

AIRES WATZKO

BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Florianópolis-SC

2007

BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO NO BRASIL

AIRES WAZTKO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Infra-Estrutura e Gerência Viária

Orientador: Prof^o. Marciano Maccarini, Ph.D.

Florianópolis-SC

2007

BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO NO BRASIL

Esta dissertação foi julgada e aprovada como requisito final para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, em sessão pública realizada em 12 de dezembro de 2007

Profº. Marciano Maccarini, Ph.D. (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Profº. Glicério Trichês
Coordenador do Curso do PPGEC - UFSC

Comissão Examinadora:

Profº. Dr. Leto Momm
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Profº. Dr. Orlando Martini de Oliveira
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Profº. Dr. Paulo Teixeira da Cruz
Departamento de Engenharia Civil - USP

AGRADECIMENTOS

Á Deus, que através dos seus ensinamentos permite-nos que evoluímos.

Aos meus pais, Lourenço Watzko e Genoveva Lescowicz Watzko, “in memoriun”, que sempre estiveram ao lado dos filhos, apoiando e incentivando.

Á minha esposa, Ivone, pela dedicação e incentivo mostrados no transcorrer deste trabalho.

Aos meus filhos, Carolina, Paula e Eduardo, que pelo simples fato de estarem ao meu lado mostraram a importância de valorizar esta etapa do meu aprendizado.

Aos meus irmãos, Ademir e Áurea, cujo apoio incondicional colaborou com o meu desenvolvimento humano e intelectual.

Aos meus amigos, que me estimularam e acreditaram em meu objetivo.

Á Leme Engenharia que têm incentivado seus profissionais a se envolverem em pesquisas, fortalecendo assim seu corpo técnico.

Á Tractebel Energia que, graças a seu apoio ao programa de P&D o qual proporcionou o desenvolvimento de pesquisa na área de barragens.

Á Universidade Federal de Santa Catarina que, encampou a idéia de pesquisa na área de barragens de enrocamento, e que com o envolvimento de Professores das áreas de geotecnia e estruturas elaborou-se os programas P&D.

Aos professores da comissão examinadora, pelas sugestões e incentivo.

E a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, apoiaram-me no desenvolvimento deste trabalho, especialmente o Prof^o. Marciano Maccarini, Eng^o. Nelson Dornelas, Eng^a. Patrícia Becker de Andrade, Eng^a. Márcia Collares Meireles e o Eng^o. Ricardo Hey Andrzejewski, pela importante contribuição proporcionada nas diversas discussões sobre o tema deste trabalho, e os constantes incentivos.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	v
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA TABELAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 2 BARRAGENS	6
CAPÍTULO 3 BARRAGENS DE ENROCAMENTO	12
3.1 HISTÓRICO	12
3.2 DESENVOLVIMENTO DAS BARRAGENS DE ENROCAMENTO NO BRASIL	14
3.2.1 ENSECADEIRA	15
3.2.2 PLINTO	18
3.2.3 LAJE	23
3.2.4 SISTEMA DE JUNTAS ENTRE LAJES	26
3.2.5 SUBSTRATO PARA APOIO DA LAJE	30
3.2.6 MACIÇO DE ENROCAMENTO	33
3.3 CARACTERÍSTICAS DO ENROCAMENTO	38
3.3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ENROCAMENTOS	39
3.3.1.1 Enrocamento Fino	40
3.3.1.2 Enrocamento Médio	42
3.3.1.3 Enrocamento Graúdo Duro	43

3.3.1.4	Enrocamento Graúdo Brando	45
3.3.2	OBTENÇÃO	46
3.3.3	EMPREGO E PROCESSO CONSTRUTIVO	47
3.4	CONTROLE TECNOLÓGICO	49
3.4.1	ENSAIO GRANULOMÉTRICO	50
3.4.2	ENSAIO DE DENSIDADE	52
 CAPÍTULO 4 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO.		56
4.1	INSTRUMENTAÇÃO	56
4.1.1	MEDIDOR DE RECALQUE TIPO CAIXAS SUECAS OU CÉLULAS DE RECALQUE	57
4.1.2	MEDIDOR MAGNÉTICO DE RECALQUE	58
4.1.3	EXTENSOMÊTRO MÚLTIPLO	59
4.1.4	MARCO DE ASSENTAMENTO SUPERFICIAL	60
4.1.5	MEDIDOR DE JUNTA	61
4.1.6	MEDIDOR TRIORTOGONAL DE JUNTA	61
4.1.7	ELETRO NÍVEIS	62
4.1.8	MEDIDOR DE VAZÃO	63
4.1.9	PÊNDULO DIRETO	64
4.2	ACOMPANHAMENTO	65
 CAPÍTULO 5 ZONEAMENTO DAS BARRAGENS DE ENROCAMENTO		72
5.1	PROPOSIÇÃO DE OTIMIZAÇÃO DO ZONEAMENTO DAS BEFC	74
 CAPÍTULO 6 CAPACITAÇÃO TÉCNICA E INSTRUMENTAL PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA COM ENROCAMENTO		77
 CAPÍTULO 7 ESTUDOS DE TRAJETÓRIAS DE TENSÕES		84
7.1	OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS	84
7.2	MÉTODO DE CÁLCULO	91
7.3	TENSÕES VERTICAIS	91
7.4	MÓDULO DE DEFORMABILIDADE.	91
7.5	TENSÕES HORIZONTAIS	93

7.6 CÁLCULOS DAS TENSÕES E DOS MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE.	93
7.7 RESULTADO DOS ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DA TRAJETÓRIA DE TENSÕES	98
CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	102
CAPÍTULO 9 BIBLIOGRÁFICA	104

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

Abreviaes

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
BEFC	Barragem de enrocamento com face de concreto.
CFRD	Concret face rockfill dams.
ELETROSUL	Centrais Elétricas do Sul do Brasil S/A.
ENERSUL	Comit de Estudos Energéticos da Regio Sul.
EPC	Engineering, Procurement and Construction.
N.A.	Nível de gua.
PPGEC	Programa de Pós-Graduao em Engenharia Civil.
P&D	Programa de pesquisa e desenvolvimento.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.
UHE	Usina Hidrelétrica.

Símbolos

c	Constante. $c = 0,30$ m.
C	Altura da camada considerada no estudo
C_u	Coefficiente de no uniformidade.
D_{50}	Dimetro equivalente a 50% do material retido.
E	Módulo de deformabilidade.
E_h	Módulo de deformabilidade horizontal
E_v	Módulo de deformabilidade vertical
e	Espessura da laje de vedaao (m).
ϵ	Deformaao específica.

ϵ_h	Deformação específica horizontal.
ϵ_v	Deformação específica vertical.
ϕ	Diâmetro.
γ	Densidade “in situ”.
γ_{Min}	Menor densidade “in situ” obtida nos ensaios.
γ_{Max}	Maior densidade “in situ” obtida nos ensaios.
γ_{Med}	Densidade média “in situ” obtida nos ensaios.
H	Altura da barragem.
h	Carregamento de enrocamento (aterro).
k	Coefficiente de permeabilidade.
P	Peso do material.
R	Recalque corrigido da camada
σ	Tensão.
σ_h	Tensão horizontal.
σ_v	Tensão vertical.
V_c	Volume da cava.
V_{Li}	Volume inicial medido.
V_{Lf}	Volume final medido.

LISTA DE FIGURAS

Figura, 1-1 – Bacia do rio Uruguai – Trecho totalmente Brasileiros.	1
Figura, 1-2 – Divisão de quedas proposto pelo Estudo de Inventário Hidroenergético, 1979.	2
Figura, 1-3 – Barragem de Machadinho. – (a) Implantação. – (b) Concluída e lago já formado.	3
Figura, 1-4 – Barragem de Itá. – (a) Construção finalizada. (b) Concluída e lago já formado.	3
Figura, 1-5 – Barragem de Barra Grande fase de construção – Vista de montante.	4
Figura, 1-6 – Barragem de Campos Novos fase de construção – Vista de jusante.	4
Figura, 2-1 – Faixas granulométricas dos enrocamentos, (Neves 2002).	9
Figura, 2-2 – Zoneamento típico – BEFC, (Cooke 1999).	10
Figura, 3-1 – Ensecadeira Barragem Foz do Areia – Planta.	17
Figura, 3-2 – Ensecadeira de montante da Barragem Foz do Areia – Seção ² .	17
Figura, 3-3 – Detalhe da seção da barragem da incorporação da ensecadeira da Jusante.	18
Figura, 3-4 – Seção ² do plinto mostrando os detalhes para furação de injeções e ancoragens.	19
Figura, 3-5 – Detalhes do plinto mostrando o sistema de juntas de vedação (veda juntas).	19
Figura, 3-6 – Detalhes do aterro de proteção na região central executado sobre o plinto.	20
Figura, 3-7 – Detalhe típico do zoneamento materiais sob a laje.	20
Figura, 3-8 – Detalhe típico da Junta Perimetral.	21
Figura, 3-9 – (a) Junta de cobre. (b) Colchão de argamassa. (c) Elemento estrudado.	22
Figura, 3-10 – Preparo da fundação e a ferragem de armação do plinto.	22
Figura, 3-11 – (a) Barras de ancoragem. (b) Armadura. (c) Tubos guias.	22
Figura, 3-12 – Seção típica da barragem Foz do Areia ³ .	23
Figura, 3-13 – Mapeamento das trincas obtidas com investigação subaquática.	24
Figura, 3-14 – Trecho superior mostrando o posicionamento central da armadura.	25
Figura, 3-15 – Trecho inferior mostrando a distribuição nas duas faces da laje.	25
Figura, 3-16 – Mostrando um pano da laje e a separação da armadura simples e dupla.	26
Figura, 3-17 – Indicação esquemática do comportamento da face de concreto.	26
Figura, 3-18 – Curvas de iso, deformação da face de concreto.	27
Figura, 3-19 – Curvas de iso deformação da face de concreto da ombreira esquerda.	27
Figura, 3-20 – Detalhe típico do sistema de juntas da região tracionada – ombreiras.	28
Figura, 3-21 – Detalhe junta de cobre da região tracionada.	29
Figura, 3-22 – Detalhe de sistema de juntas da região tracionada com o reforço.	29
Figura, 3-23 – Detalhe típico do sistema de juntas da região comprimida – trecho central.	29

Figura, 3-24 – Seqüência dos trabalhos de preparação do substrato para recebimento da laje.	30
Figura, 3-25 – Seqüência dos trabalhos de preparação do substrato para recebimento da laje.	31
Figura, 3-26 – Imprimação e compactação. Efeito “yô-yô” ⁴ .	31
Figura, 3-27 – Detalhe – Laje, elementos estrudados e transição.	32
Figura, 3-28 – Detalhe do elemento estrudado.	32
Figura, 3-29 – Seqüência de fotos mostrando a execução do elemento estrudado.	32
Figura, 3-30 – Zoneamento da barragem de Machadinho ⁴ .	35
Figura, 3-31 – (a) Enrocamento fino. (b) Enrocamento de proteção.	38
Figura, 3-32 – Gráfico da faixa granulométrica do enrocamento fino.	40
Figura, 3-33 – Enrocamento fino na praça de aplicação.	41
Figura, 3-34 – Gráfico da faixa granulométrica do enrocamento médio.	42
Figura, 3-35 – Enrocamento médio na praça de aplicação.	43
Figura, 3-36 – Enrocamento graúdo duro na praça de aplicação.	44
Figura, 3-37 – Gráfico da faixa granulométrica do enrocamento graúdo duro.	44
Figura, 3-38 – Enrocamento graúdo brando.	46
Figura, 3-39 – Escavações obrigatórias, principal fonte de obtenção de enrocamento.	47
Figura, 3-40 – Lançamento em ponta de aterro.	48
Figura, 3-41 – Lançamento e espalhamento do enrocamento.	48
Figura, 3-42 – Molhagem e compactação.	48
Figura, 3-43 – Seção típica do zoneamento adotado nas obras de Itá e Machadinho.	50
Figura, 3-44 – Controle tecnológico do enrocamento – ensaio granulométrico.	50
Figura, 3-45 – Gráfico granulométrico - Material E0 da figura, 3-43, enrocamento fino.	51
Figura, 3-46 – Gráfico granulométrico - Material E1 da figura, 3-43, enrocamento médio.	51
Figura, 3-47 – Gráfico granulométrico - Material E3 da figura, 3-43, enrocamento graúdo	52
Figura, 3-48 – Ensaio de densidade “in-situ” na transição.	53
Figura, 3-49 – Realização do ensaio de densidade “in-situ” em enrocamento médio.	54
Figura, 3-50 – Histograma dos ensaios de densidade “in-situ” do material E1, figura, 3-43.	54
Figura, 3-51 – Histograma dos ensaios de densidade “in-situ” do material E3, figura, 3-43.	55
Figura, 4-1 – Seções instrumentais – Barragem de Machadinho.	56
Figura, 4-2 – Caixa Sueca – aparelho e instalação.	58
Figura, 4-3 – Cabine de leitura – terminais de leituras das Caixas Suecas.	58
Figura, 4-4 – Medidor de Recalque magnético – croqui e detalhes de instalação.	59
Figura, 4-5 – Medidor de Recalque magnético – Leitura do instrumento.	59

Figura, 4-6 – Extensômetro múltiplo de haste – Croqui e detalhes de instalação.	60
Figura, 4-7 – Extensômetro múltiplo de haste – Leitura do instrumento.	60
Figura, 4-8 – Marco de Assentamento Superficial.	60
Figura, 4-9 – Medidor de Junta elétrico.	61
Figura, 4-10 – Medidor de Triortogonal de Junta elétrico.	62
Figura, 4-11 – Medidor Triortogonal de Junta mecânico.	62
Figura, 4-12 – Eletro Nível – instalação na face laje de vedação.	63
Figura, 4-13 – Medidor de Vazão Triangular.	64
Figura, 4-14 – Pêndulo direto.	64
Figura, 4-15 – Fluxograma das atividades de auscultação.	66
Figura, 4-16 – Posição dos medidores Magnéticos de Recalque.	67
Figura, 4-17 – Posição das Caixas Suecas, Extensômetros Múltiplos e eletro níveis.	67
Figura, 4-18 – Acompanhamento dos recalques com Caixas Suecas.	68
Figura, 4-19 – Avaliação dos Módulos de Deformabilidade – Caixa Sueca.	69
Figura, 4-20 – Acompanhamento dos recalques com Medidor Magnético de Recalque.	70
Figura, 4-21 – Avaliação dos Módulos de Deformabilidade - Medidor Magnético de Recalque.	71
Figura, 5-1 – Movimentos observados nas Barragens de Cethana e Foz do Areia.	72
Figura, 5-2 – Barragem de Itá - Movimentação observada na Laje 29.	73
Figura; 5-3 – Croqui comparativo.	73
Figura, 5-4 – Zoneamento proposto – zona 1 igual a $1/3$ da largura da base da barragem.	76
Figura, 5-5 – Zoneamento proposto – zona 1 igual a $1/2$ da largura da base da barragem.	76
Figura, 6-1 – Equipamento de ensaio Edométrico.	79
Figura, 6-2 – Detalhe do Equipamento de Ensaio Edométrico.	80
Figura, 6-3 – Vista geral do equipamento de ensaio de cisalhamento direto.	81
Figura, 6-4 – Equipamento de ensaio de cisalhamento direto.	81
Figura, 6-5 – Vista geral - Equipamento de ensaio Triaxial e de cisalhamento direto.	82
Figura, 6-6 – Equipamento de ensaio Triaxial e caixa do ensaio de cisalhamento direto.	82
Figura, 6-7 – Câmara do ensaio Triaxial.	83
Figura, 7-1 – Seção esquemática da barragem considerada no estudo.	84
Figura, 7-2 – Recalque acumulado incremental.	88
Figura, 7-3 – Construção por camada – incremento de carga sobre a Caixa Sueca.	92
Figura, 7-4 – Método de cálculo dos módulos de deformabilidade.	93
Figura, 7-5 – Curva Tensão Deformação.	100

Figura, 7-6 – Curva Tensão Deformação e “Curva” de Iso Módulos. 101

Figura, 7-7 – Trajetória de tensões no eixo da Barragem. 101

LISTA DE TABELAS

Tabela, 3-1 – Características dos materiais utilizados na barragem de Machadinho ⁴	36
Tabela, 3-2 – Dados característicos das barragens brasileiras com face de concreto.	37
Tabela, 3-3 – Dados característicos do enrocamento fino.....	41
Tabela, 3-4 – Dados característicos do enrocamento médio.	43
Tabela, 3-5 – Dados característicos do enrocamento graúdo duro.....	45
Tabela, 3-6 – Dados característicos do enrocamento graúdo brando.	45
Tabela, 3-7 – Resultados dos ensaios de densidade.	54
Tabela, 6-1 – Quadro com volumes e peso de cada ensaio.	83
Tabela, 7-1 – Dados iniciais de instalação das Caixas Suecas.	85
Tabela, 7-2 – Recalques acumulados e os recalques das camadas estudadas.	86
Tabela, 7-3 – Continuação da tabela, 7-2.	87
Tabela, 7-4 – Deformações horizontais acumuladas.	89
Tabela, 7-5 – Continuação da tabela 7-4.	90
Tabela, 7-6 – Tensão vertical, deformação específica vertical e módulo de deformabilidade.....	94
Tabela, 7-7 – Continuação da tabela, 7-6.	95
Tabela, 7-8 – Deformação Específica horizontal e Tensão horizontal.....	96
Tabela, 7-9 – Continuação da tabela, 7-8.	97
Tabela, 7-10 – Tabela com os valores de P e Q	98
Tabela, 7-11 – Continuação da Tabela, 7-10.....	99

RESUMO

O presente trabalho busca descrever a evolução das barragens de enrocamento com face de concreto no Brasil, dos conceitos com relação à utilização dos materiais, da sua qualidade, do seu zoneamento e também dos aspectos construtivos. Será abordada também a flexibilidade dos materiais utilizados no enrocamento, permitindo uma gama mais ampla de aproveitamento dos materiais escavados. Esta evolução do material de enrocamento vem de encontro com a contínua necessidade de energia e a necessidade da competitividade econômica dos empreendimentos. Outro ponto abordado é o acompanhamento construtivo por meio de controle tecnológico e da análise da instrumentação de auscultação, atividade esta perfeitamente coerente com estudos, pesquisas e ensaios, que vem sendo desenvolvidas nesta área. A importância de parcerias das entidades privadas com as instituições de ensino está presente na capacitação técnica de pessoal e instrumental dos laboratórios de pesquisa e ensino. O estudo das tensões e deformações e da trajetória de tensões por meio da avaliação do desempenho da estrutura de enrocamento tendo por base o controle tecnológico e da análise da instrumentação de auscultação da barragem, trazem informações que podem ser utilizadas nos ensaios de laboratório. Estas informações facilitarão a montagem e a elaboração de ensaios que prestarão uma maior representatividade no resultado final.

ABSTRACT

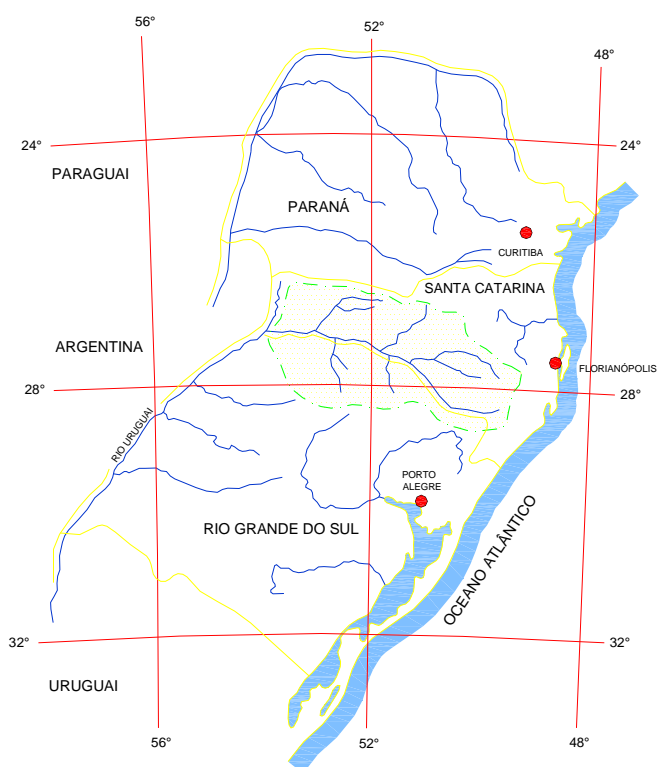
The current paper work describes the Concrete Face Rockfill Dams evolution in Brazil, the concepts related to the materials utilization, its quality and zoning and also the constructive aspects. Another addressed subject is the flexibility of the materials used on the rockfill, allowing a variety of dug material utilization. This rockfills material evolution bonds up; within the continuous energy need; and the enterprise economics competitiveness need. Is also addressed the constructive accompanying duo to the technological control and the instrumentation analysis, which is perfectly consistent with the studies, researches and tests the have been developed in this area. The importance of the private entities partnership within the education institutions is present in the personal and instrumental technical training of education and research laboratories. The tensions, deformations and tensions tracks studies duo to rock fills structure development evaluation based on the technological control and the dams instrumentation; analysis bring information that can be used on laboratories tests. These information; will facilitate the setting and elaboration of the tests that will provide a bigger representation to the end result.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

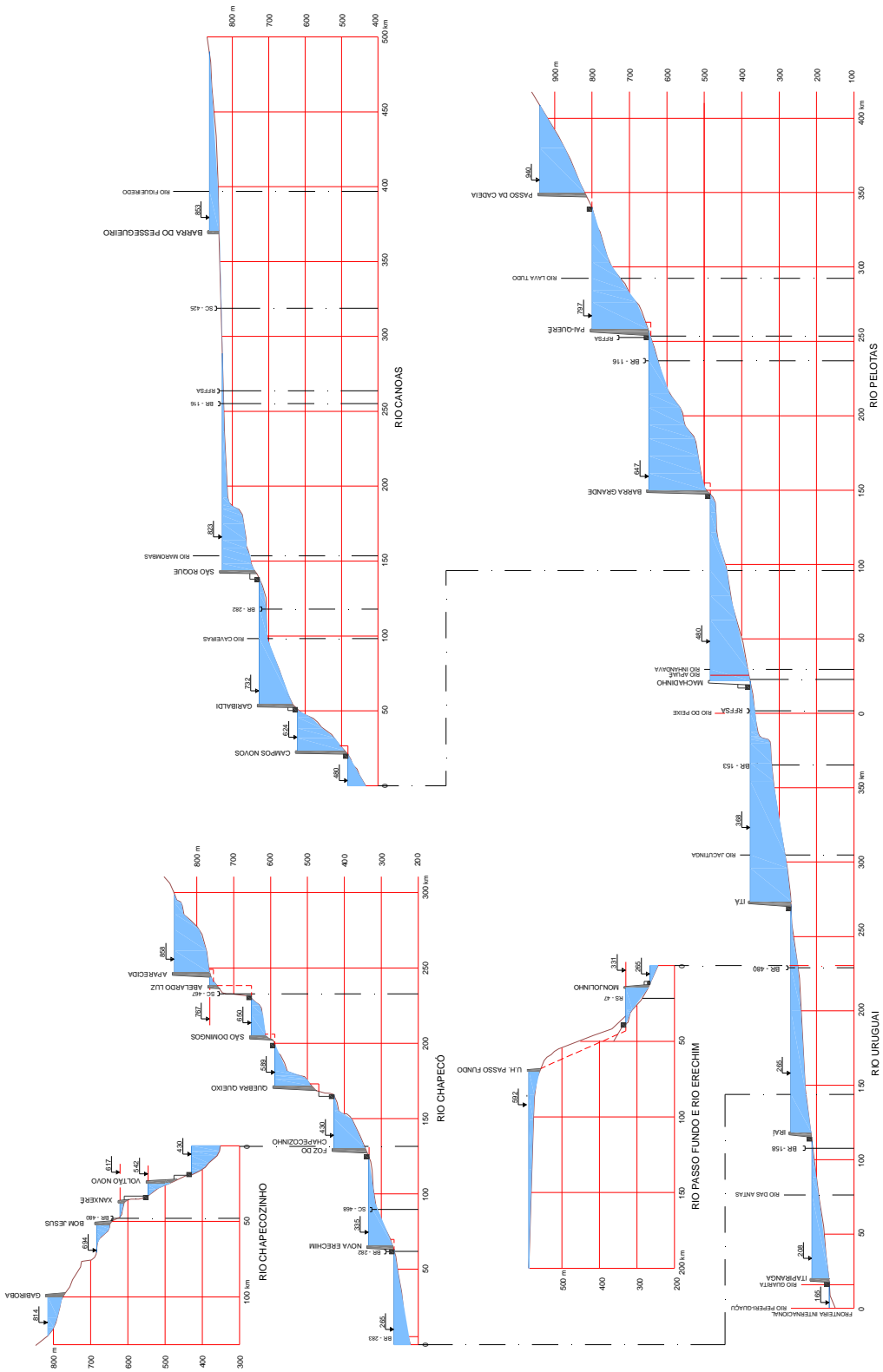
A construção de barragens com face de concreto no Brasil teve início na década de 70, com a construção da barragem de Foz do Areia construída entre 1975 e 1980. Desde então este tipo de barragem têm-se mostrado altamente competitiva tanto economicamente quanto tecnicamente. Razões pelas quais se tornaram bastante difundidas no Brasil, com destaque para a região sul, onde os aspectos de relevo e características dos solos apresentavam grande qualidade, e eram adequadas à solução de barragem de enrocamento com face de concreto.

Na bacia do rio Uruguai, mostradas nas figuras, 1-1 e 1-2, estudos encomendados pela ENERSUL, e elaborados pela CANANBRA, e posteriormente reavaliados pela ELETROSUL¹, mostraram um grande potencial hidroenergético.



Figura, 1-1 – Bacia do rio Uruguai – Trecho totalmente Brasileiros.

¹ ELETROSUL. Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai – Estudo de Inventário Hidroenergético, 1979



Figura, 1-2 – Divisão de quedas proposto pelo Estudo de Inventário Hidroenergético, 1979.

Em seu trecho principal, abrangendo os rios Pelotas, Canoas e nesta junção o rio Uruguai, (figura, 1-2), estão hoje instaladas as barragens de Barra Grande, Campos Novos, Machadinho e Itá, todas de enrocamento com face de concreto, (figuras, 1-3 á 1-6).

As obras das barragens de Itá e Machadinho, construídas entres 1995 e 2001, se destacam pelas principais inovações construtivas.



(a)



(b)

Figura, 1-3 – Barragem de Machadinho. – (a) Implantação. – (b) Concluída e lago já formado.



(a)



(b)

Figura, 1-4 – Barragem de Itá. – (a) Construção finalizada. (b) Concluída e lago já formado.



Figura, 1-5 – Barragem de Barra Grande fase de construção – Vista de montante.



Figura, 1-6 – Barragem de Campos Novos fase de construção – Vista de jusante.

O acompanhamento de projeto e construção destas obras, em particular as barragens de Itá e Machadinho, gerou a necessidade de documentar o desenvolvimento observado no processo construtivo das barragens de enrocamento com face de concreto. Parte desta documentação está registrada em anais de congressos e/ou simpósios, porém estas informações devem ser levadas

também, de maneira direta, para as instituições de ensino e pesquisa. A promoção de intercâmbio entre as entidades de ensino e pesquisa com empresas de projeto e construção fortaleceram a iniciativa, justificando a pesquisa na área de barragens de enrocamento com face de concreto. Com o apoio dos profissionais envolvidos no projeto e construção, de empresas do setor hidroenergético e a UFSC, montou-se os programas de pesquisa nesta área.

1.2 OBJETIVOS

Quando da possibilidade da participação em programas de pesquisa aplicadas dos programas P&D iniciamos, a elaboração de propostas de pesquisas na área de barragens, mais especificamente na BEFC. O interesse manifestado e o apoio entre a UFSC, a Tractebel Energia e a Leme Engenharia, os programas apresentados para o desenvolvimento da pesquisa saíram do papel e entraram na fase de execução.

Por meio desta parceria é que nos possibilitou ter uma participação mais ativa possibilitando a elaboração deste trabalho cujos objetivos estão citados a seguir:

- a. Dissertar resumidamente a evolução deste tipo de estrutura no Brasil desde a construção da primeira, Barragem de Foz do Areia, ou seja, cerca de 30 anos atrás. Destaca-se, a contribuição da engenharia nacional no cenário mundial, mostrando as inovações, os controles tecnológicos, o acompanhamento da instrumentação e materiais empregados, (Capítulo 3).
- b. Uma abordagem sobre a evolução e montagem das pesquisas desenvolvidas, e em desenvolvimento. Mostrar as etapas de montagem do laboratório de “Mecânica dos Enrocamentos”, fabricação, aquisição e montagem de equipamentos para ensaios em amostras de grandes dimensões, (Capítulo 6).
- c. Estudo da trajetória de tensões que ocorrem em protótipo, (barragem). Este estudo tem como base os dados da instrumentação e dos ensaios de controle tecnológicos feitos durante a construção da barragem, que neste caso refere-se á Barragem de Itá, (Capítulo 7).

CAPÍTULO 2 BARRAGENS

A construção de barragens pelo homem, para utilização de diversos recursos hídricos, remonta há cerca de 5000 anos, conforme registros da barragem de Jawa na Jordânia. Não tão mais antigo, é o registro do primeiro acidente com este tipo de estrutura que foi a barragem de Kafara, no Egito, aproximadamente 4600 anos.

A primeira barragem de enrocamento foi construída na Califórnia, na Sierra Nevada em 1850, para atender à demanda de água nos garimpos e minerações. Região caracterizada pelo baixo intemperismo das rochas, conseqüentemente pobre em materiais terrosos, tornava as alternativas de construções de barragens de terra inviáveis, construções estas, comuns nas minerações de ouro. Por sua vez a abundância de rochas, árvores e explosivos levou à adoção de uma nova técnica que rapidamente alastrou-se por todo o mundo. Dentre as barragens, a, de enrocamento com face de concreto se tornou muito aceita como solução de engenharia principalmente por fatores de segurança e econômico.

