

GOVERNO DO ESTADO DO CEARA
SECRETARIA DOS RECUSOS HÍDRICOS - SRH

PROJETO EXECUTIVO DE AMPLIAÇÃO DO AÇUDE ITAPEBUSSU, EM MARANGUAPE-CE.
VOLUME III – ESTUDOS GEOTÉCNICOS

Fortaleza, Outubro de 2015.

R-01

SUMÁRIO

Apresentação	4
1. Introdução	6
2. Informações existentes no projeto executivo original.....	8
2.1. Informações gerais da barragem de itapebussu	8
2.2. Descrição da seção máxima de projeto.....	8
2.3. Descrição das características geológica-geotécnica da fundação do vertedouro	10
2.4. Estudos geológico-geotécnicos realizados no projeto executivo original	12
3. Estudos geotécnicos realizados para o projeto de ampliação da barragem	15
4. Análises de fluxo e estabilidade de taludes.....	19
4.1. Descrição da seção proposta	19
4.2. Definição e estimativas dos parâmetros.....	22
4.3. Definição das análises	23
4.4. Apresentação dos resultados	23
4.4.1. Análise 1 – escavação superficial da barragem existente	23
5. Dimensionamento do vertedouro.....	28
5.1. Dados de projeto do vertedouro	28
5.2. Definição do perfil creager e descrição das alternativas de projeto.....	28
5.3. Condições de carregamento atuante no vertedouro	30
5.4. Análise de fluxo na fundação do vertedouro	32
5.5. Análise das condições de estabilidade externa do vertedouro	37
6. Recomendação e especificações técnicas para tratamento da fundação do vertedouro e dos taludes dos canais de aproximação e restituição	39
7. Conclusões e recomendações gerais.....	42
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
9. Anexos	51
10. Apêndices	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Informações gerais da Barragem de Itapebussu segundo o Projeto Executivo original ...	8
Tabela 2 – Resultados dos ensaios realizados nos materiais terrosos de jazida (Fonte: Projeto Executivo da Barragem Itapebussu N° 0230/01/02/A, nov., 1998).	12
Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados nos materiais granulares de jazidas (Fonte: Projeto Executivo da Barragem Itapebussu N° 0230/01/02/A, nov., 1998).	13
Tabela 4 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos materiais de jazida e do maciço. ...	15
Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos nas sondagens à percussão e mistas realizadas.....	17
Tabela 6 – Parâmetros utilizados nas análises fluxo e estabilidade de taludes	22
Tabela 7 – Dados de projeto do vertedouro da Barragem de Itapebussu	28
Tabela 8 – Critérios de estabilidade externa para vertedouros em concreto (Eletrobrás, 2003).....	32
Tabela 9 – Resumo dos parâmetros avaliados nas análises de fluxo do vertedouro.....	36
Tabela 10 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade externa do vertedouro.....	37
Tabela 11 – Resumo das análises de estabilidade da barragem.....	42
Tabela 12 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade externa para a solução adotada para o vertedouro	42

APRESENTAÇÃO

.....

Apresentação

A CONSTRUTEC ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA, atendendo às atribuições do Contrato firmado com a Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, em conformidade com o Processo Licitatório – Tomada de Preço N.º 18/SRH/CE/2014, vem desenvolvendo o Projeto Executivo de Ampliação da Barragem Itapebussu, no município de Maranguape, no Estado do Ceará.

O presente documento consta do Volume III – Estudos Geotécnicos

O referido projeto será apresentado através dos relatórios, divididos em volumes, abaixo relacionados.

PROJETO EXECUTIVO DE AMPLIAÇÃO DA BARRAGEM ITAPEBUSSU

- Volume I – Levantamentos topográficos e diagnóstico da situação atual;
- Volume II – Estudos Hidrológicos
- Volume III – Estudos Geotécnicos
- Volume IV – Relatório Geral, Quantitativos, Orçamento, Notas de Serviço e Desenhos
- Volume V – Estudo de Viabilidade Ambiental (EVA)
- Volume VI – Especificações Técnicas

INTRODUÇÃO

.....

1. Introdução

Este relatório tem por objetivo apresentar os resultados das análises de fluxo e estabilidade de taludes, assim como apresentar o dimensionamento do vertedouro e as recomendações para tratamento da fundação deste e dos taludes dos canais de aproximação e restituição no âmbito do projeto de ampliação da Barragem de Itapebussu, situada no Distrito de Itapebussu, Município de Maranguape, Estado do Ceará.

As análises de fluxo e estabilidade de taludes foram realizadas considerando as informações existentes no projeto executivo da barragem e no projeto de ampliação da barragem, para a seção situada na Estaca 7 + 0,00 (seção de máxima altura). As análises apresentadas foram realizadas para a condição crítica em termos de estabilidade à ruptura, qual seja, para o talude de jusante na altura máxima, e com o reservatório no nível máximo de operação.

Para o dimensionamento do vertedouro foram levadas em consideração as informações existentes no Projeto Executivo original da Barragem de Itapebussu, e aquelas obtidas nos estudos hidrológicos realizados no projeto de ampliação da referida barragem.

São apresentados neste relatório os seguintes elementos:

- Informações existentes no projeto executivo original: informações gerais do projeto; descrição da seção transversal existente na estaca 7 + 0,00; descrição das características geológico-geotécnicas do maciço de fundação do vertedouro; e estudos geotécnicos realizados no Projeto Executivo original da Barragem de Itapebussu;
- Descrição dos estudos geotécnicos realizados no projeto de ampliação da barragem;
- Análises de fluxo e estabilidade de taludes: descrição da seção de projeto proposta para alteamento do maciço da barragem, definição e estimativa dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de fluxo e estabilidade de taludes e apresentação dos resultados das análises feitas;
- Dimensionamento do vertedouro: dimensionamento da seção do vertedouro em perfil Creager, e apresentação das análises de estabilidade externa para as alternativas de projeto consideradas;
- Recomendações para tratamento da fundação do vertedouro e dos taludes dos canais de aproximação e restituição: apresentação das técnicas de tratamento dos maciços de fundação do vertedouro, assim como dos taludes existentes, e especificações técnicas de alguns serviços;
- Considerações finais: considerações a respeito da validade das análises e recomendações gerais.

INFORMAÇÕES EXISTENTES NO PROJETO EXECUTIVO ORIGINAL

.....

2. Informações existentes no projeto executivo original

De acordo com projeto executivo original (VOLUME I – RELATÓRIO GERAL DE PROJETO, PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM ITAPEBUSSU Nº 0230/01/B, DE NOVEMBRO DE 1998), o arranjo geral da Barragem de Itapebussu é composto por uma barragem zonada de terra, uma tomada d'água sob o maciço e um sangradouro na ombreira esquerda, cujas informações específicas de interesse serão apresentadas a seguir.

2.1. Informações gerais da barragem de itapebussu

De acordo com o projeto executivo original, a Barragem de Itapebussu foi projetada no Rio São Gonçalo, localizado na Bacia Metropolitana – Sub-bacia do Rio São Gonçalo. A Tabela 1 apresenta algumas informações gerais da barragem e do sangradouro conforme descrito nas páginas 08, 09 e 10 do VOLUME I – RELATÓRIO GERAL DE PROJETO, PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM ITAPEBUSSU Nº 0230/01/B, DE NOVEMBRO DE 1998.

Tabela 1 – Informações gerais da Barragem de Itapebussu segundo o Projeto Executivo original

Item	Unidade	Dados
Características Gerais		
Vazão regularizada (f = 90%)	m ³ /s	0,100
Acumulação máxima (cota 115,50 m)	m ³	9,00 x 10 ⁶
Maciço		
Cota do coroamento	m	118,00
Altura máxima acima da fundação	m	13,40
Largura do coroamento	m	6,00
Comprimento da crista	m	528,00
Taludes	-	Montante 2,5H:1,00V; Jusante
Sangradouro		
Tipo	-	Canal escavado em rocha (soleira
Cota da Soleira	m	115,50
Largura	m	90,00
Lamina máxima de sangria (Tr = 1000 anos)	m	1,26
Cota máxima vertente	m	116,80
Vazão máxima de projeto (Tr = 1000 anos)	m ³ /s	161,7
Vazão máxima de projeto (Tr = 100 anos)	m ³ /s	222,4

2.2. Descrição da seção máxima de projeto

A Barragem de Itapebussu, conforme ilustrada nos Desenhos nº 05 (arranjo geral das obras) e 08 (seção tipo e detalhes), apresentados no VOLUME V – DESENHOS, PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM ITAPEBUSSU Nº 0230/05/B, DE NOVEMBRO DE 1998, foi projetada com eixo retilíneo em todo seu desenvolvimento com 528,00 metros de extensão, coroamento na cota 118,0m, com 6,00m de largura e o maciço constituído por solo argiloso no espaldar de montante, e um material “random” proveniente das escavações do sangradouro no espaldar de jusante. A Figura 1 ilustra a geometria e materiais existentes na seção detalhada para a Escaca 7 + 0,00, que corresponde à seção de máxima altura da barragem.

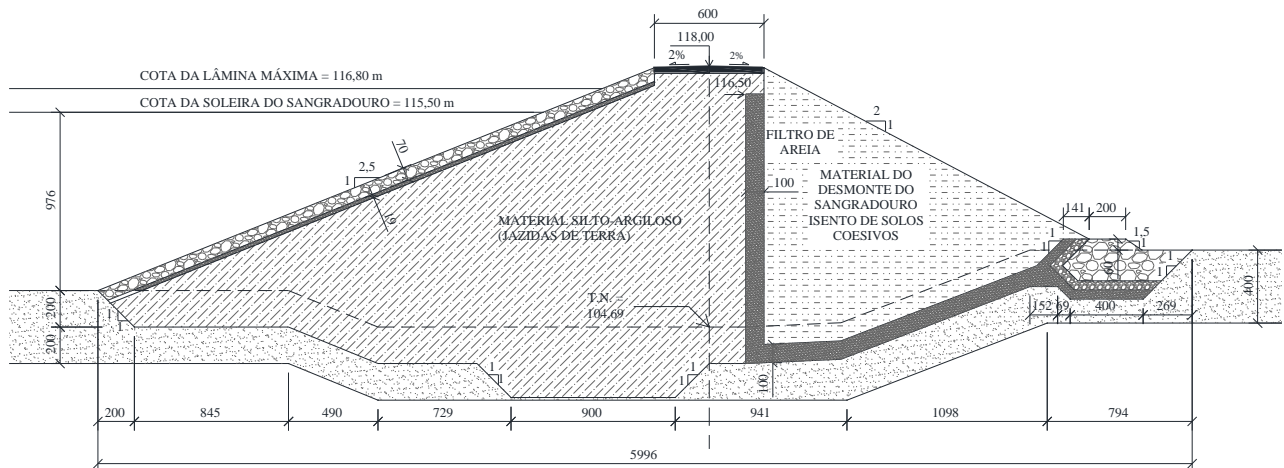


Figura 1 – Seção Tipo – estaca 7 + 0,00 (Seção máxima)

Conforme estudos topográficos realizados, a barragem foi construída com coroamento na cota 118,85m, largura de 7,60m e extensão de 498,97 metros.

De acordo com as informações existentes no projeto executivo original da barragem, o aterro a montante do filtro vertical é constituído por um solo silto-argiloso proveniente da área de empréstimo nº 03 (JS 03), tendo sido utilizado a jusante um material de 2ª e 3ª categorias, isentos de solos coesivos, provenientes das escavações do sangradouro. Entretanto, em vistoria realizada durante a elaboração do projeto, e após entrevistas feitas com moradores locais, concluiu-se que efetivamente na construção da barragem não foi utilizada nenhuma das jazidas estudadas. Portanto, devido a esta incerteza se fez necessário a realização de alguns ensaios de laboratório no material existente na estrutura atual do barramento.

A jusante a seção possui taludes de 2,0 (H):1,0(V) da cota do coroamento até a cota 107,00, onde foi projetado um dreno-de-pé, constituído por uma berma de 2,00 m de largura que segue com talude 1,5 (H):1,0(V) até o terreno natural.

O talude de montante possui inclinação de 2,5(H):1,0(V), do coroamento até o terreno natural. A proteção deste talude consiste de uma camada de transição de brita corrida de 0,20 m de espessura e um rip-rap de enrocamento oriundo das escavações obrigatórias com 0,70 m de espessura.

O sistema de drenagem interno é constituído por um filtro vertical de areia situado no início do maciço de jusante, com topo na cota correspondente ao N.A. máximo (116,80 m) com 1,00 m de espessura, ligado a um filtro horizontal de areia de 1,00 m de espessura, seguido por um dreno-de-pé de enrocamento oriundas das escavações do sangradouro, com duas zonas de transição.

Quanto ao tratamento de fundação da barragem, foi previsto o seguinte: tratamento superficial em toda área de implantação do aterro; remoção de pacotes aluvionares entre as estacas 7 e 16 com espessuras variando entre 1,00 m e 2,00 m, no domínio do off-set; e a execução de uma trincheira de vedação do tipo “cut-off” com largura da base variável, e taludes com inclinação 1,0(H):1,0(V) e profundidade até atingir o solo residual e/ou rocha alterada.

