Instance, Create..., seleciona todas as partes, seleciona **Independent (mesh on instance)**, **OK**.

Em seguida, posiciona-se o modelo com o cento da crista na origem do sistema, Figura A.22.

Instance, Translate, seleciona todo o modelo, **Done**, clica no meio da crista, tecla **Enter**, **OK**.
Figura A.22.

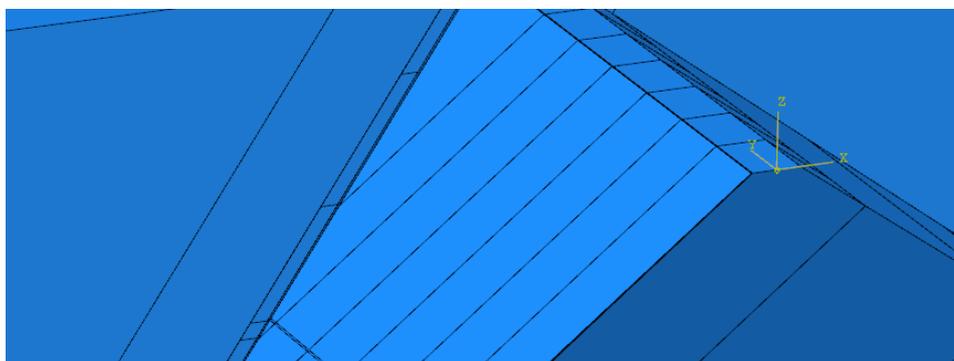


Figura A.22 – Posicionamento do eixo zero.

Os *sets* de montagem permitem que o arranjo seja marcado como um todo, não só por peças individuais. As definições agora correspondem as condições de contorno, forças de corpo que envolvem o modelo como um todo.

A.3.1 SETS Total

O set total da montagem considera todas as partes, incluindo fundação, injeção, plinto e face de concreto.

Tools, Set, Create..., Name: “Set-TOTAL”, Continue..., seleciona tudo e *Done*.

A.3.2 SETS das Condições de Fronteira

Para definição das condições de fronteira do problema, serão feitas restrições de movimento perpendiculares as faces, nas três direções. No caso, a direção x coincide com a direção 1, y com 2 e z com 3. No canto inferior esquerdo das figuras está a marcação dos eixos, então a definição será com os nomes “Set-U1”, “Set-U2” e “Set-U3”, Figura A.23, Figura A.24 e Figura A.25, que correspondem as restrições para os eixos x, y e z, respectivamente. A seguir o procedimento de um deles e as imagens de cada um deles.

Tools, Set, Manager..., Create, Name: “Set-U1”, Continue...

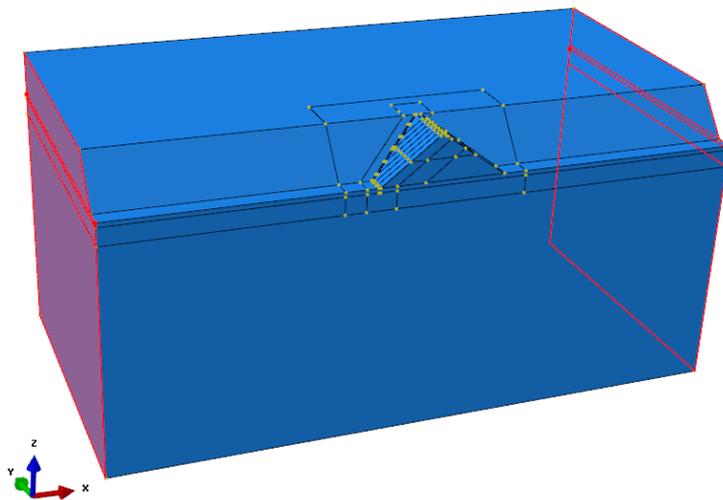


Figura A.23 – Set-U1

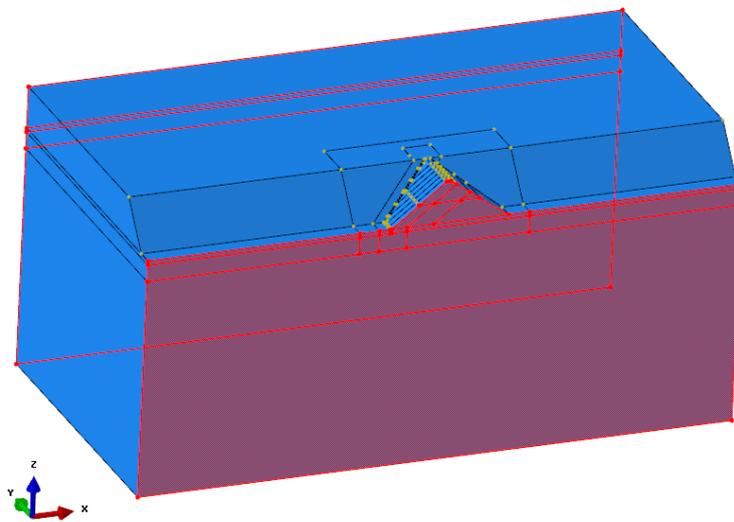


Figura A.24 – Set-U2

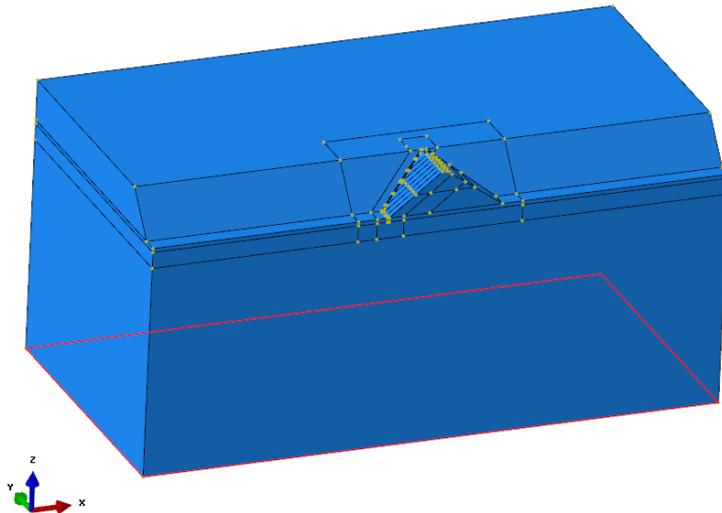


Figura A.25 – Set U3

A.3.3 SET Barragem

O “Set-BARRAGEM” corresponde a todas as estruturas de concreto junto com o enrocamento. Sua definição é feita com o auxílio de a ferramenta chamada *Display Groups*.

Tools, Display Group, Create..., Part/Model Instances, seleciona todos menos “FUNDAÇÃO-1”, **Intersect**.

Ainda com a janela aberta, selecionar **Sets**, “FUNDACAO-1.Set-ENROCAMENTO”, **Add**.
Figura A.26.

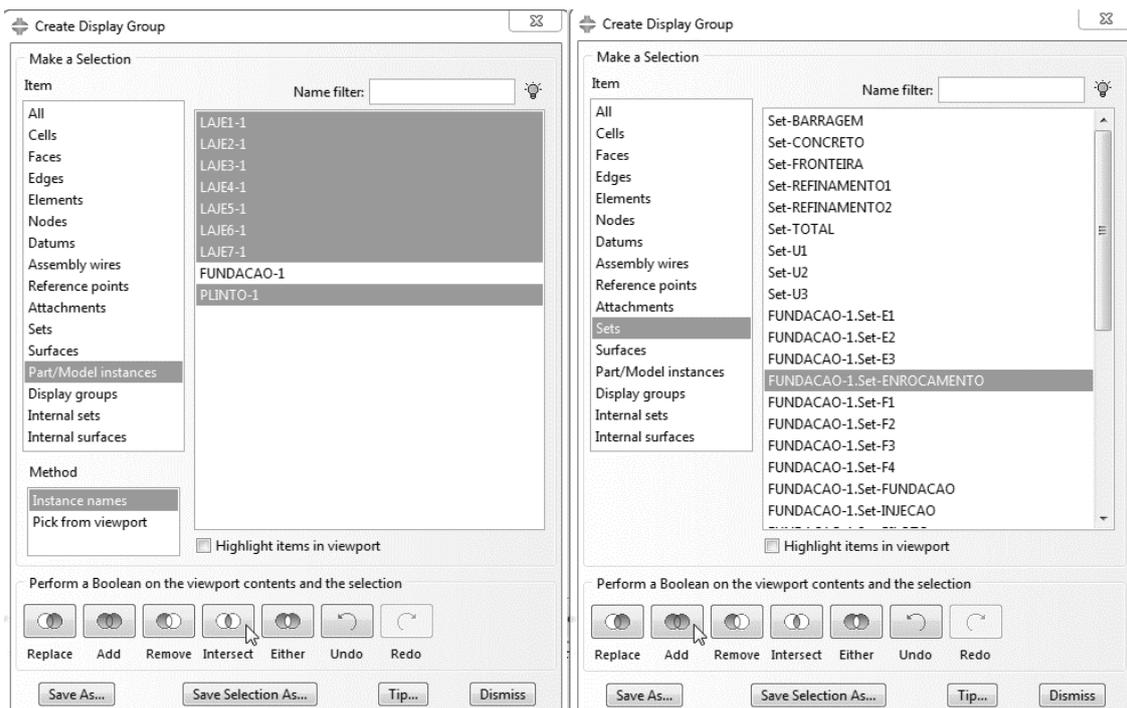


Figura A.26 – Separar a o material de enrocamento.

Tools, Set, Manager..., Create, Name: “Set-BARRAGEM”, Continue..., seleciona tudo, *Done.*

Figura A.27.

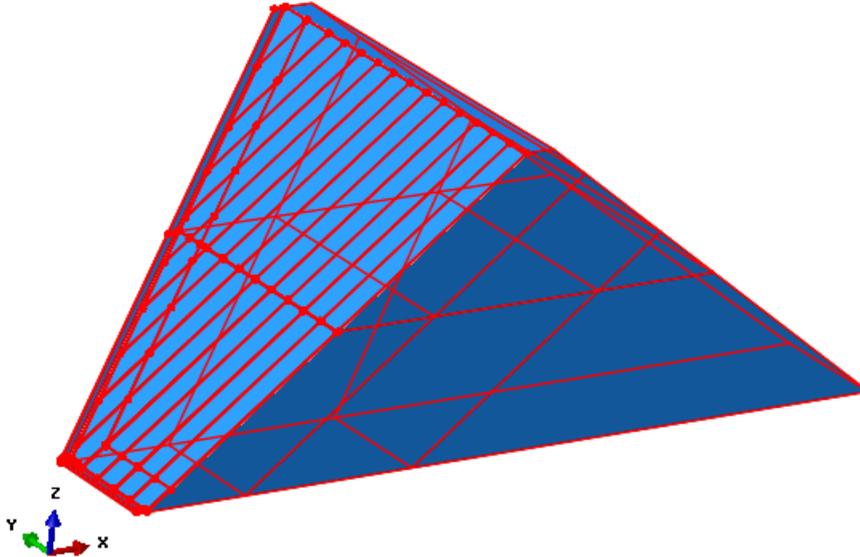


Figura A.27 – Set-BARRAGEM

Depois retorna à visualização completa com:

Tool, Display Group, Plot, “All”.

A.3.4 SET de Refinamento da Fundação

Três *sets* são adicionados para ajudar no refinamento da malha, o primeiro definido no domínio externo na Figura A.28, Do bloco 2 para o refinamento da malha Figura A.29 e do bloco 1 para o refinamento da malha Figura A.30.

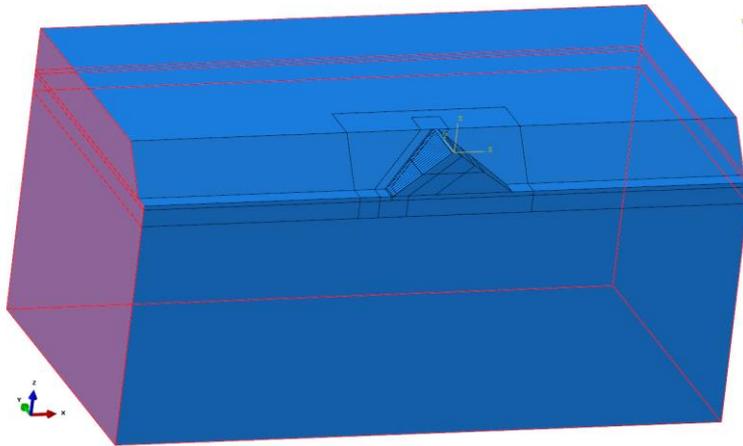


Figura A.28 – Set-FRONTEIRA

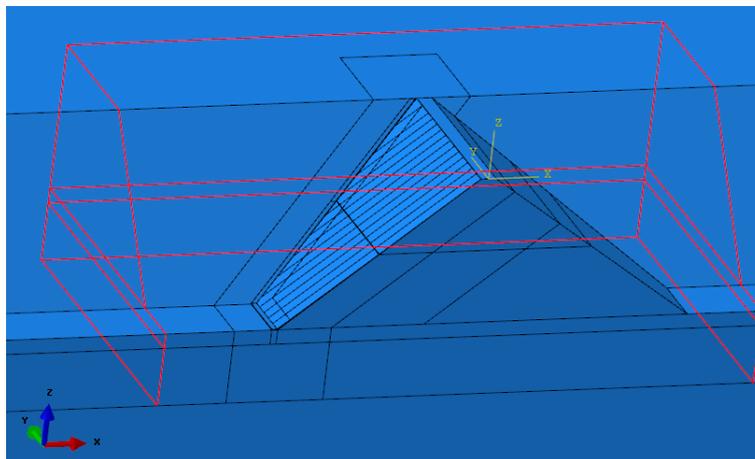


Figura A.29 – Set-REFINAMENTO1 (Bloco 2 do refinamento da malha)

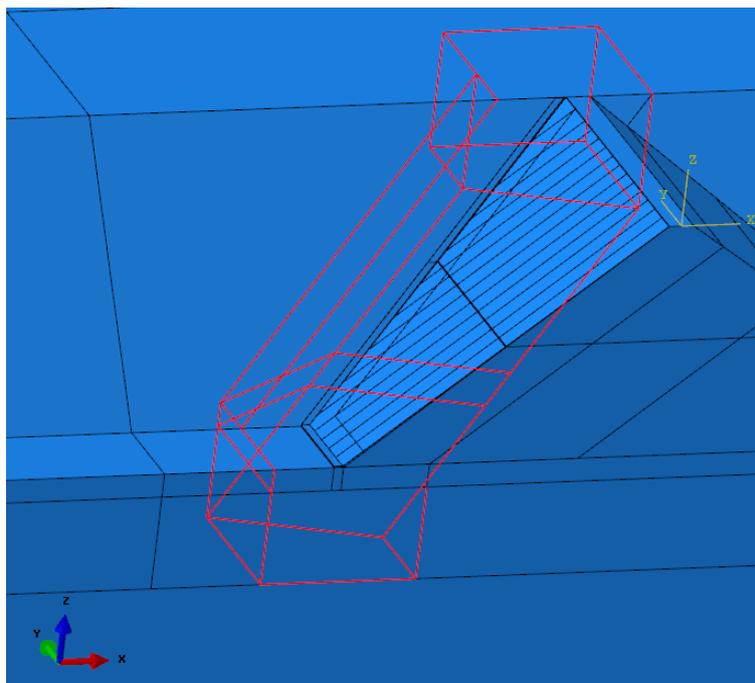


Figura A.30 – Set-REFINAMENTO2 (Bloco 1 de refinamento da malha)

A.3.5 SET Concreto

Como as estruturas de concreto foram importadas como elementos separados, um *set* será criado para auxiliar na seleção posterior para fase de refinamento da malha, com o nome “Set-CONCRETO”, selecionando todas as lajes e o plinto, criado com o auxílio da ferramenta *Display Group*.

Tools, Display Group, Create..., Part/Model Instances, seleciona todos menos “FUNDAÇÃO-1”, **Intersect**.

Em seguida, cria-se o *set*:

Tools, Set, Manager..., Create, Name: “Set-CONCRETO”, Continue..., seleciona todas as lajes e plinto, **Done**.

Para retornar à visualização completa:

Tools, Display Group, Plot, “All”.

A.3.6 Superfícies para Condições de Contorno

Mais uma superfície deve ser definida, para aplicação do peso do reservatório, “Set-RESERVATÓRIO”, **Tools, Surfaces, Create...**, Figura A.31.

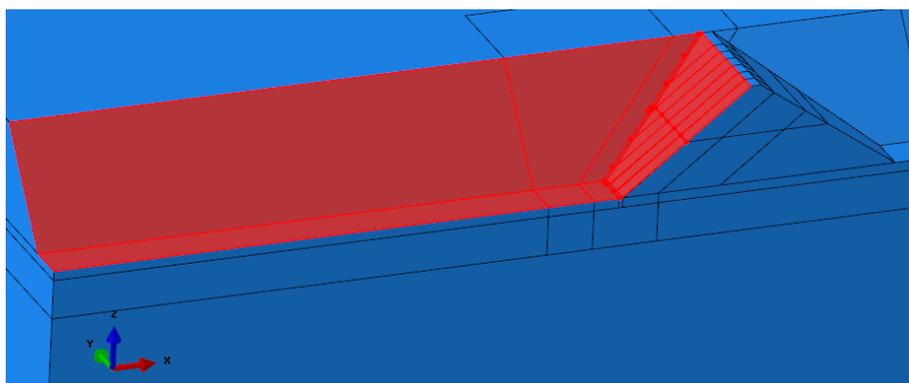


Figura A.31 – Set-RESERVATÓRIO

A.4 Módulo STEP

Neste módulo, são definidos os passos de análise. Na caixa de seleção de módulos: **Step**.

A.4.1 Passo da Análise Piloto

O passo inicial ou “initial” é pré-definido por padrão. Os demais passos são definidos com o procedimento descrito a seguir, todos do tipo *Static General*.

Step, Manager...

Create..., Name: “Step-RESERVATORIO”, *Static, General, Continue... OK.*

Create..., Name: “Step-PERCOLACAO”, *Static, General, Continue... OK.*

A.5 Módulo *INTERACTION*

O módulo que possui as ferramentas para definição das interfaces, no caso entre as faixas da laje, o plinto, a injeção e enrocamento. Na caixa de seleção de módulos: *Interaction*.

A.5.1 Propriedade de Interface

Ainda no “PLINTO”, deve-se definir a interação para cada uma das faixas de laje, agora com a definição de propriedades de interface. No caso será colocada somente

Interaction, Property, Create..., Name: “IntProp-CONCRETO” e criar as propriedades conforme a Tabela A.5.

Tabela A.5 – Propriedades de interface.

