

MÓDULO III – PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM
MARANGUAPE I

VOLUME 1 – ESTUDOS BÁSICOS
TOMO 1 – RELATÓRIO GERAL

| Rev. | Data | Descrição | Por | Ver. | Apr. | Aut. |
|------|---------|----------------------------------|-----------|------|------|------|
| 00 | Juni/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 - TRANSPORTE DE COTAS</u> | 15 |
| <u>3.4 - LEVANTAMENTO DO EIXO BARRÁVEL E SANGRADOURO</u> | 17 |
| <u>3.5 - LEVANTAMENTO DA BACIA HIDRÁULICA</u> | 18 |
| <u>3.5.1 - Cobertura Aerofotogramétrica</u> | 18 |
| <u>3.5.2 - Mapeamento Planialtimétrico</u> | 18 |
| <u>3.6 - LEVANTAMENTO DOS EMPRÉSTIMOS</u> | 21 |
| <u>3.6.1 - Jazida</u> | 21 |
| <u>3.6.2 - Areal</u> | 21 |
| <u>3.6.3 - Pedreira</u> | 21 |
| <u>4 - ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS</u> | 23 |
| <u>4.1 - GEOMORFOLOGIA</u> | 24 |
| <u>4.2 - GEOLOGIA REGIONAL - BACIA HIDROGRÁFICA</u> | 25 |
| <u>4.2.1 - Caracterização Estrutural</u> | 27 |
| <u>4.2.2 - Metamorfismo</u> | 28 |
| <u>4.3 - GEOLOGIA DO EIXO BARRÁVEL</u> | 28 |
| <u>4.3.1 - Estudos Geológicos e Geotécnicos Preliminares</u> | 30 |
| <u>4.4 - INVESTIGAÇÕES NO BARRAMENTO E SANGRADOURO</u> | 30 |
| <u>4.4.1 - Sondagens à Percussão</u> | 30 |
| <u>4.4.2 - Sondagens Mistas</u> | 30 |
| <u>4.4.3 - Ensaios de Permeabilidade " in situ" com Carga Constante (Le Franc)</u> | 31 |
| <u>4.4.4 - Ensaios de Perda D' Água (Lugeon)</u> | 31 |

| | |
|--|----|
| <u>4.5 - ESTUDOS DOS MATERIAIS</u> | 33 |
| <u>4.5.1 - Permeabilidade com Carga Variável</u> | 35 |
| <u>4.5.2 - Permeabilidade com Carga Constante</u> | 35 |
| <u>4.5.3 - Cisalhamento Direto Lento</u> | 36 |
| <u>4.6 - COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE AS INVESTIGAÇÕES</u> | 36 |
| <u>4.6.1 - Apresentação dos Resultados</u> | 36 |
| <u>4.6.2 - Fundações</u> | 37 |
| <u>4.6.3 - Análise das Ocorrências Estudadas</u> | 42 |
| <u>5 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS</u> | 46 |
| <u>5.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA</u> | 47 |
| <u>5.2 - ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS</u> | 51 |
| <u>5.3 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS</u> | 51 |
| <u>5.3.1 - Chuvas Intensas</u> | 53 |
| <u>5.4 - ESTUDOS DE CHEIAS</u> | 54 |
| <u>5.4.1 - Precipitação Efetiva para aplicação do HEC-1</u> | 56 |
| <u>5.4.2 - Hidrograma Unitário - SCS</u> | 58 |
| <u>5.5 - CURVAS DE REGULAÇÃO DO RESERVATÓRIO</u> | 60 |
| <u>5.5.1 - Solução Direta da Equação do Balanço Hídrico</u> | 60 |
| <u>5.5.2 - Hidrograma Triangular</u> | 62 |
| <u>5.6 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO</u> | 65 |
| <u>5.6.1 - Análise econômica</u> | 65 |
| <u>5.6.2 - Escolha da capacidade do reservatório - Análise hidrológico-econômica</u> | 65 |
| <u>5.7 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO</u> | 66 |
| <u>5.7.1 - Propagação da Cheia no Reservatório</u> | 66 |
| <u>5.7.2 - Resultados</u> | 67 |

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 Viabilidade Técnica, Ambientais e Econômicas, EIAS-RIMAS, Projetos Executivos, Levantamentos Cadastrais e Planos de Reassentamentos de Populações, Manuais de Operação e Manutenção e Avaliações Financeira e Econômica, referentes às Barragens GAMELEIRA, TRAIRI, JENIPAPEIRO, MARANGUAPE I e MARANGUAPE II e Adutoras de ITAPIPOCA, TRAIRI, IPAUMIRIM/BAIXIO/UMARI e MARANGUAPE/SAPUPARA/URUCARÁ/LADEIRA GRANDE.

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 Adutoras

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

Módulo II – Estudos dos Impactos no Meio Ambiente

VOLUME I – Estudos Básicos e Diagnóstico

Tomo 1 – Estudos Básicos

Tomo 2 – Diagnóstico Ambiental

VOLUME II – EIA/RIMA

Tomo 1 – Relatório Preliminar dos Estudos Ambientais

Tomo 2 – Relatório Final EIA/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
- Tomo 3 – Levantamentos Topográficos

VOLUME II – Plano de Reassentamento

- Tomo 1 – Diagnóstico
- Tomo 2 – Programação das Ações
- Tomo 3 – Detalhamento do Plano de Reassentamento
- Tomo 4 – Relatório Final do Reassentamento

Módulo V – Projeto Executivo das Adutoras

VOLUME I – Estudos Básicos

- Tomo 1 – Levantamentos Topográficos
- Tomo 2 – 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 Medição e Pagamento
- 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 Maranguape I*, 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 uma descrição sintética 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 Maranguape I.

2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

2 – LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Localizado na Região Metropolitana de Fortaleza, o município de Maranguape foi criado em 1851 pela lei 553, estando geograficamente definido pelas coordenadas 03°53'27" de latitude Sul e 38°41'08" de longitude Oeste, com uma extensão territorial de 672 km². Limita-se ao Norte com Caucaia e Maracanaú, ao Sul com Palmácia e Caridade, a Leste com Pacatuba e Guaiuba e a Oeste com Pentecoste. O acesso a Fortaleza se faz pela CE-065.

O eixo barrável Maranguape I está localizado em um afluente do riacho Tangureira, aproximadamente, 6,00 km ao Sul da sede do município de Maranguape. O acesso ao local da barragem Maranguape I, é feito partindo-se da cidade de Maranguape em direção ao Sul pela CE-065 e, a 2,5 km no local denominado Gereraú, bem próximo a rodovia, dobra-se à direita e a 800,00 m encontra-se o boqueirão barrável. (ver Figura 2.1).

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.

A carta da SUDENE utilizada foi a seguinte:

- Fortaleza: folha nº SA.24-Z-C-IV

O contorno da bacia hidrográfica da Barragem Maranguape I 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. Na barragem Maranguape I, juntamente com a barragem Maranguape II foram implantados 12 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 cada marco foi elaborada uma monografia que se encontra no anexo do Volume I – Estudos Básicos, Tomo 3 – Estudos Cartográficos.

Para a determinação das coordenadas de cada vértice da rede de apoio básico da Barragem Maranguape I tivemos na planimetria origem no Vértice Bico Fino do IBGE de latitude $03^{\circ}50'46,4641''$ S e longitude $38^{\circ}53'10,6817''$ W e altitude de 408,67 m, e chegada no Vértice SA-24-1022 do IBGE de latitude $03^{\circ}52'28,7805''$ S e longitude $38^{\circ}31'21,6900''$ e altitude de 114,23 m.

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.

Quadro 3.1 – Marcos Implantados na Barragem Maranguape

| Ponto | Localização (*) | Coordenadas UTM (m) | | Longitude Geodésica | Latitude Geodésica |
|----------|-----------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------------|
| | | Norte | Este | | |
| M-01 | 2,66km/LD | 9.564.360,536 | 532.756,819 | 38°42'17,75498"W | 03°56'28,45862"S |
| M-02 | 3,28km/LE | 9.563.608,0446 | 532.750,366 | 38°42'17,95557"W | 03°56'52,96601"S |
| M-03 | 4,45km/LD | 9.563.915,610 | 531.622,487 | 38°42'54,53407"W | 03°56'42,96164"S |
| M-04 | 5,38km/LD | 9.563.589,8306 | 530.6856,332 | 38°43'24,92075"W | 03°56'53,58230"S |
| M-05 | 5,25km/LD | 9.561.863,588 | 534.609,747 | 38°41'17,63805"W | 03°57'49,75771"S |
| M-06 | +/-5,00km/LD | 9.562.126,1966 | 535.193,276 | 38°40'58,71819"W | 03°57'41,19782"S |
| M-07 | 6,74km/LD | 9.560.330,105 | 535.132,608 | 38°41'00,33660"W | 03°58'39,69394"S |
| M-08(**) | 3,75km/LE | 9.556.372,187 | 533.772,249 | 38°41'44,76733"W | 03°59'10,90822"S |
| M-09(**) | 3,62km/LD | 9.559.313,868 | 533.694,748 | 38°41'47,27996"W | 03°59'12,80851"S |
| M-10 | 6,87km/LE | 9.560.295,344 | 535.270,200 | 38°40'56,20086"W | 03°58'40,82430"S |
| M-11 | 4,05km/LD | 9.564.150,742 | 531.650,828 | 38°42'53,61765"W | 03°56'35,30376"S |
| M-12 | 5,28km/LD | 9.563.637,165 | 530.764,660 | 38°43'22,34878"W | 03°56'52,03982"S |

(*) A localização dos marcos teve como Km 00 o a Igreja de Urucará – Maranguape/CE, na rodovia CE-065. 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.

(**) A localização dos marcos M-08 e M-09 teve como Km 00, a Igreja do Povoado de Ladeira Grande – Maranguape/CE, próximo a rodovia CE-065.

3.3 - TRANSPORTE DE COTAS

Tomou-se como base para a altimetria da barragem Maranguape I, o marco M01, implantado pela empresa BASE Aerofotogrametria e Projetos S/A, quando da execução de serviços de engenharia cartográfica, localizado na ombreira esquerda do eixo barrável, com cota igual a 100,990m.

Figura 3.1

Bacia Hidrográfica da barragem Maranguape I

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 Soksha TM-20-C, 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.

O levantamento altimétrico da barragem Maraguape I, foi realizado utilizando-se um nível automático Soksha C.3.A, 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 planialtimétricos na área da bacia hidráulica da barragem Maranguape I, 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.

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 scanerizadas 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 12 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 Maranguape I tivemos origem no Vértice Bico Fino do IBGE de latitude

03°50'46,4641" S e longitude 38°53'10,6817" W e altitude de 408,67 m, e chegada no Vértice SA-24-1022 do IBGE de latitude 03°52'28,7805" S e longitude 38°31'21,6900" e altitude de 114,23 m.

Foram implantados os vértices M-01 a M-08 e posteriormente executado um adensamento de mais 4 vértices, M-09 a M-12, para obter-se intervisibilidade.

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

Para a geração dos trabalhos de aerotriangulação, as imagens foram obtidas a partir da scanerização 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 scanerização 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.

Figura 3.2

Bacia Hidráulica da barragem Maranguape I

3.6 - LEVANTAMENTO DOS EMPRÉSTIMOS

Com a utilização de um Teodolito Soksha TM-20-C 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

Foram estudadas duas jazidas de material terroso, denominadas J 01 e J 02. As jazidas foram estudadas através de sondagens a pá e picareta, executadas nos vértices de uma malha de 100m x 50m. Suas características são descritas a seguir:

- Jazida 01 - Material terroso para a construção do maciço, com área igual a $455.000,00\text{m}^2$ e volume útil de $395.850,00\text{m}^3$, a uma distância de 100m do eixo da barragem;
- Jazida 02 - Material terroso para a construção do maciço, com área igual a $475.000,00\text{m}^2$ e volume útil de $370.500,00\text{m}^3$, a uma distância de aproximadamente 1,70km do eixo da barragem;

3.6.2 - Areal

- Areal 01 - Areia de rio (Rio Maranguape) que será usada nas transições, filtros, drenos e concretos, com uma área de $16.000,00\text{m}^2$ e um volume útil de $22.400,00\text{m}^3$, localizado junto à estaca 07 do eixo da barragem;

3.6.3 - Pedreira

- Pedreira 01 - Para produção de pedra para enrocamento e brita. Esta localizada aproximadamente a 1,00km de distância do eixo da barragem, com área igual a $10.000,00\text{m}^2$ e volume útil de $300.000,00\text{m}^3$.

Planta de locação das ocorrências

4 - ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

4 - ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS

4.1 - GEOMORFOLOGIA

Quatro feições morfológicas caracterizam o relevo, em escala regional da área da bacia hidráulica da barragem Maranguape I: o relevo litorâneo, a superfície aplainada das coberturas cenozóicas, o extenso pediplano de rochas cristalinas e os maciços montanhosos cristalinos.

A faixa litorânea é caracterizada por cordões de dunas que se movem de NE para SW, sob a ação dos ventos dominantes de leste e noroeste. Possuem tonalidades avermelhadas, contrastando com os tons esbranquiçados das dunas movediças.

Entre o relevo litorâneo e as serras altas do interior interpõem-se os primeiros níveis elevados, formados pelos **terrenos cenozóicos de cobertura**. Ocupam uma faixa de largura variável ao longo da costa, formando uma ampla superfície aplainada, suavemente inclinada para o mar, conhecida como tabuleiros.

O **pediplano de rochas pré-cambrianas** abrange uma vasta região e consiste de um conjunto profundamente arrasado, cujas altitudes crescem progressivamente para o interior. A monotonia de formas levemente ondulada, é interrompida por forte rutura de declive com os morros e serrotes residuais, formados por migmatitos e granitóides mais resistentes.

