



APRESENTAÇÃO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA



*Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br*

APRESENTAÇÃO

A RW - Engenheiros Consultores S/C Ltda vem, através deste documento, apresentar o Projeto Executivo da Barragem Itapajé, em Itapajé. Ceará, objeto da Carta Convite N° 007/2006-AGRIC e do Contrato N°303/2006 celebrado entre esta consultora e a Prefeitura Municipal de Itapajé.

O projeto da citada barragem é apresentado nos seguintes volumes:

VOLUME 1 – Relatório do Projeto;

VOLUME 1A – Estudos Geotécnicos

VOLUME 2 – Desenhos;

VOLUME 3 – Memória de Cálculo;

VOLUME 4 – Orçamento;

VOLUME 5 – Especificações;

VOLUME 6 – Síntese;

VOLUME 7 – Desapropriação.

O presente volume é nomeado como Volume 3 – Memória de Cálculo.





ÍNDICE

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

*Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br*



ÍNDICE

APRESENTAÇÃO.....	1
ÍNDICE.....	3
1 – INTRODUÇÃO.....	7
2 – CÁLCULO DA FOLGA.....	9
3 – CÁLCULO DA COTA DO COROAMENTO.....	11
4 – CÁLCULO DA LARGURA DO COROAMENTO.....	13
5 – ESCOLHA DA INCLINAÇÃO DOS TALUDES.....	15
6 – DIMENSIONAMENTO DO RIP-RAP.....	18
7 – DETERMINAÇÃO DA LINHA FREÁTICA.....	23
8 – ESTUDOS DE PERCOLAÇÃO PELA BARRAGEM E FUNDAÇÃO.....	27
9 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO VERTICAL.....	30
10 – DIMENSIONAMENTO DO TAPETE HORIZONTAL.....	32
11 – ANÁLISE DA ESTABILIDADE.....	34
12 – COTA DO VOLUME MORTO.....	62
13 – TOMADA D'ÁGUA.....	64
13.1 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA GALERIA.....	65
13.2 CANAL DA TOMADA D'ÁGUA.....	70
14 – ANÁLISE DOS RECALQUES.....	71

15 – DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO.....	75
15.1 CANAL VERTEDOURO.....	76
15.2 PROJETO HIDRÁULICO DO MURO VERTEDOURO.....	77
15.3 DIMENSIONAMENTO DO MURO LATERAL.....	80
16 – demonstrativo de quantitativos.....	85



RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

*Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br*



1 – INTRODUÇÃO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



1 – INTRODUÇÃO

A Memória de Cálculo do Projeto Executivo da Barragem Itapajé é desenvolvida abordando os seguintes tópicos:

- Cálculo de Folga;
- Cálculo da Cota de Coroamento;
- Cálculo da Largura do Coroamento;
- Escolha da Inclinação dos Taludes;
- Dimensionamento do Riprap;
- Determinação da Linha Freática;
- Determinação da Percolação pelo Maciço e Fundação;
- Dimensionamento do Filtro Vertical;
- Dimensionamento do Tapete Horizontal;
- Análise da Estabilidade;
- Cota do Volume Morto;
- Tomada D'água;
- Análise dos Recalques;
- Dimensionamento do Vertedouro.



2 – CÁLCULO DA FOLGA

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



2 – CÁLCULO DA FOLGA

A folga da barragem é a diferença de cota entre o coroamento e o nível máximo das águas. A folga é dada pela expressão:

$$f = 0,75h + \frac{V^2}{2g}$$

Onde h é a altura da onda formada pela ação dos ventos sobre o espelho d'água do lago, enquanto h é dado por :

$$h = 0,75 + 0,34F^{1/2} - 0,26F^{1/4} (m) \text{ para } F < 18km$$

$$h = 0,34F^{1/2} (m) \text{ para } F > 18km$$

Onde:

F = distância máxima (em km) em linha reta entre qualquer extremidade do lago e um ponto qualquer sobre o barramento (fecht).

V = Velocidade da onda em m/s dado pela fórmula:

$$V = 1,5 + 2h(m/s)$$

Para o lago da barragem Itapajé tem-se $F = 4,8km$, logo:

$$h = 0,75 + 0,34 \times 1,84^{1/2} - 0,26 \times 1,84^{1/4}$$

$$h = 0,91m$$

Adotando $h = 1,00m$

$$V = 1,5 + 2 \times 1,0 = 3,5m/s$$

$$f = 0,75 \times 1,0 + \frac{3,5^2}{2 \times 9,81} = 1,37m$$

Adotando $f = 1,40m$.

3 – CÁLCULO DA COTA DO COROAMENTO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



3 – CÁLCULO DA COTA DO COROAMENTO

A cota do Coroamento da Barragem é dada pela expressão:

$$C_c = C_s + L + F$$

Onde:

C_c = Cota do Coroamento.

C_s = Cota da Soleira = 278,00m.

L = Lâmina vertente na cheia milenar = 1,94m.

f = Folga = 1,40m.

$$C_c = 278,00 + 1,4 + 1,94 = 281,34m.$$

Adotando $C_c = 281,5m$

4 – CÁLCULO DA LARGURA DO COROAMENTO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



4 – CÁLCULO DA LARGURA DO COROAMENTO

Adotando-se a fórmula de Preece à seção de maior altura tem-se:

$$L_c = 1,10\sqrt{H_b} + 0,9(m)$$

Onde:

L_c = Largura da barragem (m);

H_b = Altura da barragem (m).

Para a seção de altura máxima tem-se:

$$H_b = 19,70m \text{ e } L_c = 1,10 \times \sqrt{19,70} + 0,90 = 5,78m, \text{ foi adotado } L_c = 6,0m .$$



5 – ESCOLHA DA INCLINAÇÃO DOS TALUDES

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



5 – ESCOLHA DA INCLINAÇÃO DOS TALUDES

A fixação dos taludes foi resultado de análise da estabilidade. Entretanto foi necessário se fazer uma escolha inicial para em seguida se fazer a análise de estabilidade.

O Bureau of Reclamation sugere as inclinações de taludes, reproduzidas no Quadro nº5.1:

Quadro Nº5.1: Inclinação Dos Taludes – Bureau Of Reclamation				
Caso	Sujeito a Esvaziamento Rápido	Classificação dos Solos	Montante	Jusante
A	NÃO	GW, GP, SW, SP	Permeável, não adequado	
		GC, GM, SC, SM	2,5:1	2:1
		CL, ML	3:1	2,5:1
		CH, MH	3,5:1	2,5:1
B	SIM	GW, GP, SW, SP	Permeável, não adequado	
		GC, GM, SC, SM	3:1	2:1
		CL, ML	3,5:1	2,5:1
		CH, MH	4:1	2,5:1

Terzaghi apresentou, para efeito de anteprojeto, as inclinações aconselháveis que são mostrados no Quadro nº5.2:

Quadro Nº5.2: Inclinação dos Taludes – Terzaghi		
Tipo de Material	Taludes	
	Montante	Jusante
Seção Homogênea – Solo bem graduado	1:2,5	1:2
Seção Homogênea – Silte grosso	1:3	1:2,5
Seção Homogênea – Argila ou argila siltosa, altura menor que 15m	1:2,5	1:2

Quadro Nº5.2: Inclinação dos Taludes – Terzaghi		
Tipo de Material	Taludes	
	Montante	Jusante
Seção Homogênea – Argila ou argila siltosa, altura maior que 15m	1:3	1:2,5
Areia ou Pedregulho e Areia com núcleo de argila	1:3	1:2,5
Areia ou Pedregulho com cortina de concreto armado	1:2,5	1:2

O engenheiro Paulo Teixeira da Cruz em sua obra 100 Barragens Brasileiras sugere os seguintes taludes preliminares que são mostrados no Quadro nº5.3:

Quadro Nº5.3: Inclinação dos Taludes – Paulo T. Cruz		
Tipo de Material	Montante	Jusante
Solos Compactados	2:5(H) : 1,0(V) 3,0(H) : 1,0(V)	2:0(H) : 1,0(V)
Solos Compactados Argilosos	2:0(H) : 1,0(V) 3,0(H) : 1,0(V)	2:0(H) : 1,0(V) 2,5(H) : 1,0(V)
Solos Compactados Siltosos	3,5(H) : 1,0(V)	3,0(H) : 1,0(V)
Enrocamentos	1:3(H) : 1,0(V)	1:3(H) : 1,0(V)
	1,6(H) : 1,0(V)	1,6(H) : 1,0(V)

Os solos das Jazidas J-01, J-02, J-03 e J-04 são do tipo CL, portanto analisando as tabelas juntamente com os materiais que serão usados na construção adotou-se para análise os taludes de Montante de 1:2,5 (V:H) e Jusante de 1:2 (V:H) com berma de 2,0m de largura na cota 254,70m.