Propriedade	Parâmetro	Valor	Unidade SI
<i>Mechanical/Tangential Behavior</i>	Penalty	0.5	-
<i>Friction Formulation</i>			
<i>Mechanical/Normal Behavior</i>	“Hard” Contact/Default	-	-

A.5.2 Plinto/Fundação

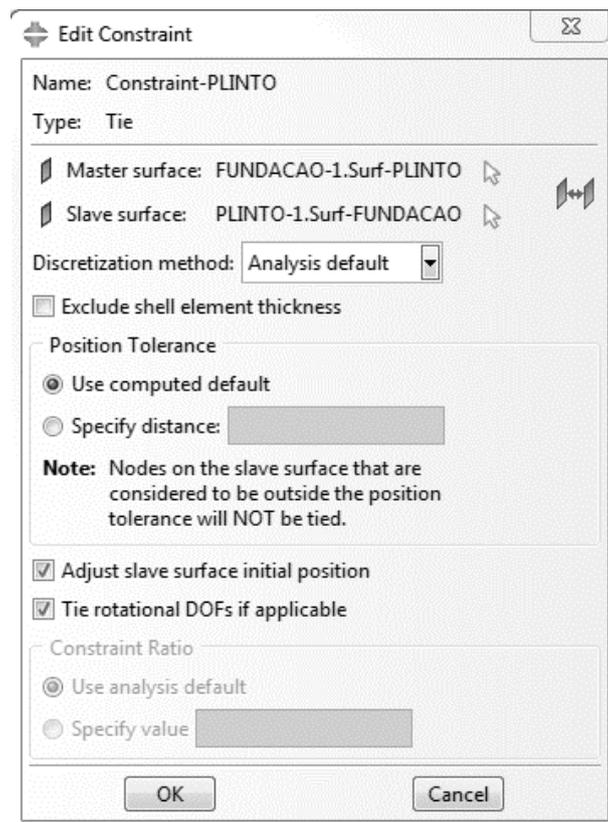


Figura A.32 – Interação Tie, Fundação/Plinto

Considerando que o plinto esteja atirantado na fundação, a interface será do tipo *Tie* entre o plinto e a injeção de fundação, desta forma as partes ficam “grudadas”, se movimentam juntas.

Constraint, Create..., Name: “Constraint-Plinto”, **Type:** *Tie*, **Continue..., Surface,** “FUNDACAO-1.Surf-PLINTO”, **Surface,** “PLINTO-1.Surf-FUNDACAO”, **OK.** Figura A.32.

A.5.3 Plinto/Lajes

O contato entre o plinto e as faixas de laje são definidos como se houvesse atrito, mas as superfícies podem se descolar, mas não se sobrepor.

Como se trata de sete definições, abre-se primeiro o gerenciador para então adicionar as interfaces conforme o procedimento, a Tabela A.1 apresenta cada um dos nomes e as superfícies *master* e *slave*.

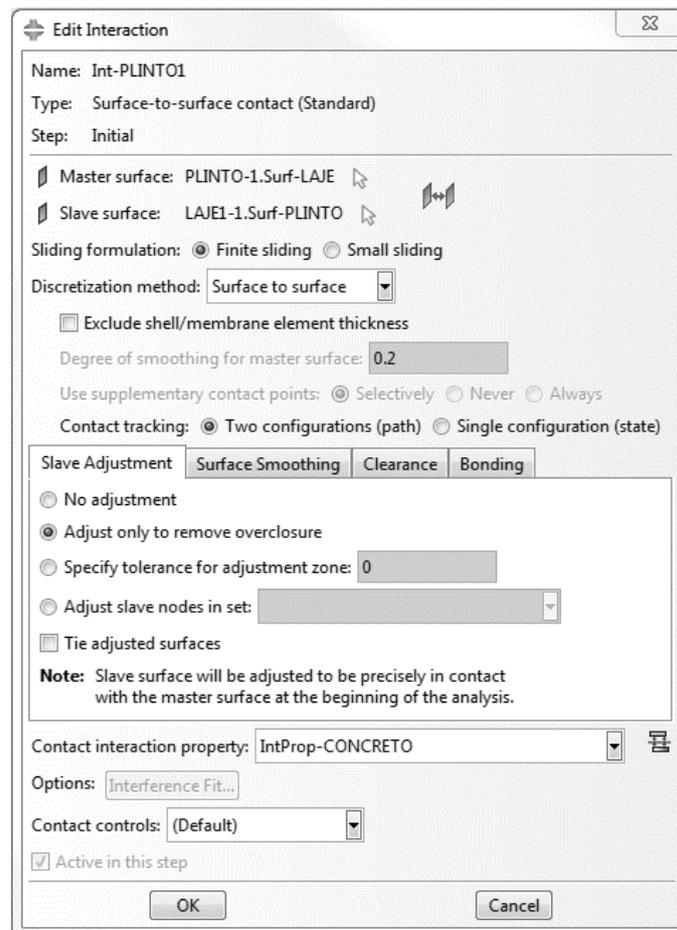


Figura A.33 – Configuração dos contatos Plinto/Lajes

A partir da segunda interação, pode-se copiar a anterior para importar as definições como padrão. Importante definir todas as interações criadas no passo “initial” propagando para os demais passos.

Interactions, Manager...

Create..., ***Name:*** (escolher o nome), ***Surface-to-surface contact***, ***Continue...***, ***Surface***, (*master*), ***Surface***, (*Slave*), ***Slave Adjustment: Adjust only to remove overclosure***, ***Contact interaction property:*** “IntProp-CONCRETO”. Seguindo as interações da Tabela A.6, a Figura A.33 mostra a configuração padrão para os contatos.

Tabela A.6 – Interações entre plinto e laje.

Nome	Master	Slave
Int-PLINTO1	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE1-1.Surf-PLINTO
Int-PLINTO2	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE2-1.Surf-PLINTO
Int-PLINTO3	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE3-1.Surf-PLINTO
Int-PLINTO4	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE4-1.Surf-PLINTO
Int-PLINTO5	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE5-1.Surf-PLINTO
Int-PLINTO6	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE6-1.Surf-PLINTO
Int-PLINTO7	PLINTO-1.Surf-LAJE	LAJE7-1.Surf-PLINTO

A.5.4 Lajes/Enrocamento

Seguindo o mesmo procedimento do passo anterior, mas agora com a interação entre as lajes e o enrocamento. A orientação de interações é apresentada na Tabela A.7.

Tabela A.7 – Interações entre a fundação e a laje.

Nome	Master	Slave
Int-ENROC1	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE1-1.Surf-FUNDACAO
Int-ENROC2	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE2-1.Surf-FUNDACAO
Int-ENROC3	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE3-1.Surf-FUNDACAO
Int-ENROC4	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE4-1.Surf-FUNDACAO
Int-ENROC5	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE5-1.Surf-FUNDACAO
Int-ENROC6	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE6-1.Surf-FUNDACAO
Int-ENROC7	FUNDACAO-1.Surf-LAJE	LAJE7-1.Surf-FUNDACAO

A.5.5 Lajes/Lajes

Seguindo o mesmo procedimento do passo anterior, a interação entre as faixas de laje recebem o mesmo tipo de propriedade. A orientação de interações é apresentada na Tabela A.8.

Tabela A.8 – Interações entre laje e laje.

Nome	Master	Slave
Int-LAJE1	LAJE1-1.Surf-LAJE2	LAJE2-1.Surf-LAJE1
Int-LAJE2	LAJE2-1.Surf-LAJE3	LAJE3-1.Surf-LAJE2
Int-LAJE3	LAJE3-1.Surf-LAJE4	LAJE4-1.Surf-LAJE3
Int-LAJE4	LAJE4-1.Surf-LAJE5	LAJE5-1.Surf-LAJE4
Int-LAJE5	LAJE5-1.Surf-LAJE6	LAJE6-1.Surf-LAJE5
Int-LAJE6	LAJE6-1.Surf-LAJE7	LAJE7-1.Surf-LAJE6

A.6 Módulo *LOAD*

Nesta etapa serão definidas as forças externas aplicadas ao modelo, como peso próprio, peso do reservatório e uma forças piloto concentradas em nós. Na caixa de seleção de módulos: *Load*.

A.6.1 Restrição de Deslocamento nas Fronteiras

A seguir o procedimento para a restrição de deslocamento nas fronteiras do domínio, aplicadas sempre perpendiculares as faces externas. Por exemplo, as faces paralelas aos eixos YZ (23) terão o deslocamento restrito na direção X (1). No Abaqus®, os deslocamentos são representados pela letra “U”, assim:

BC, Create..., name: “BC-U1”, step: “Inicial”, *Mechanical, Displacement/Rotation, Continue...*, “Set-U1”, *Continue...*, marcar somente a caixa de seleção “U1”, *OK*.

BC, Create..., name: “BC-U2”, step: “Inicial”, *Mechanical, Displacement/Rotation, Continue...*, “Set-U2”, *Continue...*, marcar somente a caixa de seleção “U2”, *OK*.

BC, Create..., name: “BC-U3”, step: “Inicial”, *Mechanical, Displacement/Rotation, Continue...*, “Set-U3”, *Continue...*, marcar somente a caixa de seleção “U3”, *OK*.

A.6.2 Recalque por Peso Próprio

Uma gravidade é inserida no “Step-RESERVATORIO” para simular um recalque no enrocamento devido o peso próprio, o valor não é da gravidade real mas de uma parcela que represente o recalque do material. A adição é feita porque não foi encontrada a opção de zerar as deformações de passo construtivos no software, então o aterro é construído de uma só vez. O valor é arbitrado a partir da observação da instrumentação de barragens já construídas com materiais semelhantes. O valor inicialmente proposto é de 30% da gravidade, ou seja 3m/s².

Load, Create, Name: “Load-GRAVIDADE”, *Step:* “Step-RESERVATORIO”, *Mechanical, Gravity, Continue...*, *Component 3:* “-2”, os demais zero, clicar na seta azul, “FUNDACAO-1.Set-ENROCAMENTO”, *OK*.

A.6.3 Peso do Concreto

Embora o peso do concreto não desenvolva esforços representativos, será definido como se segue.

Load, Create, Name: “Load-GRAV-CONCRETO”, **Step:** “Step-RESERVATORIO”, **Mechanical, Gravity, Continue...**, **Component 3:** “-10”, os demais zero, clicar na seta azul, “Set-CONCRETO”, **OK**.

A.6.4 Peso do Reservatório

O carregamento do peso do reservatório é aplicado a partir de uma função linear que cresce com a profundidade. No caso inicia em zero na profundidade zero e cresce com uma taxa de -10.000Pa a cada metro, corresponde ao peso específico da água.

A definição da função é feita da seguinte forma:

Tools, field, Analytical Fields, Create..., **Name:** “AnalyticalField-RESERVATORIO”, **Type:** **Expression field, Continue...**, “-10000*Z”. **OK**.

O carregamento então é criado e com comportamento desta função:

Load, Create..., **Name:** “Load-RESERVATORIO”, **Step:** “Step-RESERVATORIO”, **Mechanical, Pressure, Continue...**, “Surf-RESERVATORIO”, **Distribution:** “(A) AnalyticalField-RESERVATORIO”, **Magnitude:** “1”. **OK**.

Os valores do carregamento incidem perpendicularmente as faces, em magnitude crescente com a profundidade, como ilustrado na Figura A.34.

A.6.5 Cargas Piloto

As cargas piloto serão usadas como referência para aplicação das cargas de força de percolação (em inglês *Seepage Force*) provindas da análise de percolação. Como a fundação possui quatro materiais diferentes, será aplicada uma força para cada uma delas.

A magnitude da carga não é importante mas a sugestão é que seja pequena e colocada nas três direções. A sugestão é de 100N, 200N e 300N, nas direções X, Y e Z (1, 2 e 3), respectivamente.

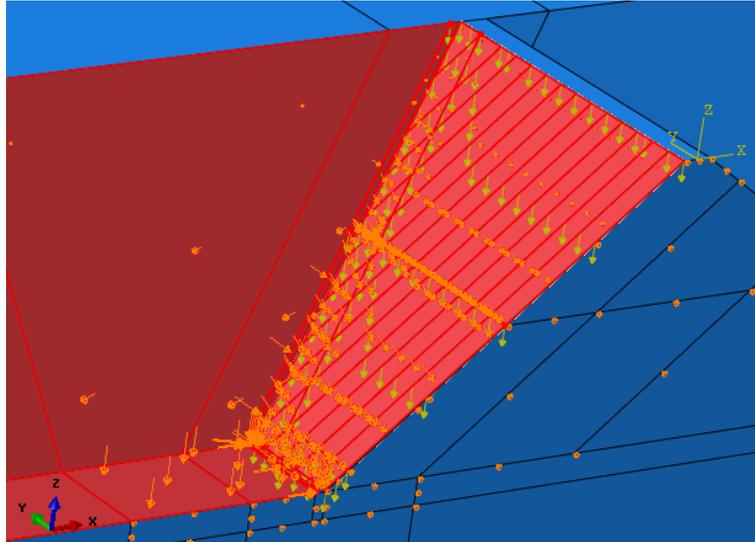


Figura A.34 – Peso do reservatório.

Load, Manager...

Create..., Name: “Load-PILOTO-F1”, Step: “Step-PERCOLACAO”, ***Mechanical, Concentrated Force, Continue...***, “FUNDACAO-1.Set-PILOTO” ***OK***. Inserir as forças 100N, 200N e 300N, como apresentado na Figura A.35.

Copy..., Name: “Load-PILOTO-F2”, ***OK***.

Copy..., Name: “Load-PILOTO-F3”, ***OK***.

Copy..., Name: “Load-PILOTO-F4”, ***OK***.

A.7 Módulo *MESH*

Neste módulo será definida a malha, qual o tipo de elemento e sua distribuição. Na caixa de seleção de módulos: ***Mesh***.

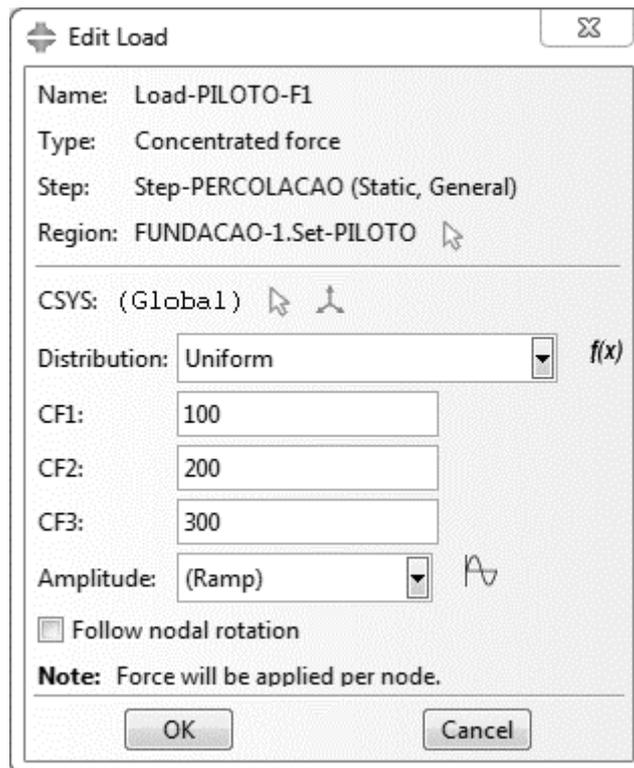


Figura A.35 – Exemplo de força piloto.

A.7.1 Tipo de Elemento

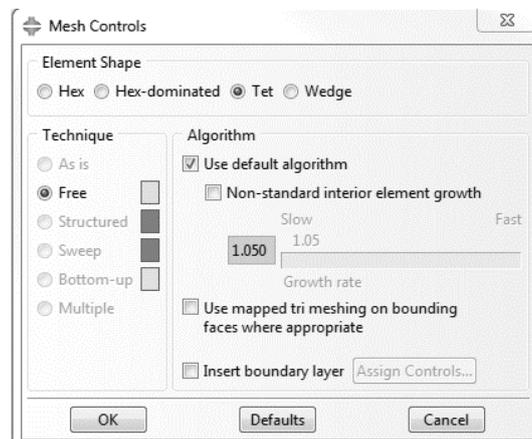


Figura A.36 – Opções da malha.

A malha será gerada com elementos triangulares, mesmo que os resultados sejam menos precisos, a distribuição fica mais bem escalonada no refinamento.

Mesh, Control..., seleciona toda a geometria, **Done, Element Shape: Tet**, deixa somente a opção **Use default algorithm** marcada. Figura A.36.

A.7.2 Ferramentas de Seleção

A distribuição de tamanhos dos elementos será feita com o auxílio da caixa de seleção das partes, Figura A.37. Podemos selecionar entre o modelo como um todo (*Assembly*) ou suas partes (*Part*).

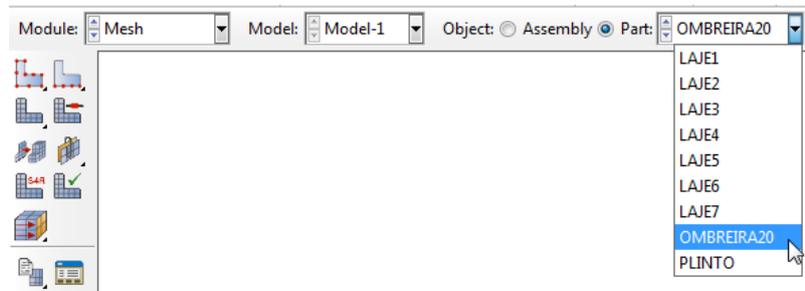


Figura A.37 – Caixa de seleção das partes para a distribuição da malha.

Um segundo artifício para seleção será usado, com o uso de *Display Groups*.

A.7.3 Semear Arestas Externas

A ferramenta para controle do tamanho da malha será feita através da definição do tamanho de elementos para cada aresta, em posições que possibilitem uma transição mais suave de tamanho dos elementos finitos.

A semeadura das arestas se inicia pela parte mais externa:

Seed, Edges, “Set-FRONTEIRA”, *Aproximate elemento size*: “200”.

Seed, Edges, “Set-REFINAMENTO1”, *Aproximate elemento size*: “50”.

Seed, Edges, “Set-REFINAMENTO2”, *Aproximate elemento size*: “15”.

A.7.4 Semear Arestas do Enrocamento

Display groups são usados para auxiliar o refinamento do enrocamento, da injeção:

Tool, Display Group, Create, Set, “FUNDACAO-1.Set-E1”, **Intersect**.

Seed, Edges, Select in Viewport..., Selecciona tudo. *Aproximate elemento size*: “30”.

Tool, Display Group, Create, Set, “FUNDACAO-1.Set-E2”, **Add**.

Seed, Edges, Select in Viewport..., Seleciona as faces superior interna. **Aproximate elemento size:** “20”.

Tool, Display Group, Create, Set, “FUNDACAO-1.Set-E3”, **Add.**

Seed, Edges, Select in Viewport..., Seleciona as faces superior em contato com o concreto. **Aproximate elemento size:** “5”.