A primeira barragem de enrocamento com face de concreto construída no Brasil foi a Foz do Areia, sua construção teve início em 1975 e foi concluída em 1979. Está localizada no rio Iguazu no Paraná. Foz do Areia foi um marco na engenharia nacional e internacional sendo a maior estrutura do gênero na época. Detalhes construtivos marcantes desta estrutura foram os sistemas de juntas verticais, entre as lajes, perimetral, junto ao plinto, e as juntas horizontais. Estas últimas eram elementos construtivos uma vez que as lajes eram produzidas em duas fases.

Razões políticas e econômicas, pelas quais o país passou, fez com que as grandes obras, principalmente no setor elétrico, sofressem enorme retração, fazendo com que por quase dez (10) anos não houvesse investimentos nesta área.

Normalmente é a deficiente caracterização mecânica dos materiais do protótipo que conduz a previsão do comportamento estrutural das barragens de enrocamento a se afastarem dos valores reais obtidos pela observação.

Na década de 90, a abertura do setor elétrico, através de modelos de parcerias envolvendo empresas estatais e a iniciativa privada, impulsionadas pelas necessidades de aumento do parque gerador de energia, deu início a um novo ciclo de construção de barragens com fins de geração de energia. O fomento no setor reabriu o interesse no desenvolvimento de pesquisas na busca de um maior conhecimento do comportamento das barragens de enrocamento em especial as com face de concreto.

A barragem de Itá na fronteira entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul deu início a este novo modelo. Seguiu-se a esta obra as barragens de Machadinho e Barra Grande no rio Pelotas, Campos Novos no rio Canoas, e Itapebi no rio Jequitinhonha. Todas estas barragens de enrocamento com face de concreto.

Entretanto, no início deste novo modelo, a pesquisa ficou a margem do processo. O desenvolvimento dos projetos continuou com as formulações empíricas que se fazem presentes no zoneamento do maciço de enrocamento, na definição da espessura e armadura da laje e nos sistemas das juntas de vedação.

Esforços isolados e graças a, obrigatoriedade, vinculados a concessão, onde empresas do setor elétrico devem aplicar cerca de, 0,2% do faturamento em pesquisas diversas direcionadas ao setor elétrico, é que se obteve apoio financeiro para as pesquisas nas áreas de barragens. Os recursos são gerenciados conjuntamente pela Empresa geradora do recurso e pela ANEEL, sendo que uma parcela muito tímida atualmente é aplicada na pesquisa para o desenvolvimento científico das estruturas de barragens de enrocamento, em particular as com face de concreto.

O estudo do comportamento das estruturas, tendo como base as informações do protótipo da construção e, operação da barragem, é de grande valia para que se possam, autenticar, comparar e/ou correlacionar com informações dos estudos em laboratório.

A previsão do comportamento das estruturas é fundamental na engenharia. Os estudos dos materiais, comportamento, resistência, trabalhabilidade e confiabilidade são desejáveis e essenciais para o sucesso das construções. Logo o conhecimento científico é decisivo para interpretação e dimensionamento das estruturas. A observação e acompanhamento do comportamento das estruturas fornecem informações importantes. Esta metodologia científica de

análise é na realidade a iniciação do desenvolvimento. Este processo fornece informações iniciando-se com técnicas e definições empíricas e se desenvolvendo para formulações, montagem de teorias e da modelagem matemática. No caso das barragens de enrocamento estamos ainda hoje navegando nas técnicas e definições empíricas para a maioria das soluções adotadas. A previsão das deformações e das tensões desenvolvidas no maciço são desafios a serem vencidos.

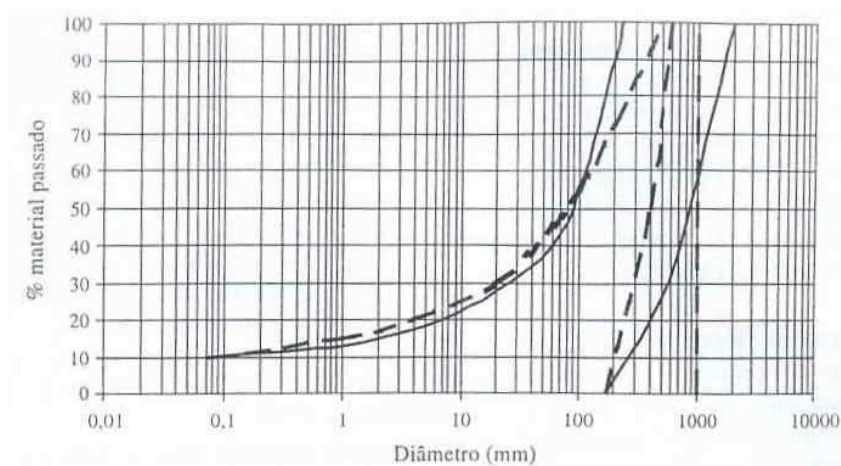
A bibliografia não é muito extensa quando se trata de estudos e pesquisas envolvendo o protótipo. Em parte esta ausência é explicada pelo fato da confidencialidade destas informações, e talvez pelo fato da complexidade para o correlacionamento entre as obras, a heterogeneidade dos materiais aplicados, as variáveis possíveis de serem arroladas e as dificuldades das modelagens e formulações matemáticas desencorajam este tipo de estudo e pesquisa. É comum se encontrar referências bibliográficas no que se refere às experiências construtivas, narrativas de processos de produção e da aceitação do uso de enrocamentos com faixa granulométrica menos rígida, isto é, a busca pela utilização integral, praticamente, dos materiais escavados.

O emprego de materiais granulares sempre foi comum nas obras civis. O uso massivo e de materiais com composição granulométrica muito abrangente, que é o caso dos enrocamentos vem se tornando e sofrendo uma constante alteração em sua definição. As primeiras definições foram por volta da década de 70, e, que, caracterizavam-se os enrocamentos por sua composição litológica, granulométrica e permeabilidade. Hoje os requisitos estão substancialmente mais relaxados, onde a aceitação litológica e de sanidade dos grãos são praticamente abertas, ficando como divisor entre um conceito em que, qualquer composição granulométrica seja tolerável, e que aceita a permeabilidade que deve ser maior que $k=10^{-3}$ cm/s, isto significa uma composição predominante de característica granular, ou fragmentos de rocha envoltos em pedregulho, areia e uma parcela pequena, inferior a 20%, de siltes e argila.

Desta forma, como descrito nos ensaios feitos por Pacheco (2004), os enrocamentos “*rockfill*” podiam ser definidos como um conjunto não coerente de fragmentos de rocha cuja granulometria é constituída em 70% por partículas maiores que 1/2”(12,5 mm) com uma fração de no máximo 30% (o ideal seria 10%) de partículas que passam a peneira n°4 (4,8 mm). Atualmente, tem-se granulometria onde o diâmetro máximo atinge até 1,5 m e o percentual de material fino chega

aos 35% a 40% (passante na peneira nº 4), ou até mesmo, um percentual da ordem de 10% (passante na peneira no 200 ($\phi \leq 0.075$ mm)).

Uma característica que se mantém é referente ao não desenvolvimento de pressão neutra no enrocamento. Penman e Charles (1971), eles citaram que o coeficiente de permeabilidade deve ser superior a 10^{-3} cm/s. Quanto ao diâmetro máximo dos grãos este é relacionado ao processo construtivo e em função da capacidade de compactação. Matherson (1986) apud Maia (2001) considera que, o diâmetro máximo não deve ser superior $\frac{3}{4}$ da espessura da camada compactada. As faixas granulométricas apresentadas na figura 2-1, sugeridas por Dapena (1994) e Maranha das Neves (1993) apud Maranha das Neves (2002), onde se devem encaixar as granulometrias dos enrocamentos. O traço contínuo corresponde ao limite proposto por Dapena e o traço contínuo por Maranha das Neves.



Figura, 2-1 – Faixas granulométricas dos enrocamentos, (Neves 2002).

O comportamento dos enrocamentos difere dos outros materiais granulares como, as areias, porque durante o processo de compactação e/ou carregamento, os grãos do enrocamento fraturam e sofrem esmagamento mesmo para estados de tensão baixos.

O uso dos enrocamentos remonta ao século XIX, contudo o emprego como material de construção envolvendo algum tipo de controle é recente, da segunda metade do século XX. O desenvolvimento do uso deste material esta diretamente ligada á evolução tecnológica dos equipamentos, processos de desmonte, transporte e densificação de materiais rochosos.

Os enrocamentos são provenientes das escavações obrigatórias da própria obra, e somente em casos particulares e/ou por balanço deficiente de material, se lança mão de pedreiras como

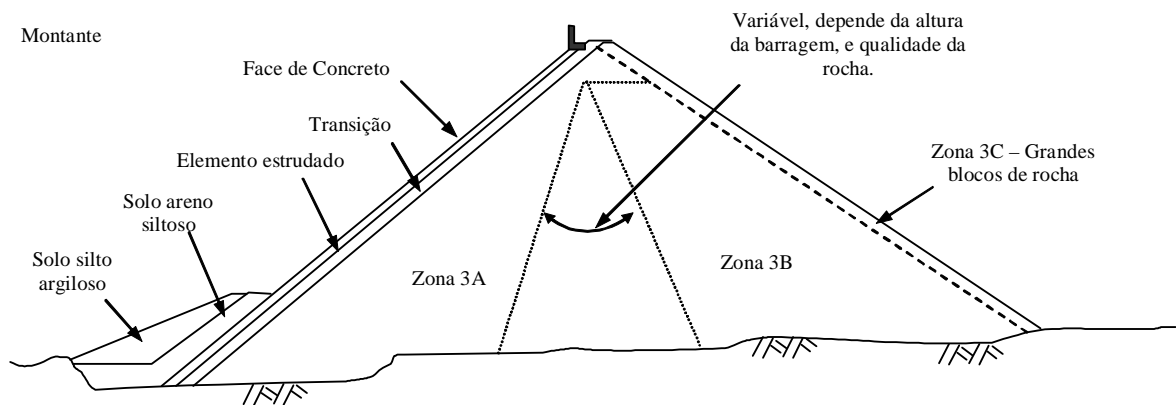
empréstimo. Nestes casos os estudos de alternativas como concreto a rolo, ou mesmo concreto convencional possam se tornar atrativo.

Barragens de enrocamento são robustas com grau de segurança elevado e confiável. O maciço de aterro rochoso garante a estrutura da barragem. O elemento de vedação pode ser feito de diferentes modos. As estruturas de vedação mais comuns são:

- Núcleo de argila;
- Núcleo asfáltico;
- Face de montante em laje de concreto;
- Face de montante em laje de concreto betuminoso;
- Face de madeira (atualmente não utilizada);
- Face metálica (raro).

As barragens com núcleo argiloso costumam ter o talude em torno de 1 V: 1,5 á 1,8 H e as de Face de concreto 1 V: 1,2 á 1,3 H. A largura da crista é variável em função da utilização futura, mas normalmente fica entre 7,00 m á 10,00 m.

Um zoneamento típico, Cooke (1999), de uma barragem de enrocamento com face de concreto é mostrado na figura, 2-2.



Figura, 2-2 – Zoneamento típico – BEFC, (Cooke 1999).

As zonas, 3A e 3B são consideradas estruturais e requerem cuidados maiores, conforme Sherard (1985) e Cooke (1999). A parte central seria considerada um preenchimento. A distinção é denotada pela preocupação na obtenção de maior rigidez para a zona 3A. Em consequência desta condição a espessura da camada, para efeitos de compactação, a ser considerada usualmente é

entre 0,9 á 1,2 m para a zona 3A e entre 1,5 á 2,0 m para a zona 3B. Para Cooke (1999), o tamanho máximo de partícula deve ser compatível com a espessura da camada, (normalmente o diâmetro máximo ligeiramente inferior a espessura da camada a ser compactada).

Todos estes aspectos justificam e encorajam o desenvolvimento de mais pesquisas sobre o comportamento geomecânico dos enrocamentos. Para tanto é necessário conhecer os fatores que condicionam o comportamento dos enrocamentos, bem como a forma pelas quais estes fatores podem ser avaliados em campo.

Outra direção de estudo e pesquisa é a utilização das informações e dados dos protótipos para análise do desempenho e o comportamento das estruturas. O controle tecnológico atualmente adotado proporciona informações e dados que permitem estudar em parte o comportamento destas estruturas.

O conjunto de dados colhidos em campo não permite um estudo completo ou conclusivo no que se refere ao comportamento da estrutura. Contudo as informações e medições realizadas são informações importantes, e devem ser disponibilizados para a pesquisa, e uma maior gama de grandezas á serem observadas e medidas, também são importantes elas serem implementadas como medições de deformações longitudinais das barragens. O controle atualmente posto em prática abrange duas pontas, uma através de ensaios de caracterização granulométrica e da densidade aparente do aterro e a outra através do monitoramento das estruturas de aterro, enrocamento da barragem que consiste basicamente na medição das deformações.

A questão do zoneamento do maciço da barragem também é fundamental para que se possa relacionar a litologia dos materiais empregados no aterro. Esta caracterização do maciço se faz necessário para um melhor mapeamento visando correlações com os materiais aplicados e talvez futuramente com ensaios edométricos e/ou triaxiais, uma vez, que esta caracterização pode facilitar a modelagem de amostras para os ensaios de laboratório.

CAPÍTULO 3 BARRAGENS DE ENROCAMENTO

3.1 HISTÓRICO

A maior parte dos rios no mundo não tem vazão suficiente para satisfazer as demandas de água, especialmente durante as estiagens. Desde tempos remotos que houve necessidade de armazenar as águas das chuvas de modo que possamos utilizá-las durante a época seca. As barragens não fazem mais do que uma transferência de água no tempo em oposição às adutoras que fazem transferências de água no espaço.

A construção de barragem pelo homem para utilização diversa dos recursos hídricos, já remonta há cerca de 5000 anos, conforme registros da barragem de Jawa na Jordânia. E também, é o registro do primeiro acidente com este tipo de estrutura que foi a barragem de Kafara no Egito aproximadamente 4600 anos.

Na Índia as barragens se contam por milhares. Quando os ingleses ocuparam a Índia encontraram somente no estado de Madrastra, milhares de barragens de pequeno porte, todas destinadas à irrigação. Uma delas, em Ponniary, que inundava 20.000ha.

Na ilha de Ceilão, quando os portugueses lá desembarcaram, encontraram mais de 700 barragens.

Os árabes na Península Ibérica construíram centenas de barragens para o uso da rega, hoje todas completamente assoreadas. Os romanos deixaram numerosas barragens na Península Ibérica. Em Portugal existem vestígios de algumas mencionadas no livro “Aproveitamentos Hidráulicos Romanos ao Sul do Tejo,” de Antônio de Carvalho Quintela et all. As maiores são Monte Novo (H = 5,7m; L = 52m), Almarjão (H = 5,2m; L = 55m), Muro (em Campo Maior) (H = 4,6m; L = 50m) e Pisões (H = 3,0m; L = 130).

Na atualidade, desde o início do século, construíram-se milhares de barragens, a maioria destinada ao aproveitamento hidroelétrico. As maiores do mundo, em volume de acumulação, são:

- Owen Falls, Uganda $204,8 \times 10^9 \text{ m}^3$
- Bratsk, URSS $169,3 \times 10^9 \text{ m}^3$

- Kariba, Zimbabwe $160,4 \times 10^9 \text{ m}^3$
- Sadd-el-ali, Egipto $157,0 \times 10^9 \text{ m}^3$
- Akosombo, Guiana $148,0 \times 10^9 \text{ m}^3$

Como já mencionado, as barragens de enrocamento surgiram para atender a demanda de água nos garimpos e mineração nos Estados Unidos. A primeira barragem de enrocamento foi construída na Califórnia, na Sierra Nevada em 1850, para atender à demanda de água nos garimpos e minerações. Naquela região não havia solo para construir barragens de terra, como era comum nas minerações de ouro. A abundância de rochas, árvores e explosivos levou à adoção de uma nova técnica que rapidamente se alastrou por todo o mundo. Existem hoje milhares de barragens de enrocamento.

Uma barragem de enrocamento é um maciço formado por fragmentos de rocha compactados em camadas. O peso dos grãos e o imbricamento dos blocos fazem com que esta estrutura seja estável ao cisalhamento. A impermeabilização é conseguida através de duas maneiras:

- a) - Núcleo argiloso compactado que pode ser vertical ou inclinado;
- b) - Núcleo de concreto asfáltico;
- c) - Face impermeável (estanque) sobre o talude de montante.
 - Face de concreto;
 - Face de concreto betuminoso – asfalto;
 - Face de metal
 - Face de Madeira, etc..

No primeiro caso (núcleo argiloso) os materiais utilizados devem ter características de baixa permeabilidade, a fim de garantir vazões mínimas de percolação, baixa erodibilidade (pouco risco no carreamento de finos) e boa trabalhabilidade, materiais mais plásticos. A deformabilidade limita as fissurações que podem ocorrer durante a construção e após o enchimento do reservatório. Em suma, o núcleo deve ser constituído por materiais que apresentem baixa permeabilidade, boa trabalhabilidade e uma adequada resistência ao cisalhamento.

As barragens de enrocamento, em particular as com face de concreto, têm originado algumas preocupações motivadas por ocorrências de aberturas de fissuras e trincas na laje o que ocasiona infiltrações indesejadas, nos casos das barragens brasileiras este desconforto também se

verificou. Mas mesmo assim, em função da enorme segurança proporcionada pelo maciço de enrocamento e a facilidade encontrada na solução da vedação, para a selagem destas fissuras ou trincas, tem sido crescente o uso destas barragens por apresentarem vantagens como:

- a) Menor custo;
- b) Segurança;
- c) Cronograma de construção menor;
- d) Amplo domínio das técnicas construtivas;
- e) Estabilidade interna, mesmo com grandes deformações não há a preocupação com erosão interna.

3.2 DESENVOLVIMENTO DAS BARRAGENS DE ENROCAMENTO NO BRASIL

Conforme já citado, a primeira barragem de enrocamento com face de concreto construída no Brasil foi a barragem Foz do Areia no Estado do Paraná entre 1975 á 1980. Nos últimos 30 anos o Brasil foi responsável por importantes evoluções com alterações de métodos construtivos proporcionando um maior benefício econômico para este tipo de barragem.

O rio Foz do Areia está implantado no rio Iguaçu, sendo a primeira barragem sentido montante jusante, na divisão de queda deste rio. Uso importante dentro do cenário nacional e mundial é o fato de ser a primeira barragem de enrocamento com face de concreto a ser construída no Brasil e de ter sido a maior no mundo, em sua categoria, quando da sua construção.

Na seqüência foram projetadas e construídas as barragens de:

- Foz do Areia, no rio Iguaçu – concluída em 1980
- Segredo, no rio Iguaçu – concluída em 1993;
- Xingó, no rio São Francisco – concluída em 1994;
- Itá, no rio Uruguai – concluída em 1999;
- Machadinho, no rio Pelotas – concluída em 2001
- Itapebi, no rio Jequetinhonha – concluída em 2003;
- Quebra Queixo, no rio Chapecó – concluída em 2003;
- Barra Grande, no rio Pelotas – concluída em 2005;
- Campos Novos, no rio Canoas – concluída em 2006;

Outras barragens em fase de estudos e projetos como Pai Querê, no rio Pelotas, Garibaldi e São Roque, no rio Canoas, Itapiranga, no rio Uruguai, são grandes candidatas a serem de enrocamento com face de concreto.

O desenvolvimento do projeto e a cronologia de construção, requererem, planejamento de implantação. O lançamento de materiais, seção prioritária de alteamento do aterro é condicionado por necessidades técnicas e logísticas. De modo resumido vamos abordar esta questão de implantação antes de entrarmos nas questões referentes ao desenho, e do projeto das barragens de enrocamento com face de concreto.

Os materiais a serem empregados nos aterros são provenientes das escavações obrigatórias para a implantação do empreendimento com as estruturas da casa de força, vertedouro, tomada d'água e do sistema de desvio do rio, e o manejo do rio para a construção da barragem.

Para o desenvolvimento da descrição aqui proposto e objetivando um entendimento do processo, eles estão divididos logo abaixo em elementos que compõem as barragens de enrocamento com face de concreto, e procurarão mostrar as principais diferenças entre o estado da arte da construção nos idos de 1975 para os enfoques atuais, 2000 á 2007. Desta forma a abordagem será:

- Ensecadeira;
- Plinto;
- Laje, e
- Maciço de enrocamento.

3.2.1 Ensecadeira

Para a construção da barragem há a necessidade de se ensecar a área onde será implantada a estrutura de barramento. São construídas ensecadeiras, barragem auxiliares, para que se possa construir a barragem propriamente dita. Em função de estudos hidrológicos são definidas elevações que garantam uma segurança especificada nos projetos, que normalmente giram em torno de 25 á 50 anos de tempo de recorrência. Tempo de Recorrência (TR) é determinado estatisticamente com base em uma série hidrológica e tem o significado de uma cheia ter a probabilidade de ocorrer uma vez em um determinado número de anos. Logo TR=50 é a

probabilidade de uma determinada cheia ocorrer uma vez em cada 50 anos. A fixação da TR leva em considerações diferentes condicionantes como:

- Tempo em que a estrutura auxiliar deverá proteger a construção da barragem;
- Condições econômicas relacionadas ao seguro da construção (exigências das seguradoras);
- Riscos com danos que possam ser causados à jusante;
- Comportamento hidrológico do rio.

As figuras, 9 e 10 mostram a ensecadeira implantada para a construção da barragem de Foz do Areia, planta e seção, respectivamente.

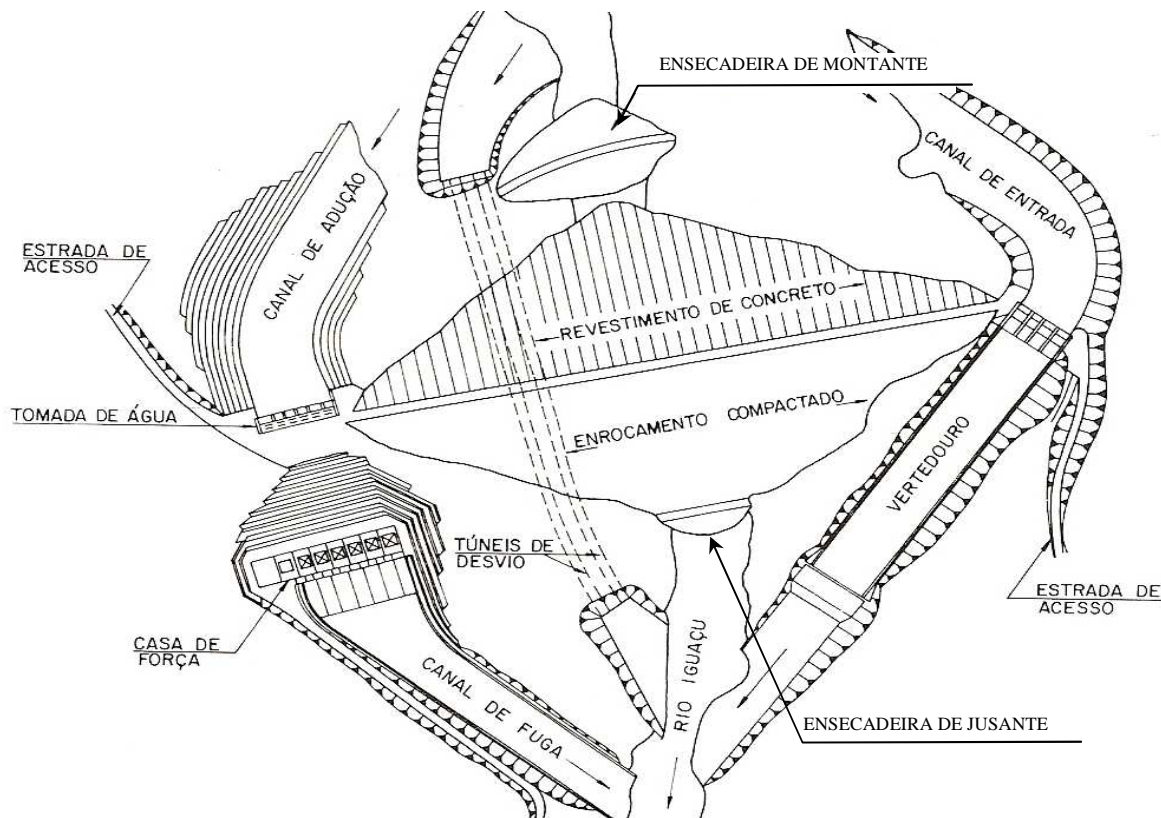
Após a construção dos túneis de desvio foi lançado dois cordões de enrocamento para a construção da ensecadeira de montante, na figura 10, identificados como dique de montante e de jusante. Na seqüência é executado o lançamento de material de transição para posterior lançamento de material impermeabilizante, e argila. Concluído esta fase já é possível a complementação do corpo da ensecadeira erguendo-a até sua elevação final de projeto.

O projeto que envolve as ensecadeiras normalmente buscam a otimização dos custos e são feitas em duas etapas. A primeira é com as ensecadeiras permitindo o desenvolvimento da construção até uma elevação na qual a própria estrutura garanta a sua segurança para a condição requerida no projeto. Esta primeira fase de implantação da barragem corresponde á construção da seção prioritária a qual dará segurança ao empreendimento para ocorrência de cheias correspondentes a uma TR=500 anos (Tempo de Recorrência). A segunda fase corresponde à elevação da barragem permitindo a sua finalização e de toda a implantação do empreendimento.

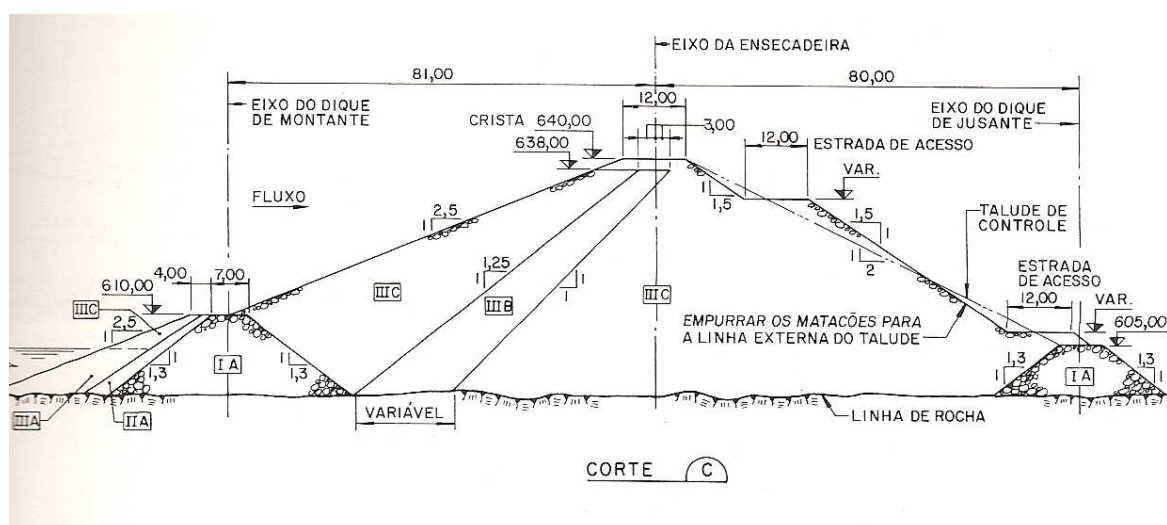
Nestas grandes obras uma estrutura auxiliar como a ensecadeira já é uma obra considerável, e requer tratamentos adequados para que as demais atividades possam ser desenvolvidas com segurança.

Nas barragens de enrocamentos com face de concreto é comum a incorporação da ensecadeira de jusante ao corpo da barragem principal, conforme mostram as figuras, 3-1 e 3-3. Por razões óbvias isto não é possível com ensecadeira de montante, figuras, 3-1 e 3-2, uma vez que é

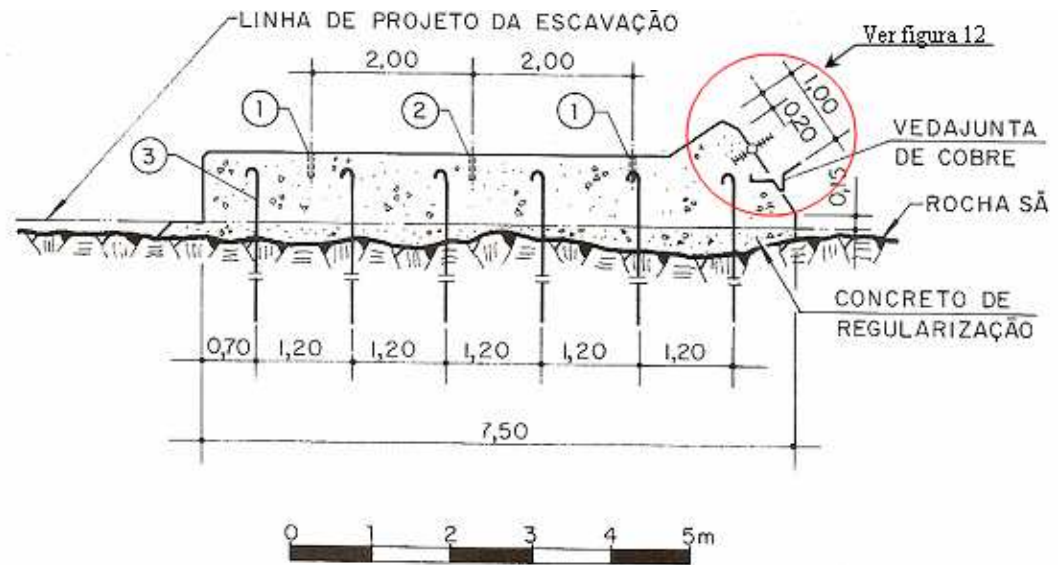
necessário manter todo o talude de montante da barragem livre para os tratamentos no pé, fundação, instalação do plinto e da face de concreto.



Figura, 3-1 – Ensecadeira Barragem Foz do Areia – Planta².