O sangradouro foi projetado na ombreira esquerda, sendo do tipo soleira espessa, com 90 metros de larguras escavado em rocha comoposto por um canal de aproximação de 150,00m de extensão, um cordão de fixação com soleira na cota 115,50m ligado nas extremidades por muros laterais de proteção e um canal de fuga de 60 metros de extensão. Entretanto, conforme constatado em in loco, o cordão de fixação foi executado com cota de soleira de 115,85m, tendo tido posteriormente um incremento de 0,50m de altura, estando portanto, atualmente na cota de 116,35m.

2.3. Descrição das características geológica-geotécnica da fundação do vertedouro

De acordo com o projeto executivo original da Barragem de Itapebussu (VOLUME I – ESTUDOS BÁSICOS, TOMO II – Estudos Geológicos e Geotécnicos), foram realizadas quando do seu projeto e construção investigações de campo ao longo de todo eixo barrável e na região do vertedouro.

Na região do vertedouro, foram executadas três sondagens mistas, denominadas SM 06, SM 07 e SM 08, conforme descrito no projeto executivo original (VOLUME I – ESTUDOS BÁSICOS, TOMO II – Estudos Geológicos e Geotécnicos), e apresentado no DESENHO 02/23 – LOCALIZAÇÃO DAS INVESTIGAÇÕES E AMARRAÇÃO DAS OBRAS (VOLUME V – DESENHOS).

Em toda área de implantação do vertedouro, essas investigações, indicaram a ocorrência de rocha tipo granitóide bastante fraturada, com grau de faturamento entre F3 e F4, sobreposta por uma camada de solo de alteração e/ou coluvião com espessura de 1,50 m. A jusante deste, no trecho correspondente ao canal de restituição foi observado um afloramento de rocha medianamente alterada. A condutividade hidráulica do maciço rochoso, medida por meio dos ensaios in situ realizados durante a realização das sondagens mistas, foi da ordem de 10^{-4} cm/s.

Para elaboração do projeto de alteamento do maciço da barragem, foi feito também uma alteração do vertedouro, tanto em termos de cotas, quanto de geometria. O vertedouro existente que é do tipo soleira espessa, passará a ser do tipo Creager no projeto de alteamento da barragem, cujos estudos hidrológicos definiram para a cheia com tempo de recorrência de 1.000 anos uma lâmina máxima de 1,1 m.

Para o projeto de ampliação da Barragem de Itapebussu, além dos novos estudos hidrológicos e topográficos realizados, foram feitas visitas de campo para conhecimento da obra existente, assim como detalhamento e definição dos estudos complementares a serem realizados. Entre a Figura 2 e a Figura 5 é mostrado um registro fotográfico do vertedouro realizado em fevereiro de 2015. Dentre as observações destacam-se: no canal de aproximação do vertedouro e no canal de fuga observa-se a ocorrência de blocos rochas tipo granitoide aflorantes, com vegetação rasteira e solo arenoso assoreando as calhas; na ombreira esquerda o maciço rochoso apresenta-se bastante fraturado, com descontinuidades perpendiculares ao eixo do vertedouro com mergulho voltado para o interior do maciço, taludes negativos e a presença de vegetação.

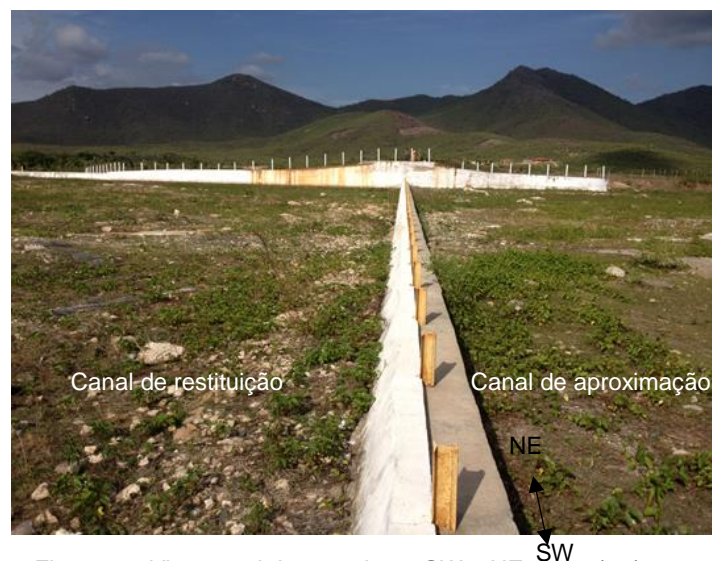


Figura 2 – Vista geral do vertedouro SW – NE em 02/02/2015.



Figura 3 – Vista da calha do vertedouro à jusante (canal de restituição) em 02/02/2015.



Figura 4 – Vista da calha do vertedouro à montante (canal de aproximação) em 02/02/2015.



Figura 5 – Vista do encontro do vertedouro com a parede do maciço em 02/02/2015.

2.4. Estudos geológico-geotécnicos realizados no projeto executivo original

Para elaboração do projeto executivo da Barragem Itapebussu, os estudos geológico-geotécnicos (VOLUME I – ESTUDOS BÁSICOS, TOMO II – ESTUDOS GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DO PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM ITAPEBUSSU, DE NOVEMBRO DE 1998) consistiram de investigações de campo e de laboratório no eixo barrável, e em áreas de empréstimos de materiais terrosos e granulares.

No que diz respeito às investigações de campo, foram executadas sondagens à pá e picareta, sondagens à percussão SPT e mista (percussão + rotativa). Durante a execução dessas sondagens, foram realizados, também ensaios de permeabilidade *in situ*, e feita coleta de amostras deformadas para posterior caracterização física dos materiais em laboratório.

No eixo barrável, foram executadas 4,65 m de sondagem à pá e picareta – SPP (distribuídas em 6 poços), 25,5 m de sondagens à percussão e mistas e 77,2 m de sondagens rotativas. Nas sondagens mistas foram executados 23 ensaios de perda d'água do tipo Lugeon, para determinação da permeabilidade do substrato rochoso.

As investigações na área de implantação do sangradouro, indicaram a ocorrência de uma rocha tipo granitóide bastante fraturada, sobreposta por uma camada de solo de alteração e/ou coluvião com espessura de 1,50 m. A jusante deste, no trecho correspondente ao canal de fuga foi observado afloramento de rocha medianamente alterada.

As investigações no local da barragem, indicaram a ocorrência de um pacote aluvionar no leito do rio que se estende por cerca de 100,0 m na ombreira esquerda, constituído por uma camada de areia média a grossa; sobreposta por uma camada de areia fina siltosa, com N_{SPT} variando entre 3 e 22 golpes/30 cm e permeabilidade na ordem de 10^{-5} cm/s; com rocha aflorante, em pontos localizados, como nas estacas 2 + 0,00 e 3 + 0,00 na ombreira direita, e nas estacas 26 + 00 e 28 + 0,00 na ombreira esquerda; conforme observado no perfil geológico-geotécnico e apresentado no DESENHO Nº 04 (VOLUME V – DESENHOS, PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM ITAPEBUSSU Nº 0230/05/B, DE NOVEMBRO DE 1998).

Os resultados dos ensaios de perda d'água no substrato rochoso indicaram permeabilidade variando entre 10^{-4} cm/s e 10^{-5} cm/s. Para a construção da barragem, foram estudadas cinco áreas de empréstimo/jazidas de materiais terrosos, uma área de depósito arenoso e duas pedreiras.

Nas jazidas de solos, foram executados 58 poços de inspeção à pá e picareta, nos quais foram coletadas amostras para realização de ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade e cisalhamento direto.

Na jazida de areia foram executados três furos de sondagem a trado com coleta de amostras para realização de ensaios de granulometria e permeabilidade. Nas pedreiras foram coletadas amostras e determinação da Abrasão Los Angeles. Na Tabela 2 e na Tabela 3 são mostrados os resumos dos ensaios laboratoriais realizados nos materiais de jazida.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios realizados nos materiais terrosos de jazida (Fonte: Projeto Executivo da Barragem Itapebussu Nº 0230/01/02/A, nov., 1998).

Características Gerais	Jazidas										
	JS-1			JS-2		JS-3		JS-4		JS-5	
Distância	1,12			1,55		2,59		4,21		4,49	
Utilização	Maciço/			Maciço/		Maciço/		Maciço/		Maciço/	
Área	25.000,0			22.500,0		39.600,0		25.200,0		113.200,0	
Volume	20.500,0			15.975,0		32.076,0		21.168,0		92.824,0	
Sondagem	04	06	09	02	09	03	09	02	03	01	03
LL (%)	26	28	30	28	26	29	29	28	29	28	28

LP (%)	12	15	16	14	15	18	16	15	18	18	15
IP (%)	14	13	14	14	11	11	13	13	11	10	13
% PASSA #4	96	94	99	96	98	97	100	97	98	100	99
% PASSA	94	91	92	94	93	93	97	93	93	94	93
% PASSA	72	72	74	63	74	76	81	67	69	75	76
% PASSA	43	48	59	38	52	44	58	46	45	51	54
Tipo de	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL
Umidade	11,2	13,2	11,3	12,2	9,7	11,4	12,0	13,4	13,0	12,1	11,3
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,86	1,71	1,88	1,85	1,92	1,89	1,89	1,82	1,91	1,85	1,91
c' (kPa)	-			-			-			22,0	
ϕ' (°)	-			-			-			29,1	
k (cm/s)	8,7 x 10 ⁻⁷			9,0 x 10 ⁻⁷			6,3 x 10 ⁻⁷			9,2 x 10 ⁻⁷	

Tabela 3 – Resultados dos ensaios realizados nos materiais granulares de jazidas (Fonte: Projeto Executivo da Barragem Itapebussu Nº 0230/01/02/A, nov., 1998).

Características Gerais	Jazidas					
	JA-1			JP-1	JP-2	
Distância média de transporte	0,225			1,63	2,27	
Utilização	Filtro/ transições			Rip-rap/ rockfill/ concreto	Rip-rap/ rockfill/ concreto	
Área levantada (m ²)	10.000,0			7.500,0	30.000,0	
Volume utilizável (m ³)	8.000,0			37.500,0	45.000,0	
Tipo de material	Areia fina a média			Gnaisse	Gnaisse/ granitóide	
k (cm/s)	4,2	3,8	6,2	4,9 x	-	-
Abrasão Los Angeles	-			38	37	

**ESTUDOS GEOTÉCNICOS REALIZADOS PARA O PROJETO DE AMPLIAÇÃO DA
BARRAGEM**

.....

3. Estudos geotécnicos realizados para o projeto de ampliação da barragem

Para concepção do projeto de ampliação da Barragem de Itapebussu, foram realizados estudos geotécnicos que consistiram na realização de ensaios de laboratório em amostras de solo deformadas e indeformadas coletadas no maciço da barragem (nas seções correspondentes às Estacas 07 + 0,0 e 17 + 0,00), e em duas das jazidas contempladas no projeto executivo original (JS 03 e JS 04); na realização de sondagens à percussão do tipo SPT no maciço do barramento (no talude de jusante); e sondagens mistas (percussão + rotativas) realizadas no solo de aluvião a jusante da barragem.

Os ensaios de laboratório realizados em amostras indeformadas coletadas no maciço do barramento, no filtro, e em amostras deformadas coletadas nas jazidas foram:

- Ensaios de caracterização geotécnica (granulometria com sedimentação, LL, LP);
- Ensaios de compactação;
- Ensaios de permeabilidade;
- Ensaios de compressão triaxial do tipo CU (adensado e não-drenado).

Além desses ensaios, foram realizados ensaios de permeabilidade in situ nos furos de sondagem SPT e mista.

Esses ensaios visam confirmar os resultados dos estudos geotécnicos apresentados no projeto executivo, principalmente para as amostras das jazidas, além da determinação de novos parâmetros geotécnicos não determinados anteriormente, como por exemplo, os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material do maciço do barramento. Além disto, os estudos geotécnicos realizados visaram obter informações e parâmetros que caracterizem completamente a estrutura do barramento existente, e o maciço de fundação, tendo em vista o dimensionamento e análises de fluxo e estabilidade de taludes da barragem a serem realizadas.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios laboratoriais realizados com solo do maciço da barragem e das jazidas. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará. A metodologia dos ensaios, assim como as planilhas de cálculo e os resultados encontram-se no Relatório N° 20/2015 – Ensaio de Laboratório, apresentado no Anexo 1.

Tabela 4 – Resumo dos resultados dos ensaios realizados nos materiais de jazida e do maciço.