Para voltar a apresentar todas as partes:

Tool, Display Group, Plot, “All”

A.7.5 Semear Arestas da Injeção

Tool, Display Group, Create, Set, “FUNDACAO-1.Set-INJECAO”, **Intersect.**

Seed, Edges, Select in Viewport..., Seleciona as faces de baixo como na Figura A.38a. **Aproximate elemento size:** “2”.

Seed, Edges, Select in Viewport..., Seleciona as faces de cima como na Figura A.38b. **Aproximate elemento size:** “4”.

Seed, Edges, Select in Viewport..., Seleciona todas as arestas verticais. **Bias Single. Minimum size:** “2”, **Maximum size:** “4”. Com as setas orientadas para baixo.

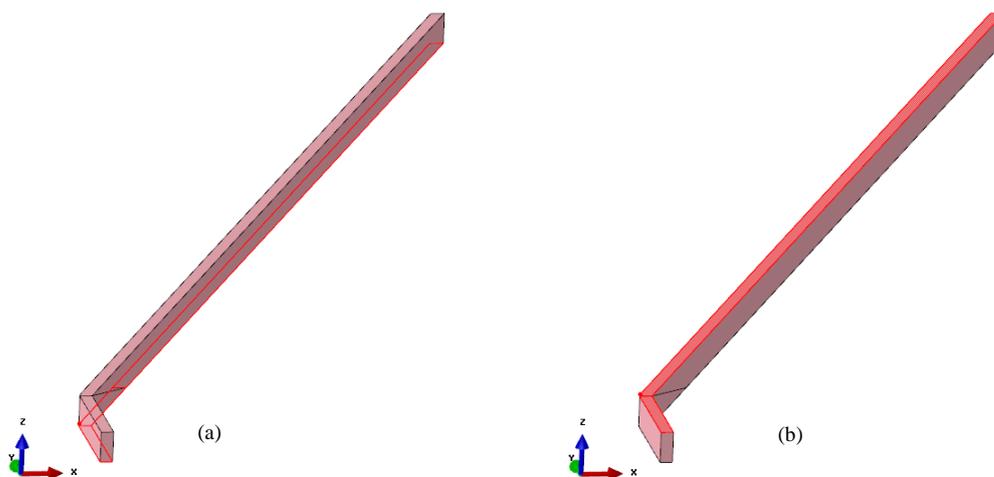


Figura A.38 – Seleção para semear a malha na injeção.

Para voltar a apresentar todas as partes:

Tool, Display Group, Plot, “All”

A.7.6 Semear o Concreto

Semear o plinto:

Seed, Edges, “PLINTO-1.Set-TOTAL”, *Aproximate element size: “1.5”*.

Semear as lajes:

Tool, Display Group, Create, Parts/Model instances, seleciona todas as lajes, *Intersect*.

Seed, Edges, seleciona conforme Figura A.39a, *Aproximate element size: “0.8”*.

Seed, Edges, seleciona conforme Figura A.39b, *Aproximate element size: “1”*.

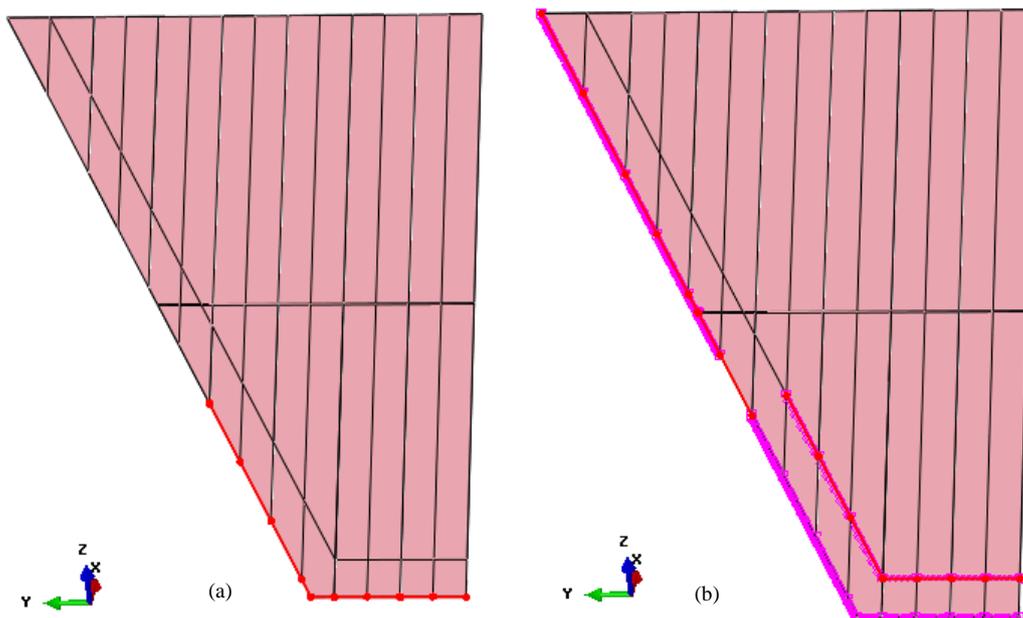


Figura A.39 – Seleção para semear a malha no perímetro da laje.

Seed, Edges, seleciona conforme Figura A.40, *Aproximate element size: “2”*.

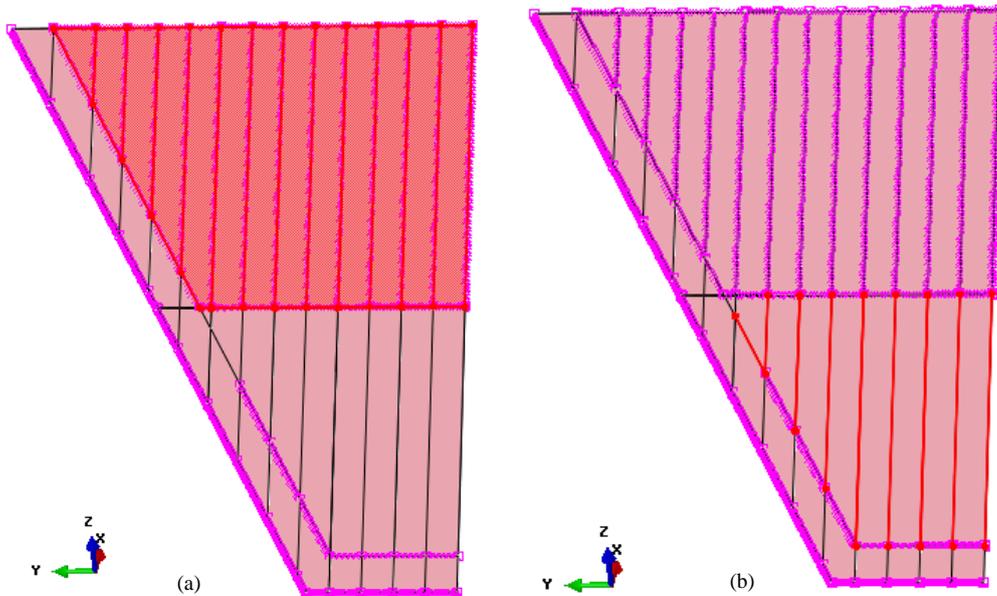


Figura A.40 – Seleção para semear a malha na metade superior da laje.

Seed, Edges, Select in Viewport..., Selecciona como na Figura A.41a. **Bias Single**. **Minimum size**: “1”, **Maximum size**: “2”. Com as setas orientadas para baixo.

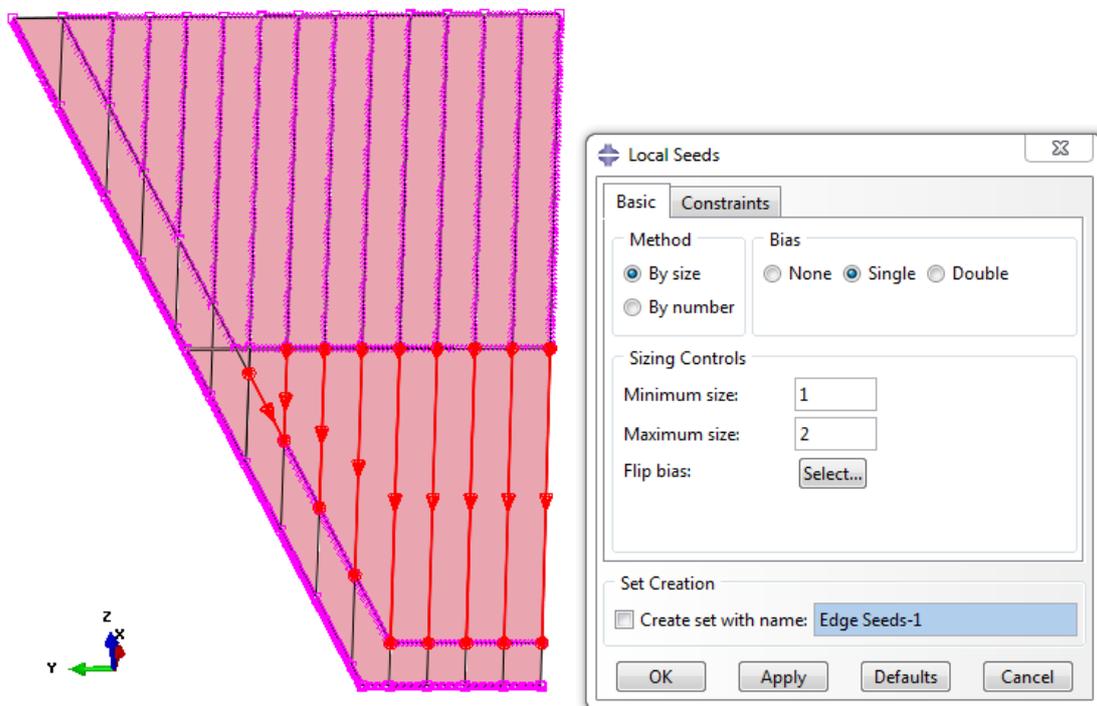


Figura A.41 – Semear a malha na metade inferior, com variação de espaçamento.

Para voltar a apresentar todas as partes:

Tool, Display Group, Plot, “All”

A.7.7 Gerar as Malhas

Mesh, Instance, Selecciona todo o modelo, **Done**.

As Figura A.42, Figura A.43, Figura A.44 e Figura A.45 mostram a malha gerada.

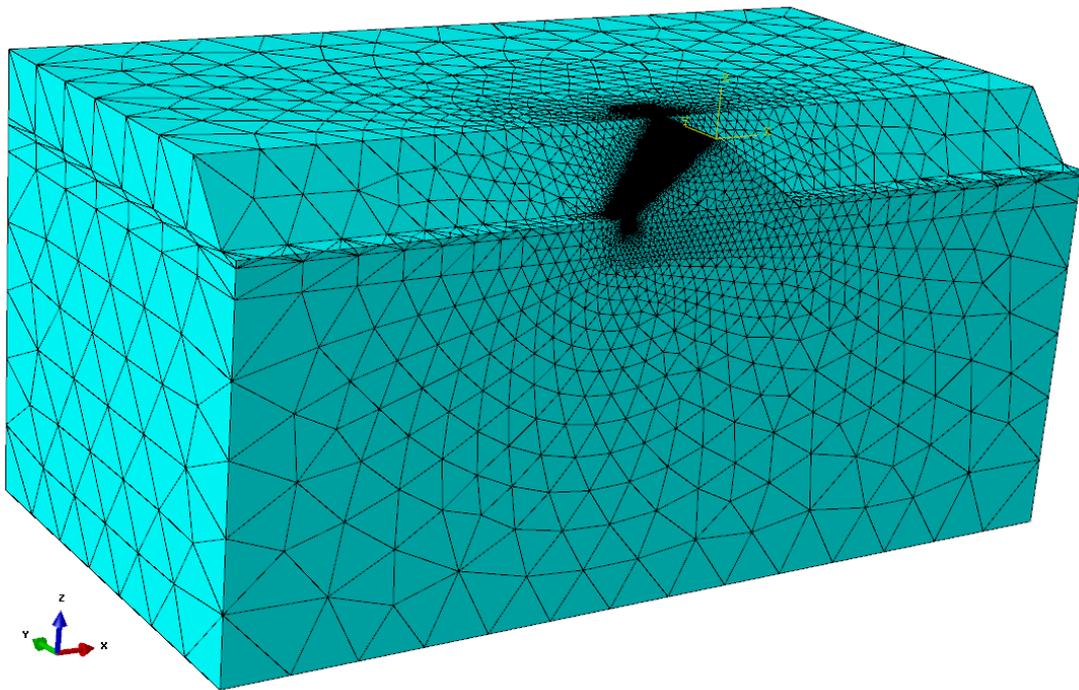


Figura A.42 – Malha gerada – visão geral.

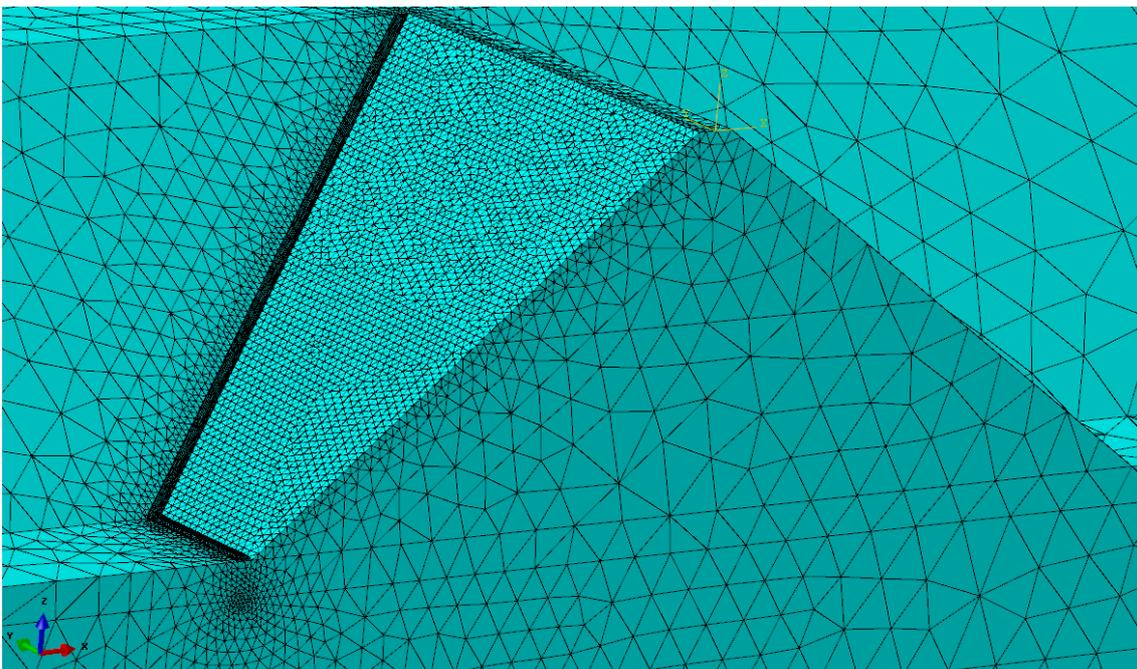


Figura A.43 – Malha gerada – detalhe da barragem sem as lajes.

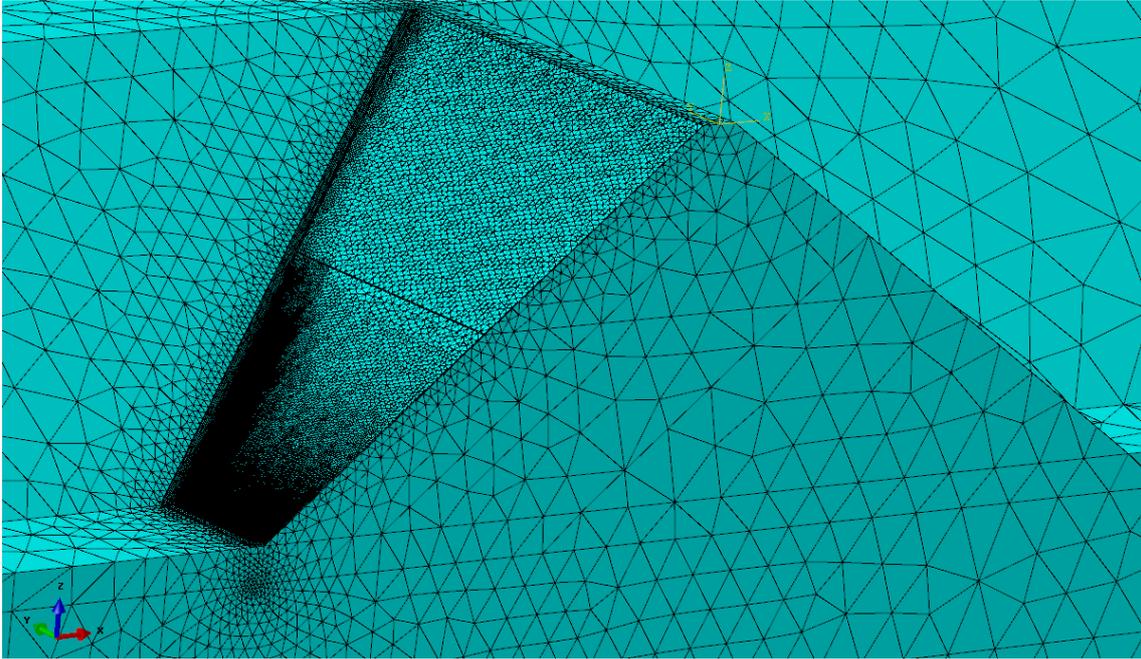


Figura A.44 – Malha gerada – detalhe da barragem com as lajes.