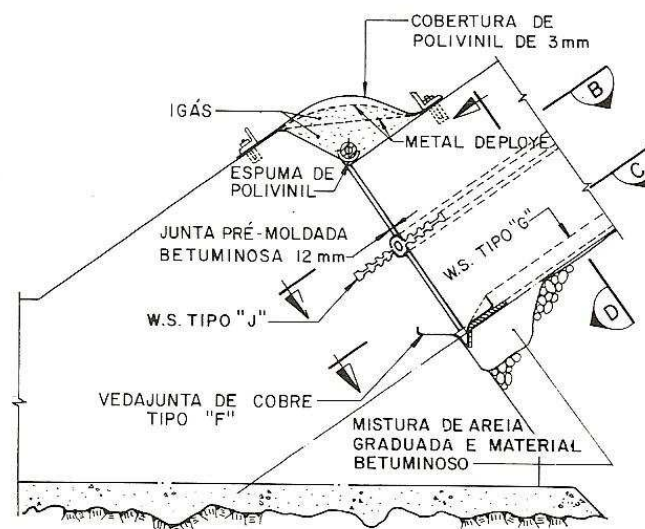
Figura, 3-2 – Ensecadeira de montante da Barragem Foz do Areia – Seção².



LEGENDA

- ① TUBO DE AÇO PRETO \varnothing 3" x 0,30 PARA FUROS DE INJEÇÕES DE CONSOLIDAÇÃO - (TÍP)
- ② TUBO DE AÇO PRETO \varnothing 4" x 0,30 PARA FUROS DA CORTINA DE INJEÇÃO - (TÍP)
- ③ BARRAS DE ANCORAGEM \varnothing 1.1/4" x 4,00 DISTANTES 1,20 EM AMBAS AS DIREÇÕES.

Figura, 3-4 – Seção2 do plinto mostrando os detalhes para furação de injeções e ancoragens.

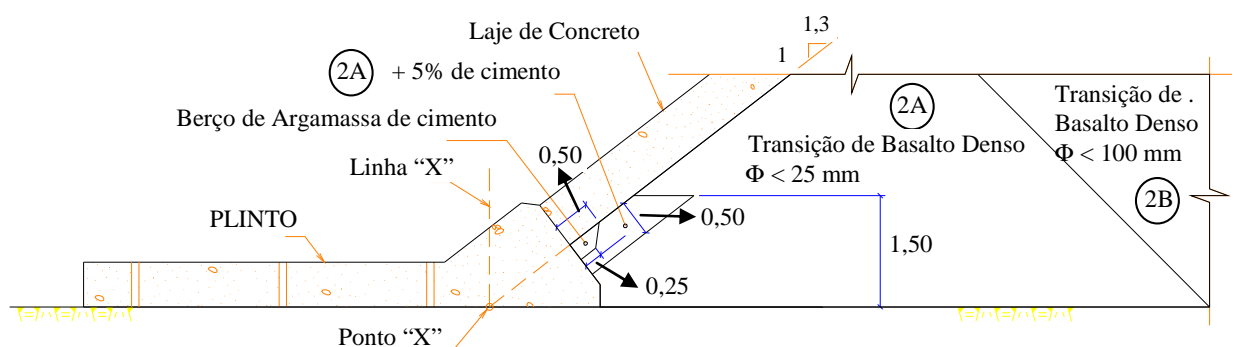


Figura, 3-5 – Detalhes do plinto mostrando o sistema de juntas de vedação (veda juntas).

Além destas defesas na região central do vale, todo este sistema que compõe a junta perimetral, é recoberto com material fino, um solo silto argiloso de baixa ou nenhuma coesão, (ver figura 3-6). A função deste aterro é criar, na zona de maior solicitação, pressões hidrostáticas, uma condição de auto cicatrização, isto é, caso haja abertura entre o plinto e a laje, o material depositado migra para o interior da abertura promovendo o preenchimento deste vazio. A transição executada abaixo da laje protege a fuga do material cicatrizante, solo silto argiloso. A figura, 3-7 mostra uma seção típica do plinto, laje e a transição.

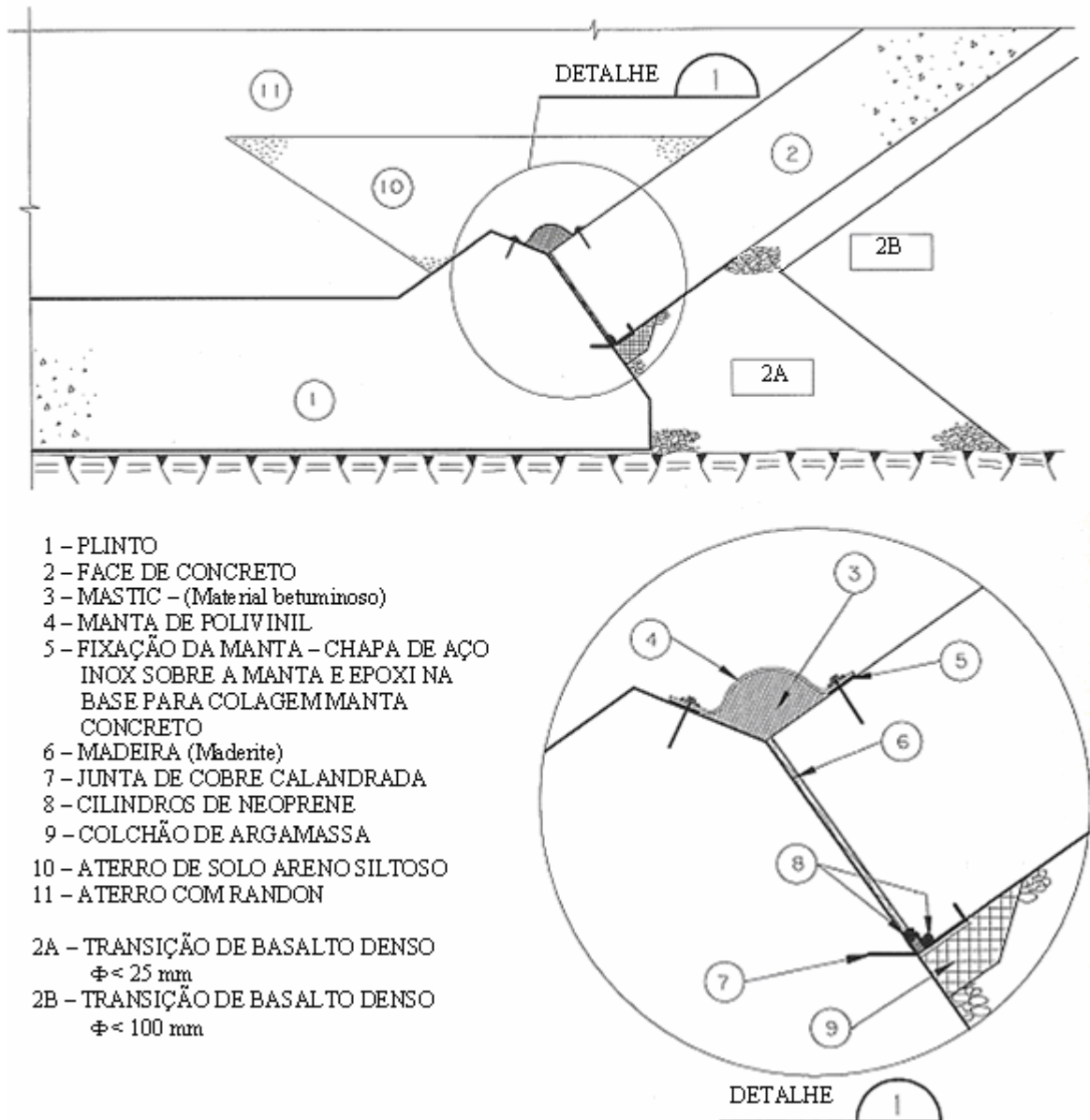


Figura, 3-6 – Detalhes do aterro de proteção na região central executado sobre o plinto.



Figura, 3-7 – Detalhe típico do zoneamento materiais sob a laje.

Nas obras seguintes, o sistema de vedação e juntas entre o Plinto e a Laje, sofreram alterações ou mesmo podemos dizer, simplificações. A nova concepção da junta Perimetral elimina o elemento central, mantendo o do topo e o da base. Os demais cuidados como o zoneamento de transição à jusante da laje e o aterro na parte central permanecem sendo adotados, (figura, 3-8).

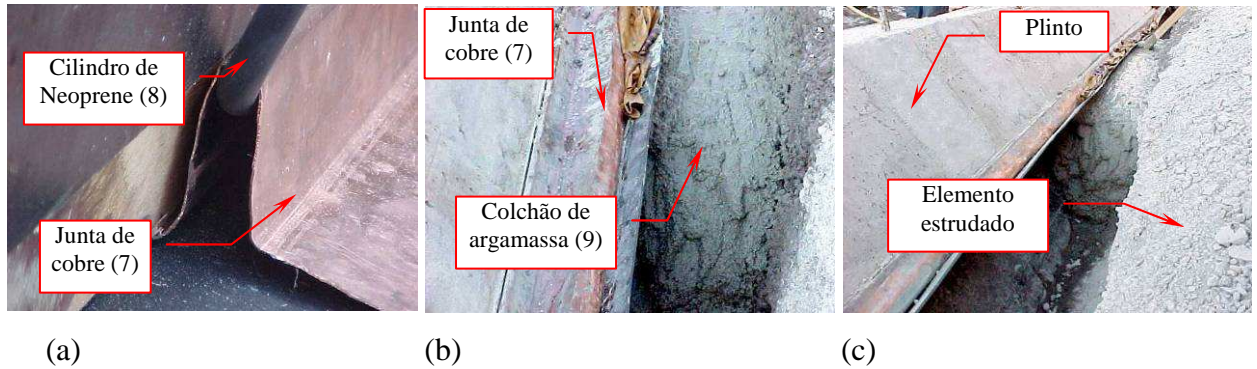


Figura, 3-8 – Detalhe típico da Junta Perimetral.

Embora a junta perimetral seja considerada um ponto frágil das barragens de enrocamento com face de concreto, seu comportamento tem sido adequado e não se pode imputar a ela algumas das vazões excessivas observadas nas barragens de Itá, Barra Grande e Campos Novos. Logo o sistema de Junta perimetral adotado nos projetos atuais, atende perfeitamente aos objetivos e solicitações impostas a ela.

Com a adoção do elemento estrudado para o assentamento da laje de vedação que será visto no item 3.2.5, a transição passou a ser colocada atrás deste elemento. Contudo na junção do plinto com a laje manteve-se a mesma composição conforme mostra o conjunto da figura, 3-9, tendo-se

o devido cuidado de executar o colchão de argamassa para o preenchimento de vazios entre o elemento estruturado e o plinto.

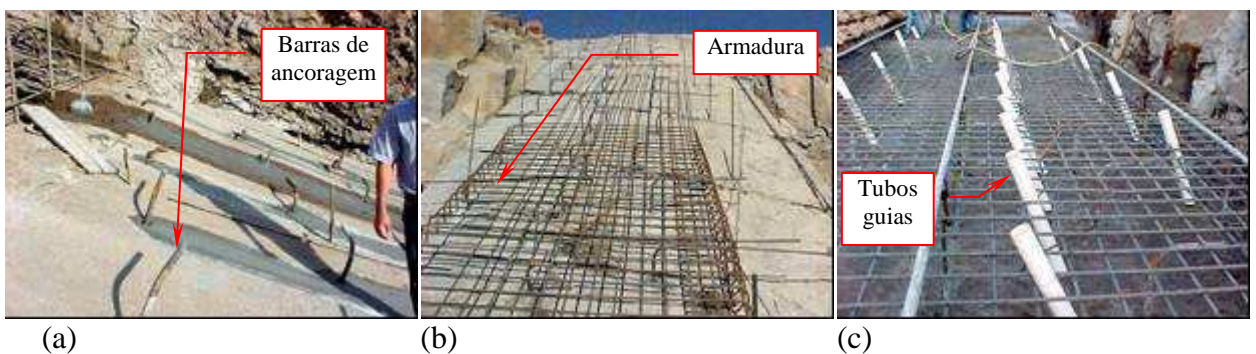


Figura, 3-9 – (a) Junta de cobre. (b) Colchão de argamassa. (c) Elemento estruturado.

As figuras, 3-10 e 3-11 mostram uma seqüência de detalhes da execução do plinto, desde a preparação da fundação, armadura e tubos guias para os serviços de perfuração e injeção com calda de cimento, ancoragem e concretagem.



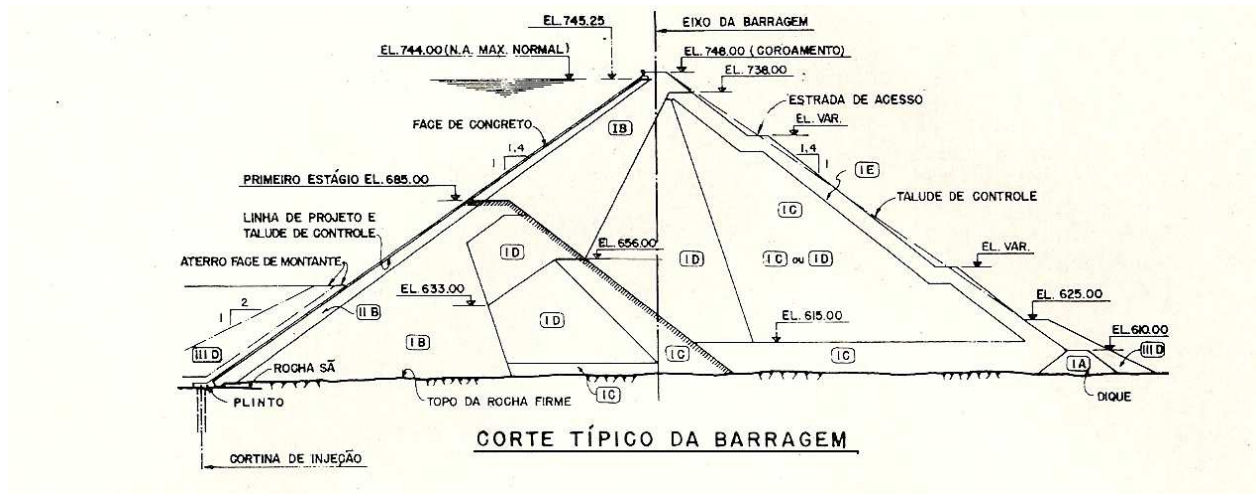
Figura, 3-10 – Preparo da fundação e a ferragem de armação do plinto.



Figura, 3-11 – (a) Barras de ancoragem. (b) Armadura. (c) Tubos guias.

3.2.3 Laje

A laje é o elemento de vedação das barragens de enrocamento com face de concreto. A figura, 3-12 mostra a seção da barragem de Foz do Areia³. Este elemento tem função fundamental neste tipo de barragem. As dimensões da laje são centimétricas e são tratadas como membranas.



Figura, 3-12 – Seção típica da barragem Foz do Areia³.

A determinação da espessura é empírica e definida pela equação abaixo:

$$e = 0,30 + c \times H$$

Onde:

$e \rightarrow$ espessura (resultado em metro)

$c \rightarrow$ constante.

$H \rightarrow$ altura da barragem.

A constante “c” tem sofrido pequenas variações em função do projeto, conforme é apresentada nas equações a seguir, onde mostra a espessura da laje na base, junto ao plinto, e o topo, no coroamento junto ao muro de montante

Barragem	Equação	Altura Bar.	Esp. Base	Esp.Topo
▪ Foz do Areia	$e=0,30 + 0,0035H$	H=160,0 m	e=0,86 m	e=0,30 m
▪ Segredo	$e=0,30 + 0,0035H$	H=145,0 m	e=0,80 m	e=0,30 m
▪ Xingó	$e=0,30 + 0,0034H$	H=140,0 m	e=0,76 m	e=0,30 m
▪ Itá	$e=0,30 + 0,0020H$	H=125,0 m	e=0,55 m	e=0,30 m
▪ Machadinho	$e=0,30 + 0,0020H$	H=125,0 m	e=0,55 m	e=0,30 m
▪ Itapebi	$e=0,30 + 0,0020H$	H=121,0 m	e=0,55 m	e=0,30 m
▪ Quebra Queixo	$e=0,30 + 0,0020H$	H= 75,0 m	e=0,45 m	e=0,30 m
▪ Barra Grande	$e=0,30 + 0,0035H$	H=189,0 m	e=0,96 m	e=0,30 m
▪ Campos Novos	$e=0,30 + 0,0030H$	H=196,0 m	e=0,90 m	e=0,30 m

Em função da esbelteza das lajes, estas eram tratadas como membranas e se considerava para o dimensionamento somente a ação de esforços de tração. Como resultado desta hipótese e simplificação construtiva, a armação da laje era posicionada em seu centro. Com a possibilidade de avaliação das trincas ocorridas nas lajes da barragem de Itá, este conceito sofreu alterações e hoje já se consideram esforços de flexo tração e flexo compressão. A figura, 3-13 mostra o mapeamento das trincas na laje da barragem de Itá.



Figura, 3-13 – Mapeamento das trincas obtidas com investigação subaquática.

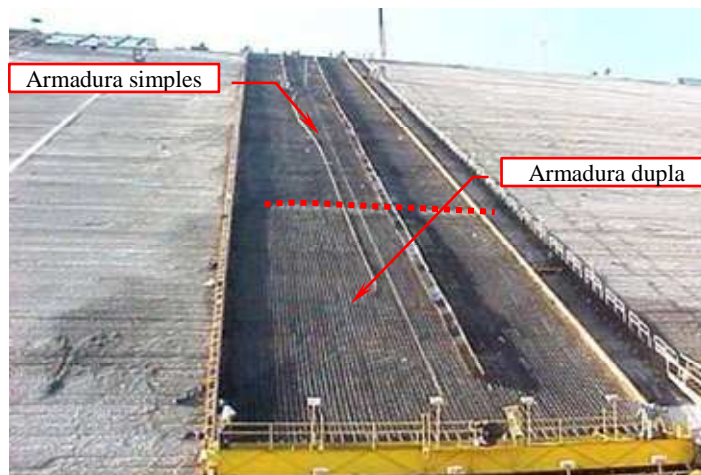
Com este enfoque o conceito de se armar unicamente a laje na região central, cedeu, parcialmente para uma armação dupla. Logo se detalhou a armadura nas duas faces, sem que houvesse a necessidade de alteração das taxas de armadura, que permanecem na ordem de 0,4% na direção horizontal e vertical. Os últimos projetos mostraram que no terço inferior esta nova distribuição foi adotada. Pesquisas e estudos em desenvolvimentos na UFSC, sugere para que a estrutura seja tratada e submetida a esforços de flexo tração e compressão, e que o detalhamento da armadura deva ser compatível com este critério, ou seja, a laje de vedação deve ser armada em suas duas faces ao longo de toda sua extensão, no qual o autor concorda plenamente. As figuras, 3-14 á 3-16 mostram detalhes da armadura.



Figura, 3-14 – Trecho superior mostrando o posicionamento central da armadura.



Figura, 3-15 – Trecho inferior mostrando a distribuição nas duas faces da laje.

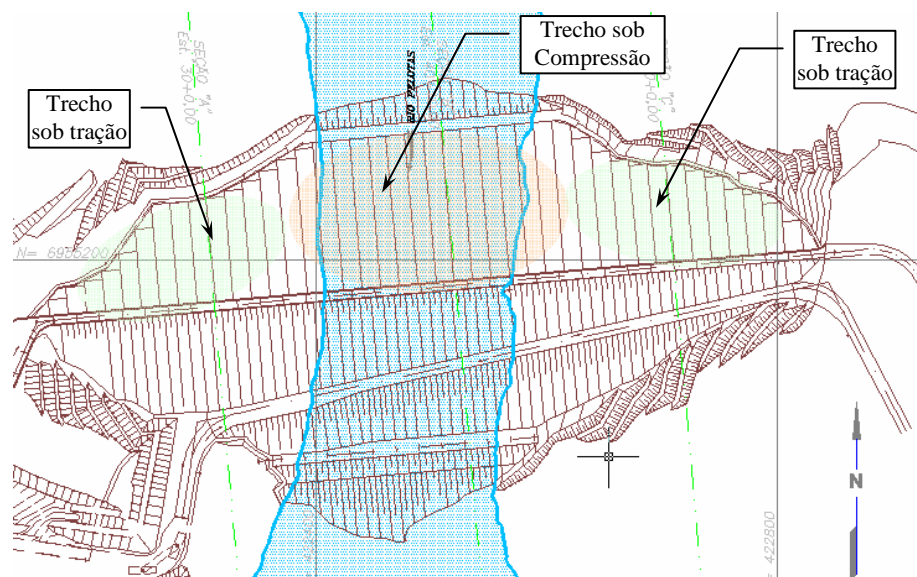


Figura, 3-16 – Mostrando um pano da laje e a separação da armadura simples e dupla.

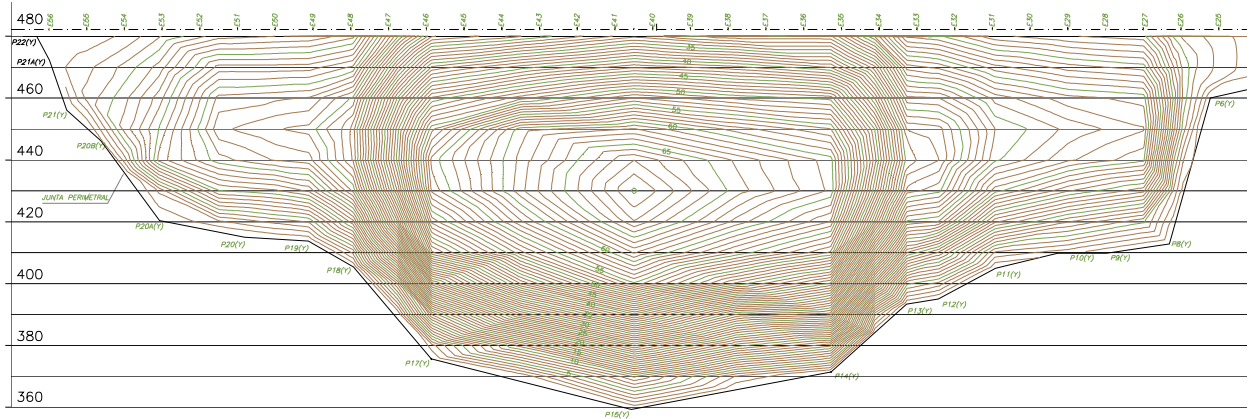
Além da questão estrutural da laje, que como apresentado tem-se divergências de critério e concepção, outros detalhes executivos são interessantes para serem abordados. Estes detalhes são os sistemas de juntas verticais entre as lajes e o substrato, a preparação da base sobre o qual a laje é assentada.

3.2.4 Sistema de Juntas entre Lajes

Estudos qualitativos e de sensibilidade, análise de tensão deformação por meio de modelagem matemática, mostram de maneira genérica a tendência de que o conjunto das lajes junto às ombreiras nas laterais sofre tração, e as do trecho central sofre compressão. As figuras, 3-17 á 3-19 mostram essas tendências

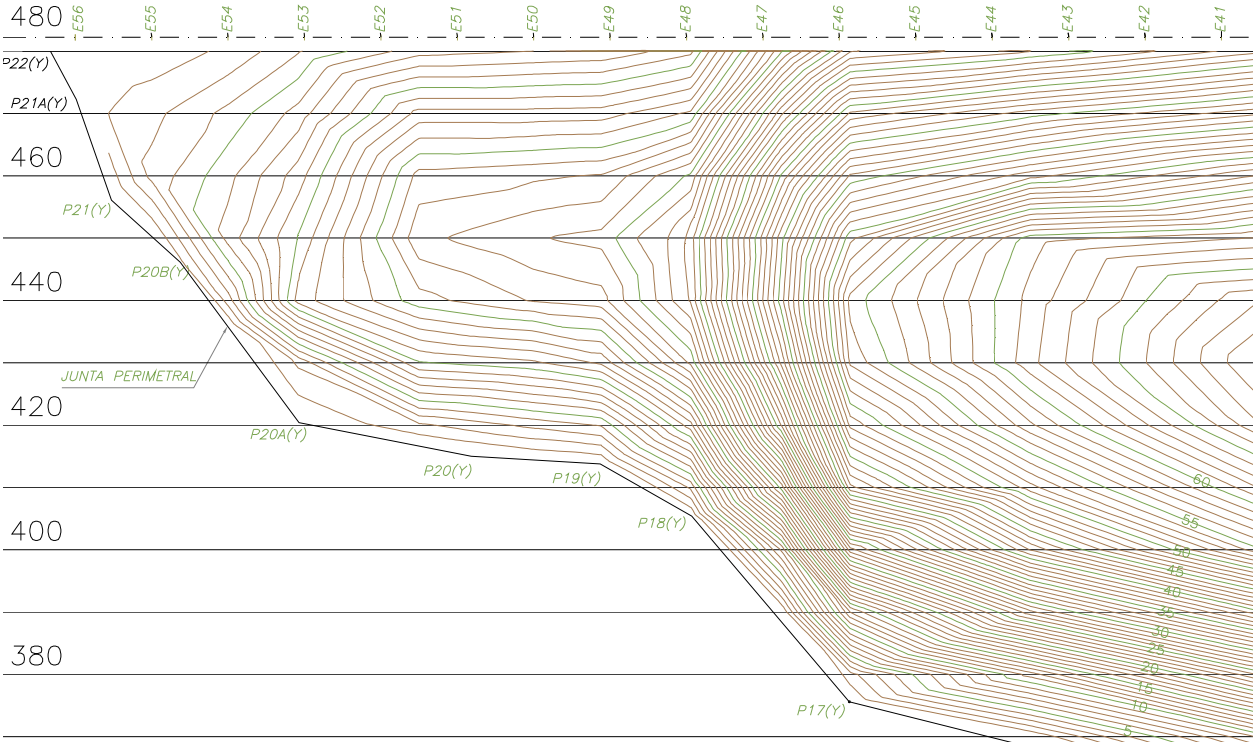


Figura, 3-17 – Indicação esquemática do comportamento da face de concreto.



Figura, 3-18 – Curvas de iso, deformação da face de concreto.

As figuras, 3-18 e 3-19 apresentam as curvas de iso deformação da laje de concreto de 1 em 1 cm obtidas dos estudos de tensão deformação. Elas mostram a tendência côncava da deformada da laje sendo a maior deformação em seu ponto central. Deformação máxima apresentada é da ordem de 70 cm.

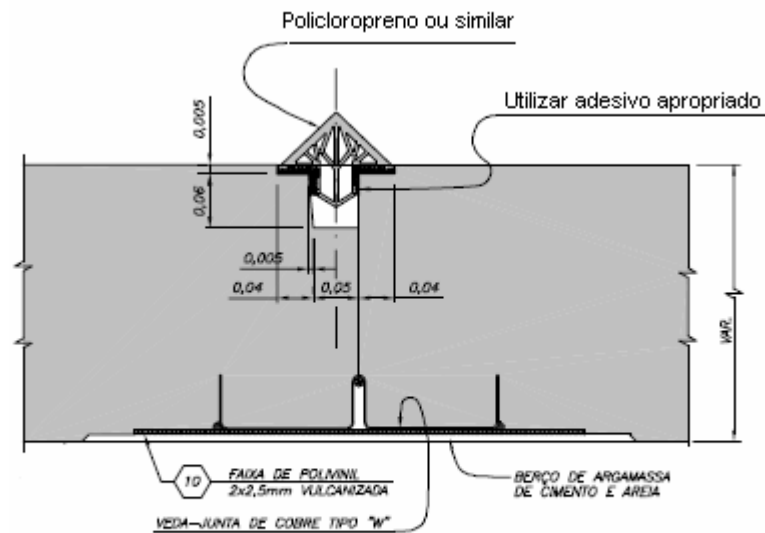


Figura, 3-19 – Curvas de iso deformação da face de concreto da ombreira esquerda.

Este comportamento faz com que o tratamento das juntas entre as lajes sejam diferenciados. Cada “pano” de laje mede da ordem de 16,0 m de largura por aproximadamente 205.0 m de

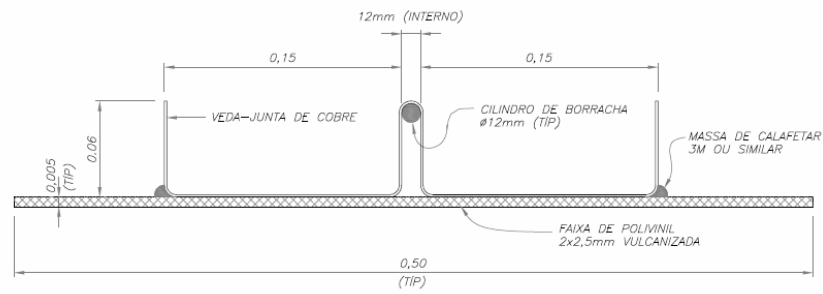
comprimento na região central da barragem. Nas barragens de Itá e Machadinho, foram executadas aproximadamente 56 “panos” de laje. O processo executivo foi a preparação de uma laje inferior, denominada de arranque, que é construída com forma fixa e o restante até o topo com forma deslizante.

Nas áreas tracionadas, a proteção é feita na base e no topo das lajes. Na base a junta é de cobre que fica assentada sobre uma regularização de concreto. No topo a junta pode ser de policloropreno ou manta de borracha reforçada com lona, figuras, 3-20 á 3-22. A junta de policloropreno é fixada diretamente na laje de concreto por meio de cola especial, já a manta de borracha é colada com epóxi e recebe uma tira metálica nas bordas a qual é parafusada prendendo a manta já colada à laje de concreto, (figura, 3-22). Basicamente são definidos dois sistemas de vedajuntas, um para a região tracionada, ombreira, e a outra para a região comprimida, centro da estrutura. As ombreiras, encontro ou ascentamento da estrutura nos taludes laterais que margeiam o rio é a região das barragens. Este local recebe um reforço com duas linhas de proteção sendo uma na base, (junta de cobre), e outra no topo, (policloropreno) ou manta de borracha preenchida com epóxi ou material não coesivo.