Características			Materiais						
Ensaio			Porcentagem que passa						
Granulometria	#	mm	Jazidas			SOLO/ E7 + 0,0	SOLO/ E17 + 0,0	FILTRO / E7 + 0,0	FILTRO/ E17 + 0,0
			JS03	JS03	JS04				
			Localização						
			509164;	509244	50517				
	1"	25,4	100	100	96	100	100	100	100
	3/4"	19,1	100	98	95	100	99	100	100
	1/2"	12,27	99	98	90	99	96	99	99
	3/8"	9,52	98	97	86	98	94	97	98
	No. 4	4,76	92	94	76	93	88	96	95
	No. 10	2,00	82	90	67	84	82	90	90
	No. 30	0,60	65	77	49	64	67	70	72
	No. 40	0,42	61	72	43	60	64	64	67
	No. 50	0,30	52	64	35	53	57	51	53
	No.10	0,15	40	52	25	46	50	25	19
	No.20	0,074	33	44	18	40	45	8	9
	< 0,005		16	24	7	24	28	-	-
	LL (%)		37	38	NL	40	43	-	-
	LP (%)		19	14	NP	24	23	-	-
	IP (%)		18	24	NP	16	20	-	-
	Cu		-	-	66,7	-	-	5,0	4,75
	Cc		-	-	1,85	-	-	1,01	1,31
	Classificação CUCS		SC	SC	SM	SC	SC	SP	SP
	Umidade ótima (%)		12,0	14,3	11,9	-	-	-	-
	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)		1,840	1,780	1,906	-	-	-	-
	k (cm/s)		5,1 x 10 ⁻⁷	2,9 x 10 ⁻⁷	-	7,6 x 10 ⁻⁷	5,6 x 10 ⁻⁷	1,1 x 10 ⁻³	1,2 x 10 ⁻³
	c (kPa)		42,0	65,0	-	75,0	55,0	-	-
	c' (kPa)		15,0	15,0	-	8,0	0,0	-	-
	ϕ		23,1	25,4	-	23,6	28,5	-	-
	ϕ'		30,8	33,7	-	33,4	36,4	-	-

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das sondagens à percussão SPT, das sondagens mistas, incluindo os resultados dos ensaios de permeabilidade *in situ* realizados. Esses ensaios foram realizados pela empresa Fortsolos Engenharia LTDA. A metodologia dos ensaios, assim como os perfis individuais de sondagens são apresentados no Anexo 2.

Tabela 5 – Resumo dos resultados obtidos nas sondagens à percussão e mistas realizadas

Furo		Prof.	N _{SPT}	Rec.	Classificação do	k (cm/s)	Data	Coord.
SP – 01	07 + 0,00	1,00	24	-	Areia silto-argilosa, com pedregulhos, de cor variegada cinza e vermelhada	-	11/02/2015	510827/ 9551506
		2,00	35	-		$4,3 \times 10^{-7}$		
		3,00	35	-		$2,9 \times 10^{-5}$		
		3,55		-	Areia grossa pouco siltosa	-		
SP – 02	17 + 0,00	1,00	22	-	Areia silto-argilosa, com pedregulhos, de cor variegada cinza e vermelhada	-	11/02/2015	510674/ 9551397
		2,00	24	-		$3,2 \times 10^{-9}$		
		3,00	35	-		7×10^{-6}		
		3,60		-	Areia grossa pouco siltosa	-		
SM - 01	07 + 0,00	1,00	4	-	Areia siltosa, com pedregulhos, de cor cinza	-	10/02/2015	510814/ 9551516
		2,00	6	-		$6,2 \times 10^{-10}$		
		2,50		-		-		
		3,00	25/5	-	Areia silto-argilosa, com pedregulhos de quartzo, de cor cinza	-		
		4,00	25/5	-		-		
		5,00	25/5	-		-		
		6,00		60%	Gnaisse	$7,1 \times 10^{-6}$		
SM - 02	17 + 0,00	1,00	33	-	areia siltosa pedregulhosa de cor cinza	-	12/02/2015	510660/ 9551412
		1,45		-		-		
		2,00	25/5	-	areia silto agilosa pedregulhosa de cor marrom	$1,1 \times 10^{-3}$		
		3,00	25/5	-		-		
		4,00	25/5	-		-		
		5,00		55%	Gnaisse	$2,2 \times 10^{-6}$		

ANÁLISES DE FLUXO E ESTABILIDADE DE TALUDES

.....

4. Análises de fluxo e estabilidade de taludes

4.1. Descrição da seção proposta

A nova seção da barragem foi definida a partir das informações topográficas e hidrológicas do projeto executivo, e dos novos estudos realizados. Dessa forma, a seção da barragem ficou definida da seguinte forma: a inclinação do talude de montante foi mantida igual àquela considerada no projeto executivo original, ou seja, em 2,5(H):1,0(V); para o talude de jusante, optou-se também pela manutenção da inclinação existente após o alteamento proposto para a cota do coroamento, ou seja, foi mantida a inclinação 2,0 (H):1(V).

Anteriormente à execução do aterro compactado do alteamento, foi proposta, e considerada, uma escavação superficial de 0,5 m do material do coroamento e do talude de jusante para remoção de materiais contaminados com matéria orgânica, dentre outros, com posterior escavação de bermas com 1,0 m de altura e 2,0 m de largura, visando promover uma ligação eficiente do aterro existente, com o aterro a ser executado durante o alteamento da barragem. Com relação ao sistema de drenagem interno, foi definido uma escavação, ou raspagem superficial, no pé do talude de jusante para que se possa descobrir o rockfill existente, permitindo a execução do seu complemento, e execução das camadas de transição quando da ampliação da seção da barragem.

O estudo hidrológico definiu que a altura do alteamento da cota da soleira do sangradouro no projeto de ampliação da Barragem de Itapebussu foi de 1,15 m, sendo este valor utilizado para o dimensionamento da seção da barragem. A Figura 6 apresenta a seção-tipo proposta após o dimensionamento da altura da seção conforme se segue:

a) Cálculo da folga da barragem – F

A folga foi calculada como:

$$F = 0,75h_0 + \frac{v_0^2}{2g}$$

onde: F – folga (m); h_0 – altura das ondas (m); v_0 – velocidade das ondas (m/s); g – aceleração da gravidade (m/s^2).

Com Fetch = $f = 3,0$ km (definido de acordo com a topografia considerando a cota de alteamento da soleira), tem-se:

$$h_0 = 0,75 + 0,34 \sqrt{f} - 0,26 \sqrt[4]{f} = 1,00 \text{ m (Fórmula de Stevenson)}$$

$$v_0 = 1,5 + 2 h_0 = 3,50 \text{ m (Fórmula de Gaillard).}$$

Então:

$$F = 0,75 \times 1,00 + \frac{(3,5)^2}{2 \times 9,81} = 1,37 \text{ m}$$

b) Cálculo da cota coroamento – C_c

A cota do coroamento da barragem foi calculada como:

$$C_c = C_s + R$$

onde: C_s – cota da soleira do vertedouro (m); R – Revanche = $H_0 + F$ (m).

Então:

$$C_c = 117,50 + 1,09 + 1,37 = 119,96 \text{ m}$$

No caso, foi adotada a cota 120,0 m para o coroamento do barramento após o alteamento de 1,15 m da soleira do sangradouro a ser realizada.

c) Altura total do barramento - H_B

A altura do barramento foi calculada como:

$$H_B = C_c - C_t$$

onde: C_c – cota do coroamento (m); C_t – cota do talvegue na seção máxima (m).

Então:

$$H_B = 120,00 \text{ m} - 104,60 = 15,40 \text{ m.}$$

d) Largura do coroamento da barragem – B

A largura do coroamento da barragem foi calculada como:

$$B = 1,1\sqrt{H_B} + 1,00 = 1,1\sqrt{15,4} + 1,00 = 5,32\text{m}$$

Foi adotada uma largura igual a 6,0 m.

e) Proteção dos taludes

A proteção dos taludes de montante e jusante foi mantida de acordo com o que foi definido no projeto executivo. A proteção de montante deverá ser feita por uma camada de 0,90m de espessura de rocha disposto da seguinte maneira: 0,20m de transição de brita corrida, sob 0,70m de enrocamento externo, e no de jusante deverá ser utilizada uma camada de brita de 0,20m, conforme disposto nas especificações dos serviços.

SEÇÃO TRANSVERSAL MODIFICADA- ESTACA 7 + 0,00

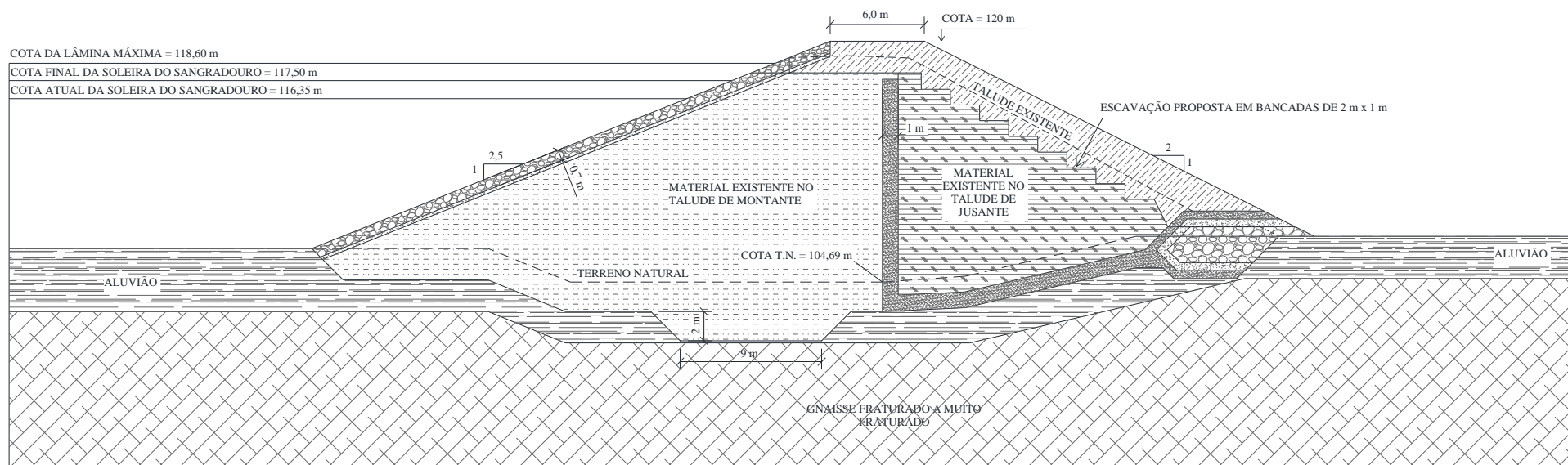


Figura 6 - Seção Tipo – estaca 07 + 0,00 (Seção máxima), com alteamento do maciço.

4.2. Definição e estimativas dos parâmetros

As análises de fluxo e estabilidade de taludes foram realizadas considerando-se os parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios de campo e de laboratório, conforme descrito a seguir:

- a) Para o maciço de montante existente, os parâmetros geotécnicos foram estimados a partir de ensaios de laboratório, considerando os valores médios obtidos;
- b) Para os materiais do filtro (horizontal e vertical) e do dreno de pé de jusante, os parâmetros foram estimados a partir da classificação SUCS do material (Vieira et al 1996), exceto a permeabilidade do material do filtro, que foi determinada a partir de ensaios de laboratório;
- c) Os parâmetros do material da fundação foram estimados a partir dos ensaios *in situ* (SPT e rotativa) e da literatura de barragens (Vieira et al, 1996);
- d) Os parâmetros do material do maciço de montante e foram estimados a partir dos ensaios *in situ* (SPT) e de retroanálises realizadas com base nas escavações realizadas para a obtenção das amostras indeformadas. Na definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dessa zona foram feitas as seguintes hipóteses e considerações:
 - O ângulo de atrito foi estimado em função do valor do N_{SPT} conforme proposição de Teixeira (1996);
 - O valor da coesão foi obtido a partir da retroanálise da situação observada quando da escavação do talude para obtenção das amostras indeformadas quando dos estudos geotécnicos realizados: no caso, observou-se que foi possível a escavação com aproximadamente 1,0 m de profundidade, sem que ocorresse o desmoronamento do talude vertical formado; tendo, portanto, sido aplicada a Teoria de Rankine para o cálculo das tensões ativas, e considerando uma altura crítica igual a 1,0 m, estimou-se que a coesão mínima necessária para que as tensões ativas fossem negativas foi de 5,2 kPa; valor este utilizado para a estimativa da estabilidade dos taludes provisórios formados durante o alteamento da barragem.
- e) Para o solo de jazida a ser utilizado na compactação do aterro de ampliação, foram considerados os parâmetros médios previstos para a jazida 03 cujas amostras foram ensaiadas.

A Tabela 6 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados nas análises de fluxo e estabilidade de talude realizadas no projeto de ampliação da Barragem de Itapebussu.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nas análises de fluxo e estabilidade de taludes

Parâmetros	Maciço existente e a mont.	Maciço existente e a Jus.	Filtro	Brita de transição	Enrocamento	Aterro de ampliação	Solo de fundação	Maciço rochoso de fundação
c (kPa)	65,0	-	-	0	0	53,5	-	-

c' (kPa)	4,0	5,2	0	0	0	15,0	0	2
ϕ (°)	26,05	-	-	40,0	40,0	24,25	-	-
ϕ' (°)	34,9	35,0	35,0	40,0	40,0	32,25	30,0	35,0
γ (kN/m ³)	20,0	20,0	19,0	19,0	22,0	20,0	19,5	22,0
k (cm/s)	$6,5 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-7}$	1	1	4×10^{-7}	$1,1 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-7}$
k_h/k_v	10	10	1	1	1	10	1	

4.3. Definição das análises

As análises de fluxo e estabilidade foram feitas para a seção transversal correspondente à Estaca 7 + 0,00 (seção máxima da barragem). Essas análises foram feitas para os seguintes estágios de carregamento: escavação superficial do coroamento e do talude de jusante existente; final de construção após alteamento do barramento; regime de operação após o alteamento do coroamento, e; rebaixamento rápido.