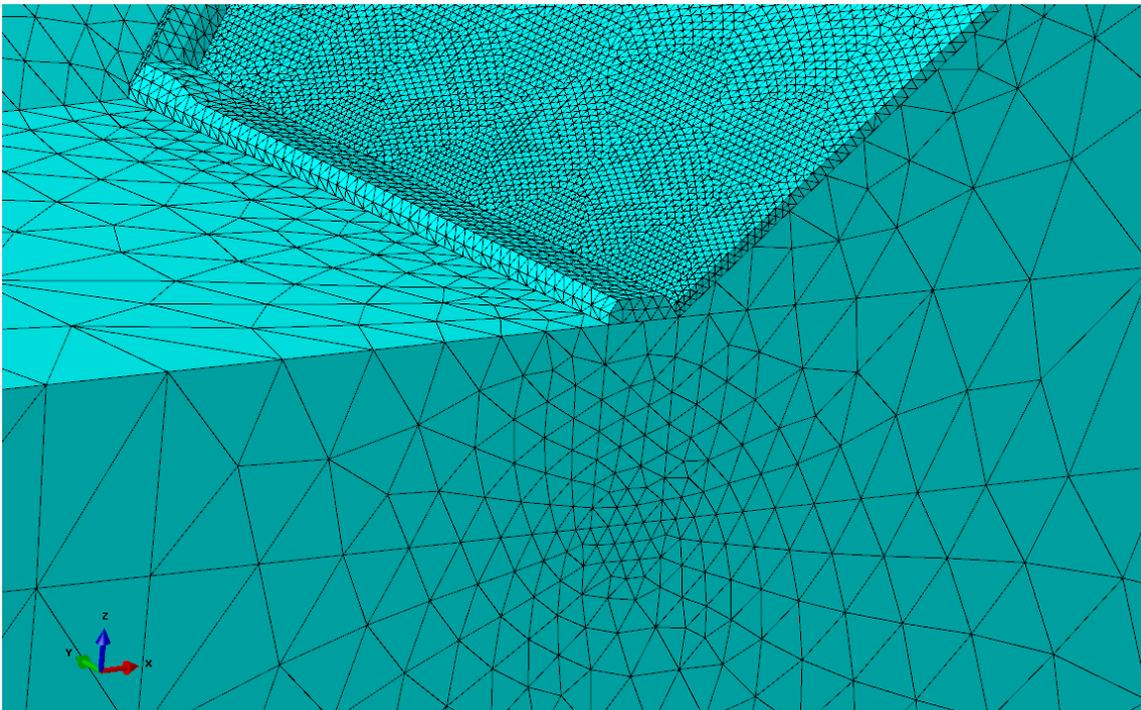


Figura A.45 – Malha gerada – detalhe da injeção e plinto de pé com as lajes.

A.8 Módulo *JOB*

Neste módulo será criado o arquivo de entrada com a linguagem para entrada da análise numérica, com formato “.inp”. Na caixa de seleção de módulos: ***Job***.

A.8.1 Criar

Job, Create..., “Job-PILOTO”, ***Continue...***, ***Parallelization, Use multiplex processors***, insere o número de processadores para a análise, ***OK***.

A.8.2 Verificar o *JOB*

Job, Data Check, “Job-PILOTO”

A.8.3 Enviar a Modelagem para o Cálculo

Job, Submit, “Job-PERCOLACAO”.

A.9 Módulo *VISUALIZATION*

As ferramentas de visualização dos resultados são acessadas neste módulo. Na caixa de seleção de módulos: ***Visualization***.

O resultado da análise é salvo em um arquivo com o nome “Job-PILOTO.odb”, pode ser aberto:

File, Open..., ***File filter: Output Database (.odb)***, ***File name: “Job-PILOTO”***, ***OK***.

A.9.1 Opções Gráficas

Para exportar imagens dos resultados, vamos mudar a cor do fundo para branca e ajustar o tamanho das letras da de visualização.

View, Graphic Options..., ***Select Color***, selecionar a cor branca, ***OK***.

Viewport, Viewport Annotation Options..., ***Legend, Set Font...***, ***Size: “14”***, selecionar todos os campos em ***Apply To***, ***OK***.

B – SIMULAÇÃO DE PERCOLAÇÃO

A segunda simulação é montada a partir da simulação piloto, com modificações para o problema de percolação. Se trata de uma simplificação, onde as estruturas de concreto são até ignoradas e retiradas da análise, sendo consideradas estruturas impermeáveis. A seguir o procedimento para adaptação do modelo piloto para percolação.

O primeiro passo é abrir o arquivo PILOTO.cae e salvar como PERCOLACAO.cae.

File, Save as..., “PERCOLACAO.cae”.

B.1 Módulo PART

A retirada das estruturas de concreto do modelo é feita a partir do gerenciamento das partes. Na caixa de seleção de módulos: *Part*.

Part, Manager..., seleciona todas as partes de concreto, *Delete, OK*.

B.2 Módulo PROPERTY

Nesta etapa é necessário somente adicionar a propriedade de permeabilidade nos materiais. Na caixa de seleção de módulos: *Property*.

Material, Manager... seleciona o material, *Edit...*, *Other, Pore Fluid, Permeability*.

O parâmetro de peso específico da água deve ser inserido em todos os materiais na propriedade de permeabilidade: *Specific weight of wetting liquid*: 10e6. A unidade é em Pascals. Para o parâmetro de permeabilidade (*k*) é mostrado na Tabela B.1, que representa ao arranjo de permeabilidades P1 esclarecido no Item 3.4, para os demais arranjos basta mudar os valores conforme a Tabela 3.5.

Tabela B.1 – Permeabilidades dos materiais.

Material	k	Unidade
Material-E1	0.1	m/s
Material-E2	0.1	m/s
Material-E3	0.1	m/s
Material-F1	1e-6	m/s
Material-F2	1e-6	m/s
Material-F3	1e-7	m/s
Material-F4	1e-7	m/s
Material-INJECAO	1e-10	m/s

A Figura B.1. Apresenta os parâmetros da propriedade de permeabilidade para o “Material-E1”. O material “Material-CONCRETO” pode ser mantido como está.

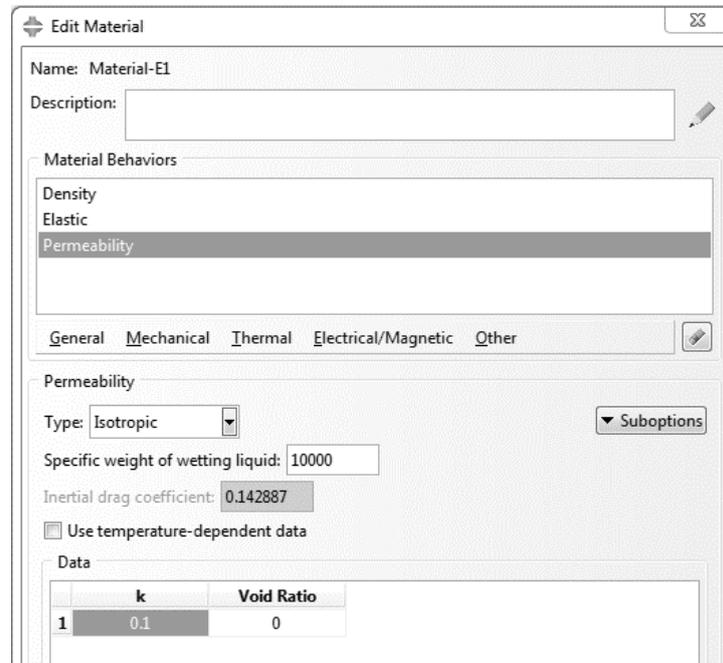


Figura B.1– Configuração de permeabilidade do “Material-E1”.

B.3 Módulo *ASSEMBLY*

Ao mudar para o módulo de montagem deve aparecer um aviso, isso porque foram deletadas as partes de concreto. Na caixa de seleção de módulos: **Assembly**. O programa já suprime automaticamente as partes, não sendo necessário deletar nem modificar.

Devemos somente ajustar o Set-U2, que agora não tem mais as partes de concreto. **Tool, Set, Manager...**, “Set-U2”, **Edit...**, **OK**.

B.4 Módulo *STEP*

Os passos criados para análise estática devem ser deletados, e criaremos novos para percolação, conforme descrito a seguir. Na caixa de seleção de módulos: **Step**.

Step, Manager..., seleciona todos menos “initial”, **Delete...**

B.4.1 *STEP* Percolação

A criação dos passos seguintes , na mesma janela **Step, Manager...**

Create..., “Step-PERCOLACAO”, *Soil*, como na Figura B.2, *Continue...*

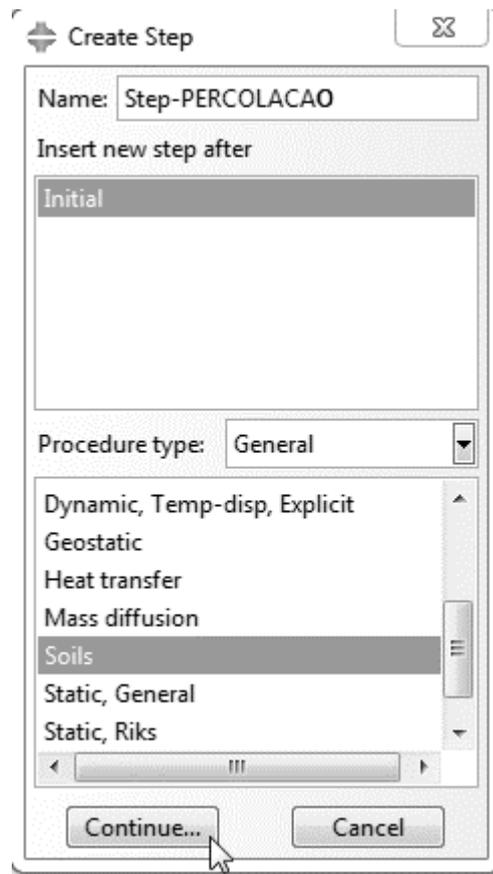


Figura B.2 – Criar o passo de percolação.

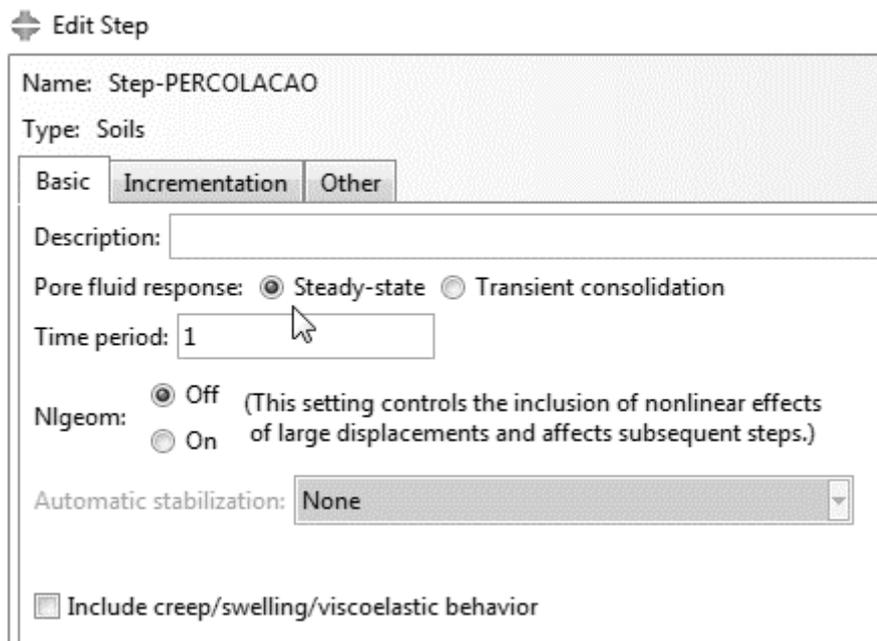


Figura B.3 – Configurar o tipo de análise,

A configuração para o passo, deve-se selecionar a simulação em fluxo permanente (*Steady-State*), desabilitar as considerações de *creep*, *swelling*, *viscoelastic*, como apresentado na Figura B.3.

Ainda na janela aberta, abre-se a aba *Incrementation*. Os incrementos devem ser ajustados com inicial: “0.1” e mínimo: 1E-7, como apresentado na Figura B.4.

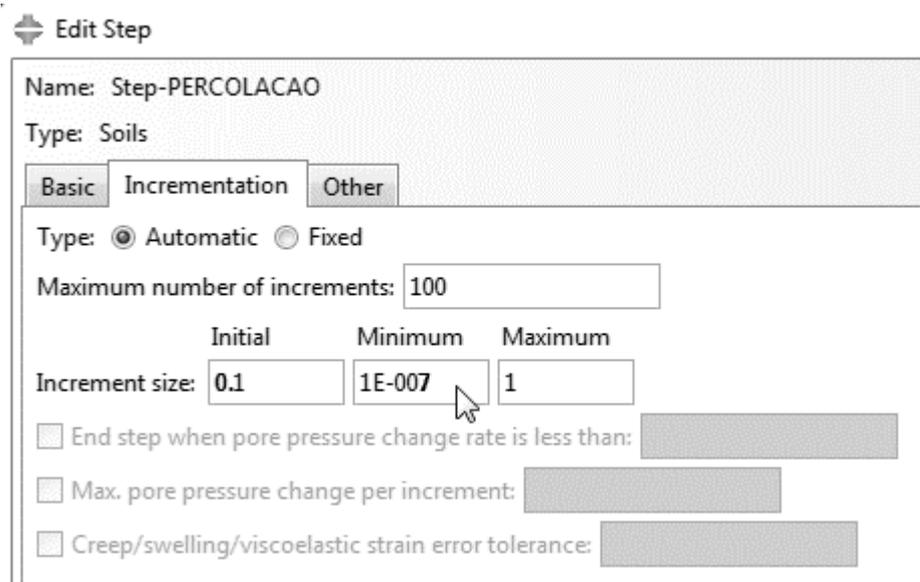


Figura B.4 – Ajustar os incrementos.

B.4.2 Solicitação de Resultados

Os dois resultados necessários para cálculo da força de percolação são a velocidade de fluxo para o cálculo do gradiente e o volume de cada elemento nos nós. Um resultado adicional é acrescentado para visualização e avaliação dos resultados obtidos, poropressão. Desta forma:

Output, Field Output Request, Manager..., "F-Output-1" Edit...

Primeiro desmarca-se todas as solicitações de resultados, deixando somente as seguintes:

Na opção *Porous media/Fluids*, seleciona *FLVEL, Pore fluid effective velocity* e *POR, Pore or Acustic pressure*

Depois adiciona-se a solicitação de resultado de volume dos elementos integrados nos nós.

Na opção *Volume/Thickness/Coordinates*, seleciona *IVOL, Integration point volume*.

B.5 Módulo *INTERACTION*

Todas as interações são deletadas. Na caixa de seleção de módulos: *Interaction*.

Constraint, Manager, seleciona tudo, *Delete...*

Interaction, Manager, seleciona uma a uma e *Delete...*

B.6 Módulo *LOAD*

Nesta etapa, adicionaremos campos iniciais e as condições de poropressão de montante e jusante. Na caixa de seleção de módulos: *Load*.

B.6.1 Campos Iniciais

Predefined Field, Manager, Create..., Step: “initial”,

“PredefinedField-POROPRESSAO”, *Other, Pore pressure, Continue...*, “FUNDACAO-1.Set-TOTAL”, Pore pressure 1: “0”, **OK**.

Create..., “PredefinedField-SATURACAO”, *Other, Pore pressure, Continue...*, “FUNDACAO-1.Set-TOTAL”, Saturation: “1”, **OK**.

Create..., “PredefinedField-VAZIOS”, *Other, Void ratio, Continue...*, “FUNDACAO-1.Set-TOTAL”, Void ratio 1: “0.4”, **OK**.

B.6.2 Carregamentos

São definidos um carregamento de gravidade e duas condições de contorno de percolação:

Load, Manager, Create..., “Load-GRAVIDADE”, *Step:* “Step-PERCOLACAO”, *Mechanical, Gravity, Continue..., Component 3:* “-10”.

BC, Manager, Create..., “BC-MONTANTE”, *Step:* “Step-PERCOLACAO”, *Other, Pore pressure, Continue...*, “FUNDACAO-1.Set-MONTANTE” *Continue..., Distribution:* “AnalyticalField-RESERVATORIO”, *Magnitude:* “1”, **OK**.

BC, Manager, Create..., “BC-JUSANTE”, *Step:* “Step-PERCOLACAO”, *Other, Pore pressure, Continue...*, “FUNDACAO-1.Set-JUSANTE” *Continue..., Distribution:* “Uniform”, *Magnitude:* “0”, **OK**.

B.7 Módulo MESH

No módulo deve-se mudar o tipo da malha para permitir percolação. Na caixa de seleção de módulos: **Mesh**.

Mesh, Element Type, “FUNDACAO-1.Set-TOTAL”, **Family: Pore fluid/Stress. OK**.

B.8 Módulo JOB

A retirada das estruturas de concreto do modelo é feita a partir do gerenciamento das partes, Na caixa de seleção de módulos: **Job**.

B.8.1 Renomear

Job, Manager..., Rename..., “Job-PERCOLACAO”, **OK**.

B.8.2 Verificar o JOB

Job, Data Check, “Job-PERCOLACAO”.

B.8.3 Enviar a Modelagem para o Cálculo

Job, Submit, “Job-PERCOLACAO”.

B.9 Módulo VISUALIZATION

As ferramentas de visualização dos resultados são acessadas neste módulo. Na caixa de seleção de módulos: **Visualization**. O resultado da análise é salvo em um arquivo com o nome Job-PERCOLACAO.odt, pode ser aberto:

File, Open..., **File filter: Output Database (.odt)**, **File name: “Job-PERCOLACAO.odt”**, **OK**.

B.9.1 Opções Gráficas

Para exportar imagens dos resultados, vamos mudar a cor do fundo para branca e ajustar o tamanho das letras da de visualização.

View, Graphic Options..., **Select Color**, selecionar a cor branca, **OK**.

Viewport, Viewport Annotation Options..., **Legend, Set Font...**, **Size: “14”**, selecionar todos os campos em **Apply To**, **OK**.

C – SIMULAÇÃO DE FORÇA DE PERCOLAÇÃO

A seguir os procedimentos adorados para a geração dos textos que são inseridos no arquivo .inp como substituição da força piloto, da simulação piloto com os vetores da simulação de percolação.

C.1 Exportar Vetores

As forças de percolação são calculadas a partir de vetores obtidos dos resultados da simulação de percolação. Os referidos vetores são calculados a partir do produto entre a velocidade de percolação com o volume dos elementos nos nós, cada nó com três componentes.

Tools, Create Field Output, From Fields... Name: “SFORCE1” para a direção x.

Na caixa de seleção *Functions* seleciona-se “Scalars”. A montagem da operação entre os valores e saída é feita com clique no Volume “IVOL”, digita “*” para a multiplicação, clica no vetor de fluxo “FLVEL” na componente de velocidade de fluxo “FLVEL1”.