6 – DIMENSIONAMENTO DO RIP-RAP

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



6 – DIMENSIONAMENTO DO RIPRAP

Adotando a fórmula recomendada pelo Tennessee Valley Authority (TVA), tem-se:

$$e = CV^2$$

Onde:

e = Espessura do riprap (m);

C = Coeficiente, função da inclinação do talude e da densidade da rocha;

V = Velocidade da onda (m/s).

Tem-se:

$$V = 3,5 \text{ m / s}$$

$$C = 0,030 \text{ m}$$

$$e = 0,030 \times 3,50^2 = 0,36 \text{ m}$$

Será adotado $e = 0,70 \text{ m}$.

a) Os blocos empregados na construção do riprap devem ter no mínimo 50% de pedras com peso igual a:

$$P_{50\%} = 0,52 \cdot \gamma \cdot e^3$$

Onde:

$P_{50\%}$ = Peso do bloco de rocha que compõem 50% do riprap (tf);

γ = Peso específico da rocha = 2,50 tf/m³;

e = Espessura do riprap em (m).

Portanto tem-se:

$$P_{50\%} = 0,52 \times 2,5 \times 0,70^3 = 0,45tf$$

b) Os blocos de enrocamento do rip-rap devem ter no mínimo 50% de pedras com o diâmetro igual a:

$$D_{50\%} = \left(\frac{P_{50\%}}{0,75\gamma} \right)^{1/3}$$

Onde:

$D_{50\%}$ = diâmetro do bloco de rocha que compõem 50% do rip-rap

Logo:

$$D_{50\%} = \left(\frac{0,45}{0,75 \times 2,50} \right)^{1/3} \therefore D_{50\%} = 0,62m$$

c) O diâmetro e o peso do bloco mínimo:

$$P_{min} = 0,25P_{50\%} = 0,25 \times 0,45 \therefore P_{min} = 0,11tf$$

$$D_{min} = \left(\frac{P_{min}}{0,75\gamma} \right)^{1/3} = \left(\frac{0,11}{0,75 \times 2,50} \right)^{1/3} \therefore D_{min} = 0,39 \text{ min}$$

d) O diâmetro e o peso máximo do bloco.

$$P_{máx} = 4P_{50\%} = 4 \times 0,45 \therefore P_{máx} = 1,80tf$$

$$D_{máx} = \left(\frac{P_{50\%}}{0,75\gamma} \right)^{1/3} = \left(\frac{1,80}{0,75 \times 2,50} \right)^{1/3} \therefore D_{máx} = 0,98m$$

Como $D_{máx}$ calculado foi maior do que a espessura, será adotado $D_{máx} = e = 0,70m$.

Assim sendo:

$$P_{máx} = 0,75\gamma D_{máx}^3 = 0,75 \times 2,50 \times (0,70)^3 \therefore P_{máx} = 0,64tf$$

O riprap será assente sobre uma camada de transição com 0,20m de espessura obtida de produto de britagem, atendendo aos seguintes requisitos:

- Material filtrante x Solo Compactado

$$(D_{15})_{\text{filtro}} \leq 5 \times (D_{85})_{\text{solo}}$$

- Material filtrante x Riprap

Bourdeaux (1979) recomenda: $25\text{mm} < (D_{85})_{\text{filtro}} < 5 / \text{mm}$ e $0,2\text{mm} < D_{\text{min}} < 0,6\text{mm}$.

- Apresentar curvas granulométricas aproximadamente paralelas.

A faixa granulométrica do solo compactado do maciço foi obtido pela média aritmética dos resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e dos ensaios de granulometria por sedimentação realizados em amostras das jazidas de solo (J-01, J-02, J-03 e J-04).

Tem-se:

$$(D_{15})_{\text{maciço}} = 0,01\text{mm}$$

$$(D_{85})_{\text{maciço}} = 0,49\text{mm}$$

Com essas informações, e recorrendo-se ao traçado das curvas granulométricas obtém o material de transição que deve ser produzido de britagem de rochas de pedreira.

Quadro N°6.1: Material e Transição		
Peneira		Faixa Granulométrica (Porcentagem que Passa)
#	mm	
-	200	100
-	100	90-98
2"	50,8	77-91
1"	25,4	63-83
3/4"	19,1	57-79
1/2"	12,7	47-71
3/8"	9,5	42-67
N° 4	4,76	29-56

Quadro N°6.1: Material e Transição		
Peneira		Faixa Granulométrica (Porcentagem que Passa)
#	mm	
N° 10	2,00	16-38
N° 40	0,42	0-11
N° 100	0,15	0

O material do riprap deve ser produzido com a seguinte granulometria:

Quadro N°6.2: Material do Rip-Rap		
Peneira		Faixa Granulométrica (Porcentagem que Passa)
#	mm	
-	700	100
-	600	16-98
-	500	5-90
-	390	-



7 – DETERMINAÇÃO DA LINHA FREÁTICA

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



7 – DETERMINAÇÃO DA LINHA FREÁTICA

Para o traçado da linha freática utiliza-se a parábola de Kozeny dada por:

$$\sqrt{X^2 + Y^2} - X - P = 0$$

Esta equação representa a linha de saturação com eixo cuja a origem coincide com o foco da parábola, P é o dobro da distância do Foco ao vértice da parábola:

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2} - X$$

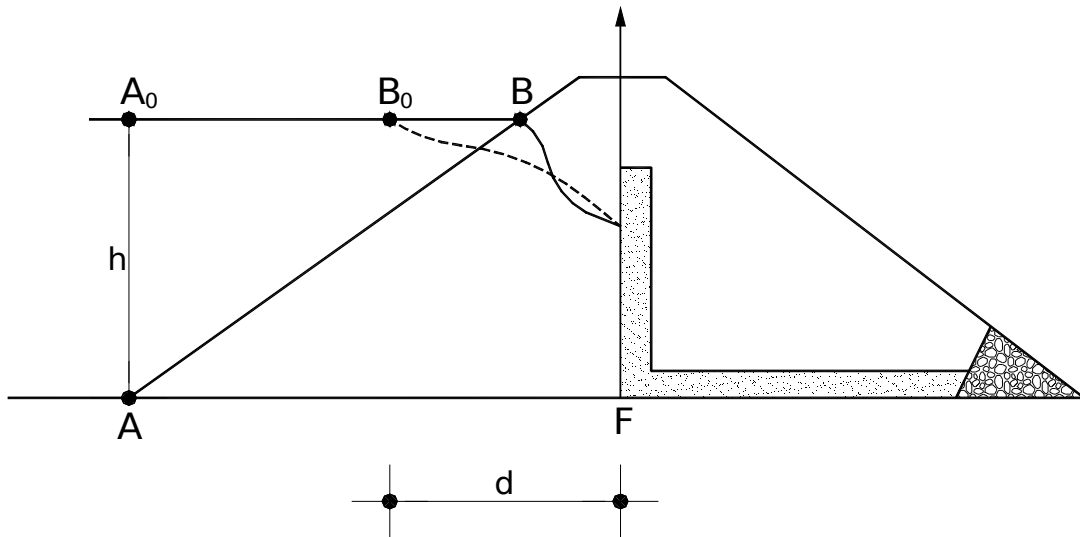
Na figura tem-se $B_oB = \frac{1}{3} A_oB$

$$A_oB = 40,50m$$

$$B_oB = 13,50m$$

$$d = 19,50m$$

$$h = 16,20m.$$



Adotando uma anisotropia de $\frac{K_h}{K_v} = 9$, e fazendo uma mudança de variável tal que $X = X_r$,

