

GOVERNO DO ESTADO



CEARÁ
AVANÇANDO NAS MUDANÇAS

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS - SRH
SUPERINTENDÊNCIA DO OBRAS HIDRÁULICAS SOHIDRA

PROJETO DE APROVEITAMENTO
HIDROAGRÍCOLA DA BACIA DO
RIO CRUXATI
ITAPIPOCA - CE

VOLUME 2 RELATÓRIO DE CONCEPÇÃO GERAL
DO PROJETO

RM Planejamento e Consultoria Agropecuária Ltda

FORTALEZA- CE
DEZEMBRO DE 1997



GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUPERINTENDÊNCIA DE OBRAS HIDRAÚLICAS – SOHIDRA

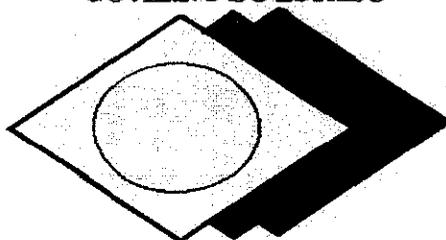
PROJETO DE APROVEITAMENTO
HIDROAGRÍCOLA DA BACIA DO
RIO CRUXATI
ITAPIPOCA – CE

VOLUME 2 – RELATÓRIO DE CONCEPÇÃO GERAL DO
PROJETO

0211/02

Lote: 02291 - Prep () Scan () Index ()
Projeto Nº 0211/02
Volume _____
Qtd. A4 _____ Qtd. A3 _____
Qtd. A2 _____ Qtd. A1 _____
Qtd. A0 _____ Outros _____

GOVERNO DO ESTADO



CEARÁ
AVANÇANDO NAS MUDANÇAS

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS – SOHIDRA

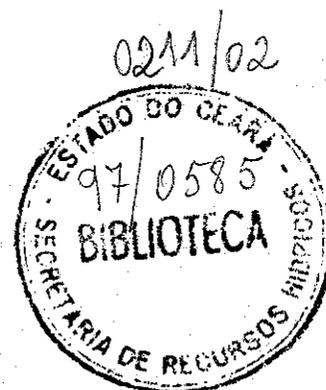
PROJETO DE
APROVEITAMENTO
HIDROAGRÍCOLA DA BACIA DO
RIO CRUXATI
ITAPIPOCA – CE

VOLUME 2 – RELATÓRIO DE CONCEPÇÃO GERAL DO
PROJETO

000003

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO
2. ESTUDOS TOPOGRÁFICOS
3. ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS
4. INSPEÇÃO GEOTÉCNICA
5. ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE "LAY-OUT" DA BARRAGEM
6. DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DA BARRAGEM SORORÓ



1. APRESENTAÇÃO

Este relatório consiste o Estudo de Concepção geral do Projeto desenvolvido na bacia do rio cruxati no município de Itapipoca-Ce, visando o seu aproveitamento hidroagrícola.

Os estudos estão sendo executados para a secretaria de Obras Hidráulicas – SOHIDRA, pela empresa R&M Planejamento e Consultoria Agropecuária Ltda.

O objetivo deste relatório e apresentar as alternativas de barramento estudadas , considerando custos e volume reservado.



FIGURA : MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BARRAGEM SORORO

0:00000

2. ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

Após a escolha do eixo ideal de barramento iniciou-se o levantamento topográfico da bacia hidráulica, eixo barravel e sangradouro.

Foi utilizado no levantamento equipamento digital computadorizado "Estação Total", sendo todos os pontos processados no computador e gerando a planta planialtimétrica da área.

No levantamento foram seguidos os seguintes parâmetros:

01 - Estudos Cartográficos

A base cartográfica gerada para o estudo foi obtida a partir de fotografias aéreas na escala de 1:25.000.

- Levantamento Topográficos

Foi realizado o levantamento topográfico dos eixos de transferência, dos eixos barráveis e outros pontos notáveis, de modo a compatibilizar os níveis de regularização.

Este levantamento está apresentado em planta e perfil em escala adequada que em princípio deverá ser de 1:2.000 (horizontal) e 1:200 (vertical).

3. ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

3.1 - CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA

O rio Cruxati tem sua nascente na Serra de Uburetama e foz no rio Mundaú drenando uma área de 84.811 km². Não existe nenhuma estação hidroclimatológica nos domínios da bacia do rio Mundaú, sendo por isso utilizada como estação representativa a de Sobral, com denominação homônima de sua localidade (INEMET, 1991)¹.

3.1.1 - Principais Parâmetros

3.1.1.1 - Temperatura

A distribuição temporal das temperaturas diárias mostra pequenas variações para os três pontos discretos de monitoramento (12:00; 18:00 e 24:00 TMG - Tempo Médio de Greenwich), sendo tais flutuações processadas, sob uma visão contínua no tempo, com pequenos gradientes.

A temperatura compensada apresenta uma pequena variação de 2,6 °C, isso para os meses de abril (27,5 °C) e junho (24,9 °C). As médias máximas e mínimas extremas ocorrem respectivamente nos meses de Outubro (35,9 °C) e Julho (21,2 °C).

3.1.1.2 - Umidade Relativa

A umidade relativa média apresenta uma variação máxima de 30%, referente aos meses de Abril (85%) e Agosto/Setembro (55%).

3.1.1.3 - Ventos

¹INEMET, 1991. INVENTÁRIO DE ESTAÇÕES HIDROCLIMATOLÓGICAS.

A intensidade do vento é medida nos horários sinóticos de observação, a uma altitude de 10 m em relação a estação. Da mesma forma, a direção do vento também é medida nos três horários sinóticos, indicando a direção de onde o vento se origina.

3.1.1.4 - Evaporação Média

A evaporação anual observada em tanque-tipo classe "A" é de 1914,7 mm, distribuída ao longo dos meses :

O trimestre que apresenta os maiores valores de evaporação corresponde a setembro/outubro/novembro, ocorrendo o máximo em outubro (224,7 mm).

3.1.1.5 - Evapotranspiração

Aa evapotranspiração potencial mensal obtida segundo Thornthwaite e Mather, totalizando 1657,2 mm.

3.2 - Balanço Hídrico

O princípio da conservação da massa à água aplicado a um determinado local ou área (em um dado volume de controle), nos fornece a diferença entre o ganho (precipitação) e o consumo (escoamento superficial e profundo, evaporação ou evapotranspiração). Este princípio é a base do balanço hídrico, concebido por Thornthwaite & Mather em 1955, e tem sido utilizado amplamente quando não se dispõe de muitos dados para um estudo mais apurado.

Aplicando-se a metodologia do balanço hídrico para a bacia em questão, supondo-se uma capacidade de armazenamento de 100 mm (PERH, 1990)², obtém-se o quadro I.8.

²PERH, 1990. PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ.

Quadro I.8 - Balanço Hídrico segundo Thornthwaite e Mather

CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO = 100 mm

MÊS	T °C	P* mm	ETP mm	P-ETP mm	ARM mm	ALT mm	ETR mm	EXC mm	DEF mm
JAN	26,7	101,1	142,1	-41,0	0,0	0,0	101,1	0,0	41,0
FEV	27,1	169,1	137,3	31,8	31,8	31,8	137,3	0,0	0,0
MAR	26,2	293,0	132,3	160,7	100,0	68,2	132,3	92,5	0,0
ABR	27,5	335,4	152,7	182,7	100,0	0,0	152,7	182,7	0,0
MAI	26,2	183,7	129,8	53,9	100,0	0,0	129,8	53,9	0,0
JUN	24,9	87,6	104,0	-16,4	85,0	-15,0	102,6	0,0	1,4
JUL	26,4	38,0	133,6	-95,6	32,0	-53,0	91,0	0,0	42,6
AGO	27,2	6,8	150,9	-144,1	7,0	-25,0	31,8	0,0	119,1
SET	26,3	9,9	129,1	-119,2	2,0	-5,0	14,9	0,0	114,2
OUT	26,7	8,0	143,5	-135,5	0,0	-2,0	10,0	0,0	133,5
NOV	27,1	7,0	148,8	-141,8	0,0	0,0	7,0	0,0	141,8
DEZ	27,1	22,8	153,1	-130,3	0,0	0,0	22,8	0,0	130,3
ANO	26,6	1262,4	1657,2	-394,8	457,8	0,0	933,3	329,1	723,9

P* - Precipitação Média em Cruxati

3.1.3 - Classificação do Clima

3.1.3.1 - Classificação segundo Koeppen

De acordo com a classificação, a região do estudo encontra-se classificada como Zona de Climas Secos, tipo B. As chuvas são classificadas como do tipo Bwx', uma vez que a distribuição temporal da precipitação da área abrangem o verão e o outono. O clima, segundo o aspecto térmico, é do tipo muito quente, ou megatérmico.

3.1.3.2 - Classificação segundo Thornthwaite

Segundo esta classificação, além da característica pluviométrica e térmica, a evapotranspiração potencial é também considerada elemento determinante do clima. Como forma de auxiliar na classificação de tipos e subtipos climáticos, três parâmetros foram introduzidos por Thornthwaite, a saber:

-Índice de aridez:

O índice de aridez vem a ser a deficiência hídrica expressa em porcentagem da evapotranspiração potencial, este índice apresentou o valor 43,7.

-Índice de umidade:

O índice de umidade é o excesso de água (Exc) expresso em porcentagem da necessidade que é representado pela evapotranspiração potencial (ETP), este índice apresentou um valor de 19,9 (quadro I.8).

-Índice efetivo de umidade:

Este índice reflete o excesso ou deficit de água ao longo do ano, apresentando um valor igual a -6,3 (quadro I.8).

Com base nestes índices, os dados para a área de estudo, mostram um clima seco e sub-úmido; tipo C₁, com índice de umidade variando entre 0 e -20%; sub-tipo S, com

moderado excesso no inverno e moderada deficiência no verão; tipo A', megatérmico e sub-tipo a', baixa variação estacional (C₁ SA'a').

3.2 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS

A pluviometria do Estado foi detalhadamente analisada por ocasião do PERH (Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, 1990), sendo esta análise iniciada com a coleta dos registros inventariados e atualizados até 1988 pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste). Esta etapa foi seguida por várias outras, entre as quais destaca-se, para os fins deste trabalho: a caracterização do regime pluviométrico em vários intervalos de tempo e o estabelecimento de série pluviométrica média para as bacias hidrográficas dos açudes de médio e grande porte.

- Dados Utilizados

Foram utilizados onze postos neste estudo, englobando toda a área de interesse, bacia do rio Cruxati. Na estimativa dos dois vetores regionais, um a nível anual e o outro a nível mensal, estes postos foram separados em 3 grupos:, a saber: Icarai, Paracuru, Uruburetama e Uruoca, denominados grupos regionais, (PERH, 1990), por apresentarem médias dos totais anuais mais próximas, além de estarem localizados em regiões de pouca variação de altitude.

