

ROSSANA HERRERA LÓPEZ

**APLICAÇÃO DA MECÂNICA DE FRATURA À
ANÁLISE DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE
CONCRETO FUNDADAS EM ROCHA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino

São Carlos

2005

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

H565a Herrera López, Rossana
Aplicação da mecânica de fratura à análise de
fundações de barragens de concreto fundadas em rocha /
Rossana Herrera López. -- São Carlos, 2005.

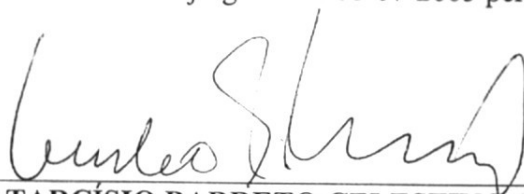
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Geotecnia.
Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino.

1. Mecânica da fratura. 2. Barragem. 3. Fundação
rochosa. 4. Modelo do Dano. 5. Propagação da fratura.
6. Zona tracionada. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

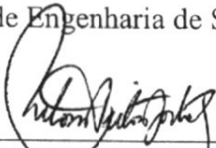
Candidata: Engenheira **ROSSANA HERRERA LÓPEZ**

Dissertação defendida e julgada em 01-07-2005 perante a Comissão Julgadora:



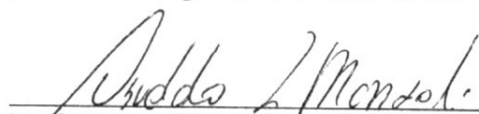
Prof. Dr. **TARCÍSIO BARRETO CELESTINO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado




Prof. Dr. **ANTÔNIO AIRTON BORTOLUCCI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

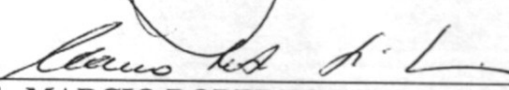


Prof. Dr. **OSVALDO LUIS MANZOLI**
(UNESP/Bauru)

APROVADO



Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia



Prof. Associado **MARCIO ROBERTO SILVA CORRÊA**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação, em Exercício

A minha mãe Alejandra, que com seu amor, valentia e exemplo de trabalho orientou e motivou a minha vida. E as minhas irmãs Carmen e Rut pelo apoio desmedido na minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida e a oportunidade de estudar e compartilhar com o próximo.

A CNPq pela oportunidade e financiamento na realização da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Tarcísio B. Celestino, pela orientação, ensinamentos e críticas que contribuíram muito na minha formação de Mestre.

Ao Prof. Dr. Osvaldo L. Manzoli pelo contínuo apoio, orientação e amizade na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Antonio Airton Bortolucci e ao Prof. Dr. Edmundo Esquivel pelo grande e constante apoio durante a realização do trabalho.

Ao geólogo Giácomo Re e à engenheira Kênia Damaseno pelo generoso apoio técnico.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram para o meu aperfeiçoamento profissional e elaboração deste trabalho, em especial aos Profs. Dr. José C. Cintra, Prof. Dr. Orencio Monje Vilar, Prof. Dr. José E. Rodrigues, ao Prof. Dr. Nelson Aoki, ao Prof. Dr. João B. Nogueira, ao Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette e ao Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno.

Aos Drs. Philippe Martin, Dr. C. Wei, ao engenheiro amigo Jorge Bustamante Dawson que me deram muito apoio no aperfeiçoamento profissional. E aos meus professores Mijail Shteinberg, Victor Dorozhkin e Constantin Karadzhi pela sua dedicação e ensino na minha formação profissional no Instituto de Engenharia de Construção de Odessa.

A todos meus colegas pela amizade e contribuição na realização deste trabalho em especial Heraldo N. Pitanga, Leonardo Silveira, Sara Rodrigues, Miguel Alfaro, Eliana Martins, Kleber, Enrique, Mauricio, Jean Carlo, Ivan, Clóvis. E a Héctor Velásquez pela sua amizade e motivação.

Às secretarias Maristela e Neiva pela ajuda generosa, ao engenheiro Herivelto Moreira dos Santos pelos múltiplos socorros no uso da informática.

Ao povo brasileiro, amigo e generoso, pela acolhida fraterna. E às minhas amigas Maribel Funes, Daniane Vicentini e Marly Monma pela amizade e apoio.

RESUMO

HERRERA, R.L (2005). Aplicação da Mecânica da Fratura à análise de fundações de barragens de concreto fundadas em rocha. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

O presente trabalho de pesquisa está relacionado à análise do progresso do fraturamento na zona tracionada de fundações rochosas de barragens de concreto e suas conseqüências nas avaliações de estabilidade global. Tomou-se como exemplo a barragem de Porto Primavera de propriedade da CESP (Companhia Energética de São Paulo), situada entre os Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, Brasil. Com a ajuda de modelos elaborados com elementos finitos e sob a ótica da Mecânica da Fratura não linear e da Mecânica do Dano, analisa-se o desenvolvimento da fratura mediante uma avaliação iterativa tensão-deformação e carga hidráulica. Devido ao carregamento progressivo de água, realiza-se a análise iterativa baseada no avanço da fratura e na aplicação de pressão hidráulica, até quando a fratura deixa de progredir. A simulação numérica proposta tem o objetivo de estudar o desenvolvimento de fraturas, determinar as deformações ocorridas sob a ação das forças de empuxo d'água, de subpressão, do peso próprio e das pressões de água na fratura do maciço rochoso fraturado. As deformações calculadas são comparadas com registros da instrumentação na fundação efetuados durante o enchimento do reservatório, o que permitirá o ajuste dos parâmetros adotados na simulação, assim como estabelecer as reais características da fundação.

Palavras-chave: Mecânica da Fratura, barragem, fundação rochosa, Modelo do Dano, propagação da fratura, zona tracionada.

ABSTRACT

HERRERA, R.L. (2005). The application of Rock Mechanics to the analysis of rock foundations of concrete dams. M.Sc. Dissertation. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

This study is related to the analysis of crack propagation in the tensioned zone of concrete dam foundation. The example of Porto Primavera dam owned by CESP (São Paulo State Power Company) Brazil is presented. Fracture growth is analyzed by mean iterative stress-strain and hydraulic head analysis with codes based on finite elements incorporating non-linear fracture mechanics and damage models. Due to progressive load of water, a step-by-step analysis is performed, based on the development of fracture and application of forces due of hydraulic pressure. The proposed numerical simulation has the purpose of studying the development of fracture, determining deformations due to the action of uplift pressure, self-weight and hydraulic pressure on the fracture walls. The computed deformations are compared with instrumentation data, obtained during the impoundment of the reservoir, from devices installed in the foundation, which will allow to adjust the adopted parameters in the simulation and to determine the real characteristics of the foundation.

Keywords: Fracture Mechanics, dam, rock foundation, Damage model, fracture propagation, tension zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tomada de água e casa de força da barragem Água Vermelha (Celestino, 1983).	7
Figura 2.2 - Instrumentação do vertedouro da barragem de Ilha Solteira (Celestino, 1983).	9
Figura 2.3 - Relação entre deslocamentos calculados e medidos (extensômetros longos).	10
Figura 2.4 - Esquema dos índices usados na análise de Cruz (1978).	15
Figura 2.5 - Esquema de subpressão no contato concreto-rocha (Cruz, 1978).....	16
Figura 2.6 - Esquema de subpressões na fundação com descontinuidade (Cruz, 1978). 16	
Figura 2.7 - (a) Subpressão na fundação do vertedouro de fundo da barragem Jupuí. (b) Na fundação da barragem de Capivara (Cruz,1978).....	18
Figura 2.8 - Leituras piezométricas da subpressão na base das barragens com $B=0,7H$ a $1,0H$	19
Figura 2.9 - Leituras piezométricas da subpressão nas descontinuidades da fundação de barragens com $B=0,7H$ a $1,0H$	19
Figura 2.10 - Diagrama de subpressão proposto na base da barragem sob condições normais.	20
Figura 2.11 - Diagrama de subpressão proposto em descontinuidades sob condições normais.	20
Figura 2.12 - Variações na permeabilidade com a profundidade (Apud Cruz e Silva, 1978).	21
Figura 2.13 - Critério proposto para a redução do empuxo de água (Cruz e Silva, 1978).	22

Figura 2.14 - Fraturas no pé de montante da barragem Kölbrein (Linsbauer et al., 1989).	23
Figura 2.15 - Fraturas no pé da barragem (Linsbauer et al., 1989).....	23
Figura 2.16 - Esquemas dos quatro modelos para fraturamentos ao lado da montante: (a) Modelo de fratura em ângulo; (b) Modelo sem interligação barragem-macijo; (c) Modelo de rigidez variável da base e (d) Modelo de junta de fundação.	24
Figura 2.17 - Esquema de carregamento (Linsbauer et al. 1989)	25
Figura 2.18 - Detalhe da zona de propagação da fratura (modelo de fratura em ângulo).	25
Figura 2.19 - Detalhe da malha após dois intervalos de avanço da fratura (modelo sem interligação barragem-macijo).	26
Figura 2.20 - Seção transversal da barragem com a instrumentação Piezodex e Micrômetros deslizantes, as juntas S, L e o selo de neoprene.	28
Figura 2.21 - Perfis da deformação ao longo das duas perfurações (Kóvari e Bergamin, 1994).	29
Figura 2.22 - Desenvolvimento da deformação na junta ativa S (medida da posição GM.1.46) devido à variação do nível de água.	30
Figura 2.23 - Comparação dos valores de pressão calculados com as leituras no nível 2162m (Kóvari e Bergamin, 1994).	31
Figura 2.24 - Energia e variação da energia em função do tamanho da fratura (Bortolucci, 1994)	33
Figura 2.25 - Modos de propagação da fratura.	34
Figura 2.26 - Curva uniaxial tensão-deformação para o modelo de degradação (Olivier et al., 1990).	36
Figura 2.27 - Superfície limite inicial do dano no espaço das tensões principais efetivas biaxial.....	38
Figura 2.28 - Esquema de Cálculo de Andrade (1988).....	43
Figura 2.29 - Definição da subpressão média (Sd) segundo Andrade (1988).	43
Figura 2.30 - Consideração do fator de forma, l (Andrade, 1988).....	44
Figura 2.31 - Tipos de abertura ou descontinuidade (Andrade, 1980).	46

Figura 2.32 - Substituição do modelo real (A) pelo modelo teórico (B)	46
Figura 3.1 - Seção de análise do vertedouro sob carga máxima atual de água.....	50
Figura 3.2 - Seção de análise da casa de força sob a carga máxima de água.....	51
Figura 3.3 - Localização em planta do vertedouro BV-6.....	51
Figura 3.4 - Localização em planta da zona da tomada de água e da casa de força U-10.	52
Figura 3.5 - Esquema de carregamento hidráulico do vertedouro.	55
Figura 3.6 - Esquema do carregamento hidráulico na tomada e casa de força.....	55
Figura 3.7 - Esquema de cálculo das forças nodais equivalentes.	56
Figura 3.8 - Esquema de cálculo da carga de água a jusante do vertedouro.....	57
Figura 3.9 - Esquema de cálculo das forças a jusante da casa de força.	58
Figura 3.10 - Esquema de aplicação da carga na entrada do conduto e na zona de saída.	59
Figura 3.11 - Esquema para o cálculo das forças equivalentes na fenda do vertedouro.	60
Figura 3.12 - Esquema para o cálculo das forças nodais na fenda.....	60
Figura 3.13 - Malha de análise do vertedouro (Programa GID).	67
Figura 3.14 - Malha de análise da casa de força.	67
Figura 3.15 - Pressão de água na fratura (Reich et al. 1994).	68
Figura 3.16 - Orientação da fratura e ângulos de inclinação das forças.	69
Figura 3.17 - Esquema da aplicação das forças nodais nos elementos danificados.....	69
Figura 3.18 - Modelo de análise para calcular as forças equivalentes da subpressão no vertedouro (Programa SEEP/W).	70
Figura 3.19 - Discretização da zona de fratura para o cálculo da subpressão.....	71
Figura 3.20 - Modelo de análise para calcular as forças equivalentes da subpressão na casa de força.....	71
Figura 3.21 - Discretização da zona de fratura para o cálculo da subpressão.....	72
Figura 4.1 - Desenvolvimento da fratura: (a) sob carga do nível 242m e (b) sob a aplicação da carga do mesmo nível na fratura.	73
Figura 4.2 Avanço da fratura sob carga do nível de água 244m.....	74

Figura 4.3 Avanço da fratura sob carga do nível de água 247m.....	74
Figura 4.4 Avanço da fratura sob carga do nível de água 250m.....	74
Figura 4.5 Avanço da fratura sob carga do nível de água 253m.....	75
Figura 4.6 Avanço da fratura sob carga do nível de água 257m.....	75
Figura 4.7 Extensômetros e Piezômetros existentes na seção de análise do vertedouro.	79
Figura 4.8 Extensômetros e Piezômetros existentes na seção de análise da casa de força.	80
Figura 4.9 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-261.	81
Figura 4.10 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-261.....	81
Figura 4.11 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-261.....	82
Figura 4.12 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-262.....	82
Figura 4.13 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-262.....	83
Figura 4.14 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-262.....	83
Figura 4.15 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-566.....	84
Figura 4.16 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-566.....	84
Figura 4.17 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-566.....	85
Figura 4.18 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-567.....	85
Figura 4.19 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-567.....	86

Figura 4.20 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-567.....	86
Figura 4.21 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-568.....	87
Figura 4.22 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-568.....	87
Figura 4.23 Comparação das vazões dos drenos do bloco BV-6 e as respectivas vazões calculadas.	88
Figura 4.24 Comparação das vazões dos drenos da U-10 e as respectivas vazões calculadas.	88
Figura 4.25 Deslocamentos das hastes no tempo do enchimento em relação ao nível de água do reservatório.	90
Figura 4.26 Deslocamentos das hastes em relação à temperatura média.....	91
Figura 4.27 Deslocamentos das hastes no tempo em relação ao nível de água do reservatório.....	91
Figura 4.28 Deslocamentos das hastes em relação à temperatura média.....	92
Figura 4.29 Deslocamentos das hastes no tempo em relação ao nível de água.	93
Figura 4.30 Deslocamentos das hastes do EH-566 em relação à temperatura média.	93
Figura 4.31 Deslocamentos das hastes no tempo em relação ao nível de água.	94
Figura 4.32 Deslocamentos das hastes do EH-568 no tempo em relação ao nível de água.	94
Figura 4.33 Deslocamentos das hastes do EH-568 em relação à temperatura média.	95
Figura 4.34 Comparação das hastes 1 dos extensômetros 261 e 262.....	95
Figura 4.35 Comparação das hastes 2 dos extensômetros 261 e 262.....	96
Figura 4.36 Comparação das hastes 3 dos extensômetros 261 e 262.....	96
Figura 4.37 Comparação das hastes 1 dos extensômetros 566 e 567.....	97
Figura 4.38 Comparação das hastes 2 dos extensômetros 566 e 567.....	97
Figura 4.39 Comparação das hastes 3 dos extensômetros 566 e 567.....	98
Figura 4.40 Desenvolvimento da fratura a montante do vertedouro.....	99

Figura 4.41 Desenvolvimento da fratura a montante da estrutura tomada de água-casa de força.	99
Figura 4.42 Leituras dos piezômetros a montante em relação ao nível de água.....	100
Figura 4.43 Localização da fratura em relação aos piezômetros na seção BV-2.....	100
Figura 4.44 Leituras dos piezômetros PZ-221, PZ-222, PZ-223, PZ-224, PZ-225 e PZ-226 no vertedouro BV-2.	101
Figura 4.45 Subpressão calculada sem fratura e com fratura na fundação do vertedouro.	101
Figura 4.46 Comparação dos critérios de projeto e o resultado da simulação numérica.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros característicos dos materiais para a simulação do vertedouro.....	53
Tabela 2. Parâmetros característicos dos materiais para a simulação da casa de força. .	53
Tabela 3 Valores calculados da Energia de fratura para o basalto.....	54
Tabela 4. Valores da condutividade hidráulica.	54
Tabela 5. Pressões a montante e a jusante, e cargas pontuais no vertedouro.....	59
Tabela 6. Pressões de água a montante e a jusante da casa de força.....	59
Tabela 7. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-261 no vertedouro.....	76
Tabela 8. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-262 no vertedouro.....	76
Tabela 9. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-566 na casa de força.	77
Tabela 10. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-567 na casa de força.	77
Tabela 11. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-568 na casa de força.	77
Tabela 12. Cota de instalação dos extensômetros e dos piezômetros do vertedouro.....	79
Tabela 13. Cota de instalação dos extensômetros e dos piezômetros da casa de força. .	80

LISTA DE SÍMBOLOS

- A^+ Parâmetro de abrandamento.
 A Área onde ocorre o escoamento na unidade de largura.
 A_d Superfície da circunferência do dreno.
 a Semi comprimento da fratura.
 a_d Distância entre furos de drenagem.
 B Largura da base da barragem.
 b Distância do dreno até a face de jusante.
 \overline{CD} Coluna de água no dreno.
 D_0 Tensor constitutivo elástico linear de quarta ordem.
 d^+ Variável interna do dano de tração.
 d^- Variável interna do dano de compressão.
 d Variável de dano.
 E Módulo de elasticidade.
 E_d Eficiência de drenagem.
 E_x Módulo de deformabilidade na direção x.
 E_y Módulo de deformabilidade na direção y.
 e Abertura nominal da fratura.
 e_1, e_2, e_3 Altura de aplicação das cargas nodais equivalentes.
 ε Deformação específica.
 F_1, F_2, F_3 Forças nodais equivalentes.
 F_{eq} Força equivalente.
 f_0^+, f_0^- Limites de proporcionalidade.
 f_t Resistência à tração.
 f Fator de escoamento.
 ϕ Diâmetro do furo de drenagem.
 γ Energia específica de superfície livre.

γ_c	Peso específico do concreto.
γ_m	Peso específico do maciço saturado.
γ_n	Peso específico do maciço em condição natural.
γ_w	Peso específico da água.
G	Variação da liberação de energia.
G_c	Energia de ruptura crítica.
G_F	Energia de fratura do material.
g	Aceleração da gravidade.
H_m	Carga hidráulica a montante.
H_j	Carga hidráulica a jusante.
H_d	Carga de água na boca do dreno.
H_{dr}	Profundidade do dreno.
H_1, H_2, H_3	Altura da zona de influencia das cargas a jusante.
h_1, h_2, h_3	Altura dos níveis de carga de água.
i	Gradiente hidráulico.
K	Fator de intensidade de tensão.
K_c	Tenacidade à fratura.
k_d	Condutividade hidráulica do dreno.
k_h	Condutividade hidráulica horizontal.
k_v	Condutividade hidráulica vertical.
k_x	Condutividade hidráulica na direção x.
k_y	Condutividade hidráulica na direção y.
K	Coefficiente de empuxo.
k_f	Condutividade da fratura.
k_t	Condutividade total o ponderada do elemento danificado.
L	Comprimento da circunferência do dreno.
l	Distância de um ponto qualquer até o dreno.
l_e	Largura do elemento.
λ	Fator de forma da linha de drenos.
n	Número de elemento.
μ	Viscosidade dinâmica.
p, p_1	Pressões de água.
ν	Viscosidade cinemática de água.

Q	Vazão do meio.
Q_d	Vazão no dreno.
Q_t	Vazão total do elemento danificado.
Q_f	Vazão da abertura da fratura.
Q_m	Vazão da zona do elemento sem fratura.
q	Vazão do meio descontínuo.
q_m	Vazão que penetra a montante.
q_d	Vazão que sai pelo dreno.
q_j	Vazão que sai por jusante.
q_1, q_2, q_3	Pressões de água.
r^+	Limite corrente de dano de tração.
r^-	Limite corrente de dano de compressão.
r_0^+, r_0^-	Limites correntes de dano iniciais.
r_d	Raio do dreno.
σ	Tensão.
σ_{cr}	Tensão crítica para ruptura.
$\bar{\sigma}$	Tensão efetiva.
$\bar{\sigma}^+$	Tensão efetiva de tração.
$\bar{\sigma}^-$	Tensão efetiva de compressão.
σ_h	Tensão horizontal.
σ_v	Tensão vertical.
S	Área total.
S_D	Área das microfissuras e cavidades.
S_d	Subpressão média.
s	Distância do dreno até a face de montante.
s_1, s_2, s_3	Pressões de água.
$\bar{\tau}^+$	Norma de tensão efetiva de tração.
$\bar{\tau}^-$	Norma de tensão efetiva de compressão.
U_e	Energia de deformação.
U_s	Energia de superfície.
U_t	Energia total.
v_m	Velocidade média.

v Coeficiente de Poisson.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Apresentação do trabalho	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Antecedente de estudos de barragens no Brasil.....	4
2.1.1 Água Vermelha	6
2.1.2 Itaipu	7
2.1.3 Porto Primavera	8
2.1.4 Ilha Solteira.....	9
2.2 Antecedente de estudos de barragens no exterior.....	22
2.2.1 Barragem Kölblrein.....	23
2.2.2 Barragem Albigna.....	27
2.3 A mecânica de Fratura.....	31
2.3.1 Balanço Energético de Griffith	31
2.3.2 Modos de propagação da fratura.....	34
2.4 Modelo de Propagação de Fratura	35
2.5 Determinação da Subpressão.....	39
2.5.1 Determinação da subpressão média.....	41
2.5.2 Escoamento do fluxo.....	45
3. METODOLOGIA.....	48
3.1 Parâmetros de análise	50
3.1.1 Cálculo das forças atuantes.....	54
3.1.2 Subpressão e Pressão Média	60

3.1.3	Condutividade hidráulica do dreno.....	62
3.1.4	Cálculo da condutividade hidráulica na fratura	63
3.1	Modelos de análise	65
3.2.1	Modelo Tensão-Deformação e Pressão de água	65
3.2.2	Modelo de análise de fluxo e subpressão.....	69
4.	RESULTADOS	73
4.1	Aferição dos resultados	78
4.2	Discussão	88
5.	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXO A	109
	ANEXO B	157

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As estruturas de barragens são geralmente as obras mais caras construídas pelo homem. Isto se vê refletido no grande esforço que os engenheiros fazem para garantir que sejam projetadas, construídas e mantidas sob critérios de vanguarda e tecnologia. Durante muito tempo, os projetos de barragens foram analisados com métodos clássicos que não permitiam distinguir quando e por que se produz o fraturamento das estruturas e suas fundações. A grande preocupação em manter a segurança das barragens de concreto tem motivado a realização de inúmeros estudos com o intuito de determinar os fatores que influem a formação e desenvolvimento das fraturas. As barragens de concreto assentadas nos maciços rochosos e submetidas a empuxos de água experimentam fraturamento tanto no próprio corpo da estrutura, como também na fundação, sendo esta zona objeto do presente estudo.

Devido às tensões de tração impostas pelo carregamento de empuxo a montante, fendas se formam na rocha do pé da barragem. A presença destas fraturas ou fendas, como já é conhecido, pode originar uma série de problemas no que concerne ao funcionamento normal das estruturas hidráulicas, produzindo, principalmente, grandes vazamentos ou a desestabilização da estrutura, o que, em muitos casos, pode levá-la ao colapso.

Como exemplo, podemos citar os estudos efetuados na barragem de Itaipu relatados no trabalho de Rosso *et al.* (1997), em que, devido à presença de fendas no concreto, foram constatadas grandes vazões de infiltração, observando-se a dependência das vazões em relação às fraturas originadas pelas variações da temperatura-ambiente. Salienta-se, porém, que o fator temperatura não é o único. Em barragens, como a de Kolbrein na Áustria, segundo o estudo de Linsbauer *et al.* (1989), o aparecimento das fraturas se deu devido à ação das cargas hidráulicas ou de empuxo, assim como devido

ao peso próprio e às tensões na base da barragem. Outro caso digno de ser citado é a barragem de Albigna na Suíça, onde Kovári e Bergamin (1994) com ajuda de instrumentação conseguiram descobrir a existência de fissuras, na fundação de montante, que originavam deformações na estrutura e mudanças da permeabilidade devido à variação do nível de água.

É importante aclarar que as forças de percolação e os sismos também são fatores que influem na estabilidade do sistema barragem-fundação-água.

A problemática das fraturas em concreto e em rocha tem sido um dos objetivos de estudo da Mecânica da Fratura, cujos princípios tornam possível a análise de situações de tensões em zonas onde o critério clássico da resistência dos materiais não funciona.

A Mecânica da Fratura, cujos princípios permitem conhecer e controlar a propagação das fraturas, pode ser aplicada com a ajuda de modelos numéricos, os que trabalham principalmente com elementos finitos. Modelos numéricos, como o Modelo de Dano, são empregados na análise do desenvolvimento da fratura em rochas ou em concreto. Mas, embora as técnicas de análise ajudem muito na representação matemática da estrutura interagindo com a fundação e a água do reservatório, ainda não se consegue fazer a fiel representação do sistema barragem-fundação-água. Detalhes da caracterização do contorno do modelo e do material ainda sofrem simplificações que permitam viabilizar a análise e obter conclusões razoáveis.

1.2 Apresentação do trabalho

O presente trabalho tenta desenvolver uma metodologia que, baseada em um modelo matemático, permita realizar uma análise iterativa do estado de tensão-deformação do maciço e a consideração da pressão hidrostática na fratura após o carregamento progressivo d'água durante o enchimento do reservatório.

No desenvolvimento do trabalho, apresenta-se, num primeiro momento, a revisão bibliográfica relacionada ao estudo, onde são expostos antecedentes de estudos realizados em barragens no Brasil e no exterior. Seguidamente, trata-se de dar uma abordagem simples e concisa do fundamento teórico da Mecânica da Fratura e sua aplicação na Mecânica das Rochas. Igualmente, apresentam-se os conceitos principais da Teoria da Mecânica do Dano, na qual se baseia o Modelo de propagação de fratura que foi usado na análise e que fornece os deslocamentos que ocorrem na rocha de fundação. Apresenta-se uma breve resenha dos estudos de subpressão e o critério de

cálculo para determinação da pressão média assim como também os estudos relacionados à lei cúbica de vazão, através de fraturas individuais.

Num segundo momento, apresenta-se no item 03 a metodologia adotada e seguida, a qual descreve o roteiro da obtenção dos parâmetros necessários para a análise, o enfoque e o procedimento da análise, a quantificação dos valores de saída e a análise dos resultados.

No mesmo item 03, apresentam-se as características das seções da estrutura da barragem e os parâmetros necessários para o cálculo, tanto os utilizados no projeto original, como os obtidos com base nos ensaios de laboratório. São parte deste item o modelo de análise de tensão-deformação e de pressão de água, assim como o modelo de análise de subpressão afetado pela presença de fratura no pé de montante da barragem. O processamento do modelo tensão-deformação e de pressão de água é realizado com a ajuda do Modelo de propagação da Fratura, no qual são consideradas as componentes de tração das tensões principais.

Os resultados obtidos, que são os deslocamentos produzidos na fundação, são mostrados no item 04, onde se faz a aferição dos resultados em relação aos registros da instrumentação existente na fundação da barragem e se expõem as discussões relacionadas ao tema.

Por fim, no item 05, são apresentadas as conclusões a que se chegou com base na aferição dos dados. Também são apresentadas algumas sugestões identificadas como relevantes à continuidade da pesquisa, propondo-se mais variáveis a serem consideradas, as quais não foram usadas neste trabalho, em decorrência do tempo limitado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Antecedente de estudos de barragens no Brasil

Um grande número de barragens, no Brasil tem sido estudado para analisar sua segurança e estabilidade. A necessidade de se realizarem análises localizadas de deformações e fraturas deu passo ao emprego de modelos matemáticos com ajuda de métodos numéricos.

Celestino (1983) aborda o tema pertinente ao uso de métodos numéricos com exemplos de aplicação em barragens da Bacia do Alto Paraná, explicando com detalhe as evoluções, principalmente nas hipóteses de cálculo, e os aspectos de aferição dos modelos numéricos com resultados de instrumentação, dando importância à representação da ação da água na fundação. Neste último caso, o emprego de ações impostas como o uso do diagrama de subpressão obtido de observações de outras obras cede lugar a uma análise de fluxo, acoplada à análise de tensão-deformação. Salienta-se que as duas análises são interdependentes, no sentido de que as pressões de água modificam as tensões efetivas, que por sua vez modificam localmente a permeabilidade.

Segundo Celestino (1983), os modelos matemáticos envolvem simplificações nas propriedades dos materiais, na geometria e no carregamento. Nas análises, assume-se geralmente um comportamento elástico linear sob compressão. Isto se dá para rochas típicas aceitas como material de fundação das barragens do Alto Paraná, onde as tensões atuantes são relativamente baixas e o material intacto trabalha dentro de seu limite de linearidade. Mas, em situações como a fundação da barragem de Porto Primavera, por motivos econômicos, foi necessário que se trabalhasse sobre um maciço basáltico de peso específico bastante baixo e de resistência bem inferior aos materiais usuais para tal fim. Diante uma situação de concentração de tensões que atingia a resistência do basalto leve, as análises levaram em conta o critério de ruptura do material intacto.

Os parâmetros correspondentes ao módulo de elasticidade e ao coeficiente de

Poisson necessários para a análise linear podem ser determinados mediante a aferição de modelos matemáticos com resultados de instrumentação.

Em relação à segurança das barragens, Celestino (1983) considera que os níveis de tensão numa rocha intacta situam-se sempre abaixo dos limites de linearidade dos materiais, porém isto não ocorre com as descontinuidades. Análises mais precisas devem considerar estas feições e representar seu comportamento elasto-plástico. Ele referencia resultados de ensaios *in-situ*, onde se concluiu que o critério de um coeficiente de segurança imposto de 1,5 (condições normais de operação de barragens) para o atrito das descontinuidades seria como impor que a fundação trabalhasse abaixo do ponto de cedência, ou seja, em regime linear, o que resulta na tendência de procurar maior tensão normal ou maior altura da barragem em análise.

Em relação à permeabilidade, Celestino (1983) explica que os maciços têm sido representados como heterogêneos, anisotrópicos, porém contínuos. Ante a necessidade de parâmetros, tomam-se coeficientes de permeabilidade válidos para certas regiões do maciço. Aquele autor chama a atenção, também para os limites de modelos analisados, principalmente aqueles onde se realizam análises acopladas de fluxo e tensão-deformação. A extensão de uma malha para percolação deve ser determinada em função do comprimento impermeável da base da barragem e da profundidade da zona permeável da fundação, contudo, para tensão-deformação, o critério usual se baseia na altura da barragem. Devido à presença de drenos que reduzem a zona impermeável da base, a profundidade da zona permeável é um parâmetro determinante, o que leva a considerar comprimentos da malha de cerca do dobro da profundidade, para montante e jusante, porém, em casos de forte anisotropia ($k_h \gg k_v$), este critério pode ser insuficiente. Com relação à geometria, é na análise plana que se tem maior simplificação de efeitos tridimensionais. Isto pode ser complicado quando se trata de percolação porque a variação espacial da permeabilidade parece ser maior do que as propriedades mecânicas. As diferenças no tratamento das fundações e a disposição geométrica das estruturas de uma usina originam componentes de fluxo significativos que não são representados em análises planas. Guidicini (1983) mostra que o efeito de convergência do fluxo na casa de força gera, em sua vizinhança, linhas de fluxo quase paralelas ao eixo da barragem.

Outro aspecto importante que ressalta Celestino (1983) corresponde aos efeitos de arqueamento da estrutura em vales estreitos que somente podem ser considerados em

análises tridimensionais. Um exemplo de consideração foi o caso da Usina de Itaipu, onde, graças a um modelo reduzido tridimensional, comprovou-se que o carregamento de ruptura era o dobro daquele encontrado em análises planas.

Com o objetivo de mostrar a aplicação das hipóteses de cálculo, Celestino (1983) cita como exemplos alguns casos reais.

2.1.1 Água Vermelha

O projeto de Água Vermelha foi o primeiro nas obras do Alto Paraná que analisou a fundação das estruturas, considerando o comportamento elasto-plástico das descontinuidades do maciço rochoso.

Uma hipótese importante foi a consideração de pressões totais do reservatório na fundação a montante da cortina de vedação, devido à ação da água. Esta zona, que antes foi chamada de trinca de tração, deu margem a confusão. Isto pode ser explicado pelas deformações impostas ao maciço imediatamente a montante da barragem, o que tenderá a aumentar a abertura das fissuras, por onde percola a água e em decorrência sua condutividade hidráulica. Como é sabido, a vazão através de uma fissura individual depende do cubo de sua abertura, o que influi na permeabilidade média do maciço em dependência da abertura média das fissuras, e também, indiretamente, nas tensões efetivas atuantes. A figura 2.1 apresenta a seção da tomada de água – casa de força da barragem.

Vale dizer que na determinação das pressões atuantes, são importantes os valores relativos de permeabilidades das diversas zonas e não seus valores absolutos. Outro ponto a considerar é que a zona imediata a jusante, que sofre deformações de extensão (zona de aumento de permeabilidade), é caracterizada pela presença da cortina de vedação e elevadas tensões de compressão, devido ao peso próprio da barragem, o que contribui para a diminuição da permeabilidade. O contraste de permeabilidade leva a um aumento das pressões de percolação, na zona imediata a montante da cortina de vedação. A quantificação deste aumento de pressões não é tão simples.

Para a tomada de água e a casa de força, foram realizadas análises considerando-se as não linearidades decorrentes da variação dos parâmetros de deformação da junta com a tensão normal atuante. No final, não houve diferenças sensíveis.

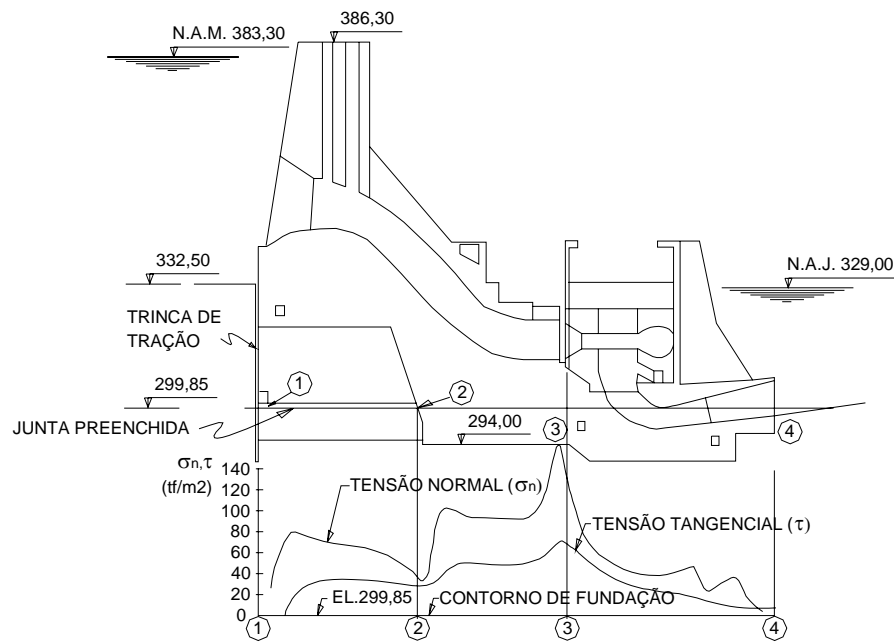


Figura 2.1 Tomada de água e casa de força da barragem Água Vermelha (Celestino, 1983).

2.1.2 Itaipu

A obra foi objeto de várias análises, muitas delas nas fundações. Celestino (1983) comenta uma em especial por seu aspecto inovador quanto à hipótese de ação da água na fundação.

Na análise realizada, não se considerou a imposição prévia de uma trinca de tração, e o maciço foi tratado como um material sem nenhuma resistência à tração, seguindo o modelo de redistribuição de tensões, proposto por Zienkiewicz *et al.* (1968).

A zona tracionada, após cálculos iterativos de redistribuição do excedente de tensões que o maciço não tinha capacidade de suportar, convergiu para uma configuração estável a uma profundidade máxima, no topo da camada de brecha basáltica.

Não se considerou a ação de água como subpressão ou como pressão a montante da cortina de vedação. Realizando-se uma análise de percolação acoplada à análise de tensão-deformação, desenvolveu-se um processo iterativo que consistiu nos seguintes passos:

1. Análise inicial de tensões, considerando-se a construção das estruturas de concreto. Com o estado de tensões da zona a montante da cortina, determina-se a permeabilidade correspondente.
2. Análise de percolação, usando-se os valores da permeabilidade da zona a montante da cortina de vedação determinados no passo anterior. A isto seguiu-se o cálculo das forças de percolação.
3. Análise de tensões efetivas, usando-se as forças de percolação e diagramas de subpressão determinadas no passo 2.
4. Determinação dos novos valores de permeabilidade, compatíveis com as tensões calculadas no passo 3. Se a diferença de permeabilidade em relação aos valores adotados na última análise for menor que uma tolerância estabelecida, o processo converge e os resultados finais são os da última análise de percolação e de tensões. Caso contrário, adotam-se os novos valores de permeabilidade e retorna-se ao passo 2.

A análise convergiu com 3 iterações, tendo-se como resultado uma grande diferença entre os valores adotados da permeabilidade da cortina de vedação e o maciço vizinho. Isto talvez causou pressões elevadas a montante da cortina.

Celestino (1983) ressalta outro aspecto importante a considerar, a saber, o valor das tensões horizontais iniciais, atuando em planos paralelos ao eixo da barragem. As tensões finais, após a construção da barragem e enchimento do reservatório, serão tanto maiores quanto maiores foram as tensões iniciais e, conseqüentemente, tanto menor será a permeabilidade vertical e tanto menor será a pressão de água a montante da cortina de vedação.

2.1.3 Porto Primavera

Em vista da importância do estado inicial de tensões, realizaram-se duas análises. Uma considerou $K=\sigma_h/\sigma_v=0,3$, determinado a partir de um estado de tensões puramente gravitacional. Na outra, adotou-se $K=0,7$, admitindo-se a existência de tectonismo.

Uma análise da eclusa foi realizada sob os mesmos princípios de acoplamento entre análises de percolação e tensões. Destaca-se que uma análise com ações impostas a priori seria menos confiável que para barragens, porque não são usuais os diagramas de subpressão para eclusas, devido às particularidades do sistema de drenagem.

2.1.4 Ilha Solteira

Tomou-se como exemplo um bloco instrumentado, onde se pretendeu analisar a coerência de resultados dos extensômetros de grande base, curtos e dos extensômetros de haste, longos, dispostos esquematicamente na figura 2.2. Os extensômetros de grande base foram instalados antes da concretagem, e os extensômetros de haste instalados antes do enchimento do reservatório. As leituras iniciais dos extensômetros de grande base foram muito afetadas por efeitos térmicos da cura das primeiras camadas de concreto e não tinham significado físico. Considerou-se a leitura inicial apenas quando os resultados se estabilizaram. Em consequência, supõe-se que se perdeu parte dos deslocamentos diferenciais devidos ao carregamento das primeiras camadas de concreto.

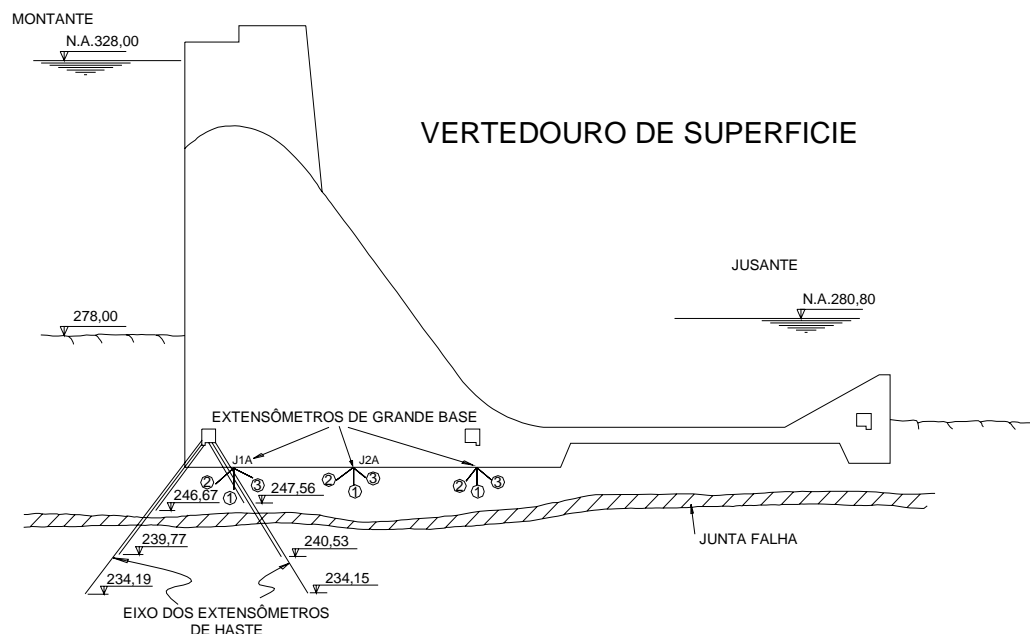


Figura 2.2 Instrumentação do vertedouro da barragem de Ilha Solteira (Celestino, 1983).

Dos resultados obtidos, foi feita uma relação entre as medidas dos extensômetros de grande base, após a conclusão da concretagem e os valores calculados para deslocamentos diferenciais entre pontos extremos dos extensômetros. Dessa relação, podia-se ver que os valores não se situavam ao longo de uma linha reta a 45° como deveria representar uma total concordância de um modelo perfeito, e ainda não passava pela origem em razão de que a leitura inicial dos extensômetros foi definida depois que parte da construção havia ocorrido.

O fato de a reta não estar inclinada de 45° significa que as deformabilidades do modelo e do protótipo são diferentes. No modelo, adotou-se $E=200.000 \text{ kgf/cm}^2$ e pela inclinação obtida da relação poder-se-ia retro-calcular que um valor mais realista estaria em torno de 120.000 kgf/cm^2 lembrando-se que esses extensômetros de grande base têm comprimento máximo de 2,0m, atingindo apenas a camada superior do maciço afetado pela escavação. Já nos extensômetros de haste, a correlação entre valores calculados e medidos deu ótima concordância como mostrado na figura 2.3.

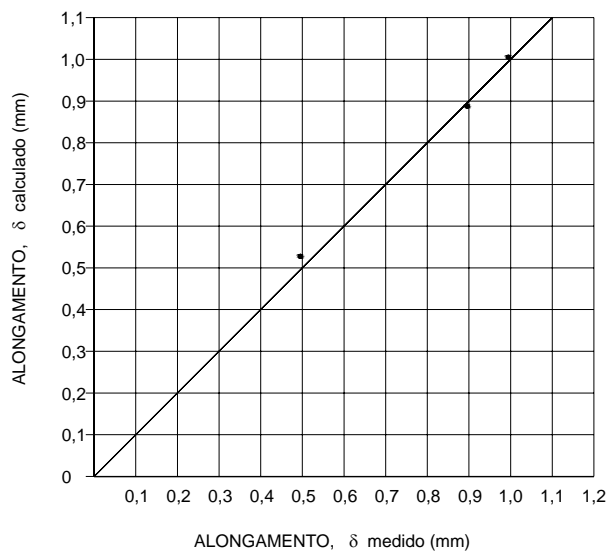


Figura 2.3 Relação entre deslocamentos calculados e medidos (extensômetros longos).

Como resultado do exemplo exposto, poder-se-ia ver que caso se desejasse aferir os valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, uma análise do modelo deve ser realizada adotando-se, como deslocamentos iniciais, não no início da construção, mas sim a configuração na data em que as leituras dos instrumentos passam a ser coerentes com carregamentos mecânicos. Assim, a reta de correlação entre deslocamentos medidos e calculados passaria pela origem. O módulo de elasticidade adotado influiria em seu coeficiente angular, que deve ser unitário. O coeficiente de Poisson influiria nas medidas referentes às bases inclinadas, mais afetadas pelo parâmetro.

Silveira *et al.* (1978) apresentaram um exemplo de aferição de parâmetros sem usar modelos numéricos. Nele, as tensões para cálculo dos módulos de deformabilidade da rocha e de rigidez das discontinuidades foram obtidas a partir de expressões analíticas da teoria da elasticidade, deduzidas para meios contínuos e homogêneos. Essas tensões foram, sem dúvida, obtidas com boa aproximação já que se admitiu um

estado uniaxial de tensões ao longo da direção das hastes dos extensômetros, ou seja, a medida de um extensômetro foi relacionada apenas com a tensão normal que atua na direção paralela à haste. As outras duas componentes de tensões normais, atuantes em direções perpendiculares à haste, não foram consideradas, ou foram consideradas constantes durante o período de análise.

Paes de Barros e Barbi (1983) apresentam uma experiência interessante, onde foram comparados os resultados das análises de percolação e tensão-deformação acopladas e a linha piezométrica do contato A/B da barragem de Itaipu, obtidas a partir das leituras da instrumentação. O resultado mostrou que as pressões calculadas a montante são significativamente superiores às medidas. Daí, Celestino (1983) explica dois fatos importantes que devem ser levados em conta na aferição deste modelo:

1. O contraste da permeabilidade da cortina de vedação imposta no modelo foi bem grande, o que aumentou a pressão a montante da cortina, reduzindo, por sua vez, as tensões efetivas que originaram o aumento da permeabilidade e, em consequência, aumentaram ainda mais a pressão na zona de análise;
2. A ensecadeira de quase 100m de altura certamente contribuiu para elevação das tensões efetivas na zona de montante, diminuindo a permeabilidade e as pressões.

Um parâmetro importante a ser levado em conta em eventuais aferições de modelos é o estado de tensões iniciais. Infelizmente, segundo Midea (1983) não existiu um padrão de resultados bem sucedidos de medidas de tensões iniciais nas obras do Alto Paraná. Por este motivo, as medidas de tensões iniciais em rocha devem ser tomadas com reserva. Midea também ressalta a ocorrência de tensões horizontais maiores que as verticais em medidas realizadas em Água Vermelha e Itaipu. A incerteza dos valores de K pode ser uma explicação importante no comportamento hidrogeológico de barragens. Vale a pena lembrar que o acréscimo de pressões de água a montante da vedação não está ligado à ocorrência de tensões de tração. Mesmo com compressão aliviada, haverá um contraste de permeabilidade com a zona de compressão não aliviada, obviamente de menor intensidade, do que se ocorressem tensões de tração.

Celestino (1983) comenta a importância da tendência de renovação dos critérios de projeto. Cruz e Silva (1978) propuseram novos critérios, um deles o de considerar que a pressão a montante da cortina de vedação seja admitida constante com a profundidade.

Abordar o tema dos critérios de projeto implica também encarar as limitações dos critérios puramente observacionais, limitações devidas a imprecisões das medidas e, pior ainda, à caracterização de propriedades localizadas de enorme dispersão de dados. Obviamente, estabelece-se um critério com base em um número suficiente de dados para que a probabilidade de que se disponha da zona de interesse seja grande. Em rochas, o fluxo preferencial pode-se dar em zonas de limitada extensão, o que diminui a possibilidade de que um piezômetro esteja localizado exatamente na possível zona crítica. Isto é corroborado por estudos feitos por Cruz e Silva (1978) e também Silveira *et al.*(1981) onde nem sempre pode haver um piezômetro na zona de pressão mais elevada. Celestino (1983) salienta a importância de que, antes de catalogar os valores obtidos, deve-se entender os mecanismos que dão origem a eles e usar as observações para aferir tais mecanismos.

Celestino (1983) cita a experiência de Johandar *et al.* (1971) que calcularam a vazão da fundação de uma barragem de 10m de altura, considerando a variação de permeabilidade devida a tensões efetivas, resultando em 40% da vazão que seria obtida numa análise que não considerasse este fato. Esses autores descreveram um método iterativo geral para análises acopladas de percolação e tensões.

Em relação ao uso dos modelos matemáticos em projetos do Alto Paraná, Celestino (1983) afirma que estes modelos não têm sido sistematicamente aferidos com dados de instrumentação, o que deveria ser realizado com o intuito de discernimento dos mecanismos de funcionamento de obras concluídas. Para obras em andamento, o uso de fases intermédias de construção permitiria, por meio da comparação de instrumentação com resultados de modelos matemáticos, oferecer úteis subsídios de parâmetros para a análise final da obra. Exemplo disto seria o conhecimento do estado inicial de tensões que é importante para o conhecimento do funcionamento da obra. Com instrumentação simples das escavações e a comparação com modelos matemáticos também simples, seria possível determinar o valor global das tensões iniciais do maciço, determinante do comportamento da obra.

Celestino (1983) discorre sobre estabelecer o modo mais abrangente de tratar as ações da água nas fundações de barragens, levantando a pergunta se sub-pressões, por exemplo, são ações que se devem impor na análise do comportamento da barragem, ou se podem ser tratadas como uma resposta que inclui a intervenção de muitos parâmetros, que podem corresponder à geologia, tipo de estrutura, estado de tensões

iniciais, tipo de tratamento, etc.

Os modelos com leis fundamentais e universais, quando aferidos e interpretados, contribuirão muito em diferentes condições (Celestino, 1983).

O tema das subpressões em barragens brasileiras, fundadas em formações basálticas, é abordado por Cruz (1978) que mostra, com ajuda de diagramas, as subpressões observadas, tanto para o contato concreto-rocha como para descontinuidades no maciço de fundação. Fazendo uma descrição do tipo de tratamento realizado na fundação, observa que as cortinas de injeção realizadas desde as galerias foram orientadas para montante, enquanto que as executadas a partir da superfície da rocha foram verticais sob a barragem ou orientadas a jusante, quando executadas da superfície da rocha no pé de montante da estrutura. Contudo, os drenos em sua grande maioria foram executados no sentido vertical a partir das galerias paralelas ao eixo ou, às vezes desde galerias dispostas transversalmente ao eixo. Em alguns casos, os drenos foram inclinados para jusante a partir da galeria a montante.

Na análise das subpressões, Cruz (1978) estabelece a relação entre o trecho da fundação injetado e/ou drenado (medido pela diferença entre cotas do nível da rocha de montante e a cota do final do tratamento) e a carga de água a montante (medida pela diferença de cotas entre o nível de água normal e a cota da rocha de fundação a montante da estrutura), fazendo o mesmo para jusante, considerando os níveis de água normais de operação. As diferenças nos valores dessa relação encontradas entre projetos não refletem diferentes critérios e, pelo contrário, provavelmente reflete a natureza da formação basáltica da fundação e as descontinuidades de fluxo preferencial (Cruz, 1978).

Os diagramas de subpressões de várias barragens foram representados pelas envoltórias máximas e mínimas, registradas por piezômetros. Nesses diagramas, foram apresentadas as leituras feitas em seções paralelas, representadas numa única seção. Como só se contou com informação das subpressões a montante devido à presença dos piezômetros instalados nesta zona, Cruz (1978) fez, no trecho de jusante, uma interpretação apoiada na hipótese de que o nível de água a jusante controla as subpressões nesta zona.

A seguir, alguns índices que Cruz (1978) utilizou nas análises, definidos a partir de variáveis mostradas na figura 2.4:

$$\frac{H_p}{H_M} = DM, \text{ Coeficiente de perda de carga de montante;}$$

$$\frac{H_p}{H_J} = DJ, \text{ Coeficiente de perda de carga de jusante;}$$

$$1 - \frac{H_{D-M}}{H_{M-D}} = EM, \text{ Eficiência de drenagem a montante;}$$

$$1 - \frac{H_{D-J}}{H_{J-D}} = EJ, \text{ Eficiência de drenagem a jusante;}$$

U_{piez} = Subpressão total medida pelos piezômetros;

$U_{máx.}$ = Subpressão total teórica para drenos e injeção inoperantes;

U_{cat} = Subpressão total “catastrófica” para o sistema de bombeamento inoperante;

$U_{67\%}$ = Subpressão total para eficiência de drenagem (a montante) de 67%.

$$\frac{U_{piez}}{U_{máx.}} = \text{Relação da pressão total medida em relação à máxima teórica;}$$

$$\frac{U_{piez}}{U_{cat}} = \text{Relação da pressão total medida em relação à pressão catastrófica;}$$

$$\frac{U_{piez}}{U_{67\%}} = \text{Relação da pressão total medida em relação à pressão total calculada para 67\% de EM.}$$

Os valores de DM variaram muito, mas em vários casos foram iguais a 1,0 o que poderia significar que a perda de carga que ocorre a montante das injeções pode ser pequena, seja por fraturamento superficial da rocha devido a escavações ou à separação no contato vertical concreto-rocha ou, seja pela eficiência da injeção que reduz a permeabilidade do maciço, concentrando a maior perda de carga na sua área. Contrariamente, os valores baixos de DM inferiores a 0,5 em 25% dos casos poderiam ser devidos a um melhor contato concreto-rocha no encaixe sub-vertical, a uma maior eficiência de injeção de colagem, a um maciço escavado cuidadosamente ou a um piezômetro influenciado pela injeção ou pela drenagem. Já os valores de DJ que registraram o valor de 1,0 podem indicar o controle das subpressões pelo nível de água a jusante.

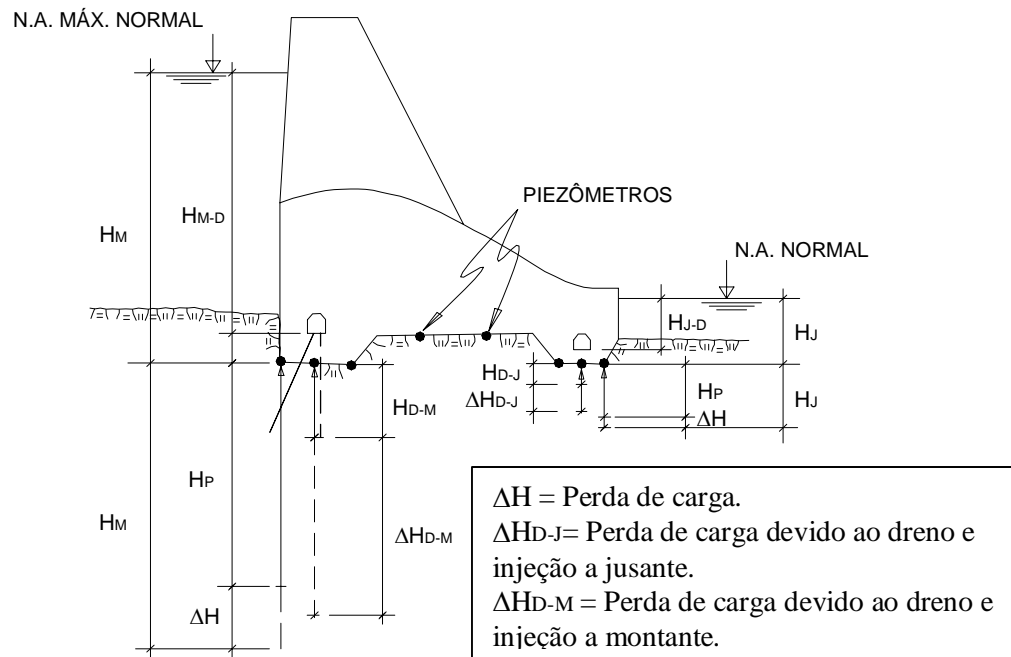


Figura 2.4 Esquema dos índices usados na análise de Cruz (1978).

Os valores de EM indicaram a eficácia dos tratamentos de fundação. É verdade que os efeitos de injeção e drenagem são de difícil diferenciação, mas a queda marcante de subpressões entre piezômetros colocados a montante e jusante da cortina de injeção sugere que as injeções conseguem reduzir as subpressões. Por outro lado, os valores elevados de EJ mostraram também a eficácia do tratamento.

As relações $\frac{U_{piez}}{U_{m\acute{a}x.}}$, $\frac{U_{piez}}{U_{cat}}$ e $\frac{U_{piez}}{U_{67\%}}$ foram usadas como parte adicional de

segurança dos projetos quanto à análise de estabilidade por escorregamento.

Cruz (1978) salienta que a condição crítica de estabilidade ao escorregamento só pode ser verificada no contato concreto-rocha, ou no subcontato quando o maciço rochoso de fundação até uma profundidade razoável apresenta-se homogêneo e sem descontinuidades que possam representar fraquezas estruturais do maciço. As subpressões nessas descontinuidades seriam as de especial cuidado, portanto, a instrumentação deve estar nesses “planos”.

Para os casos das descontinuidades, Cruz (1978) definiu parâmetros similares a DM, DJ, etc. para as subpressões de três projetos, assumindo planos horizontais para as descontinuidades subhorizontais, em razão da sua formação e origem. Como resultado das análises, chegou a algumas conclusões importantes para os cálculos de estabilidade e para o estabelecimento de critérios de projeto. A figura 2.5 mostra o esquema das

subpressões no contato e a figura 2.6 as subpressões em discontinuidades do maciço.

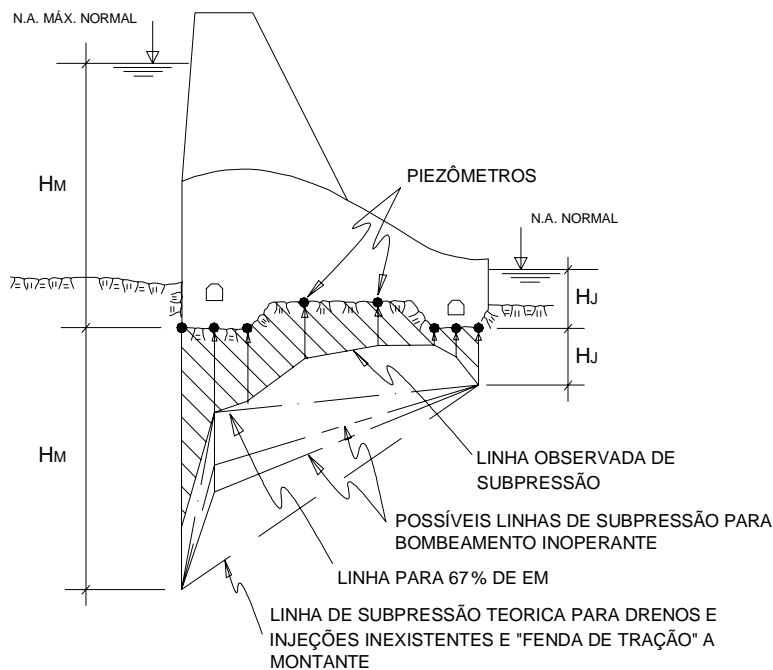


Figura 2.5 Esquema de subpressão no contato concreto-rocha (Cruz, 1978).

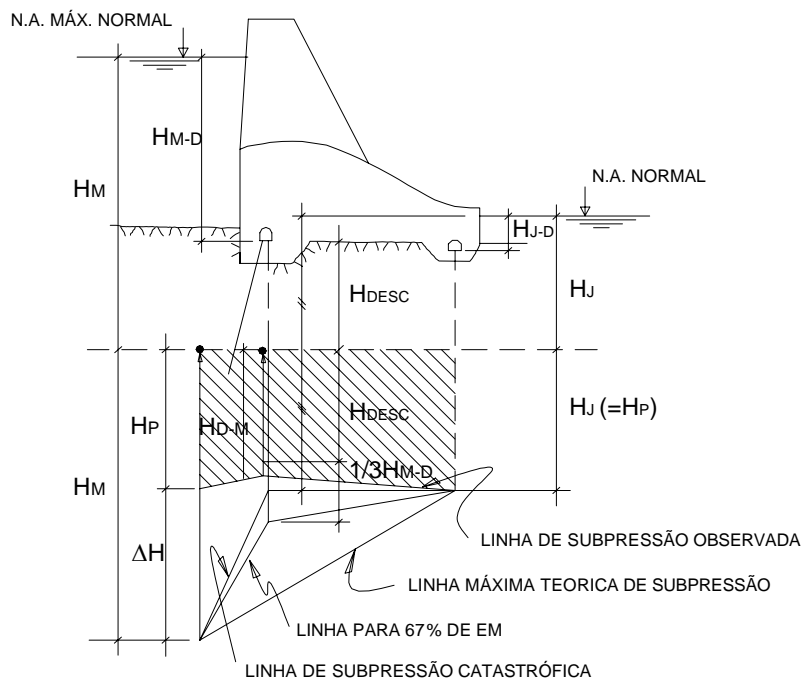


Figura 2.6 Esquema de subpressões na fundação com descontinuidade (Cruz, 1978).

Uma primeira observação importante foi em relação à perda de carga a montante, onde a consideração de colagem no contato concreto-rocha daria como consequência uma redução de subpressão nessa zona e uma redução na vazão dos drenos. Mas, se

uma fenda de tração fosse considerada na zona, essa fenda poderia dar acesso livre de água a alguma descontinuidade existente, o que daria como resultado um valor de $DM=1,0$.

Uma segunda observação trata das subpressões a jusante, onde quase sempre são controladas pelo nível de água de jusante. Não obstante, nem sempre é assim, pela presença de descontinuidades permitindo o fluxo, resultando em valores de DJ maiores de 1,0.

Uma terceira observação se relaciona aos valores de EM que mostraram uma eficiência do tratamento das fundações com valores maiores do que os 67% convencionais, de alguns critérios de projeto. No entanto, o cálculo de EM considera implicitamente a presença da fenda de tração, dando um valor da eficiência da drenagem menor do que o real. Considerando-se o cálculo de um fator de eficiência da drenagem, E_d , mediante a eq. (1), chega-se a valores de eficiência de 80 a 100%, concluindo-se que a drenagem tem sido efetiva.

$$E_d = \frac{H_M - H_{D-M}}{H_M - H_{Desc.}} \quad (1)$$

Uma quarta observação trata dos valores de EJ que resultaram nulos, o que foi interpretado como eficiência nula de drenagem para descontinuidades a uma certa profundidade, o que significa que não há bombeamento para reduzir as subpressões. Porém, é recomendável uma drenagem a jusante para se evitar subpressões maiores do que as correspondentes ao nível de água a jusante que poderiam instabilizar o maciço rochoso a jusante das estruturas.

Uma última observação se baseia na análise dos valores de $\frac{U_{piez}}{U_{máx.}}$, $\frac{U_{piez}}{U_{cat}}$ e $\frac{U_{piez}}{U_{67\%}}$ em função da profundidade das descontinuidades, o que demonstra a influência da profundidade, onde os tratamentos, a partir de galerias de concreto, são inoperantes. Estas análises permitem estabelecer critérios de projeto relativos à profundidade de tratamento de fundação, como injeção e drenos. A figura 2.7 mostra a seção da barragem Jupιά e a seção da barragem Promissão.

Mais tarde, Cruz e Silva (1978) analisaram sete barragens brasileiras (Ilha Solteira, Jurumirim, Jupιά, Capivara, Ibitinga, Promissão e Barra Bonita) assentadas em

maciço basáltico, usando para esse fim os dados de subpressão recolhidos da instrumentação dessas barragens.

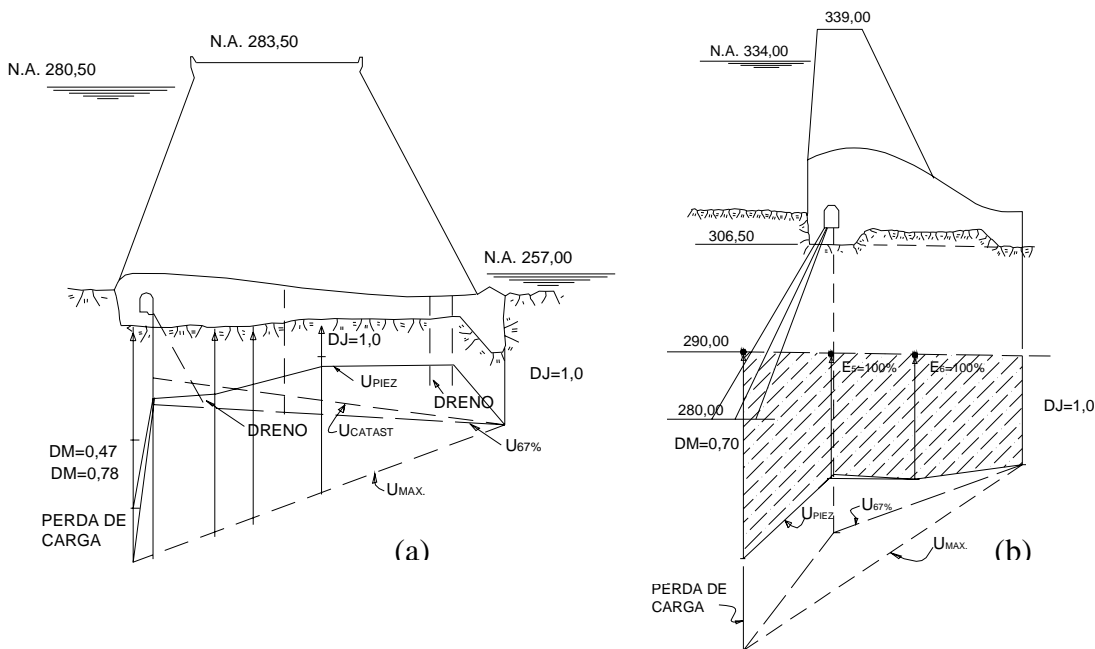


Figura 2.7 (a) Subpressão na fundação do vertedouro de fundo da barragem Jupia. (b) Na fundação da barragem de Capivara (Cruz,1978).

