CESAN
qualidade em saneamento



CONTRATO 0190/2022
OF Nº E-GPJ-016-001-2022

MUNICÍPIO DE DOMINGOS MARTINS

IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM DOS IMIGRANTES DO RIO JUCU

PROJETO HIDRÁULICO

DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS - MEMÓRIA DE CÁLCULO

A-062-000-00-5-MC-0001

Interteche CONSULTORES S.A.

Julho / 2023

IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM DOS IMIGRANTES DO RIO JUCU
PROJETO HIDRÁULICO
DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS - MEMÓRIA DE CÁLCULO

Nº	Descrição	Prep.	Aprov.	Data
1	ALTERAÇÃO DE CÓDIGO	JPA	RM	JUL/23
0	VERSÃO APROVADA	MLN	RM	MAR/23
C	REVISÃO DO PROJETO REFERENTE AO TÚNEL DE DESVIO	MLN	RM	FEV/23
B	INCLUSÃO DO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO DESVIO DO RIO	MLN	RG	JAN/23
A	EMISSÃO INICIAL	MLN/ES	RG	DEZ/22

REVISÕES

Intertechne CONSULTORES S.A.

CESAN
qualidade em saneamento

BARRAGEM DOS IMIGRANTES DO RIO JUCU
PROJETO BÁSICO

Elaborado por	MLN/ES	Monica Carvalho Gerente do Projeto
Verificado por	RG	
Supervisor	RM	José F. Pinheiro Machado
Data	DEZ/22	Resp. Técnico CREA PR 20532/D

CÓDIGO INTERTECHNE	Rev.
22AL-BI-4-GE-G00-00-C-13-MC-0001	1

CÓDIGO DO CLIENTE	Rev.
A-062-000-00-5-MC-0001	1

JOSE FRANCO PINHEIRO MACHADO:56752890978
Assinado de forma digital por JOSE FRANCO PINHEIRO MACHADO:56752890978
Dados: 2023.07.20 09:18:20 -03'00'

IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM DOS IMIGRANTES DO RIO JUCU
PROJETO HIDRÁULICO
DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS - MEMÓRIA DE CÁLCULO

ÍNDICE

1. OBJETIVO 1
2. ESTUDOS HIDROLÓGICOS 1
   2.1. REVISÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS 1
   2.2. REVISÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS SAZONAIS 4
   2.3. VAZÕES MÉDIAS MENSAIS 5
3. CURVA-CHAVE DE JUSANTE 5
4. VERTEDOURO 8
   4.1. GEOMETRIA DO VERTEDOURO 8
   4.2. CAPACIDADE DE DESCARGA 9
   4.3. CALHA DO VERTEDOURO 11
   4.4. BACIA DE DISSIPAÇÃO 14
5. DESVIO DO RIO 19
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 23

IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM DOS IMIGRANTES DO RIO JUCU
PROJETO HIDRÁULICO
DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS - MEMÓRIA DE CÁLCULO

1. OBJETIVO

O presente documento tem por objetivo apresentar a revisão dos estudos hidrológicos (referente às vazões máximas anuais e sazonais), os critérios e cálculos referentes ao dimensionamento hidráulico do vertedouro e do túnel de desvio e a definição das cotas de proteção das estruturas principais da Barragem dos Imigrantes, localizada no Rio Jucu Braço Norte, Estado do Espírito Santo.

2. ESTUDOS HIDROLÓGICOS

2.1. REVISÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS

Os estudos de vazões máximas anuais, desenvolvidos na presente fase e em etapas anteriores, tiveram como base principal os registros médios diários da estação fluviométrica Córrego do Galo, cuja área de drenagem representa 86% da área de drenagem da Barragem dos Imigrantes. Nessa estação tem-se que a maior cheia registrada ocorreu em 1960, e a sua consideração nas análises influencia de forma direta e significativa os resultados obtidos.

Nas análises efetuadas em dezembro de 2020, os dados então obtidos do HidroWeb, o portal de dados da ANA, compreendiam registros de cotas com início em abril de 1955 até a data presente, estando os mesmos consistidos até o fim do ano de 2014. A série de vazões obtida na ocasião compreendia o mesmo período de cotas e foi calculada a partir de uma gama de 8 conjuntos de curvas de descarga com validades para diferentes períodos a partir de outubro de 1955. Em relação às medições de descarga, a mais antiga datava de maio de 1969 e a mais recente de janeiro de 2020, totalizando 222 medições. A vazão média diária máxima então apresentada para a cheia de 1960, correspondia a 527,6 m³/s (cota 500 cm); já para a cheia de 1956/1957, que apresenta a segunda maior cota do histórico, a vazão então estimada foi de 180,4 m³/s (cota 350 cm).

Para a presente análise, uma nova consulta aos dados da estação Córrego do Galo foi efetuada junto ao Hidroweb. Nessa fase, verificou-se a disponibilização da mesma série de cotas disponível em dezembro de 2020, apenas com a complementação do período mais recente, estando os dados da cheia de 1960 constando ainda como consistidos. Já quanto às vazões, o Hidroweb as disponibiliza agora apenas para o período posterior a maio de 1969, sendo que a curva de descarga com validade mais antiga, antes apresentada, teve data inicial alterada de abril de 1955 para maio de 1969, e seu tramo para cotas superiores a 330 cm foi excluído. As demais curvas agora apresentadas para os diferentes períodos, não apresentam diferenças significativas entre elas, tendo aqui sido consideradas a partir de uma única equação.

Desse cenário, conclui-se que em março de 1960 houve no rio Jucu, bem como em dezembro de 1957, cheias bastante severas, para as quais não se têm conhecimento

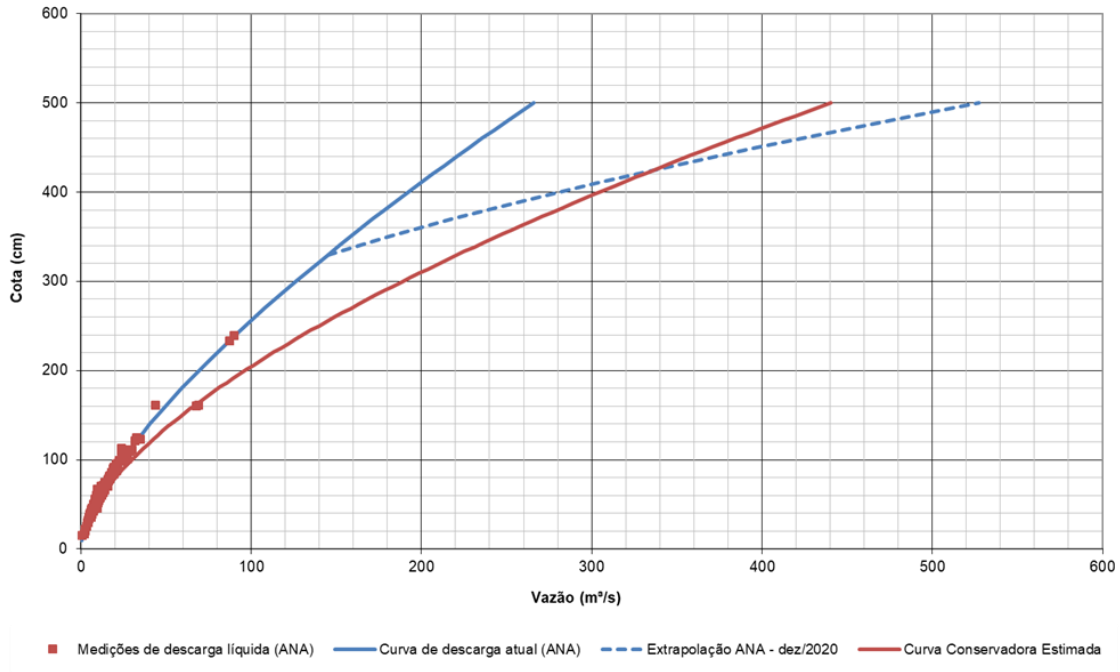
do valor real. A antiguidade dos registros, bem como a ausência de medições efetuadas na época, dificulta a estimativa da magnitude destes eventos de forma mais assertiva.

Assim, na atual fase dos estudos, decidiu-se por uma análise de sensibilidade quanto a magnitude dessa cheia e sua influência nas vazões esperadas na seção da Barragem dos Imigrantes nos diferentes tempos de recorrência. Os cenários considerados foram:

1. Atual série de vazões médias diárias disponibilizada pelo HidroWeb (a partir de maio de 1969);
2. Série a partir de abril de 1955, com vazões do período anterior a maio de 1969 calculadas com a curva de descarga atualmente disponibilizada pelo Hidroweb (aqui considerada uma curva única); e
3. Série a partir de abril de 1955, com vazões do período anterior a maio de 1969 calculadas com a curva de descarga estimada a partir das medições de descarga mais baixas, considerada aqui como um cenário conservador.

A Figura 2-1 apresenta as medições de descarga existentes, a curva atual adotada pela ANA, a extrapolação disponível em dezembro de 2020 e a curva conservadora estimada.

Figura 2-1 – Estação Córrego do Galo – Curvas de Descarga



Das séries de vazões médias diárias obtidas para os diferentes cenários foram obtidas as correspondentes séries de vazões médias diárias máximas anuais e a essas foram ajustadas as distribuições de frequência de Gumbel ou Exponencial, conforme indicação do coeficiente de assimetria.

A Tabela 2-1 apresenta as estatísticas das séries e a Tabela 2-2 apresenta as vazões máximas obtidas para os diferentes tempos de recorrência.

