

SECRETARIA DE ESTADO  
DA INFRAESTRUTURA,  
DOS RECURSOS HÍDRICOS E DO MEIO AMBIENTE



*Somos todos*  
**PARAÍBA**  
Governo do Estado

**PROJETO DE RECUPERAÇÃO, ADEQUAÇÃO E ESTUDOS  
COMPLEMENTARES DA BARRAGEM DE CAMALAÚ – PARAÍBA.**

**VOLUME 04 - ESTUDOS BÁSICOS**

# ÍNDICE

1. APRESENTAÇÃO.....	3
----------------------	---

ESTUDOS HIDROLÓGICOS

ESTUDOS HIDRÁULICOS

## 1. APRESENTAÇÃO

É apresentado a **SEIRHMA - Secretaria de Estado da Infraestrutura, dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente** o Projeto de Recuperação, Adequação e Estudos Complementares da Barragem de Camalaú - Paraíba, conforme Contrato N° 016/2019, datado de 15/10/2019 celebrado com a **MMC Engenharia Ltda.**

A Barragem Camalaú foi classificada pela AESA, em levantamento realizado em 2018 como de Categoria de Risco ALTO e Dano Potencial Associado ALTO, exigindo obras de recuperação por parte da SEIRHMA.

O Projeto de Recuperação elaborado pela MMC é composto dos seguintes volumes:

- **VOLUME 01 - MEMORIAL DESCRITIVO;**
- **VOLUME 02 - DESENHOS;**
- **VOLUME 03 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS;**
- **VOLUME 04 - ESTUDOS BÁSICOS;**
- **VOLUME 05 - PLANILHA DE ORÇAMENTAÇÃO.**

O presente volume constitui o **VOLUME 04 - ESTUDOS BÁSICOS**, contendo os Estudos Hidrológicos e Estudos Hidráulicos.

## ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Os estudos hidrológicos foram extraídos do Plano de Segurança da Barragem Camalaú, em conformidade com o **Contrato N° 020-2018**, firmado entre a **SEIRHMA - SECRETARIA DE ESTADO DA INFRAESTRUTURA, DOS RECURSOS HÍDRICOS E DO MEIO AMBIENTE** e a **GEOTECHNIQUE - CONSULTORIA E ENGENHARIA LTDA**, cujo objeto é a Elaboração do Plano de Segurança (PSB) das Barragens Várzea Grande, Santa Rosa, Poleiros, Felismina de Queiroz, Capoeira, Cacimba de Várzea, Baião, Bonsucesso, Camará, Acauã e Camalaú e do Plano de Enchimento da Barragem Camará, visando atender a Lei Federal N° 12.334 de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e à Resolução 002, de 28 de março de 2019, da AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, que estabelece o conteúdo mínimo do Plano de Segurança de Barragens (PSB) sob sua fiscalização.

## 1. REAVLIAÇÃO DAS SÉRIES E ESTUDOS HIDROLÓGICOS E CONFRONTAÇÃO DESSES ESTUDOS COM A CAPACIDADE DOS DISPOSITIVOS DE DESCARGA EXISTENTES

As cheias afluentes e efluentes foram avaliadas pelo método do hidrograma unitário utilizando o modelo IPHS1, que foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, da UFRGS e pela Faculdade de Engenharia Agrícola – FEA, da UFPel, em sua versão para Windows a partir do programa em DOS, desenvolvido por Carlos Eduardo Morelli Tucci do IPH.

Este programa, a partir da transformação de chuva – vazão ou da propagação de vazões em cursos d'água ou em reservatórios define os hidrogramas resultantes das cheias, em cada um dos pontos característicos da bacia.

O IPHS1 é um sistema computacional modulado que permite a determinação do hidrograma da cheia de projeto através da escolha de alguns algoritmos existentes na literatura. O hidrograma da cheia de projeto é determinado através do conhecimento da chuva de projeto, das características físicas das bacias e dos parâmetros do modelo de transformação da precipitação em vazão.

Na avaliação dos hidrogramas das vazões de projeto no modelo IPHS1 foram utilizados os algoritmos a seguir descritos.

**Chuva Efetiva** - Para a separação da parcela de chuva efetiva utilizada na determinação do hidrograma de escoamento direto, foi aplicado o uso da Curva Número - CN do *Soil Conservation Service* - SCS, este algoritmo está baseado na proporção:

$$\frac{(P - Q)}{S} = \frac{Q}{P}$$

Onde:

P: precipitação acumulada, (mm);

Q: escoamento direto (mm);

S: perda potencial máxima ao início da tormenta (mm).

Considera-se uma perda inicial ( $I_a$ ) igual à quantidade de precipitação que não produz escoamento no início da tormenta. Retirando as perdas iniciais ( $I_a$ ) da precipitação acumulada ( $P$ ) na expressão acima e isolando Q, tem-se:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - 0,8S)}$$

$I_a$  é considerada como 20% das perdas potenciais máximas, ou seja,  $I_a = 0.2 \times S$ .

$$Q = \frac{(P - 0,2.S)^2}{(P + 0,8.S)}$$

O número de cada curva (CN) está relacionado com a perda potencial inicial máxima “S” definida pela seguinte expressão:

$$CN = \frac{25400}{(10 + S)}$$

**Tipos de solos** - O SCS distingue, em seu método, quatro grupos hidrológicos de solos:

GRUPO A - Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.

GRUPO B - Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menos teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial.

GRUPO C - Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

GRUPO D - Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados.

**Condição de Umidade Antecedente do Solo** - O método do SCS distingue três condições de umidade antecedente do solo, nesta avaliação será considerada as condições antecedentes II, estas condições são assim definidas:

CONDIÇÃO I - solos secos - as chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm.

CONDIÇÃO II - situação média na época das cheias - as chuvas, nos últimos cinco dias, totalizaram de 15 a 40 mm.

CONDIÇÃO III - solo úmido (próximo da saturação) - as chuvas, nos últimos cinco dias, foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

Os quadros para definição da Curva Número - CN apresentados pela literatura são sempre indicados para as Condições Antecedentes II – AMC-II, tendo-se que transformar este CN, na hipótese de se adotar outras condições antecedentes, que não a II. O Quadro 6.1 a seguir apresenta as referências adotadas nesta transformação.

**QUADRO 1.1 - NÚMERO CURVAS (CN) E CONSTANTES (PARA  $I_A = 0,2S$ )**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
CN for condition II	CN for conditions		S values <sup>1</sup> inches	Curve <sup>1</sup> starts where P = , inches	CN for condition II	CN for conditions		S values <sup>1</sup> inches	Curve <sup>1</sup> starts where P = , inches
	I	III				I	III		
100	100	100	0.	0.	60	40	78	6.67	1.33
99	97	100	.101	.02	59	39	77	6.95	1.39
98	94	99	.204	.04	58	38	76	7.24	1.45
97	91	99	.309	.06	57	37	75	7.54	1.51
96	89	99	.417	.08	56	36	75	7.86	1.57
95	87	98	.526	.11	55	35	74	8.18	1.64
94	85	98	.638	.13	54	34	73	8.52	1.70
93	83	98	.753	.15	53	33	72	8.87	1.77
92	81	97	.870	.17	52	32	71	9.23	1.85
91	80	97	.989	.20	51	31	70	9.61	1.92
90	78	96	1.11	.22	50	31	70	10.0	2.00
89	76	96	1.24	.25	49	30	69	10.4	2.08
88	75	95	1.36	.27	48	29	68	10.8	2.16
87	73	95	1.49	.30	47	28	67	11.3	2.26
86	72	94	1.63	.33	46	27	66	11.7	2.34
85	70	94	1.76	.35	45	26	65	12.2	2.44
84	68	93	1.90	.38	44	25	64	12.7	2.54
83	67	93	2.05	.41	43	25	63	13.2	2.64
82	66	92	2.20	.44	42	24	62	13.8	2.76
81	64	92	2.34	.47	41	23	61	14.4	2.88
80	63	91	2.50	.50	40	22	60	15.0	3.00
79	62	91	2.66	.53	39	21	59	15.6	3.12
78	60	90	2.82	.56	38	21	58	16.3	3.26
77	59	89	2.99	.60	37	20	57	17.0	3.40
76	58	89	3.16	.63	36	19	56	17.8	3.56
75	57	88	3.33	.67	35	18	55	18.6	3.72
74	55	88	3.51	.70	34	18	54	19.4	3.88
73	54	87	3.70	.74	33	17	53	20.3	4.06
72	53	86	3.89	.78	32	16	52	21.2	4.24
71	52	86	4.08	.82	31	16	51	22.2	4.44
70	51	85	4.28	.86	30	15	50	23.3	4.66
69	50	84	4.49	.90					
68	48	84	4.70	.94	25	12	43	30.0	6.00
67	47	83	4.92	.98	20	9	37	40.0	8.00
66	46	82	5.15	1.03	15	6	30	56.7	11.34
65	45	82	5.38	1.08	10	4	22	90.0	18.00
64	44	81	5.62	1.12	5	2	13	190.0	38.00
63	43	80	5.87	1.17	0	0	0	in-	in-
62	42	79	6.13	1.23				finity	finity
61	41	78	6.39	1.28					

<sup>1</sup> For CN in column 1.

Fonte: *Design of Small Dams*.

Assim, se para uma determinada combinação de tipo de solo e seu uso for definido um CN= 80, para as Condições Antecedentes II, este valor de CN seria 63 para as condições antecedentes I e 91 para as condições antecedentes III. A literatura existente recomenda e é praticado na avaliação das vazões de projeto as Condições Antecedentes II, pois ao se adotar, por exemplo, as condições antecedentes III as vazões poderiam estar sendo superdimensionadas.

**Curva Número – CN** - O parâmetro CN quando da aplicação da metodologia será obtido a partir do Quadro 6.2 apresentado a seguir, para as condições antecedentes II (AMC II).

**QUADRO 1.2 - NÚMERO DE CURVAS (CN) PARA DIFERENTES COMPLEXOS HIDROLÓGICOS DE SOLO-COBERTURA (PARA CONDIÇÃO II E IA = 0,2S)**

Land use or cover	Treatment or practice	Hydrologic condition for infiltrating	Hydrologic soil group			
			A	B	C	D
Fallow.....	SR		77	86	91	94
Row crops.....	SR	Poor.....	72	81	88	91
	SR	Good.....	67	78	85	89
	C	Poor.....	70	79	84	88
	C	Good.....	65	75	82	86
	C&T	Poor.....	66	74	80	82
	C&T	Good.....	62	71	78	81
Small grain.....	SR	Poor.....	65	76	84	88
	SR	Good.....	63	75	83	87
	C	Poor.....	63	74	82	85
	C	Good.....	61	73	81	84
	C&T	Poor.....	61	72	79	82
	C&T	Good.....	59	70	78	81
Close-seeded legumes <sup>1</sup> or rotation meadow.	SR	Poor.....	66	77	85	89
	SR	Good.....	58	72	81	85
	C	Poor.....	64	75	83	85
	C	Good.....	55	69	78	83
	C&T	Poor.....	63	73	80	83
	C&T	Good.....	51	67	76	80
Pasture or range.....		Poor.....	68	79	86	89
		Fair.....	49	69	79	84
		Good.....	39	61	74	80
	C	Poor.....	47	67	81	88
	C	Fair.....	25	59	75	83
	C	Good.....	6	35	70	79
Meadow (permanent).		do.....	30	58	71	78
Woods (farm woodlots).		Poor.....	45	66	77	83
		Fair.....	36	60	73	79
		Good.....	25	55	70	77
Farmsteads.....			59	74	82	86
Roads (dirt) <sup>2</sup> (hard surface). <sup>3</sup>			72	82	87	89
			74	84	90	92

<sup>1</sup> Close-drilled or broadcast. (U.S. Soil Conservation Service.)

<sup>2</sup> Including right-of-way.

<sup>3</sup> See sec. A-5.

SR = Straight row.

C = Contoured.

T = Terraced.

C&T = Contoured and terraced.

Fonte: *Design of Small Dams*.

**Tempo de Retorno** - O tempo de retorno adotado foi o recomendado no Quadro 6.3 - Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens, que faz parte do "Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens" da Agência Nacional de Águas – ANA, que prevê os critérios apresentados no Quadro 6.3 a seguir.

**QUADRO 1.3 - TEMPOS DE RETORNO MÍNIMOS (ANOS) RECOMENDADOS PARA AS CHEIAS DE PROJETO**

ALTURA, H (M)	VOLUME, V (HM <sup>3</sup> )	TEMPO DE RETORNO (ANOS)
$h \geq 30$	$V \geq 50$	CMP <sup>1</sup>
$15 \leq h < 30$	$3 \leq V < 50$	1.000
$h < 15$	$V < 3$	500

Fonte: Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens, ANA.

Nota: <sup>1</sup> CMP – Cheia Máxima Provável



Em alternativa e na falta de dados suficientes para estimativa da Precipitação Máxima Provável – PMP, utilizado no cálculo da CMP, poderá utilizar-se o valor correspondente à cheia com tempo de retorno de 10.000 anos, que foi utilizado neste estudo.

Foi adotado o maior tempo de retorno resultante da aplicação do critério acima.

**Borda Normal e Livre** – Segundo o recomendado no Quadro 6.3 - Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens, que faz parte do "Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens" da Agência Nacional de Águas – ANA, a borda normal (diferença entre a cota de coroamento e a cota do extravasor) mínima deve ser de 3,00 m para a barragem de terra e de 1,50 m para barragens de concreto. Já a borda livre quando da ocorrência da cheia de projeto, no nível d'água máximo *maximorum* deve ser de 1,00 m para as barragens em terra e de 0,50 m para as barragens de concreto. A partir destes valores de referência foi verificado se a barragem atende a este critério.

**Chuvas de Projeto** – Inicialmente, foram identificados os postos pluviométricos existentes na região, no Banco de Dados HidroWeb da ANA, ao redor da área em interesse, tendo-se pré-selecionando os postos que possuísem séries mais extensas. Para estes postos procedeu-se a um ajustamento estatístico, considerando a distribuição de Gumbel, tendo-se definidas as chuvas diárias com tempo de retorno de 50, 100, 500, 1.000 e 10.000 anos, para estes postos. Definidas estas séries, passou-se ao estudo estatístico destas chuvas diárias através da distribuição de Gumbel, para os tempos de retorno acima.

Estas chuvas diárias têm como sistemática de coleta da informação diariamente às sete horas, podendo interromper uma única chuva, em duas leituras diárias. Estudos realizados sugerem que se adote uma relação entre a chuva diária e a chuva de 24 horas, sendo que, neste estudo foi adotada a relação recomendada pelo Engenheiro Jaime Taborga, no livro "Práticas Hidrológicas", que é de se considerar a chuva de 24 horas como 1,1 da chuva diária. Aplicando-se esta recomendação têm-se as chuvas com 24 horas de duração nos postos analisados.

Com as chuvas de vinte e quatro horas, mais uma vez, buscou-se apoio no método do Taborga, para ser feito a distribuição ao longo do período. Para tanto, utilizou-se o gráfico por ele desenvolvido que apresenta Altura de Chuva versus Tempo de Duração, de onde foi obtida a chuva, para os diversos intervalos de tempo intermediários, em função da isozona que a barragem estiver localizada.

**Distribuição espacial** - A chuva pontual deverá ser aplicada para bacias com áreas de drenagens inferiores a 25 km<sup>2</sup>. Para bacias com áreas superiores a 25 km<sup>2</sup> deverá ser distribuída espacialmente - ao longo de toda a Bacia - o que é feito com ajuda da expressão da NERC, dentre outras opções possíveis, que é a seguir apresentada:

$$P_E/P_P = (1 - 0,038 \times D^{-0,38} \times A^{0,37})$$

Onde:

$P_E$  = Chuva distribuída espacialmente (mm)

$P_P$  = Chuva Pontual (mm)

$D$  = Duração chuva de projeto (horas)

$A$  = Área da bacia hidrográfica (km<sup>2</sup>)

**Distribuição Temporal** – Para a distribuição temporal da chuva de projeto foi adotado o Método dos Blocos Alternados. O Método dos Blocos Alternados é uma aproximação do Método de Chicago. Neste procedimento, as intensidades médias são definidas para cada duração até a duração total usando as equações de chuvas intensas. Estas intensidades são transformadas em alturas de chuva e representam o volume de chuva acumulado até o último intervalo. A diferença entre os valores calculados em dois intervalos de tempo sucessivos é dito incremento. Os valores incrementais são calculados e reordenados, ficando o maior valor ao centro e os demais, de forma decrescente, dispostos à direita e à esquerda do bloco central, alternadamente. A colocação dos blocos no hietograma é arbitrária, porém existem algumas regras empíricas que conduzem a picos mais elevados. Uma dessas regras é colocar o bloco maior entre 1/3 e 1/2 da duração da chuva, neste estudo foi adotado no 1/2 da duração da chuva.

**Módulo Rio** - O módulo rio é formado pelos modelos que representam o processo de propagação de ondas de cheia em rios, canais e reservatórios. Neste estudo foi utilizado o modelo de Muskingum – Cunge.

Cunge (1969) relacionou a difusão numérica produzida pelo método Muskingum com o coeficiente de difusão hidráulica da equação de difusão linearizada, ou seja, Cunge igualou a difusão numérica do método de Muskingum a difusão real, transformando, desta forma o modelo Muskingum num modelo de difusão (que no entanto não tem capacidade para levar em conta efeitos de jusante).

Os parâmetros  $K$  e  $X$  para este método podem ser estimados com base nas características físicas do trecho de propagação e com base na discretização, utilizando as seguintes equações:

$$X = 0,5 - \frac{q}{2 \cdot S_o \cdot c \cdot \Delta_x}$$

$$K = \frac{\Delta_x}{c}$$

Onde:

$q$  é a vazão específica por unidade de largura do canal;

$S_o$  é a declividade de fundo do canal;

$c$ , a celeridade da onda.

A celeridade da onda  $c$  é obtida pela expressão:

$$C = \frac{1}{B} \cdot \frac{dQ}{dh}$$

Utilizando a equação de Manning (canais prismáticos) para calcular a vazão total Q, a celeridade pode ser estimada por:

$$C = \frac{5}{3} \cdot \frac{S_o^{0,3} \cdot q^{0,4}}{n^{0,6}}$$

Onde:

B é a largura do canal;

n é o coeficiente de rugosidade de Manning

No escoamento em reservatório foi utilizado o método de Puls para propagação de cheias em reservatório baseado na equação de continuidade concentrada, sem contribuição lateral; e a relação da vazão de saída do reservatório em função do armazenamento  $O=f(S)$  (considerando a linha de água do reservatório horizontal). Discretizando a equação da continuidade num intervalo  $\Delta t$ .

$$\frac{S_2}{\Delta t} + 0,5.O_2 = \frac{S_1}{\Delta t} - 0,5.O_1 + 0,5.(I_1 + I_2)$$

Onde:

$I_1, I_2$  são as vazões de entrada ao reservatório ao início e ao final do intervalo de tempo;

$O_1, O_2$  são as vazões de saída ao início e fim do intervalo de tempo;

$S_1, S_2$  são os armazenamentos ao início e ao final do intervalo de tempo.

### 6.1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM CAMALAU

As principais características desta barragem de interesse da reavaliação das cheias de projeto são as seguintes:

Tipo da Barragem	Terra Homogênea
Bacia Hidrográfica	Paraíba
Município	Camalaú
Rio	Monteiro
Área da Bacia Hidrográfica (km <sup>2</sup> )	1.032,00
Cota da Crista (m)	533,00
Cota da Soleira: (m)	528,50
Altura Máxima da Barragem (m)	27,00

Largura Extravaso (m) 88,20

Capacidade de Armazenamento (m<sup>3</sup>) 46.437.520,00

A relação cota x área x volume é apresentada no Quadro 6.4 a seguir.

**QUADRO 1.4 - RELAÇÃO COTA X ÁREA X VOLUME**

COTA (M)	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	VOLUME (HM <sup>3</sup> )
506,5	0,03	0,00
507,5	0,08	0,05
508,5	0,13	0,16
509,5	0,19	0,32
510,5	0,24	0,53
511,5	0,29	0,8
512,5	0,33	1,11
513,5	0,36	1,46
514,5	0,39	1,83
515,5	0,43	2,25
516,5	0,46	2,69
517,5	0,91	3,38
518,5	1,35	4,50
519,5	1,80	6,08
520,5	2,24	8,10
521,5	2,69	10,56
522,5	3,36	13,58
523,5	4,04	17,29
524,5	4,72	21,67
525,5	5,40	26,73
526,5	6,08	32,47
527,5	6,99	39,00
<b>528,5</b>	<b>7,89</b>	<b>46,44</b>
529,5	8,80	54,79
530,5	9,71	64,04
531,5	10,62	74,21

Fonte: KL Engenharia/DNOCS

## 6.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

As principais características físicas da bacia hidrográfica a montante da seção onde está situada a Barragem Camalaú são:

- Área Drenagem 1.032 km<sup>2</sup>
- Desnível 295 m
- Comprimento Talvegue 67,92 km
- Tempo Concentração 13,9 horas 833,6 minutos
- Adotar duração chuva de 15 horas
- CN - 70

- Dados do Hidrograma Unitário
  - tp= 9,59 horas
  - tb= 25,59 horas
  - tr= 16,01 horas
  - Qp= 21,75 m<sup>3</sup>/s

### 6.3. CHUVA DE PROJETO DA BARRAGEM CAMALAÚ

Os postos pluviométricos com maiores séries disponíveis no HidroWeb e de interesse para a Barragem Camalaú são apresentados no Quadro 6.5 a seguir.