Tanto na região do pediplano como nos terrenos cenozóicos, a declividade dos talwegues é pequena, próxima do perfil de equilíbrio. Os vales são abertos, com extensas planícies de inundação, separadas por divisores d'água baixos e abaulados. Os cursos d'água são lentos, com pequena capacidade de carga, embora possam ocorrer enchentes violentas durante os períodos de elevadas médias pluviométricas.

A feição morfológica mais característica e que mais se destaca na área do projeto da barragem Maranguape I são os acidentes topográficos relacionados aos **maciços montanhosos cristalinos**, esculpidos em rochas graníticas.

4.2 - GEOLOGIA REGIONAL - BACIA HIDROGRÁFICA

O esboço geológico regional compreende basicamente um complexo de rochas pertencentes ao Pré-Cambriano não diferenciado PCX, que incluem rochas do tipo PI(B), do Proterozóico Inferior. Baseando-se em critérios estritamente litoestratigráficos, foram distinguidas as seguintes unidades pré-cambrianas: complexos Caicó e Tamboril/Sante Quitéria, Complexo Independência e Grupo Ceará e finalmente os diques ácidos.

Esta unidade apresenta como tipo litológico predominante, os migmatitos e gnaisses diversos, com ocorrência maior na parte central da bacia. A área exibe nos relevos elevados, corpos de granitóides de composição granítica a granodiorítica, e granitos diversificados, de textura grosseira e porfiróides, que datam do Proterozóico Inferior onde indicados (Ymi), com ocorrência na parte leste e sudeste da bacia hidráulica.

Toda seqüência variegada, constituída de clásticos finos a grosseiros que ocorrem na costa, infrajacentes às dunas, foi denominada de Grupo Barreiras Indiviso (TQBi). Estes depósitos sedimentares ocorrem por toda a faixa costeira. Individualiza-se como uma região de tabuleiros planos, localmente ondulada com depressões suaves, sendo truncada por falésias e pelos vales dos rios. Todo este pacote sedimentar repousa discordantemente sobre o embasamento cristalino em discordância erosiva angular. É capeada na linha da costa pelo cordão litorâneo de dunas, através de discordância e, no interior, passa transicionalmente para as coberturas Colúvio-eluviais indiferenciadas.

Nas áreas onde estão expostas as rochas cristalinas, principalmente na faixa de contato com os sedimentos costeiros, ocorrem tabuleiros constituídos por sedimentos de natureza colúvio-eluvial (TQc). Tais sedimentos foram individualizados como uma unidade com características próprias e bem definida. Estes capeamentos foram definidos como produtos da alteração de rochas cristalinas transformados em sedimentos areno-silto-argilosos inconsolidados, de idade terció-quadernária. Na região de Maranguape, constatou-se uma passagem gradativa para estas coberturas, dando um solo avermelhado com matriz areno-siltosa-ferruginosa contendo fragmentos angulosos de quartzo, pouco espesso, que evolui para um material mais alaranjado, homogêneo e visivelmente mais estável.

Os sedimentos litorâneos definiu-se pelo agrupamento dos cordões areníticos de idade recente, representados pelos arenitos flúvio-marinhos, com os sedimentos inconsolidados de origem eólica representados pelas dunas.

Os sedimentos aluviais do holoceno (Qa) são representados por todos os depósitos fluviais ou lagunares recentes. Compreendem as faixas alongadas, estreitas

e sinuosas depositadas nas calhas dos rios. Litologicamente são representadas pelas argilas, areias argilosas, areias quartzosas, areias puras e cascalho.

Um resumo das principais características de cada um dos grupos litológicos é apresentado a seguir:

- **Unidade sem Denominação – PCX, que incluem rochas do tipo PI(B)**

É constituída por uma associação complexa de migmatitos e gnaisses diversos, encerrando jazimentos subordinados de corpos metacalcários, anfibolitos, rochas calciosilicáticas, quartzitos e rochas graníticas a dioríticas. Zonas de intensa migmatização com núcleos granitóides e migmatitos homogêneos dominantes onde individualizados – Ymi.

Os gnaisses apresentam-se laminados, algo migmatizados, gradando para anfibolitos. Os biotita-quartzo-feldspato gnaisses exibem tonalidades cinza-claro a cinza médio e cinza-escuro. A estrutura normalmente mostra uma intercalação de bandas escuras, enriquecidas em máficos, com bandas claras, quartzo-feldspáticas. A granulação é principalmente equigranular média podendo variar para fina. Os gnaisses próximos às zonas de falha exibem porfiroblastos estirados de feldspatos, caracterizando os gnaisses facoidais.

Os migmatitos diversos exibem estruturas flebíticas, estromática, oftálmica, “schlieren” e homofônica; envolvem granitóides geralmente porfiroblástticos. Apresentam coloração cinza-clara a rósea, granulação média e grosseira, textura equigranular, pórfiro-granular, estrutura granítica (isotrópica), constituída essencialmente por quartzo, feldspato plagioclásio e biotita, às vezes muscovita, como minaral acessório.

Os quartzitos ocorrem dispersos e sob a forma de lentes, encaixadas concordantemente ao lineamento das rochas gnáissicas e migmatíticas. Exibem tonalidades esbranquiçadas, granulação que varia de média a grossa, laminadas, quando micáceas.

O granito exhibe coloração cinza-clara, granulação média a grosseira e textura granular. É constituído essencialmente por quartzo, feldspatos (plagioclásio e ortoclásio) e biotita.

- **Grupo Barreiras Indiviso – TQb - TQbi**

Litologicamente, se caracteriza por arenitos argilosos de coloração variegada (tons avermelhados, amarelados e esverdeados), matriz argilo-caulínica, com cimento argiloso, ferruginoso e, algumas vezes silicoso. A granulação apresenta-se de fina à média, com leitos conglomeráticos e nódulos lateríticos na base. Apresentam estratificação cruzada e discreta estratificação plano-paralela/fluvial.

- **Coberturas Colúvio-Eluviais – TQc / QHa**

Litologicamente, as aluviões estão representadas pelas argilas, areias argilosas, areias puras e cascalho. As argilas são abundantes e se encontram com frequência em todas as calhas de rios e riachos. Os cascalhos e areias constituem grandes reservas, constituídas principalmente de areias grossas, mal selecionadas, puras, com seixos de quartzo e rochas cristalinas diversas.

- **As Aluviões – Qa**

São representadas por todos os depósitos fluviais ou lagunares recentes. Constituem uma unidade importante, tanto do ponto de vista geológico quanto econômico. Compreendem as faixas alongadas, estreitas e sinuosas das calhas dos rios. Litologicamente, as aluviões estão representadas pelas argilas, areias argilosas, areias puras e cascalho. As argilas são abundantes e se encontram com frequência em todas as calhas dos rios. Geralmente são argilas detríticas, de boa plasticidade, de cores muito variadas, quase sempre brancas, amarelas, alaranjadas e vários tons de cinza.

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.

4.2.1 - Caracterização Estrutural

A bacia hidrográfica do açude Maraguape I, sofre um controle estrutural ao longo dos seus eixos de drenagem, através de zonas de falhas indiscriminadas (segundo carta geológica da CPRM – Projeto Radam Brasil), com direção preferencial NE/SW.

Outra feição estrutural, peculiar dos plutões concordantes é reconhecida, na área do projeto, nos terrenos altamente metamorfoseados do Complexo Tamboril/Santa Quitéria. A estrutura é de domo gnaisse-granito, formando dois corpos rochosos, alongados e concordantes com o “trend” da estruturação regional. Nestes corpos observa-se uma forte lineação marginal que forma a região transicional entre o

domo e as rochas circundantes, cujos elementos planares vão sendo diluídos da periferia para o núcleo. Nas porções centrais destes corpos, são encontradas rochas graníticas, no lato sensu, cuja formação é derivada da da culminação dos processos anatéticos. Estes corpos graníticos apresentam-se homogeneizados, orientados segundo a foliação regional, com uma forte lineação mineral.

Pequenos traços de fraturas, distribuídos com maior intensidade na direção NW/SW denunciam o controle da drenagem. Algumas deflexões abruptas ao longo dos eixos de 1ª ordem e 2ª ordem da drenagem, sugerem zonas de pequenas lineações que caracterizam o complexo litológico dos gnaisses diversos e migmatitos.

A influência dos planos de lineação são identificados do lado oeste da serra de Pacatuba, bordo direito da bacia da barragem Maranguape I.

4.2.2 - Metamorfismo

A grande variedade de rochas que constituem a Unidade sem Denominação (PX) é resultante do metamorfismo regional e está caracterizada por assembléias minerais diversas, que possibilitaram sugerir as condições genéticas da seqüência. As assembléias minerais ocorrem dentro de uma faixa ampla de temperatura e pressão, dentro do metamorfismo regional, e não são suficientemente seguros para determinar condições específicas de metamorfismos. Caracteriza-se pela presença constante de migmatização, que em certos casos leva a mesma a uma homogeneização total, originando núcleos granitóides.

4.3 - GEOLOGIA DO EIXO BARRÁVEL

Na etapa de desenvolvimento dos Estudos Básicos da Barragem Maranguape I, foram realizados estudos geológicos que compreenderam inicialmente consultas a mapas geológicos e bibliografias disponíveis sobre a região. Posteriormente foram efetuadas visitas de inspeção ao local dos serviços onde foi procedida uma campanha de investigações geológicas de campo.

A geologia do sítio da Barragem, principalmente em seu eixo, apresenta uma situação geológica característica da região, pois a área situa-se sobre rochas cristalinas do tipo graníticas. Na área que corresponde à ombreira esquerda, verificou-se um capeamento de solo residual de espessura considerável, da ordem de 2 a 8 metros, constituído de silte-arenoso, de coloração amarela e cinza variegada, com seixos rolados e pedregulhos. Esta situação é observada principalmente no trecho entre as estacas 0 e 11 (eixo da barragem) e em direção ao local de implantação do sangradouro, onde os afloramentos rochosos são inexistentes.

Na área que corresponde à ombreira direita, verificou-se um capeamento de solo de pequena espessura, podendo chegar a mais de 1,0 metro, constituído de silte

arenoso, de coloração creme, amarela e cinza variegada, com muitos seixos rolados. Esta situação é observada principalmente no trecho a partir da estaca 18 (eixo da barragem). Os afloramentos rochosos foram evidenciados nesta ombreira, a partir da estaca 34 (eixo) e nas seções transversais, principalmente à jusante do eixo.

No trecho correspondente as estacas 00,00=10+17,20 a 3A+0,00 e 9A+0,00 a 25A+14,29 observou-se um capeamento de solo residual, constituído por silte arenoso, pouco argiloso, de coloração creme e cinza, apresentando seixos rolados e pedregulhos. Mais precisamente, nas estacas 17A+0,00 e 20A+0,00 evidenciou-se a ocorrência de blocos soltos e embicados de rocha granítica, de coloração ora avermelhada e ora variando de cinza clara a escuro, apresentando-se porfiróide.

Logo abaixo da camada de solo residual encontra-se a rocha granítica, pouca e medianamente alterada em superfície, apresentando coloração cinza claro e escuro, por vezes avermelhada, com granulação variando de média a grossa. Apresentam pórfiroblastos de feldspatos, de coloração rósea. É constituída essencialmente por quartzo, feldspatos (plagioclásio e ortoclásio) e biotita.

Estas ocorrências rochosas apresentam características resistentes aos processos de decomposição e recobrem praticamente toda a extensão, a partir da estaca 34+10,00, com grandes afloramentos rochosos mais à montante a cerca de 200 metros, às margens do rio.

Na parte baixa do vale, nas margens do rio Bragantino, entre as estacas 18+0,00 a 32+8,00 estão restritos os sedimentos colúvio-aluviais representativos no local do sítio barrável, sob a forma de solos areno-silto-argilosos com pedregulhos, micáceos, medianamente compacta a compacta, cinza e amarela, do período Terciário e estendem-se por toda a extensão do rio, desenvolvendo planícies aluviais (várzeas), de topografia plana e suave, sujeitas a inundações. Trata-se de sedimentos imaturos, inconsolidados, provenientes da alteração das rochas cristalinas transformadas em sedimentos areno-silto-argilosos (TQc).

Em particular, na calha principal do rio, entre as estacas 25+11,50 a 25+14,00 e no trecho entre as estacas 3A+0,00 a 9A+0,00 estão os depósitos de aluviões recentes, do período Quaternário (Qha), em forma de pequenos bancos de areias, bem graduadas, de cor creme e com granulometria de média a grossa, com pedregulho, medianamente compacta, além de sedimentos silto-argilosos de coloração cinza escuro. Ocorrem também pequenos afloramentos graníticos, de coloração cinza escura, em forma de blocos e matações dispersos, medianamente a muito alterada.

A campanha de sondagens executada, identificou na estaca 25, rochas do tipo biotita-gnaïsse, muito alterada nos primeiros metros, passando a sã em maiores profundidades, quando apresenta-se moderadamente dura a dura. Mostra uma estrutura xistosa, um granulado fino, foliado com muita concentração de biotita.

Na sondagem SM-15, localizada na estaca 20+0,00m, classificou-se a rocha extraída como sendo um gabro, dura, de coloração cinza escura, textura meio granulada e estrutura maciça. Em geral assumem a forma de diques, sem controle tectônico definido, cuja unidade pertence a rochas plutônicas granulares (PCgb)..

4.3.1 - Estudos Geológicos e Geotécnicos Preliminares

Os estudos geológicos e geotécnicos preliminares, quando da visita ao sítio do barramento, foram desenvolvidos ao nível de reconhecimento, baseados na Carta Geológica do Estado do Ceará – DNPM, confeccionada na escala de 1:500.000 e através dos estudos do Projeto RADAMBRASIL. Foram considerados também nesta etapa, todos os estudos geológicos e geotécnicos atualmente existentes e os que foram executados anteriormente, os quais forneceram subsídios para uma melhor definição das características geológicas.