Inicialmente foi considerado o intervalo anual, para o qual analisou-se as duplas massas entre a pluviometria anual e a série sintética obtida a partir do vetor regional associado. Esta análise permite a identificação de anomalias, ou seja, valores que divergem do padrão, este definido com base na informação de todos os postos pelo princípio da máxima verossimilhança.

A seguir prossegue-se com a análise, à nível mensal, utilizando o vetor regional mensal, buscando os meses que apresentam desvios consideráveis para aqueles anos de desvios consideráveis em relação ao valor sintético, sendo corrigidos os de maior contribuição para o desvio a nível anual. Os valores diários são compatibilizados pelo princípio da desagregação

nos meses que sofreram a correção. Para maiores detalhes, consultar o PERH - SRH, 1990 - Relatório Geral - Diagnóstico.

- Caracterização do Regime Pluviométrico

- Nível Anual

As isoietas, linhas de mesma precipitação média, e iso-cv's (coeficientes de variação) estão apresentadas nas figuras II.1 e II.2, que mostram a região da bacia do rio Jaguaribe e onde se acha assinalada a área do estudo. A área de estudo apresenta, segundo análise destas figuras, média pluviométrica entre 800 e 1200 mm com um coeficiente de variação em torno de 0,45.

- Nível Mensal

A análise da distribuição temporal mostra a concentração do total precipitado no primeiro semestre do ano, correspondendo a mais de 90% do total anual.

- Nível Diário

Os principais tipos de precipitações da região são em decorrência da elevação brusca das massas de ar por efeito térmico ou lenta, neste caso quando a massa de ar encontra obstáculos topográficos.

Na análise hidrológica de prováveis obras hidráulicas, os eventos de alta frequência assumem uma importância maior com relação aos de baixa. Aqui foram utilizadas séries anuais de máximos diários.

- Chuvas Intensas

Na área em estudo inexistem registros de pluviógrafos, sendo o aparelho mais comum em estações pluviométricas o pluviômetro, capaz de registrar a "precipitação máxima

de 1 dia". Isto impossibilita o uso da metodologia convencional, na qual, a partir de chuvas intensas de várias durações registradas em pluviogramas, estabelece-se uma equação que relaciona intensidade, duração e freqüência para a área de representatividade do aparelho.

Como alternativa ao método tradicional, tem-se o Método das Isozonas (TORRICO, 1975)³, que partindo da transformação da chuva de 1 dia em 24 horas, permite estimar valores para intervalos de menor duração.

A desagregação da chuva de 24 horas em chuvas de menores duração consiste nas seguintes etapas de cálculo descritas a seguir:

1. multiplicar a chuva de um dia por 1,10 para obter-se a chuva pontual de 24 horas;
2. determinar a isozona onde está localizado o centro de gravidade da bacia hidrográfica - isozona C para a área em estudo, sendo adotado D apenas para o posto 2871202 3.
3. estimar, para os diversos períodos de retorno, a chuva de 1 hora de duração a partir da chuva de 24 horas, através da multiplicação pelo fator R_{1h} ;
4. plotar os valores P_{24h} e P_{1h} em papel probabilístico para obtenção de chuvas de durações intermediárias.

O método das isozonas apresenta diferenças bem significativas quando comparado com o método tradicional, conforme mostra Silva, Kern e Henrique (1989), o que sugere que os resultados obtidos pelo método das isozonas sejam observados com certas restrições.

De acordo com o posto 2861917 apresenta os maiores valores estimados de precipitação extrema associada a diferentes tempos de retorno. Ao lado deste fato, o posto situa-se na isozona D em oposição aos demais que situam-se na isozona C, o que também implicará em um hietograma de projeto mais crítico uma vez que os coeficiente para a isozona

³ TORRICO, J.T., 1975. PRÁTICAS HIDROLÓGICAS, 2a. EDIÇÃO, TRANSCOM, RIO DE JANEIRO.

D são maiores do que os da C. Assim, adotou-se como posto base para análise de eventos extremos o posto Cemoaba (2861917). A chuva pontual (figura II.4) para este posto foi convertida em chuva para toda a bacia pela equação:

$$P_A = P_0 \cdot (1 - W \cdot \log(\frac{A}{A_0}))$$

onde $W = 0,15$ (coeficiente regional para zonas áridas e semi-áridas);

P_A = Precipitação sobre toda a área;

P_0 = Chuva pontual;

$A = 84,81 \text{ km}^2$ (área da bacia);

$A_0 = 25 \text{ km}^2$ (área base para chuva pontual),

obtendo-se um fator de redução igual a 0,9204. O quadro II.6 apresenta a chuva de projeto sem redução e com a aplicação do fator redutor de área. A figura II.4 mostra as curvas altura-duração-frequência (chuvas pontuais) para diferentes tempos de retorno dos postos utilizados.

Quadro II.6 - Chuva de Projeto (mm) - Estação: 2861917

DURAÇÃO (h)	PERÍODOS DE RETORNO				
	100	200	500	1000	10000
CHUVA PONTUAL					
0.1	29,49				
1	118,85			190,18	
24	294,92	344,38	420,37	487,64	
CHUVA REDUZIDA					
0.1	27,14				
1	109,39			175,04	
24	271,92	316,97	386,92	448,84	

3.3 - ESTUDO DE DEFLÚVIOS

O objetivo básico deste capítulo consiste na definição das séries de vazões afluentes ao Rio Cruxati, produto das chuvas que ocorrem em sua cabeceira na serra de Uruburetama até a confluência com o principal Rio da Bacia, o Rio Mundaú. Estas séries fluviométricas podem ser utilizadas como base para estudos direcionados à construção de pequenos e médios açudes e para avaliação de alternativas para projetos de irrigação na área.

Como foi descrito anteriormente, na bacia ou na suas proximidades existem dados pluviométricos de uma estação próxima à área de estudo que foram consistidos e utilizados por ocasião da elaboração do PERH-CE. Estas informações serão utilizadas para o modelo MODHAC⁴.

- Dados Necessários

Os dados necessários para a calibração do MODHAC são: pluviometria diária, séries fluviométricas mensais/ diárias e evapotranspiração potencial. Devido a inexistência de estações fluviométricas na bacia do Rio Cruxati, optou-se pela transposição de dados de uma região próxima. A realização desta transposição de dados foi abordada de duas maneiras:

- calibração do MODHAC em uma bacia vizinha, e utilização dos parâmetros obtidos nesta calibração para a geração de séries de vazões na bacia do Rio Cruxati;
- obtenção de uma série de vazões para o Rio Cruxati através de proporção de áreas, e a partir desta é realizado um ajuste do modelo MODHAC para a bacia do Rio Cruxati.

Estas hipóteses simplificadoras assumem, respectivamente, que:

- os parâmetros utilizados são representativos para simular os processos de transformação chuva-vazão que ocorrem na bacia do Rio Cruxati ;

⁴ MODHAC - Modelo Hidrológico Auto Calibrável - A.E.L. Lanna & M. Schwarzbach - 1989. Publicação de Recursos Hídricos 21 - Instituto de Pesquisas Hidráulicas I.P.H. - U.F.R.G.S.

- a bacia vizinha é hidrologicamente semelhante a bacia de interesse.

- Ajuste do Modelo e Resultados Obtidos

A partir dos valores dos parâmetros obtidos pela calibração do MODHAC para postos vizinhos é possível gerar séries de vazões a partir de séries de precipitações, e com extensão igual destas últimas. No caso em estudo foi utilizado duas estações, a saber:

- posto situado em São Luis do Curu, pertencente ao município do mesmo nome, na bacia do Rio Curu;
- posto situado em Patos-Sobral na bacia do Rio Aracatiaçu.

O quadro III.1 apresenta os parâmetros obtidos na calibração automática do modelo MODHAC em ambas estações. Na tentativa de garantir que o mínimo obtido pelo método de Rosebrook seja um mínimo global, o processo de calibração foi repetido várias vezes com diferentes condições iniciais para estes parâmetros. Como função objetivo foi empregada a função objetivo modulada $\sum |Q_{obs} - Q_{ger}|$, a qual é recomendada para a aplicação deste modelo em regiões do Nordeste Brasileiro.

Para as estações utilizadas, São Luis do Curu e Patos-Sobral, foi obtido na fase de calibração as seguintes características:

São Luis do Curu: lâmina média escoada = 69,7 mm
coeficiente de deflúvio = 9,35 %

Patos-Sobral: lâmina média escoada = 41,0 mm
coeficiente de deflúvio = 8,04 %

Utilizando os parâmetros obtidos na fase de calibração (quadro III.1) para as duas estações acima, gerou-se com o MODHAC série de vazões para a bacia em estudo correspondente à série de precipitação média desta bacia. As características da série gerada a partir dos

parâmetros do MODHAC obtidos na calibração com as duas alternativas (São Luis do Curu e Patos-Sobral) são as seguintes:

São Luis do Curu: lâmina média escoada = 469,8 mm
coeficiente de deflúvio = 42 %

Patos-Sobral: lâmina média escoada = 553,9 mm
coeficiente de deflúvio = 49,7 %

Como pode-se observar pelos valores acima, os coeficientes de deflúvio variam de 42% a quase 50% o que é inaceitável para uma bacia rural no semi-árido, podendo-se observar ainda o alto valor obtido para a lâmina média escoada.

Alternativamente à transposição de parâmetros, optou-se pela transposição de vazões por proporção de área, utilizando-se como bacia base a do Rio Curu. A partir da série obtida por proporção de área procedeu-se com a calibração do MODHAC, mas os resultados não foram melhores, a saber:

lâmina média escoada = 633,75 mm
coeficiente de deflúvio = 51,9 %

Diante dos valores acima, decidiu-se não proceder com a extensão da série. Os parâmetros obtidos nas calibrações estão apresentados no quadro III.1.

Assim, com base na qualidade dos resultados obtidos, aconselha-se utilizar para caracterização do escoamento os valores obtidos pelo balanço hídrico distribuído (PERH, 1990) para o município de Itapipoca (região de interesse), a saber:

lâmina média escoada = 194 mm

coeficiente de variação dos deflúvios anuais = 0,73⁵

O uso destes valores sugere a aplicação de métodos de geração no dimensionamento do reservatório.

Quadro III.1 - Parâmetros Utilizados pelo Modelo MODHAC - CALIBRAÇÃO.