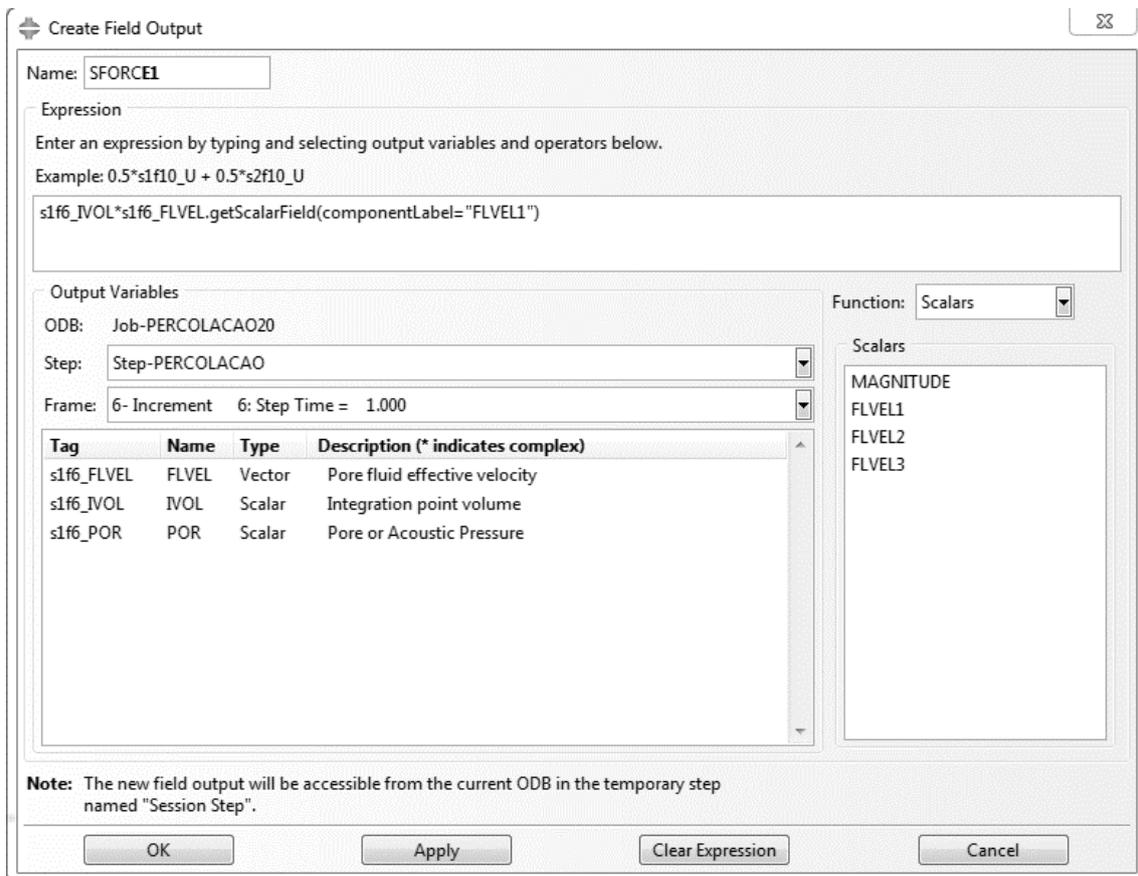


Figura C.1 – Criar primeiro vetor para exportação.

O procedimento descrito no parágrafo acima resulta em expressão que multiplica o volume do elemento integrado no nó pela componente na direção x da velocidade de fluxo. Para finalizar a definição deve-se clicar em **Apply**, Figura C.1.

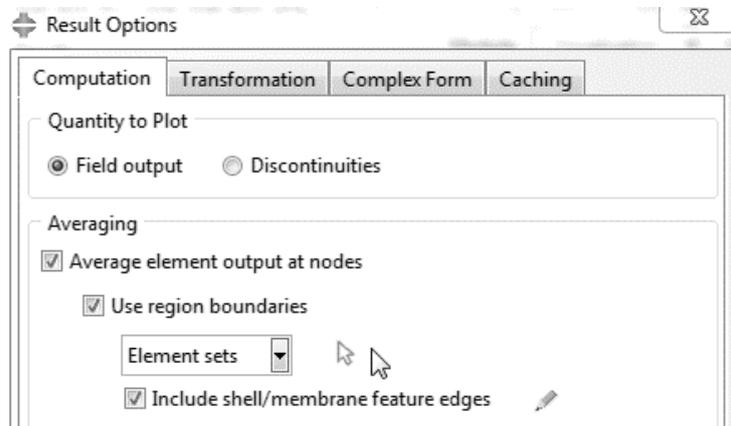


Figura C.2 – Opções dos resultados.

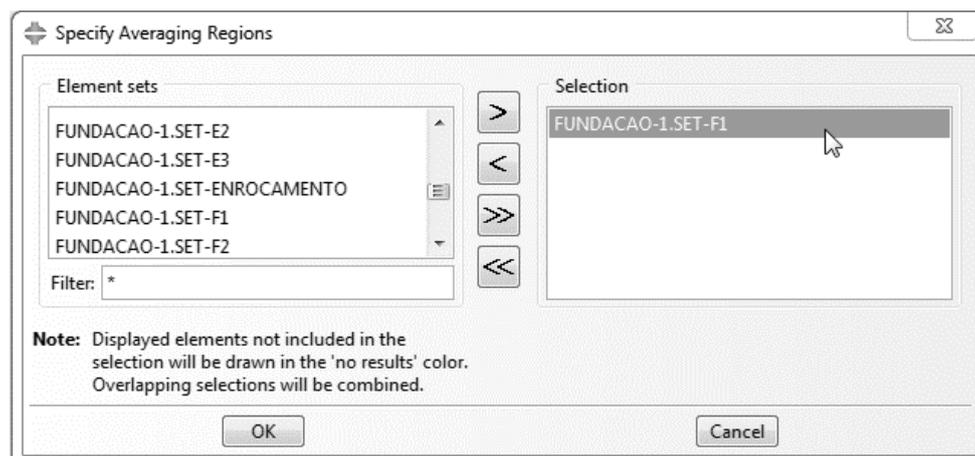


Figura C.3 – Selecionar o *set* de resultados.

As demais componentes têm nomes “SFORCE2” e “SFORCE3” para as direções y e z, respectivamente. Criadas a partir do mesmo procedimento, mudando somente a componente “FLVEL2” e FLVEL3 para as direções y e z, respectivamente.

Result, Step/Frame..., Section Step, OK

Result, Options..., Element sets, seta azul, Figura C.2.

“FUNDACAO-1.Set-F1”, >, **OK**. Figura C.3.

A visualização com cores é apresentada na janela gráfica do programa, no caso da primeira componente temos a Figura C.4.

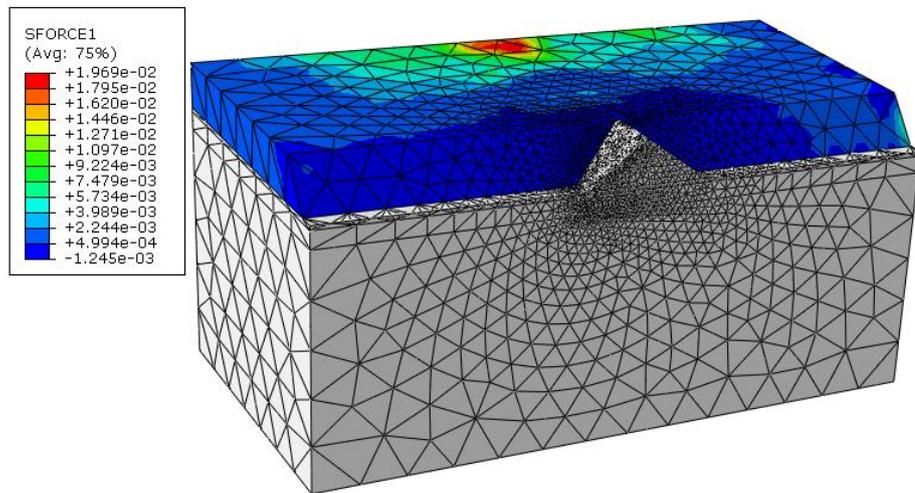


Figura C.4 – Visualização dos resultados para a força de percolação na direção x.

Report, Field Output..., Unique Nodal, seleciona os três na Figura C.5.

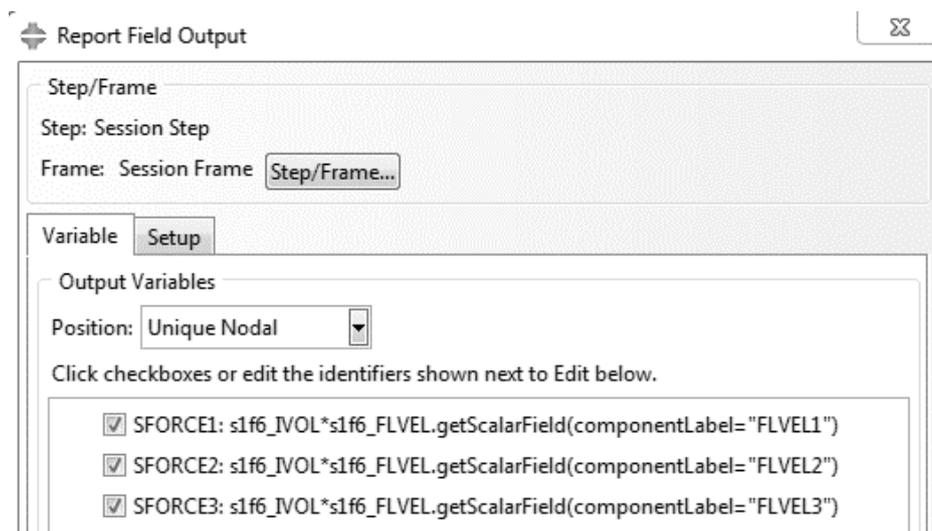


Figura C.5 – Selecionar os vetores para a exportação.

Setup, Name:Fl.rtp, desmarca *append to file*, **OK**, Figura C.6.

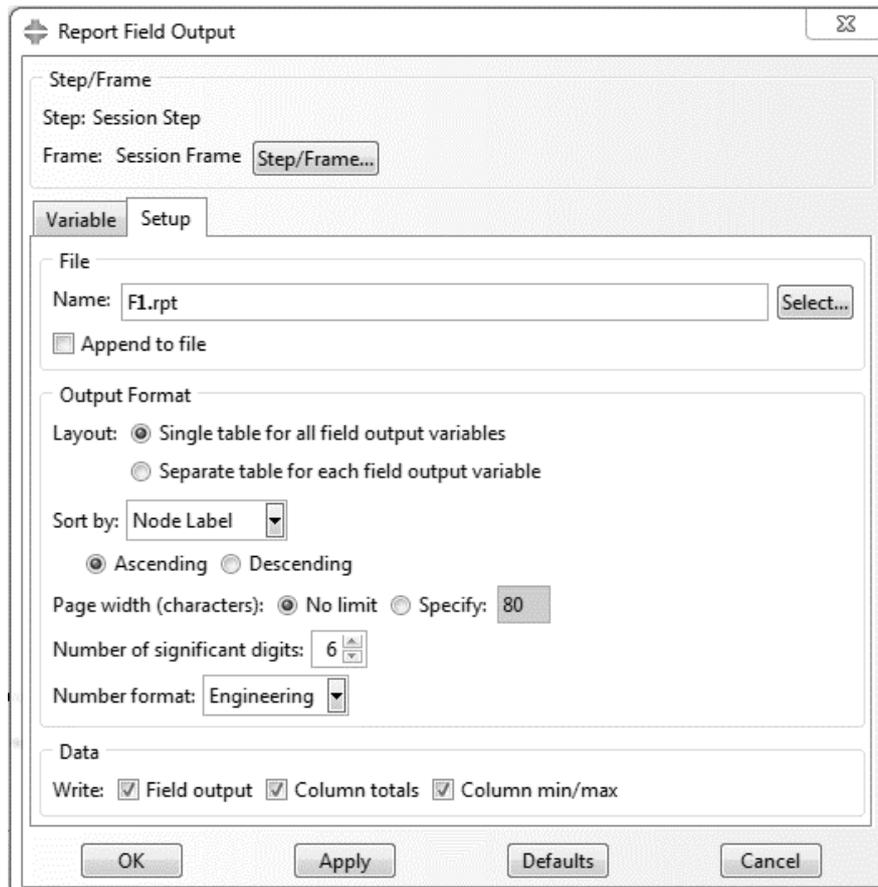


Figura C.6 – Exportar o campo de vetores para o arquivo de texto.

Abri o arquivo “F1.rpt” no bloco de notas, selecionar todo o cabeçalho como na Figura C.7 e deletar. Depois selecionar todo o rodapé como na Figura C.8 e deletar. Salvar e fechar.

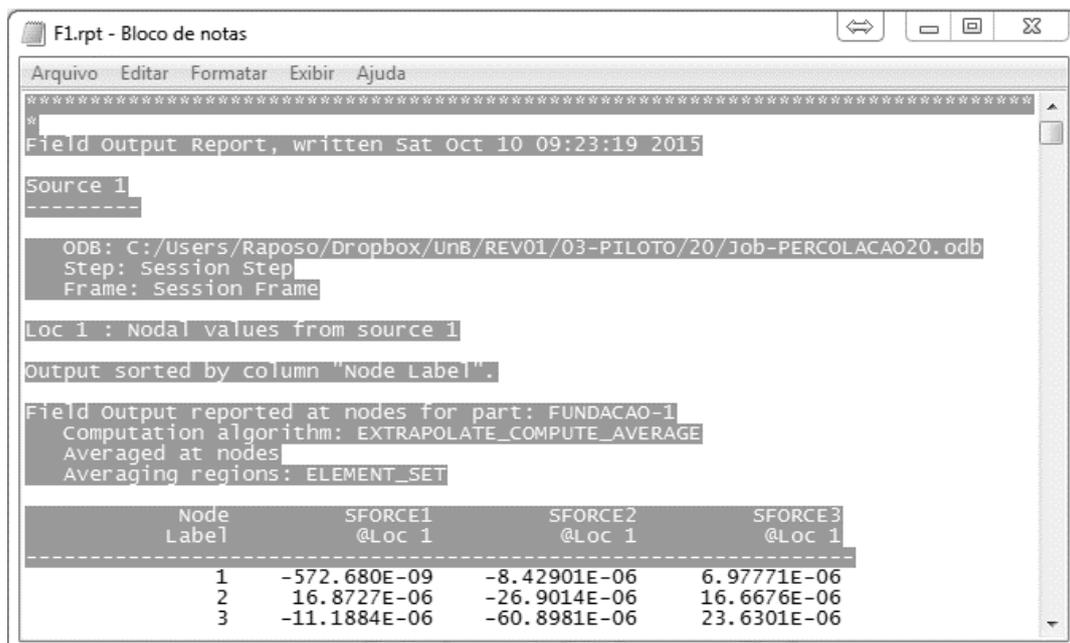


Figura C.7 – Deletar o cabeçalho do arquivo “F1.rpt”.

F1.rpt - Bloco de notas				
Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
165139	27.1004E-06	-26.9947E-06	-3.06329E-06	
165140	-53.2112E-09	6.61763E-06	-5.59744E-06	
Minimum	-1.24548E-03	-28.8718E-03	-18.4987E-03	
At Node	74605	40	40	
Maximum	19.6928E-03	23.7774E-03	502.756E-06	
At Node	76036	72561	76219	
Total	12.3511	-820.843E-03	-2.47074	

Figura C.8 – Deletar rodapé do arquivo “F1.rpt”.

Result, Options..., Element sets, seta azul, selecionar somente o “FUNDACAO-1.Set-F2”, **OK**.

Report, Field Output..., Unique Nodal, seleciona os três, **Setup, Name:F2.rtp**, desmarca **append to file**, **OK**.

Abri o arquivo “F2.rtp”, deletar o cabeçalho e o rodapé, salvar e fechar.

Repetir o procedimento para os “FUNDACAO-1-Set-F3” e “FUNDACAO-1-Set-F4”.

Análise dimensional destes vetores: $[L]^1[T]^{-1}[L]^3 = [L]^4[T]^{-1}$

A unidade destes vetores está, no SI: $(m/s) \times (m^3) = m^4/s$

C.2 Job-PILOTO.inp para FORCA-PERCOLACAO.inp

Os documentos criados nos itens anteriores serão inseridos no piloto.inp para completar a simulação de tensão-deformação com a força de percolação. O novo documento se chama “FORCA-PERCOLACAO.inp”.

Primeiro salva-se o arquivo “Job-PILOTO.inp” com o nome “FORCA-PERCOLACAO.inp”.

C.3 Exportar Texto dos Nós da Fundação

As forças pontuais são aplicadas a partir de *sets* independentes para cada um dos nós da fundação, o número de cada nó é obtido a partir do arquivo “FORCA-PERCOLACAO.inp”. Com o bloco de notas, abre-se o referido arquivo, que é salvo como “NOS-FUNDACAO.txt”.

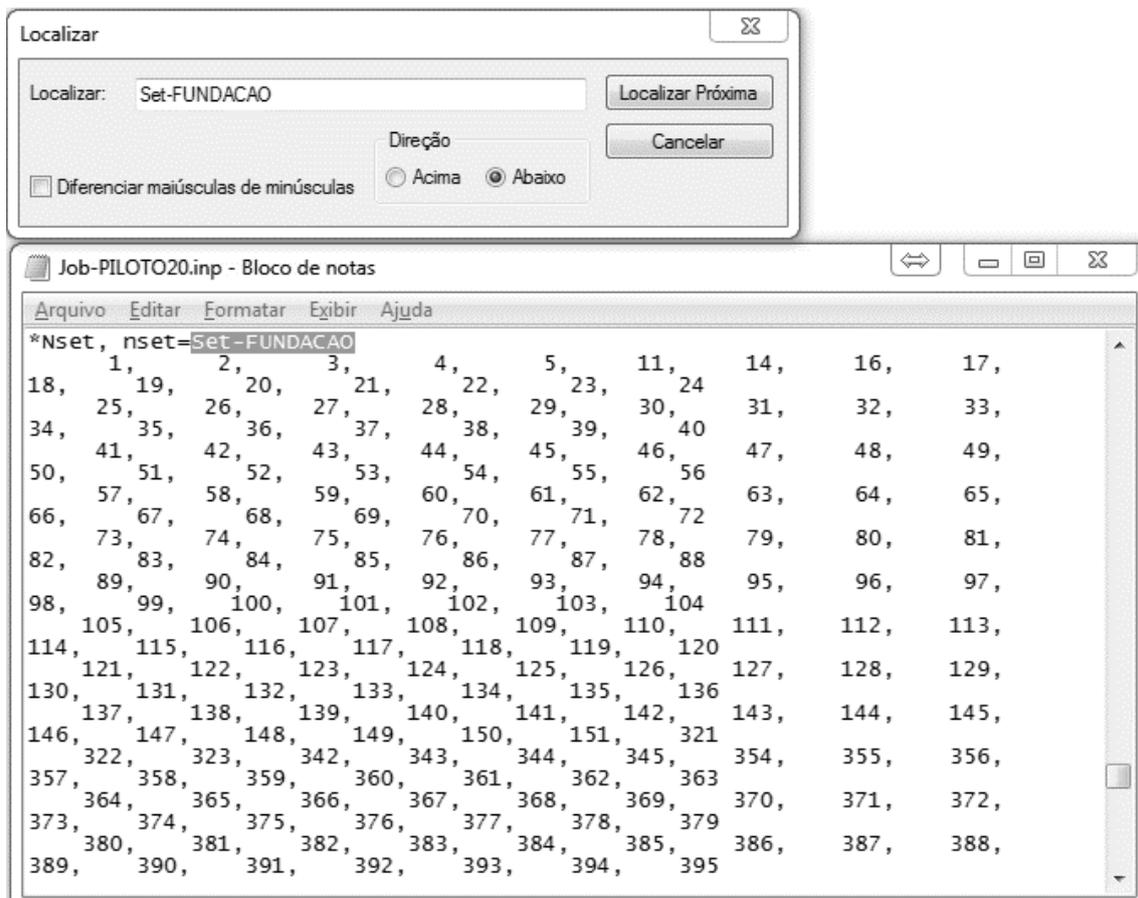


Figura C.9 – Buscar o primeiro “Set-FUNDACAO” no arquivo “PILOTO.inp”.