4.4 - INVESTIGAÇÕES NO BARRAMENTO E SANGRADOURO

4.4.1 - Sondagens à Percussão

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

Todas as sondagens à percussão foram executadas com diâmetro 21/2” 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 04 (quatro) sondagens à percussão, perfazendo um total de 29,47m perfurados. No Quadro 4.1 a seguir é apresentado, o resumo das sondagens, com suas respectivas profundidades, amarração, estaqueamento e o número de ensaios de infiltração do tipo “Le Franc” executados. Os perfis individuais dessas sondagens e o resultado dos ensaios são apresentados no *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

4.4.2 - Sondagens Mistas

Foram executadas 11 (onze) sondagens mistas, perfazendo um total de 198,70 metros. No Quadro 4.1 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”. No *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos* são apresentados os perfis individuais das sondagens e o resultado dos ensaios.

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.

Baseado nos resultados das sondagens, foi elaborada uma planta com o Perfil Longitudinal do Subsolo que está apresentada no *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*. Lembramos que este perfil representa evidentemente apenas uma indicação do provável desenvolvimento das camadas do subsolo, pois foi feito somente na vertical e foi elaborado para uma melhor visualização da natureza geral da área em estudo.

4.4.3 - Ensaios de Permeabilidade " *in situ*" com Carga Constante (Le Franc)

Neste tipo de ensaio, mantém-se constante a vazão de água no furo até que as condições de fluxo se estabilizem e a coluna d'água no furo, se torne constante. Com estas condições, é possível medir a vazão e a carga. Os ensaios podem ser executados abaixo e/ou acima do nível d'água.

Foram realizados 49 ensaios de permeabilidade "*in situ*" com carga constante e os resultados destes podem ser observados no *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

4.4.4 - Ensaios de Perda D' Água (Lugeon)

Os ensaios de perda d'água sob pressão (Lugeon), em furos de sondagens têm por objetivo a determinação da permeabilidade e do comportamento dos maciços rochosos frente à percolação da água através de suas fissuras.

Consiste na injeção de água sob pressão em um trecho do furo de sondagem e na medida da quantidade da água que se infiltra no maciço, durante um certo tempo, sob uma dada pressão de injeção. O ensaio é realizado em 5 (cinco) estágios de pressão, sendo o 1º e o 5º estágios sob uma pressão mínima; o 2º e 4º estágios sob uma pressão intermediária, e o 3º estágio sob uma pressão máxima.

Foram realizados 19 ensaios de perda d'água, e os resultados estão apresentados no *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

QUADRO 4.1 RESUMO DAS SP's e SM's

Arquivo: Quadro4-1.xls

4.5 - ESTUDOS DOS MATERIAIS

Os estudos das ocorrências de materiais para a utilização na construção da Barragem Maranguape I 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 455.000,00m² e volume útil de 395.850,00m³, a uma distância de 100m do eixo da barragem;
- Jazida 02 - Material terroso para a construção do maciço, com área igual a 475.000,00m² e volume útil de 370.500,00m³, a uma distância de aproximadamente 1,70km do eixo da barragem;
- Areal 01 - Areia de rio (Rio Maranguape) que será usada nas transições, filtros, drenos e concretos, com uma área de 16.000,00m² e um volume útil de 22.400,00m³, localizado junto à estaca 07 do eixo da barragem;
- Pedreira 01 - Para produção de pedra para enrocamento e brita. Esta localizada aproximadamente a 1,00km de distância do eixo da barragem, com área igual a 10.000,00m² e volume útil de 300.000,00m³.

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

As jazidas de materiais terrosos (J 01 e J 02) foram estudadas através de sondagens a pá e picareta, executadas nos vértices de uma malha de 100m x 50m. Na Jazida 01 foram executados 83 poços, com um total de 82,25m de sondagem e na Jazida 02 foram executados 90 poços, perfazendo 78,50m de sondagem. Das jazidas 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 Ensaios 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 nas jazidas 01 e 02. A classificação táctil-visual e os resultados dos ensaios são apresentados no *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

Quadro 4.2 - Resumo dos Ensaio Geotécnicos Área de Empréstimo - Jazida 01

| ENSAIOS | TOTAL | FUROS COLETADOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | | 02 | 04 | 08 | 11 | 15 | 18 | 21 | 27 | 30 | 32 | 35 | 37 | 44 | |
| Granulometria por Sedimentação | 07 | | | X | | | X | | | | X | X | | X | |
| Permeabilidade (Carga Variável) | 07 | | | X | | | X | | | | X | X | | X | |
| Cisalhamento Direto | 04 | | | X | | | | | | | X | | | X | |
| Compactação (Proctor Normal) | 21 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Limite Liquidez | 21 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Limite Plasticidade | 21 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Granulometria por Peneiramento | 21 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |

Continuação

| ENSAIOS | FUROS COLETADOS | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 46 | 48 | 53 | 58 | 63 | 75 | 77 | 80 | 82 |
| Granulometria por Sedimentação | | | | X | | | | X | |
| Permeabilidade (Carga Variável) | | | | X | | | | X | |
| Cisalhamento Direto | | | X | | | | | | |
| Compactação (Proctor Normal) | X | X | | X | X | X | X | X | X |
| Limite Liquidez | X | X | | X | X | X | X | X | X |
| Limite Plasticidade | X | X | | X | X | X | X | X | X |
| Granulometria por Peneiramento | X | X | | X | X | X | X | X | X |

Quadro 4.3 - Resumo dos Ensaio Geotécnicos Área de Empréstimo - Jazida 02

| ENSAIOS | TOTAL | FUROS COLETADOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | | 01 | 05 | 09 | 11 | 16 | 23 | 29 | 34 | 36 | 37 | 41 | 47 | 54 | |
| Granulometria por Sedimentação | 08 | | X | | | | | | | X | X | X | | | |
| Permeabilidade (Carga Variável) | 08 | | X | | | | | | | X | X | X | | | |
| Cisalhamento Direto | 06 | | | | | | | | | X | X | X | | | |
| Compactação (Proctor Normal) | 22 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Limite Liquidez | 22 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Limite Plasticidade | 22 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| Granulometria por Peneiramento | 22 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |

Continuação

| ENSAIOS | FUROS COLETADOS | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 55 | 61 | 64 | 68 | 72 | 75 | 78 | 82 | 86 | 90 |
| Granulometria por Sedimentação | | | X | X | | | | X | X | |
| Permeabilidade (Carga Variável) | | | X | X | | | | X | X | |
| Cisalhamento Direto | | | X | X | | | | X | | |
| Compactação (Proctor Normal) | X | X | | X | X | X | X | X | X | X |
| Limite Liquidez | X | X | | X | X | X | X | X | X | X |
| Limite Plasticidade | X | X | | X | X | X | X | X | X | X |
| Granulometria por Peneiramento | X | X | | X | X | X | X | X | X | X |

No Areal 01 foram coletadas 25 amostras, totalizando 34,00m de sondagem, para a classificação tátil-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 4.4).

Quadro 4.4 - Resumo dos Ensaios Geotécnicos do Areal 01

| ENSAIOS | TOTAL | FUROS COLETADOS | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 |
| Granulometria | 12 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Permeabilidade (Carga Constante) | 07 | X | X | | X | | X | X | X | | | X | |

Para a Pedreira 01 foram coletadas cinco amostras para a realização do ensaio de Desgaste por Abrasão tipo “Los Angeles”. O resultado deste ensaio está apresentado no *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

4.5.1 - Permeabilidade com Carga Variável

A moldagem do corpo de prova foi realizada no próprio cilindro onde foram executados os ensaios, sendo o solo compactado na umidade ótima e massa específica seca máxima, obtida no ensaio de compactação.

O equipamento de ensaio foi drenado para retirada das bolhas de ar. Inicialmente, os corpos de prova permaneceram no mínimo 24 horas sob fluxo de água, até que este se tornasse constante, quando foi iniciado o ensaio.

Foi medido o tempo para a água descer uma determinada altura na bureta. O nível da água foi repostado ao nível inicial e a operação repetida no mínimo mais duas vezes. O coeficiente de permeabilidade foi calculado através da média dos valores.

4.5.2 - Permeabilidade com Carga Constante

A moldagem dos corpos de prova foi realizada no próprio cilindro onde foram executados os ensaios, adensando o material com água abundante, percolando o solo até ser atingido o índice de vazio previsto.

Os corpos de prova permaneceram no mínimo trinta minutos com fluxo de água constante, antes do início do ensaio.

Durante a execução do ensaio, foi medida a quantidade de água que atravessou o corpo de prova, durante um certo intervalo de tempo e a operação repetida no mínimo mais três vezes consecutivamente. O coeficiente de permeabilidade foi calculado através da média dos coeficientes obtidos em cada uma das vezes.

4.5.3 - Cisalhamento Direto Lento

Os corpos de prova foram compactados na caixa de cisalhamento, e saturados sob uma tensão vertical de 0,5 kgf/cm². Em seguida foi complementada a carga vertical de tal modo que fosse obtida a tensão normal de ruptura (0,5; 1 e 2 kgf/cm²) e aguardado o tempo necessário para que ocorresse o adensamento primário.

Posteriormente, foi iniciada a fase de ruptura com uma velocidade de 10⁻²mm/min, sendo realizadas leituras das deformações vertical, horizontal e do dinamômetro a cada 15 minutos, até que fosse caracterizada a ruptura ou a tensão de cisalhamento permanecesse constante.

4.6 - COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE AS INVESTIGAÇÕES

4.6.1 - Apresentação dos Resultados

Os resultados dos Estudos Geotécnicos podem ser visualizados no Anexo *do Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*, divididos da seguinte maneira.

- Boletins de Sondagens e Ensaio no Sítio Barrável
 - Sondagens a Percussão;
 - Sondagens Mistas;
 - Ensaio de Infiltração (Le Franc);
 - Ensaio de Perda D'Água (Lugeon).
- Estudos dos Materiais
 - Boletins de Sondagens para Jazidas;
 - Quadro Resumo dos Ensaio de Laboratório;
 - Ensaio de Granulometria por Peneiramento;
 - Ensaio de Limites de Consistência;
 - Ensaio de Compactação (Proctor Normal);
 - Análise Granulométrica por Sedimentação;
 - Ensaio de Densidade “in situ”.

- Ensaios Especiais
 - Ensaios de Permeabilidade com Carga Variável;
 - Ensaios de Permeabilidade com Carga Constante;
 - Ensaios “Los Angeles”;
 - Ensaios de Cisalhamento Direto Lento.

4.6.2 - Fundações

Através da análise dos resultados das sondagens executadas no local das obras, pode-se traçar um provável perfil geotécnico da área do trecho barrável. Este desenho encontra-se no anexo do *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

As características da fundação da barragem podem ser visualizadas nos boletins de sondagem, nos ensaios de infiltração e perda d'água realizados, bem como no desenho referentes ao perfil geológico-geotécnico apresentado no anexo do *Volume I – Estudos Básicos, Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos*.

O eixo locado é dividido por três segmentos contínuos denominados de ombreira esquerda, calha do rio e ombreira direita.

- Ombreira Esquerda

A ombreira esquerda está localizada entre as estacas 25A até a estaca 14A. Nesta área foram executadas 4 (quatro) sondagens mistas, a saber: SM-A, SM-B, SM-E e SM-17.

A sondagem SM-A foi realizada na estaca 17A no eixo barrável. Foi encontrado nível d'água a uma profundidade de 0,96m. Até 0,87m de profundidade foi encontrado silte arenoso, cinza, com SPT de 20/6 golpes. No trecho entre 0,87m e 5,50m encontrou-se um solo residual, caracterizado por areia siltosa, com pedregulhos, micácea, cinza clara e cinza escura variegada, com SPT'S variando de 32 golpes a 13/3 golpes. A partir da profundidade de 5,50m até o final do furo, na profundidade de 14,50m, encontrou-se o substrato rochoso, caracterizado por granito duro muito duro, cinza e rósea, com recuperação mínima de 98%, com RQD variando de 50% a 100%, medianamente intemperizada a rocha são e com fraturas por metro variando entre 5 frat./m a 10 frat./m.

A sondagem SM-B foi realizada na estaca 23A+5,00m, deslocado 116m para jusante do eixo barrável. O nível d'água encontra-se a 0,42m de profundidade. No trecho entre 0,00 até 0,40m foi encontrado um silte argiloso com pedregulhos, com SPT de 4 golpes. No trecho entre 0,40m e 2,00m encontra-se uma areia grossa, pouco siltosa, cinza e amarela, com SPT'S variando de 4 golpes a 5 golpes. No trecho entre 2,00m e 4,80m encontra-se uma areia siltosa micácea com pedregulhos, cinza escura, com SPT'S variando de 4 golpes a 12 golpes. No trecho entre 4,80m e 6,00m encontra-se um silte argiloso, com pedregulhos micáceo, cinza escuro, com SPT'S

variando de 25/15 golpes a 14/1 golpes. A partir da profundidade de 9,50m foi encontrado o substrato rochoso, caracterizado por um granito muito duro, cinza, com recuperação mínima de 98%, com RQD variando de 60% a 100%, ligeiramente intemperizada a rocha sã e com fraturas por metro variando de 5 frat./m a 10 frat./m.

A sondagem SM-E foi realizada na estaca 23A+5,00m. deslocada 58m para o lado de jusante do eixo barrável. Não foi encontrado neste furo de sondagem nível d'água. Entre 0,00m e 4,00m foi encontrado um silte arenoso, micáceo, com pedregulho, cinza e amarelo, com SPT'S variando de 2 golpes a 32/20 golpes. No trecho entre 4,00m e 8,20m foi encontrado solo residual, caracterizado por silte arenoso, micáceo, cinza escuro, com SPT'S variando de 41 golpes a 15/3 golpes. A partir de 8,20m até o final do furo de sondagem, a profundidade de 14,00m é encontrado o substrato rochoso, caracterizado por gnaiss, moderadamente dura, dura a muito dura, cinza, com recuperação variando de 80% a 90%, RQD variando de 40% a 80%, medianamente intemperizada a ligeiramente intemperizada e com fraturas por metro não superiores a 5 frat./m.