RSPX mm	RSSX mm	RSBX	RSBF	IMAX mm/ dia	IMIN mm/ dia	IDEC	ASP	ASS	ASB	PRED	CEV A
São Luis do Curu											
Função Objetivo: 479			Coef. Deflúvio = 9,35%				Lâmina Média Escoada = 69,7				
mm											
31,5	263,1	0,0	0,0	30,8	5,2 e-3	7,0 e-2	4,0 e-2	8,5 e-4	0,49	999,0	0,0
Patos-Sobral											
Função Objetivo: 580			Coef. Deflúvio = 8,04%				Lâmina Média Escoada = 41,0				
mm											
46,3	147,1	0,0	0,0	99,98	1,988	6,1 e-2	0,1	3,9 e-3	8,6 e-3	999,0	4,1 e-3
Transposição de área - Curu											
Função Objetivo: 3,2 e4			Coef. Deflúvio = 51,9%				Lâmina Média Escoada = 633,75				
mm											
60,0	264,4	0,0	0,0	40,07	4,1	0,46	4,6 e-4	7,0 e-3	0,531	999,0	1,1 e-3

⁵CAMPOS, J.N.B., VIEIRA, J.F. e MARTINS, E.S.P.R. (1995). "Política de Recursos Hídricos em Áreas Vulneráveis". In: Projeto Áridas-CEARÁ. Coordenação Geral: Secretaria de Planejamento.

4. INSPEÇÃO GEOTÉCNICA

A partir de estudos já elaborados na região de interesse do projeto, bem como de inspeções recentes, realizadas *in loco* no sítio do barramento, pode-se tecer alguns comentários sobre a descrição geológico-geotécnica regional e local para a implantação do empreendimento.

A título de simplificação, o esboço geológico regional compreende basicamente rochas pré-cambrianas com tipo litológico predominante de gnaisses e migmatitos diversos, exibindo nos relevos elevados de serra, corpos de granitóides, dioritos e granitos diversificados do proterozóico superior. Estas rochas estão limitadas ao norte nas proximidades do boqueirão Sororó, pelos sedimentos costeiros e inconsolidados do Terciário e Quaternário pertencentes ao Grupo Barreiras e às Coberturas Sedimentares de espraimento aluval.

A bacia de contribuição a partir da seção do barramento proposto, encontra-se completamente em terreno do Embasamento Cristalino, compreendidas pelas rochas Pré-cambrianas e Proterozóicas descritas anteriormente. Uma melhor visualização do esboço geológico-regional pode ser verificado na Figura 4.1 apresentada a seguir.

No sítio do barramento nas áreas que correspondem às ombreiras ou zonas mais elevadas, verifica-se um capeamento de solo residual de pouca espessura. Logo abaixo desta camada residual encontra-se rocha granítica apresentando características resistentes aos processos de decomposição e alteração. Uma rala visão deste solo residual pode se verificar na foto 4.1 mostrada a seguir.

Na parte baixa do boqueirão estão restritos os sedimentos coluviais pouco representativos no local do sítio barrável, e em particular na calha principal do rio estão os depósitos de aluviões recentes compostos predominantemente de areias quartzo-feldspáticas bem graduadas. As fotos 4.2, 4.3 e 4.4 apresentadas a seguir mostram com clareza a superfície do sítio barrável na sua parte mais baixa e demonstram *a priori* alguns aspectos geotécnicos locais. A incidência de pequenos afloramentos bem como de blocos rochosos de *granito são*

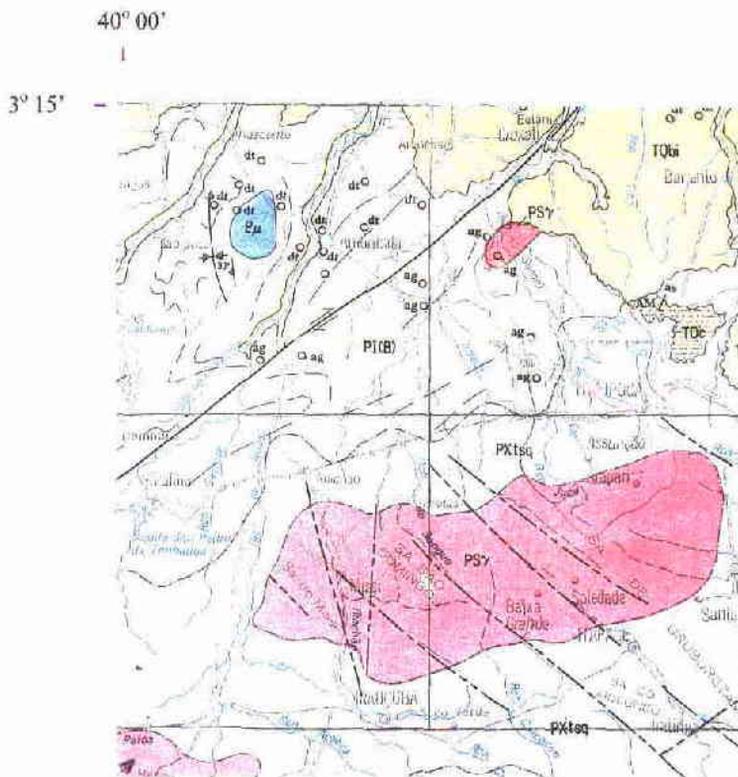


Figura 4.1 . MAPA GEOLÓGICO REGIONAL (Fonte : Mapa Geológico do estado do Ceará, 1993 – Esc. 1: 500.000)



FOTO 4.1 – EIXO DO BOQUEIRÃO, tomada a partir da ombreira direita.



FOTO 4.2 – Vista da calha do rio, tomada a partir da esquerda para a direita. Observe os blocos de rochas no eixo do boqueirão.

5. ESTUDO DE ALTERNATIVAS DE "LAY-OUT" DA BARRAGEM

5.1. Metodologia

Este capítulo tem como objetivo estudar a viabilidade de três alternativas de "lay-out" para a barragem Sororó a partir dos dados básicos de geologia, geotecnia e hidrologia da região. Os critérios de análise seguem a seguinte ordem: (i) segurança do barramento; (ii) custo do investimento; e (iii) impactos causados pela obra. Em uma primeira aproximação são desenvolvidas três concepções do barramento para uma mesma cota de referência (cota da soleira do vertedor) e os critérios supra-citados avaliados. Adota-se, também, uma única largura de vertedor para as alternativas. Desenvolvido cada ante-projeto procede-se a análise dos critérios e traçam-se recomendações.

5.2. Elementos geométricos da barragem

Gráfico cota - volume e estimativa de cheia milenar - Com base nos estudos topográficos é possível avaliar o comportamento do volume acumulado no reservatório como função do nível d'água. A grande importância destes dados está na avaliação hidrológica do reservatório. A figura 5.1. abaixo representa este comportamento para o caso da barragem Sororó.

Para estimar a vazão de pico da cheia milenar, partiu-se da formulação empírica da vazão centenária como proposta pelo Eng. Aguiar (equação 5.1).

$$Q_{100} = 1150.S/T_1; T_1 = (L.C)^{1/2} \cdot (120 + K_A.L.C_A) \quad (5.1)$$

em que S é a área de contribuição em km²; L o comprimento do talvegue principal; e C_A e K_A coeficientes da bacia. Para a barragem Sororó $Q_{100} \cong 480 \text{ m}^3/\text{s}$.

Considerando-se a formulação de Chow (equação 5.2)

$$Q(\text{Tr}) = Q_{\text{média}} + K(\text{Tr}) \cdot S \quad (5.2)$$



FOTO 4.3 – Vista da calha esquerda do rio no eixo do boqueirão.

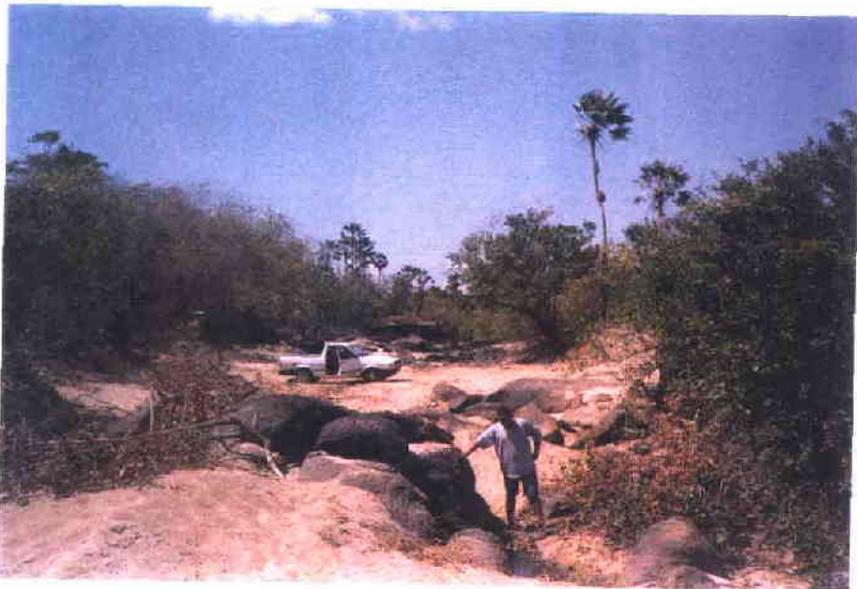


FOTO 4.4 – Vista de montante a partir do eixo. Observando os pequenos afloramentos e blocos soltos da rocha granítica no sítio do barramento.



FOTO 4.5 – Afloramento de rocha resistente em local proposto para sangradouro referente a alternativa “A” na ombreira esquerda.



FOTO 4.6 – Outro afloramento no sítio do sangradouro alternativa “A”

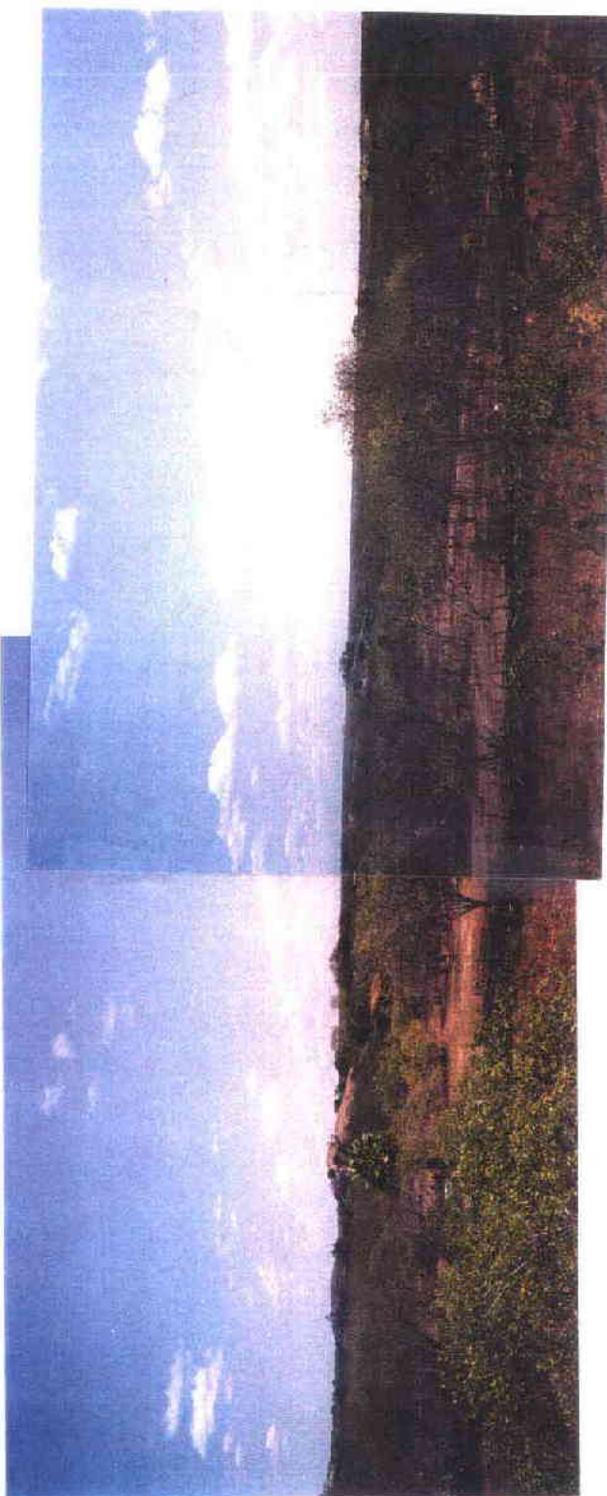


FOTO 4.7 -
Local definido para
implantação do
sangradouro a
alternativa "C".
Vista
Longitudinal.
(Observe vários
afloramentos
acima da
superfície de
rocha Granítica
Sã, nas
proximidades do
local.