Para facilitar a análise, as estruturas foram divididas em 4 grupos, considerando-se sua forma, expressa pela relação da largura da base (B) e a altura (H), e o tratamento da fundação que inclui a cortina de injeção e a drenagem. Os grupos I e II consideraram uma cortina de injeção a montante e uma galeria de drenagem, diferenciando-se pela taxa B/H . O grupo III considera duas ou três galerias de drenagem e cortinas de injeção a montante e jusante. Já no grupo IV foram consideradas as estruturas da tomada de água e a casa de força com diferentes níveis de escavação devido a processos construtivos. Adotou-se um perfil médio para as 4 estruturas, considerando-se também drenagem superficial no contato concreto-rocha. Por meio de figuras, Cruz e Silva (1978) dividiram os dados das subpressões como aqueles que correspondem à base da barragem, ou seja, no contato concreto-rocha, e a aqueles das descontinuidades na fundação. Todos os dados são dos piezômetros tipo Casagrande, os quais são considerados confiáveis. Nas figuras 2.8 e 2.9 apresentam-se as leituras piezométricas das pressões na base das barragens e nas descontinuidades.

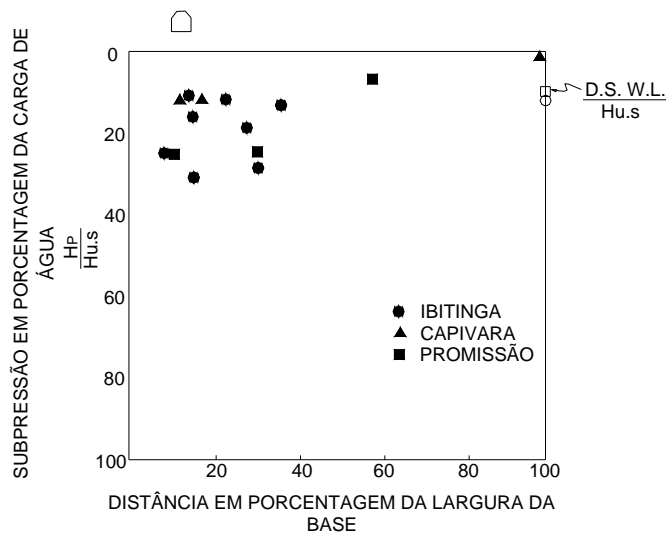


Figura 2.8 Leituras piezométricas da subpressão na base das barragens com $B=0,7$ a $1,0H$.

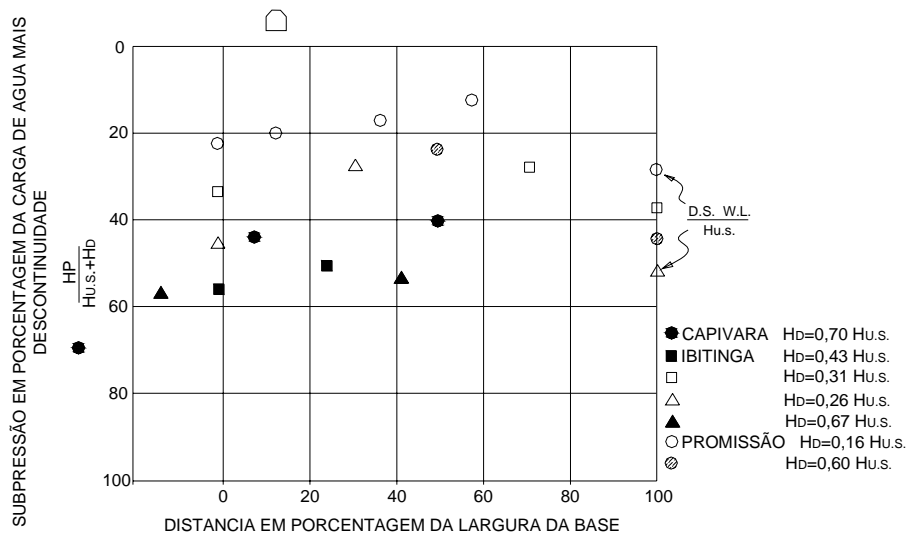


Figura 2.9 Leituras piezométricas da subpressão nas descontinuidades da fundação de barragens com $B=0,7$ a $1,0H$.

Na base dos dados de piezômetros, Cruz e Silva (1978) destacaram a eficiência do sistema de drenagem em relação ao “excesso” da pressão piezométrica acima do nível de drenagem, o que não excedeu a 20%. Recomendam também que, para fundações de níveis inferiores, deve-se considerar a profundidade da descontinuidade. Valores maiores de subpressões correspondem ao fato de que o dreno não drena em níveis inferiores do que o nível do seu topo. Os valores negativos do “excesso” das pressões piezométricas medidas podem significar que a água flui através de feições mais favoráveis de drenagem, principalmente representados pelas descontinuidades na

fundação ou em combinação com outros drenos a jusante. Com ajuda das figuras 2.10 e 2.11, Cruz e Silva (1978) apresentam a sua interpretação dos diagramas típicos de subpressões que, segundo eles, poderiam ser usados nos projetos de estruturas similares e assentes em rocha basáltica sob condições normais de operação, sendo que o critério de eficiência de 67% é o limite maior, caso que não foi considerado nas estruturas analisadas.

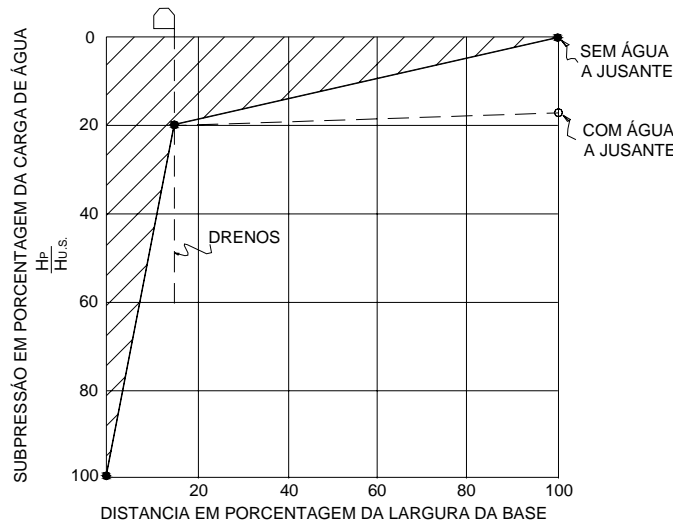


Figura 2.10 Diagrama de subpressão proposto na base da barragem sob condições normais.

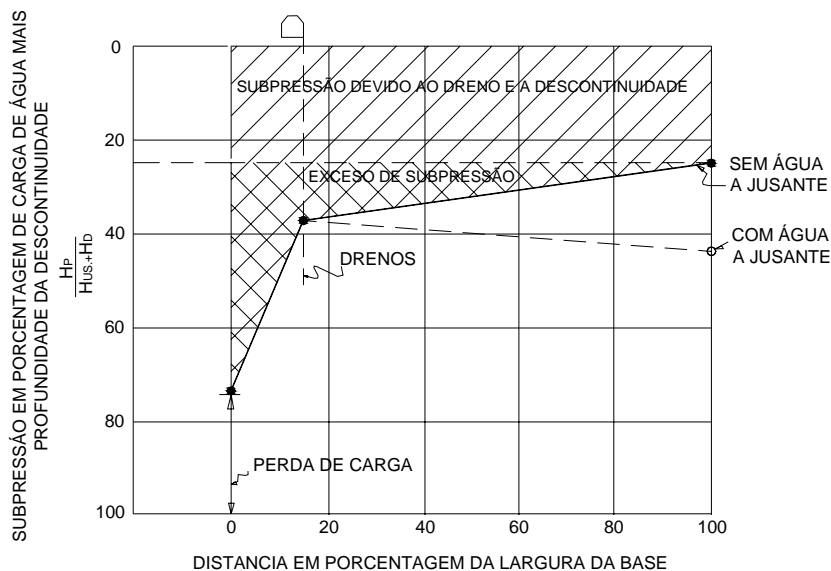


Figura 2.11 Diagrama de subpressão proposto em descontinuidades sob condições normais

Cruz e Silva (1978) definem o maciço basáltico como uma formação anisotrópica

em relação à permeabilidade. Mediante um modelo, o qual apresenta-se na figura 2.12, são mostrados os valores localizados de condutividade correspondendo aos contatos ou juntas. No contraste, o basalto maciço é bastante impermeável. A camada mais superficial que está em contato com a estrutura pode ter uma condutividade maior aumentada pelas escavações. A partir de uma análise do fluxo simples, este se orienta vertical a montante da barragem, logo sub-horizontal pela descontinuidade, seguida a um fluxo novamente vertical a sub-vertical pelo dreno.

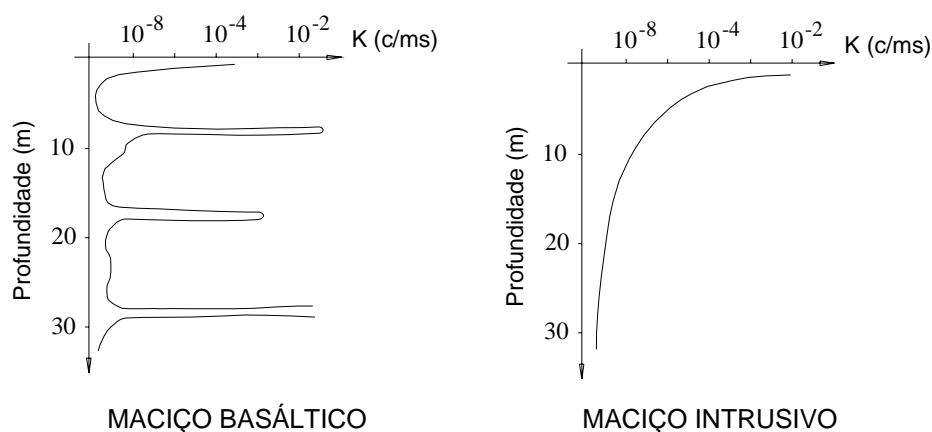


Figura 2.12 Variações na permeabilidade com a profundidade (Apud Cruz e Silva, 1978).

As condutividades localizadas nos contatos ou juntas não representam um papel importante porque são isoladas por camadas impermeáveis de basalto. Só podem merecer cuidado quando existe fluxo livre de água de formações anômalas.

Outro ponto mencionado por Cruz e Silva (1978) trata sobre a consideração nos critérios de projeto de uma fratura vertical originada pela presença de esforços de tração. Estudos teóricos com ajuda de elementos finitos foram desenvolvidos para a barragem de Itaipu, dando resultados que indicaram que se desenvolveria uma zona de tração a montante até uma profundidade de $0,6H$ na fundação com uma fratura de tração de $0,3H$ no maciço rochoso.

Uma especial observação foi feita em relação à perda de carga na zona a montante. Os dados dos piezômetros localizados a montante da cortina de injeção e da drenagem para diferentes níveis de descontinuidades foram analisados, obtendo-se valores de DM menores de um; se existisse uma fratura, os valores de DM seriam próximos a 1,0, caso que não está acontecendo nas barragens de análise. Como

resultado disto, Cruz e Silva (1978) propuseram um critério modificado de projeto. Este novo critério de projeto tem como objetivo a redução do empuxo de água a montante na zona da possível fratura e a redução da subpressão. O diagrama do empuxo de água proposto é apresentado na figura 2.13.

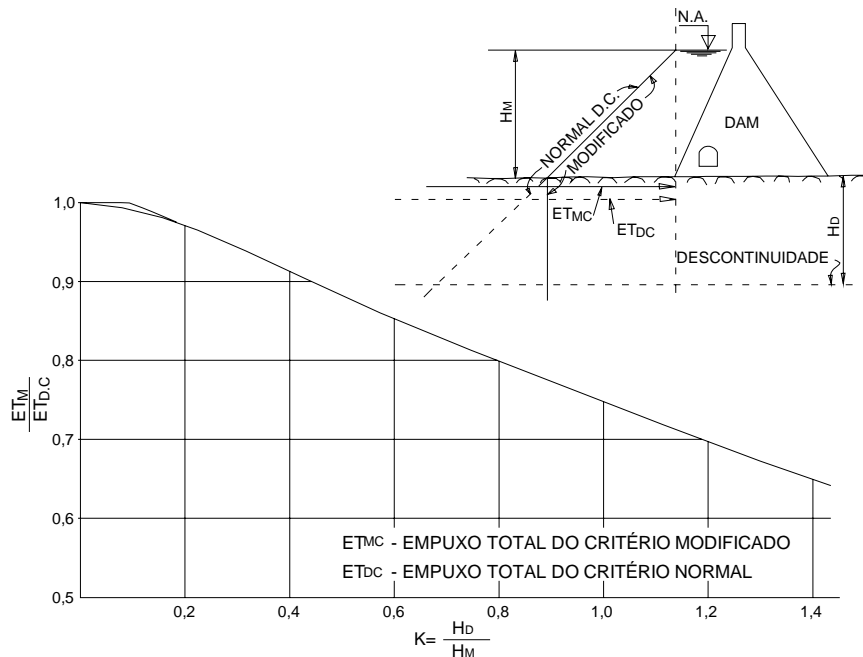


Figura 2.13 Critério proposto para a redução do empuxo de água (Cruz e Silva, 1978).

A partir dos dados e figuras, Cruz e Silva (1978) concluíram que uma grande porcentagem do fluxo vai entre o nível de montante da rocha para os drenos de montante, e um fluxo bem menor vai sob a barragem. Contudo, o fluxo vai desde jusante até os drenos de jusante, se estes existem. No final, o fluxo principal é limitado pelos extremos da estrutura, porém o fluxo independente pode ir pelas descontinuidades, mas isto não influirá na estabilidade da barragem.

No final, Cruz e Silva (1978) concluíram que as subpressões medidas para as sete barragens da CESP são similares na base aos valores observados nas barragens segundo o Bureau of Reclamation e a Tennessee Valley Administration um tanto menores, sendo a comparação válida para estruturas similares, com galeria a montante somente.

2.2 Antecedente de estudos de barragens no exterior

No exterior, inúmeros estudos de fundação de barragens têm sido realizados especialmente usando modelos matemáticos. Esses modelos, com ajuda de métodos numéricos como os elementos finitos, têm permitido localizar os setores danificados na

estrutura e na fundação de barragens. No presente estudo, apresentam-se dois casos que foram executados depois de acontecido o fraturamento, o primeiro no corpo da barragem, enquanto que o segundo, na fundação.

2.2.1 Barragem Kölbrein

A barragem de Kölbrein na Áustria, cujo estudo foi realizado por Linsbauer *et al.* (1989), é um caso típico de fraturamento no corpo da estrutura. Neste caso, as forças devidas ao peso próprio e às injeções originaram o fraturamento do concreto da barragem, duas no paramento a jusante e duas no paramento a montante (uma em 1978 e outra em 1983). As figuras 2.14 e 2.15 mostram as fraturas no pé da estrutura.

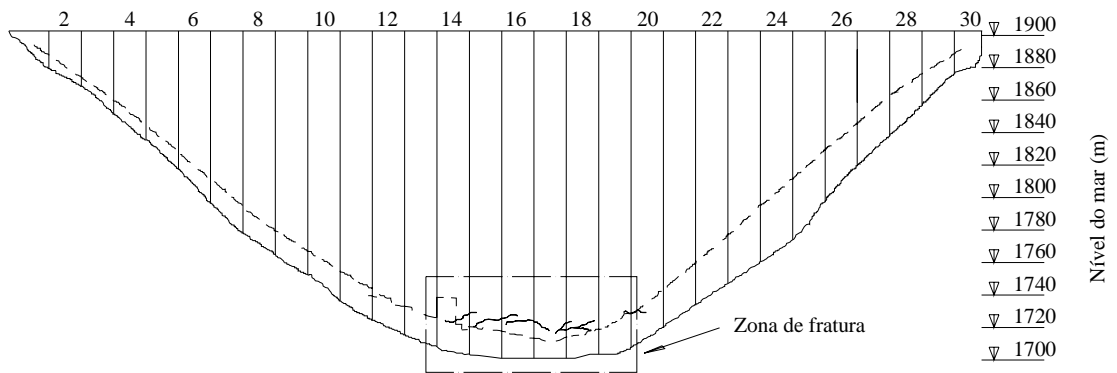


Figura 2.14 Fraturas no pé de montante da barragem Kölbrein (Linsbauer *et al.*, 1989).

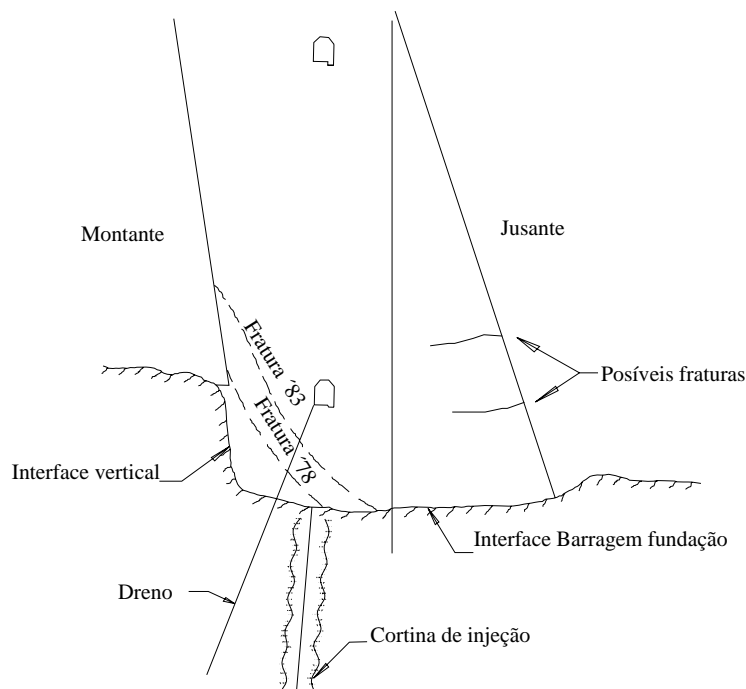


Figura 2.15 Fraturas no pé da barragem (Linsbauer *et al.*, 1989).

Com o objetivo de analisar a orientação das fraturas, Linsbauer *et al.* (1989) estudaram seu desenvolvimento no corpo da barragem aplicando os conceitos da Mecânica de Fratura com a ajuda de modelos matemáticos baseados em elementos finitos. Para simular as fraturas e a sua tendência de propagação; primeiro modelaram o estado sem fratura onde se localizou a zona de tração e o campo das deformações para a seção completa da barragem. Uma segunda análise foi realizada da zona de localização das fraturas a jusante, onde foram determinadas as tensões máximas que originaram as fraturas. Os resultados deste processamento, que localizou a posição das fraturas e a abertura delas, concordaram com a informação obtida dos micrômetros deslizantes que indicavam picos das deformações próximas ao local.

As fraturas no paramento a montante foram estudadas em quatro modelos bidimensionais (ver figura 2.16), os quais consistiram de:

- a. Modelo de fratura em ângulo;
- b. Modelo sem interligação barragem-maciço;
- c. Modelo de rigidez variável da base;
- d. Modelo de junta de fundação.

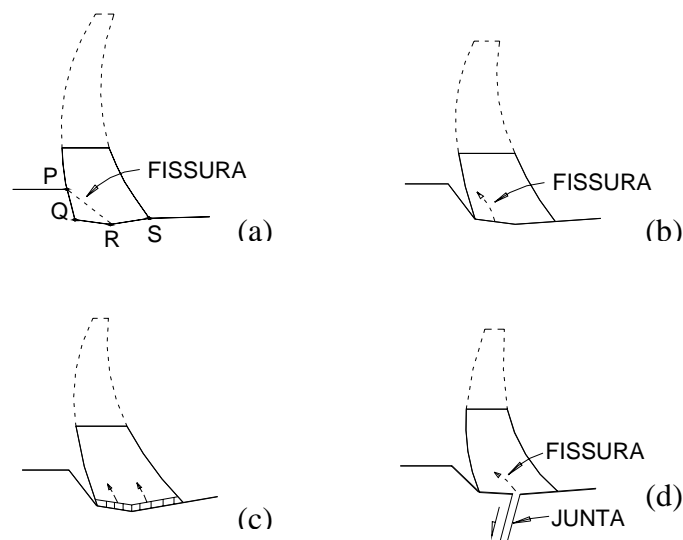


Figura 2.16 Esquemas dos quatro modelos para fraturamentos ao lado da montante: (a) Modelo de fratura em ângulo; (b) Modelo sem interligação barragem-maciço; (c) Modelo de rigidez variável da base e (d) Modelo de junta de fundação.

O esquema de carregamento considerou as cargas de peso próprio, de água quando o reservatório está cheio e as cargas adicionais devidas a processos construtivos. A figura 2.17 apresenta o esquema de carregamento. As malhas de análise foram de

elementos quadráticos isoparamétricos e o contato barragem-fundação foi representado por elementos de junta compatíveis, sendo que a propagação da fratura dos modelos era controlada pelos princípios da mecânica da fratura elástica linear do modo misto. Foi assumido também que a formação das fraturas a montante não era influenciada pelas fraturas de jusante.

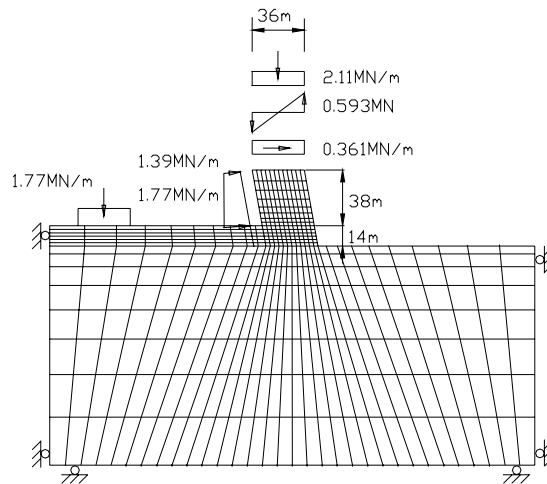


Figura 2.17 Esquema de carregamento (Linsbauer *et al.* 1989)

O Modelo de fratura em ângulo, para o qual assumiu-se a ligação perfeita entre o concreto e a rocha, considerou um ponto da zona de interface como a região onde existem grandes tensões. Esse ponto P foi escolhido como o início da fratura (ver figura 2.18), dando-se o avanço da fratura num ângulo normal às tensões da região. Por meio da figura, pode-se ver o percurso da fratura semelhante com a fratura real em estudo.

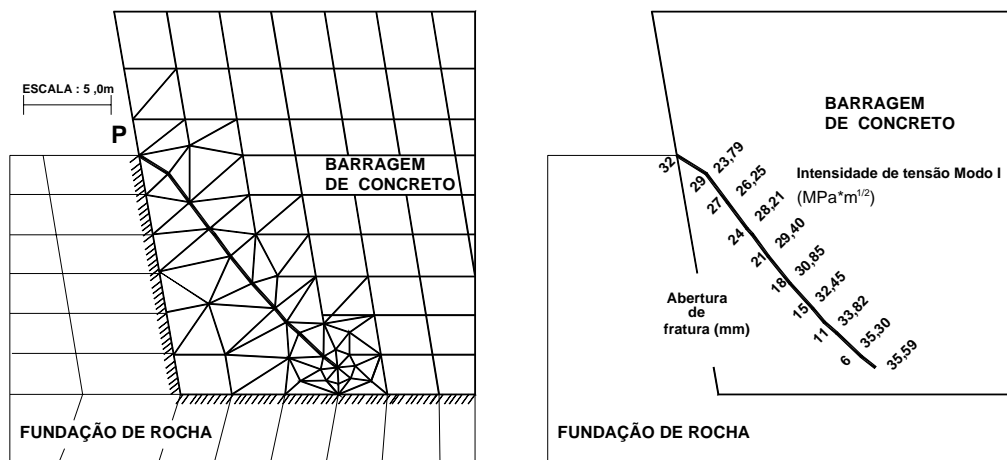


Figura 2.18 Detalhe da zona de propagação da fratura (modelo de fratura em ângulo).

Esta simulação foi satisfatoriamente feita, embora não se conhecessem todas as

condições de interface, das quais depende sensivelmente a mecânica de fratura.

O Modelo sem interligação barragem-maciço não considera a ligação na interface entre concreto e rocha com o objetivo de observar o efeito dessa abertura no estado de tensões que se dá na região do pé da estrutura. Em relação às grandes tensões principais na região, deu-se início a uma fratura na interface, a alguns metros a jusante do ponto Q. Em dois passos, o fator de intensidade de tensão excedeu a tenacidade da fratura do concreto e se viu mais incrementada com a inclusão da pressão de água. Ainda que avance em linha reta, a fratura ainda se orienta para a interseção com a interface PQ, ao invés de orientar-se para o ponto P ou acima deste como se pode ver na figura 2.19.

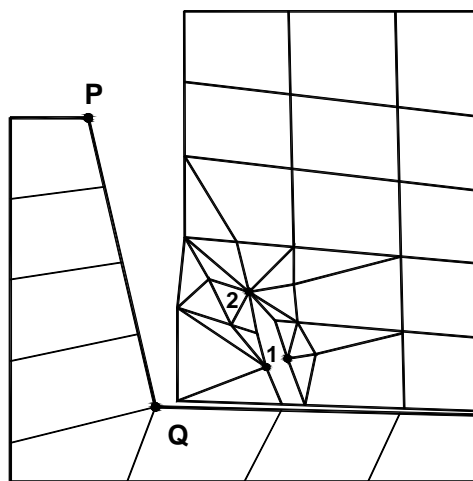


Figura 2.19 Detalhe da malha após dois intervalos de avanço da fratura (modelo sem interligação barragem-maciço).

O modelo de rigidez variável da base consistiu na variação da rigidez ao cisalhamento nos nós dos elementos, resultando no primeiro caso que a zona de alta tensão tem sido alargada para o centro da base da barragem. Estas tensões paralelas à interface justificariam o início da fratura em qualquer lugar dessa zona. No segundo caso de análise, a distribuição de tensões produzida sofreu um alargamento maior ainda da zona de grandes tensões na interface. Ao final, não foi possível realizar análises de propagação porque os autores não tiveram informação concernente às propriedades dos materiais da interface. Salienta-se, contudo, que estes puderam distinguir o tipo de redistribuição de tensão que poderia existir nas fraturas de 1978, no ponto de interface superficial ou ponto P, e na fratura de 1983, no ponto ao longo da interface estrutura fundação, depois que a fratura de 1978 tinha se propagado próximo ao ponto Q, e houvesse causado degradação da interface.

O modelo da junta de fundação assumiu um deslizamento ao longo da fundação, diretamente abaixo da barragem (ver figura 2.16d). Foi também assumido que o reservatório cheio provocava um movimento de 1cm ao longo da junta vertical e que a interface barragem-fundação tinha uma resistência suficiente que provocaria o início de uma fratura, na base da barragem, de maneira que o confinamento da zona de interface se desligava, ficando somente uma região de poucos metros, de um ou outro lado da fratura.

Em conclusão, Linsbauer *et al.* admitem que o uso dos mecanismos de análise ou modelos investigados pode, em forma combinada, produzir a fratura de 1978. Por não terem informação suficiente para simular o progresso da fratura, o desempenho dos registros da barragem de fontes potenciais, tais como movimentos da ombreira e da fundação, eles não puderam determinar com exatidão a origem das fraturas de 1978 e de 1983. Uma segunda observação foi que diferentes mecanismos podem induzir fraturas em direção oposta. Mesmo assim, eles reconhecem que a zona de início das fraturas na barragem e o comprimento da fratura variam de uma estrutura a outra e consideram que o perfil do deslocamento da abertura da fratura deve ser variável ao longo do comprimento da barragem.

2.2.2 Barragem Albigna

A barragem Albigna na Suíça, construída em 1959, é um estudo que está relacionado com a presente pesquisa. Desenvolvido por Kovári e Bergamin (1994), estes aplicaram modelos numéricos na análise da fundação da barragem. A estrutura de concreto encontra-se fundada em granito, caracterizando-se esta pela presença de duas grandes juntas no pé de montante. A determinação das características de deformação da rocha de fundação como resultado das variações dos níveis de água foi o objetivo do estudo de Albigna, cuja seção apresenta-se na figura 2.20. Na figura, também se pode ver a localização da instrumentação instalada. A instrumentação consistia de piezômetros (intervalo de medida 0,5m) e de micrômetros deslizantes para a medição da deformação (intervalo de medida de 1,0m). A estrutura, que se encontra no nível 2000m sobre o nível do mar, possui uma crista de 759m de comprimento com blocos de 20m de largura. A profundidade do bloco maior no vale é de 115m de altura. Entre blocos, existe separação de 5m que serve como alívio da subpressão, sendo a capacidade do reservatório de 70 milhões de m³ de água. A estrutura está fundada sobre uma rocha de um granito de granulação grossa de boa resistência, mas existem nesta fundação três

famílias de juntas preenchidas com material cristalino de grande resistência.

No ano 1960, devido ao primeiro enchimento, constatou-se o aparecimento de uma fratura num dos blocos, mais tarde com o correr dos anos aconteceram eventos inesperados como a perda de água e um ligeiro incremento nas deformações permanentes. Tudo isto motivou a observação das deformações em relação à variação dos níveis de carga de água. Com a ajuda de seis perfurações (total de 440m de comprimento) instrumentadas, revelou-se a existência de algumas fissuras ativas que se abriam e se fechavam devido à variação do nível de água. Logo foram descobertas duas juntas (S e L) no pé de montante que eram as responsáveis pela infiltração ocorrida sob a parcela central da barragem. Para evitar a perda de água na zona da junta L imediata ao pé da estrutura, esta foi coberta com neoprene (ver figura 2.20). Em 1987, cinco novas perfurações foram feitas. Nesta época, a maior ênfase foi dada ao programa de observação das leituras de subpressão e deformação durante o enchimento do reservatório.

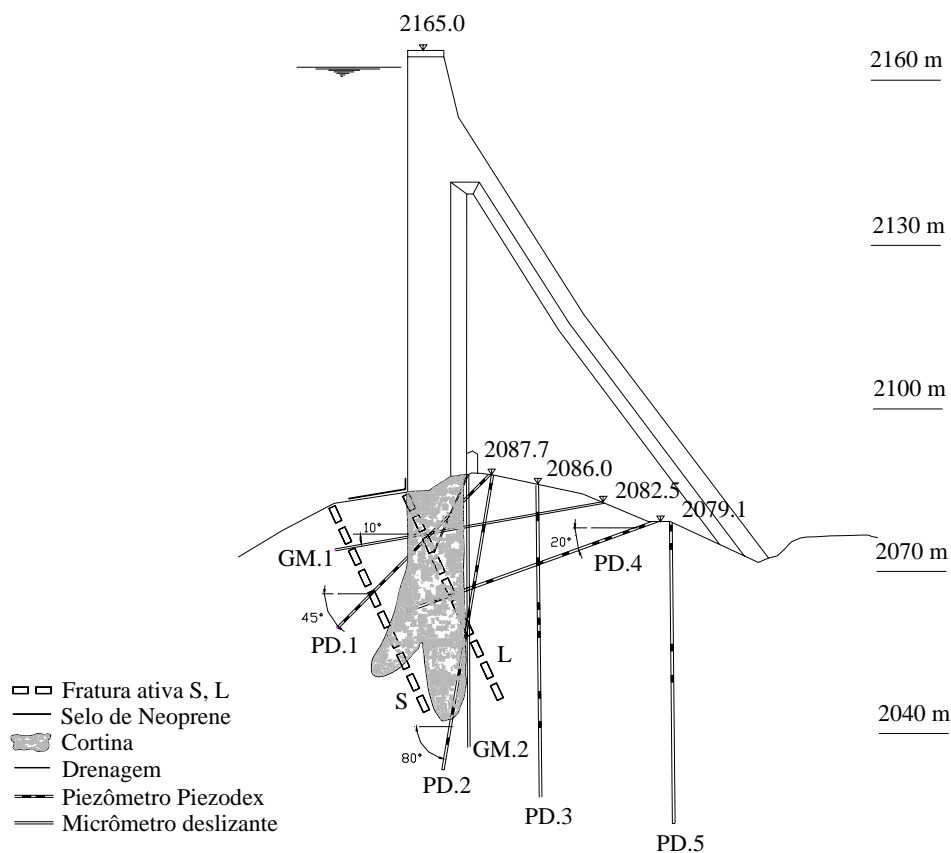


Figura 2.20 Seção transversal da barragem com a instrumentação de Piezômetros e Micrômetros deslizantes, as juntas S, L e o selo de neoprene.

Todas as leituras foram definidas com relação a sua localização, tempo e exato nível de água, considerando-se principalmente as leituras correspondentes aos níveis máximo e mínimo. As leituras dos piezômetros, quando relacionadas com os níveis de água, deram como resultado que, para o nível 2135m, a pressão de água aumenta bruscamente, o que poderia ser explicado como a mudança abrupta da permeabilidade no maciço rochoso devido à abertura das juntas, além de mostrar que, ante o carregamento cíclico (variação do nível), as pressões medidas se tornavam maiores quando descia o nível do que quando subia.

Os micrômetros deslizantes localizados abaixo da base da estrutura, na zona do pé de montante, demonstraram com suas leituras (picos) a presença das duas juntas interceptadas pelas perfurações instrumentadas (ver figura 2.21). Não obstante, a interpretação das leituras possui alguma incerteza em relação à existência de mais juntas interceptadas e à largura inicial das juntas no momento da calibração do micrômetro que não é conhecida. Em relação às medidas, por exemplo, do desenvolvimento da deformação na junta S, estas demonstraram um aumento abrupto das deformações a partir do nível 2130m, mas eram maiores na descida do nível do que na subida (ver figura 2.22).

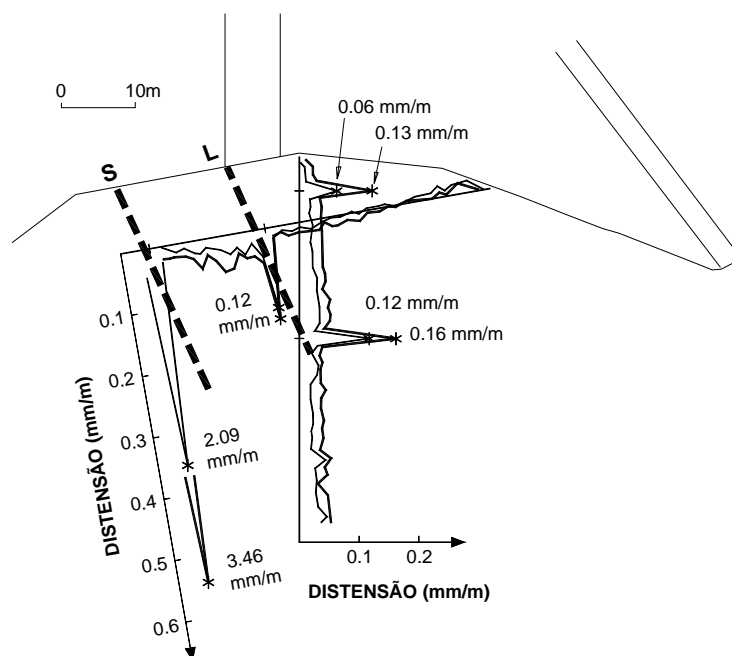


Figura 2.21 Perfis da deformação ao longo das duas perfurações (Kovári e Bergamin, 1994).

Mais tarde, com o intuito de observar o acontecido no marco teórico, foi realizada

uma análise do modelo numérico de elementos finitos. No modelo, as dimensões foram bastante extensas para não assumir condições de fronteira do fluxo e seja desprezível a influência nos potenciais na faixa dos furos dos piezômetros. O fluxo que flui através do maciço rochoso a montante foi definido em relação ao nível de água, considerando-se a zona protegida com neoprene como impermeável.

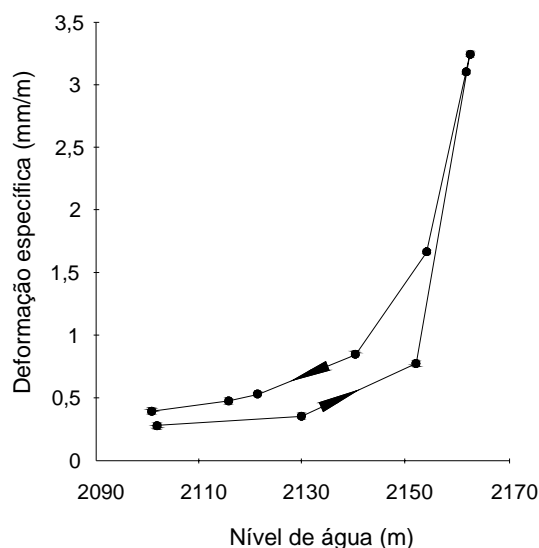


Figura 2.22 Desenvolvimento da deformação na junta ativa S (medida da posição GM.1.46) devido à variação do nível de água.

Os modelos de análise foram três, em função das características do maciço rochoso. O primeiro, homogêneo isotrópico e contínuo. O segundo, com duas zonas maiores de fraturas estendendo-se ao infinito, representando as juntas S e L com uma série de fraturas perpendiculares a elas, com permeabilidade muito menor. O acréscimo da abertura da fratura para níveis maiores é simulado com o incremento do coeficiente de condutividade nas zonas maiores de fratura. Um terceiro modelo corresponde a um meio homogêneo isotrópico, com duas juntas e a drenagem, considerando-se a permeabilidade variável, em função do nível de água para três níveis: 2162m, 2135m e 2101m. O resultado do modelo 1 se mostra na figura 2.23. Nele se faz a comparação entre os valores das leituras dos piezômetros e os calculados.

No final, nenhum dos modelos descreve uma distribuição semelhante das pressões medidas pelos piezômetros para todos os níveis de análise, talvez devido à falta de leis constitutivas confiáveis que considerassem a variação da permeabilidade. Porém, as pressões observadas puderam ser simuladas com ajuda de fatores físicos, como as juntas de maior dimensão e acréscimos da permeabilidade para níveis altos. A simples

extensão do meio homogêneo e isotrópico do modelo deu resultados satisfatórios.

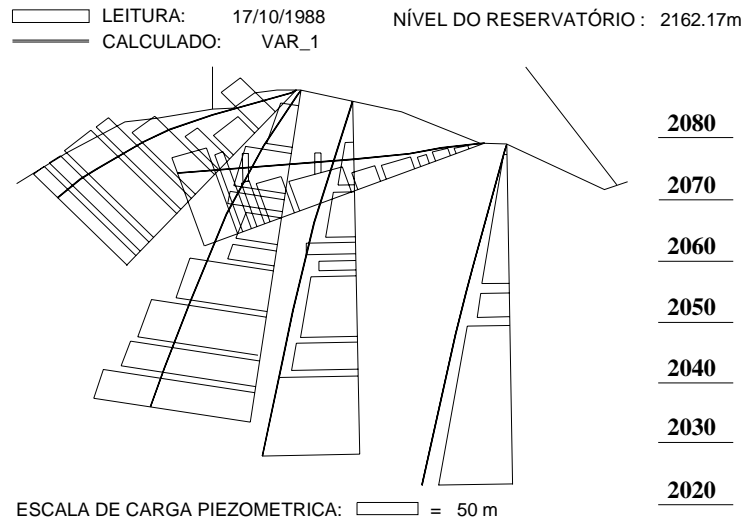


Figura 2.23 Comparação dos valores de pressão calculados com as leituras no nível 2162m (Kovári e Bergamin, 1994).

2.3 A Mecânica de Fratura

Durante muito tempo, o aparecimento de fraturas em estruturas que foram projetadas sob os conceitos clássicos de tensão limite representava um problema que, às vezes, terminava em tragédia. O desenvolvimento da fratura e a sua relação com o tipo do material, o carregamento e o tempo teriam uma dependência inerente que seria desvendada no início do século XX.

Os princípios da Mecânica da Fratura trouxeram a explicação da propagação da fratura dentro da perspectiva da Mecânica das Rochas, de modo que logo foi possível explicar fenômenos muito importantes, tais como a fluência, a fadiga, o efeito escala e aspectos da relação tensão-deformação, no comportamento das rochas (Bortolucci, 1993).

2.3.1 Balanço Energético de Griffith

A necessidade de se explicar como se transmitiam as tensões nos corpos descontínuos, e qual era o mecanismo responsável pela propagação da fratura motivou a Griffith (1920) a estudar este fenômeno, desenvolvendo o conceito do balanço de energia no processo de fraturamento. Segundo este conceito, o balanço de energia considera a transferência da energia de deformação armazenada num corpo fraturado para a energia necessária que cria superfícies fraturadas. Isso explica o fato de que, quando uma fratura se propaga num corpo, haverá liberação de energia de deformação

armazenada, mas também haverá uma energia de superfície sendo absorvida pelo acréscimo no comprimento da fratura. Assim, um corpo atingirá a ruptura quando a propagação da fratura presente ocorre de forma instável, o que quer dizer que a taxa de energia de deformação liberada é maior do que a taxa de energia de superfície necessária para provocar o processo de fraturamento (Bortolucci, 1993).

Griffith determinou a perda da energia de deformação a partir da análise de Inglis (1913), que foi realizada num corpo infinito com fratura em forma de elipse e submetida a uma tensão remota. Assim a perda de energia de deformação foi expressa pela eq.(2):

$$U_e = \frac{\pi a^2 \sigma^2}{2E} \quad (2)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material e a o semi comprimento da fratura. A energia de superfície U_s foi determinada pela eq. (3) abaixo:

$$U_s = 2a\gamma \quad (3)$$

onde γ é a energia específica de superfície livre, considerada propriedade do material.

Finalmente, o balanço energético foi definido com a eq. (4):

$$U_T = -\frac{\pi a^2 \sigma^2}{2E} + 2a\gamma \quad (4)$$

onde a condição de ruptura se dá quando a energia total, U_T , atingir o máximo valor ou quando $\delta U_T / \delta a = 0$, a partir do qual a tensão crítica para a ruptura expressa-se com a eq. (5):

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (5)$$

Da eq. (5), conclui-se que a tensão crítica depende do tamanho da fratura e explica por que, para fraturas maiores, se precisará de menores valores de tensão de ruptura (Bortolucci, 1993). A figura 2.24 apresenta a interpretação gráfica do conceito.

A partir dos anos 50 do século passado, o estudo da propagação da fratura se viu ampliada quando Irwin, Orowan e outros postularam uma teoria modificada à teoria de Griffith. A teoria modificada propunha que, no lugar de se analisar a energia específica de superfície, deve-se considerar a *variação da liberação de energia de deformação*. Esta teoria propõe que um corpo atinge a ruptura quando a variação da liberação de

energia (G) atingir o valor crítico, (G_c) que seria uma propriedade do material. Este valor G_c pode ser facilmente obtido em ensaios de materiais em processo de fraturamento. Então, determinando-se o G de um corpo fraturado em função da rigidez e da geometria do corpo, das tensões aplicadas e do tamanho da fratura, e comparando-se com o G_c do material, se a condição é $G > G_c$, conseqüentemente, a fratura se propaga instavelmente. A ruptura começará quando $G = G_c$.

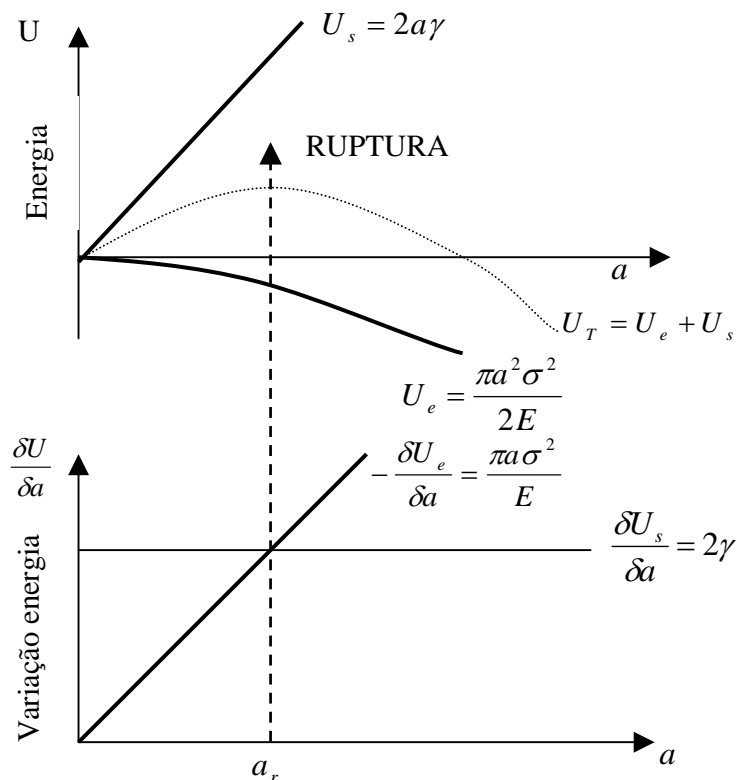


Figura 2.24 Energia e variação da energia em função do tamanho da fratura (Knott, 1973)

Irwin (1957) definiu como “*fator de intensidade de tensão*” uma constante K que depende da geometria do corpo, das tensões aplicadas e do tamanho da fratura. O aumento do fator de intensidade de tensão pode dar-se se a tensão aplicada for aumentada ou se o tamanho da fratura aumentar. Assim como existe uma variação de liberação de energia crítica (G_c), existe também um valor crítico de intensidade de tensão que determina se a propagação da fratura será instável.

Esse valor crítico de intensidade de tensão, considerado propriedade do material, é chamado de tenacidade à fratura do material (K_c) e é determinado em ensaios de laboratório. O valor de intensidade de tensão (K) pode ser relacionado com a variação

da liberação de energia (G) da eq. (6) para o estado plano de tensões e eq. (7) para o estado plano de deformações (Knott, 1973).

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (6)$$

$$G = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (7)$$

Com o intuito de compreender melhor o mecanismo da propagação da fratura, teorias têm sido derivadas como o Modelo Coesivo e a Mecânica do Dano que são empregadas na simulação de modelos matemáticos aplicados à engenharia. No trabalho presente, faz-se uso dos princípios da Mecânica do Dano, aplicados ao modelo de análise da zona fraturada.

2.3.2 Modos de propagação da fratura

A propagação da fratura num corpo ocorre de três modos, classificados segundo o tipo de movimento cinemático observado nos lados da fratura. Tal propagação pode ser do Modo I, o qual se dá devido a esforços de tração e se caracteriza pela separação das faces da fratura. O Modo II se dá pelo esforço de cisalhamento, caracterizando-se pelo escorregamento de uma face sobre a outra. Por fim, o Modo III ocorre pela ação de esforços de torção, separando-se as faces de modo a provocar o rasgamento como se pode ver na figura 2.25.

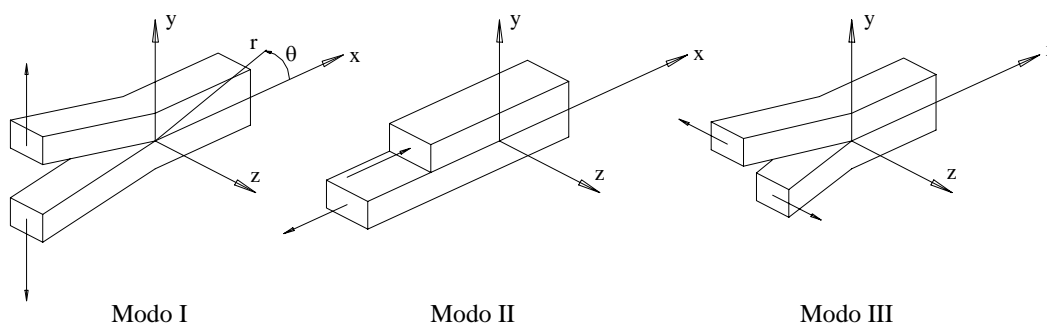


Figura 2.25 Modos de propagação da fratura.

Na realidade, a propagação de uma fratura pode acontecer tanto de um modo, como pela combinação deles, chamando-se, neste último caso, de modo misto. Os Modos I e II ou a combinação deles são os mais frequentes nos problemas de Mecânica

das Rochas.

Em situações como a fundação de uma barragem na zona do pé de montante, o desenvolvimento de uma fratura tende a ser por cisalhamento (Pedroso, 1996). Esta zona da fundação da barragem de Porto Primavera, por exemplo, experimenta esforços de cisalhamento devido ao carregamento do peso próprio da estrutura. Estes esforços desenvolvem a fratura e sua propagação, primeiro do modo misto e logo depois do Modo I devido a esforços de tração, ocasionados pelo carregamento de água no reservatório. Mas, vale dizer que a trajetória da propagação da fratura segue um estado de tensões, o que já foi observado por Ingraffea (1983), para quem cada incremento no comprimento da fratura implica em um novo estado de tensões na estrutura.

2.4 Modelo de Propagação de Fratura

O Modelo constitutivo que é usado na simulação numérica do desenvolvimento da fratura baseia-se na Teoria da Mecânica do Dano, que visa a quantificação da degradação das propriedades mecânicas do material. Tal degradação resulta do início e crescimento de micro-defeitos, tais como micro-fissuras e cavidades. Essa quantificação é uma variável escalar, chamada variável de dano, representada por d . O valor desta variável nos fornece a medida da perda de rigidez secante e varia desde zero, para o material não danificado, até 1, para o material totalmente degradado (ver figura 2.26). Lemaitre (1996) define a variável d conforme se apresenta na eq. (8), a qual se pode interpretar fisicamente como a relação local entre a superfície danificada e a superfície total (nominal) do material.

$$d = \frac{S_D}{S} \quad (8)$$

onde:

S_D : área das micro-fissuras e cavidades;

S : área total.

Conseqüentemente, o módulo de elasticidade do material danificado se define pela relação da eq.(9):

$$\bar{E} = E(1 - d) \quad (9)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material não danificado.

A Teoria da Mecânica do Dano está baseada na definição do conceito de tensões efetivas e na hipótese de equivalência de deformações (Lemaitre e Chaboche, 1978): “A deformação associada ao estado degradado submetido a uma determinada tensão σ é equivalente à deformação associada ao estado intacto (não degradado) submetido à tensão efetiva $\bar{\sigma}$ ”.

Assim, em termos de tensões, estabelece-se a seguinte equação:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{(1-d)} = E \varepsilon \quad (10)$$

onde ε é a deformação uniaxial.

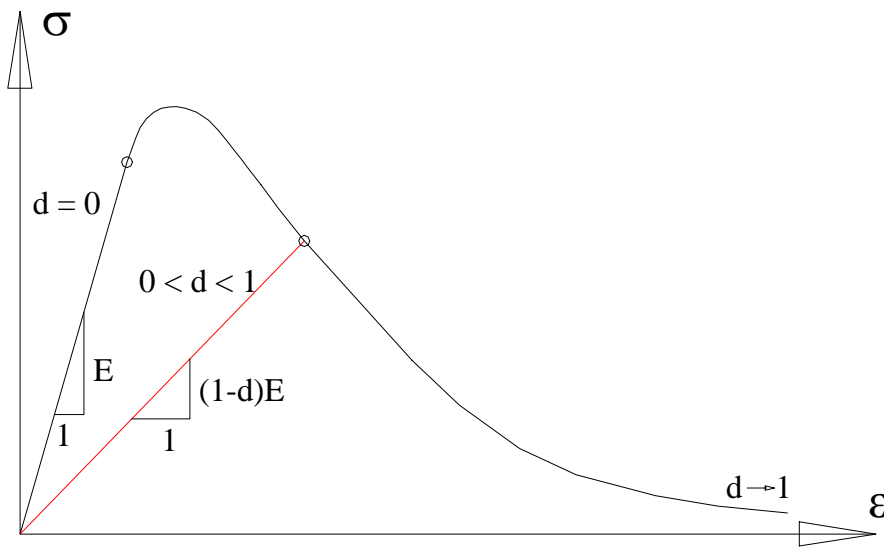


Figura 2.26. Curva uniaxial tensão-deformação para o modelo de degradação (Olivier *et al.*, 1990).

Em problemas multiaxiais, o tensor de tensões efetivas de segunda ordem, $\bar{\sigma}$ é expresso pela eq. (11):

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_o : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

onde \mathbf{D}_o é o tensor constitutivo elástico linear de quarta ordem, $\boldsymbol{\varepsilon}$ é tensor de deformações de segunda ordem e $(:)$ representa o produto tensorial contraído em dois índices. O tensor de tensões efetivas pode ser decomposto em duas componentes $\bar{\sigma}^+$ e $\bar{\sigma}^-$, correspondentes à tração e compressão, contendo, respectivamente, as componentes positivas e negativas das tensões principais de $\bar{\sigma}$. A partir da divisão das tensões, pode-se definir, explicitamente, a lei constitutiva, através do tensor de tensões de Cauchy:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^- \quad (12)$$

com

$$0 \leq d^+ \leq 1 \text{ e } 0 \leq d^- \leq 1 \quad (13)$$

onde d^+ e d^- são as variáveis internas de dano de tração e compressão, respectivamente. Em consequência o modelo fica definido pelas leis de evolução das variáveis internas de dano.

Os critérios de dano de tração e de compressão são dados pelas eq. (14) e (15), respectivamente.

$$g^+(\bar{\tau}^+, r^+) = \bar{\tau}^+ - r^+ \leq 0 \quad (14)$$

$$g^-(\bar{\tau}^-, r^-) = \bar{\tau}^- - r^- \leq 0 \quad (15)$$

onde $\bar{\tau}^+$ e $\bar{\tau}^-$ são as normas das tensões efetivas de tração e compressão, e as variáveis r^+ e r^- são os limites correntes de dano. As expressões das normas $\bar{\tau}^+$ e $\bar{\tau}^-$ definem a forma enquanto que os valores dos limites de dano controlam o tamanho da superfície limite do dano, que se expande no espaço das tensões efetivas. Essas variáveis, antes da aplicação de cargas assumem valores iniciais, r_o^+ e r_o^- que são atribuídas com base nas tensões uniaxiais correspondentes aos limites de proporcionalidade, f_o^+ e f_o^- , de onde:

$$r_o^+ = \frac{f_o^+}{\sqrt{E}} \quad (16)$$

$$r_o^- = \frac{f_o^-}{\sqrt{E}} \quad (17)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material. Devido à fragilidade do material à tração (caso rocha) a tensão limite de proporcionalidade, f_o^+ , em geral, coincide com a tensão de resistência à tração, f_t , a partir da qual ocorre abrandamento da tensão com acréscimo da deformação. A figura 2.27 ilustra os contornos da superfície limite inicial do dano no espaço das tensões principais efetivas que se pode obter com as expressões das normas das tensões efetivas propostas por Cervera *et al.* (1996).

As variáveis do dano são expressas em função das variáveis limites de dano. Para o caso específico de tração (objetivo do estudo) a evolução do dano é expressa pela eq.

(18).

$$d^+ = 1 - \frac{r_o^+}{r^+} e^{A^+ \left(1 - \frac{r^+}{r_o^+}\right)} \quad (18)$$

onde A^+ é o parâmetro de abrandamento da lei de evolução do dano.

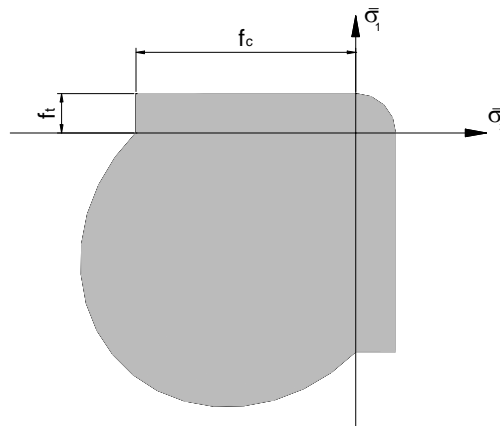


Figura 2.27 Superfície limite inicial do dano no espaço das tensões principais efetivas biaxial.

Como é bem sabido, o emprego de modelo de dano para representar fratura de maneira difusa (smeared crack approach) pode conduzir a uma forte dependência da resposta com respeito ao tamanho e à orientação da malha de elementos finitos. Para minimizar essa falta de objetividade com respeito à malha de elementos finitos sem prejuízo de simplicidade e robustez do método, utilizam-se as seguintes estratégias:

1. A energia dissipada localmente pelo modelo de dano em um processo completo de degradação (estabelecida pelo parâmetro de abrandamento A^+) é função da energia de fratura do material (G_F) e do tamanho característico do elemento finito (Cervera *et al.* 1996);
2. A trajetória da fratura ao longo do processo de carregamento é estabelecida por um algoritmo de traçado progressivo que assegura continuidade da fratura entre elementos finitos. A orientação da linha de fratura no interior de cada elemento é fixada ortogonalmente à direção de máxima tensão no instante em que as tensões alcançam o critério de dano. Somente os elementos atravessados pela linha de fratura podem apresentar comportamento não-linear, permanecendo os demais em regime elástico linear.

Note que o emprego de tais estratégias conduz a uma forma de representar a

fratura muito similar à do modelo coesivo (Hillerborg *et al.* 1976). Nesse caso, a zona de formação da fratura corresponde ao domínio dos elementos atravessados pela trajetória da fratura. A lei de redução das tensões fica estabelecida pela lei de abrandamento do modelo de dano e a abertura da fissura corresponde ao deslocamento relativo entre os lados do elemento, que é resultante da parte inelástica das deformações.

No presente estudo, considera-se o dano progressivo da zona de fundação ao pé da montante da barragem sob a ação da carga de água na frente e no pé de montante da mesma, produzindo o avanço da fratura para cada acréscimo do nível de água. Nesse trabalho, emprega-se um modelo de dano isotrópico com degradação somente por solicitações de tração, no qual somente intervêm as componentes positivas das tensões principais.

2.5 Determinação da Subpressão

A ação da água nas fundações mal e pouco foi considerada no começo das construções de barragens. Depois de muitos desastres de estruturas construídas em séculos passados, um comitê de investigação liderado por Maurice Levy no ano de 1895 indicou que as causas do acidente da barragem de Bouzey corresponderam às pressões de água na rocha e à força de subpressão atuante sob a fundação da barragem. A subpressão poderia ter reduzido o peso efetivo da estrutura e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento (Birindelli, 1987).

O conceito de subpressão e sua atuação passaram por várias etapas onde inicialmente, por falta de dados e precariedades dos ensaios de permeabilidade, a barragem de concreto e o maciço de fundação foram considerados impermeáveis, levando-se em conta que a subpressão só se exercia através das juntas ou fissuras. Mais tarde, como resultados de evidências, foi mostrada a existência de pressões de água tanto na fundação como no corpo da estrutura. Uma das maiores controvérsias que logo surgiu foi em relação à área efetiva de atuação destas pressões. A idéia de que não haveria subpressão entre as partículas do contato que não tinham água era o principal argumento contra a idéia de que a área de atuação das pressões de água era de 100%.

Contudo, Serafim (1954) cita Castigliano de 1884 como sendo o primeiro que indicou a fissuração e as tensões de tração como as causas da penetração de água na base das estruturas. Outros, como Francis em 1888, sugeriram a existência de pressões na base de barragens de gravidade devido à fissuração da rocha, propondo a execução

dos drenos na base da estrutura, próximo ao paramento de montante. Afirmava, também, que as subpressões variavam desde a pressão do reservatório a montante até zero a jusante. Com exceção de Levy, todos consideravam a existência de fendas através das quais as pressões de água eram exercidas no interior e na base das barragens. Ainda não se admitia que a pressão hidrostática pudesse ser exercida em toda área das seções horizontais.

Segundo Serafim, foi Pelletrau em 1897 que indicou que sempre ocorreria a subpressão no contato com a estrutura em virtude da permeabilidade da fundação, ainda que esta fosse rocha sã.

Mais tarde, após discussões, dois fatores importantes se consolidaram como sendo relevantes: a área efetiva de atuação da pressão de água sob a base da estrutura e a intensidade com que ela se manifesta. O fator “A” e o fator intensidade “I” constituíam-se nos elementos determinantes da subpressão. O fator de área A, segundo Birindelli (1987), foi definido como a porcentagem da área da seção horizontal da base da barragem que deveria ser admitida como sendo a área efetiva de aplicação da solicitação, com valores que poderiam chegar a 100% ou 1,0 em função da porosidade do meio ou conforme a experiência do projetista. Mas o valor para o fator de área A tinha como base algumas evidências de investigação. Uma muito importante foi a de Terzaghi (1936) que argumentou, com base em sua investigação, que, semelhantemente ao concreto, as mesmas condições poderiam ser encontradas nas rochas, que eram materiais porosos e, em função de sua própria estrutura, estariam submetidas a um alto fator de área, independente da influência de aberturas ou cavidades na rocha, da presença de juntas ou de fraturas. A existência destas facilita o acesso de água, promovendo a saturação da rocha, resultando em um valor alto do fator de área A.

O fator intensidade “I”, segundo Birindelli (1987), foi definido como um coeficiente de minoração do valor de subpressão de montante. Este era expresso como um gradiente que se estendia desde uma pressão correspondente ao nível de jusante até um valor variável da face de montante. Este valor variaria até um máximo correspondendo à pressão total do reservatório, sendo em consequência igual a 100% ou 1,0. Ante a presença de drenagem, esta reduziria a subpressão.

Além das condições geológicas da fundação que influenciam diretamente a intensidade da subpressão atuante na base das estruturas, dedicou-se especial atenção

aos sistemas de redução desta solicitação, como as cortinas de injeção e drenagem amplamente utilizadas no Estados Unidos. A eficácia da drenagem e das cortinas de injeção foi muito discutida em relação às cortinas de injeção que eram consideradas como proteção permanente, embora existissem algumas dúvidas a esse respeito. Entretanto, Rienius (1948) argumentava que estas cortinas de injeção poderiam ser acessíveis e passíveis de reforço através das galerias próximas à fundação ou desde o reservatório. O sistema de drenagem também tinha algumas observações contrárias, pois se alertava sobre a possibilidade de ineficácia dos drenos devido à colmatação. Em consequência disto, foi recomendado um acompanhamento sistemático do funcionamento dos dispositivos de controle, seja através de medidas de pressão ou de vazões para assegurar a eficiência.

São vários os critérios ou normas importantes que foram levadas em conta em relação à determinação da subpressão. Tanto os critérios europeus, americanos e as normas da USBR mostram que as observações do comportamento dos maciços de fundação das estruturas constituem dados de entrada importantes na aferição e ajuste dos critérios. Destacam-se, especialmente, os aspectos pertinentes à geologia local, às características dos tratamentos, etc. Os organismos passaram a não indicar valores a serem assumidos, mas sim a indicar a necessidade de calculá-los em função das condições específicas de cada caso analisado.

No Brasil, tendo como especial marco a existência de grandes barragens, vários estudos têm sido realizados. O mais ilustrativo foi apresentado anteriormente, onde Cruz e Silva (1978) estabelecem critérios para a determinação da subpressão no contato ou interface concreto-rocha e nas discontinuidades.

