

MÓDULO III – PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM TRAIRI

VOLUME 1 – ESTUDOS BÁSICOS

TOMO 1 – RELATÓRIO GERAL

Rev.	Data	Descrição	Por	Ver.	Apr.	Aut.
00	Abr/02	Apresentação – Edição Definitiva	CONSÓRCIO	TAD	NKT	NKT

ÍNDICE

ÍNDICE

<u>APRESENTAÇÃO</u>	5
<u>1 - INTRODUÇÃO</u>	8
<u>2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO</u>	10
<u>3 - ESTUDOS TOPOGRÁFICOS</u>	13
<u>3.1 - TRABALHOS CARTOGRÁFICOS</u>	14
<u>3.2 - TRANSPORTES DE COORDENADAS</u>	14
<u>3.3 - TRANSPORTES DE COTAS</u>	16
<u>3.4 - LEVANTAMENTO DO EIXO BARRÁVEL E SANGRADOURO</u>	16
<u>3.5 - LEVANTAMENTO DA BACIA HIDRÁULICA</u>	17
<u>3.5.1 - Cobertura Aerofotogramétrica</u>	17
<u>3.5.2 - Mapeamento Planialtimétrico</u>	18
<u>3.6 - LEVANTAMENTO DOS EMPRÉSTIMOS</u>	20
<u>3.6.1 - Jazida</u>	20
<u>3.6.2 - Areal</u>	20
<u>3.6.3 - Pedreira</u>	20
<u>3.7 - SÍNTESE DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO</u>	21
<u>4 - ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS</u>	27
<u>4.1 - GEOLOGIA REGIONAL</u>	28
<u>4.2 - GEOLOGIA LOCAL</u>	31
<u>4.3 - LEVANTAMENTO GEOLÓGICO DE SUPERFÍCIE</u>	36
<u>4.4 - INVESTIGAÇÕES NO BARRAMENTO</u>	37
<u>4.4.1 - Sondagens Realizadas</u>	37
<u>4.5 - INVESTIGAÇÕES DO SANGRADOURO</u>	40
<u>4.5.1 - Sondagens Realizadas</u>	40
<u>4.6 - ESTUDOS DOS MATERIAIS</u>	42

<u>4.6.1 - Jazida</u>	42
<u>4.6.2 - Areal</u>	44
<u>4.6.3 - Pedreira</u>	44
<u>5 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS</u>	45
<u>5.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA</u>	46
<u>5.2 - ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS</u>	49
<u>5.3 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS</u>	50
<u>5.3.1 - Chuvas Intensas</u>	52
<u>5.4 - ESTUDOS DE CHEIAS</u>	54
<u>5.4.1 - Precipitação Efetiva para aplicação do HEC-1</u>	57
<u>5.4.2 - Hidrograma Unitário - SCS</u>	59
<u>5.4.3 - Hidrograma Triangular</u>	61
<u>5.5 - CURVAS DE REGULAÇÃO DO RESERVATÓRIO</u>	63
<u>5.5.1 - Resultados</u>	63
<u>5.6 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO</u>	66
<u>5.6.1 - Análise econômica</u>	66
<u>5.6.2 - Escolha da capacidade do reservatório - Análise hidrológico-econômica</u>	67
<u>5.7 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO</u>	68
<u>5.7.1 - Propagação da Cheia no Reservatório</u>	68
<u>5.7.2 - Resultados</u>	68

APRESENTAÇÃO

APRESENTAÇÃO

Os serviços executados pelo Consórcio JP ENGENHARIA – AGUASOLOS – ESC/TE, no âmbito do Contrato nº 005/PROGERIRH-PILOTO/CE/SRH/2001, assinado em 22/03/2001 com a Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH-CE), tem como objeto a Elaboração dos Estudos de Viabilidades Técnicas, Ambientais e Econômicas, EIA's-RIMA's, Projetos Executivos, Levantamentos Cadastrais e Planos de Reassentamentos de Populações, Manuais de Operação e Manutenção e Avaliação Financeira e Econômica, referentes às Barragens GAMELEIRA, TRAIRI, JENIPAPEIRO, MARANGUAPE I e MARANGUAPE II e Aduadoras de ITAPIPOCA, TRAIRI, IPAUMIRIM/BAIXIO/UMARI e MARANGUAPE/SAPUPARA/URUCARÁ/LADEIRA GRANDE, no Estado do Ceará.

Os estudos desenvolvidos, em atendimento aos Termos de Referência, são constituídos por atividades multidisciplinares que permitem a elaboração de relatórios específicos organizados em Módulos, Volumes e Tomos. As partes e tomos que compõem o acervo do contrato são os apresentados na seqüência:

Módulo I – Estudos de Alternativas de Localização das Barragens e Aduadoras

VOLUME I – Estudo de Alternativas e Opções para a Localização dos Eixos Barráveis e Aduadoras

Módulo II – Estudos dos Impactos Ambientais

VOLUME I – Estudos dos Impactos Ambientais - EIA

VOLUME II – Relatório dos Estudos dos Impactos Ambientais - RIMA

Módulo III – Projeto Executivo das Barragens

VOLUME I – Estudos Básicos

Tomo 1 – Relatório Geral

Tomo 2 – Estudos Hidrológicos

Tomo 3 – Estudos Cartográficos

Tomo 4 – Estudos Topográficos

Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos

VOLUME II – Anteprojeto

Tomo 1 – Relatório de Concepção Geral

Tomo 2 – Plantas

VOLUME III – Detalhamento do Projeto Executivo

Tomo 1 – Memorial Descritivo do Projeto

Tomo 2 – Memória de Cálculo

Tomo 3 – Especificações Técnicas

Tomo 4 – Quantitativos e Orçamentos

Tomo 5 – Síntese

Tomo 6 – Plantas

Módulo IV – Levantamento Cadastral e Plano de Reassentamento

VOLUME I – Levantamento Cadastral

Tomo 1 – Relatório Geral

Tomo 2 – Laudos Individuais de Avaliação

VOLUME II – Plano de Reassentamento

Tomo 1 – Diagnóstico Socioeconômico

Tomo 2 – Detalhamento do Plano de Reassentamento

Módulo V – Projeto Executivo das Adustras

VOLUME I – Estudos Básicos - Levantamentos Topográficos e Investigações Geotécnicas

VOLUME II – Anteprojeto

VOLUME III – Detalhamento do Projeto Executivo

Tomo 1 – Memorial Descritivo

Tomo 2 – Memória de Cálculo

Tomo 3 – Quantitativos e Orçamentos

Tomo 4 – Especificações Técnicas e Normas de Medições

Tomo 5 – Plantas

Módulo VI – Elaboração dos Manuais de Operação e Manutenção

VOLUME 1 – Manuais de Operação e Manutenção

Módulo VII – Avaliação Financeira e Econômica do Projeto

VOLUME 1 – Relatório de Avaliação Financeira e Econômica do Projeto

O presente relatório é nomeado como *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 1 – Relatório Geral da Barragem Trairi*, e é parte integrante do *Módulo III*.

1 - INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

O presente relatório, é parte integrante de um conjunto de estudos que estão sendo apresentados e que permitirão, ao final, definir a solução técnica mais viável para a elaboração do Projeto da Barragem, tendo sido elaborado de forma a atender os requisitos básicos estabelecidos pela SRH, configurados nos Termos de Referência, os quais reúne as informações técnicas essenciais ao desenvolvimento dos trabalhos.

O objetivo desse relatório é fazer um relato sintético de todas as atividades desenvolvidas nos Estudos Básicos referentes aos estudos topográficos, cartográficos, geológicos, geotécnicos e hidrológicos, desenvolvidos para subsidiar o Projeto Executivo da Barragem Trairi.

2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

2 – LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Trairi localiza-se na região Norte do Estado do Ceará. Sua situação geográfica é definida pelas coordenadas 3°16'40" de latitude Sul e 39°16'08" de longitude Oeste. A altitude da sede é de 18 m. Os seus limites são: ao Norte o Oceano Atlântico; ao Sul os municípios de São Luiz do Curu e Tururu; a Leste Paraipaba e São Gonçalo do Amarante e a Oeste Itapipoca. A sua extensão territorial é de 756 km² e a distância a Fortaleza é de 130 km. O acesso a Fortaleza é feito pela BR-222 e pelas CE's-163 e 085.

O acesso ao sítio do barramento pode ser feito a partir de Fortaleza pela rodovia BR-222 até, aproximadamente, 4,2 km após a cidade de São Luiz do Curu. A partir desse ponto toma-se a direita (sentido norte) pela CE-163, na qual percorre-se cerca de 33 km, onde entra-se a esquerda, numa estrada carroçável na qual percorre-se cerca de 5 km e chega-se ao local do boqueirão, à 1 km da localidade denominada Córrego Fundo, bem próximo à rodovia CE-085. (ver figura a seguir).

Outra forma de acesso ao local do boqueirão partindo de Fortaleza é pela Rodovia Estruturante (CE-085) até a localidade de Córrego Fundo, aproximadamente 119 km. Deste ponto toma-se à esquerda em estrada carroçável e a 1 km chega-se ao local do boqueirão.

Figura 2.1

Mapa de localização

Arquivo Corel

3 - ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

3- ESTUDOS TOPOGRÁFICOS

3.1 - TRABALHOS CARTOGRÁFICOS

Os estudos cartográficos foram desenvolvidos basicamente a partir de cartas da SUDENE, na escala de 1:100.000 e com curvas de nível a cada 40m. Sobre a base cartográfica foi definida a localização do barramento e delimitada a área da bacia hidrográfica da barragem. Para esses estudos também foram utilizadas fotos aéreas da região e o Projeto RADAMBRASIL, na escala 1:250.000.

As cartas da SUDENE utilizadas foram as seguintes:

- Paracuru: folha nº SA.24-Y-D-III
- São Luís do Curu: folha nº SA.24-Y-D-VI

O contorno da bacia hidrográfica da Barragem Trairi está apresentado na Figura 3.1 a seguir.

3.2 - TRANSPORTES DE COORDENADAS

Foram utilizados como ponto de partida, marcos geodésicos do IBGE existentes na área em estudo. Inicialmente foram implantados os marcos (M-01 a M-04), posteriormente complementados com mais dois marcos (M-05 e M-06). Os marcos implantados serviram de origem para o traçado da malha de coordenadas necessárias à elaboração das plantas topográficas. O Quadro 3.1, a seguir, apresenta as características dos marcos implantados.

Quadro 3.1 – Marcos Implantados na Barragem Trairi

Ponto	Localização (*)	Coordenadas UTM (m)		Longitude Geodésica	Latitude Geodésica
		Norte	Este		
Marco M-01	Km 1,42 LD	9.628.137,081	461.750,503	39°20'39,56860"W	03°21'51,29666"S
Marco M-02	Km 6,15 LE	9.626.980,356	462.797,275	39°20'05,65898"W	03°22'28,98137"S
Marco M-03	Km 10,30 LD	9.624.765,624	462.333,108	39°20'20,72650"W	03°23'41,10662"S
Marco M-04	Km 1,65 LE	9.627.153,331	460.825,655	39°21'09,55205"W	03°22'23,32517"S
Marco M-05	Km 1,65 LE	9.627.201,296	460.962,437	39°21'05,11875"W	03°22'11,76461"S
Marco M-06	Km 4,90 LD	9.624.724,082	462.238,788	39°20'23,78373"W	03°23'42,45852"S

(*) A localização dos marcos teve como Km 00 o Chafariz de Córrego Fundo. Para uma melhor visualização dos marcos no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 3 – Estudos Cartográficos, no item 11.1, está apresentada a Monografia dos Vértices Implantados.

Figura 3.1

Bacia Hidrográfica do Trairi

Arquivo: Bacia Hidrográfica Trairi.dwg

As medições foram feitas com GPS (Sistema de Posicionamento Global) Trimble 4600LS, de uma frequência com duração de rastreamento de 01 hora.

No Volume I – Estudos Básicos, Tomo 3 – Estudos Cartográficos, do Módulo III, encontram-se os cálculos realizados para o transporte de coordenadas, bem como os procedimentos adotados para a implantação dos marcos.

3.3 - TRANSPORTES DE COTAS

O transporte de cotas se fez a partir do marco do IBGE mais próximo, através de poligonais de nivelamento e de contra-nivelamento levantadas com equipamentos topográficos de precisão compatíveis com os serviços, Nível Wild NAK-1.

Tomou-se como base a RN nº 1852T do IBGE (chapa cravada no canto SE da ponte sobre o rio Trairi) com cota igual a 7,00 m, a uma distância de 18,94 km do eixo da Barragem.

A poligonal de contra-nivelamento foi levantada após a execução da poligonal de nivelamento. Estas poligonais são apresentadas nas cadernetas de campo, apresentadas no Capítulo 4 – Anexo, do Volume I – Estudos Básicos, Tomo 4 – Estudos Topográficos.

3.4 - LEVANTAMENTO DO EIXO BARRÁVEL E SANGRADOURO

O levantamento do eixo barrável foi executado com uma abrangência numa faixa de domínio de 150 metros à montante e 150 metros à jusante do referido eixo. Foram levantadas seções transversais ao eixo, com pontos cotados a cada 20 metros, de acordo com a faixa de domínio recomendada.

Os levantamentos dos eixos longitudinal e transversal do sangradouro seguiram a sistemática descrita anteriormente, sendo que as seções tiveram seus levantamentos prolongados à montante, até a cota fixada para soleira, e à jusante, até encontrarem o leito do rio.

Para distâncias maiores, o levantamento até o leito do rio foi feito acompanhando o canal de sangria, através de poligonais seccionadas a cada 50 metros, com 100 metros de largura para cada lado, com pontos cotados a cada 20 metros.

Utilizando-se um teodolito Wild T-1A, nº 156.024, locou-se o eixo da barragem e sangradouro, os quais foram materializados a cada 20 metros por pontos estaqueados, numerados e cotados, podendo ser encontradas estacas intermediárias indicando elementos importantes, tais como: talvegues, estradas, afloramentos rochosos, rede elétrica, elevações, mudanças bruscas de inclinação do terreno, etc.

Foram instalados 2 marcos de concreto para facilitar uma futura relocação. O primeiro denominado de M0 foi implantado na estaca 0, localizado na ombreira

esquerda com cota 34,66 m e o segundo, denominado de M1, na estaca 70 do eixo barrável, com cota 34,84 m.