sendo Tr o período de retorno, $Q_{média}$ e S respectivamente a média e o desvio-padrão da série de aflúncias máximas. Admitindo-se o comportamento da série como distribuição normal, para $Tr = 100$ anos, $K(Tr) = 2,325$; e, para $Tr = 1000$ anos, $K(Tr) = 3,090$. Daí pode-se estimar a vazão máxima para cheia milenar em cerca de $600 \text{ m}^3/\text{s}$.

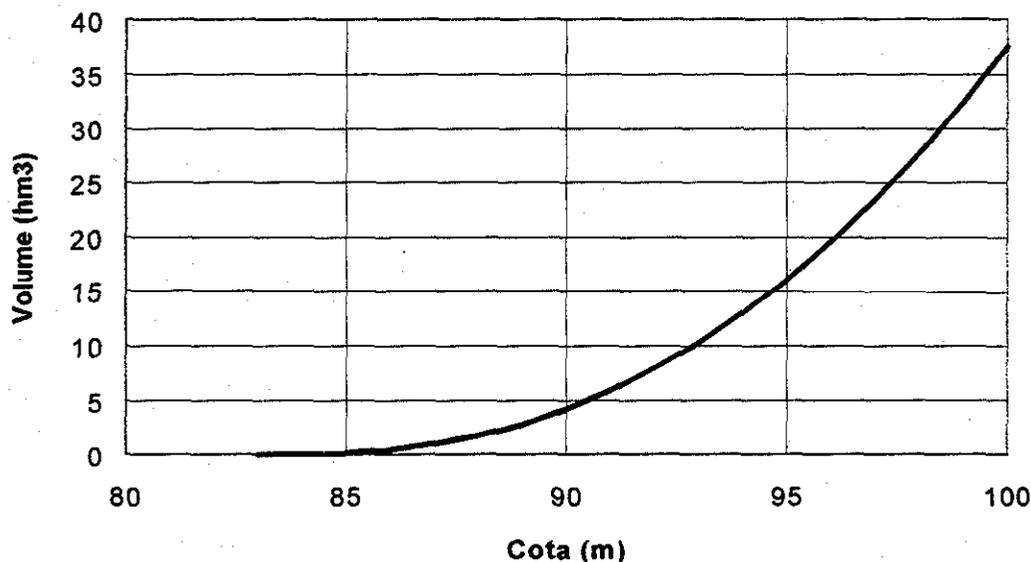


Figura 5.1. Curva cota-volume da barragem Sororó

Cota de referência - Estudando-se o levantamento topográfico da ombreira esquerda do eixo barrável pode-se verificar que, ao contrário do que ocorre na ombreira direita, as curvas de nível passam a se distanciar a partir da cota 96 m, não se encontrando sequer identificadas as curvas de cotas acima de 99 m. Isto determina uma limitação topográfica, devendo a cota do coroamento estar em nível não superior a 98 m. Análises preliminares indicam, por sua vez, que a revanche (isto é, a soma da lâmina H_0 , para cheia de projeto, com a folga f) mede cerca de 3 metros, o que aponta para cota ideal de soleira em 95 m. Faz-se necessário ainda verificar as conseqüências hidrológicas desta escolha. Com base na curva cota-volume (Figura 5.1) do reservatório verifica-se que, à cota 95 m, reservam-se cerca de 16 hm^3 . Sabe-se, dos estudos hidrológicos preliminares, que o volume afluente anual é de $40 \text{ hm}^3/\text{ano}$. Portanto, o parâmetro fk , dado pela razão entre o volume de reservação e o volume afluente anual, seria de 0,40 ,

valor razoável para barragens interanuais de porte pequeno a médio. Com base nestes critérios recomenda-se, numa primeira análise, a cota 95 m para a soleira do vertedor.

Largura de referência do vertedor - Para a avaliação inicial decidiu-se por adotar uma única largura de vertedor para o estudo das três alternativas. Foram realizadas simulações hidráulicas para diversos tipos de vertedor com larguras variando entre 50 e 200 metros, traçando-se como meta altura de lâmina para cheia milenar entre 1,50 m e 2,50 m. Os resultados, apresentados na tabela 5.1 abaixo, recomendam largura adequada de 100 m para vertedores em perfil Creager ou em soleira espessa e 150 m para vertedor em canal. Adota-se, então, 100 m como largura de referência.

Tabela 5.1. Avaliação preliminar das lâminas de escoamento dos vertedores

Tipo	Lâmina Ho (m) para largura ...			
	50 m	100 m	150 m	200 m
Creager	3,15	1,99	1,52	1,25
Soleira espessa	3,62	2,28	1,74	1,44
Canal 450 m	4,16	2,90	2,42	2,16

Estimativa preliminar da folga - Define-se folga como a diferença de nível entre a cota do coroamento e a cota do nível d'água máximo esperado. No caso da barragem Sororó o nível máximo correspondente à cheia milenar. Segundo formulação citada em DNOCS (1979)⁶

$$h = 0,75 + 0,34.Ft^{1/2} - 0,26.Ft^{1/4}$$

$$f = 0,75.h + V^2/(2.g) \quad (5.3)$$

$$c = (g.h)^{1/2}$$

na qual h é a altura estimada da onda em m; Ft o "fetch" do lago em km; V a velocidade da onda em m/s; e f a folga em metros. A velocidade da onda foi estimada em função de sua celeridade c. O fetch foi calculado em 3,9 km para soleira na cota 95 m e nível d'água máximo na cota 97 m e, portanto, folga f = 1,09 m.

⁶ DNOCS, "Roteiro para Projeto de Pequenos Açudes", Fortaleza, 1979, 85 p.

Estimativa preliminar da largura do coroamento - A largura do coroamento B é calculada, em geral, como função da altura máxima do barramento. Tomando-se como base soleira na cota 95 m; lâmina máxima de vertimento de 2,0 m; e folga de 1,0 m a cota do coroamento seria de 98,0 m e a altura máxima de 16,15 m, já que o ponto mais profundo no eixo barrável tem cota 81,85 m. Da fórmula de Preece (equação 5.4) chega-se a $B = 5,4$ m.

$$B = 1,1 * H_{\text{máx}}^{1/2} + 0,90 \quad (5.4)$$

sendo B e $H_{\text{máx}}$ dados em metros.

5.3. Alternativa "A"

A primeira alternativa ("A") estudada corresponde à solução de barragem de terra com vertedor em canal escavado em rocha no extremo da ombreira esquerda, como mostrado na Figura 5.2. Esta alternativa foi cogitada a partir de observações em campo, considerando-se a existência de um ponto de sela e de rocha aflorante em bom estado ao longo do que seria o canal. Avaliação mais apurada em escritório, no entanto, demonstra que o canal teria cerca de 450 metros de comprimento para soleira na cota 95 m e que, em alguns trechos, seria necessário escavar mais de 2 metros em rocha sã. A curva-chave do vertedor é traçada com base nas equações (5.5) e (5.6) abaixo