Em todas as análises de fluxo o coeficiente de permeabilidade foi considerado como constante em função da sucção mátrica atuante. As análises de estabilidade de taludes foram realizadas utilizando o método de Morgenster & Price (1965) apresentado em Gerscovich (2012).

Como critério de aceitação do comportamento da barragem foram adotadas as recomendações do Manual de Estabilidade de Taludes do Corpo de Engenheiros do Exército Norte-Americano (U.S Army Corp of Engineers, 2003), e da publicação Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (Eletrobrás, 2003), nas quais as barragens de terra devem apresentar:

- Fator de segurança mínimo para a situação de final de construção: 1,4;
- Fator de segurança mínimo para a condição de operação: 1,5;
- Fator de segurança mínimo para a situação de rebaixamento rápido: 1,0 – 1,3.

4.4. Apresentação dos resultados

4.4.1. Análise 1 – escavação superficial da barragem existente

Na análise de fluxo foi considerado o nível de água no reservatório na cota de operação especificada no projeto executivo original da barragem, e fluxo permanente estabelecido, que representa uma situação mais conservadora, e, portanto, a favor da segurança.

Na Figura 7 são mostrados os resultados das análises de fluxo e estabilidade de taludes (talude de jusante) descritas anteriormente para a seção transversal da Estaca 7 + 0,00, para a qual observa-se que para a escavação temporária realizada o fator de segurança dos taludes provisórios é de 1,55, sendo considerado bastante satisfatório.

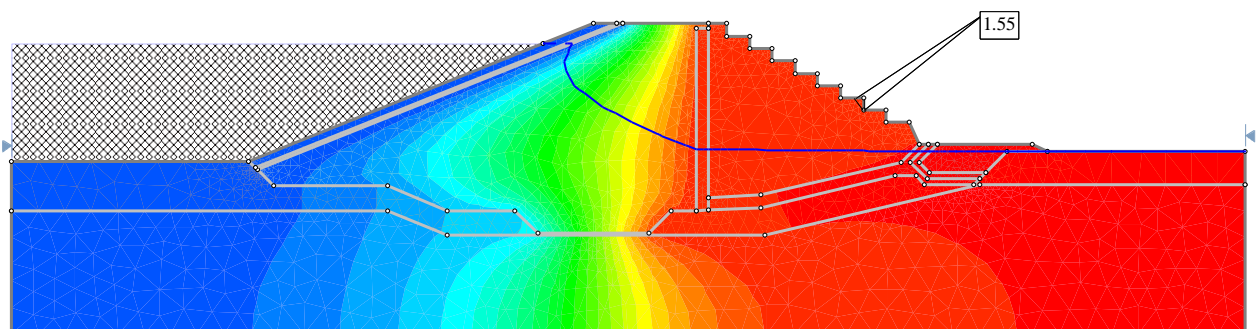


Figura 7 – Rede de Fluxo e Superfície Potencial de Ruptura para o Talude de Jusante após Escavação Inicial - FS = 1,55

4.4.2. Análise 2 – final de construção

As condições de contorno considerando o final de construção do aterro de alteamento foram:

- Nível de água a montante igual à cota de operação do reservatório antes do alteamento: condição crítica (Cota = 116,35 m);
- Parâmetros geotécnicos para o solo do aterro de ampliação definidos em termos de tensões totais, ou seja, condição não-drenada;
- Parâmetros geotécnicos para o solo da estrutura existente definidos em termos de tensões efetivas.

Nas Figura 8 e Figura 9 são mostrados os resultados das análises de fluxo e estabilidade de para a seção transversal da Estaca 7 + 0,00, após a execução do aterro de ampliação da barragem. Observa-se que o fatores de segurança obtidos foram de 1,46, e 3,41, para os taludes de jusante e montante, respectivamente, sendo superiores, portanto, ao valor mínimo exigido para esta situação de projeto.

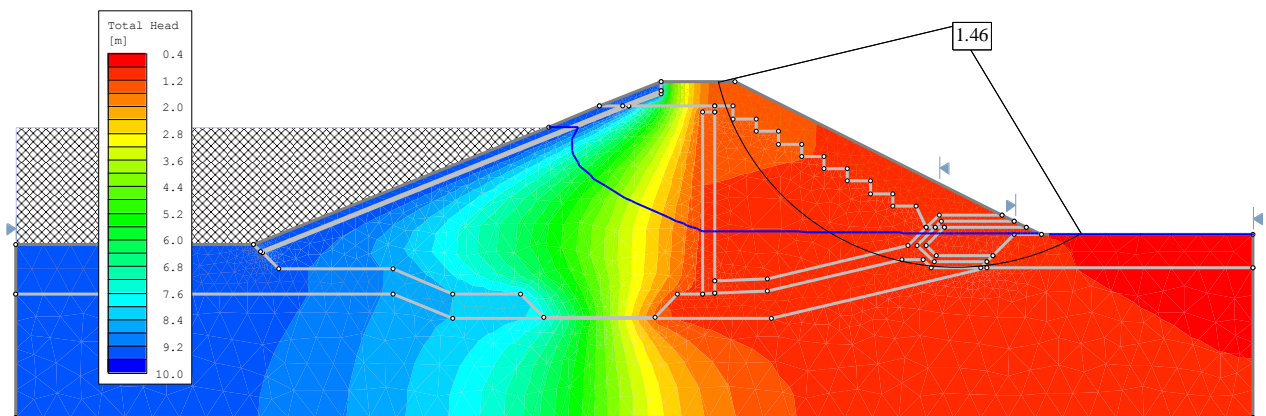


Figura 8 – Rede de Fluxo e Superfície Potencial de Ruptura para o Talude de Jusante no Final de Construção - FS = 1,46

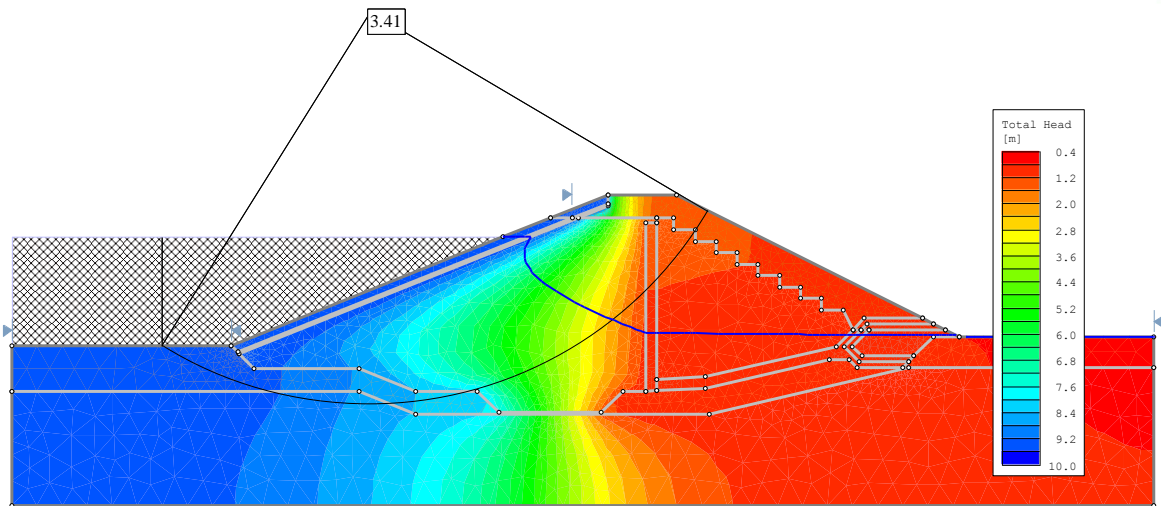


Figura 9 – Rede de Fluxo e Superfície Potencial de Ruptura para o Talude de Montante no Final de Construção - FS = 3,41

4.4.3. Análise 3 – regime de operação – rede de fluxo em regime estacionário

Para a situação de regime de operação com a rede de fluxo em regime estacionário (permanente) foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- Nível de água do reservatório igual ao especificado no projeto executivo acrescido de 1,15 m (valor do alteamento da cota da soleira fornecida pela hidrologia);
- Parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes do barramento definidos em termos de tensões efetivas;

A Figura 10 mostra os resultados das análises de fluxo e estabilidade de talude (talude de jusante), para a seção transversal da Estaca 7 + 0,00, após a execução do aterro de ampliação da barragem e na condição de regime de operação.

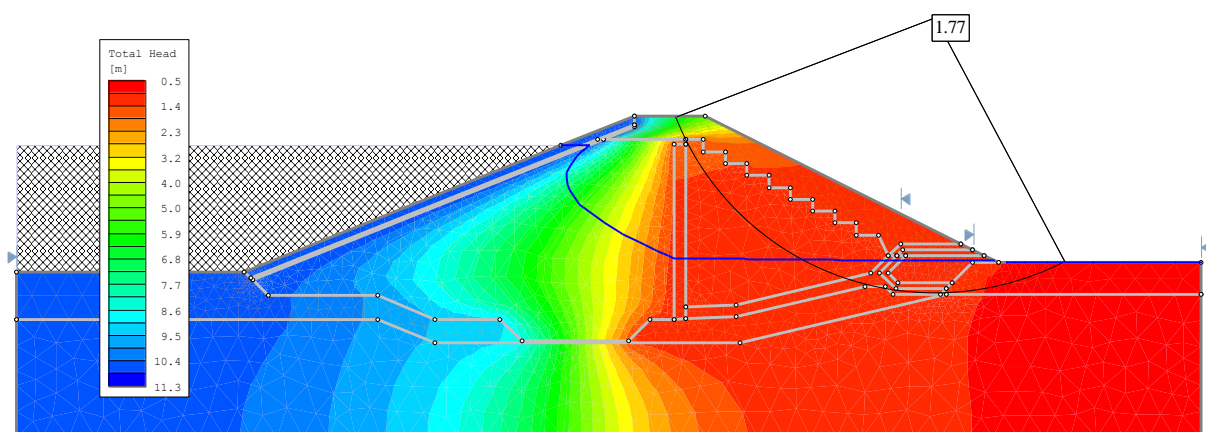


Figura 10 – Rede de Fluxo e Superfície Potencial de Ruptura para o Talude de Jusante em Regime de Operação com Fluxo Permanente - FS = 1,77

A Figura 11 mostra a distribuição dos valores dos gradientes hidráulicos estimados para a seção transversal modelada na Estaca 7 + 0,00. Considerando que o maciço existente tenha um peso

específico submerso igual a 10 kN/m^3 , observa-se que o gradiente crítico seria de 1,0. Assim, os fatores de segurança na região do fluxo estão superiores a 2,0 no que se refere à ruptura hidráulica.

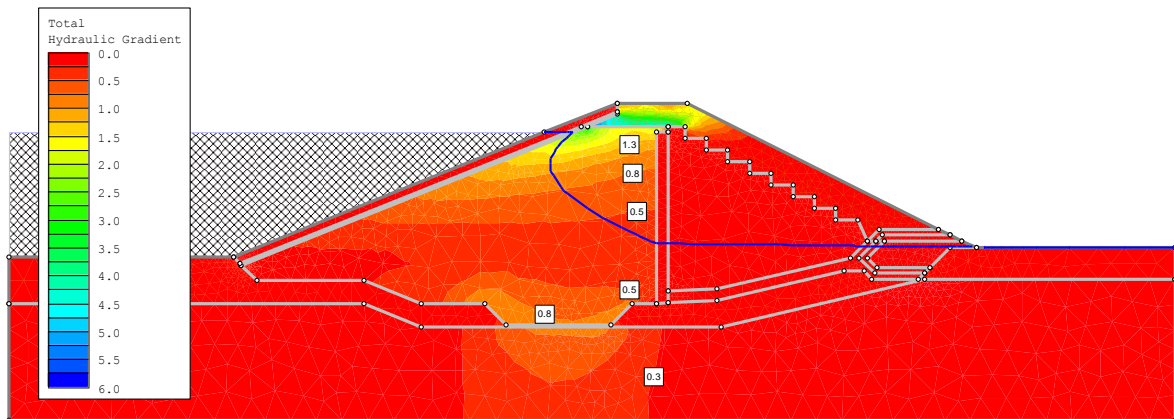


Figura 11 – Distribuição dos gradientes hidráulicos

4.4.4. Análise 4 – rebaixamento rápido

A análise da estabilidade do talude de montante durante o rebaixamento rápido da barragem foi feita utilizando-se o Método do Corpo de Engenheiros Americano (Corp of Engineers, 1970).

Nesta etapa, na análise de estabilidade, os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados foram aqueles definidos em termos de tensões totais, uma vez que o material trabalha de forma não-drenado durante o rebaixamento rápido.

A Figura 12 mostra a linha de fluxo estabelecida na condição do rebaixamento do nível d'água e o resultado da análise de estabilidade (talude de montante), mostrando que o fator de segurança obtido de 2,07 encontra-se acima dos valores mínimos exigidos para esta situação de projeto.