O levantamento altimétrico da barragem Trairi, foi realizado utilizando-se um nível Wild NAK-1, nº 343.367, onde foram niveladas todas as estacas dos eixos materializados.

Esses levantamentos permitiram a confecção dos desenhos, da seção do boqueirão e do sangradouro com escala vertical 1:200 e horizontal 1:2000, e planta com curvas de nível a cada metro na escala 1:2000. Estes desenhos fazem parte do Volume I – Estudos Básicos, Tomo 4 – Estudos Topográficos.

A calha do rio à jusante também foi levantada, desde o eixo barrável até o ponto onde o canal de sangria encontra o rio. As seções são a cada 50 metros, com 100 metros de largura para cada lado do eixo. Os pontos foram cotados a cada 20 metros, sendo menor este espaçamento onde o relevo ou outro fator exigiu maior nível de detalhamento.

3.5 - LEVANTAMENTO DA BACIA HIDRÁULICA

Para a execução dos serviços plani-altimétricos na área da bacia hidráulica da barragem Trairi, o Consórcio firmou contrato com a empresa *BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A*, tendo como objetivo a execução de serviços de engenharia cartográfica, compreendendo cobertura aerofotogramétrica colorida, na escala 1:15.000 e mapas digitais na escala 1:5.000 da bacia hidráulica da barragem Trairi.

3.5.1 - Cobertura Aerofotogramétrica

A cobertura aerofotogramétrica teve todos os serviços executados de acordo com as Especificações Técnicas, sendo isentos de defeitos, de falhas e de omissões.

Toda a área sobrevoada foi realizada com aeronave modelo Navajo PA31 bimotor, equipada à tomada de aerofotos e homologada para vôos aerofotogramétricos.

As fotografias foram obtidas com câmara aerofotogramétrica da marca ZEISS, modelo RMK-TOP, de última geração, dotada de mecanismo compensador do arrastamento de imagens causado pelo deslocamento da aeronave, chassi giro-estabilizado, que compensa instantaneamente as eventuais inclinações da aeronave e mecanismo automático que possibilita o registro das coordenadas do centro da foto no momento da tomada.

Foi utilizado filme aerofotogramétrico colorido de base estável, marca Kodak Aerocolor HS Film SO 846 de alto poder resolutivo e quadro com formato útil de 23 x 23 cm

O processamento do filme e de todos os seus subprodutos foi realizado em laboratório, com condições de temperatura e umidade relativa controladas.

As cópias fotográficas foram executadas em copiadoras eletrônicas, utilizando papel fotográfico, semi-mate com graduação que permitiu bom contraste.

Para a confecção do foto-índice digital, as fotografias foram scannerizadas e montadas em faixas e estas em blocos, e, em seguida, reproduzidas em escala 4 (quatro) vezes menor que a escala original das fotos, em papel Semi Gloss, enquadradas por coordenadas geográficas, através de cruzetas desenhadas nos 4 (quatro) cantos de cada folha.

3.5.2 - Mapeamento Planialtimétrico

Para o apoio básico, foram implantados 06 vértices, monumentalizados por marcos de concreto de formato tronco piramidal medindo 10x12x50 cm, com chapa de bronze no centro do topo e elevado a 10 cm do solo.

Para a determinação das coordenadas de cada vértice da rede de apoio básico da Barragem Trairi tivemos na planimetria origem no Vértice Bastiões do IBGE de latitude 03°17'58,5465" S e longitude 39°37'33,9045" W e altitude de 53,65 m, e chegada no Vértice SA-24-1017 do IBGE de latitude 03°10'25,2202" S e longitude 39°28'12,4563" e altitude de 51,69m.

Inicialmente foram implantados os vértices M-01 a M-04, posteriormente complementados com M-05 e M-06. A determinação foi executada pelo método diferencial estático com rastreamento em tempo suficiente para resolver a ambigüidade com constelação mínima de 05 (cinco) satélites e PDOP de 06 (seis) ou menor, a fim de garantir uma precisão mínima de 1:100.000.

Para a geração dos trabalhos de aerotriangulação, as imagens foram obtidas a partir da scannerização dos negativos fotogramétricos na escala 1:15.000, com utilização de "scanner fotogramétrico" com capacidade de geração de imagens digitais com pixel de 28 microns.

A aerotriangulação espacial foi executada em equipamentos digitais ISM dotados de programa específico para o cálculo e ajustamento da mesma utilizando a scannerização executada.

No cálculo da aerotriangulação foi utilizado o programa PAT-B do professor Ackermann.

Para a vetorização dos elementos cartográficos: sistema hidrográfico; altimetria; referências de nível; e ortofoto, foram utilizados restituidores digitais dotados de programa específico.

Todos os trabalhos seguiram as *Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional*, atendendo ao padrão de PEC estabelecido a esse tipo de trabalho.

PLANTA A3 BACIA HIDRÁULICA

3.6 - LEVANTAMENTO DOS EMPRÉSTIMOS

Com a utilização de um teodolito Wild T-1A foram realizadas as locações e os levantamentos planialtimétricos das áreas das ocorrências de materiais que poderão ser utilizados na construção da barragem, e amarradas à poligonal do eixo barrável através de uma linha de base auxiliar (que poderá se constituir no eixo do acesso ao local da obra). Todos os poços escavados na investigação dos empréstimos foram locados, numerados e amarrados à linha de base auxiliar através de eixos de locação. Foram confeccionados desenhos individuais, em escala apropriada, com a planta baixa das áreas dos empréstimos mostrando a localização de todas as ocorrências de material, de forma que possibilite a definição das distâncias de transporte. Tais desenhos e todos os dados necessários para localização e identificação dos empréstimos estão apresentados no Volume I – Estudos Básicos, *Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

3.6.1 - Jazida

Foi estudada uma jazida de material terroso, denominada J 01, localizada na estaca 67=00 do eixo da barragem, com uma área de 340.000m² e volume útil de 363.800m³. A jazida foi estudada através de sondagens a pá e picareta, executadas nos vértices de uma malha de 100m x 50m, onde foram realizados 89 poços.

3.6.2 - Areal

Foram estudados 03 (três) areais, sendo estes:

- Areal 01 - Areia de rio (rio Mundaú), localizado na estaca 24 do eixo da barragem, com área de 35.000m² e um volume útil de 52.000m³.
- Areal 02 - Areia de rio (rio Trairi). O material encontra-se a 6 km a montante e está submerso.
- Areal 03 - Areia de rio (rio Santana). O material coletado foi analisado, mostrando-se inadequado para utilização na barragem.

3.6.3 - Pedreira

A pedreira 01 de onde será extraído o material pétreo necessário a construção da barragem está localizada à 6 km do eixo da barragem e possui um volume útil de 45.000m³.

3.7 - SÍNTESE DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Discriminação do Serviço	Quantidade
Locação e nivelamento do eixo barrável e do sangradouro	2,55 Km
Levantamento das secções do eixo barrável e do sangradouro	28,80 Km
Locação e nivelamento da poligonal do canal de sangria e da calha do rio	14,62 Km
Levantamento de jazidas (malha 100 x 100)	42,0 Ha
Transporte de cotas	18,94 Km
Transporte de coordenadas	26,00 Km

1

5

4 - ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

4 - ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

4.1 - GEOLOGIA REGIONAL

A descrição da geologia regional teve como fonte de pesquisa o Mapa Geológico do Estado do Ceará, elaborado em 1983, pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em convênio com o Governo do Estado do Ceará, em escala 1:500.000 e o Projeto Fortaleza, executado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais através do convênio DNPM/CPRM, em 1981, tendo sido consideradas as terminologias adotadas pelo Projeto Fortaleza.

O rio Trairi, escolhido para a formação da barragem é um rio intermitente que integra a bacia litorânea à noroeste do Estado do Ceará, desaguando no mar.

Quatro feições morfológicas estão presentes. A primeira compreende a faixa litorânea caracterizada pelas dunas, dispostas em cordões paralelos à costa. Entre o relevo litorâneo e as serras altas do interior, desenvolve-se a segunda feição, representada pelos tabuleiros cenozóicos, ocupando uma faixa de largura entre 30 a 50Km ao longo da costa, formando uma superfície aplainada, suavemente inclinada para o mar. Essas coberturas pertencem aos sedimentos do Grupo Barreiras Indiviso de idade Tércio-quadernária. A terceira feição corresponde a um extenso pediplano de rochas cristalinas Pré-cambrianas, constituindo um conjunto profundamente arrasado, com cotas em torno de 60m. Sobressaindo desse relevo monótono tem-se a feição representada pelos maciços montanhosos esculpido em rochas cristalinas, destacando-se a serra Sítio Verde, próximo à cidade de Itapipoca, e a serra de Uruburetama, no município de mesmo nome.

A geologia da área é representada em grande parte pelas rochas cristalinas pré-cambrianas, ocorrendo os sedimentos cenozóicos na porção ao norte de Itapipoca, bem como nas áreas onde se situam Trairi e Paraipaba, próximo ao litoral.

As rochas cristalinas pré-cambrianas foram agrupadas em cinco unidades litoestratigráficas individualizadas segundo os critérios estruturais e sendo consideradas as associações litológicas, estratigraficamente indiferenciadas, visto que os elementos estruturais relacionados aos eventos geológicos foram mascarados pela tectônica superimposta desenvolvida em vários ciclos de reativação.

Passa-se a descrever a seguir as unidades descritas nas fontes de pesquisa supracitadas:

- **Complexo Caicó:** esta unidade é constituída de gnaisses variados, incluindo lentes de quartzito, metarcósio, anfíbolito e calcário cristalino. Além de migmatitos com estruturas planares bem desenvolvidas (metatexitos) e com estruturas homogeneizadas (diatexitos). O “trend” estrutural está orientado segundo NE-SW, tendo como características na região de domínio dos gnaisses as feições retilíneas. A ausência de foliação é característica no domínio dos diatexitos.
- **Rochas Plutônicas Granulares:** esta unidade representa todas as rochas granulares formadas em baixo da superfície terrestre, representada por granitóides, gabróides e sienitos posicionados concordantes com o “trend” regional. Os granitóides estão representados por um corpo a noroeste de Itapipoca, com coloração rósea, granulação grosseira e contatos transicionais. Os gabróideas ocorrem em corpos geralmente com forma ovóide, apresentando contatos transicionais, eventualmente bruscos, bordejados por rochas foliadas e apresentando composição predominantemente diorítica, ocorrendo em dois pequenos corpos situados na porção sudeste da área, entre Apuiarés e Canafístula, próximo do rio Curú.
- **Complexo Tamboril-Santa-Quitéria:** Apresenta uma morfologia uniformemente elevada e tem contatos transicionais para com as rochas cristalinas circunjacentes. Compreende litologias altamente migmatizadas, apresentando uma zonação da periferia para o núcleo, começando com gnaisses e migmatitos homogeneizados, com culminações granitóides nas porções mais centrais da unidade. Estratigraficamente trata-se de um domo gnaisse-granito, também chamado de domo migmatítico. Está orientado segundo o “trend” da estruturação regional. Os corpos granitóides pertencentes às porções centrais deste domo são, petrograficamente, constituídos por granitos granodioritos de grã média a grossa equigranulares ou porfiróides.
- **Grupo Ceará:** compreende uma sequência formada por quartzitos na base, seguida de xistos, filitos, gnaisses e lentes carbonáticas no topo da sequência. O quartzito, o filito e a fácies carbonática podem, localmente estar ausentes. Via de regra a unidade mostra-se dobrada, formando

sinclinais assimétricas ou reviradas, fazendo contatos aparentemente concordantes com o Complexo Caicó.

- **Diques Ácidos:** são agrupados nesta unidade todas as rochas filoneanas de caráter petrográfico ácido e hiperácido, como granitos filoneanos, pegmatitos e veios quartzosos e de sílica cripto-cristalina. Essas rochas geralmente não são mapeáveis em escala regional e ocorrem preenchendo fraturas com direções NW, NE ou N-S.

Da era Cenozóica, estão presentes as unidades mais recentes, estratigraficamente falando, divididas da seguinte forma:

- **Grupo Barreiras Indiviso:** de idade Tércio-quadernária, ocorre formando extensos tabuleiros, fazendo contatos nítidos com as rochas cristalinas e constituindo uma sequência sedimentar representada por conglomerados, arenitos e siltitos de cores variegadas com intercalações de argila e cascalhos.
- **Sedimentos Litorâneos:** esta unidade é formada por cordões areníticos de idade recente, representados por arenitos flúvio-marinhos e sedimentos inconsolidados de origem eólica, que constituem as dunas, desenvolvendo-se paralelamente à linha de costa, capeando a sequência sedimentar do Grupo Barreiras, podendo ser subdivididas, de acordo com suas características genéticas, morfológicas e faciológicas, em dunas móveis e paleodunas; as primeiras constituídas de sedimentos inconsolidados, formadores de dunas de praia, estando intimamente condicionados ao desenvolvimento da geomorfologia litorânea; as segundas, representadas pelas dunas antigas, rebaixadas quase ao nível dos tabuleiros costeiros, pelo constante retrabalhamento dos ventos, constituídas litologicamente por areias de grã fina a média, raramente siltosas, quartzosas e/ou quartzofeldspáticas, com grãos arredondados e foscas, bem selecionados, de coloração variando de cinza-claro a alaranjado no topo e avermelhado na base.
- **Aluviões:** são formações recentes, de idade quadernária, constituídas de depósitos fluviais ou lagunares, compondo-se de sedimentos arenosos inconsolidados. Ocorrem principalmente nos leitos e margens dos

principais rios e riachos da região, destacando-se os rios Aracatiaçu, Cruxati, Mundaú, Trairi e Curú.

Estruturalmente nenhum evento de grandes proporções se destaca na região. Na porção noroeste da região, a aproximadamente 35km de Córrego Fundo (local escolhido para o barramento), tem-se o final da falha de Forquilha, que apresenta uma direção NE-SW e rejeito dextrógiro. Sua extensão total é de aproximadamente 130km, passando por Groaíras, Forquilha e adentrando na calha do rio Cruxati, onde é coberta pelas aluviões e pelos sedimentos terciário-quadernários existentes na porção setentrional da região. Ao longo da área que será ocupada pela bacia hidráulica da barragem em estudo, se desenvolve um extenso falhamento, com aproximadamente 15Km de extensão, com direção quase N-S.