**QUADRO 1.5 - POSTOS PLUVIOMÉTRICOS ANALISADOS PARA A BARRAGEM CAMALAÚ**

CÓDIGO	POSTO	MUNICÍPIO	NÚMERO DE ANOS DISPONÍVEIS
00736021	Camalaú	Camalaú	30
00737012	Monteiro (Alagoa do Monteiro)	Monteiro	14
00737013	Monteiro	Monteiro	10
00737014	Monteiro	Monteiro	50
00836001	Santa Maria da Paraíba	São João do Tigre	30
00837000	São Sebastião do Umbuzeiro	São Sebastião do Umbuzeiro	25

Fonte: Banco de Dados HidroWeb da ANA.

Das séries de dados disponíveis identificou-se para cada ano o dia da máxima chuva. Estas séries assim definidas estão apresentadas no Quadro 6.6 a seguir, onde se observa que em todos os postos já ocorreram chuvas acima de 100 mm e que nos postos de Camalaú, Monteiro (00737013), Monteiro (00737014) e Santa Maria da Paraíba já ocorreram chuvas acima de 150 mm em um dia.

**QUADRO 1.6 - CHUVAS MÁXIMAS DIÁRIAS (MM)**

ANO/POSTO	00736021	00737012	00737013	00737014	00836001	00837000
	CAMALAÚ	MONTEIRO (ALAGOA DO MONTEIRO)	MONTEIRO	MONTEIRO	SANTA MARIA DA PARAÍBA	SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO
1925				46,2		
1926				60,4		
1927				60,8		
1928				36,4		
1929				64,3		
1930				66,3		
1931						
1932				33,0		
1933				39,0		
1934						
1935				84,5		
1936				48,4		
1937				69,3		
1938				43,3		
1939						
1940				65,5		
1941				78,5		

ANO/POSTO	00736021	00737012	00737013	00737014	00836001	00837000
	CAMALAÚ	MONTEIRO (ALAGOA DO MONTEIRO)	MONTEIRO	MONTEIRO	SANTA MARIA DA PARAÍBA	SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO
1942				59,8		
1943				60,7		
1944				76,1		
1945				134,4		
1946				42,3		
1947				87,3		
1948				152,3		
1949				160,5		
1950				50,5		
1951				72,5		
1952				54,2		
1953				44,0		
1954						
1955				77,5		
1956				38,0		
1957				72,0		
1958				60,0		
1959				63,0		
1960				63,0		
1961				53,0		
1962				35,0		72,3
1963	69,8		174,0	63,0	83,2	80,4
1964	54,6	88,0		93,0	52,3	83,4
1965	59,8	107,0	107,0	92,4	42,3	56,9
1966	170,7	29,9		53,2	86,2	88,2
1967	108,8	104,4	104,4	130,4	103,0	85,2
1968	74,2	56,2	56,2	50,3	42,0	74,2
1969	136,1	73,2	73,2	73,2	115,0	82,2
1970	64,2	96,4	96,4	96,4	71,6	41,4
1971	70,2	76,6			104,2	75,6
1972	117,3	73,0		73,0	70,2	50,0
1973	84,2	64,0		64,0	29,6	50,0
1974	172,4	62,0		62,0	129,2	50,8
1975	112,6	62,0		62,0	95,4	50,0
1976	90,8	60,0	63,4	60,0	121,6	
1977	111,0			68,2	90,2	48,0
1978	109,0		98,2		50,0	50,0
1979	116,0				31,0	62,0
1980	74,0				112,0	68,0
1981	115,2				70,0	76,6
1982	42,0				60,8	
1983	32,0		58,9		38,0	
1984	84,2	98,0	98,0	98,0	58,4	108,0
1985	96,2			120,0	154,0	90,0
1986	130,4				35,6	58,9
1987	70,0				58,0	35,1
1988	30,2				65,0	60,4
1989	71,0				66,0	104,0
1990	28,4				34,2	
1991	125,0				49,8	

ANO/POSTO	00736021 CAMALAÚ	00737012 MONTEIRO (ALAGOA DO MONTEIRO)	00737013 MONTEIRO	00737014 MONTEIRO	00836001 SANTA MARIA DA PARAÍBA	00837000 SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO
1992					108,8	
1993						
1994	98,0					
Média	90,6	75,1	93,0	70,2	74,3	68,1
Desvio Padrão	37,19	21,71	34,54	28,54	32,93	19,31
Máximo	172,4	107,0	174,0	160,5	154,0	108,0
>100 mm	12	2	3	5	8	2
>150 mm	2	0	1	2	1	0
>200 mm	0	0	0	0	0	0
Nº Anos	30	14	10	50	30	25

Fonte: Banco de Dados HidroWeb da ANA.

A partir destas séries foi feito o ajustamento estatístico, tendo-se definido as chuvas de projeto diárias apresentadas no Quadro 6.7 a seguir.

**QUADRO 1.7 - CHUVAS DIÁRIAS DE PROJETO (MM)**

CÓDIGO	POSTO	MUNICÍPIO	TR=20	TR=50	TR=100	TR=500	TR=1.000	TR=10.000
00736021	CAMALAU	Camalaú	160,0	187,0	207,2	254,0	274,1	340,9
00737012	MONTEIRO (ALAGOA DO MONTEIRO)	Monteiro	115,5	131,3	143,1	170,4	182,2	221,1
00737013	MONTEIRO	Monteiro	157,4	182,5	201,3	244,7	263,4	325,4
00737014	MONTEIRO	Monteiro	123,4	144,2	159,7	195,6	211,0	262,3
00836001	SANTA MARIA DA PARAÍBA	São João do Tigre	135,7	159,6	177,5	218,9	236,7	295,9
00837000	SÃO SEBASTIÃO DO UMBUZEIRO	São Sebastião do Umbuzeiro	104,1	118,1	128,6	152,9	163,3	198,0

Analisando os resultados acima optou-se por adotar o posto de Camalaú, que além de sua localização possui uma série relativamente extensa com cerca de 30 anos já apresentou chuvas bastante intensas.

A chuva de projeto foi definida para a duração de 15 horas, em função do tempo de concentração da bacia hidrográfica e adotando-se um intervalo de tempo de 30 minutos (0,50 horas). O Quadro 6.8 a seguir apresenta as chuvas de projeto para tempos entre 0,5 e 15 horas.

**QUADRO 1.8 - CHUVAS DE PROJETO CAMALAÚ (00736021)**

INTERVALO TEMPO (HORAS)	TEMPO DE RETORNO (ANOS)				
	50	100	500	1.000	10.000
0,5	67,6	74,1	90,2	96,7	118,7
1,0	91,5	100,7	122,8	131,9	162,5
1,5	105,4	116,2	141,9	152,5	188,1
2,0	115,3	127,2	155,4	167,1	206,3
2,5	123,0	135,8	165,9	178,4	220,4
3,0	129,2	142,7	174,4	187,7	231,9
3,5	134,5	148,6	181,7	195,5	241,7
4,0	139,1	153,8	188,0	202,3	250,1

INTERVALO TEMPO (HORAS)	TEMPO DE RETORNO (ANOS)				
	50	100	500	1.000	10.000
4,5	143,2	158,3	193,5	208,2	257,6
5,0	146,8	162,3	198,4	213,6	264,2
5,5	150,1	166,0	202,9	218,4	270,3
6,0	153,1	169,3	207,0	222,8	275,7
6,5	155,8	172,4	210,8	226,9	280,8
7,0	158,4	175,2	214,3	230,7	285,5
7,5	160,7	177,8	217,5	234,2	289,9
8,0	163,0	180,3	220,5	237,4	293,9
8,5	165,0	182,6	223,4	240,5	297,8
9,0	167,0	184,8	226,1	243,4	301,4
9,5	168,9	186,9	228,6	246,2	304,8
10,0	170,6	188,9	231,0	248,8	308,0
10,5	172,3	190,7	233,3	251,2	311,1
11,0	173,9	192,5	235,5	253,6	314,1
11,5	175,4	194,2	237,6	255,9	316,9
12,0	176,9	195,9	239,6	258,0	319,6
12,5	178,3	197,4	241,5	260,1	322,1
13,0	179,6	198,9	243,3	262,1	324,6
13,5	180,9	200,4	245,1	264,0	327,0
14,0	182,2	201,8	246,8	265,8	329,3
14,5	183,4	203,1	248,5	267,6	331,5
15,0	184,6	204,4	250,1	269,3	333,7

#### 6.4. CHEIA DE PROJETO DA BARRAGEM DE CAMALAÚ

A cheia de projeto da Barragem Camalaú foi reavaliada para o tempo de retorno de 1.000 anos de acordo com o critério da ANA, uma vez que sua altura é inferior a 30,00 m e seu volume acumulado é de 46,44 hm<sup>3</sup>. Adicionalmente foi avaliada a cheia com 10.000 anos de tempo de retorno.

As vazões de projeto foram avaliadas através da metodologia do hidrograma unitário sintético, onde os resultados específicos obtidos na avaliação destas vazões de projeto são apresentados a seguir. Na avaliação das chuvas intensas optou-se por utilizar os resultados do estudo estatístico do posto de Camalaú (00736031) e na avaliação das vazões de projeto aplicou-se o modelo IPHS1, que foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, da UFRGS e pela Faculdade de Engenharia Agrícola – FEA, da UFPel, desenvolvido por Carlos Eduardo Morelli Tucci do IPH.

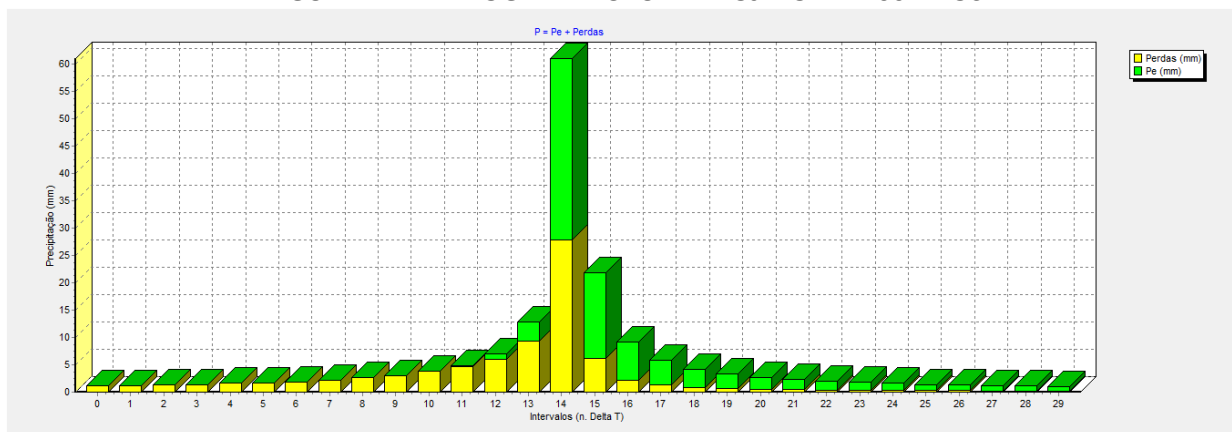
A chuva de projeto adotada foi a apresentada no Capítulo 6.3. Aplicando-se o coeficiente de distribuição espacial de 0,8230, de acordo com a metodologia já apresentada, tem-se as chuvas de projeto para os tempos de recorrência de 1.000 e de 10.000 anos com duração entre 0,5 e 15 horas, conforme apresentado no Quadro 6.9 a seguir.



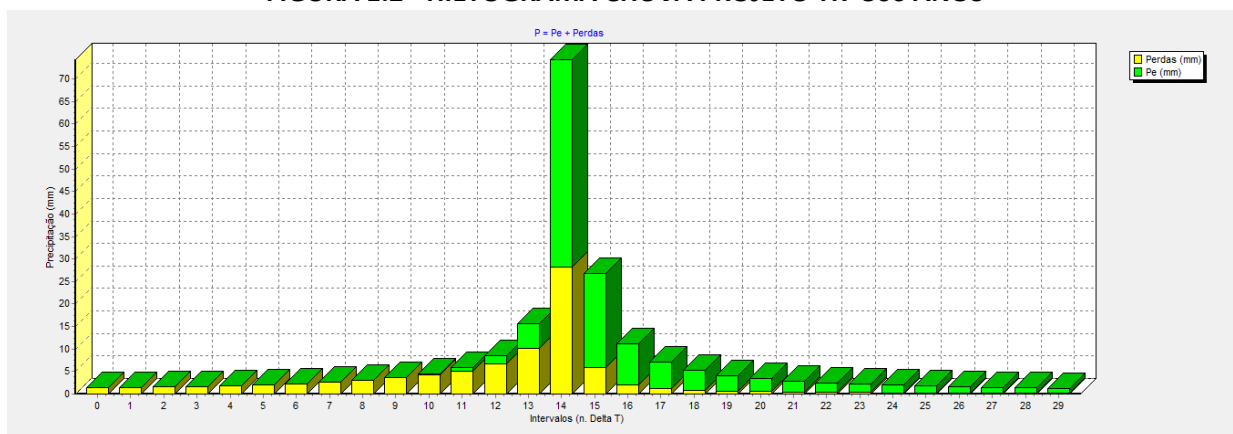
**QUADRO 1.9 - CHUVA DE PROJETO (MM) BARRAGEM CAMALAU**

DURAÇÃO (MINUTOS)	DURAÇÃO (HORAS)	TR=100 ANOS	TR=500 ANOS	TR=1.000 ANOS	TR=10.000 ANOS
30	0,5	61,0	74,3	79,6	97,7
60	1,0	82,8	101,1	108,6	133,7
90	1,5	95,6	116,8	125,5	154,8
120	2,0	104,7	127,9	137,5	169,8
150	2,5	111,7	136,5	146,8	181,4
180	3,0	117,5	143,6	154,5	190,9
210	3,5	122,3	149,5	160,9	198,9
240	4,0	126,5	154,7	166,5	205,9
270	4,5	130,3	159,2	171,4	212,0
300	5,0	133,6	163,3	175,8	217,5
330	5,5	136,6	167,0	179,8	222,4
360	6,0	139,3	170,4	183,4	226,9
390	6,5	141,9	173,5	186,7	231,1
420	7,0	144,2	176,3	189,8	235,0
450	7,5	146,4	179,0	192,7	238,6
480	8,0	148,4	181,5	195,4	241,9
510	8,5	150,3	183,8	198,0	245,1
540	9,0	152,1	186,1	200,3	248,0
570	9,5	153,8	188,1	202,6	250,8
600	10,0	155,4	190,1	204,7	253,5
630	10,5	157,0	192,0	206,8	256,1
660	11,0	158,4	193,8	208,7	258,5
690	11,5	159,8	195,5	210,6	260,8
720	12,0	161,2	197,2	212,4	263,0
750	12,5	162,5	198,8	214,1	265,1
780	13,0	163,7	200,3	215,7	267,2
810	13,5	164,9	201,7	217,3	269,1
840	14,0	166,0	203,1	218,8	271,0
870	14,5	167,2	204,5	220,3	272,8
900	15,0	168,2	205,8	221,7	274,6

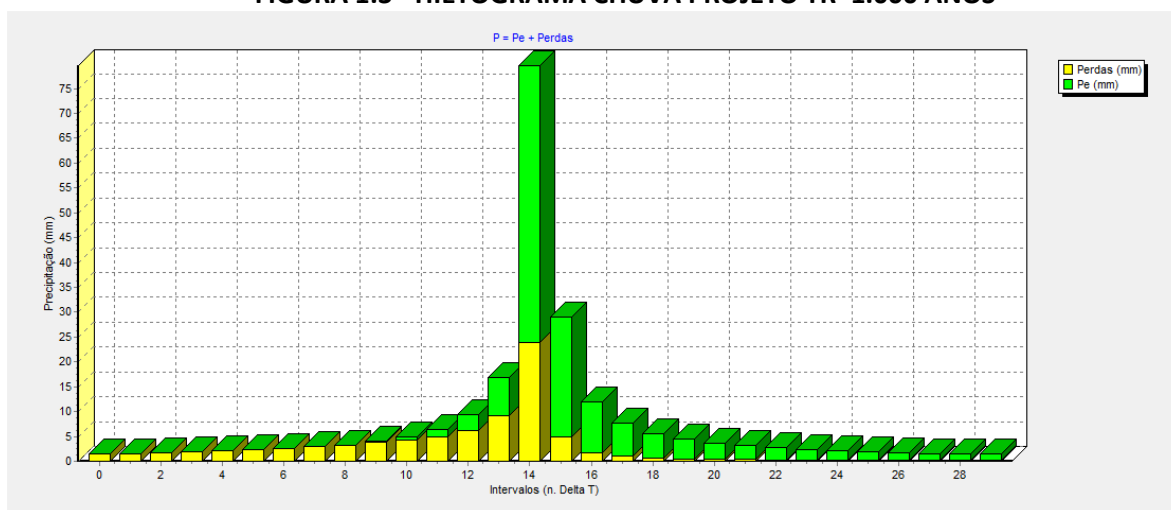
Esta chuva de projeto, após processada pelo modelo IPHS1 distribuída espacialmente e temporalmente, tem as configurações apresentadas nas Figuras 6.1 e 6.4 a seguir, onde também são apresentadas as perdas e a precipitação efetiva.

**FIGURA 1.1 - HIETOGRAMA CHUVA PROJETO TR=100 ANOS**


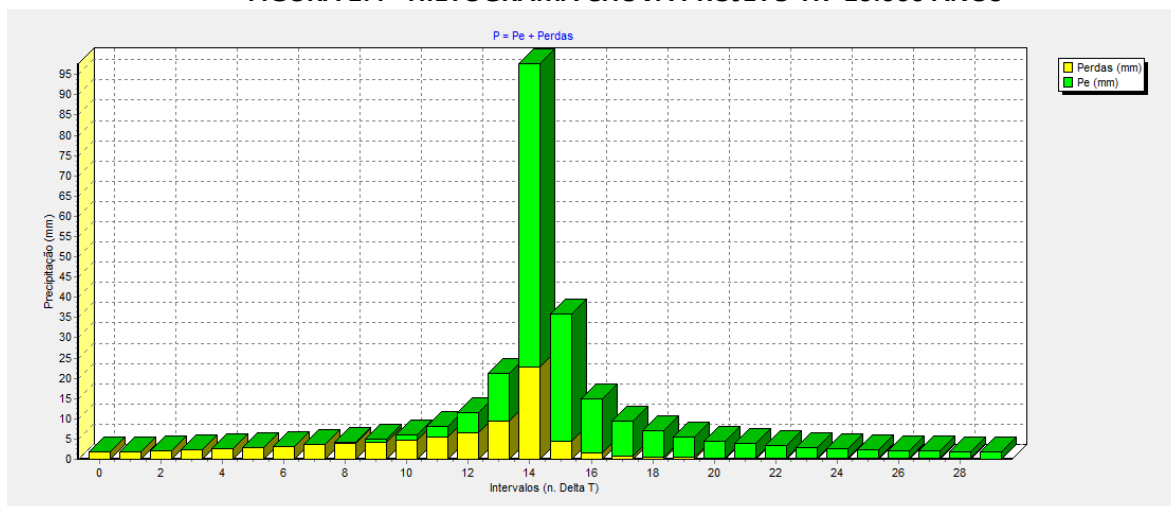
**FIGURA 1.2 - HIETOGRAMA CHUVA PROJETO TR=500 ANOS**