$$H_o = E_o(Q,b) + S_f(Q,b) * L \quad (5.5)$$

$$E_o = (3/2) * (q^2/g)^{1/3}; \quad q = Q/b \quad (5.6)$$

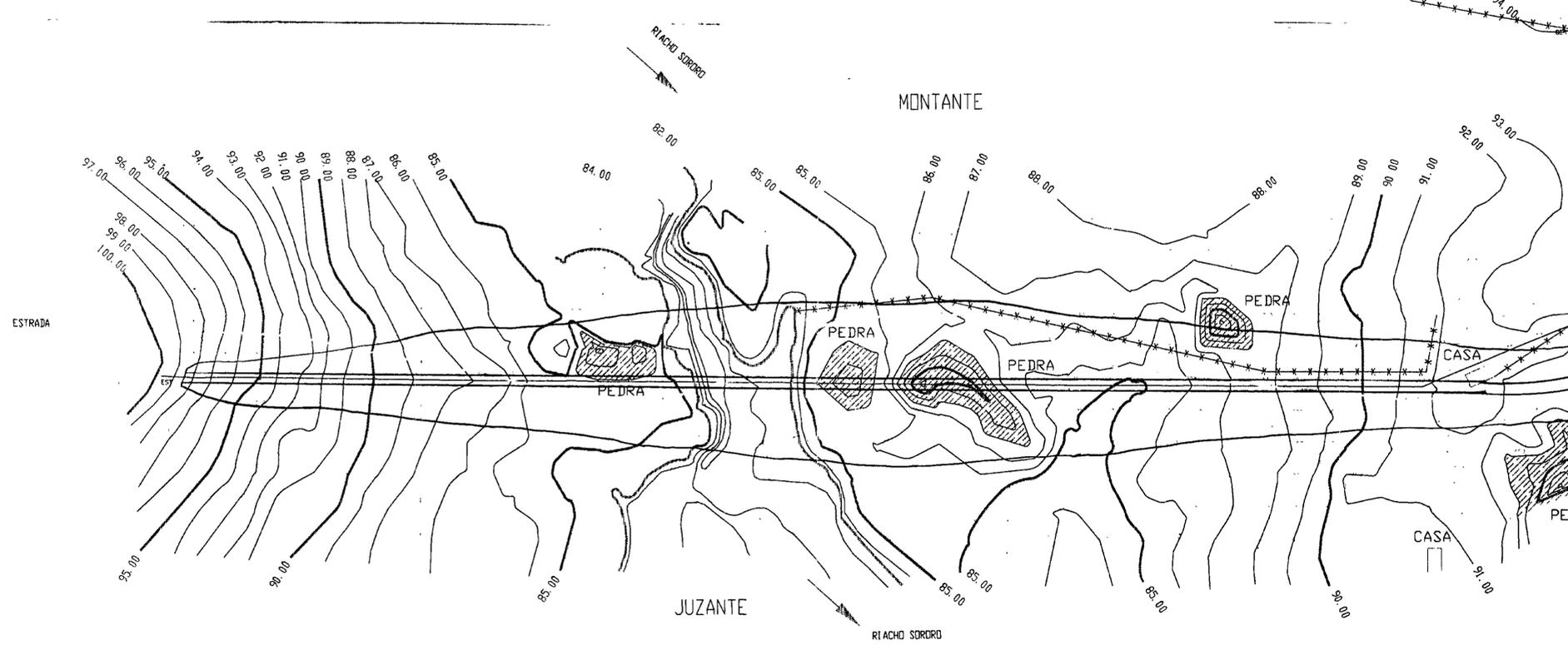
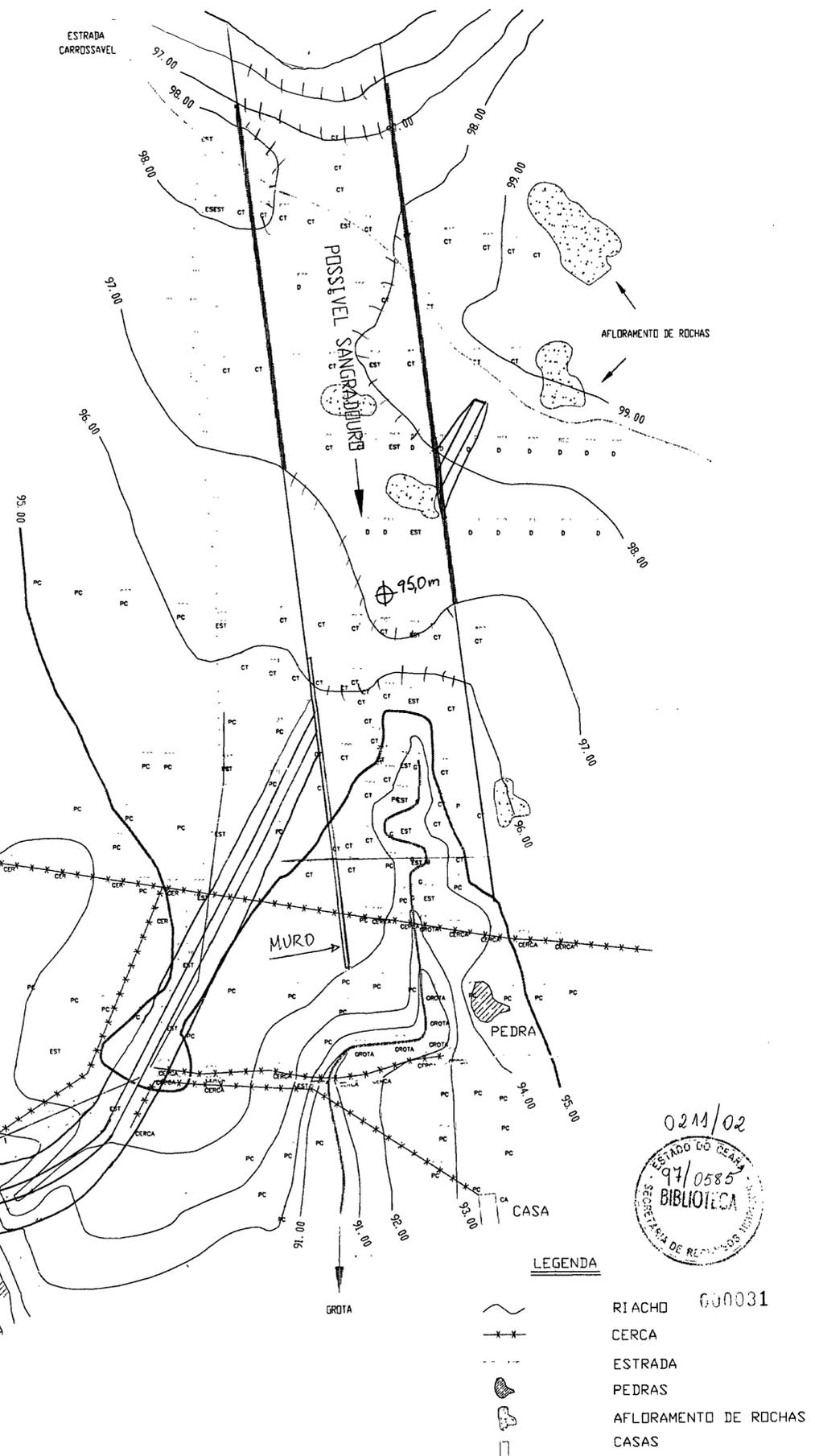
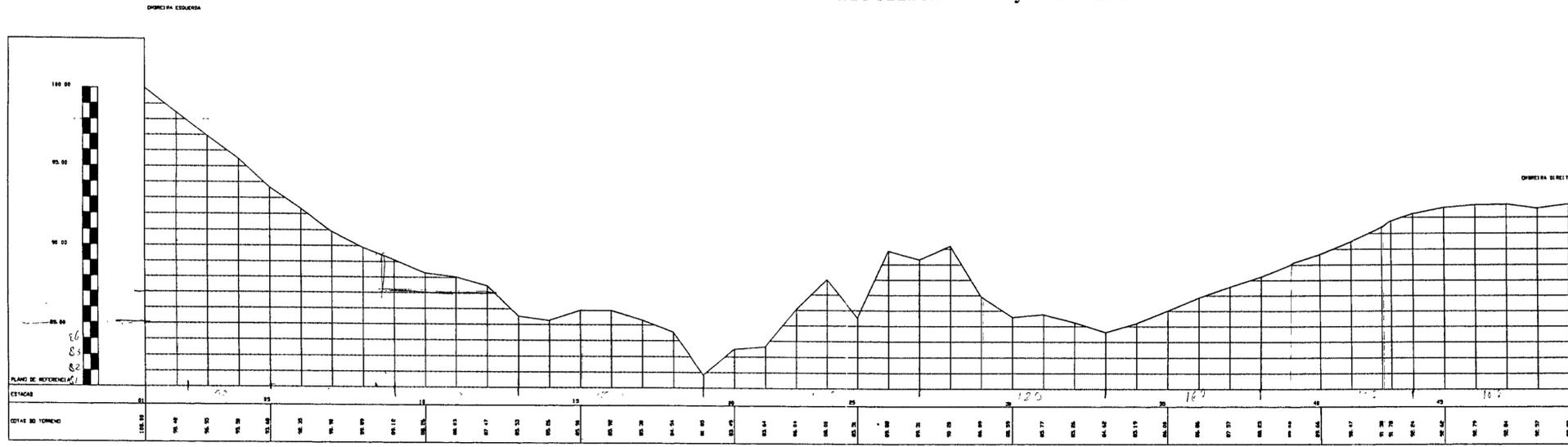
em que E_o é a energia mínima necessária para aduzir a vazão Q; y_{cr} a profundidade crítica; b a largura do canal; S_f a declividade média da linha de energia; e L o comprimento médio do canal. O valor de S_f foi calculado pela onda cinemática $S_f = S_o$ e pela formulação de Manning. A lâmina média foi calculada para lâminas variando de $y = H_o$ até $y = 0,71 * y_{cr}$, caso este que deve ocorrer próximo na seção de mudança brusca de declividade a jusante, como demonstra estudo do U.S. Bureau of Reclamation.

R&M

ALTERNATIVA " A "

000030

FIGURA 5.2 - "Lay-out" da alternativa "A"



0211/02
 ESTADO DO RIO DE JANEIRO
 97/0585
 BIBLIOTECA
 SECRETARIA DE RECURSOS HUMANOS

- LEGENDA
- RIACHO 000031
 - CERCA
 - ESTRADA
 - PEDRAS
 - AFLORAMENTO DE ROCHAS
 - CASAS

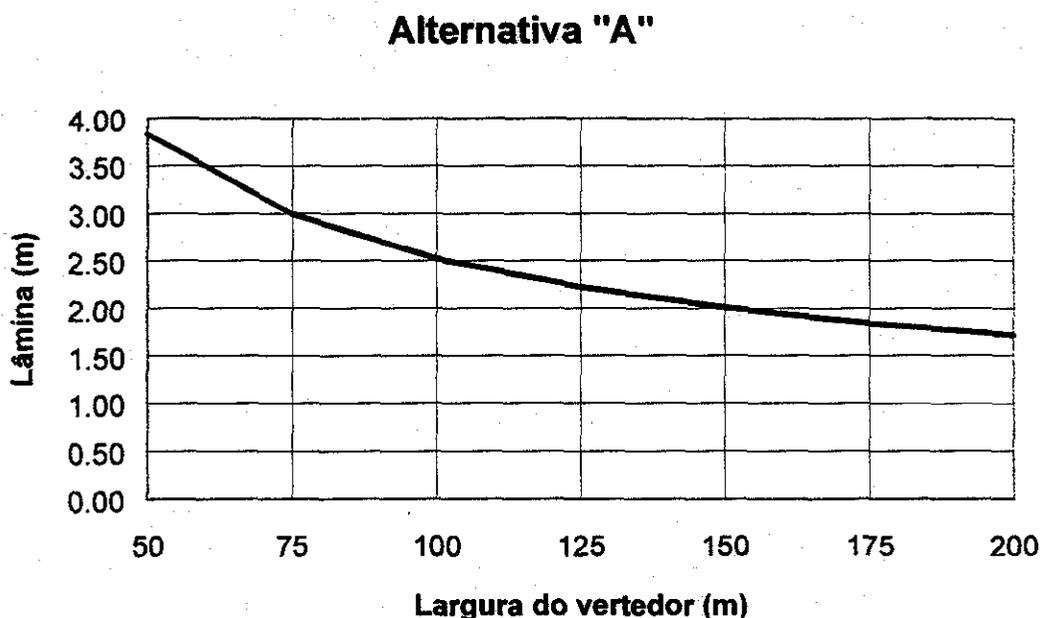


Figura 5.3. Lâmina para cheia milenar em função da largura do vertedor: alternativa "A"

A Figura 5.3 demonstra que, para $b = 100$ m, a altura H_0 é superior a 2,50 m para cheia milenar. Isto, por si só, torna desvantajosa a alternativa "A", pois seria necessário aumentar a largura do canal para cerca de 200 m ou elevar a cota do coroamento da barragem para 98,60 m. Ambas soluções oneram consideravelmente a obra. Outro aspecto importante: com esta disposição o canal vertedor fica paralelo à saia do aterro da ombreira esquerda, representando risco de erosão, a menos que se construa extenso muro lateral, onerando ainda mais a barragem. Pode-se concluir que, a menos que se decida localizar a soleira do vertedor entre as cotas 96,0 m e 97,5 m (a despeito das adversidades topográficas), a alternativa "A" não se justifica.