A sondagem SM-17 foi realizada na estaca 24A no eixo barrável. Neste furo de sondagem não foi encontrado nível d'água. Entre as profundidades de 0,00m a 2,00m foi encontrado silte argiloso, marrom, com SPT'S variando de 25/23 golpes a 37 golpes. No trecho entre 2,00m a 7,80m foi encontrado solo residual, caracterizado por silte arenoso com pedregulhos, micáceo, cinza claro e cinza escuro variegado, com SPT'S variando de 24/13 golpes a 19/3 golpes. A partir de 7,80m até o final do furo de sondagem na profundidade de 20,00m, foi encontrado o substrato rochoso, caracterizado por granito dura muito dura, cinza, com recuperação mínima de 58%, com RQD variando de zero a 90%, ligeiramente intemperizada a rocha sã e com fraturas por metro variando de 5 frat./m a mais de 20 frat./m.

Na sondagem SM-17 no trecho em rocha foram realizados 4 (quatro) ensaios de perda d'água sobre pressão do tipo Lugeon, os quais indicaram perdas d'água nulas.

- Calha do Rio

A calha do rio da Barragem Maraguape I está localizada entre as estacas 13A e 34. Ao longo do trecho da calha do rio foram executadas 4 (quatro) sondagens percussivas e 3 (três) sondagens mistas, a saber: SP-01, SP-A, SP-B, SP-C, SM-02, SM-03, SM-04, SM-05, SM-C, SM-15 e SM-18.

A sondagem SP-01 foi realizada na estaca 3 do eixo barrável. Neste furo de sondagem não foi encontrado nível d'água. Entre 0,00m e 0,35m foi encontrado areia média pouco siltosa, micácea, cinza escura, com SPT de 11 golpes. Entre as profundidades de 0,35m e 2,45m foi encontrado silte arenoso, micáceo, com pedregulhos, cinza e amarela, com pedregulho e com SPT'S variando de 17 golpes a 33 golpes. A partir da profundidade de 2,45m até o final do furo, na profundidade de

9,00m, foi encontrado solo residual, caracterizado por areia siltosa, micácea, cinza e amarela, com SPT'S variando de 40 golpes a 15/3 golpes.

Nesta sondagem foram realizados 2 (dois) ensaios de infiltração tipo Le Franc, com valores de $2,26 \times 10^{-4}$ cm/s e $2,7 \times 10^{-5}$ cm/s.

A sondagem SP-A foi realizada na estaca 5A no eixo barrável. Na profundidade de 0,58 foi encontrado nível d'água. Entre 0,00m e 2,90m foi encontrada areia siltosa, micácea, com pedregulhos, cinza escura, com SPT'S variando de 1 golpe a 14 golpes. No trecho entre 2,90m e 4,80m foi encontrada argila muito argilosa, com pedregulhos cinza e amarela, com SPT'S variando de 14 golpes a 44/19 golpes. Da profundidade de 4,80m até o final do furo, na profundidade de 6,42, foi encontrado solo residual caracterizado por silte arenoso, micáceo, cinza, com SPT'S variando de 20/3 golpes a 45/6 golpes.

Na sondagem SP-A foram realizados 7 (sete) ensaios de infiltração tipo Le Franc, o qual apresentou coeficientes de permeabilidade variando de zero a $2,51 \times 10^{-7}$ cm/s.

A sondagem SP-B foi realizada na estaca 8A no eixo barrável. O nível do lençol freático foi encontrado a 1,10m de profundidade. Entre 0,00m e 0,25m foi encontrada areia siltosa, micácea, cinza escura, com SPT de 2 golpes. De 0,25 a 3,00 foi encontrada areia siltosa, com pedregulhos, cinza escura, com SPT'S variando de 5 golpes a 10 golpes. De 3,00m a 5,00m foi encontrada argila muito arenosa, micácea, com pedregulhos, cinza e amarela, com SPT'S variando de 30 golpes a 30/8 golpes. De 5,00m a 6,45m, final do furo de sondagem, encontrou-se solo residual caracterizado por silte arenoso, micáceo, cinza, com SPT'S variando de 50/18 golpes a 45/8 golpes.

Na sondagem SP-B foram realizados 6 (seis) ensaios de infiltração tipo Le Franc, os quais determinaram coeficientes de permeabilidade variando de $1,05 \times 10^{-4}$ cm/s a $2,72 \times 10^{-6}$ cm/s.

A sondagem SP-C foi realizada na estaca 10A do eixo barrável. O nível d'água foi identificado na profundidade de 1,05m. Nos 0,40m iniciais foi identificado um silte argiloso, com pedregulhos, cinza escuro, com SPT de 10 golpes. De 0,40m a 3,05m foi encontrada argila muito arenosa, com pedregulhos, cinza, com SPT'S variando de 12 golpes a 26 golpes. De 3,05m até 7,60m, final do furo de sondagem, encontrou-se solo residual, caracterizado por silte arenoso, micáceo, com pedregulhos, amarelo, com SPT'S variando de 17 golpes a 35/6 golpes.

Na sondagem SP-C foram realizados 7 (sete) ensaios de infiltração tipo Le Franc, os quais determinaram coeficientes de permeabilidade variando de $1,38 \times 10^{-5}$ cm/s a $2,11 \times 10^{-7}$ cm/s.

A sondagem SM-02 foi realizada na estaca 6+10,00m no eixo barrável. O nível d'água encontrado está na profundidade de 0,60m. Nos 0,20m iniciais foi identificado

silte argiloso com pedregulhos, cinza escura, com SPT de 15 golpes. De 0,20m a 1,15m foi encontrada argila siltosa, com pedregulhos, cinza e amarela, com SPT de 49 golpes. De 1,15m até 7,00m de profundidade foi encontrado solo residual, caracterizado por silte argiloso, micáceo, com pedregulhos, cinza, com SPT'S variando de 40 golpes a 15/2 golpes. A partir de 7,00m até o final do furo na profundidade de 16,00m foi encontrado o substrato rochoso, caracterizado por granito muito duro, róseo, com recuperação mínima de 90%, com RQD variando de 50% a 100%, medianamente intemperizada a rocha sã e com fratura por metro de 5 frat./m a 15 frat./m.

Na sondagem SM-02 foram realizados no trecho em solo 3 (três) ensaios de infiltração tipo Le Franc, que determinaram coeficientes de permeabilidade na ordem de 10^{-6} cm/s. Nesta mesma sondagem, no trecho em rocha, foram realizados 3 (três) ensaios de perda d'água tipo Lugeon, cujos valores de perda d'água variaram de zero a 0,01 l/min/m/10 atm.

A sondagem SM-03 foi realizada na estaca 10+17,80m, no eixo barrável. O nível d'água encontrado está a 5,00m de profundidade. Nos 0,20m iniciais foi encontrada areia siltosa, micácea, cinza escura, com SPT de 11 golpes. De 0,20m a 13,00m foi identificado solo residual caracterizado por silte arenoso, micáceo, com pedregulhos, cinza, com SPT'S variando de 22/10 golpes a 10/1 golpes. A partir de 13,00m até o final do furo na profundidade de 18,50m foi encontrado o substrato rochoso, caracterizado por granito muito duro, com recuperação variando de 80% a 95%, com RQD variando de zero a 80%, ligeiramente intemperizada a rocha sã e com fraturas por metro na ordem de 5 frat./m.

No trecho de solo da sondagem SM-03 foram realizados 5 (cinco) ensaios de infiltração do tipo Le Franc, o qual indicaram coeficientes de permeabilidade entre $1,35 \times 10^{-5}$ cm/s e $4,91 \times 10^{-6}$ cm/s. No trecho em rocha, foram realizados 2 (dois) ensaios de Lugeon, os quais indicaram perda d'água nula e de 0,02 l/min/m/10 atm.

A sondagem mistas SM-04 foi executada na estaca 14A no eixo barrável. Foi encontrado nível d'água a uma profundidade de 0,25m. Entre o horizonte de 0,00m a 1,00m foi encontrada uma areia siltosa com pedregulhos, micácea, cinza e amarela, com SPT'S variando de 13 golpes a 26 golpes. No trecho entre 1,00m e 6,90 foi encontrado o solo residual, caracterizado por silte pouco argiloso, com pedregulhos, micácea, cinza e amarela, com SPT'S variando de 25/9 golpes a 30/4 golpes. A partir da profundidade de 6,90m até o final do furo, à profundidade 21,90m, encontra-se o substrato rochoso, caracterizado por um granito, duro, muito duro, cinza, com RQD mínimo de 30%, variando de medianamente intemperizada a rocha sã, com valores de fratura por metro variando de 5 frat./m a 15 frat./m.

Na sondagem SM-04 foram realizados no trecho em solo 5 (cinco) ensaios de infiltração tipo Le Franc, os quais foram encontrados valores de permeabilidade entre

$1,5 \times 10^{-6}$ cm/s e $8,4 \times 10^{-7}$ cm/s. Nesta mesma sondagem, no trecho em rocha, foram realizados 5 (cinco) ensaios de perda d'água tipo Lugeon, os quais foram encontrados valores de perdas d'água variando de zero a 0,07 l/min/m/atm.

A sondagem mista SM-05 foi executada na estaca 16A no eixo barrável. Foi encontrado nesta sondagem o nível d'água a 0,20m de profundidade. Até a profundidade de 1,85m encontra-se uma areia siltosa, micácea, cinza, com SPT'S variando de 2 golpes a 5 golpes. No trecho entre 1,85m a 2,90m encontra-se um silte argiloso, cinza, com SPT'S variando de 5 golpes a 6 golpes. No trecho entre 2,90m a 5,00m encontra-se uma areia argilosa, cinza, com SPT'S variando de 6 golpes a 15 golpes. No trecho entre 5,00m a 10,50m encontra-se um silte argiloso, cinza, com SPT'S variando de 21 golpes a 36/16 golpes. A partir da profundidade de 10,50m até o final do furo, na profundidade de 24,50m, encontra-se o substrato rochoso, caracterizado por granito duro, muito duro, cinza, com recuperação mínima de 90%, com RQD variando de 40% a 100%, ligeiramente intemperizada a rocha sã e com fraturas por metro variando de zero a 5 frat./m.

Na sondagem mista SM-05 foram executados no trecho em solo 7 (sete) ensaios de infiltração tipo Le Franc, os quais apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade variando de zero a $6,14 \times 10^{-6}$ cm/s.

A sondagem SM-C foi realizada na estaca 23A+5,00m no eixo barrável. Não foi encontrado nível d'água neste furo. Até a profundidade de 2,65m foi encontrado um silte pouco argiloso, micáceo, cinza, com SPT'S variando de 65 golpes a 30/7 golpes. No trecho entre 2,65 a 11,50 foi encontrado solo residual caracterizado por uma areia siltosa, micácea, com pedregulhos, cinza clara e cinza escura variegada, com SPT'S variando de 21/14 golpes a 13/1 golpes. A partir da profundidade de 11,50m até o final do furo, na profundidade de 20,00m, foi encontrado granito macio, duro a muito duro, cinza, com recuperação variando de 82% a 98%, com RQD variando de 30% a 90%, medianamente intemperizada a rocha sã e com fratura por metro variando de 10 frat./m a mais de 20 frat./m.

Na sondagem SM-C, na camada de solo foram realizados 7 (sete) ensaios de infiltração tipo Le Franc, com coeficiente de permeabilidade variando de $1,33 \times 10^{-4}$ cm/s a $7,52 \times 10^{-6}$ cm/s. No trecho entre 3,00m e 3,50m, houve perda total. Nesta mesma sondagem, no trecho em rocha, foram executados 3 (três) ensaios de perda d'água tipo Lugeon, cujos valores de perda d'água variaram entre 0,01 l/min/m/10 atm e 0,14 l/min/m/10 atm.

A sondagem SM-15 foi realizada na estaca 20 do eixo barrável. Neste furo de sondagem não foi encontrado nível d'água. Entre 0,00m e 1,40m de profundidade foi

encontrado silte argiloso, marrom, com SPT'S variando de 37 golpes a 32/35 golpes. No trecho entre 1,40m e 3,80m foi encontrada alteração de rocha. No trecho entre 3,80m e 6,80m foi encontrado ultramilonito, cinza, amarela e vermelha, variegada, com recuperação variando de 50% a 90%, com RQD nulo ou no máximo 20%, medianamente intemperizado e com fraturas por metro superiores a 20. Neste trecho, ou seja, entre a profundidade de 3,80m e 6,80m, foi realizado o ensaio de perda d'água tipo Lugeon, cujo valor encontrado de perda d'água foi de 0,01 l/min/m/10 atm. Em seguida, entre 6,80m e 7,80m foi encontrado solo residual, caracterizado por silte areno argiloso, micáceo, cinza, amarelo e vermelho, variegado, com SPT de 15/4 golpes. No trecho entre as profundidades de 7,80m e 11,80m foi encontrado solo residual caracterizado por areia fina siltosa, micácea, cinza, amarelo e vermelho, variegado, com SPT'S variando de 13/2 golpes a 31/1 golpes. No trecho entre 11,80m até o final do furo, à profundidade de 14,80, foi encontrado granito duro a muito duro, cinza escuro, com recuperação mínima de 90%, RQD variando de 40% a 80%, ligeiramente intemperizada a rocha sã e com fratura por metro variando de 10 frat./m a 11/15 frat./m.