**FIGURA 1.3 - HIETOGRAMA CHUVA PROJETO TR=1.000 ANOS**



**FIGURA 1.4 - HIETOGRAMA CHUVA PROJETO TR=10.000 ANOS**

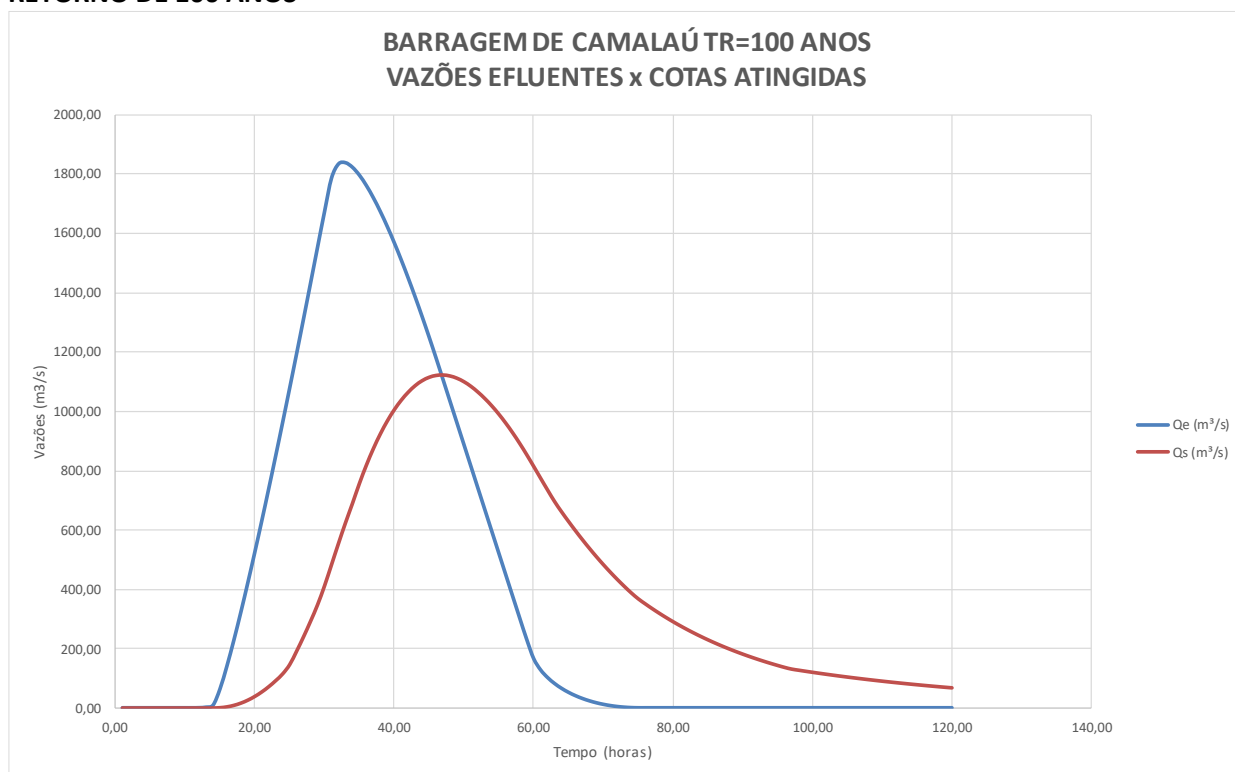


A partir das informações disponíveis, as características relevantes do extravasor adotadas neste estudo são:

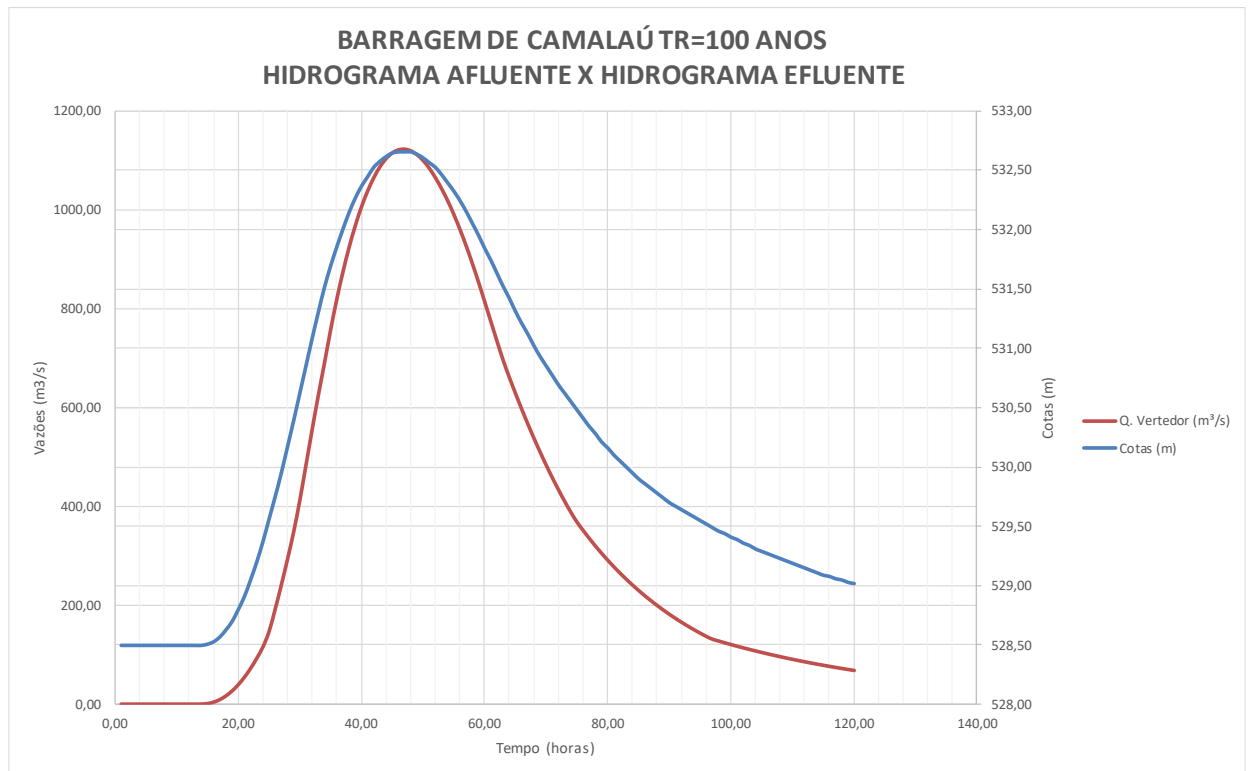
- Largura do extravasor – 88,20 m
- Coeficiente de descarga – 1,5
- Cota da soleira do extravasor – 528,50 m

Os resultados da simulação realizada para o tempo de retorno de 1.000 anos são sintetizados nas Figuras 6.5 e 6.6 e no Quadro 6.10.

**FIGURA 1.5 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 100 ANOS**



**FIGURA 1.6 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS EFLUENTES E COTAS ATINGIDAS PARA TEMPO DE RETORNO DE 100 ANOS**



**QUADRO 1.10 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DAS VAZÕES DE PROJETO AFLUENTES (QE) E EFLUENTES (QS) E COTAS ATINGIDAS PARA TR=100 ANOS**

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
1	30	0,50	0,00	0,01	528,50
2	60	1,00	0,00	0,01	528,50
3	90	1,50	0,00	0,01	528,50
4	120	2,00	0,00	0,01	528,50
5	150	2,50	0,00	0,01	528,50
6	180	3,00	0,00	0,01	528,50
7	210	3,50	0,00	0,01	528,50
8	240	4,00	0,00	0,01	528,50
9	270	4,50	0,00	0,01	528,50
10	300	5,00	0,00	0,01	528,50
11	330	5,50	0,00	0,01	528,50
12	360	6,00	0,31	0,01	528,50
13	390	6,50	2,03	0,04	528,50
14	420	7,00	8,69	0,19	528,50
15	450	7,50	63,68	1,20	528,51
16	480	8,00	141,48	4,05	528,53
17	510	8,50	229,31	9,15	528,57
18	540	9,00	323,66	16,67	528,63
19	570	9,50	422,80	26,69	528,70
20	600	10,00	525,73	39,28	528,80
21	630	10,50	631,79	54,45	528,91
22	660	11,00	740,51	72,21	529,05
23	690	11,50	851,58	92,56	529,20
24	720	12,00	964,75	115,49	529,37

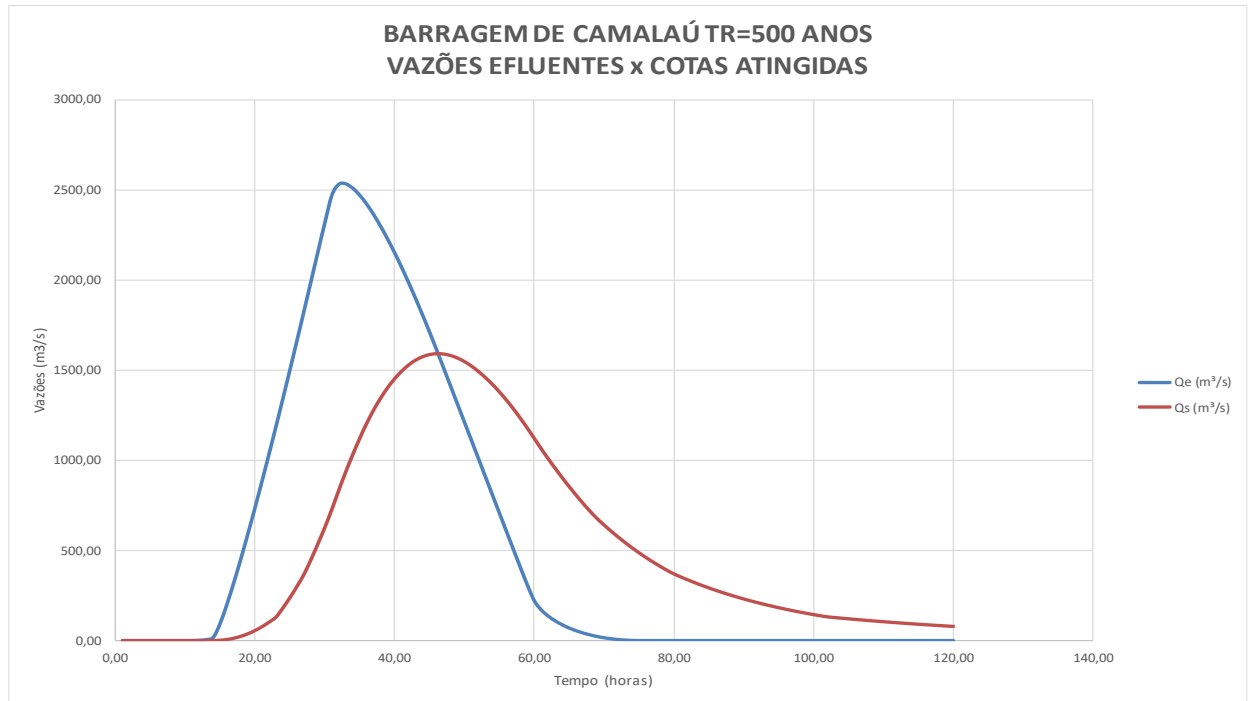
INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
25	750	12,50	1079,81	146,52	529,56
26	780	13,00	1196,52	192,12	529,75
27	810	13,50	1314,88	241,04	529,95
28	840	14,00	1434,67	293,18	530,17
29	870	14,50	1555,35	348,45	530,39
30	900	15,00	1675,28	412,34	530,62
31	930	15,50	1788,27	483,52	530,85
32	960	16,00	1835,90	555,19	531,08
33	990	16,50	1840,07	624,39	531,30
34	1020	17,00	1824,68	689,80	531,51
35	1050	17,50	1797,91	757,33	531,69
36	1080	18,00	1763,00	818,94	531,85
37	1110	18,50	1721,76	874,55	532,00
38	1140	19,00	1675,34	924,16	532,14
39	1170	19,50	1624,52	967,86	532,26
40	1200	20,00	1569,88	1005,76	532,36
41	1230	20,50	1511,80	1037,98	532,44
42	1260	21,00	1450,65	1064,93	532,52
43	1290	21,50	1386,79	1087,10	532,57
44	1320	22,00	1320,29	1103,80	532,61
45	1350	22,50	1251,44	1115,21	532,64
46	1380	23,00	1180,48	1121,53	532,65
47	1410	23,50	1107,58	1122,94	532,65
48	1440	24,00	1034,36	1119,68	532,65
49	1470	24,50	961,14	1112,04	532,63
50	1500	25,00	887,91	1100,29	532,60
51	1530	25,50	814,69	1084,68	532,56
52	1560	26,00	741,46	1065,46	532,52
53	1590	26,50	668,24	1043,47	532,46
54	1620	27,00	595,02	1018,67	532,39
55	1650	27,50	521,79	990,96	532,32
56	1680	28,00	448,57	960,50	532,24
57	1710	28,50	375,37	927,47	532,15
58	1740	29,00	302,46	892,03	532,05
59	1770	29,50	230,71	854,37	531,95
60	1800	30,00	165,86	814,87	531,84
61	1830	30,50	127,64	774,64	531,74
62	1860	31,00	101,91	734,90	531,63
63	1890	31,50	81,87	696,18	531,52
64	1920	32,00	65,58	661,69	531,42
65	1950	32,50	52,06	629,17	531,31
66	1980	33,00	40,76	597,73	531,21
67	2010	33,50	31,28	567,43	531,12
68	2040	34,00	23,38	538,29	531,02
69	2070	34,50	16,85	510,34	530,93
70	2100	35,00	11,57	483,57	530,85
71	2130	35,50	7,39	458,00	530,77
72	2160	36,00	4,20	433,60	530,69
73	2190	36,50	1,98	410,38	530,62
74	2220	37,00	0,60	388,31	530,55
75	2250	37,50	0,00	368,38	530,48
76	2280	38,00	0,00	351,44	530,41

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
77	2310	38,50	0,00	335,28	530,34
78	2340	39,00	0,00	319,86	530,28
79	2370	39,50	0,00	305,15	530,21
80	2400	40,00	0,00	291,11	530,16
81	2430	40,50	0,00	277,73	530,10
82	2460	41,00	0,00	264,95	530,05
83	2490	41,50	0,00	252,77	530,00
84	2520	42,00	0,00	241,14	529,95
85	2550	42,50	0,00	230,05	529,90
86	2580	43,00	0,00	219,47	529,86
87	2610	43,50	0,00	209,38	529,82
88	2640	44,00	0,00	199,75	529,78
89	2670	44,50	0,00	190,56	529,74
90	2700	45,00	0,00	181,80	529,70
91	2730	45,50	0,00	173,44	529,67
92	2760	46,00	0,00	165,46	529,64
93	2790	46,50	0,00	157,85	529,61
94	2820	47,00	0,00	150,59	529,58
95	2850	47,50	0,00	143,67	529,55
96	2880	48,00	0,00	137,06	529,52
97	2910	48,50	0,00	131,36	529,49
98	2940	49,00	0,00	127,66	529,46
99	2970	49,50	0,00	124,07	529,44
100	3000	50,00	0,00	120,58	529,41
101	3030	50,50	0,00	117,19	529,39
102	3060	51,00	0,00	113,90	529,36
103	3090	51,50	0,00	110,70	529,34
104	3120	52,00	0,00	107,58	529,31
105	3150	52,50	0,00	104,56	529,29
106	3180	53,00	0,00	101,62	529,27
107	3210	53,50	0,00	98,76	529,25
108	3240	54,00	0,00	95,98	529,23
109	3270	54,50	0,00	93,29	529,21
110	3300	55,00	0,00	90,66	529,19
111	3330	55,50	0,00	88,11	529,17
112	3360	56,00	0,00	85,64	529,15
113	3390	56,50	0,00	83,23	529,13
114	3420	57,00	0,00	80,89	529,11
115	3450	57,50	0,00	78,61	529,09
116	3480	58,00	0,00	76,40	529,08
117	3510	58,50	0,00	74,26	529,06
118	3540	59,00	0,00	72,17	529,05
119	3570	59,50	0,00	70,14	529,03
120	3600	60,00	0,00	68,17	529,02
<b>MÁXIMOS</b>			1840,07	1122,94	<b>532,65</b>

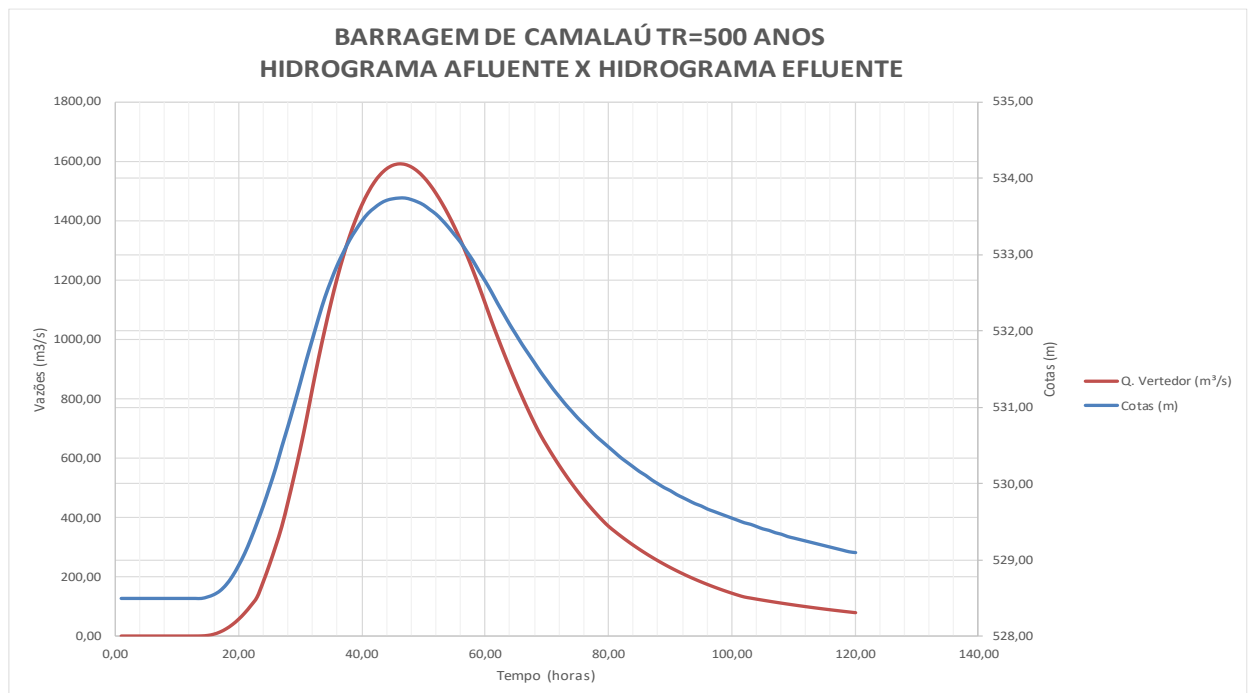
A cheia de projeto para o tempo de retorno de 100 anos atingiu a cota 532,65 m, inferior a cota de coroamento da barragem que é de 533,00 m, não havendo o galgamento para este tempo de retorno.

Os resultados da simulação realizada para o tempo de retorno de 500 anos são sintetizados nas Figuras 6.7 e 6.8 e no Quadro 6.11.