Na Figura 4.1, a seguir, é mostrada a geologia regional da área compreendida entre as seguintes coordenadas geográficas: Meridianos – 39° 00' a 39° 45' de longitude oeste e Paralelos 3° 00' a 4° 00' de latitude sul, compilada do Mapa Geológico do Estado do Ceará, em escala 1:500.000, elaborado em 1983.

4.2 - GEOLOGIA LOCAL

A área estudada fica no município de Trairi, próximo à localidade de Córrego Fundo, no Estado do Ceará.

Ao longo do eixo topográfico locado, o terreno se desenvolve através de uma topografia plana, com suaves declividades para os talwegues dos rios, constituído de sedimentos inconsolidados pertencentes ao Grupo Barreiras, sendo um fato marcante, a ausência total de afloramentos. Esses sedimentos possuem uma cobertura arenosa rasa (em torno de 10 a 40 cm de espessura), de coloração esbranquiçada, com pedregulhos de quartzo, sobre um pacote espesso de sedimento silto-areno-argiloso de granulação fina a média, de coloração avermelhada, creme ou amarelada, com estratificação indistinta e, muitas vezes, apresentando um bom índice de plasticidade. Ainda no local do barramento, ocorre, pela margem esquerda do rio Trairi, uma faixa de depósito aluvial constituída por sedimentos de granulação fina, siltosos e argilosos de coloração cinza clara a escura, contendo matéria orgânica. No local definido para o sangradouro, todo o terreno é constituído pelos mesmos sedimentos pertencentes ao Grupo Barreiras supra descritos, verificando-se total ausência de afloramentos de rocha ao longo da superfície.

Figura 4.1

Geologia regional

Arquivo Corel

Ao longo da área de ocupação da bacia hidráulica foram identificadas feições geológicas mais diversificadas, com ocorrências de rochas pré-cambrianas graníticas, gnáissicas e quartzíticas, bem como áreas dominadas por sedimentos do Grupo Barreiras, de idade Tércio-quadernária, e/ou por coberturas colúvio-eluviais, também Tércio-quadernárias, além dos depósitos aluviais, do Quadernário, que se desenvolvem nas margens dos principais rios e riachos. A maior parte da área é caracterizada por uma topografia plana com suaves ondulações, com predominância dos terrenos de superfície arenosa que muitas vezes dificultam visualmente a distinção e separação entre um tipo e outro, ou seja, se pertencem ao Grupo Barreiras ou se representam sedimentos colúvio-eluviais.

Na área constituída predominantemente pelos sedimentos colúvio-eluviais o terreno é caracterizado por uma camada superficial de solo proveniente da decomposição da rocha subjacente, formando um manto com espessura média entre 0,60m a 2,00m de profundidade, que recobre rochas cristalinas, com escassez de afloramentos, de topografia plana e suave. Tratam-se de sedimentos imaturos, inconsolidados, provenientes da alteração de rochas cristalinas transformados em sedimentos areno-silto-argilosos, contendo grãos de quartzo pouco desgastados e palhetas de mica e grãos de feldspatos em vias de alteração com coloração avermelhada ou amarelada e granulação fina a média. Esses sedimentos, quando mais lixiviados, apresentam-se mais arenosos e são mais esbranquiçados. Nos leitos das grotas, onde o terreno é mais dissecado pela erosão, ocorrem com frequência afloramentos de pegmatito, que caracterizam as rochas filoneanas que preenchem fraturas.

Muitas vezes se pode notar, na superfície do terreno, veios de quartzo que se preservaram durante o processo de formação desses sedimentos, bem como extensas áreas com cobertura de seixos angulosos e/ou rolados de quartzo e sílica e fragmentos de rochas formando zonas que se pode definir como “cascalheiras”; no mapa geológico da bacia hidráulica, apresentado em anexo, está indicado o ponto de coordenadas 459.731E / 9.626.994 em uma área de ocorrência desse tipo de material com recobrimento de seixos de quartzo sobre a superfície do terreno. Há também uma área de concentração laterítica, cujo solo de matriz areno-argilosa, com concreções ferruginosas e seixos rolados de quartzo, de cor vermelho e amarelo, variegado e mosqueado, constitui uma jazida de “piçarra”, indicada no mapa geológico da bacia hidráulica através dos pontos com as seguintes coordenadas: 460.100E/9.627.200N,

460.491E/9.627.366N, 460.348E/9.627440N, 460.766E/9.627.162N. Na área de domínio dos sedimentos pertencentes ao Grupo Barreiras a topografia do terreno também é plana e suave e o solo tem grandes espessuras que, conforme pode-se verificar nos cacimbões escavados na área, ultrapassa 10m de profundidade, e é constituído de sedimentos areno-argilosos, não ou poucos litificados, consistentes, pois em muitos casos as paredes dos cacimbões não possuem revestimento, de coloração avermelhada, creme ou amarelada, muitas vezes com aspecto mosqueado, mal selecionados, de granulação fina a média, com horizontes conglomeráticos e níveis lateríticos, de matriz argilosa caulínica, com cimento argilo-ferruginoso e às vezes silicoso.

Na área de ocorrência dos granitos há grandes afloramentos distribuídos de forma dispersa, sobressaindo-se da topografia plana do terreno, muitas vezes constituindo áreas de potencial para exploração de material pétreo, inclusive alguns locais com indícios de exploração paralisada. A rocha, via de regra, apresenta aspecto são e alta dureza, de coloração cinza clara a rósea, leucocrática, textura equigranular, algumas vezes porfiróide, granulação média a grossa, pouco fraturada, eventualmente recortada por veios quartzo-feldspáticos, constituída essencialmente de quartzo, feldspato (plagioclásio e ortoclásio) e biotita. Foram indicados alguns pontos que merecem atenção no sentido de se investigar a viabilidade de exploração de material pétreo para a obra, cujas coordenadas são enumeradas a seguir: 460.112E/9.626.450N, 459.507E/9.626.170N, 459.310E/9.626.200N, 459.115E/9.626.276N, 459.981E/9.626.076N.

Na porção mais à montante ao longo do rio Trairi, ou seja, no extremo da bacia hidráulica, ocorrem as rochas gnáissicas, que afloram próximo às margens e no leito do rio Trairi, apresentando cor cinza clara a escura, granulação fina a média, com minerais bem orientados, exibindo foliação e bandeamento, algumas vezes migmatizada, em alguns locais intensamente fraturada e alterada, milonítica, de cor amarelada e granulação muito fina, constituída essencialmente de quartzo, feldspato e biotita, e subordinadamente muscovita e hornblenda, tendo a granada como mineral acessório em grande quantidade. A rocha é frequentemente recortada por veios de quartzo com espessura variando de 1cm a 3cm, concordantes com a foliação, que tem orientação preferencial segundo NE-SW e mergulhos subverticais entre 60° a 70°, ora para NW, ora para SE, atribuindo-se essa variação aos dobramentos a que foi submetida a rocha.. São também comuns as ocorrências de zonas cataclásticas e miloníticas além de veios pegmatíticos que recortam a litologia tanto de forma

concordante como discordante com a foliação. As características descritas evidenciam a presença de zona de falha.

A este do eixo da barragem, a uma distância aproximada de 1.200 m da ombreira direita, ocorre uma área constituída de quartzito, formando uma elevação alongada que se sobressai na topografia, configurando um corpo de forma elipsoidal. A rocha apresenta uma certa anisotropia, com minerais bem orientados constituindo uma lineação, com acamamento visível, de cor creme e amarela com tons avermelhados, bastante fraturada, de granulação fina e textura maciça, contendo essencialmente quartzo, mas também apresentando presença marcante de mica (muscovita), sendo recortada, concordantemente, com frequência, por veios pegmatíticos. A atitude do acamamento medida se dá segundo N168°Az/68°SW, ou seja, com direção segundo NW-SE, discordante com o “trend” regional, que é NE-SW.

As aluviões constituem depósitos sedimentares recentes de idade quaternária que formam faixas alongadas estreitas e sinuosas depositadas nas calhas e margens do rio Trairi e de seus contribuintes, constituídos de silte-areno-argiloso de cor cinza escura nas margens, e areias finas mal selecionadas, algumas vezes com seixos e fragmentos de rochas nas calhas. As ocorrências de areia para agregados nas calhas dos rios e riachos da área são muito escassas, com potencial de volume indisponível para a exploração necessária à obra, sendo necessário a investigação em outra região próxima que venha atender essa necessidade.

A drenagem local, nas áreas de domínio das rochas cristalinas, ocorre conforme o modelo regional, ou seja, mantém o padrão dendrítico, que é condicionado à litologia das rochas cristalinas.

Quanto ao aspecto estrutural, a feição mais relevante que evidencia a existência de movimentação ruptural e dúctil, é um falhamento existente na porção mais à montante da bacia hidráulica, na área de domínio dos gnaisses, com direção aproximadamente segundo N-S, com evidências de cataclase e milonitização nos afloramentos visualizados. Outro aspecto estrutural é a configuração retilínea de alguns córregos e riachos com afloramentos de pegmatito nos seus leitos, evidenciando fraturamentos com preenchimento dessas rochas filoneanas. Na faixa próxima ao eixo

locado, nenhuma estrutura pode ser visualizada a nível de superfície, já que o terreno é totalmente encoberto por espesso pacote de sedimentos inconsolidados.

4.3 - LEVANTAMENTO GEOLÓGICO DE SUPERFÍCIE

O levantamento geológico de superfície realizado ao longo do eixo topográfico locado, e na área de ocupação da bacia hidráulica, teve como principal objetivo a identificação e classificação dos tipos litológicos ocorrentes, visando a definição dos traçados dos contatos litológicos e não necessariamente geológicos.

O eixo topográfico locado se subdivide em dois segmentos contínuos que dividem o sangradouro e a barragem, ficando o sangradouro na ombreira esquerda com estaqueamento ao longo do eixo a cada 20 metros, com um trecho decrescente da esquerda para a direita (Est. 08 a Est. 00=11+10,00m), e outro trecho também decrescente da esquerda para a direita (Est. 11+10,00m a Est. 00=00 da barragem); o eixo da barragem, também estaqueado a cada 20m, com a numeração das estacas crescendo no sentido oposto ao do sangradouro, ou seja, da ombreira esquerda para a direita (Est. 00=Est.00 do sangradouro a Est. 79). Ao longo do eixo foram identificadas as seguintes litologias:

- ***Da estaca 08 do sangradouro a 22+10,00m da barragem***

O terreno tem topografia plana com suave declividade em direção ao talvegue do rio. Em toda a extensão dessa área o terreno se constitui de um solo composto de sedimentos inconsolidados pertencentes ao Grupo Barreiras, com ausência total de afloramentos, e com cultivo de melancias em toda área. O solo de cobertura mais superficial é silto-arenoso, de granulação fina, com pedregulhos de quartzo, de cor cinza clara e vermelha, variegada, contendo raízes, até uma espessura em torno de 40 cm, recobrimo um solo contendo areia fina, argilosa de cor vermelha, com boa trabalhabilidade, em termos de plasticidade. Na Est. 10+10,00m, em torno de 190 metros para jusante do eixo do sangradouro há um cacimão escavado com profundidade em torno de 8,00m, cujo nível d'água está a aproximadamente 6,50m. Não há indícios de rocha e o solo escavado é composto de silte areno-argiloso com concreções ferruginosas (laterita), com níveis conglomeráticos, com porções caulínicas, de coloração mosqueada de tons branco, vermelho e amarelo. O material escavado tem ótima consistência, pois as paredes do cacimão não possuem revestimento. Nas margens e leito de um córrego que passa mais à jusante, não há indícios de afloramentos, e o solo é arenoso, de granulação fina, homogêneo, de cor

cinza claro. Na Est. 22+10,00m, no eixo, tem-se o contato entre os sedimentos da Formação Barreiras e a faixa de aluvião que ocorre pela margem esquerda do rio Trairi, abrangendo o riacho Santana.

- ***Da estaca 22+10,00m a 39+10,00m (barragem)***

Nesta faixa tem-se o domínio dos solos aluviais, apresentando uma constituição fina e formados por areia fina, silte e argila, de cor cinza clara a escura, ricos em matéria orgânica. As calhas do rio Trairi e do riacho Santana com largura em torno de 20 metros, encontravam-se com água.

- ***Da Est. 39+10,00m a Est. 79***

O terreno tem as mesmas características descritas no primeiro trecho, com topografia plana, com suave declive em direção ao leito do rio. O solo superficial, que é mais lixiviado, tem composição silto-arenosa, granulação fina, com pedregulhos de quartzo. O solo subjacente, verificado através de formigueiros, tem composição silto-areno-argilosa, de granulação fina a média, de coloração avermelhada, creme ou amarelada, apresentando um bom índice de plasticidade.

4.4 - INVESTIGAÇÕES NO BARRAMENTO

4.4.1 - Sondagens Realizadas

As investigações geotécnicas realizadas no local da barragem objetivaram a identificação e compreensão das características e peculiaridades do solo de fundação e do substrato rochoso deste sítio, visando a concepção de um maciço tecnicamente adequado e seguro, além de economicamente viável.

Nestas investigações procurou-se identificar as características do pacote aluvionar, quanto ao aspecto hidráulico e de suporte, através das sondagens à percussão e ensaios de infiltração, caracterizar a camada de solo e/ou alteração de rocha, sob o aspecto geomecânico e de transmissibilidade hidráulica, através das sondagens rotativas e ensaios de perda d'água.

Ao longo do eixo barrável foram realizadas 15 sondagens, sendo 11 sondagens à percussão e 04 sondagens mistas.

Todos os furos de sondagem foram referenciados ao eixo topográfico implantado e tiveram as cotas das bocas levantadas através de nivelamento topográfico.

A locação das sondagens, bem como os perfis individuais das sondagens realizadas e seus respectivos ensaios, são encontrados no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos.

4.4.1.1 - Sondagens à Percussão

O objetivo principal destas sondagens foi à definição da espessura dos depósitos aluvionares sobre o embasamento rochoso e as resistências das camadas através do “SPT” (STANDARD PENETRATION TEST), realizado a cada metro sondado.