, onde $X_r = \sqrt{\frac{K_v}{K_h}} \cdot X$. Pode-se tratar o problema no sistema $(X_r ; Y)$ de coordenadas como isotrópico. Desta forma tem-se:

$$P = \sqrt{X_r^2 + Y^2} - X_r;$$

para $X_r = d$ e $Y = h$, tem-se :

$$P = \sqrt{d^2 + h^2} - d$$

Para $d = 6,5m$ e $h = 16,20m$ tem-se:

$$p = 10,95m$$

Rearranjando a equação básica obtém-se:

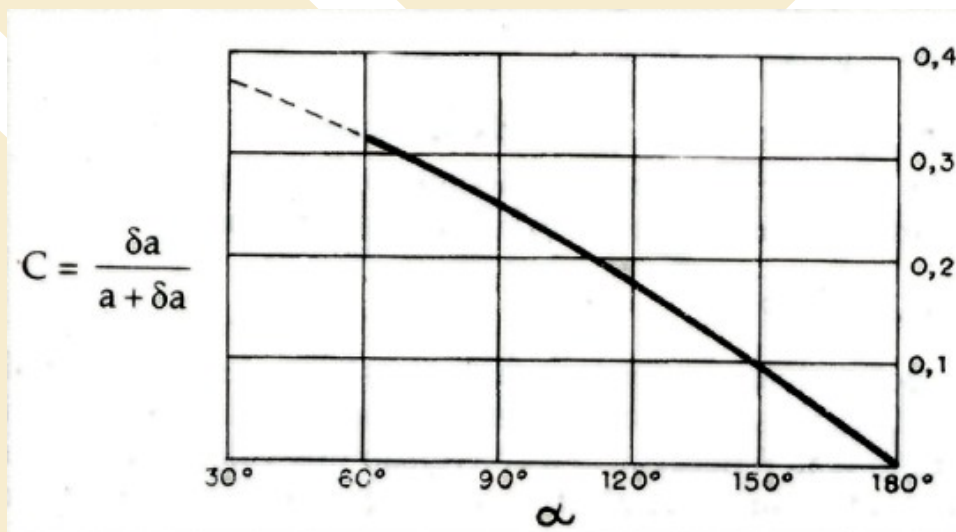
$$y = \sqrt{p^2 + 2 \cdot X_t \cdot p}$$

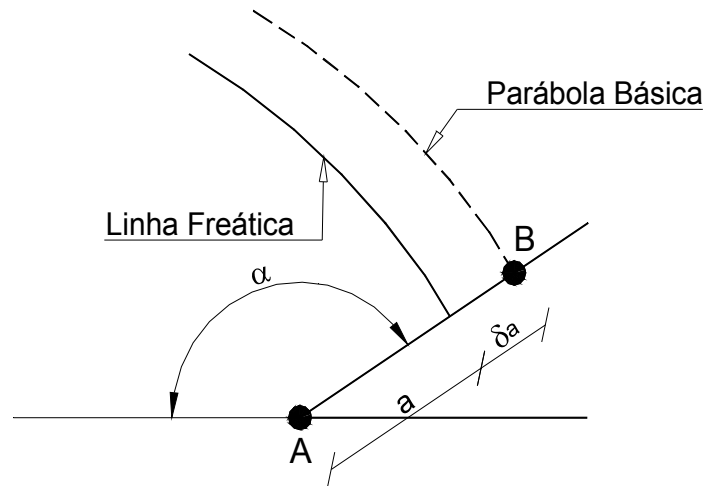
Atribuindo valores a X_t obtém-se Y , conforme Quadro nº7.1 a seguir:

Quadro nº7.1: Coordenadas	
X_t	Y
0,00	10,95
2,00	12,79
4,00	14,40
6,00	15,85
6,50	16,20

$y_{\text{corrigido}}$ correspondente às correções da parábola básica na entrada de montante e saída de jusante.

A correção da saída é função do ângulo que a superfície drenante forma com a horizontal dada pela figura abaixo:





Tem-se:

$$a + \delta a = AB$$

Para $\alpha = 90^\circ$, tem-se $C = 0,25$

$$a + \delta a = 10,95m$$

$$\delta a = 2,73m$$

$$a = 8,22m$$

8 – ESTUDOS DE PERCOLAÇÃO PELA BARRAGEM E FUNDAÇÃO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



8 – ESTUDOS DE PERCOLAÇÃO PELA BARRAGEM E FUNDAÇÃO

Os estudos de percolação foram realizados com o objetivo principal de avaliar os valores das vazões percoladas pelo corpo da barragem e pela fundação.

Para obtenção dessas vazões foi realizado o seguinte procedimento:

a) Vazões pelo Maciço: Determinou-se a linha freática associando esta à parábola teórica de KOZENY fazendo as correções de contorno. Foi adotado uma Anisotropia entre a permeabilidade horizontal e vertical igual a 9. Esse valor é recomendado pelo Profº Paulo Cruz, no seu livro 100 Barragens Brasileiras, para maciços terrosos compactados com altura até 20,00m.

Determinou-se a ordenada y_o da interseção da linha freática com o filtro vertical e aplicou-se a expressão para determinação da vazão por metro de barragem.

$$q = \sqrt{K_x \cdot K_y} \cdot y_o [m^3 / s \cdot m]$$

b) Vazões pela Fundação: O perfil geotécnico do substrato de assentamento da barragem mostra que abaixo do cut-off a percolação é praticamente nula ou muito baixa. A vazão pela fundação pode ser estimada considerando a perda de carga total ao longo do cut-off desta forma a vazão é dada por:

$$Q = K \cdot I \cdot A$$

Onde:

$$K = 8,4 \times 10^{-7} \text{ cm} / \text{s} \text{ (obtido dos ensaios)}$$

$$I = \frac{\Delta H}{L} = \frac{19,40}{25,50} = 0,76 \text{ m} / \text{m}$$

$$A = 6,50 \times 1,0 = 6,50 \text{ m}^2$$

Para os materiais que formarão os dispositivos de drenagem interna tais como areia de rio, adotou-se uma permeabilidade de $2,1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, obtido com base na análise dos

ensaios de permeabilidade realizados sobre as amostras do areal A-01, os quais são mostrados no Quadro nº8.1:

Quadro nº8.1 – Coeficiente de Permeabilidade do Areal A-01	
Furo	K (cm/s)
1	$2,1 \times 10^{-3}$
2	$2,1 \times 10^{-3}$
3	$2,2 \times 10^{-3}$
4	$2,1 \times 10^{-3}$
7	$8,3 \times 10^{-3}$

As vazões obtidas para dimensionamento dos dispositivos de drenagem interna foram:

$$Q_{\text{maciço}} = 1,65 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$$

$$Q_{\text{fundação}} = 5,46 \times 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$$

A vazão total que sairá no tapete horizontal será:

$$Q_{\text{total}} = 2,19 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$$



9 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO VERTICAL

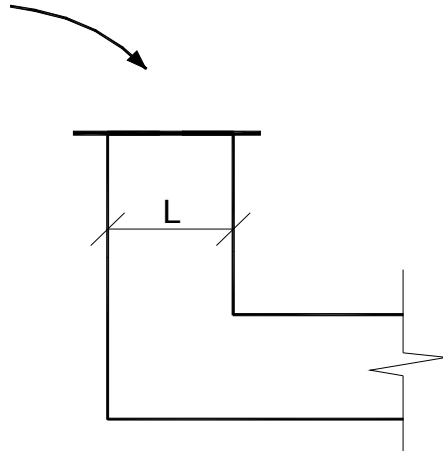
RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



9 – DIMENSIONAMENTO DO FILTRO VERTICAL

$$Q_{\text{maciço}} = 1,65 \times 10^{-7} \text{ m / s} \cdot \text{m}$$



$$Q = k \cdot i \cdot A$$

$$A = L \times 1,0 \text{ m}$$

$$i = 1,0$$

$$K_a = 2,1 \times 10^{-5} \text{ m / s}$$

$$Q = k \cdot i \cdot L$$

$$L = \frac{Q}{k \cdot i} = \frac{1,65 \times 10^{-7}}{2,1 \times 10^{-5} \times 1,0} = 7,8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Adotou-se $L = 1,0 \text{ m}$ por questões construtivas, principalmente porque indica-se a construção do filtro através da escavação de camada de solo já executada.