**FIGURA 1.7 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 500 ANOS**



**FIGURA 1.8 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS EFLUENTES E COTAS ATINGIDAS PARA TEMPO DE RETORNO DE 500 ANOS**



**QUADRO 1.11 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DAS VAZÕES DE PROJETO AFLUENTES (QE) E EFLUENTES (QS) E COTAS ATINGIDAS PARA TR=500 ANOS**

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
1	30	0,50	0,00	0,01	528,50
2	60	1,00	0,00	0,01	528,50
3	90	1,50	0,00	0,01	528,50
4	120	2,00	0,00	0,01	528,50
5	150	2,50	0,00	0,01	528,50
6	180	3,00	0,00	0,01	528,50
7	210	3,50	0,00	0,01	528,50
8	240	4,00	0,00	0,01	528,50
9	270	4,50	0,00	0,01	528,50
10	300	5,00	0,00	0,01	528,50
11	330	5,50	0,26	0,01	528,50
12	360	6,00	1,59	0,03	528,50
13	390	6,50	5,71	0,14	528,50
14	420	7,00	17,94	0,46	528,50
15	450	7,50	97,37	2,07	528,52
16	480	8,00	207,15	6,30	528,55
17	510	8,50	330,03	13,67	528,60
18	540	9,00	461,43	24,41	528,68
19	570	9,50	599,12	38,64	528,79
20	600	10,00	741,82	56,40	528,93
21	630	10,50	888,68	77,74	529,09
22	660	11,00	1038,99	102,65	529,28
23	690	11,50	1192,38	131,14	529,49
24	720	12,00	1348,63	182,80	529,71
25	750	12,50	1507,36	240,07	529,95
26	780	13,00	1668,33	302,05	530,20
27	810	13,50	1831,43	368,64	530,48
28	840	14,00	1996,05	451,03	530,75
29	870	14,50	2160,94	538,82	531,03
30	900	15,00	2323,47	630,72	531,32
31	930	15,50	2474,49	730,60	531,62
32	960	16,00	2534,30	837,41	531,90
33	990	16,50	2535,47	939,62	532,18
34	1020	17,00	2510,96	1034,97	532,44
35	1050	17,50	2471,57	1125,30	532,66
36	1080	18,00	2421,51	1208,11	532,86
37	1110	18,50	2363,09	1282,34	533,03
38	1140	19,00	2297,78	1348,04	533,19
39	1170	19,50	2226,77	1405,35	533,32
40	1200	20,00	2150,72	1454,45	533,44
41	1230	20,50	2070,04	1496,07	533,54
42	1260	21,00	1985,30	1530,41	533,61
43	1290	21,50	1896,90	1556,94	533,67
44	1320	22,00	1805,08	1575,93	533,71
45	1350	22,50	1710,20	1587,67	533,73
46	1380	23,00	1612,47	1592,43	533,74
47	1410	23,50	1512,11	1590,48	533,74
48	1440	24,00	1411,30	1582,16	533,72
49	1470	24,50	1310,49	1567,87	533,69
50	1500	25,00	1209,68	1547,99	533,65



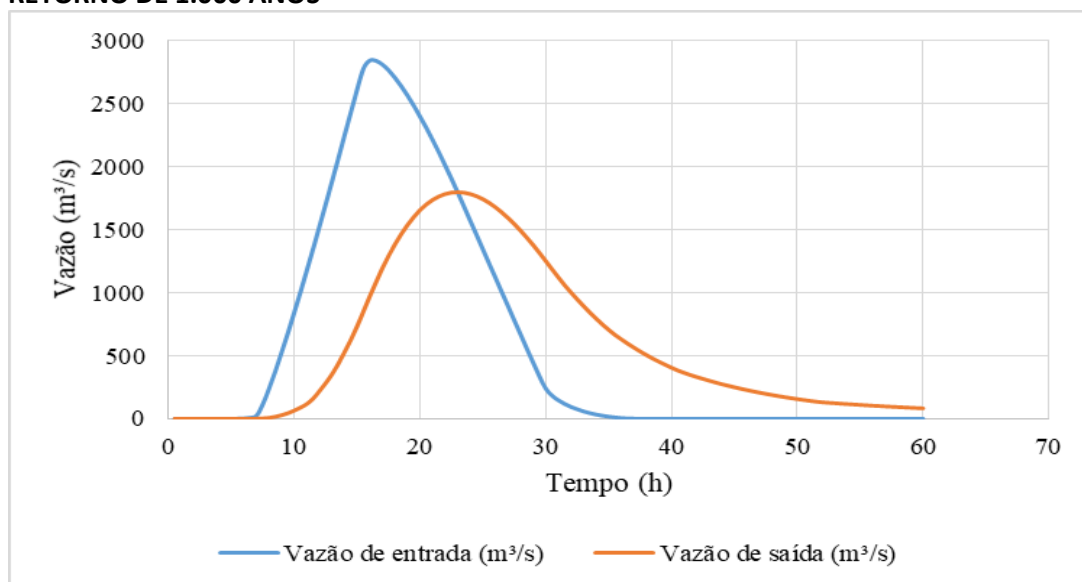
INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
51	1530	25,50	1108,87	1522,88	533,59
52	1560	26,00	1008,07	1492,88	533,53
53	1590	26,50	907,26	1458,92	533,45
54	1620	27,00	806,45	1421,18	533,36
55	1650	27,50	705,64	1379,49	533,26
56	1680	28,00	604,85	1334,09	533,16
57	1710	28,50	504,30	1285,23	533,04
58	1740	29,00	404,54	1233,16	532,92
59	1770	29,50	306,93	1178,16	532,78
60	1800	30,00	219,54	1120,81	532,65
61	1830	30,50	169,05	1062,73	532,51
62	1860	31,00	135,16	1007,73	532,36
63	1890	31,50	108,71	954,39	532,22
64	1920	32,00	87,15	902,82	532,08
65	1950	32,50	69,24	853,17	531,95
66	1980	33,00	54,26	805,51	531,82
67	2010	33,50	41,70	759,90	531,70
68	2040	34,00	31,18	716,33	531,58
69	2070	34,50	22,48	676,13	531,46
70	2100	35,00	15,46	640,68	531,35
71	2130	35,50	9,90	606,80	531,24
72	2160	36,00	5,67	574,49	531,14
73	2190	36,50	2,70	543,72	531,04
74	2220	37,00	0,83	514,48	530,95
75	2250	37,50	0,00	486,75	530,86
76	2280	38,00	0,00	460,49	530,78
77	2310	38,50	0,00	435,65	530,70
78	2340	39,00	0,00	412,15	530,62
79	2370	39,50	0,00	389,91	530,55
80	2400	40,00	0,00	369,66	530,48
81	2430	40,50	0,00	352,66	530,41
82	2460	41,00	0,00	336,44	530,34
83	2490	41,50	0,00	320,97	530,28
84	2520	42,00	0,00	306,21	530,22
85	2550	42,50	0,00	292,13	530,16
86	2580	43,00	0,00	278,69	530,11
87	2610	43,50	0,00	265,87	530,05
88	2640	44,00	0,00	253,65	530,00
89	2670	44,50	0,00	241,98	529,95
90	2700	45,00	0,00	230,85	529,91
91	2730	45,50	0,00	220,24	529,86
92	2760	46,00	0,00	210,11	529,82
93	2790	46,50	0,00	200,44	529,78
94	2820	47,00	0,00	191,23	529,74
95	2850	47,50	0,00	182,43	529,71
96	2880	48,00	0,00	174,04	529,67
97	2910	48,50	0,00	166,04	529,64
98	2940	49,00	0,00	158,40	529,61
99	2970	49,50	0,00	151,12	529,58
100	3000	50,00	0,00	144,17	529,55
101	3030	50,50	0,00	137,54	529,52
102	3060	51,00	0,00	131,63	529,49

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M <sup>3</sup> /S)	QS (M <sup>3</sup> /S)	COTAS (M)
103	3090	51,50	0,00	127,93	529,47
104	3120	52,00	0,00	124,34	529,44
105	3150	52,50	0,00	120,84	529,41
106	3180	53,00	0,00	117,44	529,39
107	3210	53,50	0,00	114,14	529,36
108	3240	54,00	0,00	110,93	529,34
109	3270	54,50	0,00	107,81	529,31
110	3300	55,00	0,00	104,78	529,29
111	3330	55,50	0,00	101,83	529,27
112	3360	56,00	0,00	98,97	529,25
113	3390	56,50	0,00	96,19	529,23
114	3420	57,00	0,00	93,48	529,21
115	3450	57,50	0,00	90,85	529,19
116	3480	58,00	0,00	88,30	529,17
117	3510	58,50	0,00	85,82	529,15
118	3540	59,00	0,00	83,40	529,13
119	3570	59,50	0,00	81,06	529,11
120	3600	60,00	0,00	78,78	529,10
<b>MÁXIMOS</b>			2535,47	1592,43	<b>533,74</b>

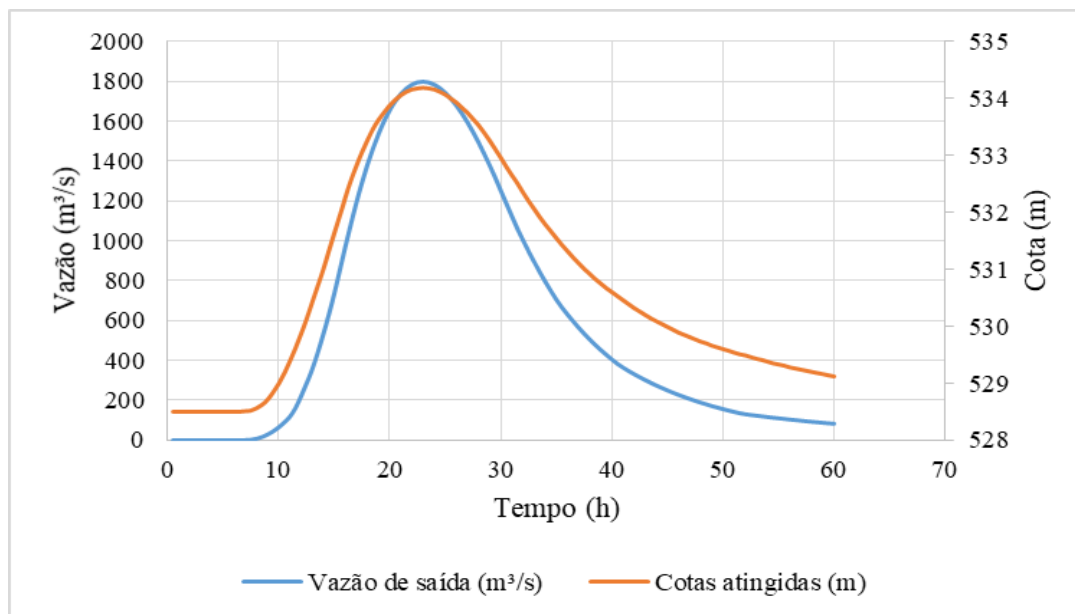
A cheia de projeto para o tempo de retorno de 500 anos atingiu a cota 533,74 m, superior a cota de coroamento da barragem que é de 533,00 m, havendo o galgamento para este tempo de retorno.

Os resultados da simulação realizada para o tempo de retorno de 1.000 anos são sintetizados nas Figuras 6.3 e 6.4 e no Quadro 6.10.

**FIGURA 1.9 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 1.000 ANOS**



**FIGURA 1.10 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS EFLUENTES E COTAS ATINGIDAS PARA TEMPO DE RETORNO DE 1.000 ANOS**



**QUADRO 1.12 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DAS VAZÕES DE PROJETO AFLUENTES (QE) E EFLUENTES (QS) E COTAS ATINGIDAS PARA TR=1.000 ANOS**

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
1	30	0,50	0,00	0,01	528,50
2	60	1,00	0,00	0,01	528,50
3	90	1,50	0,00	0,01	528,50
4	120	2,00	0,00	0,01	528,50
5	150	2,50	0,00	0,01	528,50
6	180	3,00	0,00	0,01	528,50
7	210	3,50	0,00	0,01	528,50
8	240	4,00	0,00	0,01	528,50
9	270	4,50	0,00	0,01	528,50
10	300	5,00	0,06	0,01	528,50
11	330	5,50	0,68	0,02	528,50
12	360	6,00	2,83	0,06	528,50
13	390	6,50	8,54	0,22	528,50
14	420	7,00	23,94	0,67	528,51
15	450	7,50	114,68	2,60	528,52
16	480	8,00	239,11	7,50	528,56
17	510	8,50	378,03	15,97	528,62
18	540	9,00	526,36	28,23	528,71
19	570	9,50	681,62	44,42	528,84
20	600	10,00	842,34	64,60	528,99
21	630	10,50	1007,56	88,79	529,17
22	660	11,00	1176,66	117,00	529,38
23	690	11,50	1349,16	159,98	529,61
24	720	12,00	1524,56	218,70	529,86
25	750	12,50	1702,62	282,85	530,12
26	780	13,00	1883,08	352,30	530,41
27	810	13,50	2065,74	436,02	530,70
28	840	14,00	2249,68	528,90	530,99

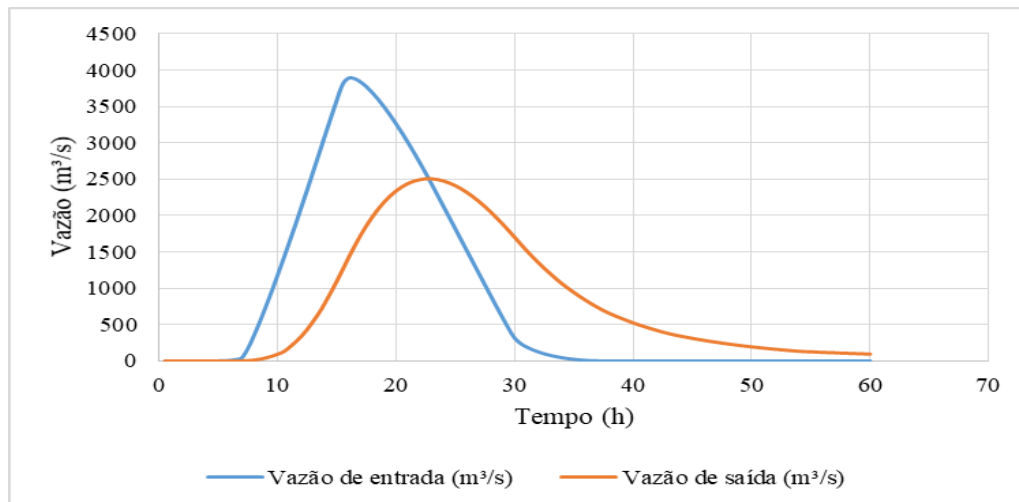
INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M <sup>3</sup> /S)	QS (M <sup>3</sup> /S)	COTAS (M)
29	870	14,50	2433,35	626,68	531,31
30	900	15,00	2613,66	733,84	531,63
31	930	15,50	2780,16	852,04	531,94
32	960	16,00	2844,24	970,07	532,26
33	990	16,50	2843,02	1083,89	532,56
34	1020	17,00	2813,37	1193,23	532,82
35	1050	17,50	2767,26	1293,34	533,06
36	1080	18,00	2709,41	1383,91	533,27
37	1110	18,50	2642,41	1464,90	533,47
38	1140	19,00	2567,96	1538,12	533,63
39	1170	19,50	2487,13	1602,04	533,76
40	1200	20,00	2400,74	1656,42	533,88
41	1230	20,50	2309,58	1701,56	533,98
42	1260	21,00	2214,10	1737,75	534,06
43	1290	21,50	2114,71	1765,32	534,12
44	1320	22,00	2011,64	1784,56	534,16
45	1350	22,50	1905,24	1795,79	534,18
46	1380	23,00	1795,76	1799,32	534,19
47	1410	23,50	1683,40	1795,47	534,18
48	1440	24,00	1570,54	1784,58	534,16
49	1470	24,50	1457,69	1767,11	534,12
50	1500	25,00	1344,83	1743,48	534,07
51	1530	25,50	1231,98	1714,08	534,00
52	1560	26,00	1119,12	1679,29	533,93
53	1590	26,50	1006,27	1639,46	533,84
54	1620	27,00	893,41	1594,91	533,75
55	1650	27,50	780,56	1545,95	533,64
56	1680	28,00	667,79	1492,86	533,53
57	1710	28,50	555,45	1437,22	533,40
58	1740	29,00	444,20	1378,46	533,26
59	1770	29,50	335,65	1316,50	533,11
60	1800	30,00	238,85	1251,98	532,96
61	1830	30,50	183,39	1186,74	532,80
62	1860	31,00	146,35	1122,69	532,65
63	1890	31,50	117,53	1060,59	532,51
64	1920	32,00	94,13	1003,01	532,35
65	1950	32,50	74,74	947,70	532,20
66	1980	33,00	58,53	894,65	532,06
67	2010	33,50	44,96	843,89	531,92
68	2040	34,00	33,68	795,44	531,79
69	2070	34,50	24,38	749,30	531,67
70	2100	35,00	16,79	705,42	531,55
71	2130	35,50	10,78	666,23	531,43
72	2160	36,00	6,19	630,75	531,32
73	2190	36,50	2,94	596,97	531,21
74	2220	37,00	0,91	564,87	531,11
75	2250	37,50	0,00	534,42	531,01
76	2280	38,00	0,00	505,59	530,92
77	2310	38,50	0,00	478,32	530,83
78	2340	39,00	0,00	452,51	530,75
79	2370	39,50	0,00	428,10	530,67
80	2400	40,00	0,00	405,01	530,60

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M <sup>3</sup> /S)	QS (M <sup>3</sup> /S)	COTAS (M)
81	2430	40,50	0,00	383,16	530,53
82	2460	41,00	0,00	364,21	530,46
83	2490	41,50	0,00	347,46	530,39
84	2520	42,00	0,00	331,48	530,32
85	2550	42,50	0,00	316,24	530,26
86	2580	43,00	0,00	301,70	530,20
87	2610	43,50	0,00	287,82	530,14
88	2640	44,00	0,00	274,58	530,09
89	2670	44,50	0,00	261,96	530,04
90	2700	45,00	0,00	249,91	529,99
91	2730	45,50	0,00	238,41	529,94
92	2760	46,00	0,00	227,45	529,89
93	2790	46,50	0,00	216,99	529,85
94	2820	47,00	0,00	207,01	529,81
95	2850	47,50	0,00	197,49	529,77
96	2880	48,00	0,00	188,41	529,73
97	2910	48,50	0,00	179,74	529,70
98	2940	49,00	0,00	171,48	529,66
99	2970	49,50	0,00	163,59	529,63
100	3000	50,00	0,00	156,07	529,60
101	3030	50,50	0,00	148,89	529,57
102	3060	51,00	0,00	142,04	529,54
103	3090	51,50	0,00	135,51	529,51
104	3120	52,00	0,00	130,45	529,49
105	3150	52,50	0,00	126,78	529,46
106	3180	53,00	0,00	123,22	529,43
107	3210	53,50	0,00	119,75	529,41
108	3240	54,00	0,00	116,39	529,38
109	3270	54,50	0,00	113,11	529,35
110	3300	55,00	0,00	109,93	529,33
111	3330	55,50	0,00	106,84	529,31
112	3360	56,00	0,00	103,84	529,28
113	3390	56,50	0,00	100,92	529,26
114	3420	57,00	0,00	98,08	529,24
115	3450	57,50	0,00	95,32	529,22
116	3480	58,00	0,00	92,64	529,20
117	3510	58,50	0,00	90,04	529,18
118	3540	59,00	0,00	87,51	529,16
119	3570	59,50	0,00	85,05	529,14
120	3600	60,00	0,00	82,66	529,12
<b>MÁXIMOS</b>			2844,24	1799,32	<b>534,19</b>

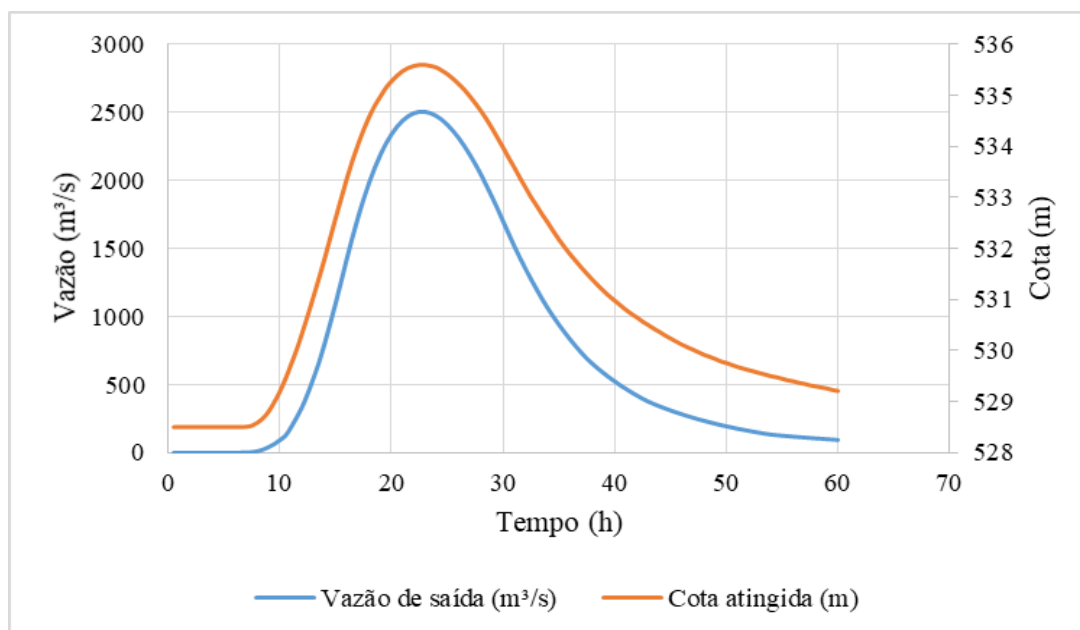
A cheia de projeto para o tempo de retorno de 1.000 anos atingiu a cota 534,19 m, superior a cota de coroamento da barragem que é de 533,00 m, havendo o galgamento para este tempo de retorno.

Os resultados da simulação realizada para o tempo de retorno de 10.000 anos são sintetizados nas Figuras 6.11 e 6.12 e no Quadro 6.13.