Todas as sondagens à percussão foram executadas com diâmetro 2 1/2” polegadas e o critério de paralisação da perfuração foi em função da lavagem por tempo (menos de 5cm de penetração para cada dez minutos de lavagem).

Foram executadas 09 sondagens à percussão no eixo da barragem e mais duas sondagens a montante e jusante na estaca 25, perfazendo um total de 69,28m. É apresentado a seguir, no Quadro 4.1, o resumo das sondagens, com suas respectivas profundidades, amarração e estaqueamento e o número de ensaios “Le Franc” e de perda d’água “Lugeon”.

Quadro 4.1 – Resumo das Sondagens à Percussão

Sondagem	Ensaio		Profundidade (m)			Amarração / Estaqueamento
	Le Franc	Lugeon	Solo	Rocha	Total	
SP-10			4,60	-	4,60	Est. 25
SP-15	06		11,50	-	11,50	Est. 51
SP-17			14,18	-	14,18	Est. 72
SP-20			7,45	-	7,45	Est. 76+10m
SP-21			1,45	-	1,45	Est. 25
SP-22			2,45	-	2,45	Est. 25 (60m/M)
SP-23			4,45	-	4,45	Est. 25 (60m/J)
SP-24			3,78	-	3,78	Est. 17
SP-25			4,75	-	4,75	Est. 13
SP-29			8,20	-	8,20	Est. 46
SP-30			5,48	-	5,48	Est. 55
Total	06				68,29	

4.4.1.2 - Sondagens Mistas

Foram executadas 04 sondagens mistas, perfazendo um total de 64,35 metros. No Quadro 4.2 a seguir, é apresentado o resumo das sondagens com suas respectivas profundidades, amarração, estaqueamento e o número de ensaios “*Le Franc*” e de perda d’água “*Lugeon*”.

Os trechos de sondagens rotativas foram executados com coroa NX (diâmetro externo: 75,3mm e interno 54,7mm) acoplada a um barrilete duplo giratório com caixa de mola. A sonda utilizada foi uma MACH 920 da Maquesonda de avanço manual. Para cada operação do barrilete foram registradas a percentagem de recuperação e o número de peças - dados que podem ser visualizados nos perfis de sondagens.

As sondagens mistas foram iniciadas pelo método de sondagem a percussão e prosseguidas por sondagens rotativas. A metodologia empregada é a mesma para sondagens a percussão e rotativas.

Quadro 4.2 – Resumo das Sondagens Mistas

Sondagem	Ensaios		Profundidade (m)			Amarração / Estaqueamento
	Le Franc	Lugeon	Solo	Rocha	Total	
SM-11	04	03	8,00	9,65	17,65	Est. 29
SM-12	04	03	6,50	10,00	16,50	Est. 34+10m
SM-13	03	03	6,00	9,00	15,00	Est. 38+10m
SM-14	03	03	6,20	9,00	15,20	Est. 42
Total	14	12			64,35	

4.4.1.3 - Ensaios de Campo

Nas sondagens mistas, em trecho de solo, e nas sondagens percussivas foram executados ensaios de infiltração do tipo *Le Franc*, para a determinação do coeficiente de permeabilidade “*in situ*” do substrato terroso. No trecho em rocha das sondagens mistas, foram executados ensaios de perda d’água sob pressão (ensaio de *Lugeon*), para a determinação quantitativa sobre a circulação de água através das fissuras do substrato rochoso.

Os resultados destes ensaios podem ser encontrados no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos.

4.5 - INVESTIGAÇÕES DO SANGRADOURO

4.5.1 - Sondagens Realizadas

Os estudos geotécnicos no local do sangradouro foram realizados com a finalidade de fazer a identificação e caracterização do subsolo, inclusive, avaliando a capacidade do material rochoso de resistir aos processos erosivos provocados pelas descargas previstas.

Ao longo do sangradouro foram realizadas 09 sondagens a pá e picareta, 06 sondagens à percussão e 01 sondagem mista.

Todos os furos de sondagem foram referenciados ao eixo topográfico implantado e tiveram as cotas das bocas levantadas através de nivelamento topográfico.

A locação das sondagens, bem como os perfis individuais das sondagens realizadas e seus respectivos ensaios, são encontrados no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos.

4.5.1.1 - Sondagens a Pá e Picareta

As sondagens a pá e picareta distribuídas ao longo do sangradouro, foram realizadas objetivando o balizamento rochoso abaixo do capeamento dos solos residuais. Todos os poços foram perfurados até o ponto em que a alteração de rocha não mais permitisse a escavação com pá e picareta.

Foram executadas 09 sondagens a pá e picareta perfazendo um total de 20m. É apresentado no Quadro 4.3, o resumo das sondagens com suas respectivas profundidades, amarração e estaqueamento.

Quadro 4.3 – Resumo das Sondagens a Pá e Picareta no Sangradouro

Sondagem	Profundidade (m)	Amarração /
----------	------------------	-------------

Estaqueamento

	Solo	Rocha	Total	
SPP-01	5,20	-	5,20	Est. 01MExLS/OE
SPP-02	1,60	-	1,60	Est. 04MExLS/OE
SPP-03	2,10	-	2,10	Est. 07MExLS/OE
SPP-04	1,60	-	1,60	Est. 10MExLS/OE
SPP-05	2,80	-	2,80	Est. 01JExLS/OE
SPP-06	2,20	-	2,20	Est. 04JExLS/OE
SPP-07	2,00	-	2,00	Est. 07JExLS/OE
SPP-08	1,50	-	1,50	Est. 09JExLS/OE
SPP-09	1,00	-	1,00	Est. 11JExLS/OE
Total			20,00	

No sangradouro ainda foram realizadas as sondagens apresentadas nos quadros a seguir.

Quadro 4.4 – Resumo das Sondagens à Percussão no Sangradouro

Sondagem	Profundidade (m)			Amarração / Estaqueamento
	Solo	Rocha	Total	
SP-02	24,32	-	24,32	Est. 10_S/OE
SP-05	20,02	-	20,02	Est. 05+10_S/OE
SP-08	20,03	-	20,03	Est. 03+10_S/OE
SP-26	15,45	-	15,45	Est.02+10J_ExLS/OE
SP-27	15,45	-	15,45	Est. 05J_ExLS/OE
SP-28	15,26	-	15,26	Est. 02+10M_ExLS/OE
Total			110,53	

Quadro 4.5 – Resumo das Sondagens Mistas no Sangradouro

Sondagem	Profundidade (m)			Amarração / Estaqueamento
	Solo	Rocha	Total	
SM-15	19,00	11,00	30,00	Est. 00_ExS/OE
Total			30,00	

4.6 - ESTUDOS DOS MATERIAIS

Os estudos das ocorrências de materiais para a utilização na construção da Barragem Trairi tiveram início com o reconhecimento de toda a área em volta do eixo do barramento para a seleção das ocorrências aproveitáveis, considerando a qualidade e o volume dos materiais disponíveis.

Foram estudadas as seguintes ocorrências:

- Jazida 01 - Material terroso para a construção do maciço, com área igual a 340.000m² e volume útil de 363.800m³;
- Areal 01 - Areia de rio (rio Mundaú) que será usada nas transições, filtros, drenos e concretos, com uma área de 35.000m² e um volume útil de 52.5000m³
- Areal 02 - Areia de rio (rio Trairi). O material encontra-se a 6 km a montante e está submerso.
- Areal 03 - Areia de rio (rio Santana). O material coletado foi analisado, mostrando-se inadequado para utilização na barragem.
- Pedreira 01 - Para a produção de pedra para enrocamento e brita. Está localizada à 6km do eixo da barragem e possui um volume útil de 45.000m³.

As localizações e acessos a todas as ocorrências, em relação ao eixo barrável, estão apresentadas em croquis individuais específicos, constante no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos.

4.6.1 - Jazida

A jazida de materiais terrosos (J 01) foi estudada através de sondagens a pá e picareta executadas nos vértices de uma malha quadrada de 100m x 50m. Da jazida foram coletadas amostras para a execução dos seguintes ensaios de laboratório: Granulometria por Peneiramento, Granulometria por Sedimentação, Limites de Consistência, Peso Específico dos Grãos, Umidade Natural e Ensaio de Compactação (Proctor-Normal). Foram realizados ainda os seguintes ensaios especiais: Permeabilidade com Carga Variável e Cisalhamento Direto Lento.

A seguir é apresentado um resumo dos ensaios geotécnicos realizados na Jazida 01. A classificação táctil-visual e os resultados dos ensaios são apresentados no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos.

Quadro 4.6 - Resumo dos Ensaios Geotécnicos Área de Empréstimo - Jazida 01

ENSAIOS	FUROS COLETADOS																					
	03	05	07	09	10	12	14	17	19	21	22	25	27	29	31	33	35	37	38	39	41	
Sedimentação	X							X		X					X		X		X			
Peneiramento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Permeabilidade	X							X		X					X		X		X			
Compactação	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limite Liquidez	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limite Plasticidade	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cisalhamento									X												X	
ENSAIOS	FUROS COLETADOS																					
	42	43	45	47	49	51	52	54	56	58	60	62	64	66	68	72	75	80	81	84		
Sedimentação	X		X	X			X				X		X	X	X	X						
Peneiramento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Permeabilidade	X		X	X			X				X		X	X	X	X						
Compactação	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limite Liquidez	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Limite Plasticidade	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cisalhamento						X			X			X				X		X				

4.6.2 - Areal

No Areal 01 foram coletadas amostras para a classificação táctil-visual e para a realização, em laboratório de ensaios de Granulometria por Peneiramento e Permeabilidade com Carga Constante. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados no Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos. A seguir é apresentado um quadro com o resumo dos ensaios do Areal.

Quadro 4.7 - Resumo dos Ensaios Geotécnicos do Areal 01

ENSAIOS	FUROS COLETADOS			
	02	05	07	10
Granulometria	X	X	X	X
Permeabilidade (Carga Constante)	X	X	X	X

4.6.3 - Pedreira

Para a Pedreira 01 foi coletada uma amostra para a realização do ensaio de Desgaste por Abrasão tipo “Los Angeles”. O resultado deste ensaio está apresentado Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos.

5 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS

5 – ESTUDOS HIDROLÓGICOS

5.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

O açude Trairi barra o rio de mesmo nome nas coordenadas UTM 462.477,717E e 9.642.782,442N. A barragem situa-se próximo da localidade denominada de Córrego Fundo, no km 119 da rodovia estruturante CE-085. O quadro a seguir apresenta um resumo dos dados característicos da bacia em estudo.

Quadro 5.1 – Caracterização da Bacia

Área da bacia do Açude Trairi	327,02 km ²
Perímetro da bacia do Açude Trairi	81,7 km
Declividade Média da bacia do Açude Trairi	5,85 m/km
Comprimento do rio principal	31,85 km
Fator de compactidade	1,31
Fator de forma	0,32
Tempo de concentração	7,25 hrs

A Figura 5.1 mostra a altimetria da bacia hidrográfica do Açude Trairi. Na mesma figura é possível visualizar a bacia hidráulica do Açude Água Boa a montante do Açude Trairi, com um volume aproximado de 24 hm³.

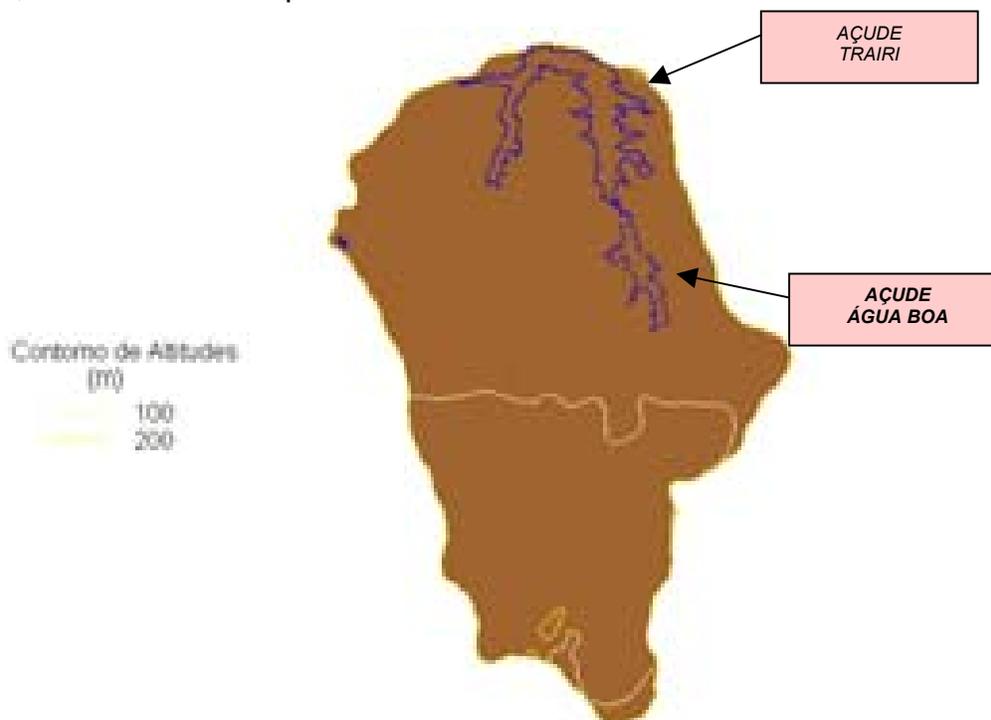


Figura 5.1. Bacia do Açude Trairi

As definições de solos e cobertura vegetal da área em estudo constituem elementos importantes na formação do regime de escoamento superficial. A cobertura vegetal representa o primeiro obstáculo encontrado pela precipitação e tem papel importante na interceptação e na evapotranspiração. Os solos através da sua capacidade de infiltração, capacidade de retenção de água próximo à superfície e da presença de depressões evaporativas, definem os movimentos das águas que ultrapassaram a cobertura vegetal.

A bacia do Açude Trairi tem solos Latosol Vermelho Amarelo Distrófico e Regosol Distrófico (LVd10 e Red32, respectivamente. Ver Figura 5.2) predominantemente, o que associado com o relevo da bacia resulta em solos com moderada a elevada capacidade de drenagem (Figura 5.3). A vegetação predominante é o complexo vegetacional da zona litorânea (Figura 5.4) e o principal uso é a agricultura de culturas anuais, temporárias e permanentes (Figura 5.5).