Tabela 2-1 – Estatísticas das Séries de Vazões Médias Diárias Máximas Anuais – Estação Córrego do Galo – Diferentes Cenários

Parâmetro	Série Atual ANA (Cenário 1)	Série Estendida	
		Curva Atual ANA (Cenário 2)	Curva Estimada (Cenário 3)
Média (m³/s)	71,09	71,81	79,15
D. Padrão (m³/s)	28,70	38,65	57,70
C. Assim.	1,23	2,49	4,35
Máximo (m³/s)	160,63	265,94	440,41
N	51	65	65

Tabela 2-2 – Vazões Médias Diárias Máximas Anuais (m³/s) – Estação Córrego do Galo – Diferentes Cenários

TR (anos)	Série Atual ANA (Cenário 1)	Série Estendida	
		Curva Atual ANA (Cenário 2)	Curva Estimada (Cenário 3)
5	92	95	121
10	109	122	154
25	130	158	197
50	145	184	229
100	161	211	260
500	197	273	333
1.000	213	300	364
10.000	264	389	468

Os resultados obtidos do Cenário 1 consideram apenas as vazões atualmente disponibilizadas no Hidroweb, as quais não englobam as vazões correspondentes as duas maiores cheias registradas no histórico de cotas: 1960 e 1956. Os Cenários 2 e 3 estimam as vazões desses eventos, porém trazem em si um considerável grau de incerteza quanto à magnitude dos mesmos, uma vez que não há medições efetuadas e curvas de descarga definidas para o período. Esses dois cenários buscam representar um cenário mais otimista (Cenário 2) e um cenário mais conservador (Cenário 3), sendo que para esse último foi estimada para 1960 vazão ainda menor que a disponibilizada pela ANA em dezembro de 2020 e retirada na sequência.

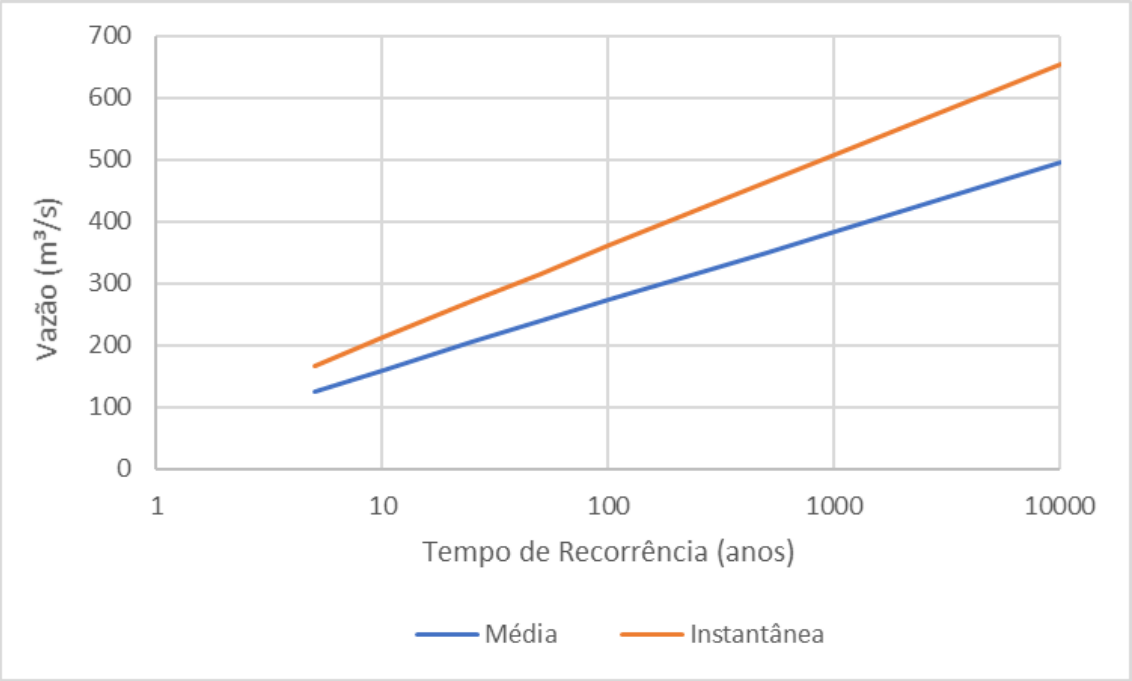
Assim, visando um maior nível de garantia para a estrutura de vertimento da Barragem dos Imigrantes, decidiu-se pela adoção, para a estação Córrego do Galo, do valor médio entre os resultados dos Cenários 2 e 3. Os resultados assim obtidos foram transferidos para a seção da Barragem dos Imigrantes por relação entre áreas de drenagem, e a eles foi aplicada a equação de Fuller para a estimativa das vazões máximas instantâneas.

Esses resultados são apresentados na Tabela 2-3 e na Figura 2-2.

Tabela 2-3 – Vazões Diárias Máximas Anuais – Barragem dos Imigrantes

TR (anos)	Vazão (m³/s)	
	Média	Instantânea
5	125	165
10	160	211
25	205	271
50	239	316
100	272	360
500	350	463
1.000	384	507
10.000	495	655

Figura 2-2 – Vazões Diárias Máximas Anuais – Barragem dos Imigrantes



2.2. REVISÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS SAZONAIS

Visando subsidiar o dimensionamento das estruturas da etapa de desvio, foram determinadas as vazões máximas dos períodos correspondente aos 4 meses mais secos (junho a setembro) e aos 6 meses mais secos (maio a outubro). A metodologia adotada foi a mesma considerada para a determinação das vazões máximas anuais, ou seja, a média dos resultados dos Cenários 2 e 3, e posterior transferência para a seção do barramento com aplicação da equação de Fuller para a estimativa das vazões máximas instantâneas.

Esses resultados são apresentados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 – Vazões Diárias Máximas Sazonais – Barragem dos Imigrantes

TR (anos)	Vazão (m³/s)	
	4 Meses (jun a set)	6 Meses (mai a out)
5	37	49
10	48	63
25	63	82
50	74	96
100	85	110

2.3. VAZÕES MÉDIAS MENSAIS

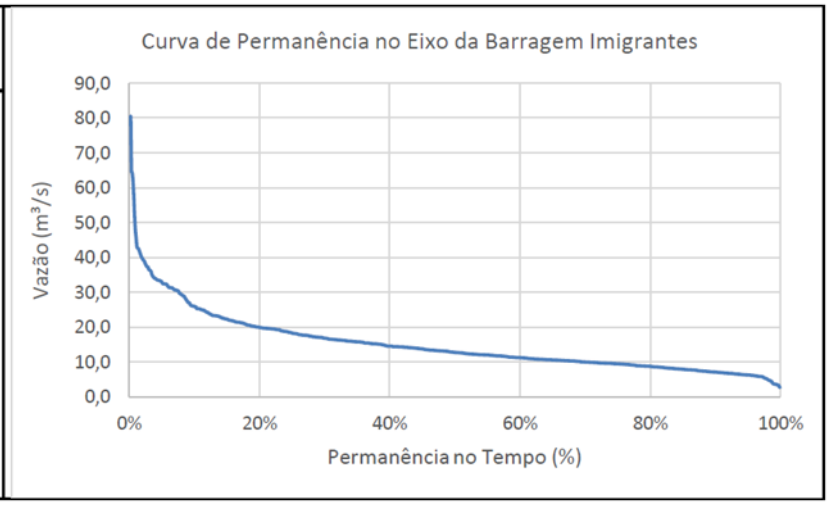
A determinação da série de vazões médias mensais é apresentada no relatório A-062-000-00-0-RT-0080-0A (realizado pela empresa POENTE Engenharia e Consultoria), referente ao antigo projeto básico realizado em 2018. A metodologia para sua obtenção e resultado obtido podem ser considerados satisfatoriamente representativos do regime de vazões médias junto ao local da Barragem dos Imigrantes.

As diferenças quanto a curva de descarga adotada para a obtenção das vazões na estação Córrego do Galo, por se concentrarem no tramo alto dessa relação, não afetaram de maneira significativa a obtenção das vazões médias mensais.

A curva de permanência de vazões médias mensais para a Barragem dos Imigrantes está apresentada na Figura 2-3

Figura 2-3 – Curva de Permanência no Eixo da Barragem dos Imigrantes

Permanência (%)	Vazão (m³/s)
5%	33,2
10%	26,0
20%	20,0
25%	18,4
30%	16,9
40%	14,6
50%	12,8
60%	11,3
70%	10,0
80%	8,8
90%	7,1
95%	6,3



Fonte: A-062-000-00-0-RT-0080-0A

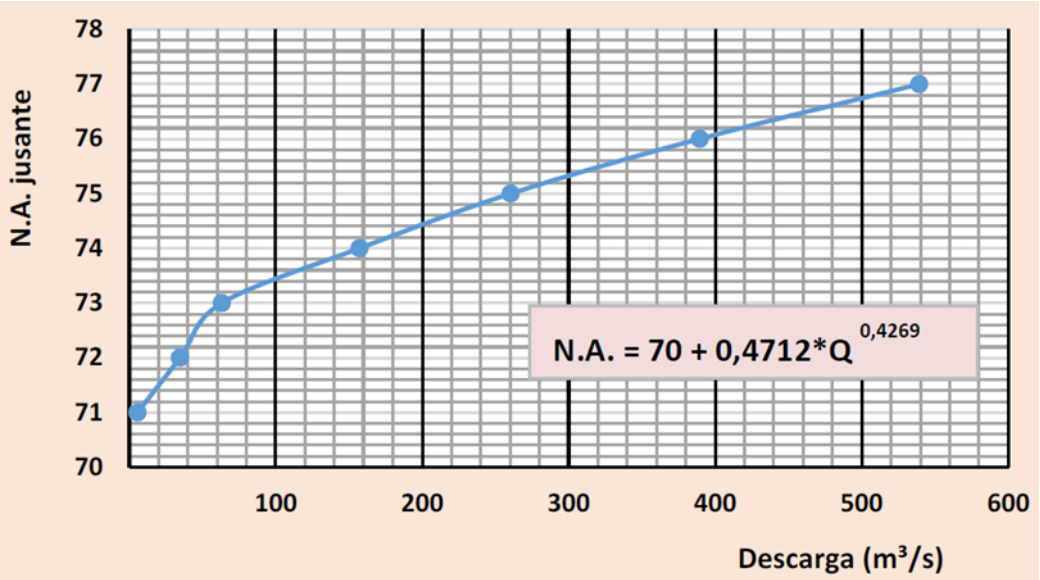
Verifica-se que a vazão firme natural do rio (vazão com 5% de risco de indisponibilidade) é de 6,3 m³/s.