**FIGURA 1.11 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 10.000 ANOS**



**FIGURA 1.12 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS EFLUENTES E COTAS ATINGIDAS PARA TEMPO DE RETORNO DE 10.000 ANOS**



**QUADRO 1.13 – BARRAGEM CAMALAÚ: HIDROGRAMAS DAS VAZÕES DE PROJETO AFLUENTES (QE) E EFLUENTES (QS) E COTAS ATINGIDAS PARA TR=10.000 ANOS**

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
1	30	0,50	0,00	0,01	528,50
2	60	1,00	0,00	0,01	528,50
3	90	1,50	0,00	0,01	528,50
4	120	2,00	0,00	0,01	528,50
5	150	2,50	0,00	0,01	528,50
6	180	3,00	0,00	0,01	528,50
7	210	3,50	0,00	0,01	528,50
8	240	4,00	0,00	0,01	528,50

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M³/S)	QS (M³/S)	COTAS (M)
9	270	4,50	0,10	0,01	528,50
10	300	5,00	0,82	0,02	528,50
11	330	5,50	3,06	0,07	528,50
12	360	6,00	8,33	0,23	528,50
13	390	6,50	19,70	0,62	528,50
14	420	7,00	46,12	1,53	528,51
15	450	7,50	175,22	4,60	528,53
16	480	8,00	348,73	11,83	528,59
17	510	8,50	541,28	24,01	528,68
18	540	9,00	746,04	41,43	528,81
19	570	9,50	959,84	64,25	528,99
20	600	10,00	1.180,78	92,54	529,20
21	630	10,50	1.407,58	126,33	529,45
22	660	11,00	1.639,49	186,79	529,73
23	690	11,50	1.875,72	259,03	530,02
24	720	12,00	2.115,75	338,90	530,35
25	750	12,50	2.359,34	435,22	530,69
26	780	13,00	2.605,96	545,67	531,05
27	810	13,50	2.854,61	663,53	531,42
28	840	14,00	3.103,87	800,19	531,80
29	870	14,50	3.351,22	946,35	532,20
30	900	15,00	3.592,03	1.100,05	532,60
31	930	15,50	3.811,24	1.263,12	532,99
32	960	16,00	3.890,33	1.425,32	533,37
33	990	16,50	3.882,44	1.582,65	533,72
34	1020	17,00	3.837,13	1.729,75	534,04
35	1050	17,50	3.770,43	1.863,73	534,33
36	1080	18,00	3.688,41	1.984,99	534,58
37	1110	18,50	3.594,44	2.093,96	534,80
38	1140	19,00	3.490,75	2.189,26	534,98
39	1170	19,50	3.378,70	2.271,19	535,15
40	1200	20,00	3.259,52	2.340,13	535,28
41	1230	20,50	3.134,11	2.396,48	535,39
42	1260	21,00	3.002,95	2.440,69	535,48
43	1290	21,50	2.866,64	2.473,44	535,54
44	1320	22,00	2.725,61	2.494,88	535,58
45	1350	22,50	2.580,12	2.505,38	535,60
46	1380	23,00	2.430,53	2.505,38	535,60
47	1410	23,50	2.277,11	2.495,30	535,58
48	1440	24,00	2.123,02	2.475,68	535,55
49	1470	24,50	1.968,94	2.447,15	535,49
50	1500	25,00	1.814,86	2.410,63	535,42
51	1530	25,50	1.660,78	2.366,37	535,33
52	1560	26,00	1.506,70	2.314,88	535,23
53	1590	26,50	1.352,62	2.256,65	535,12
54	1620	27,00	1.198,55	2.192,11	534,99
55	1650	27,50	1.044,58	2.121,68	534,85
56	1680	28,00	891,07	2.045,77	534,70
57	1710	28,50	738,61	1.964,80	534,54
58	1740	29,00	588,23	1.880,36	534,36
59	1770	29,50	442,33	1.792,18	534,17

INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M <sup>3</sup> /S)	QS (M <sup>3</sup> /S)	COTAS (M)
60	1800	30,00	313,38	1.700,81	533,98
61	1830	30,50	240,63	1.608,84	533,78
62	1860	31,00	192,18	1.518,89	533,59
63	1890	31,50	154,50	1.433,37	533,39
64	1920	32,00	123,85	1.352,24	533,20
65	1950	32,50	98,44	1.274,45	533,01
66	1980	33,00	77,19	1.200,07	532,84
67	2010	33,50	59,38	1.129,13	532,67
68	2040	34,00	44,56	1.061,61	532,51
69	2070	34,50	32,28	999,87	532,34
70	2100	35,00	22,25	941,31	532,18
71	2130	35,50	14,32	885,73	532,03
72	2160	36,00	8,25	833,07	531,89
73	2190	36,50	3,91	783,28	531,76
74	2220	37,00	1,21	736,27	531,63
75	2250	37,50	0,00	691,97	531,51
76	2280	38,00	0,00	654,17	531,39
77	2310	38,50	0,00	618,88	531,28
78	2340	39,00	0,00	585,49	531,17
79	2370	39,50	0,00	553,91	531,07
80	2400	40,00	0,00	524,02	530,98
81	2430	40,50	0,00	495,76	530,89
82	2460	41,00	0,00	469,01	530,80
83	2490	41,50	0,00	443,71	530,72
84	2520	42,00	0,00	419,77	530,65
85	2550	42,50	0,00	397,13	530,57
86	2580	43,00	0,00	375,70	530,50
87	2610	43,50	0,00	358,20	530,43
88	2640	44,00	0,00	341,73	530,37
89	2670	44,50	0,00	326,01	530,30
90	2700	45,00	0,00	311,02	530,24
91	2730	45,50	0,00	296,72	530,18
92	2760	46,00	0,00	283,07	530,12
93	2790	46,50	0,00	270,05	530,07
94	2820	47,00	0,00	257,63	530,02
95	2850	47,50	0,00	245,78	529,97
96	2880	48,00	0,00	234,48	529,92
97	2910	48,50	0,00	223,70	529,88
98	2940	49,00	0,00	213,41	529,84
99	2970	49,50	0,00	203,59	529,79
100	3000	50,00	0,00	194,23	529,76
101	3030	50,50	0,00	185,30	529,72
102	3060	51,00	0,00	176,78	529,68
103	3090	51,50	0,00	168,65	529,65
104	3120	52,00	0,00	160,89	529,62
105	3150	52,50	0,00	153,49	529,59
106	3180	53,00	0,00	146,43	529,56
107	3210	53,50	0,00	139,70	529,53
108	3240	54,00	0,00	133,27	529,50
109	3270	54,50	0,00	129,15	529,48
110	3300	55,00	0,00	125,52	529,45



INTERVALO	TEMPO (MIN)	TEMPO (HORAS)	QE (M <sup>3</sup> /S)	QS (M <sup>3</sup> /S)	COTAS (M)
111	3330	55,50	0,00	121,99	529,42
112	3360	56,00	0,00	118,56	529,40
113	3390	56,50	0,00	115,22	529,37
114	3420	57,00	0,00	111,98	529,35
115	3450	57,50	0,00	108,83	529,32
116	3480	58,00	0,00	105,77	529,30
117	3510	58,50	0,00	102,80	529,28
118	3540	59,00	0,00	99,91	529,26
119	3570	59,50	0,00	97,10	529,23
120	3600	60,00	0,00	94,37	529,21
MÁXIMOS			3.890,33	2.505,38	<b>535,60</b>

Para o tempo de retorno de 10.000 anos existe o galgamento com uma lâmina de 2,60 m sobre a cota da crista da barragem.

A borda normal desta barragem é de 4,50 m (533,00 m - 528,50 m) e para que fosse mantida uma borda livre mínima de 1,00 m, quando da ocorrência da cheia de projeto, resulta numa carga hidráulica de 3,50 m, que para a largura e coeficiente de descarga deste extravasor corresponderia a cheia efluente de 787,7 m<sup>3</sup>/s. Por interpolação esta cheia efluente corresponde a tempo de retorno de 37,7 anos. Considerando a borda normal – 4,50 m, a vazão efluente deste extravasor seria de 1.148,4 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a um tempo de retorno de 120 anos.

#### 6.5. ANÁLISE DE ESTUDOS ANTERIORES

Em setembro de 2016 foi realizada uma reavaliação das cheias de projeto pelo DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas através da KL Engenharia que está inserido no Relatório “SERVIÇOS DE CONSULTORIA ESPECIALIZADA PARA A ELABORAÇÃO DE ESTUDOS TÉCNICOS E PROJETOS NO ÂMBITO DAS AÇÕES PARA A RECUPERAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DOS AÇUDES EXISTENTES INSERIDOS NO SISTEMA DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO COM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO NORDESTE SETENTRIONAL – PISF, R2 – RELATÓRIO DE PROJETO BÁSICO: DIAGNÓSTICO E PLANO DE RECUPERAÇÃO, LOTE II: BARRAGEM CAMALAÚ – PB, TOMO I – TEXTO”.

Nesse estudo as cheias de projeto foram avaliadas pelo método do hidrograma unitário, através do modelo HEC-HMS.

Os principais parâmetros e critérios adotados nesta reavaliação foram:

#### CHUVA DE PROJETO

- Posto de Camalaú (0736021) no período de 1962 a 1991, ajustada estatisticamente pela distribuição normal truncada, tendo definido as seguintes chuvas de projeto diárias.

**QUADRO 1.14 - CHUVAS PROJETO DIÁRIAS**

<b>TEMPO RETORNO (ANOS)</b>	<b>CHUVA DE PROJETO (MM)</b>
10	134,6
20	155,7
50	180,3
100	197,4
1.000	248,3
10.000	295,1

Fonte: KL/DNOCS

A chuva de projeto foi adotada para a duração de 1 hora.

- A distribuição temporal adotada foi a dos blocos alternados com incremento de 5 minutos tendo sido feita a distribuição espacial dessa chuva de projeto.

**TEMPO DE CONCENTRAÇÃO**

- Foi avaliado pela fórmula de Dodge tendo obtido um tempo de concentração de 320 minutos.

**ÁREA DE DRENAGEM**

- A área de drenagem da barragem foi avaliada em 1.045,5 km<sup>2</sup>.

**CURVA NÚMERO**

- O CN – curva número adotado foi de 70.

**EXTRAVASOR**

- Soleira Espessa de 140 m
- Cota soleira 528,50 m

**RELAÇÃO COTA x ÁREA x VOLUME**

- A relação cota x área x volume adotada foi a seguinte:

**QUADRO 1.15 - RELAÇÃO COTA X ÁREA X VOLUME BARRAGEM CAMALAÚ**

COTA (M)	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	VOLUME (HM <sup>3</sup> )	COTA (M)	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	VOLUME (HM <sup>3</sup> )
506,50	0,03	0,00	519,50	1,80	6,08
507,50	0,08	0,05	520,50	2,24	8,10
508,50	0,13	0,16	521,50	2,69	10,56
509,50	0,19	0,32	522,50	3,36	13,58
510,50	0,24	0,53	523,50	4,04	17,29
511,50	0,29	0,80	524,50	4,72	21,67
512,50	0,33	1,11	525,50	5,40	26,73
513,50	0,36	1,46	526,50	6,08	32,47
514,50	0,39	1,83	527,50	6,99	39,00
515,50	0,43	2,25	528,50	7,89	46,44
516,50	0,46	2,69	529,50	8,80	54,79
517,50	0,91	3,38	530,50	9,71	64,04
518,50	1,35	4,50	531,50	10,62	74,21

Fonte: KL/DNOCS

As cheias reavaliadas e os respectivos níveis atingidos naquele estudo foram os seguintes:

TR (ANOS)	Q <sub>IN</sub> (M <sup>3</sup> /S)	Q <sub>OUT</sub> (M <sup>3</sup> /S)	COTA (M)	LÂMINA (M)
1.000	1.725,2	1.470,9	532,2	3,7
10.000	2.168,1	1.466,9	532,2	3,7

Fonte: KL/DNOCS

Concluiu aquele estudo que não haveria galgamento da cheia e, portanto, não requerendo intervenções no extravasor.

Convém comentar que a duração da chuva de projeto adotada de 1 hora (60 minutos) não é adequada ao tempo de concentração da bacia de 320 minutos. Inclusive a seguir é transcrito dois parágrafos apresentados na página 59, segundo e terceiro parágrafos do citado Relatório.

*Em que  $T_c$  = tempo de concentração (minutos);  $A$  = área da bacia, km<sup>2</sup>;  $S_o$  = declividade média do talvegue em m<sup>-1</sup>. Dodge foi determinada para bacias rurais com áreas variando de 140 a 930 km<sup>2</sup>, desta forma mais adequada a região do que a fórmula de Kirpich. O tempo de concentração da bacia do Camalaú é de 320 minutos.*

*Para determinação da distribuição temporal da chuva de projeto utilizou-se o método dos blocos alternados e uma chuva com duração de 1,0 hora (aproximadamente duas vezes o tempo de concentração da Bacia).*

Não foi possível identificar nas informações apresentadas no Relatório se trata de uma não conformidade da redação ou se os cálculos da reavaliação das cheias realizadas com o HEC-HMS foram realizadas com a chuva de duração de 1 hora, gerando uma inconsistência nos seus resultados, parecendo ser esta segunda hipótese a mais provável.

Outro aspecto relevante é a largura do extravasor adotado que foi de 140,00 m em lugar de 88,2 m, conforme cadastrado topográfico realizado pela GEOTECHNIQUE.

Convém ainda destacar que a duração da chuva de projeto e os demais parâmetros utilizados foram semelhantes. Na avaliação atual a chuva de projeto tem uma duração de 15 horas, já os

estudos anteriores avaliaram a cheia de projeto para uma duração de 1 hora, totalmente incompatível com o tempo de contração da bacia hidrográfica da Barragem Camalaú.

Os relatórios de saída do programa IPHS1 são apresentados no Anexo 01.

#### **6.6. CONCLUSÃO**

Com base nos resultados obtidos na atualização dos estudos hidrológicos realizada pela GEOTECHNIQUE, conclui-se que o extravasor da Barragem Camalaú não é compatível com as vazões de projeto, devendo ser realizados estudos complementares para ampliação dessa estrutura, evitando o eventual galgamento do maciço de terra que poderia comprometer a segurança da barragem.

## ESTUDOS HIDRÁULICOS

**AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DA ADEQUAÇÃO DO EXTRAVASOR DA  
BARRAGEM DE CAMALAÚ PERANTE A OCORRÊNCIA DOS  
HIDROGRAMAS DE CHEIA AFLUENTES AO RESERVATÓRIO  
DEFINIDOS NOS NOVOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS ELABORADOS  
PELA MMC ENGENHARIA.**

## **SUMÁRIO**

- 1. APRESENTAÇÃO**
- 2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**
- 3. SUMÁRIO DOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS**
- 4. INTERVENÇÕES PROPOSTAS PARA A ADEQUAÇÃO DA BARRAGEM**
- 5. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO EXTRAVASOR**

## **1. APRESENTAÇÃO**



Este relatório apresenta as equações, critérios e parâmetros de cálculo considerados para a avaliação hidráulica da adequação do extravasor da Barragem de Camalaú perante a ocorrência dos hidrogramas de cheia afluentes ao reservatório definidos nos novos estudos hidrológicos elaborados pela MMC Engenharia.

Os estudos hidráulicos objetivaram verificar se o sangradouro da barragem apresenta condições de veicular com segurança as vazões efluentes previstas.

## **2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A Barragem de Camalaú apresenta um extravasor lateral posicionado em sua ombreira esquerda composto por vertedor de soleira espessa e canal de queda escavado em rocha. Não existe bacia para efetuar a dissipação da energia do escoamento no final do canal de queda e, com isso, promover um retorno tranquilo das águas vertidas ao leito do Rio Monteiro.

Para a avaliação do comportamento hidráulico do sangradouro da barragem foram disponibilizados o levantamento topográfico cadastral do sítio da barragem e as fotos da área de abrangência dos estudos.

As principais características do sangradouro da barragem obtidas dos desenhos “as is” são relacionadas a seguir:

- cota de fundo do canal de aproximação ao vertedor de soleira espessa=528,50m;
- elevação da soleira do vertedor=528,50m;
- elevação da crista da barragem de terra=533,00m;
- largura do canal de aproximação=88,20m;
- cota da crista dos muros laterais do canal de aproximação ao vertedor=532,50m;
- comprimento da soleira vertente=88,20m;
- canal de queda convergente de seção trapezoidal com largura de base de 88,20m em sua seção inicial e de 50m em seu trecho mais estreito;
- as paredes laterais do canal de queda são escavadas em solo e rocha. Os taludes da margem direita do canal apresentam pequena altura em seu trecho inicial, que variam entre 1,39m e 2,24m. A reduzida altura da parede lateral direita do canal de queda é insuficiente para promover o confinamento da água em seu interior para vertimentos de maior magnitude. Deste modo, existe o risco de ocorrer extravasamento lateral de água do canal de queda para o interior do canal de saída do dispositivo de tomada d'água recentemente construído.

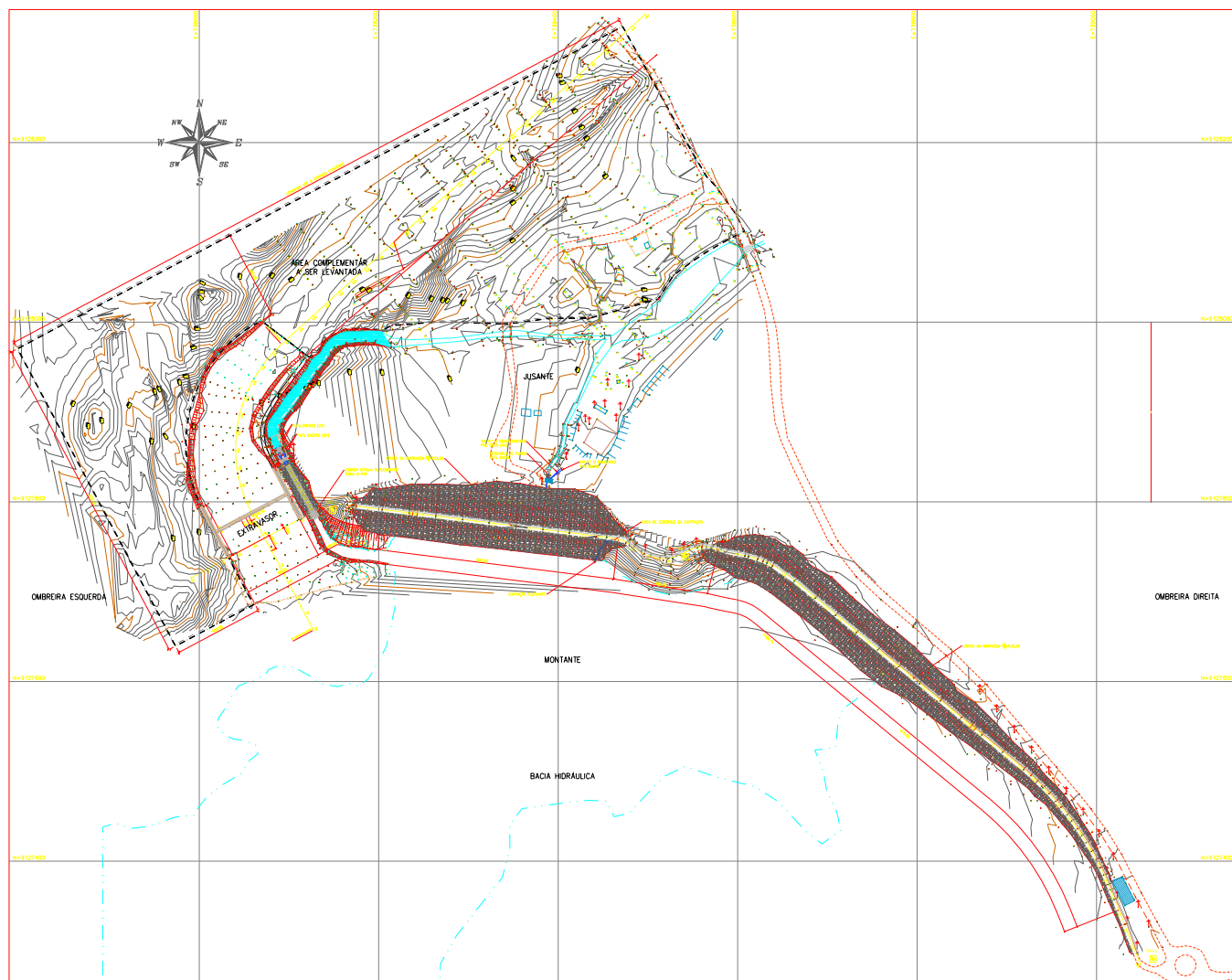
Conforme acima citado, o sangradouro da Barragem de Camalaú não dispõe de bacia de dissipação e canal de restituição das águas vertidas ao leito do Rio Monteiro. Atualmente o volume de água vertido é lançado sobre o terreno natural, por onde escoam superficialmente em elevada velocidade passando sobre uma estrada existente até alcançar o leito do Rio Monteiro. Isso pode resultar em severas erosões no terreno natural e em necessidade de interdição da estrada sempre que ocorrerem chuvas de maior magnitude na bacia do Rio Monteiro.