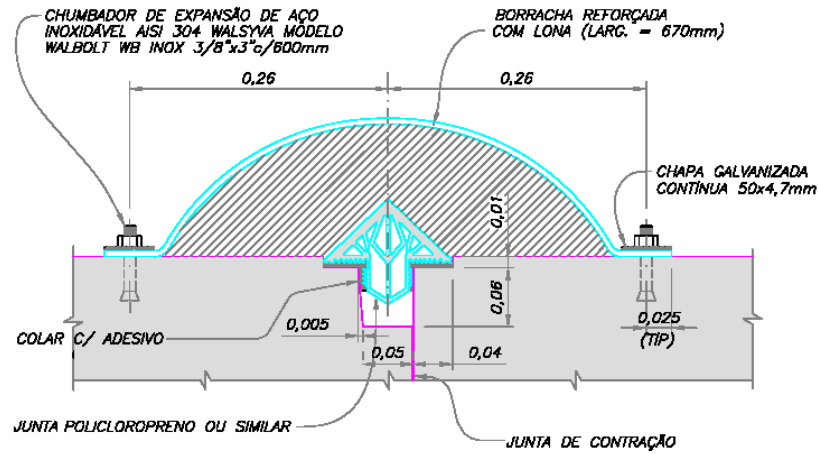


Detalhe Típico de Junta entre Lajes nas ombreiras

Figura, 3-20 – Detalhe típico do sistema de juntas da região tracionada – ombreiras.

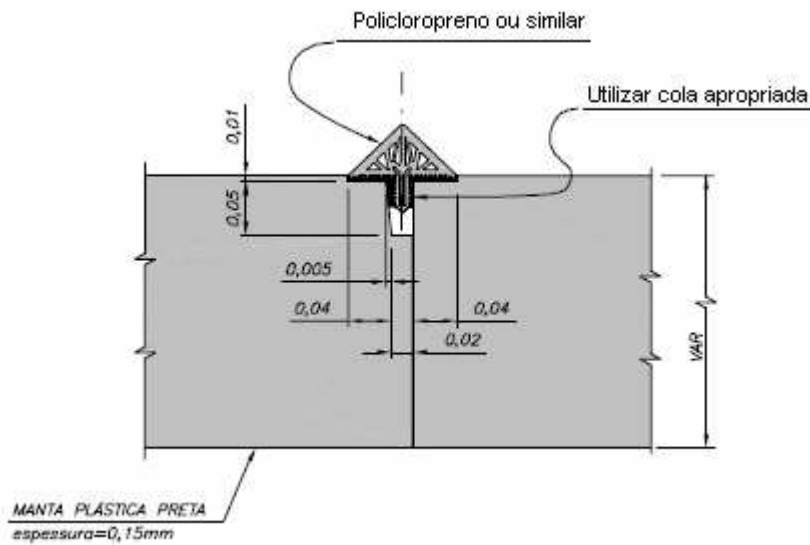


Figura, 3-21 – Detalhe junta de cobre da região tracionada.



Figura, 3-22 – Detalhe de sistema de juntas da região tracionada com o reforço.

Na região comprimida, parte central do vale, as juntas são instaladas normalmente só na face da laje, (figura, 3-23).



Figura, 3-23 – Detalhe típico do sistema de juntas da região comprimida – trecho central.

É comum, nas áreas comprimidas, adotar juntas de manta de borracha, conforme mostrado na figura, 3-22, porem sem a proteção dupla, manta e junta de policloropreno. Quando se adota a manta, esta recebe preenchimento com “mastic”, material betuminoso, ou material arenoso siltoso. Esta segunda opção tem como conceito a auto-cicatrização, promovida pelo transporte do material fino não coesivo para o interior da eventual abertura produzida na parte deformada da laje.

3.2.5 Substrato para apoio da laje

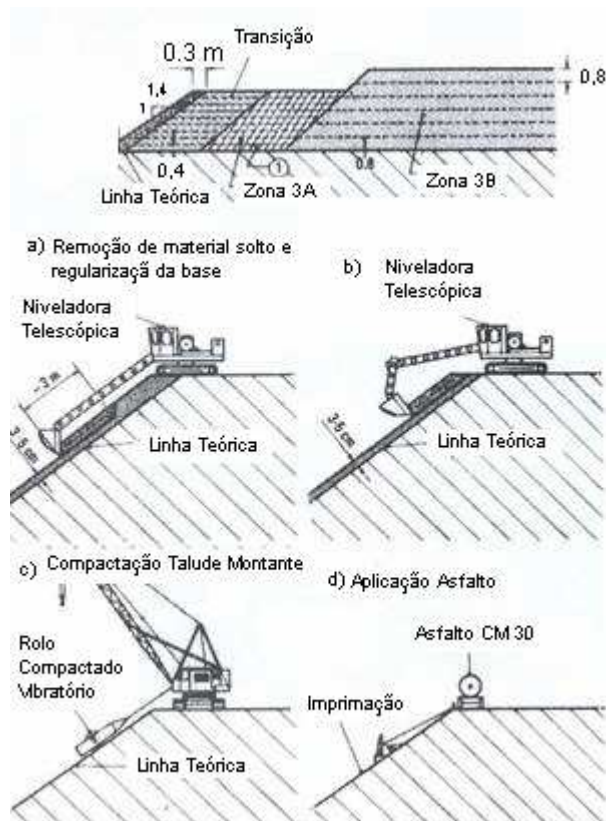
O assentamento da laje é feito sobre um substrato, base de apoio, o qual deve ser preparado de maneira a reduzir irregularidades e principalmente se o material apresentar uma característica de resistência uniforme. Esta condição é difícil de ser obtida durante o alteamento da barragem, pois o material dos espaldares não recebe ou tem a compactação prejudicada pelo fato que não há confinamento nas bordas.

Para suprir esta deficiência, até as barragens de Foz do Areia e Xingó, lançava-se mão de processo construtivo trabalhoso. O espaldar passava por um processo de remoção do material solto e regularização da superfície. Na seqüência executava-se a imprimação e compactação do substrato, base, com método conhecido como efeito “yô-yô”. As figuras, 3-24 á 3-26 mostram a seqüência dos trabalhos.



Figura, 3-24 – Seqüência dos trabalhos de preparação do substrato para recebimento da laje⁴.

⁴ Fonte II Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto – Florianópolis –out/2007



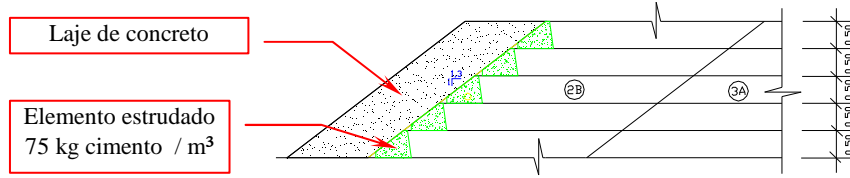
Figura, 3-25 – Sequência dos trabalhos de preparação do substrato para recebimento da laje.



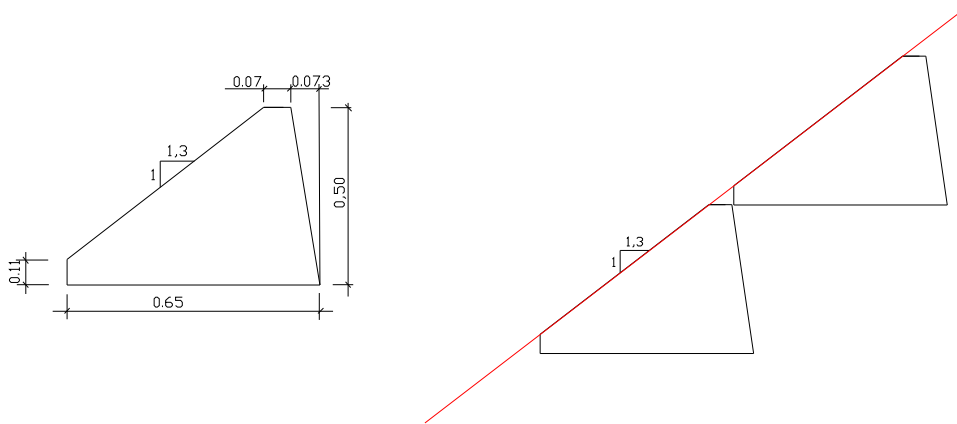
Figura, 3-26 – Imprimação e compactação. Efeito “yô-yô”⁴.

A partir da barragem de Itá, a preparação do substrato sofre alteração significativa, promovendo uma evolução com reflexos econômicos, facilidade executiva e acabamento. O processo é constituído pela execução de uma mureta estrudada de concreto de baixa resistência. Este elemento promove a regularização da face, confinamento para uma melhor compactação da transição e leva o acabamento da face juntamente com o alteamento da barragem. Por se tratar de um concreto com baixo teor de cimento a rigidez das peças não é significativamente maior que a

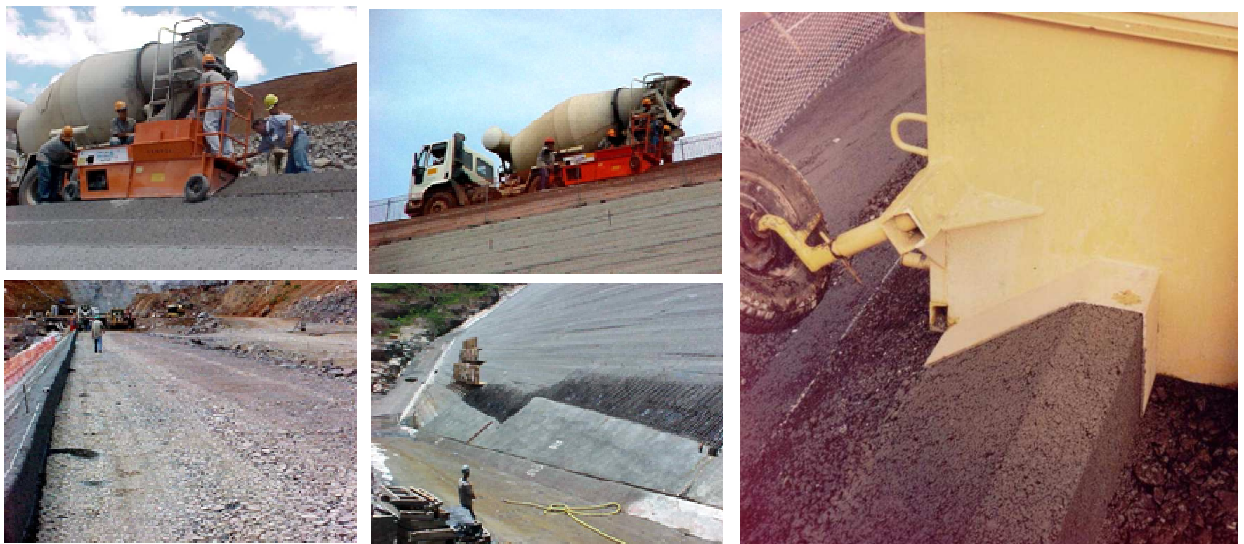
do material subjacente e transição, proporcionando uma passagem gradual entre os materiais. As figuras, 3-27 á 3-29 mostram este processo.



Figura, 3-27 – Detalhe – Laje, elementos estrudados e transição.



Figura, 3-28 – Detalhe do elemento estrudado.



Figura, 3-29 – Seqüência de fotos mostrando a execução do elemento estrudado.

3.2.6 Maciço de Enrocamento

A seqüência construtiva das barragens de enrocamento com face de concreto é cuidadosamente analisada, pois há a necessidade de criar condições para lançamento dos materiais provenientes das escavações. A questão da seção prioritária também é importante uma vez que esta deverá ter a face de montante tratada para que tenha uma camada menos permeável ou mesmo ser impermeável de modo a garantir a segurança da estrutura na ocorrência de uma cheia que venha a solicitar esta seção.

O zoneamento aplicado nas barragens apresenta características de materiais e camadas de lançamento e compactação diferentes. A preocupação fundamental do zoneamento é criar transições entre materiais e processos construtivos de maneira não brusca, para que as distribuições de tensões e deformações também sejam suavizadas, principalmente junto a laje, que é uma estrutura com rigidez muito maior que os demais materiais, tornando fundamental o zoneamento e distribuindo os materiais e processos construtivos.

Após a construção da barragem de Itá, o novo modelo de contrato da forma EPC, aliados aos fatores econômicos levaram a utilização de materiais com características mais variadas e menos “nobres”. Procurar utilizar a maior parte dos materiais escavados que obtenham reflexo econômico e ambiental. A título de exemplo podemos qualificar duas obras com características distintas de zoneamento.

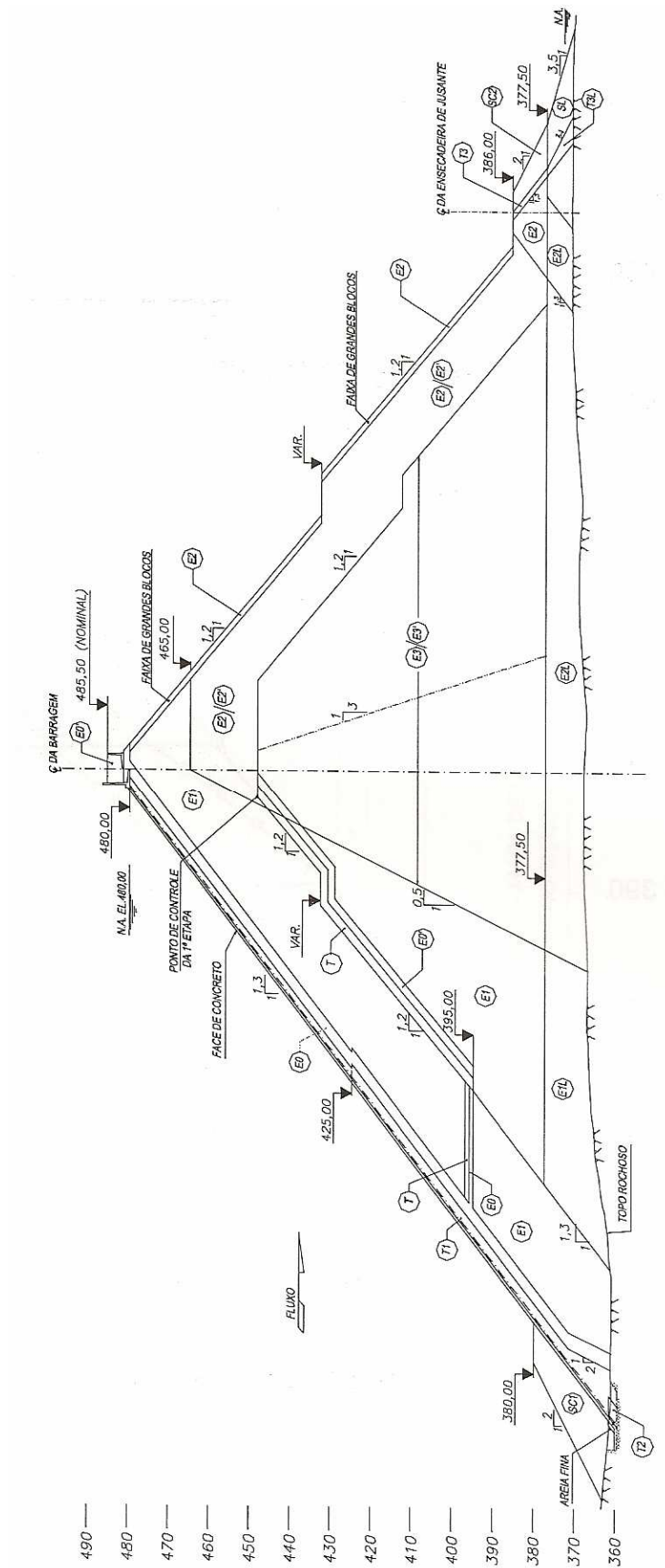
Foz do Areia seguiu uma linha já consagrada na época. O material utilizado nos aterros manteve um padrão de rocha basáltica densa pouco alterada e somente na zona 1C é que se permitiu a incorporação de no máximo 25% de brecha basáltica. As camadas construtivas de compactação variaram de 0,40 á 1,20 m. Na região junto a laje, a montante, aplicou-se de 0,80 m nas zonas 1B, e de 1,20 m nas zonas 1C e 1D. A utilização de água durante o processo de compactação foi aplicada em todo o maciço. A figura, 3-12 mostra o zoneamento adotado.

A seqüência construtiva considerou o avanço da seção de montante até a elevação 685,00 m, conforme mostra a figura, 3-12, inclusive com a laje de vedação. Este processo construtivo (execução da seção prioritária por montante), incluindo a laje, induz uma junta construtiva

horizontal na laje. Outra questão neste processo é que há a necessidade de se ter o plinto, (estrutura de suporte da laje), já construído.

A barragem de Machadinho é um exemplo da tendência atual. O emprego de materiais com características mais brandas como, rochas com um grau de alteração acentuado de menor resistência à compressão, litologia mais variada, fizeram parte do zoneamento o que possibilitou um uso mais amplo dos materiais escavados.

A figura, 3-30 mostra a seção típica da barragem de Machadinho e a tabela, 3-1 mostra a característica dos materiais utilizados. A tabela, 3-2 mostra os dados característicos das barragens brasileiras de enrocamento com face de concreto.



Figura, 3-30 – Zoneamento da barragem de Machadinho⁴.

ZONA	MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO	MÉTODO DE LANÇAMENTO E COMPACTAÇÃO
E0	Enrocamento	Mínimo de 70% de Basalto com resistência a compressão simples $\geq 50\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 0,40 m
E1	Enrocamento	Mínimo de 70% de Basalto com resistência a compressão simples $\geq 50\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 6 passadas; camadas de 0,80 m
E2	Enrocamento	Mínimo de 70% de Basalto com resistência a compressão simples $\geq 40\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 1,60 m
E1L	Enrocamento	Mínimo de 70% de Basalto com resistência a compressão simples $\geq 50\text{MPa}$	Lançado
E2L	Enrocamento	Mínimo de 70% de Basalto com resistência a compressão simples $\geq 40\text{MPa}$	Lançado
E2'	Enrocamento	Mínimo de 70% de Basalto com resistência a compressão simples $\geq 40\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 1,20 m
E3	Enrocamento	Basalto e/ou brecha em qualquer proporção com resistência a compressão simples $\geq 25\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 1,60 m
E3'	Enrocamento	Basalto e/ou brecha em qualquer proporção com resistência a compressão simples $\geq 25\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 1,20 m
E4	Enrocamento – Lançamento em zonas confinadas	Basalto e/ou brecha em qualquer proporção com resistência a compressão simples $\geq 20\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 0,80 m
T1	Transição	Basalto com resistência a compressão simples $\geq 50\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 0,40 m
T2	Transição	Basalto com resistência a compressão simples $\geq 50\text{MPa}$	Rolo liso vibratório com peso estático $\geq 90\text{kN}$ – 4 passadas; camadas de 0,20 m
T3	Transição	Transição não processada de saprolito duro	Compactado com trafico de equipamento, camadas de 0,40 m
T3L	Transição	Transição não processada de saprolito duro	Lançado abaixo do Nível d'água
SL	Solo	Solo residual - saprolito	Lançado
SC1	Solo	Solo residual - saprolito	Compactado com trafico de equipamento, camadas de 0,25 m
SC2	Solo	Solo residual - saprolito	Compactado com trafico de equipamento, camadas de 0,40 m

Tabela, 3-1 – Características dos materiais utilizados na barragem de Machadinho⁴.

No item, 3.3, Características dos Enrocamentos, apresenta uma alternativa de classificação deste material em função da sua qualidade física, litológica e granulométrica. Esta classificação vem de encontro com as tendências e preocupações entre um adequado zoneamento considerando-se as condições técnicas de tensão e deformação e a necessidade econômica da utilização de materiais oriundos das escavações obrigatórias.

DADOS CARACTERÍSTICOS DAS BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO DO BRASIL

Descrição da Característica	Foz do Areia	Secredo	Xingó	Ita	Itapebi	Machadinho	Quebra Queixo	Barra Grande	Campos Novos
Altura (m)	160	145	140	125	106	125	70	183	196
Talude Montante	1:1,4	1:1,3	1:1,4	1:1,3	1:1,25	1:1,3			
Talude Jusante	1:1,4	1:1,4	1:1,3	1:1,3	1:1,4	1:1,3			
Espessura da Laje	e=0,3+0,0035*H ¹	e=0,3+0,0035*H ¹	e=0,3+0,0034*H ¹	e=0,3+0,0020*H ¹	e=0,3+0,0020*H ¹	e=0,3+0,0020H ¹	e=0,3+0,0020H ¹	e=0,3+0,0035H ¹	e=0,3+0,0030H ¹
Densidade Dos Grãos (t/m ³)	2,81	2,89	2,75	2,85	2,62	2,76	2,80	2,85	2,78
Tipo de Rocha	Basalto	Basalto	Granito	Basalto	Granito-gnaissse	Basalto	Basalto	Basalto	Basalto
Densidade Aparente (t/m ³)	2,12	2,10	2,12	2,15	2,10	2,10	2,12	2,14	2,12
Índice de vazios	0,33	0,38	0,30	0,33	0,25	0,31	0,32	0,33	0,31
Módulo de deformabilidade (MPa)	47	60	32	30 a 60	40	20 a 45			
Compactação	N ^o passadas	4	4	4	4	4 a 6	4	4	4 a 6
	Rolo Vibratório	10 t	9 t	9 t	9 t	9 t	9 t		9 t
	Molhagem	25%emVolume	150 l/m ³	60 l/m ³	40 l/m ³	30 l/m ³			
Zoneamento simplificado ²	Terço de Montante	E0 e E1	E0 e E1	E0 e E1	E0 e E1	E0 e E1	E0 e E1	E0 e E1	E0 e E1
	Terço Central	E1	E1 e E2	E1 e E3	E1 e E2	E1 e E3	E2 e E3	E2 e E3	E2 e E3
	Terço de Jusante	E1 e E3	E3	E3	E3	E3	E3	E3	E3

1 - H = altura da coluna d'água

2 - Divisão do zoneamento em 3 faixas principais com o objetivo de facilitar a comparações

E0 - Basalto denso com no máximo 30% de Brecha - Compactado em camadas de 0,40 m

E1 - Basalto denso com no máximo 30% de Brecha - Compactado em camadas de 0,80 m

E2 - Basalto denso e/ou Brecha em qualquer proporção - Compactado em camadas de 1,20 m

E3 - Basalto desno e/ou Brecha em qualquer proporção - Compactado em camadas de 1,60 m

ou granito são - compactado em camadas de 0,40 m
ou granito e gnaissse são - compactado em camadas de 0,80 m
ou granito e gnaissse alterados - compactado em camadas entre 1,60 a 2,00 m

Fontes - Il Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto - out/1999 -

- Concret Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance - Edited by Barre Cooke and James L. Sherard - out/1985

- Berry Cooke - Benje out/2001

Tabela, 3-2 – Dados característicos das barragens brasileiras com face de concreto.

3.3 CARACTERÍSTICAS DO ENROCAMENTO

Apesar de uma notória evolução no que se refere principalmente aos equipamentos de construção, o caráter empírico está presente ainda hoje no tratamento e elaboração dos projetos de barragens, principalmente as de enrocamento com face de concreto. A preocupação com a segurança, desempenho e custos das obras de barragens para os diversos fins é uma questão de enfoque nacional e mundial.

A compactação do maciço, inicialmente muito deficiente, era conseguida com passagem de tratores pesados (tipo D8 ou D9) resultando um corpo compressível.

Atualmente a compactação é feita com rolos vibratórios metálicos lisos, com peso estático superior á 9t. Estes rolos são muito eficientes na compactação de camadas de enrocamentos até 1,60 m de espessura.

Durante a década de 70, a palavra enrocamento “rockfill” podia ser definida como um conjunto de fragmentos de rocha, cuja granulometria é constituída em 70% por partículas maiores que 1/2”(12,5mm), com uma fração no máximo 30% (o ideal seria 10%) de partículas que passam no peneiro nº4 (4,8mm). Atualmente estes percentuais são bem mais relaxados. Tem-se granulometria onde o diâmetro máximo atinge até 1,5 m e o percentual de material fino chega aos 35% ou 40%, (passante na peneira nº 4) ou até mesmo um percentual da ordem de 10% (passante na peneira nº 200) ($\phi \leq 0.075\text{mm}$). Um dos requisitos a que se dá importância é a permeabilidade do material que deve ser superior a $k=10^{-3}$ cm/s.



(a)



(b)

Figura, 3-31 – (a) Enrocamento fino. (b) Enrocamento de proteção.

A figura, 3-31 ilustra dois tipos de enrocamento, o fino, utilizado como aterro em geral e o graúdo para proteção de talude ao fluxo d'água.

Um enrocamento bem graduado (com alguns finos) tem resistência e compressibilidade maiores do que um enrocamento mal graduado (uniforme). A máxima dimensão de blocos deverá ser menor que 80% da espessura da camada compactada.

Os enrocamentos vêm sofrendo uma constante alteração em sua definição. Como foi comentado anteriormente, na década de 70, os enrocamentos tinham uma caracterização em função da litologia, da granulometria e da permeabilidade. Atualmente estes requisitos estão substancialmente mais relaxados dando-se ênfase à permeabilidade que deve ser maior que $k=10^3$ cm/s.

Por se tratar de um material de boa trabalhabilidade e de ser drenante, o seu emprego independe das condições meteorológicas ou condições de umidade natural, sendo o cronograma afetado somente pelas limitações de produção, capacidade ou praça.

3.3.1 Classificação dos Enrocamentos

Com a finalidade de facilitar o entendimento do uso dos enrocamentos em função de seu zoneamento e características, recomenda-se classificar este material. A divisão das classes está intimamente relacionada com a sua utilização e suas características que estão condicionados a litologia, granulometria e grau de alteração dos grãos. A referência dada a litologia e alteração dos grãos é função da uniformidade em relação á resistência mecânica, resistência á ciclagem, coerência e dureza.

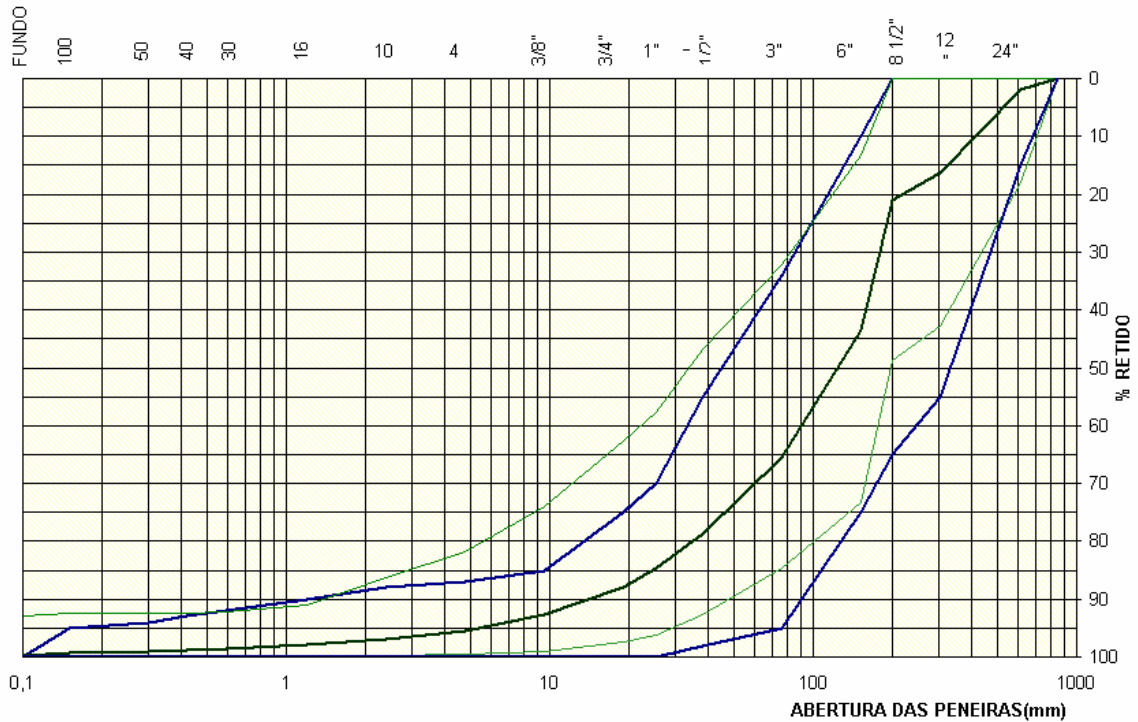
Desta forma podem-se classificar os enrocamentos em:

- a. Enrocamento fino
- b. Enrocamento médio
- c. Enrocamento graúdo duro
- d. Enrocamento graúdo brando

3.3.1.1 Enrocamento Fino

Os enrocamentos finos, figura, 3-32 e tabela, 3-3 são compostos por materiais granulares com $\phi \leq 400$ mm. Em sua composição não é aceito variações litológicas em materiais que apresentem sinais de grande alterabilidade. A figura, 3-33 mostra o enrocamento fino no local da sua aplicação na região á montante da barragem, junto á laje de vedação.

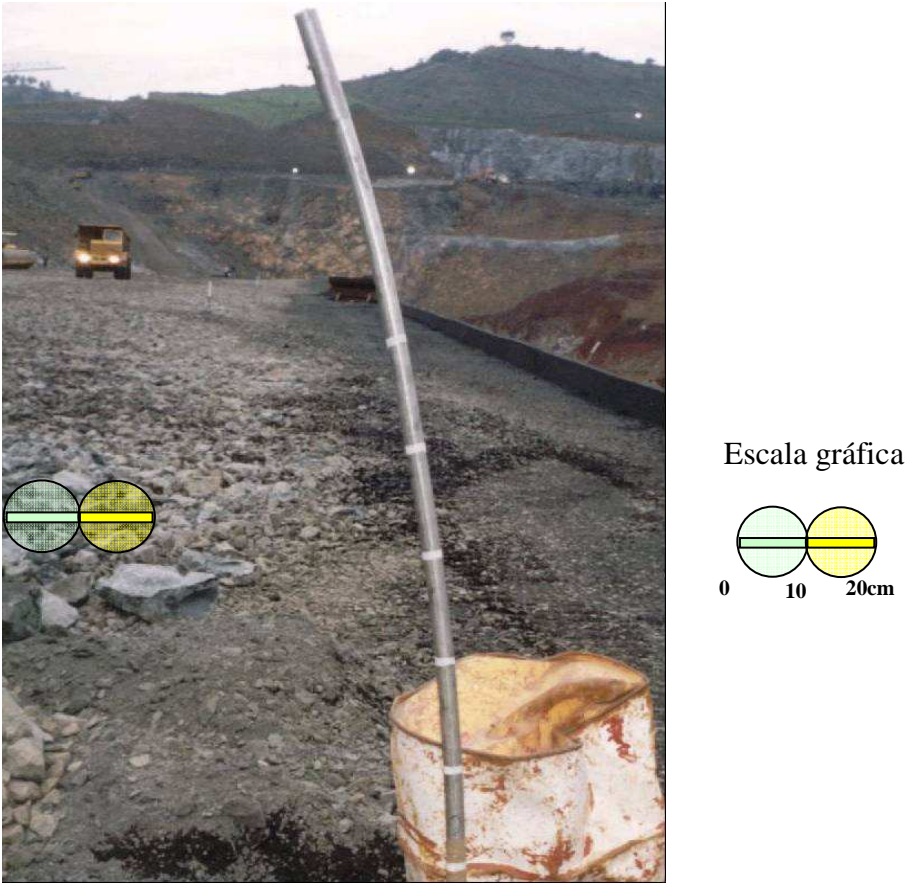
Estes enrocamentos, principalmente quando bem compactados, apresentam baixos índices de vazios que somados a boa qualidade dos grãos confere um alto coeficiente de deformabilidade ($E > 100$ MPa). As deformações específicas deste material ficam na ordem de 1%.