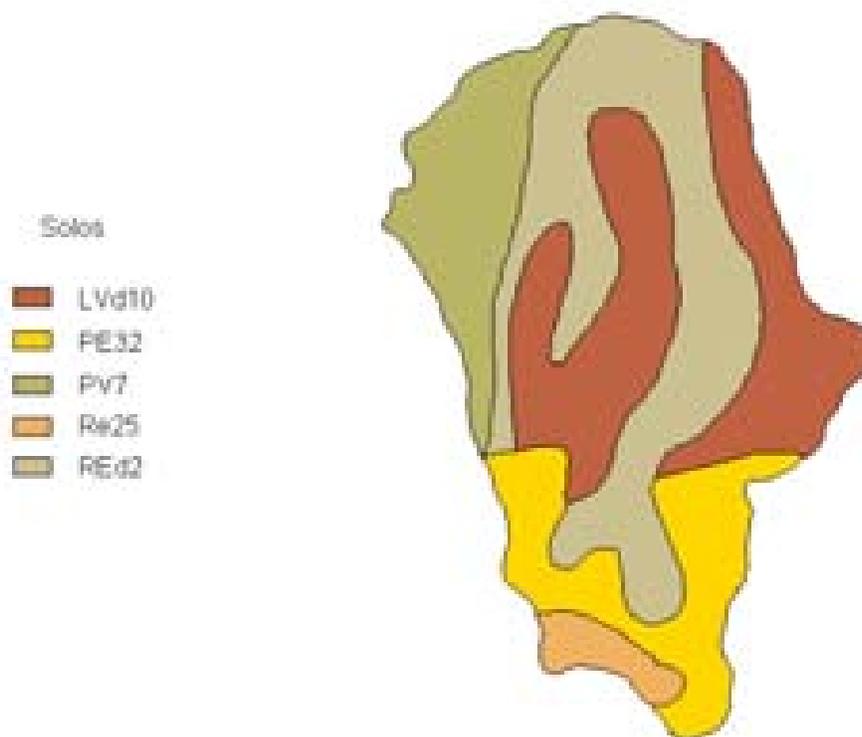


Figura 5.2. Solos da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).



Figura 5.3. Grupos Hidrológicos de Solos da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).



Figura 5.4. Vegetação da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).



Figura 5.5. Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).

5.2 - ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

O rio Trairi tem sua nascente próxima a Lagoa Queimada e Serrote do Bringel desaguando em um complexo de lagoas (Lagamar da Rua, do Carrapicho, da Torta, do Livramento e do Sal) drenando uma área de 327,02 km². Não existe nenhuma estação hidroclimatológica nos domínios da bacia do rio Trairi, sendo por isso utilizada como estação representativa a de Sobral, com denominação homônima de sua localidade (INEMET, 1991). As normais climatológicas aqui apresentadas são referentes aos dados coletados pelo INEMET entre o período 1969-1989.

O Quadro 5.2, a seguir, apresenta uma síntese dos indicadores do clima da bacia em estudo.

Quadro 5.2 – Resumo dos Indicadores Climáticos

Pluviometria média anual	1150,5 mm
Evaporação média anual	1914,7 mm
Evapotranspiração Potencial (Hargreaves)	1853,8 mm
Insolação média anual	2416,6 h

Continuação

Umidade relativa média anual	67,9 %
Temperatura média anual: média das máximas	33,3 °C
Temperatura média anual: média das médias	26,6 °C
Temperatura média anual: média das mínimas	22,0 °C
Classificação climática segundo Köppen	BWx'
Classificação climática segundo Thornthwaite	C1SA'a'

5.3 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS

A série pluviométrica bruta utilizada neste estudo foi inicialmente tratada pelo método do Vetor Regional (HIEZ, 1978), destinado à identificação de inconsistências nas séries históricas. Estas inconsistências podem ser originadas por erros de observação, podendo tais erros, ocorrerem sistematicamente ou isoladamente em um certo período.

Dois postos foram utilizados neste estudo, os mais próximos da área de interesse, bacia do rio Trairi, que possui uma área de 327,02 km², além de estar em uma altitude que representa melhor as características da área de estudo. Na estimativa dos dois vetores regionais, um a nível anual e o outro a nível mensal, foram utilizados postos reunidos nos 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, a 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.

O Quadro 5.3 mostra os postos pluviométricos que foram utilizados neste estudo e que compõem o grupo regional PARACURU. Foram utilizados dados até 1988, pois estes foram consistidos por ocasião do Plano Estadual de Recursos Hídricos (1992).

**Quadro 5.3 - Postos utilizados consistidos pelo método do Vetor Regional:
Grupo Paracuru**

Posto	Código	Período	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Mundaú	2861329	1912 - 1982	03°11'	39°22'	5
Trairi	2861553	1962 - 1988	03°17'	39°15'	20

Fonte: PERH-CE (1990)

Uma análise freqüencial foi realizada para os postos de Mundaú e Trairi, sendo testadas várias distribuições, e escolhida a Log-Pearson III como a de melhor ajuste, sendo seus parâmetros estimados pelo método dos momentos. O Quadro 5.4 resume esta análise de freqüência.

**Quadro 5.4 - Análise de Freqüência dos Totais Anuais
Distribuição Log-Pearson III.**

Código	N	Período de Retorno					
		10	50	100	200	500	1000
2861329	53	1680,99	2051,20	2191,34	2324,61	2493,23	2616,58
2861553	12	2236,89	3570,49	4276,08	5083,93	6341,40	7465,03

No Quadro 5.5 mostra-se um resumo dos índices nos três níveis (mensal, trimestral e semestral), enquanto que no Quadro 5.6 apresenta-se um resumo da análise de freqüência utilizando a série de totais mensais para o mês mais chuvoso no posto considerado. Os períodos de retorno utilizados variam de 10 a 1000 anos, com totais pluviométricos obtidos por ajustamento da distribuição Log-Pearson III.

**Quadro 5.5 - Índices de Concentração Pluviométrica -
Série de Valores Médios Mensais.**

Código	MÊS	VALOR	%TOT	TRIMES	VALOR	%	SEM	VALOR	%
2861329	ABRIL	277,7	24,2	FMA	712,1	62,1	1	1039,1	90,7
2861553	ABRIL	367,1	24,3	MAM	906,6	60,0	1	1321,3	87,5

Quadro 5.6 - Análise de Freqüência-Nível Mensal-Distribuição Log-Pearson III.

Código	N	Período de Retorno					
		10	50	100	200	500	1000
2861329	70	475,13	661,91	739,68	817,01	919,36	997,29
2861553	20	708,75	1042,73	1189,84	1341,92	1553,09	1722,16

Diversas distribuições podem ser utilizadas como teóricas para as frequências observadas. Depois de comparar diversas distribuições, foi escolhida a Log-Pearson III, cujas estimativas para vários períodos de retorno encontram-se no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 - Análise de Frequência-Nível Diário-Distribuição Log-Pearson III.

Código	N	Período de Retorno					
		10	50	100	200	500	1000
2861329	67	110,95	134,91	144,31	153,40	165,10	173,78
2861553	18	124,58	154,08	165,87	177,50	192,84	204,58

5.3.1 - Chuvas Intensas

Para projetos de obras hidráulicas em geral é importante a caracterização do regime pluviométrico em intervalos de tempo inferiores a 24 horas. A definição da vazão de projeto, por exemplo de canais integrantes da rede de drenagem, obras d'arte, está vinculada a determinação da relação intensidade-duração-frequência pluviométrica.

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 frequência para a área de representatividade do aparelho.

Como alternativa ao método tradicional, tem-se o Método das Isozonas (TORRICO, 1975), 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 durações 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 (Figura 5.3.1.1);
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 R1h;
4. plotar os valores P24h e P1h em papel probabilístico para obtenção de chuvas de durações intermediárias.

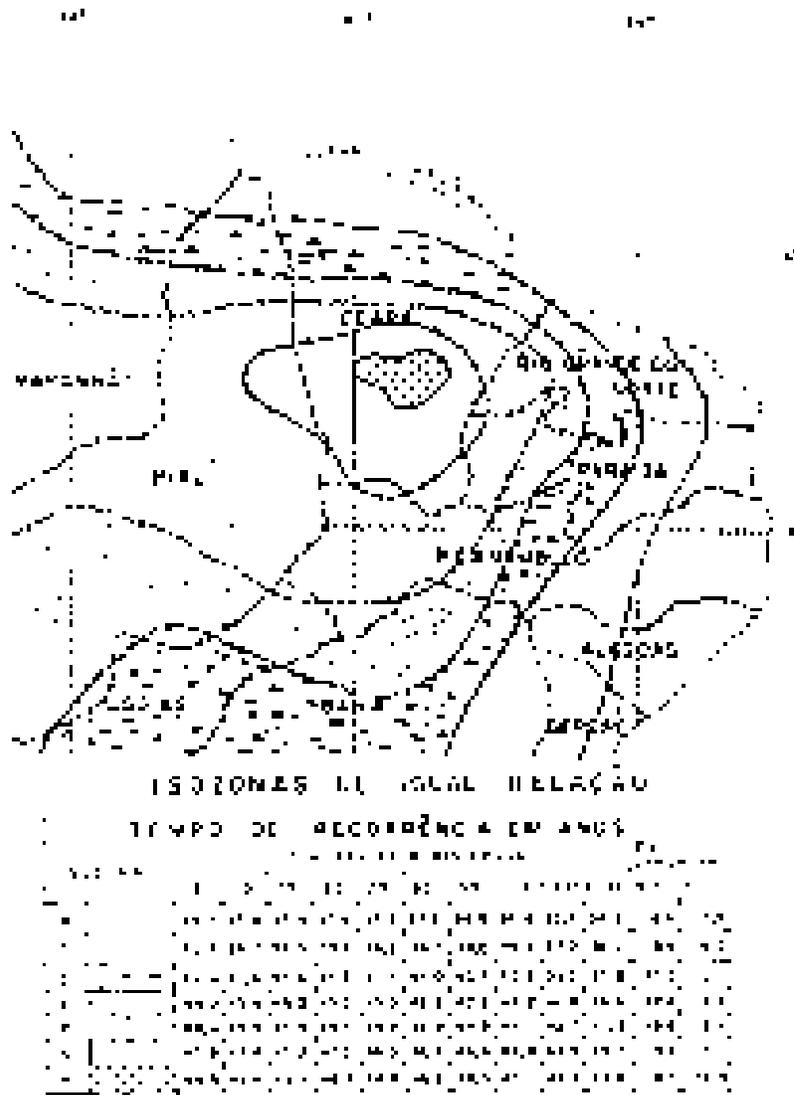


Figura 5.6 – Método das Isozonas de Taborga

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.

O posto de Mundau (2861329) foi escolhido uma vez que o de Trairi tem uma extensão bem menor e muitas falhas. A Figura 5.7 mostra as curvas intensidade-duração-freqüência para diferentes tempos de retorno.

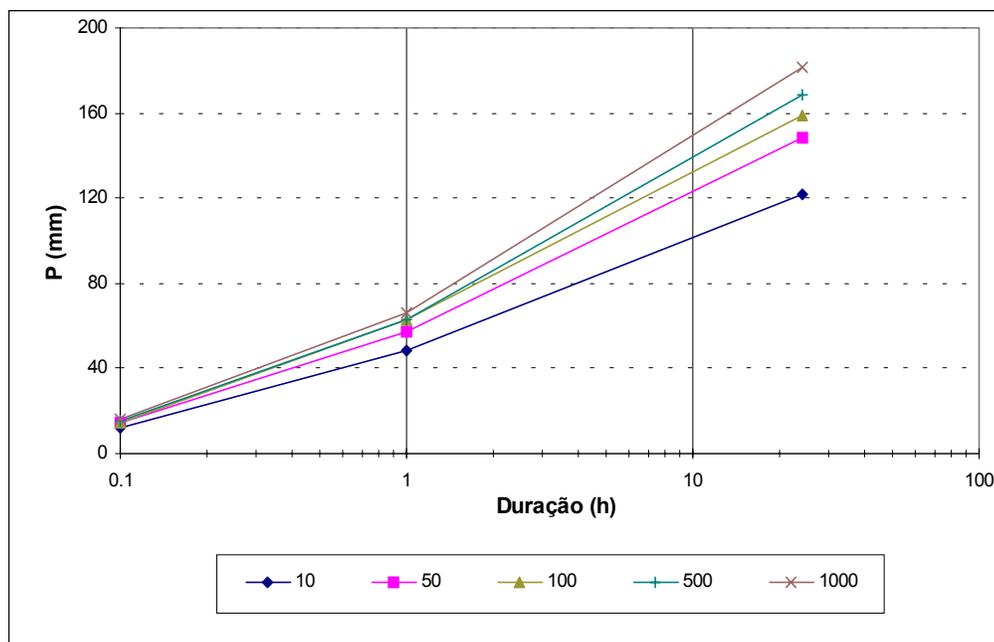


Figura 5.7 - Curvas Intensidade-Duração-Frequência

5.4 - ESTUDOS DE CHEIAS

A determinação da cheia de projeto para dimensionamento do sangradouro pode ser realizada com base em dados históricos de vazão (métodos diretos) e com base na precipitação (métodos indiretos), estando em ambos os casos associados a um risco previamente escolhido. Diante da escassez de registros históricos de vazões, é mais usual a determinação do hidrograma de projeto com base na precipitação. A utilização de métodos diretos ficou impossibilitada diante a inexistência de registros fluviométricos na Bacia Litoral, região hidrográfica que engloba a Bacia do Açude Trairi.

As relações chuva-deflúvio para a bacia do Rio Trairi foram estabelecidas utilizando-se o modelo HEC-1, um modelo projetado para simular o escoamento superficial em uma bacia, sendo esta representada como um sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos. Para esta bacia foi estudada a sua resposta ao hietogramas de projeto correspondentes a 1000 e a 10000 anos (T_r = tempo de retorno).

Para o cálculo do escoamento superficial da bacia do Rio Trairi foi assumido uma precipitação uniformemente distribuída sobre a referida bacia. O HEC-1 permite a entrada de tormentas históricas ou sintéticas, sendo as últimas freqüentemente utilizadas para planejamento e estudos de projetos.