10 – DIMENSIONAMENTO DO TAPETE HORIZONTAL

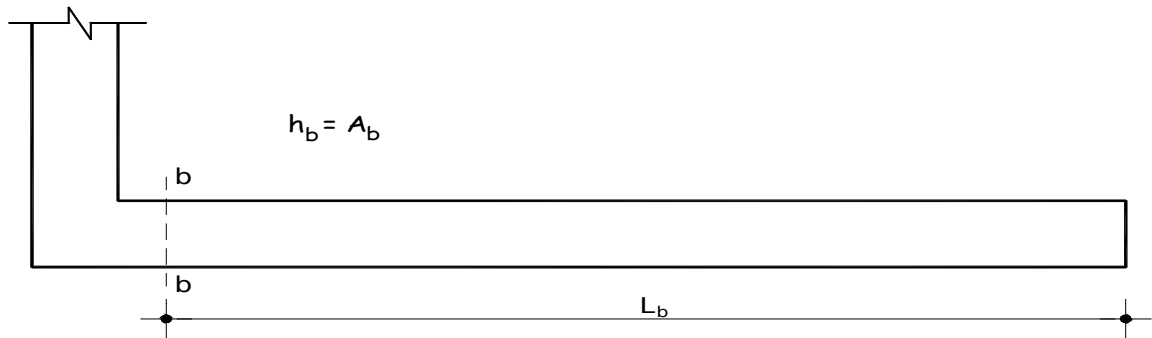
RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



10 – DIMENSIONAMENTO DO TAPETE HORIZONTAL

A vazão na seções final do tapete é de $2,19 \times 10^{-7} \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$.



$$L_b = 40,60 \text{ m}$$

$$K_b = \frac{Q}{i \cdot A_b}$$

$$h_b = A_b$$

$$i = \frac{h_b}{L_b}$$

$$K_b = \frac{Q_b}{\left(\frac{h_b}{L_b}\right) \cdot A_b} = \frac{Q_b \cdot L_b}{h_b}$$

$$h_b^2 = \frac{Q_b \cdot L_b}{K_b}$$

$$h_b = \sqrt{\frac{2,19 \times 10^{-7} \times 40,60}{2,1 \times 10^{-5}}} = 0,65 \text{ m}$$

Foi adotado 1,0m de tapete drenante de areia nas zonas indicadas no projeto.

11 – ANÁLISE DA ESTABILIDADE



RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



11 – ANÁLISE DA ESTABILIDADE

A análise da estabilidade foi verificada para as situações estática e sísmica. Utilizou-se o programa Geo-Slope/W que usa o método de Bishop Modificado.

Analisou-se as seguintes situações:

- Final de Construção – análise feita para os taludes de montante e jusante;
- Regime Permanente – análise feita no talude de jusante;
- Esvaziamento Rápido – análise feita no talude de montante.

A análise sísmica foi feita pelo processo pseudo-estático introduzindo um fator de aceleração da gravidade. Para todas as análises estudadas adotou-se o fator igual a 0,10.

Para as análises de Final de Construção e rebaixamento rápido adotou-se o fator igual a 0,10.

No Quadro nº11.1 são mostrados os parâmetros geotécnicos adotados.

Quadro nº11.1: Parâmetros Geotécnicos				
Material	γ (kN/m³)	C (kPa)	ϕ(graus)	R_u
Riprap	18,0	0,00	45°	0,00
Maciço	20,0	10,00	30°	0,10
Filtro / Tapete	18,0	0,00	35°	0,10
Rock-fill	20,0	0,00	45°	0,00
Aluvião	18,0	5,0	30°	0,10
Solo Residual	20,0	7,00	30°	0,10

Nos Quadros nºs 2.2 e 2.3 a seguir é apresentado o fator mínimo determinado em cada análise de estabilidade:

Quadro Nº2.1: Análise De Estabilidade - Estática				
Simulação	C.S. Mínimo	Superfície de Deslizamento		
		Superficial	Intermediária	Profunda
Final de Construção – Talude de montante	1,3	2,047	1,876	2,451
Final de Construção – Talude de Jusante	1,3	1,907	1,888	2,058
Reservatório Cheio – Talude de Jusante	1,5	1,907	1,793	1,795
Esvaziamento Rápido – Talude de Montante	1,1	1,398	1,126	1,435

Quadro nº2.2: Análise de Estabilidade – Abalo Sísmico				
Simulação	C.S. Mínimo	Superfície de Deslizamento		
		Superficial	Intermediária	Profunda
Final de Construção – Talude de montante	1,0	1,590	1,460	1,914
Final de Construção – Talude de Jusante	1,0	1,505	1,494	1,687
Reservatório Cheio – Talude de Jusante	1,0	1,505	1,465	1,487
Esvaziamento Rápido – Talude de Montante	1,0	1,113	1,066	1,220

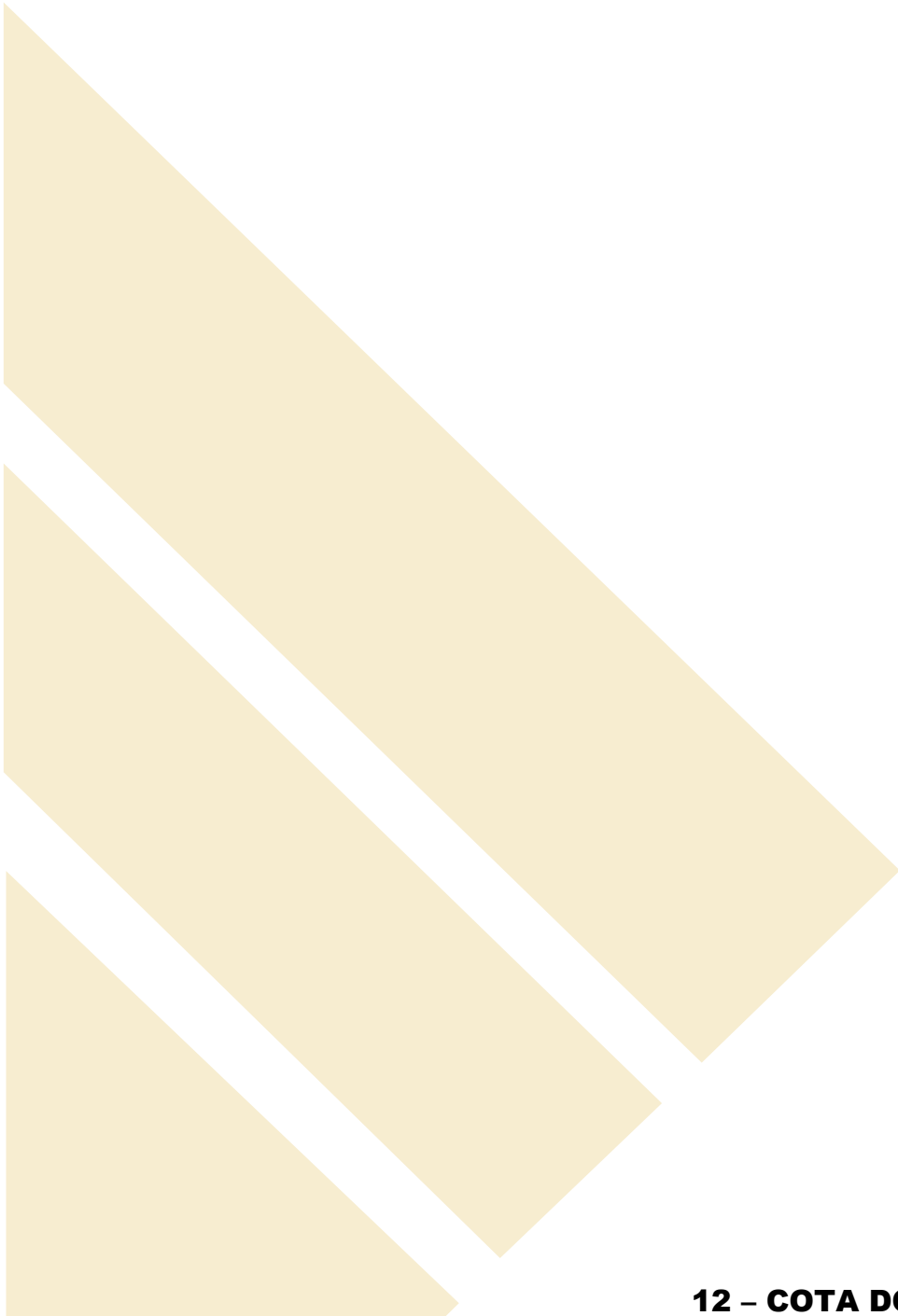
Todos os fatores de segurança encontrados foram superiores aos coeficientes de segurança mínimos recomendados em bibliografia.