Figura, 3-32 – Gráfico da faixa granulométrica do enrocamento fino.

Características do enrocamento fino		Material de origem basáltica
Litologia	Uniforme	Basalto denso
Sanidade dos grãos	Rocha sã	Rocha basáltica sã
Coefficiente de não uniformidade C_u	$5 < C_u < 30$	
Diâmetro máximo	$\phi_{max} < 400 \text{ mm}$	
D_{50}	$10 < \phi_{50} < 80 \text{ mm}$	
Coefficiente de permeabilidade k	$k > 10^{-3} \text{ cm/s}$ (normalmente $k \cdot 10^{-3} < k < 10 \text{ cm/s}$)	
Módulo de deformabilidade E	$E > 80 \text{ MPa}$	

Tabela, 3-3 – Dados característicos do enrocamento fino.

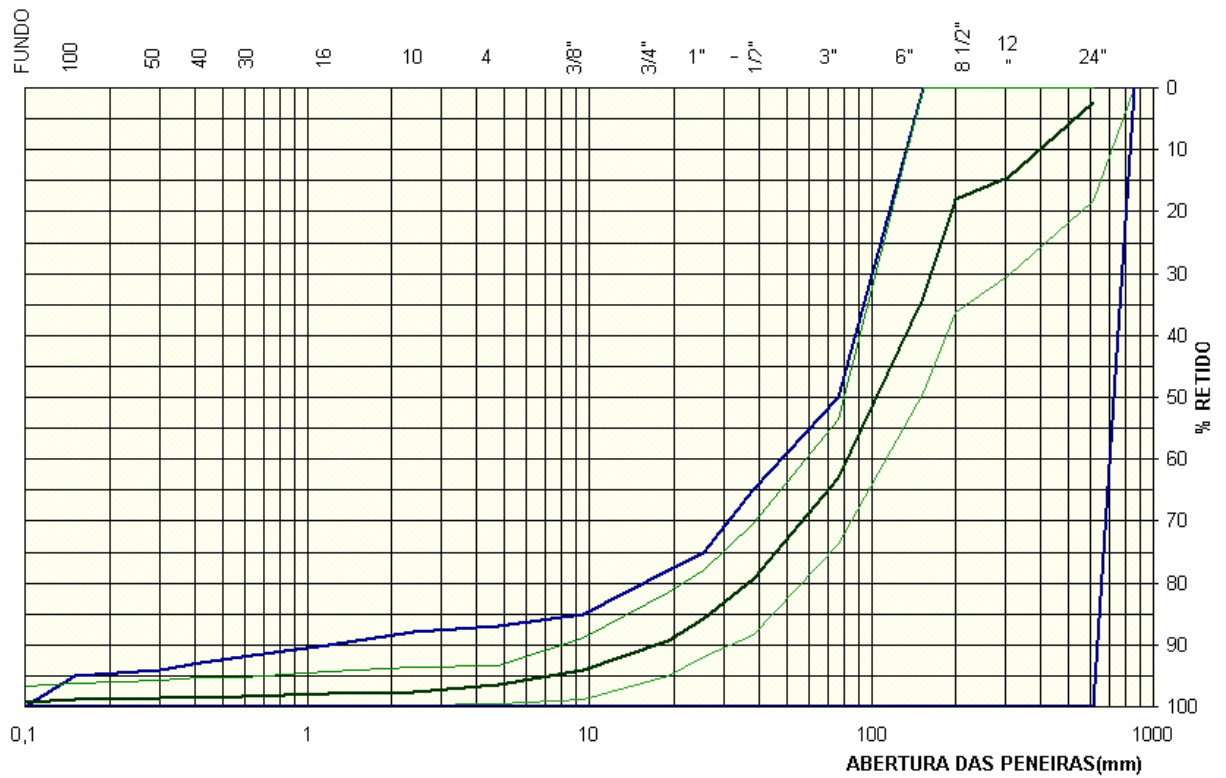


Figura, 3-33 – Enrocamento fino na praça de aplicação.

3.3.1.2 Enrocamento Médio

Os enrocamentos médios, figura, 3-34 e tabela, 3-4 são compostos por fragmentos de rochas com diâmetro até 800 mm ($\phi \leq 800$ mm). É aceitável uma mistura litológica de até 30% de materiais que apresentem uma formação menos resistente, porém preservando a sanidade dos grãos.

Estes enrocamentos também costumam apresentar boa performance, quando da deformação. O coeficiente de deformabilidade normalmente fica entre 50 á 90 MPa. As deformações específicas deste material ficam na ordem de 1%. A figura, 3-35 mostra o material em seu local de aplicação no corpo da barragem.



Figura, 3-34 – Gráfico da faixa granulométrica do enrocamento médio.

Características do enrocamento médio		Material de origem basáltica
Litologia	Variada na proporção 70% e 30%	Basalto denso 70% Brecha 30%
Sanidade dos grãos	Rocha sã	Rocha basáltica sã
Coefficiente de não uniformidade C_u	$5 < C_u < 20$	
Diâmetro máximo	$\phi_{\max} < 800 \text{ mm}$	
D_{50}	$30 < \phi_{50} < 100 \text{ mm}$	
Coefficiente de permeabilidade k	$k > 10^{-3} \text{ cm/s}$ (normalmente $k \cdot 10^{-3} < k < 10 \text{ cm/s}$)	
Módulo de deformabilidade E	$50 < E \leq 90 \text{ MPa}$	

Tabela, 3-4 – Dados característicos do enrocamento médio.



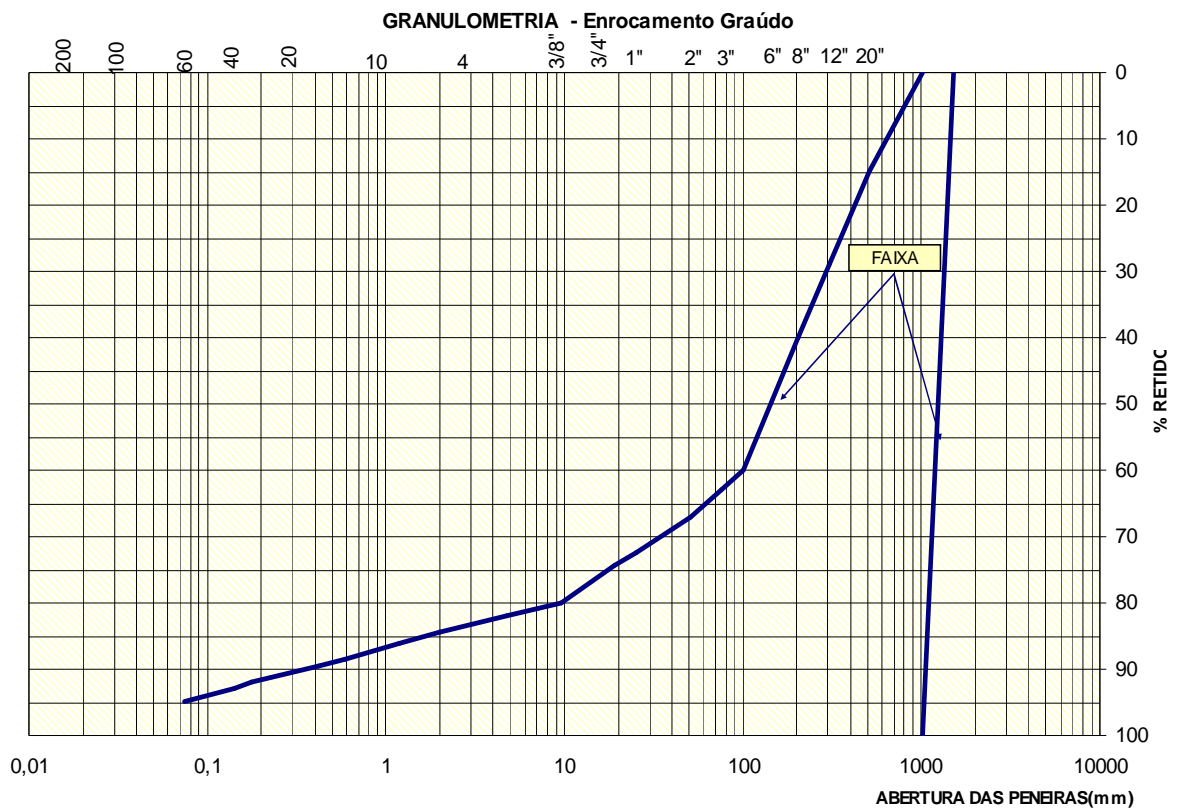
Figura, 3-35 – Enrocamento médio na praça de aplicação.

3.3.1.3 Enrocamento Graúdo Duro

Os enrocamentos graúdos duros caracterizam-se pelo coeficiente de não uniformidade baixo. As figuras, 3-36 e 3-37 mostram o enrocamento graúdo duro na praça de aplicação e o gráfico da faixa granulométrica respectivamente. A tabela, 3-5 apresenta as principais características deste material.



Figura, 3-36 – Enrocamento graúdo duro na praça de aplicação.



Figura, 3-37 – Gráfico da faixa granulométrica do enrocamento graúdo duro.

Características do enrocamento graúdo duro		Material de origem basáltica
Litologia	Variada na proporção 70% e 30%	Basalto denso 70% Brecha 30%
Sanidade dos grãos	Rocha sã	Rocha basáltica sã
Coefficiente de não uniformidade C_u	$C_u < 10$	
Diâmetro máximo	$\phi_{\max} < 1600 \text{ mm}$	
D_{50}	$100 < \phi_{50} < 600 \text{ mm}$	
Coefficiente de permeabilidade k	$k > 10 \text{ cm/s}$	
Módulo de deformabilidade E	$50 < E \leq 90 \text{ MPa}$	

Tabela, 3-5 – Dados característicos do enrocamento graúdo duro.

3.3.1.4 Enrocamento Graúdo Brando

As características dos enrocamentos graúdos brandos, são conhecidos por sua flexibilidade. Praticamente são aceitos todos os materiais granulares das escavações, mesmo os materiais com grau de alteração elevado. A faixa granulométrica pode ser considerada a mesma apresentada na figura, 3-37, mais somente o $\phi 50$ é da ordem de 100 mm. A tabela, 3-6 mostra as principais características deste material. A figura, 3-38 mostra as características do material do tipo enrocamento graúdo brando.

Características do enrocamento graúdo brando		Material de origem basáltica
Litologia	Proporção variada	Basalto denso/alterado e Brecha
Sanidade dos grãos	Rocha sã a muito alterada	Rocha basáltica sã alterada
Coefficiente de não uniformidade C_u	$C_u < 10$	
Diâmetro máximo	$\phi_{\max} < 1600 \text{ mm}$	
D_{50}	$100 < \phi_{50} < 600 \text{ mm}$	
Coefficiente de permeabilidade k	$k > 10^{-3} \text{ cm/s}$	
Módulo de deformabilidade E	$15 < E \leq 50 \text{ MPa}$	

Tabela, 3-6 – Dados característicos do enrocamento graúdo brando.



Figura, 3-38 – Enrocamento graúdo brando.

3.3.2 Obtenção

De um modo geral os enrocamentos são obtidos das escavações obrigatórias da obra, e somente em casos particulares e/ou por deficiência do balanço de material é que se lança mão de pedreiras como empréstimo. Nestes casos os estudos de alternativas como concreto compactado a rolo ou mesmo concreto convencional pode ser mais atrativo.

As escavações para a implantação das estruturas do empreendimento fornecem materiais de construção para aterros em solo, enrocamentos, filtros transições e para o concreto. A seleção dos materiais em função da utilização vai desde a qualidade intrínseca do material até na influência do processo construtivo com a determinação de plano de fogo. A figura, 3-39 apresenta uma seqüência de fotos mostrando as escavações obrigatórias, fonte de procedência das diferentes classes de enrocamentos.



Figura, 3-39 – Escavações obrigatórias, principal fonte de obtenção de enrocamento.

3.3.3 Emprego e Processo Construtivo

Devido sua característica os enrocamentos são materiais aplicáveis em diferentes locais e com diferentes finalidades. É praticamente um material de uso geral e sem restrições.

Os principais campos de aplicação dos enrocamentos são as barragens, as obras portuárias, as vias de comunicação e os aeroportos. Dentre estes, destaca-se a construção das grandes barragens onde os enrocamentos mostraram o seu grande potencial de utilização, tanto no que se refere aos custos, quanto às características geomecânicas.

Como o nosso foco são as barragens, é importante comentar os processos construtivos. De maneira geral os processos executivos pouco alteraram. As alterações maiores foram no campo de equipamentos e zoneamento adotados, (tipos de enrocamento).

O lançamento em ponta de aterro é usado quando não há compactação com rolo vibratório, isto ocorre normalmente á frente de lançamento e na presença de lâmina d'água, figura, 3-40.



Figura, 3-40 – Lançamento em ponta de aterro.

O alteamento das estruturas de enrocamento é feito com o lançamento, espalhamento com trator de esteira e compactação com rolo vibratório.

O lançamento é feito em camadas que variam de 0,40 á 1,60 m de espessura conforme especificado no zoneamento, ver figuras, 3-30 e 3-33.

É comum, principalmente nas regiões onde se deseja uma maior rigidez do enrocamento proceder, o lançamento de água concomitantemente com a compactação, figuras, 3-41 e 3-42.



Figura, 3-41 – Lançamento e espalhamento do enrocamento.



Figura, 3-42 – Molhagem e compactação.

3.4 CONTROLE TECNOLÓGICO

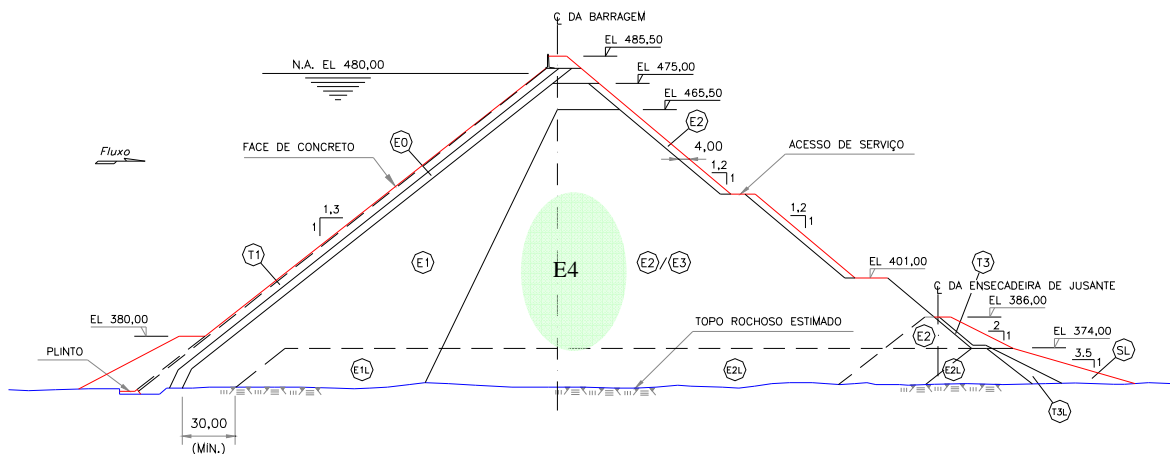
Parte fundamental para obtenção da qualidade dos enrocamentos compactados é o controle tecnológico cujas informações são importantes para verificações de projetos e também como estudos dos enrocamentos com materiais de construção.

A observação do comportamento em protótipos, barragens, auxilia na busca de novos procedimentos construtivos, na abertura das faixas de materiais a serem utilizados de maneira a otimizar os balanceamentos de materiais escavados, como os utilizados nos aterros.

O controle tecnológico da construção de ambas as obras foram feitos com base em controle de equipamento de compactação, número de passada, umedecimento do material, espessura da camada e ensaios de materiais. Os ensaios realizados foram de granulometria e densidade “in situ”. Em função do tipo de material envolvido, estes ensaios apresentam um grau de dificuldade relativamente alto, apesar do conceito simples de execução.

Para cada projeto é definido uma quantidade de ensaio de granulometria e densidade por tipo de material. Esta quantidade varia da ordem de um ensaio para cada 50.000,00 m³ á 100.000,00 m³ de enrocamento lançado. Para os enrocamentos graúdos o número de ensaio é menor.

A figura, 3-43 mostra a seção típica do zoneamento adotado nas barragens das obras de Itá e Machadinho. Na barragem de Machadinho a zona E3 foi subdividida em E3, E3' e E4. Para se ter uma idéia da magnitude desta atividade, nas obras das barragens de Itá e Machadinho, com cerca de 7.000.000,00 m³ e 6.500.000,00 m³ respectivamente, fez-se da ordem de 160 ensaios em cada obra.



Figura, 3-43 – Seção típica do zoneamento adotado nas obras de Itá e Machadinho.

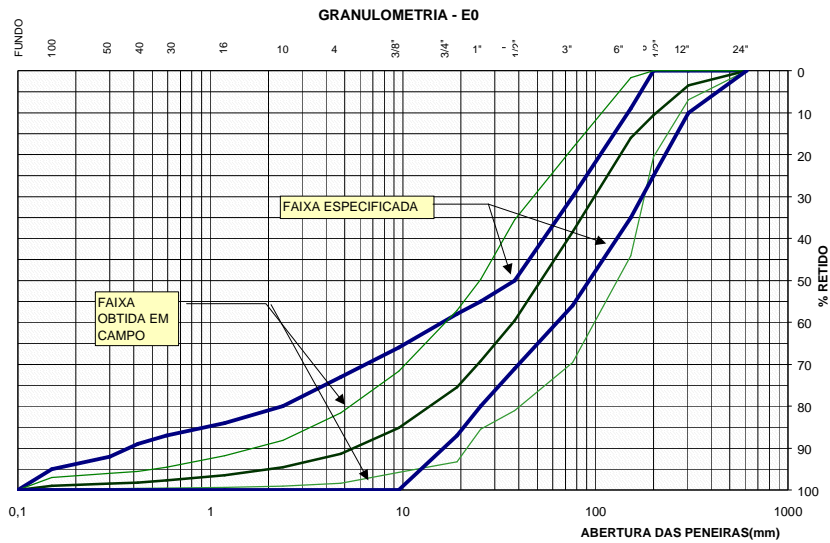
3.4.1 Ensaio Granulométrico

O ensaio de granulometria é feito por peneiramento. Inicialmente seleciona-se um determinado local da praça com a finalidade de identificar a zona e o material correspondente especificado no projeto. Uma vez identificado o tipo de material (E0...E4), e a localização (estaca e afastamento) delimita-se a área com gabaritos verificando-se que todos os equipamentos e materiais necessários para a realização do ensaio estão apostos, como por exemplo, material para anotação, pás, picaretas, lona plástica, balança, gabaritos, peneira e mesmo retro escavadeira estão apostos. Na seqüência inicia-se o ensaio e promove-se a remoção de uma quantidade de material, o qual medido com gabaritos ou peneirado em função do diâmetro, pesado, separado e guardado até que termine o ensaio, ver figura, 3-44.

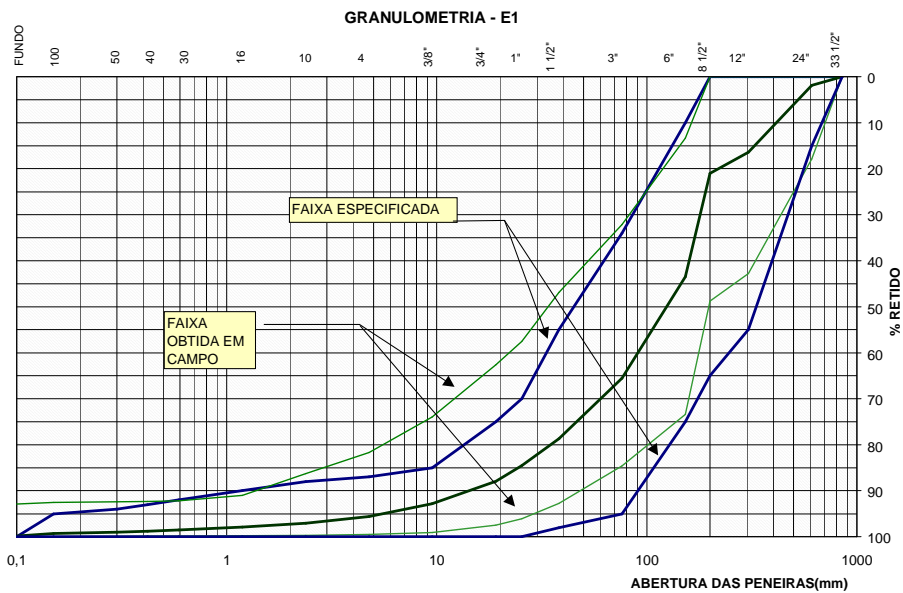


Figura, 3-44 – Controle tecnológico do enrocamento – ensaio granulométrico.

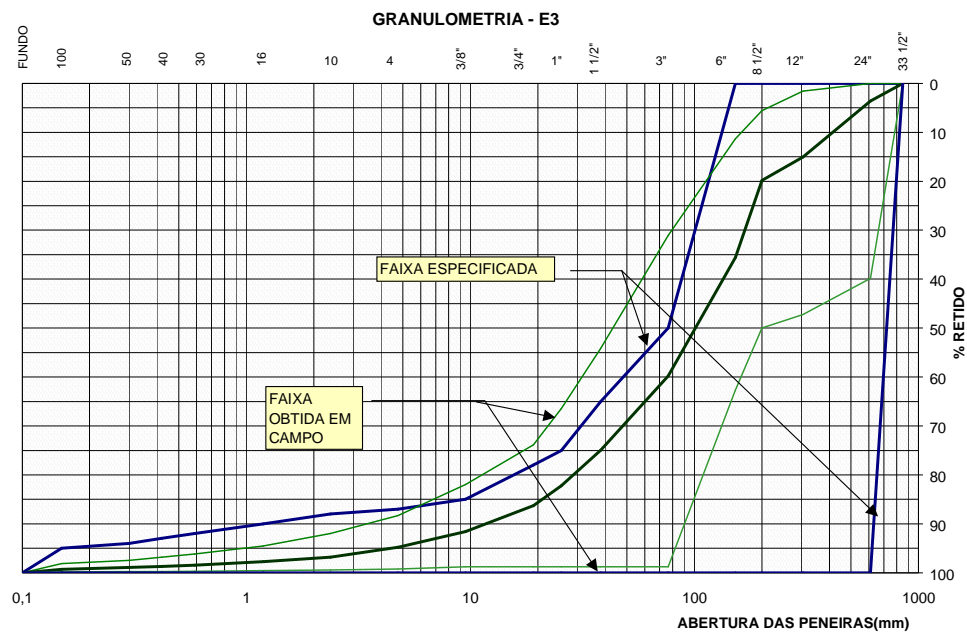
Os resultados dos ensaios são registrados e comparados com as faixas granulométricas especificadas no projeto. Quando o material não atende a faixa especificada se faz necessário o ajuste da granulometria. Isto pode ser feito com alteração da malha de detonação, obtenção do material na sua procedência, ou através de composições feitas com materiais em pilhas de estoque ou proveniente de outra frente de escavação. As figuras, 3-45 á 3-47 mostram os resultados dos ensaios granulométricos.



Figura, 3-45 – Gráfico granulométrico - Material E0 da figura, 3-43, enrocamento fino.



Figura, 3-46 – Gráfico granulométrico - Material E1 da figura, 3-43, enrocamento médio.



Figura, 3-47 – Gráfico granulométrico - Material E3 da figura, 3-43, enrocamento graúdo

3.4.2 Ensaio de Densidade

O ensaio de controle tecnológico é o ensaio para a determinação da densidade “in situ”. Este ensaio é similar ao ensaio com o frasco de areia utilizado nos solos. Para as transições e mesmo o enrocamento fino é possível este tipo de ensaio. Contudo como se trata de grandes volumes, no caso dos enrocamentos médios e graúdos, o que necessitaria de uma preparação e estocagem de areia para este ensaio “areia seca e aferida”, substitui-se a areia por água.

Logo o ensaio consiste em medir o volume ocupado pelo material removido e pesado no ensaio de granulometria. Para isto, com o auxílio de um gabarito metálico ou de madeira demarca-se o local. O gabarito é nivelado e toda a superfície é coberta com material impermeável, (lona plástica). Mede-se o volume de água necessário para nivelar com o gabarito, obtêm-se a leitura inicial de volume. Após a remoção do material a cava é revestida com lona plástica, procedendo-se o preenchimento com água até nivelar-se com o gabarito, fazendo então a leitura final de volume. Os volumes são devidamente medidos com hidrômetro. Os equipamentos complementares para os ensaios são compostos por carro pipa e hidrômetro.

Como a densidade é a relação entre peso e volume, temos:

$$\gamma = \frac{P}{V_c} \quad \text{e} \quad V_c = V_{Lf} - V_{Li}$$

Onde:

P → peso do material removido da cava, (considerado seco)

V_c → volume da cava.

V_{Lf} → volume final de água medido.

V_{Li} → volume inicial de água medido.

As figuras, 3-48 e 3-49 mostram as atividades de execução do ensaio de determinação da densidade “in-situ”, bem como a montagem do gabarito, remoção, pesagem e preenchimento da cava com água para a medição de volume. Os ensaios são tabulados e arquivados de maneira a possibilitar o tratamento estatístico destes. A tabela, 3-7 apresenta os resultados médios obtidos dos ensaios de cada material e as figuras, 3-50 e 3-51, o histograma das densidades “in situ”.



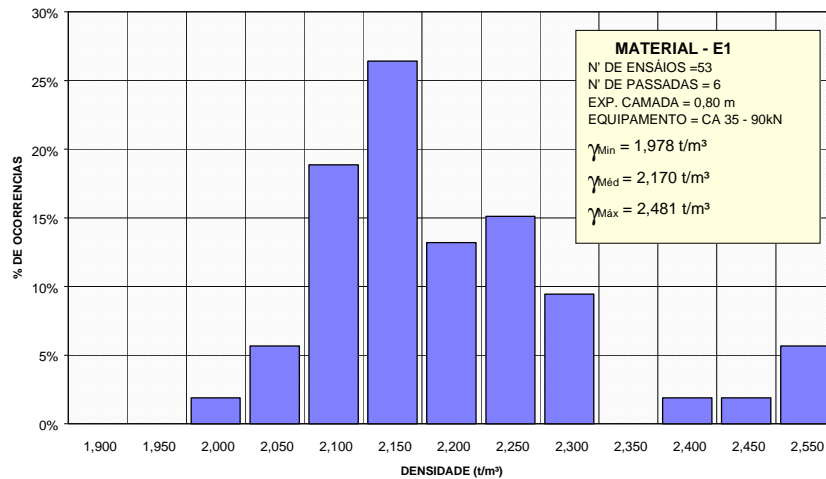
Figura, 3-48 – Ensaio de densidade “in-situ” na transição.



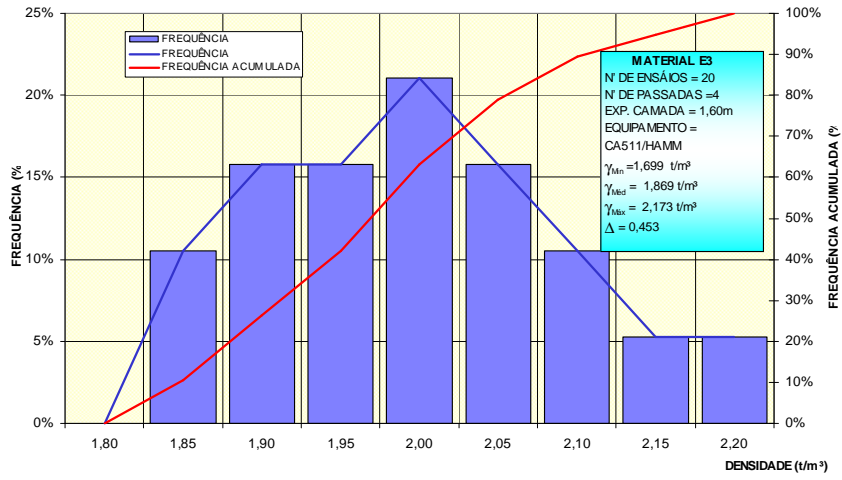
Figura, 3-49 – Realização do ensaio de densidade “in-situ” em enrocamento médio.

BARRAGEM	ALTURA	MATERIAL				
		Rocha Predominante	Zonas	Densidade in situ $\gamma(t/m^3)$	Índice de vazios - e	No. Ensaios
ITÁ	126 m	Basalto Básico	E0	2.308	0.211	42
			E1	2.170	0.322	53
			E2	2.084	0.297	11
			E3	2.066	0.383	42
MACHADINHO	126 m	Basalto – Ácido Riodacito	E0	2.027	0.325	55
			E0'	2.008	0.381	5
			E1	2.030	0.270	71
			E2	2.017	0.342	4
			E2'	1.979	0.367	8
			E3	1.967	0.377	19
			E3'	2.019	0.339	4
			E4	2.034	0.314	10

Tabela, 3-7 – Resultados dos ensaios de densidade.



Figura, 3-50 – Histograma dos ensaios de densidade “in-situ” do material E1, figura, 3-43.