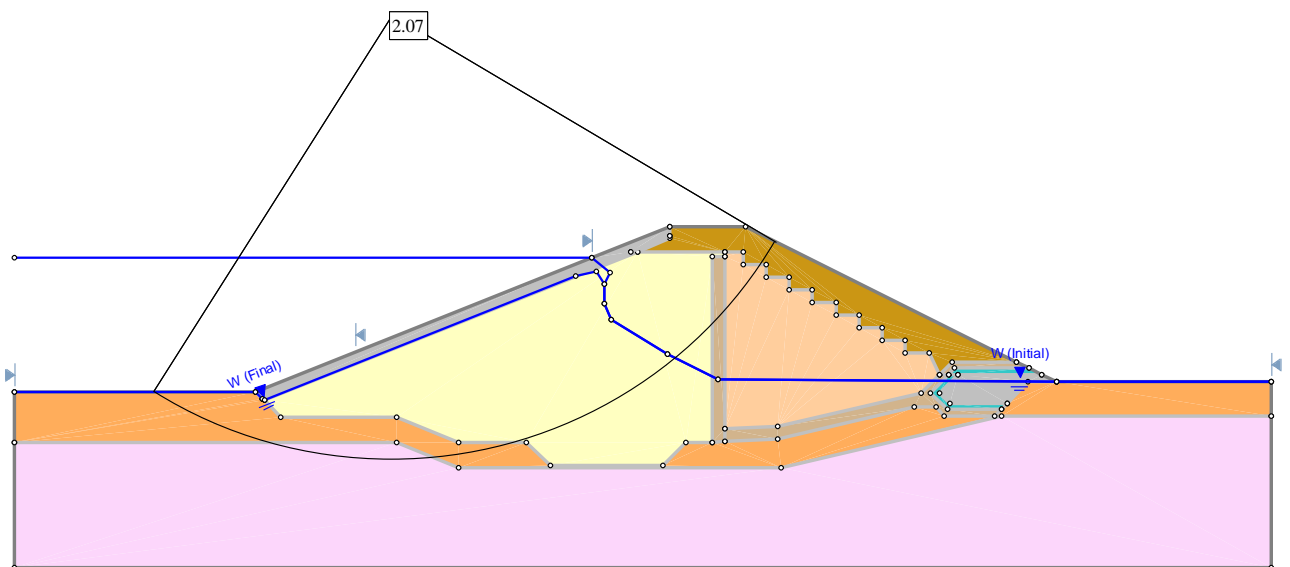


Figura 12 – Rede de fluxo e superfície potencial de ruptura para o talude de montante na condição crítica de rebaixamento rápido segundo o método Corp of Engineers (1970) - FS = 2,07

DIMENSIONAMENTO DO VERTEDOURO

.....

5. Dimensionamento do vertedouro

Para a ampliação da capacidade de armazenamento da Barragem de Itapebussu foi necessária a elevação da cota da soleira do sangradouro de 116,35 m, definida a partir do levantamento topográfico realizado, para a cota de 117,50 m. De forma a atender às exigências das vazões afluentes para as cheias de projeto foi definido nos estudos hidrológicos que o vertedouro da barragem passaria de um vertedouro do tipo parede espessa para um perfil Creager, para cuja lâmina de água na máxima cheia é de 1,10 m.

A seguir são apresentados os dados de projeto utilizados no dimensionamento do vertedouro de perfil Creager, as condições de carregamento definidas de acordo com os Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (Eletrobrás, 2003), e os resultados das análises de estabilidade externa para as soluções de projeto consideradas.

5.1. Dados de projeto do vertedouro

Na Tabela 7 são apresentadas as informações levantadas nos estudos hidrológicos e topografia que permitiram a definição das características geométricas do vertedouro em perfil Creager para o projeto de ampliação da Barragem de Itapebussu.

As informações referentes ao maciço rochoso de fundação foram obtidas no projeto executivo original da Barragem de Itapebussu, conforme já descrito anteriormente, sendo considerado um maciço de fundação formado por um granitoide muito alterado, com permeabilidade aproximada de 1×10^{-4} cm/s, até uma profundidade de 6,0 m, e um granito pouco alterado com coeficiente de permeabilidade de aproximadamente 1×10^{-7} cm/s entre as profundidades de 6,0 m a 12,0 m.

Tabela 7 – Dados de projeto do vertedouro da Barragem de Itapebussu

Item	Unidade	Valor/Descrição	Fonte
Tipo de vertedouro	-	Creager	Estudos Hidrológicos
Cota da soleira	m	117,5	Estudos Hidrológicos
Lâmina de água máxima	m	1,10	Estudos Hidrológicos
Largura do vertedouro	m	90,0	Topografia
Cota média do canal	m	115,65	Topografia

5.2. Definição do perfil creager e descrição das alternativas de projeto

A definição da geometria do perfil Creager foi feito tomando-se por base as recomendações de Azevedo Netto et al. (1998). A Figura 13 mostra a definição do perfil Creager para o vertedouro da Barragem de Itapebussu, considerando uma lâmina de água (H) igual a 1,10 m.

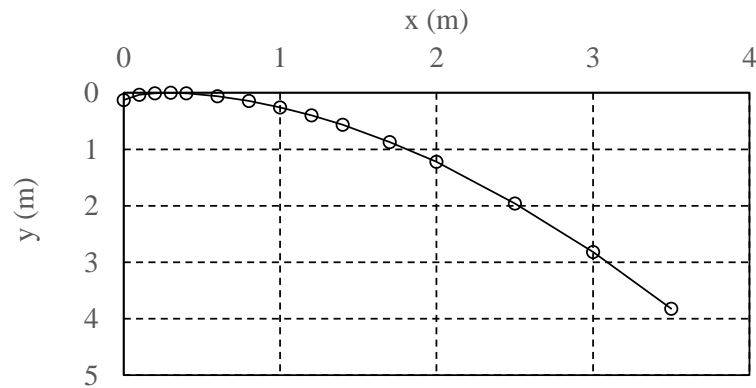


Figura 13 – Definição do perfil Creager para $H = 1,10\text{ m}$

A partir da definição da geometria do perfil Creager, foram consideradas duas alternativas de projeto, e feitas as verificações das suas condições de estabilidade externas para as condições de carregamento recomendadas na publicação Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (Eletrobrás, 2003):

- a) Alternativa 1: vertedouro em perfil Creager, com altura total de 1,84 m, sobre uma laje de concreto simples de 0,2 m de espessura e 2,83 m de largura, assente diretamente sobre o maciço rochoso de fundação sem qualquer tipo de tratamento, conforme ilustrado na Figura 14;
- b) Alternativa 2: vertedouro em perfil Creager, com altura total de 1,84 m, sobre uma laje de concreto simples de 0,2 m de espessura e 2,83 m de largura, assente diretamente sobre o maciço rochoso de fundação, com a execução de uma linha de injeções de cimento, de 5,0 m de profundidade, no pé de montante do vertedouro, conforme ilustrado na Figura 15.

O objetivo da consideração da linha de injeções de cimento a montante do vertedouro em perfil Creager foi de diminuir o fluxo de água durante a operação do vertedouro devido ao elevado coeficiente de permeabilidade observado nos estudos geotécnicos, e conseqüentemente as forças de sub-pressão de água que podem prejudicar as análises de estabilidade externa, conforme resultados mostrados a seguir.

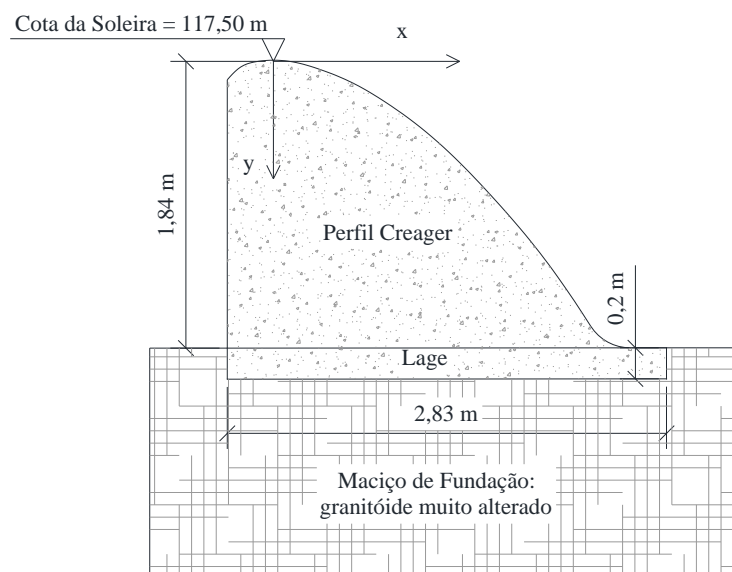


Figura 14 – Seção transversal para a Alternativa 1 de projeto para o vertedouro em perfil Creager

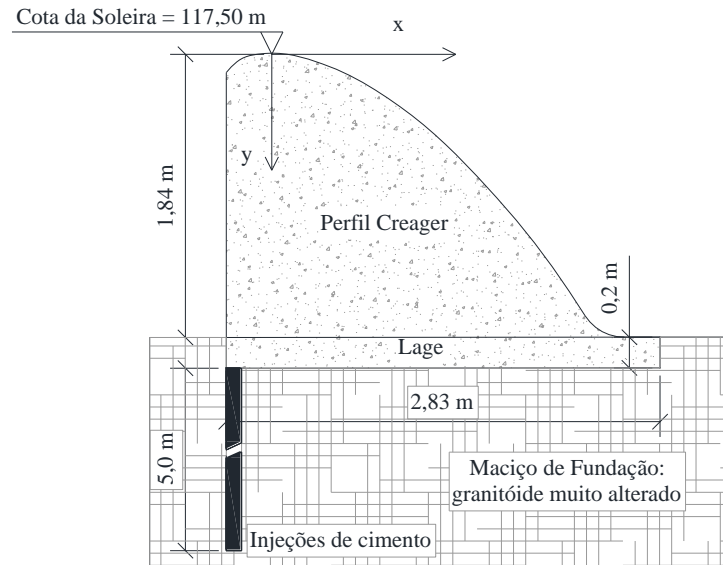


Figura 15 – Seção transversal para a Alternativa 2 de projeto para o vertedouro em perfil Creager

5.3. Condições de carregamento atuante no vertedouro

De acordo com a publicação Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (Eletrobrás, 2003), os principais tipos de carregamento a serem considerados no caso do projeto de vertedouros são:

- Cargas devido ao peso próprio da estrutura, definida em função do peso específico e geometria da seção do vertedouro;
- Pressões hidrostáticas que atuam em decorrência dos diversos níveis de água atuantes na estrutura, e;
- Sub-pressão devido ao fluxo de água pelo maciço de fundação.

A Figura 16 apresenta as forças atuantes em um vertedouro em perfil Creager operando nas suas condições de trabalho mais severas. A publicação da Eletrobrás (2003) refere-se ainda ao fato de que estas forças devem ser consideradas na análise da estabilidade da estrutura de acordo com certas condições de carregamento, quais sejam:

- Condição de Carregamento Normal (CCN): corresponde a uma situação de combinação de ações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, não considerando, por exemplo, ações excepcionais, tais como condições hidrológicas excepcionais;
- Condição de Carregamento Excepcional (CCE): corresponde a uma situação de combinação de ações com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, como por exemplo, condições hidrológicas excepcionais de baixa probabilidade de ocorrência;
- Condição de Carregamento Limite (CCL): corresponde a uma situação de combinação de mais de uma ação com muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida útil da

estrutura, se aplicando mais especificamente à análise de barragens de concreto, que às análises de vertedouros, devido às suas características de operação específicas;

- d) Condição de Carregamento de Construção (CCC): corresponde a todas as combinações de ações que apresentem probabilidade de ocorrência durante a execução da obra durante a sua execução.

Em função das características de operação específica, no projeto dos vertedouros são normalmente consideradas apenas as CCN e as CCC.

Para a condição CCN aplicam-se nas análises da estabilidade dos vertedouros as seguintes cargas:

- a) Peso próprio da estrutura;
- b) Empuxos hidrostáticos com o NA do reservatório e do canal de fuga no nível normal de operação (cota da soleira);
- c) Subpressão atuante na estrutura;

Para a condição CCE aplicam-se nas análises da estabilidade dos vertedouros as seguintes cargas:

- d) Peso próprio da estrutura;
- e) Empuxos hidrostáticos com o NA do reservatório e do canal de fuga no nível de maior severidade;
- f) Subpressão atuante na estrutura;

No que tange às análises da estabilidade externa do vertedouro devem ser levadas em consideração os seguintes critérios de estabilidade (Eletrobrás, 2003):

- a) Estabilidade quanto à flutuação;
- b) Estabilidade quanto ao tombamento;
- c) Estabilidade quanto ao deslizamento;
- d) Estabilidade quanto à capacidade de carga do maciço de fundação.

Os critérios de estabilidade são definidos a partir de valores mínimos de fatores de segurança estabelecidos para cada condição de carregamento considerada, conforme recomendações da Eletrobrás (2003) apresentadas na Tabela 8. Os valores apresentados entre parênteses devem ser adotados quando não se tem informações confiáveis (levantadas na literatura técnica, por exemplo) sobre os parâmetros de resistência dos materiais envolvidos nas análises. Os valores dos fatores de segurança apresentados para a capacidade de carga se referem à relação entre a máxima tensão de tração atuante na base do maciço de fundação e a sua tensão admissível. Além disto, não é admitida a ocorrência de tensão de tração no contato estrutura-fundação.