3. CURVA-CHAVE DE JUSANTE

A metodologia para a obtenção dos níveis de jusante está apresentada no documento E-062-00-00-5-MC-0002-3 (realizado pela empresa POENTE Engenharia e Consultoria), referente ao projeto hidráulico do vertedouro, emitido em junho de 2021. Os níveis de jusante foram obtidos por meio da determinação da vazão escoada em uma seção do rio utilizando a expressão de Manning e admitindo-se uma declividade da

linha de energia de 0,1% e um coeficiente de Manning de 0,035. O resultado obtido está apresentado na Figura 3-1

Figura 3-1 – Curva Chave a Jusante - Barragem dos Imigrantes



Deve-se comentar que este é um método aproximado e caso se variem os parâmetros de declividade e de rugosidade, pode-se obter diversos valores de níveis de jusante. O procedimento também parte da premissa de que o regime é uniforme, o que implica na existência da mesma seção transversal do escoamento ao longo do rio, o que não é compatível com as condições naturais do rio. A definição dos níveis a jusante deve ser necessariamente baseada em levantamentos de campo consistido na instalação de régua liminimétrica, medições de perfis de linha de água e medições diretas de vazão cobrindo ao menos um período hidrológico completo.

Nesse sentido, a especificação técnica apresentada no documento 22AL-BI-4-GE-G00-00-C-13-ET-0001 / A-062-000-00-0-ET-0011, solicita os serviços de levantamentos hidrométricos a serem realizados para o empreendimento Barragem dos Imigrantes com a finalidade da definição dos níveis de água de jusante de forma mais assertiva. Ressalta-se que a indefinição dos níveis de jusante afeta as condições de restituição do fluxo descarregado pelo vertedouro, as condições de restituição do túnel de desvio (ensecadeira de jusante) e a definição da cota de acesso das válvulas dispersoras na saída do túnel de desvio.

Abaixo, apresentam-se os níveis de água de jusante de referência:

- Nível de Água para TR 10 anos (211 m³/s) ..... 74,63 m;
- Nível de Água para TR 50 anos (316 m³/s) ..... 75,50 m;
- Nível de Água para TR 100 anos (360 m³/s) ..... 75,81 m;
- Nível de Água para TR 1.000 anos (507 m³/s) ..... 76,73 m;
- Nível de Água para TR 10.000 anos (655 m³/s) ..... 77,51 m.

Na atual etapa do projeto será adotada a informação acima apresentada, sendo que, futuramente, em função dos levantamentos de campo, a curva chave poderá ser revisada podendo resultar em alterações no dimensionamento das estruturas que compõem o empreendimento.

4. VERTEDOURO

4.1. GEOMETRIA DO VERTEDOURO

O extravasamento de cheias da Barragem dos Imigrantes será efetuado por meio de um vertedouro tipo labirinto. A estrutura do labirinto possui largura frontal de 35,00 m, comprimento efetivo da crista de 136,61 m e crista na elevação 120,00 m.

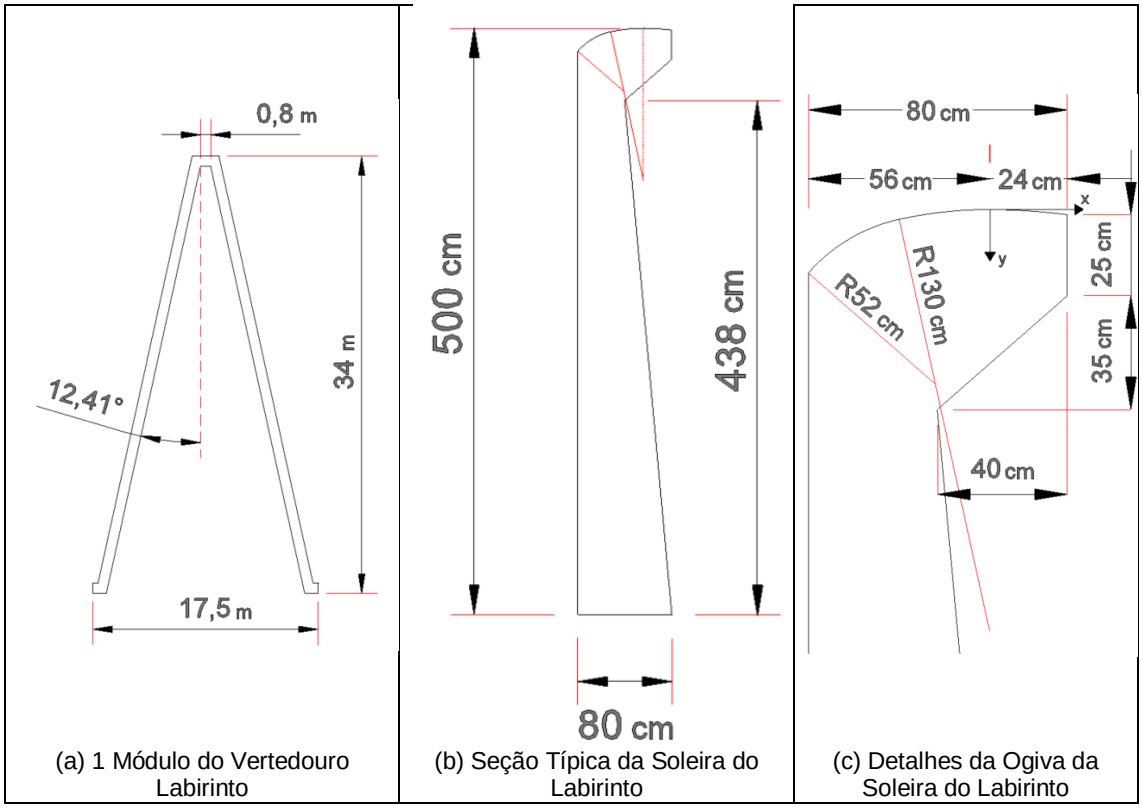
O vertedouro foi dimensionado para descarregar a cheia com tempo de recorrência de 10.000 anos (655 m³/s) com o nível máximo maximorum na elevação 122,31 m.

Abaixo, apresentam-se as principais dimensões características adotadas para o vertedouro labirinto:

- Elevação da Crista ..... 120,00 m;
- Largura Frontal (W) ..... 35,00 m;
- Comprimento Efetivo da Crista (L) ..... 136,61 m;
- Altura do Paramento (P) ..... 5,00 m;
- Número de Módulos (N) 2;
- Ângulo do Labirinto (α) 12,41º;
- Espessura da Parede (t) ..... 0,80 m.

A Figura 4-1 apresenta detalhes da geometria do vertedouro labirinto da Barragem dos Imigrantes e a Tabela 4-1 apresenta as coordenadas do perfil Creager da soleira do vertedouro labirinto.

Figura 4-1 – Detalhes da Geometria do Vertedouro Labirinto da Barragem dos Imigrantes

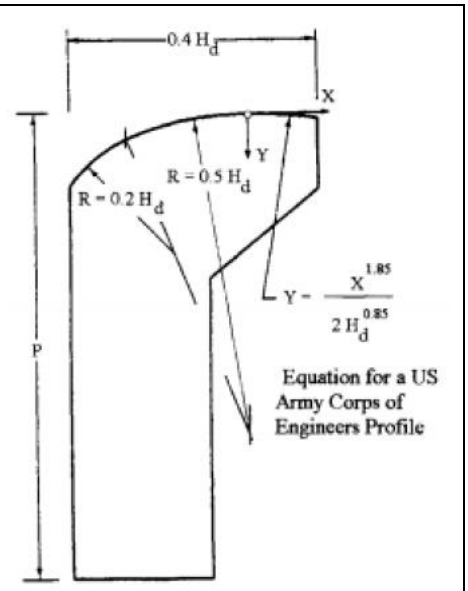


(a) 1 Módulo do Vertedouro Labirinto

(b) Seção Típica da Soleira do Labirinto

(c) Detalhes da Ogiva da Soleira do Labirinto

Tabela 4-1 – Coordenadas do Perfil Creager da Soleira do Vertedouro Labirinto da Barragem dos Imigrantes

x (m) Posição	y (m) Elevação	
0,00	120,000	
0,05	119,999	
0,10	119,997	
0,15	119,993	
0,20	119,989	
0,24	119,984	

4.2. CAPACIDADE DE DESCARGA

Para a verificação da capacidade de descarga do vertedouro de soleira livre foi utilizada a metodologia proposta por Tullis (1995). Esta metodologia recomenda a Equação *(4.1)* para o dimensionamento hidráulico da estrutura.