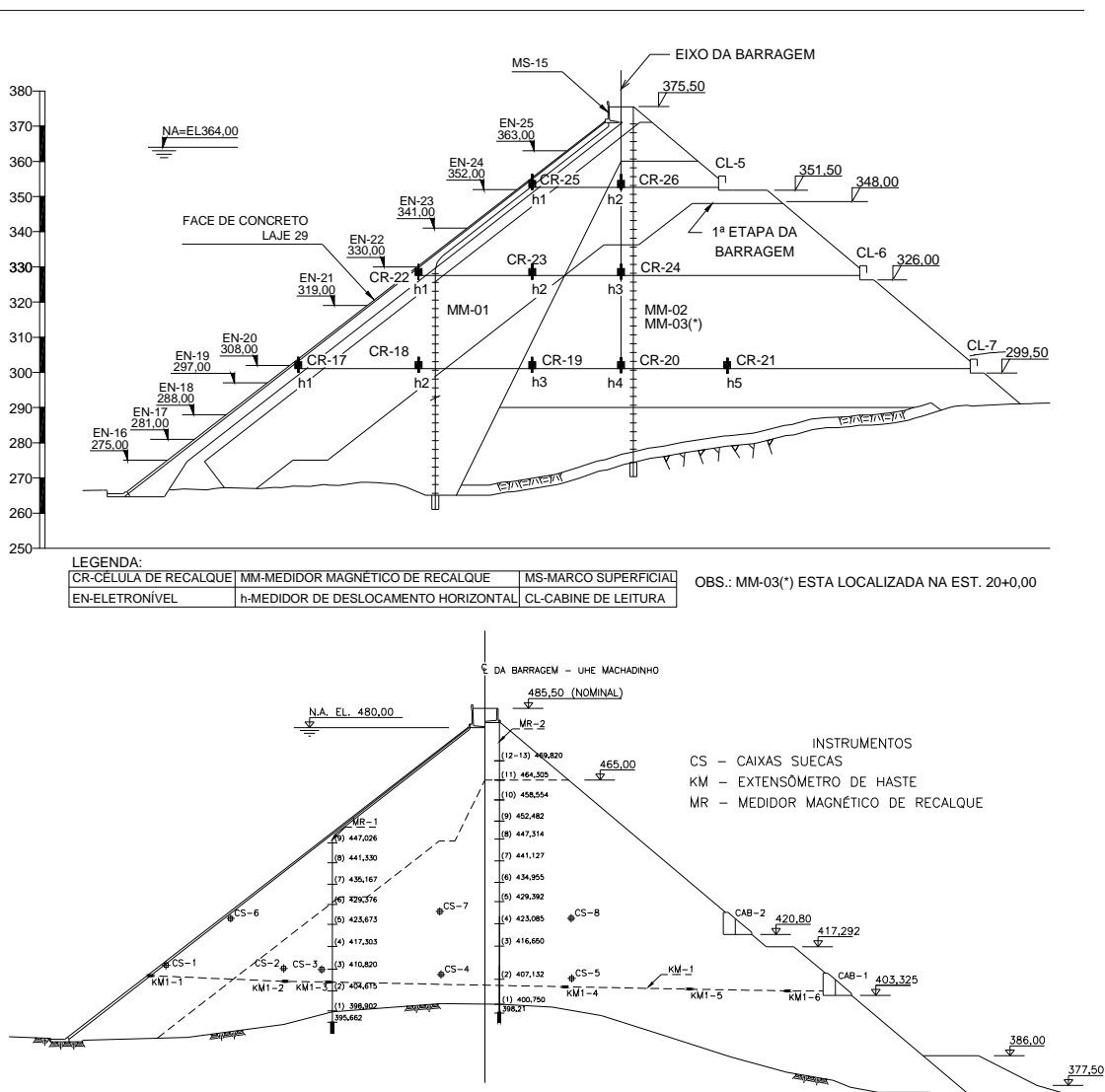


Figura, 3-51 – Histograma dos ensaios de densidade “in-situ” do material E3, figura, 3-43.

CAPÍTULO 4 MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO.

4.1 INSTRUMENTAÇÃO

De um modo geral para o controle da estrutura da barragem é projetado e implantado um sistema de auscultação para a medição das deformações horizontais e verticais do corpo da barragem e da estrutura de vedação, laje. A figura, 4-1 mostra seções instrumentais da barragem de Machadinho.



Figura, 4-1 – Seções instrumentais – Barragem de Machadinho.

Os instrumentos que comumente compõem este conjunto são:

- a) Medidores de deformação vertical:

- Caixas Suecas;
 - Medidor Magnético de Recalque.
- b) Medidores de deformação horizontal:
- Extensômetro Múltiplo;
 - Marco de Assentamento Superficial;
 - Medidor Horizontal Magnético.
- c) Medidor de junta:
- Medidor de Junta simples;
 - Medidor Triortogonal de Junta.
- d) Deformada da laje:
- Eletro Níveis;
 - Inclinomêtro.
- e) Medidor de Vazão de Infiltração.

Em algumas obras são adicionados outros tipos de aparelhos como:

- a) Medidores de tensão na ferragem da laje, tensomêtros;
- b) Medidores de pressão total, usados algumas vezes para medir as tensões de contato entre enrocamento e muro (por exemplo). Pouco usado;
- c) Piezômetros para medição de pressão neutra, logicamente não do enrocamento, mas nas ombreiras. Pouco usado

Para melhor exemplificar, falaremos na seqüência sobre os instrumentos mais usuais.

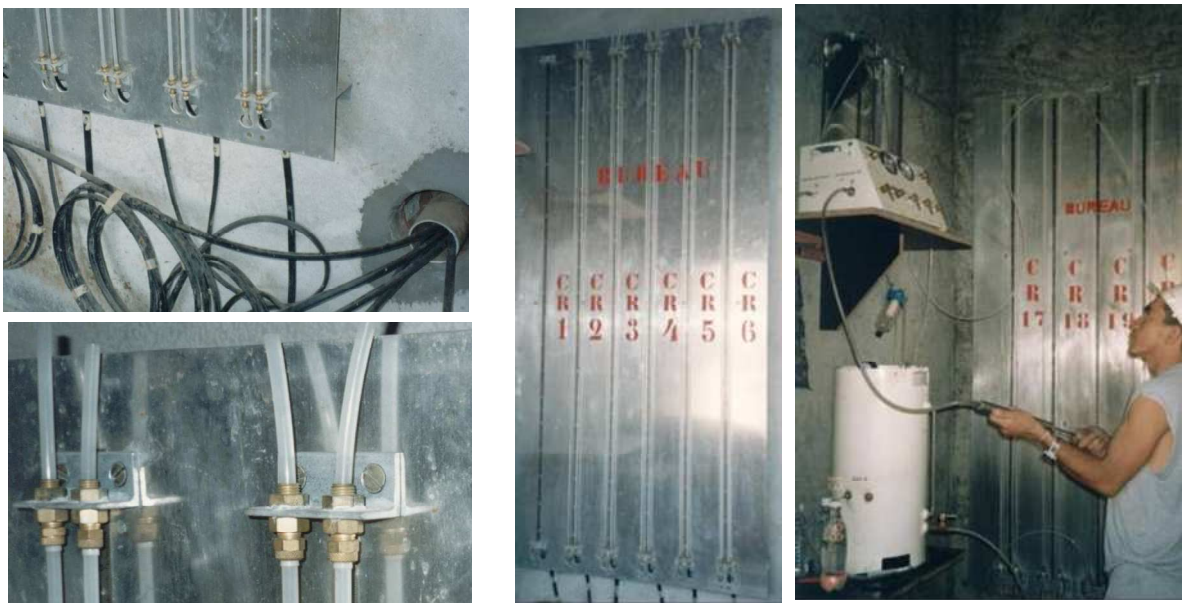
4.1.1 Medidor de recalque tipo Caixas Suecas ou Células de Recalque

Estes instrumentos são extremamente simples e confiáveis. Seu funcionamento é baseado no princípio dos vasos comunicantes. Uma desvantagem deste instrumento é que em função do seu sistema de funcionamento fica impraticável instrumentar pequenas camadas, desta forma normalmente a espessura da camada medida fica da ordem de 20,00 m á 30,00 m. Cuidado especial deve ser dado ao se executar a leitura utilizando água desaerada, proceder a circulação no sistema e fazer a complementação da água com leveza. A figura, 4-2 mostra a caixa sueca e a sua instalação no corpo da barragem, já a figura, 4-3 apresenta os terminais das caixas suecas nas cabines de medição localizadas no talude de jusante. É importante salientar que a

complementação de água no interior da tubulação de leitura para a equalização das colunas d'água no aparelho e na cabine de medição, e vasos comunicantes é um processo cuidadoso de maneira a se evitar a inclusão de bolhas de ar ao sistema.



Figura, 4-2 – Caixa Sueca – aparelho e instalação.



Figura, 4-3 – Cabine de leitura – terminais de leituras das Caixas Suecas.

4.1.2 Medidor Magnético de Recalque

Este instrumento consiste em placas metálicas sobrepostas na vertical e conectadas por um tubo de referência. O espaçamento entre placas e a quantidade, é função do projeto, residindo neste fato uma boa vantagem. Cada aparelho tem uma diferente composição de número de placas em função da espessura de cada camada que se deseja medir, porem, é usual monitorar uma espessura da ordem de 6 m. Para a execução das leituras, um sensor magnético é introduzido no tubo, e ao passar pela placa metálica, esta é detectada e faz com que o receptor emita um sinal

sonoro. O cabo de ligação, sonda transdutor, é grafado metricamente possibilitando determinar o ponto exato da posição de cada placa. A figura, 4-4 mostra os cuidados com a instalação das placas do medidor magnético de recalque.



Figura, 4-4 – Medidor de Recalque magnético – croqui e detalhes de instalação.

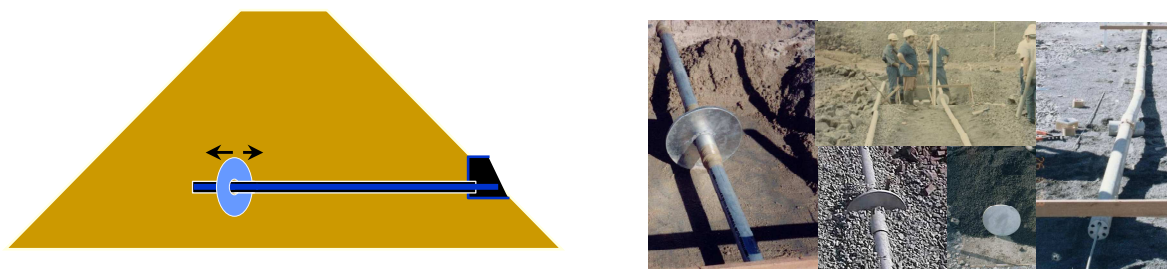
A figura, 4-5 mostra o instrumento já instalado, o processo e a leitura.



Figura, 4-5 – Medidor de Recalque magnético – Leitura do instrumento.

4.1.3 Extensômetro Múltiplo

São hastes metálicas fixadas no extremo do interior da barragem e livre para movimentação no outro extremo localizado na cabine de medição. Estas hastes medem as deformações horizontais do corpo da barragem, a figura, 4-6 mostra o croqui e a instalação deste instrumento. Na cabine de leitura, neste extremo livre, é acoplado um anel de referência que serve de base para a execução das leituras que podem ser efetuadas através de régua, paquímetro ou relógio comparador, figura, 4-7.



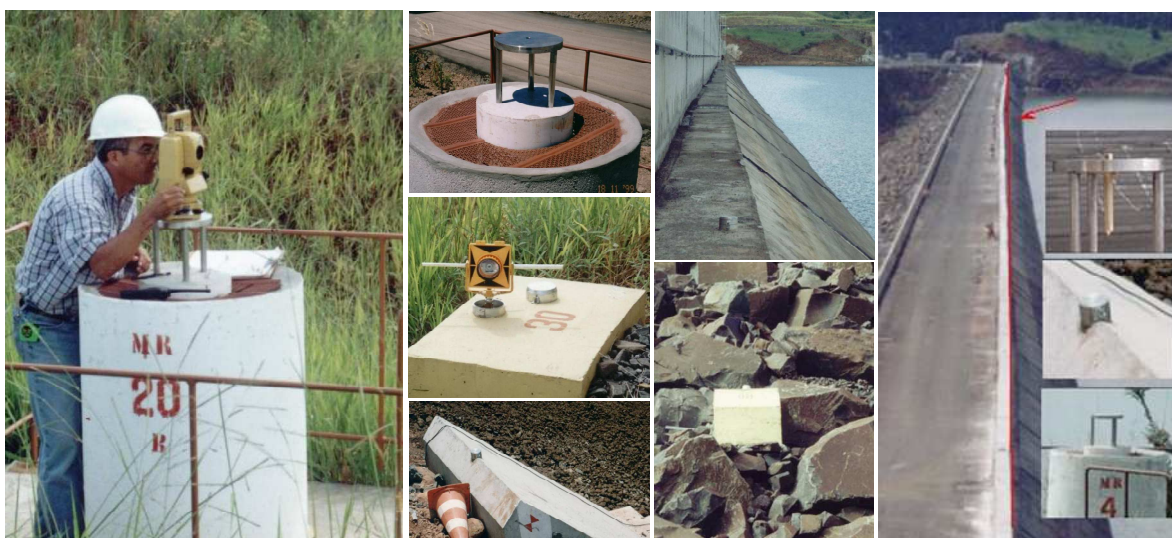
Figura, 4-6 – Extensômetro múltiplo de haste – Croqui e detalhes de instalação.



Figura, 4-7 – Extensômetro múltiplo de haste – Leitura do instrumento.

4.1.4 Marco de Assentamento Superficial

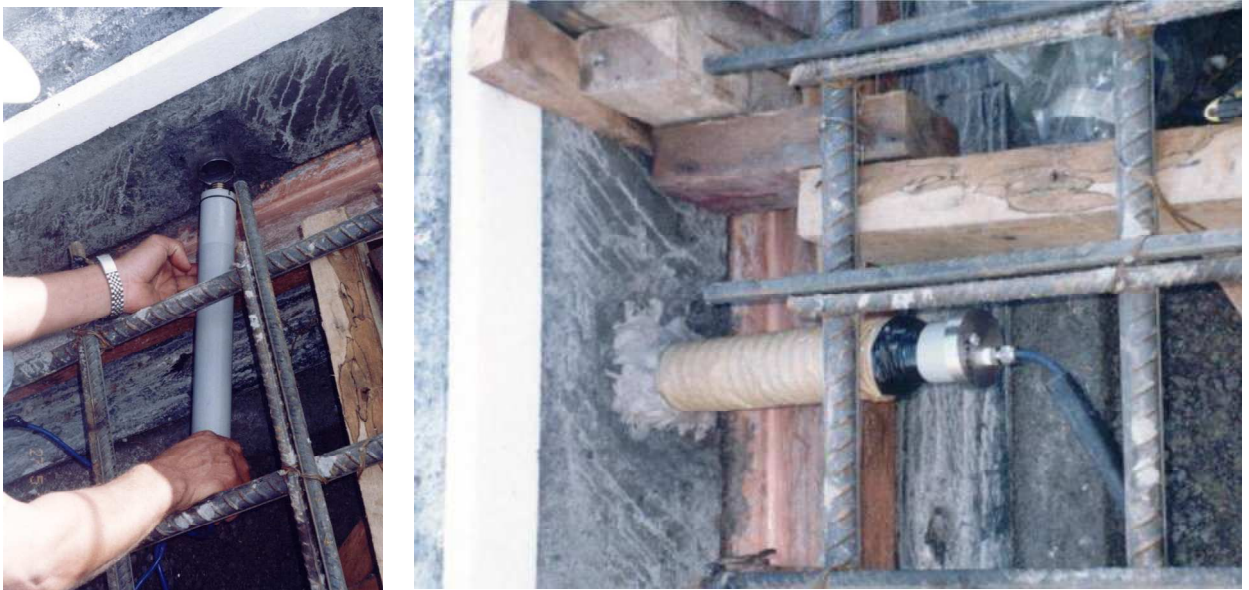
Marco de assentamento superficial para acompanhamento dos deslocamentos verticais e horizontais das estruturas é instalados nas superfícies a serem observadas, tais como; taludes da barragem, crista e nas cabines de medição. A leitura é feita topograficamente, figura, 4-8.



Figura, 4-8 – Marco de Assentamento Superficial.

4.1.5 Medidor de Junta

Fornece a leitura dos deslocamentos relativos ou absolutos entre dois pontos, ou melhor, qualificando-os, e mede a abertura ou fechamento entre dois pontos. O sistema de aquisição da leitura pode ser de funcionamento elétrico, (“strain gauge”), ou mecânico, (relógio comparador). A opção por um ou outro sistema é função da acessibilidade futura do instrumento, a figura, 4-9 mostra um medidor de junta elétrico instalado na laje da face da barragem.



Figura, 4-9 – Medidor de Junta elétrico.

4.1.6 Medidor Triortogonal de Junta

Fornece a leitura, dos deslocamentos relativos ou absolutos entre dois pontos, os quais são medidos em três direções ortogonais, com auxílio de um sistema de apoio construídos em aço inox, e fixados convenientemente na estrutura. O sistema de aquisição da leitura pode ser de funcionamento elétrico, ou mecânico. A opção por um ou outro sistema é função da acessibilidade futura do instrumento, a figura, 4-10 mostra o medidor triortogonal de junta elétrico instalado no plinto cujo acesso fica impossibilitado após o enchimento do reservatório. Já a figura, 4-11 mostra um medidor triortogonal de junta mecânico cujo custo é muito menor e possibilita na manutenção, fazendo com que a vida útil deste modelo ser muito superior ao elétrico.



Figura, 4-10 – Medidor de Triortogonal de Junta elétrico.



Figura, 4-11 – Medidor Triortogonal de Junta mecânico.

4.1.7 Eletro Níveis

São instrumentos que medem as inflexões da laje, isto é, cada sensor instalado possui internamente três ligações que através de diferença de resistividade determina a inclinação entre a posição inicial e o de um tempo posterior qualquer, a figura, 4-12 mostra a instalação deste instrumento.



Figura, 4-12 – Eletro Nível – instalação na face laje de vedação.

4.1.8 Medidor de Vazão

Os medidores de vazão de infiltração medem as vazões gerais de infiltração na estrutura de barramento. Normalmente são de formatos triangulares, em função das estimativas do vão. Pode-se adotar também medidores retangulares. Estes instrumentos são instalados à jusante, aproveitando-se a incorporação e vedação da ensecadeira de jusante, então se constrói uma estrutura de captação das águas internas à barragem. Estas águas são oriundas das infiltrações pela fundação, juntas da laje de vedação, ombreiras, e águas da pluviometria local, e também, registrada por fissuras e/ou trincas na laje.

Em função das condições de fundação do plinto, do seu perímetro e área da laje, estimam-se valores de infiltração esperados. O acompanhamento deste instrumento permite avaliar estas premissas de projeto. Como ordem de grandeza, barragens de magnitude da UHE de Itá e/ou Machadinho, considera-se valores esperados com vazões da ordem de, 250 l/s.

A figura, 4-13 mostra o instrumento em operação. Este equipamento é dimensionado para uma capacidade de medição muito superior a vazão estimada, cerca de 10 á 15 vezes o valor esperado. Este dimensionamento se justifica pelas incertezas do sistema de geral vedação composto pelo plinto, junção plinto/laje e também as questões das feições geológicas da fundação. Este conjunto de variáveis pode acarretar infiltrações superiores das estimadas, como também temos a questão da própria laje de vedação de montante que pode, como já ocorrido, apresentar trincas, que elevam significativamente as vazões.



Figura, 4-13 – Medidor de Vazão Triangular.

4.1.9 Pêndulo direto

O pêndulo direto mede o tombamento, e inclinação da estrutura. Seu funcionamento é simples e se baseia no fio de prumo. O ponto fixo é instalado em um ponto na parte superior da estrutura e o prumo fica submerso em um tanque de óleo, para evitar oscilações, em um ponto na base da estrutura. Normalmente o fio que conecta as duas extremidades fica protegido com tubo de PVC ou aço com diâmetro não inferior á 200 mm. Podem-se ter, ao longo do fio, vários pontos de medição, porém é muito comum ter-se somente um ponto de leitura que fica locada junto á base. A figura, 4-14 mostra o instrumento e a leitura sendo executada.



Figura, 4-14 – Pêndulo direto.

4.2 ACOMPANHAMENTO

Como já mencionado, a questão de segurança das barragens sempre é fator de muita preocupação. Considerando que apesar da evolução em algumas áreas, as barragens são construídas com cunho empírico. As necessidades e a utilização de materiais com características de resistência menor sem a devida comprovação científica tornam cada obra um novo laboratório para análise e avaliação do desempenho. Logo as informações obtidas da instrumentação podem e devem ser disponibilizadas para estudos de maneira a se facilitar as modelagens de laboratório, proporcionando meios de comparação com a situação real. Em parte o controle tecnológico e a auscultação destas estruturas, têm ajudado no mínimo para acompanhar e verificar as decisões de projeto e de construção.

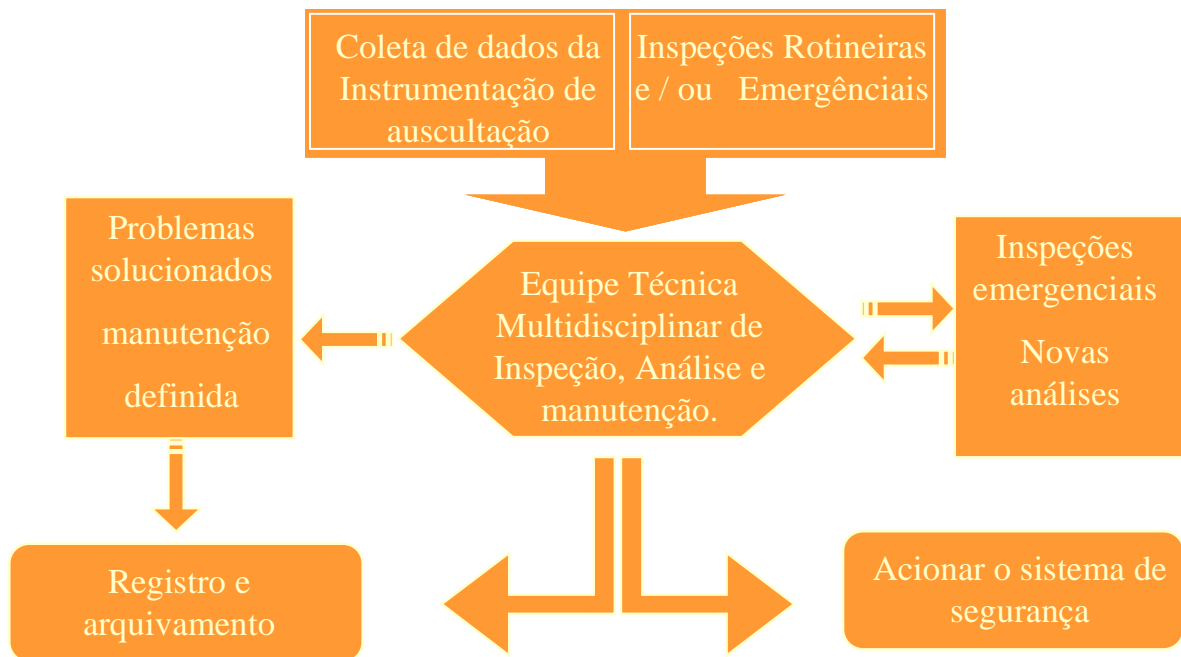
Apesar de se observar diferenças distintas entre cada obra, principalmente entre as construídas no início da década de 70, e as mais recentes, uma questão importante nestas estruturas é o fato de que as principais deformações são registradas durante a construção e na fase do enchimento do reservatório. As deformações que são extremamente importantes principalmente as da região de contato com a laje de vedação, costumam ocorrer cerca de 80% á 90% na fase construtiva. Este fato leva á uma situação de conforto, uma vez que normalmente a laje só é construída após o alteamento do enrocamento. Contudo mesmo assim tem se registrado ocorrências indesejáveis como, fissuras e mesmo trincas na laje elevando as vazões estimadas de projeto da ordem de 250 l/s, para vazões superiores á 1200 l/s. Estas vazões elevadas não são motivo de preocupações maiores, pois não comprometem a questão de estabilidade da estrutura.

Um dos fatores que tem dado tranqüilidade é exatamente a instrumentação de auscultação que permite o acompanhamento praticamente sem interrupções ao longo da vida da barragem. Além do acompanhamento através da auscultação deve-se sempre proceder as inspeções visuais das estruturas.

As atividades de leitura devem ser executadas por técnicos treinados e experientes, já as atividades de inspeção visual e análises das instrumentações devem ser feitas por especialistas das áreas geotécnicas, estruturas e geologia principalmente. A preocupação de que a equipe responsável pela análise deva ser especializada, recai no fato de que uma interpretação de algum

dado, leitura ou uma ocorrência observada na inspeção visual, não seja individualizada e sim analisada, considerando-se outras leituras e outras ocorrências.

De um modo geral a figura, 4-15 mostra um fluxograma das atividades de auscultação e inspeção de estruturas civis feitas em barragens.



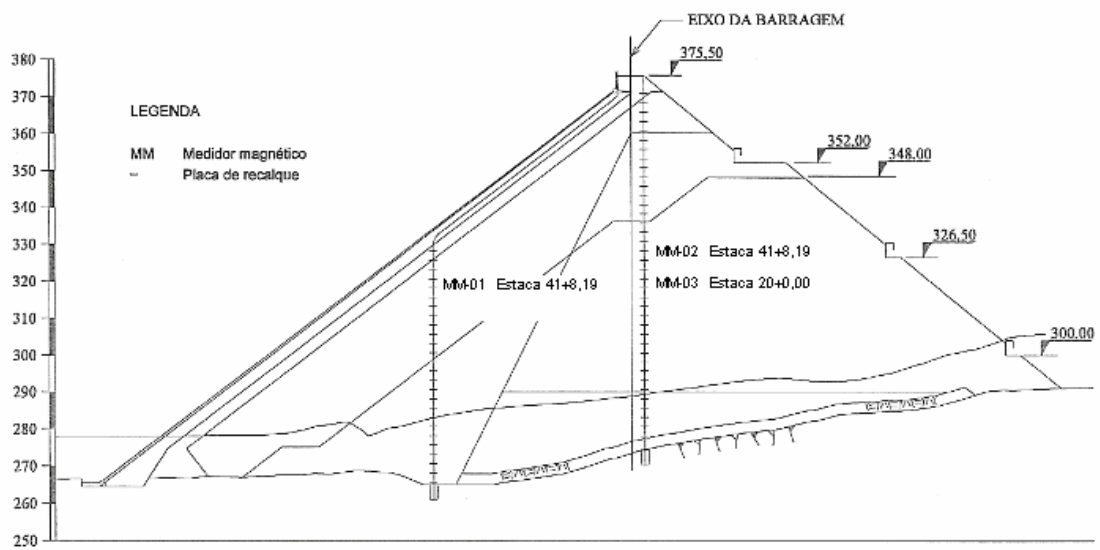
Figura, 4-15 – Fluxograma das atividades de auscultação.

Desta forma pode-se avaliar o comportamento da estrutura durante a construção, na fase de carregamento hidráulico, enchimento do reservatório, e posteriormente durante sua vida operacional.

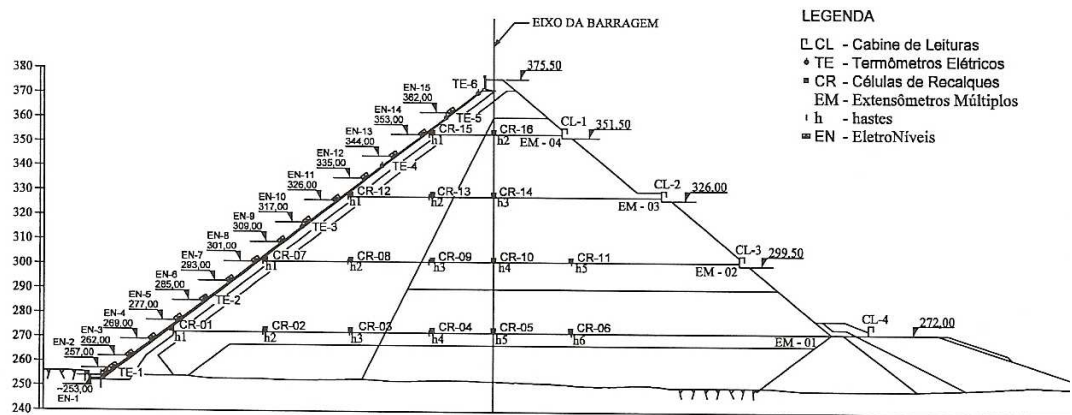
Na fase de construção cada alteamento representa um carregamento, o que permite observar as deformações e com base nos ensaios tecnológicos procede-se as avaliações dos módulos de deformabilidade. Este acompanhamento é útil no ajuste dos parâmetros de deformabilidade, o que permite e calibra os estudos de tensão deformação da estrutura da barragem. Desta forma a extrapolação do comportamento é ajustada no decorrer da própria construção onde os resultados dos controles e da instrumentação vão aferindo principalmente os parâmetros de deformabilidade. Logo as previsões das deformações ao final da construção e com o carregamento hidráulico ganham uma maior confiabilidade. Na seqüência será apresentado o

comportamento durante o período construtivo e os estudos de avaliação dos módulos de deformabilidade.

A figura, 4-16 mostra seção instrumentada dos medidores magnéticos e a figura, 4-17 o posicionamento das caixas suecas, extensômetros múltiplos e os eletro níveis na face de montante, ambas, barragem de Itá.