O hietograma adotado baseia-se nas curvas altura-duração-freqüência obtida nos estudos hidroclimatológicos, sendo ajustado à área da bacia usando a seguinte 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; $A = 320,02 \text{ km}^2$ (área da bacia); $A_0 = 25 \text{ km}^2$ (área base para chuva pontual), obtendo-se um fator de redução igual a $0,87 (1 - W \cdot \log(A/A_0))$.

O Quadro 5.8 apresenta a chuva pontual e com a aplicação do fator redutor de área correspondente, as curvas i-d-f. A partir das curvas de chuva reduzida, foi obtida a precipitação associada aos tempos de retorno de 1000 e 10000 anos para as durações de 5 min, 15 min, 60 min, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h.

Quadro 5.8 - Valores de Chuva (mm) de 24 horas - Pontual e Reduzida.

Chuva Pontual (mm)								
Duração	5 min	15 min	60 min	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
P(mm) – TR 1000	13,6	36,7	65,7	91,0	105,8	131,1	140,4	181,6
P(mm) – TR 10000	15,8	42,6	76,4	105,8	122,9	152,3	163,2	211,0
Chuva Reduzida (mm)								
Duração	5 min	15 min	60 min	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
P(mm) – TR 1000	10,6	28,5	51,1	70,7	82,2	101,8	109,1	141,1
P(mm) – TR 10000	12,3	33,1	59,3	82,1	95,5	118,3	126,8	163,9

O HEC-1 utiliza estes dados para construir uma distribuição triangular da precipitação, onde é assumido que cada total precipitado para qualquer duração ocorre durante a parte central da tormenta (tormenta balanceada). Alturas correspondentes a 10 e 30 minutos são interpoladas das alturas precipitadas de 5, 15 e 60 minutos através das equações do HYDRO-35 (National Weather Service, 1977):

$$P_{10min} = 0,41.P_{5min} + 0,59.P_{15min}$$

$$P_{30min} = 0,51.P_{15min} + 0,49.P_{60min}$$

onde P_n é a precipitação para a duração de n minutos.

A chuva de projeto associada ao tempo de retorno de 1000 e 10000 anos para a aplicação da metodologia do hidrograma triangular foi aquela correspondente a uma duração igual ao tempo de concentração da bacia. Obteve-se a partir das curvas altura-duração-freqüência os totais precipitados aos intervalos $1/6 \cdot t_c$. A partir desta série de precipitação acumulada calcula-se a precipitação efetiva utilizando-se o método curva número. Depois de obtida a precipitação efetiva, procede-se uma reordenação dos valores precipitados de modo a manter o pico no terceiro intervalo (Quadros 5.9 e 5.10).

Quadro 5.9 - Cálculo do Hietograma de Projeto para a bacia contribuinte do reservatório Trairi usando o Hidrograma Triangular ($T_r = 1000$ anos). CN = 75.

DT (h)	PAcum (mm)	S (mm)	Pef Ac (mm)	Pef (mm)	Pef Ord (mm)	DPef (mm)	Qp	Tp	Tb	Q pico (m3/s)
1,21	55,18	84,67	11,90	11,90	1,11	5,62	77,23	4,95	13,23	485,38
2,42	75,49		23,94	12,04	5,62	7,28	100,03	6,16	13,23	
3,62	86,28		31,23	7,28	5,67	12,04	165,30	7,37	13,23	
4,83	94,18		36,85	5,62	7,28	11,90	163,42	8,58	13,23	
6,04	101,85		42,52	5,67	11,90	5,67	77,86	9,79	13,23	
7,25	103,32		43,63	1,11	12,04	1,11	15,20	11,00	13,23	

DT - tempo
Precipitação Efetiva: Pef
DPef – Pef Ord Desagregada
Tp - Tempo de pico de cada hidrograma
Vazão de Pico: Qp - de cada hidrograma

S – Armazenamento
Pef Ac - Acumulada

Pacum - Precipitação Acumulada
Pef Ord - Ordenada

Tb - Tempo de base de cada hidrograma
Qpico - do hidrograma total (após convolução).

Quadro 5.10 - Cálculo do Hietograma de Projeto para a bacia contribuinte do reservatório Trairi usando o Hidrograma Triangular ($T_r = 10000$ anos). CN = 75.

DT (h)	PAcum (mm)	S (mm)	Pef Ac (mm)	Pef (mm)	Pef Ord (mm)	DPef (mm)	Qp	Tp	Tb	Q pico (m3/s)
1,21	65,76	63,50	24,15	24,15	1,47	7,60	104,34	4,95	13,23	756,02
2,42	87,68		40,60	16,45	7,60	10,14	139,29	6,16	13,23	
3,62	100,25		50,74	10,14	7,65	24,15	331,61	7,37	13,23	
4,83	109,43		58,40	7,65	10,14	16,45	225,84	8,58	13,23	
6,04	118,36		66,00	7,60	16,45	7,65	105,08	9,79	13,23	
7,25	120,07		67,47	1,47	24,15	1,47	20,22	11,00	13,23	

DT - tempo
Precipitação Efetiva: Pef
DPef – Pef Ord Desagregada
Tp - Tempo de pico de cada hidrograma
Vazão de Pico: Qp - de cada hidrograma

S – Armazenamento
Pef Ac - Acumulada

Pacum - Precipitação Acumulada
Pef Ord - Ordenada

Tb - Tempo de base de cada hidrograma
Qpico - do hidrograma total (após convolução).

5.4.1 - Precipitação Efetiva para aplicação do HEC-1

O modelo utilizado pelo HEC-1 refere-se a interceptação superficial, armazenamento em depressões e infiltração como perdas de precipitação, ou seja, a parcela da precipitação que não contribui para gerar escoamento é considerada perda, sendo o restante, considerado precipitação efetiva.

O cálculo das perdas de precipitação pode ser usado nos outros componentes do modelo HEC-1, em especial, hidrograma unitário. No caso do hidrograma unitário, estas perdas são consideradas uniformemente distribuídas sobre a bacia (ou sub-bacia).

De maneira geral, existem três metodologias utilizadas para determinação da chuva efetiva: equações de infiltração, índices e relações funcionais. Especificamente, o HEC-1 possibilita o uso de 5 métodos: 1) taxa de perda inicial e uniforme; 2) taxa de perda exponencial; 3) Curva-Número; 4) Holtan; 5) Função de Infiltração Green e Ampt. Foi considerado mais adequado, diante dos dados disponíveis, o método curva número do Soil Conservation Service.

O método Curva Número é um procedimento desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo USDA, no qual a lâmina escoada (isto é, a altura de chuva efetiva) é uma função da altura total de chuva e um parâmetro de abstração denominado Curva-Número, CN. Este coeficiente varia de 1 a 100, sendo uma função das seguintes propriedades geradoras de escoamento na bacia: (1) tipo de solo hidrológico; (2) uso do solo e tratamento; (3) condição da superfície subterrânea, e (4) condição de umidade antecedente. Para a bacia do Rio Trairi foi adotado um CN = 75 com base nos mapas de solo (grupos hidrológicos), uso e ocupação e relevo contidos no PERH (1990).

A equação de escoamento do SCS é dada por

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

Onde Q = escoamento; P = precipitação; S = capacidade máxima de armazenamento do solo; I_a = perdas antes do início do escoamento.

As perdas antes do início do escoamento (I_a) incluem água retida em depressões superficiais, água interceptada pela vegetação, evaporação, e infiltração. I_a é altamente variado, mas a partir de dados de pequenas bacias I_a é aproximado pela seguinte relação empírica:

$$I_a = 0,20.S \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) elimina-se la , resultando em:

$$Q = \frac{(P - 0,20.S)^2}{P + 0,80.S}$$

Onde S está relacionado às condições de solo e cobertura através do parâmetro CN por

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{unidades métricas})$$

Onde CN varia de 0 a 100. CN foi tabelado para diferentes tipos de solos e cobertura, sendo estes valores tabelados apresentados para condições de umidade antecedente normal (AMC II). Para condições secas (AMC I) e úmidas (AMC III), CNs equivalentes podem ser calculados pelas seguintes fórmulas:

CONDIÇÕES SECAS

$$CN (I) = \frac{4,2.CN(II)}{10 - 0,058.CN(II)}$$

CONDIÇÕES ÚMIDAS

$$CN (III) = \frac{2,3.CN(II)}{10 + 0,13.CN(II)}$$

Alternativamente, os CNs para estas condições podem ser obtidos, a partir da condição normal (AMC II), utilizando-se tabelas.

Como já mencionado, o CN foi tabelado para diferentes tipos de solos, os quais foram classificados pelo SCS em quatro grupos de solos hidrológicos (A, B, C e D) de acordo com sua taxa de infiltração. Estes quatro grupos são descritos a seguir:

- A - solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. solos arenosos profundos com pouco silte e argilla.
- B - solos menos permeáveis que o anterior, solos arenosos menos profundo que o do tipo a e com permeabilidade superior à média.
- C - solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.
- D - solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Desde que o método do SCS dá o excesso total para uma tormenta, o excesso incremental de precipitação para um período de tempo é calculado como a diferença entre o excesso acumulado no fim do presente período e o acumulado do período anterior.

5.4.2 - Hidrograma Unitário - SCS

A técnica do hidrograma unitário é usada para transformar a precipitação efetiva em escoamento superficial de uma sub-bacia. Este método foi escolhido por ter sido idealizado para bacias de áreas entre 2,5 e 1000 km², e por ser construído exclusivamente a partir de informações hidrológicas. Além disso, este modelo necessita apenas de um parâmetro: o T_{LAG}. Este parâmetro, T_{LAG}, é igual à distância (lag) entre o centro de massa do excesso de chuva e o pico do hidrograma unitário.

O tempo de concentração da bacia foi estimado aqui pela fórmula do Califórnia Highways, também conhecida como fórmula de Kirpich:

$$T_C = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0.385}$$

Onde T_C = tempo de concentração em minutos; L = comprimento do maior talvegue em km; ΔH = diferença de elevação entre o ponto mais remoto da bacia e o exutório. Logo, para a bacia do Rio Trairi tem-se:

Seção Barragem: L = 31,87 km; ΔH = 165 m; S = 5,18 m/km, o que resulta T_C = 7,25 h ; T_{LAG} = 4,35 h para a Barragem Trairi.

A vazão de pico e o tempo de pico são calculados por:

$$Q_p = 208 \cdot \frac{A}{t_p} \quad t_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{LAG}$$

Onde Q_p = é a vazão de pico (m³/s), t_p = tempo de pico do hidrograma (h), A = área da bacia em km² e Δt = o intervalo de cálculo. No quadro 5.11 a seguir estão indicados os dados dos hidrogramas de cheia milenar e decamilenar.

QUADRO 5.11

Cheia	Δt (minutos)	Chuva Total (mm)	Perdas (mm)	Chuva efetiva (mm)
1.000	10	130,31	65,40	64,91
10.000	10	151,37	68,88	82,48

Uma vez determinados estes parâmetros e o intervalo de cálculo (duração do hidrograma unitário), o HEC-1 utiliza estes para interpolar um hidrograma unitário a partir de um hidrograma unitário adimensional do SCS. A seleção do intervalo de cálculo é baseado na relação Δt = 0,20 t_p, não devendo exceder 0,25 t_p. Estas relações baseiam-se nas seguintes relações empíricas.

$$t_{lag} = 0,60 T_C \quad e \quad 1,7 t_p = \Delta t + T_C$$

Onde T_C = é o tempo de concentração da bacia. O HEC-1 sugere que Δt ≤ 0,29 T_{LAG}. O intervalo escolhido pelo HEC-1 foi de 10 minutos. Para o cálculo do hidrograma de projeto por esta metodologia, é necessário uma estimativa do tempo de

concentração da bacia. Este tempo de concentração foi avaliado através da aplicação da fórmula de Kirpich.

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os hietogramas de projeto (precipitação total) e os hidrogramas afluentes a barragem Trairi obtido através do uso do modelo HEC correspondentes aos tempos de retorno 1000 e 10000 anos, conforme metodologia acima. A vazão de pico do hidrograma foi 661 m³/s para o período de retorno de 1000 anos, e 845 m³/s para o período de retorno de 10000 anos.

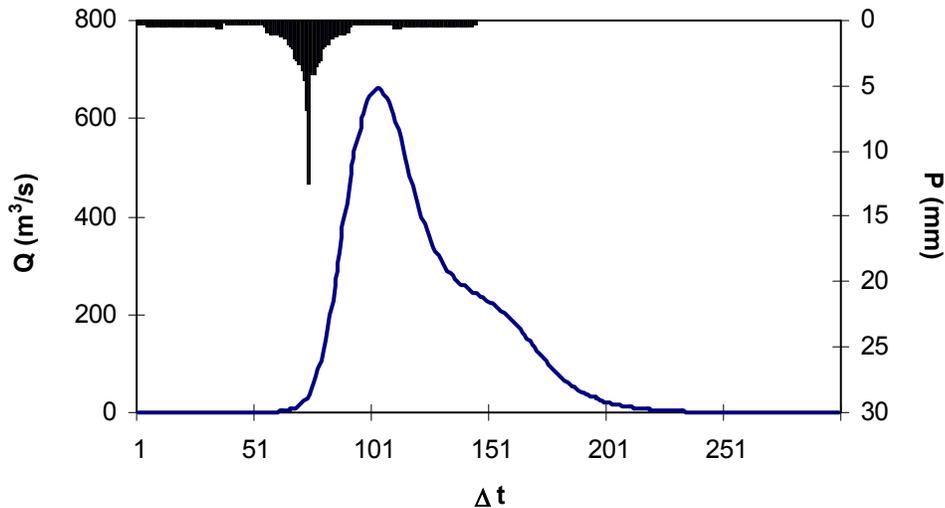


Figura 5.8 - Hidrograma total afluente - Bacia 327.02 km² (Tr = 1000 anos).