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} {H_t}^{3/2} \qquad (4.1)$$

Em que:

Q: Vazão descarregada (m³/s);

C_d: Coeficiente de descarga (-);

L: Comprimento efetivo da crista do vertedouro (m);

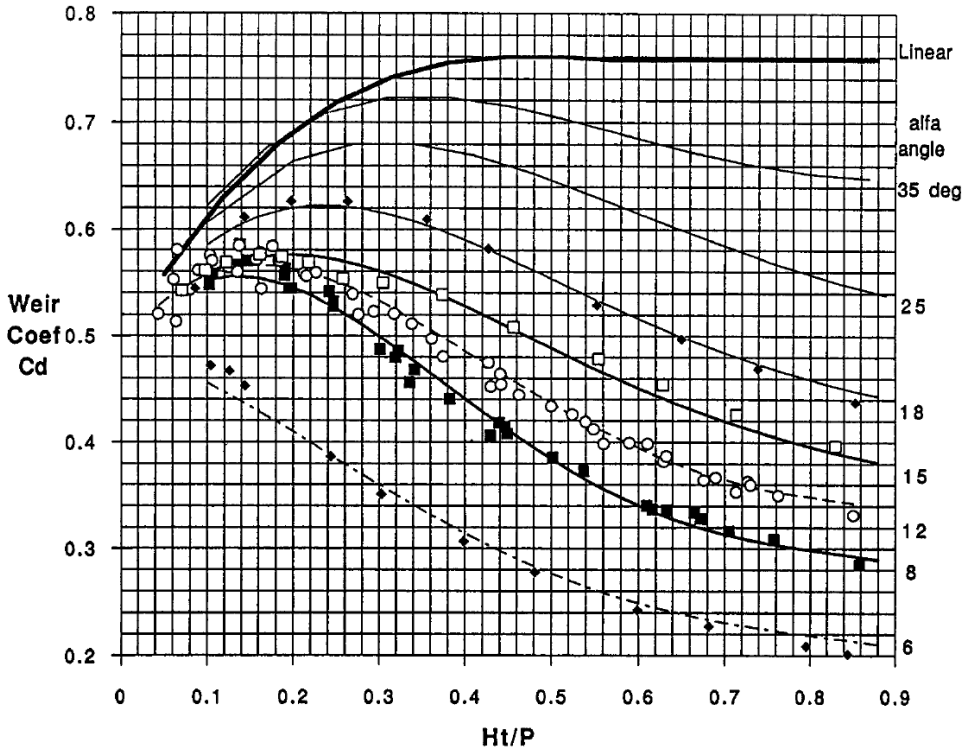
W Largura total da soleira em labirinto (m);

g: Aceleração da gravidade (m/s²);

H_t: Carga sobre a crista do vertedouro (m).

Os valores relativos ao coeficiente de descarga foram obtidos por meio da Figura 4-2. Conforme observado na metodologia de Tullis (1995), o coeficiente de descarga é função da carga hidráulica (H_t), da altura do paramento de montante do labirinto (P) e do ângulo formado entre os muros do vertedouro labirinto e a direção principal do escoamento (α).

Figura 4-2 – Coeficiente de Descarga para Vertedouro Labirinto – Tullis (1995)



Fonte: Adaptado de Tullis (1995)

O vertedouro foi dimensionado para a vazão com tempo de recorrência de 10.000 anos (655 m³/s) e verificado para a passagem da HMMP (Hidrograma Máximo Mais Provável) referente à uma vazão de 735 m³/s. A metodologia para a determinação da HMMP está apresentada no documento E-062-000-00-5-RT-0001-1 (realizado pela empresa POENTE Engenharia e Consultoria), referente à revisão dos estudos de cheias máximas, emitido em abril de 2021.

A Figura 4-3 e a Tabela 4-2 apresentam a curva de descarga do vertedouro da Barragem dos Imigrantes.

Figura 4-3 – Curva de Descarga do Vertedouro Tipo Labirinto da Barragem dos Imigrantes

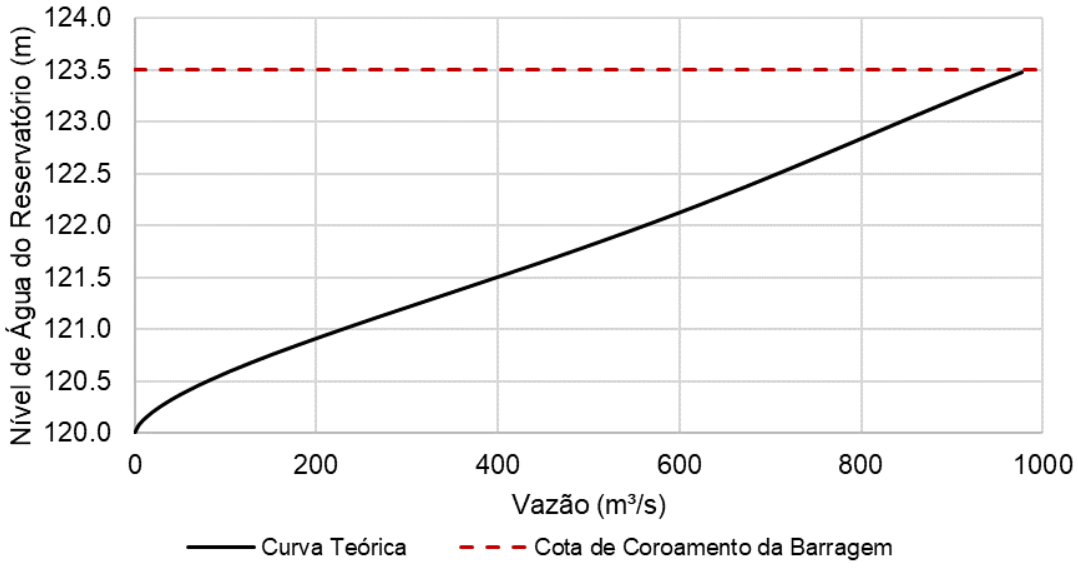


Tabela 4-2 – Capacidade de Descarga do Vertedouro Tipo Labirinto da Barragem dos Imigrantes

Vazões Notáveis	H (m)	H/P	C_t (m^{0,5}/s)	Q (m³/s)	Nível de Água do Reservatório (m)
-	0,00	0,00	0,490	0	120,00
5 anos	0,80	0,16	0,567	165	120,80
10 anos	0,95	0,19	0,566	211	120,95
25 anos	1,13	0,23	0,560	271	121,13
50 anos	1,26	0,25	0,553	316	121,26
100 anos	1,39	0,28	0,545	360	121,39
500 anos	1,69	0,34	0,521	463	121,69
1.000 anos	1,83	0,37	0,508	507	121,83
10.000 anos (condição de projeto)	**2,31**	**0,46**	**0,462**	**655**	**122,31**
HMMP	2,60	0,52	0,435	735	122,60
-	3,50	0,70	0,373	984	123,50

4.3. CALHA DO VERTEDOURO

A calha do vertedouro possui aproximadamente 81,0 m de comprimento (medida horizontal) e largura total de 35,0 m. A inclinação da calha é de 60%, inicia-se na elevação 115,00 m e finaliza-se na elevação 66,50 m. Ao longo da calha há muros laterais com 3,0 m de altura para realizar a contenção do escoamento. A Figura 4-4 e a Figura 4-5 apresentam o perfil geral do vertedouro da Barragem dos Imigrantes.

Figura 4-4 – Perfil do Vertedouro da Barragem dos Imigrantes

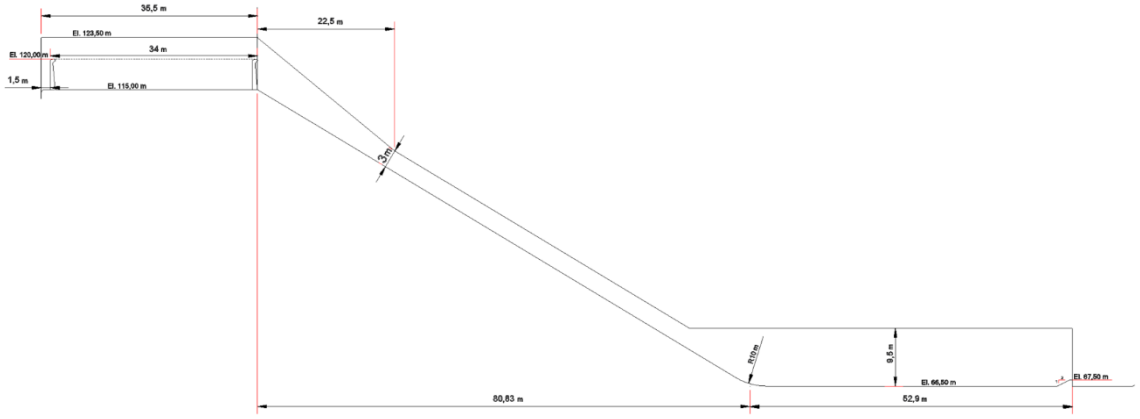
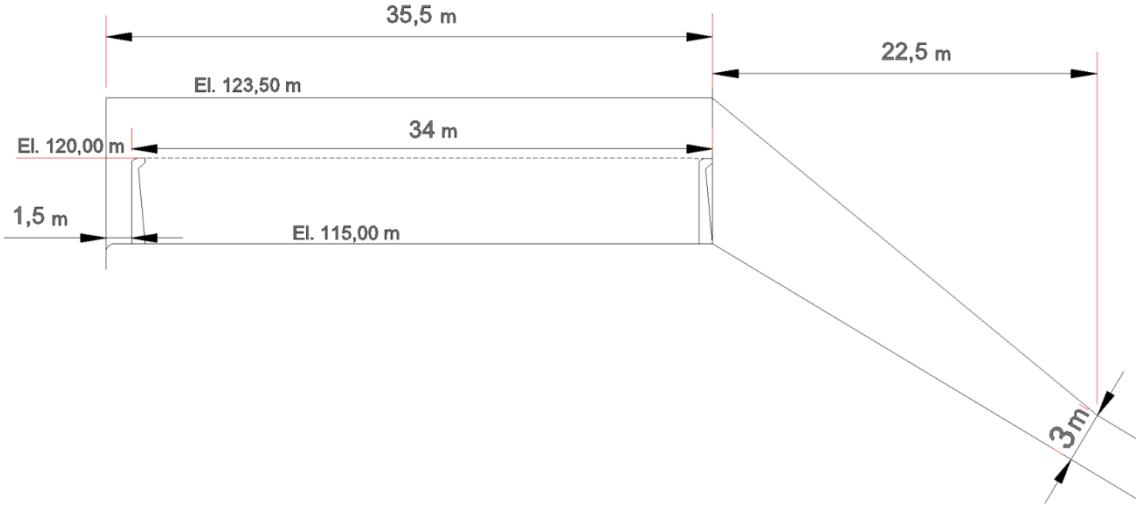


Figura 4-5 – Perfil do Vertedouro da Barragem dos Imigrantes



Para a determinação do nível de água ao longo da calha e definição dos muros laterais, é necessário estimar as perdas de carga ao longo do mesmo. A estimativa da perda de carga foi realizada considerando o desenvolvimento completo da camada limite ao longo da calha, assim sendo, realizou-se o cálculo de remanso em regime supercrítico.