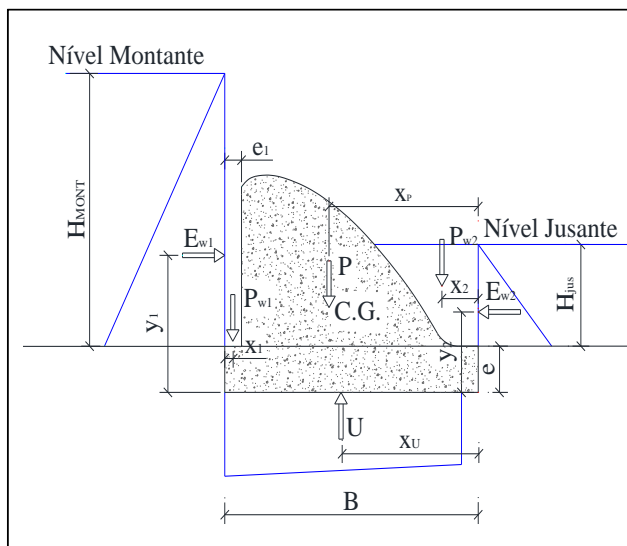


Figura 16 – Carregamentos atuantes no vertedouro em perfil Creager

quais sejam:

Tabela 8 – Critérios de estabilidade externa para vertedouros em concreto (Eletrobrás, 2003)

Critério	CCN	CCE
Flutuação	1,3	1,1
Tombamento	1,5	1,2
Deslizamento		
- Coesão	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)
- Atrio	1,5 (2,0)	1,1 (1,3)
Capacidade de Carga da Fundação	3,0 (4,0)	1,5 (2,0)

5.4. Análise de fluxo na fundação do vertedouro

De forma a se determinar a vazão de percolação, e a distribuição de poro-pressões no maciço do vertedoutor foi realizada uma análise de fluxo para as duas condições de carregamento consideradas (CCN e CCE), e as duas alternativas de projeto descritas anteriormente.

Para o maciço de fundação foi considerada a descrição feita anteriormente, e os coeficientes de permeabilidade obtidos nos estudos geotécnicos realizados quando da elaboração do projeto executivo original da Barragem de Itapebussu. A análise de fluxo foi considerada estacionária, para as condições de carregamento consideradas, e o material considerado isotrópico, sendo utilizado o Método dos Elementos Finitos para a resolução das equações constitutivas e obtenção dos resultados.

Entre a Figura 17 e a Figura 24 são mostradas as redes de fluxo, e as curvas de distribuição de poropressões na base dos vertedoutoros para cada uma das alternativas de projeto, e condições de carregamento consideradas.

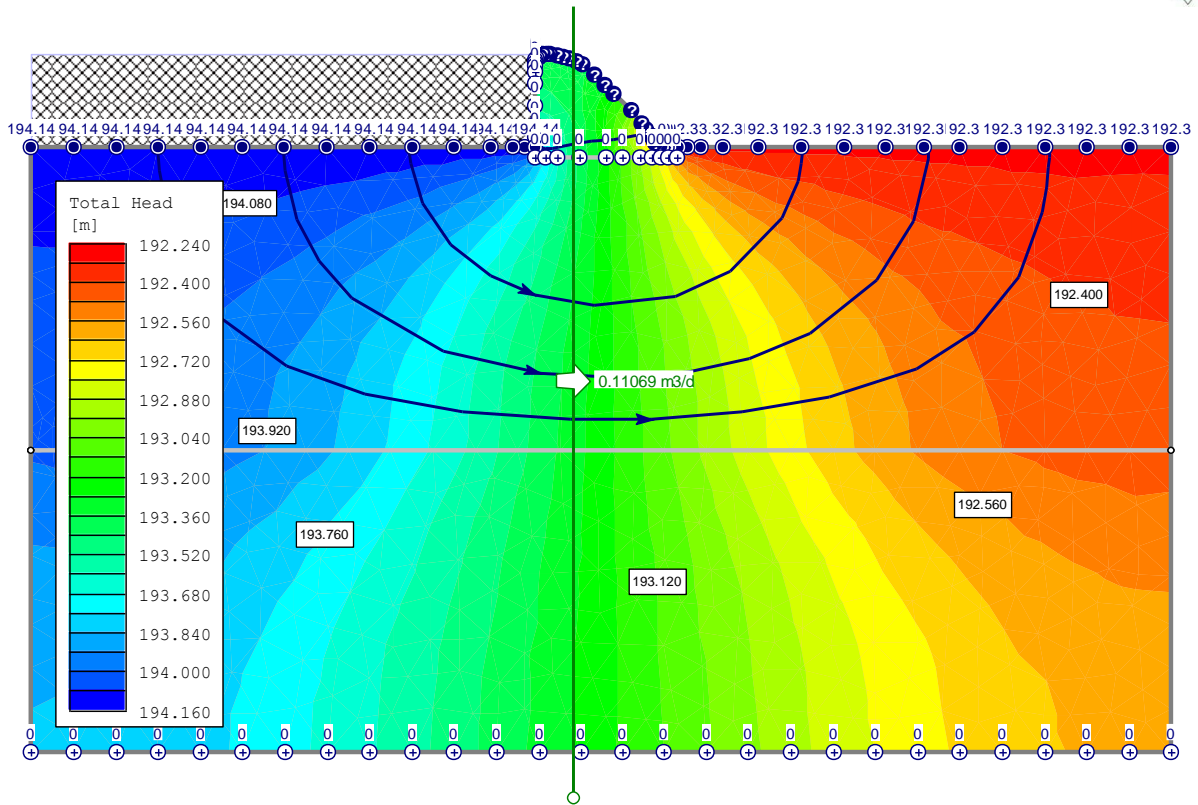


Figura 17 – Rede de Fluxo para o vertedouro considerado na Alternativa 1 na CCN

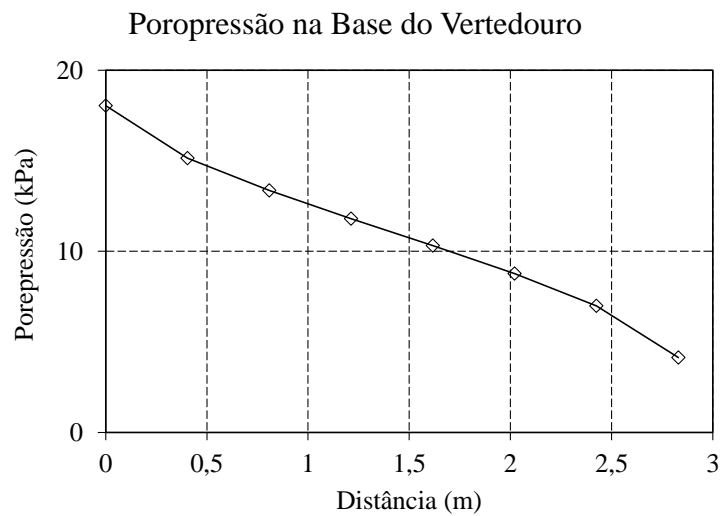


Figura 18 – Variação das poropressões na base do vertedouro considerado na Alternativa 1 na CCN

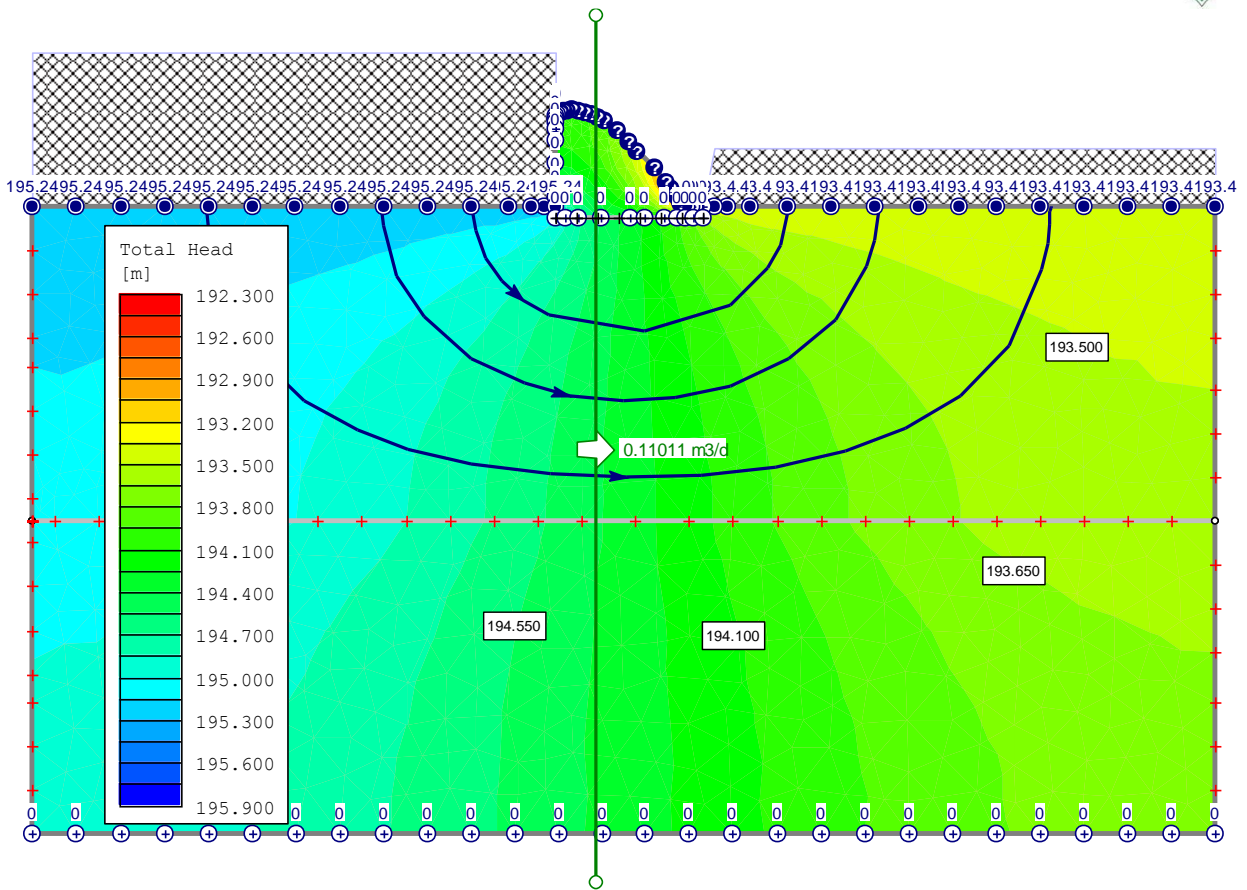


Figura 19 – Rede de Fluxo para o vertedouro considerado na Alternativa 1 na CCE

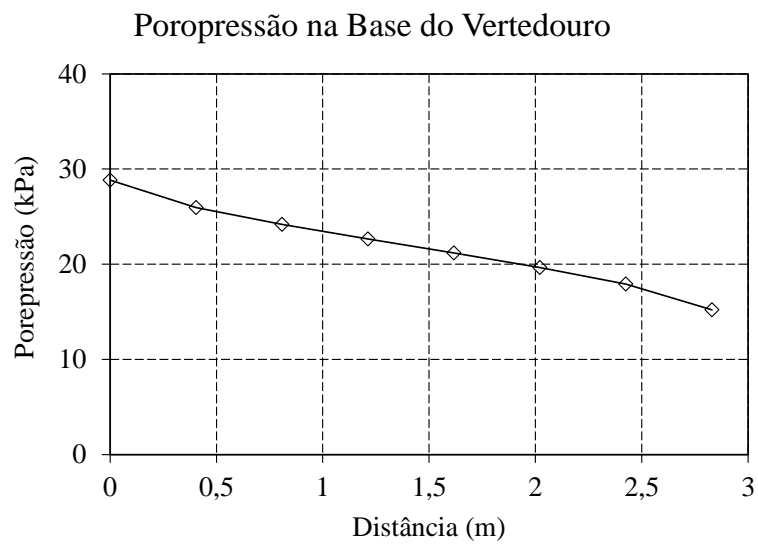


Figura 20 – Variação das poropressões na base do vertedouro considerado na Alternativa 1 na CCE