2.5.1 Determinação da subpressão média

A partir do modelo idealizado de Muskat (1937), Andrade (1980) procura estabelecer a subpressão média, S_d , na linha de drenos. Embora o modelo seja bidimensional (como o de Muskat), Andrade considera um fluxo transversal, paralelo à linha de drenagem, que ocorreria entre drenos em função da diferença de pressão que se estabelece entre a meia distância dos drenos e suas vizinhanças. Andrade amplia a validade de suas equações, fazendo considerações importantes tais como a anisotropia de maciços, a utilização de esquemas de tratamentos diferenciados mais complexos que uma simples linha de drenagem e a imposição de um nível de drenagem inferior ao

nível de jusante através do uso de bombeamento. Assim, as premissas do método sugerido por ele constituem uma extensão ao método de Casagrande. Cabe esclarecer que, para Casagrande, S_d representa o excesso de subpressão em relação ao nível de jusante. Entende-se este excesso de subpressão como sendo a diferença de potencial existente com relação ao nível de jusante.

Com base na equação de Darcy e da continuidade, sem considerar as perdas de carga que ocorrem ao longo dos drenos, Andrade estabelece o valor da subpressão média na linha de drenos, supondo que estes funcionem com uma eficiência de 100% dentro de uma camada permeável.

No cálculo da subpressão média na zona dos drenos, Andrade (1980) utiliza um modelo unidimensional como mostrado na figura 2.28(a), onde considera uma linha de drenos paralela à face de montante da barragem a uma distância s , sendo os furos de diâmetro ϕ espaçados a uma distância a_d .

O contato barragem-fundação (AC) é considerado uma descontinuidade principal, onde a vazão que penetra a montante é igual à vazão que sai pelo dreno mais a vazão que vai para jusante, sendo expressa pela eq. (19) e esquematizada na figura 2.28(b).

$$q_m = q_d + q_j \quad (19)$$

De acordo com a vazão do meio que está representada pela eq.(20), supõe-se que o fator de escoamento f é constante não só no sentido AC como também no BD, ou seja, ao longo da linha de drenos, de modo que S_d seria constante para qualquer valor de l (l - distância de um ponto qualquer até o dreno), inclusive $l=1$, sendo S_d o valor da pressão média no ponto B de acordo com a figura 2.28, e o fator de escoamento no plano BD representado pela eq. (21):

$$Q = f \cdot i \quad (20)$$

$$f' = f \cdot \lambda' \quad (21)$$

onde λ' é um fator que leva em conta o espaçamento de drenos e o diâmetro dos mesmos.

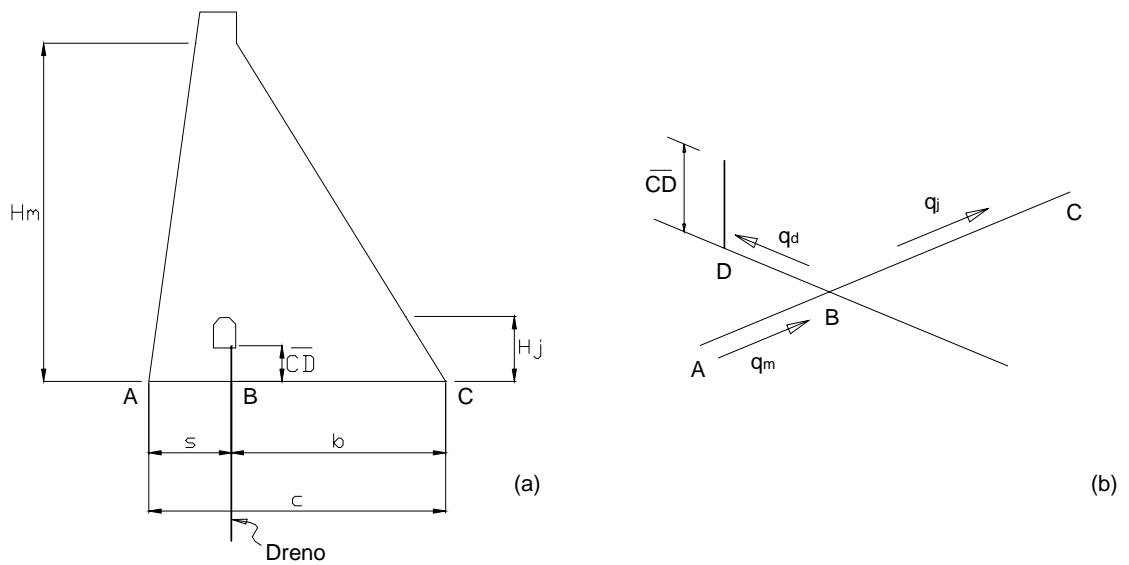


Figura 2.28 Esquema de Cálculo de Andrade (1988).

Portanto, λ' , denominado por Andrade de fator de forma da linha de drenos, representa a modificação que a drenagem provoca no escoamento no plano da linha de drenos. O valor de \overline{CD} , de acordo com as figuras 2.28 e 2.29, é a coluna de água no dreno até a base AC, ou seja, é a distancia da boca do dreno até o plano da descontinuidade em estudo.

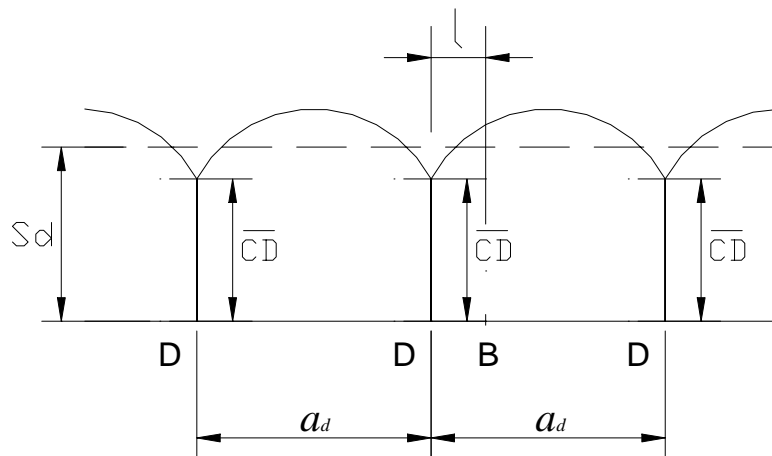


Figura 2.29 Definição da subpressão média (S_d) segundo Andrade (1988).

Com base nas equações (19) e (20), Andrade deduz as seguintes equações (22), (23), (24) e (25):

$$q_m = f \frac{H_m - S_d}{s} \tag{22}$$

$$q_d = f\lambda' \left[\frac{S_d - \overline{CD}}{l} \right] \quad (23)$$

$$\lambda' = l\lambda \quad (24)$$

resultando em:

$$q_d = f\lambda(S_d - \overline{CD}) \quad (23a)$$

$$q_j = f \frac{S_d - H_j}{b} \quad (25)$$

a partir das quais se obteve a seguinte expressão para S_d :

$$S_d = \frac{H_m b + H_j s + bs\lambda \overline{CD}}{sb\lambda + b + s} \quad (26)$$

onde b a distância do dreno até a face de jusante e s , distância do dreno até a face de montante.

Nesta expressão da eq. 26, o valor do fator de forma da linha de drenos, λ , é dado por:

$$\lambda = \frac{2\pi}{a_d \ln \left[\frac{a_d}{2\pi r_d} \right]} \quad (27)$$

onde r_d , é o raio do dreno.

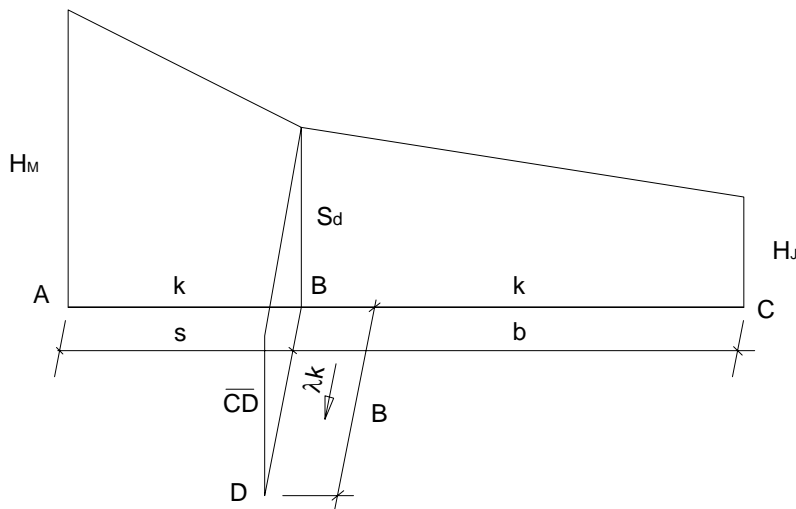


Figura 2.30 Consideração do fator de forma, λ (Andrade, 1988).

2.5.2 Escoamento do fluxo

O escoamento do fluxo no maciço rochoso é considerado bem complexo. Para entender como flui a água no meio fraturado, é preciso entender o comportamento do fluxo através de uma simples fratura. Como se sabe, as vazões são maiores onde a quantidade de vazios é maior. Segundo Andrade (1988), nos maciços rochosos existem caminhos que as águas escolherão para percorrer preferencialmente. É como considerar a existência de um gradiente hidráulico que na maioria das vezes não é de grande intensidade. As forças de impulsão geradas pelos gradientes, evidentemente, encaminham as águas subterrâneas para descontinuidades que favorecem sua passagem. Mas, será preciso explicar que existem outros fatores que influenciam o escoamento das águas, como a temperatura, por exemplo, a qual depende da profundidade, assim como o grau geotérmico em geral do meio e a temperatura das águas do reservatório. Sabe-se que as águas represadas sofrem variações sazonais de temperatura e, com isto, influenciam o escoamento das águas subterrâneas. Outro fator pode ser a composição química das substâncias dissolvidas que alteram as rochas de fundação, e, finalmente, o índice mineralógico de solubilidade, a radioatividade, etc.

Existem vários tipos de descontinuidades ou superfícies abertas ou de fraturas que são vias de escoamento como se apresenta na figura 2.31. As de tipo A, que não têm material de preenchimento, as de tipo B com preenchimento de material poroso, as de tipo C, superfícies abertas com preenchimento de material qualquer que poderia ter até sub-fraturas, e aquelas de tipo D, superfícies irregulares compostas por rochas fraturadas que se interligam, mas que funcionam como se fossem uma só descontinuidade.

Aquela de tipo A é a mais representativa porque permite assumir que o escoamento se dá entre duas superfícies paralelas próximas, substituindo-se o modelo real por um modelo teórico como se mostra na figura 2.32. Este modelo teórico serve como apoio para estabelecer um valor nominal da abertura e da descontinuidade. Este valor chama-se abertura nominal, o qual teoricamente representa o espaço onde acontece o escoamento em uma fratura real. Cabe esclarecer que as superfícies paralelas representam os limites impermeáveis para o fluxo.

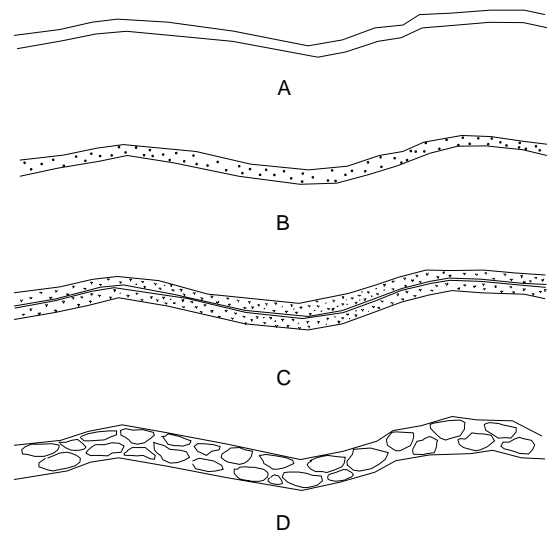


Figura 2.31 Tipos de abertura ou descontinuidade (Andrade, 1988).

Como o escoamento tem velocidades em geral baixas, ele pode ser considerado no regime laminar, ou seja, um escoamento onde as partículas de água escoam paralelas à superfície da descontinuidade com uma velocidade média v_m .

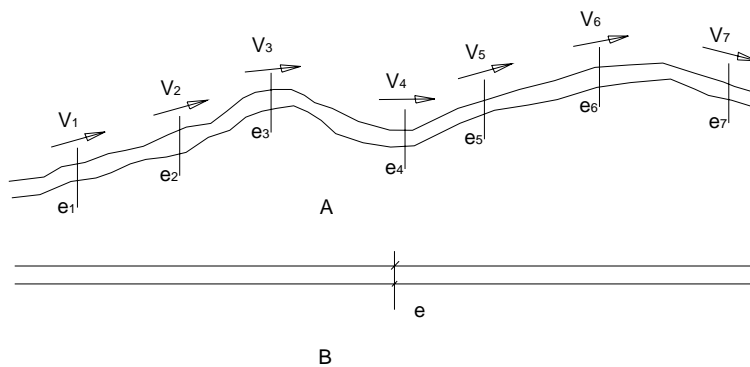


Figura 2.32 Substituição do modelo real (A) pelo modelo teórico (B) (Andrade, 1988).

Devido ao fato de que a abertura nominal de uma fratura é bem pequena, considera-se que o fluxo pode se basear na lei cúbica, a partir da qual deduz-se o valor da permeabilidade ou condutividade da fratura por meio da eq. (28):

$$q = -f \cdot i \tag{28}$$

de onde f é o fator de escoamento que se apresenta pela eq. (29):

$$f = \frac{\gamma_w e^3}{12\mu} = \frac{g e^3}{12\nu} \tag{29}$$

onde γ_w é o peso específico da água, ν a viscosidade cinemática e g a aceleração da

gravidade.

$$\frac{\gamma_w}{\mu} = \frac{g}{\nu} \quad (30)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica. A partir das expressões acima, pode-se calcular o valor da condutividade da fratura por meio das eq. (31) e eq. (32):

$$f = k_f A \quad (31)$$

$$k_f = \frac{ge^2}{12\nu} \quad (32)$$

Onde k_f é a condutividade hidráulica da descontinuidade ou fratura e A é a área onde se dá o escoamento na unidade de largura. A eq. (28) da vazão é utilizada num meio descontínuo, onde o escoamento se realiza por descontinuidades principais persistentes de abertura nominal e num regime laminar. Já a eq. (32) foi utilizada nos cálculos do presente estudo.

3. METODOLOGIA

A fundação da barragem da Usina de Porto Primavera, situada entre os Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, é o objeto do presente trabalho de pesquisa. A metodologia seguida está baseada, inicialmente, na seleção das seções da barragem a serem analisadas. Tomou-se uma seção representativa da zona do vertedouro que foi a seção BV-6, a que possui instrumentação instalada de extensômetros e piezômetros na fundação, assim como uma seção da zona da casa de força, a unidade U-10, que também possui instrumentação instalada na fundação. Seguidamente, deram-se os seguintes passos:

1. A compilação dos parâmetros característicos do material do maciço rochoso, (a saber, a densidade, a condutividade hidráulica, os módulos de deformabilidade nas duas direções e o coeficiente de Poisson) e da estrutura de concreto da barragem usados no projeto original,
2. A compilação dos registros das leituras realizadas pela instrumentação existente na fundação da estrutura (a saber, extensômetros, piezômetros e drenos),
3. A quantificação das cargas de água nos níveis de análise, para a aplicação das pressões correspondentes nas superfícies do paramento a montante e jusante, na fundação assim como na zona de contato concreto-rocha a montante. Determinou-se também o módulo de deformabilidade do maciço (E) e a densidade equivalente para as seções assumidas de análise,
4. O cálculo de parâmetros como a energia de fratura (G), a carga hidráulica média na zona do dreno na fundação, a condutividade do dreno e da zona de fratura para a análise de fluxo.

De acordo com os objetivos de estudo do aparecimento e propagação da fratura, considerou-se a aplicação da Mecânica de Fratura mediante a análise não linear da zona

de fratura. A análise é realizada sob o Modelo do Dano na zona onde se desenvolve a fratura. No estudo, considerou-se o dano progressivo sob a ação da carga de água na frente e no pé de montante da barragem, originando uma fratura na fundação ao pé do paramento a montante, considerando-se a análise do avanço da fratura para cada acréscimo de nível de água. Nesse trabalho, emprega-se um modelo de dano isótropo com degradação somente por solicitações de tração, no qual somente intervêm as componentes positivas das tensões principais (Oliver *et al.*1990).

Devido ao carregamento progressivo de água na face da estrutura a montante, propôs-se a análise iterativa de tensão-deformação e pressão hidráulica na parede da fratura baseada no avanço da fratura e na aplicação de forças nodais na parede da fratura, finalizando-se esta análise quando a fratura deixa de progredir. Para o desenvolvimento da análise, realizou-se a construção de um modelo de tensão-deformação, além de um segundo modelo para realizar o cálculo de subpressão para cada avanço da fratura.

Considerou-se realizar a análise para seis níveis de carregamento de água, os quais foram: 242m, 244m, 247m, 250m, 253m e 257m (máximo nível atual de água). As análises tanto de tensão-deformação e pressão de água como de fluxo e subpressão se deram de forma iterativa.

Inicia-se a análise com o processamento do modelo tensão-deformação, considerando todas as cargas hidráulicas correspondentes ao primeiro nível de água. Este primeiro carregamento origina uma fenda ou fratura, a qual será considerada num novo processamento de fluxo e subpressão. Os resultados deste último processamento deram um novo diagrama de subpressão na base que é considerado no seguinte processamento. Ao mesmo tempo, a fratura que se produz será afetada pela pressão hidrostática nas suas paredes correspondentes ao mesmo primeiro nível. Essa pressão hidráulica é considerada constante a partir da superfície da fundação na zona de contato concreto-rocha. A partir dessa pressão, calcularam-se forças nodais que foram aplicadas nos nós dos elementos para um novo processamento de tensão-deformação. Após este último processamento, produziu-se um novo avanço da fratura, o que foi afetado pelas cargas do seguinte nível de água. Assim, deram-se os processamentos com todos os níveis de água até que a fratura deixou de progredir.

Depois de realizados os processamentos de análise, procedeu-se a tomar os

deslocamentos dos pontos que identificam a posição das hastes dos extensômetros. Estes deslocamentos produzidos sob cada carregamento de água são relacionados com os pontos que representam a posição dos aparelhos de leitura instalados nas galerias de montante. O afastamento ou acercamento dos pontos indicaram o alongamento ou encurtamento das hastes dos extensômetros, o que mostra a possível deformação desenvolvida no maciço rochoso da zona. Das deformações calculadas, foi feita uma aferição com as leituras compiladas dos extensômetros existentes na fundação das seções selecionadas.

3.1 Parâmetros de análise

A estrutura de concreto da barragem de Porto Primavera está fundada sobre um maciço basáltico na região de micro-derrames que são simplificados no modelo de análise, mas que influem nos valores das características geomecânicas utilizadas no projeto original. O nível de água máximo considerado para a análise foi 257m, dado tomado do projeto original. As seções de análise apresentam-se na figura 3.1 para o vertedouro e na figura 3.2 para a casa de força.

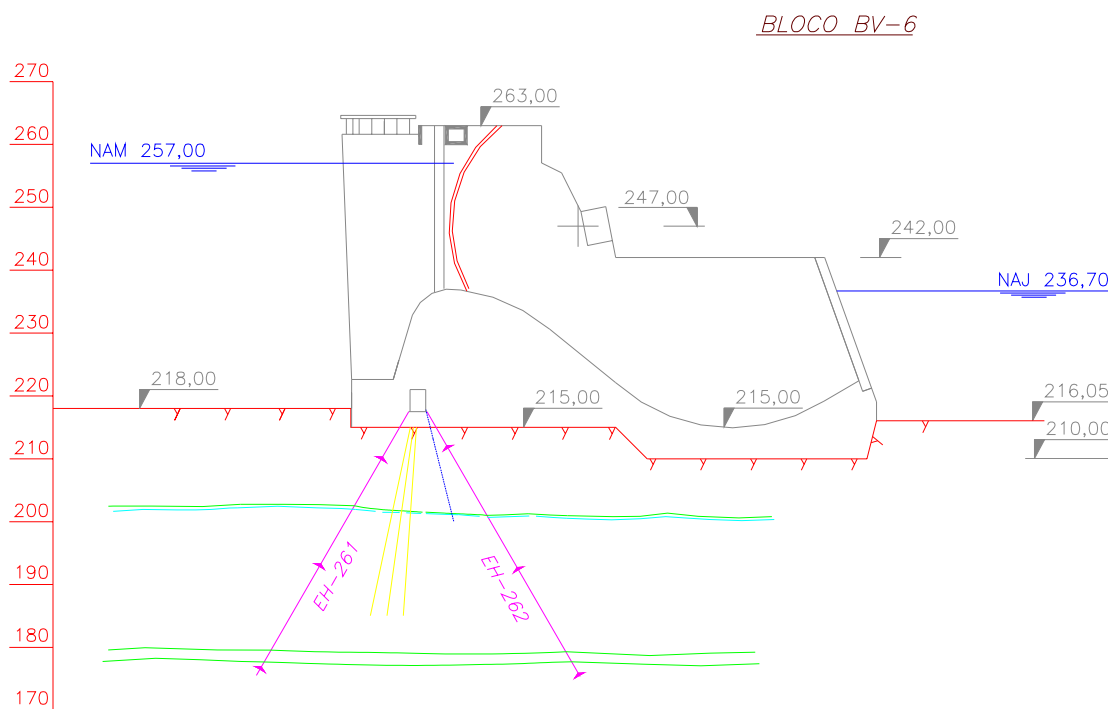


Figura 3.1 Seção de análise do vertedouro sob carga máxima atual de água.

As características geométricas dos blocos do vertedouro e da casa de força são as seguintes: o bloco do vertedouro tem uma largura de 20m, a qual inclui a zona da

comporta de 15m e os pilares de 5m, sendo que a casa de força tem uma largura de 31m na qual se inclui a zona da tomada de água para as turbinas. A seção de análise assumiu-se em 1m. A figura 3.3 apresenta a planta do vertedouro e a figura 3.4 a planta da casa de força.

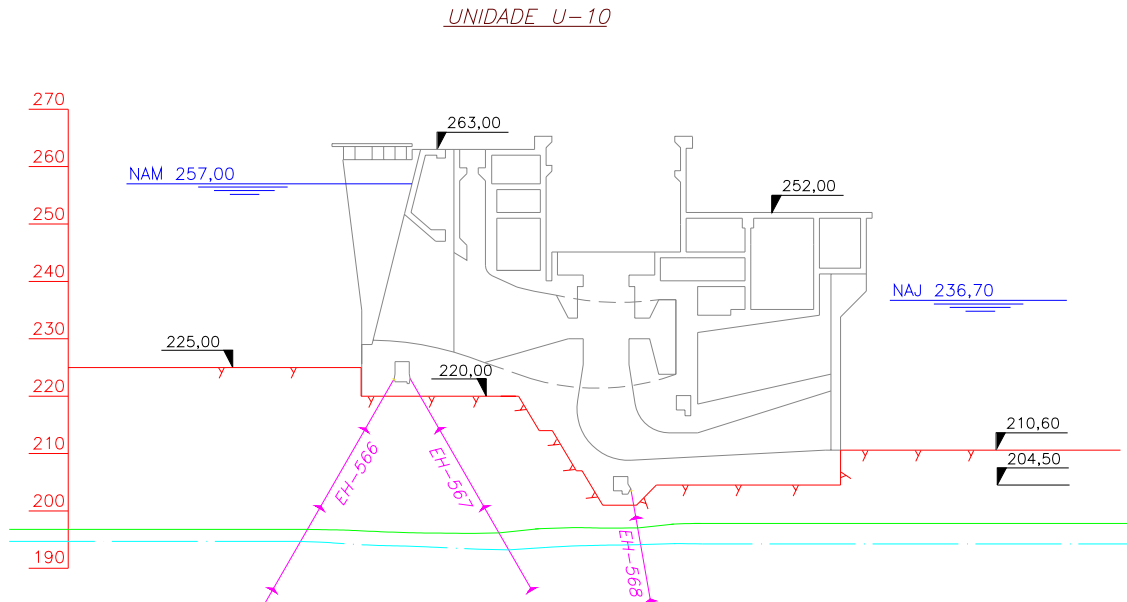


Figura 3.2 Seção de análise da casa de força sob a carga máxima de água.

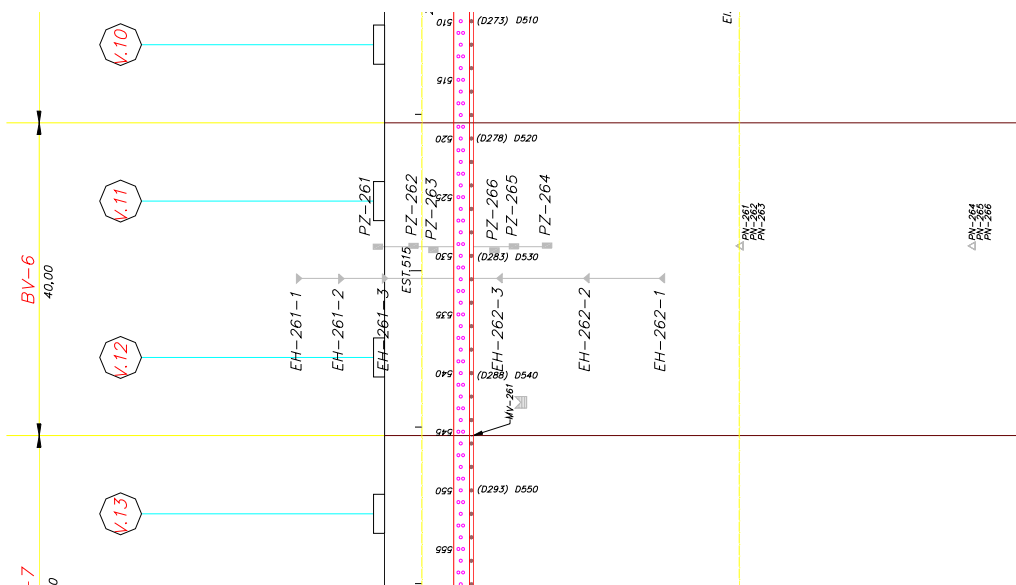


Figura 3.3 Localização em planta do vertedouro BV-6.

Os parâmetros geomecânicos adotados para a análise foram tomados do projeto original, os quais foram:

1. Peso específico do concreto, $\gamma_c=24 \text{ kN/m}^3$;

2. Peso específico do maciço (saturado), $\gamma_m=21 \text{ kN/m}^3$;
3. Peso específico do maciço em sua condição natural, $\gamma_n=20 \text{ kN/m}^3$;
4. Peso específico da água, $\gamma_w=9,8 \text{ kN/m}^3$;
5. Módulo de elasticidade do concreto, $E=21 \text{ GPa}$;
6. Módulo de deformabilidade em x (horizontal) do maciço na fundação do vertedouro, $E_x=25 \text{ GPa}$;
7. Módulo de deformabilidade em y (vertical) do maciço na fundação do vertedouro, $E_y=10 \text{ GPa}$;
8. Módulo de deformabilidade em x (horizontal) do maciço na fundação da casa de força, $E_x=25 \text{ GPa}$;
9. Módulo de deformabilidade em y (vertical) do maciço na fundação da casa de força, $E_y=15 \text{ GPa}$;
10. Coeficiente de Poisson para o concreto de 0,18, sendo que para o maciço foi de 0,25.

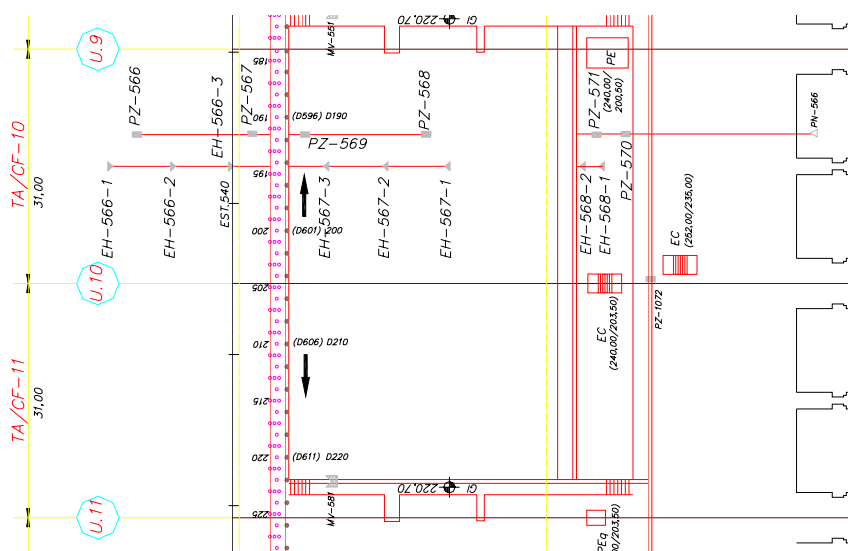


Figura 3.4 Localização em planta da zona da tomada de água e da casa de força U-10.

O módulo de elasticidade para a estrutura, tanto para o vertedouro como para a casa de força, foi adotado do projeto; já o módulo de deformabilidade do maciço foi calculado a partir dos valores nas direções x e y , adotando-se a média geométrica dos valores apresentados, que foi de 15,8 GPa para o vertedouro. Todos os parâmetros para

o concreto foram ponderados em relação às seções adotadas para o vertedouro. Os valores utilizados na análise para o vertedouro apresentam-se na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros característicos dos materiais para a simulação do vertedouro.

Estrutura	Material	Largura m	Módulo Deformabilidade GPa	Peso Específico kN/m ³	Coefficiente Poisson	F _t MPa
Pilar	Concreto	5,00	5,25	6	0,18	
Vertedouro	Concreto	15,00	21,00	24	0,18	
Maciço	Basalto		15,80	21	0,25	0,12
Contato	Basalto		10,00	7	0,30	0,06

Na análise da casa de força foi utilizado o módulo de deformabilidade do maciço calculado como a média geométrica dos valores acima citados obtendo-se 19,4 GPa. Os valores adotados da densidade e o módulo de elasticidade do concreto foram os mesmos acima mencionados e ponderados em relação às seções adotadas.

Tabela 2. Parâmetros característicos dos materiais para a simulação da casa de força.

Estrutura	Material	Largura m	Módulo de deformabilidade GPa	Peso Específico kN/m ³	Coefficiente de Poisson	F _t MPa
Pilar	Concreto	4,50	3,05	3,48	0,18	
Bloco	Concreto	31,00	12,30	14,10	0,18	
Maciço	Basalto		19,40	21,00	0,25	0,12
Contato	Basalto		10,00	19,00	0,30	0,06

Outras características consideradas são:

1. As tensões horizontais iniciais existentes no maciço, e que no caso estão na relação $\sigma_h=0,7\sigma_v$,
2. A energia de fratura (G) em função da tenacidade de fratura (K_c) do material que foi tomado dos resultados de ensaios realizados em basaltos por Pehovaz (2004) na Escola de Engenharia de São Carlos, e
3. A resistência à tração (F_t) do maciço, adotada como 0,12 MPa, entanto que para o contato 0,06 MPa.

Os valores da energia de fratura com base na tenacidade do material foram calculados com ajuda da eq.(33) para o caso de uma análise plana de deformações. Os valores apresentam-se na tabela 3:

$$G_F = \frac{K_c^2(1-\nu^2)}{E} \tag{33}$$

Tabela 3 Valores calculados da Energia de fratura para o basalto.

Estrutura	Tenacidade de fratura	Coefficiente de Poisson	Módulo de Deformabilidade	Energia de fratura
	K_c	ν	E	G_F
	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$		MPa	N/m
Vertedouro	2,31	0,25	15800	316,62
	2,40			341,77
	2,65	416,68		
Casa de força		0,25	19365	258,33
				278,85
				339,97

A condutividade hidráulica do maciço foi determinada com base nos valores de condutividade, achados por Tressoldi *et al.* (1990), que realizaram ensaios de intercomunicação tridimensionais na fundação da barragem de Porto Primavera. Esses ensaios permitiram a caracterização hidrogeológica e hidrogeotécnica completa do maciço. Para a zona de contato, o valor da condutividade foi tomado do estudo de Tressoldi (1987). Já a condutividade da cortina de injeção foi tomada do projeto original, entanto que para o dreno a condutividade foi calculada. Os valores utilizados são apresentados na tabela 4:

Tabela 4. Valores da condutividade hidráulica.

Zona	k_x , m/s	k_y , m/s
Maciço	1e-05	1e-07
Contato	3e-02	3e-03
Injeção	2e-07	1e-07
Drenagem	1e-04	1e-04

3.1.1 Cálculo das forças atuantes

O cálculo das forças atuantes, resultado do carregamento hidráulico nas estruturas do vertedouro e da casa de força, baseia-se nos esquemas de carregamento mostrados nas figuras 3.5 e 3.6.

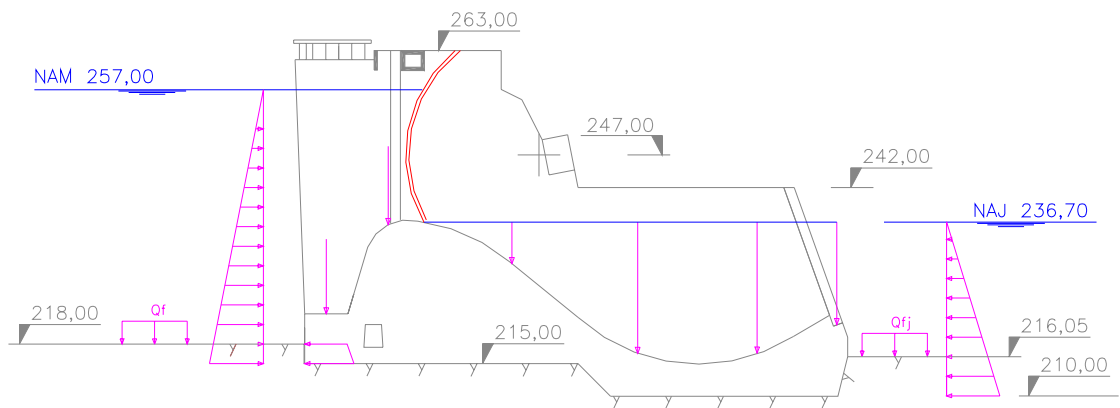


Figura 3.5 Esquema de carregamento hidráulico do vertedouro.

As tensões horizontais iniciais, no maciço, foram calculadas em dependência da relação $\sigma_h=0,7\sigma_v$. Essas tensões foram consideradas na análise da fundação do vertedouro e da estrutura tomada de água-casa de força.

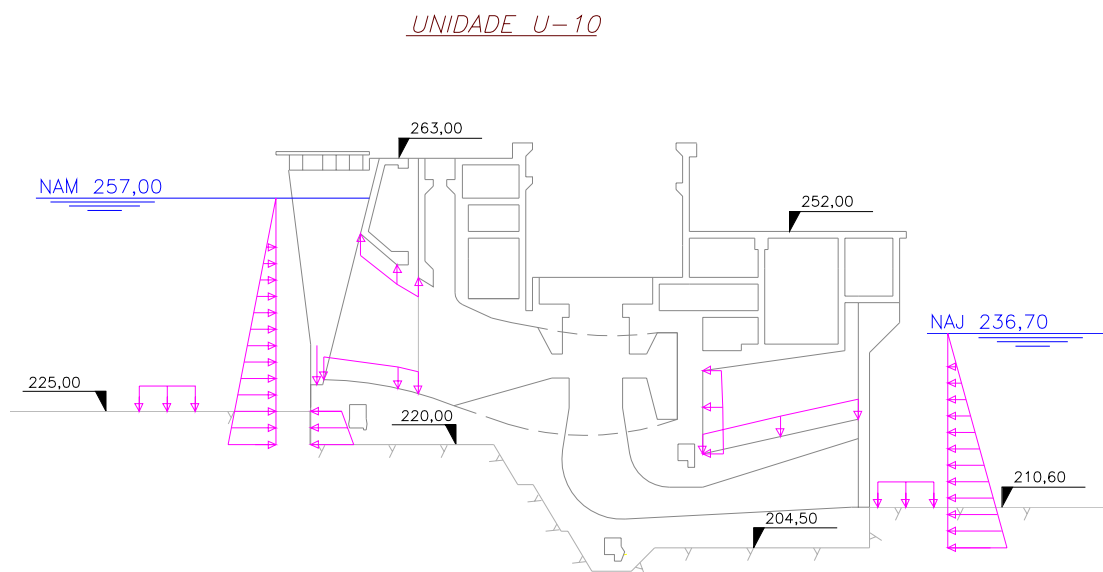


Figura 3.6 Esquema do carregamento hidráulico na tomada e casa de força.

A carga de água na face de montante, tanto para o vertedouro como para a casa de força, foi calculada usando o esquema como se mostra na figura 3.7, sendo que, para efeito de cálculo do vertedouro, considerou-se o nível de superfície da fundação 218m e para a casa de força o nível 225m.

Considerando o nível máximo de água na barragem, tomaram-se seis níveis de água que foram representados por cargas nodais equivalentes, calculadas com as eq.(34)

a eq.(36). As eq.(37) a eq.(40) foram utilizadas para obter a posição das forças nodais equivalentes.

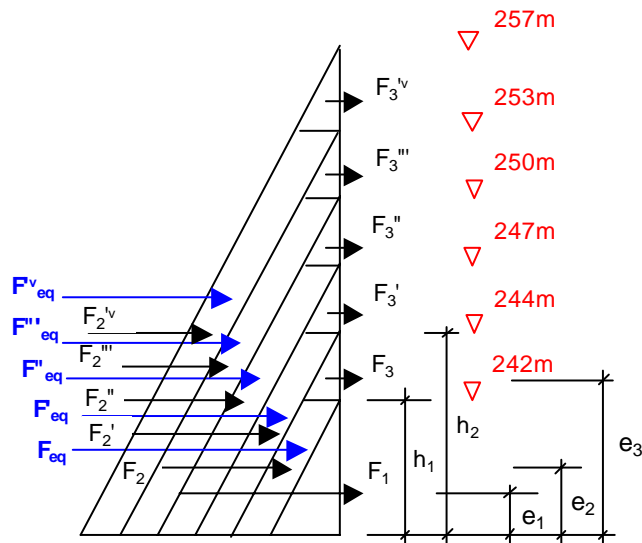


Figura 3.7 Esquema de cálculo das forças nodais equivalentes.

$$F_1 = \frac{h_1^2}{2} \gamma_w \quad (34)$$

$$F_2 = (h_2 - h_1) h_1 \gamma_w \quad (35)$$

$$F_3 = \frac{(h_2 - h_1)^2}{2} \gamma_w \quad (36)$$

$$e_1 = \frac{h_1}{3} \quad (37)$$

$$e_2 = \frac{h_1}{2} \quad (38)$$

$$e_3 = h_1 + \frac{(h_2 - h_1)}{3} \quad (39)$$

$$e_{eq} = \frac{F_3 e_3 + F_2 e_2}{F_{eq}} \quad (40)$$

onde:

h_1 , altura do primeiro nível até a superfície da fundação, ou seja,

$$h_1 = (242 - 218) \text{m} = 24 \text{m}.$$

h_2 , altura do segundo nível até a superfície da fundação, ou seja,

$h_2=(244-218)m=26m$. Estes valores são definidos para o primeiro e segundo nível de carregamento; em seguida, para o terceiro nível de carregamento, $h_1=(244-218)m=26m$ e $h_2=(247-218)m=29m$; para o quarto nível, $h_1=(247-218)m=29m$ e $h_2=(250-218)m=32m$; para o quinto nível, $h_1=(250-218)m=32m$ e $h_2=(253-218)m=35m$; por fim, para o sexto nível de carregamento, $h_1=(253-218)m=35m$ e $h_2=(257-218)m=39m$.

De igual forma, foram calculadas as forças equivalentes para a casa de força, onde, para o primeiro nível de carregamento, $h_1=(242-225)m=17m$, e para o segundo nível, $h_2=(244-225)m=19m$. Para o terceiro nível, $h_1=(244-225)m=19m$ e $h_2=(247-225)m=22m$. Para o quarto nível, $h_1=(247-225)m=22m$ e $h_2=(250-225)m=25m$. Para o quinto nível, $h_1=(250-225)m=25m$ e $h_2=(253-225)m=28m$. E finalmente, para o sexto nível, $h_1=(253-225)m=28m$ e $h_2=(257-225)m=32m$.

O nível de água a jusante foi fixado devido a sua permanência constante, daí que as forças no vertedouro foram calculadas segundo o esquema da figura 3.8.

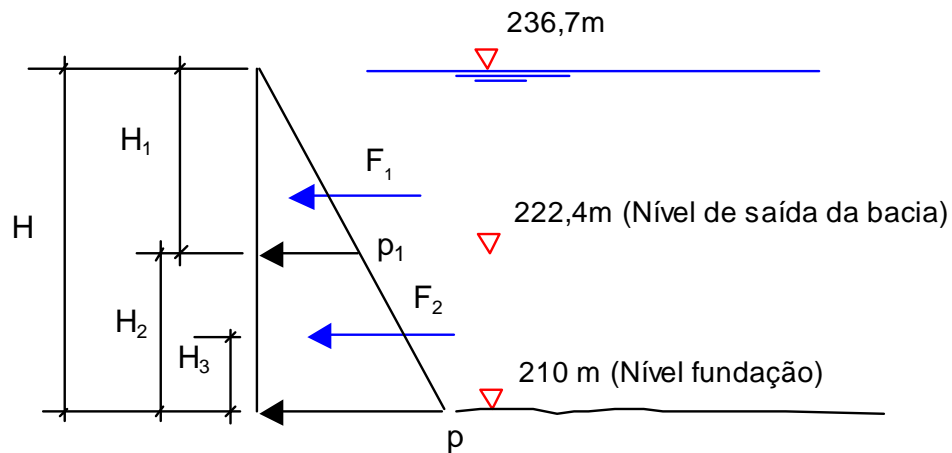


Figura 3.8 Esquema de cálculo da carga de água a jusante do vertedouro.

Consideraram-se dois níveis de aplicação das forças equivalentes, uma primeira F_1 aplicada nos muros e uma segunda no nível da estrutura de saída de água, F_2 . O procedimento de cálculo foi o seguinte:

Determinação de H_1 , H_2 e H , assim como das pressões p_1 , para o pilar e, p para o nível de saída do vertedouro.

$$H=(236,7-210,0)m=26,7m, H_1=(236,7-222,4)m=14,3m \text{ e } H_2=H-H_1=12,4m.$$

$$p_1 = H_1 * \gamma_w = 140,24 \text{ kN/cm}^2,$$

$$p = H * \gamma_w = 261,85 \text{ kN/cm}^2$$

de onde, $F_1 = H_1 * 0,5 * \gamma_w = 1002,72 \text{ kN/m} * (5/20) = 250,68 \text{ kN/m}$ ou $F_1 = 25068 \text{ kgf/m}$,

$F_2 = (p_1 + p) * 0,5 * H_2 = 2492,94 \text{ kN/m}$ ou $F_2 = 249294 \text{ kgf/m}$.

Os níveis de aplicação foram: para F_1 , 227,2m e para F_2 , 215,6m.

De forma similar ao cálculo para o vertedouro, as forças a jusante da casa de força foram calculadas segundo o esquema da figura 3.9.

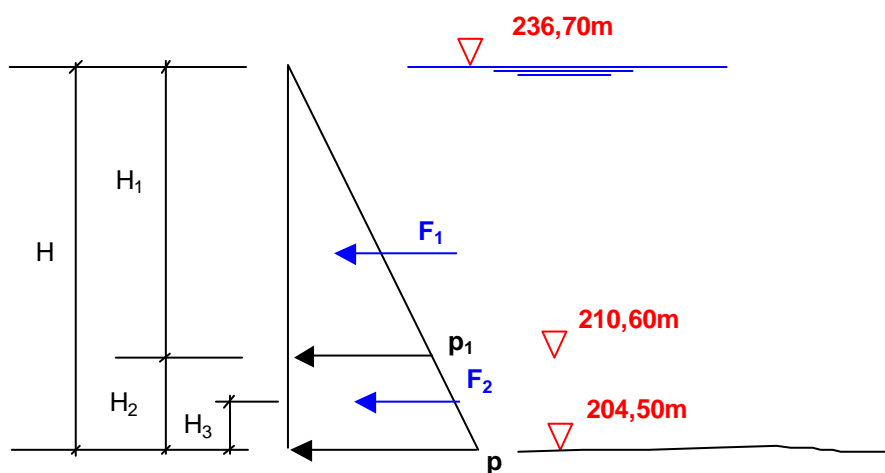


Figura 3.9 Esquema de cálculo das forças a jusante da casa de força.

As forças equivalentes a considerar a jusante, F_1 para os muros laterais e F_2 para a saída das turbinas, foram determinadas da mesma forma que para o vertedouro, obtendo-se os seguintes valores:

$$F_1 = 75426 \text{ kgf/m},$$

$$F_2 = 174383 \text{ kgf/m e},$$

Nível de aplicação de F_1 , 219,3m,

Nível de aplicação de F_2 , 207,4m.

Foram calculadas, também, as forças pontuais e as pressões de água na superfície da fundação a montante para o vertedouro e para a casa de força. Os valores são apresentados na tabela 5 e 6 respectivamente.

Na casa de força também foram calculadas as forças pontuais em função da pressão de água no conduto, na zona de entrada da tomada e na zona de saída do

conduto. A figura 3.10 apresenta o esquema de aplicação das forças consideradas para a análise.

Tabela 5. Pressões a montante e a jusante, e cargas pontuais no vertedouro.

Carga	Níveis de carga					
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Nível 6
Pressão, kgf/cm²						
Na fundação a montante	2,35	2,55	2,84	3,14	3,43	3,82
Na fundação a jusante	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
Força Pontual, kgf						
Na crista do vertedouro	31753	40947	54032	66859	79701	96810
No pé do vertedouro	94080	103788	118352	132915	147479	166897
Água no vertedouro (nível constante. 236,7m)	114735					
	287024					
	282280					
	39299					

Tabela 6. Pressões de água a montante e a jusante da casa de força.

Carga	Níveis de carga					
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Nível 6
Pressão, kgf/cm²						
A montante	1,67	1,86	2,16	2,45	2,75	3,14
A jusante	2,56					

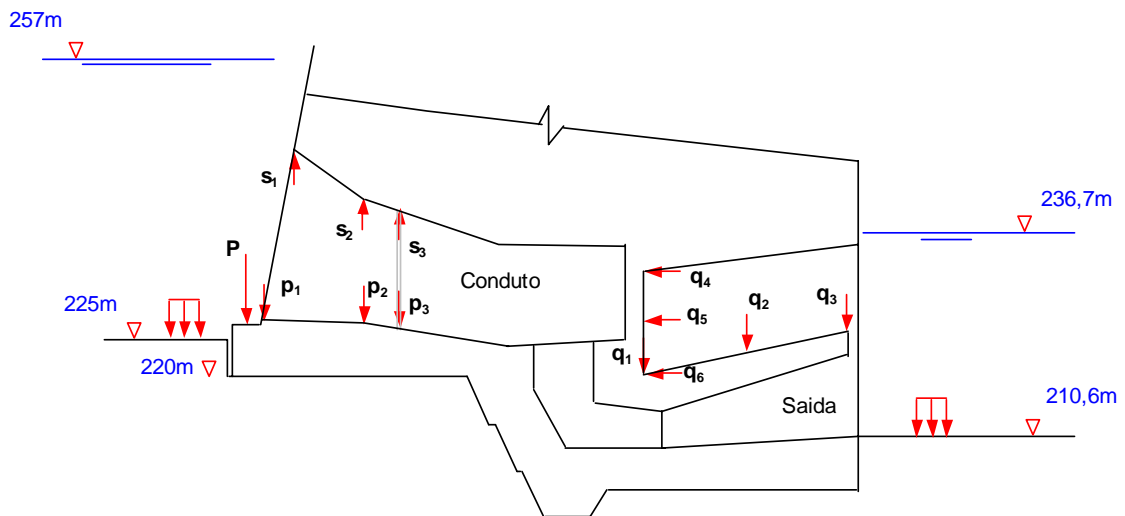


Figura 3.10 Esquema de aplicação da carga na entrada do conduto e na zona de saída.

Ao ter sido considerada uma fenda na zona de contato concreto-rocha a montante, calcularam-se as forças equivalentes à pressão que exerceria a carga hidráulica na zona para simplificar o ingresso de dados. Para o vertedouro, escolheram-se três níveis de aplicação das forças, as quais se apresentam na figura 3.11.

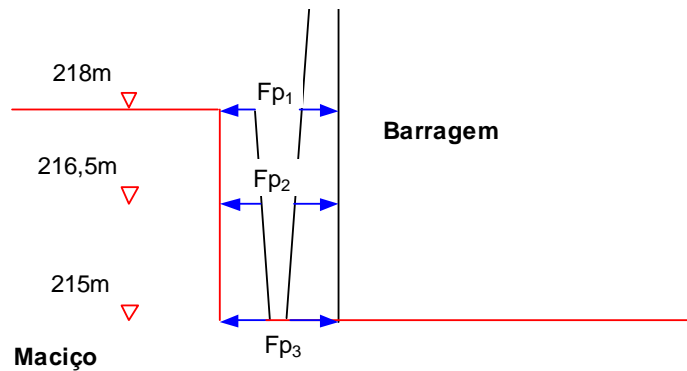


Figura 3.11 Esquema para o cálculo das forças equivalentes na fenda do vertedouro.

Para o caso da casa de força, foram considerados vários pontos de aplicação das forças na fenda do contato entre o maciço de fundação e o pé de montante da estrutura. A figura 3.12 mostra o esquema da aplicação das forças.

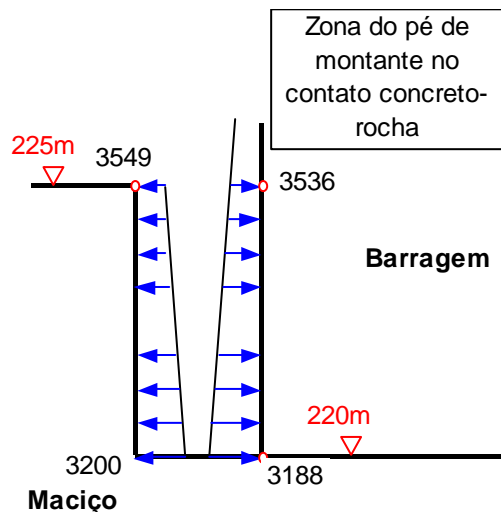


Figura 3.12 Esquema para o cálculo das forças nodais na fenda.

3.1.2 Subpressão e Pressão Média

Ao definir a subpressão na base da estrutura, considerou-se o critério de Andrade (1988) assumindo-se a pressão a montante igual à carga hidráulica atuante a montante, enquanto que a pressão a jusante foi considerada igual à carga hidráulica atuante a jusante. Já na zona da boca do dreno, chamada de pressão média, S_d foi determinada a partir do critério proposto por Andrade (1980), onde se considera uma pressão média na linha dos drenos, como descrito na referência bibliográfica exposta anteriormente. Essa pressão média foi calculada tanto para o vertedouro como para a casa de força, tomando-se os seguintes dados:

Carga hidráulica a montante, $H_m=27m$,

Carga hidráulica a jusante, $H_j=26,7\text{m}$,

Comprimento da base da estrutura, $B=81,94\text{m}$

Comprimento da base a montante do dreno, $s=12,5\text{m}$

Comprimento da base depois do dreno, $b=B-s=69,44\text{m}$

Distância entre drenos, $a_d=3\text{m}$

Raio do dreno, $r_d=0,038\text{m}$

Nível da boca do dreno, $H_d=7,5\text{m}$.

Segundo Andrade (1980), para o caso da posição da boca do dreno abaixo do nível de água de jusante, consideram-se as seguintes equações:

$$\overline{CD} = \Delta H_w = -(H_j - H_d) \quad (41)$$

e consideraram-se, também, as eq. (18) e eq. (19). No caso correspondente ao primeiro nível de carga hidráulica, obteve-se:

$$\Delta H_w = -(26,7 - 7,5) = -19,2\text{m}.$$

Usando as eq. (27) e eq. (26):

$$\lambda = \frac{2 * \pi}{3 * \ln\left(\frac{3}{2 * \pi * 0,038}\right)} = 0,828\text{m}^{-1}$$

$$S_d = \frac{69,44 * 12,5 * 0,828 * (-19,2) + 69,44 * 27 + 12,5 * 26,7}{12,5 * 69,44 * 0,828 + 69,44 + 12,5} = -14,474\text{m}$$

O resultado de S_d mostra o sentido do fluxo de jusante a montante. Do mesmo modo, foram calculados todos os valores da pressão média para cada um dos níveis de carregamento hidráulico.

No caso da casa de força, os dados considerados no cálculo foram os seguintes:

Carga hidráulica a montante, $H_m=22,0\text{m}$,

Carga hidráulica a jusante, $H_j=32,2\text{m}$,

Comprimento da base da estrutura, $B=83,73\text{m}$

Comprimento da base a montante do dreno, $s=9,04\text{m}$

Comprimento da base a jusante do dreno, $b=B-s=74,69\text{m}$

Distância entre drenos, $a_d=3\text{m}$

Raio do dreno, $r_d=0,038\text{m}$

Nível da boca do dreno, $H_d=18\text{m}$

Calculando-se, $\Delta H_w = -(32,2-18) = -14,2\text{m}$, e logo por meio da eq. (27), calculou-se λ ,

$$\lambda = \frac{2 * \pi}{3 * \ln\left(\frac{3}{2 * \pi * 0,038}\right)} = 0,828\text{m}^{-1},$$

e seguidamente S_d pela eq. (26),

$$S_d = \frac{74,69 * 9,04 * 0,828 * (-14,2) + 74,69 * 22 + 9,04 * 32,2}{9,04 * 74,69 * 0,828 + 74,69 + 9,04} = -9,339\text{m}$$

3.1.3 Condutividade hidráulica do dreno

Para efeito da análise de fluxo, calculou-se a condutividade hidráulica a adotar-se no dreno da fundação tanto do vertedouro como da casa de força. Os dados considerados foram: a condutividade hidráulica do maciço na direção x , k_x , a carga hidráulica a montante H_m , a jusante H_j e a carga média (S_d) na boca do dreno. Também fizeram parte dos dados: a profundidade do dreno, $H_{dr}=20\text{m}$ (dado do projeto), a distância entre drenos, $a_d=3\text{m}$ (dado do projeto), o comprimento desde a face de montante ao dreno s (dado do projeto), e o comprimento do dreno a jusante b (também dado do projeto).

Para o vertedouro, tomaram-se os dados de H_m , H_j e S_d . O valor de $k_x=1\text{e-}05\text{m/s}$ para o maciço foi tomado da tabela 4 e os valores de s e b como antes apresentados. A partir dessa informação, calculou-se o gradiente para o primeiro nível de carregamento com a eq.(42).

$$i = \left(\frac{H_m - S_d}{s} - \frac{S_d - H_j}{b} \right) \quad (42)$$

$$i = \left(\frac{242 - 222,23}{12,5} - \frac{222,23 - 236,7}{69,44} \right) = 1,79$$

Assumiu-se que a quantidade de vazão que passa pela área de influência do dreno seja aquele que saia pelo dreno para o qual calculou-se a vazão da área de influência, ou seja, na área de 3m , que é a distância entre drenos e a profundidade do dreno, $H_{dr}=20\text{m}$.

$$A = H_{dr} \cdot a_d = 20 \cdot 3 = 60 \text{m}^2$$

Pela equação de Darcy, eq. (43):

$$Q = k_x \cdot i \cdot A \quad (43)$$

$$Q = 1,074e - 03 \text{m}^3 / \text{seg}$$

Seguidamente, assumiu-se um comprimento da circunferência do dreno na análise de $L=0,3\text{m}$, e calculou-se a superfície da circunferência do dreno:

$$A_d = L \cdot H_{dr} = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{m}^2, \text{ que vazará } Q_d.$$

Para que o dreno consiga conduzir a água que passaria na área de influência do dreno, precisa-se que $Q = Q_d$; em razão desta igualdade, calculou-se a condutividade hidráulica do dreno, k_d , a qual foi realizada da seguinte forma:

$$Q_d = k_d \cdot i \cdot A_d \quad (44)$$

e,

$$k_d = \frac{Q_d}{i \cdot A_d} \quad (45)$$

Considerando-se a igualdade de $Q = Q_d$, determinou-se k_d :

$$k_d = \frac{1,074e - 03}{1,79 \cdot 6} = 1e - 04 \text{m} / \text{seg}$$

Assim foi calculado o valor k_d para todos os níveis de carga, dando como resultado valores muito próximos de $1e-04\text{m}/\text{seg}$, tomando-se esse valor constante.

De igual modo, foi calculado para o dreno da casa de força. Mas, embora esta seja outra estrutura, os valores de k_d foram similares. Na continuação, apresenta-se o cálculo realizado de k_d para o nível máximo 257m.

$$i = \left(\frac{257 - 229,11}{9,04} - \frac{229,11 - 236,7}{74,69} \right) = 3,187$$

$$Q = 1,9122e - 03 \text{m}^3 / \text{seg}$$

$$k_d = \frac{1,9122e - 03}{3,187 \cdot 6} = 1e - 04 \text{m} / \text{seg}$$

3.1.4 Cálculo da condutividade hidráulica na fratura

Como resultado da abertura da fratura e do avanço da mesma devido à pressão

hidráulica, considerou-se uma condutividade dependendo da dimensão da abertura. A análise tensão-deformação, que se apresenta mais adiante tem como resultado de saída a abertura dos elementos da malha de análise. Segundo o modelo matemático, o cálculo da abertura dos elementos foi realizado com os deslocamentos dos nós. Assim, no presente trabalho, calcularam-se os valores da condutividade hidráulica para cada elemento danificado na zona de fratura tanto do vertedouro como da casa de força.

Para efeitos de cálculo da condutividade hidráulica da fratura, por ser tão pequena, aplicou-se o critério da lei cúbica. Na continuação, apresentam-se os dados principais de cálculo.

A condutividade do maciço, $k_x=1,0e-03$ cm/s, $k_y=1,0e-05$ cm/s, $k_{xy}=1,0e-03$ cm/s

Gravidade, $g=981$ cm/s²,

Viscosidade cinemática da água (20°), $\nu=0,01$ cm²/s,

A abertura, e , foi dada pelos dados de saída do modelo analisado.

Como os valores da condutividade da abertura da fratura foram pequenos, considerou-se incluí-los no elemento danificado e calcular a condutividade ponderada para cada um deles, dependendo da largura de cada elemento danificado. Assim, foi assumido que,

$$Q_t = Q_f + Q_m \quad (46)$$

Onde, Q_t , é a vazão do elemento;

Q_f , a vazão que passa pela abertura;

Q_m , a vazão que passa pela zona sem abertura.

Em conseqüência, com o uso da eq. (46) e a eq. (32) da lei cúbica, foi deduzida a eq. (47).

$$k_t = \frac{k_f e + k_{xy} (l_e - e)}{l_e} \quad (47)$$

onde k_t é a condutividade total ou ponderada do elemento danificado no sentido vertical, l_e a largura do elemento danificado, k_f a condutividade da abertura que foi calculada com a eq. (32) e k_{xy} a condutividade da parte do elemento sem fratura. Salienta-se que, k_{xy} , foi calculada como a média geométrica dos valores da condutividade de um

elemento sem fratura, assumindo-se que esta zona estaria já afetada. No processo de análise de fluxo e subpressão, as condutividades utilizadas para o elemento danificado foram k_t no sentido vertical e k_x no sentido horizontal, considerando-se, em conseqüência, os elementos danificados anisotrópicos. O mesmo procedimento de cálculo foi seguido tanto para o vertedouro como para a casa de força.

O cálculo das forças equivalentes da pressão hidráulica exercida pela água na fratura foi realizado em função do dano que experimentou cada elemento atravessado pela fratura. No capítulo dos modelos, será relatado o procedimento de cálculo daquelas forças.

3.2 MODELOS DE ANÁLISE

Todas as estruturas hidráulicas de barragens estão sujeitas a forças de empuxo de água, as quais exercem pressão no paramento a montante da estrutura, originando esforços de tração tanto na estrutura como na fundação do pé da estrutura. Estes esforços de tração podem ser aumentados pelos acréscimos de água ou pela ação dinâmica da mesma.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração quanto à zona de fundação é a ação do peso próprio que produz esforços de cisalhamento na zona de contato rocha-paramento de montante, o que levará ao fraturamento devido à ação combinada de esforços que originam a propagação de fraturas dos tipos I e II. Pedroso *et al.* (1996) realizaram uma análise numérica de uma barragem concluindo na existência desta condição de cisalhamento na zona de fundação.

Em face da variação progressiva da carga hidrostática e do efeito que esta tem nas primeiras fraturas formadas na zona de fundação no pé de montante, propôs-se a análise iterativa tensão-deformação e pressão de água na fratura, juntamente a uma análise de fluxo e subpressão. Para este fim, propôs-se um modelo para tensão-deformação e um segundo para o cálculo do efeito da subpressão na base da estrutura.

3.2.1 Modelo Tensão-Deformação e Pressão de água

O modelo de análise proposto baseia-se nos seguintes princípios:

1. Análise bidimensional não linear;
2. Mecânica do Dano;
3. Deformação plana;

4. Forças de superfície nas paredes da fratura;
5. Meio saturado;
6. Lei constitutiva baseada na degradação do material pela solicitação de esforços de tração.

Na elaboração do modelo, preparou-se uma malha da estrutura e da fundação com a ajuda do programa GID (Interactive Graphical User Interface, 1999) que trabalha com elementos finitos. Este programa permite a definição, preparação e visualização da geometria, dos materiais e das condições de carga e de contorno do modelo, considerando as características dos materiais. Permite também a visualização dos resultados da simulação numérica após o processamento do programa Omega (Organized Module for Engineering General Analysis, 1996).

No modelo, fez-se uso de elementos finitos triangulares com interpolação linear dos deslocamentos. Realizou-se o arranjo da malha considerando uma profundidade de duas vezes a altura da estrutura, o comprimento da lateral a montante de uma vez e meia (1,5) da altura, sendo que a lateral a jusante é igual a uma altura e a base da estrutura corresponde a 1,8 da altura. A figura 3.13 mostra a malha antes da análise. Salienta-se que, a montante, não existe contato (chamada fenda) entre o concreto da estrutura e o maciço até a base da estrutura como se mostra na figura 3.13, no extremo superior direito. Ressalta-se também que na malha foram considerados como nós os pontos de localização das hastes dos extensômetros existentes nos blocos tanto do vertedouro como da casa de força. A figura 3.14 apresenta a malha para a casa de força.

O Modelo Tensão-Deformação é processado com ajuda do programa Omega adaptado por Manzoli (1998) para realizar a análise não linear da fratura sob o Modelo de propagação da Fratura. O processo de cálculo tensão-deformação inicia-se com o ingresso de todas as características geomecânicas da fundação, as características elásticas do material da estrutura, a densidade da estrutura e do maciço, a carga hidráulica a montante e a jusante, assim como também a subpressão no estado sem fratura. A primeira carga hidráulica a ser aplicada corresponde ao nível 242m, a qual origina esforços de tração na rocha, no pé de montante, produzindo uma fenda a qual por sua vez suportará esforços de tração até que tais esforços atinjam a resistência a tração da rocha, produzindo-se o dano no material e, conseqüentemente, a propagação da fratura. A figura 3.15 mostra o processo de fraturamento sob pressão hidráulica.