Em função do acima exposto, verifica-se a necessidade da execução de obras para a adequação do extravasor da barragem a fim de torná-lo apto a veicular com segurança as vazões de projeto definidas no estudo hidrológico elaborado pela MMC Engenharia. As intervenções necessárias contemplam a construção de muros laterais ao longo do canal de

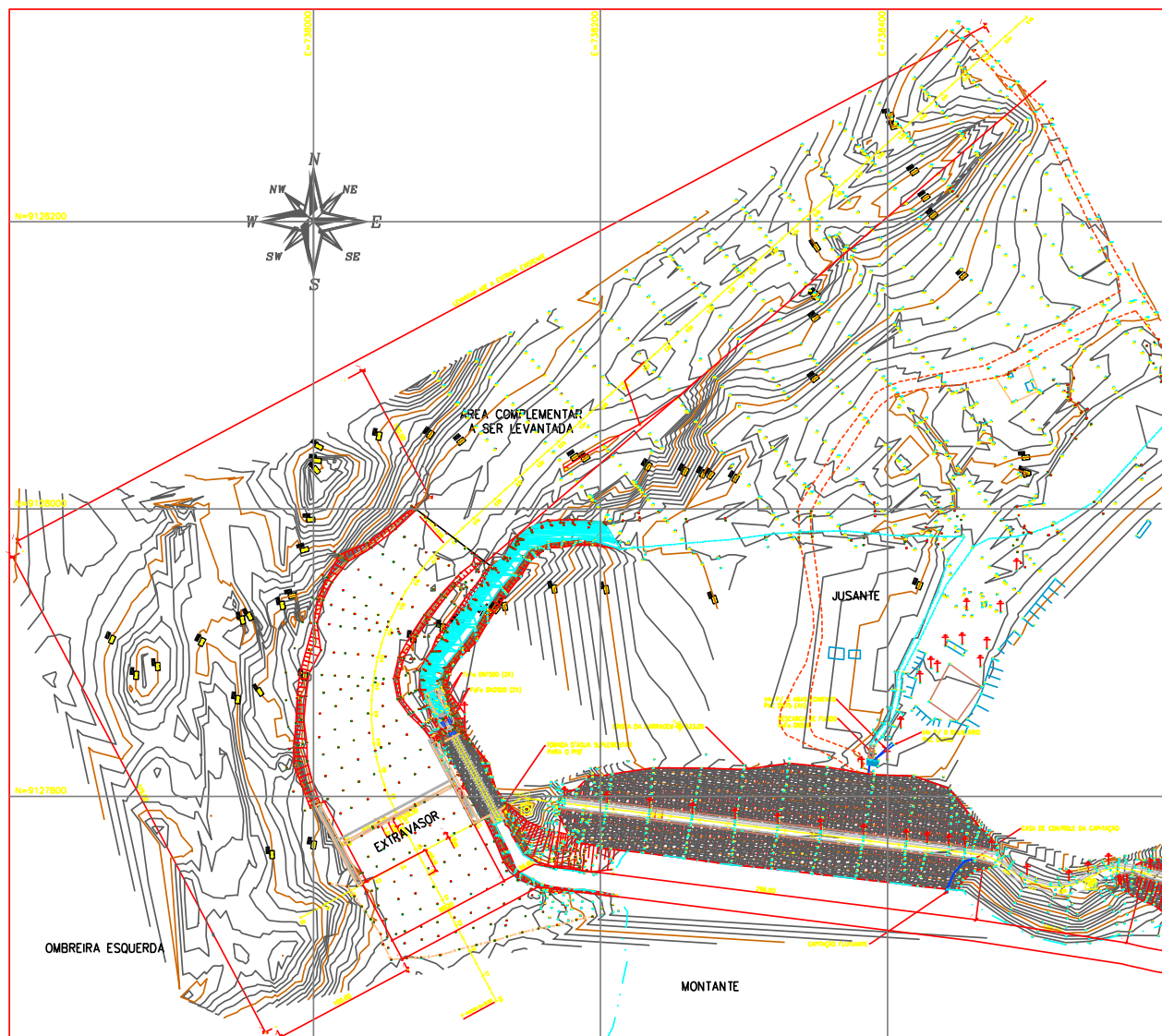
queda com altura suficiente para confinar o volume de água em escoamento, a implantação de uma bacia de dissipação e a execução de um canal de restituição para veicular as águas vertidas ao leito do rio.

As ilustrações a seguir apresentam a configuração atual do barramento em estudo.

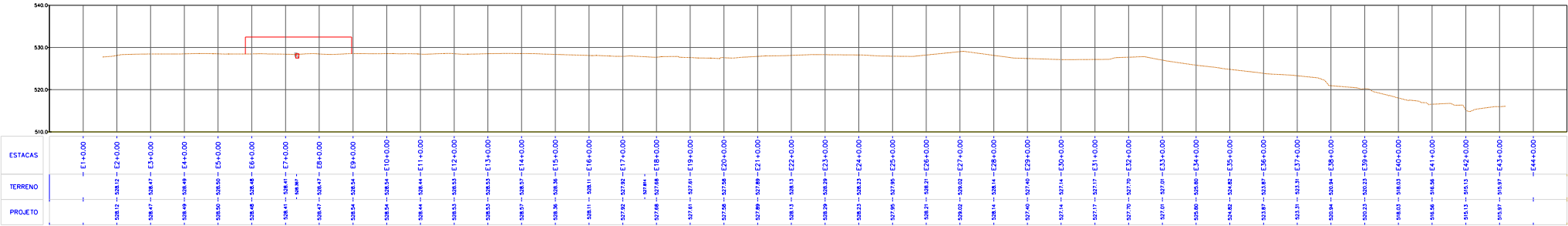
## BARRAGEM DE CAMALAU – ARRANJO GERAL – PLANTA



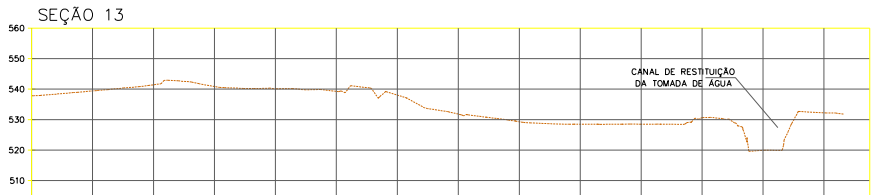
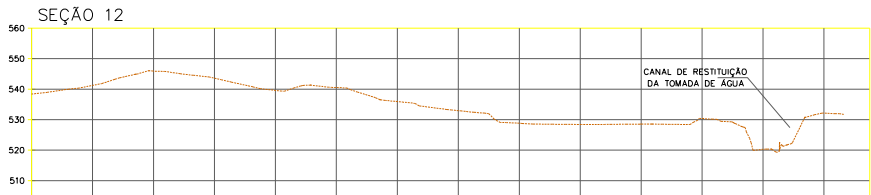
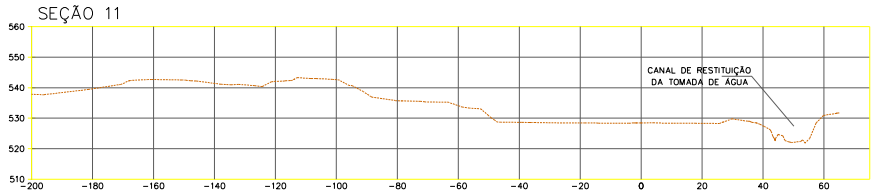
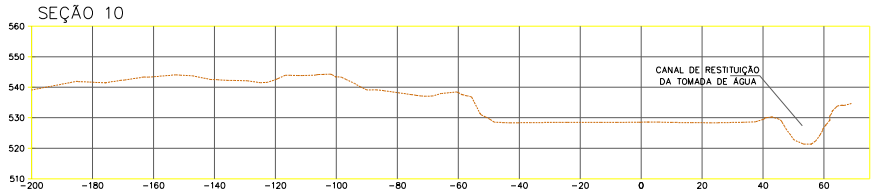
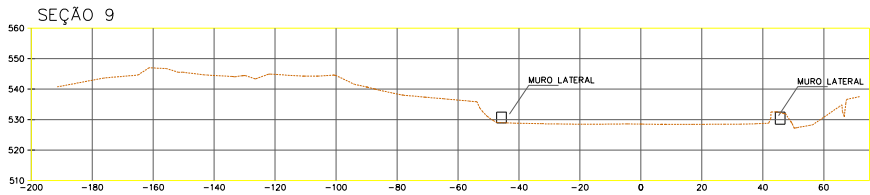
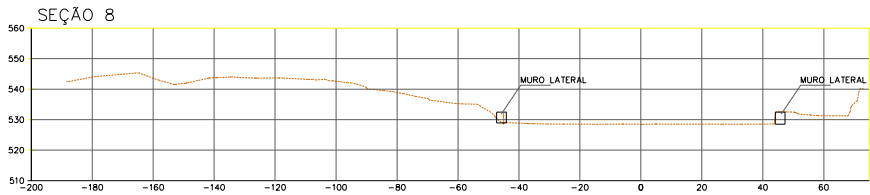
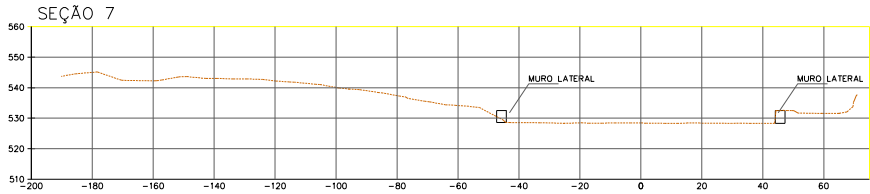
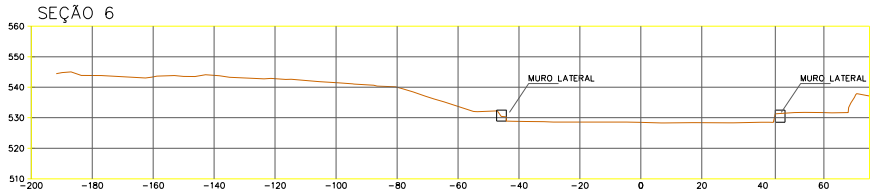
## BARRAGEM DE CAMALAU – EXTRAVASOR – PLANTA



BARRAGEM DE CAMALAÚ – PERFIL LONGITUDINAL PELO EIXO DO SANGRADOURO



BARRAGEM DE CAMALAU – SEÇÕES TRANSVERSAIS





De acordo com os desenhos cadastrais da área do sítio da barragem, o extravasor existente apresenta muros laterais em concreto armado apenas nas proximidades do vertedor do tipo retangular de soleira espessa posicionada na elevação 528,50m. Os muros laterais existentes possuem altura de 4m e extensão de 63m, com tópo posicionado na elevação 532,50m. A crista do maciço de terra da barragem está posicionada na elevação 533,00m, 0,50m acima do tópo dos muros do extravasor.

A partir da estaca 9+0,00m as paredes laterais do canal de queda são formadas pelos taludes da escavação executada para a constituição da calha de escoamento. Conforme mostrado nas seções transversais acima, a altura da parede lateral direita no trecho inicial do canal de queda varia entre 1,39m e 2,24m, o que é insuficiente para confinar o volume de água que seria liberado quando da ocorrência de cheias de maior magnitude na bacia do Rio Monteiro. Da forma em que se encontra o sangradouro da barragem pode ocorrer extravasamento lateral de água que seria lançada sobre a estrutura de abrigo das válvulas dispersoras e canal de restituição do dispositivo de tomada d'água recentemente construído. Isto deverá ser corrigido por meio da construção de muros laterais com altura adequada em toda a extensão do canal de queda.

O canal de queda da barragem em estudo apresenta traçado curvilíneo e largura da seção transversal convergente, onde no trecho inicial próximo ao vertedor possui largura de 88,20m e na seção final (est. 18+0,00m) a largura de base é de 52m. A presença de curva acentuada e a redução da largura de base do canal traz associado um aumento da profundidade da lâmina d'água em escoamento. Isto irá requerer alturas mais elevadas para os muros laterais do canal de queda quando comparado a um canal retilíneo de seção constante.

O extravasor existente tem extensão aproximada de 360m e o final do canal de queda ocorre na estaca 18+0,00m do levantamento topográfico. A partir daí a água é lançada diretamente sobre o terreno natural, o qual possui declividade longitudinal acentuada no trecho de jusante em direção à estrada existente.

Os elementos disponibilizados para a elaboração do presente estudo não informam os valores das vazões de projeto e máxima consideradas na fase de projeto executivo do vertedor da Barragem de Camalaú. Não foi disponibilizada, ainda, a relação entre o nível d'água e a vazão no trecho do Rio Monteiro situado a jusante do barramento, relação conhecida como a curva-chave do rio.

Considerando que a barragem de Camalaú não dispõe de bacia de dissipação o projeto de adequação da barragem objeto do presente relatório contempla a elaboração do projeto de uma bacia dimensionada para a vazão efluente com recorrência de 100 anos.

A avaliação do comportamento hidráulico do sangradouro da barragem é objeto dos capítulos seguintes deste relatório.

### **3. SUMÁRIO DOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS**

A Barragem de Camalaú, construída sobre o leito do Rio Monteiro, está localizada na zona rural do município de Camalaú, estado da Paraíba. A relação cota x área x volume do reservatório utilizada para os estudos de regularização é a seguir apresentada:

**Quadro 2.1 Barragem de Camalaú – Curva Cota-Área-Volume**

<b>Cota (m)</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (Hm<sup>3</sup>)</b>
506,5	0,03	0,00
507,5	0,08	0,05
508,5	0,13	0,16
509,5	0,19	0,32
510,5	0,24	0,53
511,5	0,29	0,8
512,5	0,33	1,11
513,5	0,36	1,46
514,5	0,39	1,83
515,5	0,43	2,25
516,5	0,46	2,69
517,5	0,91	3,38
518,5	1,35	4,50
519,5	1,80	6,08
520,5	2,24	8,10
521,5	2,69	10,56
522,5	3,36	13,58
523,5	4,04	17,29
524,5	4,72	21,67
525,5	5,40	26,73
526,5	6,08	32,47
527,5	6,99	39,00
<b>528,5</b>	<b>7,89</b>	<b>46,44</b>
529,5	8,80	54,79
530,5	9,71	64,04
531,5	10,62	74,21

Fonte: ESTUDOS HIDROLÓGICOS PARA A BARRAGEM CAMALAÚ NO RIO MONTEIRO.

A área da bacia hidrográfica do Rio Monteiro até a seção onde foi construído o maciço de terra da barragem é de 1032 Km<sup>2</sup>. A barragem apresenta uma altura máxima de 27m com capacidade de armazenamento do reservatório de 46,437 Hm<sup>3</sup> quando o NA no lago está posicionado na elevação 528,50m (soleira do vertedor). A crista da barragem está situada na cota 533,00m.

O extravasor da Barragem de Camalaú é constituído por um canal lateral dotado de uma viga de amarração dos muros laterais que forma um vertedor retangular de soleira espessa posicionada na cota 528,50m. O sangradouro está posicionado na ombreira esquerda da barragem, e o canal de aproximação ao vertedor apresenta fundo plano posicionado também na elevação 528,50m com largura de 88,00m.

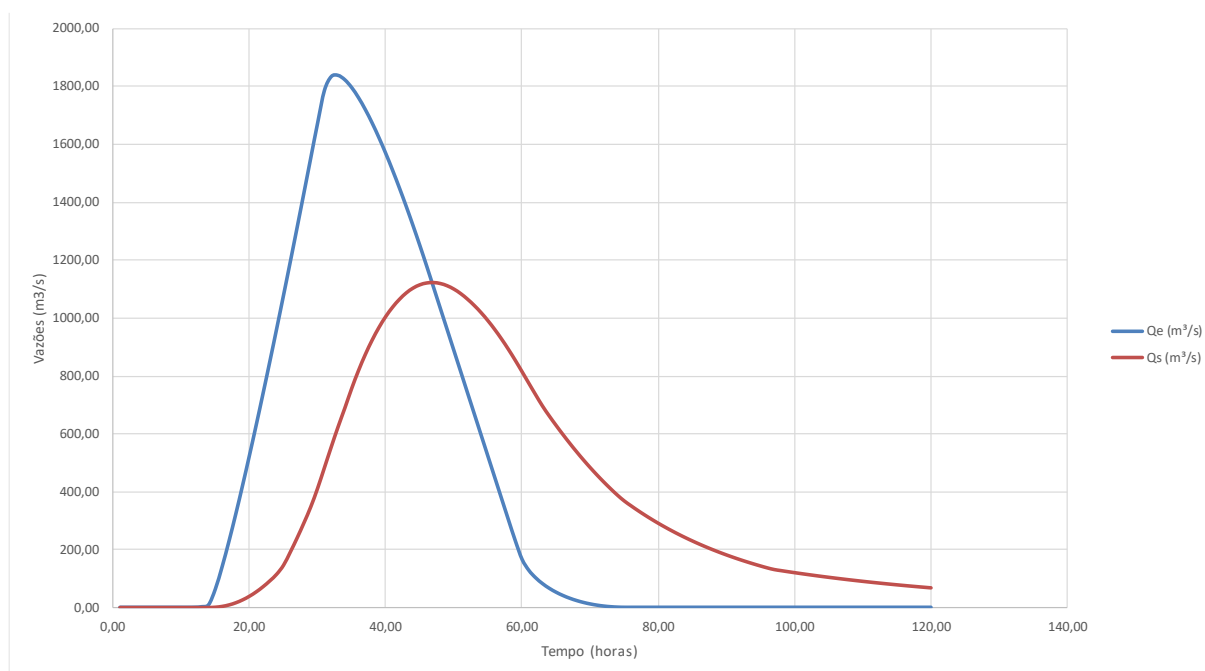
Na fase de estudos iniciais foram elaborados estudos hidrológicos para a determinação das vazões de cheia afluentes e efluentes ao reservatório. O quadro a seguir apresenta as vazões obtidas nestes estudos por meio do Método do Hidrograma Unitário Sintético para a seção do Rio Monteiro onde foi implantada a barragem.

**Quadro 2.1 Cheias de Verificação do Sangradouro de Camalaú – Método do Hidrograma Unitário**

Tempo de Retorno (Anos)	Cheia Afluente (m <sup>3</sup> /s)	Cheia Efluente (m <sup>3</sup> /s)	EL NA Máx. (m)	H Máx. (m)
100	1.840,07	1.122,94	532,65	4,15
500	2.535,47	1.592,43	533,74	5,24
1.000	2.844,24	1.799,32	534,19	5,69
10.000	3.890,33	2.505,38	535,60	7,10

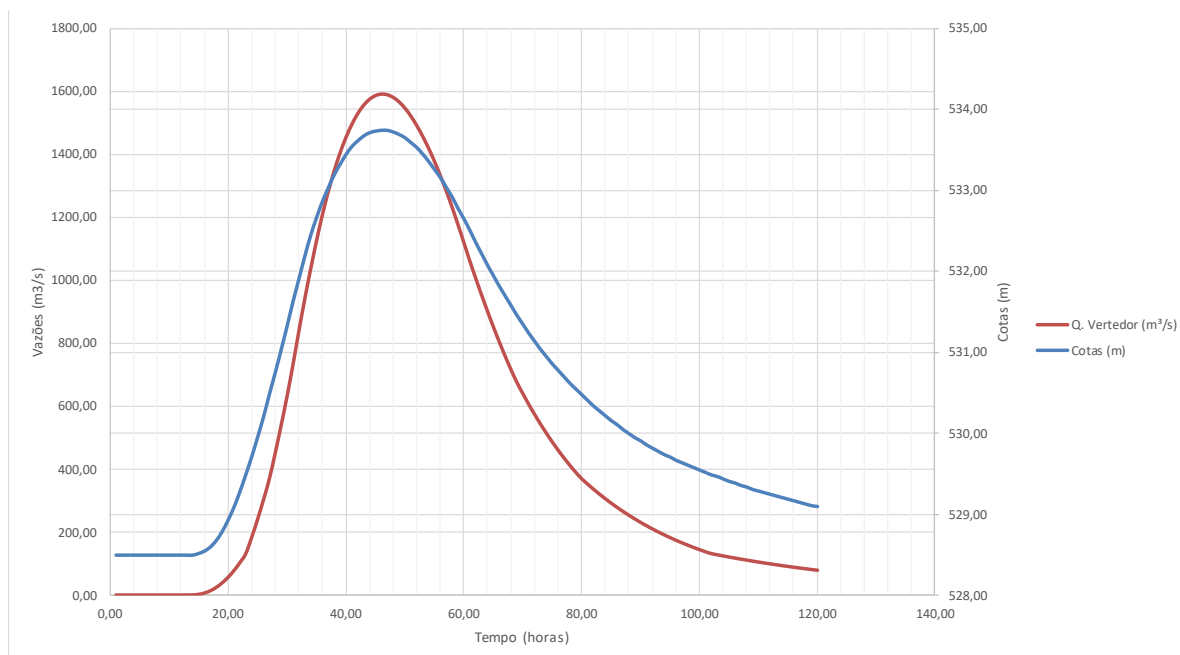
Os gráficos a seguir apresentam os hidrogramas das cheias com recorrências de 100, 500, 1.000 e 10.000 anos.

#### **HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 100 ANOS**



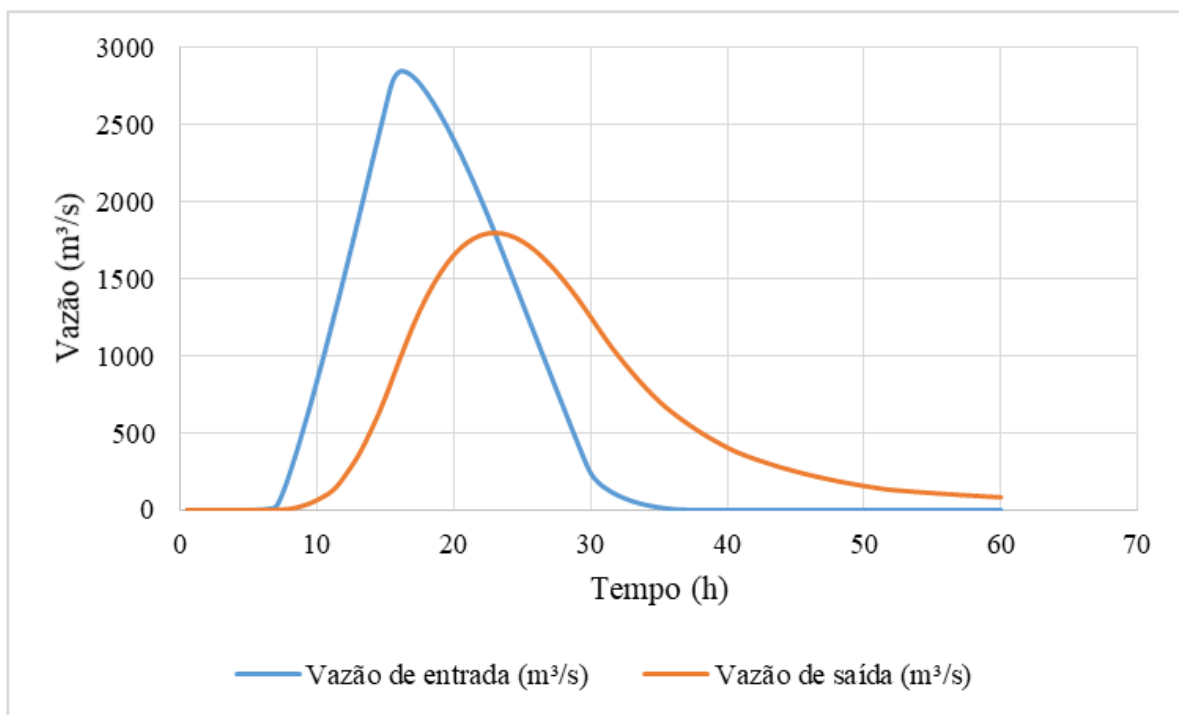
Fonte: Relatório de Estudos Hidrológicos p/ Barragem de Camalaú no Rio Monteiro – MMC Engenharia - 2020.

### HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 500 ANOS



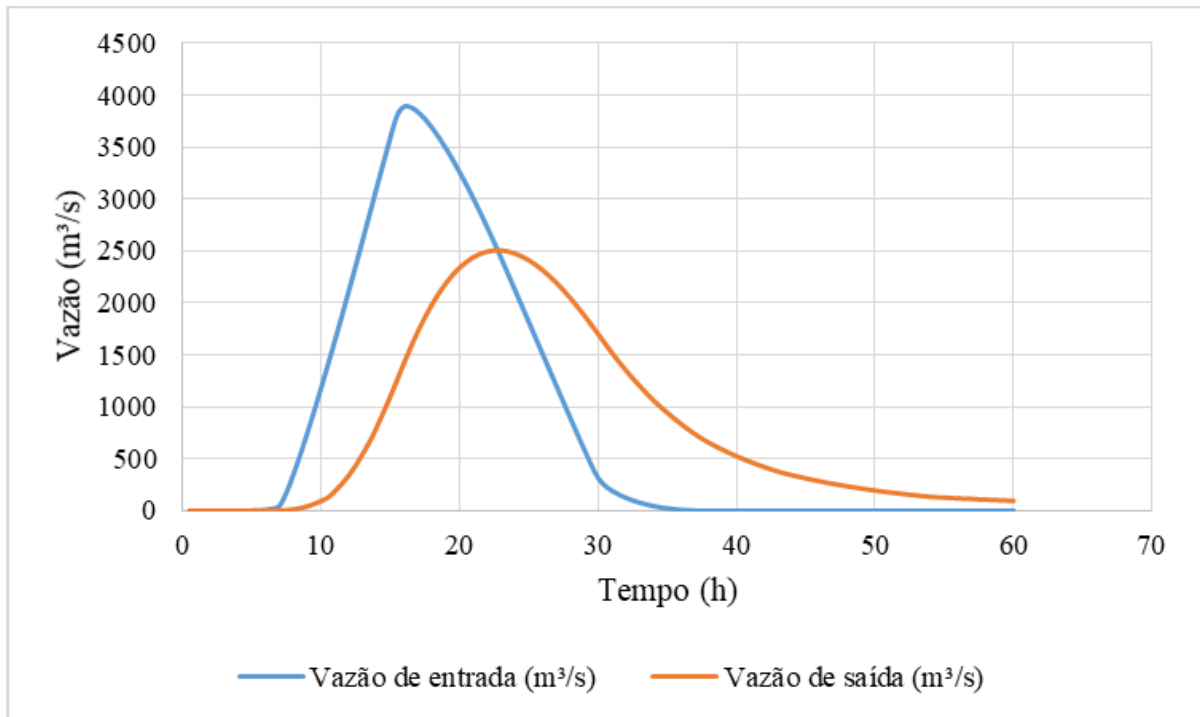
Fonte: Relatório de Estudos Hidrológicos p/ Barragem de Camalaú no Rio Monteiro – MMC Engenharia - 2020.

### HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 1.000 ANOS



Fonte: Relatório de Estudos Hidrológicos p/ Barragem de Camalaú no Rio Monteiro – MMC Engenharia - 2020.

### HIDROGRAMAS DE ENTRADA E SAÍDA PARA TEMPO DE RETORNO DE 10.000 ANOS



Fonte: Relatório de Estudos Hidrológicos p/ Barragem de Camalaú no Rio Monteiro – MMC Engenharia - 2020.

Com exceção para a vazão com recorrência de 100 anos, para os demais cenários avaliados a cota atingida pelo nível d'água no reservatório seria sempre superior a cota de coroamento da barragem (533,00 m), indicando que as cheias para os tempos de retorno de 500, 1.000 e 10.000 anos provocariam o extravasamento de água sobre o maciço de terra da barragem ("over top").

Esta ocorrência não pode ser admitida visto que poderia resultar na ruptura do maciço de terra da barragem. No capítulo seguinte são propostas intervenções para tornar a estrutura disponível da Barragem de Camalaú apta a veicular as cheias de projeto com recorrências milenar e decamilenar.

Estas intervenções contemplam uma forma de elevação da crista do barramento para que o reservatório fique apto a abrigar o volume de água resultante da ocorrência da cheia de projeto e as obras a serem executadas no extravasor existente para torna-lo capaz de conduzir o volume de água efluente e, ainda, dissipar a energia do escoamento antes do lançamento no canal de restituição das águas vertidas ao leito do Rio Monteiro.

#### **4 INTERVENÇÕES PROPOSTAS PARA A ADEQUAÇÃO DA BARRAGEM**

Conforme mencionado anteriormente, em sua configuração atual o extravasor da Barragem de Camalaú não apresenta condições de liberar as vazões de projeto obtidas nos novos estudos hidrológicos elaborados pela MMC engenharia sem que houvesse o extravasamento de água sobre o maciço de terra (elevação da crista=533,00m) para as vazões com recorrências de 500, 1.000 e 10.000 anos.

Foram propostas, então, intervenções a serem realizadas no maciço de terra e extravasor para tornar a barragem apta a liberar para jusante as vazões de referência com recorrências de 1.000 anos e 10.000 anos sem a ocorrência de galgamento ("over top"). Estas intervenções são relacionadas a seguir:

- execução de aterro para elevação da crista do maciço de terra da barragem para a cota 534,40m;
- construção de uma mureta de concreto armado com altura de 1,20m em toda a crista do talude de montante da barragem;
- elevação dos muros laterais do extravasor existente da cota atual 532,50m para a cota 535,60m;
- construção de muros laterais em concreto armado com altura adequada ao longo de todo o canal de queda e bacia de dissipação;
- implantação de uma bacia de dissipação do tipo ressalto hidráulico.

Com a implantação das intervenções propostas o reservatório de Camalaú estará apto a conter as cheias na bacia hidrográfica do Rio Monteiro associadas a precipitações extremas com recorrências de até 10.000 anos. Com isto o reservatório passará a estar enquadrado nos critérios requeridos pela legislação vigente de segurança de barragens.

O capítulo seguinte deste relatório aborda o dimensionamento hidráulico do extravasor para o novo arranjo proposto para a Barragem de Camalaú.



## **5. DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO EXTRAVASOR**

A presente memória tem o objetivo de apresentar o dimensionamento e a verificação do comportamento hidráulico do sangradouro Barragem de Camalaú perante a ocorrência das vazões efluentes máximas previstas de 1799,32 m<sup>3</sup>/s e 2505,38 m<sup>3</sup>/s. Estas vazões são correspondentes à chegada dos hidrogramas de cheias milenar e decamilenar com os níveis d'água no lago posicionados nas elevações 534,19m e 535,60m, respectivamente.

Os estudos objetivam determinar se os diversos componentes do sangradouro possuem capacidade para veicular as vazões de referência previstas com segurança.

O novo extravasor da Barragem de Camalaú será constituído pelos seguintes componentes:

- canal de aproximação ao vertedor;
- vertedor retangular do tipo soleira espessa;
- canal de queda;
- bacia de dissipação do tipo ressalto hidráulico;

### 5.1 DIMENSIONAMENTO DO VERTEADOR

Os dados utilizados para o dimensionamento da soleira vertente são:

- largura da soleira = 88m;
- largura da bacia de dissipação = 50m;
- cota da soleira vertente = 528,50m;
- cota do fundo do canal de aproximação = 528,50 m;
- vazão de projeto do vertedor ( $Q_o$ ) = 1799,32 m<sup>3</sup>/s, carga de projeto ( $H_o$ ) = 5,69m, 1.000 anos;
- vazão máxima vertedor ( $Q_{máx.}$ ) = 2505,38 m<sup>3</sup>/s, carga máxima ( $H_{máx.}$ ) = 7,10m, 10.000 anos.

A vazão efluente através do vertedor retangular de soleira espessa será obtida por meio de:

$$Q = C.L.H^{3/2} \quad (IV)$$

Onde, C: coeficiente de descarga do vertedor (m<sup>1/2</sup>-s<sup>-1</sup>);

L: comprimento da soleira vertente (m);

H: carga hidráulica sobre a soleira do vertedor (m).

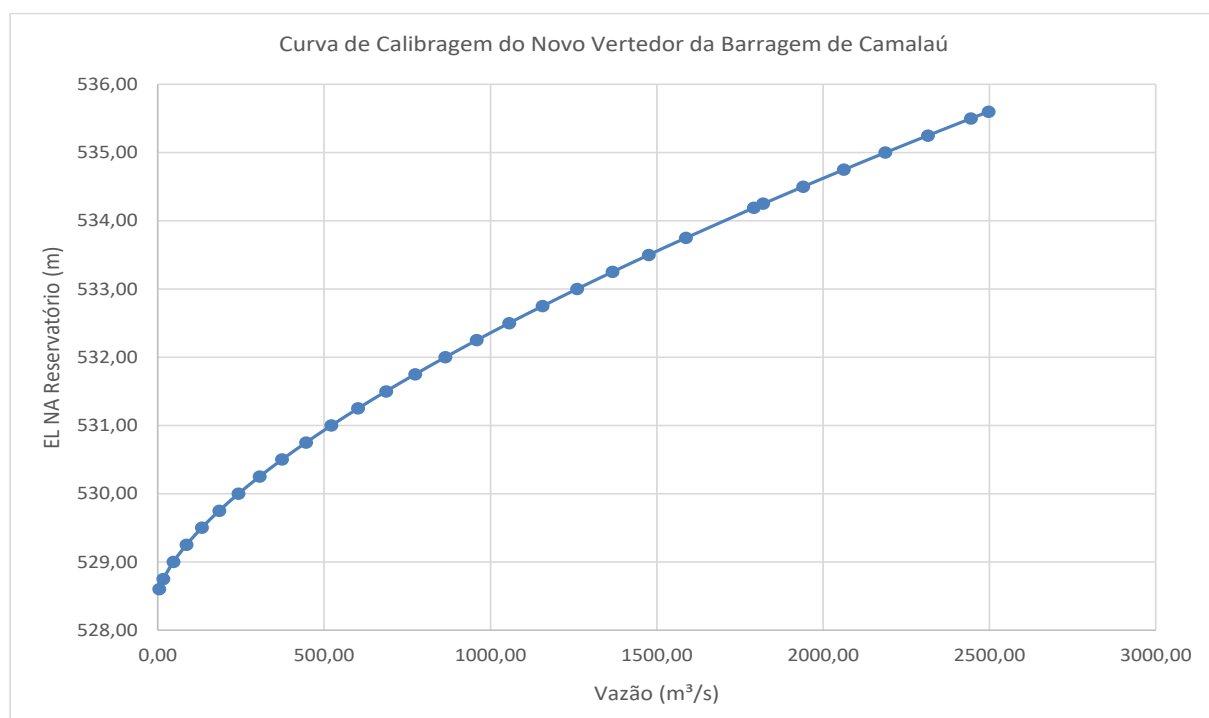
Em função do arranjo de implantação da soleira vertente adotou-se o coeficiente de descarga  $C=1,50 \text{ m}^{1/2}\text{-s}^{-1}$  para o vertedor.

O cálculo da vazão efluente em função da carga hidráulica sobre a soleira vertente é apresentado no quadro a seguir:

**Quadro 5.1 Vazão x Carga Hidráulica no Novo Vertedor da Barragem de Camalaú**

H (m)	Largura (m)	Cota da Soleira (m)	Coefficiente Descarga ( $m^{1/2}.s^{-1}$ )	Vazão Efluente ( $m^3/s$ )	Elevação NA Mont. (m)	Observação
0,10	88,00	528,50	1,50	4,17	528,60	
0,25	88,00	528,50	1,50	16,50	528,75	
0,50	88,00	528,50	1,50	46,67	529,00	
0,75	88,00	528,50	1,50	85,74	529,25	
1,00	88,00	528,50	1,50	132,00	529,50	
1,25	88,00	528,50	1,50	184,48	529,75	
1,50	88,00	528,50	1,50	242,50	530,00	
1,75	88,00	528,50	1,50	305,58	530,25	
2,00	88,00	528,50	1,50	373,35	530,50	
2,25	88,00	528,50	1,50	445,50	530,75	
2,50	88,00	528,50	1,50	521,78	531,00	
2,75	88,00	528,50	1,50	601,97	531,25	
3,00	88,00	528,50	1,50	685,89	531,50	
3,25	88,00	528,50	1,50	773,39	531,75	
3,50	88,00	528,50	1,50	864,32	532,00	
3,75	88,00	528,50	1,50	958,56	532,25	
4,00	88,00	528,50	1,50	1056,00	532,50	
4,25	88,00	528,50	1,50	1156,53	532,75	
4,50	88,00	528,50	1,50	1260,06	533,00	
4,75	88,00	528,50	1,50	1366,51	533,25	
5,00	88,00	528,50	1,50	1475,80	533,50	
5,25	88,00	528,50	1,50	1587,86	533,75	
5,69	88,00	528,50	1,50	1791,61	534,19	Tr=1.000 Anos
5,75	88,00	528,50	1,50	1820,02	534,25	
6,00	88,00	528,50	1,50	1940,00	534,50	
6,25	88,00	528,50	1,50	2062,50	534,75	
6,50	88,00	528,50	1,50	2187,48	535,00	
6,75	88,00	528,50	1,50	2314,89	535,25	
7,00	88,00	528,50	1,50	2444,67	535,50	
7,10	88,00	528,50	1,50	2497,25	535,60	Tr=10.000 Anos

A curva de calibragem do vertedor expressa graficamente a relação entre a elevação do nível d'água no reservatório e a vazão efluente através do sangradouro. O seu gráfico é mostrado a seguir.



## 5,2 GEOMETRIA DO SANGRADOURO

De acordo com o arranjo proposto para o novo extravasor da barragem, o canal de aproximação ao vertedor terá extensão de 30m com seção retangular de largura 88m e fundo horizontal posicionado na elevação 528,50m. Contatará com muros laterais em concreto armado com topo posicionado na cota 535,60m.

O canal de queda terá início logo após a cinta de amarração dos muros laterais existentes, de onde prosseguirá com declividades de 0,2804%, 6,9833% e 21,6000% até a seção de início da bacia de dissipação. Em função da necessidade de se manter a configuração atual este canal apresentará trajetória curvilínea com redução gradual da largura da base passando de 88m na seção de início para 50m na seção de início da bacia de dissipação. Ao longo de todo o canal de queda o regime de escoamento será do tipo supercrítico, caracterizado por reduzidas profundidades e elevadas velocidades de escoamento. A geometria da seção transversal do canal será aproximadamente trapezoidal, formada pelo muro vertical em concreto a ser construído à direita e pelo talude natural do terreno à esquerda.

A bacia de dissipação será do tipo ressalto hidráulico, constituída por um canal trapezoidal com fundo horizontal liso de largura de base de 50m, paredes laterais escavadas em rocha e extensão total de 85m. O fundo da bacia de dissipação estará posicionada na elevação 507,00m, e para possibilitar a formação de um colchão de água no seu interior o projeto prevê a construção de um dique de terra com crista posicionada na cota 512,00m. A restituição das águas vertidas ao leito do Rio Monteiro ocorrerá por meio de tubulações a serem instaladas no fundo do dique.

A extensão total do novo extravasor desde o início do canal de aproximação até o final da bacia de dissipação será de 911m.

A geometria do novo sangradouro da Barragem de Camalaú é ilustrada nas figuras seguintes.

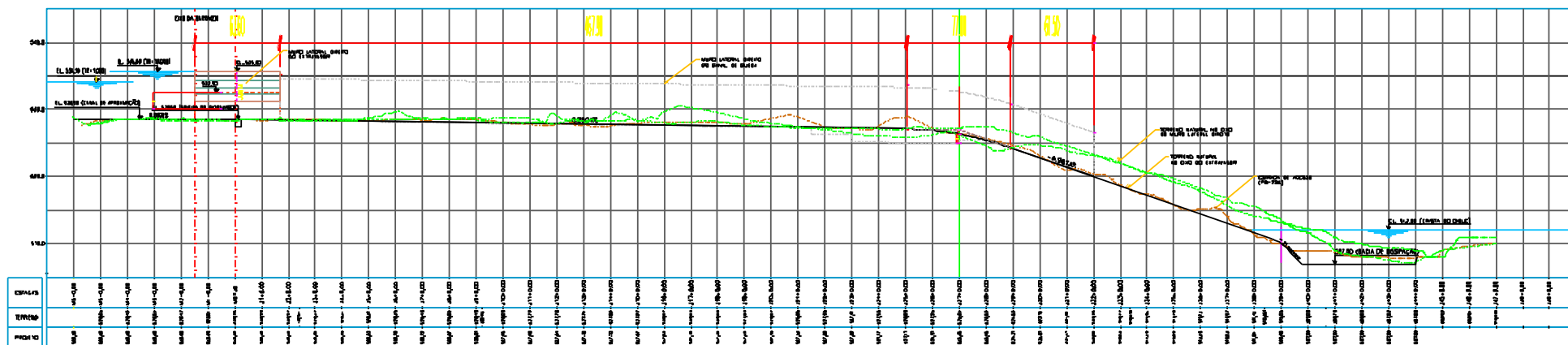


Figura 1. Perfil Longitudinal ao Longo do Novo Extravaso da Barragem de Camalaú



### 5.3 PERFIL DA LÂMINA D'ÁGUA AO LONGO DO CANAL DE QUEDA

A determinação do perfil da lâmina d'água ao longo do canal de queda (rápido) foi realizada utilizando-se as equações do escoamento gradualmente variado em canais.

A energia total em uma seção do canal é dada por:

$$E = d \cos \alpha + \frac{V^2}{2g} + z$$

onde,  $z$  = cota do fundo do canal (m);

$V$  = velocidade (m/s);

$d$  = profundidade (normal) do escoamento (m);

$\alpha$  = ângulo de inclinação do canal de queda (graus).

A equação da energia aplicada a duas seções adjacentes do canal de queda conduz a:

$$E_1 = E_2 + \Delta H_{f_{1-2}}$$

onde,  $E_1$  = energia total na seção 1 – montante (m);

$E_2$  = energia total na seção 2 – jusante (m);

$\Delta H_{f_{1-2}}$  = perda de carga entre as seções 1 e 2 (m);

A perda de carga por fricção pode ser expressa como:

$$\Delta H_{f_{1-2}} = S_f \cdot \Delta x$$

onde,  $S_f$  = declividade média da linha de energia (m/m);

$\Delta x$  = distância entre as seções 1 e 2 (m).

A declividade da linha de energia em uma seção do canal foi obtida a partir da aplicação da equação de Manning, o que conduz a:

$$S_f = \left( \frac{q \cdot n \cdot (L + 2d)^{2/3}}{L^{2/3} \cdot d^{2/3}} \right)^2$$

onde,  $q$  = vazão específica (m<sup>3</sup>/s.m);

$L$  = largura do canal (m);

$d$  = profundidade (normal) do escoamento (m);

$n$  = coeficiente de rugosidade (m<sup>-1/3</sup>. s)

Para o presente estudo foi adotado  $n=0,025 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Para a integração da equação representativa do escoamento permanente gradualmente variado em canais abertos de geometria irregular foi utilizado o software “HEC RAS – River Analysis System”, versão 4.1, de autoria e disponibilizado pelo U. S. Army Corps of Engineers.

Nas planilhas seguintes são apresentados os cálculos necessários à avaliação do perfil do escoamento gradualmente variado ao longo do canal de queda.