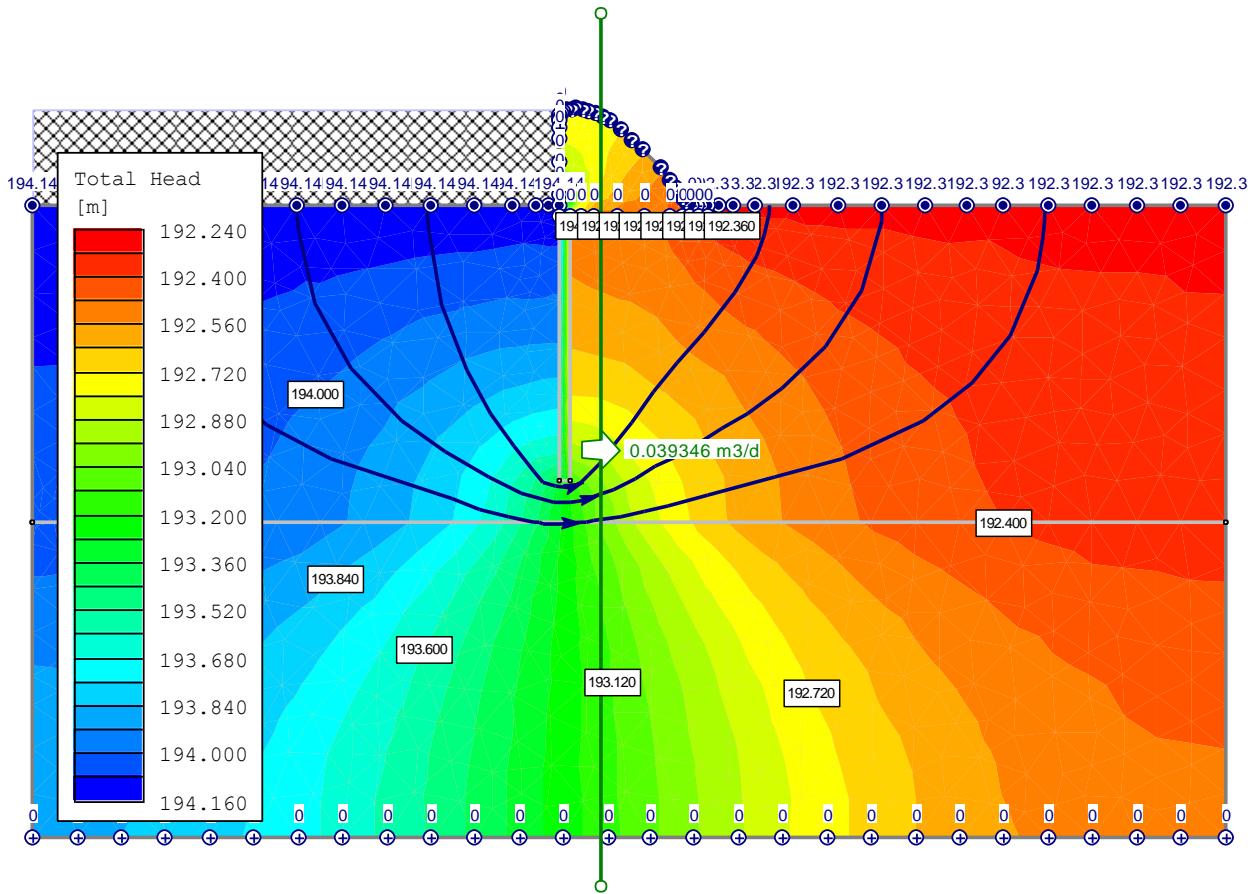


Figura 21 – Rede de Fluxo para o vertedouro considerado na Alternativa 2 na CCN

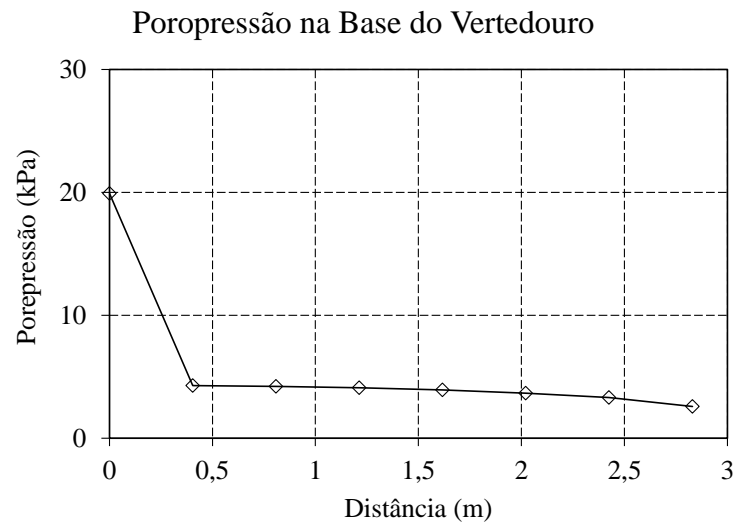


Figura 22 – Variação das poropressões na base do vertedouro considerado na Alternativa 2 na CCN

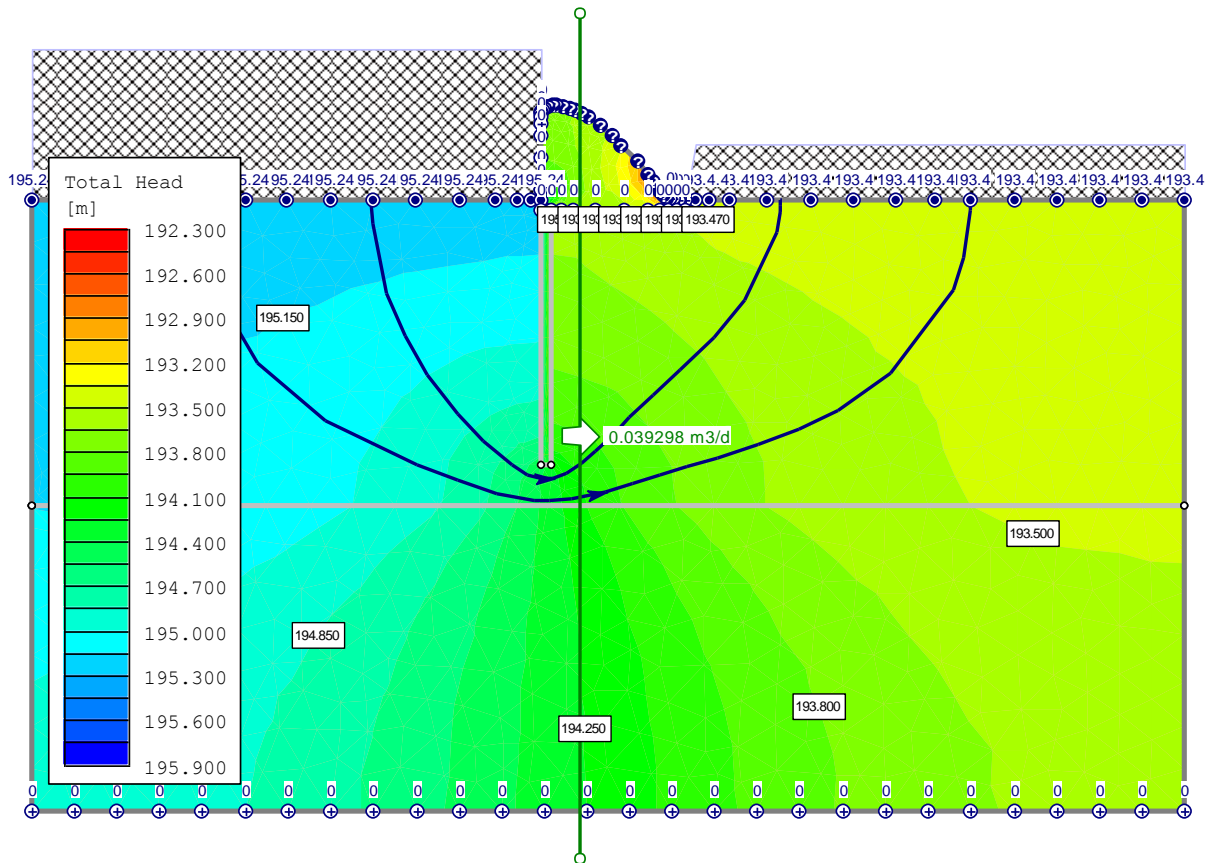


Figura 23 – Rede de Fluxo para o vertedouro considerado na Alternativa 2 na CCE

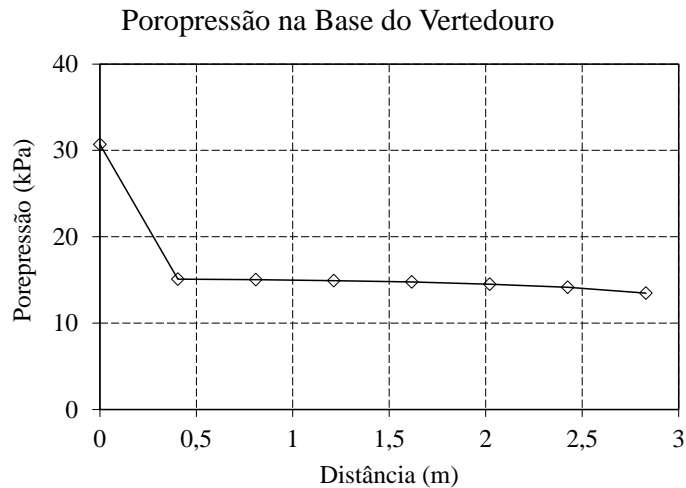


Figura 24 – Variação das poropressões na base do vertedouro considerado na Alternativa 2 na CCE

A Tabela 9 mostra o resumo dos resultados para o valor da subpressão atuante na base do vertedouro, e a vazão que percola pelo maciço de fundação para as alternativas de projeto e condições de cargas hidrostáticas consideradas. Observa-se que a consideração da injeção de cimento a montante do vertedouro provoca uma redução significativa da vazão de percolação, e principalmente, da subpressão atuante.

Tabela 9 – Resumo dos parâmetros avaliados nas análises de fluxo do vertedouro

Parâmetros	Alternativa 1 – Sem Injeção		Alternativa 2 – Com Injeção	
	CCN	CCE	CCN	CCE
Subpressão – U (kN/m)	31,31	62,10	14,14	44,69
Vazão - Q (l/s/m)	110	110	39	39

5.5. Análise das condições de estabilidade externa do vertedouro

No Apêndice 1 é apresentada toda a memória de cálculo dos fatores de segurança representativos dos critérios de estabilidade de flutuação, tombamento, deslizamento e capacidade de carga da fundação para as alternativas de projeto, e condições de carregamento consideradas.

A Tabela 10 apresenta os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade externa para as alternativas de projeto e condições de carregamento consideradas. Observa-se que para a Alternativa 1 – a qual não foi considerada as injeções de cimento no maciço rochoso de fundação – não foram atendidos os critérios que constam na Tabela 8 para os critérios de deslizamento e tensão normal mínima atuante na fundação. Desta forma, a alternativa a ser adotada é a Alternativa 2, a qual considera a execução de uma linha de injeção a montante do vertedouro, com o objetivo de se diminuir as vazões que percolam pela fundação e as subpressões atuantes.

Tabela 10 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade externa do vertedouro

Critério	Alternativa 1		Alternativa 2	
	CCN	CCE	CCN	CCE
Flutuação	3,83	1,63	15,67	2,42
Tombamento	1,67	1,15	2,34	1,43
Deslizamento	1,94	1,02	2,45	1,54
Capacidade de Carga da Fundação	4,61	6,17	4,24	5,51
Tensão normal mínima na fundação	> 0	< 0	> 0	> 0

**RECOMENDAÇÃO E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PARA TRATAMENTO DA
FUNDAÇÃO DO VERTEDOURO E DOS TALUDES DOS CANAIS DE APROXIMAÇÃO
E RESTITUIÇÃO**

.....

6. Recomendação e especificações técnicas para tratamento da fundação do vertedouro e dos taludes dos canais de aproximação e restituição

A partir das condições de fundação descritas no projeto executivo e recomenda-se o seguinte tratamento de fundação para o vertedouro:

- a) Remoção total do vertedouro existente;
- b) Escavação com profundidade de 0,2 m e regularização da superfície da fundação, seguida por limpeza com jato de ar e água e preenchimento das irregularidades com calda de cimento, argamassa ou concreto dental;
- c) Execução de uma cortina de injeções de impermeabilização no maciço de fundação, a montante e imediatamente abaixo do início da seção do vertedouro (conforme detalhamento no projeto executivo) com o objetivo de eliminar, ou diminuir a percolação por baixo do vertedouro, evitando assim, eventuais problemas de estabilidade externa devido à ação de elevadas subpressões de água no contato fundação – vertedouro.

A cortina de injeções proposta poderá ser iniciada com os furos primários de 5,0 m de profundidade, espaçados a cada 6,0 m, seguida por furos secundários adjacentes com 3,0 m de profundidade e espaçados a cada 6,0 m, e prosseguir fechando o espaçamento nos pontos onde os ensaios de perda de água e absorção de cimento recomendarem. Recomenda-se que os serviços de injeção sejam executados de acordo com os seguintes procedimentos e especificações:

- a) Execução e injeção de dois furos rotativos exploratórios espaçados de 45 m, com retirada de testemunhos e ensaios de perda d'água em trechos de 3,0 m e com profundidade de 3,0 m abaixo do limite previsto para o tratamento.
- b) Execução e injeção de furos primários espaçados a cada 6,0 m;
- c) Análise dos resultados de consumo de cimento nos furos primários e definição dos locais com necessidade de furos secundários.
- d) Execução e injeção dos furos secundários adjacentes aos furos primários com maiores consumos de cimento;
- e) Análise das execução e injeção de furos secundários: caso algum furo secundário apresente consumos de cimento considerados grandes, deverá ser avaliada a necessidade de reforço do tratamento com furos terciários.
- f) Os furos serão executados a partir do topo rochoso, após a remoção do vertedouro existente e limpeza superficial com jato de ar e água limpa;
- g) O trecho a ser injetado será perfurado com perfuratriz rotativa e o furo deverá ter um diâmetro mínimo de 2 1/2”;
- h) O furo será executado em toda a sua profundidade prevista, para posterior injeção, pelo processo ascendente: caso se mostre inviável a obturação devido às características da rocha (fraturada, alterada, etc), a injeção deverá ser descendente;
- i) Imediatamente antes da injeção, o furo deverá ser lavado com jatos de ar ou água limpa até que a água de lavagem saia isenta de impurezas perceptíveis por meios visuais ou táteis;
- j) A pressão manométrica de injeção a ser aplicada será $P = 0,25H$, sendo “P” a pressão em kgf/cm^2 e “H” a profundidade em metros, contada da boca do furo até a posição do obturador.