A estimativa das perdas de carga por meio do cálculo do remanso foi realizada considerando um coeficiente de rugosidade de Strickler de 70 $m^{1/3}/s$.

A altura dos muros laterais foi definida a partir do perfil da linha de água calculado para a vazão com tempo de recorrência de 10.000 anos (655 m^3/s) com borda livre e verificada para o perfil da linha de água para a cheia corresponde a HMMP (735 m^3/s).

O critério de borda livre considerado para o dimensionamento dos muros laterais é indicado por USBR (1965) e descrito pela Equação *(4.2)*.

$$FB = 0{,}61 + 0{,}03714\mathrm{V}\sqrt[3]{d} \qquad (4.2)$$

Em que:

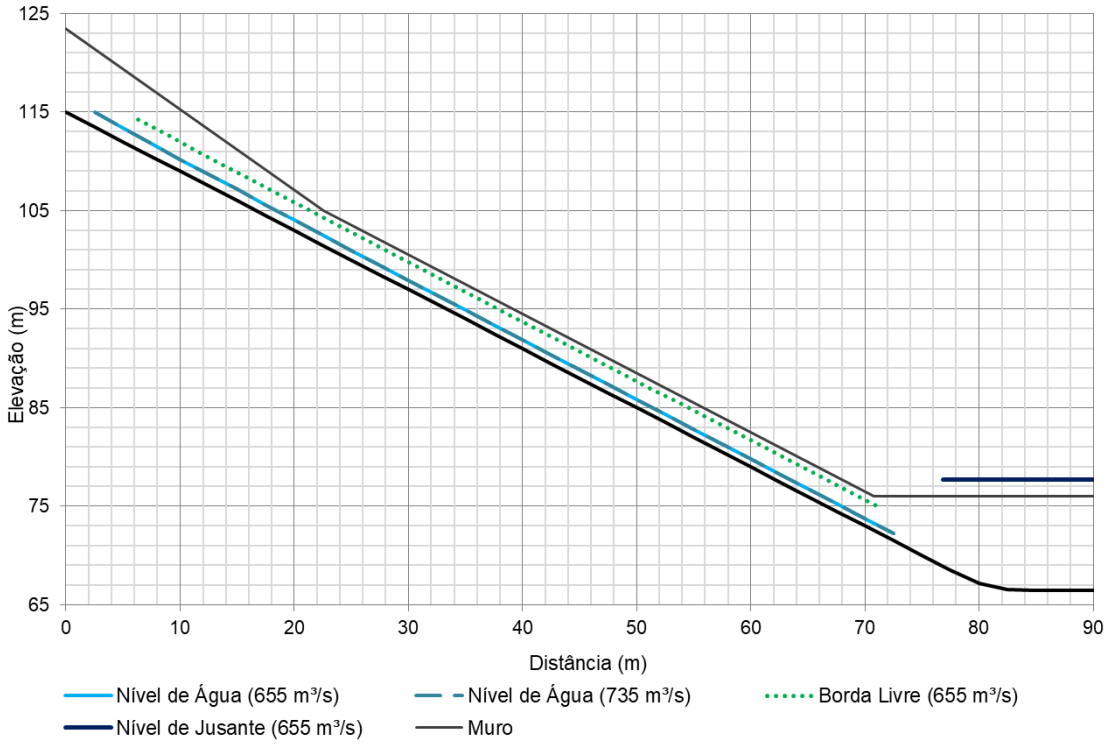
FB: Altura da borda livre (m);

V: Velocidade do escoamento (m/s);

d: Profundidade do escoamento (m).

A Figura 4-6 apresenta os perfis da linha de água ao longo da calha do vertedouro para as vazões com tempo de recorrência de 10.000 anos e HMMP. Também, a figura apresenta a linha de água para a vazão decamilenar com borda livre.

Figura 4-6 – Perfil da Linha de Água ao Longo da Calha do Vertedouro



Para a avaliação do risco de ocorrência de cavitação ao longo da calha, deve-se avaliar o índice de cavitação do escoamento, o qual é determinado segundo as equações a seguir.

$$\sigma_n = \frac{H - H_v}{\frac{V^2}{2g}} \qquad (4.3)$$

$$H = \frac{P_a}{\gamma} = h\cos\emptyset + \frac{V^2 h}{gR} \qquad (4.4)$$

Em que:

σ_n: Índice de cavitação natural;

H: Altura de pressão em termos absolutos (m);

V: Velocidade média do escoamento (m/s);

H_v: Altura da pressão de vapor (m);

P_a: Pressão atmosférica (t/m²);

h: Tirante do escoamento no sentido perpendicular à calha (m);

$\emptyset$: Ângulo de inclinação da calha com a horizontal (º);

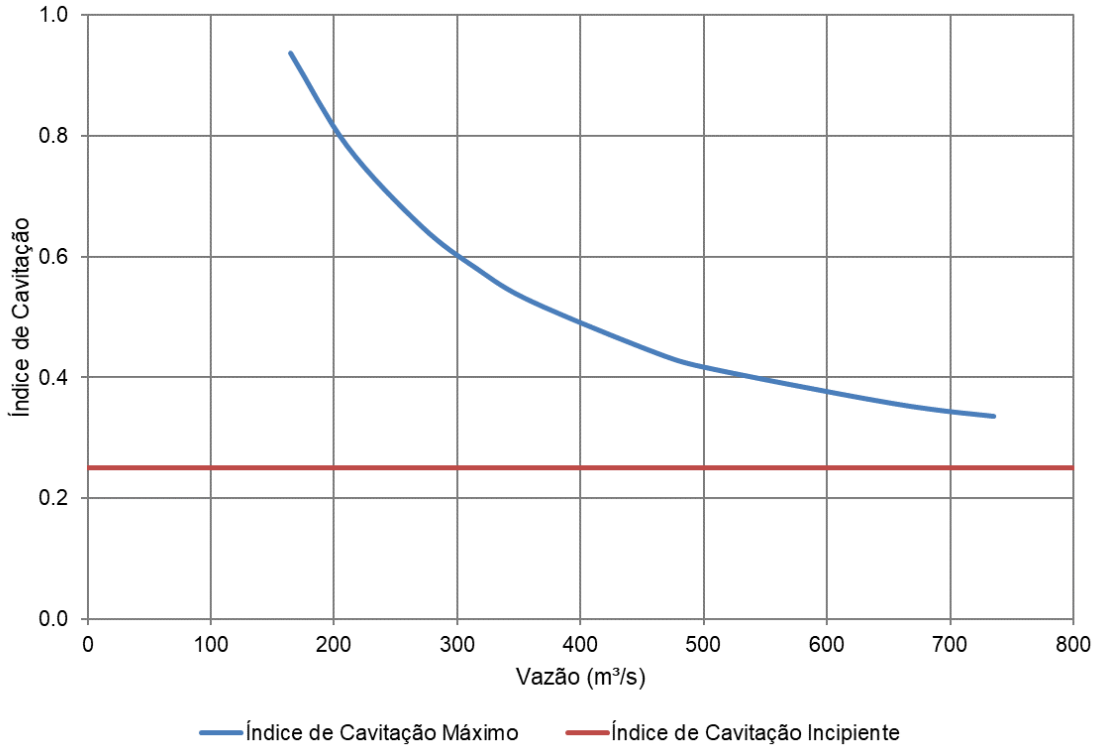
R: Raio de curvatura da curva vertical (m);

γ: Peso específico da água (N/m³).

O valor mínimo do índice de cavitação está associado à qualidade da superfície hidráulica no que se refere à existência de irregularidades, como, por exemplo, chanfros e sobressaltos decorrentes de juntas. Conforme Falvey (1990), recomenda-se que se evite fluxos com índices de cavitação inferiores a 0,25, índice este que está associado a irregularidades do tipo chanfro com declividade 20H:1V. Recomenda-se ainda, para projetos sem aeradores, que se evite o dimensionamento com índices de cavitação abaixo de 0,20.

A Figura 4-7 apresenta o índice de cavitação obtido a partir das avaliações teóricas ao longo da calha do vertedouro para várias vazões. Conforme pode ser observado, as avaliações teóricas indicam a não ocorrência de cavitação ao longo da estrutura. Ao longo do escoamento, a velocidade aumenta gradualmente com a redução proporcional da lâmina de água, sendo que, para a vazão decamilenar (655 m³/s), a velocidade ao final da calha chega a valores da ordem de 29 m/s com uma lâmina de cerca de 0,60 m. Essa condição resulta em um índice de cavitação de 0,36. A condição mais crítica ocorre para a vazão correspondente ao HMMP (735 m³/s) - índice de cavitação de 0,34.