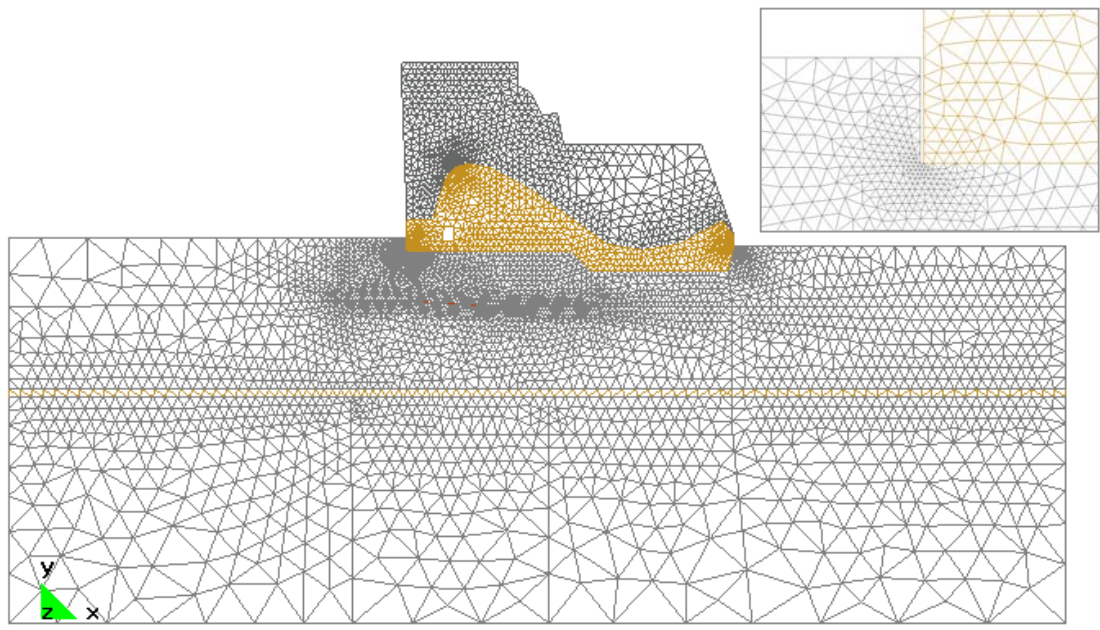


Figura 3.13 Malha de análise do vertedouro (Programa GID).

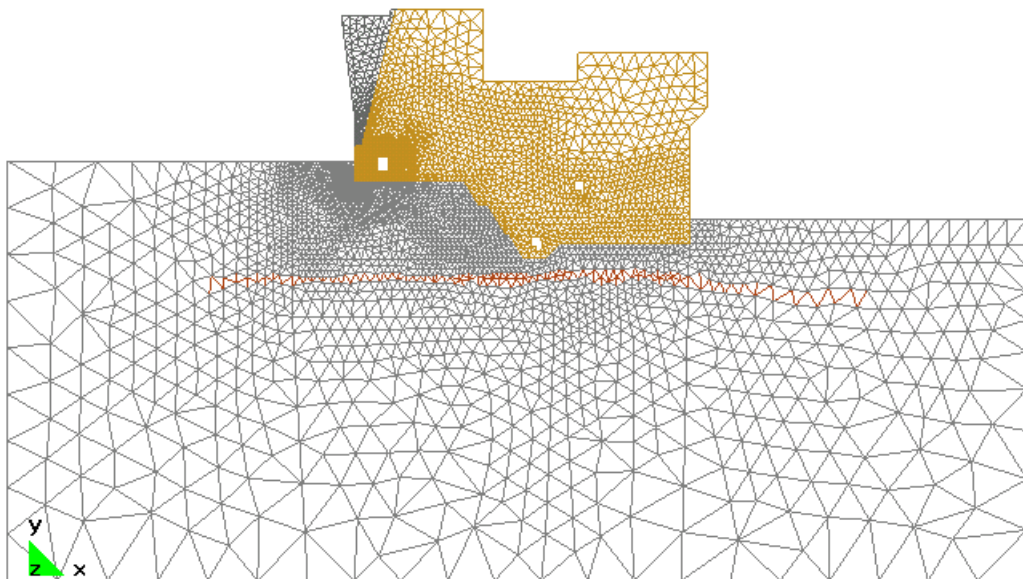


Figura 3.14 Malha de análise da casa de força.

A zona de fratura na malha está representada pelos elementos danificados que o programa fornece como resultado da aplicação das forças do peso próprio, da carga de água e da subpressão. Após o aparecimento da primeira fratura sob o nível 242m, os elementos danificados são considerados na análise do Modelo de fluxo para a determinação da subpressão influenciada pela presença da fratura. O processo de carregamento hidráulico se deu com incrementos do nível de 2m para o segundo nível, 3m para os níveis terceiro, quarto e quinto, e 4m para o nível máximo de trabalho (257m).

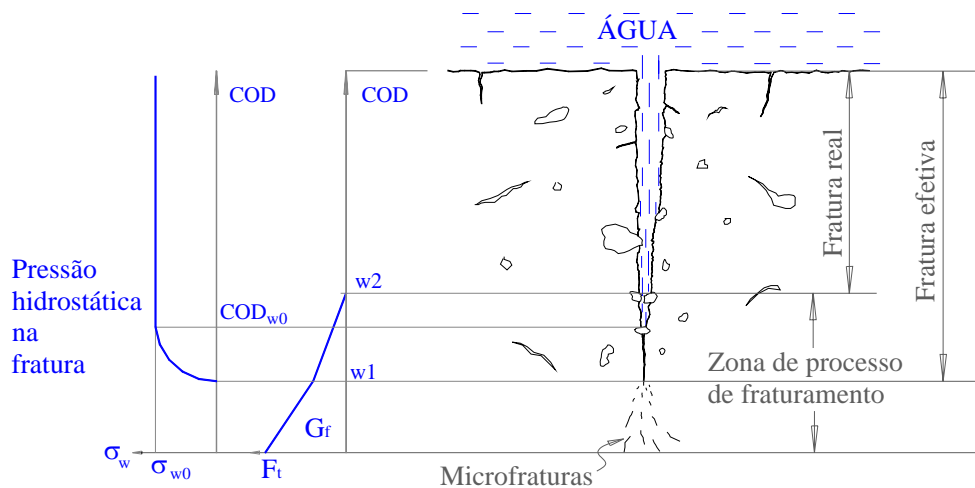


Figura 3.15 Pressão de água na fratura (Reich *et al.*, 1994).

Uma vez obtidos os novos valores de subpressão com a presença da primeira fratura, realizou-se o segundo processamento do Modelo tensão-deformação onde foi considerado o efeito da pressão hidráulica na primeira fratura originada pela pressão do primeiro nível (242m); neste caso, a pressão foi transformada em forças nodais que, conjuntamente com as forças de subpressão, foram aplicadas como forças nodais nos elementos danificados pela primeira carga hidráulica. Após o segundo processamento, a fratura teve um novo avanço. Seguidamente, foi incrementada a carga hidráulica para o nível de água 244m, exercendo-se uma pressão maior no paramento, na fundação e na fratura aberta, produzindo-se um segundo avanço da fratura em profundidade. Aplicou-se, logo, a pressão correspondente ao atual nível de água na nova fratura. Assim, repetiu-se o processo de carregamento progressivo da carga hidráulica para os níveis 247m, 250m, 253m e 257m. A pressão de água atuante na superfície da fratura foi considerada constante a partir da superfície de montante.

Nota-se que as forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura foram calculadas considerando a direção da fratura e o grau do dano por cada elemento, sendo aplicadas perpendicular à face da fratura. Os cálculos foram feitos para todos os níveis de carga hidráulica. A figura 3.16 mostra o eixo da fratura nos elementos afetados.

Os cálculos dos valores das forças nodais consideradas no avanço da fratura foram identificados como PPv30pC para o vertedouro e PPcf12p para a casa de força, sendo apresentados nas tabelas A-10 a A-15 do anexo A para o vertedouro e nas tabelas A-16 a A-21 para a casa de força.

Um esquema da aplicação das forças nodais perpendiculares ao eixo da fratura se apresenta na figura 3.17.

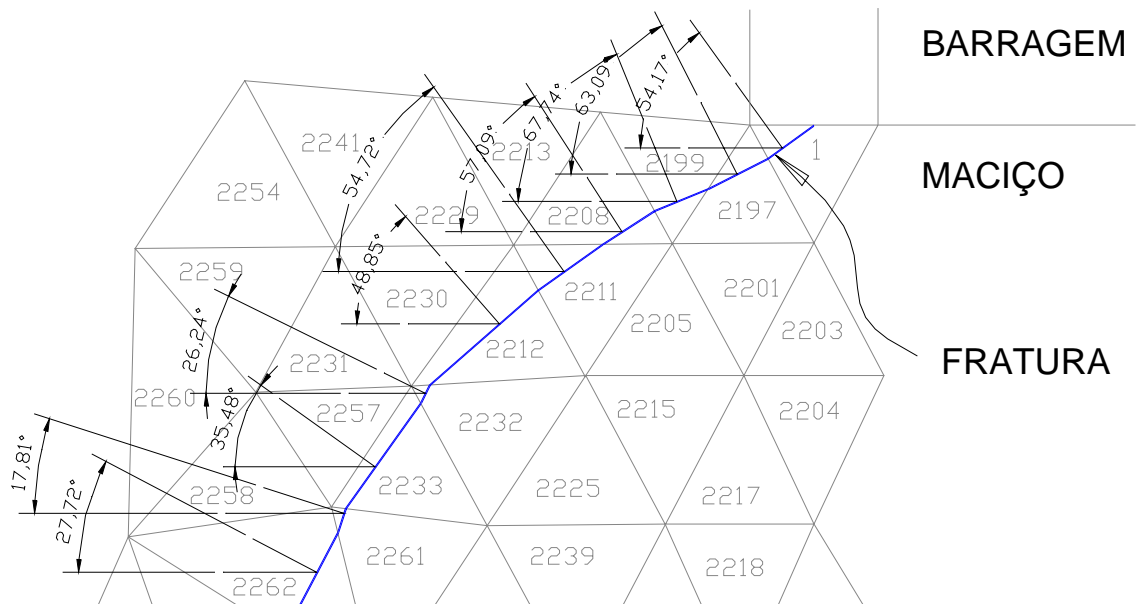


Figura 3.16 Orientação da fratura e ângulos de inclinação das forças.

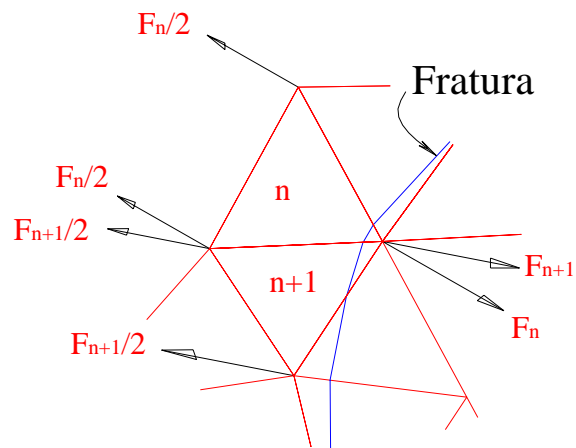


Figura 3.17 Esquema da aplicação das forças nodais nos elementos danificados.

3.2.2 Modelo de Análise de fluxo e subpressão

O modelo de análise da subpressão considerou as características anisotrópicas do maciço da fundação tanto do vertedouro como da casa de força, tomando-se os valores da condutividade hidráulica do maciço apresentados na tabela 4. Para a análise, preparou-se uma malha de elementos finitos considerando uma extensão a montante correspondente ao dobro da altura da estrutura, uma profundidade correspondente ao dobro da altura e, a jusante, uma extensão que corresponde a um e meio (1,5) da altura. Realizou-se o processamento do modelo de análise da subpressão com ajuda do

programa SEEP/W (GEO-SLOPE).

Para representar a zona do pé de montante no contato concreto-macizo onde ocorre a fratura, acrescentou-se a quantidade de elementos de dimensões bem menores do que o resto do maciço, repetindo-se os elementos da malha da simulação de tensão-deformação. Nos elementos desta zona danificada, adotaram-se os valores da condutividade hidráulica calculados para cada elemento danificado como foi explicado no item 3.1.4 e são apresentados no anexo B. A figura 3.18 mostra o modelo de análise para subpressão no nível 257m do vertedouro e a figura 3.19 mostra a zona de fratura onde as cores dos elementos indicam a diferença de condutividade entre os elementos.

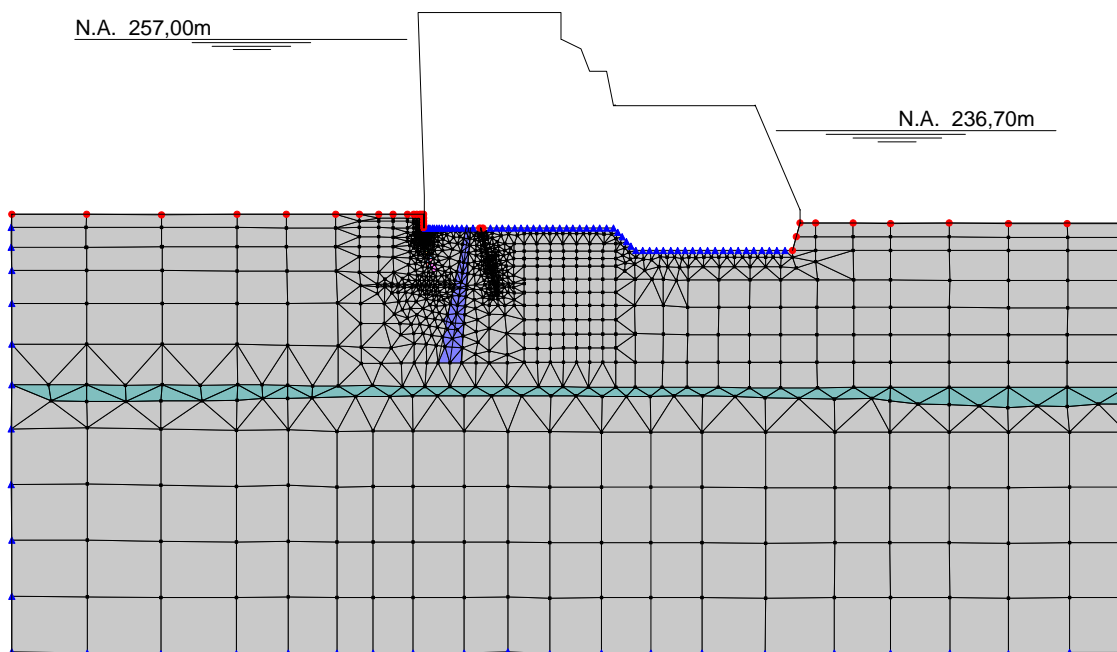


Figura 3.18 Modelo de análise para calcular as forças equivalentes da subpressão no vertedouro (Programa SEEP/W).

Depois de obtida a primeira fratura, esta é considerada no cálculo da subpressão afetada, agora, pela presença das fraturas. A nova subpressão foi transformada em forças nodais equivalentes, as quais foram aplicadas na base da estrutura de análise tensão-deformação para ser processada novamente e dar o seguinte avanço da fratura. O cálculo da variação da subpressão para cada nível de carregamento hidráulico é apresentado no anexo B.

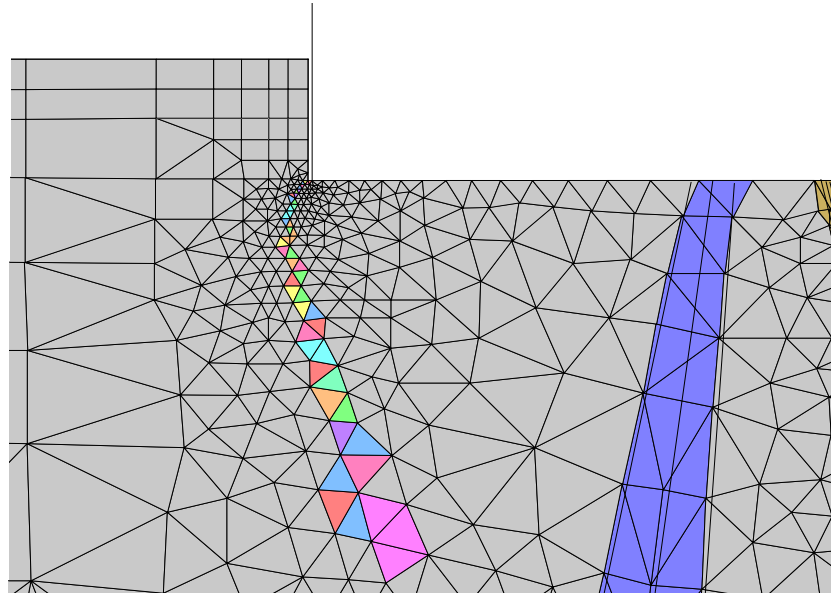


Figura 3.19 Discretização da zona de fratura para o cálculo da subpressão.

Na figura 3.20, mostra-se a malha para o modelo de análise da subpressão da casa de força e na figura 3.21, a zona de discretização da fratura no modelo.

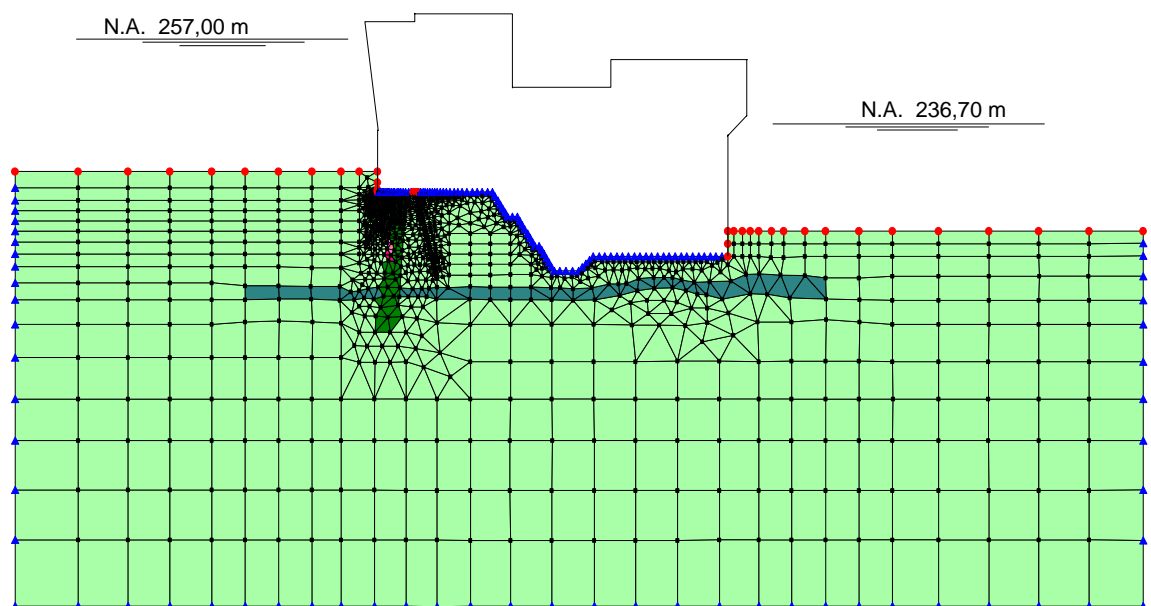


Figura 3.20 Modelo de análise para calcular as forças equivalentes da subpressão na casa de força.

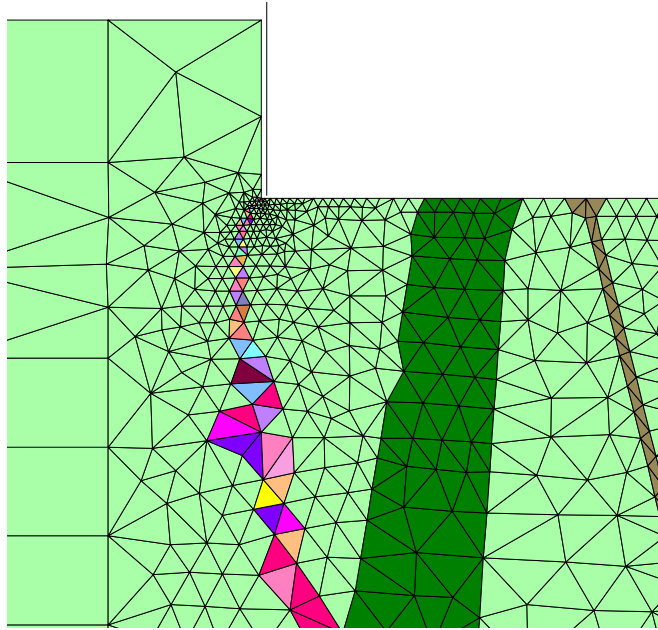


Figura 3.21 Discretização da zona de fratura para o cálculo da subpressão.

4. RESULTADOS

Para cada nível de água e após a aplicação do carregamento na fratura, obteve-se o avanço da mesma, indicado pelo dano sofrido pelos elementos da malha de análise, tanto para o vertedouro como para a casa de força. As figuras 4.1 a 4.6 mostram o desenvolvimento da fratura no maciço mediante os elementos danificados em função do parâmetro do dano (D), parâmetro cujo valor é representado pela intensidade de cores.

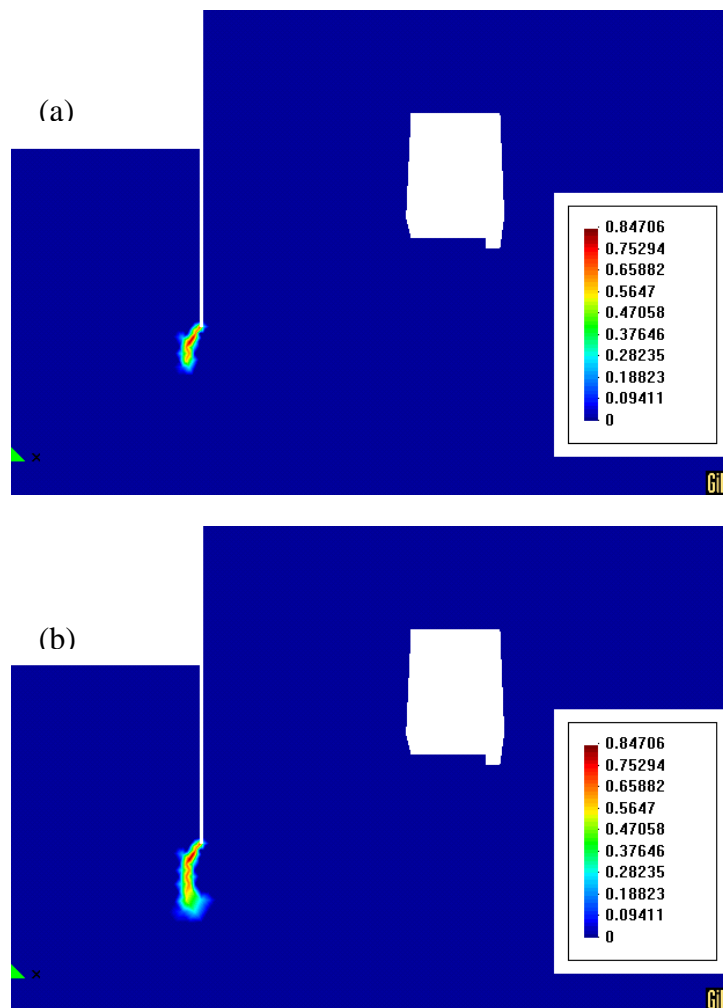


Figura 4.1 Desenvolvimento da fratura na fundação da casa de força: (a) sob carga do nível 242m e (b) sob a aplicação da carga do mesmo nível na fratura.

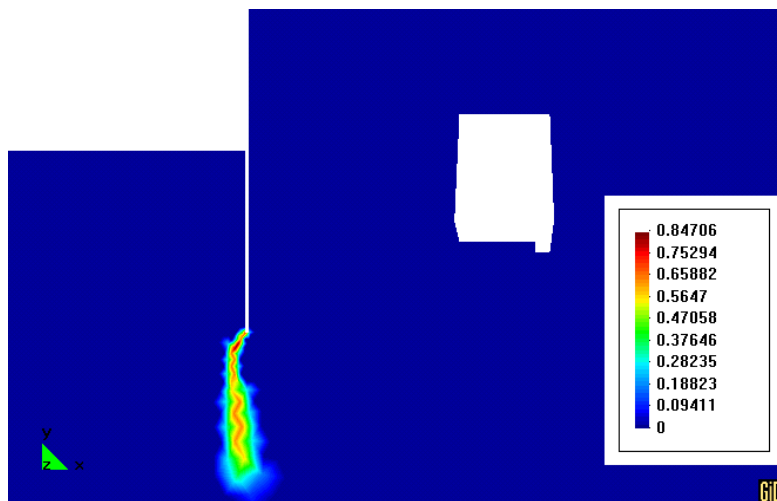


Figura 4.2 Avanço da fratura sob carga do nível de água 244m.

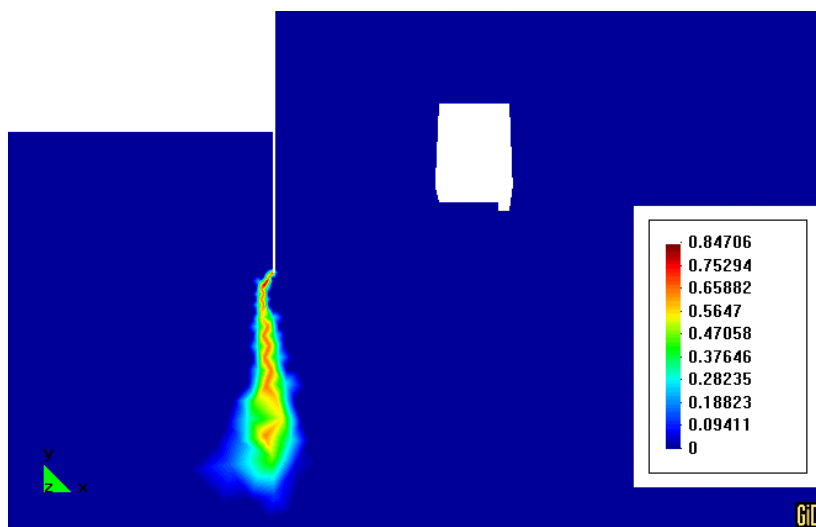


Figura 4.3 Avanço da fratura sob carga do nível de água 247m.

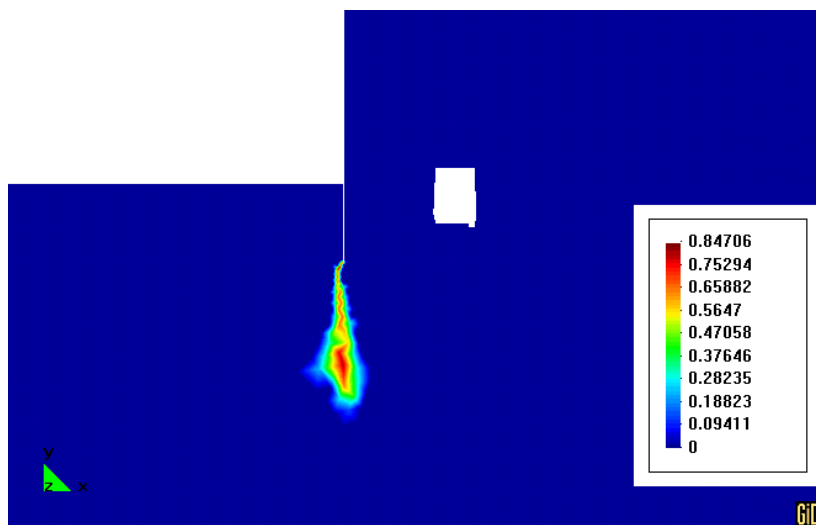


Figura 4.4 Avanço da fratura sob carga do nível de água 250m.

A partir dos resultados do processamento de cada nível de água, foram tomados os deslocamentos dos nós selecionados para as hastes dos extensômetros e para os pontos de controle na galeria de drenagem. Estes deslocamentos permitem determinar as deformações que se produzem no maciço.

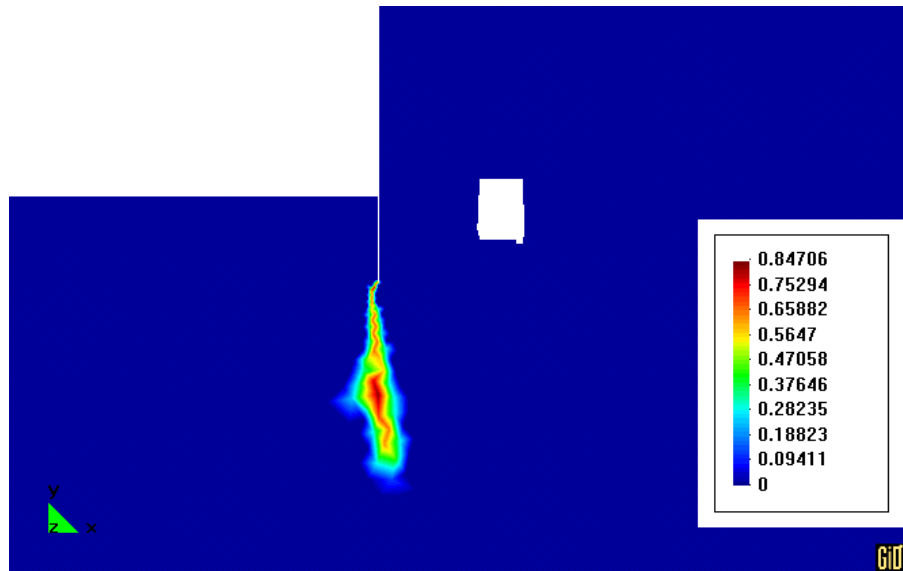


Figura 4.5 Avanço da fratura sob carga do nível de água 253m.

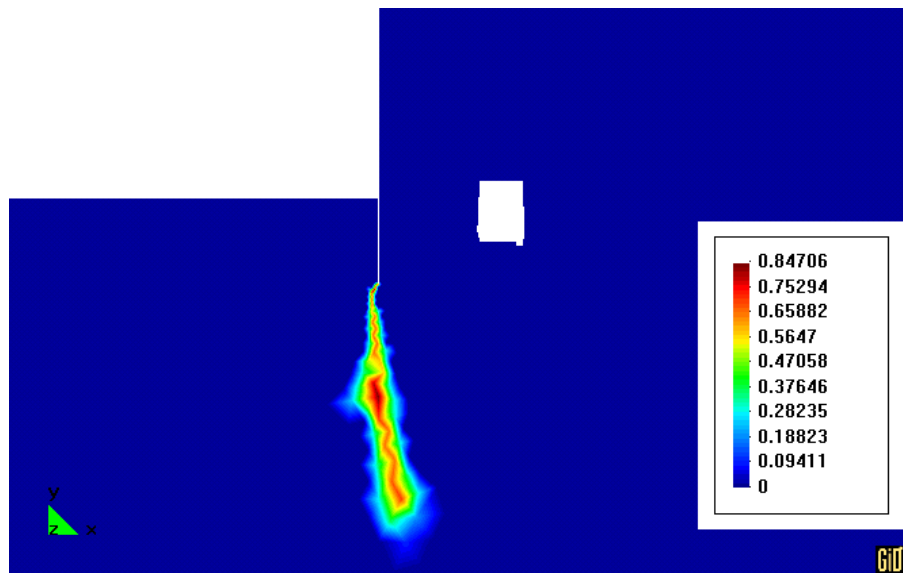


Figura 4.6 Avanço da fratura sob carga do nível de água 257m.

O procedimento seguido para o cálculo dos deslocamentos das hastes foi, inicialmente, o de relacionar a posição inicial dos nós (extensômetros) com os pontos de controle, obtendo-se os comprimentos iniciais. Em seguida, após a aplicação do carregamento de cada nível, foram relacionadas as posições dos nós deslocados com os pontos de controle, também deslocados, o que forneceu a variação da distância entre as

hastes e os pontos de controle. A diminuição ou o aumento das distâncias entre os pontos das hastes permitiu considerá-las como os deslocamentos sofridos pelo maciço. Esses deslocamentos calculados para o vertedouro foram comparados com os registros dos extensômetros EH-261 e EH-262 existentes no vertedouro, e os deslocamentos calculados para a casa de força foram comparados com as leituras dos extensômetros EH-566, EH-567 e EH-568. As tabelas 7 e 8 apresentam os deslocamentos calculados para o vertedouro, enquanto que as tabelas 9 e 11 apresentam os deslocamentos calculados para a casa de força.

Tabela 7. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-261 no vertedouro.

Nível	Comprimento Hastes			Deslocamento, mm		
	L1, cm	L2, cm	L3, cm	Haste 1	Haste 2	Haste 3
(inicial)	4729,64	2840,423	875,4473			
242	4729,484	2840,349	875,4302	-1,56	-0,73	-0,17
244	4729,486	2840,351	875,4307	-1,54	-0,72	-0,17
247	4729,489	2840,353	875,4314	-1,51	-0,69	-0,16
250	4729,493	2840,357	875,4323	-1,47	-0,66	-0,15
253	4729,498	2840,36	875,4333	-1,42	-0,62	-0,14
257	4729,508	2840,369	875,4364	-1,32	-0,54	-0,11

Tabela 8. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-262 no vertedouro.

Nível	Comprimento Hastes			Deslocamento, mm		
	L1, cm	L2, cm	L3, cm	Haste 1	Haste 2	Haste 3
(inicial)	4843,9766	2902,6879	668,42875			
242	4843,8108	2902,6104	668,4164	-1,66	-0,78	-0,12
244	4843,8096	2902,6096	668,4162	-1,67	-0,78	-0,13
247	4843,808	2902,6086	668,41594	-1,69	-0,79	-0,13
250	4843,8066	2902,6077	668,41573	-1,70	-0,80	-0,13
253	4843,8053	2902,607	668,41559	-1,71	-0,81	-0,13
257	4843,804	2902,6062	668,41537	-1,73	-0,82	-0,13

Tabela 9. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-566 na casa de força.

Nível	Comprimento Hastes			Deslocamento, mm		
	L1, cm	L2, cm	L3, cm	Haste 1	Haste 2	Haste 3
(inicial)	4260,369	2606,722	1037,428			
242	4260,271	2606,672	1037,408	-0,98	-0,50	-0,20
244	4260,276	2606,677	1037,410	-0,92	-0,45	-0,17
247	4260,285	2606,685	1037,411	-0,84	-0,38	-0,17
250	4260,295	2606,694	1037,411	-0,74	-0,28	-0,16
253	4260,309	2606,707	1037,412	-0,59	-0,15	-0,15
257	4260,332	2606,730	1037,414	-0,36	0,08	-0,14

Tabela 10. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-567 na casa de força.

Nível	Comprimento Hastes			Deslocamento, mm		
	L1, cm	L2, cm	L3, cm	Haste 1	Haste 2	Haste 3
(inicial)	4255,773	2607,959	1037,677			
242	4255,664	2607,900	1037,654	-1,09	-0,58	-0,22
244	4255,661	2607,898	1037,653	-1,12	-0,60	-0,23
247	4255,658	2607,896	1037,653	-1,15	-0,63	-0,24
250	4255,656	2607,894	1037,652	-1,17	-0,64	-0,25
253	4255,654	2607,893	1037,652	-1,19	-0,66	-0,25
257	4255,653	2607,891	1037,653	-1,21	-0,67	-0,24

Tabela 11. Deslocamentos das hastes do extensômetro EH-568 na casa de força.

Nível	Comprimento Hastes		Deslocamento, mm	
	L1, cm	L2, cm	Haste 1	Haste 2
(inicial)	1991,085	526,100		
242	1991,026	526,081	-0,592	-0,192
244	1991,026	526,081	-0,592	-0,192
247	1991,026	526,081	-0,592	-0,191
250	1991,026	526,081	-0,593	-0,191
253	1991,026	526,081	-0,593	-0,190
257	1991,026	526,081	-0,594	-0,188

Outro parâmetro de interesse obtido foi a abertura da fratura desenvolvida na rocha sob cada nível de água. Esta abertura foi utilizada no cálculo de fluxo e da subpressão. A partir da análise de fluxo, realizou-se, também, o cálculo da vazão no dreno e comparou-se com os registros dos drenos existentes na fundação das seções selecionadas, o qual se apresenta no item 4.1.

4.1 Aferição dos resultados

Nos modelos matemáticos de análise de fraturas, adotam-se parâmetros e hipóteses que devem ser verificados com medições da instrumentação existente na fundação. Celestino (1983) propõe que, na aferição dos resultados de modelos com aqueles medidos pela instrumentação, deve-se procurar a correspondência das medições dos extensômetros com os deslocamentos calculados no modelo. A partir desta correspondência, pode-se retro-analisar o modelo e encontrar os parâmetros correspondentes às leituras feitas nas datas definidas para as mesmas condições.

Um ponto importante a se considerar na aferição dos dados é a variação do parâmetro de condutividade hidráulica do maciço, o qual se vê afetado pelas variações das tensões efetivas produzidas pelo carregamento da estrutura. Este problema foi inicialmente estudado por Johandar *et al.* (1971). Outro aspecto a ser considerado corresponde às condições de contorno do modelo que nem sempre corresponderão à situação real do problema.

No presente trabalho, na aferição dos resultados, consideraram-se os registros dos deslocamentos dos extensômetros de haste EH-261 e EH-262 do vertedouro, os quais estão localizados embaixo da galeria de montante como é mostrado na figura 4.7. Cada extensômetro possui três hastes numeradas ascendentemente (de baixo para acima). Já a informação dos piezômetros foi considerada para correlacionar os possíveis efeitos da presença do fraturamento. Os piezômetros desta seção do vertedouro foram identificados como PZ-261, PZ-262 e PZ-263 inclinados a montante, enquanto que PZ-264, PZ-265 e PZ-266 estão orientados a jusante. A tabela 12 apresenta a informação de localização da instrumentação supramencionada indicando a cota da base de cada aparelho.

Tabela 12. Cota de instalação dos extensômetros e dos piezômetros do vertedouro.

Instrumentação		Cota (m)
Extensômetro EH-261	Haste 1	176,54
	Haste 2	192,90
	Haste 3	209,92
Ponto de controle	261	218,09
Extensômetro EH-262	Haste 1	175,55
	Haste 2	192,36
	Haste 3	211,71
Ponto de controle	262	217,97
Piezômetros	PZ - 261	201,38
	PZ - 262	209,32
	PZ - 263	213,74
	PZ - 264	201,74
	PZ - 265	209,13
	PZ - 266	213,48

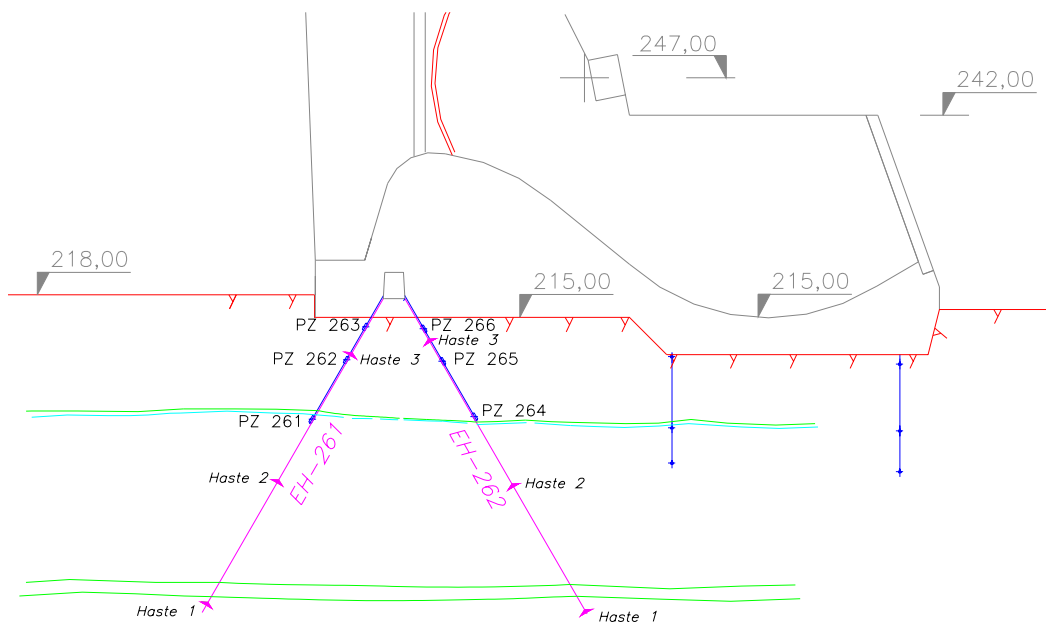


Figura 4.7 Extensômetros e Piezômetros existentes na seção de análise do vertedouro.

De igual modo, foram utilizados os registros dos extensômetros de haste EH-566, EH-567 e EH-568 para a casa de força. Os piezômetros desta seção foram identificados como PZ-566 e PZ-567 inclinados a montante, ao passo que, orientados a jusante, estão PZ-568 e PZ-569, na seção de análise. A figura 4.8 apresenta a localização da instrumentação e a tabela 13 as cotas da base de cada aparelho.

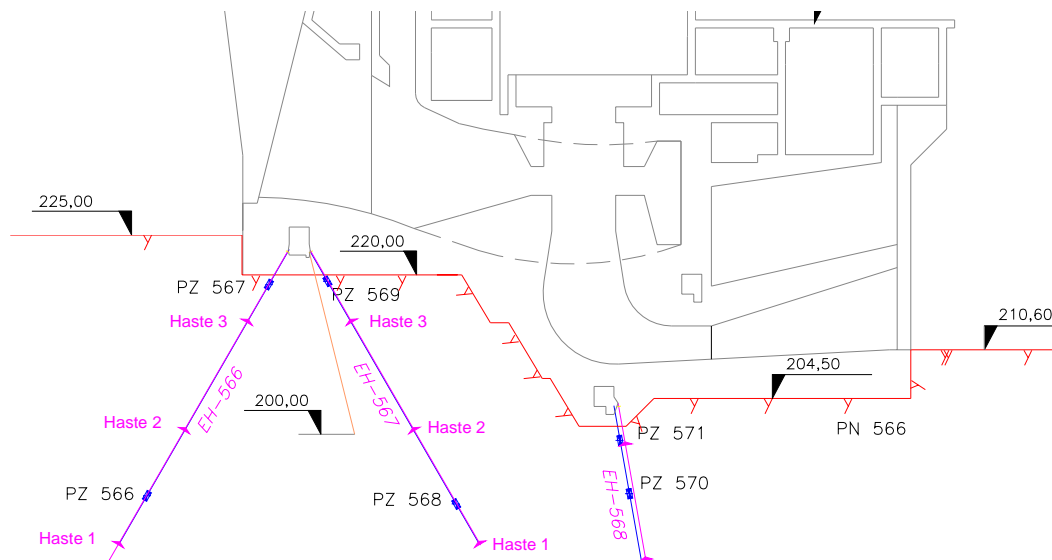


Figura 4.8 Extensômetros e Piezômetros existentes na seção de análise da casa de força.

Tabela 13. Cota de instalação dos extensômetros e dos piezômetros da casa de força.

Instrumentação		Cota (m)
Extensômetro EH-566	Haste 1	186,14
	Haste 2	200,46
	Haste 3	214,06
Ponto de controle	566	223,06
Extensômetro EH-567	Haste 1	186,20
	Haste 2	200,47
	Haste 3	214,07
Ponto de controle	567	223,09
Extensômetro EH-568	Haste 1	184,21
	Haste 2	198,66
Ponto de controle	568	203,91
Piezômetros	PZ - 566	192,28
	PZ - 567	218,79
	PZ - 568	191,25
	PZ - 569	219,20
	PZ - 570	192,55
	PZ - 571	199,24

Na aferição dos dados calculados com aqueles das leituras tanto do vertedouro como da casa de força, procurou-se achar a correspondência entre os deslocamentos calculados e os das leituras. Para esse fim, prepararam-se gráficos relacionando os valores obtidos para cada nível de carga e os valores das leituras para cada haste dos extensômetros. Na seqüência, as figuras 4.9 a 4.11 apresentam os deslocamentos para o extensômetro EH-261, e as figuras 4.12 a 4.14 apresentam os deslocamentos para o extensômetro EH-262.

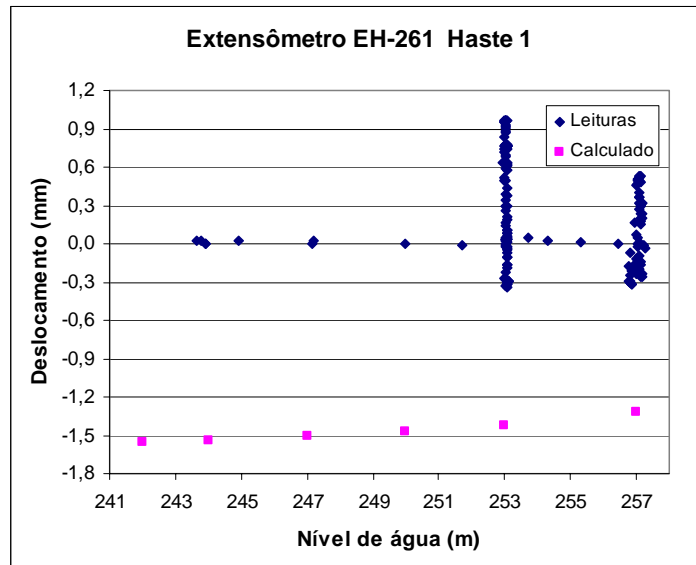


Figura 4.9 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-261.

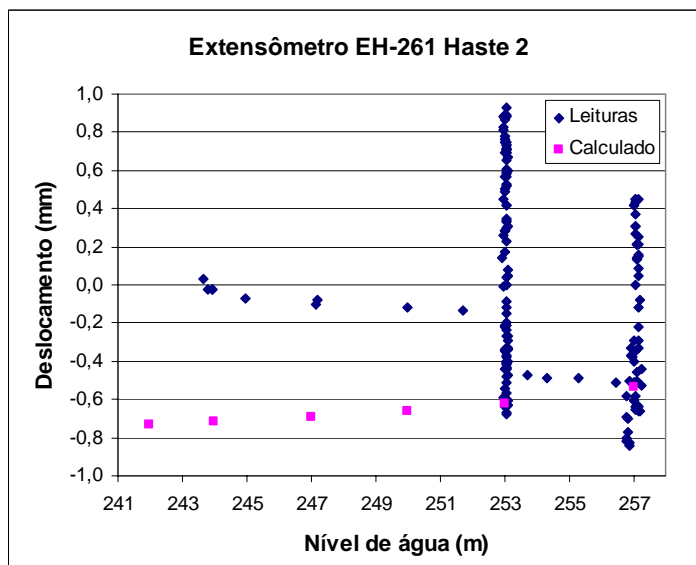


Figura 4.10 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-261.

Não se deve buscar semelhança entre os valores iniciais de cálculo e instrumentação. Muitos efeitos decorrentes da concretagem não foram simulados. Portanto a comparação deve ser feita apenas com as variações em função do nível d'água.

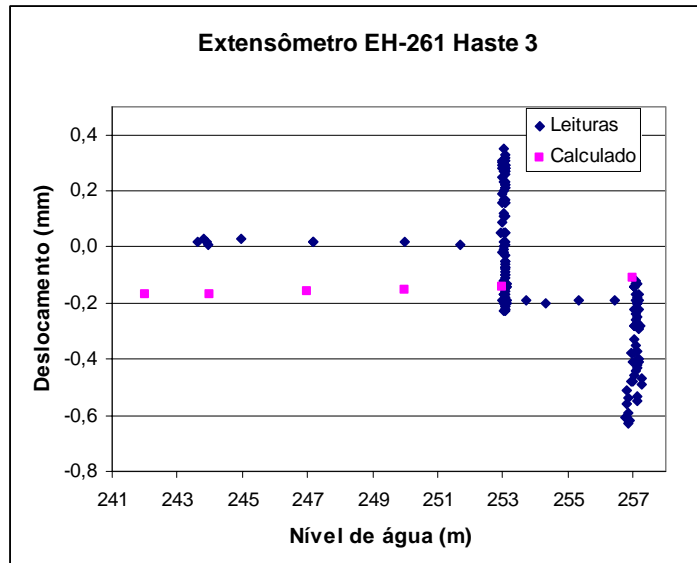


Figura 4.11 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-261.

Neste primeiro extensômetro EH-261, os valores calculados mostraram-se próximos daqueles das leituras na haste 3, a qual se encontra próxima à superfície do contato estrutura-fundação. Porém, foi necessário analisar o comportamento das hastes do extensômetro EH-262 para se ter uma idéia geral desta zona do maciço. As figuras 4.12 a 4.14 apresentam a comparação dos valores calculados com os medidos.

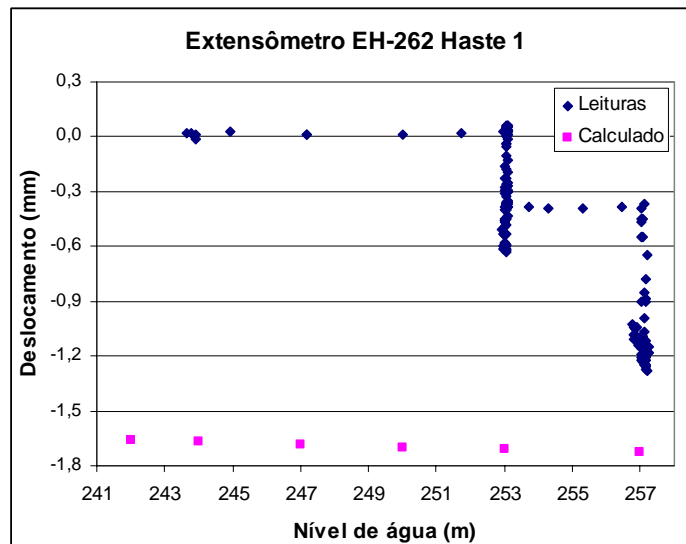


Figura 4.12 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-262.

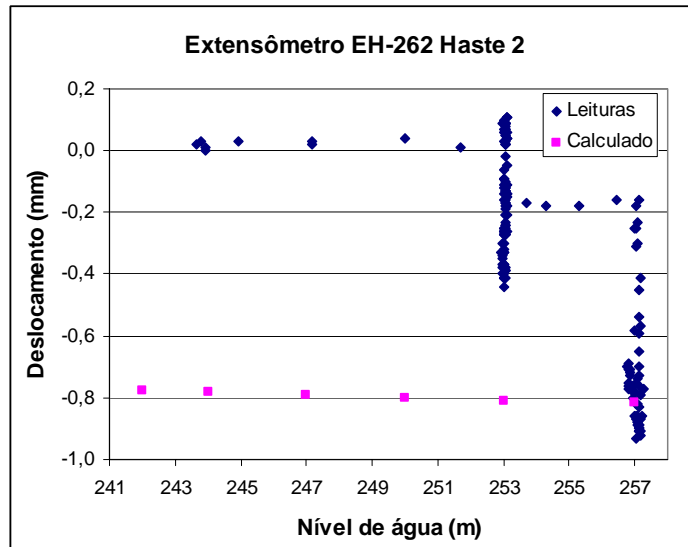


Figura 4.13 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-262.

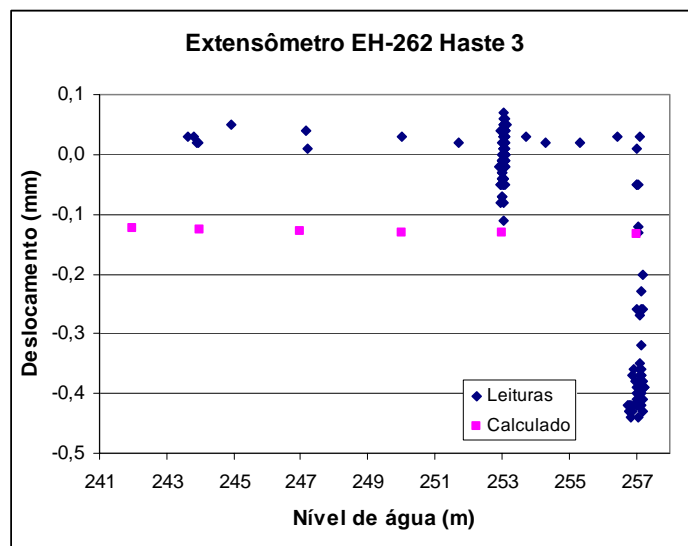


Figura 4.14 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-262.

Como mostrado pelas figuras, os valores dos deslocamentos calculados são mais próximos dos medidos nas hastes superficiais do que aqueles correspondentes às hastes inferiores, e se mostram mais afastados nas hastes mais profundas. Por outro lado, observou-se, também, que a variação dos deslocamentos, mostrados pelas leituras, são bem pequenos e quase semelhantes aos calculados, enquanto que os carregamentos hidráulicos não são constantes. Contudo, quando o carregamento hidráulico, nos níveis altos, permanece constante por um longo período de tempo, como foram nos níveis 253m e 257m, verifica-se que as leituras mostraram oscilação dos deslocamentos

(compressão e distensão), o que é bem diferente da tendência dos valores calculados. As possíveis causas que justificam este comportamento e as discussões correspondentes são apresentadas no item 4.2.

Para o caso da estrutura da tomada de água-casa de força a comparação dos dados calculados e as leituras esta apresentada nas figuras 4.15 a 4.17 correspondente ao extensômetro EH-566.

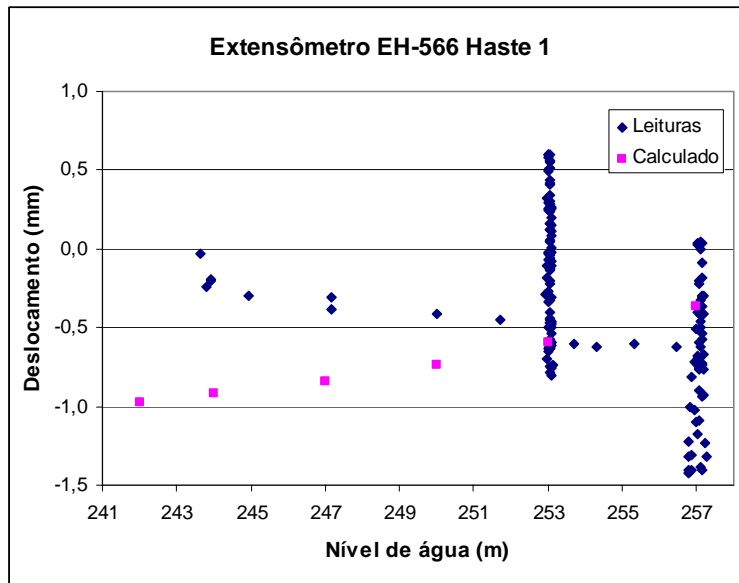


Figura 4.15 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-566.

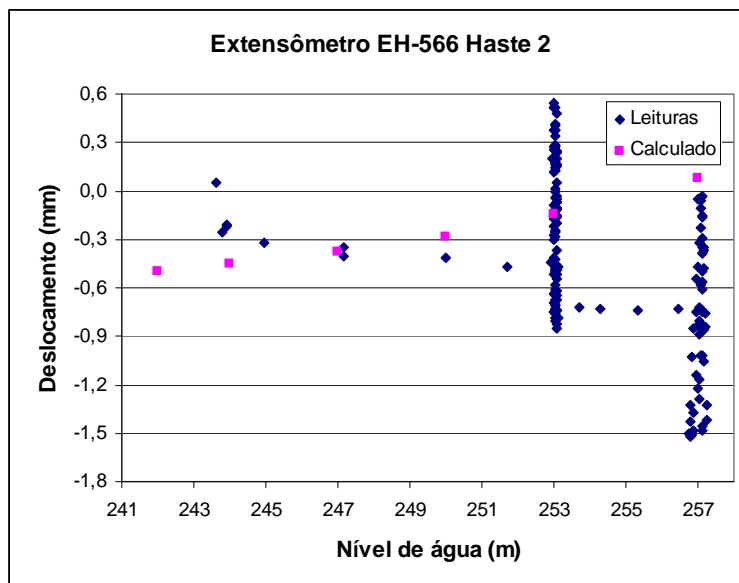


Figura 4.16 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-566.

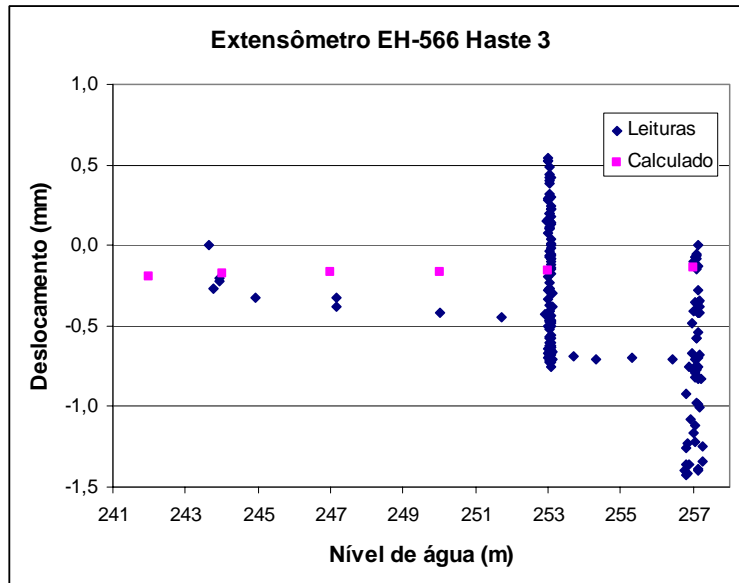


Figura 4.17 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-566.

Pelas figuras mostradas do EH-566, observa-se proximidade dos valores calculados com as leituras como no caso de montante do vertedouro, porém, se mostraram com tendência à distensão. Não obstante, é preciso ver as figuras do EH-567 a jusante do tratamento de fundação por meio das figuras 4.18 a 4.20, assim como as figuras 4.21 e 4.22 do extensômetro 568.

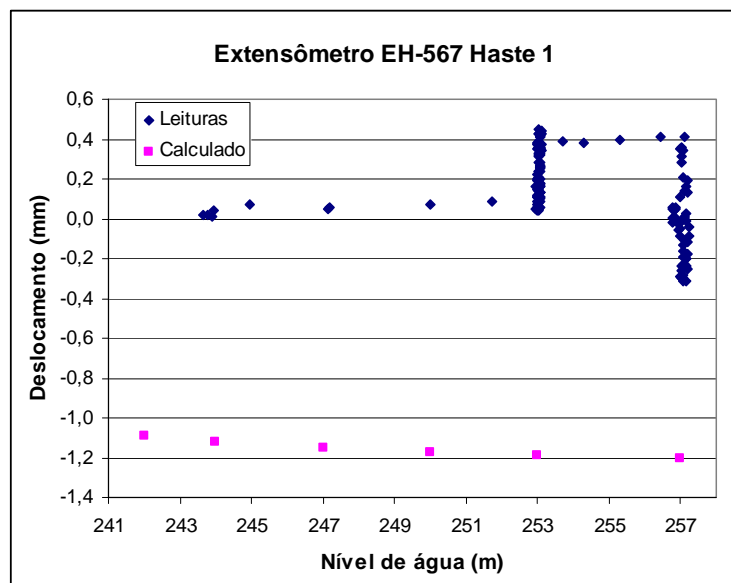


Figura 4.18 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-567.

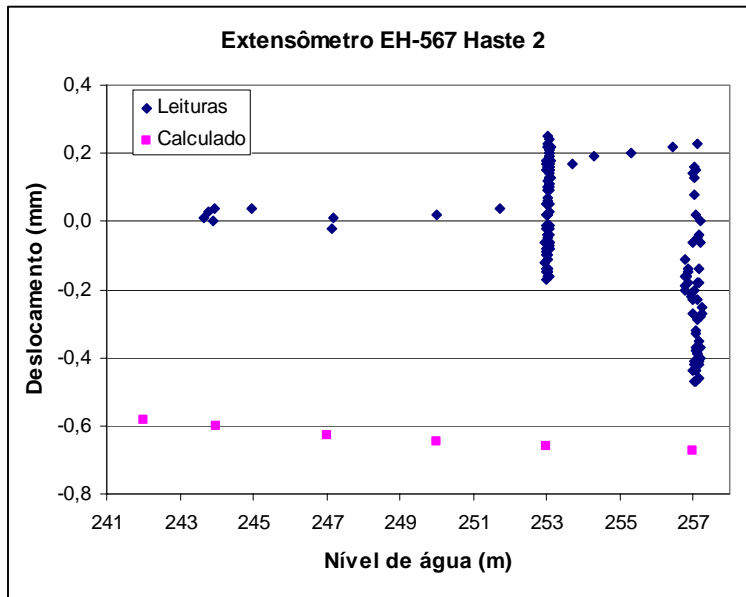


Figura 4.19 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-567.

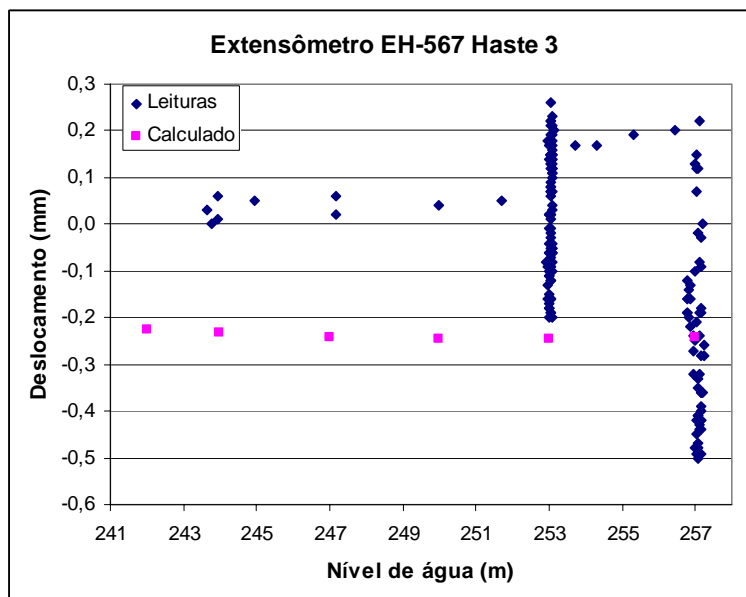


Figura 4.20 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 3 do EH-567.

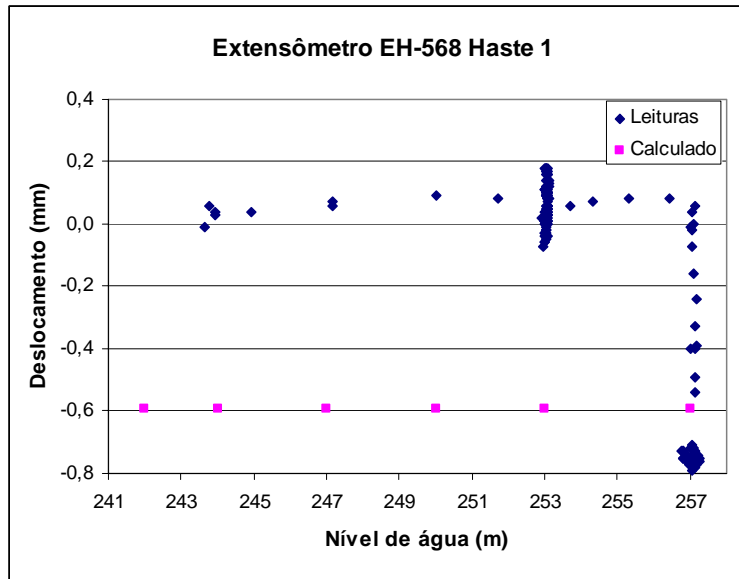


Figura 4.21 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 1 do EH-568.

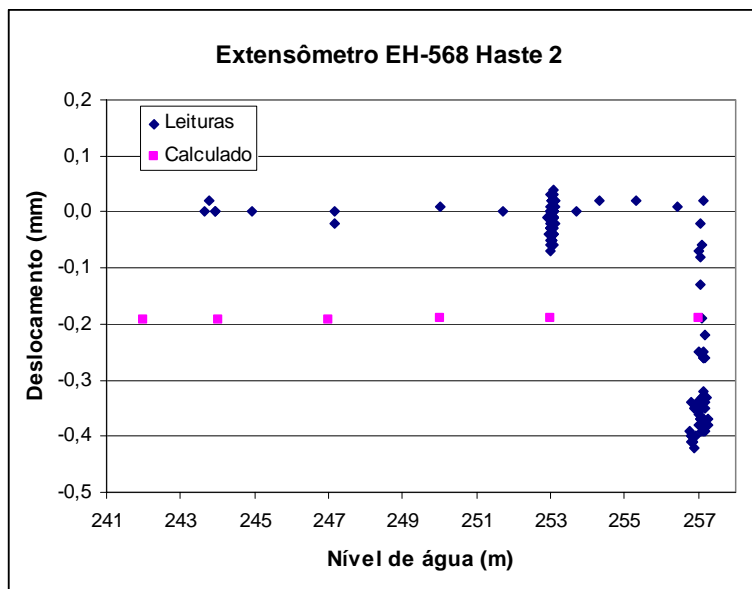


Figura 4.22 Comparação dos deslocamentos calculados e medidos da haste 2 do EH-568.