A sondagem SM-18 foi executada na estaca 25 no eixo barrável. Não foi encontrado nível d' água neste furo de sondagem. Entre as profundidades de 0,00m a 1,20m foi encontrado silte arenoso com pedregulhos, marrom, com SPT de 34 golpes. Entre as profundidades de 1,20m e 7,00m foi encontrado solo residual caracterizado por silte arenoso com pedregulhos, micáceo, cinza claro e escuro variegado, com SPT'S variando de 40 golpes a 24/4 golpes. A partir da profundidade de 7,00m até o final do furo de sondagem foi encontrado o substrato rochoso caracterizado por biotita xisto, moderadamente dura, dura, muito dura, cinza, com recuperação variando de 70% a 92%, com RQD variando de zero a 60%, medianamente intemperizada a rocha sã, com fraturas por metro variando de 10 frat./m a mais de 20 frat./m.)

4.6.3 - Análise das Ocorrências Estudadas

Para a construção da Barragem Maranguape I foram estudadas duas jazidas de solo areno argiloso J-01 e J-02, um areal A-01 e uma pedreira.

Nos materiais das jazidas foram executados os seguintes ensaios:

- Granulometria (por peneiramento);
- Granulometria (por sedimentação);
- Limite de Liqueidez;
- Limite de Plasticidade;
- Compactação;
- Permeabilidade com Carga Variável;
- Cisalhamento Direto Lento.

Nas jazidas J-01 e J-02 foram coletadas respectivamente 21 e 22 amostras para realização dos ensaios.

No areal A-01, foram coletadas doze amostras sobre as quais foram realizados os ensaios de:

- Granulometria (por peneiramento);
- Permeabilidade com carga variável.

Na pedreira P-01 coletou-se cinco amostras para realização de ensaios de Desgaste por Abrasão tipo “Los Angeles”.

Examinando os resultados dos ensaios realizados nas amostras da Jazida J-01 pode se dizer o seguinte:

- Os solos da Jazida J-01 tem valores médios de:
 - LL=33%;
 - IP=10%;
 - $h_{ótima}=12,11\%$;
 - $\gamma_{s \text{ Max}}=1,874\text{tf/m}^3$.
- O enquadramento dos solos da jazida J-01 na Classificação Unificada USC indica que eles são de dois tipos SM (silte arenoso) e SC (argila arenosa). Os solos desses grupos, têm segundo Sherard* as seguintes características:

SOLOS SM

- Variam de impermeável a semi-impermeável;
- Tem média resistência ao piping;
- Tem alta resistência ao cisalhamento;
- Apresentam de boa a muito boa trabalhabilidade;

SOLOS SC

- São impermeáveis;
- Tem alta resistência ao piping;
- Tem de alta a média resistência ao cisalhamento;
- Tem boa trabalhabilidade.

- Os ensaios de permeabilidade a carga variável mostraram que os solos da jazida J-01, quando compactados próximo da umidade ótima tem permeabilidade média de $K = 1,2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$;
- Examinando os resultados dos ensaios de cisalhamento direto lento, pode se adotar os seguintes parâmetros efetivos para os solos dessa jazida $C'=17 \text{ kPa}$ e $\phi'=33,6^\circ$;
- No campo, a densidade natural da jazida J-01 foi verificada em doze pontos, obtendo-se os seguintes valores médios:
 - $h_{\text{in situ}}=4,2\%$
 - $\gamma_{\text{in situ}}=1,493 \text{ tf/m}^3$

Examinando os resultados dos ensaios da jazida J-02 pode se dizer o seguinte:

- Os solos da jazida J-02 têm valores médios de limite de liquidez, índice de plasticidade, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima dados por:
 - $LL=35\%$;
 - $IP=11\%$;
 - $h_{\text{ótima}}=13,4\%$
 - $\gamma_s \text{ máx}=1,859 \text{ tf/m}^3$
- O enquadramento dos solos da jazida J-02 na Classificação Unificada USC mostra que eles são de dois tipos SC (argila arenosa) e SM (silte arenoso).

Segundo SHERARD os solos do tipo SC e SM, quando compactados próximo da umidade ótima, apresentam as seguintes propriedades:

SOLOS SM

- Variam de impermeável a semi-impermeável;
- Tem média resistência ao piping;
- Tem alta resistência ao cisalhamento;
- Apresentam de boa a muito boa trabalhabilidade.

SOLOS SC

- São impermeáveis;
- Tem alta resistência ao piping;
- Tem de alta a média resistência ao cisalhamento;
- Tem boa trabalhabilidade.

- Os ensaios de permeabilidade com carga variável mostraram que os solos da jazida J-02, quando compactados próximo da umidade ótima, tem permeabilidade média de $K = 7,8 \times 10^{-7}$ cm/s.
- No campo, a densidade natural foi verificada em quatro pontos, apresentando os seguintes valores médios:
 - $h_{in situ} = 4,80\%$
 - $\gamma_{in situ} = 1,547$ tf/m³
- Examinando os resultados dos ensaios de cisalhamento direto lento, pode se adotar os seguintes parâmetros efetivos de resistência do solo $C' = 17$ kPa e $\phi' = 32,3^\circ$.

No Areal A-01 foram realizados ensaios de permeabilidade e de granulometria. Examinando esses ensaios pode-se fazer as seguintes observações:

- A permeabilidade média da areia é de $6,9 \times 10^{-3}$ cm/s. Areias com essa permeabilidade são adequadas para utilização como filtro no sistema de drenagem interna da barragem;
- As amostras coletadas apresentaram diâmetro máximo dos grãos de 9,5mm;
- O módulo de finura médio (MF) = 3,18. As areias com módulo de finura neste valor são classificadas como média;
- A percentagem passando na peneira nº 200 é menor que 1% o que caracteriza uma areia limpa isenta de material pulverulento.

Na pedreira P-01, foram coletadas cinco amostras de rocha que foram submetidas ao ensaio de Desgaste por Abrasão tipo “Los Angeles”. Os resultados encontrados foram os seguintes:

- Amostra-1 – 35%;
- Amostra-2 – 31%;
- Amostra-3 – 33%;
- Amostra-4 – 31%;
- Amostra-5 – 29%.

Pedreiras com “Los Angeles” dessa ordem são consideradas adequadas para fornecer produtos de britagens para a barragem.

5 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS

5 – ESTUDOS HIDROLÓGICOS

5.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A barragem Maranguape I está localizada em um afluente do riacho Tangureira denominado rio Gereraú à aproximadamente 6,0 km ao sul da sede do município de Maranguape. O eixo barrável barra o rio nas coordenadas UTM 531.918,00 E e 9.563.860,00 N. 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 Maranguape I | 15,86 km ² |
| Perímetro da bacia do Açude Maranguape I | 18,17 km |
| Declividade média da bacia do Açude Maranguape I | 68,67 m/km |
| Comprimento do rio principal | 4,50 km |
| Fator de compacidade | 1,29 |
| Fator de forma | 0,78 |
| Tempo de concentração | 0,60 hrs |

A Figura 5.1 a seguir mostra a altimetria da bacia hidrográfica do Açude Maranguape I.

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 Maranguape I tem predominantemente solos Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico - PE3 e Bruno não Cálcico - NC8 (ver Figura 5.2), o que associado com o relevo da bacia resulta em solos com baixa capacidade de drenagem (Figura 5.3). A vegetação predominante é a Caatinga Arbustiva Densa (Figura 5.4) e o principal uso é a Agricultura [Horticultura] e remanescentes florestais (Figura 5.5). O Quadro 5.2 apresenta os tipos de solo, grupos hidrológicos de solos, vegetação e uso do solo, e as áreas de cada classe e sua respectiva percentagem..

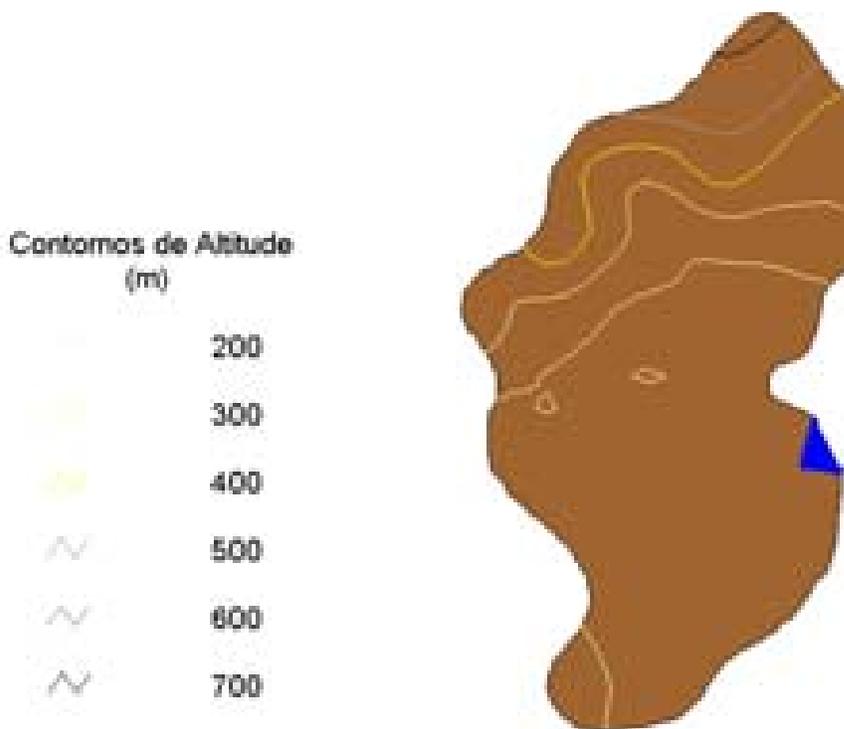


Figura 5.1. Bacia do Açude Maranguape I.

Quadro 5.2 – Análise temática para a bacia do Açude Maranguape I.

| Temas | Área (km ²) | % |
|--|-------------------------|------|
| Solos | | |
| NC8 | 2,96 | 0,19 |
| PE3 | 12,90 | 0,81 |
| Grupo Hidrológico de Solos | | |
| CD | 2,96 | 0,19 |
| D | 12,90 | 0,81 |
| Vegetação | | |
| Caatinga Arbustiva Densa | 15,23 | 0,96 |
| Floresta Subcaducifólia Tropical Fluvial (Mata Seca) | 0,63 | 0,04 |
| Uso do Solo | | |
| Agricultura (Culturas Anuais, Temporárias e Permanentes) | 4,05 | 0,26 |
| Agricultura (Horticultura) e Remanescentes Florestais | 11,81 | 0,74 |

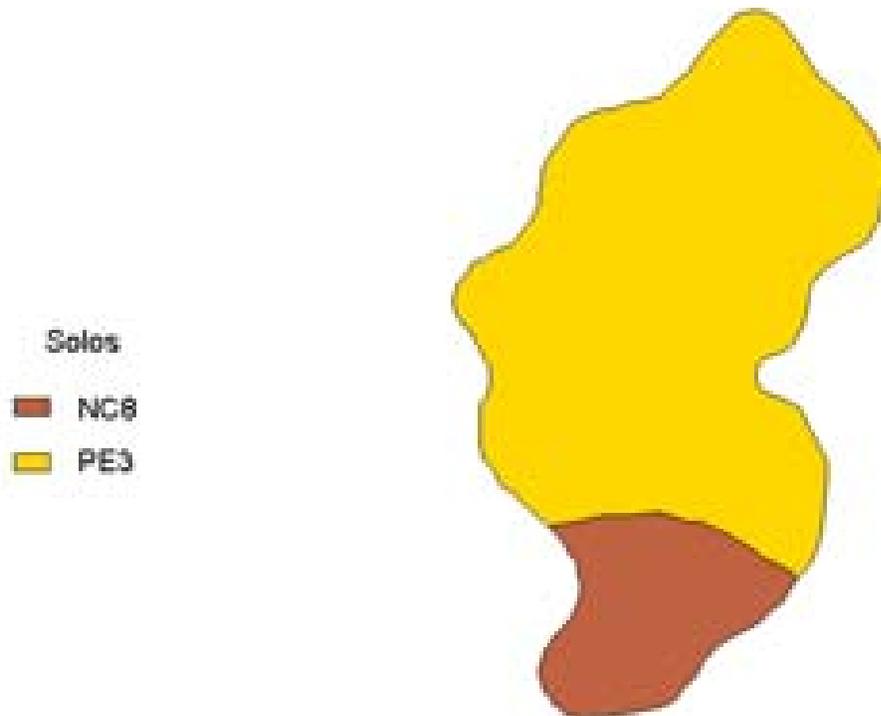


Figura 5.2. Solos da Bacia do Açude Maranguape I (Fonte: FUNCEME).



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



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



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

5.2 - ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

A abordagem da climatologia aqui desenvolvida visa dar subsídios as etapas subseqüentes dos estudos realizados na bacia do Maranguape I, principalmente aquelas relacionadas ao aproveitamento dos seus recursos hídricos.

A bacia hidrográfica estudada drena uma área de 15,86 km² no local a ser barrado. A referida bacia não tem estação hidroclimatológica localizada em seus domínios, sendo por isso utilizada como estação representativa, a de Fortaleza, com denominação homônima de sua localidade (INEMET, 1991)¹.

O Quadro 5.3, a seguir, apresenta uma síntese dos indicadores do clima da bacia em estudo.

Quadro 5.3 – Resumo dos Indicadores Climáticos

| | |
|--|-----------|
| Pluviometria média anual | 1386 mm |
| Evaporação média anual | 1468 mm |
| Evapotranspiração potencial (Hargreaves) | 1563,1 mm |
| Insolação média anual | 2694,3 h |
| Umidade relativa média anual | 78,3 % |
| Temperatura média anual: média das máximas | 29,9 °C |
| Temperatura média anual: média das médias | 26,6 °C |
| Temperatura média anual: média das mínimas | 23,5 °C |
| Classificação climática segundo Köppen | BWx' |
| Classificação climática segundo Thornthwaite | C2S2A'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 na série histórica. Estas inconsistências podem ser originadas por erros de observação, podendo tais erros ocorrer sistematicamente ou isoladamente em um certo período.