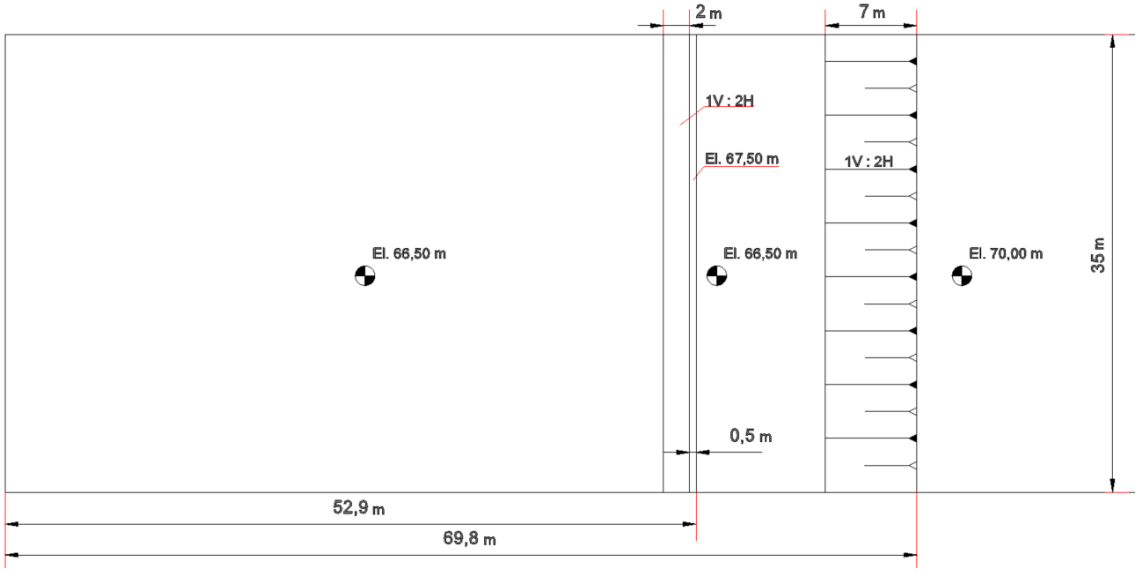
Figura 4-7 – Índice de Cavitação ao Longo da Calha



4.4. BACIA DE DISSIPAÇÃO

A dissipação da energia residual do vertedouro é realizada em uma bacia de dissipação em concreto com fundo na elevação 66,50 m, largura total de 35,00 m e comprimento de 52,90 m (incluindo o *end-sill*). Ao final da bacia encontra-se o *end-sillI* com elevação na cota 67,50 m e rampa com declividade igual a 2H:1V. A Figura 4-8 apresenta uma vista em planta da bacia de dissipação.

Figura 4-8 – Vista em Planta da Bacia de Dissipação



O dimensionamento hidráulico da bacia de dissipação contemplou as seguintes verificações principais:

- Cota da Bacia de Dissipação: A cota do piso da bacia de dissipação deve ser definida de maneira a garantir a formação do ressalto hidráulico para toda a faixa de operação considerada no projeto do vertedouro. Para isso, a cota da bacia deve estar posicionada de tal modo que as profundidades do fluxo a jusante sejam sempre iguais ou maiores que a altura conjugada necessária para a formação do ressalto hidráulico;
- Comprimento da Bacia de Dissipação: A dissipação da energia residual ocorre ao longo do ressalto hidráulico. Essa dissipação ocorre pelo movimento caótico, flutuação de pressão e turbulência que ocorre ao longo do desenvolvimento do ressalto. Essa dissipação de energia e turbulência está associada a um grande potencial erosivo, motivo pelo qual, na maioria das obras hidráulicas dimensionadas, opta-se por proteger com concreto o maciço rochoso onde ocorrerá a formação do ressalto, evitando assim erosões que possam comprometer a segurança da estrutura. Dessa forma, a determinação do comprimento da bacia de dissipação dever ser compatível com a qualidade da rocha a jusante e, em caso extremo de rochas erodíveis, o comprimento deve ser o mesmo que o do ressalto hidráulico. A Eletrobrás (2003) recomenda a utilização da TR = 100 anos para a definição do comprimento da bacia de dissipação, admitindo-se a ocorrência de parte do ressalto fora da bacia para enchentes mais raras.

A seguir serão feitas considerações específicas a respeito de cada um dos pontos acima citados.

Ressalta-se que para o cálculo do dimensionamento da bacia de dissipação são necessários os níveis de água de jusante e, conforme apresentado no item 3, a curva-chave de jusante traz certa incerteza em relação aos resultados obtidos. Dessa forma, destaca-se que é necessário a confirmação da curva-chave de jusante para garantir o bom funcionamento hidráulico da bacia de dissipação.

Cota do Piso da Bacia de Dissipação

A verificação da cota do piso da bacia de dissipação foi realizada por meio da metodologia proposta por USBR (1965) e está descrita pelo sistema de equações abaixo.

$$h_{conjugada} = \frac{h_1}{2}\left[\sqrt{\left(1 + 8{Fr_1}^2\right)} - 1\right] \quad (4.5)$$

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} \quad (4.6)$$

$$v_1 = \frac{Q}{B \cdot h_1} \quad (4.7)$$

$$N.A.R. = Z_{bacia} + h_1 + \frac{{v_1}^2}{2 \cdot g} \quad (4.8)$$

$$N.A._{conjugada} = h_{conjugada} + Z_{bacia} \quad (4.9)$$

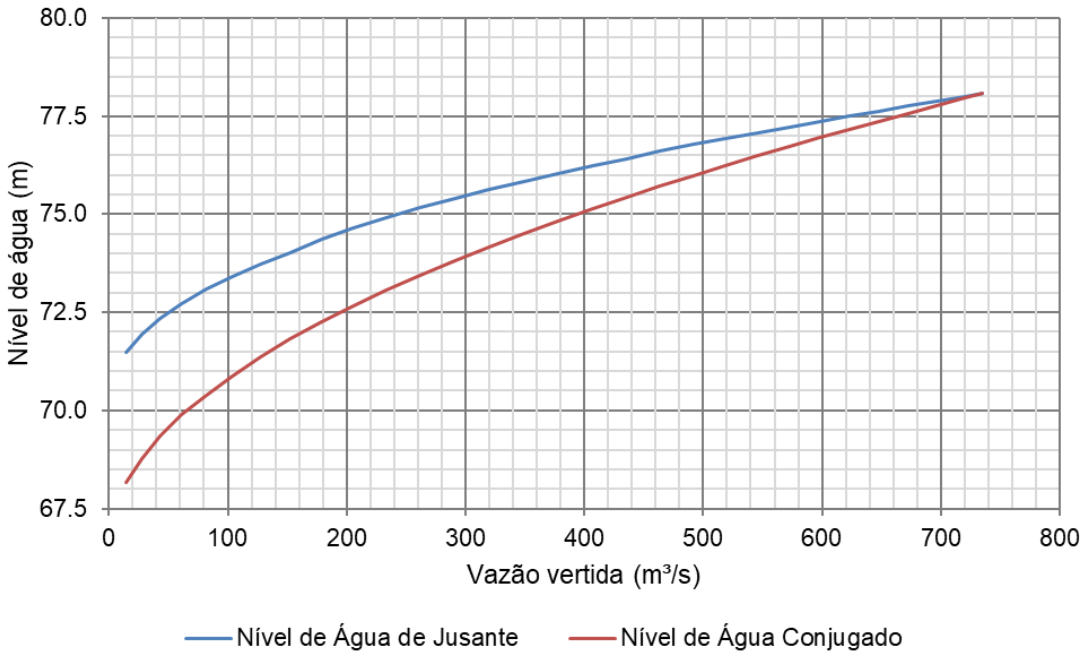
$$N.A._{conjugada} \leq N.A.J. \quad (4.10)$$

Em que:

$h_{conjugada}$:	Profundidade conjugada (m);
h_1:	Profundidade do escoamento supercrítico na entrada do ressalto (m);
Fr_1:	Número de Froude do escoamento supercrítico na entrada do ressalto;
v_1:	Velocidade do escoamento supercrítico na entrada do ressalto (m/s);
g:	Aceleração da gravidade (m/s²);
Q:	Vazão (m³/s);
B:	Largura da bacia de dissipação (m);
$N.A.R.$:	Nível de água do reservatório descontado de perdas de carga ao longo da calha (m);
Z_{bacia}:	Cota da bacia de dissipação (m);
$N.A._{conjugada}$	Nível de água necessário para a formação do ressalto (m);
$N.A.J:$	Nível de água de jusante obtido no documento E-062-00-00-5-MC-0002-3 (m).

A Figura 4-9 apresenta a verificação do dimensionamento da cota do piso da bacia de dissipação. Conforme pode ser observado, os níveis de água de jusante são suficientes para garantir a formação do ressalto hidráulico no interior da bacia de dissipação para toda a faixa de operação.