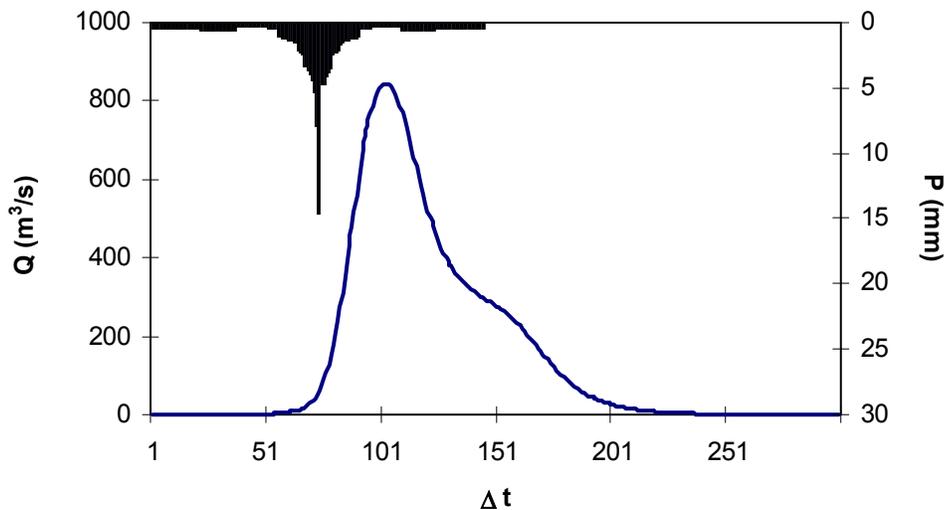


Figura 5.9 - Hidrograma total afluente - Bacia 327.02 km² (Tr = 10000 anos).

5.4.3 - Hidrograma Triangular

Com o hietograma de projeto determinado conforme descrito anteriormente para o período de retorno de 1000, calculou-se a cheia de projeto utilizando o critério do Hidrograma Unitário Triangular do Soil Conservation Service (S.C.S.), sendo o excesso de precipitação determinado a partir de um parâmetro (CN) que define o complexo solo, vegetação.

O cálculo é feito como se segue:

A vazão de pico do hidrograma unitário, em $\text{m}^3/\text{s}/\text{cm}$, é assim definida para uma chuva efetiva igual a 1 cm de altura e para um tempo unitário:

$$q_p = \frac{2,08A}{t_p},$$

Onde t_p é o tempo de pico, em horas, dado por $t_p = \frac{\delta_t}{2} + 0,6t_c$, $\delta_t = t_c/6$ é o tempo unitário em horas, e t_c é o tempo de concentração em horas calculado conforme Kirpich.

O tempo de base do hidrograma, em horas, é dado por:

$$t_b = 2,67t_p$$

Para a bacia contribuinte ao reservatório tem-se, $t_c = 7,25$ horas, então $t_b = 13,23$ horas, $\Delta t = 1,21$ horas, $t_p = 4,95$ horas e, $q_p = 137,31 \text{ m}^3/\text{s}/\text{cm}$.

Então, já podemos traçar o Hidrograma Unitário Triangular (HUT) correspondentes aos tempos de retorno 1000 e 10000 anos (Figuras 5.10 e 5.11). Uma vez determinado o HUT correspondente a cada intervalo de chuva efetiva, faz-se a convolução obtendo-se assim, o hidrograma total. Após a convolução dos seis hidrogramas, obteve-se as vazões de pico associadas a 1000 anos ($485,38 \text{ m}^3/\text{s}$) e a 10000 anos ($756,02 \text{ m}^3/\text{s}$).

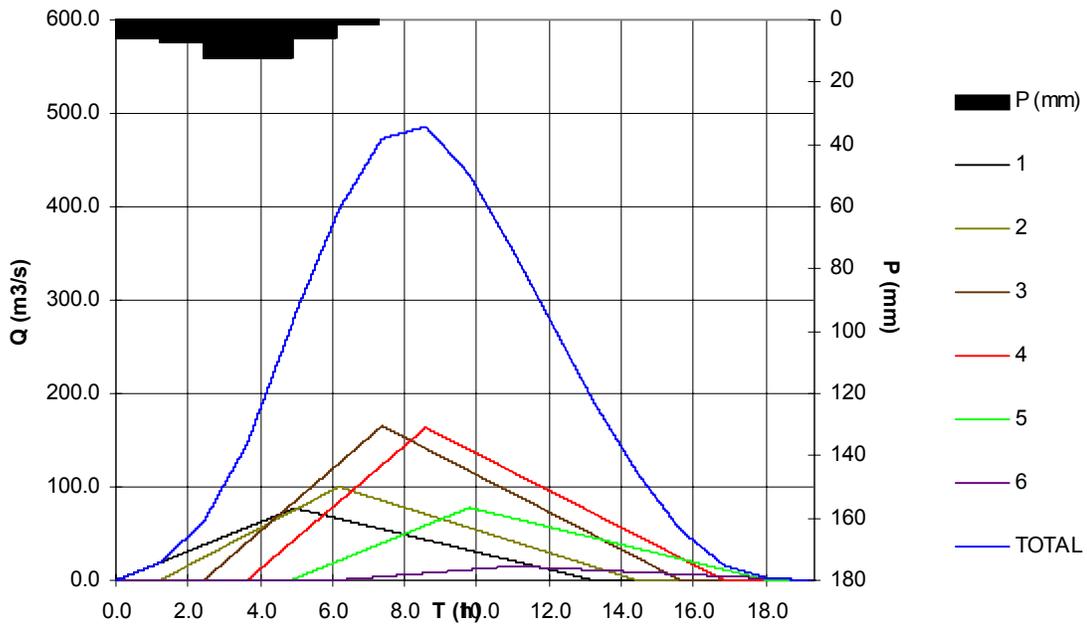


Figura 5.10 - Hidrograma total afluente - Bacia 327.02 km² (Tr = 1000 anos).

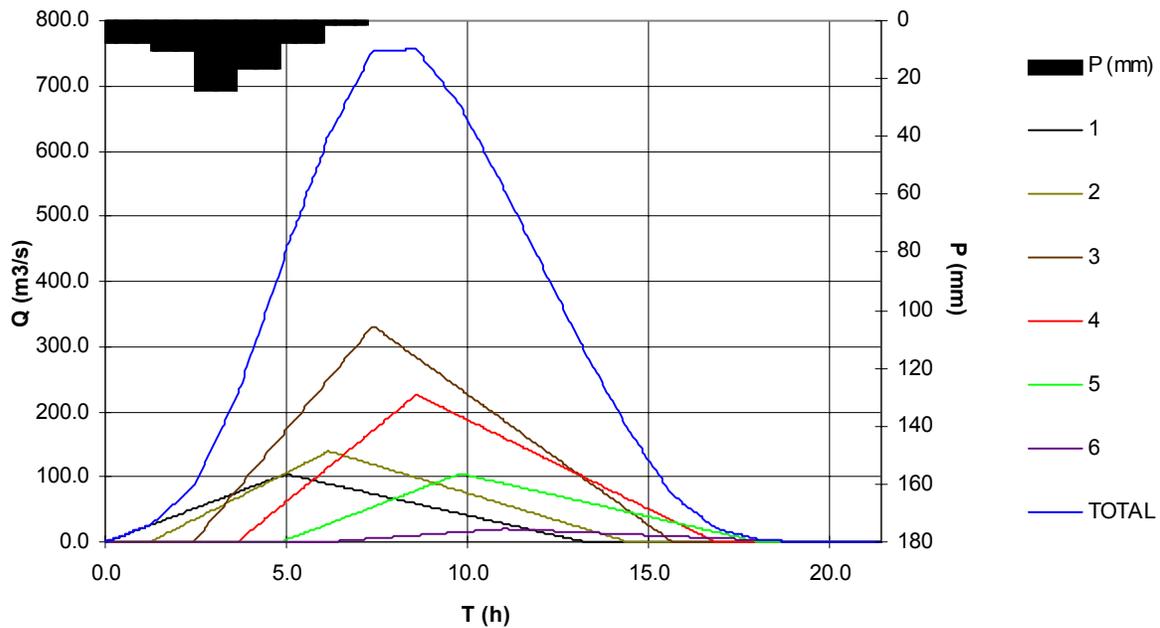


Figura 5.11 - Hidrograma total afluente - Bacia 327.02 km² (Tr = 10000 anos).

5.5 - CURVAS DE REGULAÇÃO DO RESERVATÓRIO

A importância do estudo da capacidade de regularização de um reservatório está ligada ao conhecimento das mudanças temporais e espaciais dos deflúvios naturais, visando o atendimento das demandas da sociedade. Busca-se aqui avaliar o tamanho que deve ser a obra de maneira que ganhos em regularização de águas justifiquem os investimentos a serem realizados.

Na determinação das curvas de regulação do reservatório foram utilizados dois métodos, a saber:

1. Solução direta da equação de balanço hídrico;
2. Diagrama Triangular de Regularização – sem influência do açude de montante.

5.5.1 - Resultados

As características do escoamento estabelecidas no PERH (1990) foram utilizadas aqui para a geração de séries sintéticas de vazão, a saber:

- lâmina média escoada: 202 mm

- volume afluente médio escoado (μ): 66.058.040 m³

O coeficiente de variação de CV = 1,1 foi adotado com base no valor indicado por CAMPOS et al. (1995).

Para aplicação dos dois métodos faz-se necessário a determinação do fator de forma α , lâmina evaporada e fator adimensional de evaporação e capacidade. No caso do fator adimensional de capacidade, este é variável uma vez que se pretende analisar o ganho na regularização em função do aumento da capacidade

No Quadro 5.12 apresenta-se o percentual e seu valor correspondente dos volumes regularizados, evaporados e sangrados para o reservatório a montante do açude Trairi.

Quadro 5.12 – Volumes evaporado, sangrado e liberado, vazão regularizada com 90% de garantia para o açude a montante do Açude Trairi.

K (hm ³)	F _k =K/ μ	%LIB	LIB (hm ³ /ano)	%EV	EV (hm ³ /ano)	%SG	SG (hm ³ /ano)	Q90 (m ³ /s)	M90 (hm ³ /ano)
24	0,71	26,43	8,905	7,03	2.368	66,55	22,426	0,297	9,363

No Quadro 5.13 apresenta-se o percentual e seu valor correspondente dos volumes regularizados, evaporados e sangrados em função de f_K (fator de capacidade = K/μ) para o açude Trairi. A Figura 5.12 apresenta as curvas de regulação para o reservatório Trairi, que nada mais é que a graficação dos valores apresentados no Quadro 5.13.

Quadro 5.13 - Estudo incremental de capacidades do Reservatório Trairi

K (hm^3)	$F_k=K/\mu$	%LIB	LIB (hm^3/ano)	%EV	EV (hm^3/ano)	%SG	SG (hm^3/ano)	DM/dK	Q90 (m^3/s)	M90 (hm^3/ano)
16,515	0,25	10,67	7,319	4,11	2,817	85,22	58,467	-----	0,241	7,612
33,029	0,50	18,36	12,591	6,63	4,546	75,01	51,448	0,330	0,414	13,060
49,544	0,75	25,63	17,578	8,48	5,818	65,89	45,185	0,327	0,585	18,453
66,058	1,00	29,82	20,444	10,45	7,163	59,73	40,955	0,179	0,679	21,410
82,573	1,25	34,08	23,363	12,10	8,298	53,81	36,888	0,186	0,777	24,489
99,087	1,50	38,08	26,095	13,53	9,276	48,39	33,163	0,179	0,870	27,439
115,602	1,75	41,30	28,300	14,88	10,194	43,83	30,038	0,144	0,946	29,821

A análise da Figura 5.12 e dos dados apresentados no Quadro 5.12 sugerem que a faixa de volumes estudada está bem aquém da hidrológicamente possível, fato este refletido pelo baixo fator de capacidade ($f_K < 1,75$). Entretanto, a topografia do eixo barrável impede a análise para maiores fatores de capacidade, o que nos leva a escolha do volume em torno de $58,8 \text{ hm}^3$ ($f_K = 0,89$) pelas condições físicas do local, correspondente a cota de 30,5 m (cota de coroamento = 34 m). Para esta capacidade o reservatório regulariza cerca de 28,8% do volume afluente médio anual, ou em termos de volume, $20,1 \text{ hm}^3/ano$, conforme a resolução direta da equação do balanço hídrico. Este volume regularizado anualmente corresponde a uma vazão regularizada com 90% de garantia de $0,638 \text{ m}^3/s$.

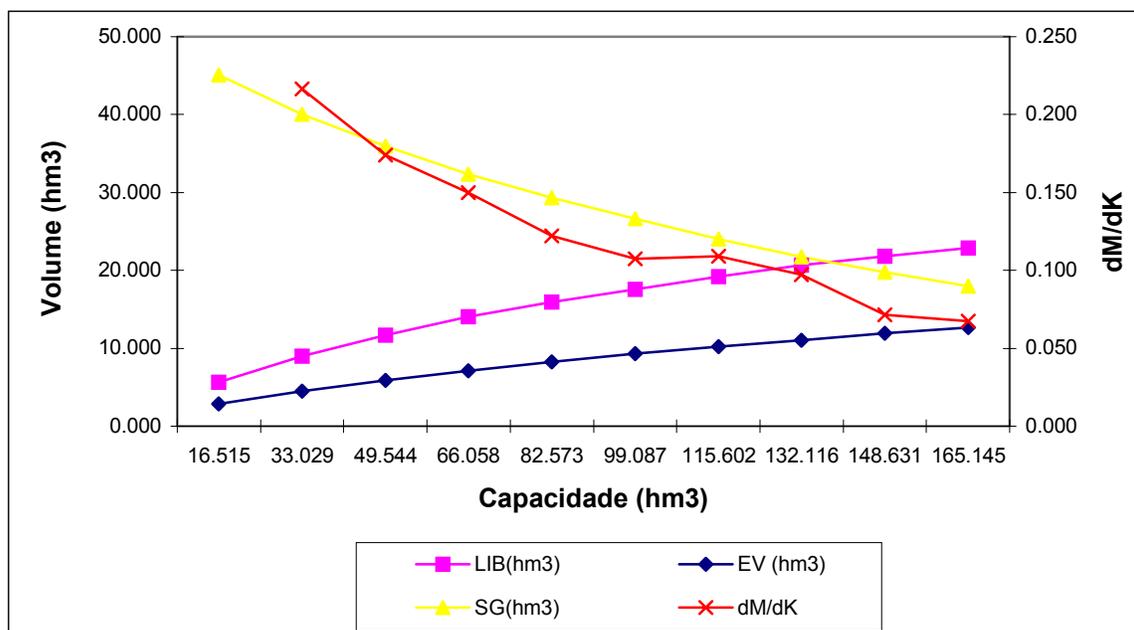


Figura 5.12 - Curvas de Regulação do Reservatório Trairi – Resolução direta da equação do balanço hídrico.