Um posto foi utilizado neste estudo, o mais próximo da área de interesse que possui uma bacia hidrográfica com 15,86 km², além de estar em uma altitude que representa melhor as características da área de estudo. Na estimativa dos dois vetores

¹INEMET, 1991. INVENTÁRIO DE ESTAÇÕES HIDROCLIMATOLÓGICAS.

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 a dupla massa 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 5.4 mostra os postos pluviométricos que foram utilizados neste estudo e que compõem o grupo regional PACOTI. Foram utilizados dados até 1988, pois estes foram consistidos por ocasião do Plano Estadual de Recursos Hídricos (1992).

**Quadro 5.4 - Postos utilizados consistidos pelo método do Vetor Regional:
Grupo Pacoti**

| Posto | Código | Período | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|------------|---------|-------------|----------|-----------|--------------|
| MARANGUAPE | 2872766 | 1912 - 1982 | 03°53' | 38°41' | 67 |

Fonte: PERH-CE (1990)

Uma análise freqüencial foi realizada para o postos de Maranguape, sendo testadas várias distribuições, e escolhida a Pearson III como a de melhor ajuste, sendo seus parâmetros estimados pelo método dos momentos. O Quadro 5.5 resume esta análise de freqüência.

Quadro 5.5 - Análise de Freqüência dos Totais Anuais - Distribuição Pearson III.

| Código | N | Período de Retorno | | | | | |
|---------|----|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| 2872766 | 75 | 2092,4 | 2723,6 | 2981,0 | 3234,3 | 3566,0 | 3816,3 |

No Quadro 5.6 mostra-se um resumo dos índices nos três níveis (mensal, trimestral e semestral), enquanto que no Quadro 5.7 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 Pearson III.

**Quadro 5.6 - Índices de Concentração Pluviométrica.
Série de Valores Médios Mensais.**

| Código | MÊS | VALOR | %TOT | TRIMES | VALOR | % | SEM | VALOR | % |
|---------|-------|-------|------|--------|-------|------|-----|--------|------|
| 2872766 | MARÇO | 323,2 | 23,3 | FMA | 825,4 | 59,6 | 1 | 1236,7 | 89,2 |

**Quadro 5.7 - Análise de Freqüência-Nível Mensal-Distribuição Pearson III
(mês mais chuvoso = março).**

| Código | N | Período de Retorno | | | | | |
|---------|----|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| 2872766 | 75 | 528,6 | 716,1 | 793,2 | 869,4 | 969,7 | 1045,6 |

5.3.1 - Chuvas Intensas

Na área em estudo inexistem registros pluviográficos, 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), que partindo da transformação da chuva de 1 dia em 24 horas, permite estimar valores para intervalos de menor duração.

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 Maranguape (2872766) foi escolhido uma vez que tem uma série extensa e uma boa representatividade do regime de chuvas da região. A Figura 5.6 mostra as curvas intensidade-duração-freqüência para diferentes tempos de retorno.

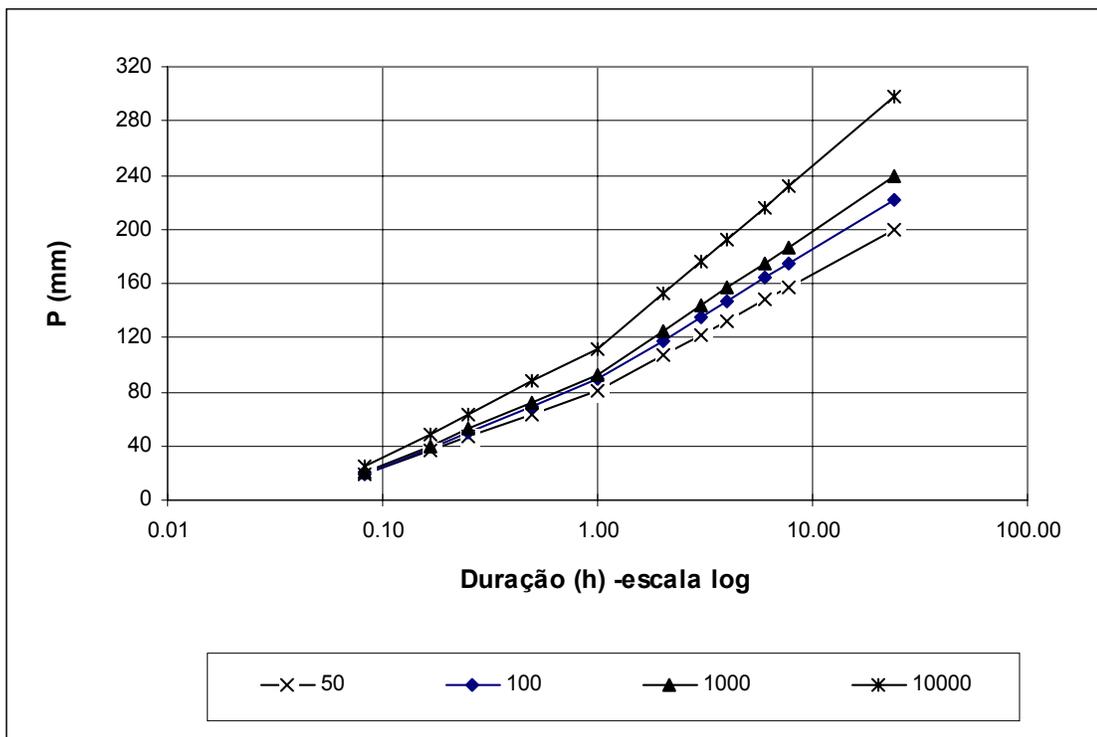


Figura 5.6 - Curvas Intensidade-Duração-Frequência

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.

As relações chuva-deflúvio para a bacia do Maranguape I 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 anos (T_r = tempo de retorno).

Para cálculo do escoamento superficial para a bacia do Maranguape I, foi considerada 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 obtidas através do método de Taborga. Na Figura 5.8 apresenta a curva intensidade-duração-freqüência para a bacia de estudo. Como a área da bacia é da ordem de 16 km², foi utilizada a chuva pontual, não sendo realizado nenhum ajuste para correção de área.

Quadro 5.8 - Chuvas Pontual e Reduzida

| Duração | 5 min | 15 min | 60 min | 2 h | 3 h | 6 h | 12 h | 24 h |
|-------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P(mm) – TR 50 | 18,6 | 46,3 | 81,2 | 107,0 | 122,1 | 147,9 | 157,5 | 199,5 |
| P(mm) – TR 100 | 18,5 | 49,8 | 89,3 | 118,1 | 135,0 | 163,9 | 174,6 | 221,6 |
| P(mm) – TR 1000 | 19,9 | 52,2 | 93,0 | 124,8 | 143,3 | 175,1 | 186,9 | 238,6 |
| P (mm) – TR 10000 | 24,8 | 63,3 | 111,8 | 152,3 | 176,0 | 216,4 | 231,4 | 297,4 |

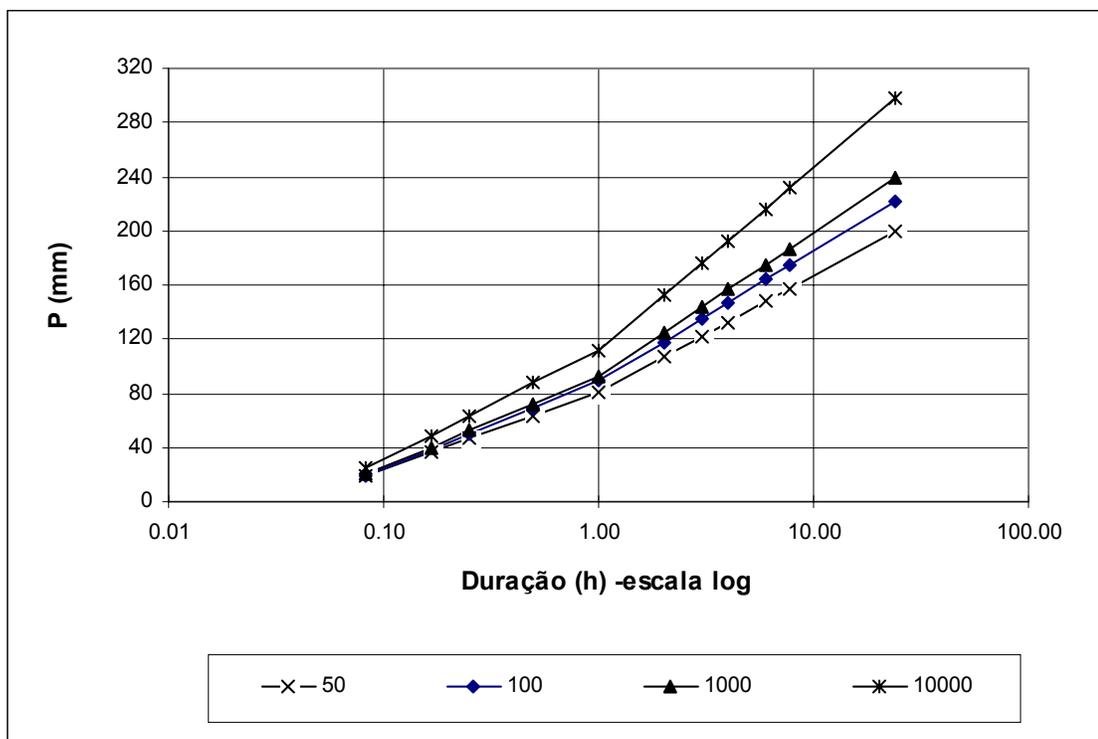


Figura 5.7 – Curvas intensidade-duração-freqüência

O HEC-1 utiliza os dados da curva intensidade-duração-freqüência 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. Adotou-se um hietograma de projeto com duração de 24 horas.

5.4.1 - Precipitação Efetiva para aplicação do HEC-1

O modelo 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 Maranguape I foi adotado um CN = 70 com base nos mapas de solos (grupos hidrológicos), uso e ocupação e relevo contidos no PERH (1990).

A equação de escoamento do SCS é dada por

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

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 la é aproximado pela seguinte relação empírica:

$$I_a = 0,20.S$$

Substituindo (2) em (1) elimina-se I_a , 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 argila.
- B - solos menos permeáveis que o anterior, solos arenosos menos profundos 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 profundos.
- D - solos contendo argilas expansivas, 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 disto, este modelo necessita apenas de um parâmetro: o TLAG. Este parâmetro, TLAG, 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 TC = 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 Maranguape I tem-se:

$$L = 4,5 \text{ km} \quad \Delta H = 309 \text{ m} \quad S = 68,67 \text{ m/km} \quad v \text{ (m/s)} = 2,08 \text{ m/s}$$

o que resulta $T_C = 0,60 \text{ h}$; $T_{LAG} = 0,36 \text{ h}$.

A vazão de pico e o tempo de pico são, assim, 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 5.9 a seguir estão indicados os dados dos hidrogramas de cheia milenar e decamilenar.

QUADRO 5.9

| Cheia | Δt (minutos) | Chuva Total (mm) | Perdas (mm) | Chuva efetiva (mm) |
|--------|--------------|------------------|-------------|--------------------|
| 1.000 | 1 | 236,71 | 94,03 | 142,68 |
| 10.000 | 1 | 295,05 | 99,62 | 195,43 |

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 $\Delta t = 0,20 t_p$, 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 Δt utilizado foi de 1 minuto. O HEC-1 sugere que $\Delta t \leq 0.29 T_{LAG}$. Para cálculo do hidrograma de projeto por esta metodologia, é necessária uma estimativa do tempo de concentração da bacia. Este tempo de concentração foi avaliado através da aplicação da fórmula de Kirpich.

A Figura 5.8 abaixo apresenta o hidrograma de projeto e o hidrograma afluente a barragem Maranguape I obtido através do uso do modelo HEC-1, conforme metodologia acima. A vazão de pico do hidrograma de 1000 anos de tempo de retorno foi 399 m³/s. Para o tempo de retorno de 10000 anos foi obtida uma vazão de pico de 528 m³/s (Figura 5.9).

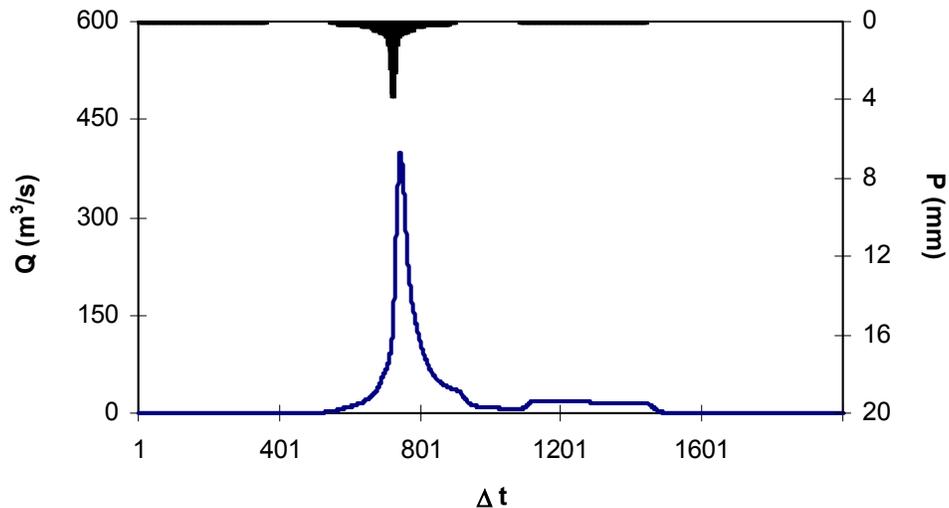


Figura 5.8 - Hidrograma total afluente ao Maranguape I (Tr = 1000 anos).