Figura 4-9 - Verificação do Dimensionamento da Cota do Piso da Bacia de Dissipação

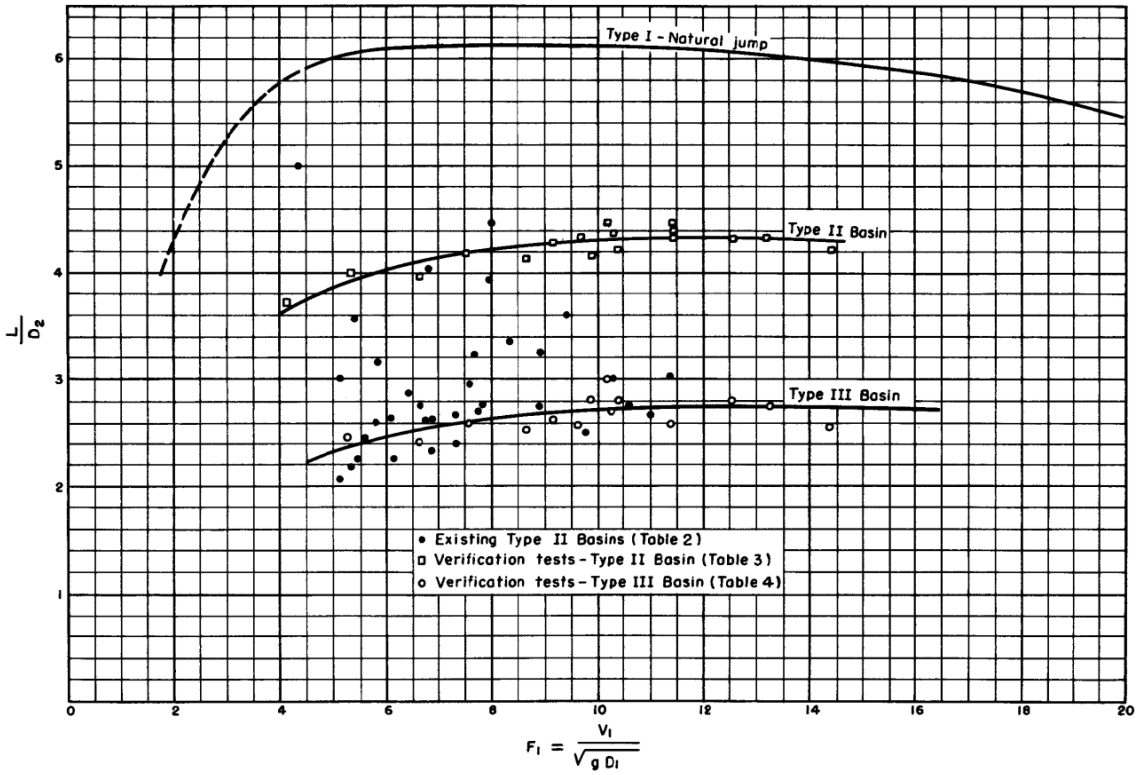


Comprimento da Bacia de Dissipação

O comprimento do ressalto hidráulico pode ser definido a partir do gráfico apresentado na Figura 4-10. O comprimento é função do número de Froude e do tipo de bacia, sendo o Tipo I correspondente ao comprimento natural do ressalto hidráulico, ou seja, sem a existência de blocos de dissipação na bacia. Dessa forma, considerando o comprimento natural do ressalto (curva para a bacia do Tipo I), obtém-se os comprimentos de ressalto ($L_{ressalto}$) indicados na Figura 4-11.

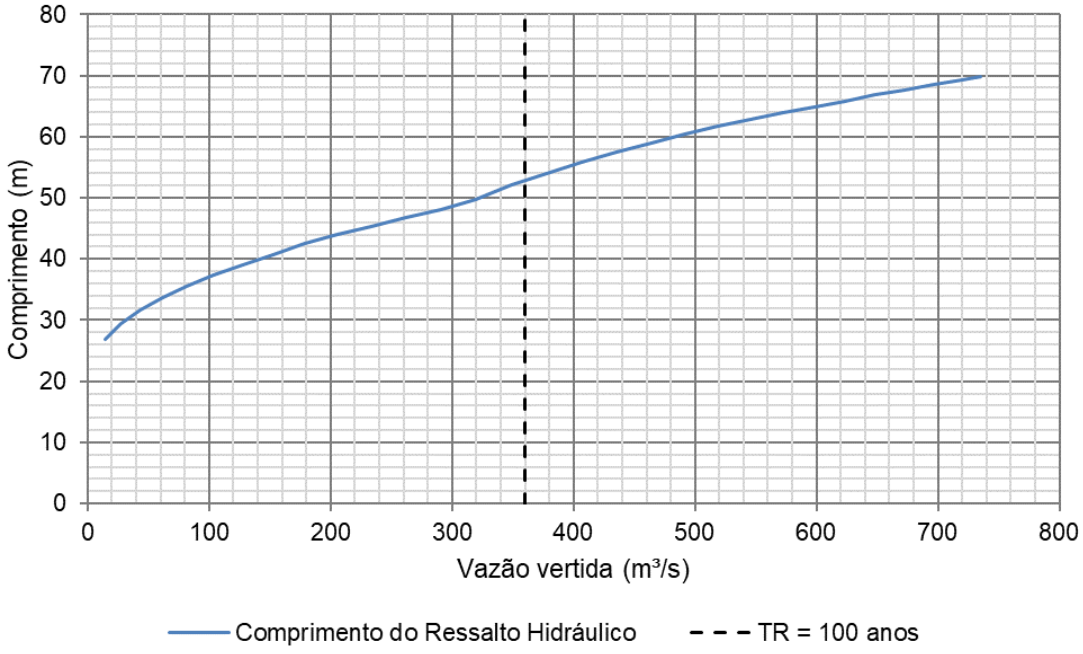
De maneira conservadora, o comprimento da bacia de dissipação foi projetado considerando o mesmo comprimento do ressalto hidráulico e a vazão de tempo de recorrência de 100 anos, ou seja, 52,90 m (ver Figura 4-11).

Figura 4-10 - Comprimento do Ressalto Hidráulico em Função do Tipo da Bacia de Dissipação



Fonte: Peterka (1958)

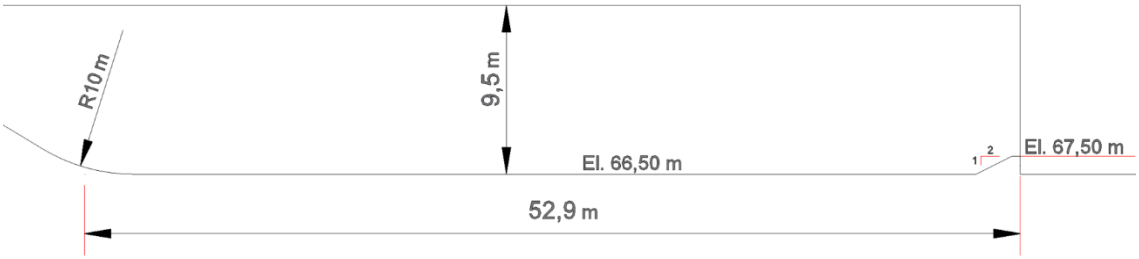
Figura 4-11 - Avaliação do Comprimento Necessário da Bacia de Dissipação



Muros Laterais da Bacia de Dissipação

Os muros laterais da bacia de dissipação foram dimensionados para conter o nível de água para uma cheia com tempo de recorrência de 50 anos. Foi realizado o cálculo de remanso no canal de restituição para verificar os níveis de água no interior da bacia de dissipação. Deste modo, para a cheia de 50 anos (316 m³/s), obteve-se o nível de água igual a 75,60 m. Portanto, foi definido a altura dos muros laterais de 9,50 m na elevação 76,00 m, o que resulta em uma borda livre de 0,40 m.

Figura 4-12 – Vista em Perfil da Bacia de Dissipação



Comenta-se que se verificou as condições do escoamento considerando a cheia HMMP (735 m³/s). Nesse cenário, ocorrerá galgamento dos muros da bacia de dissipação, sendo que as velocidades na crista do muro serão da ordem de 2,7 m/s. Sendo que, a proteção dos taludes nas regiões próximas da bacia de dissipação está relacionada ao tipo de material que será exposto.

Ressalta-se que estas análises são simplificadas visto que existe a incerteza em relação ao nível de jusante.

5. DESVIO DO RIO

O estudo realizado levou à escolha de um esquema de desvio mediante a construção de um túnel de desvio ao longo da margem esquerda do rio. O seu dimensionamento foi realizado para desviar uma vazão de 316 m³/s, associada a um tempo de recorrência de 50 anos (considerando o período úmido). O túnel de desvio possui duas seções transversais. A primeira seção transversal é do tipo arco ferradura com seção interna circular com raio de 2,70 m, conforme ilustrado na Figura 5-1. Essa seção foi projetada considerando o trecho inicial de escavação em solo e terá comprimento aproximado de 62,00 m. A segunda seção é do tipo arco retângulo com as seguintes dimensões principais: 6,50 m de altura e 6,00 m de largura (Figura 5-2), e comprimento de 132,50 m. Essa seção foi projetada considerando o trecho de escavação em rocha.

O emboque do túnel de desvio encontra-se na elevação 70,00 m e o desemboque na elevação 69,50 m, sendo que o túnel de desvio possui um comprimento total da ordem de 211 m. A estrutura de emboque e de controle do túnel de desvio será construída em concreto. A estrutura possui dois vãos com 2,9 m de largura e 6,5 m de altura. Cada um dos vãos possuirá duas ranhuras com respectivas guias para introdução de comportas. Referente à velocidade no início da estrutura de controle, o fluxo atingirá uma velocidade da ordem de 8,4 m/s, nesse sentido, a montante da estrutura, o canal deverá ser protegido considerando-se esta magnitude de velocidade.

O canal de aproximação do túnel de desvio será escavado na elevação 70,00 m com uma rampa para a elevação 69,50 m logo a montante do emboque do túnel, possuirá comprimento total de cerca de 95,00 m e 11,5 m de largura. A velocidade no canal de aproximação atingirá o valor da ordem de 2,0 m/s. O canal de restituição do túnel será

escavado na elevação 69,50 m, possuirá comprimento total de 61,37 m e 9,0 m de largura.