De acordo com as figuras correspondentes à estrutura da tomada de água-casa de força, observa-se o mesmo comportamento da zona do vertedouro onde os valores calculados das hastes 3 próximas ao contato estrutura-fundação mostram-se mais próximos aos valores fornecidos pela instrumentação. Contudo, é importante analisar o porquê da tendência contrária das leituras em relação aos valores calculados, o que se expõe no item 4.2.

Também, foi realizada a comparação das vazões calculadas e os registros de *Rossana Herrera López*

vazões dos drenos nas seções de análise. A figura 4.23 mostra a comparação das vazões no vertedouro, enquanto que a figura 4.24 mostra a comparação para a estrutura tomada de água-casa de força.

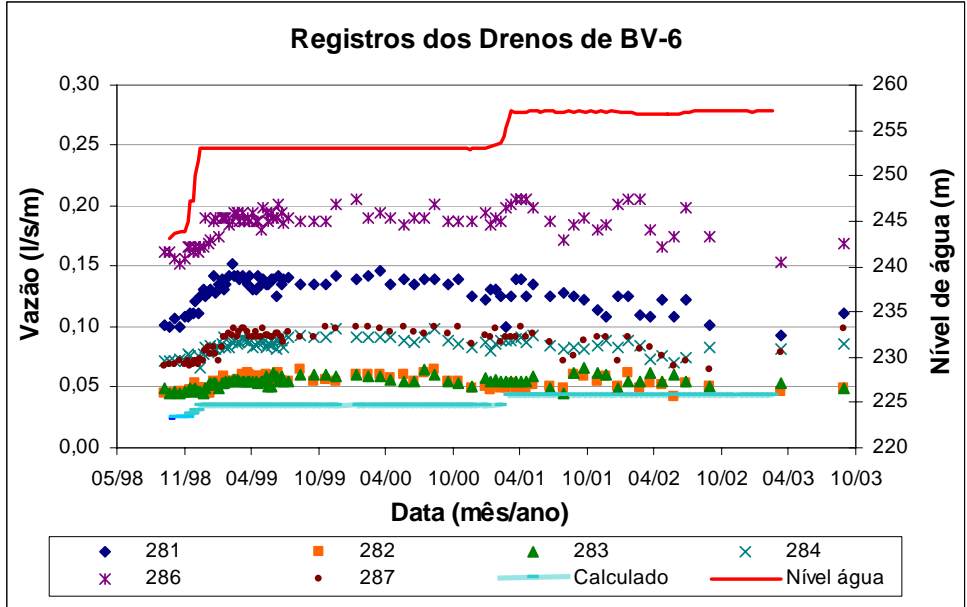


Figura 4.23 Comparação das vazões dos drenos do bloco BV-6 e as respectivas vazões calculadas.

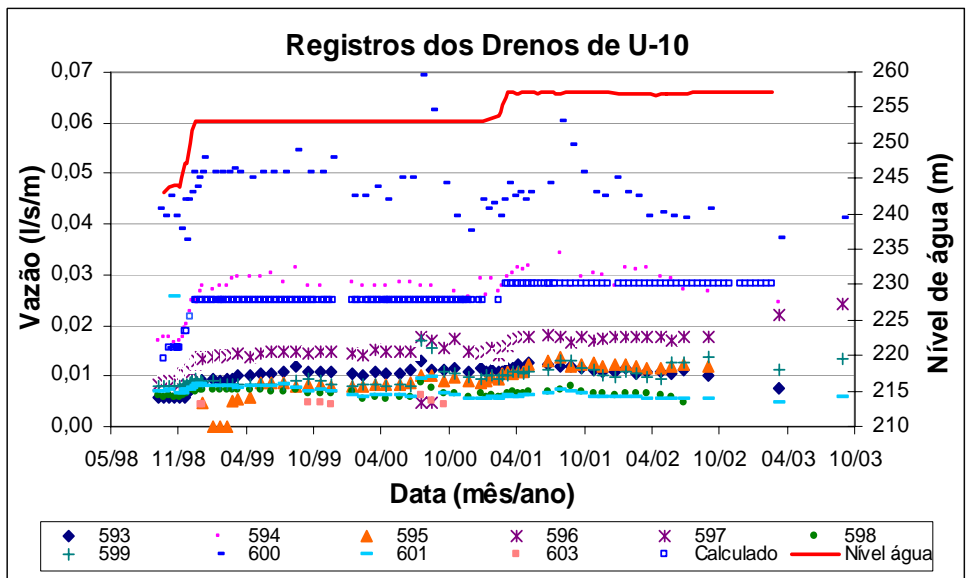


Figura 4.24 Comparação das vazões dos drenos da U-10 e as respectivas vazões calculadas.

4.2 Discussão

A partir da aferição dos deslocamentos da fundação do vertedouro e da casa de força, observaram-se os seguintes aspectos que merecem discussão para tentar explicar

o comportamento do maciço basáltico da fundação da Usina de Porto Primavera.

Como se sabe, o maciço de fundação da barragem está conformado por derrames basálticos da Formação Serra Geral (Tressoldi, 1990). Estes derrames espessos de elevada continuidade lateral, denominados macroderrames, encontram-se mais constantes na fundação da estrutura tomada de água-casa de força, com presença de contatos à profundidade, preenchidos de brecha basáltica calcária e basalto amigdaloidal. Contudo, sob o vertedouro, os derrames não apresentam continuidade lateral e têm variação do material com contatos subverticais. Estas características brevemente citadas podem nos ajudar a explicar o comportamento do maciço.

Deve-se considerar, segundo Kovári e Bergamin (1994) que ante a presença de uma fenda ou fratura a montante, as hastes do extensômetro a montante sofrem contração sob a carga do peso próprio da estrutura e vai sofrendo distensão à medida que sobe o nível da água do reservatório sendo isto mais marcante nas hastes próximas à abertura. Ressalta-se que esta foi a tendência demonstrada pelos cálculos obtidos. Os deslocamentos do extensômetro a montante da cortina de vedação, segundo os cálculos, mostraram distensão à medida que se aumenta o nível de água, enquanto que o extensômetro orientado para jusante experimenta compressão sob o aumento da carga hidráulica. Esta tendência se reflete tanto no vertedouro como na casa de força.

A partir dessa tendência lógica do comportamento do maciço de fundação, quando comparados os deslocamentos calculados com os registros dos extensômetros existentes, observa-se um comportamento mais concordante no caso do vertedouro, não sendo assim para a casa de força que se mostra bem diferente, o que fica demonstrado com as figuras que mostram a relação entre os deslocamentos calculados e os medidos.

Segundo as figuras correspondentes ao extensômetro EH-261, observa-se que as três hastes mostram grande oscilação desde compressão no início do enchimento, para logo mostrar distensão, sendo que este comportamento se repete durante o tempo que o nível de água permanece constante. Esta variação continua se repetindo até nível de água mais elevado onde acontece de novo uma compressão maior para logo continuar com a mesma oscilação descrita acima, durante a segunda etapa de enchimento. Contudo, nem todas as hastes reagiram da mesma forma, visto que a segunda haste se mostrou mais marcante. A primeira haste mostrou uma oscilação intermédia, enquanto que a terceira oscilou menos. Aparentemente, isto poderia ser explicado pela

variabilidade do material do maciço à profundidade visto que, como foi mencionado acima, o vertedouro encontra-se sobre derrames pouco constantes e existem descontinuidades, especialmente uma que passa próxima à segunda haste. O fenômeno de oscilação de compressão e distensão mostrada pelas hastes poderia ser entendido como uma resposta do maciço primeiramente a um aumento de carregamento (primeiro enchimento), e posteriormente à permanência de um carregamento hidráulico por um longo período de tempo, o que poderia ter provocado a abertura de fendas, levando o maciço a experimentar deformações oscilantes também provocadas pela influência da variação sazonal da temperatura (Guidicini e Andrade 1987). O processo de abertura de trincas no maciço é na realidade dependente do tempo, devido a componentes viscosas do comportamento do material intacto. Esta dependência não é levada em conta no modelo matemático. As figuras 4.25 e 4.26 nos fornecem uma visão deste fenômeno.

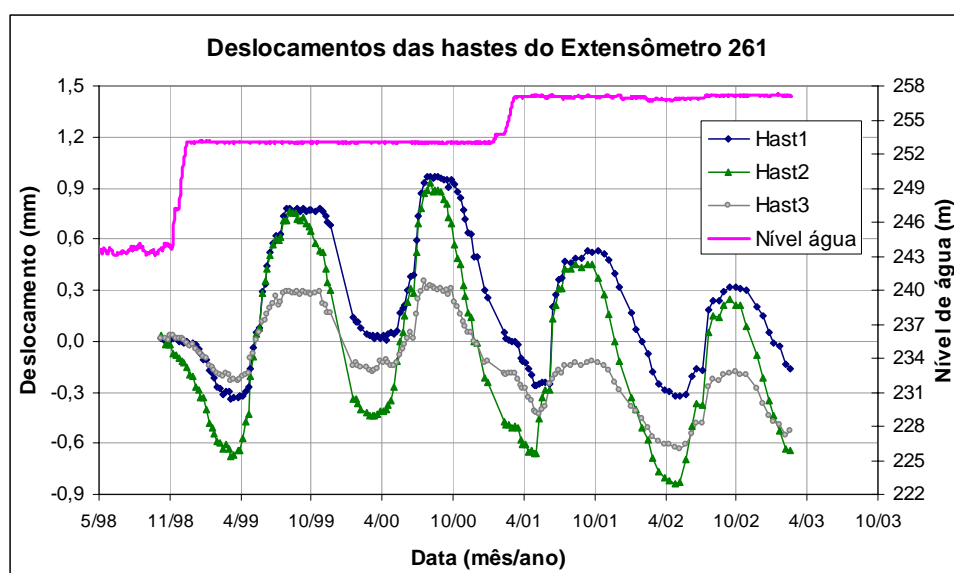


Figura 4.25 Deslocamentos das hastes no tempo do enchimento em relação ao nível de água do reservatório.

No vertedouro, um aspecto importante a ressaltar é a diferença de tendências na comparação de resultados medidos e calculados para as hastes correspondentes à região superficial. Isto somente pode ser explicado por heterogeneidades presentes na fundação, na escala da estrutura, não detectadas na caracterização do maciço.

Outro aspecto que deve ser comentado está relacionado com a possibilidade da influência da variação sazonal de temperatura como mostra a figura 4.26, onde a oscilação dos deslocamentos foi cíclica, produzindo-se compressão quase um mês depois de acabado o inverno, e distensão a quase dois meses de ter acabado o verão. Isto

poderia ser devido ao resfriamento ou ao aumento de temperatura do meio rochoso (Guidicini e Andrade, 1987).

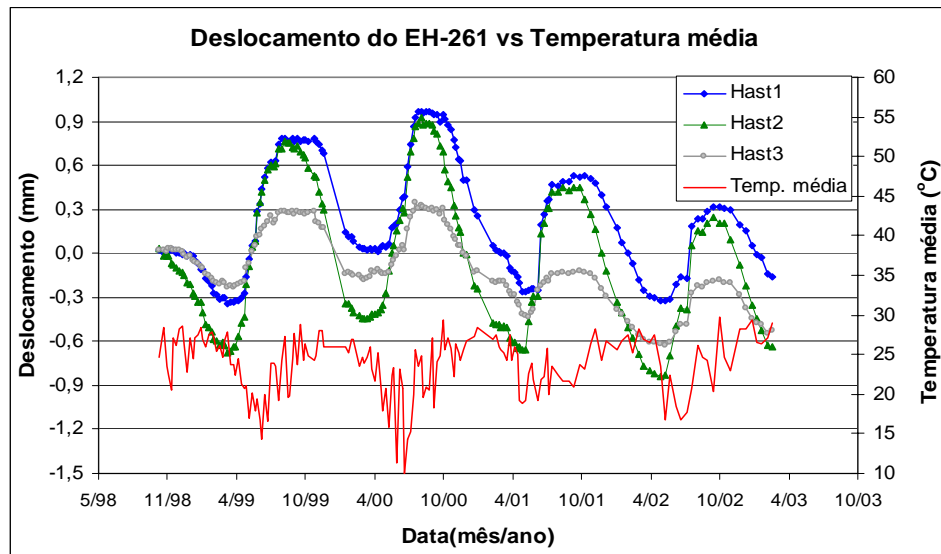


Figura 4.26 Deslocamentos das hastes em relação à temperatura média.

O extensômetro EH-262 experimenta uma situação similar ao EH-261 com a diferença de que a haste 3 quase não mostra distensão do maciço, enquanto que as hastes 1 e 2 mostram uma oscilação menor entre compressão e distensão. Isto poderia ser explicado devido à sua posição visto que esta se encontra a jusante do tratamento de impermeabilização e dreno, de modo que as discontinuidades e fraturas não se veriam tão afetadas pelo carregamento hidráulico. As figuras 4.27 e 4.28 apresentam os deslocamentos das hastes do extensômetro EH-262 no tempo.

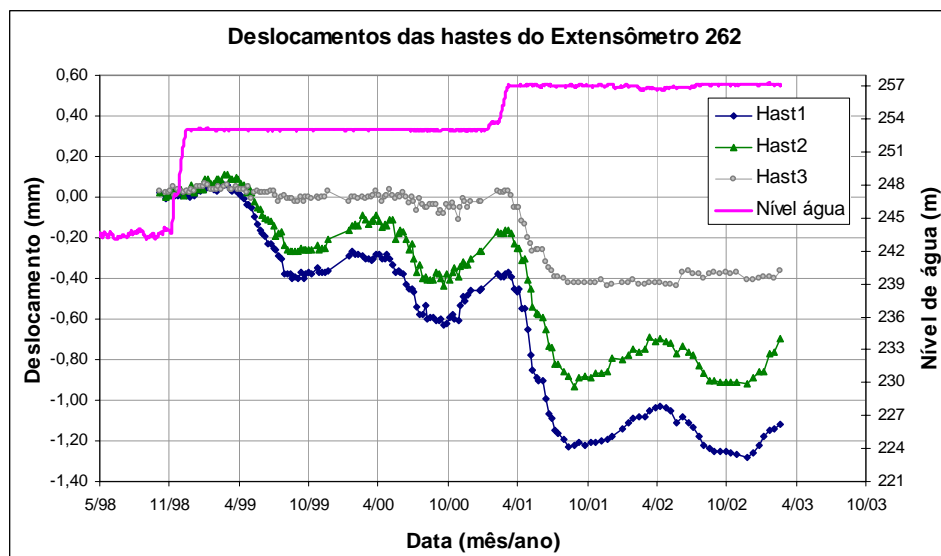


Figura 4.27 Deslocamentos das hastes em relação ao nível de água do reservatório.

Em relação aos cálculos para o EH-262, estes mostram uma tendência de compressão similar às leituras. Quanto à oscilação mostrada pelas leituras das hastes sob os carregamentos dos níveis 253m e 257m, não se conseguiu simulá-la por não se dispor de um programa que considere o carregamento e a degradação do material no tempo.

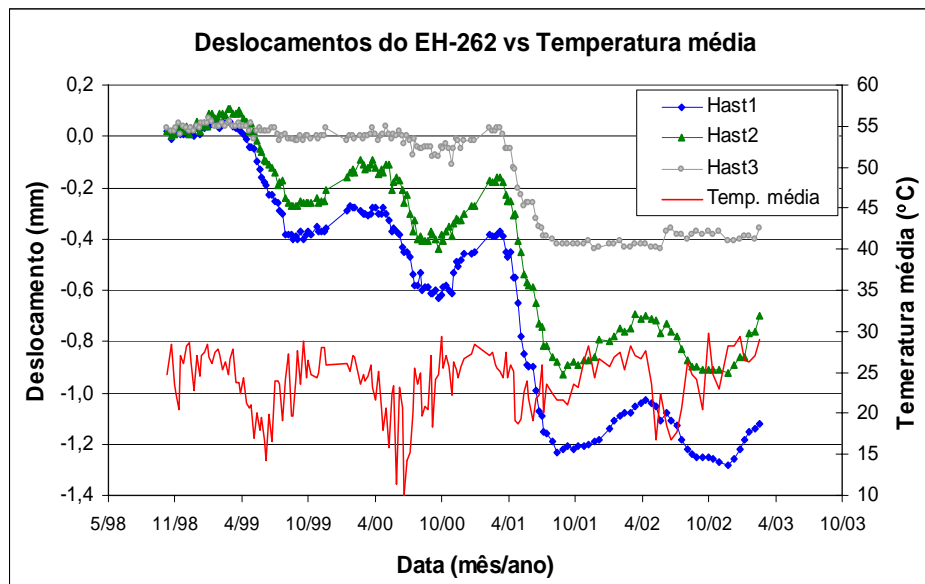


Figura 4.28 Deslocamentos das hastes em relação à temperatura média.

No caso da casa de força, é necessário dizer que devido à não concordância dos deslocamentos calculados e os deslocamentos das leituras, principalmente dos extensômetros EH-566 e EH-567 se torna difícil afirmar o que motivou esta contradição. Uma possível causa poderia ser a geologia local. Contudo a oscilação de compressão e distensão cíclica se mostra muito similar entre as hastes do EH-566 como o ilustra a figura 4.29. Com os primeiros carregamentos de níveis inferiores a 253m, as leituras registraram compressão, mas quando este carregamento permanece no nível do primeiro enchimento (ou seja, 253m) e logo no segundo enchimento no nível 257m, verificou-se a ocorrência de grande oscilação.

Conforme a figura 4.29, parece que a zona do extensômetro EH-566 (de montante) reage de acordo a determinados períodos do ano, sendo possível relacionar o comportamento oscilante à variação das temperaturas. A figura 4.30 mostra os deslocamentos ocorridos em relação à temperatura média.

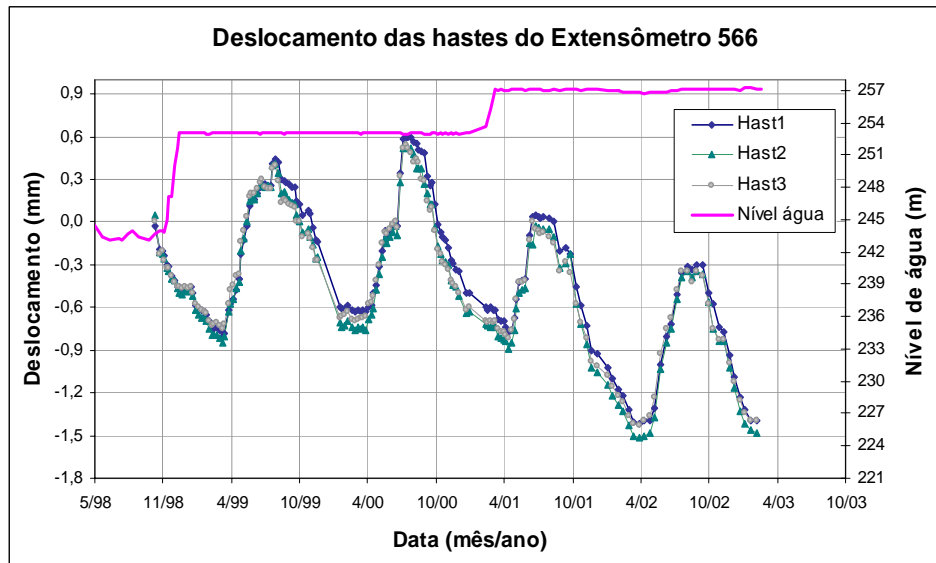


Figura 4.29 Deslocamentos das hastas no tempo em relação ao nível de água.

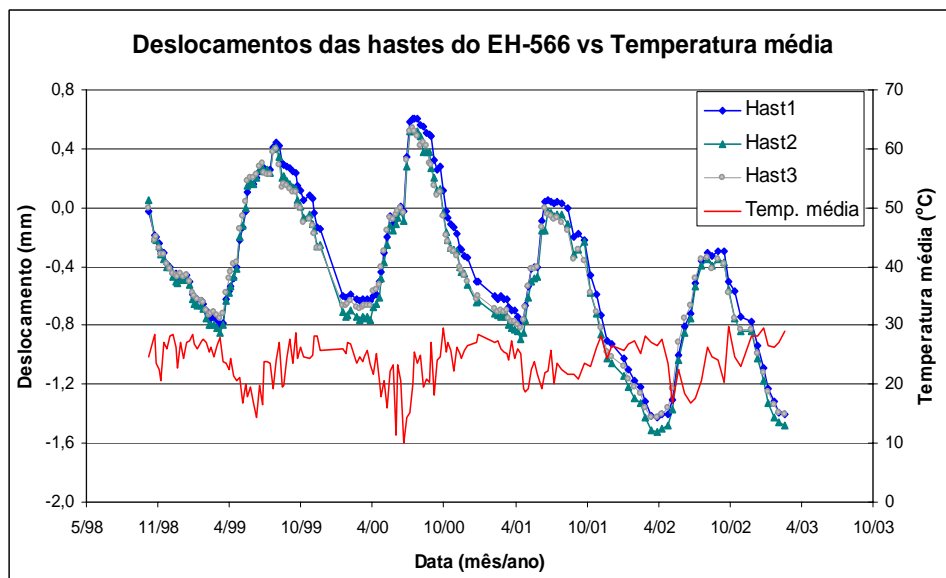


Figura 4.30 Deslocamentos das hastas do EH-566 em relação à temperatura média.

A figura 4.31 apresenta os deslocamentos das hastas do EH-567 com uma oscilação menor, mas semelhante às hastas do EH-566. Já no caso do EH-568 a oscilação foi irregular e, sob o carregamento máximo, mostra uma tendência à estabilização como apresenta a figura 4.32. A figura 4.33 mostra os deslocamentos em relação à temperatura média.

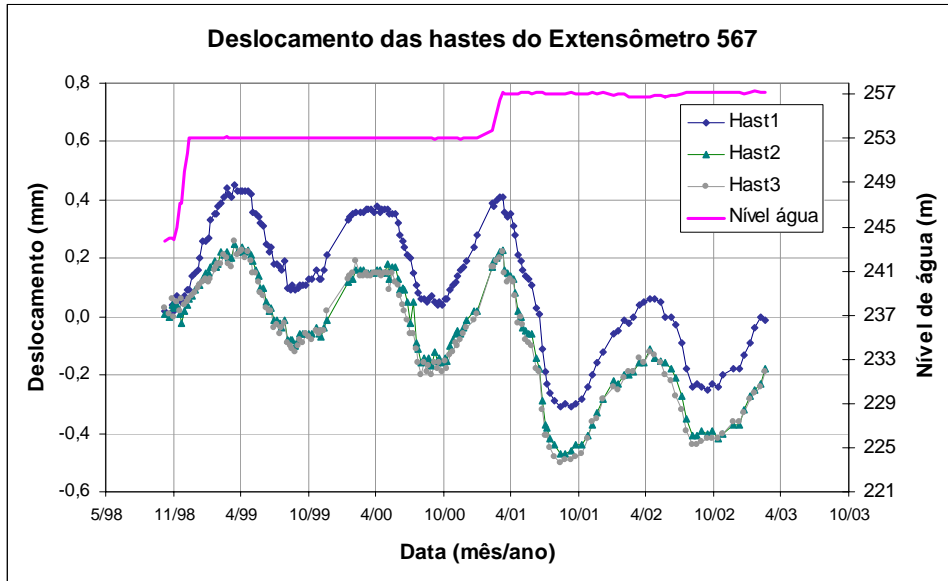


Figura 4.31 Deslocamentos das hastas no tempo em relação ao nível de água.

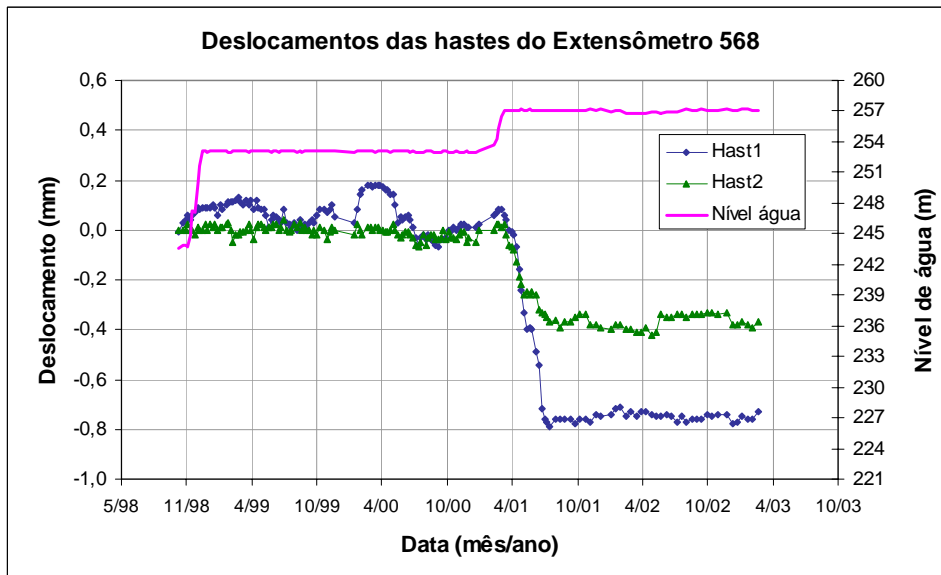


Figura 4.32 Deslocamentos das hastas do EH-568 no tempo em relação ao nível de água.

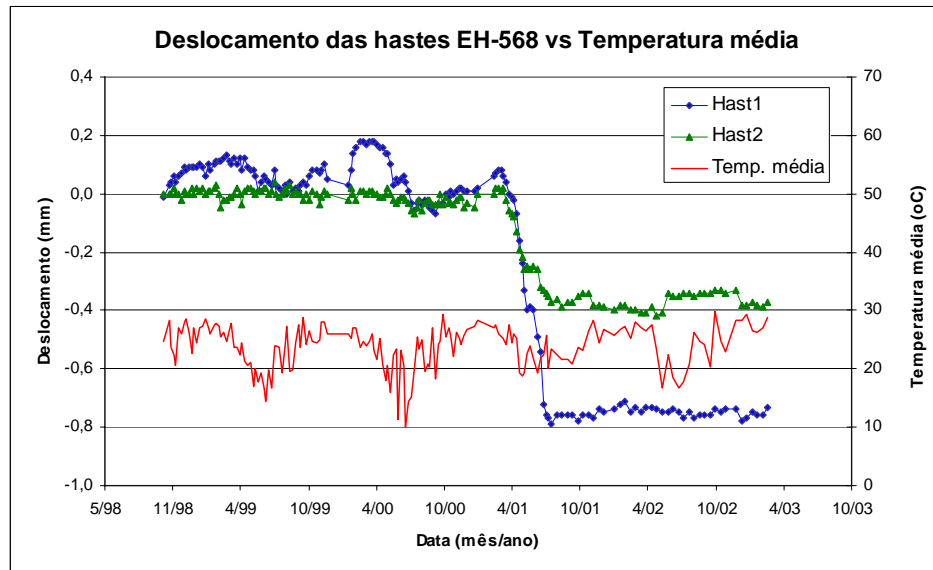


Figura 4.33 Deslocamentos das hastes do EH-568 em relação à temperatura média.

Como foi visto nas figuras apresentadas, a influência da temperatura se torna um fator a mais a considerar nas análises. Por esta razão, as hastes dos extensômetros foram relacionadas entre si a fim de se verificar o que acontecia quando, simultaneamente, uma experimentava distensão e a outra compressão sob uma mesma temperatura. Por meio das figuras 4.34 a 4.36, mostram-se essas relações para o caso do vertedouro.

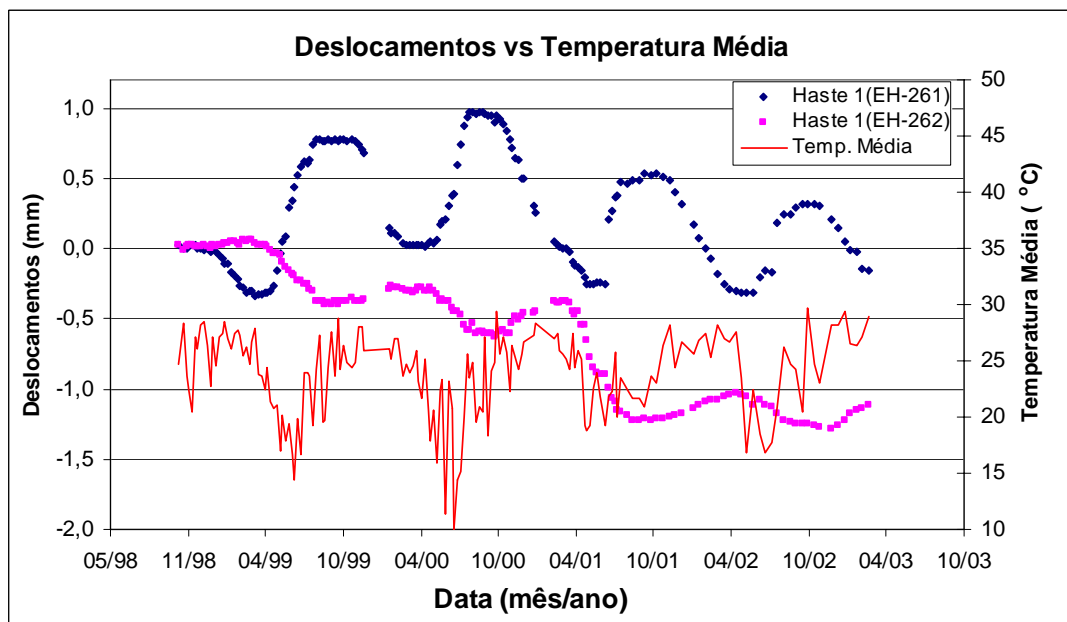


Figura 4.34 Comparação das hastes 1 dos extensômetros 261 e 262.

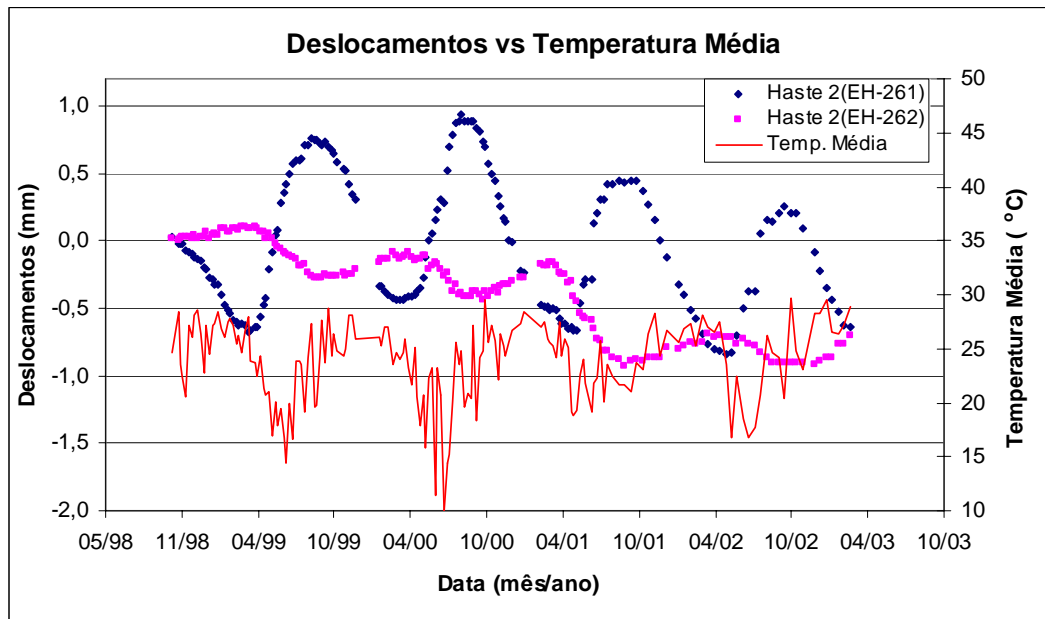


Figura 4.35 Comparação das hastes 2 dos extensômetros 261 e 262.

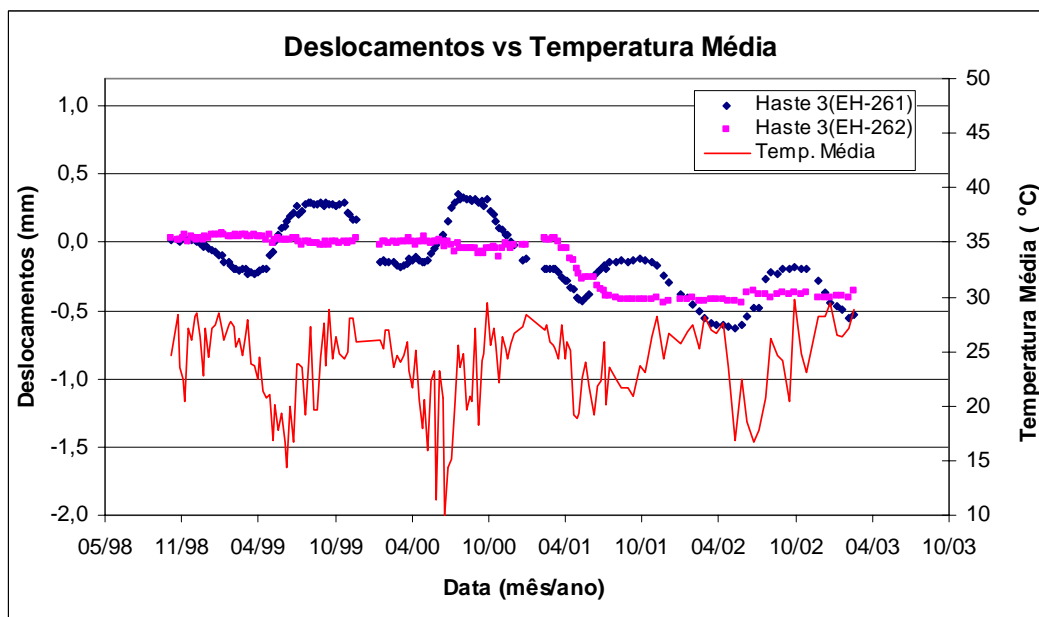


Figura 4.36 Comparação das hastes 3 dos extensômetros 261 e 262.

Para o caso da casa de força, a comparação dos deslocamentos das hastes dos extensômetros EH-566 e 567 mostra também uma relação dependente da presença da fratura, só que a oscilação das hastes a montante se mostra mais constante, o que poderia ser atribuído à influência da fratura. As figuras 4.37 a 4.39 mostram a comparação dos extensômetros.

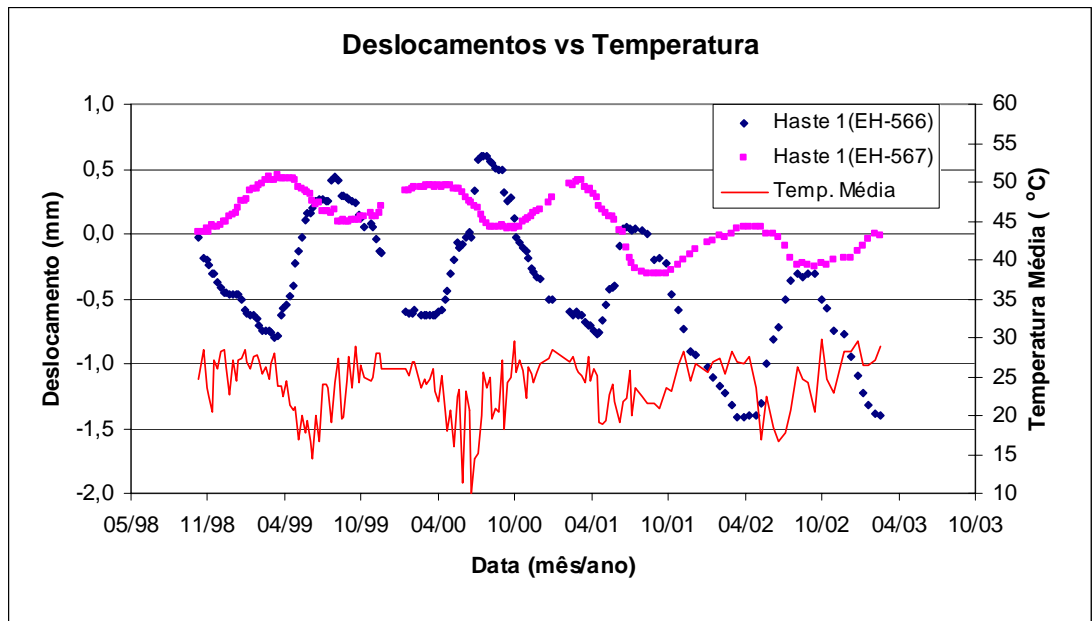


Figura 4.37 Comparação das hastes 1 dos extensômetros 566 e 567.

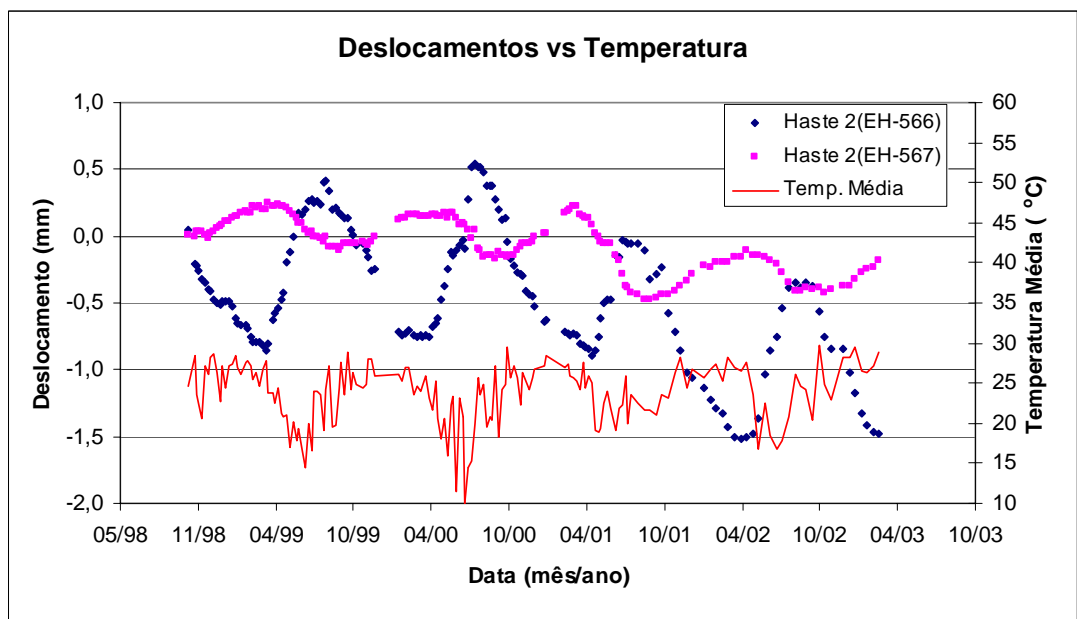


Figura 4.38 Comparação das hastes 2 dos extensômetros 566 e 567.

No que concerne às relações das hastes a montante, observa-se que as oscilações são maiores, o que evidencia a sensibilidade da zona aos efeitos térmicos que não poderia ser só atribuída ao concreto da galeria visto que os deslocamentos dos extensômetros da mesma galeria mostram diferentes oscilações.

Será preciso também, deixar em claro que as hastes dos extensômetros estão sujeitas a deformações por variações de temperatura. E a pesar que não há medidas de

temperatura conhecidas no interior de maciços de barragens brasileiras, conhecem-se dados de variação de temperatura de água de reservatórios, que revelam uma amplitude sazonal a pequena profundidade bem menor que a da temperatura ambiente. A amplitude para a água em profundidade é ainda menor que a da água a pequena profundidade. Em conseqüência, no interior do maciço, a amplitude deve ser ainda menor que a da água em profundidade. Por esta razão não tem sido comum considerar a influência da variação de temperatura nas leituras.

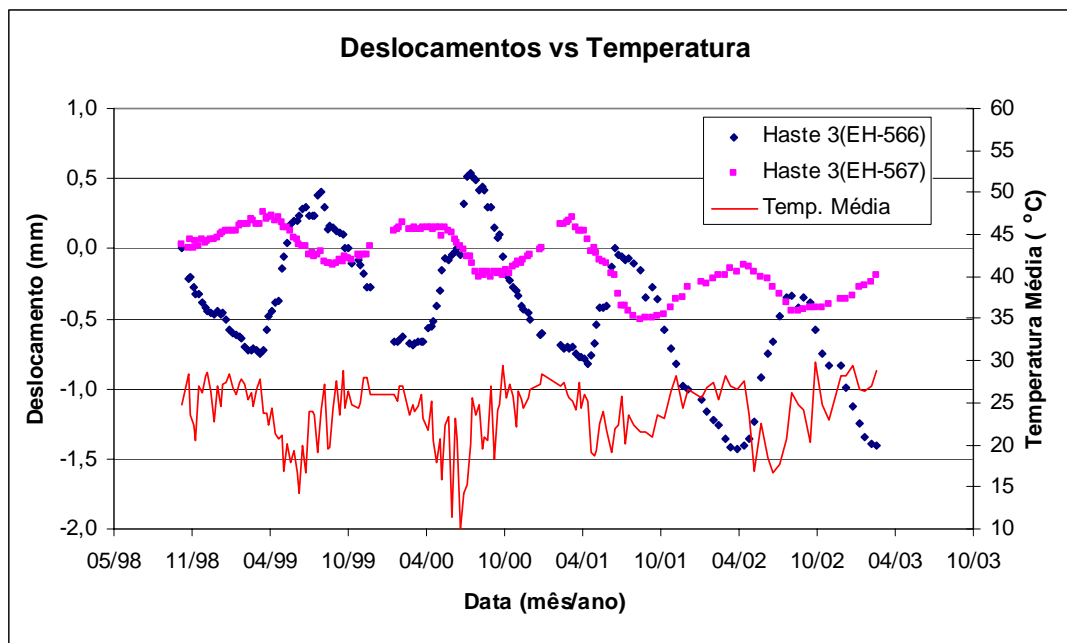


Figura 4.39 Comparação das hastas 3 dos extensômetros 566 e 567.

Outro aspecto importante e que deve ser submetido à discussão é o efeito da presença da fratura na zona de montante das estruturas do vertedouro e da casa de força. Segundo os cálculos, desenvolveu-se uma fratura no pé de montante do vertedouro que avançou à profundidade de 10 m. A fratura passou pelas hastas 2 e 3 e devido a isto poderia se dizer que o efeito se vê refletido nos deslocamentos que mostram certa tendência com as leituras dessas hastas. A figura 4.40 apresenta a fratura desenvolvida em relação à instrumentação no vertedouro.

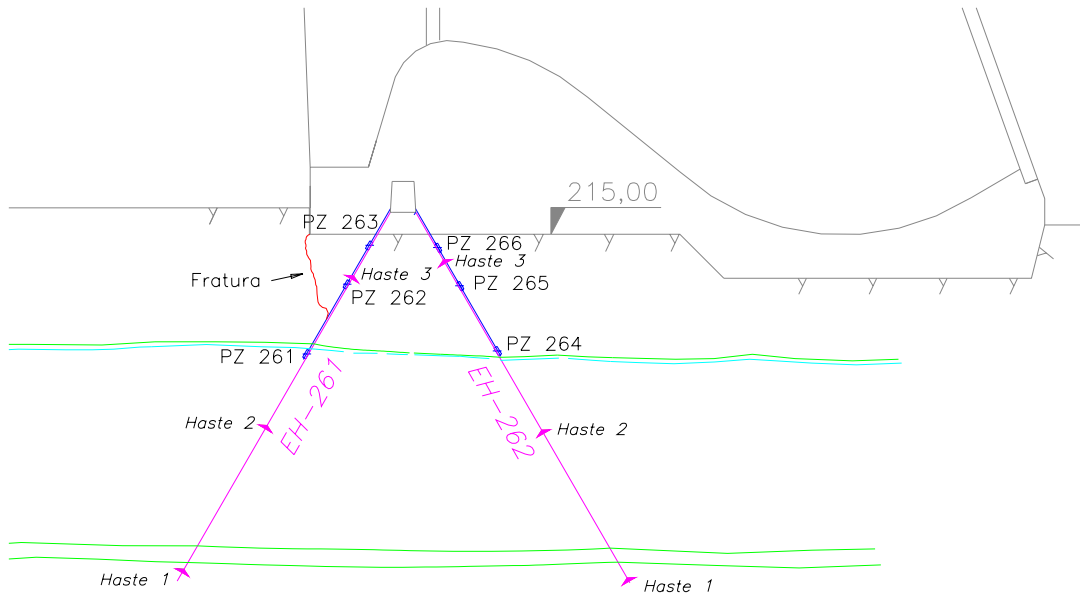


Figura 4.40 Desenvolvimento da fratura a montante do vertedouro.

Na casa de força, desenvolveu-se uma fratura de aproximadamente 12,4m de comprimento, a qual passou, também, pelas hastas 1 e 2 do EH-566 como apresenta a figura 4.41. Esta fratura parece que influenciou no piezômetro PZ-567 como se pode apreciar na figura 4.42.

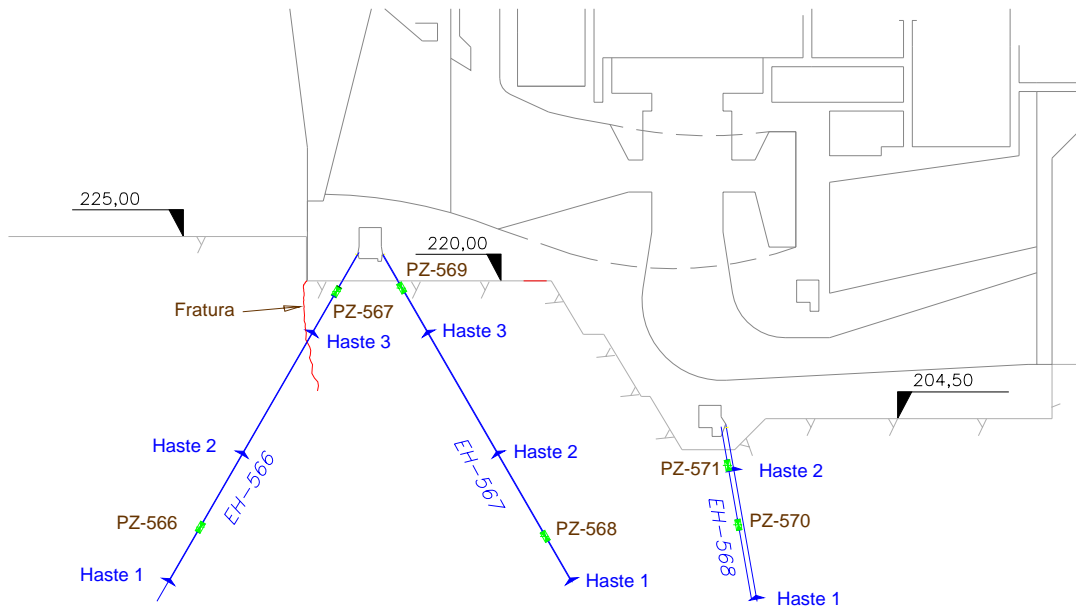


Figura 4.41 Desenvolvimento da fratura a montante da estrutura tomada de água-casa de força.

Em relação aos registros dos piezômetros e do nível de água, verifica-se que o piezômetro PZ-567 mostra algumas alterações ao se elevar a carga hidráulica para o nível 257m, dando motivo a se suspeitar quanto a alguma influência da fratura nessa

zona do piezômetro, sendo isto uma prova a mais da presença do fraturamento.

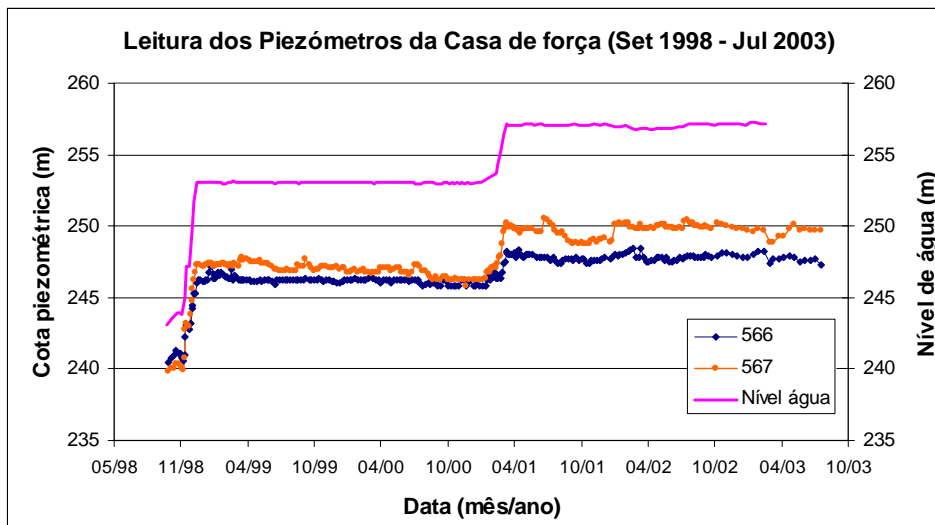


Figura 4.42 Leituras dos piezômetros a montante em relação ao nível de água.

Esta situação da influência da fratura nos registros dos piezômetros a montante se vê refletida, também, numa análise inicial que foi feita na seção do vertedouro BV-2 (ver figura 4.43), onde a fratura, obtida da simulação, passou próxima ao piezômetro PZ-222, e este tinha registrado, nas leituras, alterações marcantes no período de enchimento como mostra a figura 4.44.

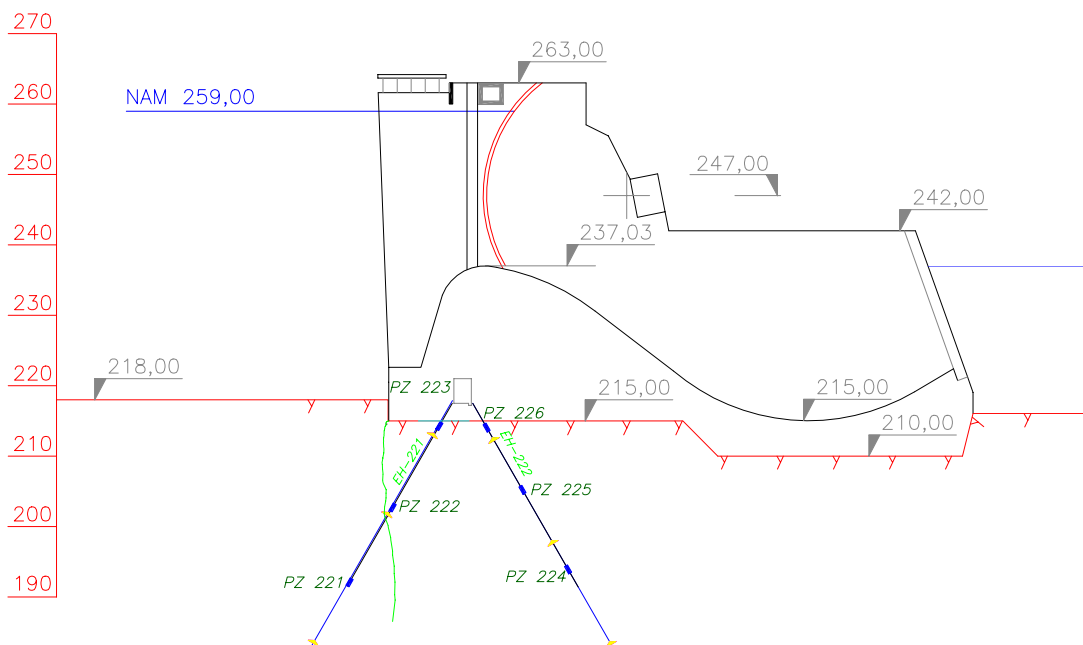


Figura 4.43 Localização da fratura em relação aos piezômetros na seção BV-2.

Com base na análise realizada, pode-se dar por aceita a presença do fraturamento e os efeitos que este tem na fundação, determinando-se que é necessário o ajuste dos

parâmetros do módulo de deformabilidade do maciço para os distintos derrames.

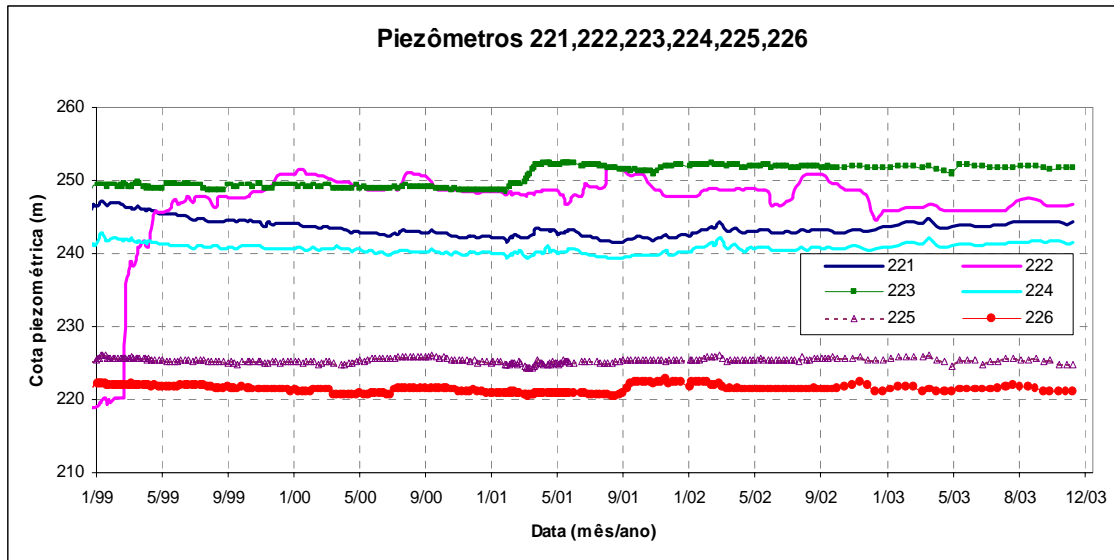


Figura 4.44 Leituras dos piezômetros PZ-221, PZ-222, PZ-223, PZ-224, PZ-225 e PZ-226 no vertedouro BV-2.

Com base nos resultados da análise de fluxo e subpressão foi feita uma avaliação da variação da subpressão para o caso sem fratura e com a presença da fratura sob o nível de água de 257m. Verifica-se, a partir disto, que a fratura origina o aumento da subpressão a montante, situação que se dá em menor grau a jusante. Este efeito apresenta-se na figura 4.45

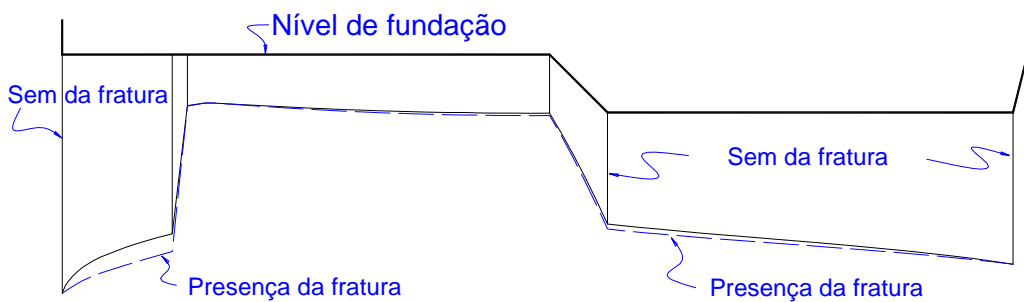


Figura 4.45 Subpressão calculada sem fratura e com fratura na fundação do vertedouro.

Por fim, em relação às pressões na fratura, considerou-se fazer uma comparação dos critérios de Rocha e Cruz, adotadas na prática comum, e os resultados da análise, tomando-se as pressões para o nível máximo de água de 257m no vertedouro. A figura 4.46 mostra a comparação.

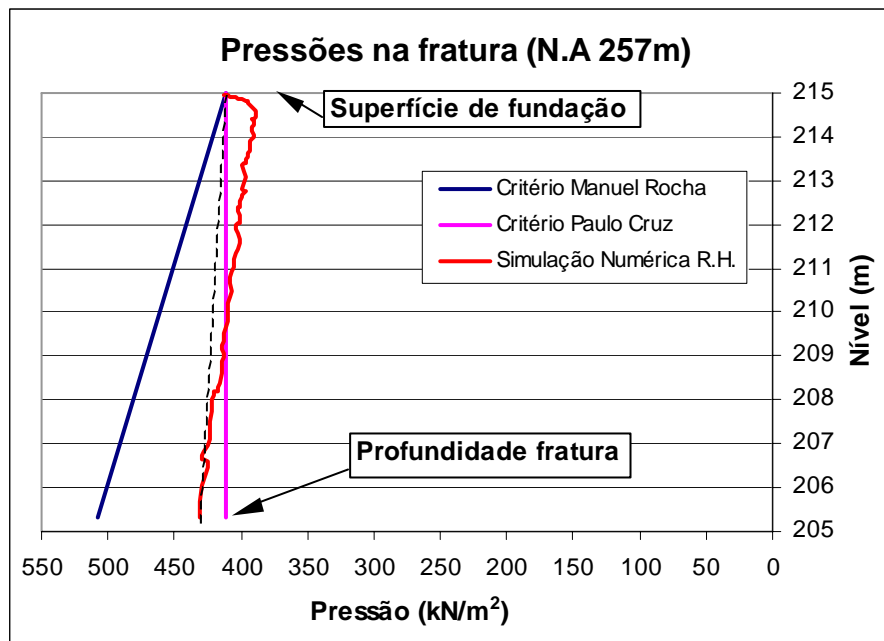


Figura 4.46 Comparação dos critérios de projeto e o resultado da simulação numérica.

Ao fazer a comparação das pressões na fratura em relação às pressões calculadas, esta última se apresenta um tanto menor nas proximidades da superfície da fundação para logo, a profundidade, se situar entre os outros dois critérios e mais próxima ao critério de Cruz (1978). Isto poderia ser explicado pelo tamanho da abertura na superfície da fundação. A tendência de aumento das pressões calculadas poderia ser considerada pela linha tracejada. Essa tendência mostrada pela simulação numérica demonstra a clara vantagem da aplicação da Mecânica da fratura em análises de fundações de barragens, vantagem esta que acabará se refletindo em termos econômicos.

5. CONCLUSÕES

O trabalho de pesquisa teve a finalidade de discernir problemas relacionados à presença de fratura e os efeitos que esta provocaria na fundação, especialmente a montante da cortina de vedação. A principal preocupação foi a de determinar as variáveis que devem ser consideradas ao se assumir parâmetros que caracterizam os materiais e os critérios adotados na elaboração de modelos matemáticos que possam representar fielmente o estado de tensões do sistema barragem-fundação-água. É importante mencionar que, mais que uma comparação numérica, procurou-se chegar a determinar os parâmetros que permitam avaliar a segurança e a estabilidade da estrutura, assim como ajudar no controle da instrumentação e, conseqüentemente, a segurança das estruturas hidráulicas.

O uso de modelos numéricos baseados nos princípios da Mecânica da Fratura tornou possível simular o comportamento do maciço de fundação. Mediante a simulação do avanço de uma fratura na fundação a montante, foram determinados os deslocamentos da instrumentação. A aferição dos resultados da análise com as leituras da instrumentação permitiu não somente a compreensão da influência do fraturamento no comportamento do maciço rochoso, assim como a necessidade da elaboração de um modelo que possua condições de contorno que se assemelhem às condições reais. Outro fator que foi visto como sendo importante corresponde à consideração da degradação do material no tempo.

Embora tenham sido efetuadas simplificações nos modelos de análise, os resultados obtidos do processamento mostraram-se satisfatórios em relação aos dados da instrumentação. Como foi apresentado acima, os gráficos mostraram a influência do fraturamento no comportamento do maciço tanto nos deslocamentos, como nas vazões e nos registros da piezometria.

Finalmente, a análise realizada da modelagem das seções do vertedouro e da

estrutura da tomada de água-casa de força tornou possível o estabelecimento das seguintes conclusões:

1. Em face da existência de vários derrames rochosos e descontinuidades que fazem o maciço heterogêneo e anisotrópico, é essencial preparar um modelo de análise mais detalhado das feições do maciço e suas características geomecânicas, como o módulo de deformabilidade e o coeficiente de Poisson, que têm uma grande influência no comportamento do mesmo;
2. O fraturamento do maciço rochoso de fundação a montante exerce uma influência direta na subpressão, especialmente a montante da cortina de vedação, sendo necessário o controle de piezômetros que se localizam próximos a possíveis fraturas determinadas com base em uma análise de fraturamento do maciço;
3. É possível o estabelecimento de parâmetros de controle tais como as vazões que dão conta do estado da fundação em relação às forças de subpressão;
4. Ao se considerar as feições do maciço, é necessária a análise do comportamento tensão-deformação e das forças de percolação a fim de se avaliar o efeito destas últimas no fraturamento e nas feições;
5. É necessário avaliar a influência da temperatura sazonal no comportamento do maciço rochoso fraturado;
6. Deve-se considerar a importância e a vantagem do uso dos métodos computacionais e da aplicação da Mecânica da Fratura na modelagem numérica de fraturamentos de maciços rochosos e sua influência em termos econômicos.

Os itens apresentados representam os principais aspectos que a autora deste trabalho considera como sendo necessários para se chegar a um melhor controle de parâmetros que permitem a segurança das estruturas hidráulicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R.M. (1980). Cálculo da subpressão em estruturas de concreto assentes em maciços permeáveis anisotrópicos. Engevix, Rio de Janeiro, p. 70.
- ANDRADE, R.M. (1988). Mecânica do escoamento em maciços fraturados aplicada a barragens. Engevix, Rio de Janeiro, p.139-142.
- BIRINDELLI, M.C.A.G. (1987). Análise de métodos de avaliação de subpressão em estruturas tipo gravidade. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de São Paulo.
- BORTOLUCCI, A A. (1993). Modelo de ruptura em compressão de materiais frágeis baseado na mecânica da fratura e aplicado ao efeito escala. Tese de doutorado – EESC/USP. Capítulo. 2, p.21-27.
- CELESTINO, T.B. (1983). Emprego de modelos matemáticos no projeto de fundações de barragens de concreto. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, São Paulo. p.299-318.
- CERVERA, M.; OLIVIER, J. e MANZOLI, O. (1996). A rate dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 25, p. 987-1010.
- Companhia Energética do estado de São Paulo (CESP). Dados da Usina Hidroelétrica de Porto Primavera. (2003).
- CRUZ, P. T. (1978). Análise de subpressões em barragens de concreto fundadas em formações basálticas. Notas de Aula, Escola Politécnica da USP. Vol.VI, parte 1.
- CRUZ, P. T. e SILVA, R. F. (1978). Uplift pressures at the base and in the rock basaltic foundations of gravity concrete dams. *Proc. Int. Symposium of Rock Mechanic related to dam foundation, ISRM*, pp. III, p. 1-25, Rio de Janeiro.
- GEOSLOPE International Ltd. (SEEP/W). Versão 4.22, (1991-1999). Alberta, Canadá.
- GID (Interactive Graphical User Interface, 1999). International Center for Numerical methods in Engineering (CIMNE). Barcelona, Spain

- GRIFFITH, A.A. (1920). The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions Royal Society, London. Vol. A221, p.163-198.
- GUIDICINI, G. (1983). Uma avaliação de conceitos sobre injeção e drenagem na fundação de barragens. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, São Paulo.
- GUIDICIN, G. e ANDRADE R.M. (1987). Oscilação sazonal de subpressões na fundação de estruturas hidráulicas por variações térmicas ambientais. V Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, São Paulo. Vol. 1, p. 21-40.
- HILLERBORG, A; MODEER, M. e PETERSSON, P-E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete research. Vol. 6, p. 773-782. Pergamon Press, Inc.
- INGLIS, G.R. (1913). Stresses in a Plate due to the presence of cracks and sharp corners. Trans. Royal Institute Naval Architects. Vol. 60, p.219-230.
- INGRAFFEA, A.R. (1983). Numerical modeling of Fracture propagation. In: Rossmanith, H.P., ed. Rock Fracture Mechanics. Wien:Springer, p. 484 (International Centre for Mechanical Sciences: Courses and Lectures).
- IRWIN, G.R. (1957). Analysis of stresses and strain near the end of a crack transversing a plate. Journal Applied Mechanics. Vol. 24, p. 361-364.
- JOHANDAR, N.; WITHERSPOON, P. e BREKKE, T.L. (1971). A method for coupled stress and flow analysis of fractured rock masses. Dept. Civil Eng., University of California, Berkeley.
- KNOTT, J.F. (1973). Fundamentals of Fracture Mechanics. Butterworth Publishers. 2nd. Edition, p. 108.
- KÓVARI, K. e BERGAMIN, St. (1994). Joint opening and head distribution in the foundation rock of the Albigna gravity dam. Seveth Int. IAEG Congress. Balkema, Rotterdam, p. 3797-3806.
- LEMAITRE, J. (1996). A course on damage mechanics. Springer-Verlag, Berlin, 228p.
- LEMAITRE, J. e CHABOCHE, J.L. (1978). Aspects phénoménologiques de la rupture par endommagement. J. Mec. Appl. Vol.2, p. 317-365.
- LINSBAUER, H.N.; INGRAFFEA, A.R.; ROSSMANITH, H.P.e WAWRZYNEK, P.A. (1989). Simulation of cracking in large Arch Dam: Part I and Part II. Journal of Structural Engineering, Vol. 115-7, p.1599-1630.