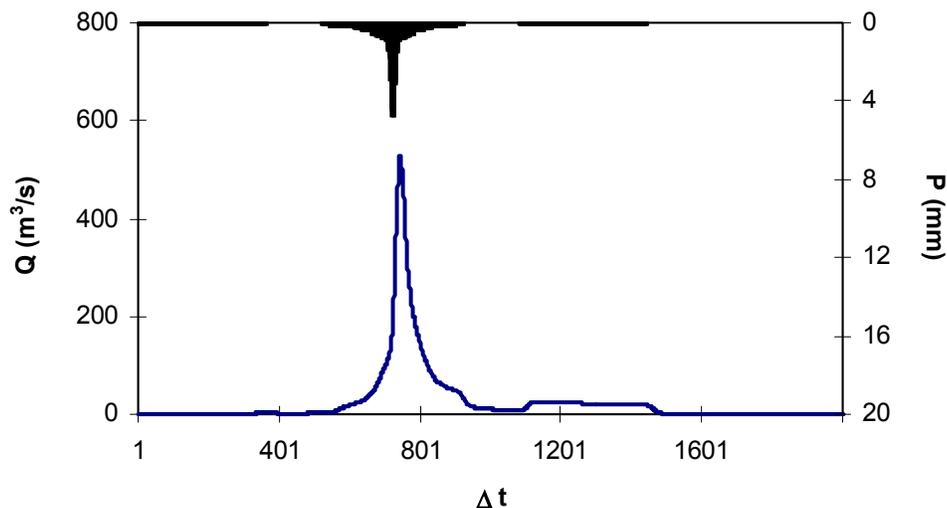


Figura 5.9 - Hidrograma total afluente ao Maranguape I (Tr = 10000 anos).

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.

5.5.1 - Solução Direta da Equação do Balanço Hídrico

A equação do balanço hídrico de um reservatório pode ser dada por:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - \frac{A_{t+1} + A_t}{2} E - M - S_t$$

$$S_t = \max(B - K; 0)$$

Com

$$B = Z_t + I_t - \frac{A_{t+1} + A_t}{2} E - M$$

Onde:

Z_t = volume armazenado no início do ano t;

I_t = volume afluente ao reservatório durante o ano t;

A_t = área do espelho d'água no início do ano t;

E = lâmina evaporada durante o ano t, suposta constante ao longo dos anos;

K = capacidade do reservatório;

S_t = volume perdido por sangria durante o ano t.

Representando-se a bacia hidráulica por

$$Z(h) = \alpha \cdot h^3 \quad \text{e} \quad A(h) = 3 \cdot \alpha \cdot h^2,$$

h - altura d'água α - fator de forma (obtido por regressão entre z e h^3)

Supondo um modelo mutuamente exclusivo com volume contínuo e uma série de vazões afluentes com uma extensão de 2000 anos seguindo uma distribuição Gamma de 2 parâmetros, pode-se resolver a equação de balanço hídrico segundo o processo descrito por CAMPOS (1990) [CAMPOS, J.N.B. 1990, REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES EM RIOS INTERMI-TENTES. TESE PARA CONCURSO DE PROF. TITULAR. UFC.], a saber:

1. estabelece-se um valor inicial para a retirada M;
2. considera-se um volume inicial igual MIN (0,5 K; 0,5 μ);
3. Calcula-se

$$Z_U = Z_t + I_t \quad p/ Z_t + I_t \leq K$$

$$Z_U = K \quad \text{caso contrário}$$

$$D_S = \text{MAX}(Z_t + I_t - K; 0)$$

onde Z_U é o volume armazenado no final da estação e D_S o volume sangrado no ano t;

4. Calcula-se o volume no fim da estação seca (início do próximo ano) por:
 - a) divide-se M e E em L partes (no caso L=6)
 - b) retirada da reserva, se disponível, de M/L

ATUALIZAÇÃO DO VOLUME ARMAZENADO

$$Z_2 = Z_1 - M / L \quad \text{se } Z_1 - M / L > Z_{MIN}$$

$$Z_2 = Z_{MIN} \quad \text{caso contrário (ANO FALHO)}$$

$$Z_{MIN} = \text{MAX}(0,05.K; 0,20. \mu)$$

VOLUME UTILIZADO

$$D_M = Z_1 - Z_2$$

ATUALIZAÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

$$h_2 = \left(\frac{Z_2}{\alpha} \right)^{1/3}$$

- c) retirada da reserva, se disponível, de E/L

ATUALIZAÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

$$h_3 = h_2 - E / L \quad \text{se } h_2 - E / L \geq 0$$

$$h_3 = 0 \quad \text{caso contrário}$$

ATUALIZAÇÃO DO VOLUME ARMAZENADO

$$Z_3 = \alpha.h_3^3$$

VOLUME UTILIZADO

$$D_E = Z_3 - Z_2$$

- d) retorna-se a b) até completar as L fases da integração;

5. Prossegue-se com os passos 3 e 4 até que se complete os 2000 anos da série gerada, totalizando os volumes evaporado, sangrado e liberado;

6. Concluído os 2000 anos, verifica-se se a frequência de falha está entre 9,95 e 10,05%, ou se o erro em retirada é menor do que 0,5 unidade. Caso afirmativo aceita-se o valor de M, caso contrário atribui-se novo valor de M e retorna-se a 1.

5.5.2 - Hidrograma Triangular

O método do Diagrama Triangular baseia-se no balanço de massas de um reservatório para um período longo:

$$\sum I = \sum M + \sum S + \sum E + Z$$

Onde $\sum I, \sum M, \sum S, \sum E$ representam as somas dos volumes afluente, retirado, sangrado e evaporado, enquanto Z representa a diferença entre os volumes final e inicial do reservatório. Dividindo-se a equação de balanço de massas acima por N , sendo N suficientemente grande, obtém-se:

$$\mu = E \{M\} + E \{S\} + E \{E\}$$

Onde $E \{.\}$ representa operador valor esperado, e μ o deflúvio afluente médio. Pela última equação verifica-se que o volume afluente divide-se em três componentes, o que sugere o uso do Diagrama Triangular para estabelecer como esta divisão se processa em função dos parâmetros estatísticos dos deflúvios e das características do reservatório (CAMPOS, 1990).

- **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: 322 mm
- volume afluente médio escoado (μ): 5,107 hm³/ano

O coeficiente de variação de $CV = 0,85$ 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. Assim,

$$\begin{aligned} E_L &= 0,85 \cdot (80,5+100,6+129,0+142,6+147,5+142,9+131,2) \\ &= 743,1 \text{ mm (Evaporação na estação seca)} \end{aligned}$$

$$\alpha = 434,2$$

$$f_E = 3\alpha^{1/3} E_L/\mu^{1/3} = 0,09$$

No Quadro 5.10 apresenta-se o percentual e seu valor correspondente dos volumes regularizados, evaporados e sangrados em função de f_K (fator de capacidade = K/μ) e o Quadro 5.11 mostra como o volume afluente ao reservatório se distribui. A Figura 5.10 apresenta as curvas de regulação para o reservatório Maranguape I, que nada mais é que o gráfico dos valores apresentados no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 - Estudo incremental de capacidades do Reservatório Maranguape I

| Cota (m) | K (hm ³) | Fk K/μ | %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) |
|-------------|-------------------------|-------------|--------------|-------------------------------|-------------|------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| 93 | 1,726 | 0,34 | 20,84 | 1,058 | 3,10 | 0,158 | 76,06 | 3,863 | ----- | 0,035 | 1,101 |
| 95 | 2,409 | 0,47 | 25,68 | 1,304 | 4,05 | 0,205 | 70,27 | 3,567 | 0,365 | 0,043 | 1,350 |
| 97 | 3,237 | 0,63 | 31,72 | 1,610 | 4,99 | 0,253 | 63,29 | 3,212 | 0,383 | 0,053 | 1,667 |
| 99 | 4,124 | 0,81 | 37,64 | 1,909 | 5,87 | 0,298 | 56,49 | 2,866 | 0,352 | 0,063 | 1,979 |
| 101 | 5,073 | 0,99 | 43,58 | 2,210 | 6,68 | 0,339 | 49,74 | 2,523 | 0,338 | 0,073 | 2,299 |
| 102 | 5,574 | 1,09 | 46,39 | 2,353 | 7,08 | 0,359 | 46,53 | 2,360 | 0,307 | 0,078 | 2,453 |
| 103 | 6,092 | 1,19 | 49,20 | 2,495 | 7,45 | 0,378 | 43,36 | 2,199 | 0,300 | 0,083 | 2,608 |
| 104 | 6,624 | 1,30 | 51,10 | 2,591 | 7,90 | 0,401 | 41,00 | 2,079 | 0,185 | 0,086 | 2,706 |
| 105 | 7,167 | 1,40 | 52,98 | 2,686 | 8,34 | 0,423 | 38,68 | 1,961 | 0,183 | 0,089 | 2,806 |
| 106 | 7,724 | 1,51 | 54,69 | 2,772 | 8,78 | 0,445 | 36,53 | 1,852 | 0,160 | 0,092 | 2,895 |
| 107 | 8,297 | 1,62 | 56,39 | 2,858 | 9,21 | 0,467 | 34,40 | 1,744 | 0,153 | 0,095 | 2,983 |
| 108 | 8,888 | 1,74 | 58,20 | 2,950 | 9,61 | 0,487 | 32,20 | 1,632 | 0,166 | 0,098 | 3,081 |
| 109 | 9,495 | 1,86 | 59,64 | 3,023 | 10,04 | 0,509 | 30,32 | 1,537 | 0,125 | 0,100 | 3,157 |
| 110 | 10,120 | 1,98 | 61,18 | 3,101 | 10,44 | 0,529 | 28,38 | 1,439 | 0,132 | 0,103 | 3,240 |

Quadro 5.11 - Distribuição do volume afluente e Qr (90%) para o Reservatório Maranguape I

| Equação do Balanço Hídrico | | | |
|----------------------------|----------------|---------------|----------------------------|
| RG - % | SG - % | EV - % | Qr 90% (m ³ /s) |
| 2,772 – 54,7% | 1,852 – 36,53% | 0,445 – 8,78% | 0,092 |

EV - Volume Evaporado (hm³/ano)
 SG - Volume Sangrado (hm³/ano)
 RG- Volume Regularizado (hm³/ano)
 Qr 90% - Vazão regularizada com 90% de garantia (m³/s)

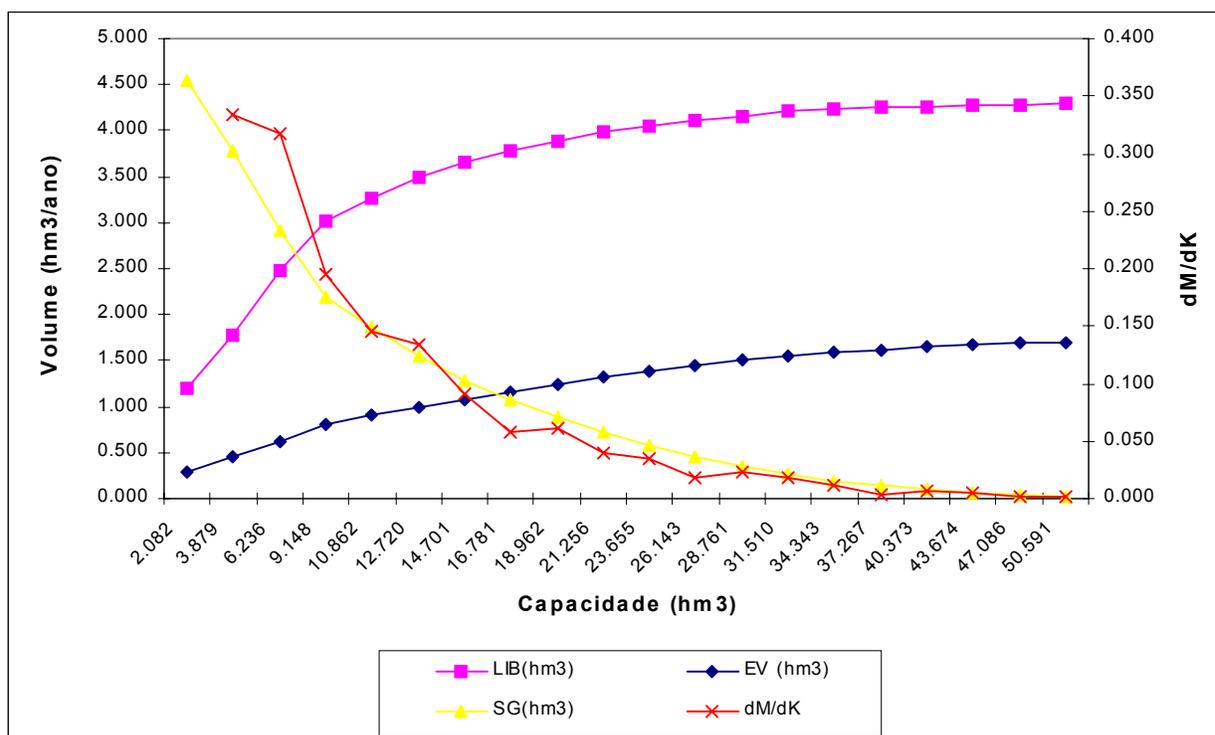


Figura 5.10 - Curvas de Regulação do Reservatório Maranguape I

Apesar dos ganhos incrementais na capacidade de regularização da barragem com o aumento do barramento ainda serem significativos para cotas acima da 106 m (Figura 5.10 e Quadro 5.10), a topografia do local do barramento é um fator limitante (cota máxima de soleira possível = 110 m). Assim sendo, a cota de soleira de 106 m é indicada como a mais adequada hidrológicamente. Esta corresponde a um volume de acumulação de 7,724 hm³. Para esta capacidade o reservatório regulariza 54,7% do volume afluente médio anual, ou seja, 2,772 hm³/ano, conforme a resolução direta da equação do balanço hídrico. Este volume regularizado anualmente corresponde a uma vazão regularizada com 90% de garantia de 0,092 m³/s. O Quadro 5.11 mostra como o volume afluente ao reservatório distribui-se em volume regularizado (RG), volume evaporado (EV) e volume sangrado (SG)..