Figura 5-1 – Seção Típica do Túnel de Desvio da Barragem dos Imigrantes – Escavação em Solo

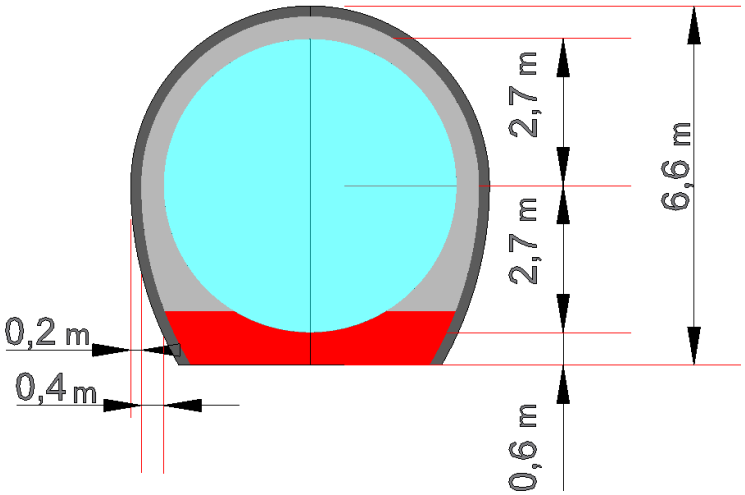
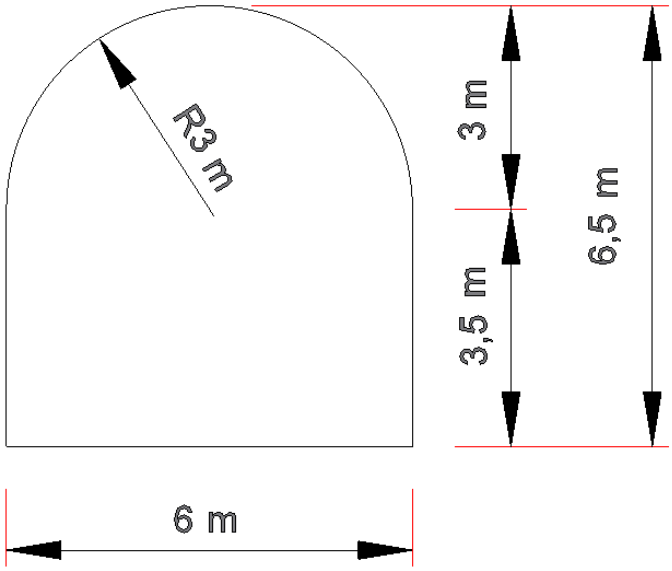


Figura 5-2 – Seção Típica do Túnel de Desvio da Barragem dos Imigrantes – Escavação em Rocha



Para proteção das obras de construção do túnel de desvio serão utilizados septos naturais de proteção complementados com o lançamento de ensecadeiras onde necessário, definidos para uma vazão de 211 m³/s, a qual está associada a uma cheia com tempo de recorrência de 10 anos (considerando o período úmido). Desse modo, a cota de coroamento da proteção se dará na elevação 76,50 m. Os septos naturais terão inclinação dos taludes igual a 1,0V:2,0H e as ensecadeiras com taludes iguais a 1,0V:1,7H.

Durante a fase do desvio, o fluxo do rio Jucu Braço Norte escoará pelo túnel de desvio até que seja possível o início do enchimento do reservatório. Na data de início do enchimento do reservatório será necessário que as estruturas que compõe o barramento, ou seja, barragem principal, barragens de fechamento, vertedouro e tomada de água estejam finalizadas em sua cota de coroamento final.

A capacidade de descarga do túnel de desvio foi definida através do cálculo das perdas de carga ao longo dos canais de entrada e saída do desvio e no interior do túnel propriamente dito (perdas localizadas na contração e expansão entre as seções do túnel). As perdas de carga nos canais de saída e entrada escavados em rocha foram determinadas por meio do cálculo de remanso pelos canais considerando-se um coeficiente de Strickler de 28 $m^{1/3}/s$. No trecho de escavação subterrânea do túnel escavado em rocha considerou-se um coeficiente de Strickler de 33 $m^{1/3}/s$ e nos trechos das estruturas de controle e do túnel escavado em solo (executadas em concreto) foi usando um coeficiente de Strickler de 70 $m^{1/3}/s$. Considerou-se na entrada do túnel um coeficiente de perda de carga localizada de 0,10, um coeficiente de perda de carga localizada de 0,20 no início da contração da seção do túnel circular e 0,30 na expansão entre o túnel com seção circular e a seção arco retângulo. As velocidades no interior do túnel de desvio serão da ordem de 13,8 m/s e 9,4 m/s, considerando a primeira seção (seção circular) e a segunda seção (seção arco retângulo) do túnel, respectivamente.

A Figura 5-3 e a Tabela 5-2 apresentam a curva de descarga do túnel de desvio. Pode-se observar que para uma vazão de 316 m^3/s (50 anos de recorrência anual) os níveis de água a montante e a jusante resultam, respectivamente, nas elevações 89,90 m e 75,50 m. Dessa forma, os septos/ensecadeiras de montante e de jusante resultaram nas cotas de coroamento 91,00 m (borda livre de 1,10 m) e 76,50 m (borda livre de 1,00 m), respectivamente.

Figura 5-3 – Curva de Descarga do Túnel de Desvio da Barragem dos Imigrantes

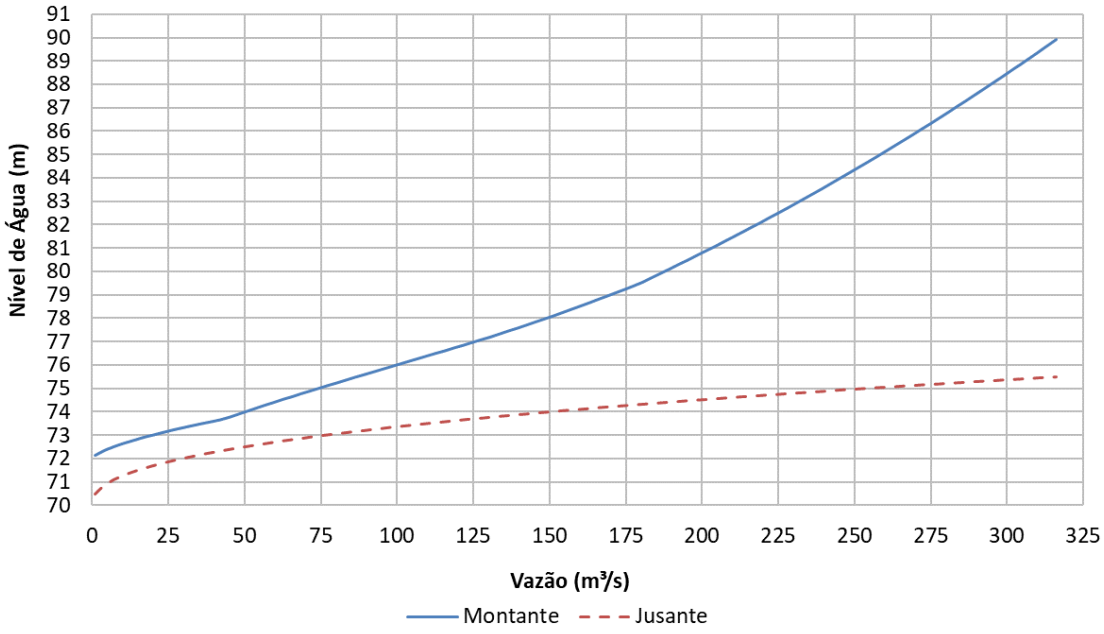


Tabela 5-1 – Capacidade de Descarga do Túnel de Desvio da Barragem dos Imigrantes

Vazão (m^3/s)	Nível de Jusante (m)	Nível de Montante (m)		Vazão (m^3/s)	Nível de Jusante (m)	Nível de Montante (m)
1	70,47	72,14		165	74,17	78,76
10	71,26	72,64		170	74,22	79,01
20	71,69	73,01		180	74,32	79,51
30	72,01	73,33		190	74,43	80,15
40	72,28	73,60		200	74,52	80,80
50	72,50	73,99		211	74,63	81,53
60	72,71	74,42		220	74,71	82,15
70	72,89	74,83		230	74,80	82,86
80	73,06	75,23		240	74,89	83,59
90	73,22	75,62		250	74,98	84,35
100	73,37	76,01		260	75,06	85,12
110	73,50	76,40		271	75,15	86,00
120	73,64	76,78		280	75,22	86,74
130	73,76	77,17		290	75,30	87,59
140	73,88	77,60		300	75,38	88,46
150	74,00	78,05		310	75,45	89,35
160	74,11	78,51		316	75,50	89,90

Ressalta-se que, conforme apresentado no item 2.2, a indefinição do nível de jusante afeta as condições de restituição do túnel de desvio (ensecadeira de jusante) podendo inclusive afetar a cota da ensecadeira de montante.

Os túneis de desvio e canais de entrada e saída foram concebidos de modo a possibilitar a transferência do fluxo do rio Jucu Braço Norte para o referido túnel com desnível entre os níveis de montante e de jusante dos septos naturais/ensecadeiras inferior a 3,0 m.

As ensecadeiras de montante e de jusante, utilizadas para a construção da barragem principal, foram definidas de modo a atender as condições da cheia associada a um tempo de recorrência de 50 anos. Assim, as ensecadeiras de montante e de jusante deverão ser coroadas nas elevações 91,00 m e 76,50 m, respectivamente.

A Tabela 5-2 sintetiza as principais cotas de proteção requeridas durante a construção.

Tabela 5-2 – Cotas de Proteção Durante as Etapas de Desvio do Rio Jucu Braço Norte

Estrutura	Tempo de Recorrência / Período	Vazão (m^3/s)	Nível de Água (m)	Cota de Coroamento (m)
Septo natural de montante/Ensecadeira	10 anos (anual)	211	74,63	76,50
Septo natural de jusante/Ensecadeira	10 anos (anual)	211	74,63	76,50
Ensecadeira de montante	50 anos (anual)	316	89,90	91,00
Ensecadeira de jusante	50 anos (anual)	316	75,50	76,50

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

U. S. Corps of Engineers. *EM–1110-2-1603 - Hydraulic Design of Spillways.* Washington, D.C. (1990)

ELETROBRÁS. *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. (2003(.

TULLIS, J. P., AMANIAN, N., WALDRON, D. *Design of Labyrinth Spillways*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 121, nº 3, p. 247-255. (1995).

USBR. *Design of Small Dams*. Washington: United States Government Printing Office. (1965).