5.4. Alternativa "B"

A alternativa "B" avaliada foi a de se localizar o vertedor no corpo central do barramento (ver Figura 5.4), lançando-se a água vertida diretamente no leito original do rio Sororó. Com isto o vertedor seria hidraulicamente eficiente, baixando-se o valor da lâmina H_0 de 2,52 m (alternativa "A") para cerca de 1,90 m (se a largura for de 100m) sem apresentar problemas clássicos do canal de restituição ao leito principal do rio. Se a largura for aumentada este

R&M

ALTERNATIVA " B "

000033

benefício torna-se ainda mais intenso, com se pode ver na Figura 5.5 abaixo. A redução na cota do nível máximo d'água faz, a rigor, com que a cota do coroamento caia ainda mais, já que ocorre uma redução no fetch F_t e, portanto, na folga.

Alternativa "B"

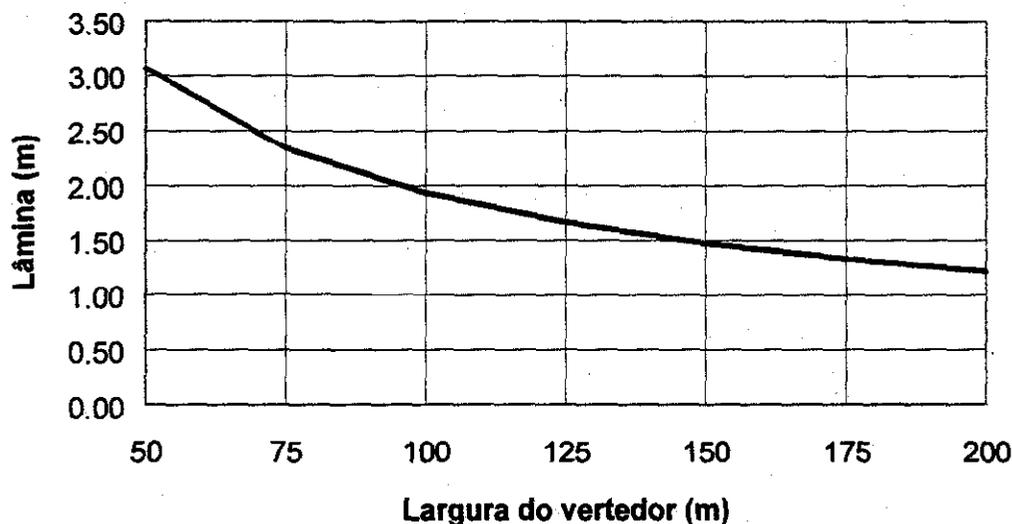


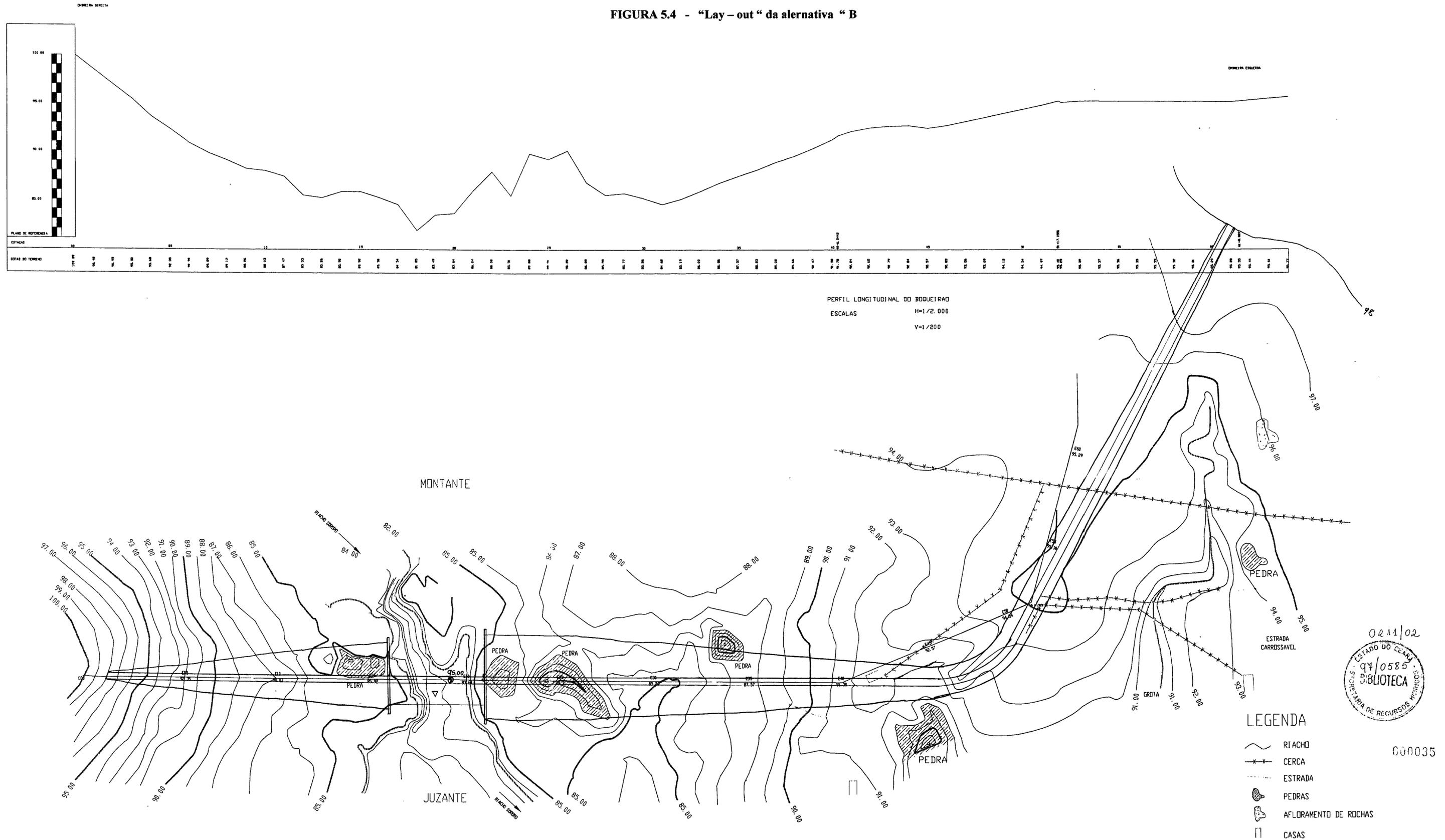
Figura 5.5. Lâmina para cheia milenar em função da largura do vertedor: alternativa "B"

Com isto reduz-se consideravelmente o volume do maciço e, conseqüentemente, seu custo, assim como o custo com desapropriação. Por outro lado o preço de um vertedor em perfil Creager de 100 m de largura e 16,2 m de altura útil, somada à altura de fundação e aos muros laterais, pode superar os benefícios previamente descritos. É necessário encontrar ainda solução que una bom desempenho técnico (hidráulico e geotécnico) e econômico.

5.5. Alternativas "C"

A terceira alternativa estudada ("C") busca atender às exigências de eficiência técnica e economia, e consiste em se aproveitar um pequeno platô à cota 95 m na ombreira esquerda, seguido de um talvegue, para localizar a estrutura vertedora (ver Figura 5.6). O vertedor seria, então, limitado à direita e à esquerda por muros laterais. Isto porque o maciço se estenderia até a cota 98 m, situando-se também à esquerda do vertedor.

FIGURA 5.4 - "Lay-out" da alternativa "B"



R&M

ALTERNATIVA " C "

000036

Alternativas "C"

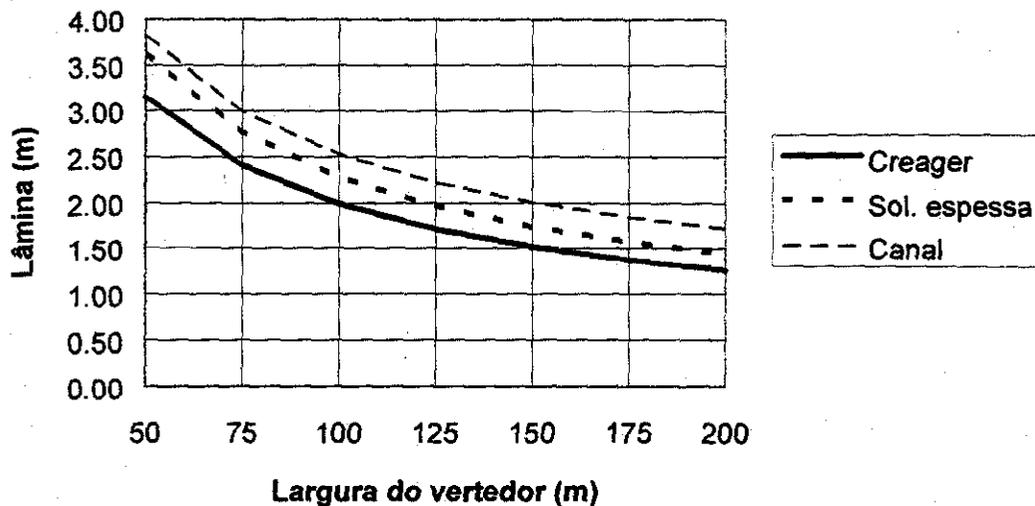


Figura 5.7. Lâmina para cheia milenar em função da largura do vertedor: alternativa "C"

Considerando-se que a cota do terreno no platô é muito próxima à cota 95 m (a mesma da soleira do vertedor) e que neste local a rocha sã se encontra aproximadamente na cota 94 m, decidiu-se não fazer vertedor-canal, já que este estaria sobre material rochoso pouco resistente. A menos que a cota da soleira seja, a nível de projeto executivo, compatível com o substrato rochoso, esta opção deve ser rejeitada. É necessário, portanto, projetar estrutura vertedora em concreto fundada em rocha, porém com soleira na cota desejada. Aparecem aí duas alternativas: projetar vertedor em soleira espessa ou em perfil Creager. A Figura 5.7 demonstra que a solução de vertedor em perfil Creager é hidraulicamente mais eficiente, sendo seu custo perfeitamente compatível com o custo da soleira espessa. Recomenda-se, portanto, a solução de vertedor em perfil Creager sobre o platô na ombreira esquerda para a alternativa "C".