5.6 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO

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 m³ de água acumulada em função da cota de soleira do reservatório para um período de 30 anos à 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 5.11 mostra que:

- o custo anual do m³ regularizado variou entre R\$0,046 (cota 104 m) e R\$ 0,078 (cota 109 m).
- o custo anual do m³ de acumulação variou entre R\$ 0,019 (cota 104 m) a R\$ 0,026 (cota 109).

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

Os custos do m³ regularizado e do m³ acumulado aumentam com o aumento da capacidade do reservatório, não apresentando diferenças significativas somente para cotas ≤ 106 m. Assim, considerando os aspectos construtivos, hidrológicos e econômicos sugere-se a adoção da cota de soleira = 106 m (volume de armazenamento = 7,724 hm³)..

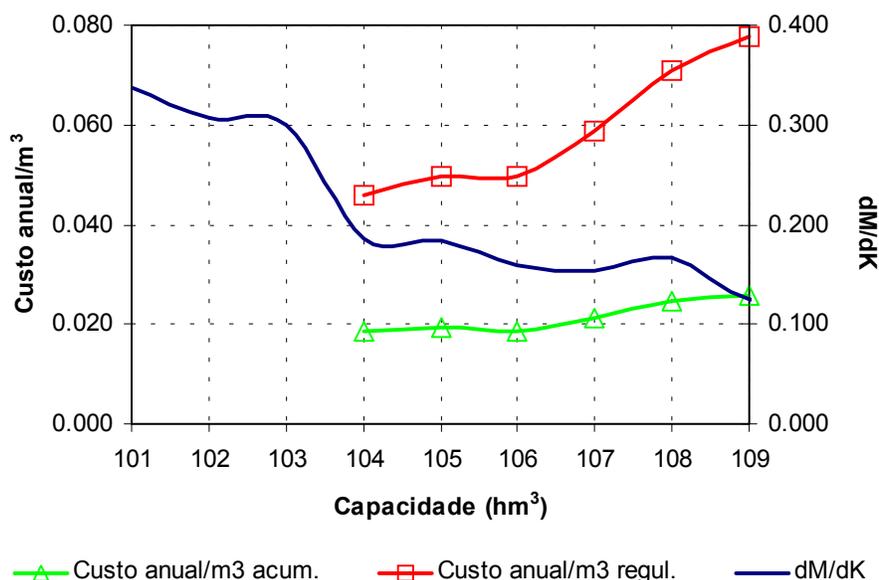


Figura 5.12. Análise hidrológico-econômica para seleção da capacidade da barragem Maranguape I.

5.7 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO

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

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.

A equação discretizada da continuidade é dada por

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (1)$$

Onde I_t e I_{t+1} = vazões afluentes ao reservatório em t e $t+1$; Q_t e Q_{t+1} = vazões de saída ao reservatório em t e $t+1$; S_t e S_{t+1} = armazenamento em t e $t+1$; Δt = intervalo de tempo. As incógnitas Q_{t+1} e S_{t+1} podem ser colocadas em um mesmo lado, resultando em

$$Q_{t+1} + 2 \cdot \frac{S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_t + 2 \cdot \frac{S_t}{\Delta t} \quad (2)$$

Conhecendo-se a função $Q = f(S)$, constrói-se uma função $Q = h(Q + 2S/\Delta t)$, resultando no seguinte processo de cálculo:

1. determinação do volume inicial S_0 (conforme objetivo do estudo), e a partir deste, determina-se Q_0 ;
2. calcular o termo direito da equação 2, uma vez que o hidrograma de entrada foi determinado pelo método do hidrograma unitário do SCS;
3. com este valor ($Q_{t+1} + 2 \cdot S_{t+1}/\Delta t$) é possível obter Q_{t+1} através de $Q = h(Q + 2S/\Delta t)$ e S_{t+1} através de $S_{t+1} = f^{-1}(Q_{t+1})$;
4. repetem-se 2 e 3 para todos intervalos de cálculo.

Foram analisadas duas alternativas para o vertedouro, o primeiro escavado em rocha com coeficiente de descarga 1,4, e o outro um perfil Creager com coeficiente de descarga 2,1, ficando suas equações características, respectivamente:

$$Q = 1,4 L (Z - Z_w)^{1,5} \quad \text{e} \quad Q = 2,1 L (Z - Z_w)^{1,5}.$$

5.7.2 - Resultados

Uma vez escolhida a dimensão do açude, elaborou-se os estudos 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.

Para a alternativa do vertedouro escavado em rocha, os picos dos hidrogramas de entrada e saída, a cota e altura da lâmina vertida encontram-se no Quadro 5.12, usando-se como hidrograma de projeto aquele associado ao tempo de retorno de 1.000 e 10.000 anos. A Figura 5.13 a seguir, mostra para o tempo de retorno $T_r=1000$ anos, o hidrograma de projeto, o hidrograma de entrada e o de saída ao reservatório Maranguape I. Os resultados para o tempo de retorno de 10000 anos são apresentados na Figura 5.14.

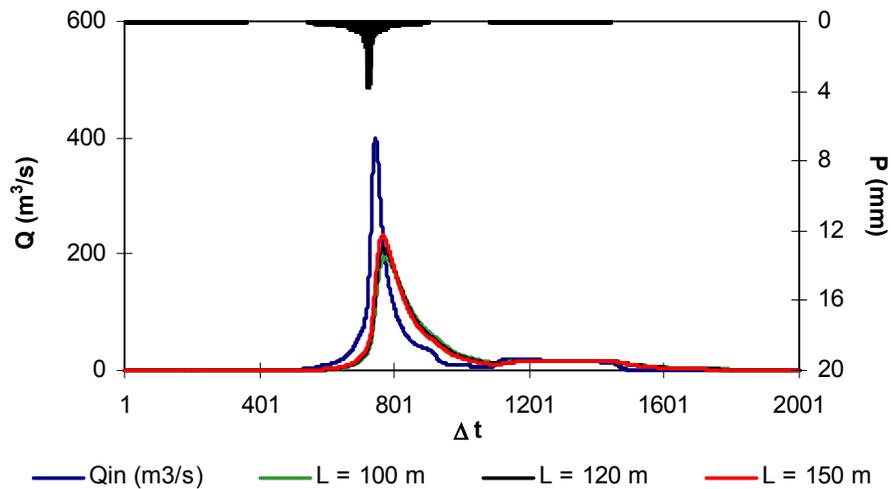


Figura 5.13 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Maranguape I $T_r=1000$ anos. Escavado em Rocha. Cota 106 m. $L = 100, 120$ e 150 m.

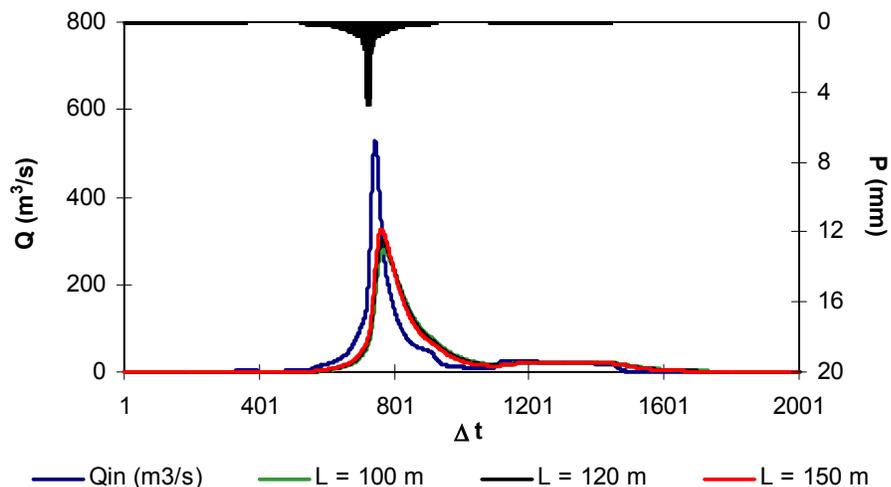


Figura 5.14 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Maranguape I $T_r=10000$ anos. Escavado em Rocha. Cota 106 m. $L = 100, 120$ e 150 m.

Quadro 5.12 - Resultado da simulação acima descrita

| L (m) | Q _{out} (m ³ /s) | Cota (m) | Lâmina (m) |
|---|--------------------------------------|----------|------------|
| Escavado em Rocha: Z_w = 106,0 m | | | |
| Tr = 1000 anos - Q_{in} = 399 m³/s | | | |
| 100 | 195 | 107,25 | 1,25 |
| 120 | 212 | 107,16 | 1,16 |
| 150 | 232 | 107,07 | 1,07 |
| Tr = 10000 anos - Q_{in} = 528 m³/s | | | |
| 100 | 280 | 107,58 | 1,58 |
| 120 | 300 | 107,47 | 1,47 |
| 150 | 326 | 107,34 | 1,34 |

L = Largura do sangradouro

Z_w = cota da soleira do sangradouro

Q_{in} = Vazão afluente ao reservatório

Q_{out} = Vazão de saída (sangradouro)

Para a alternativa em perfil creager, os picos dos hidrogramas de entrada e saída, a cota e altura da lâmina vertida encontram-se no Quadro 5.13, 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 hidrograma de projeto, o hidrograma de entrada e o de saída ao reservatório Maranguape I. Os resultados para o tempo de retorno de 10000 anos são apresentados na Figura 5.16

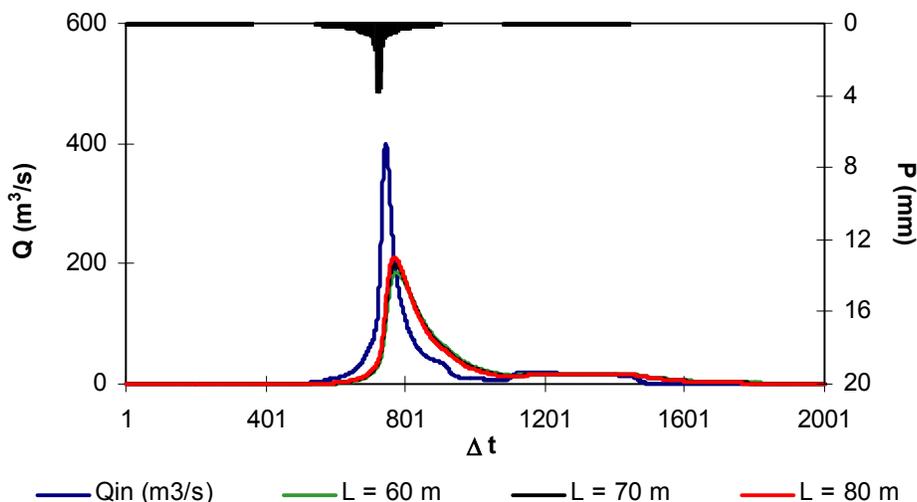


Figura 5.15 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Maranguape I Tr=1000 anos. Perfil Creager. Cota 106 m. L = 60, 70 e 80 m.

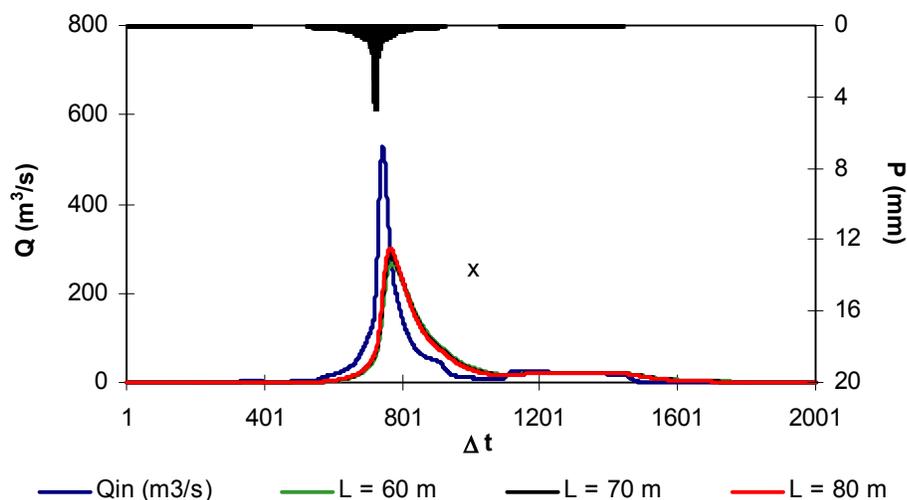


Figura 5.16 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Maranguape I
Tr=10000 anos. Perfil Creager. Cota 106 m. L = 60, 70 e 80 m.

Quadro 5.13 - Resultado da simulação acima descrita

| L (m) | Q _{out} (m ³ /s) | Cota (m) | Lâmina (m) |
|---|---|-------------|---------------|
| Perfil Creager: Z_w = 106,0 m | | | |
| Tr = 1000 anos - Q_{in} = 399 m³/s | | | |
| 60 | 186 | 107,3 | 1,3 |
| 70 | 199 | 107,2 | 1,2 |
| 80 | 212 | 107,2 | 1,2 |
| Tr = 10000 anos - Q_{in} = 528 m³/s | | | |
| 60 | 267 | 107,6 | 1,6 |
| 70 | 285 | 107,6 | 1,6 |
| 80 | 300 | 107,5 | 1,5 |

L = Largura do sangradouro
 Q_{in} = Vazão afluente ao reservatório

Z_w = Cota da soleira do sangradouro
 Q_{out} = Vazão de saída (sangradouro)