Utilizando-se o método do Diagrama Triangular de Regularização com $f_E = 0,16$, $f_K = 0,89$ e $CV = 1,1$, obtém-se um volume de $19,48 \text{ hm}^3$ regularizado anualmente, ou em termos de vazão, $Q_{90} = 0,618 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor está bem próximo ao valor obtido pela solução direta da equação do balanço hídrico (Quadro 5.15). A Figura 5.13 apresenta o Diagrama Triangular ($CV = 1,1$) e nele o caso da Barragem Trairi.

Quadro 5.14 - Distribuição do volume afluyente e Q_r (90%) para a Barragem Trairi

Equação do Balanço Hídrico			
LIB - %	SG - %	EV - %	Q_r 90% (m³/s)
19,190 – 28,0%	42,806 – 62,4%	6,575 – 9,6%	0,638
Diagrama Triangular de Regularização (sem interferência do açude de montante)			
19,487 – 29,5%	40,626 – 61,5%	5,945 – 9,0%	0,618

EV - Volume Evaporado (hm^3/ano) SG - Volume Sangrado (hm^3/ano)
 LIB- Volume Liberado (hm^3/ano) Q_r 90% - Vazão regularizada com 90% de garantia (m^3/s)

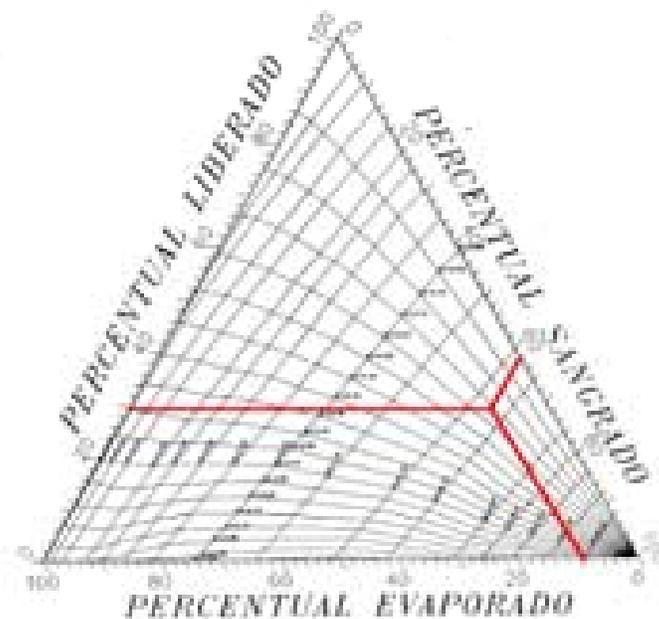


Figura 5.13 – Diagrama Triangular de Regularização aplicado a Barragem de Trairi sem levar em consideração a interferência do açude de montante.

5.6 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO

O item anterior demonstrou que a faixa de volumes estudada está bem aquém da hidrológicamente possível, fato este refletido pelo baixo fator de capacidade ($f_K < 1,75$). Entretanto, a topografia do eixo barrável impede a análise para maiores fatores de capacidade, o que nos leva a escolha do volume em torno de $58,8 \text{ hm}^3$ ($f_K = 0,89$) pelas condições físicas do local, correspondente a cota de $30,5 \text{ m}$ (cota de coroamento = 34 m). Para esta capacidade o reservatório regulariza cerca de $28,8\%$ do volume afluente médio anual, ou em termos de volume, $20,1 \text{ hm}^3/\text{ano}$, conforme a resolução direta da equação do balanço hídrico. Este volume regularizado anualmente corresponde a uma vazão regularizada com 90% de garantia de $0,638 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.6.1 - Análise econômica

Para facilitar a escolha da capacidade da barragem foi elaborado um gráfico contendo as seguintes informações:

- variação do custo anual do m^3 de água acumulada em função da cota de soleira do reservatório para um período de 30 anos e uma taxa de 8% ;

- variação do custo anual do m³ de água regularizada com 90% de garantia, em função da cota de soleira do reservatório para um período de 30 anos à uma taxa de 8%;
- variação do ganho em unidades de volume regularizado por unidade de volume acrescido na capacidade do reservatório (dM/dK);

A análise dos resultados da Figura 14 mostra que:

- o custo anual do m³ regularizado variou entre R\$ 0,037 (cota 31 m) e R\$ 0,032 (cota 34 m).
- o custo anual do m³ de acumulação variou entre R\$ 0,008 (cota 31 m) e R\$ 0,006 (cota 34 m).

5.6.2 - Escolha da capacidade do reservatório - Análise hidrológico-econômica

Apesar de tanto o custo anual do m³ regularizado como também de custo anual do m³ acumulado terem uma tendência negativa ao aumentarmos a cota de soleira de 31 para 34 m, existem limitantes topográficas que limitam a escolha da cota da soleira. Assim, considerando os aspectos hidrológico-econômicos e os limitantes topográficos (cota de coroamento no máximo = 34 m) sugere-se a adoção da cota de soleira = 30,5 m (volume de armazenamento = 58,8 hm³).

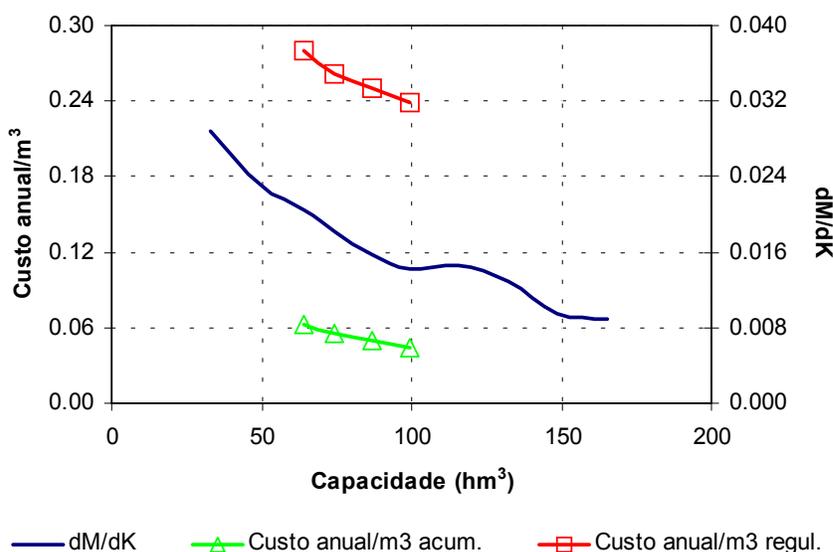


Figura 5.14 - Análise hidrológico-econômica para seleção da capacidade da Barragem Trairi.

5.7 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO

Uma vez realizado o dimensionamento do reservatório com base nos estudos hidrológicos e econômicos do item anterior, faz-se necessário agora o dimensionamento do sangradouro visando a definição de sua largura, seu tipo e a cota de coroamento da barragem associada à alternativa adotada.

No dimensionamento do sangradouro foi adotada a cheia associada ao tempo de retorno de 1.000 anos, realizando-se para esta os estudos de laminação, e será determinada a cota de coroamento da barragem com base na cheia associada a 10.000 anos, para garantir o não galgamento nesta cheia.

Não havia marcas de cheias históricas no local da barragem, o que impossibilitou o uso desta informação.

Com base nestes princípios, apresenta-se neste item o dimensionamento do sangradouro.

5.7.1 - Propagação da Cheia no Reservatório

Técnicas de propagação em reservatórios são baseadas no conceito de armazenamento, sendo o método de Puls um dos mais conhecidos para propagação em reservatórios. Este método consiste em uma expressão discretizada da equação de continuidade concentrada e na relação entre vazão e armazenamento.

O vertedouro escolhido é do tipo perfil creager, com coeficiente de descarga 2,1 ficando a equação característica: $Q = 2,1 \times L(z-zw)^{15}$.

5.7.2 - Resultados

Uma vez escolhida a dimensão do açude, elaborou-se o estudo de laminação para a cheia de 1.000 anos, para dimensionamento do sangradouro, e para a cheia de 10.000 anos, visando garantir que a barragem não seja galgada nesta cheia, servindo assim para a definição da cota de coroamento da barragem.

Os picos dos hidrogramas de entrada e saída, a cota e altura da lâmina vertida encontram-se no Quadro 5.16, usando-se como hidrograma de projeto aquele associado ao tempo de retorno de 1.000 e 10.000 anos. A Figura 5.15 a seguir mostra para o tempo de retorno $Tr=1000$ anos, o hietograma de projeto, o hidrograma de entrada e o de saída ao reservatório Trairi. Os resultados para o tempo de retorno de 10000 anos são apresentados na Figura 5.16.

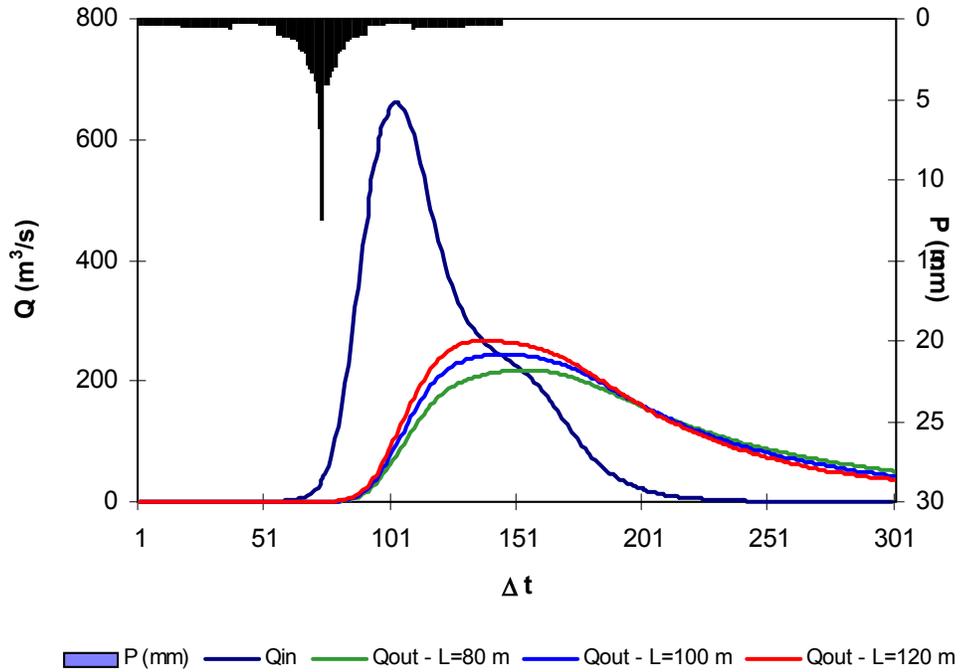


Figura 5.15 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Trairi - $T_r=1000$ anos. Perfil Creager. Cota 30.5 m. L = 80, 100 e 120.

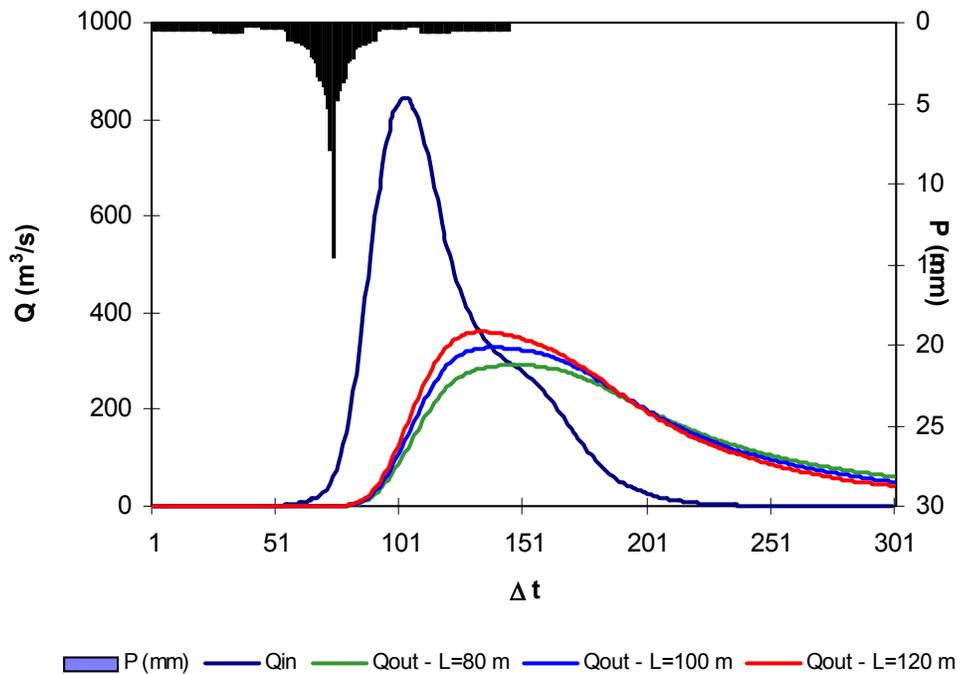


Figura 5.16 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Trairi - $T_r=10000$ anos. Perfil Creager. Cota 30.5 m. L = 80, 100 e 120.

Quadro 5.15 - Resultado da simulação acima descrita

L (m)	Q _{out} (m ³ /s)	Cota (m)	Lâmina (m)
Perfil Creager: Z_w = 30.5 m			
Tr = 1000 anos - Q_{in} = 661 m3/s			
80	218	31,7	1,2
100	243	31,6	1,1
120	267	31,5	1,0
Tr = 10000 anos - Q_{in} = 845 m3/s			
80	292	31,9	1,4
100	328	31,8	1,3
120	361	31,8	1,3

L = Largura do Sangradouro

Z_w = cota da soleira do sangradouro

Q_{in} = Vazão afluente ao reservatório

Q_{out} = Vazão de saída (sangradouro)