- MANZOLI, O.L. (1998). Localización de deformaciones: Análisis y simulación numérica de Discontinuidades en Mecánica de Sólidos. Tesis doctoral, Universidad Técnica de Cataluña.
- MIDEA, N. F. (1983). Resenha e análise crítica dos métodos e técnicas de ensaios geomecânicos efetuados para escavação em rocha. Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, São Paulo.
- MUSKAT, M. (1937). The flow of homogeneous fluids through porous media. New York, Mc Graw-Hill. P. 763.
- OLIVIER, J.; CERVERA, M.; OLLER, S.; LUBLINER, J. (1990) Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete. Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Swansea. Pineridge Press, p.945-957.
- OMEGA (Organized Module for Engineering General Analysis, 1996).
- PAES DE BARROS, F. e BARBI, A. L. (1983). Análise do comportamento das fundações das estruturas de concreto de Itaipu. XV Seminário Nacional de Grandes barragens, Rio de Janeiro.
- PEDROSO, E.O.; LINS, P.G.C.; CELESTINO, T.B. e BORTOLUCCI, A.A. (1996). Um estudo do comportamento de fundações de barragens pela Mecânica da Fratura. In. VIII Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, ABGE, Rio de Janeiro.
- PEHOVAZ, H.I.A.; BORTOLUCCI, A.A. e CELESTINO, T.B. (2004). Ensaios não convencionais para a determinação da tenacidade à fratura em rochas: análise e comparação (Ensaios em basalto e granito). Escola de Engenharia de São Carlos.
- REICH, R.W.; BRÜHWILER, E.; SLOWIK, V. e SAOUMA, V.E. (1994). Experimental and computational aspects of a water/fracture interaction. In: Proceedings of the International workshop on dam fracture and damage. Dam Fracture and Damage, Bourdarot, Mazars & Saouma eds. Balkema, Rotterdam 1994.
- RIENIUS, E. (1948). Effect of hydrostatic uplift on stresses in concrete and on the stability of dams. In: III Congress on Large Dams, Estocolmo, Transactions. Paris, C.I.B. Vol. 1, Rep. 57.
- ROSSO, J. A.; FLORINI, A.S.; PORTO, E.C. e SILVEIRA, J. F. (1997). Barragem de Itaipu – Lições aprendidas com o comportamento térmico das estruturas tipo gravidade – aliviada e contraforte. In: XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Vol. 1, p.161-176.

- SERAFIM, J.L. (1954). A subpressão nas barragens. Lisboa, LNEC, p. 243 (LNEC Publicação n.55).
- SILVEIRA, J.F.A.; MIYA, S. e YENDO, M. (1978). Geomechanical parameters computed from instrumentation measurements at Água Vermelha dam foundation. Proc. Int. Symposium of Rock Mechanic related to dam foundation, ISRM, Vol. 1, pp. II, p. 103-120.
- SUZUKI, H. (1995). Behaviors of Kaore Arch Dam and its foundation rock during test filling. Rock Foundation. Yoshinaka & Kikuchi eds. Balkema, Rotterdam, p. 367-374.
- TERZAGHI, K. (1936). Simple tests determine hydrostatic uplift. Engineering News Record, New York.
- TRESSOLDI, M. (1987). Aspectos hidrogeológicos dos derrames basálticos das fundações das estruturas de concreto da Usina de Porto Primavera. Anais do V. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Paulo. ABGE, p. 357-363.
- TRESSOLDI, M.; CELESTINO, T.B.; COSTA, S.M.K.M. e VICENZO JR., M.C. (1990). Caracterização hidrogeológica e hidrogeotécnica de basaltos fraturados através de ensaios tridimensionais-o exemplo de Porto Primavera. VI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Salvador.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; VALLIAPPAN, S. e KING, I.P. (1968). Stress analysis of rock as a no-tension material. Geotechnique, Vol. 18, p. 56-66.

ANEXO A - Cálculo de forças.

- Tabela A-1 Tensões horizontais no maciço de fundação do Vertedouro.
- Tabela A-2 Tensões horizontais no maciço de fundação da Casa de Força.
- Tabela A-3 Forças nodais equivalentes de água no paramento de montante do Vertedouro.
- Tabela A-4 Forças nodais equivalentes de água no paramento de montante da Casa de Força.
- Tabela A-5 Força pontuais no conduto da estrutura Tomada de água-Casa de Força,
- Tabela A-6 Força pontuais na zona de saída da estrutura Tomada de água-Casa de Força.
- Tabela A-7 Força nodais na fenda do Vertedouro.
- Tabela A-8 Força nodais na fenda da estrutura Tomada de água-Casa de Força, níveis 1 a 3.
- Tabela A-9 Força nodais na fenda da estrutura Tomada de água-Casa de Força, níveis 4 a 6.
- Tabela A-10 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPv30pC – Vertedouro, nível 1.
- Tabela A-11 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPv30pC – Vertedouro, nível 2.
- Tabela A-12 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPv30pC – Vertedouro, nível 3.
- Tabela A-13 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPv30pC – Vertedouro, nível 4.
- Tabela A-14 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPv30pC – Vertedouro, nível 5.
- Tabela A-15 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPv30pC – Vertedouro, nível 6.
- Tabela A-16 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPcf12p – Casa de força, nível 1.
- Tabela A-17 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPcf12p – Casa de força, nível 2.
- Tabela A-18 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPcf12p – Casa de força, nível 3.
- Tabela A-19 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPcf12p – Casa de força, nível 4.

Tabela A-20 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPcf12p – Casa de força, nível 5.

Tabela A-21 Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura. PPcf12p – Casa de força, nível 6.

Tabela A-1

Vertedouro

Tensões horizontais

Peso específico, γ 0,002 kgf/cm³

k = 0,7

$$\sigma_h = k\sigma_v$$

Montante					Jusante				
Elemento	Nós	Nível	σ_v , kgf/cm ²	σ_h , kgf/cm ²	Elementos	Nós	Nível	σ_v , kgf/cm ²	σ_h , kgf/cm ²
5189	6958	218,00	0,00	0	12189	909	216,05	0,00	0
	6957	213,62	0,88	0,61		788	212,22	0,77	0,54
5095	6955	210,37	1,53	1,07	12141	689	209,37	1,34	0,94
4923	6954	207,72	2,06	1,44	12122	609	207,01	1,81	1,27
4828	6953	205,56	2,49	1,74	11881	536	205,08	2,19	1,54
4746	6949	203,80	2,84	1,99	11817	473	203,51	2,51	1,75
4744	6947	202,36	3,13	2,19	11688	420	202,24	2,76	1,93
4336	6945	201,20	3,36	2,35	11301	380	201,20	2,97	2,08
7092	6943	200,50	3,50	2,45	13198	355	200,50	3,11	2,18
6117	6940	199,25	3,75	2,63	9735	317	199,25	3,36	2,35
6415	6937	197,69	4,06	2,84	10112	283	197,69	3,67	2,57
6527	6931	195,78	4,44	3,11	10227	248	195,78	4,05	2,84
6621	6924	193,45	4,91	3,44	10394	218	193,45	4,52	3,16
7007	6916	190,60	5,48	3,84	10581	182	190,60	5,09	3,56
7058	6903	187,11	6,18	4,32	10555	154	187,11	5,79	4,05
7086	6891	182,84	7,03	4,92	10727	121	184,84	6,24	4,37
7010	6881	179,57	7,69	5,38	10652	100	179,57	7,30	5,11
8764	6874	177,68	8,06	5,64	10732	85	177,68	7,67	5,37
10860	6864	174,47	8,71	6,09	8868	72	174,65	8,28	5,80
11010	6855	170,50	9,50	6,65	9036	54	170,89	9,03	6,32
11019	6840	165,62	10,48	7,33	9042	41	166,28	9,95	6,97
11058	6825	159,65	11,67	8,17	9061	27	160,64	11,08	7,76
11097	6810	152,37	13,13	9,19	9096	17	153,75	12,46	8,72
11130	6796	143,47	14,91	10,43	9165	10	145,34	14,14	9,90
11178	6782	132,58	17,08	11,96	9221	4	135,04	16,20	11,34
11188	6778	120,00	19,60	13,72	9227	1	120,00	19,21	13,45

Tabela A-2

Casa de Força

Tensões horizontais

Peso específico, γ 0,002 kgf/cm³k = **0,7**

$$\sigma_h = k \sigma_v$$

Montante					Jusante				
Elementos	Nós	Nível	σ_v kgf/cm ²	σ_h kgf/cm ²	Elementos	Nós	Nível	σ_v kgf/cm ²	σ_h kgf/cm ²
2946	4362	225,00	0,00	0	4474	126	210,60	0,00	0
	4361	213,33	2,33	1,63		95	204,00	1,32	0,92
2949	4360	201,67	4,67	3,27	8071	76	198,55	2,41	1,69
2948	4358	190,00	7,00	4,90	8151	57	192,34	3,65	2,56
2939	4356	178,33	9,33	6,53	8175	43	185,26	5,07	3,55
2940	4354	166,67	11,67	8,17	8218	30	177,20	6,68	4,68
2950	4353	155,00	14,00	9,80	8245	18	167,99	8,52	5,97
2938	4351	143,33	16,33	11,43	8262	12	157,49	10,62	7,44
2945	4350	131,67	18,67	13,07	8263	7	145,46	13,03	9,12
2947	4348	120,00	21,00	14,70	8285	3	132,73	15,57	10,90
					8277	1	120,00	18,12	12,68

Tabela A-3

Nível		F_n kN*	e_n m	e_{eq} m	Nível Apli. F_{eq} , m	Forças F_{eq} kgf
Nível 1, 242m	F_1	2824	8,00		226,00	282442
Nível 2, 244m	F_2	471	12,00	12,51	230,51	49035
	F_3	20	24,67			
Nível 3, 247m	F'_2	765	13,00	13,76	231,76	80908
	F'_3	44	27,00			
Nível 4, 250m	F''_2	853	14,50	15,26	233,26	89734
	F''_3	44	30,00			
Nível 5, 253m	F'''_2	941	16,00	16,76	234,76	98560
	F'''_3	44	33,00			
Nível 6, 257m	F^{iv}_2	1373	17,50	18,52	236,52	145144
	F^{iv}_3	78	36,33			

Tabela A-4

Nível		F_n kN*	e_n m	e_{eq} m	Nível Apli. F_{eq} , m	Força Eq kgf
Nível 1, 242m	F_1	1417	5,67		230,67	141711
Nível 2, 244m	F_2	333	8,50	9,01	234,01	35305
	F_3	20	17,67			
Nível 3, 247m	F'_2	559	9,50	10,27	235,27	60313
	F'_3	44	20,00			
Nível 4, 250m	F''_2	647	11,00	11,77	236,77	69139
	F''_3	44	23,00			
Nível 5, 253m	F'''_2	736	12,50	13,26	238,26	77966
	F'''_3	44	26,00			
Nível 6, 257m	F^{iv}_2	1098	14,00	15,02	240,02	117684
	F^{iv}_3	78	29,33			

Tabela A-5

Pressões Conduto	Cotas (m)	H (m)	Pressão kgf/cm²	Comprimento (m)	Largura (m)	Força tot. kgf	Força Pontual kgf/m
Nível 6, 257m							
p1	229,76	27,24	2,67				105434
p2	228,68	28,32	2,78	11,16	21,5	6536888	136803
p3	227,67	29,33	2,88	3,2	21,5	1944885	31369
s1	251,68	5,32	0,61				21853
s2	247	10	1,14	7,19	21,5	1354874	44873
s3	245,05	11,95	1,93	3,75	21,5	1427250	23020
Nível 5, 253m							
p1	229,76	23,24	2,28				90252
p2	228,68	24,32	2,39	11,16	21,5	5595652	117269
p3	227,67	25,33	2,48	3,2	21,5	1674996	27016
s1	251,68	1,32	0,15				10441
s2	247	6	0,69	7,19	21,5	647368	25072
s3	245,05	7,95	1,28	3,75	21,5	907068	14630
Nível 4, 250m							
p1	229,76	20,24	1,98				78867
p2	228,68	21,32	2,09	11,16	21,5	4889724	102618
p3	227,67	22,33	2,19	3,2	21,5	1472580	23751
s1	251,68	-	0,00				2744
s2	247	3	0,34	4,61	21,5	170111	11081
s3	245,05	4,95	0,80	3,75	21,5	516931	8338
Nível 3, 247m							
p1	229,76	17,24	1,69				67481
p2	228,68	18,32	1,80	11,16	21,5	4183797	87967
p3	227,67	19,33	1,90	3,2	21,5	1270163	20487
s2	247	0	0,00				2045
s3	245,05	1,95	0,31	3,75	21,5	126794	2045
Nível 2, 244m							
p1	229,76	14,24	1,40				56095
p2	228,68	15,32	1,50	11,16	21,5	3477869	73316
p3	227,67	16,33	1,60	3,2	21,5	1067747	17222
Nível 1, 242m							
p1	229,76	12,24	1,20				48504
p2	228,68	13,32	1,31	11,16	21,5	3007251	63549
p3	227,67	14,33	1,41	3,2	21,5	932803	15045

Tabela A-6

Pressões Saida	Cotas (m)	H (m)	Pressão kgf/cm²	Comprime (m)	Largura (m)	Força kgf	Força Pontual kgf/m
q1	218,61	18,09	1,77				72912
q2	221,22	15,48	1,52	11,94	23,0	4520533	134486
q3	223,83	12,87	1,26	11,94	23,0	3817609	61574
q4	231,1	5,60	0,55				16708
q5	225,6	11,10	1,09	5,5	23,0	1035889	53823
q6	218,61	18,09	1,77	6,99	23,0	2301152	37115

Tabela A-7

Nível de aplicação das forças	Carga Força	Níveis de carga					
		Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5	Nível 6
218m	F _{p1}	17928	19399	21606	23813	26019	28961
216,5m	F _{p2}	37512	40454	44867	49280	53693	59578
215m	F _{p3}	19583	21054	23261	25468	27674	30616

Tabela A-8

Nível 1		242 m			Forças equivalentes		
Nós	Coord. Y cm	Distância cm	kgf/cm ²	kgf	kgf (-)	Nós	kgf (+)
3549	22500,00		1,67	10587	5293	3536	5293
3513	22437,64	62,36	1,73	10968	10778	3503	10778
3481	22375,28	62,36	1,79	10720	10844	3470	10844
3442	22316,33	58,95	1,85	9732	10226	3433	10226
3412	22264,36	51,97	1,90	8813	9272	3396	9272
3380	22218,48	45,88	1,94	7961	8387	3367	8387
3352	22177,93	40,55	1,98	7174	7568	3335	7568
3322	22142,07	35,86	2,02	6449	6812	3307	6812
3300	22110,36	31,71	2,05	5781	6115	3284	6115
3275	22082,34	28,02	2,08	5165	5473	3266	5473
3252	22057,61	24,73	2,10	4598	4881	3235	4881
3233	22035,84	21,77	2,12	4075	4337	3218	4337
3216	22016,72	19,12	2,14	3594	3835	3199	3835
3200	22000,00	16,72	2,16		1797	3188	1797

Nível 2		244 m			Forças equivalentes		
Nós	Coord. Y cm	Distância cm	kgf/cm ²	kgf	kgf (-)	Nós	kgf (+)
3549	22500,00		1,86	11810	5905	3536	5905
3513	22437,64	62,36	1,92	12191	12001	3503	12001
3481	22375,28	62,36	1,99	11877	12034	3470	12034
3442	22316,33	58,95	2,04	10751	11314	3433	11314
3412	22264,36	51,97	2,09	9713	10232	3396	10232
3380	22218,48	45,88	2,14	8757	9235	3367	9235
3352	22177,93	40,55	2,18	7878	8317	3335	8317
3322	22142,07	35,86	2,21	7071	7474	3307	7474
3300	22110,36	31,71	2,25	6330	6701	3284	6701
3275	22082,34	28,02	2,27	5650	5990	3266	5990
3252	22057,61	24,73	2,30	5025	5338	3235	5338
3233	22035,84	21,77	2,32	4450	4738	3218	4738
3216	22016,72	19,12	2,34	3922	4186	3199	4186
3200	22000,00	16,72	2,35		1961	3188	1961

Nível 3		247 m			Forças equivalentes		
Nós	Coord. Y cm	Distância cm	kgf/cm ²	kgf	kgf (-)	Nós	kgf (+)
3549	22500,00		2,16	13645	6822	3536	6822
3513	22437,64	62,36	2,22	14026	13835	3503	13835
3481	22375,28	62,36	2,28	13611	13819	3470	13819
3442	22316,33	58,95	2,34	12280	12946	3433	12946
3412	22264,36	51,97	2,39	11063	11671	3396	11671
3380	22218,48	45,88	2,43	9950	10506	3367	10506
3352	22177,93	40,55	2,47	8933	9441	3335	9441
3322	22142,07	35,86	2,51	8004	8468	3307	8468
3300	22110,36	31,71	2,54	7155	7579	3284	7579
3275	22082,34	28,02	2,57	6377	6766	3266	6766
3252	22057,61	24,73	2,59	5666	6022	3235	6022
3233	22035,84	21,77	2,61	5013	5339	3218	5339
3216	22016,72	19,12	2,63	4414	4713	3199	4713
3200	22000,00	16,72	2,65		2207	3188	2207

Tabela A-9

Nível 4		250 m			Forças equivalentes		
Nós	Coord. Y cm	Distância cm	kgf/cm ²	kgf	kgf (-)	Nós	kgf (+)
3549	22500,00		2,45	15479	7740	3536	7740
3513	22437,64	62,36	2,51	15861	15670	3503	15670
3481	22375,28	62,36	2,57	15346	15603	3470	15603
3442	22316,33	58,95	2,63	13809	14577	3433	14577
3412	22264,36	51,97	2,68	12412	13111	3396	13111
3380	22218,48	45,88	2,73	11143	11778	3367	11778
3352	22177,93	40,55	2,77	9988	10565	3335	10565
3322	22142,07	35,86	2,80	8937	9462	3307	9462
3300	22110,36	31,71	2,83	7979	8458	3284	8458
3275	22082,34	28,02	2,86	7105	7542	3266	7542
3252	22057,61	24,73	2,89	6306	6706	3235	6706
3233	22035,84	21,77	2,91	5575	5941	3218	5941
3216	22016,72	19,12	2,93	4906	5240	3199	5240
3200	22000,00	16,72	2,94		2453	3188	2453

Nível 5		253 m			Forças equivalentes		
Nós	Coord. Y cm	Distância cm	kgf/cm ²	kgf	kgf (-)	Nós	kgf (+)
3549	22500,00		2,75	17314	8657	3536	8657
3513	22437,64	62,36	2,81	17695	17505	3503	17505
3481	22375,28	62,36	2,87	17080	17388	3470	17388
3442	22316,33	58,95	2,93	15338	16209	3433	16209
3412	22264,36	51,97	2,98	13762	14550	3396	14550
3380	22218,48	45,88	3,02	12336	13049	3367	13049
3352	22177,93	40,55	3,06	11043	11689	3335	11689
3322	22142,07	35,86	3,10	9870	10456	3307	10456
3300	22110,36	31,71	3,13	8803	9337	3284	9337
3275	22082,34	28,02	3,16	7832	8318	3266	8318
3252	22057,61	24,73	3,18	6947	7390	3235	7390
3233	22035,84	21,77	3,20	6138	6542	3218	6542
3216	22016,72	19,12	3,22	5398	5768	3199	5768
3200	22000,00	16,72	3,24		2699	3188	2699

Nível 6		257 m			Forças equivalentes		
Nós	Coord. Y cm	Distância cm	kgf/cm ²	kgf	kgf (-)	Nós	kgf (+)
3549	22500,00		3,14	19760	9880	3536	9880
3513	22437,64	62,36	3,20	20142	19951	3503	19951
3481	22375,28	62,36	3,26	19393	19767	3470	19767
3442	22316,33	58,95	3,32	17377	18385	3433	18385
3412	22264,36	51,97	3,37	15562	16469	3396	16469
3380	22218,48	45,88	3,41	13927	14744	3367	14744
3352	22177,93	40,55	3,45	12450	13188	3335	13188
3322	22142,07	35,86	3,49	11114	11782	3307	11782
3300	22110,36	31,71	3,52	9903	10508	3284	10508
3275	22082,34	28,02	3,55	8802	9352	3266	9352
3252	22057,61	24,73	3,57	7801	8302	3235	8302
3233	22035,84	21,77	3,59	6888	7344	3218	7344
3216	22016,72	19,12	3,61	6053	6471	3199	6471
3200	22000,00	16,72	3,63		3027	3188	3027

Tabela A-11

Nível 244 m, pressão 0,196

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Eleme	Nó	X				Fx kgf	Y				Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf						
							Dano	Fx	Fy	Dano		Fx	Fy													
1	443	0,196	86,8	0,945	1	3330	-51				-114	70,4				203	0,982	-112	199	0,008	-1	2				
						3323	25,4				49	-35,2				-81							48	-79	0	-1
						3324	25,4				25	-35,2				-35										
2	521	0,196	102,2	1,101	2197	3330		-46,2					91,1			0,965	138	-248	0,013	2	-3					
						3331	23,1				143	-46										-257	-46			
						3323		23,1																		
3	455	0,196	89,2	1,182	2199	3331		33,8								0,913			0,051							
						3330		-16,9					41,3													
						3346	-16,9				-43	41,3										81	-39	74	-2	4
4	482	0,196	94,5	0,996	2208	3331		51,3					-79,3		0,944			0,036								
						3346		-25,7					39,7													
						3348	-25,7				-66	39,7										132	-62	125	-2	5
5	616	0,196	120,8	0,955	2211	3348		-70				98,6			0,880	-22	-33	0,094	-2	-4						
						3333	34,9				-25	-49										-37				
						3331			34,9														-49			
6	310	0,196	60,8	0,197	2212	3333		-59,6					12		0,783			0,181								
						3348		29,8																		
						3353	29,8				30	-5,9										-6	23	-5	5	-1
7	155	2,844	440,8	0,458	2232	3353		-395				-395	194,9		195	0,251	-99	49	0,699	-276	136					
						3334	197,7				198	-97,5										-97	50	-24	138	-68
						3333		197,7			198											-97				
8	1010	2,844	2873,5	0,619	2233	3334		2340,0				2601	-1667,8		-1752	0,923			0,923	2402	-1617					
						3353		-1170,0				-1170			833,9								834	-1080	770	
						3357	-1170,0				-2826	833,9										1598	-2610			1475
9	193	2,844	548,5	0,311	2261	3357		-522,2				167,8			0,910			0,910	6203	-1501						
						3336	261,1				6817	-83,9										-1649				
						3334		261,1															-83,9			
10	901	2,844	2562,4	0,484	2262	3336		2268					-1191,9			0,531			0,531	-1741	416					
						3357		-1134,2					595,9									783				
						3376	-1134,2				-3278	595,9														
11	1513	2,844	4303,5	0,087	2293	3336		4287					-373,6			0,721			0,721	-1546	135					
						3376		-2143,6					186,8													
						3341	-2143,6				-2144	186,8										187				

Tabela A-12 (1)

Nível 247 m, pressão 0,294

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Eleme	Nó	X			Fx kgf	Y			Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf		
															Dano	Fx	Fy	Dano	Fx	Fy
1	443	0,294	130,2	0,945	1	3330	-76			-171	105,6			304	0,990	-169	301			
						3323	38,1			73	-52,8			-121		72	-120			
						3324	38,1			38	-52,8			-53		38	-52			
2	521	0,294	153,3	1,101	2197	3330	-69,4				136,7			0,979	210	-377				
						3323	34,7				-68									
3	455	0,294	133,8	1,182	2199	3331	50,7				-124			0,967						
						3330	-25,3			-25,3		61,9								-62
4	482	0,294	141,7	0,996	2208	3331	77,0				-119,0			0,981						
						3346	-38,5			-98	59,5				59,5					
5	616	0,294	181,2	0,955	2211	3348	-105				147,9			0,977	-36	-55	0,012	0	-1	
						3333	52,3			-37	-74									
6	310	0,294	91,2	0,197	2212	3331	-89,4				18			0,971			0,017			
						3348	44,7			44,7		-8,9				-8,9				
7	155	0,294	45,6	0,458	2232	3353	-41			-41	20,2			0,964	-39	19	0,023	-1	0	
						3334	20,5			20	-10,1				-10	20				-10
8	1010	0,294	297,3	0,619	2233	3333	20,5			20	-10,1			0,955	257	-173	0,031	8	-6	
						3334	242,1			269	-172,5				-181	257				-173
9	193	0,294	56,7	0,311	2261	3353	-121,0			-121	86,3			0,949	-116	82	0,037	26	-6	
						3357	-121,0			-292	86,3				165	-279				158
10	901	0,294	265,1	0,484	2262	3357	-54,0				17,4			0,830	669	-162	0,129			
						3336	27,0			705	-8,7				-171					
11	1513	0,294	445,2	0,087	2293	3334	27,0				-8,7			0,879			0,100			
						3336	235				-123,3									
12	256	3,138	803,1	0,163	2281	3357	-117,3			-339	61,6			0,500	-281	67	0,469	396	-65	
						3376	-117,3				61,6				81					
						3336	444				-38,6									
						3376	-221,8				19,3									
						3341	-221,8			-222	19,3				-195	17				
						3341	-792,5			-792	130,3				-792	130				
						3319	396,2			396	-65,2				396	-65				
						3336	396,2			396	-65,2				396	-65				

Tabela A-12 (2)

13	181	3,138	566,5	0,296	2294	3341			-541,8			-3099		165,3		1507
						3318	270,9				6104	-82,7				-2748
						3319		270,9			271		-82,7			-83
14	1840	3,138	5774,3	0,483	2308	3318	5113,5					-2682,4				
						3341			-2556,7				1341,2			
						3340	-2556,7				-6161	1341,2			1332	
15	459	3,138	1440,1	-0,023	2327	3340		-1440					-33,7			
						3317	719,9				9802	16,8			1456	
						3318		719,9					16,8			
16	1380	3,138	4329,2	0,011	2349	3317		4329					-49,1			
						3340			-2164,5				24,6			
						3342	-2164,5				-3686	24,6			-365	
17	1001	3,138	3140,5	-0,251	2375	3317		3042,1					779,9			
						3342		-1521,1					-390,0			
						3316	-1521,1				-7838	-390,0			-2088	
18	1180	3,138	3702,8	-0,393	2376	3316		-3421,2					-1416,4			
						3271	1710,6				7502	708,2			1272	
						3317			1710,6					708,2		
19	1854	3,138	5819,1	-0,097	2377	3271		5791,7					563,8			
						3316			-2895,8					-281,9		
						3264	-2895,8				-2896	-281,9			-282	

0,962	-2981	1449
	5872	-2643
	261	-80
0,935		
	-5761	1246
0,927	9086	1350
0,841		
	-3100	-307
0,852		
	-6681	-1780
0,629	4721	800
0,420		
	-1215	-118

Tabela A-13 (1)

Nível 250 m, pressão 0,294

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Eleme	Nó	X				Fx kgf	Y				Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf			
							Dano	Fx	Fy	Dano		Fx	Fy	Dano	Fx		Fy						
1	443	0,294	130,2	0,945	1	3330	-76				-171	105,6				304	0,994	-170	302				
						3323	38,1				73	-52,8				-121		72	-120				
						3324	38,1				38	-52,8				-53		38	-52				
2	521	0,294	153,3	1,101	2197	3330	-69,4					136,7				0,987	212	-380					
						3331	34,7				215	-68					-385						
						3323	34,7	34,7				-68											
3	455	0,294	133,8	1,182	2199	3331	50,7					-124				0,981							
						3330		-25,3				61,9											
						3346	-25,3				-64	61,9					121	-63				119	
4	482	0,294	141,7	0,996	2208	3331		77,0				-119,0				0,991							
						3346	-38,5	-38,5				59,5											
						3348	-38,5				-98	59,5					199	-98				197	
5	616	0,294	181,2	0,955	2211	3348	-105					147,9				0,991	-37	-56					
						3333	52,3				-37	-74											
						3331			52,3					-74									
6	310	0,294	91,2	0,197	2212	3333	-89,4					18				0,989							
						3348		44,7				-8,9											
						3353	44,7				45	-8,9					-9	44				-9	
7	155	0,294	45,6	0,458	2232	3353	-41				-41	20,2				0,989	-40	20					
						3334	20,5				20	-10,1					-10	20				-10	
						3333		20,5			20		-10,1				-10	20				-10	
8	1010	0,294	297,3	0,619	2233	3334	242,1				269	-172,5				0,988	266	-179					
						3353		-121,0			-121		86,3				86	-120				85	
						3357	-121,0				-292	86,3					165	-289				163	
9	193	0,294	56,7	0,311	2261	3357	-54,0					17,4				0,988	697	-169	0,007		5	-1	
						3336	27,0				705	-8,7					-171						
						3334		27,0				-8,7											
10	901	0,294	265,1	0,484	2262	3336	235					-123,3				0,968			0,016				
						3357		-117,3				61,6											
						3376	-117,3				-339	61,6					81	-328					78
11	1513	0,294	445,2	0,087	2293	3336	444					-38,6				0,983			0,010				
						3376	-221,8	-221,8				19,3											
						3341	-221,8				-222	19,3					19	-218					19
12	256	0,294	75,3	0,163	2281	3341	-74,3				-74	12,2				0,977	-73	12	0,015		-1	0	
						3319	37,1				37	-6,1					-6	36					-6
						3336		37,1			37		-6,1				-6	36					-6
13	181	0,294	53,1	0,296	2294	3341	-50,8				-290	15,5				0,974	-283	138	0,016		-5	2	
						3318	25,4				572	-7,8					-258	558					-251
						3319	25,4	25,4			25		-7,8				-8	25					-8

Tabela A-13 (2)

14	1840	0,294	541,3	0,483	2308	3318		479,4					-251,5						
						3341				-239,7							125,7		
						3340	-239,7					-578	125,7						125
15	459	0,294	135,0	-0,023	2327	3340		-135					-3,2						
						3317	67,5					919	1,6					136	
						3318		67,5								1,6			
16	1380	0,294	405,9	0,011	2349	3317		406					-4,6						
						3340			-202,9						2,3				
						3342	-202,9					-346	2,3				-34		
17	1001	0,294	294,4	-0,251	2375	3317		285,2						73,1					
						3342		-142,6							-36,6				
						3316	-142,6				-735	-36,6					-196		
18	1180	0,294	347,1	-0,393	2376	3316		-320,7					-132,8						
						3271	160,4					703	66,4				119		
						3317			160,4						66,4				
19	1854	0,294	545,5	-0,097	2377	3271		543,0					52,9						
						3316		-271,5							-26,4				
						3264	-271,5				-271	-26,4					-26		
20	470	3,432	1613,0	-0,090	2430	3264		-1607				-1607	-144					-144	
						3242	803,3					803	72					72	
						3271		803				803		72,1			72		
21	719	3,432	2467,1	0,270	2431	3264		-2377,9				-4375		657,7				1210	
						3248	1188,9					12884	-328,8					1167	
						3242		1188,9				1189		-328,8				-329	
22	1208	3,432	4144,7	0,270	2434	3248		3994,7					-1104,8						
						3264			-1997,4						552,4				
						3314	-1997,4				-2769	552,4					461		
23	453	3,432	1553,5	-0,118	2513	3248		1542,7						182,3					
						3314		-771						-91					
						3306	-771,4					-1598	-91,2					-419	
24	518	3,432	1777,8	-0,378	2584	3248		1652,5						655,6					
						3306		-826,3							-327,8				
						3241	-826,3					-14437	-327,8					-3980	
25	2819	3,432	9675,6	-0,373	2551	3241		-9010,3					-3525,7						
						3203	4505,2					14678	1762,8					2221	
						3248				4505,2					1762,8				
26	2681	3,432	9204,0	-0,027	2585	3203		9200,6					252,2						
						3241		-4600,3							-126,1				
						3201	-4600,3					-8852	-126,1					-440	
27	579	3,432	1987,7	-0,208	2604	3201		-1944,7					-411,2						
						3150	972,3					2126	205,6					157	
						3203		972,3							205,6				
28	673	3,432	2309,4	0,042	2646	3201		-2307,4						97,5					
						3147	1153,7					1154	-48,8					-49	
						3150		1153,7						-48,8					

0,967		
	-559	121
0,963	885	131
0,940		
	-325	-32
0,941		
	-691	-184
0,890	626	106
0,846		
	-230	-22
	-604	-54
0,376	302	27
	302	27

0,022		
	-13	3
0,026	24	3
0,046		
	-16	-2
0,047		
	-34	-9
0,096	68	11
0,139		
	-38	-4
	-965	-87
0,601	482	43
	482	43
0,975	-4264	1179
	12557	1137
	1159	-320
0,825		
	-2284	381
0,934		
	-1493	-391
0,941		
	-13588	-3745
0,908	13330	2017
0,862		
	-7633	-379
0,588	1249	92
0,472	545	-23

Tabela A-14 (1)

Nível 253 m, pressão 0,294

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Eleme	Nó	X				Fx kgf	Y				Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf		
							Dano	Fx	Fy	Dano		Fx	Fy									
1	443	0,294	130,2	0,945	1	3330	-76				-171	105,6				304	0,997	-170	303			
						3323	38,1				73	-52,8				-121		73	-121			
						3324	38,1				38	-52,8				-53		38	-53			
2	521	0,294	153,3	1,101	2197	3330		-69,4				136,7				0,992	213	-382				
						3331	34,7				215	-68										-385
3	455	0,294	133,8	1,182	2199	3323		34,7				-68				0,989						
						3330		50,7				-124			61,9							
4	482	0,294	141,7	0,996	2208	3330		-25,3			-64	61,9				0,996	-63	120				
						3331		77,0				-119,0										
5	616	0,294	181,2	0,955	2211	3346		-38,5			-98	59,5				0,996	-98	198				
						3348		-105				147,9										
6	310	0,294	91,2	0,197	2212	3333		52,3			-37	-74				0,995	-37	-56				
						3331						18			-74							
7	155	0,294	45,6	0,458	2232	3333		-89,4								0,995	44	-9				
						3348		44,7				-8,9										
8	1010	0,294	297,3	0,619	2233	3353					45	-8,9				0,995	-41	20				
						3353		-41			-41	20,2			20							
9	193	0,294	56,7	0,311	2261	3334		20,5			20	-10,1				0,995	20	-10				
						3333		20,5			20			-10,1	-10							
10	901	0,294	265,1	0,484	2262	3334		242,1			269	-172,5				0,995	268	-180				
						3353		-121,0			-121			86,3	86							
11	1513	0,294	445,2	0,087	2293	3357		-121,0			-292	86,3				0,995	-291	164				
						3357		-54,0				17,4										
12	256	0,294	75,3	0,163	2281	3336		27,0			705	-8,7				0,995	702	-170				
						3334		27,0				-8,7										
13	181	0,294	53,1	0,296	2294	3336		235				-123,3				0,996	-334	80				
						3357		-117,3			-339	61,6			81							
14	1513	0,294	445,2	0,087	2293	3376		444				-38,6				0,994	-221	19				
						3376		-221,8				19,3										
15	256	0,294	75,3	0,163	2281	3341		-74,3			-222	19,3				0,993	-74	12				
						3341		-74,3			-74			12,2	12							
16	181	0,294	53,1	0,296	2294	3319		37,1			37	-6,1				0,992	37	-6				
						3336		37,1			37			-6,1	-6							
17	181	0,294	53,1	0,296	2294	3341		-50,8			-290	15,5				0,992	568	-256				
						3319		25,4			572	-7,8			-258							
18	181	0,294	53,1	0,296	2294	3319		25,4			25	-7,8				0,992	25	-8				
						3319		25,4			25			-8								

Tabela A-14 (3)

29	3301	3,727	12301,0	-0,502	2668	3147	#####			11872	5924,2			6327	0,634	7528	4012	0,337	3996	2130
						3201			-5390,2	-5390			-2962,1	-2962		-3418	-1878		-1814	-997
						3200	-5390,2			-5936	-2962,1			-3164		-3764	-2006		-1998	-1065
30	312	3,727	1163,7	-0,354	2677	3147		1091,7				403,0			0,57			0,404		
						3200		-545,8				-201,5								
						3145	-545,8			-546	-201,5			-201						
31	4347	3,727	16199,8	-0,601	2715	3145		-13359		-14290		-9164,0		-9239	0,57			0,404		
						3147			6679,3	6679			4582,0	4582						
						3106	6679,3			16098	4582,0			5551						
32	502	3,727	1868,9	-0,080	2716	3106		1862,9				149,6			0,57			0,404		
						3145			-931,5				-74,8							
						3100	-931,5			-29573	-74,8			-1824						
33	4079	3,727	15200,7	-0,108	2778	3100		-15112				-1639,0			0,57			0,404		
						3051	7556,0			11644	819,5			910						
						3106			7556			819,5								
34	2194	3,727	8177,3	-0,022	2809	3100		-8175,3				-181,2			0,57			0,404		
						3036	4087,7			25020	90,6			3391						
						3051		4087,7			90,6									
35	2874	3,727	10708,6	0,013	2825	3036		#####				-142,0			0,57			0,404		
						3100			-5353,8			71,0								
						3095	-5353,8			-10466	71,0			-1650						
36	2895	3,727	10788,3	-0,325	2935	3036		#####				3442,8			0,57			0,404		
						3095		-5112,1				-1721,4								
						3039	-5112,1			-5112	-1721,4			-1721						

Tabela A-15 (1)

Nível 257 m, pressão 0,392

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Eleme	Nó	X			Fx kgf	Y			Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf						
							Dano	Fx	Fy		Dano	Fx	Fy		Dano	Fx	Fy							
1	443	0,392	173,6	0,945	1	3330	-102				-228	140,8			406									
						3323	50,8				97	-70,4					0,998	-228	405					
						3324	50,8				51	-70,4						97	-161					
2	521	0,392	204,3	1,101	2197	3330		-92,5				182,2												
						3331	46,2				286	-91					0,995	285	-511					
						3323	46,2						-91											
3	455	0,392	178,4	1,182	2199	3331		67,6				-165												
						3330		-33,8				82,6					0,992							
						3346	-33,8				-85	82,6						-84	161					
4	482	0,392	188,9	0,996	2208	3331		102,7				-158,6												
						3346		-51,3				79,3					0,998							
						3348	-51,3				-131	79,3						-131	264					
5	616	0,392	241,6	0,955	2211	3348		-140				197,3												
						3333	69,8				-49	-99					0,998	-49	-75					
						3331			69,8					-99										
6	310	0,392	121,5	0,197	2212	3333		-119,2				24												
						3348		59,6				-11,9					0,998							
						3353	59,6				60	-11,9						59	-12					
7	155	0,392	60,8	0,458	2232	3353		-55			-55	26,9			27									
						3334	27,3				27	-13,4					0,998	27	-13					
						3333		27,3			27		-13,4					27	-13					
8	1010	0,392	396,3	0,619	2233	3334		322,8			359	-230,0			-242									
						3353		-161,4			-161		115,0				0,998	-161	115					
						3357	-161,4				-390	115,0						-389	220					
9	193	0,392	75,7	0,311	2261	3357		-72,0				23,1												
						3336	36,0				940	-11,6					0,998	938	-227					
						3334		36,0					-11,6											
10	901	0,392	353,4	0,484	2262	3336		313				-164,4												
						3357		-156,4					82,2				0,992							
						3376	-156,4				-452	82,2						-449	107					
11	1513	0,392	593,6	0,087	2293	3336		591				-51,5												
						3376		-295,7				25,8					0,998							
						3341	-295,7				-296	25,8						-295	26					
12	256	0,392	100,4	0,163	2281	3341		-99,1			-99	16,3			16									
						3319	49,5				50	-8,1					0,997	49	-8					
						3336			49,5		50			-8,1				49	-8					
13	181	0,392	70,8	0,296	2294	3341		-67,7			-387	20,7			188									
						3318	33,9				763	-10,3					0,996	-386	188					
						3319		33,9			34		-10,3					34	-10					

Tabela A-15 (4)

29	3301	0,392	1294,8	-0,502	2668	3147 3201 3200	0,002	2 -1 -1	1 0 -1			
30	312	0,392	122,5	-0,354	2677	3147 3200 3145	0,001					
31	4347	0,392	1705,2	-0,601	2715	3145 3147 3106	0,001	0 -2 1 2	0 -1 1 1			
32	502	0,392	196,7	-0,080	2716	3106 3145 3100	0,002					
33	4079	0,392	1600,1	-0,108	2778	3100 3051 3106	0,002					
34	2194	0,392	860,8	-0,022	2809	3100 3036 3051	0,003			0,001	3	0
35	2874	0,392	1127,2	0,013	2825	3036 3100 3095	0,005			0,002		
36	2895	0,392	1135,6	-0,325	2935	3036 3095 3039	0,004			0,001		
37	3472	4,119	14299,5	-0,586	2896	3039 2983 3036	0,005	-94 136 31	-46 46 21	0,001	-25 36 8	-12 12 5
38	3020	4,119	12438,8	-0,140	2936	2983 3039 3015	0,010			0,002		
39	4059	4,119	16717,6	-0,386	2946	3015 2945 2983	0,015			0,003		
40	5645	4,119	23250,2	-0,130	2947	2945 3015 2947	0,027	737 -311 -1006	141 -41 -184	0,003	94 -40 -128	18 -5 -23
41	2338	4,119	9628,9	-0,473	3002	2947 2899 2945	0,0479			0,004	173	18
42	8363	4,119	34447,8	-0,055	3003	2899 2947 2898	0,084			0,006		
43	1	4,119	5,8	-0,612	3056	2898 2845 2899	0,318			0,018	0	0

Tabela A-15 (5)

44	4	4,119	16,6	-0,122	3057	2898	0,94	-17636	-2156	0,031	-589	-72
					2843	2843		59318	23435		1981	783
					2845	2843		8	1		0	0
45	9170	4,119	37770,6	-0,122	3161	2843	0,620			0,330		
					2898	2898						
					2904	2904		-15857	-3442		-8451	-1835
46	3682	4,119	15164,9	-0,445	3162	2843	0,750			0,212		
					2904	2904						
					2846	2846		-9597	-7626		-2718	-2160
47	4430	4,119	18247,8	-0,859	3223	2843	0,278			0,652		
					2846	2846						
					2796	2796		-1659	-1924		-3887	-4508
48	4456	4,119	18355,6	-1,310	3170	2796				0,186	-10566	-3330
					2795	2795					2479	2512
					2843	2843					439	1645
49	5802	4,119	23897,8	-0,402	3213	2796				0,684	17852	72
					2759	2759						
					2795	2795						
50	7664	4,119	31568,8	0,294	3212	2796				0,334	5051	-1527
					2760	2760						
					2759	2759						

Tabela A-16 (1)

Forças nodais equivalentes à pressão hidráulica na fratura - PPcf12p - Casa de Força

	h1	h2	h3	h4	h5	h6
Nível 225	1,667	1,863	2,158	2,452	2,746	3,138
Nível 220	2,158	2,354	2,648	2,942	3,236	3,629

Pressão na fratura

Nível 242 m (h1=22m), pressão

2,158

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Força nos eixos		Elemen	Nó	X			Fx kgf	Y			Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf				
					x	y											Dano	Fx	Fy		
1	467	2,158	1008,4	0,722	-756,9	666,3	1	3200	-756,9			-1593	666,3			2219	0,995	-1586	2209		
					378,4	-333,2		3187	378,4			687	-333,2			-988				683	-983
					378,4	-333,2		3188	378,4			378	-333,2			-333				377	-332
2	671	2,158	1447,3	1,131	-616,2	1309,5	1137	3200	-616,2				1309,5			0,990	1977	-1938			
					308,1	-654,8		3201	308,1			1997	-654,8						-1958		
					308,1	-654,8		3187	308,1				-654,8								
3	304	2,158	656,0	0,836	439,6	-486,9	1139	3201	439,6				-486,9			0,982	-302	334			
					-219,8	243,5		3200		-219,8			243,5								
					-219,8	243,5		3221	-219,8			-307	243,5						340		
4	121	2,158	261,2	0,836	175,1	-193,9	1148	3201		175,1			-193,9			0,994	-2266	1378			
					-87,5	96,9		3221		-87,5			96,9								
					-87,5	96,9		3222	-87,5			-2281	96,9						1387		
5	1151	2,158	2483,2	0,525	-2148,8	1244,6	1150	3222	-2149				1244,6			0,993	3295	-1962			
					1074,4	-622,3		3202	1074,4			3318	-622,3						-1975		
					1074,4	-622,3		3201		1074,4				-622,3							
6	59	2,158	127,3	0,801	88,6	-91,4	1151	3202	88,6				-91,4			0,992	-943	572			
					-44,3	45,7		3222		-44,3			45,7								
					-44,3	45,7		3225	-44,3			-950	45,7						576		
7	973	2,158	2098,6	0,530	1811,0	-1060,4	1165	3202	1811				-1060			0,991	-3144	2102			
					-905,5	530,2		3225		-905,5			530,2								
					-905,5	530,2		3203	-905,5			-3172	530,2						2121		
8	369	2,158	796,4	0,530	-687,2	402,4	1160	3203	-687,2				402,4			0,989	361	-212			
					343,6	-201,2		3184	343,6			365	-201,2						-214		
					343,6	-201,2		3202		343,6				-201,2							

Tabela A-17 (1)

Nível 244 m (h2=24m), pressão 2,354

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Elemen	Nó	X			Fx kgf	Y			Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf		
							Dano	Fx	Fy		Dano	Fx	Fy		Dano	Fx	Fy			
1	467	0,196	91,7	0,722	1	3200	-68,8			-145	60,6			202	0,997	-144	201	0,001	0	0
						3187	34,4			62	-30,3			-90		62	-90		0	0
						3188	34,4			34	-30,3			-30		34	-30		0	0
2	671	0,196	131,6	1,131	1137	3200	-56,0				119,0			0,994	180	-177	0,002	0	0	
						3201	28,0			182	-59,5				-178					
3	304	0,196	59,6	0,836	1139	3187	28,0				-59,5			0,990			0,003			
						3201	40,0				-44,3									
						3200		-20,0			22,1								0	0
4	121	0,196	23,7	0,836	1148	3221	-20,0			-28	22,1			0,996	-28	31	0,001			
						3201		15,9				-17,6								
						3222	-8,0			-207	8,8				126	-207		126	0	0
5	1151	0,196	225,7	0,525	1150	3222	-195			302	-56,6			0,996	301	-179	0,001	0	0	
						3202	97,7													
						3201		97,7				-56,6								
6	59	0,196	11,6	0,801	1151	3202		8,1			-8,3			0,996			0,001			
						3222		-4,0			4,2									
						3225	-4,0			-86	4,2				52	-86		52	0	0
7	973	0,196	190,8	0,530	1165	3202		165			-96			0,995			0,002			
						3225		-82,3			48,2									
						3203	-82,3			-288	48,2				193	-287		192	-1	0
8	369	0,196	72,4	0,530	1160	3203	-62,5				36,6			0,995	33	-19	0,002	0	0	
						3184	31,2			33	-18,3									
						3202		31,2				-18,3								
9	23	0,196	4,6	0,551	1170	3203		-3,9			2,4			0,995	26	-19	0,002	0	0	
						3181	2,0			26	-1,2									
						3184		2,0			-1,2									
10	304	0,196	59,6	0,648	1179	3203		-47,5			36,0			0,989	365	-201	0,004	1	-1	
						3205	23,8			369	-18,0									
						3181		23,8			-18,0									
11	1178	0,196	231,0	0,648	1191	3205		184,2			-139			0,983			0,006			
						3203				-92			69,7							
						3226	-92			-99	69,7				73	-97		72	-1	0
12	74	0,196	14,6	0,456	1192	3205		13,1			-6,4			0,989			0,004			
						3226		-6,5			3,2									
						3246	-6,5			-19	3,2				5	-19		5	0	0

Tabela A-18 (1)

Nível 247 m (h3=27m), pressão 2,648

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Elemen	Nó	X				Fx kgf	Y				Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf		
							Dano	Fx	Fy	Dano		Fx	Fy	Dano	Fx		Fy					
1	467	0,294	137,5	0,722	1	3200	-103,2				-217	90,9				303	0,999	-217	302			
						3187	51,6				94	-45,4				-135				93	-135	
						3188	51,6				52	-45,4				-45						52
2	671	0,294	197,4	1,131	1137	3200		-84,0				178,6				0,996	271	-266				
						3201	42,0				272	-89,3							-267			
						3187		42,0					-89,3									
3	304	0,294	89,5	0,836	1139	3201		60,0				-66,4				0,994						
						3200			-30,0			33,2										
						3221	-30,0				-42	33,2							46	-42	46	
4	121	0,294	35,6	0,836	1148	3201		23,9				-26,4			0,998							
						3221		-11,9				13,2										
						3222	-11,9				-311	13,2							189	-310	189	
5	1151	0,294	338,6	0,525	1150	3222		-293				169,7			0,998	452	-269					
						3202	146,5				452	-84,9							-269			
						3201			146,5				-84,9									
6	59	0,294	17,4	0,801	1151	3202		12,1				-12,5			0,998							
						3222			-6,0				6,2									
						3225	-6,0				-130	6,2							79	-129	78	
7	973	0,294	286,2	0,530	1165	3202		247				-145			0,998							
						3225			-123,5			72,3										
						3203	-123,5				-433	72,3							289	-432	289	
8	369	0,294	108,6	0,530	1160	3203		-93,7				54,9			0,998	50	-29					
						3184	46,9				50	-27,4							-29			
						3202			46,9					-27,4								
9	23	0,294	6,9	0,551	1170	3203		-5,9				3,6			0,998	39	-29					
						3181	2,9				39	-1,8							-29			
						3184		2,9					-1,8									
10	304	0,294	89,4	0,648	1179	3203		-71,3					53,9		0,994	550	-303					
						3205	35,7				553	-27,0							-305			
						3181		35,7					-27,0									
11	1178	0,294	346,5	0,648	1191	3205		276,3				-209			0,992							
						3203												104,5				
						3226	-138				-148	104,5							109	-147	108	
12	74	0,294	21,8	0,456	1192	3205		19,6				-9,6		0,995								
						3226			-9,8				4,8									
						3246	-9,8				-29	4,8								-28	7	

Tabela A-18 (4)

42	2362	2,648	6253,5	-0,283	2109	2825		-6005				-22833		-1745				-332
						2743	3003					10341	872					256
						2806			3002,6	3003				872			872	
43	5562	2,648	14727,6	0,084	2169	2825		-14676						1232,4				
						2769	7338,0				26674	-616,2					6122	
						2743		7338,0					-616,2					
44	1631	2,648	4318,4	0,084	2170	2769		4303						-361,4				
						2825			-2151,6					180,7				
						2904	-2151,6			-2847	180,7					113		
45	528	2,648	1397,4	-0,096	2256	2769			1390,9					134,4				
						2904		-695,5					-67,2					
						2893	-695,5			-1425	-67,2					-334		
46	587	2,648	1553,9	-0,351	2299	2769			1459,2					534,3				
						2893		-729,6				-267,1						
						2782	-729,6			-2299	-267,1					-1096		
47	1341	2,648	3549,6	-0,486	2298	2769				3139,1				1657,1				
						2782		-1569,5				-828,6						
						2697	-1569,5			-19657	-828,6				-10377			
48	7724	2,648	20452,6	-0,486	2221	2697		-18087					-9548					
						2686	9043,5				9044	4774,2				4774		
						2769										4774,2		

0,935	-21355	-310
	9672	240
0,898	2808	816
	23940	5495
0,455		
	-1295	52
0,564		
	-803	-188
0,609		
	-1399	-667
0,540		
	-10613	-5602
0,276		
	2500	1320

Tabela A-19 (1)

Nível 250 m (h4=30m), pressão 2,942

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Elemen	Nó	X				Fx kgf	Y				Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf			Forças nodais equivalentes, kgf		
							Dano	Fx	Fy	Dano		Fx	Fy									
1	467	0,294	137,5	0,722	1	3200	-103,2				-217	90,9			303	0,999	-217	302	0,999	94	-135	
						3187	51,6			94	-45,4			-135								
						3188	51,6			52	-45,4			-45								
2	671	0,294	197,4	1,131	1137	3200		-84,0				178,6			-267	0,997	272	-266	0,997	272	-266	
						3201	42,0			272	-89,3			-267								
						3187		42,0			-89,3											
3	304	0,294	89,5	0,836	1139	3201		60,0				-66,4				0,995	-42	46	0,995	-42	46	
						3200		-30,0			33,2											
						3221	-30,0			-42	33,2			46								
4	121	0,294	35,6	0,836	1148	3201		23,9				-26,4				0,999	-311	189	0,999	-311	189	
						3221		-11,9			13,2											
						3222	-11,9			-311	13,2			189								
5	1151	0,294	338,6	0,525	1150	3222		-293				169,7				0,999	452	-269	0,999	452	-269	
						3202	146,5			452	-84,9			-269								
						3201			146,5			-84,9										
6	59	0,294	17,4	0,801	1151	3202		12,1				-12,5				0,999	-129	78	0,999	-129	78	
						3222		-6,0			6,2											
						3225	-6,0			-130	6,2			79								
7	973	0,294	286,2	0,530	1165	3202		247				-145				0,999	-432	289	0,999	-432	289	
						3225		-123,5			72,3											
						3203	-123,5			-433	72,3			289								
8	369	0,294	108,6	0,530	1160	3203		-93,7				54,9				0,999	50	-29	0,999	50	-29	
						3184	46,9			50	-27,4			-29								
						3202			46,9			-27,4										
9	23	0,294	6,9	0,551	1170	3203		-5,9				3,6				0,999	39	-29	0,999	39	-29	
						3181	2,9			39	-1,8			-29								
						3184		2,9			-1,8											
10	304	0,294	89,4	0,648	1179	3203		-71,3				53,9				0,996	551	-303	0,996	551	-303	
						3205	35,7			553	-27,0			-305								
						3181		35,7			-27,0											
11	1178	0,294	346,5	0,648	1191	3205		276,3				-209				0,994	-147	109	0,994	-147	109	
						3203				-138				104,5								
						3226	-138			-148	104,5			109								
12	74	0,294	21,8	0,456	1192	3205		19,6				-9,6				0,996	-28	7	0,996	-28	7	
						3226		-9,8			4,8											
						3246	-9,8			-29	4,8			7								

Tabela A-19 (3)

28	749	0,294	220,2	0,334	1553	3048		-208,1					72,3																			
						3002	104,0				130	-36,1											-40									
						3049				104,0														-36,1								
29	177	0,294	52,2	0,155	1592	3048			-51,6						8,0																	
						2996	25,8					2103	-4,0										155									
						3002		25,8							-4,0																	
30	3436	0,294	1010,9	-0,061	1614	2996		1009,1							61,9																	
						3048							-504,5										-30,9									
						3044	-504,5										-966	-30,9						-95								
31	3171	0,294	932,9	-0,139	1623	2996			923,9						128,9																	
						3044		-462,0															-64,4									
						2984	-462,0																	-25								
32	1002	0,294	294,9	0,217	1665	2984		-287,9							63,6																	
						2944	144,0																	-39								
						2996				144,0															-31,8							
33	353	0,294	104,0	0,133	1666	2984			-103,1						13,8																	
						2937	51,5																	170								
						2944		51,5																		-6,9						
34	4249	0,294	1250,2	-0,060	1735	2937		1247,9							75,2																	
						2984																			-37,6							
						2972	-624,0																				-102					
						2937				1344,0										128,2												
35	4589	0,294	1350,1	-0,095	1736	2972		-672,0							-64,1																	
						2922	-672,0																			-10						
						2922		-186,2																					52,2			
36	657	0,294	193,4	0,273	1813	2855	93,1																			-27						
						2937				93,1																			-26,1			
						2922				-21,1									2,2													
37	72	0,294	21,3	0,103	1985	2857	10,6																				-1					
						2855		10,6																								
						2857		1440							1945																-1,1	
38	4901	0,294	1441,8	0,042	1984	2857		1440																			113					
						2922				-720,2																				31		
						2929	-720,2																								-307	
39	3631	0,294	1068,3	-0,332	2029	2929		-1009,8																				-348,7				
						2806	504,9																								338	
						2857				504,9																						174,3
40	3497	0,294	1028,9	0,023	2044	2806		1028,6																					-23,2			
						2929				-514,3																					11,6	
						2912	-514,3																									11,6
41	4248	0,294	1249,8	-0,150	2117	2806			1236																			186,5				
						2912		-617,9																								-93,2
						2825	-617,9																									

0,995	129	-40				
0,994	2091	154	0,002	3	0	
0,994			0,002			
0,994	-960	-95	0,002	-2	0	
0,994			0,002			
0,994	-1468	-25	0,002	-3	0	
0,993	194	-38	0,002	0	0	
0,992	2716	169	0,002	6	0	
0,992			0,003			
0,992	-1285	-101	0,003	-3	0	
0,992			0,003			
0,992	-873	-10	0,003	-2	0	
0,987	102	-27	0,005	1	0	
0,986	10	-1	0,005	0	0	
0,984	1914	111	0,006	11	1	
0,984	-709	30	0,006	-4	0	
0,984	-2208	-302	0,006	-13	-2	
0,983	2723	332	0,006	18	2	
0,963			0,014			
0,963	-1090	-79	0,014	-16	-1	
0,966			0,015			
0,966	-597	-90	0,015	-9	-1	

Tabela A-20 (4)

42	2362	0,294	694,8	-0,283	2109	2825		-667			-2537		-194				-37
						2743	334			1149	97					28	
						2806			333,6	334				97		97	
43	5562	0,294	1636,4	0,084	2169	2825		-1631					136,9				
						2769	815,3			2964	-68,5					680	
						2743		815,3				-68,5					
44	1631	0,294	479,8	0,084	2170	2769		478					-40,2				
						2825			-239,1				20,1				
						2904	-239,1			-316	20,1					13	
45	528	0,294	155,3	-0,096	2256	2769		154,5					14,9				
						2904		-77,3				-7,5					
						2893	-77,3			-158	-7,5					-37	
46	587	0,294	172,7	-0,351	2299	2769			162,1					59,4			
						2893		-81,1				-29,7					
						2782	-81,1			-255	-29,7					-122	
47	1341	0,294	394,4	-0,486	2298	2769			348,8					184,1			
						2782		-174,4				-92,1					
						2697	-174,4			-2184	-92,1					-1153	
48	7724	0,294	2272,5	-0,486	2221	2697		-2010					-1061				
						2686	1004,8			1005	530,5					530	
						2769			1004,8							530,5	
49	3817	0,294	1123	-0,279	2296	2697		-1080			-2634		-309				-187
						2643	539,8			1317	155					94	
						2686		539,8		540		155				155	
50	5300	0,294	1559	0,078	2295	2697			-1554					122			
						2632	777,2			777	-61					-61	
						2643		777,2				-61,0					
51	3080	0,294	906	0,301	2196	2632		866			2110		-268				165
						2697				-433	-433					134	134
						2685	-433			-1055	134					-83	
52	4478	0,294	1318	-0,335	4067	2632		1244						434			
						2685		-622,1				-217					
						2616	-622,1			-622	-217					-217	
53	3846	3,236	12446	-0,484	4103	2616		-11017			-24967		-5791,3				-5151
						2558	5508,4			12483	2895,7					2575	
						2632			5508	5508				2895,7		2896	
54	4315	3,236	13965	0,046	4104	2616		-13950					640,8				
						2535	6975,0			6975	-320,4					-320	
						2558		6975				-320,4					
55	5569	3,236	18023	0,089	4134	2535		17952			35325		-1599,0				7889
						2616			-8976		-8976					799,5	800
						2606	-8976,0			-17662	799,5					-3944	
56	6116	3,236	19795	-0,500	4158	2535		17373						9487,7			
						2606		-8686				-4743,8					
						2503	-8686,4			-8686	-4743,8					-4744	
0,986	-2501	-36	1133	28	0,006	6	0										
								0,980	2904	667	0,007	21	5				
														0,938	-297	12	0,023
0,961	-152	-36	0,016	-3	-1												
						0,971	-248	-118	0,014	-3	-2						
												0,975	-2131	-1125	0,011	-24	-13
0,914	918	485	0,047	47	25												
						0,964	-2538	-180	0,018	-49	-3						
												0,966	1269	90	0,017	24	2
0,947	520	149	0,030	10	3												
						0,936	750	-59	0,041	13	-1						
												0,812	1999	156	0,156	64	5
0,764	-410	127	0,198	-13	4												
						0,906	-999	-78	0,906	-32	-2						
												0,883	-582	-203	0,883	-26	-9
0,906	-20275	-4183	0,906	-3888	-802												
						0,883	10137	2091	0,906	1944	401						
												0,883	4473	2351	0,883	858	451
0,883	5327	-245	0,883	1381	-63												
						0,883	32006	7148	0,883	-8133	724						
												0,883	-16003	-3574	0,883	-7667	-4187
0,883	-8133	724	0,883	-16003	-3574												
						0,883	-7667	-4187	0,883	-7667	-4187						

Tabela A-21 (1)

Nível 257 m (h6=37m), pressão 3,629

#	Area cm ²	Pressão kgf/cm ²	Força kgf	Ângulo rad	Elemen	Nó	X				Fx kgf	Y				Fy kgf	Forças nodais equivalentes, kgf		
							Dano	Fx	Fy										
1	467	0,392	183,3	0,722	1	3200	-137,6				-290	121,2				404	1,000	-289	403
						3187	68,8				125	-60,6				-180		125	-180
						3188	68,8				69	-60,6				-61		69	-61
2	671	0,392	263,1	1,131	1137	3200		-112,0				238,1				0,998	362	-355	
						3201	56,0				363	-119,0					-356		
						3187		56,0					-119,0						
3	304	0,392	119,3	0,836	1139	3201		79,9				-88,5				0,996			
						3200			-40,0				44,3						
						3221	-40,0				-56	44,3					62		-56
4	121	0,392	47,5	0,836	1148	3201			31,8			-35,3				0,999			
						3221		-15,9				17,6							
						3222	-15,9				-415	17,6					252		-414
5	1151	0,392	451,5	0,525	1150	3222		-391				226,3				0,999			
						3202	195,3				603	-113,1					-359	603	-359
						3201			195,3				-113,1						
6	59	0,392	23,1	0,801	1151	3202		16,1				-16,6				0,999			
						3222			-8,1			8,3							
						3225	-8,1				-173	8,3					105		-173
7	973	0,392	381,6	0,530	1165	3202			329			-193				0,999			
						3225		-164,6				96,4							
						3203	-164,6				-577	96,4					386		-576
8	369	0,392	144,8	0,530	1160	3203		-125,0				73,2				0,999	66	-39	
						3184	62,5				66	-36,6					-39		
						3202			62,5								-36,6		
9	23	0,392	9,2	0,551	1170	3203			-7,8			4,8				0,999			
						3181	3,9				51	-2,4					-38	51	-38
						3184		3,9					-2,4						
10	304	0,392	119,2	0,648	1179	3203			-95,1			71,9				0,997	736	-405	
						3205	47,5				738	-36,0					-406		
						3181		47,5					-36,0						
11	1178	0,392	461,9	0,648	1191	3205		368,4				-279				0,996			
						3203				-184					139,3				
						3226	-184				-197	139,3					146		-196
12	74	0,392	29,1	0,456	1192	3205		26,1				-12,8				0,998			
						3226		-13,1					6,4						
						3246	-13,1					-38	6,4					10	

ANEXO B - Cálculo da Condutividade Hidráulica e Subpressão.