Os dados utilizados para o dimensionamento da soleira vertente são:

- largura do vertedor = 88m;
- largura da bacia de dissipação = 50m;
- cota do fundo do canal de aproximação = 528,50 m;

- vazão de projeto do extravasor ( $Q_o$ ) = 1799,32 m<sup>3</sup>/s, carga de projeto ( $H_o$ ) = 5,69m, 1.000 anos;
- vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x.}$ ) = 2505,38 m<sup>3</sup>/s, carga máxima ( $H_{m\acute{a}x.}$ ) = 7,10m, 10.000 anos;
- vazão de projeto da bacia de dissipação ( $Q_{100}$ ) = 1122,94 m<sup>3</sup>/s, carga de projeto ( $H_o$ ) = 4,15m, período de recorrência de 100 anos;

As principais características do escoamento ( $T_r=100$  anos) no final do canal de queda (início da bacia de dissipação) são discriminadas a seguir:

- vazão ( $Q_{100}$ ) = 1122,94 m<sup>3</sup>/s;
- vazão específica ( $q_{100}$ ) = 22,4588 m<sup>3</sup>/s/m;
- cota do fundo do canal = 507,00m;
- profundidade da lâmina d'água ( $d_B$ ) = 1,390m;
- velocidade ( $V_B$ ) = 15,71 m/s;
- Energia Específica ( $EE_B$ ) = 13,98m;
- número de Froude ( $F_B$ ) = 4,31.

Os parâmetros acima serão utilizados para o dimensionamento hidráulico da bacia de dissipação. A opção pelo dimensionamento da bacia para a vazão com recorrência de 100 anos foi escolhida pelo cliente por estar associada a um menor custo de implantação.

As principais características do escoamento ( $T_r=1.000$  anos) no final do canal de queda são relacionadas a seguir:

- vazão ( $Q_o$ ) = 1799,32 m<sup>3</sup>/s;
- vazão específica ( $q_o$ ) = 35,9864 m<sup>3</sup>/s/m;
- cota do fundo do canal = 507,00m;
- profundidade da lâmina d'água ( $d_B$ ) = 2,040 m;
- velocidade ( $V_B$ ) = 16,95 m/s;
- Energia Específica ( $EE_B$ ) = 16,69m;
- número de Froude ( $F_B$ ) = 3,86.

As principais características do escoamento ( $T_r=10.000$  anos) no final do canal de queda (início da bacia) são relacionadas a seguir:

- vazão ( $Q_{m\acute{a}x.}$ ) = 2505,38 m<sup>3</sup>/s;
- vazão específica ( $q_{M\acute{A}X.}$ ) = 50,1076 m<sup>3</sup>/s/m;
- cota de fundo do canal = 507,00m;
- profundidade da lâmina d'água ( $d_B$ ) = 2,670 m;
- velocidade ( $V_B$ ) = 17,79 m/s;
- Energia Específica ( $EE_B$ ) = 18,81m;
- número de Froude ( $F_B$ ) = 3,56.



**Quadro 5.2 Cálculo do Perfil da Lâmina d'Água ao Longo do Novo Extravaso – Tr=100 anos**

Estaca			Distance	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	W.Depth	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
			(m)		(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m²)	(m)	
0	+	5,00	0,00	100	1122,94	528,50	531,04	2,54	5,01	223,98	88,20	1,00
2	+	0,00	35,00	99	1122,94	528,40	530,87	2,47	5,14	218,37	89,67	1,05
4	+	0,00	40,00	98	1122,94	528,29	531,00	2,71	5,16	217,72	80,35	1,00
6	+	0,00	40,00	97	1122,94	528,18	531,22	3,04	5,38	208,73	71,25	1,00
8	+	0,00	40,00	96	1122,94	528,07	531,33	3,26	5,54	202,82	64,99	1,00
10	+	0,00	40,00	95	1122,94	527,96	531,63	3,67	5,88	191,09	54,77	1,00
12	+	0,00	40,00	94	1122,94	527,84	530,99	3,15	6,47	173,43	59,48	1,21
14	+	0,00	40,00	93	1122,94	527,73	530,67	2,94	6,50	172,77	69,69	1,32
16	+	0,00	40,00	92	1122,94	527,62	531,19	3,57	5,22	215,18	77,68	1,00
18	+	0,00	40,00	91	1122,94	527,51	531,21	3,70	5,09	220,45	83,60	1,00
20	+	0,00	40,00	90	1122,94	527,40	530,53	3,13	5,82	192,93	81,39	1,20
22	+	0,00	40,00	89	1122,94	527,28	530,05	2,77	6,10	184,11	78,96	1,28
24	+	0,00	40,00	88	1122,94	527,04	530,39	3,35	5,28	212,72	74,88	1,00
26	+	0,00	40,00	87	1122,94	526,91	530,46	3,55	5,46	205,48	67,52	1,00
27	+	0,00	20,00	86	1122,94	526,35	529,16	2,81	7,12	157,73	62,27	1,43
28	+	0,00	20,00	85	1122,94	525,46	528,23	2,77	7,96	141,06	55,43	1,59
30	+	0,00	40,00	84	1122,94	522,81	524,96	2,15	10,43	107,62	50,22	2,28
32	+	0,00	40,00	83	1122,94	520,02	521,92	1,90	11,81	95,06	50,19	2,74
34	+	0,00	40,00	82	1122,94	517,23	520,51	3,28	11,68	96,17	49,04	2,66
36	+	0,00	40,00	81	1122,94	514,88	518,22	3,34	12,19	92,14	53,45	2,96
38	+	0,00	40,00	80	1122,94	511,02	514,34	3,32	13,48	83,33	49,02	3,30
39	+	0,00	20,00	79	1122,94	509,36	512,72	3,36	13,79	81,46	46,64	3,33
39	+	15,00	15,00	78	1122,94	507,00	508,39	1,39	15,71	71,46	52,78	4,31

**Quadro 5.3 Cálculo do Perfil da Lâmina d'Água ao Longo do Novo Extravaso – Tr=1000 anos**

Estaca			Distance	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	W.Depth	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
			(m)		(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m²)	(m)	
0	+	5,00	0,00	100	1799,32	528,50	531,98	3,48	5,86	307,25	88,20	1,00
2	+	0,00	35,00	99	1799,32	528,40	531,69	3,29	6,15	292,39	90,73	1,09
4	+	0,00	40,00	98	1799,32	528,29	532,01	3,72	6,03	298,26	80,46	1,00
6	+	0,00	40,00	97	1799,32	528,18	532,38	4,20	6,10	294,97	78,44	1,00
8	+	0,00	40,00	96	1799,32	528,07	532,49	4,42	6,44	279,18	66,12	1,00
10	+	0,00	40,00	95	1799,32	527,96	532,97	5,01	6,74	266,77	57,87	1,00
12	+	0,00	40,00	94	1799,32	527,84	531,97	4,13	7,71	233,34	63,02	1,28
14	+	0,00	40,00	93	1799,32	527,73	531,40	3,67	7,97	225,74	74,39	1,46
16	+	0,00	40,00	92	1799,32	527,62	532,26	4,64	5,99	300,43	82,57	1,00
18	+	0,00	40,00	91	1799,32	527,51	532,21	4,70	5,88	308,27	91,27	0,99
20	+	0,00	40,00	90	1799,32	527,40	531,40	4,00	6,74	269,92	92,55	1,22
22	+	0,00	40,00	89	1799,32	527,28	530,99	3,71	6,90	260,72	84,54	1,25
24	+	0,00	40,00	88	1799,32	527,04	531,50	4,46	6,01	299,59	81,71	1,00
26	+	0,00	40,00	87	1799,32	526,91	531,67	4,76	6,16	292,19	75,90	1,00
27	+	0,00	20,00	86	1799,32	526,35	530,27	3,92	7,80	230,68	70,06	1,37
28	+	0,00	20,00	85	1799,32	525,46	529,42	3,96	8,52	211,17	62,01	1,47
30	+	0,00	40,00	84	1799,32	522,81	526,04	3,23	11,11	162,00	50,33	1,98
32	+	0,00	40,00	83	1799,32	520,02	522,82	2,80	12,81	140,49	50,28	2,45
34	+	0,00	40,00	82	1799,32	517,23	521,31	4,08	12,99	138,56	57,38	2,67
36	+	0,00	40,00	81	1799,32	514,88	518,92	4,04	13,57	132,59	63,30	2,99
38	+	0,00	40,00	80	1799,32	511,02	515,05	4,03	14,78	121,73	60,37	3,32
39	+	0,00	20,00	79	1799,32	509,36	513,43	4,07	15,07	119,42	61,71	3,46
39	+	15,00	15,00	78	1799,32	507,00	509,04	2,04	16,95	106,15	54,08	3,86

**Quadro 5.4 Cálculo do Perfil da Lâmina d'Água ao Longo do Novo Extravaso – Tr=10000 anos**

Estaca			Distance	River Sta	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	W.Depth	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude
			(m)		(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m²)	(m)	
0	+	5,00	0,00	100	2505,38	528,50	532,84	4,34	6,54	383,15	88,20	1,00
2	+	0,00	35,00	99	2505,38	528,40	532,42	4,02	6,98	358,94	91,19	1,12
4	+	0,00	40,00	98	2505,38	528,29	532,91	4,62	6,75	371,32	80,55	1,00
6	+	0,00	40,00	97	2505,38	528,18	533,39	5,21	6,64	377,39	84,74	1,00
8	+	0,00	40,00	96	2505,38	528,07	533,57	5,50	7,13	351,31	67,97	1,00
10	+	0,00	40,00	95	2505,38	527,96	534,17	6,21	7,41	337,90	60,67	1,00
12	+	0,00	40,00	94	2505,38	527,84	532,83	4,99	8,66	289,40	66,16	1,32
14	+	0,00	40,00	93	2505,38	527,73	532,07	4,34	9,08	276,30	76,62	1,51
16	+	0,00	40,00	92	2505,38	527,62	532,51	4,89	7,82	320,55	84,09	1,28
18	+	0,00	40,00	91	2505,38	527,51	533,13	5,62	6,47	395,29	96,56	0,97
20	+	0,00	40,00	90	2505,38	527,40	532,16	4,76	7,48	342,51	96,87	1,21
22	+	0,00	40,00	89	2505,38	527,28	531,84	4,56	7,52	333,00	84,54	1,21
24	+	0,00	40,00	88	2505,38	527,04	532,41	5,37	6,66	375,97	83,63	1,00
26	+	0,00	40,00	87	2505,38	526,91	532,69	5,78	6,71	373,59	82,62	1,01
27	+	0,00	20,00	86	2505,38	526,35	531,23	4,88	8,31	301,33	76,73	1,34
28	+	0,00	20,00	85	2505,38	525,46	530,51	5,05	8,89	281,71	68,00	1,40
30	+	0,00	40,00	84	2505,38	522,81	527,05	4,24	11,51	217,69	58,85	1,91
32	+	0,00	40,00	83	2505,38	520,02	523,76	3,74	13,30	188,42	53,20	2,26
34	+	0,00	40,00	82	2505,38	517,23	522,03	4,80	13,74	182,41	64,30	2,60
36	+	0,00	40,00	81	2505,38	514,88	519,52	4,64	14,44	173,48	71,06	2,95
38	+	0,00	40,00	80	2505,38	511,02	515,62	4,60	15,67	159,89	70,76	3,33
39	+	0,00	20,00	79	2505,38	509,36	513,98	4,62	15,97	156,83	70,92	3,43
39	+	15,00	15,00	78	2505,38	507,00	509,67	2,67	17,79	140,84	55,35	3,56

#### 5.4 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA BACIA DE DISSIPAÇÃO

Para dissipar a energia do escoamento no pé do novo sangradouro da Barragem de Camalaú e promover, com isso, um retorno tranquilo das águas ao leito do canal de restituição foi implantada uma bacia de dissipação do tipo ressalto hidráulico.

A seguir são apresentados os parâmetros e critérios de cálculo utilizados para a avaliação do comportamento hidráulico desta bacia de dissipação.

Uma vez conhecidas as características do escoamento no início da bacia ( $y_1$ ,  $V_1$ ,  $F_1$ ,  $EE_1$ ) a profundidade conjugada do ressalto ( $y_2$ ) em um canal retangular é dada por:

$$y_2/y_1 = \frac{1}{2} [(1+8F_1^2)^{0,5} - 1]$$

A perda de energia no ressalto é igual à diferença entre as energias específicas do escoamento antes e depois do ressalto, e pode ser calculada através de:

$$\Delta E = EE_1 - EE_2 = (y_2 - y_1)^2 / (4y_1 \cdot y_2)$$

Onde,  $\Delta E$  é a perda de energia no ressalto hidráulico (m);

$y_1$  e  $y_2$  são as profundidades da lâmina d'água antes e depois do ressalto (m).

A relação  $\Delta E/EE_1$  é a perda relativa. A eficiência do ressalto hidráulico é dada pela relação entre a energia específica depois e antes do ressalto ( $EE_2/EE_1$ ).

Para a bacia em estudo a extensão do ressalto ( $L/y_2$ ) em função de  $F_1$  é obtida através da Figura 12 da publicação *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, do U. S. Bureau of Reclamation, A. J. Peterka.

Conforme calculado no estudo de determinação do perfil da lâmina d'água ao longo do canal de queda, as principais características do escoamento no final do canal de queda (=início da bacia de dissipação) para a vazão com recorrência de 100 anos são:

- vazão ( $Q_{100}$ ) = 1122,94 m<sup>3</sup>/s;
- vazão específica ( $q_{100}$ ) = 22,4588 m<sup>3</sup>/s/m;
- profundidade da lâmina d'água ( $d_B$ ) = 1,39m;
- velocidade ( $V_B$ ) = 15,71 m/s;
- Energia Específica ( $EE_B$ ) = 13,98m;
- número de Froude ( $F_B$ ) = 4,31.

A planilha a seguir apresenta os cálculos realizados para a verificação das características do escoamento na bacia de dissipação proposta para a vazão de projeto com recorrência de 100 anos.

**Quadro 5.5 Características do Ressalto Hidráulico para a Vazão com Recorrência de 100 Anos**

Tr	Q (m <sup>3</sup> /s)	EE <sub>1</sub> (m)	y <sub>1</sub> (m)	V <sub>1</sub> (m/s)	F <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> (m)	V <sub>2</sub> (m/s)	F <sub>2</sub>	L/y <sub>2</sub> (Fig. 12)	L <sub>res.</sub> (m)
100	1122.94	13.98	1.39	15.71	4.31	7.81	2.88	0,33	5.90	46.0

Os cálculos acima foram realizados considerando uma bacia de dissipação retangular com fundo horizontal posicionado na elevação 507,00m e base de 50m. Neste contexto, no caso da ocorrência da vazão com recorrência de 100 anos de 1122,94 m<sup>3</sup>/s o escoamento na entrada da bacia teria profundidade  $y_1$  de 1,39m, velocidade de 15,71 m/s e número de Froude 4,31. O ressalto hidráulico resultante teria altura conjugada  $y_2$  de 7,81m e extensão aproximada de 46m.

No caso do arranjo proposto para o novo extravasor da Barragem de Camalaú seria construído um dique de terra a jusante com crista na elevação 512,00m ("elevação do tail water") que proporcionará a formação de um reservatório a jusante do canal de queda com fundo posicionado na cota 507,00m. O elevado volume de água contido no interior deste reservatório de jusante proporcionará a efetiva dissipação da energia residual do escoamento no final do novo extravasor da barragem.

## 5.5 VERIFICAÇÃO DA BACIA DE DISSIPAÇÃO PARA AS VAZÕES EXTREMAS

A planilha a seguir apresenta os cálculos realizados para a verificação do funcionamento hidráulico da bacia de dissipação para as vazões efluentes com recorrências milenar e decamilenar.

**Quadro 5.6 Características do Ressalto Hidráulico para as Vazões Milenar e Decamilenar**

Tr	Q (m <sup>3</sup> /s)	EE <sub>1</sub> (m)	y <sub>1</sub> (m)	V <sub>1</sub> (m/s)	F <sub>1</sub>	y <sub>2</sub> (m)	V <sub>2</sub> (m/s)	F <sub>2</sub>	L <sub>res.</sub> (m)
1000	1799.32	16.69	2,04	16.95	3.86	10.16	3.54	0,35	62,0
10000	2505.38	18.81	2.67	17.79	3.56	12.17	4.12	0,38	73.0

Em função dos resultados obtidos, verifica-se que no caso da ocorrência da vazão milenar de 1799,32 m<sup>3</sup>/s o escoamento na entrada da bacia teria profundidade y<sub>1</sub> de 2,04m, velocidade de 16,95 m/s e número de Froude 3,86. O ressalto hidráulico resultante teria altura conjugada y<sub>2</sub> de 10,16m e extensão aproximada de 62m.

Para o caso da ocorrência da vazão decamilenar de 2505,38 m<sup>3</sup>/s o escoamento na entrada da bacia teria profundidade y<sub>1</sub> de 2,67m, velocidade de 17,79 m/s e número de Froude 3,56. O ressalto hidráulico resultante teria altura conjugada y<sub>2</sub> de 12,17m e extensão aproximada de 73m.

Conforme mencionado anteriormente, esses resultados são válidos para uma bacia de dissipação retangular de fundo horizontal na cota 507,00m e largura de 50m. No caso em estudo as condições são mais favoráveis, pois o reservatório receptor a jusante terá seção irregular com profundidade de 5m, base horizontal de 50m e topo com largura variando entre 100m e 280m. Este colchão d'água de jusante proporcionará o espraçamento do volume de água efluente à Barragem de Camalaú.

## 5.6 DETERMINAÇÃO DA ALTURA DOS MUROS DO CANAL DE QUEDA

A altura dos muros do canal de queda foi definida para a cheia de recorrência milenar, conforme mostrado a seguir.

O efeito do aumento da lâmina d'água resultante da incorporação de ar ao longo do canal de queda é dado por:

$$h_{Ar} = \beta \cdot h_w$$

onde, h<sub>Ar</sub> = altura incremental de ar (m);

h<sub>w</sub> = altura da lâmina d'água (m);

$\beta$  = coeficiente adimensional.

O coeficiente  $\beta$  pode ser obtido através de:

$$\beta = 0,09.F_r \quad (\text{equação de Sharma})$$

onde,  $F_r$  é o número de Froude do escoamento na seção considerada.

Foi admitida uma folga mínima de 60 cm em relação à profundidade da lâmina aerada. A altura mínima do muro determinada por esta metodologia é dada por:

$$H_t = h_w + h_{Ar} + 0,60$$

O U.S. Bureau of Reclamation, em “Design of Small Dams”, recomenda para a determinação da borda livre (Freeboard) ao longo do canal de queda liso o emprego da seguinte equação, a qual já considera a incorporação de ar:

$$F_b = 2,0 + 0,025.V.\sqrt[3]{d}$$

onde,  $F_b$  = borda livre (ft);

$V$  = velocidade do escoamento na seção considerada (ft/s);

$d$  = altura da lâmina d'água na seção considerada (ft).

A altura mínima do muro resultante foi obtida através de:

$$h'_t = h_w + F_b$$

Os cálculos necessários à determinação da altura mínima dos muros foram realizados com base nas duas metodologias apresentadas aplicadas às seções localizadas no início e no final de cada trecho do canal de queda, conforme planilhas seguintes:

**Quadro 5.7 - Cálculo da altura dos muros do canal de queda – critério USBR**

Estaca	V (m/s)	d (m)	V (ft/s)	d (ft)	Fb (ft)	Fb (m)	Altura mín. (m)
0 + 5,00	5,86	3,48	19,23	11,42	3,08	0,94	4,42
27 + 0,00	7,80	3,92	25,59	12,86	3,50	1,07	4,99
39 + 0,00	15,07	4,07	49,44	13,35	4,93	1,50	5,57
39 + 15,00	16,95	2,04	55,61	6,69	4,62	1,41	3,45

**Quadro 5.8 - Cálculo da altura dos muros do canal de queda – critério incorporação de ar**

Estaca	F	h <sub>w</sub> (m)	$\beta$	h <sub>Ar</sub> (m)	Folga (m)	Fb (m)	Altura mín. (m)
0 + 5,00	1,00	3,48	0,09	0,31	0,60	0,91	4,39
27 + 0,00	1,37	3,92	0,12	0,48	0,60	1,08	5,00
39 + 0,00	3,46	4,07	0,31	1,27	0,60	1,87	5,94
39 + 15,00	3,86	2,04	0,35	0,71	0,60	1,31	3,35

Conforme pode ser visto nas planilhas acima, os dois critérios resultaram em valores muito próximos para a altura mínima dos muros do canal de queda, da ordem de 5,00m para o primeiro trecho, 6m para o segundo e 3,50m para o terceiro.

Entretanto, devido ao formato convergente e trajetória curvilínea do primeiro trecho do canal de queda recomenda-se uma folga adicional para a altura dos muros laterais de modo a contemplar a elevação da lâmina d'água resultante do estreitamento da seção de escoamento. Assim, para atender à condição de projeto (cheia milenar), recomenda-se que os muros do canal de queda da Barragem de Camalaú tenham altura mínima de 6,20m em toda a sua extensão.

Os resultados obtidos mostram também que em toda a extensão do extravasor proposto o volume de água efluente ao reservatório resultante da vazão decamilenar estaria contido pelos muros laterais da barragem e taludes do terreno natural.

## **5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

A seguir são apresentados os títulos das publicações utilizadas como referência para o projeto do novo sangradouro da Barragem de Camalaú.

1. CHOW, V. T. "Open Channel Hydraulics", 1959.
2. PETERKA, A.J. "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipator" U.S. Bureau of Reclamation, 1964.
3. U. S. BUREAU OF RECLAMATION. "Design of Small Dam's", 1987.