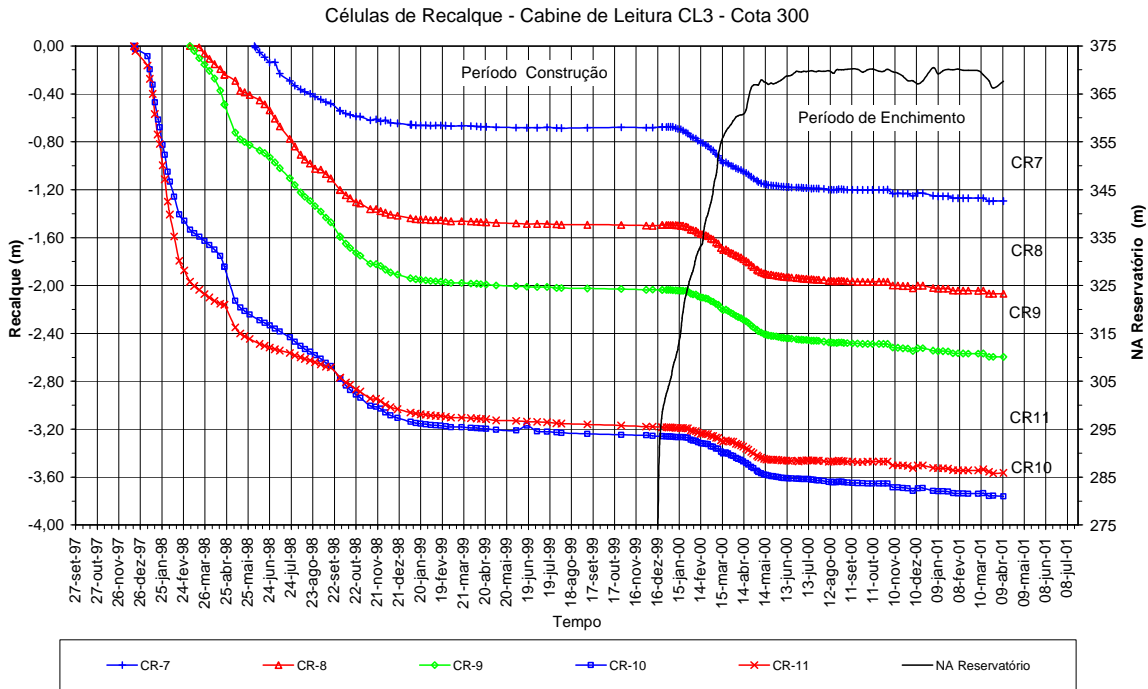
Figura, 4-16 – Posição dos medidores Magnéticos de Recalque.



Figura, 4-17 – Posição das Caixas Suecas, Extensômetros Múltiplos e eletro níveis.

Como mostra a figura, 4-17 as espessuras das camadas que cada Caixa Sueca mede a deformação, correspondem ao espaço entre sua cota de instalação e a fundação, o que equivale a uma camada muito espessa. Para atenuar esta condição, faz-se uma correspondência para que o espaçamento corresponda ao espaço entre duas linhas instrumentadas. Como exemplo a camada medida pela CR-08 é da ordem de, 32,00 m, espessura entre a CR-03 e CR-08, cotas 269,00 e 301,00 respectivamente. Esta espessura prejudica as avaliações principalmente as determinações dos módulos de deformabilidade.

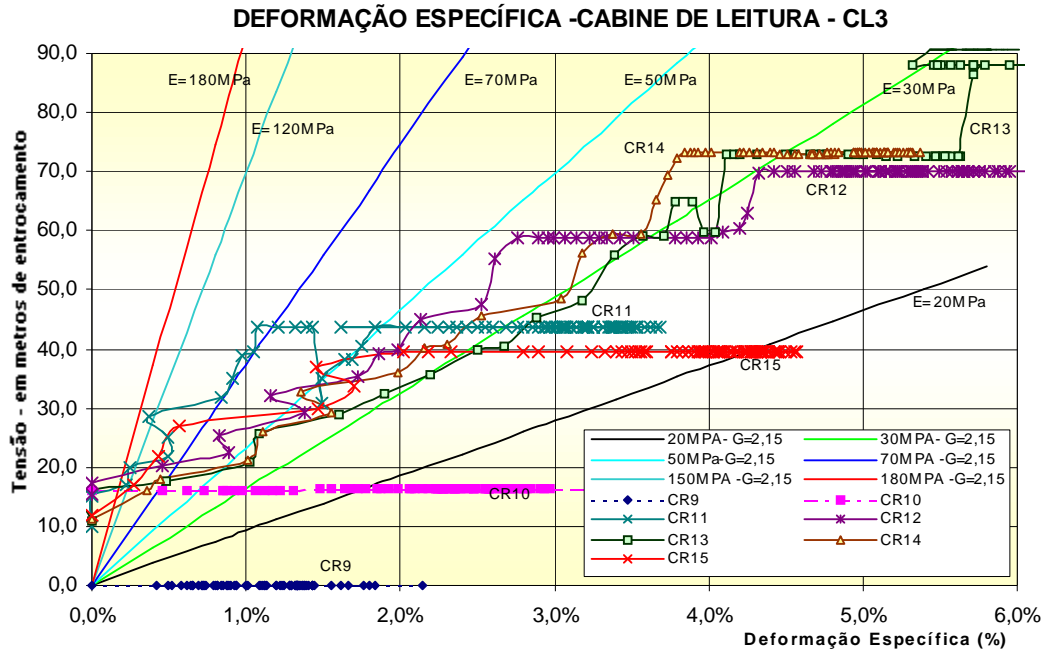
A figura, 4-18 mostra o recalque medido pelas caixas suecas com o tempo. No eixo “Y” na esquerda mostra os recalque e na direita o nível de água (NA) durante o enchimento do reservatório. Estes instrumentos mostram uma boa resposta ao carregamento. O gráfico da figura, 4-18 identifica-se claramente as fases construtivas, novembro/1997 á fevereiro de 1999, e a fase de enchimento do reservatório, dezembro/1999 a maio/2000. Nos anos de 1979 e 1980 mostram o recalque e a avaliação do módulo considerando-se os parâmetros dos materiais obtidos nos ensaios tecnológicos e os dados dos instrumentos.



Figura, 4-18 – Acompanhamento dos recalques com Caixas Suecas.

Já os desenvolvimentos das tensões ao longo do tempo não apresentam a mesma correspondência, apesar de se poder considerar como boa a relação, conforme pode ser visto na

figura, 4-19 onde são mostrados as curvas de tensão deformação e curvas de iso-módulos de deformabilidade.



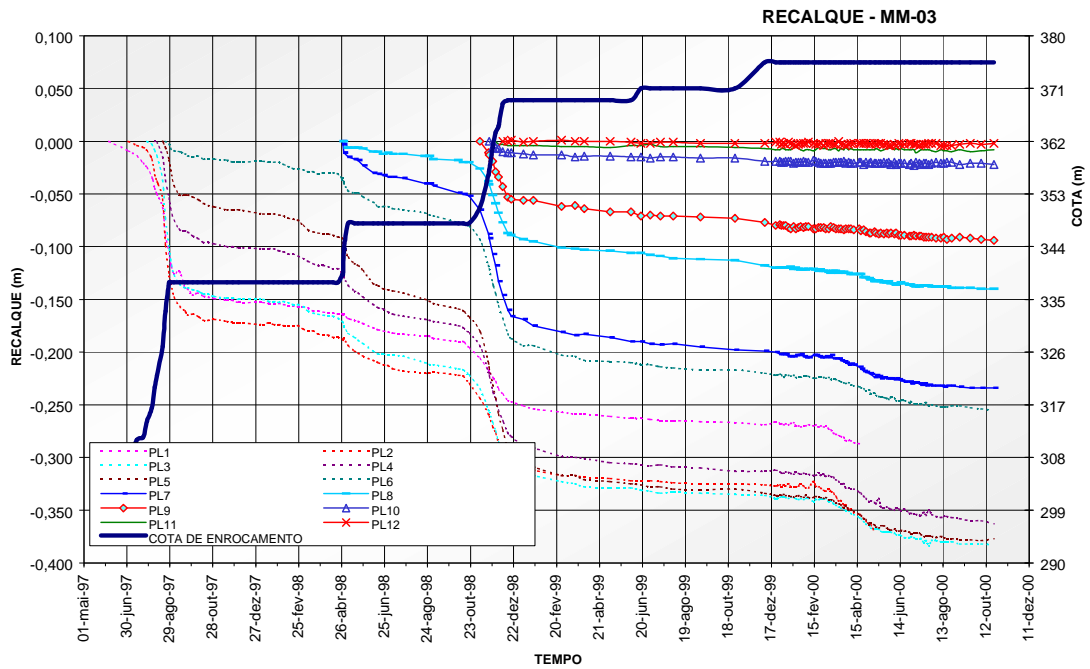
Figura, 4-19 – Avaliação dos Módulos de Deformabilidade – Caixa Sueca.

As Caixas Suecas apresentam leituras confiáveis, contudo em função das dimensões das camadas, normalmente superiores a 30 m, faz com que se perca um pouco a sensibilidade das deformações com os carregamentos que são da ordem de 0,80 m a 1,60 m. Isto fica mais claro quando compararmos o desenvolvimento das deformações das Caixas Suecas com os Medidores Magnéticos de deformação, figuras, 4-18 e 4-20 respectivamente.

A figura, 4-19 mostra o gráfico com a avaliação dos módulos. A resposta é muito boa mostrando uma relação entre o carregamento e deformação específica praticamente linear, o que equivale as curvas de igual módulo, apresentadas no mesmo gráfico.

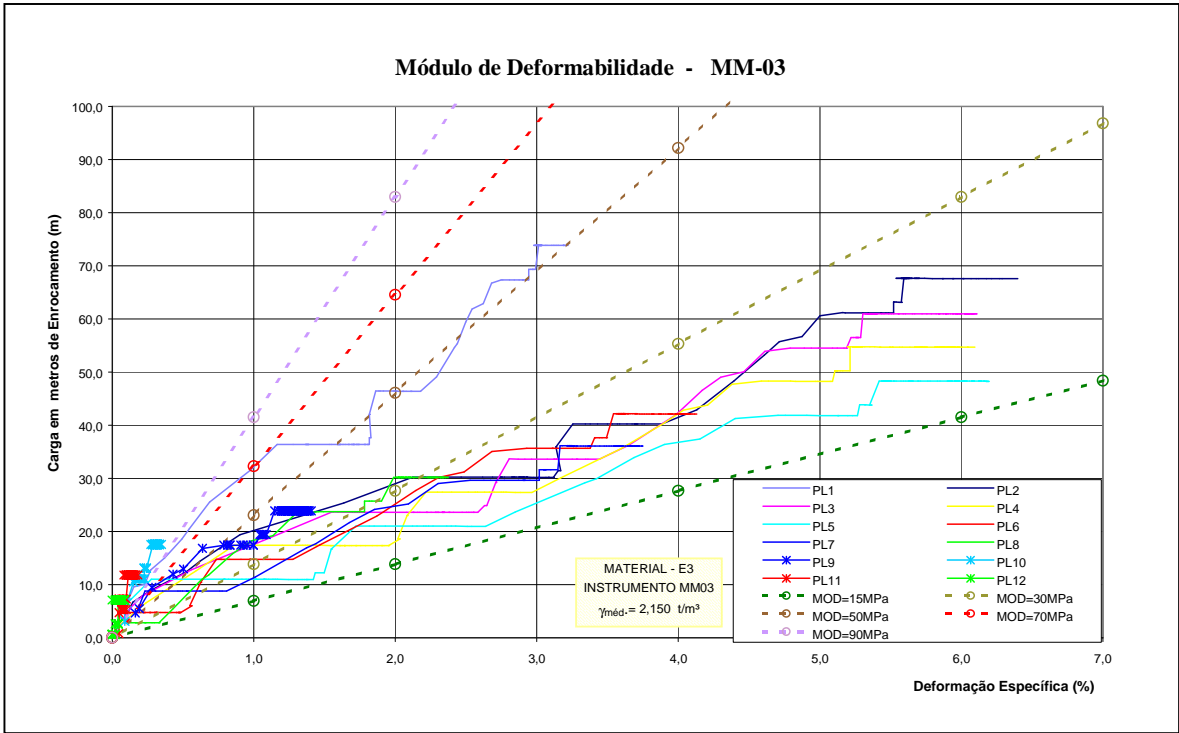
Os medidores Magnéticos de Recalque também são instrumentos confiáveis, e com uma enorme vantagem sobre as Caixas Suecas, que é a possibilidade de se acompanhar espessura de camadas muito menores, o que torna as informações muito mais sensíveis aos carregamentos, produzindo uma informação mais consistente. A desvantagem deste instrumento é a interferência que provoca com o processo construtivo. No caso das Caixas Suecas, esta interferência é momentânea, enquanto que os medidores Magnéticos de Recalque interferem durante todo o processo construtivo, ver figuras, 4-2, 4-4, 4-5, 4-16 e 4-17.

A figura, 4-20 mostra nitidamente a excelente resposta do Medidor Magnético de Deformação no que se refere ao carregamento construtivo, o instrumento é muito sensível ao alteamento do enrocamento, (aterro). Apesar de o gráfico estar mostrando somente à fase construtiva, a resposta ao carregamento hidráulico é igualmente muito bom.



Figura, 4-20 – Acompanhamento dos recalques com Medidor Magnético de Recalque.

Esta mesma sensibilidade pode ser observada na análise do gráfico de tensão deformação apresentado na figura, 4-21. Logo na avaliação dos módulos de deformabilidade, esta excelente correlação mostrada pelos medidores Magnéticos de Recalque, mostra claramente que o módulo de deformabilidade é uma característica do material e que a adoção de módulo tangente é perfeitamente sustentável.

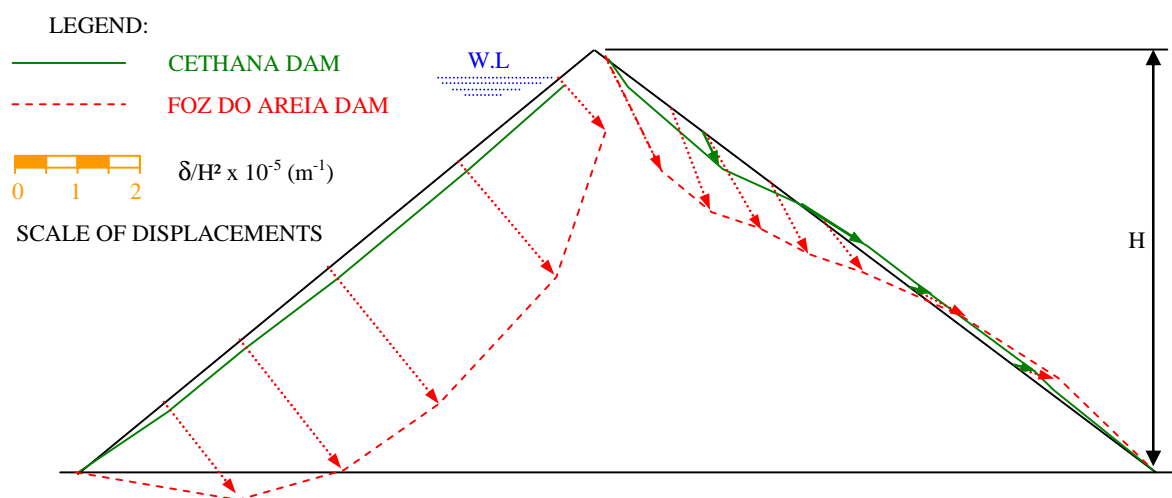


Figura, 4-21 – Avaliação dos Módulos de Deformabilidade - Medidor Magnético de Recalque.

CAPÍTULO 5 ZONEAMENTO DAS BARRAGENS DE ENROCAMENTO

Com os estudos desenvolvidos no primeiro programa de P&D, “*Análise do Comportamento das Lajes de Concreto Armado nas Barragens de Enrocamento com Face de Concreto*” um dos aspectos relevantes foi a verificação da necessidade de se ter um zoneamento melhor definido para a estrutura de enrocamento”. A diferença de rigidez entre o concreto da face e a estrutura da barragem tem-se concentração de tensões elevadas e que podem facilmente exceder aos esforços resistentes da laje. Logo a questão do zoneamento se mostrou extremamente importante no que diz respeito a criar-se uma melhor condição de transição entre estas duas estruturas para buscar a maior suavização possível.

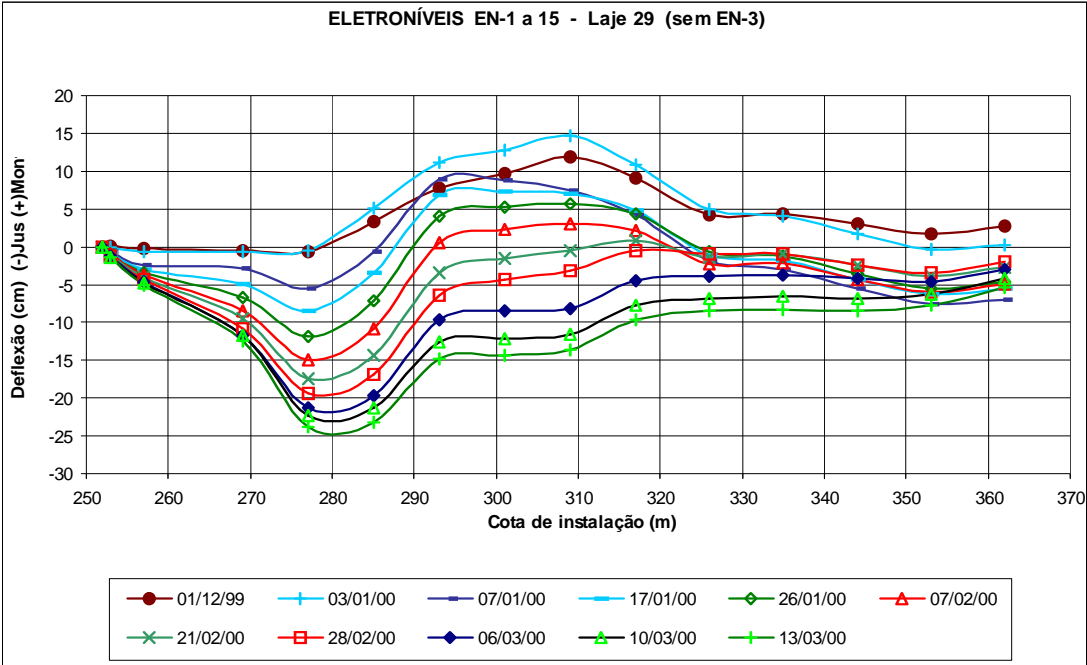
Nas barragens construídas na década de 70, os enrocamentos tinham uma característica muito “homogênea”. Esta particularidade era observada nos resultados dos estudos realizados e nos resultados da instrumentação. Esta condição de homogeneidade do material resultava em uma deformada da laje muito uniforme de formato circular e que foi aceita praticamente como deformada típica da laje das barragens de enrocamento com face de concreto. No trabalho “*A Study of Deformations in Concrete Faced Rockfill Dams*”⁵, apresenta esta deforma pós-enchimento do reservatório, e que está ilustrada na figura, 5-1. As modelagens matemáticas estão utilizando materiais homogêneos onde mostra esta mesma característica da deformada.



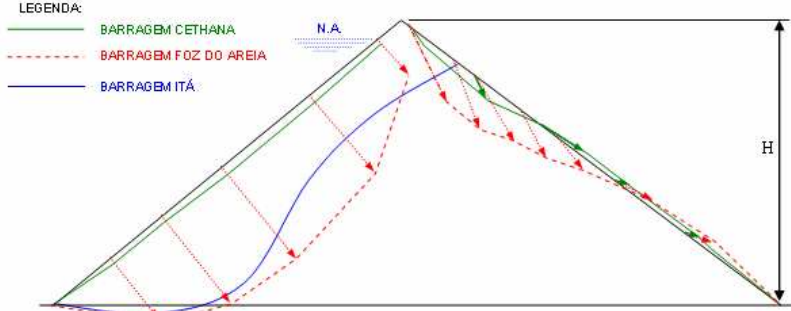
Figura, 5-1 – Movimentos observados nas Barragens de Cethana e Foz do Areia.

⁵ Sardinha, A. e Imaizumi, H. – trabalho publicado no livro “Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction, and Performance – Editado por J. Barry Cooke e James L. Sherard – outubro/1985

Contudo como o aproveitamento quase que integral dos materiais das escavações obrigatórias vem sendo uma necessidade econômica fundamental, é fácil de entender que a qualidade dos parâmetros geotécnicos foi afetada. A deformada apresentada nas barragens de Itá e Machadinho, por exemplo, apresentam características muito diferentes mostrando claramente a influência dos materiais utilizados, ficando clara a sua heterogeneidade. A deformada da laje observada nas barragens de Itá e Machadinho mostram uma característica não cilíndrica e não uniforme. A figura, 5-2 apresenta a evolução da deformada observada na laje da barragem de Itá com o carregamento hidráulico. A figura, 5-3 mostra o croqui comparativo das deformadas das lajes com o carregamento hidráulico das barragens de Cethana, Foz do Areia e Itá.



Figura, 5-2 – Barragem de Itá - Movimentação observada na Laje 29.



Figura; 5-3 – Croqui comparativo.

Esta nova condição requer o conhecimento dos parâmetros mostrando a importância de se estudar os enrocamentos e de uma maneira mais imediata induz a necessidade de se alterar os critérios de zoneamentos nas barragens. Esta modificação é importante para que se possam acomodar os materiais com características litológicas, geomecânicas e parâmetros geotécnicos muito diferentes, de maneira a proporcionar o desenvolvimento de tensões e deformações mais distribuídas e contínuas, sem que se produzam concentrações de tensões e deformações indesejadas.

5.1 PROPOSIÇÃO DE OTIMIZAÇÃO DO ZONEAMENTO DAS BEFC

O zoneamento interno da barragem, cuja evolução tem se dado de maneira a atender as necessidades de construção, cronograma, e aproveitamento dos materiais provenientes das escavações obrigatórias, etc... requerer cuidados, e a definição de critério que possam produzir uma melhor distribuição de esforços e deformações.

Segundo Paulo Cruz, um dos pontos de maior interesse no zoneamento de barragens é a diferente compressibilidade de materiais adjacentes, de modo a evitar a concentração de tensões, principalmente nas regiões próximas à laje.

O efeito do enchimento tem sido o causador das preocupações com relação ao desempenho desta estrutura no que se refere aos problemas de impermeabilização. O fato de se ter duas estruturas com propriedades tão diferentes, (enrocamento e concreto), tem proporcionado expectativas em cada processo de enchimento. Desta forma a questão de interface entre estes dois elementos da barragem é importante. Como foi, comentado sobre a questão de se criar uma zona de transição entre a laje e os materiais de menor qualidade, que normalmente são mais abundantes nestas construções, é fundamental para obter-se uma deformada mais suave, pontos de inflexão atenuados e deformadas mais previsíveis.

Nos estudos e pesquisas desenvolvidos, mostram certa coerência no zoneamento atual, contudo os estudos indicam que a zona de material mais rígido deve sofrer alteração, ter uma extensão maior. Com base nas análises feitas com as informações das instrumentações instaladas nos protótipos, eles indicam que a geometria da seção de zoneamento deva ser otimizada.

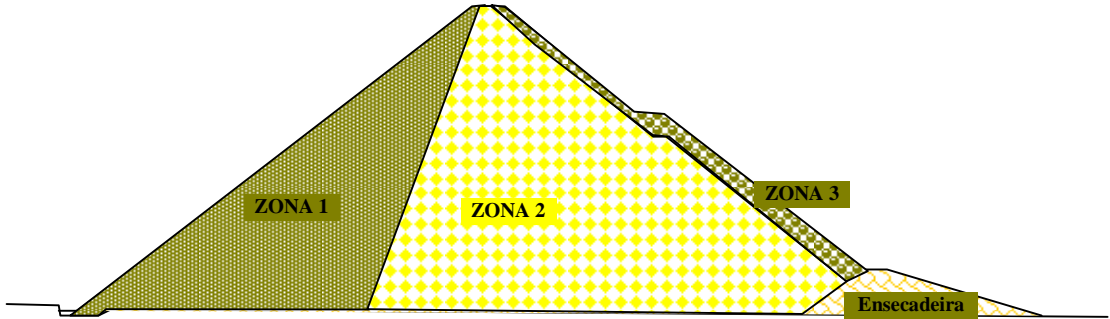
As diretrizes básicas que nortearam esta proposição de macro zoneamento, seção típica mostrada nas figuras, 83 e 84, têm como objetivo melhorar as interfaces entre os materiais de diferentes comportamentos de compressibilidade que são:

- a) A zona 1 requer um material com características litológicas, e de processo construtivo de melhor qualidade. Nesta região é recomendável:
 - Granulometria - $\phi_{\max} \leq 800$ mm;
 - Compactação – camada $\leq 1,00$ m com molhagem;
 - Material composto por rocha sã. Uma subdivisão desta zona poderá ser aceito material com até 20% de brecha ou pouco alterado(A2).
- b) A zona 2 pode ser composta com um aproveitamento maior dos materiais das escavações obrigatórias como:
 - Rocha sã com misturas de até 50% de brechas ou rochas alteradas (A2 – A3);
 - Compactação com ou sem molhagem;
 - Espessura de camada de até 1,60 m;
 - Granulometria - $\phi_{\max} \leq 1500$ mm;
 - Percentual de finos ($\phi_{\max} \leq 10$ mm) até 40%.
- c) A zona 3 deve ser composta por material selecionado e seu assentamento arrumado na face de jusante, enrocamento arrumado. As principais características são:
 - $\phi_{\max} \leq 1500$ mm ou da ordem da espessura da camada;
 - Ser acomodado na face de jusante, enrocamento arrumado;
 - O material deve ser composto, por rocha sã e pouco alterada (A1-A2).

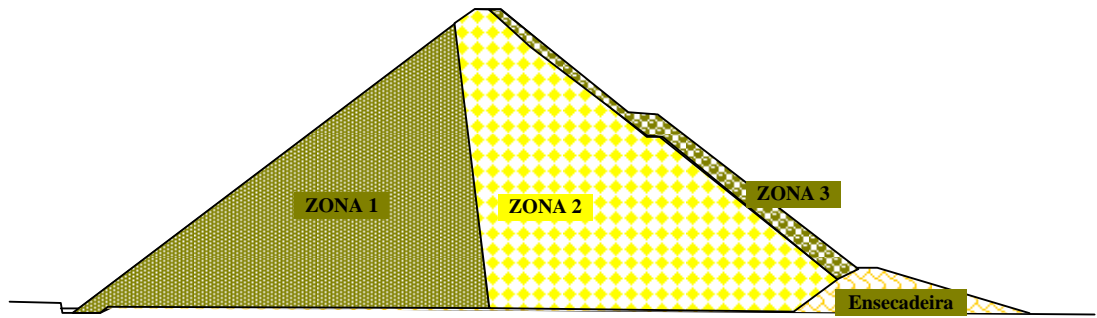
É importante considerar uma inclinação entre zonas, que será definida pela seção prioritária, a que for executada antes, e deverá estar entre 1,0 h:1v á 0,8 h:1v. No caso em que o alteamento for simultâneo a inclinação dever ser comandada pelo material de montante, zona 1, e a inclinação poderá ser de até 0,3 h:1v.

Salienta-se que o conceito da seção prioritária está diretamente relacionada as questões hidrológicas de proteção das estruturas em construção e as condicionantes de jusante, (materiais e humanas). Por esta razão define-se a cota de proteção de 500 anos, conforme critérios de projeto já consagrado.

A porção da base a ser coberta pela zona 1 é função da altura e característica geomecânicas do enrocamento onde a região é de maior rigidez, a zona 1 deve ficar entre $1/3$ á $1/2$ da largura da base, ver figura, 5-4 e 5-5.



Figura, 5-4 – Zoneamento proposto – zona 1 igual a $1/3$ da largura da base da barragem.



Figura, 5-5 – Zoneamento proposto – zona 1 igual a $1/2$ da largura da base da barragem.

CAPÍTULO 6 CAPACITAÇÃO TÉCNICA E INSTRUMENTAL PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA COM ENROCAMENTO

Conforme já abordado aqui, as barragens de enrocamento com fase de concreto são projetadas com base em experiências anteriores, (empirismo). É de conhecimento público, amplamente divulgado nos meios de comunicação, que alguns problemas e falhas, já ocorreram com estruturas de barragens de enrocamento com fase de concreto.

No “III Simpósio Sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto”⁶, que aconteceu recentemente na cidade de Florianópolis-SC, a questão dos problemas ocorridos em diversas barragens foram muito discutidos, levando-se a questionamentos quanto à adoção de critérios empíricos em detrimento do incentivo a pesquisa. É nítido o engajamento e comprometimento cada vez maior de profissionais e técnicos, que atuam em projetos de barragens de enrocamento com face de concreto, com pesquisas que buscam critérios em bases científicas, permitindo o desenvolvimento de projetos com grau de conhecimento que possa minimizar possíveis incertezas quanto ao desempenho. Por outro lado é notória também a aproximação das entidades de pesquisa como as universidades. Esta sinergia entre as universidades, centros de pesquisas, e profissionais da indústria da construção é extremamente positivo.

É evidente que a questão empírica, isto é, a experiência adquirida é fundamental e serve para orientar alguns rumos das pesquisas. Os insucessos devem ser vistos e analisados buscando associações dos modelos e condições físicas às modelagens matemáticas e verificações com a caracterização dos materiais e pesquisas dos parâmetros do enrocamento. Logo parcerias com os centros de pesquisas, universidades, e com os de produção, como, as construtoras e os empresários são fundamentais neste processo de valorização do conhecimento.

Um bom exemplo de parceria é o programa de pesquisa na área de barragens que ora esta sendo desenvolvido pela UFSC, e o programa de P&D (apoiado e gerenciado pela Tractebel), este programa também conta com o engajamento de profissionais na área de engenharia da empresa Leme Engenharia. Esta oportunidade está criando espaço e possibilidade para que profissionais

⁶ Third Symposium on CFRD-Dams – 25 a 27 de outubro de 2007 – Florianópolis/SC - Brasil

das duas vertentes possam interagir, promovendo e ampliando conhecimentos relativos aos enrocamentos, mesclando a experiência, empirismo, com a base científica e pesquisa.

Com os programas de P&D, formados pela parceria com a Tractebel, UFSC e apoio da Leme Engenharia, possibilitando-se estudos na área das barragens de enrocamento com foco na laje de vedação e no comportamento dos enrocamentos, até a presente data, outubro/2007, já foram montados três programas.

Estes trabalhos envolvem a pesquisa para a obtenção dos parâmetros de materiais de construção, modelagem matemáticas das estruturas e análise da interface/concreto enrocamento. O primeiro programa mesclou estudos com a estrutura da barragem, enrocamento, e da laje da face, concreto. Nesta etapa pode-se determinar claramente a vinculação entre as duas estruturas, contudo mostrou-se que os trabalhos de pesquisa podem e devem ser feitos independentemente. Estas atividades criam oportunidades de estudos nas áreas de geotécnica e estruturas. O desenvolvimento da pesquisa com a laje tem fundamento matemático, modelagens, enquanto que na área da barragem a pesquisa é voltada para a busca da determinação dos parâmetros do enrocamento.