- Tabela B-1 Condutividade hidráulica calculada para os elementos danificados do vertedouro sob o primeiro a sexto nível de água.
- Tabela B-2 Condutividade hidráulica calculada para os elementos danificados da casa de força sob o primeiro a quarto nível de água.
- Tabela B-3 Cálculo de subpressão para o vertedouro sob o primeiro a sexto nível.
- Tabela B-4 Cálculo de subpressão para a casa de força sob o primeiro a sexto nível.

Tabela B-1 (1)

#	Elemento	e_{frat}	K_f	l	K_t
		cm	cm/s	cm	cm/s
Nível 1					
1	1	0,00169	0,02338	8,78	1,0E-03
2	2197	0,00156	0,01978	9,21	1,0E-03
3	2199	0,00065	0,00341	9,73	1,0E-03
4	2208	0,00082	0,00546	10,30	1,0E-03
5	2211	0,00015	0,00018	10,29	1,0E-03
6	2212	0,00010	0,00009	10,46	1,0E-03
Nível, 2 pressão fratura 1					
1	1	0,00251	0,05135	8,78	1,0E-03
2	2197	0,00229	0,04290	9,21	1,0E-03
3	2199	0,00133	0,01448	9,73	1,0E-03
4	2208	0,00152	0,01898	10,30	1,0E-03
5	2211	0,00049	0,00199	10,29	1,0E-03
6	2212	0,00040	0,00128	10,46	1,0E-03
7	2232	0,00004	0,00001	10,91	1,0E-03
Nível, 2 pressão fratura 2					
1	1	0,00396	0,12799	8,78	1,1E-03
2	2197	0,00392	0,12543	9,21	1,1E-03
3	2199	0,00306	0,07653	9,73	1,0E-03
4	2208	0,00344	0,09688	10,30	1,0E-03
5	2211	0,00214	0,03728	10,29	1,0E-03
6	2212	0,00229	0,04300	10,46	1,0E-03
7	2232	0,00142	0,01645	10,91	1,0E-03
8	2233	0,00098	0,00780	10,93	1,0E-03
9	2261	0,00073	0,00437	10,94	1,0E-03
10	2262	0,00017	0,00024	14,86	1,0E-03
11	2293	0,00027	0,00061	14,23	1,0E-03
Nível, 3 pressão fratura 2					
1	1	0,00423	0,14628	8,78	1,1E-03
2	2197	0,00417	0,14223	9,21	1,1E-03
3	2199	0,00331	0,08964	9,73	1,0E-03
4	2208	0,00374	0,11444	10,30	1,0E-03
5	2211	0,00252	0,05198	10,29	1,0E-03
6	2212	0,00276	0,06230	10,46	1,0E-03
7	2232	0,00210	0,03591	10,91	1,0E-03
8	2233	0,00168	0,02305	10,93	1,0E-03
9	2261	0,00146	0,01739	10,94	1,0E-03
10	2262	0,00064	0,00334	14,86	1,0E-03
11	2293	0,00074	0,00451	14,23	1,0E-03
12	2281	0,00005	0,00002	15,41	1,0E-03
Nível, 3 pressão fratura 3					
1	1	0,00620	0,31397	8,78	1,2E-03
2	2197	0,00644	0,33955	9,21	1,2E-03
3	2199	0,00526	0,22658	9,73	1,1E-03
4	2208	0,00582	0,27731	10,30	1,2E-03
5	2211	0,00475	0,18460	10,29	1,1E-03
6	2212	0,00551	0,24844	10,46	1,1E-03
7	2232	0,00554	0,25120	10,91	1,1E-03
8	2233	0,00468	0,17904	10,93	1,1E-03
9	2261	0,00520	0,22117	10,94	1,1E-03
10	2262	0,00345	0,09711	14,86	1,0E-03
11	2293	0,00415	0,14047	14,23	1,0E-03
12	2281	0,00160	0,02084	15,41	1,0E-03
13	2294	0,00238	0,04642	17,05	1,0E-03
14	2308	0,00163	0,02161	17,21	1,0E-03
15	2327	0,00124	0,01262	17,35	1,0E-03
16	2349	0,00056	0,00253	18,38	1,0E-03
17	2375	0,00073	0,00440	19,48	1,0E-03
18	2376	0,00023	0,00043	18,30	1,0E-03
19	2377	0,00009	0,00006	18,30	1,0E-03

Tabela B-1 (2)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível, 4 pressão fratura 3					
1	1	0,00668	0,36496	8,78	1,3E-03
2	2197	0,00695	0,39468	9,21	1,3E-03
3	2199	0,00571	0,26650	9,73	1,2E-03
4	2208	0,00632	0,32604	10,30	1,2E-03
5	2211	0,00532	0,23108	10,29	1,1E-03
6	2212	0,00619	0,31339	10,46	1,2E-03
7	2232	0,00638	0,33305	10,91	1,2E-03
8	2233	0,00546	0,24343	10,93	1,1E-03
9	2261	0,00613	0,30756	10,94	1,2E-03
10	2262	0,00425	0,14741	14,86	1,0E-03
11	2293	0,00519	0,21997	14,23	1,1E-03
12	2281	0,00243	0,04831	15,41	1,0E-03
13	2294	0,00376	0,11588	17,05	1,0E-03
14	2308	0,00331	0,08953	17,21	1,0E-03
15	2327	0,00247	0,04983	17,35	1,0E-03
16	2349	0,00154	0,01931	18,38	1,0E-03
17	2375	0,00194	0,03082	19,48	1,0E-03
18	2376	0,00109	0,00974	18,30	1,0E-03
19	2377	0,00061	0,00306	18,30	1,0E-03
20	2430	0,00007	0,00004	18,35	1,0E-03
Nível, 4 pressão fratura 4					
1	1	0,00981	0,78691	8,78	1,9E-03
2	2197	0,01085	0,96315	9,21	2,1E-03
3	2199	0,00888	0,64529	9,73	1,6E-03
4	2208	0,00944	0,72787	10,30	1,7E-03
5	2211	0,00873	0,62313	10,29	1,5E-03
6	2212	0,01059	0,91651	10,46	1,9E-03
7	2232	0,01238	1,25378	10,91	2,4E-03
8	2233	0,01042	0,88834	10,93	1,8E-03
9	2261	0,01267	1,31139	10,94	2,5E-03
10	2262	0,00930	0,70649	14,86	1,4E-03
11	2293	0,01182	1,14193	14,23	1,9E-03
12	2281	0,00628	0,32214	15,41	1,1E-03
13	2294	0,00953	0,74321	17,05	1,4E-03
14	2308	0,00901	0,66371	17,21	1,3E-03
15	2327	0,00809	0,53503	17,35	1,2E-03
16	2349	0,00694	0,39353	18,38	1,1E-03
17	2375	0,00950	0,73720	19,48	1,4E-03
18	2376	0,00886	0,64216	18,30	1,3E-03
19	2377	0,00702	0,40277	18,30	1,2E-03
20	2430	0,00431	0,15180	18,35	1,0E-03
21	2431	0,00462	0,17479	15,38	1,1E-03
22	2434	0,00084	0,00580	22,62	1,0E-03
23	2513	0,00210	0,03593	30,83	1,0E-03
24	2584	0,00340	0,09463	29,19	1,0E-03
25	2551	0,00204	0,03405	28,01	1,0E-03
26	2585	0,00108	0,00955	30,72	1,0E-03
27	2604	0,00029	0,00070	33,43	1,0E-03
28	2646	0,00019	0,00028	34,79	1,0E-03

Tabela B-1 (3)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível, 5 pressão fratura 4					
1	1	0,01076	0,94714	8,78	2,2E-03
2	2197	0,01201	1,17940	9,21	2,5E-03
3	2199	0,00985	0,79257	9,73	1,8E-03
4	2208	0,01039	0,88254	10,30	1,9E-03
5	2211	0,00982	0,78766	10,29	1,8E-03
6	2212	0,01197	1,17220	10,46	2,3E-03
7	2232	0,01426	1,66132	10,91	3,2E-03
8	2233	0,01201	1,18000	10,93	2,3E-03
9	2261	0,01470	1,76768	10,94	3,4E-03
10	2262	0,01090	0,97061	14,86	1,7E-03
11	2293	0,01390	1,57875	14,23	2,5E-03
12	2281	0,00756	0,46770	15,41	1,2E-03
13	2294	0,01148	1,07727	17,05	1,7E-03
14	2308	0,01108	1,00396	17,21	1,6E-03
15	2327	0,00998	0,81445	17,35	1,5E-03
16	2349	0,00897	0,65791	18,38	1,3E-03
17	2375	0,01219	1,21525	19,48	1,8E-03
18	2376	0,01192	1,16172	18,30	1,8E-03
19	2377	0,01007	0,82958	18,30	1,5E-03
20	2430	0,00804	0,52881	18,35	1,2E-03
21	2431	0,00931	0,70918	15,38	1,4E-03
22	2434	0,00264	0,05696	22,62	1,0E-03
23	2513	0,00497	0,20195	30,83	1,0E-03
24	2584	0,00829	0,56165	29,19	1,2E-03
25	2551	0,00734	0,44101	28,01	1,1E-03
26	2585	0,00473	0,18257	30,72	1,0E-03
27	2604	0,00276	0,06222	33,43	1,0E-03
28	2646	0,00209	0,03556	34,79	1,0E-03
29	2668	0,00001	0,00000	36,44	1,0E-03
30	2677	0,00040	0,00132	37,60	1,0E-03

Tabela B-1 (4)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível, 5 pressão fratura 5					
1	1	0,01409	1,62200	8,78	3,6E-03
2	2197	0,01682	2,31313	9,21	5,2E-03
3	2199	0,01358	1,50692	9,73	3,1E-03
4	2208	0,01364	1,52203	10,30	3,0E-03
5	2211	0,01347	1,48427	10,29	2,9E-03
6	2212	0,01703	2,37225	10,46	4,9E-03
7	2232	0,02200	3,95788	10,91	9,0E-03
8	2233	0,01813	2,68819	10,93	5,5E-03
9	2261	0,02336	4,46119	10,94	1,1E-02
10	2262	0,01769	2,55949	14,86	4,0E-03
11	2293	0,02303	4,33510	14,23	8,0E-03
12	2281	0,01263	1,30504	15,41	2,1E-03
13	2294	0,01889	2,91681	17,05	4,2E-03
14	2308	0,01800	2,64794	17,21	3,8E-03
15	2327	0,01770	2,56213	17,35	3,6E-03
16	2349	0,01632	2,17775	18,38	2,9E-03
17	2375	0,02290	4,28695	19,48	6,0E-03
18	2376	0,02358	4,54635	18,30	6,9E-03
19	2377	0,01982	3,21113	18,30	4,5E-03
20	2430	0,01745	2,48788	18,35	3,4E-03
21	2431	0,01882	2,89613	15,38	4,5E-03
22	2434	0,00626	0,31988	22,62	1,1E-03
23	2513	0,01157	1,09450	30,83	1,4E-03
24	2584	0,01976	3,19061	29,19	3,2E-03
25	2551	0,01936	3,06396	28,01	3,1E-03
26	2585	0,01244	1,26585	30,72	1,5E-03
27	2604	0,01172	1,12253	33,43	1,4E-03
28	2646	0,00950	0,73703	34,79	1,2E-03
29	2668	0,00313	0,08002	36,44	1,0E-03
30	2677	0,00948	0,73411	37,60	1,2E-03
31	2715	0,00728	0,43344	39,56	1,1E-03
32	2716	0,00404	0,13311	40,73	1,0E-03
33	2778	0,00165	0,02226	45,73	1,0E-03
34	2809	0,00139	0,01575	54,40	1,0E-03
35	2825	0,00010	0,00007	62,66	1,0E-03
36	2935	0,00007	0,00004	60,07	1,0E-03

Tabela B-1 (5)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível, 6 pressão fratura 5					
1	1	0,01565	2,00194	8,78	4,6E-03
2	2197	0,01907	2,97167	9,21	7,2E-03
3	2199	0,01535	1,92568	9,73	4,0E-03
4	2208	0,01519	1,88705	10,30	3,8E-03
5	2211	0,01528	1,90815	10,29	3,8E-03
6	2212	0,01951	3,11332	10,46	6,8E-03
7	2232	0,02578	5,43165	10,91	1,4E-02
8	2233	0,02117	3,66302	10,93	8,1E-03
9	2261	0,02759	6,22207	10,94	1,7E-02
10	2262	0,02105	3,62172	14,86	6,1E-03
11	2293	0,02749	6,17811	14,23	1,3E-02
12	2281	0,01522	1,89360	15,41	2,9E-03
13	2294	0,02270	4,21111	17,05	6,6E-03
14	2308	0,02172	3,85629	17,21	5,9E-03
15	2327	0,02163	3,82450	17,35	5,8E-03
16	2349	0,02020	3,33574	18,38	4,7E-03
17	2375	0,02838	6,58580	19,48	1,1E-02
18	2376	0,02965	7,18883	18,30	1,3E-02
19	2377	0,02512	5,16048	18,30	8,1E-03
20	2430	0,02283	4,26254	18,35	6,3E-03
21	2431	0,02456	4,93247	15,38	8,9E-03
22	2434	0,00858	0,60144	22,62	1,2E-03
23	2513	0,01556	1,97921	30,83	2,0E-03
24	2584	0,02654	5,75674	29,19	6,2E-03
25	2551	0,02704	5,97729	28,01	6,8E-03
26	2585	0,01769	2,55863	30,72	2,5E-03
27	2604	0,01866	2,84531	33,43	2,6E-03
28	2646	0,01554	1,97438	34,79	1,9E-03
29	2668	0,00693	0,39236	36,44	1,1E-03
30	2677	0,02000	3,27001	37,60	2,7E-03
31	2715	0,01900	2,95079	39,56	2,4E-03
32	2716	0,01291	1,36346	40,73	1,4E-03
33	2778	0,00958	0,75035	45,73	1,2E-03
34	2809	0,00884	0,63898	54,40	1,1E-03
35	2825	0,00502	0,20575	62,66	1,0E-03
36	2935	0,00559	0,25577	60,07	1,0E-03
37	2896	0,00437	0,15585	55,42	1,0E-03
38	2936	0,00072	0,00420	68,84	1,0E-03
39	2946	0,00010	0,00008	82,42	1,0E-03

Tabela B-1 (6)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível, 6 pressão fratura 6					
1	1	0,01998	3,26230	8,78	8,4E-03
2	2197	0,02711	6,00969	9,21	1,9E-02
3	2199	0,02122	3,67939	9,73	9,0E-03
4	2208	0,01934	3,05641	10,30	6,7E-03
5	2211	0,02025	3,35341	10,29	7,6E-03
6	2212	0,02729	6,08865	10,46	1,7E-02
7	2232	0,03980	12,94769	10,91	4,8E-02
8	2233	0,03167	8,19718	10,93	2,5E-02
9	2261	0,04387	15,73464	10,94	6,4E-02
10	2262	0,03417	9,54368	14,86	2,3E-02
11	2293	0,04553	16,94775	14,23	5,5E-02
12	2281	0,02499	5,10482	15,41	9,3E-03
13	2294	0,03669	11,00297	17,05	2,5E-02
14	2308	0,03411	9,51058	17,21	2,0E-02
15	2327	0,03739	11,42656	17,35	2,6E-02
16	2349	0,03511	10,07754	18,38	2,0E-02
17	2375	0,05100	21,26701	19,48	5,7E-02
18	2376	0,05476	24,51413	18,30	7,4E-02
19	2377	0,04533	16,79490	18,30	4,3E-02
20	2430	0,04225	14,59614	18,35	3,5E-02
21	2431	0,04271	14,91057	15,38	4,2E-02
22	2434	0,01589	2,06351	22,62	2,4E-03
23	2513	0,02942	7,07395	30,83	7,7E-03
24	2584	0,05109	21,33453	29,19	3,8E-02
25	2551	0,05300	22,96386	28,01	4,4E-02
26	2585	0,03357	9,21195	30,72	1,1E-02
27	2604	0,03772	11,63255	33,43	1,4E-02
28	2646	0,03062	7,66416	34,79	7,7E-03
29	2668	0,01645	2,21246	36,44	2,0E-03
30	2677	0,04330	15,32640	37,60	1,9E-02
31	2715	0,04403	15,84740	39,56	1,9E-02
32	2716	0,02950	7,11356	40,73	6,2E-03
33	2778	0,02497	5,09690	45,73	3,8E-03
34	2809	0,02288	4,28114	54,40	2,8E-03
35	2825	0,01763	2,53963	62,66	1,7E-03
36	2935	0,02465	4,96768	60,07	3,0E-03
37	2896	0,02937	7,05274	55,42	4,7E-03
38	2936	0,01488	1,81085	68,84	1,4E-03
39	2946	0,01566	2,00573	82,42	1,4E-03
40	2947	0,00964	0,76018	72,30	1,1E-03
41	3002	0,00711	0,41290	63,06	1,0E-03
42	3003	0,00337	0,09294	63,52	1,0E-03
43	3056	0,00127	0,01315	76,59	1,0E-03

Tabela B-2 (1)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
1ro Nível					
1	1	0,00874	0,62503	8,78	1,6E-03
2	1137	0,00685	0,38376	9,20	1,3E-03
3	1139	0,00641	0,33546	10,19	1,2E-03
4	1148	0,00785	0,50350	10,38	1,4E-03
5	1150	0,00775	0,49071	10,29	1,4E-03
6	1151	0,00678	0,37544	10,53	1,2E-03
7	1165	0,00188	0,02875	12,26	1,0E-03
8	1160	0,00117	0,01125	12,26	1,0E-03
9	1170	0,00540	0,23875	12,26	1,1E-03
10	1179	0,00445	0,16213	12,99	1,1E-03
11	1191	0,00273	0,06098	13,95	1,0E-03
12	1192	0,00367	0,11035	14,83	1,0E-03
13	1223	0,00455	0,16924	14,22	1,1E-03
14	1210	0,00193	0,03031	15,41	1,0E-03
15	1227	0,00333	0,09059	17,05	1,0E-03
16	1246	0,00266	0,05795	17,21	1,0E-03
17	1264	0,00275	0,06182	17,35	1,0E-03
18	1273	0,00172	0,02418	16,30	1,0E-03
19	1274	0,00141	0,01617	16,30	1,0E-03
20	1314	0,00022	0,00039	17,56	1,0E-03
Nível 2, fratura 1					
1	1	0,01483	1,79868	8,78	4,0E-03
2	1137	0,01169	1,11701	9,20	2,4E-03
3	1139	0,01157	1,09429	10,19	2,2E-03
4	1148	0,01436	1,68677	10,38	3,3E-03
5	1150	0,01496	1,82939	10,29	3,7E-03
6	1151	0,01376	1,54886	10,53	3,0E-03
7	1165	0,00338	0,09346	12,26	1,0E-03
8	1160	0,00292	0,06958	12,26	1,0E-03
9	1170	0,01280	1,34037	12,26	2,4E-03
10	1179	0,01087	0,96647	12,99	1,8E-03
11	1191	0,00758	0,46990	13,95	1,3E-03
12	1192	0,00929	0,70620	14,83	1,4E-03
13	1223	0,01138	1,05860	14,22	1,8E-03
14	1210	0,00524	0,22484	15,41	1,1E-03
15	1227	0,00869	0,61664	17,05	1,3E-03
16	1246	0,00900	0,66146	17,21	1,3E-03
17	1264	0,00926	0,70141	17,35	1,4E-03
18	1273	0,00858	0,60132	16,30	1,3E-03
19	1274	0,00783	0,50085	16,30	1,2E-03
20	1314	0,00453	0,16762	17,56	1,0E-03
21	1315	0,00692	0,39175	18,30	1,1E-03
22	1359	0,00506	0,20939	18,35	1,1E-03
23	1360	0,00405	0,13433	19,89	1,0E-03
24	1418	0,00197	0,03185	29,23	1,0E-03
25	1419	0,00203	0,03375	35,49	1,0E-03
26	1473	0,00065	0,00342	32,63	1,0E-03

Tabela B-2 (2)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível 2, fratura 2					
1	1	0,02121	3,67832	8,78	9,9E-03
2	1137	0,01681	2,30887	9,20	5,2E-03
3	1139	0,01774	2,57247	10,19	5,5E-03
4	1148	0,02094	3,58553	10,38	8,2E-03
5	1150	0,02265	4,19358	10,29	1,0E-02
6	1151	0,02059	3,46540	10,53	7,8E-03
7	1165	0,00460	0,17293	12,26	1,1E-03
8	1160	0,00419	0,14355	12,26	1,0E-03
9	1170	0,02020	3,33593	12,26	6,5E-03
10	1179	0,01786	2,60905	12,99	4,6E-03
11	1191	0,01310	1,40192	13,95	2,3E-03
12	1192	0,01564	1,99877	14,83	3,1E-03
13	1223	0,01918	3,00759	14,22	5,1E-03
14	1210	0,00902	0,66535	15,41	1,4E-03
15	1227	0,01522	1,89350	17,05	2,7E-03
16	1246	0,01664	2,26485	17,21	3,2E-03
17	1264	0,01747	2,49524	17,35	3,5E-03
18	1273	0,01732	2,45342	16,30	3,6E-03
19	1274	0,01588	2,06242	16,30	3,0E-03
20	1314	0,01121	1,02701	17,56	1,7E-03
21	1315	0,01731	2,44989	18,30	3,3E-03
22	1359	0,01569	2,01332	18,35	2,7E-03
23	1360	0,01217	1,21126	19,89	1,7E-03
24	1418	0,00907	0,67240	29,23	1,2E-03
25	1419	0,01090	0,97102	35,49	1,3E-03
26	1473	0,00960	0,75290	32,63	1,2E-03
27	1525	0,00950	0,73796	30,72	1,2E-03
28	1553	0,00199	0,03243	33,43	1,0E-03
29	1592	0,00716	0,41937	34,79	1,1E-03
30	1614	0,00431	0,15215	36,44	1,0E-03
31	1623	0,00531	0,23082	37,60	1,0E-03
32	1665	0,00175	0,02513	39,56	1,0E-03
33	1666	0,00342	0,09566	40,73	1,0E-03
34	1735	0,00161	0,02116	40,73	1,0E-03
35	1736	0,00182	0,02698	41,20	1,0E-03
36	1813	0,00019	0,00031	52,71	1,0E-03
37	1985	0,00043	0,00152	54,68	1,0E-03

Tabela B-2 (3)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível 3, fratura 2					
1	1	0,02541	5,27731	8,78	1,6E-02
2	1137	0,02016	3,32325	9,20	8,3E-03
3	1139	0,02167	3,83997	10,19	9,2E-03
4	1148	0,02530	5,23274	10,38	1,4E-02
5	1150	0,02764	6,24640	10,29	1,8E-02
6	1151	0,02512	5,15695	10,53	1,3E-02
7	1165	0,00549	0,24637	12,26	1,1E-03
8	1160	0,00514	0,21607	12,26	1,1E-03
9	1170	0,02508	5,14172	12,26	1,2E-02
10	1179	0,02241	4,10409	12,99	8,1E-03
11	1191	0,01670	2,27873	13,95	3,7E-03
12	1192	0,01974	3,18408	14,83	5,2E-03
13	1223	0,02419	4,78561	14,22	9,1E-03
14	1210	0,01153	1,08593	15,41	1,8E-03
15	1227	0,01936	3,06437	17,05	4,5E-03
16	1246	0,02158	3,80668	17,21	5,8E-03
17	1264	0,02262	4,18322	17,35	6,5E-03
18	1273	0,02280	4,24972	16,30	6,9E-03
19	1274	0,02101	3,60866	16,30	5,6E-03
20	1314	0,01532	1,91832	17,56	2,7E-03
21	1315	0,02361	4,55793	18,30	6,9E-03
22	1359	0,02210	3,99396	18,35	5,8E-03
23	1360	0,01713	2,39974	19,89	3,1E-03
24	1418	0,01354	1,49874	29,23	1,7E-03
25	1419	0,01658	2,24645	35,49	2,0E-03
26	1473	0,01597	2,08503	32,63	2,0E-03
27	1525	0,01653	2,23439	30,72	2,2E-03
28	1553	0,00417	0,14198	33,43	1,0E-03
29	1592	0,01465	1,75435	34,79	1,7E-03
30	1614	0,01065	0,92659	36,44	1,3E-03
31	1623	0,01330	1,44568	37,60	1,5E-03
32	1665	0,00540	0,23831	39,56	1,0E-03
33	1666	0,01104	0,99597	40,73	1,3E-03
34	1735	0,00791	0,51214	40,73	1,1E-03
35	1736	0,00912	0,67997	41,20	1,2E-03
36	1813	0,00045	0,00164	52,71	1,0E-03
37	1985	0,00437	0,15633	54,68	1,0E-03
38	1984	0,00209	0,03570	55,37	1,0E-03
39	2029	0,00289	0,06844	70,57	1,0E-03
40	2044	0,00035	0,00098	111,88	1,0E-03
41	2117	0,00025	0,00052	87,92	1,0E-03

Tabela B-2 (4)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível 3, fratura 3					
1	1	0,03282	8,80561	8,78	3,4E-02
2	1137	0,02618	5,60225	9,20	1,7E-02
3	1139	0,02984	7,27949	10,19	2,2E-02
4	1148	0,03279	8,79078	10,38	2,9E-02
5	1150	0,03711	11,25577	10,29	4,2E-02
6	1151	0,03287	8,83002	10,53	2,9E-02
7	1165	0,00628	0,32195	12,26	1,2E-03
8	1160	0,00591	0,28590	12,26	1,1E-03
9	1170	0,03384	9,36206	12,26	2,7E-02
10	1179	0,03150	8,11187	12,99	2,1E-02
11	1191	0,02388	4,66275	13,95	9,0E-03
12	1192	0,02792	6,37244	14,83	1,3E-02
13	1223	0,03437	9,65947	14,22	2,4E-02
14	1210	0,01587	2,05970	15,41	3,1E-03
15	1227	0,02822	6,51158	17,05	1,2E-02
16	1246	0,03125	7,98485	17,21	1,5E-02
17	1264	0,03395	9,42078	17,35	1,9E-02
18	1273	0,03464	9,81084	16,30	2,2E-02
19	1274	0,03127	7,99375	16,30	1,6E-02
20	1314	0,02382	4,63853	17,56	7,3E-03
21	1315	0,03703	11,20744	18,30	2,4E-02
22	1359	0,03485	9,92917	18,35	2,0E-02
23	1360	0,02528	5,22495	19,89	7,6E-03
24	1418	0,02129	3,70431	29,23	3,7E-03
25	1419	0,02532	5,24260	35,49	4,7E-03
26	1473	0,02444	4,88398	32,63	4,7E-03
27	1525	0,02709	5,99876	30,72	6,3E-03
28	1553	0,00627	0,32135	33,43	1,1E-03
29	1592	0,02381	4,63617	34,79	4,2E-03
30	1614	0,01866	2,84691	36,44	2,5E-03
31	1623	0,02366	4,57463	37,60	3,9E-03
32	1665	0,00978	0,78201	39,56	1,2E-03
33	1666	0,02031	3,37266	40,73	2,7E-03
34	1735	0,01679	2,30543	40,73	2,0E-03
35	1736	0,01962	3,14737	41,20	2,5E-03
36	1813	0,00000	0,00000	52,71	1,0E-03
37	1985	0,01334	1,45511	54,68	1,4E-03
38	1984	0,01079	0,95213	55,37	1,2E-03
39	2029	0,01494	1,82569	70,57	1,4E-03
40	2044	0,00617	0,31131	111,88	1,0E-03
41	2117	0,00653	0,34867	87,92	1,0E-03
42	2109	0,00573	0,26835	78,23	1,0E-03
43	2169	0,00304	0,07575	74,25	1,0E-03
44	2170	0,00033	0,00087	83,98	1,0E-03
45	2256	0,00075	0,00457	131,62	1,0E-03
46	2299	0,00108	0,00945	80,75	1,0E-03
47	2298	0,00069	0,00391	83,61	1,0E-03
48	2221	0,00002	0,00000	129,54	1,0E-03

Tabela B-2 (5)

#	Elemento	e_{frat} cm	K_f cm/s	l cm	K_t cm/s
Nível 4, fratura 3					
1	1	0,03462	9,79949	8,78	4,0E-02
2	1137	0,02764	6,24370	9,20	2,0E-02
3	1139	0,03178	8,25881	10,19	2,7E-02
4	1148	0,03464	9,80783	10,38	3,4E-02
5	1150	0,03940	12,69051	10,29	5,0E-02
6	1151	0,03479	9,89531	10,53	3,4E-02
7	1165	0,00651	0,34639	12,26	1,2E-03
8	1160	0,00616	0,31063	12,26	1,2E-03
9	1170	0,03603	10,60978	12,26	3,2E-02
10	1179	0,03373	9,30121	12,99	2,5E-02
11	1191	0,02566	5,38457	13,95	1,1E-02
12	1192	0,02993	7,32235	14,83	1,6E-02
13	1223	0,03686	11,10751	14,22	3,0E-02
14	1210	0,01698	2,35823	15,41	3,6E-03
15	1227	0,03037	7,54042	17,05	1,4E-02
16	1246	0,03367	9,26885	17,21	1,9E-02
17	1264	0,03670	11,01158	17,35	2,4E-02
18	1273	0,03756	11,53158	16,30	2,8E-02
19	1274	0,03385	9,36605	16,30	2,0E-02
20	1314	0,02597	5,51248	17,56	9,2E-03
21	1315	0,04039	13,33413	18,30	3,0E-02
22	1359	0,03813	11,88297	18,35	2,6E-02
23	1360	0,02747	6,17042	19,89	9,5E-03
24	1418	0,02337	4,46302	29,23	4,6E-03
25	1419	0,02773	6,28714	35,49	5,9E-03
26	1473	0,02686	5,89631	32,63	5,9E-03
27	1525	0,03002	7,36835	30,72	8,2E-03
28	1553	0,00696	0,39615	33,43	1,1E-03
29	1592	0,02654	5,75722	34,79	5,4E-03
30	1614	0,02109	3,63655	36,44	3,1E-03
31	1623	0,02679	5,86622	37,60	5,2E-03
32	1665	0,01125	1,03447	39,56	1,3E-03
33	1666	0,02333	4,45024	40,73	3,5E-03
34	1735	0,01980	3,20430	40,73	2,6E-03
35	1736	0,02317	4,38871	41,20	3,5E-03
36	1813	0,00254	0,05294	52,71	1,0E-03
37	1985	0,01656	2,24254	54,68	1,7E-03
38	1984	0,01410	1,62519	55,37	1,4E-03
39	2029	0,01916	3,00164	70,57	1,8E-03
40	2044	0,00941	0,72419	111,88	1,1E-03
41	2117	0,01061	0,91945	87,92	1,1E-03
42	2109	0,01139	1,06087	78,23	1,2E-03
43	2169	0,00772	0,48697	74,25	1,1E-03
44	2170	0,00154	0,01943	83,98	1,0E-03
45	2256	0,00354	0,10249	131,62	1,0E-03
46	2299	0,00531	0,23093	80,75	1,0E-03
47	2298	0,00511	0,21365	83,61	1,0E-03
48	2221	0,00019	0,00030	129,54	1,0E-03
49	2296	0,00049	0,00199	87,44	1,0E-03
50	2295	0,00044	0,00158	77,03	1,0E-03

Tabela B-3 (1)

Subpressão do vertedouro - PPv30pC

Nível de água	Hm	Sd	Hj	Observ.
	kgf/cm ²			
h1: 242 m	2,65		2,62	
h2: 244 m	2,84		2,62	Fratura
h3: 247 m	3,14		2,62	Fratura
h4: 250 m	3,43		2,62	Fratura
h5: 253 m	3,73		2,62	Fratura
h6: 257 m	4,12		2,62	Fratura

Ptos	Nós	Coordenadas		Compr. X cm	Nível 1			Subpressão kgf/cm ²	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	ΔF2	Nível 1, fratura 1		
		x	y		Subpressão kgf/cm ²	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf					Subpressão kgf/cm ²	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3324	180	21500		2,65		3533	31	2,65		3563			
2	3263	207,1	21500	27,07	2,57	7066	7409	111	2,62	7127	7521			
3	3227	237,5	21500	30,41	2,53	7753	8132	199	2,59	7914	8331			
4	3191	271,5	21500	34,04	2,48	8511	8921	270	2,55	8748	9191			
5	3144	309,5	21500	37,98	2,44	9331	9774	328	2,52	9633	10102			
6	3107	351,8	21500	42,27	2,40	10217	10693	376	2,48	10570	11069			
7	3060	398,7	21500	46,95	2,36	11169	11685	416	2,45	11568	12101			
8	3025	450,8	21500	52,08	2,32	12200	12754	453	2,41	12634	13207			
9	2980	508,5	21500	57,69	2,29	13308	13920	490	2,37	13779	14410			
10	2942	572,4	21500	63,87	2,26	14532	15199	527	2,34	15040	15727			
11	2896	643,0	21500	70,69	2,23	15867	16582	567	2,31	16414	17148			
12	2849	721,3	21500	78,21	2,19	17296	18070	608	2,27	17883	18678			
13	2812	807,8	21500	86,58	2,16	18844	19691	652	2,23	19473	20343			
14	2772	903,7	21500	95,89	2,12	20538	21467	701	2,19	21213	22168			
15	2731	1010,0	21500	106,30	2,09	22396	23415	755	2,16	23123	24169			
16	2686	1128,0	21500	117,98	2,05	24433	21361	610	2,12	25216	21971			
17	2643	1259,2	21500	131,15	0,74	18289	14596	223	0,74	18726	14819			
18	2591	1410,0	21500	150,85	0,71	10902	7933	5	0,71	10912	7938			
19	2542	1480,0	21500	70,00	0,71	4963	8697	1	0,71	4963	8698			
20	2497	1653,4	21500	173,41	0,72	12430	10997	2	0,72	12432	11000			
21	2455	1784,3	21500	130,92	0,74	9565	9702	4	0,74	9568	9706			
22	2407	1916,8	21500	132,51	0,75	9840	9983	5	0,75	9845	9988			
23	2366	2051,0	21500	134,17	0,76	10125	10271	7	0,76	10131	10278			
24	2322	2186,9	21500	135,92	0,77	10416	10561	8	0,77	10424	10569			
25	2281	2324,7	21500	137,74	0,78	10706	10855	10	0,78	10715	10864			
26	2234	2464,3	21500	139,65	0,79	11004	11157	11	0,79	11014	11168			
27	2189	2606,0	21500	141,64	0,80	11310	11463	12	0,80	11321	11475			
28	2149	2749,7	21500	143,72	0,81	11616	11769	13	0,81	11629	11782			
29	2103	2895,6	21500	145,89	0,82	11922	12075	14	0,82	11936	12089			
30	2059	3043,7	21500	148,14	0,83	12227	12295	15	0,83	12242	12311			
31	2015	3192,2	21500	148,48	0,84	12363	12411	16	0,84	12379	12427			
32	1968	3340,7	21500	148,47	0,84	12458	12499	17	0,84	12474	12516			
33	1930	3489,1	21500	148,48	0,85	12540	12574	17	0,85	12557	12592			
34	1888	3637,6	21500	148,48	0,85	12609	12636	17	0,85	12626	12653			
35	1851	3786,1	21500	148,48	0,85	12663	12672	29	0,86	12680	12701			
36	1808	3934,6	21500	148,48	0,85	12681	12693	40	0,86	12721	12734			
37	1768	4083,0	21500	148,47	0,86	12706	12724	29	0,86	12746	12753			
38	1733	4231,5	21500	148,48	0,86	12742	12742	18	0,86	12760	12761			
39	1691	4380,0	21500	148,48	0,86	12743	10989	16	0,86	12761	11005			
40	1645	4480,0	21400	100,00	0,99	9235	9963	14	0,99	9249	9978			
41	1604	4580,0	21300	100,00	1,15	10692	11536	17	1,15	10707	11553			
42	1563	4680,0	21200	100,00	1,33	12380	13352	19	1,33	12398	13371			
43	1517	4780,0	21100	100,00	1,54	14325	15427	21	1,54	14345	15447			
44	1480	4880,0	21000	100,00	1,77	16529	21913	28	1,77	16550	21941			
45	1437	5032,7	21000	152,70	1,81	27298	27714	33	1,81	27332	27748			
46	1405	5186,9	21000	154,16	1,84	28130	28525	33	1,84	28163	28558			
47	1369	5342,5	21000	155,68	1,87	28919	29325	32	1,88	28952	29358			
48	1329	5499,8	21000	157,28	1,91	29731	30155	32	1,91	29764	30187			
49	1291	5658,8	21000	158,93	1,94	30578	31011	32	1,94	30610	31043			
50	1252	5819,4	21000	160,67	1,97	31444	31881	31	1,98	31475	31912			
51	1215	5981,9	21000	162,47	2,00	32318	32767	31	2,01	32349	32798			
52	1183	6146,2	21000	164,35	2,04	33216	33686	30	2,04	33246	33715			
53	1151	6312,5	21000	166,31	2,07	34155	34644	28	2,07	34184	34672			
54	1117	6480,9	21000	168,33	2,10	35133	35648	28	2,11	35161	35676			
55	1085	6651,3	21000	170,46	2,14	36164	36665	27	2,14	36191	36691			
56	1055	6823,6	21000	172,27	2,18	37165	37487	25	2,18	37191	37511			
57	1027	6995,9	21000	172,27	2,21	37808	38140	22	2,21	37831	38162			
58	999	7168,1	21000	172,26	2,25	38472	38822	21	2,25	38493	38842			
59	963	7340,4	21000	172,27	2,29	39172	39541	19	2,30	39191	39560			
60	930	7512,7	21000	172,27	2,34	39911	40303	17	2,34	39929	40320			
61	897	7684,9	21000	172,26	2,39	40696	41118	14	2,39	40711	41132			
62	860	7857,2	21000	172,27	2,44	41539	41994	11	2,44	41552	42005			
63	829	8029,5	21000	172,27	2,49	42448	42945	7	2,49	42458	42953			

Tabela B-3 (2)

Ptos	Nós	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 2				Nível 2, fratura 2			
		x	y		AF3	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	AF4	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3324	180	21500		264	2,84		3828	1	2,84		3828
2	3263	207,1	21500	27,07	559	2,81	7655	8080	4	2,81	7657	8084
3	3227	237,5	21500	30,41	624	2,78	8504	8955	9	2,78	8510	8964
4	3191	271,5	21500	34,04	695	2,75	9406	9886	18	2,75	9418	9904
5	3144	309,5	21500	37,98	775	2,71	10366	10876	31	2,72	10389	10908
6	3107	351,8	21500	42,27	860	2,68	11387	11929	51	2,69	11426	11979
7	3060	398,7	21500	46,95	946	2,64	12471	13047	77	2,65	12532	13124
8	3025	450,8	21500	52,08	1035	2,60	13624	14242	108	2,62	13716	14350
9	2980	508,5	21500	57,69	1128	2,56	14859	15537	136	2,58	14983	15674
10	2942	572,4	21500	63,87	1227	2,52	16215	16954	161	2,55	16364	17114
11	2896	643,0	21500	70,69	1332	2,48	17692	18481	185	2,51	17864	18666
12	2849	721,3	21500	78,21	1444	2,44	19269	20122	212	2,47	19467	20334
13	2812	807,8	21500	86,58	1565	2,40	20975	21908	238	2,43	21200	22146
14	2772	903,7	21500	95,89	1695	2,36	22841	23863	264	2,39	23092	24128
15	2731	1010,0	21500	106,30	1837	2,32	24886	26007	291	2,35	25164	26297
16	2686	1128,0	21500	117,98	1544	2,28	27127	23515	237	2,30	27431	23753
17	2643	1259,2	21500	131,15	725	0,76	19903	15544	87	0,76	20074	15632
18	2591	1410,0	21500	150,85	195	0,73	11185	8133	2	0,73	11189	8135
19	2542	1480,0	21500	70,00	205	0,73	5080	8903	0	0,73	5080	8903
20	2497	1653,4	21500	173,41	261	0,74	12726	11261	1	0,74	12726	11262
21	2455	1784,3	21500	130,92	232	0,75	9796	9938	2	0,75	9798	9940
22	2407	1916,8	21500	132,51	240	0,77	10080	10228	3	0,77	10083	10231
23	2366	2051,0	21500	134,17	247	0,78	10375	10525	4	0,78	10379	10530
24	2322	2186,9	21500	135,92	255	0,79	10675	10824	5	0,79	10680	10830
25	2281	2324,7	21500	137,74	262	0,80	10973	11127	6	0,80	10979	11133
26	2234	2464,3	21500	139,65	270	0,81	11280	11438	7	0,81	11287	11445
27	2189	2606,0	21500	141,64	278	0,82	11595	11753	8	0,82	11603	11761
28	2149	2749,7	21500	143,72	285	0,83	11910	12068	9	0,83	11919	12076
29	2103	2895,6	21500	145,89	292	0,84	12225	12382	10	0,84	12234	12391
30	2059	3043,7	21500	148,14	298	0,85	12538	12608	10	0,85	12548	12618
31	2015	3192,2	21500	148,48	300	0,86	12678	12727	11	0,86	12688	12737
32	1968	3340,7	21500	148,47	302	0,86	12776	12818	11	0,86	12786	12829
33	1930	3489,1	21500	148,48	304	0,87	12860	12895	11	0,87	12872	12907
34	1888	3637,6	21500	148,48	305	0,87	12930	12958	12	0,87	12942	12970
35	1851	3786,1	21500	148,48	306	0,88	12986	13007	12	0,88	12998	13019
36	1808	3934,6	21500	148,48	307	0,88	13028	13041	12	0,88	13040	13053
37	1768	4083,0	21500	148,47	308	0,88	13054	13061	12	0,88	13066	13073
38	1733	4231,5	21500	148,48	308	0,88	13068	13069	12	0,88	13080	13081
39	1691	4380,0	21500	148,48	259	0,88	13069	11264	11	0,88	13081	11274
40	1645	4480,0	21400	100,00	213	1,01	9458	10190	10	1,01	9467	10200
41	1604	4580,0	21300	100,00	219	1,17	10923	11771	11	1,17	10933	11783
42	1563	4680,0	21200	100,00	223	1,35	12620	13595	13	1,35	12632	13607
43	1517	4780,0	21100	100,00	223	1,56	14569	15670	14	1,56	14583	15684
44	1480	4880,0	21000	100,00	274	1,79	16771	22215	19	1,79	16785	22233
45	1437	5032,7	21000	152,70	324	1,83	27659	28071	23	1,83	27681	28094
46	1405	5186,9	21000	154,16	318	1,86	28484	28875	23	1,87	28507	28898
47	1369	5342,5	21000	155,68	311	1,90	29266	29669	22	1,90	29289	29691
48	1329	5499,8	21000	157,28	305	1,93	30072	30492	22	1,93	30094	30514
49	1291	5658,8	21000	158,93	298	1,96	30911	31340	22	1,96	30933	31362
50	1252	5819,4	21000	160,67	290	1,99	31769	32203	21	1,99	31791	32224
51	1215	5981,9	21000	162,47	283	2,02	32636	33081	21	2,03	32657	33102
52	1183	6146,2	21000	164,35	275	2,06	33526	33991	20	2,06	33546	34011
53	1151	6312,5	21000	166,31	266	2,09	34455	34938	20	2,09	34475	34959
54	1117	6480,9	21000	168,33	255	2,12	35422	35931	20	2,12	35442	35951
55	1085	6651,3	21000	170,46	243	2,15	36441	36934	19	2,16	36460	36953
56	1055	6823,6	21000	172,27	229	2,19	37428	37740	17	2,19	37446	37757
57	1027	6995,9	21000	172,27	211	2,23	38052	38374	16	2,23	38068	38389
58	999	7168,1	21000	172,26	193	2,27	38696	39035	14	2,27	38710	39049
59	963	7340,4	21000	172,27	172	2,31	39374	39732	13	2,31	39388	39745
60	930	7512,7	21000	172,27	149	2,35	40090	40469	12	2,35	40103	40481
61	897	7684,9	21000	172,26	125	2,39	40849	41257	10	2,39	40860	41267
62	860	7857,2	21000	172,27	98	2,44	41664	42103	8	2,44	41674	42111
63	829	8029,5	21000	172,27	69	2,50	42542	43021	6	2,50	42549	43027
64	801	8201,7	21000	172,26	36	2,55	43501	44029	3	2,55	43505	44032
65	772	8374	21000	172,27	9	2,62	44557	22278	1	2,62	44558	22279

Tabela B-3 (3)

Ptos	Nós	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 3, fratura 2				Nível 3, fratura 3			
		x	y		$\Delta F5$	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	$\Delta F6$	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3324	180	21500		395	3,14		4224	0	3,14		4224
2	3263	207,1	21500	27,07	834	3,10	8448	8917	1	3,10	8448	8919
3	3227	237,5	21500	30,41	922	3,07	9387	9886	3	3,07	9389	9889
4	3191	271,5	21500	34,04	1016	3,03	10385	10920	4	3,03	10389	10924
5	3144	309,5	21500	37,98	1116	3,00	11454	12024	6	3,00	11459	12030
6	3107	351,8	21500	42,27	1223	2,96	12594	13202	12	2,96	12602	13214
7	3060	398,7	21500	46,95	1338	2,92	13811	14463	24	2,93	13827	14486
8	3025	450,8	21500	52,08	1462	2,88	15115	15812	43	2,89	15146	15854
9	2980	508,5	21500	57,69	1594	2,84	16509	17268	69	2,85	16563	17337
10	2942	572,4	21500	63,87	1736	2,80	18027	18850	100	2,82	18110	18950
11	2896	643,0	21500	70,69	1887	2,76	19674	20553	135	2,78	19790	20688
12	2849	721,3	21500	78,21	2048	2,72	21432	22381	175	2,74	21587	22557
13	2812	807,8	21500	86,58	2221	2,67	23331	24367	216	2,70	23527	24583
14	2772	903,7	21500	95,89	2408	2,63	25403	26536	254	2,65	25638	26790
15	2731	1010,0	21500	106,30	2611	2,58	27669	28908	289	2,61	27941	29197
16	2686	1128,0	21500	117,98	2200	2,53	30147	25953	239	2,56	30452	26192
17	2643	1259,2	21500	131,15	1050	0,79	21759	16682	89	0,79	21932	16770
18	2591	1410,0	21500	150,85	297	0,75	11604	8431	2	0,75	11609	8434
19	2542	1480,0	21500	70,00	314	0,75	5259	9217	1	0,75	5259	9218
20	2497	1653,4	21500	173,41	398	0,77	13175	11660	3	0,77	13177	11664
21	2455	1784,3	21500	130,92	353	0,78	10145	10294	5	0,78	10150	10299
22	2407	1916,8	21500	132,51	365	0,79	10442	10596	8	0,80	10449	10604
23	2366	2051,0	21500	134,17	376	0,81	10749	10906	10	0,81	10758	10916
24	2322	2186,9	21500	135,92	388	0,82	11062	11217	12	0,82	11074	11230
25	2281	2324,7	21500	137,74	399	0,83	11372	11532	14	0,83	11386	11546
26	2234	2464,3	21500	139,65	410	0,84	11691	11855	17	0,84	11707	11871
27	2189	2606,0	21500	141,64	421	0,85	12018	12182	19	0,86	12036	12201
28	2149	2749,7	21500	143,72	432	0,86	12345	12509	21	0,87	12365	12529
29	2103	2895,6	21500	145,89	443	0,87	12672	12834	22	0,87	12693	12857
30	2059	3043,7	21500	148,14	451	0,88	12997	13069	24	0,88	13020	13093
31	2015	3192,2	21500	148,48	454	0,89	13141	13192	25	0,89	13166	13217
32	1968	3340,7	21500	148,47	457	0,90	13242	13286	26	0,90	13268	13312
33	1930	3489,1	21500	148,48	459	0,90	13330	13366	27	0,90	13356	13393
34	1888	3637,6	21500	148,48	461	0,90	13402	13431	27	0,91	13429	13459
35	1851	3786,1	21500	148,48	463	0,91	13460	13482	28	0,91	13488	13510
36	1808	3934,6	21500	148,48	464	0,91	13503	13517	28	0,91	13531	13545
37	1768	4083,0	21500	148,47	465	0,91	13530	13538	29	0,91	13559	13566
38	1733	4231,5	21500	148,48	465	0,91	13546	13546	29	0,91	13574	13575
39	1691	4380,0	21500	148,48	391	0,91	13547	11666	25	0,91	13576	11690
40	1645	4480,0	21400	100,00	321	1,04	9784	10521	22	1,05	9805	10543
41	1604	4580,0	21300	100,00	330	1,21	11258	12112	26	1,21	11282	12138
42	1563	4680,0	21200	100,00	335	1,39	12966	13943	31	1,39	12995	13973
43	1517	4780,0	21100	100,00	333	1,60	14919	16017	35	1,60	14952	16052
44	1480	4880,0	21000	100,00	409	1,83	17115	22643	45	1,83	17151	22688
45	1437	5032,7	21000	152,70	484	1,86	28170	28578	54	1,87	28225	28632
46	1405	5186,9	21000	154,16	474	1,90	28986	29372	54	1,90	29040	29426
47	1369	5342,5	21000	155,68	466	1,93	29759	30157	53	1,93	29813	30210
48	1329	5499,8	21000	157,28	456	1,96	30556	30970	53	1,96	30608	31023
49	1291	5658,8	21000	158,93	446	1,99	31385	31808	52	1,99	31437	31860
50	1252	5819,4	21000	160,67	435	2,02	32232	32660	51	2,02	32284	32710
51	1215	5981,9	21000	162,47	424	2,05	33087	33525	50	2,05	33137	33575
52	1183	6146,2	21000	164,35	411	2,08	33964	34422	48	2,08	34013	34470
53	1151	6312,5	21000	166,31	396	2,11	34879	35355	47	2,12	34927	35402
54	1117	6480,9	21000	168,33	381	2,14	35831	36332	46	2,15	35877	36377
55	1085	6651,3	21000	170,46	363	2,18	36833	37316	44	2,18	36878	37361
56	1055	6823,6	21000	172,27	342	2,21	37800	38099	41	2,21	37843	38140
57	1027	6995,9	21000	172,27	317	2,25	38398	38706	38	2,25	38438	38744
58	999	7168,1	21000	172,26	288	2,28	39013	39337	35	2,29	39050	39372
59	963	7340,4	21000	172,27	257	2,32	39661	40002	32	2,32	39694	40034
60	930	7512,7	21000	172,27	223	2,36	40343	40704	28	2,36	40373	40732
61	897	7684,9	21000	172,26	187	2,41	41066	41454	23	2,41	41091	41477
62	860	7857,2	21000	172,27	147	2,45	41842	42259	18	2,45	41862	42277
63	829	8029,5	21000	172,27	103	2,50	42676	43130	12	2,50	42691	43143
64	801	8201,7	21000	172,26	54	2,56	43585	44086	6	2,56	43595	44092
65	772	8374	21000	172,27	14	2,62	44586	22293	2	2,62	44590	22295

Tabela B-3 (4)

Ptos	Nós	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 4, fratura 3				Nível 4, fratura 4			
		x	y		ΔF6	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	ΔF6	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3324	180	21500		396	3,43		4620	2	3,43		4622
2	3263	207,1	21500	27,07	836	3,40	9240	9754	7	3,40	9244	9761
3	3227	237,5	21500	30,41	925	3,36	10268	10814	12	3,36	10278	10826
4	3191	271,5	21500	34,04	1020	3,32	11359	11943	17	3,32	11374	11961
5	3144	309,5	21500	37,98	1120	3,28	12527	13151	23	3,28	12547	13173
6	3107	351,8	21500	42,27	1228	3,24	13774	14442	29	3,24	13799	14470
7	3060	398,7	21500	46,95	1342	3,20	15110	15829	34	3,21	15141	15863
8	3025	450,8	21500	52,08	1465	3,16	16548	17320	41	3,16	16585	17361
9	2980	508,5	21500	57,69	1598	3,12	18091	18934	50	3,12	18136	18984
10	2942	572,4	21500	63,87	1742	3,08	19778	20692	63	3,09	19833	20756
11	2896	643,0	21500	70,69	1897	3,04	21607	22585	80	3,05	21678	22665
12	2849	721,3	21500	78,21	2061	2,99	23563	24618	100	3,00	23652	24719
13	2812	807,8	21500	86,58	2238	2,94	25674	26821	123	2,95	25785	26944
14	2772	903,7	21500	95,89	2430	2,89	27968	29219	147	2,91	28103	29366
15	2731	1010,0	21500	106,30	2636	2,84	30470	31833	170	2,86	30629	32003
16	2686	1128,0	21500	117,98	2222	2,79	33195	28414	142	2,80	33377	28556
17	2643	1259,2	21500	131,15	1058	0,82	23633	17828	53	0,82	23736	17882
18	2591	1410,0	21500	150,85	297	0,78	12024	8730	1	0,78	12027	8732
19	2542	1480,0	21500	70,00	314	0,78	5437	9532	2	0,78	5437	9534
20	2497	1653,4	21500	173,41	399	0,79	13627	12062	6	0,80	13630	12068
21	2455	1784,3	21500	130,92	354	0,81	10498	10653	10	0,81	10506	10663
22	2407	1916,8	21500	132,51	366	0,82	10809	10969	14	0,82	10821	10984
23	2366	2051,0	21500	134,17	378	0,84	11130	11294	19	0,84	11146	11312
24	2322	2186,9	21500	135,92	389	0,85	11457	11619	23	0,85	11478	11642
25	2281	2324,7	21500	137,74	401	0,86	11781	11947	27	0,86	11806	11974
26	2234	2464,3	21500	139,65	412	0,87	12113	12284	31	0,88	12142	12314
27	2189	2606,0	21500	141,64	424	0,89	12454	12624	35	0,89	12487	12659
28	2149	2749,7	21500	143,72	435	0,90	12794	12964	38	0,90	12831	13003
29	2103	2895,6	21500	145,89	446	0,91	13134	13303	42	0,91	13174	13345
30	2059	3043,7	21500	148,14	454	0,91	13472	13547	45	0,92	13515	13592
31	2015	3192,2	21500	148,48	458	0,92	13622	13675	47	0,92	13668	13722
32	1968	3340,7	21500	148,47	461	0,93	13727	13773	49	0,93	13776	13822
33	1930	3489,1	21500	148,48	463	0,93	13819	13856	51	0,94	13868	13907
34	1888	3637,6	21500	148,48	465	0,94	13894	13924	52	0,94	13945	13976
35	1851	3786,1	21500	148,48	467	0,94	13954	13977	53	0,95	14007	14030
36	1808	3934,6	21500	148,48	468	0,94	13999	14013	54	0,95	14053	14067
37	1768	4083,0	21500	148,47	469	0,95	14027	14035	54	0,95	14082	14090
38	1733	4231,5	21500	148,48	470	0,95	14044	14045	55	0,95	14098	14099
39	1691	4380,0	21500	148,48	395	0,95	14046	12085	47	0,95	14100	12132
40	1645	4480,0	21400	100,00	325	1,08	10125	10868	43	1,08	10165	10911
41	1604	4580,0	21300	100,00	334	1,24	11611	12472	52	1,25	11658	12524
42	1563	4680,0	21200	100,00	340	1,42	13333	14313	61	1,43	13390	14374
43	1517	4780,0	21100	100,00	338	1,64	15294	16390	67	1,64	15358	16457
44	1480	4880,0	21000	100,00	416	1,86	17486	23104	90	1,87	17556	23194
45	1437	5032,7	21000	152,70	492	1,90	28722	29125	109	1,91	28831	29234
46	1405	5186,9	21000	154,16	483	1,93	29528	29909	107	1,94	29636	30017
47	1369	5342,5	21000	155,68	473	1,96	30291	30684	106	1,97	30397	30790
48	1329	5499,8	21000	157,28	464	1,99	31077	31486	105	2,00	31182	31591
49	1291	5658,8	21000	158,93	453	2,02	31896	32313	103	2,03	32000	32417
50	1252	5819,4	21000	160,67	442	2,05	32731	33153	102	2,06	32834	33254
51	1215	5981,9	21000	162,47	431	2,08	33574	34006	100	2,09	33675	34106
52	1183	6146,2	21000	164,35	418	2,11	34438	34888	98	2,12	34537	34986
53	1151	6312,5	21000	166,31	404	2,14	35338	35806	95	2,15	35435	35901
54	1117	6480,9	21000	168,33	388	2,17	36273	36765	91	2,18	36367	36857
55	1085	6651,3	21000	170,46	370	2,20	37257	37730	87	2,21	37347	37818
56	1055	6823,6	21000	172,27	348	2,23	38203	38488	82	2,24	38288	38570
57	1027	6995,9	21000	172,27	321	2,27	38773	39065	76	2,27	38852	39141
58	999	7168,1	21000	172,26	292	2,30	39357	39664	70	2,31	39430	39335
59	963	7340,4	21000	172,27	261	2,34	39972	40295	63	2,34	40039	40359
60	930	7512,7	21000	172,27	228	2,38	40619	40960	55	2,38	40678	41015
61	897	7684,9	21000	172,26	191	2,42	41302	41668	47	2,42	41353	41714
62	860	7857,2	21000	172,27	150	2,46	42034	42427	37	2,46	42076	42464
63	829	8029,5	21000	172,27	105	2,51	42820	43248	26	2,51	42851	43274
64	801	8201,7	21000	172,26	55	2,56	43676	44147	13	2,56	43696	44161
65	772	8374	21000	172,27	14	2,62	44618	22309	3	2,62	44625	22312

Tabela B-3 (5)

Ptos	Nós	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 5, fratura 4				Nível 5, fratura 5			
		x	y		ΔF6	Subpressã kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	ΔF6	Subpressã kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3324	180	21500		397	3,73		5019	3	3,73		5021
2	3263	207,1	21500	27,07	838	3,69	10037	10599	9	3,69	10042	10608
3	3227	237,5	21500	30,41	929	3,65	11160	11755	17	3,65	11174	11773
4	3191	271,5	21500	34,04	1026	3,61	12350	12987	25	3,61	12371	13011
5	3144	309,5	21500	37,98	1129	3,57	13623	14302	33	3,57	13652	14335
6	3107	351,8	21500	42,27	1239	3,52	14982	15709	43	3,53	15019	15752
7	3060	398,7	21500	46,95	1357	3,48	16437	17220	56	3,49	16486	17277
8	3025	450,8	21500	52,08	1484	3,43	18004	18844	74	3,45	18068	18918
9	2980	508,5	21500	57,69	1621	3,39	19685	20605	94	3,41	19768	20699
10	2942	572,4	21500	63,87	1769	3,35	21525	22525	117	3,37	21630	22642
11	2896	643,0	21500	70,69	1929	3,31	23525	24594	143	3,33	23654	24737
12	2849	721,3	21500	78,21	2100	3,26	25664	26819	173	3,28	25821	26992
13	2812	807,8	21500	86,58	2285	3,21	27974	29229	204	3,23	28162	29434
14	2772	903,7	21500	95,89	2485	3,15	30484	31851	237	3,18	30705	32088
15	2731	1010,0	21500	106,30	2699	3,10	33218	34702	268	3,12	33470	34970
16	2686	1128,0	21500	117,98	2274	3,04	36187	30831	222	3,06	36469	31052
17	2643	1259,2	21500	131,15	1077	0,85	25475	18959	82	0,85	25635	19041
18	2591	1410,0	21500	150,85	297	0,80	12443	9029	2	0,80	12448	9032
19	2542	1480,0	21500	70,00	315	0,80	5615	9848	3	0,80	5615	9852
20	2497	1653,4	21500	173,41	402	0,82	14081	12470	11	0,82	14088	12481
21	2455	1784,3	21500	130,92	359	0,84	10858	11023	19	0,84	10873	11042
22	2407	1916,8	21500	132,51	374	0,85	11187	11357	28	0,85	11211	11385
23	2366	2051,0	21500	134,17	388	0,87	11527	11700	37	0,87	11560	11737
24	2322	2186,9	21500	135,92	402	0,88	11874	12044	46	0,88	11915	12090
25	2281	2324,7	21500	137,74	416	0,89	12215	12390	54	0,90	12265	12444
26	2234	2464,3	21500	139,65	430	0,91	12565	12744	62	0,91	12623	12807
27	2189	2606,0	21500	141,64	444	0,92	12924	13103	70	0,92	12990	13173
28	2149	2749,7	21500	143,72	457	0,93	13281	13460	78	0,94	13356	13538
29	2103	2895,6	21500	145,89	470	0,94	13638	13815	85	0,95	13719	13900
30	2059	3043,7	21500	148,14	480	0,95	13992	14072	91	0,96	14081	14163
31	2015	3192,2	21500	148,48	485	0,96	14151	14207	96	0,96	14245	14303
32	1968	3340,7	21500	148,47	489	0,96	14263	14311	100	0,97	14361	14411
33	1930	3489,1	21500	148,48	492	0,97	14359	14399	103	0,98	14461	14503
34	1888	3637,6	21500	148,48	495	0,97	14439	14471	106	0,98	14544	14577
35	1851	3786,1	21500	148,48	497	0,98	14503	14527	108	0,99	14610	14635
36	1808	3934,6	21500	148,48	499	0,98	14551	14566	110	0,99	14660	14676
37	1768	4083,0	21500	148,47	500	0,98	14581	14590	111	0,99	14692	14701
38	1733	4231,5	21500	148,48	501	0,98	14599	14600	112	0,99	14710	14712
39	1691	4380,0	21500	148,48	422	0,98	14601	12554	96	0,99	14713	12651
40	1645	4480,0	21400	100,00	349	1,12	10507	11260	89	1,13	10588	11349
41	1604	4580,0	21300	100,00	363	1,28	12014	12887	107	1,30	12111	12994
42	1563	4680,0	21200	100,00	374	1,47	13760	14748	127	1,48	13877	14875
43	1517	4780,0	21100	100,00	377	1,68	15737	16834	142	1,69	15872	16977
44	1480	4880,0	21000	100,00	468	1,91	17932	23662	192	1,92	18081	23854
45	1437	5032,7	21000	152,70	555	1,94	29392	29789	234	1,96	29626	30022
46	1405	5186,9	21000	154,16	546	1,97	30186	30562	232	1,99	30419	30794
47	1369	5342,5	21000	155,68	536	2,00	30938	31326	230	2,02	31169	31556
48	1329	5499,8	21000	157,28	526	2,03	31714	32117	227	2,05	31942	32344
49	1291	5658,8	21000	158,93	515	2,06	32520	32931	224	2,07	32746	33155
50	1252	5819,4	21000	160,67	502	2,09	33342	33756	221	2,10	33565	33977
51	1215	5981,9	21000	162,47	489	2,12	34171	34595	217	2,13	34389	34811
52	1183	6146,2	21000	164,35	475	2,14	35019	35461	212	2,16	35233	35673
53	1151	6312,5	21000	166,31	460	2,17	35903	36361	205	2,19	36112	36566
54	1117	6480,9	21000	168,33	442	2,20	36819	37299	199	2,21	37021	37498
55	1085	6651,3	21000	170,46	421	2,23	37780	38239	191	2,24	37975	38430
56	1055	6823,6	21000	172,27	396	2,26	38698	38966	181	2,27	38885	39147
57	1027	6995,9	21000	172,27	366	2,29	39234	39507	168	2,30	39408	39675
58	999	7168,1	21000	172,26	333	2,33	39781	40068	154	2,33	39942	40222
59	963	7340,4	21000	172,27	298	2,36	40355	40656	138	2,37	40502	40794
60	930	7512,7	21000	172,27	259	2,40	40957	41275	121	2,40	41087	41395
61	897	7684,9	21000	172,26	217	2,43	41592	41932	101	2,44	41703	42033
62	860	7857,2	21000	172,27	171	2,47	42272	42635	80	2,48	42363	42715
63	829	8029,5	21000	172,27	120	2,52	42999	43394	56	2,52	43068	43450
64	801	8201,7	21000	172,26	62	2,57	43789	44223	29	2,57	43832	44252
65	772	8374	21000	172,27	16	2,62	44657	22328	7	2,62	44671	22336