Os números dos nós são localizados com o seguinte procedimento:

Editar, Localizar, “Set-FUNDACAO”.

A linha localizada deve conter o texto: “*Nset, nset=Set-FUNDACAO”, como na Figura C.9.

Os números abaixo da referida linha são os nós que definem este *set*. O texto acima deve ser deletada, inclusive a linha localizada, deixando somente o texto só a partir dos números de nós. O passo seguinte é deletar também o texto abaixo destes números de nós, o procedimento é o seguinte:

Editar, Localizar, “Set-FUNDACAO”.

A linha localizada deve conter o texto “*Elset, elset=Set-FUNDACAO”, os números acima da linha são os nós de interesse e os números abaixo desta linha são seus elementos, que não são interessantes. Agora todo o texto abaixo desta linha deve ser deletado, se estendendo até o final do documento. Agora o documento “NOS-FUNDACAO.txt” é salvo, contendo somente os números que definem o “Set-FUNDACAO”.

C.4 Converter Nós para SETS

Os *sets* para cada um dos nós da fundação são necessários para aplicação dos vetores de força de percolação, para tanto, seguiremos a formatação de inserção do “Set-PILOTO” do arquivo “FORCA-PERCOLACAO.inp”, localizando o texto “Set-PILOTO”, com o seguinte linha de comando, no caso ele tem o nó 29. A vírgula depois do número não é necessária.

```
*Nset, nset=Set-PILOTO
29,
```

Com base neste exemplo e com o auxílio do excel, escreve-se um texto que se tenha a definição de *sets* para cada um dos nós, com o nome “Set-node_7” para o nó 7, “Set-node_13” para o nó 13, “Set-node_1471” para o nó 1471 e assim por diante.

C.4.1 Conversor dos SETS no EXCEL

A seguir os procedimentos utilizados para conversão do número dos elementos para texto de importação em formato “.inp”, utilizando o excel:

Abrir o excel, salvar como “CONVERSOR-SETS.xlsx”, criar três planilha, com nomes: “ENTRADA”, “SAIDA”, “CALCULO”.

- **PLANILHA “ENTRADA”:**

Primeiro copia-se todo conteúdo do documento “NOS-FUNDACAO.txt”, depois acessamos a planilha “ENTRADA”, **selecionamos a célula B2**

PÁGINA INICIAL, Colar, Usar Assistente de Importação de Texto..., Avançar >, Delimitadores: Vírgula, Avançar >, Formato dos dados da coluna: Não importar coluna (ignorar), Concluir.

Observamos 16 colunas com números dos nós, da coluna **B** até a coluna **Q**, Figura C.10:

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2	1	2	3	4	5	11	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
4	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
5	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
6	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
7	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
8	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
9	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136
10	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	321

Figura C.10 – Planilha com os nós da fundação.

- PLANILHA “CALCULO”:

Acessamos agora a planilha “CALCULO”, usaremos um artifício escrevendo o nome “igual” em vez do sinal “=”. Escrevemos o texto “igualENTRADA!B2” na célula **A1**, “igualENTRADA!C2” na célula **A2**, até a “igualENTRADA!Q2” na célula **A16**.

	A		A
1	igualENTRADA!B2	299983	igualENTRADA!P18750
2	igualENTRADA!C2	299984	igualENTRADA!Q18750
3	igualENTRADA!D2	299985	igualENTRADA!B18751
4	igualENTRADA!E2	299986	igualENTRADA!C18751
5	igualENTRADA!F2	299987	igualENTRADA!D18751
6	igualENTRADA!G2	299988	igualENTRADA!E18751
7	igualENTRADA!H2	299989	igualENTRADA!F18751
8	igualENTRADA!I2	299990	igualENTRADA!G18751
9	igualENTRADA!J2	299991	igualENTRADA!H18751
10	igualENTRADA!K2	299992	igualENTRADA!I18751
11	igualENTRADA!L2	299993	igualENTRADA!J18751
12	igualENTRADA!M2	299994	igualENTRADA!K18751
13	igualENTRADA!N2	299995	igualENTRADA!L18751
14	igualENTRADA!O2	299996	igualENTRADA!M18751
15	igualENTRADA!P2	299997	igualENTRADA!N18751
16	igualENTRADA!Q2	299998	igualENTRADA!O18751
		299999	igualENTRADA!P18751
		300000	igualENTRADA!Q18751
17		300001	
18			

Figura C.11 – “Puxar” os valores de entrada.

Selecionamos as células **A1** até **A2**, e puxamos a partir do canto inferior direito, como apresentado na Figura C.11. Puxa-se até a linha 300.000. O próximo passo é escrever o texto “igual"node_"&A1” na célula **B1**, igualA1 na célula **B2** (Figura C.12) selecionar as duas células e puxar até a linha 600.000 (Figura C.13).

	A	B	C
1	igualENTRADA!B2	igual"node_"&A1	
2	igualENTRADA!C2	igualA1	
3	igualENTRADA!D2		
4	igualENTRADA!E2		
5	igualENTRADA!F2		

Figura C.12 – Nomear o primeiro nó.

	A	B
599992		igualA299996
599993		igual"node_"&A299997
599994		igualA299997
599995		igual"node_"&A299998
599996		igualA299998
599997		igual"node_"&A299999
599998		igualA299999
599999		igual"node_"&A300000
600000		igualA300000
600001		

Figura C.13 – “Puxar os demais nós”

Ainda na planilha “CALCULO”, abrimos selecionamos as duas colunas por completo:

PÁGINA INICIAL, Localizar e Selecionar, Substituir..., Localizar: “igual”, Substituir por: “=”, como apresentado na Figura C.14.

	A	B	C	D
1	igualENTRADA!B2	igual"node_"&A1		
2	igualENTRADA!C2	igualA1		
3	igualENTRADA!D2	igual"node_"&A2		
4	igualENTRADA!E2	igualA2		
5	igualENTRADA!F2	igual"node_"&A3		
6	igualENTRADA!G2	igualA3		
7	igualENTRADA!H2	igual"node_"&A4		
8	igualENTRADA!I2	igualA4		
9	igualENTRADA!J2	igual"node_"&A5		
10	igualENTRADA!K2	igualA5		
11	igualENTRADA!L2	igual"node_"&A6		
12	igualENTRADA!M2	igualA6		
13	igualENTRADA!N2	igual"node_"&A7		
14	igualENTRADA!O2	igualA7		
15	igualENTRADA!P2	igual"node_"&A8		
16	igualENTRADA!O2	igualA8		

Localizar e substituir

Localizar: igual

Substituir por: =

Opções >>

Substituir tudo Substituir Localizar tudo Localizar próxima Fechar

Figura C.14 – Substituir os “igual” por “=”.

- **PLANILHA “SAIDA”:**

Por fim, abrimos a planilha “SAIDA”, escrevemos “=*Nset, nset="&CALCULO!B1” na célula **A1**, “=CALCULO!B2” na célula **A2** (Figura C.15), selecionamos as duas e puxamos até a linha 600.000 (Figura C.16). Salvar o arquivo “CONVERSOR-SETS.xlsx”.

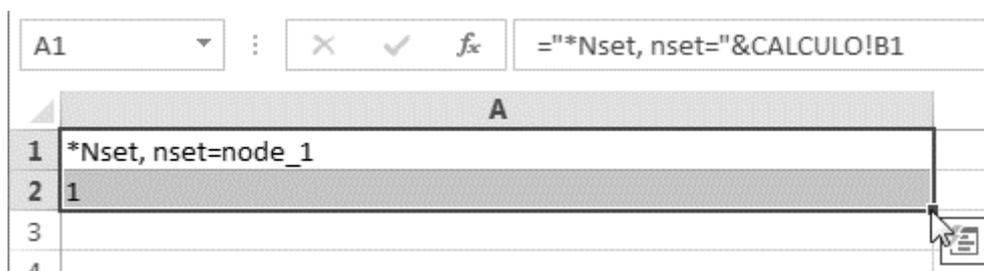


Figura C.15 – Nomear o primeiro *Set*.

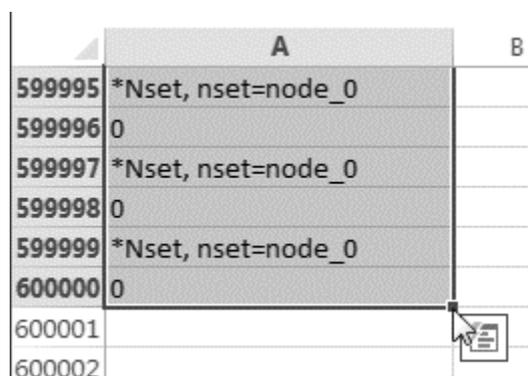


Figura C.16 – “Puxar” os demais *Sets*.

Importante ressaltar que o documento criado pode ser usado em qualquer tipo de malha que contenha até 300.000 nós de fundação (no caso deste exemplo. A entrada dos dados é feita na planilha “ENTRADA” e a saída na planilha “SAIDA”, como os próprios nomes já dizem.

C.4.2 Documento com a Definição dos *SETS*

Abrir o documento “CONVERSOR-SETS.xlsx”, na planilha “SAIDA” e copiar as células da coluna **A** da primeira até a última que contenha valores diferentes de zero, no caso até a linha 386.070, Figura C.17.

A	
386064	253133
386065	*Nset, nset=node_253134
386066	253134
386067	*Nset, nset=node_253135
386068	253135
386069	*Nset, nset=node_253136
386070	253136
386071	*Nset, nset=node_0
386072	0
386073	*Nset, nset=node_0
386074	0

Figura C.17 – Selecionar os *Sets*.

Agora colamos em um documento do bloco de notas com o nome “SETS-FUNDACAO.txt”.

Abaixo as primeiras linhas do arquivo:

```
*Nset, nset=node_1
1
*Nset, nset=node_2
2
*Nset, nset=node_3
3
*Nset, nset=node_4
4
*Nset, nset=node_5
5
*Nset, nset=node_11
11
*Nset, nset=node_14
14
*Nset, nset=node_16
16
*Nset, nset=node_17
17
*Nset, nset=node_18
18
*Nset, nset=node_19
19
*Nset, nset=node_20
20
*Nset, nset=node_21
21
*Nset, nset=node_22
22
```

C.5 Importar os SETS

Abre-se o documento “SET-FUNDACAO.txt”, copiando todo o texto e o fecha.

Abrimos o arquivo “FORCA-PERCOLACAO.inp”:

Editar, Localizar..., “Set-PILOTO”. Selecciona as duas linhas:

```
*Nset, nset=Set-PILOTO  
29,
```

Agora cola-se por cima destas duas linhas seleccionadas o novo texto, não pode-se deixar linhas em branco. Salvamos o arquivo “FORCA-PERCOLACAO.inp”.

C.6 Vetores da Força de Percolação

Com o auxílio do excel, os vetores serão transformados em forças com duas operações simples, a multiplicação de cada um dos vetores pelo peso específico da água e divisão pela permeabilidade do material.

Para o caso dos vetores do “FUNDACAO-1.Set-F1”, com a permeabilidade de $1e-6$, temos a seguinte operação: (componente do vetor) $\times (1e4) / (1e-6)$ ou seja, multiplica-se tudo por $1e10$. O referido cálculo será implementado no item seguinte, com a conversão dos textos para aplicação dos vetores de força.

Análise dimensional destes novos vetores: $[L]^4[T]^{-1}[M]^1[L]^{-2}[T]^{-2}[L]^1[T]^{-1} = [M]^1[L]^1[T]^{-2}$

A unidade destes novos vetores está, no SI: $(m^4/s) \times (N/m^3) / (m/s) = N$ (Newton)

Ainda com o auxílio do excel, os vetores convertidos em força são escritos para importação no programa. O formato padrão pode ser visualizado no documento “PILOTO.inp”, obtido na simulação piloto, com a localização do texto “Load-PILOTO”, abaixo o exemplo de formatação para aplicação dos vetores nos eixos **X**, **Y** e **Z** (1, 2 e 3).

```

** LOADS
**
** Name: Load-PILOTO-F1    Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 1, 100.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 2, 200.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 3, 300.
** Name: Load-PILOTO-F2    Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 1, 100.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 2, 200.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 3, 300.
** Name: Load-PILOTO-F3    Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 1, 100.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 2, 200.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 3, 300.
** Name: Load-PILOTO-F4    Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 1, 100.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 2, 200.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 3, 300.
**
** OUTPUT REQUESTS

```

Com o auxílio do excel, escreve-se um texto que se tenha a aplicação dos vetores de forças para cada um dos nós, com o nome “Load-F1_7” para o nó 7 na fundação F1, “Load-F4_13” para o nó 13 na fundação F4, “Load-F2_1471” para o nó 1471 na fundação F2 e assim por diante.

C.6.1 Conversor EXCEL para os Vetores

A seguir os procedimentos utilizados para conversão dos vetores originais para texto de importação em formato “.inp”, utilizando o excel:

Abrir o excel, salvar como “CONVERSION-SFORCE.xlsx”, criar quatro planilhas, com nomes: “ENTRADA”, “SAIDA”, “CALCULO1”, “CALCULO2”.

- **PLANILHA “ENTRADA”:**

Os vetores de forças são calculados a partir dos vetores que foram exportados da análise de percolação, para tanto, precisamos definir dois parâmetros de entrada, permeabilidade e peso específico da água, ambos no sistema internacional de medidas, inseridos nas células **B1** e **B2** respectivamente.

Para a formatação do texto de entrada, é necessária a entrada do nome da parte, no caso “FUNDACAO-1”, na célula **B3**. Para diferenciação do nome das forças nos diferentes materiais, entramos ainda com um nome, no caso “F1” para o material “Material-F1”, definido no *set* “FUNDAÇÃO-1.Set-F1”. Na célula **B3**.

A Figura C.18 apresenta uma sugestão de formatação para a entrada de dados, importante ressaltar que o valor de peso da água permanece fixo.

	A	B	C
1	Permeabilidade	1.00E-07	m/s
2	Peso da água	10000	N/m ³
3	Parte	FUNDACAO-1	
4	Material	F1	

Figura C.18 – Valores de entrada.

Por fim, copiamos todo conteúdo do documento “F1.rtp”, depois acessamos a planilha “ENTRADA”, selecionamos a célula **D2**.

PÁGINA INICIAL, Colar, Usar Assistente de Importação de Texto..., Avançar >, Avançar >, Formato dos dados da coluna: **Não importar coluna (ignorar), Concluir.**

A sugestão de formatação é que se coloque cabeçalhos de identificação para as colunas, como na Figura C.19.

D	E	F	G	H
Nó	Pforce1 (m/s*m ³)	Pforce1 (m/s*m ³)	Pforce1 (m/s*m ³)	
1	-5.73E-07	-8.43E-06	6.98E-06	
2	1.69E-05	-2.69E-05	1.67E-05	
3	-1.12E-05	-6.09E-05	2.36E-05	
4	-5.80E-05	-1.83E-04	5.23E-05	
5	9.81E-06	-1.71E-04	1.35E-04	

Figura C.19 – Cabeçalhos de identificação.

- **PLANILHA “CALCULO1”:**

Acessamos agora a planilha “CALCULO1”.

Na célula **A2**, escrevemos o seguinte texto para a transformação dos vetores originais em vetores de força:

=ENTRADA!E2*ENTRADA!\$B\$2/ENTRADA!\$B\$1

Em outras palavras: “= (componente do vetor) x (peso da água) / (permeabilidade)”

Selecionar a célula **A2** e “puxar” até a célula **C2**.

Na célula **D2**, escrevemos o texto:

=ENTRADA!\$B\$4&".node"&"_"&ENTRADA!D2

Na célula **E2**, escrevemos o texto:

= "load-"&ENTRADA!\$B\$1&"_"&ENTRADA!D2

Com um cabeçalho, a planilha deve parecer como a Figura C.20. Selecionamos as células criadas e puxamos a partir do canto inferior direito até a linha 200.001.

	A	B	C	D	E
1	Pforce1 (N)	Pforce2 (N)	Pforce3 (N)	node	Load
2	-5.73E+04	-8.43E+05	6.98E+05	FUNDACAO-1.node_1	load-F1_1
3					

Figura C.20 – “Puxar” as forças de percolação.

- **PLANILHA “CALCULO2”:**

São necessárias cinco linhas para formatar o texto de entrada de vetores, usaremos o artifício do “igual” para possibilitar o trabalho, a Figura C.21. Apresenta o cabeçalho sugerido já com o primeiro grupo de cinco linhas, o texto é o seguinte:

	A	B
1		(N)
2	igualCALCULO1!E2	
3		
4	igualCALCULO1!D2	igualCALCULO1!A2
5	igualCALCULO1!D2	igualCALCULO1!B2
6	igualCALCULO1!D2	igualCALCULO1!C2
7		

Figura C.21 – texto das forças em um dos nós.

Selecionando as células como na Figura C.21, puxamos o conjunto a partir do canto inferior direito até a linha 1.000.001.

Por fim selecionamos as duas colunas:

PÁGINA INICIAL, Localizar e Substituir, Substituir..., Localizar: “igual”, Substituir por: “=”. Para os dois primeiros vetores de força, o resultado é parecido com a Figura C.22.

	A	B
1		(N)
2	load-F1_1	
3		
4	FUNDACAO-1.node_1	-57268.00
5	FUNDACAO-1.node_1	-842901.00
6	FUNDACAO-1.node_1	697771.00
7	load-F1_2	
8		
9	FUNDACAO-1.node_2	1687270.00
10	FUNDACAO-1.node_2	-2690140.00
11	FUNDACAO-1.node_2	1666760.00

Figura C.22 – Formatação parcial das forças de percolação nos dois primeiros nós.

• **PLANILHA “SAIDA”:**

Por fim, abrimos a planilha “SAIDA”, escrevemos conforme a Tabela C.1. Selecciona-se as cinco linhas da e “puxamos” até a linha 1.000.000. Salvar o arquivo “CONVERSION-SFORCE.xlsx”. Para os dois primeiros vetores de força, o resultado é parecido com a Figura C.23.

Tabela C.1 – Linguagem de formatação do texto de saída.

	1
A1	= "*** Name: "&CALCULO2!A2&" Type: Concentrated force"
A2	*Cload, op=NEW
A3	=CALCULO2!A4&", "&"1"&", "&CALCULO2!B4
A4	=CALCULO2!A5&", "&"2"&", "&CALCULO2!B5
A5	=CALCULO2!A6&", "&"3"&", "&CALCULO2!B6

	A
1	** Name: load-F1_1 Type: Concentrated force
2	*Cload, op=NEW
3	FUNDACAO-1.node_1, 1, -57268
4	FUNDACAO-1.node_1, 2, -842901
5	FUNDACAO-1.node_1, 3, 697771
6	** Name: load-F1_2 Type: Concentrated force
7	*Cload, op=NEW
8	FUNDACAO-1.node_2, 1, 1687270
9	FUNDACAO-1.node_2, 2, -2690140
10	FUNDACAO-1.node_2, 3, 1666760

Figura C.23 – Formatação final das forças de percolação nos dois primeiros nós.