Após os primeiros resultados poderá ser estudada a conveniência ou não de alterar a pressão de injeção.

- k) As dosagens da calda de cimento e água será dada pela reação água:cimento de 0,7:1 (fator de sedimentação 95%) em peso, ou mesmo calda 1:1 com adição de 1% de bentonita (fator de sedimentação 90%)

Nos trechos da calha do vertedouro, correspondentes ao canal de aproximação e de fuga, ou seja, à montante e à jusante do vertedouro, recomenda-se um tratamento superficial, com a remoção da vegetação e do solo, remoção dos blocos soltos, em seguida, regularização da superfície com concreto dental.

No contato do vertedouro com o maciço rochoso na ombreira esquerda, recomenda-se a execução de um muro de concreto com 0,50 m de espessura e extensão de 50,00 m para montante e para jusante.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

.....

7. Conclusões e recomendações gerais

As análises de fluxo e estabilidade de taludes, mostraram que, para as condições e hipóteses consideradas a respeito dos parâmetros geotécnicos dos materiais, e geometria da seção, que a barragem apresenta condições de estabilidade satisfatória, expressas pelos fatores de segurança apresentados na Tabela 11 para a sua seção de máxima altura.

Tabela 11 – Resumo das análises de estabilidade da barragem

Análise	Talude de montante	Talude de jusante
Análise 1 – Escavação superficial da barragem existente	-	1,55
Análise 2 – Final de construção	3,41	1,46
Análise 3 – Regime de operação – rede de fluxo em regime	-	1,77
Análise 4 – Rebaixamento rápido	2,07	

Os resultados obtidos e apresentados na Tabela 11 podem ser estendidos às demais seções, uma vez que a situação analisada no presente relatório corresponde à situação mais crítica em termos de fluxo e estabilidade de taludes.

Em virtude de se tratar de um projeto de ampliação, recomenda-se que sejam previstos alguns dispositivos de instrumentação para monitoramento do comportamento da barragem. A instalação de e piezômetros (PZ) é recomendada afim de acompanhar o desempenho do sistema de drenagem interna e aferir os resultados das análises realizadas. Neste caso, recomenda-se a instalação desses dispositivos à montante e à jusante do filtro vertical, conforme ilustrado no croqui apresentado na Figura 25.

As medidas dos níveis de água nestes dispositivos (PZ) devem ser realizadas periodicamente, no mínimo uma leitura, a cada quinze dias. Em períodos chuvosos, a frequência de leitura deve ser aumentada, para uma leitura por semana. As informações levantadas nestas leituras devem ser devidamente enviadas ao projetista para interpretação, e avaliação das análises feitas para o projeto.

A Tabela 12 apresenta os fatores de segurança referentes aos critérios de estabilidade externa da solução adotada para o vertedouro em perfil Creager, qual seja, perfil com altura total de 1,84 m, sobre uma laje de concreto simples de 0,2 m de espessura e 2,83 m de largura, assente diretamente sobre o maciço rochoso de fundação, com a execução de uma linha de injeções de cimento primária de 5,0 m de profundidade, a cada 6,0 m, e furos secundários com profundidade de 4,0 m, espaçados a cada 6,0 m.

Tabela 12 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade externa para a solução adotada para o vertedouro

Critérios de Estabilidade	CCN	CCE
Flutuação	15,67	2,42
Tombamento	2,34	1,43
Deslizamento	2,45	1,54
Capacidade de Carga da Fundação	4,24	5,51



Tensão normal mínima na fundação	> 0	> 0
----------------------------------	-----	-----

SEÇÃO TRANSVERSAL MODIFICADA- ESTACA 7 + 0,00

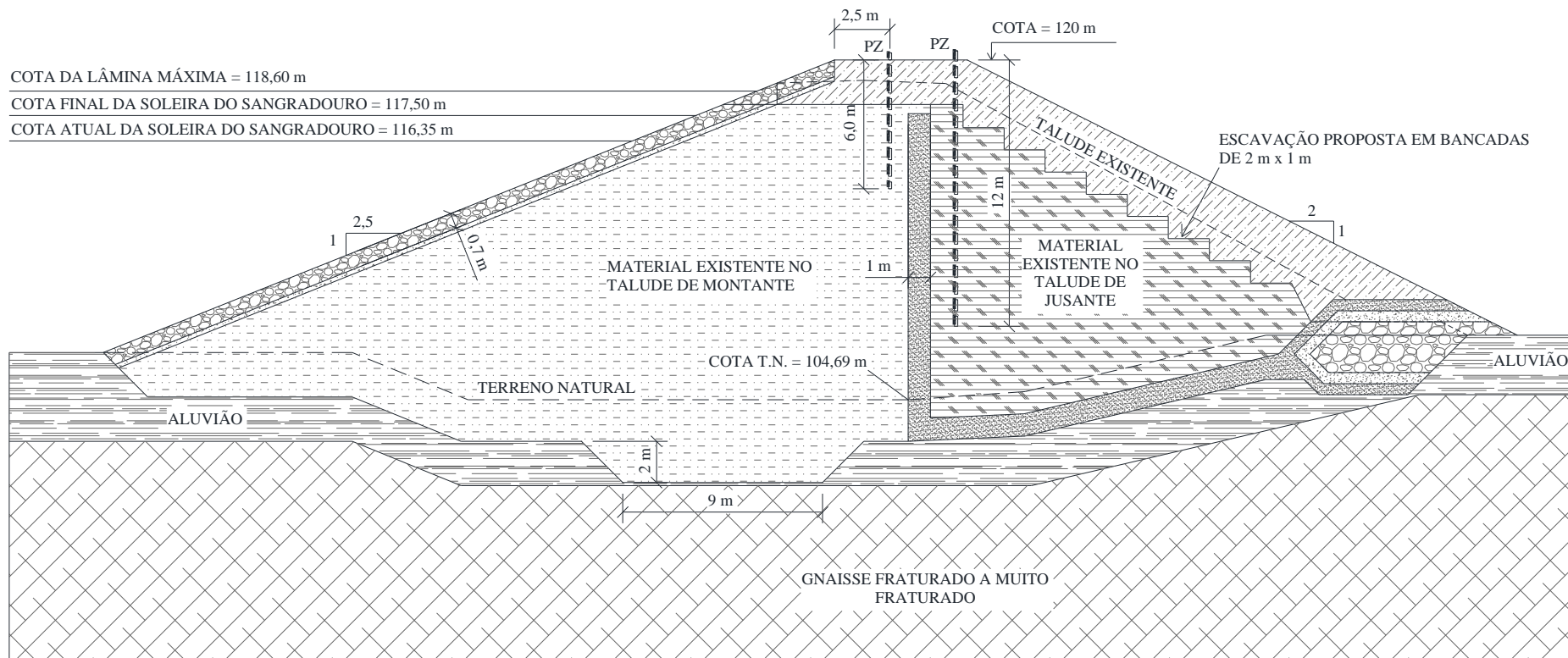


Figura 25 – Sugestão de instrumentação na Estaca 7 + 0,00



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

.....

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, A.P., HERNANDEZ, H.M. & COLMANETTI, J.P. (2002). Apostila de Barragens. G.AP-AA006/02. Universidade de Brasília, Brasília-DF, 170p.
- CORPS OF ENGINEERS (1970). Engineering and Design – Stability of Earth and Rock Fill Dams, Engineering Manual, EM 1110-2-1902. Department of the U.S. Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers.
- CRUZ, P.T. (1996). 100 Barragens Brasileiras – Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 647p.
- DAS, B.M. (2005). Fundamentals of Geotechnical Engineering. 2ª Edição. Ed. Thompson. Canadá, 566p.
- ELETOBRÁS (2003). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Disponível em: <http://www.eletobras.com/ELB/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>. Acesso em: 29/06/2015.
- GERSCOVICH, D.M. (2012). Estabilidade de Taludes. 1ª Edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 166p.
- OLIVEIRA, S.A.M. & Brito, S.N.A. Geologia de Engenharia. 1998. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.
- PINTO, C.S. (2002). Curso Básico de Mecânica dos Solos. 2ª Edição. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, SP, Brasil. 355p.
- U.S ARMY CORPS OF ENGINEER (2003). Slope Stability Manual.Engineering and design. 31 Oct.2003. <<http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals>>. Acesso em setembro de 2013.
- TEIXEIRA, A.H. Projeto e execução de fundações. SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 3., 1996, São Paulo. Anais... São Paulo, 1996. V.1. p. 33-50.
- VIEIRA, V.P.P.B; GOUVEIA NETO, A.; MIRANDA, A.N. de; MALVEIRA, V.T.C. (1996). Roteiro para Projeto de Pequenos Açudes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Ceará, Brasil.



ANEXOS

.....

9. Anexos



ANEXO 1 – RELATÓRIO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO



ANEXO 2 – RESULTADOS DAS SONDAGENS E ENSAIOS DE PERMEABILIDADE IN SITU



APÊNDICES

.....



10. Apêndices



APÊNDICE 1 – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO VERTEDOIRO CONSIDERADO COMO ALTERNATIVA 1



APÊNDICE 2 – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO VERTEDOIRO CONSIDERADO COMO ALTERNATIVA 2



APÊNDICE 3 – JAZIDA DE SOLO 06, CONSIDERAÇÕES E ANÁLISES DE MATERIAL

Conforme solicitação realizada em relatório de viagem, encaminhado a nós via ofício COINF nº 112/2015, foi identificada outra jazida de solo, que aqui chamamos de JS-06.

A JS-06, apesar de não ter sido estudada no projeto original elaborado pela ANB em 1998, foi utilizada na construção da barragem.

Nesta jazida foram realizadas sondagem a pá e picareta e análises laboratoriais, tendo sido verificado que a quantidade de material disponível atende às necessidades do projeto, contudo a utilização deste material requer a realização de ensaios mais específicos.

Considerações sobre as análises realizadas nas JS-03 e JS-06:

1. Informações em relação ao material considerado nas análises realizadas para o alteamento da barragem:

O material considerado no projeto foi aquele existente na Jazida 03, assim denominada no projeto executivo original da barragem. Este material foi classificado segundo os critérios do SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), como um SC (areia argilosa).

Para a realização das análises de fluxo e estabilidade de taludes foram realizados ensaios de permeabilidade a nível variável e ensaios de compressão triaxial do tipo CU para definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensões totais e tensões efetivas.

As análises em termos de tensões totais são aquelas feitas para as condições de final de construção e rebaixamento rápido. As análises em termos de tensões efetivas são aquelas realizadas para a condição de operação da barragem em regime permanente.

2. Informações enviadas referentes ao material da Jazida 06, sugerida pela SRH:

De acordo com o relatório de geotecnia, foram ensaiadas duas amostras: a Amostra 03, é classificada como um SC (areia argilosa), com coeficiente de permeabilidade igual a $4,4 \times 10^{-6}$ cm/s, sendo mais permeável, portanto, que o material considerado da Jazida 03 utilizada nas análises do projeto; a Amostra 05 é classificada como uma CL (argila de alta compressibilidade), com coeficiente de permeabilidade igual a $6,2 \times 10^{-7}$ cm/s, ou seja, com permeabilidade equivalente àquela obtida para o material da Jazida 03 utilizada nas análises anteriores do projeto.

Não foram realizados ensaios para a definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais.

Assim, de acordo com estas informações apresentadas, pode-se adiantar as seguintes conclusões:

1. As análises de fluxo mostraram, que a grande maioria do fluxo de água na estrutura da barragem após o alteamento ocorre no aterro existente, com o filtro e drenos internos trabalhando. Assim, não é necessário a utilização de um material, que a princípio fosse mais argiloso, e que apresentasse um menor coeficiente de permeabilidade. Assim, mesmo que o material da Jazida 06 apresente um coeficiente de permeabilidade inferior ao da Jazida 03, a sua utilização se justifica, já que este material não teria a função de estancar o fluxo de água através da barragem;

2. O material da Jazida 06 não apresenta características que o torne mais impermeável que o material da Jazida 03 considerada nas análises apresentadas anteriormente.

3. Em termos de desempenho, o material da Jazida 06 pode vir a se tornar pior que o material da Jazida 03 no que se refere à análise de estabilidade na condição de final de construção, e rebaixamento. Nestas fases de projeto, a análise de estabilidade deve ser realizada com os valores dos parâmetros de resistência obtidos em termos de tensões totais no ensaio triaxial do tipo CU. Isto significa, que a resistência do material muda devido à geração de poro-pressões no solo com o

carregamento, e quanto mais argiloso for o material, pior será seu comportamento. Assim, espera-se que ao se analisar um material classificado como CL (argila de alta compressibilidade) nas situações de final de construção e rebaixamento rápido, se obtenha uma resposta final pior que quando da utilização de uma material classificado como SC (Jazida 03 considerada nas análises anteriores). Assim, a menos que sejam realizados ensaios triaxial do tipo CU nas amostras da Jazida 06, não é recomendável a troca do material, uma vez que este material da Jazida 06 pode levar a uma condições de estabilidade pior que o material da Jazida 03, nas análises de estabilidade para as condições de final de construção e rebaixamento rápido.