Tabela B-3 (6)

Ptos	Nós	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 6, fratura 5			Nível 6, fratura 6				
		x	y		AF6	Subpressã kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	AF6	Subpressã kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3324	180	21500		529	4,12		5550	2	4,12		5552
2	3263	207,1	21500	27,07	1117	4,08	11100	11725	8	4,09	11104	11733
3	3227	237,5	21500	30,41	1239	4,04	12351	13011	14	4,04	12362	13025
4	3191	271,5	21500	34,04	1366	3,99	13671	14378	19	4,00	13688	14397
5	3144	309,5	21500	37,98	1502	3,95	15084	15837	24	3,96	15106	15861
6	3107	351,8	21500	42,27	1647	3,90	16590	17399	31	3,91	16617	17430
7	3060	398,7	21500	46,95	1804	3,86	18208	19080	42	3,86	18243	19122
8	3025	450,8	21500	52,08	1973	3,81	19953	20891	56	3,82	20001	20946
9	2980	508,5	21500	57,69	2158	3,76	21828	22857	73	3,77	21892	22930
10	2942	572,4	21500	63,87	2361	3,72	23885	25003	95	3,73	23968	25098
11	2896	643,0	21500	70,69	2579	3,67	26120	27317	120	3,69	26227	27437
12	2849	721,3	21500	78,21	2814	3,62	28513	29806	150	3,64	28647	29956
13	2812	807,8	21500	86,58	3067	3,56	31098	32501	182	3,58	31264	32682
14	2772	903,7	21500	95,89	3339	3,51	33903	35427	214	3,53	34101	35641
15	2731	1010,0	21500	106,30	3631	3,45	36950	38601	245	3,47	37181	38846
16	2686	1128,0	21500	117,98	3061	3,38	40251	34114	204	3,40	40511	34317
17	2643	1259,2	21500	131,15	1451	0,89	27976	20492	76	0,89	28124	20569
18	2591	1410,0	21500	150,85	401	0,84	13009	9432	2	0,84	13013	9434
19	2542	1480,0	21500	70,00	426	0,84	5856	10278	6	0,84	5856	10284
20	2497	1653,4	21500	173,41	547	0,86	14699	13027	19	0,86	14711	13046
21	2455	1784,3	21500	130,92	494	0,88	11355	11536	33	0,88	11381	11569
22	2407	1916,8	21500	132,51	518	0,89	11717	11903	49	0,90	11757	11952
23	2366	2051,0	21500	134,17	542	0,91	12090	12279	65	0,91	12146	12344
24	2322	2186,9	21500	135,92	566	0,93	12469	12655	80	0,93	12542	12736
25	2281	2324,7	21500	137,74	588	0,94	12842	13032	95	0,95	12929	13127
26	2234	2464,3	21500	139,65	612	0,95	13223	13418	110	0,96	13325	13528
27	2189	2606,0	21500	141,64	635	0,97	13614	13808	124	0,98	13731	13932
28	2149	2749,7	21500	143,72	657	0,98	14002	14195	138	0,99	14133	14333
29	2103	2895,6	21500	145,89	679	0,99	14387	14579	151	1,00	14532	14730
30	2059	3043,7	21500	148,14	695	1,00	14770	14858	162	1,01	14927	15019
31	2015	3192,2	21500	148,48	705	1,01	14946	15008	170	1,02	15112	15178
32	1968	3340,7	21500	148,47	713	1,02	15070	15123	178	1,03	15244	15301
33	1930	3489,1	21500	148,48	719	1,03	15177	15221	184	1,04	15358	15405
34	1888	3637,6	21500	148,48	724	1,03	15265	15301	190	1,04	15452	15490
35	1851	3786,1	21500	148,48	728	1,04	15336	15363	194	1,05	15529	15557
36	1808	3934,6	21500	148,48	731	1,04	15390	15407	196	1,05	15585	15603
37	1768	4083,0	21500	148,47	733	1,04	15424	15434	199	1,05	15622	15633
38	1733	4231,5	21500	148,48	734	1,04	15444	15446	200	1,05	15644	15646
39	1691	4380,0	21500	148,48	620	1,04	15448	13271	172	1,05	15648	13444
40	1645	4480,0	21400	100,00	520	1,18	11095	11869	160	1,19	11240	12029
41	1604	4580,0	21300	100,00	549	1,35	12644	13543	195	1,37	12819	13738
42	1563	4680,0	21200	100,00	576	1,54	14442	15451	235	1,56	14658	15685
43	1517	4780,0	21100	100,00	591	1,75	16460	17567	269	1,78	16713	17836
44	1480	4880,0	21000	100,00	743	1,98	18675	24597	370	2,01	18960	24967
45	1437	5032,7	21000	152,70	886	2,02	30519	30908	453	2,05	30974	31362
46	1405	5186,9	21000	154,16	872	2,04	31298	31666	451	2,07	31750	32117
47	1369	5342,5	21000	155,68	857	2,07	32034	32413	448	2,10	32483	32861
48	1329	5499,8	21000	157,28	842	2,10	32792	33186	445	2,13	33239	33631
49	1291	5658,8	21000	158,93	826	2,13	33580	33981	439	2,15	34023	34421
50	1252	5819,4	21000	160,67	807	2,15	34382	34784	433	2,18	34818	35217
51	1215	5981,9	21000	162,47	787	2,18	35187	35598	426	2,20	35617	36024
52	1183	6146,2	21000	164,35	765	2,20	36010	36438	417	2,23	36432	36855
53	1151	6312,5	21000	166,31	742	2,23	36866	37308	407	2,25	37278	37715
54	1117	6480,9	21000	168,33	714	2,26	37750	38212	395	2,28	38151	38607
55	1085	6651,3	21000	170,46	682	2,28	38675	39112	379	2,30	39062	39491
56	1055	6823,6	21000	172,27	641	2,31	39549	39788	359	2,33	39920	40147
57	1027	6995,9	21000	172,27	593	2,34	40026	40268	334	2,36	40373	40602
58	999	7168,1	21000	172,26	541	2,37	40510	40763	306	2,38	40831	41069
59	963	7340,4	21000	172,27	485	2,40	41016	41279	275	2,41	41307	41554
60	930	7512,7	21000	172,27	423	2,43	41543	41819	240	2,44	41801	42059
61	897	7684,9	21000	172,26	355	2,46	42094	42388	202	2,47	42317	42590
62	860	7857,2	21000	172,27	279	2,50	42682	42994	160	2,50	42864	43155
63	829	8029,5	21000	172,27	196	2,53	43307	43645	112	2,54	43445	43758
64	801	8201,7	21000	172,26	102	2,57	43984	44354	59	2,58	44071	44412
65	772	8374	21000	172,27	26	2,62	44724	22362	15	2,62	44754	22377

Tabela B-4 (1)

Subpressão da casa de força - PPcf12p

Nível de água	Hm	Sd	Hj	Observ.
	kgf/cm ²			
h1: 242 m	2,16		2,56	
h2: 244 m	2,35		2,56	Fratura
h3: 247 m	2,65		2,56	Fratura
h4: 250 m	2,94		2,56	Fratura
h5: 253 m	3,24		2,56	Fratura
h6: 257 m	3,63		2,56	Fratura

Ptos	Omega	Coordenadas		Compr. X cm	Nível 1			AF1	Nível 1, fratura 1		
		x	y		Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal,		Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal,
1	3188	180	22000		2,16		1664	8	2,16		1672
2	3153	195,5	22000	15,51	2,13	3328	3445	27	2,15	3344	3472
3	3128	212,3	22000	16,75	2,12	3562	3689	45	2,15	3601	3735
4	3102	230,3	22000	18,05	2,11	3816	3949	60	2,14	3868	4009
5	3078	249,7	22000	19,43	2,09	4082	4221	77	2,13	4150	4298
6	3045	270,6	22000	20,89	2,08	4361	4510	95	2,12	4447	4604
7	3016	293,1	22000	22,45	2,07	4658	4816	113	2,12	4762	4929
8	2985	317,2	22000	24,10	2,06	4974	5141	132	2,11	5096	5273
9	2962	343,0	22000	25,86	2,05	5309	5488	151	2,10	5451	5638
10	2935	370,8	22000	27,73	2,04	5667	5857	169	2,10	5826	6026
11	2903	400,5	22000	29,73	2,03	6047	6250	189	2,09	6226	6439
12	2870	432,4	22000	31,87	2,02	6453	6670	209	2,08	6652	6880
13	2839	466,5	22000	34,16	2,01	6887	7120	230	2,08	7107	7350
14	2807	503,1	22000	36,61	2,00	7353	7603	252	2,07	7594	7855
15	2779	542,4	22000	39,24	2,00	7853	8119	274	2,07	8116	8393
16	2738	584,4	22000	42,06	1,99	8386	8669	296	2,06	8670	8965
17	2703	629,5	22000	45,11	1,98	8953	8895	309	2,05	9260	9204
18	2660	677,9	22000	48,39	1,67	8837	8424	294	1,73	9148	8718
19	2636	729,9	22000	51,94	1,41	8010	7601	247	1,46	8288	7849
20	2600	785,7	22000	55,79	1,17	7193	6730	177	1,20	7410	6907
21	2550	845,3	22000	59,67	0,93	6267	5613	91	0,95	6404	5705
22	2510	905,0	22000	59,67	0,73	4960	4647	24	0,73	5006	4671
23	2471	964,7	22000	59,67	0,72	4335	4325	1	0,73	4337	4327
24	2434	1024,3	22000	59,67	0,72	4316	4311	0	0,72	4317	4312
25	2391	1084,0	22000	59,67	0,72	4307	4197	0	0,72	4307	4197
26	2358	1140,6	22000	56,63	0,72	4087	4091	0	0,72	4087	4091
27	2327	1197,3	22000	56,63	0,72	4094	4101	0	0,72	4094	4101
28	2292	1253,9	22000	56,63	0,73	4108	4114	1	0,73	4108	4115
29	2264	1310,5	22000	56,63	0,73	4120	4126	1	0,73	4121	4127
30	2239	1367,1	22000	56,63	0,73	4132	4137	2	0,73	4133	4139
31	2208	1423,8	22000	56,63	0,73	4142	4147	2	0,73	4144	4149
32	2182	1480,4	22000	56,63	0,73	4152	4157	2	0,73	4154	4159
33	2159	1537,0	22000	56,63	0,74	4161	4426	3	0,74	4164	4429
34	2138	1600,7	22000	63,71	0,74	4692	4864	4	0,74	4695	4867
35	2116	1668,9	22000	68,23	0,74	5036	5223	4	0,74	5040	5227
36	2092	1742,1	22000	73,13	0,74	5410	5613	5	0,74	5414	5618
37	2063	1820,5	22000	78,42	0,74	5816	6036	6	0,74	5821	6041
38	2039	1904,6	22000	84,16	0,74	6255	6494	7	0,74	6262	6501
39	2009	1995,0	22000	90,38	0,75	6732	6991	8	0,75	6739	6999
40	1985	2092,2	22000	97,15	0,75	7250	7532	9	0,75	7258	7541
41	1950	2196,7	22000	104,51	0,75	7814	8122	10	0,75	7824	8132
42	1922	2309,2	22000	112,55	0,75	8431	8767	11	0,75	8441	8778
43	1891	2430,6	22000	121,34	0,75	9104	9177	12	0,75	9116	9189
44	1854	2553,7	22000	123,10	0,75	9249	9254	12	0,75	9262	9267
45	1816	2676,8	22000	123,10	0,75	9259	9263	13	0,75	9272	9275
46	1789	2799,9	22000	123,10	0,75	9266	9268	13	0,75	9279	9281
47	1753	2923,0	22000	123,10	0,75	9270	7061	10	0,75	9283	7071
48	1715	2983,2	21900	60,17	0,86	4852	5191	9	0,86	4860	5199
49	1674	3043,3	21800	60,17	0,98	5529	5886	11	0,98	5539	5898
50	1635	3103,5	21700	60,17	1,10	6244	6604	15	1,10	6257	6619
51	1598	3163,7	21600	60,17	1,22	6964	7324	18	1,22	6980	7342
52	1552	3223,8	21500	60,17	1,34	7684	8045	21	1,34	7704	8066
53	1521	3284,0	21400	60,17	1,46	8406	12548	33	1,46	8428	12581
54	1485	3398,5	21400	114,50	1,46	16690	16693	45	1,46	16734	16738
55	1455	3513,0	21400	114,50	1,46	16696	12908	35	1,46	16741	12943
56	1418	3573,1	21300	60,14	1,57	9120	9470	26	1,58	9145	9496
57	1379	3633,3	21200	60,14	1,69	9820	10169	28	1,70	9847	10197
58	1347	3693,4	21100	60,14	1,81	10519	10866	29	1,81	10547	10895
59	1313	3753,6	21000	60,14	1,92	11214	11561	30	1,93	11244	11591
60	1282	3813,7	20900	60,14	2,04	11907	12253	32	2,04	11938	12284
61	1248	3873,9	20800	60,14	2,15	12598	12945	32	2,16	12631	12977
62	1218	3934,0	20700	60,14	2,27	13291	17871	44	2,27	13324	17915
63	1191	4033,0	20700	99,00	2,27	22452	18222	44	2,27	22506	18266

Tabela B-4 (2)

64	1162	4093,2	20600	60,17	2,38	13991	14341	34	2,39	14025	14374
65	1131	4153,3	20500	60,17	2,50	14690	15059	34	2,51	14724	15093
66	1098	4213,5	20400	60,17	2,63	15428	15815	34	2,63	15462	15848
67	1071	4273,7	20300	60,17	2,76	16201	16625	33	2,76	16235	16658
68	1045	4333,8	20200	60,16	2,91	17049	17561	32	2,92	17082	17593
69	1010	4394,0	20100	60,17	3,10	18073	30246	48	3,10	18104	30294
70	984	4530,4	20100	136,39	3,12	42418	43961	67	3,13	42484	44028
71	947	4675,6	20100	145,16	3,15	45504	47190	69	3,15	45572	47259
72	916	4830,3	20100	154,72	3,17	48876	49084	68	3,18	48946	49152
73	878	4985,0	20100	154,72	3,20	49292	38465	50	3,20	49358	38514
74	870	5072,0	20188	87,00	3,15	27637	27453	31	3,16	27671	27484
75	865	5159,0	20275	87,00	3,12	27269	27074	26	3,12	27298	27101
76	861	5246,0	20363	87,00	3,06	26880	26624	22	3,07	26903	26646
77	857	5333,0	20450	87,00	3,00	26368	34169	27	3,00	26389	34195
78	824	5473,0	20450	140,00	3,00	41969	41972	32	3,00	42001	42004
79	794	5613,0	20450	140,00	3,00	41974	41981	32	3,00	42006	42014
80	768	5753,0	20450	140,00	3,00	41989	42001	32	3,00	42021	42033
81	740	5893,0	20450	140,00	3,00	42013	42029	32	3,00	42045	42061
82	706	6033,0	20450	140,00	3,00	42045	42065	31	3,01	42076	42096
83	680	6173,0	20450	140,00	3,01	42085	42109	30	3,01	42116	42139
84	652	6313,0	20450	140,00	3,01	42132	42160	30	3,01	42162	42190
85	626	6453,0	20450	140,00	3,02	42188	42219	29	3,02	42217	42248
86	602	6593,0	20450	140,00	3,02	42250	42285	28	3,02	42279	42313
87	577	6733,0	20450	140,00	3,03	42319	42357	27	3,03	42347	42384
88	553	6873,0	20450	140,00	3,03	42396	42437	26	3,03	42422	42463
89	529	7013,0	20450	140,00	3,04	42479	42524	25	3,04	42505	42550
90	511	7153,0	20450	140,00	3,04	42570	42619	23	3,05	42594	42643
91	490	7293,0	20450	140,00	3,05	42669	42722	21	3,05	42691	42743
92	468	7433,0	20450	140,00	3,06	42775	42832	20	3,06	42795	42852
93	449	7573,0	20450	140,00	3,07	42890	42952	18	3,07	42909	42970
94	432	7713,0	20450	140,00	3,08	43014	43081	16	3,08	43031	43097
95	417	7853,0	20450	140,00	3,09	43148	43221	14	3,09	43163	43235
96	401	7993,0	20450	140,00	3,10	43294	43372	13	3,10	43307	43385
97	384	8133,0	20450	140,00	3,11	43451	43529	11	3,11	43463	43540
98	369	8273,0	20450	140,00	3,12	43607	43706	8	3,12	43617	43714
99	355	8413,0	20450	140,00	3,14	43804	43936	4	3,14	43810	43940
100	340	8553	20450	140,00	3,16	44069	22034	1	3,16	44071	22035

Tabela B-4 (3)

Ptos	Omega	Coordenadas		Compr. X cm	Nível 2, fratura 1			Nível 2, fratura 2				
		x	y		AF2	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	AF3	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3188	180	22000		153	2,35		1825	0	2,35		1825
2	3153	195,5	22000	15,51	318	2,35	3649	3790	1	2,35	3650	3791
3	3128	212,3	22000	16,75	342	2,34	3931	4077	2	2,34	3932	4079
4	3102	230,3	22000	18,05	368	2,34	4223	4377	2	2,34	4225	4379
5	3078	249,7	22000	19,43	395	2,33	4531	4693	2	2,33	4533	4695
6	3045	270,6	22000	20,89	424	2,32	4856	5028	2	2,32	4858	5030
7	3016	293,1	22000	22,45	454	2,31	5200	5383	2	2,31	5202	5385
8	2985	317,2	22000	24,10	486	2,31	5566	5759	1	2,31	5567	5761
9	2962	343,0	22000	25,86	519	2,30	5953	6157	1	2,30	5954	6159
10	2935	370,8	22000	27,73	554	2,29	6362	6580	1	2,29	6363	6581
11	2903	400,5	22000	29,73	591	2,28	6798	7030	1	2,28	6799	7031
12	2870	432,4	22000	31,87	630	2,27	7262	7510	1	2,28	7263	7511
13	2839	466,5	22000	34,16	671	2,27	7757	8022	1	2,27	7758	8023
14	2807	503,1	22000	36,61	716	2,26	8287	8570	1	2,26	8288	8571
15	2779	542,4	22000	39,24	763	2,25	8854	9156	1	2,25	8855	9157
16	2738	584,4	22000	42,06	814	2,24	9458	9779	1	2,24	9459	9780
17	2703	629,5	22000	45,11	830	2,23	10101	10033	4	2,23	10102	10038
18	2660	677,9	22000	48,39	761	1,88	9966	9479	12	1,89	9973	9491
19	2636	729,9	22000	51,94	638	1,58	8992	8487	18	1,58	9009	8505
20	2600	785,7	22000	55,79	493	1,28	7981	7399	18	1,29	8001	7417
21	2550	845,3	22000	59,67	321	1,00	6818	6026	10	1,00	6833	6036
22	2510	905,0	22000	59,67	184	0,75	5234	4855	3	0,75	5239	4857
23	2471	964,7	22000	59,67	137	0,75	4476	4464	0	0,75	4475	4464
24	2434	1024,3	22000	59,67	135	0,74	4453	4447	0	0,74	4453	4447
25	2391	1084,0	22000	59,67	131	0,74	4441	4328	0	0,74	4441	4328
26	2358	1140,6	22000	56,63	128	0,74	4215	4219	0	0,74	4215	4219
27	2327	1197,3	22000	56,63	129	0,75	4223	4230	1	0,75	4223	4231
28	2292	1253,9	22000	56,63	130	0,75	4238	4245	2	0,75	4239	4247
29	2264	1310,5	22000	56,63	131	0,75	4252	4258	3	0,75	4254	4261
30	2239	1367,1	22000	56,63	132	0,75	4265	4271	4	0,75	4268	4274
31	2208	1423,8	22000	56,63	133	0,76	4277	4282	4	0,76	4281	4287
32	2182	1480,4	22000	56,63	134	0,76	4288	4293	5	0,76	4292	4298
33	2159	1537,0	22000	56,63	143	0,76	4298	4573	6	0,76	4303	4578
34	2138	1600,7	22000	63,71	158	0,76	4847	5025	7	0,76	4854	5033
35	2116	1668,9	22000	68,23	170	0,76	5204	5398	9	0,76	5212	5406
36	2092	1742,1	22000	73,13	184	0,77	5591	5801	10	0,77	5601	5812
37	2063	1820,5	22000	78,42	198	0,77	6012	6240	12	0,77	6023	6252
38	2039	1904,6	22000	84,16	214	0,77	6467	6715	14	0,77	6480	6729
39	2009	1995,0	22000	90,38	231	0,77	6962	7230	16	0,77	6977	7246
40	1985	2092,2	22000	97,15	250	0,77	7499	7791	18	0,77	7516	7809
41	1950	2196,7	22000	104,51	270	0,77	8083	8403	21	0,78	8103	8423
42	1922	2309,2	22000	112,55	293	0,78	8722	9071	23	0,78	8744	9095
43	1891	2430,6	22000	121,34	307	0,78	9420	9496	26	0,78	9445	9522
44	1854	2553,7	22000	123,10	311	0,78	9572	9577	26	0,78	9598	9604
45	1816	2676,8	22000	123,10	311	0,78	9583	9587	27	0,78	9610	9614
46	1789	2799,9	22000	123,10	312	0,78	9590	9593	27	0,78	9618	9620
47	1753	2923,0	22000	123,10	233	0,78	9595	7305	22	0,78	9622	7326
48	1715	2983,2	21900	60,17	158	0,89	5014	5357	19	0,89	5030	5376
49	1674	3043,3	21800	60,17	166	1,01	5700	6064	26	1,01	5722	6090
50	1635	3103,5	21700	60,17	176	1,13	6428	6794	35	1,14	6458	6829
51	1598	3163,7	21600	60,17	184	1,25	7160	7527	43	1,26	7200	7570
52	1552	3223,8	21500	60,17	192	1,37	7893	8259	51	1,38	7940	8310
53	1521	3284,0	21400	60,17	288	1,49	8625	12870	83	1,50	8679	12953
54	1485	3398,5	21400	114,50	381	1,50	17115	17119	111	1,50	17226	17230
55	1455	3513,0	21400	114,50	292	1,50	17122	13235	86	1,51	17233	13321
56	1418	3573,1	21300	60,14	206	1,61	9348	9701	64	1,62	9409	9765
57	1379	3633,3	21200	60,14	211	1,73	10055	10407	69	1,74	10121	10476
58	1347	3693,4	21100	60,14	215	1,85	10760	11110	73	1,86	10831	11183
59	1313	3753,6	21000	60,14	218	1,96	11461	11809	77	1,98	11536	11886
60	1282	3813,7	20900	60,14	221	2,08	12158	12505	80	2,09	12237	12585
61	1248	3873,9	20800	60,14	223	2,19	12853	13200	82	2,21	12934	13282
62	1218	3934,0	20700	60,14	296	2,31	13547	18211	111	2,32	13630	18321
63	1191	4033,0	20700	99,00	296	2,31	22874	18561	111	2,32	23012	18673
64	1162	4093,2	20600	60,17	223	2,43	14248	14598	85	2,44	14333	14683
65	1131	4153,3	20500	60,17	222	2,54	14947	15315	86	2,56	15033	15401
66	1098	4213,5	20400	60,17	218	2,67	15682	16066	86	2,68	15768	16152
67	1071	4273,7	20300	60,17	211	2,80	16450	16870	84	2,81	16536	16954
68	1045	4333,8	20200	60,16	199	2,95	17289	17792	81	2,96	17372	17873
69	1010	4394,0	20100	60,17	294	3,13	18294	30588	123	3,14	18373	30710
70	984	4530,4	20100	136,39	400	3,16	42881	44428	169	3,17	43048	44597
71	947	4675,6	20100	145,16	406	3,18	45975	47665	173	3,19	46146	47838
72	916	4830,3	20100	154,72	397	3,20	49355	49549	171	3,21	49530	49720
73	878	4985,0	20100	154,72	291	3,23	49743	38805	126	3,24	49910	38931
74	870	5072,0	20188	87,00	181	3,18	27867	27665	78	3,19	27951	27744

Tabela B-4 (4)

75	865	5159,0	20275	87,00	153	3,14	27464	27254	66	3,14	27536	27320
76	861	5246,0	20363	87,00	131	3,08	27043	26777	57	3,09	27104	26833
77	857	5333,0	20450	87,00	153	3,01	26510	34348	67	3,02	26563	34415
78	824	5473,0	20450	140,00	185	3,01	42186	42189	81	3,02	42267	42270
79	794	5613,0	20450	140,00	184	3,01	42191	42198	81	3,02	42272	42279
80	768	5753,0	20450	140,00	183	3,02	42205	42216	80	3,02	42286	42296
81	740	5893,0	20450	140,00	181	3,02	42227	42242	79	3,02	42307	42321
82	706	6033,0	20450	140,00	179	3,02	42256	42274	78	3,03	42335	42353
83	680	6173,0	20450	140,00	175	3,02	42293	42314	77	3,03	42370	42391
84	652	6313,0	20450	140,00	172	3,03	42336	42361	75	3,03	42412	42436
85	626	6453,0	20450	140,00	167	3,03	42386	42414	73	3,03	42460	42487
86	602	6593,0	20450	140,00	161	3,03	42442	42474	71	3,04	42515	42545
87	577	6733,0	20450	140,00	156	3,04	42505	42540	69	3,04	42575	42609
88	553	6873,0	20450	140,00	149	3,04	42575	42613	65	3,05	42642	42678
89	529	7013,0	20450	140,00	142	3,05	42650	42692	62	3,05	42714	42754
90	511	7153,0	20450	140,00	135	3,06	42733	42777	59	3,06	42793	42836
91	490	7293,0	20450	140,00	127	3,06	42822	42870	56	3,07	42879	42925
92	468	7433,0	20450	140,00	118	3,07	42918	42970	52	3,07	42972	43021
93	449	7573,0	20450	140,00	107	3,08	43021	43077	47	3,08	43071	43125
94	432	7713,0	20450	140,00	97	3,09	43133	43194	42	3,09	43178	43236
95	417	7853,0	20450	140,00	85	3,09	43254	43320	36	3,10	43294	43356
96	401	7993,0	20450	140,00	71	3,10	43385	43456	31	3,11	43419	43487
97	384	8133,0	20450	140,00	57	3,11	43527	43597	26	3,12	43555	43623
98	369	8273,0	20450	140,00	43	3,12	43667	43756	19	3,13	43691	43775
99	355	8413,0	20450	140,00	24	3,14	43845	43964	10	3,14	43860	43974
100	340	8553	20450	140,00	6	3,16	44083	22042	2	3,16	44088	22044

Tabela B-4 (5)

Ptos	Omega	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 3, fratura 2			Nível 3, fratura 3				
		x	y		AF4	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	AF5	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3188	180	22000		228	2,65		2053	0	2,65		2053
2	3153	195,5	22000	15,51	474	2,65	4106	4265	0	2,65	4107	4266
3	3128	212,3	22000	16,75	510	2,64	4424	4588	0	2,64	4424	4588
4	3102	230,3	22000	18,05	546	2,63	4752	4925	0	2,63	4752	4925
5	3078	249,7	22000	19,43	585	2,62	5098	5280	-1	2,62	5097	5279
6	3045	270,6	22000	20,89	625	2,61	5462	5655	-2	2,61	5461	5653
7	3016	293,1	22000	22,45	668	2,60	5848	6053	-3	2,60	5846	6051
8	2985	317,2	22000	24,10	714	2,59	6258	6475	-4	2,59	6255	6471
9	2962	343,0	22000	25,86	762	2,58	6691	6921	-4	2,58	6687	6917
10	2935	370,8	22000	27,73	813	2,57	7151	7395	-5	2,57	7146	7390
11	2903	400,5	22000	29,73	868	2,56	7639	7899	-6	2,56	7633	7893
12	2870	432,4	22000	31,87	926	2,56	8159	8436	-7	2,55	8153	8430
13	2839	466,5	22000	34,16	987	2,55	8714	9010	-8	2,54	8707	9003
14	2807	503,1	22000	36,61	1053	2,54	9306	9624	-9	2,54	9298	9615
15	2779	542,4	22000	39,24	1124	2,53	9942	10280	-10	2,53	9932	10270
16	2738	584,4	22000	42,06	1199	2,52	10619	10979	-11	2,52	10608	10969
17	2703	629,5	22000	45,11	1216	2,51	11340	11254	-6	2,51	11329	11248
18	2660	677,9	22000	48,39	1105	2,11	11167	10596	7	2,11	11167	10603
19	2636	729,9	22000	51,94	918	1,75	10025	9423	16	1,76	10039	9439
20	2600	785,7	22000	55,79	709	1,41	8822	8126	17	1,41	8840	8143
21	2550	845,3	22000	59,67	467	1,08	7430	6503	10	1,08	7445	6513
22	2510	905,0	22000	59,67	273	0,79	5575	5131	2	0,79	5580	5133
23	2471	964,7	22000	59,67	209	0,78	4686	4673	0	0,78	4685	4672
24	2434	1024,3	22000	59,67	206	0,78	4659	4653	0	0,78	4659	4653
25	2391	1084,0	22000	59,67	200	0,78	4646	4528	0	0,78	4646	4528
26	2358	1140,6	22000	56,63	195	0,78	4409	4414	0	0,78	4409	4414
27	2327	1197,3	22000	56,63	197	0,78	4419	4428	1	0,78	4419	4429
28	2292	1253,9	22000	56,63	199	0,79	4437	4446	2	0,79	4439	4448
29	2264	1310,5	22000	56,63	201	0,79	4454	4462	3	0,79	4457	4465
30	2239	1367,1	22000	56,63	203	0,79	4470	4477	4	0,79	4474	4481
31	2208	1423,8	22000	56,63	204	0,79	4484	4491	5	0,79	4489	4496
32	2182	1480,4	22000	56,63	206	0,80	4498	4504	6	0,80	4503	4510
33	2159	1537,0	22000	56,63	220	0,80	4510	4799	7	0,80	4516	4806
34	2138	1600,7	22000	63,71	243	0,80	5088	5276	9	0,80	5096	5285
35	2116	1668,9	22000	68,23	263	0,80	5465	5669	10	0,80	5474	5679
36	2092	1742,1	22000	73,13	284	0,80	5874	6096	12	0,81	5885	6108
37	2063	1820,5	22000	78,42	307	0,81	6318	6559	15	0,81	6331	6573
38	2039	1904,6	22000	84,16	332	0,81	6799	7061	17	0,81	6815	7078
39	2009	1995,0	22000	90,38	359	0,81	7322	7605	19	0,81	7340	7625
40	1985	2092,2	22000	97,15	389	0,81	7889	8198	22	0,82	7910	8220
41	1950	2196,7	22000	104,51	421	0,81	8507	8844	25	0,82	8530	8869
42	1922	2309,2	22000	112,55	456	0,82	9182	9550	28	0,82	9208	9579
43	1891	2430,6	22000	121,34	479	0,82	9919	10000	31	0,82	9949	10031
44	1854	2553,7	22000	123,10	484	0,82	10081	10088	32	0,82	10113	10120
45	1816	2676,8	22000	123,10	486	0,82	10095	10099	33	0,82	10127	10132
46	1789	2799,9	22000	123,10	487	0,82	10104	10107	33	0,82	10137	10140
47	1753	2923,0	22000	123,10	365	0,82	10109	7691	26	0,82	10143	7717
48	1715	2983,2	21900	60,17	249	0,93	5272	5625	23	0,93	5291	5648
49	1674	3043,3	21800	60,17	266	1,06	5978	6356	32	1,06	6005	6388
50	1635	3103,5	21700	60,17	285	1,18	6734	7114	44	1,19	6772	7158
51	1598	3163,7	21600	60,17	303	1,31	7494	7873	57	1,32	7544	7930
52	1552	3223,8	21500	60,17	321	1,43	8252	8631	69	1,45	8315	8700
53	1521	3284,0	21400	60,17	487	1,56	9009	13440	115	1,57	9084	13555
54	1485	3398,5	21400	114,50	645	1,56	17870	17874	155	1,57	18025	18029
55	1455	3513,0	21400	114,50	495	1,56	17879	13817	121	1,58	18034	13937
56	1418	3573,1	21300	60,14	352	1,68	9755	10117	91	1,70	9841	10208
57	1379	3633,3	21200	60,14	363	1,80	10479	10839	100	1,82	10575	10939
58	1347	3693,4	21100	60,14	373	1,92	11200	11556	108	1,94	11304	11664
59	1313	3753,6	21000	60,14	381	2,04	11913	12267	115	2,06	12025	12383
60	1282	3813,7	20900	60,14	388	2,16	12622	12973	121	2,18	12740	13095

Tabela B-4 (6)

61	1248	3873,9	20800	60,14	392	2,27	13325	13675	126	2,29	13449	13801
62	1218	3934,0	20700	60,14	522	2,39	14024	18843	171	2,41	14153	19014
63	1191	4033,0	20700	99,00	522	2,39	23661	19195	173	2,41	23875	19367
64	1162	4093,2	20600	60,17	395	2,51	14728	15079	132	2,53	14860	15211
65	1131	4153,3	20500	60,17	393	2,62	15429	15794	134	2,65	15562	15928
66	1098	4213,5	20400	60,17	387	2,75	16160	16539	134	2,77	16294	16674
67	1071	4273,7	20300	60,17	376	2,88	16919	17330	133	2,90	17053	17463
68	1045	4333,8	20200	60,16	355	3,02	17742	18228	128	3,04	17874	18356
69	1010	4394,0	20100	60,17	528	3,20	18714	31238	196	3,22	18839	31435
70	984	4530,4	20100	136,39	721	3,22	43763	45318	270	3,24	44030	45588
71	947	4675,6	20100	145,16	733	3,24	46873	48571	277	3,26	47147	48848
72	916	4830,3	20100	154,72	717	3,26	50268	50437	274	3,28	50549	50711
73	878	4985,0	20100	154,72	525	3,28	50607	39456	202	3,30	50874	39658
74	870	5072,0	20188	87,00	327	3,22	28305	28071	126	3,24	28441	28197
75	865	5159,0	20275	87,00	276	3,17	27837	27596	107	3,19	27953	27703
76	861	5246,0	20363	87,00	236	3,11	27356	27069	91	3,12	27453	27161
77	857	5333,0	20450	87,00	277	3,04	26783	34692	108	3,05	26868	34800
78	824	5473,0	20450	140,00	334	3,04	42602	42604	130	3,05	42732	42734
79	794	5613,0	20450	140,00	333	3,04	42606	42612	129	3,05	42736	42741
80	768	5753,0	20450	140,00	330	3,04	42617	42626	128	3,05	42746	42755
81	740	5893,0	20450	140,00	326	3,05	42635	42647	127	3,06	42763	42774
82	706	6033,0	20450	140,00	322	3,05	42659	42674	125	3,06	42785	42799
83	680	6173,0	20450	140,00	316	3,05	42690	42707	123	3,06	42813	42830
84	652	6313,0	20450	140,00	309	3,05	42725	42745	120	3,06	42846	42865
85	626	6453,0	20450	140,00	301	3,06	42765	42788	118	3,06	42884	42905
86	602	6593,0	20450	140,00	291	3,06	42811	42836	114	3,07	42927	42950
87	577	6733,0	20450	140,00	280	3,06	42861	42889	111	3,07	42974	43000
88	553	6873,0	20450	140,00	269	3,07	42917	42947	106	3,08	43026	43054
89	529	7013,0	20450	140,00	257	3,07	42978	43011	101	3,08	43082	43112
90	511	7153,0	20450	140,00	243	3,08	43044	43079	95	3,08	43142	43175
91	490	7293,0	20450	140,00	228	3,08	43115	43153	90	3,09	43208	43243
92	468	7433,0	20450	140,00	211	3,09	43191	43232	84	3,09	43278	43316
93	449	7573,0	20450	140,00	193	3,09	43273	43318	77	3,10	43354	43394
94	432	7713,0	20450	140,00	174	3,10	43362	43410	69	3,11	43435	43479
95	417	7853,0	20450	140,00	153	3,11	43458	43510	60	3,11	43523	43569
96	401	7993,0	20450	140,00	129	3,12	43561	43616	51	3,12	43616	43667
97	384	8133,0	20450	140,00	104	3,12	43672	43727	42	3,13	43718	43769
98	369	8273,0	20450	140,00	77	3,13	43782	43853	31	3,13	43819	43883
99	355	8413,0	20450	140,00	43	3,14	43923	44017	16	3,14	43947	44033
100	340	8553	20450	140,00	11	3,16	44111	22055	4	3,16	44119	22059

Tabela B-4 (7)

Ptos	Omega	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 4-Fratura 3				Nível 4-Fratura 4			
		x	y		$\Delta F6$	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	$\Delta F7$	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3188	180	22000		228	2,94		2282	0	2,94		2282
2	3153	195,5	22000	15,51	474	2,94	4563	4739	0	2,94	4563	4739
3	3128	212,3	22000	16,75	509	2,93	4916	5098	0	2,93	4916	5097
4	3102	230,3	22000	18,05	546	2,92	5279	5470	0	2,92	5279	5470
5	3078	249,7	22000	19,43	584	2,91	5661	5863	-1	2,91	5661	5862
6	3045	270,6	22000	20,89	625	2,90	6065	6278	-1	2,90	6064	6277
7	3016	293,1	22000	22,45	668	2,89	6492	6718	-1	2,89	6491	6717
8	2985	317,2	22000	24,10	713	2,88	6945	7184	-2	2,88	6943	7183
9	2962	343,0	22000	25,86	761	2,87	7424	7678	-2	2,86	7422	7676
10	2935	370,8	22000	27,73	812	2,85	7932	8202	-3	2,85	7930	8199
11	2903	400,5	22000	29,73	867	2,84	8472	8760	-3	2,84	8469	8756
12	2870	432,4	22000	31,87	924	2,83	9047	9354	-4	2,83	9044	9350
13	2839	466,5	22000	34,16	986	2,82	9661	9988	-5	2,82	9656	9984
14	2807	503,1	22000	36,61	1052	2,81	10316	10667	-5	2,81	10311	10662
15	2779	542,4	22000	39,24	1122	2,80	11018	11392	-6	2,80	11012	11386
16	2738	584,4	22000	42,06	1197	2,79	11766	12166	-6	2,79	11760	12160
17	2703	629,5	22000	45,11	1213	2,78	12565	12461	-4	2,78	12559	12457
18	2660	677,9	22000	48,39	1099	2,33	12356	11701	3	2,33	12355	11705
19	2636	729,9	22000	51,94	911	1,93	11047	10350	9	1,93	11054	10359
20	2600	785,7	22000	55,79	703	1,53	9654	8846	10	1,54	9665	8855
21	2550	845,3	22000	59,67	463	1,16	8037	6976	6	1,16	8046	6982
22	2510	905,0	22000	59,67	272	0,82	5915	5405	1	0,82	5918	5407
23	2471	964,7	22000	59,67	209	0,82	4896	4881	0	0,82	4896	4881
24	2434	1024,3	22000	59,67	206	0,81	4866	4858	0	0,81	4866	4858
25	2391	1084,0	22000	59,67	200	0,81	4851	4727	0	0,81	4851	4727
26	2358	1140,6	22000	56,63	195	0,81	4604	4609	0	0,81	4604	4609
27	2327	1197,3	22000	56,63	197	0,82	4615	4626	1	0,82	4615	4627
28	2292	1253,9	22000	56,63	199	0,82	4637	4647	2	0,82	4638	4649
29	2264	1310,5	22000	56,63	201	0,82	4657	4666	3	0,82	4659	4669
30	2239	1367,1	22000	56,63	203	0,83	4675	4684	3	0,83	4678	4687
31	2208	1423,8	22000	56,63	204	0,83	4693	4700	4	0,83	4696	4705
32	2182	1480,4	22000	56,63	206	0,83	4708	4716	5	0,83	4713	4720
33	2159	1537,0	22000	56,63	220	0,84	4723	5027	6	0,84	4728	5032
34	2138	1600,7	22000	63,71	244	0,84	5330	5529	7	0,84	5337	5535
35	2116	1668,9	22000	68,23	263	0,84	5727	5942	8	0,84	5734	5951
36	2092	1742,1	22000	73,13	284	0,84	6158	6392	10	0,84	6167	6402
37	2063	1820,5	22000	78,42	307	0,85	6626	6880	12	0,85	6637	6892
38	2039	1904,6	22000	84,16	332	0,85	7134	7409	13	0,85	7146	7423
39	2009	1995,0	22000	90,38	359	0,85	7685	7984	15	0,85	7699	7999
40	1985	2092,2	22000	97,15	388	0,85	8283	8608	17	0,86	8299	8626
41	1950	2196,7	22000	104,51	421	0,86	8934	9290	20	0,86	8952	9309
42	1922	2309,2	22000	112,55	456	0,86	9646	10034	22	0,86	9667	10057
43	1891	2430,6	22000	121,34	479	0,86	10423	10510	24	0,86	10447	10534
44	1854	2553,7	22000	123,10	484	0,86	10596	10604	25	0,86	10621	10629
45	1816	2676,8	22000	123,10	485	0,86	10612	10617	26	0,86	10637	10643
46	1789	2799,9	22000	123,10	486	0,86	10623	10626	26	0,87	10649	10652
47	1753	2923,0	22000	123,10	364	0,86	10629	8081	21	0,87	10655	8102
48	1715	2983,2	21900	60,17	249	0,98	5533	5897	18	0,98	5548	5915
49	1674	3043,3	21800	60,17	266	1,11	6261	6654	25	1,11	6282	6679
50	1635	3103,5	21700	60,17	285	1,24	7047	7443	35	1,24	7077	7478
51	1598	3163,7	21600	60,17	304	1,37	7839	8234	44	1,38	7879	8278
52	1552	3223,8	21500	60,17	322	1,50	8628	9022	54	1,51	8678	9075
53	1521	3284,0	21400	60,17	488	1,63	9415	14043	89	1,64	9473	14132
54	1485	3398,5	21400	114,50	647	1,63	18672	18676	120	1,64	18791	18796
55	1455	3513,0	21400	114,50	497	1,63	18681	14435	93	1,64	18801	14528
56	1418	3573,1	21300	60,14	353	1,76	10188	10561	70	1,77	10255	10631
57	1379	3633,3	21200	60,14	366	1,88	10935	11305	77	1,89	11008	11382
58	1347	3693,4	21100	60,14	376	2,00	11675	12041	84	2,02	11756	12124
59	1313	3753,6	21000	60,14	385	2,12	12406	12768	89	2,14	12493	12857
60	1282	3813,7	20900	60,14	393	2,24	13129	13487	94	2,26	13221	13581

Tabela B-4 (8)

61	1248	3873,9	20800	60,14	398	2,36	13845	14198	98	2,38	13941	14297
62	1218	3934,0	20700	60,14	529	2,48	14552	19543	134	2,50	14652	19677
63	1191	4033,0	20700	99,00	531	2,48	24535	19898	135	2,50	24702	20033
64	1162	4093,2	20600	60,17	402	2,59	15262	15613	104	2,61	15364	15717
65	1131	4153,3	20500	60,17	401	2,71	15965	16329	105	2,73	16070	16435
66	1098	4213,5	20400	60,17	395	2,84	16693	17069	106	2,85	16799	17175
67	1071	4273,7	20300	60,17	384	2,96	17444	17848	105	2,98	17550	17952
68	1045	4333,8	20200	60,16	363	3,11	18251	18719	102	3,12	18355	18821
69	1010	4394,0	20100	60,17	539	3,27	19188	31974	155	3,29	19287	32129
70	984	4530,4	20100	136,39	737	3,29	44760	46325	214	3,31	44972	46539
71	947	4675,6	20100	145,16	749	3,31	47890	49597	219	3,32	48106	49816
72	916	4830,3	20100	154,72	734	3,32	51304	51446	217	3,34	51526	51662
73	878	4985,0	20100	154,72	538	3,34	51587	40196	159	3,36	51799	40355
74	870	5072,0	20188	87,00	335	3,28	28804	28532	100	3,29	28911	28632
75	865	5159,0	20275	87,00	283	3,22	28261	27986	85	3,23	28352	28071
76	861	5246,0	20363	87,00	242	3,15	27712	27403	73	3,16	27790	27475
77	857	5333,0	20450	87,00	285	3,08	27094	35085	86	3,08	27161	35171
78	824	5473,0	20450	140,00	344	3,08	43077	43078	104	3,08	43180	43182
79	794	5613,0	20450	140,00	343	3,08	43079	43084	104	3,08	43184	43188
80	768	5753,0	20450	140,00	340	3,08	43088	43095	104	3,09	43192	43198
81	740	5893,0	20450	140,00	337	3,08	43102	43111	102	3,09	43205	43213
82	706	6033,0	20450	140,00	331	3,08	43120	43131	101	3,09	43222	43232
83	680	6173,0	20450	140,00	325	3,08	43142	43155	99	3,09	43242	43254
84	652	6313,0	20450	140,00	317	3,08	43168	43183	97	3,09	43266	43280
85	626	6453,0	20450	140,00	309	3,09	43198	43215	95	3,09	43294	43309
86	602	6593,0	20450	140,00	300	3,09	43231	43250	92	3,10	43324	43342
87	577	6733,0	20450	140,00	289	3,09	43268	43289	88	3,10	43359	43377
88	553	6873,0	20450	140,00	277	3,10	43309	43331	84	3,10	43395	43415
89	529	7013,0	20450	140,00	264	3,10	43352	43376	81	3,10	43435	43457
90	511	7153,0	20450	140,00	250	3,10	43399	43425	77	3,11	43478	43502
91	490	7293,0	20450	140,00	235	3,11	43450	43478	71	3,11	43525	43549
92	468	7433,0	20450	140,00	218	3,11	43505	43534	66	3,11	43574	43600
93	449	7573,0	20450	140,00	199	3,11	43562	43593	61	3,12	43626	43654
94	432	7713,0	20450	140,00	179	3,12	43624	43657	56	3,12	43683	43713
95	417	7853,0	20450	140,00	156	3,12	43691	43726	49	3,13	43743	43775
96	401	7993,0	20450	140,00	132	3,13	43761	43799	41	3,13	43807	43841
97	384	8133,0	20450	140,00	107	3,13	43838	43876	33	3,14	43875	43909
98	369	8273,0	20450	140,00	80	3,14	43915	43963	24	3,14	43943	43987
99	355	8413,0	20450	140,00	43	3,15	44012	44077	13	3,15	44031	44090
100	340	8553	20450	140,00	11	3,16	44141	22071	4	3,16	44148	22074

Tabela B-4 (9)

Ptos	Omega	Coordenadas		Compr. Xi cm	Nível 5-Fratura 4			Nível 5-Fratura 5				
		x	y		AF8	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf	AF9	Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3188	180	22000		228	3,24		2510	0	3,24		2510
2	3153	195,5	22000	15,51	474	3,23	5019	5213	0	3,23	5019	5213
3	3128	212,3	22000	16,75	509	3,22	5407	5606	0	3,22	5407	5606
4	3102	230,3	22000	18,05	545	3,21	5806	6015	0	3,21	5806	6015
5	3078	249,7	22000	19,43	583	3,20	6225	6446	0	3,20	6225	6446
6	3045	270,6	22000	20,89	624	3,18	6667	6901	-1	3,18	6666	6900
7	3016	293,1	22000	22,45	666	3,17	7135	7383	-1	3,17	7135	7383
8	2985	317,2	22000	24,10	712	3,16	7632	7894	-1	3,16	7631	7893
9	2962	343,0	22000	25,86	759	3,15	8157	8435	-1	3,15	8156	8434
10	2935	370,8	22000	27,73	810	3,14	8714	9009	-2	3,14	8712	9008
11	2903	400,5	22000	29,73	864	3,12	9305	9620	-2	3,12	9303	9618
12	2870	432,4	22000	31,87	921	3,11	9935	10271	-2	3,11	9933	10269
13	2839	466,5	22000	34,16	982	3,10	10607	10966	-3	3,10	10605	10963
14	2807	503,1	22000	36,61	1048	3,09	11325	11709	-4	3,09	11322	11706
15	2779	542,4	22000	39,24	1118	3,08	12094	12504	-4	3,08	12090	12500
16	2738	584,4	22000	42,06	1192	3,06	12914	13352	-4	3,06	12910	13348
17	2703	629,5	22000	45,11	1207	3,05	13790	13665	-2	3,05	13786	13662
18	2660	677,9	22000	48,39	1093	2,55	13540	12798	2	2,55	13539	12801
19	2636	729,9	22000	51,94	906	2,10	12057	11266	7	2,10	12062	11272
20	2600	785,7	22000	55,79	700	1,66	10474	9555	7	1,66	10482	9563
21	2550	845,3	22000	59,67	462	1,24	8636	7443	5	1,24	8643	7448
22	2510	905,0	22000	59,67	272	0,86	6251	5678	1	0,86	6253	5679
23	2471	964,7	22000	59,67	209	0,85	5106	5089	0	0,85	5105	5089
24	2434	1024,3	22000	59,67	206	0,85	5072	5064	0	0,85	5072	5064
25	2391	1084,0	22000	59,67	200	0,85	5056	4927	0	0,85	5056	4927
26	2358	1140,6	22000	56,63	195	0,85	4798	4804	0	0,85	4798	4805
27	2327	1197,3	22000	56,63	197	0,85	4811	4823	1	0,85	4811	4824
28	2292	1253,9	22000	56,63	199	0,86	4836	4848	2	0,86	4838	4850
29	2264	1310,5	22000	56,63	201	0,86	4859	4870	3	0,86	4862	4873
30	2239	1367,1	22000	56,63	203	0,86	4881	4891	4	0,86	4884	4895
31	2208	1423,8	22000	56,63	205	0,87	4900	4910	5	0,87	4905	4914
32	2182	1480,4	22000	56,63	207	0,87	4919	4927	6	0,87	4924	4933
33	2159	1537,0	22000	56,63	221	0,87	4936	5254	7	0,87	4942	5260
34	2138	1600,7	22000	63,71	245	0,88	5572	5780	8	0,88	5579	5788
35	2116	1668,9	22000	68,23	264	0,88	5988	6215	10	0,88	5997	6224
36	2092	1742,1	22000	73,13	285	0,88	6441	6687	12	0,88	6452	6699
37	2063	1820,5	22000	78,42	309	0,89	6934	7200	14	0,89	6946	7214
38	2039	1904,6	22000	84,16	334	0,89	7467	7757	16	0,89	7482	7773
39	2009	1995,0	22000	90,38	361	0,89	8046	8360	18	0,89	8063	8378
40	1985	2092,2	22000	97,15	391	0,89	8674	9017	21	0,90	8694	9037
41	1950	2196,7	22000	104,51	423	0,90	9359	9733	23	0,90	9381	9756
42	1922	2309,2	22000	112,55	459	0,90	10107	10516	26	0,90	10132	10542
43	1891	2430,6	22000	121,34	482	0,90	10925	11016	29	0,90	10953	11045
44	1854	2553,7	22000	123,10	488	0,90	11108	11117	30	0,91	11137	11147
45	1816	2676,8	22000	123,10	489	0,90	11126	11132	31	0,91	11156	11163
46	1789	2799,9	22000	123,10	490	0,91	11139	11142	31	0,91	11170	11173
47	1753	2923,0	22000	123,10	368	0,91	11146	8469	24	0,91	11177	8493
48	1715	2983,2	21900	60,17	252	1,02	5792	6167	21	1,02	5810	6188
49	1674	3043,3	21800	60,17	269	1,15	6541	6949	31	1,16	6566	6980
50	1635	3103,5	21700	60,17	290	1,29	7357	7768	43	1,30	7394	7811
51	1598	3163,7	21600	60,17	311	1,43	8180	8589	55	1,44	8228	8644
52	1552	3223,8	21500	60,17	331	1,56	8999	9407	68	1,57	9060	9474
53	1521	3284,0	21400	60,17	505	1,70	9814	14637	114	1,71	9888	14750
54	1485	3398,5	21400	114,50	669	1,70	19459	19465	153	1,71	19613	19618
55	1455	3513,0	21400	114,50	514	1,70	19471	15042	120	1,71	19624	15162
56	1418	3573,1	21300	60,14	367	1,83	10614	10998	91	1,84	10700	11090
57	1379	3633,3	21200	60,14	381	1,96	11382	11763	102	1,97	11479	11865
58	1347	3693,4	21100	60,14	393	2,08	12143	12518	112	2,10	12251	12630
59	1313	3753,6	21000	60,14	404	2,21	12892	13261	121	2,23	13009	13383
60	1282	3813,7	20900	60,14	414	2,33	13631	13995	130	2,35	13757	14125

Tabela B-4 (10)

61	1248	3873,9	20800	60,14	420	2,45	14359	14717	138	2,47	14494	14855
62	1218	3934,0	20700	60,14	561	2,57	15075	20238	189	2,59	15216	20427
63	1191	4033,0	20700	99,00	562	2,57	25401	20596	192	2,59	25638	20787
64	1162	4093,2	20600	60,17	427	2,68	15790	16144	149	2,71	15937	16293
65	1131	4153,3	20500	60,17	426	2,80	16498	16861	152	2,83	16649	17013
66	1098	4213,5	20400	60,17	421	2,92	17224	17596	154	2,95	17377	17749
67	1071	4273,7	20300	60,17	410	3,05	17967	18363	153	3,07	18121	18516
68	1045	4333,8	20200	60,16	389	3,19	18758	19209	150	3,21	18911	19359
69	1010	4394,0	20100	60,17	580	3,35	19661	32709	231	3,37	19807	32940
70	984	4530,4	20100	136,39	793	3,36	45757	47332	320	3,39	46074	47653
71	947	4675,6	20100	145,16	808	3,38	48907	50624	329	3,40	49231	50952
72	916	4830,3	20100	154,72	793	3,39	52340	52455	325	3,41	52673	52780
73	878	4985,0	20100	154,72	581	3,41	52569	40936	240	3,43	52887	41176
74	870	5072,0	20188	87,00	362	3,33	29302	28994	150	3,35	29465	29144
75	865	5159,0	20275	87,00	306	3,26	28685	28377	127	3,28	28824	28504
76	861	5246,0	20363	87,00	261	3,19	28069	27737	109	3,20	28185	27846
77	857	5333,0	20450	87,00	308	3,11	27405	35479	129	3,12	27507	35608
78	824	5473,0	20450	140,00	372	3,11	43553	43554	156	3,12	43709	43710
79	794	5613,0	20450	140,00	370	3,11	43555	43558	155	3,12	43711	43713
80	768	5753,0	20450	140,00	367	3,11	43561	43566	154	3,12	43716	43720
81	740	5893,0	20450	140,00	363	3,11	43570	43576	152	3,12	43723	43728
82	706	6033,0	20450	140,00	358	3,11	43582	43589	150	3,12	43733	43740
83	680	6173,0	20450	140,00	351	3,11	43597	43605	148	3,13	43746	43753
84	652	6313,0	20450	140,00	343	3,12	43614	43623	145	3,13	43760	43768
85	626	6453,0	20450	140,00	334	3,12	43632	43643	141	3,13	43775	43784
86	602	6593,0	20450	140,00	323	3,12	43653	43665	137	3,13	43793	43802
87	577	6733,0	20450	140,00	312	3,12	43677	43689	133	3,13	43812	43822
88	553	6873,0	20450	140,00	300	3,12	43702	43715	127	3,13	43832	43842
89	529	7013,0	20450	140,00	287	3,12	43729	43743	120	3,13	43853	43864
90	511	7153,0	20450	140,00	271	3,13	43758	43773	114	3,13	43875	43887
91	490	7293,0	20450	140,00	254	3,13	43788	43804	107	3,14	43898	43911
92	468	7433,0	20450	140,00	236	3,13	43819	43836	100	3,14	43924	43936
93	449	7573,0	20450	140,00	216	3,13	43853	43870	91	3,14	43949	43962
94	432	7713,0	20450	140,00	193	3,14	43888	43906	82	3,14	43975	43988
95	417	7853,0	20450	140,00	169	3,14	43924	43944	72	3,14	44002	44016
96	401	7993,0	20450	140,00	143	3,14	43964	43984	61	3,15	44030	44045
97	384	8133,0	20450	140,00	117	3,14	44005	44026	49	3,15	44059	44075
98	369	8273,0	20450	140,00	87	3,15	44047	44074	36	3,15	44090	44111
99	355	8413,0	20450	140,00	47	3,15	44101	44137	20	3,15	44131	44157
100	340	8553	20450	140,00	12	3,16	44173	22086	5	3,16	44183	22092

Tabela B-4 (11)

Ptos	Omega	Coordenadas		Compr. Xi cm	AF10	Nível 6-Fratura 5		
		x	y			Subpressão kgf/cm2	Força de Subp. kgf	Força nodal, kgf
1	3188	180	22000		304	3,63		2814
2	3153	195,5	22000	15,51	632	3,63	5628	5844
3	3128	212,3	22000	16,75	678	3,61	6061	6285
4	3102	230,3	22000	18,05	727	3,60	6508	6742
5	3078	249,7	22000	19,43	778	3,58	6976	7223
6	3045	270,6	22000	20,89	832	3,57	7471	7732
7	3016	293,1	22000	22,45	889	3,55	7994	8271
8	2985	317,2	22000	24,10	949	3,54	8549	8842
9	2962	343,0	22000	25,86	1013	3,53	9136	9446
10	2935	370,8	22000	27,73	1080	3,51	9757	10088
11	2903	400,5	22000	29,73	1152	3,50	10418	10770
12	2870	432,4	22000	31,87	1228	3,48	11122	11497
13	2839	466,5	22000	34,16	1310	3,47	11872	12273
14	2807	503,1	22000	36,61	1397	3,46	12674	13103
15	2779	542,4	22000	39,24	1490	3,44	13532	13990
16	2738	584,4	22000	42,06	1589	3,43	14448	14937
17	2703	629,5	22000	45,11	1610	3,41	15426	15272
18	2660	677,9	22000	48,39	1458	2,84	15118	14259
19	2636	729,9	22000	51,94	1210	2,32	13400	12482
20	2600	785,7	22000	55,79	935	1,82	11563	10497
21	2550	845,3	22000	59,67	617	1,34	9431	8065
22	2510	905,0	22000	59,67	364	0,91	6700	6044
23	2471	964,7	22000	59,67	280	0,90	5388	5369
24	2434	1024,3	22000	59,67	276	0,89	5350	5340
25	2391	1084,0	22000	59,67	268	0,89	5331	5195
26	2358	1140,6	22000	56,63	262	0,89	5059	5067
27	2327	1197,3	22000	56,63	264	0,90	5074	5089
28	2292	1253,9	22000	56,63	268	0,90	5104	5117
29	2264	1310,5	22000	56,63	271	0,91	5131	5144
30	2239	1367,1	22000	56,63	274	0,91	5157	5168
31	2208	1423,8	22000	56,63	276	0,92	5180	5191
32	2182	1480,4	22000	56,63	279	0,92	5201	5211
33	2159	1537,0	22000	56,63	299	0,92	5221	5559
34	2138	1600,7	22000	63,71	330	0,93	5897	6118
35	2116	1668,9	22000	68,23	357	0,93	6340	6581
36	2092	1742,1	22000	73,13	386	0,93	6822	7085
37	2063	1820,5	22000	78,42	417	0,94	7347	7631
38	2039	1904,6	22000	84,16	452	0,94	7916	8224
39	2009	1995,0	22000	90,38	489	0,95	8533	8867
40	1985	2092,2	22000	97,15	529	0,95	9202	9567
41	1950	2196,7	22000	104,51	574	0,95	9931	10330
42	1922	2309,2	22000	112,55	622	0,95	10728	11164
43	1891	2430,6	22000	121,34	653	0,96	11600	11698
44	1854	2553,7	22000	123,10	661	0,96	11797	11808
45	1816	2676,8	22000	123,10	663	0,96	11819	11826
46	1789	2799,9	22000	123,10	664	0,96	11834	11838
47	1753	2923,0	22000	123,10	498	0,96	11842	8992
48	1715	2983,2	21900	60,17	343	1,08	6142	6531
49	1674	3043,3	21800	60,17	369	1,22	6919	7348
50	1635	3103,5	21700	60,17	399	1,36	7777	8210
51	1598	3163,7	21600	60,17	430	1,51	8643	9074
52	1552	3223,8	21500	60,17	460	1,65	9505	9934
53	1521	3284,0	21400	60,17	703	1,79	10363	15454
54	1485	3398,5	21400	114,50	933	1,80	20545	20551
55	1455	3513,0	21400	114,50	718	1,80	20558	15880
56	1418	3573,1	21300	60,14	513	1,93	11202	11603
57	1379	3633,3	21200	60,14	535	2,06	12004	12400
58	1347	3693,4	21100	60,14	556	2,19	12797	13185
59	1313	3753,6	21000	60,14	573	2,32	13574	13956
60	1282	3813,7	20900	60,14	589	2,45	14338	14714

Tabela B-4 (12)

61	1248	3873,9	20800	60,14	601	2,57	15090	15456
62	1218	3934,0	20700	60,14	804	2,69	15822	21231
63	1191	4033,0	20700	99,00	808	2,69	26640	21595
64	1162	4093,2	20600	60,17	615	2,81	16550	16908
65	1131	4153,3	20500	60,17	617	2,93	17267	17630
66	1098	4213,5	20400	60,17	611	3,05	17993	18361
67	1071	4273,7	20300	60,17	598	3,17	18728	19114
68	1045	4333,8	20200	60,16	569	3,31	19500	19928
69	1010	4394,0	20100	60,17	853	3,46	20356	33793
70	984	4530,4	20100	136,39	1169	3,47	47231	48821
71	947	4675,6	20100	145,16	1191	3,48	50412	52143
72	916	4830,3	20100	154,72	1169	3,49	53874	53949
73	878	4985,0	20100	154,72	858	3,50	54024	42034
74	870	5072,0	20188	87,00	535	3,41	30043	29680
75	865	5159,0	20275	87,00	453	3,33	29316	28958
76	861	5246,0	20363	87,00	387	3,25	28599	28233
77	857	5333,0	20450	87,00	455	3,16	27867	36063
78	824	5473,0	20450	140,00	550	3,16	44259	44260
79	794	5613,0	20450	140,00	548	3,16	44260	44261
80	768	5753,0	20450	140,00	544	3,16	44262	44264
81	740	5893,0	20450	140,00	538	3,16	44265	44267
82	706	6033,0	20450	140,00	530	3,16	44268	44270
83	680	6173,0	20450	140,00	520	3,16	44272	44273
84	652	6313,0	20450	140,00	509	3,16	44275	44276
85	626	6453,0	20450	140,00	495	3,16	44278	44279
86	602	6593,0	20450	140,00	480	3,16	44281	44282
87	577	6733,0	20450	140,00	463	3,16	44283	44285
88	553	6873,0	20450	140,00	445	3,16	44286	44287
89	529	7013,0	20450	140,00	424	3,16	44288	44288
90	511	7153,0	20450	140,00	402	3,16	44288	44288
91	490	7293,0	20450	140,00	377	3,16	44288	44288
92	468	7433,0	20450	140,00	349	3,16	44287	44286
93	449	7573,0	20450	140,00	320	3,16	44284	44282
94	432	7713,0	20450	140,00	288	3,16	44279	44276
95	417	7853,0	20450	140,00	252	3,16	44273	44268
96	401	7993,0	20450	140,00	213	3,16	44264	44258
97	384	8133,0	20450	140,00	173	3,16	44252	44247
98	369	8273,0	20450	140,00	128	3,16	44243	44239
99	355	8413,0	20450	140,00	70	3,16	44234	44227
100	340	8553	20450	140,00	18	3,16	44220	22110