Os resultados das análises de estabilidade são apresentados a seguir.



Análise da Estabilidade (25 páginas)





12 – COTA DO VOLUME MORTO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

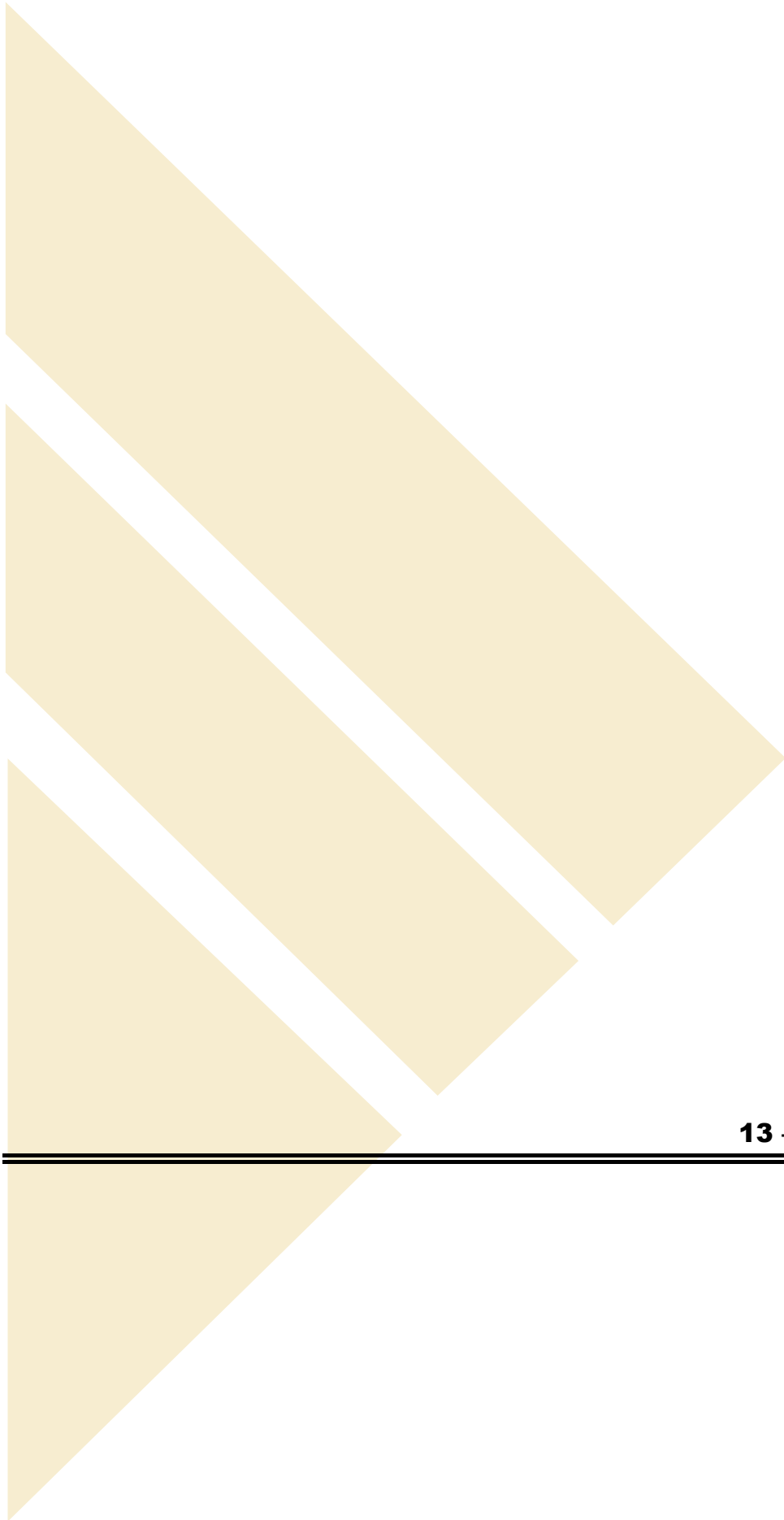
*Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br*



12 – COTA DO VOLUME MORTO

A cota do volume morto foi definida em 266,00m acumulando 0,28hm³ correspondente à cerca 5,7% do volume máximo.





13 – TOMADA D'ÁGUA

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA



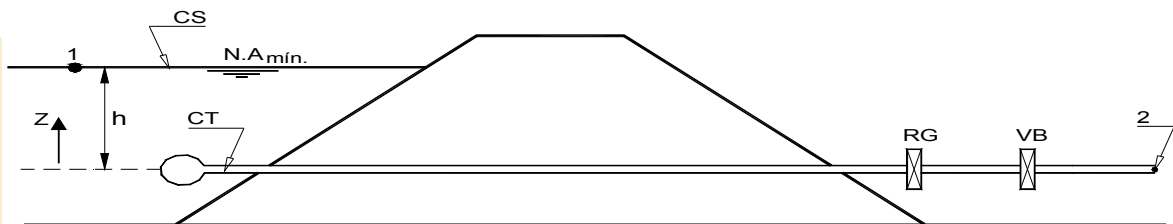
Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br

13 – TOMADA D'ÁGUA

A tomada d'água ficará localizada na estaca 9 cujo terreno natural está na cota 269,521m. A tomada d'água terá extensão de 89,95m. A galeria será em tubo de Aço ASTM com chapa 1/4pol com diâmetro $\phi=350\text{mm}$. O corpo da galeria será envolto em concreto armado. A cota do eixo da tubulação é 265,00 m.

Na extremidade de montante terá uma caixa de concreto armado com uma grade de retenção. Em jusante terá também uma caixa com três células, o primeiro acomodará a válvula borboleta e um registro de gaveta. A segunda é um dissipador de energia. Finalmente a terceira célula é um tanque tranquilizador com um vertedouro triangular na extremidade.