C.6.2 Documento com os Vetores de Força

Com o auxílio do documento feito no excel, colamos os vetores originais, exemplo “F1.rtp”, na planilha “ENTRADA” e coletamos na planilha “SAIDA”.

Os vetores do documento “F1.rtp”, são convertidos no excel e salvos no documento “SFORCE-F01.txt”, “F2.rtp” no “SFORCE-F02.txt”, “F3.rtp” no “SFORCE-F03.txt” e “F4.rtp” no “SFORCE-F04.txt”.

O exemplo a seguir mostra a as primeiras linhas do documento “SFORCE-F01.txt”:

```
** Name: load-F1_1      Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.node_1, 1, -5726.8
FUNDACAO-1.node_1, 2, -84290.1
FUNDACAO-1.node_1, 3, 69777.1
** Name: load-F1_2      Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.node_2, 1, 168727
FUNDACAO-1.node_2, 2, -269014
FUNDACAO-1.node_2, 3, 166676
** Name: load-F1_3      Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.node_3, 1, -111884
FUNDACAO-1.node_3, 2, -608981
FUNDACAO-1.node_3, 3, 236301
** Name: load-F1_4      Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.node_4, 1, -580129
FUNDACAO-1.node_4, 2, -1834090
FUNDACAO-1.node_4, 3, 522799
** Name: load-F1_5      Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.node_5, 1, 98072.1
FUNDACAO-1.node_5, 2, -1706070
FUNDACAO-1.node_5, 3, 1351840
** Name: load-F1_11     Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.node_11, 1, -2388010
FUNDACAO-1.node_11, 2, -5976470
FUNDACAO-1.node_11, 3, 962908
```

C.7 Importar os Vetores de Força

Para importar as forças, primeiro copia-se todo o texto do “SFORCE-F1.txt” e o fecha o documento. Abre-se o documento “FORCA-PERCOLACAO.inp”:

Editar, Localizar..., “Load-PILOTO-F1”. Selecciona as cinco linhas:

```
** Name: Load-PILOTO-F1  Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 1, 100.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 2, 200.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 3, 300.
```

Agora cola-se por cima deste texto seleccionado o novo texto, importante não deixar linhas vazias. Salvamos o arquivo. Em seguida repete-se o procedimento para as forças F2:

Copia-se todo o texto do “SFORCE-F2.txt” e o fecha o documento.

Editar, Localizar..., “Load-PILOTO-F2”. Selecciona as cinco linhas:

```
** Name: Load-PILOTO-F2  Type: Concentrated force
*Cload, op=NEW
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 1, 100.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 2, 200.
FUNDACAO-1.Set-PILOTO, 3, 300.
```

Agora cola-se por cima deste texto seleccionado o novo texto, deletando as linhas vazias, se houver. Salvamos o arquivo.

O procedimento é repetido para as forças nos materiais F1 e F3 e o documento finalizado está pronto para ser salvo.

C.8 Rodar a Simulação

Abre-se um novo arquivo do Abaqus ® e o procedimento para rodar a simulação é o seguinte:

Job, Create..., *Source*: “Input file:”, Escolhe o arquivo “FORCA-PERCOLACAO.inp”, **Continue...**, **Parallelization, Use multiplex processors**, insere o número de processadores para a análise, **OK**;

Job, Data Check, “FORCA-PERCOLACAO”;

Job, Submit, “FORCA-PERCOLACAO”.

D – REFINAMENTO DA MALHA

D.1 Definição das Malhas

O Apêndice D apresenta a metodologia para o estudo de densidade da malha. Estão testados cinco densidades de malha (M1 até M5) e os tamanhos médios dos elementos para grupos de arestas do modelo de cada uma delas são mostrados na Tabela D.1. O procedimento para semear os tamanhos está descrito passo a passo no Item A.7 e que agora é feita a variação de valores da simulação piloto.

Vale ressaltar que para o refinamento, foram escolhidos os parâmetros utilizados no arranjo Y4 da Tabela 3.4 e a geometria da injeção de fundação utilizada é do arranjo I1, da Tabela 3.2.

Tabela D.1 – Tamanho dos elementos semeados nas cinco malhas.

Item	Região	Tamanho aproximado das subdivisões (m)				
		M1	M2	M3	M4	M5
A.7.3	Set-FRONTEIRA	600	400	300	200	180
	Set-REFINAMENTO1	150	100	75	50	40
	Set-REFINAMENTO2	45	30	22	15	13
A.7.4	Set-E1	90	60	45	30	25
	Face entre E2 e E3	60	40	30	20	16
	Face de Montante	15	10	8	5	4.5
A.7.5	Injeção baixo	6	4	3	2	1.6
	Injeção cima	12	8	6	4	3.5
A.7.6	Plinto	4.5	3	2	1.5	1.4
	Laje-Perímetro	2.4	1.6	1.2	0.8	0.7
	Laje-linha da base	3	2	1.5	1	0.9
	Laje-metade superior	6	4	3	2	1.8

As figuras a seguir mostram todas as cinco malhas, primeiro com uma vista geral (Figura D.1) que evidenciam os elementos maiores, depois com uma aproximação da região da laje de montante (Figura D.2) e por fim na região do plinto (Figura D.3).

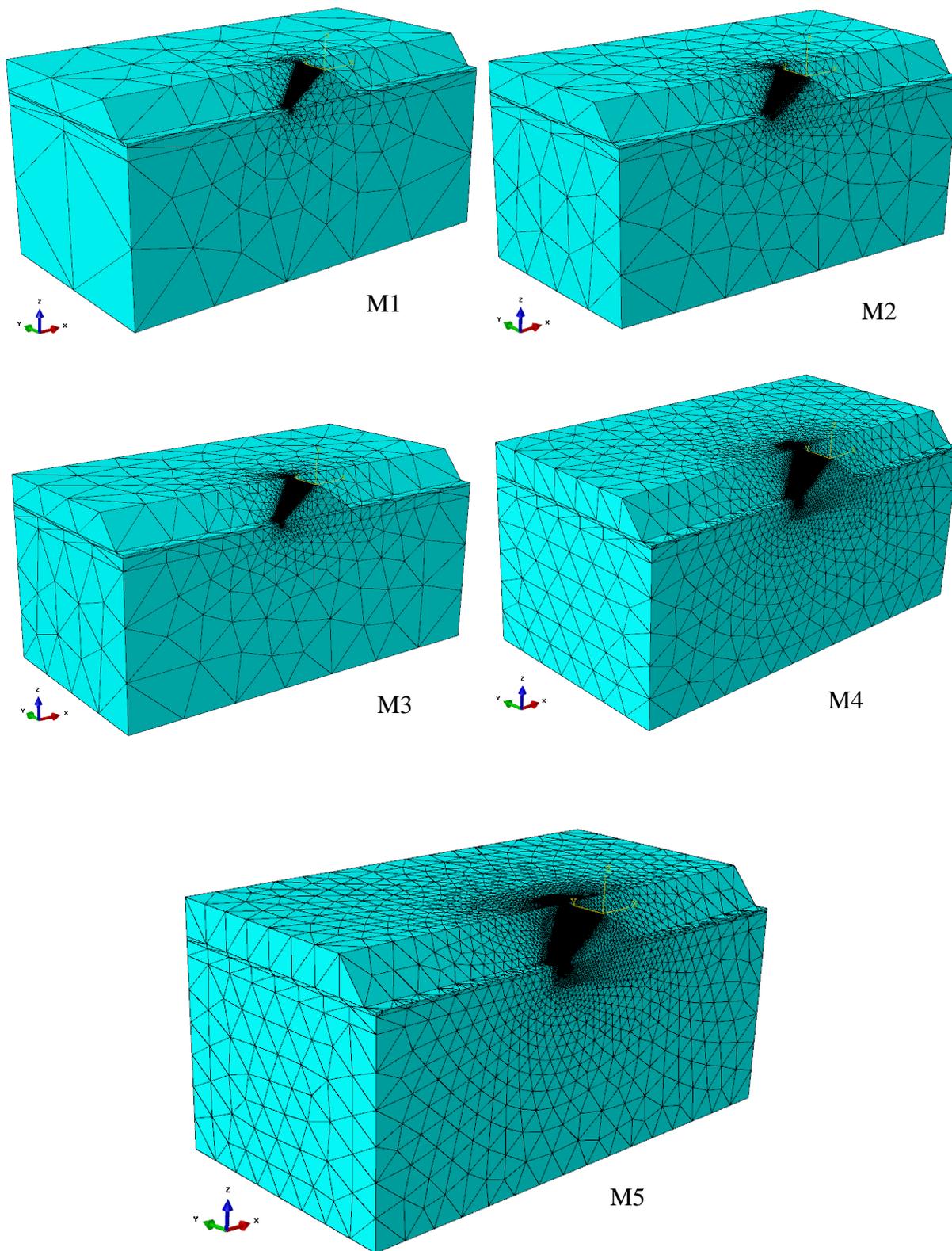


Figura D.1 – Cinco refinamentos de malha, vista geral.

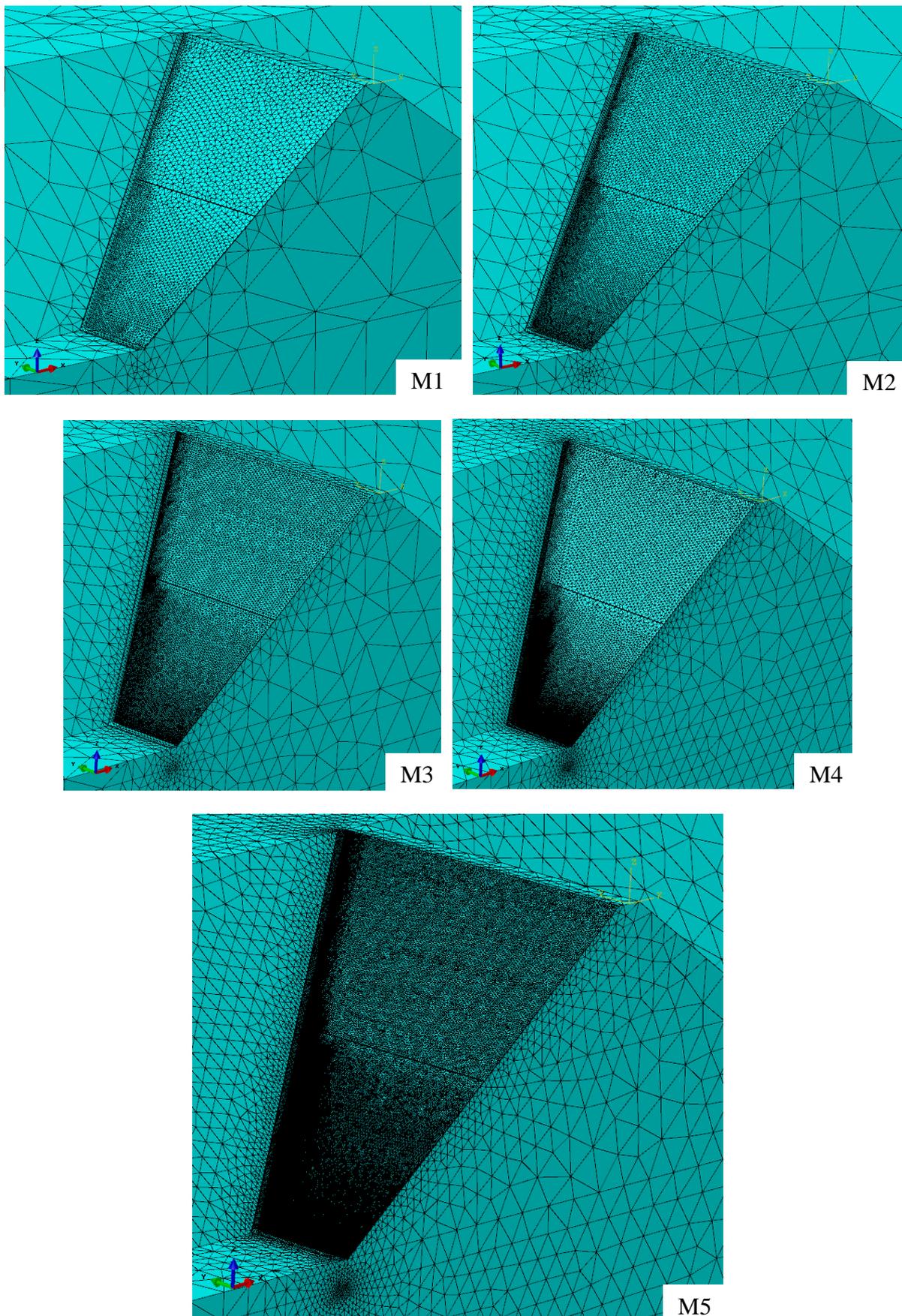


Figura D.2 – Cinco refinamentos de malha, detalhe do talude de montante.

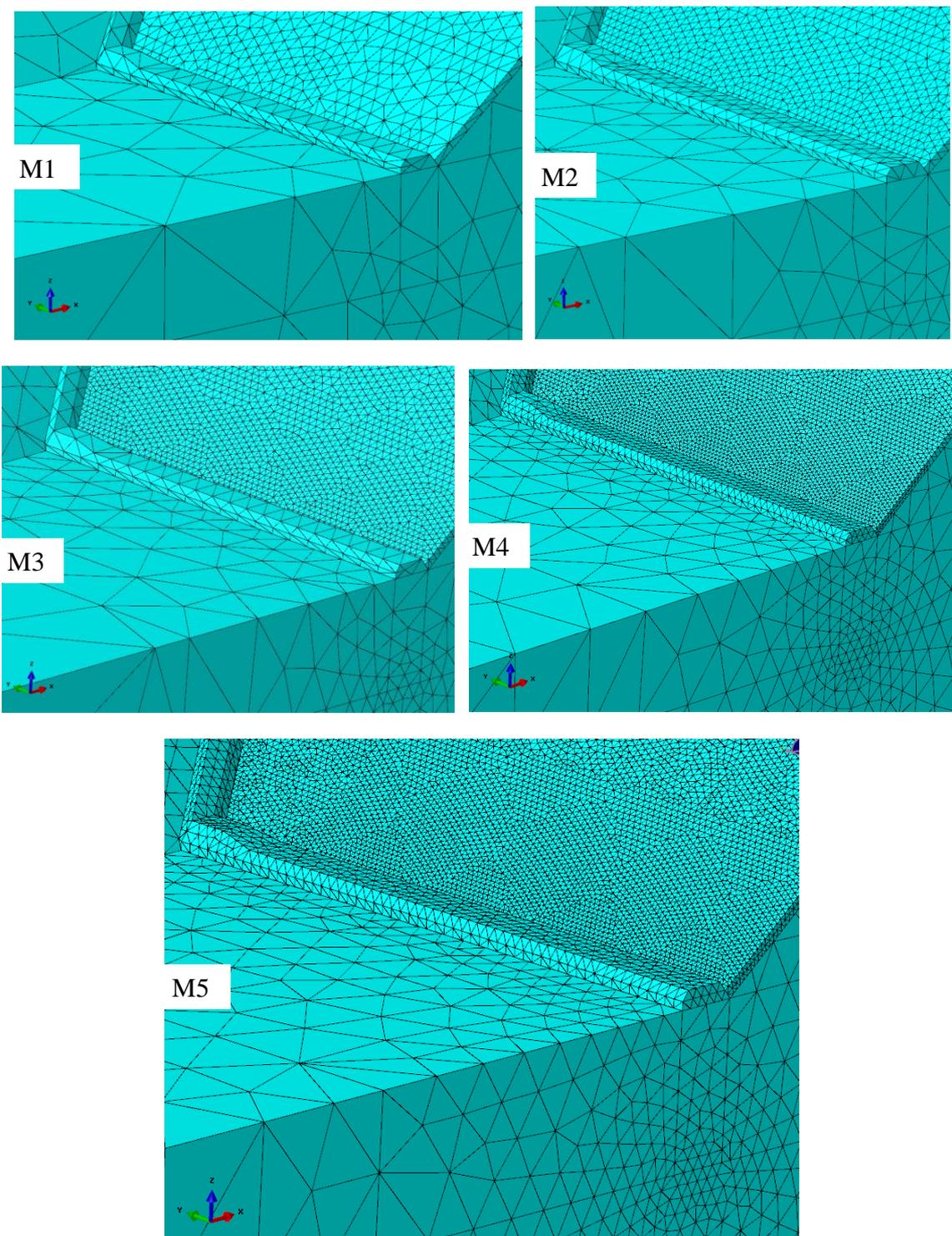


Figura D.3 – Cinco refinamentos de malha, detalhe do plinto de pé.

D.2 Escolha dos Pontos de Controle

O controle do deslocamento é feito em 18 nós que possuem posição coincidente em todas as malhas, são definidos nas subdivisões. Foram escolhidos:

- Cinco Nós A (Figura D.4) sobre a linha da fronteira do bloco 2 de refinamento da malha (cuja posição foi mostrada nas Figura 3.10 e Figura 3.13);
- Cinco Nós B (Figura D.5) sobre a linha da fronteira do bloco 1 de refinamento da malha (também foi mostrado nas Figura 3.10 e Figura 3.13);
- Quatro Nós C (Figura D.6) sobre a linha de montante do plinto;
- Quatro Nós D (Figura D.7) sobre a linha no plano de simetria da laje.

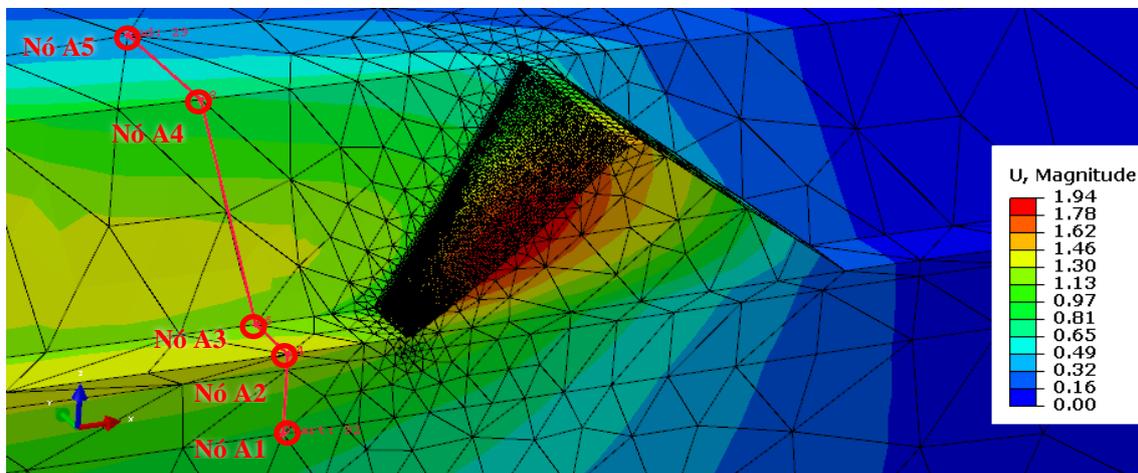


Figura D.4 – Nós A para controle de deslocamento.