5.6. Recomendações

As análises realizadas permitem traçar recomendações básicas para o projeto da barragem Sororó que, por sua vez, viabiliza estudo de alternativas, obedecendo os três critérios supra-

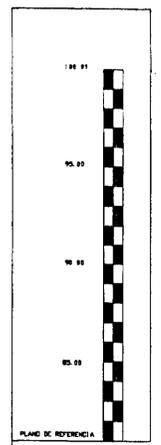
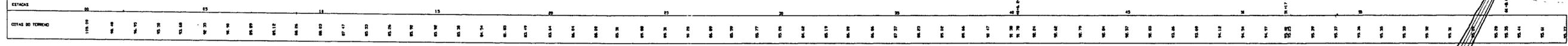
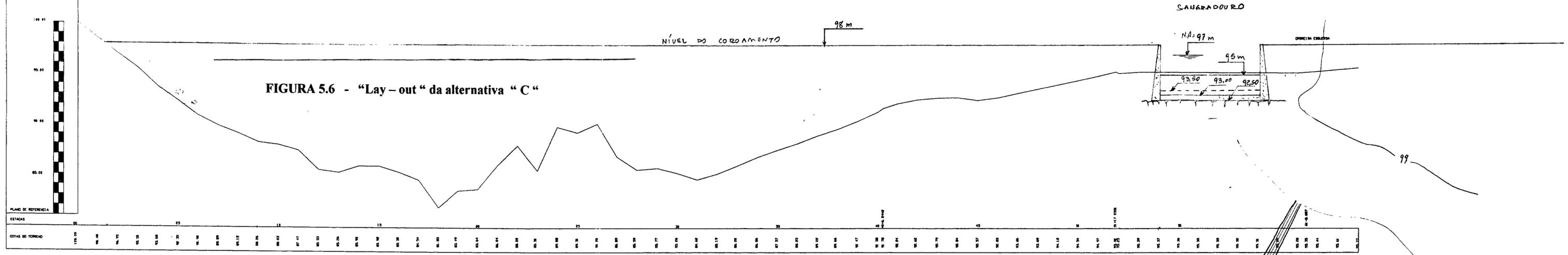
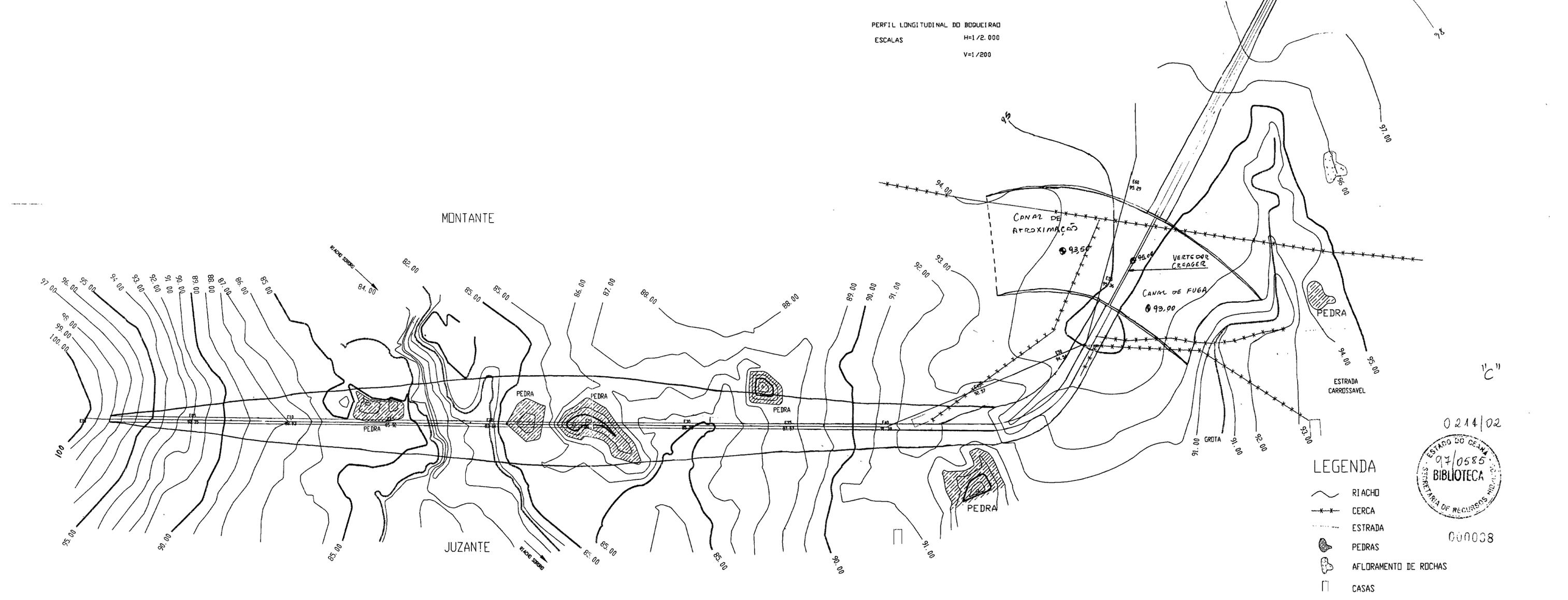


FIGURA 5.6 - "Lay-out" da alternativa "C"



PERFIL LONGITUDINAL DO BOQUEIRAD
 ESCALAS H=1/2.000
 V=1/200



- LEGENDA
- RIACHO
 - CERCA
 - ESTRADA
 - PEDRAS
 - AFLORAMENTO DE ROCHAS
 - CASAS



0214/02

000038

citados: (i) segurança do barramento; (ii) custo do investimento; e (iii) impactos sócio-ambientais causados pela obra. Considerando-se que as alternativas têm muitos aspectos em comum (finalidade da obra, volume reservado etc.) a avaliação preliminar dos impactos sócio-ambientais da barragem considerou como variáveis a área de desapropriação de montante e impactos do vertedor (riscos de cheia, área a desapropriar). Os critérios são julgados pelos conceitos *ruim, regular, bom e muito bom*.

Tabela 5.2. Matriz dos critérios do estudo de alternativas

Alternativa	Segurança	Custos	Impacto
"A"	regular	ruim	regular
"B"	bom	ruim	muito bom
"C" + vertedor em canal	bom	regular	bom
"C" + vertedor sol. espessa	muito bom	bom	bom
"C" + vertedor Creager	muito bom	muito bom	bom

A soleira do vertedor deve se localizar próxima à cota 95,0 m devido a restrições muito mais de ordem topográficas que hidrológicas. Desta forma o volume acumulado no reservatório será de aproximadamente 16 hm³, o volume regularizado de cerca de 0,20 m³/s e a alta frequência esperada de sangria indica baixo risco de salinização do reservatório. Todo esforço deve ser feito no sentido de que a cota do coroamento não ultrapasse a cota 99 m e, de preferência, a cota 98 m. A altura máxima da barragem deve ser de aproximadamente 16 m; a largura do vertedor de 100 m; a folga de 1,0 m e a largura do coroamento 5,4 m.

O estudo de alternativas indica, como se pode ver nas tabelas 5.2 e 5.3, que a alternativa "C" com vertedor em perfil Creager apresenta os melhores indicadores técnicos, econômicos e ambientais. Esta solução é recomendada e apresentada com maiores detalhes no capítulo 6 deste relatório.

Tabela 5.3. Avaliação preliminar de custos das alternativas⁷

Alternativa	Custos (R\$ - agosto 1997)
"A"	3.020.000
"B"	2.950.000
"C" + vertedor canal ⁸	2.690.000
"C" + vertedor sol. espessa	2.520.000
"C" + vertedor Creager	2.280.000

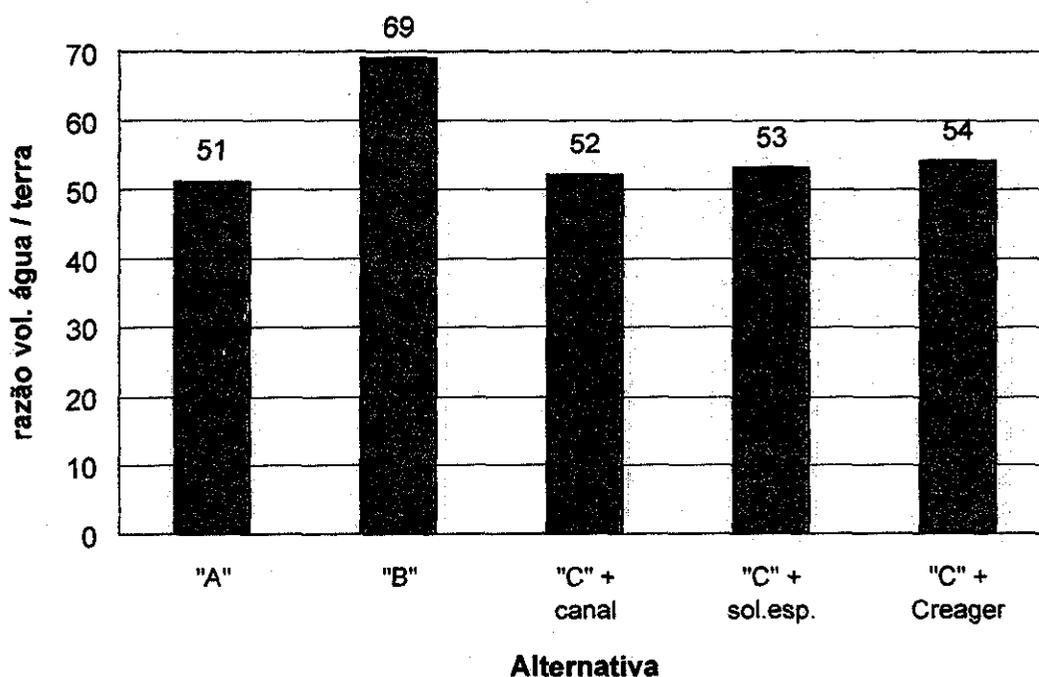


Figura 5.8. Valores da razão entre volumes de água e terra para as alternativas

Faz-se necessário observar, todavia, que o boqueirão não tem o formato desejado. Para verificar este fato pode-se utilizar o parâmetro r dado pela razão entre o volume de água acumulável (no caso $16,03 \text{ hm}^3$) pelo volume de terra do maciço. Esta razão é considerada razoável a boa

⁷Todos os sangradores têm 100 m de largura

⁸Canal tem que ser revestido em cerca de 80 m de comprimento por razões de segurança

quando superior a 100 ou 150. O gráfico da Figura 5.8 demonstra valores de r variando entre 51 e 69. Inferiores, portanto, ao desejável.

6. DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DA BARRAGEM SORORÓ

6.1. Arranjo geral das obras

O arranjo geral das obras, como proposto pelo estudo de alternativas (capítulo 5) indica que a melhor opção consiste na alternativa "C" com vertedor Creager como apresentado. Seguindo-se longitudinalmente o eixo a partir da ombreira direita pode-se descrever a obra: a barragem deve ser de terra com coroamento à cota 98 m, com eixo retilíneo até a ombreira esquerda, onde se verifica pequena deflexão, após a qual o maciço encontrará o muro do vertedor de cerca de 3 m de altura. Após o vertedor, de 100 metros de comprimento, há outro muro de encontro de onde o maciço segue até a cota 98 m da ombreira esquerda. Ao todo são 1.350 m de coroamento do maciço, sem contar os 100 m do vertedor. O vertedor deve ser em perfil Creager, com paramento vertical de montante da ordem de 1,50 m e com a cota de soleira na 95,0 m. A tomada d'água localiza-se na ombreira direita, é composta de tobo de ferro fundido com diâmetro 300 mm e tem cerca de 70 m de comprimento.