1.1 - DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA GALERIA



Considerando a válvula borboleta e o registro de gaveta totalmente aberto. Considerando o nível mínimo de operação, cota 266,00m, e a vazão a ser regularizada de $0,100\text{m}^3/\text{s}$ com 90%, dimensiona-se o tubo para passar essa vazão com velocidade de 1,2m/s.

$$Q = V \cdot S$$

$$S = \frac{Q}{V}$$

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{Q}{V}$$

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0,100}{\pi \times 1,2}} = 0,32m$$

Será adotado D=350mm.

A velocidade para a vazão será:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{0,100}{0,096} \cong 1,04m / s$$

Determinação das vazões e velocidade para as cotas de 266,00m a 278,00m com a válvula borboleta e o registro de gaveta totalmente abertos.

Aplicando a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2.

$$\frac{P_1}{\gamma} + h + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + 0 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_L$$

Tem-se:

$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

$$V_1 \cong 0$$

h_f = perda de carga por fricção

h_L = perda de carga localizada.

h_f é determinada pela expressão de Darcy-Weisbach dada por:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_L = \sum K_i \frac{V_2^2}{2g}$$

K_i = coeficiente de perda de carga localizada.

$$K_1 = \text{Grade} = 1,45$$

$$K_3 = \text{Válvula Borboleta} = 0,36$$

$$K_4 = \text{Registro de Gaveta} = 0,10$$

$$K_5 = \text{Saída} = 1,0$$

$$h_f = h_f + h_L$$

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_2^2}{2g} + \sum K_i \cdot \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_f = f \cdot \frac{76}{0,35} \cdot \frac{V_2^2}{19,62} + 2,91 \times \frac{V_2^2}{19,62}$$

$$h_f = 11,06 \cdot f \cdot V_2^2 + 0,14 \cdot V_2^2$$

Substituindo na equação de Bernoulli, obtém:

$$z = 0,19V_2^2 + 11,06fV_2^2$$

$$V_2 = \left[\frac{z}{(0,19 + 11,09f)} \right]^{1/2}$$

Tem-se a velocidade como função de f . O processo de resolução deste problema é pelo método da convergência. Atribui-se valor a f e determina-se V_2 . Com V_2 calcula f e determina-se novamente V_2 . O processo prossegue até a convergência.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Onde:

Re = Número de Reynold

ν = Viscosidade Cinemática

Para a água a 30° tem-se:

$$\nu = 8,04 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$$

Do ábaco de Rugosidade Relativa x Diâmetro tem-se para a tubulação de $\phi=350\text{mm}$,

$$\frac{e}{D} = 0,00017 .$$

Para $z = 1,0\text{m}$, adotando $f = 0,03$ tem-se:

$$V_2 = \left[\frac{1,00}{0,19 + 1,0 \times 0,03} \right]^{1/2} = 2,13 \text{ m} / \text{s}$$

Para $V_2 = 2,13 \text{ m} / \text{s}$

$$Re = \frac{2,13 \times 0,35}{8,04 \times 10^{-7}} = 9,2 \times 10^5$$

Para $Re = 9,2 \times 10^5$ e $\frac{e}{D} = 0,00017$

Do ábaco de Moody tira-se:

$$f = 0,014$$

Para $f = 0,014$ tem-se:

$$V_2 = \left[\frac{1,0}{0,19 + 11,06 \times 0,014} \right]^{1/2} = 1,70 \text{ m} / \text{s}$$

$$Re = \frac{1,79 \times 0,35}{8,04 \times 10^{-7}} = 7,4 \times 10^5$$

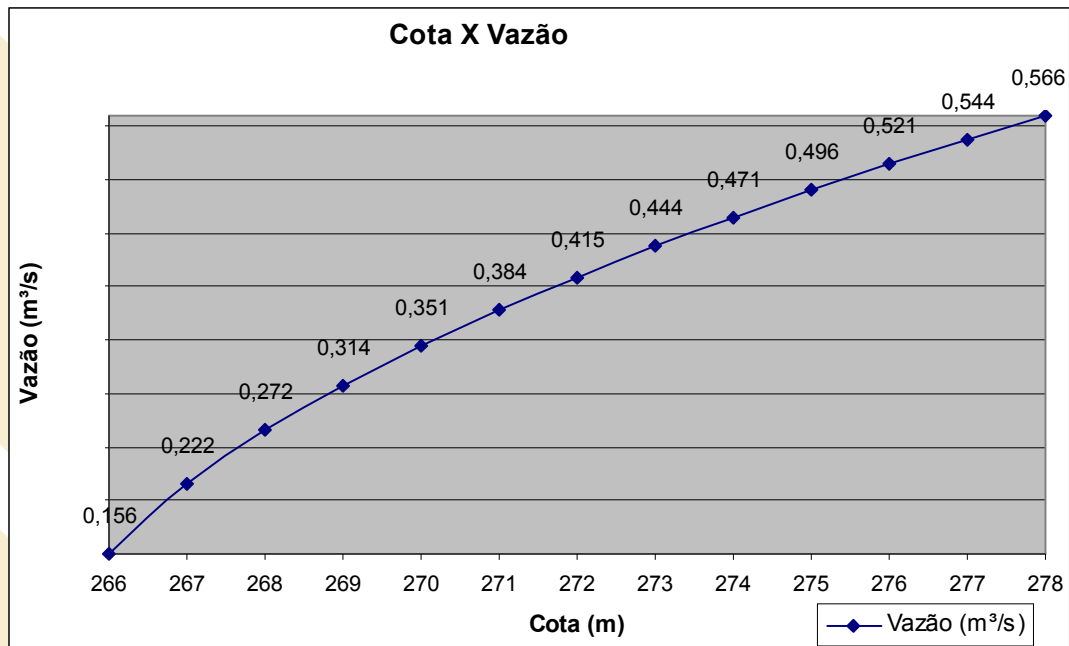
Do Ábaco de Moody tira-se $f \cong 0,014$ OK!

A vazão para a cota 266,00 é $Q = 1,70 \times 0,096 = 0,163 \text{ m}^3 / \text{s}$.

Esse procedimento foi repetido da Cota 266,00m a 278,00m, obtendo-se o Quadro nº13.1:

Quadro Nº13.1: Tomada D'Água		
Cota (m)	Vazão (m³/s)	Velocidade (m/s)
266,00	0,156	1,63
267,00	0,222	2,314
268,00	0,272	2,83
269,00	0,314	3,27
270,00	0,351	3,65
271,00	0,384	4,00
272,00	0,415	4,32
273,00	0,444	4,62
274,00	0,471	4,90
275,00	0,496	5,17
276,00	0,521	5,42
277,00	0,544	5,66
278,00	0,566	5,90

Na figura a seguir é apresentada a curva de operação Cota x Vazão.



1.2 - CANAL DA TOMADA D'ÁGUA

Para a implantação da tomada d'água, foi projetado um canal escavado em solo, com base assente em rocha. O canal projetado terá uma extensão de 181,64m, com largura de base de 3,0m, com talude de 1,0(V):2,0(H) e escavado até a cota 264,525m.

O eixo longitudinal do canal da tomada d'água está localizado perpendicularmente ao eixo barrável na estaca 9. Quando projetado, o eixo longitudinal do canal foi estaqueado de 20 em 20 metros, nomeados em quilômetros. O eixo longitudinal do canal da tomada d'água cruza a estaca 9 do eixo barrável na estaca 5+10,00.

O canal da tomada d'água possui uma curva circular com a característica descrita no Quadro nº4.8:

Quadro nº4.8: Elementos das Curvas do Canal da Tomada D'Água							
Curva	Tipo	Estaca		AC	R (m)	T (m)	D (m)
		PC	PT				
1	Circular	2+3,098	2+16,989	49°58'05"	15,00	6,99	13,08
2	Circular	8+3,421	8+15,821	47°21'52"	15,00	6,58	12,40

14 – ANÁLISE DOS RECALQUES

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



14 – ANÁLISE DOS RECALQUES

Os materiais que formam o corpo das barragens são submetidos a deformação elásticas devido a ação do peso próprio. A avaliação desses recalques tem a finalidade de corrigir a cota do coroamento da barragem para compensar o abatimento. Para determinação deste recalque adotou-se uma forma simplificada de cálculo descrita a seguir:

- a) Dividiu-se o maciço, em sua seção máxima, em lamelas de 2,0m de espessura.
- b) Para cada lamela determinou-se a tensão vertical no meio da camada .
- c) Aplicou-se a expressão dada por :

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{mi}}{E_i} \cdot \Delta Hi$$

Onde:

- S = Recalque total em m.
- σ_{mi} = Tensão vertical no meio de cada lamela.
- ΔHi = Espessura da lamela.
- E_i = Módulo de elasticidade do material da lamela i.