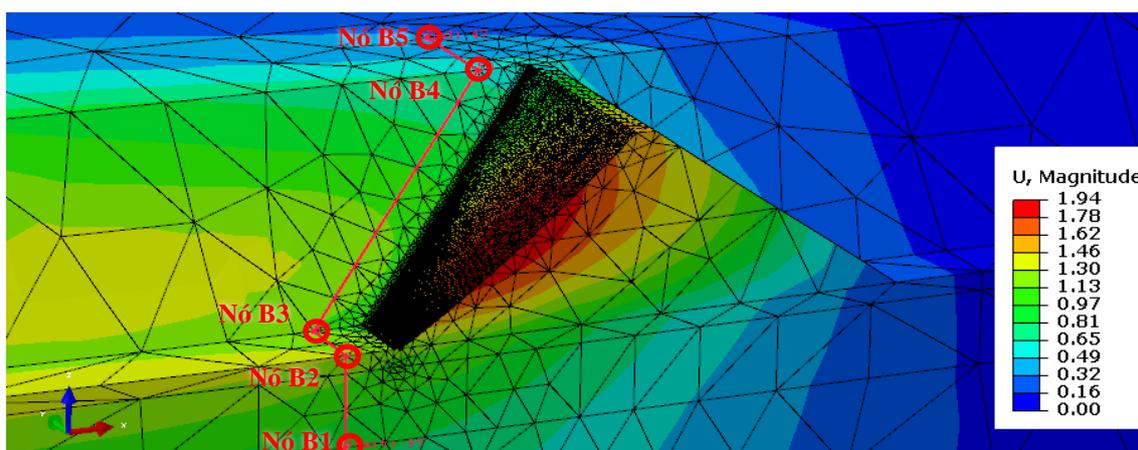


Figura D.5 – Nós B para controle de deslocamento.

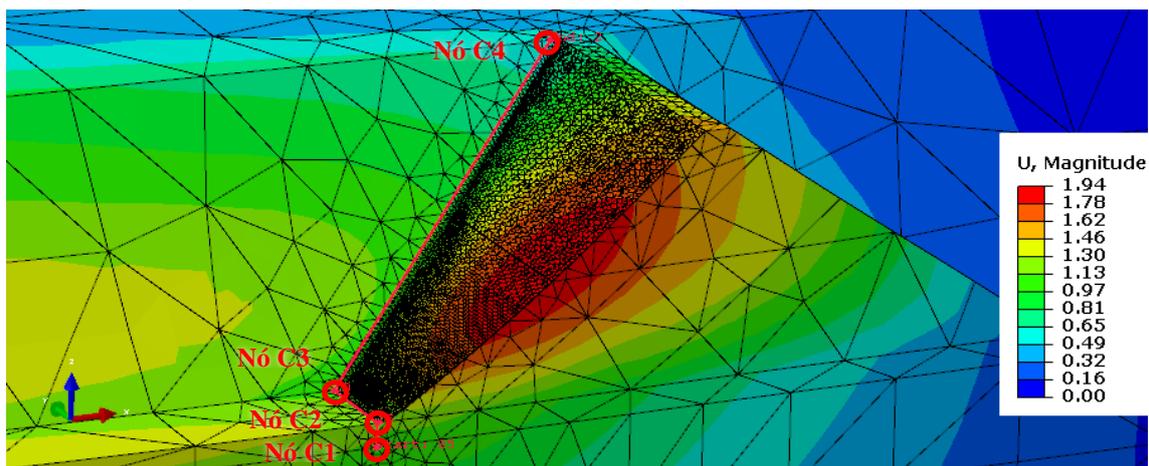


Figura D.6 – Nós C para controle de deslocamento.

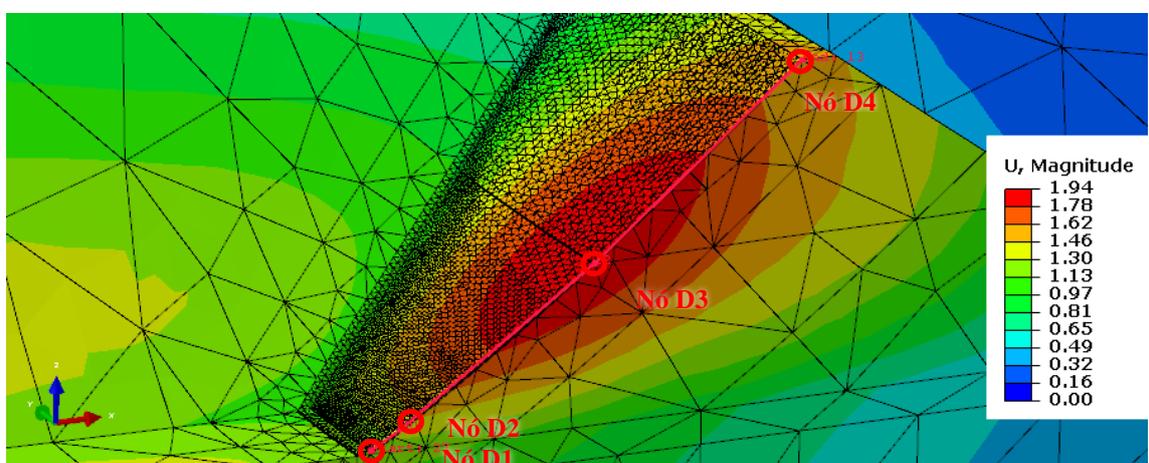


Figura D.7 – Nós D para controle de deslocamento.

D.3 Cálculos Numéricos

A Tabela D.2 mostra o número de nós e elementos de cada uma das malhas, seguindo dos tempos para rodar cada uma das simulações e de seus respectivos consumos de memória de acesso aleatório (*Random Access Memory – RAM*) do computador, que tem 20 GB instalado. Um gráfico ilustrativo do tempo vs número de nós pode é mostrado na Figura D.8, onde se verifica uma diferença de tempo muito grande entre a Malha-04 e a Malha-05.

Tabela D.2 – Informações sobre a malha e tempos de processamento.

	M1	M2	M3	M4	M5
Número de nós	140.243	321.663	548.211	823.123	1.780.423
Número de Elementos	71.741	167.371	290.609	474.584	1.005.647
Tempo de cálculo (s)	276	970	2410	5886	39745
RAM (GB)	6	10	13	17	20

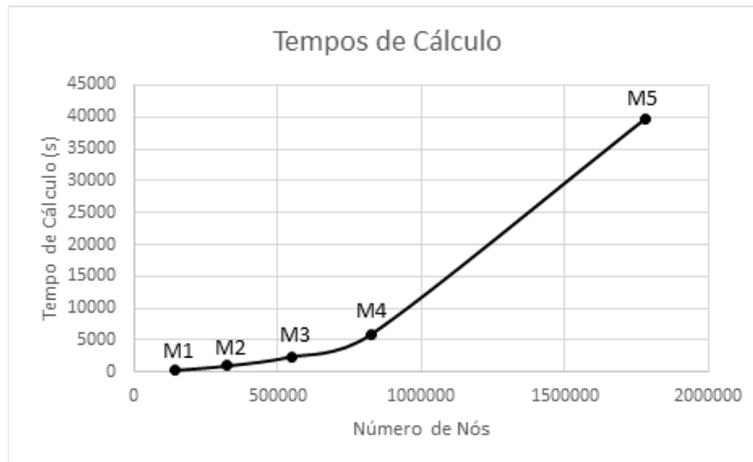


Figura D.8 – Tempos de cálculo vs número de nós para as cinco malhas.

Algumas informações da configuração e do desempenho no sistema operacional *Windows 7* podem ser visualizadas na Figura D.9.

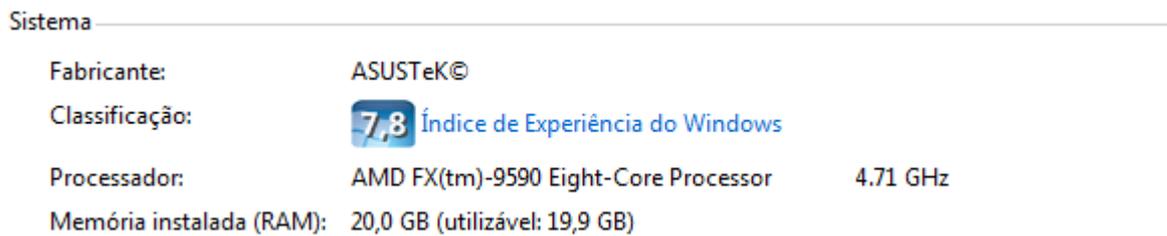


Figura D.9 – Índice de experiência do *Windows*, processador e memória instalada.

D.4 Resultados e escolha da malha

A seguir a tabela com os resultados de deslocamento nos 18 nós em cada uma das cinco malhas,



Figura D.10 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.

Tabela D.3. Observa-se que as variações de deslocamentos entre as malhas M4 e M5 são muito pequenas, que indica a convergência. O deslocamento de um dos nós em respeito ao número de nós pode ser visualizado na Figura D.10.



Figura D.10 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.

Tabela D.3 – Deslocamentos nos Nós (m).

	M1	M2	M3	M4	M5
Nó A1	0,9201	0,9229	0,9296	0,9344	0,9349
Nó A2	1,3657	1,3688	1,3790	1,3798	1,3808
Nó A3	1,2047	1,1979	1,1976	1,1927	1,1941
Nó A4	0,8357	0,8196	0,8117	0,8066	0,8050
Nó A5	0,3743	0,3694	0,3687	0,3681	0,3679
Nó B1	0,8641	0,8658	0,8695	0,8717	0,8720
Nó B2	1,2949	1,2971	1,3008	1,3032	1,3034
Nó B3	1,1121	1,1153	1,1159	1,1178	1,1162
Nó B4	0,6248	0,6253	0,6260	0,6266	0,6267
Nó B5	0,3410	0,3408	0,3413	0,3418	0,3418
Nó C1	1,0897	1,0908	1,0930	1,0944	1,0945
Nó C2	1,2056	1,2074	1,2094	1,2101	1,2106
Nó C3	1,0302	1,0277	1,0266	1,0288	1,0290
Nó C4	0,5774	0,5780	0,5788	0,5794	0,5794
Nó D1	1,1194	1,1179	1,1182	1,1183	1,1183
Nó D2	1,3624	1,3636	1,3680	1,3673	1,3676
Nó D3	1,9427	1,9431	1,9442	1,9450	1,9450
Nó D4	1,5003	1,5005	1,5013	1,5016	1,5016

A Tabela D.4 mostra os resultados das derivadas dos intervalos de deslocamento pelo número de nós (unidade 10^{-9} m). Observa-se que as últimas derivadas são as mais próximas de zero, como era de se esperar, isso indica a tendência de convergência entre as malhas M4 e M5. As derivadas de um dos nós podem ser visualizadas na Figura D.11, em função do número de nós.

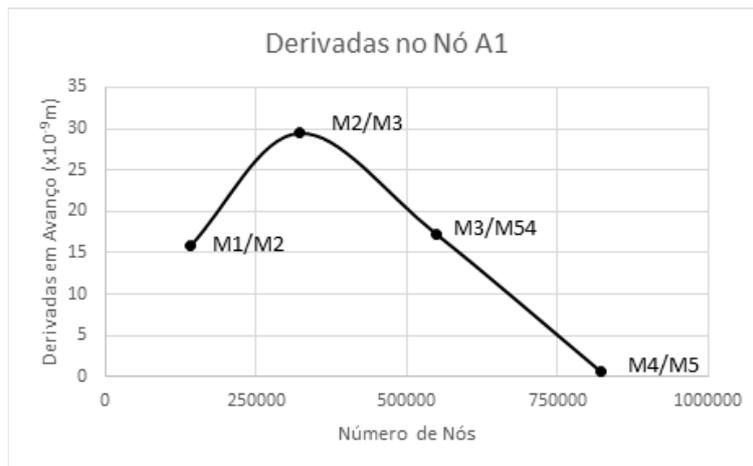


Figura D.11 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.

Tabela D.4 – Derivadas em avanço do deslocamento nos Nós pelo número de nós ($\times 10^{-9}$ m).

	M1/M2	M2/M3	M3/M4	M4/M5
Nó A1	15,78	29,46	17,31	0,56
Nó A2	16,76	45,24	2,84	1,02
Nó A3	37,15	1,54	17,90	1,55
Nó A4	88,91	34,66	18,50	1,70
Nó A5	27,03	3,14	2,19	0,21
Nó B1	9,62	16,42	7,84	0,32
Nó B2	12,13	16,42	8,73	0,16
Nó B3	17,80	2,60	7,09	1,68
Nó B4	2,50	3,11	2,40	0,13
Nó B5	1,17	2,59	1,52	0,03
Nó C1	5,95	9,98	4,80	0,20
Nó C2	9,48	9,18	2,40	0,51
Nó C3	13,45	5,08	7,97	0,28
Nó C4	3,14	3,37	2,19	0,01
Nó D1	8,32	1,41	0,36	0,02
Nó D2	6,34	19,69	2,51	0,27
Nó D3	2,43	4,99	2,66	0,02
Nó D4	1,38	3,31	1,24	0,06
Média Simples	15,52	11,79	6,14	0,49

O último indicador escolhido para avaliação da convergência é mostrado na Tabela D.5, com uma porcentagem de variação entre os deslocamentos entre malhas vizinhas, chamada de desvio em avanço, pois a diferença é dividida pelo valor em avanço. Observa-se ainda, que os últimos desvios estão quase todos abaixo de 0,1%, que reforça ainda mais a tendência de convergência

entre as malhas M4 e M5. Os desvios de um dos nós podem ser visualizadas na Figura D.12, em função do número de nós.



Figura D.12 – Deslocamento no Nó A1 vs número de nós.

Tabela D.5 – Desvios em avanço do deslocamento nos Nós (%).

	M1/M2	M2/M3	M3/M4	M4/M5
Nó A1	0,31	0,72	0,51	0,06
Nó A2	0,22	0,74	0,06	0,07
Nó A3	0,56	0,03	0,41	0,12
Nó A4	1,97	0,97	0,63	0,20
Nó A5	1,33	0,19	0,16	0,05
Nó B1	0,20	0,43	0,25	0,03
Nó B2	0,17	0,29	0,18	0,01
Nó B3	0,29	0,05	0,17	0,14
Nó B4	0,07	0,11	0,11	0,02
Nó B5	0,06	0,17	0,12	0,01
Nó C1	0,10	0,21	0,12	0,02
Nó C2	0,14	0,17	0,05	0,04
Nó C3	0,24	0,11	0,21	0,03
Nó C4	0,10	0,13	0,10	0,00
Nó D1	0,14	0,03	0,01	0,00
Nó D2	0,08	0,33	0,05	0,02
Nó D3	0,02	0,06	0,04	0,00
Nó D4	0,02	0,05	0,02	0,00
Média Simples	0,33	0,27	0,18	0,05

Frente ao exposto, podemos traçar os gráficos das médias da derivadas (Figura D.13) e da média dos desvios (Figura D.14) dos valores mostrados na Tabela D.6. Como observado nos demais gráficos, a diferença de deslocamento entre as malhas M4 e M5 é muito pequena, porém o

tempo de processamento tem uma diferença de mais de seis vezes (Tabela D.2), frente ao exposto, a malha escolhida é a M4.

Tabela D.6 – Derivadas e desvios médios dos 18 nós, ambos em avanço.

	M1/M2	M2/M3	M3/M4	M4/M5
Média das derivadas ($m \cdot 10^{-9}$)	15,52	11,79	6,14	0,49
Média dos desvios (%)	0,33	0,27	0,18	0,05

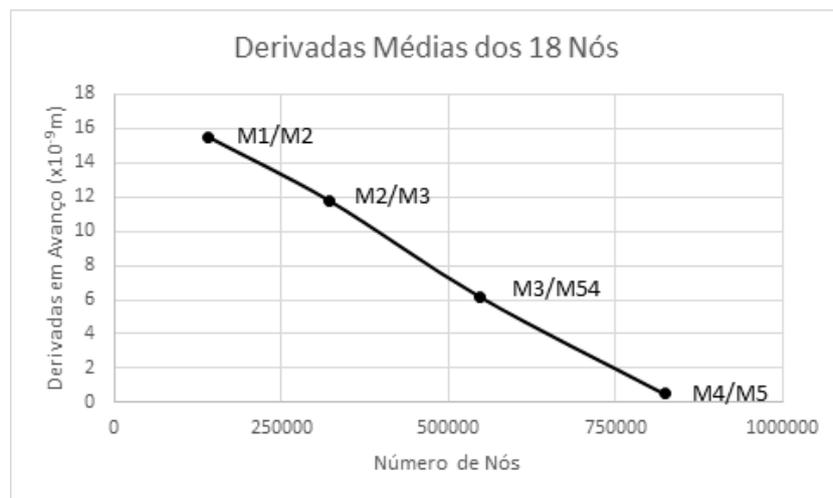


Figura D.13 – Derivadas das médias dos 18 nós pelo número de nós, em avanço.

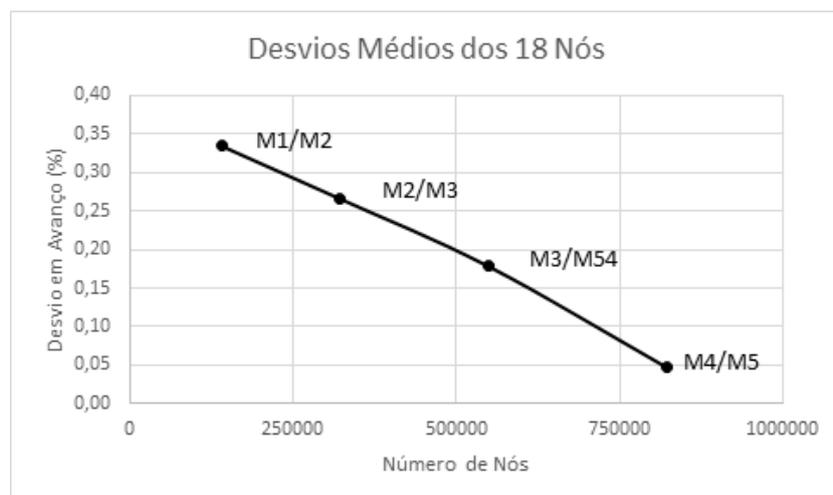


Figura D.14 – Desvio da média dos 18 nós pelo número de nós, em avanço.