6.2. Seção-tipo do maciço

A barragem Sororó é de seção composta de terra, tem altura máxima de 16,15 m, apresenta aproximadamente 300.000 m³ de terra e sua seção-tipo está detalhada na Figura 6.1. O coroamento tem 5,4 m de largura, com declividade de 3 % para montante, cuja cota deve ser 98,0 m. O talude de montante tem declividade de 2,5:1,0 (H:V) e é protegido por uma camada de brita corrida (*rip-rap*). O talude de jusante é mais íngreme, com talude 2:1 (H:V) sem bermas e com proteção feita através de drenagem de calhas que se estendem do topo até o início do enrocamento.

A fundação da barragem deve ser executada por meio de trincheira de vedação (*cut-off*) que se aprofundará até o encontro com a rocha resistente. A largura de fundo da trincheira será de 4,0 m e seus taludes devem ser de 45° com a horizontal, ou seja, 1:1. A fundação deve estar em contacto somente com o núcleo da barragem, ser construída do mesmo material do núcleo e ser

compactada sob as mesmas condições de execução após tratamento da rocha por meio de concreto dental.

Em função da inspeção geotécnica realizada *in loco*, sugerem-se os seguintes materiais de constituição da seção: o material de montante deve ser de silte arenosa (SM) encontrada a montante do eixo barrável. O núcleo da barragem deverá ser argiloso (SC-CL) e extensivo à fundação como anteriormente descrito. A jusante do núcleo deverá se localizar um filtro vertical, ligado posteriormente a um tapete drenante horizontal, compostos de areia bem graduada (SW). O material de jusante deverá ser cascalho siltoso proveniente das capas dos empréstimos quando das escavações, sendo este classificado como bom material sob o aspecto de resistência mecânica. Caso não haja este material disponível em quantidade suficiente, pode-se complementar a seção com material de peso (*random*) desde que obedecidas as especificações técnicas mínimas exigidas. Ao pé do talude de jusante deverá existir enrocamento para drenagem da água de percolação. Entre este enrocamento e o tapete drenante deve ser incluída uma transição como demonstrado na Figura 6.1.

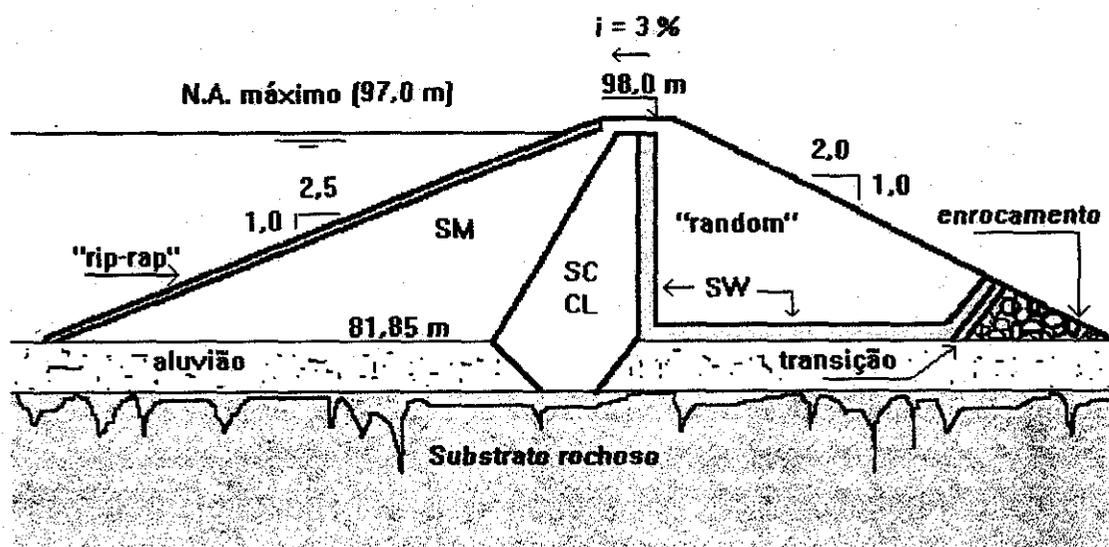


Figura 6.1. Seção-tipo da barragem Sororó

6.3. Vertedor

O vertedor deve se localizar sobre platô à ombreira esquerda, com terreno natural próximo a 95,0 m, obedecer ao formato de perfil Creager e ser fundado em rocha resistente. Sua soleira deve estar à cota 95,0 m; o canal de aproximação em 93,5 m; e o canal de fuga em 93,0 m. Com isto o paramento de montante do vertedor P será igual a 1,5 m e o de jusante 2,0 m, reduzindo-se o risco de inundação da crista, o que causaria redução na eficiência hidráulica. Segundo USBR⁹ vertedores Creager com paramento vertical, com razão $P/H_0 \cong 0,75$ e sem condição de afogamento apresentam coeficiente de crista $C_0 = 2,13 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Daí, a curva-chave do vertedor fica

$$Q (\text{m}^3/\text{s}) = 2,13 \cdot L (\text{m}) \cdot H_0^{3/2} (\text{m}); \quad L = 100 \text{ m}; \quad (6.1)$$

O canal de fuga apresenta ligeira curvatura horizontal para a direita, lançando a água vertida em um talvegue distante cerca de 100 m do eixo do vertedor. Ao cair no talvegue a água escoará até o rio Sororó a jusante da barragem, sem perigo de danos ao maciço. Esta solução apresenta, além da economia, segurança e a vantagem de apresentar baixos impactos sócio-ambientais.

6.4. Tomada d'água

A tomada d'água deverá ser localizada à ombreira direita entre as estacas E-6 e E-7 e ter sua geratriz superior localizada à cota 87,5 m, acumulando em reserva cerca de $1,6 \text{ hm}^3$ ou 10 % do volume total de acumulação. A tubulação deverá ser de ferro fundido com 300 mm de diâmetro, 3/8" de espessura e cerca de 70 m de comprimento. Seu controle deverá ser realizado a jusante, havendo aí dois registros em série. Para eventual manutenção do registro de montante será projetada ranhura na caixa de entrada da galeria, tornando possível estancar o escoamento por vedação de montante. A jusante dos registros será construída bacia de dissipação de energia em concreto, sendo o fluxo então direcionado para o leito do rio Sororó.

⁹U.S. Bureau of Reclamation. "Design of Small Dams", Washington, 1971, p. 375 - 381.

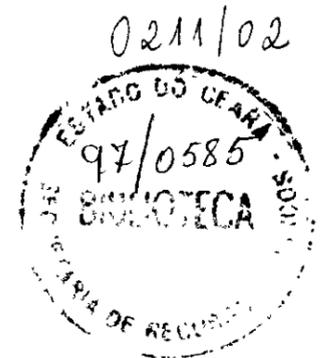
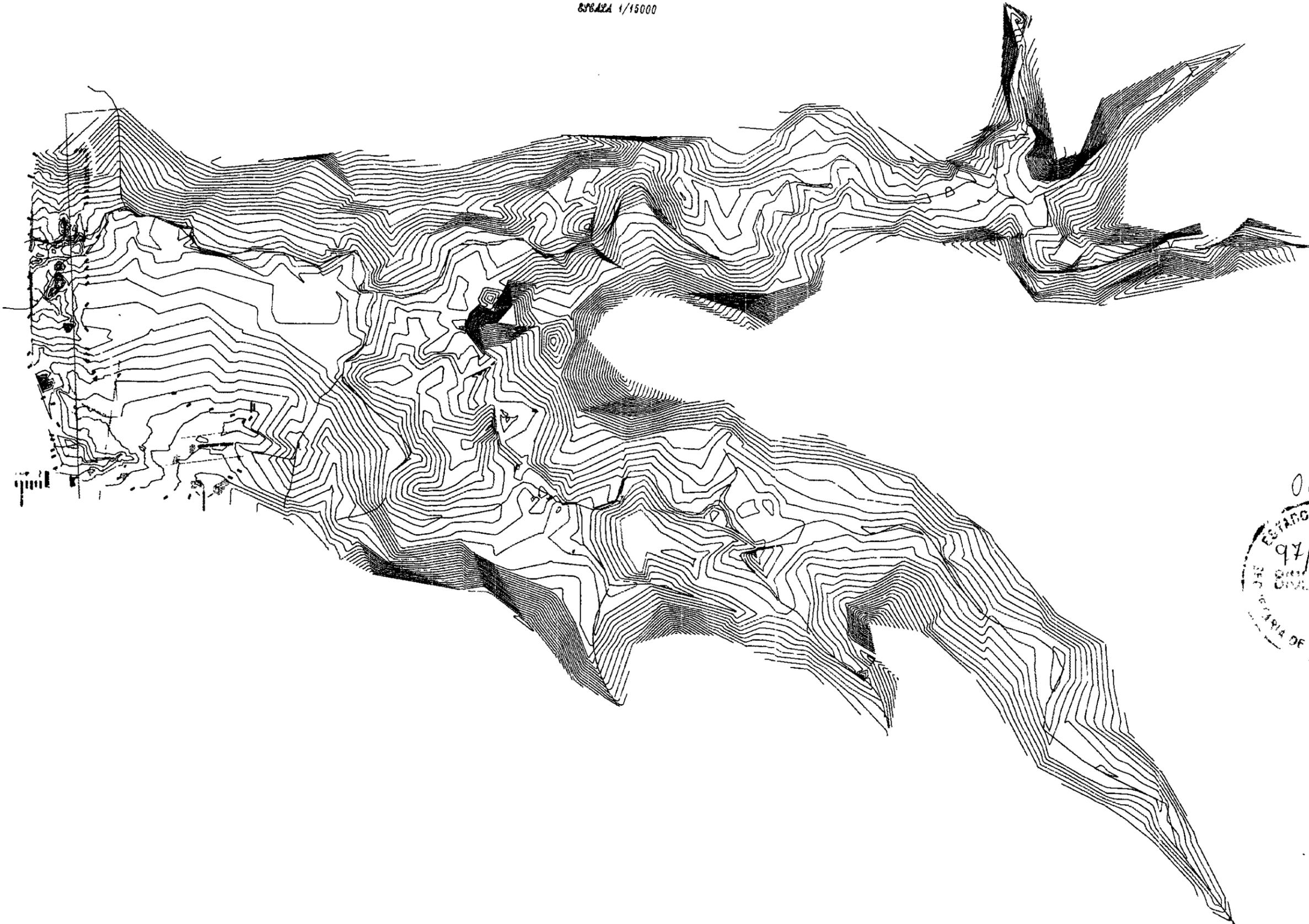
ANEXOS

PLANTAS :

- **EIXO BARRAVEL**
- **SANGRADOURO**
- **BACIA HIDRAULICA**

MAPA TOPOGRAFICO BARRASCU JORDON

ESCALA 1/15000



000047