O módulo de elasticidade foi obtido da análise das curvas de Tensão x Deformação, obtidos dos ensaios de compressão triaxial realizados em solos semelhantes os das jazidas do projeto.

Outro aspecto considerado foi a variação da pressão de confinamento com a altura da barragem.

Considerando as jazidas J-01, J-02, J-03 e J-04, que formarão o maciço e fundação da barragem, o peso específico aparente seco máxima obtido do ensaio de compactação é de 18,7KN/m³ e a umidade ótima correspondente é de 12,8%. O peso úmido será de

21,10KN/m³. Com base no peso úmido foi considerado para efeito de tensão confinante, as seguintes tensões medidas em função da altura da barragem, tomando como referência o eixo Z, com zero no coroamento e orientação para baixo:

Quadro Nº14.1: Tensão Confinante	
Z (m)	Tensão Confinante (kPa/cm²)
< 5,0	10,0
5,0 < Z < 10,0	20,0
> 10,0m	40,0

Com base nas condições da acima citadas, foram determinados os módulos de elasticidade para uso no cálculo dos recalques. Esses resultados são mostrados no Quadro nº14.2:

Quadro nº14.2: Módulo de Elasticidade	
Tensão Confinante (kPa)	E (kN/m²)
10,0	12.000
20,0	17.000
40,0	19.000

Assim sendo, o recalque estimado é apresentado no Quadro nº14.3:

Quadro nº14.3: Determinação do Recalque				
Fatia Plano Médio (m)	Espessura (m)	Tensão Média (m)	E (kN/m²)	S (mm)
0,85	1,70	17,935	12.000	2,54
2,70	2,00	52,970	12.000	8,83
4,70	2,00	99,170	12.000	16,53
6,70	2,00	141,370	17.000	16,63
8,70	2,00	183,570	17.000	21,59
10,70	2,00	225,770	19.000	23,77



Quadro nº14.3: Determinação do Recalque				
Fatia Plano Médio (m)	Espessura (m)	Tensão Média (m)	E (kN/m ²)	S (mm)
12,70	2,00	267,970	19.000	28,21
14,70	2,00	310,170	19.000	32,65
16,70	2,00	352,370	19.000	37,09
18,70	2,00	394,570	19.000	41,53

O recalque elástico esperado é de $S = 229,37 \text{ mm}$.

Esse rebaixamento do coroamento deve ser corrigido antes da colocação do revestimento primário.





15 – DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA

Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br



15 – DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO

O vertedouro da Barragem Itapajé foi projetado com base nas informações dos estudos hidrológicos e, principalmente, nas condições geotécnicas do subsolo do local da obra.

Os estudos geotécnicos mostraram que ao longo do eixo transversal no barramento entre as estacas 32 e 38 o topo rochoso está abaixo da cota 272. Já a 80,00 para jusante o topo rochoso foi encontrado por volta da cota 268,40m e a 260,00m para jusante o topo rochoso foi encontrado na cota 270,50m.

A partir dessas informações foi projetado um canal de aproximação, um perfil “creager” fundado na 274,50 e vertendo num canal de concreto armado com extensão de cerca de 210,00m.

A soleira vertente foi colocada na cota 278,00m, quando o reservatório está acumulando 4,24hm³. A largura do vertedouro é de 30,00m.

No trecho do canal de concreto os muros laterais são, também, de concreto armado e foi previsto o grampeamento da laje por uma extensão de aproximadamente de 40,00m, ou seja, no eixo do vertedouro, a locação dos grampos encontram-se entre as estacas 3+5,00 e 5+5,00. Os grampos tem 5,50m de comprimento e são constituídos de aço CA-50 com diâmetro de 25mm. O espaçamento entre os grampos é de 2,50m.

O canal em perfil se desenvolve em rampa de 1,50%.

1.3 - CANAL VERTEDOURO

O eixo longitudinal do canal vertedouro está localizado perpendicularmente ao eixo topográfico da barragem na estaca 37+10,00. O eixo longitudinal projetado do vertedouro possui uma extensão de 527,99m, estando estaqueado de 20 em 20m. A estaca 3 do eixo projetada do vertedouro é igual a estaca 37+10,00 do eixo projetado da barragem.

O canal do vertedouro terá talude de escavação de 1,0 (V) : 2,0 (H), quando estiver em solo e quando o material de escavação for rocha, o talude será de 10,0 (V) : 1,0 (H). A base do canal terá 30,0m de largura.

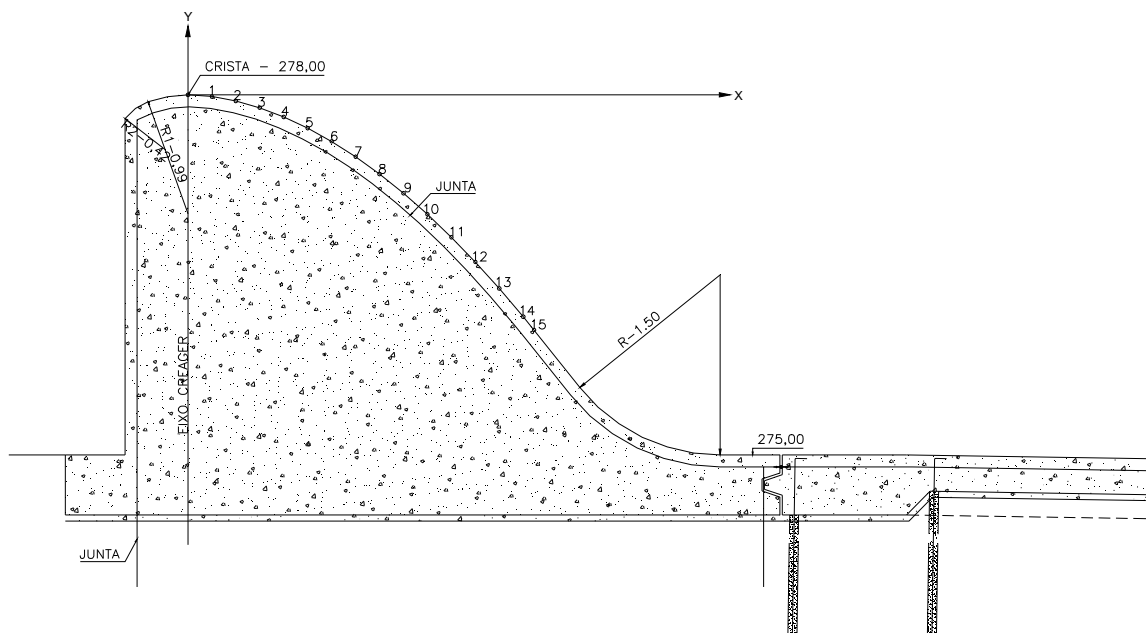
O canal do vertedouro possui duas curva circular, com as características descritas no Quadro nº15.1

Quadro nº15.1: Elementos das Curvas do Canal Vertedouro							
Curva nº	Tipo	Estaca		AC	R (m)	T (m)	D (m)
		PC	PT				
1	Circular	0+131,89	0+180,33	55°30'19"	50,00	26,31	48,44
2	Circular	0+251,63	0+317,30	65°05'28"	57,80	36,89	65,67

As estruturas do vertedouro principalmente no que se refere ao perfil creager serão fundados sobre rocha e a estrutura do perfil é de tal forma que dispensa a necessidade de utilização de sistemas de drenagem para alívio das subpressões. A estabilidade é obtida a partir da geometria do muro.

1.4 - PROJETO HIDRÁULICO DO MURO VERTEDOIRO

A ogiva do perfil Creager foi dimensionada pelos procedimentos recomendados pelo Bureau of Reclamation. Esses dimensionamentos são mostrados a seguir:



$$Q = 177 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$q = \frac{177}{30} = 5,9 \text{ m}^3 / \text{s.m}$$

Adotando $h_b = 1,99\text{m}$, tem-se:

$$h_b = \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot (P + h_b)^2} = \frac{5,90^2}{2 \times 9,81 \cdot (3 + 1,99 = 0,07\text{m})^2}$$

$$H_0 = h_b + h_b = 1,99 + 0,07 = 2,06\text{m}$$

A equação do Creager a jusante é dada por:

$$\frac{y}{H_0} = -K \left(\frac{x}{H_0} \right)^n$$

Onde K e n são tirados de ábacos, em função da relação de $\frac{h_a}{H_0}$

Para $\frac{h_a}{H_0} = 0,03$, tem-se $K = 0,511$ e $n = 1,84$.

Portanto:

$$\frac{y}{1,22} = -0,511 \cdot \left(\frac{x}{2,06} \right)^{1,84}$$

$$y = -0,278 \cdot x^{1,84}$$

Fazendo a derivada de y em relação a x , tem-se:

$$\frac{dy}{dx} = -0,511 \cdot x^{0,84}$$

Fazendo $\frac{dy}{dx} = -0,66$

Tem-se:

$$-0,66 = -0,511 \cdot x^{0,84}$$

Portanto:

$$x_T = 1,355$$

$$y_T = -0,486$$

A curva do Creager é dada no Quadro nº15.2 a seguir:

Quadro nº15.2: Coordenadas do Perfil Creager		
Ponto	X	Y
0	0,000	0,000
1	0,200	-0,014
2	0,400	-0,052
3	0,600	-0,109
4	0,800	-0,184
5	1,000	-0,278
6	1,200	-0,389
7	1,400	-0,516
8	1,600	-0,660
9	1,800	-0,820
10	2,000	-0,995
11	2,200	-1,186
12	2,400	-1,392
13	2,600	-1,613
14	2,800	-1,848
15	2,890	-1,959

As curvas circulares de montante da ogiva são determinadas em ábacos a partir

da relação $\frac{h_a}{H_0} = 0,07$.

Dessas curvas tira-se:

$$\frac{x_c}{H_0} = 0,255 \Rightarrow x_c = 0,525$$

$$\frac{y_c}{H_0} = 0,096 \Rightarrow y_c = 0,197$$

$$\frac{R_1}{H_0} = 0,481 \Rightarrow R_1 = 0,990$$

$$\frac{R_2}{H_0} = 0,205 \Rightarrow R_2 = 0,422$$

Do ábaco tira-se:

$$C_0 = 3,842tf^{1/2}/s = 2,12m^{1/2}/s \Rightarrow \text{OK!}$$

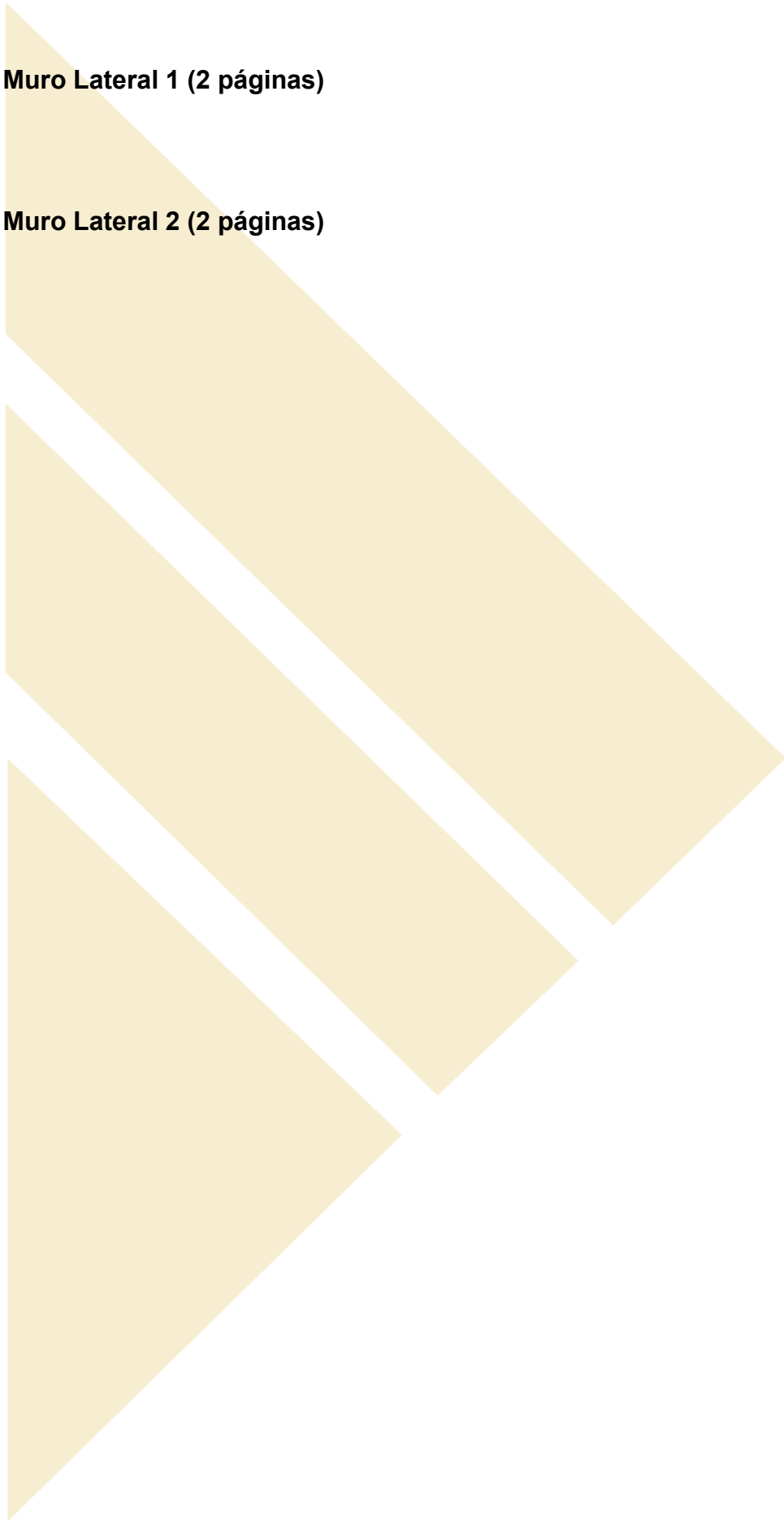
1.5 - DIMENSIONAMENTO DO MURO LATERAL

Para o dimensionamento do muro lateral utilizou-se o programa computacional AUTOCONT, desenvolvidos pela DynamicCad – Software Técnico.

A seguir serão apresentados o relatório de saída do programa.

Muro Lateral 1 (2 páginas)

Muro Lateral 2 (2 páginas)





16 – DEMONSTRATIVO DE QUANTITATIVOS

RW – ENGENHEIROS CONSULTORES S/C LTDA



*Av. Santos Dumont, 1343 - Sala 906 / Cep: 60.150-160 - Aldeota
CNPJ 04072015/0001-16 / Fone: (85) 3226.5103 - Fortaleza - Ceará
rwconsultores@secrel.com.br*

16 – DEMONSTRATIVO DE QUANTITATIVOS

Os demonstrativos das quantidades dos serviços a serem realizados na execução da Barragem Itapajé são apresentadas a seguir:



Demonstrativos de Quantitativos