A importância de se obter dados que caracterizam o enrocamento é exatamente a possibilidade de se estabelecer previsões do comportamento da estrutura. Estas previsões são fundamentais para o dimensionamento das estruturas da barragem e da laje de vedação. Os estudos geotécnicos buscam meios para obtenções de parâmetros dos materiais de construção, o que levou a elaboração de programas com a finalidade de desenvolver equipamentos com características e capacidade para executar ensaios em amostras de grandes dimensões, compatíveis com os enrocamentos.

O programa foco é o estudo do enrocamento, que iniciou com a preparação, elaboração dos projetos, fabricação e as montagens de equipamentos para os ensaios em amostras de grandes dimensões. Esta atividade tem sido um dos maiores desafios do programa, isto em função da complexidade, manuseio, custo e materiais necessários para a fabricação, montagem e execução dos ensaios.

Com o objetivo de conhecer e caracterizar os materiais de enrocamento por meio da obtenção dos parâmetros geotécnicos, o programa de pesquisa caminhou buscando atingir três diferentes etapas. No decorrer e montagem de cada etapa buscou-se complementar ou dar continuidade aos estudos de pesquisadores como os de, Marsal, Penman, Veiga Pinto, Débora Pacheco e outros. As três etapas estavam correlacionadas às pesquisas e desenvolvimentos de equipamentos específicos.

A primeira etapa constitui-se de estudos de adensamento em equipamento de grande dimensão. Na montagem do equipamento adquiriu-se criatividade e esforço dos alunos do laboratório, coordenada pelo professor Marciano Maccarini⁷. Os trabalhos foram iniciados com a recuperação da câmara edométrica, viga de reação, base e chapas de distribuição das tensões, (equipamento doado na década de 90 pela Eletrosul)⁸, os demais acessórios, equipamento de aplicação de carga, aquisitores dos dados do ensaio, foram adquiridos com recursos provenientes do programa P&D de pesquisa aplicada.

Os cuidados com a qualificação do material para que seja representativo em relação no que se refere à sanidade dos fragmentos de rocha, litológica e granulométrica bem como as questões relacionadas com atritos entre o material e a câmara edométrica, estão descritos na dissertação de mestrado da pesquisadora Eng^a Débora Pacheco⁹. Nas figuras, 6-1 e 6-2 são mostrados detalhes do equipamento durante a execução de um ensaio.



Figura, 6-1 – Equipamento de ensaio Edométrico.

7 Marciano Maccarini – Prof. Dr. PhD da Universidade Federal de Santa Catarina – Coordenado do laboratório, pesquisador na área de enrocamentos e orientador deste autor

8 Eletrosul – Centrais Elétricas do Sul do Brasil S/A – atualmente Eletrosul Centrais Elétricas S/A

9 Pacheco, Débora - Ensaio de Compressão Unidimensional em Amostras de Grandes Dimensões: Desenvolvimento do Equipamento e Realização de Ensaio em Basalto da Uhe Machadinho Dissertação de Mestrado, UFSC, 2004

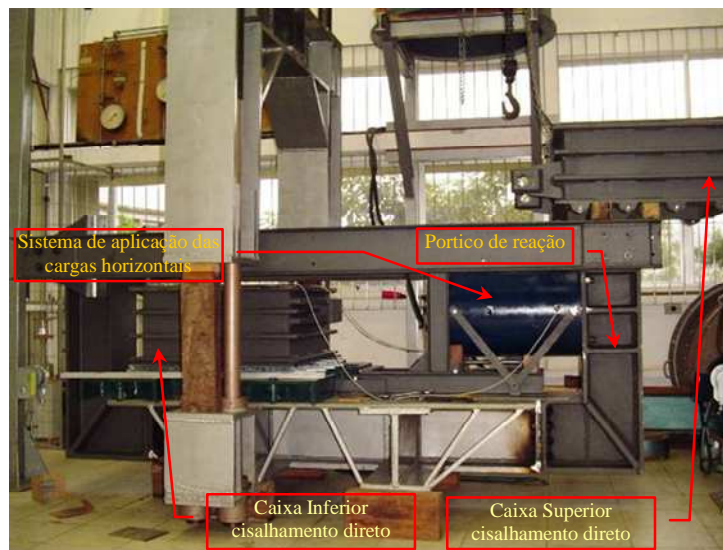
A figura, 6-2 mostra as células de carga utilizadas para a medição do esforço transferido para as paredes da câmara edométrica, permitindo a medição do atrito lateral.



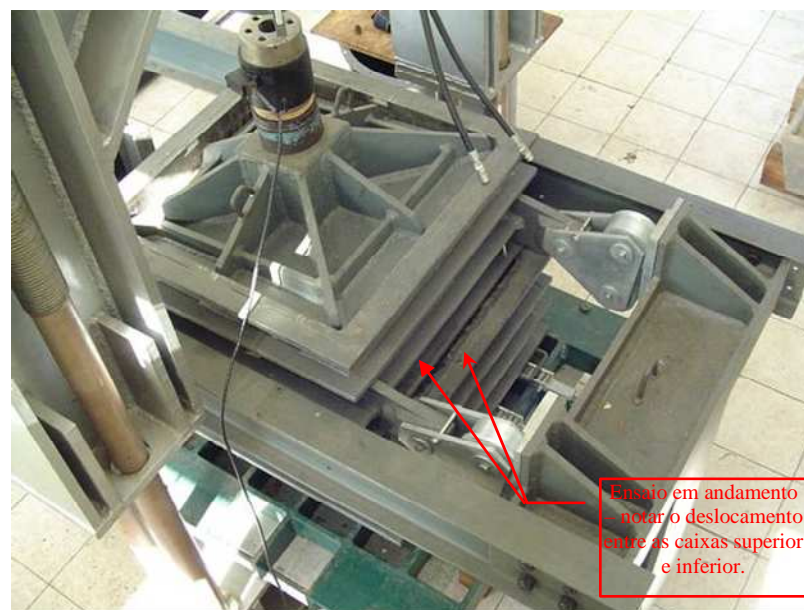
Figura, 6-2 – Detalhe do Equipamento de Ensaio Edométrico.

Nesta segunda etapa, fazendo parte de outro programa P&D de pesquisa aplicada, com as mesmas parcerias citadas acima, seria a construção de equipamento para ensaio de cisalhamento direto em amostras de grandes dimensões.

O desenvolvimento do equipamento surgiu do conjunto já existente para o ensaio edométrico, por meio de introdução de um sistema da viga de reação, para aplicação de cargas horizontais provocando a movimentação da parte inferior da caixa de cisalhamento. As pesquisas estão sendo desenvolvidas pelos mestrandos, Eng^o Rodrigo André Hummes e a Eng^a Márcia Collares Meireles, com orientação do Prof. Dr. Marciano Maccarini⁶. Conforme o programa de pesquisa dos ensaios que devem ser finalizados até o final de 2007. As figuras, 6-3 e 6-4 mostram o equipamento montado e pronto para a realização dos ensaios.

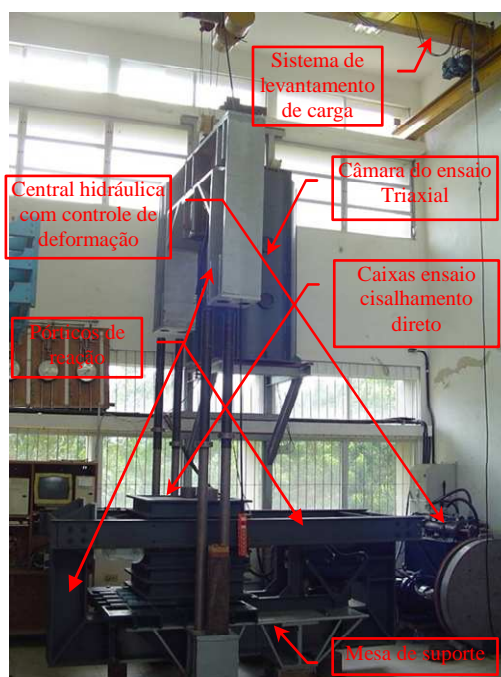


Figura, 6-3 – Vista geral do equipamento de ensaio de cisalhamento direto.

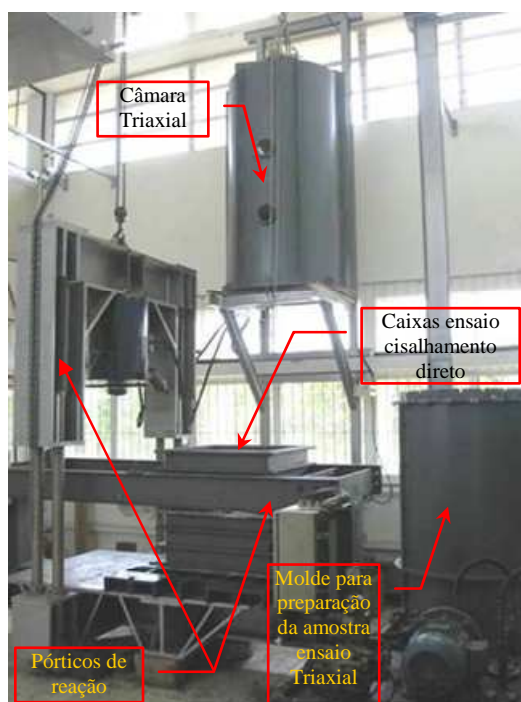


Figura, 6-4 – Equipamento de ensaio de cisalhamento direto.

Na terceira etapa faz parte do mesmo programa de pesquisa das etapas anteriores. Usando como base a mesma prensa, fabricando-se e montando-se o equipamento para o ensaio triaxial. Todo o sistema de aplicação de carga, σ_1 e σ_3 , já estão prontos, bem como a câmara triaxial e o sistema para compactação e montagem da amostra. Os ensaios devem ser iniciados no primeiro trimestre de 2008. As figuras, 6-5 á 6-7 mostram detalhes de partes do equipamento.



Figura, 6-5 – Vista geral - Equipamento de ensaio Triaxial e de cisalhamento direto.



Figura, 6-6 – Equipamento de ensaio Triaxial e caixa do ensaio de cisalhamento direto.



Figura, 6-7 – Câmara do ensaio Triaxial.

É importante salientar as dificuldades em se trabalhar com amostras de grandes dimensões. Inicialmente as cargas relacionadas são grandes, exigindo equipamentos de levantamento e movimentação adequados. A obtenção da amostra é outro fator complicador, uma vez que há a necessidade de volumes expressivos. A Tabela, 6-1 mostra quadro relacionando o ensaio com volume e peso de material requerido.

Ensaio	Volume (m³)	Peso (kgf)
Ensaio Edométrico	0,4	840
Cisalhamento direto*	0,1	210
Ensaio Triaxial	0,8	1.680
* Peso de cada metade da caixa = 105 kgf		

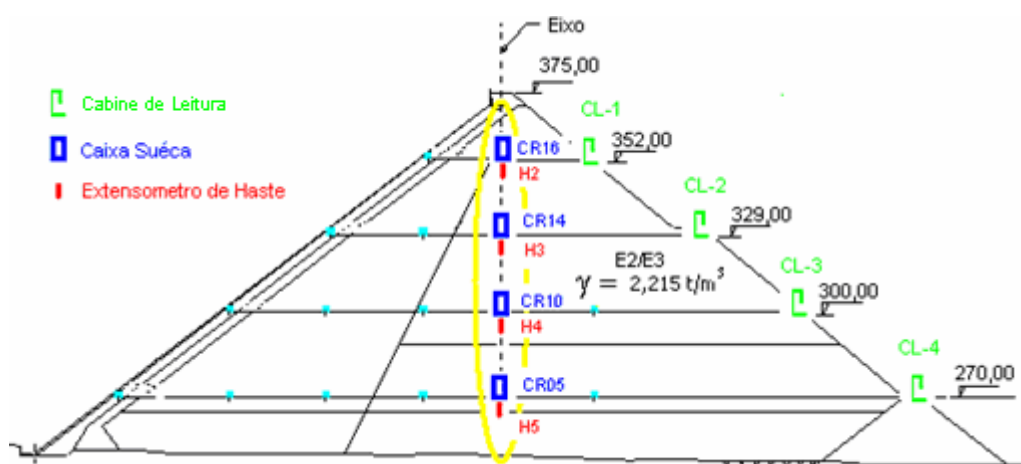
Tabela, 6-1 – Quadro com volumes e peso de cada ensaio.

CAPÍTULO 7 ESTUDOS DE TRAJETÓRIAS DE TENSÕES

Neste capítulo vamos estudar e avaliar as tensões na região central da barragem, eixo, com base nas informações da instrumentação instalada na estrutura de enrocamento, controle tecnológico executado durante a construção, materiais aplicados no aterro e considerações simplificadoras, (hipóteses). Os pontos considerados no estudado estão indicados na figura, 7-1. Embora, conforme comentado no item 4.5.2, para os estudos utilizou-se os pares de resultados das Caixas Suecas com os Extensômetros de Haste. A razão para tal adoção reside no fato de que estes dois instrumentos estão instalados sempre aos pares. Esta condição permite com mais propriedade considerar a homogeneidade das características do material no local da medição.

7.1 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Para os estudos da trajetória de tensões e da tensão e deformação utilizou-se informações da instrumentação instalada, deformações verticais e horizontais e os resultados do controle tecnológico, ensaio de determinação da densidade. A densidade média adotada nos estudos é referente ao material considerado (E2/E3), material este identificado como o utilizado na parte central da barragem, conforme mostra o zoneamento apresentado na figura, 3-33. A figura, 7-1 mostra esquematicamente a seção com os pontos estudados, zoneamento, instrumentos e material.



Figura, 7-1 – Seção esquemática da barragem considerada no estudo.

Para a determinação das deformações de cada uma das camadas, procedeu-se o tratamento das informações dos recalques, Caixas Suecas, e das deformações horizontais, Extensômetros de Haste.

As Caixas Suecas fornecem o recalque compreendido entre o seu ponto de instalação e a fundação. Isto deve ser corrigido de modo que a deformação utilizada nos cálculos seja somente a da camada em questão, para tal processou-se todas as medições de modo a expurgar os recalques das camadas inferiores.

Inicialmente obtiveram-se os dados iniciais de instalação das Caixas Suecas consideradas nos estudos. Estas informações estão apresentadas na tabela, 7-1.

CAIXA SUECA e EXTENSOMETRO DE HASTE	Cota Instalação (m)	Estaca	Afastamento Montante Jusante	Cota Fundação (m)	Espessura Camada vertical (m)	Material	Densidade (Mpa)	Distancia do Eixo e Face de Jusante da Barragem	Espessura da camada horizontal
CR05 - H5	273,961	32+8,190	0,00	251,500	22,461	Enroc.-E2	0,02215 (MPa)	131,351	32,000
CR10 - H4	302,095	32+8,190	0,00	251,500	28,134	Enroc.-E3	0,02215 (MPa)	94,777	32,000
CR14 - H3	328,309	32+8,190	0,00	251,500	26,214	Enroc.-E3	0,02215 (MPa)	60,698	60,698
CR16 - H2	352,994	32+8,190	0,00	251,500	24,685	Enroc.-E3	0,02215 (MPa)	28,608	28,608

Tabela, 7-1 – Dados iniciais de instalação das Caixas Suecas.

Para a determinação das deformações verticais, recalque, de cada camada identificou-se a data de instalação de cada instrumento. O recalque acumulado da camada inferior registrado nesta data pela Caixa Sueca foi considerado como a leitura inicial de recalque a ser descontado.

A figura, 7-1 mostra o posicionamento das caixas. Logo o recalque considerado nos cálculos para cada camada foi obtido fazendo-se:

Camada 1 → recalque integral fornecido pela Caixa Sueca CR05.

Camada 2 → recalque acumulado da Caixa Sueca CR10 subtraindo-se a diferença entre o recalque acumulado da CR05 na data “n” e o recalque acumulado da CR05 na data de instalação da CR10, Exemplo:

Data de instalação da CR10 – 18/12/1997 → Recalque acumulado da CR05 = -0,762 m

Recalque acumulado na data “n” = 11/03/1998 → CR10 = -1,133 m e CR05 = -1,409 m

Recalque da camada 2 → $Rc2 = -1,133 - (-1,409 - 0,762) \rightarrow Rc2 = -0,486$ m

Camada 3 → idem, fazendo-se a relação com a camada 2 ou CR14 com CR10.

Camada 4 → idem, fazendo-se a relação com a camada 3 ou CR16 com CR14.

As tabelas, 7-2 e 7-3 apresentam os cálculos efetuados.

DATA	Cota Aterro (m)	Recalque acumulado (m)				Recalque Entre Camadas		
		CR05	CR10	CR14	CR16	CR10>CR5	CR14>CR10	CR16>CR14
14-nov-97	277,640	0,000						
17-nov-97	280,820	-0,015						
18-nov-97	282,370	-0,053						
19-nov-97	283,710	-0,092						
20-nov-97	283,710	-0,113						
21-nov-97	284,900	-0,144						
24-nov-97	285,800	-0,202						
27-nov-97	287,500	-0,244						
1-dez-97	289,500	-0,340						
4-dez-97	293,600	-0,407						
8-dez-97	296,500	-0,537						
11-dez-97	299,000	-0,622						
15-dez-97	303,450	-0,716						
18-dez-97	305,000	-0,762	-0,010			-0,010		
9-jan-98	308,000	-0,881	-0,197			-0,078		
14-jan-98	314,000	-0,954	-0,324			-0,132		
22-jan-98	320,000	-1,061	-0,468			-0,169		
5-fev-98	332,500	-1,258	-0,614			-0,118		
11-fev-98	332,500	-1,298	-0,679			-0,142		
18-fev-98	336,700	-1,338	-0,825			-0,249		
25-fev-98	341,500	-1,362	-0,908			-0,308		
6-mar-98	341,500	-1,381	-1,051			-0,432		
11-mar-98	341,500	-1,409	-1,133			-0,486		
18-mar-98	341,500	-1,426	-1,258			-0,594		
25-mar-98	341,500	-1,445	-1,406			-0,723		
1-abr-98	341,500	-1,458	-1,460			-0,764		
8-abr-98	341,500	-1,469	-1,535			-0,829		
16-abr-98	341,500	-1,490	-1,563	0,000		-0,835	0,000	
22-abr-98	341,500	-1,517	-1,594	-0,051		-0,839	-0,020	
7-mai-98	349,500	-1,628	-1,628	-0,658		-0,762	-0,593	
14-mai-98	349,500	-1,648	-1,661	-0,745		-0,775	-0,646	
20-mai-98	349,500	-1,660	-1,701	-0,794		-0,802	-0,656	
27-mai-98	350,000	-1,668	-1,754	-0,842		-0,848	-0,651	
10-jun-98	350,000	-1,685	-1,844	-0,952		-0,920	-0,671	
17-jun-98	350,000	-1,696	-1,844	-0,974		-0,909	-0,694	
24-jun-98	350,000	-1,703	-2,128	-1,012		-1,187	-0,447	
24-jun-98	350,000	-1,703	-2,184	-1,047		-1,243	-0,426	
1-jul-98	350,000	-1,710	-2,212	-1,091		-1,264	-0,442	
8-jul-98	350,000	-1,725	-2,241	-1,094		-1,278	-0,416	
22-jul-98	350,000	-1,750	-2,291	-1,094		-1,303	-0,366	
29-jul-98	350,000	-1,760	-2,312	-1,126		-1,314	-0,376	
6-ago-98	350,000	-1,776	-2,334	-1,133		-1,320	-0,361	
12-ago-98	350,000	-1,787	-2,359	-1,176		-1,334	-0,380	
19-ago-98	350,000	-1,797	-2,383	-1,232		-1,349	-0,411	
26-ago-98	350,000	-1,808	-2,433	-1,270		-1,388	-0,399	
3-set-98	350,000	-1,822	-2,468	-1,314		-1,409	-0,409	
10-set-98	350,000	-1,838	-2,505	-1,364		-1,430	-0,422	
17-set-98	351,500	-1,852	-2,531	-1,417	0,000	-1,442	-0,449	0,000
30-set-98	354,500	-1,875	-2,554	-1,487	-0,003	-1,442	-0,496	0,067

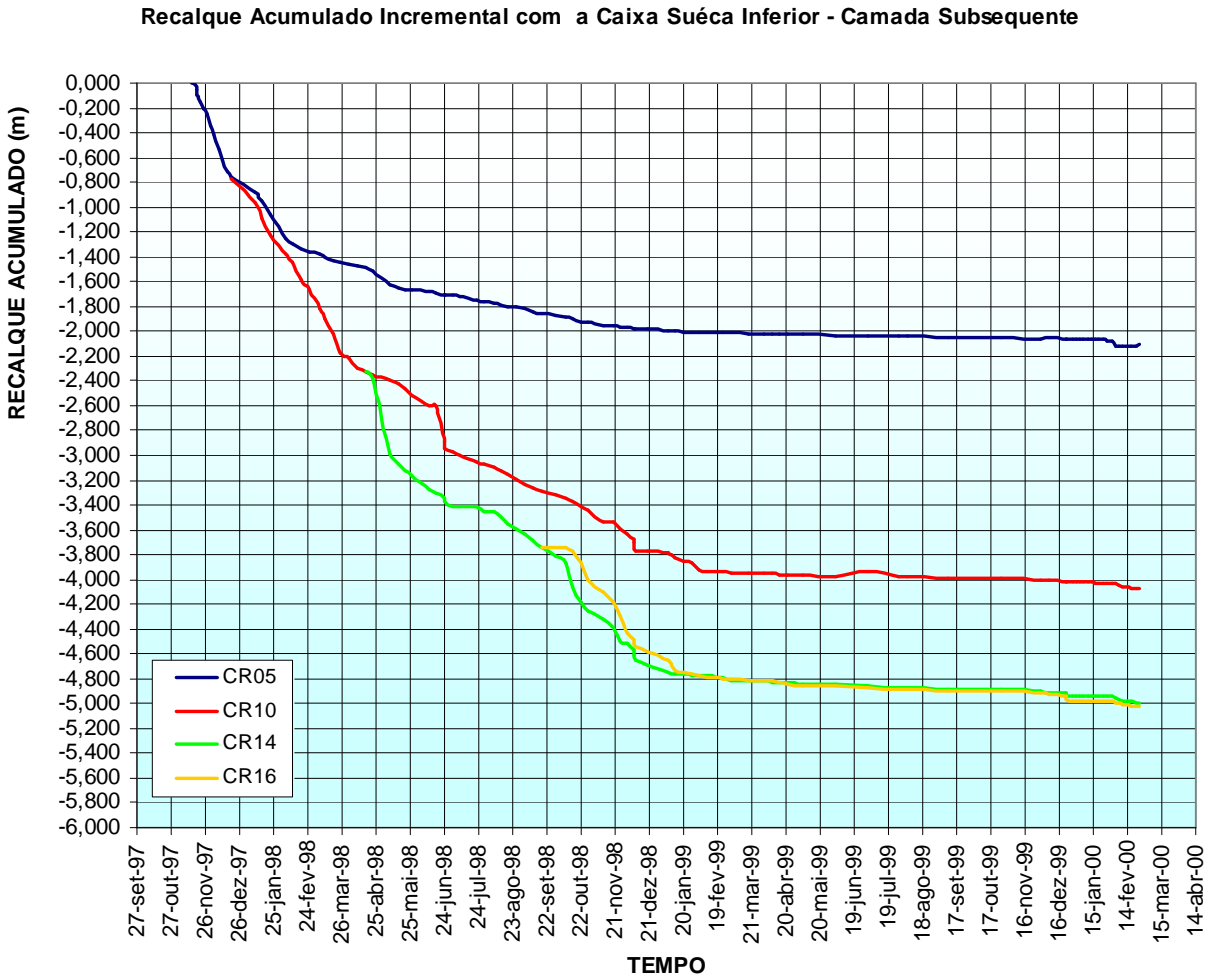
Tabela, 7-2 – Recalques acumulados e os recalques das camadas estudadas.

DATA	Cota Aterro (m)	Recalque acumulado (m)				Recalque Entre Camadas		
		CR05	CR10	CR14	CR16	CR10>CR5	CR14>CR10	CR16>CR14
8-out-98	358,500	-1,891	-2,582	-1,546	-0,004	-1,453	-0,527	0,125
14-out-98	359,000	-1,903	-2,612	-1,740	-0,024	-1,471	-0,691	0,300
22-out-98	362,200	-1,922	-2,646	-1,859	-0,120	-1,485	-0,776	0,322
28-out-98	364,000	-1,932	-2,673	-1,934	-0,260	-1,502	-0,824	0,257
11-nov-98	368,000	-1,948	-2,779	-2,002	-0,358	-1,593	-0,786	0,227
19-nov-98	369,000	-1,956	-2,779	-2,070	-0,447	-1,585	-0,854	0,206
25-nov-98	369,000	-1,962	-2,835	-2,180	-0,552	-1,634	-0,908	0,211
2-dez-98	369,000	-1,969	-2,871	-2,194	-0,690	-1,664	-0,886	0,087
7-dez-98	369,000	-1,978	-2,911	-2,243	-0,742	-1,695	-0,894	0,084
7-dez-98	369,000	-1,978	-2,936	-2,285	-0,778	-1,720	-0,912	0,090
9-dez-98	369,000	-1,979	-3,005	-2,328	-0,804	-1,788	-0,886	0,107
19-dez-98	369,000	-1,986	-3,011	-2,367	-0,845	-1,786	-0,920	0,106
6-jan-99	369,000	-1,998	-3,028	-2,420	-0,914	-1,792	-0,955	0,089
13-jan-99	369,000	-2,001	-3,062	-2,437	-0,998	-1,823	-0,939	0,022
20-jan-99	369,000	-2,002	-3,085	-2,437	-1,009	-1,845	-0,915	0,012
27-jan-99	369,000	-2,004	-3,106	-2,448	-1,016	-1,864	-0,905	0,015
3-fev-99	369,000	-2,008	-3,164	-2,453	-1,029	-1,918	-0,852	0,007
10-fev-99	369,000	-2,011	-3,167	-2,457	-1,042	-1,919	-0,853	-0,002
17-fev-99	369,000	-2,012	-3,169	-2,460	-1,042	-1,919	-0,855	0,001
24-fev-99	369,000	-2,013	-3,176	-2,467	-1,058	-1,925	-0,854	-0,008
3-mar-99	369,000	-2,015	-3,182	-2,485	-1,068	-1,929	-0,866	0,001
18-mar-99	369,000	-2,022	-3,183	-2,485	-1,070	-1,922	-0,865	-0,002
31-mar-99	369,000	-2,020	-3,188	-2,489	-1,070	-1,929	-0,865	0,003
8-abr-99	369,000	-2,022	-3,190	-2,500	-1,081	-1,930	-0,874	0,003
14-abr-99	369,000	-2,023	-3,195	-2,508	-1,090	-1,934	-0,876	0,002
21-abr-99	369,000	-2,025	-3,196	-2,511	-1,100	-1,933	-0,879	-0,005
5-mai-99	369,000	-2,027	-3,205	-2,517	-1,114	-1,940	-0,875	-0,014
2-jun-99	371,000	-2,032	-3,211	-2,521	-1,120	-1,941	-0,873	-0,016
1-jul-99	371,000	-2,034	-3,170	-2,535	-1,131	-1,898	-0,928	-0,013
28-jul-99	371,000	-2,037	-3,219	-2,543	-1,144	-1,944	-0,887	-0,018
4-ago-99	371,000	-2,040	-3,221	-2,552	-1,149	-1,943	-0,894	-0,013
9-set-99	371,000	-2,046	-3,227	-2,560	-1,156	-1,943	-0,896	-0,013
26-out-99	371,000	-2,052	-3,231	-2,565	-1,160	-1,941	-0,897	-0,012
29-nov-99	375,500	-2,057	-3,238	-2,568	-1,166	-1,942	-0,894	-0,014
7-dez-99	375,500	-2,055	-3,246	-2,582	-1,186	-1,953	-0,899	-0,020
22-dez-99	375,500	-2,058	-3,251	-2,592	-1,198	-1,955	-0,904	-0,023
22-dez-99	375,500	-2,058	-3,255	-2,609	-1,223	-1,959	-0,917	-0,031
28-dez-99	375,500	-2,059	-3,260	-2,613	-1,237	-1,962	-0,916	-0,041
31-dez-99	375,500	-2,059	-3,260	-2,613	-1,237	-1,962	-0,916	-0,041
3-jan-00	375,500	-2,061	-3,261	-2,614	-1,236	-1,961	-0,916	-0,039
6-jan-00	375,500	-2,063	-3,261	-2,614	-1,237	-1,960	-0,916	-0,039
10-jan-00	375,500	-2,063	-3,261	-2,614	-1,236	-1,960	-0,916	-0,039
13-jan-00	375,500	-2,063	-3,263	-2,616	-1,238	-1,962	-0,916	-0,039
17-jan-00	375,500	-2,068	-3,265	-2,616	-1,238	-1,959	-0,914	-0,038
20-jan-00	375,500	-2,066	-3,266	-2,617	-1,239	-1,961	-0,915	-0,038
24-jan-00	375,500	-2,070	-3,267	-2,617	-1,241	-1,959	-0,913	-0,041
27-jan-00	375,500	-2,073	-3,267	-2,618	-1,242	-1,955	-0,914	-0,041
31-jan-00	375,500	-2,085	-3,269	-2,621	-1,244	-1,946	-0,915	-0,040
3-fev-00	375,500	-2,117	-3,271	-2,630	-1,249	-1,916	-0,922	-0,036
7-fev-00	375,500	-2,121	-3,289	-2,644	-1,259	-1,930	-0,918	-0,032
10-fev-00	375,500	-2,123	-3,294	-2,655	-1,273	-1,933	-0,925	-0,035
14-fev-00	375,500	-2,125	-3,296	-2,656	-1,273	-1,932	-0,924	-0,034
17-fev-00	375,500	-2,124	-3,309	-2,655	-1,275	-1,946	-0,910	-0,037
21-fev-00	375,500	-2,126	-3,318	-2,673	-1,276	-1,954	-0,919	-0,019
24-fev-00	375,500	-2,111	-3,318	-2,677	-1,276	-1,969	-0,922	-0,016

Tabela, 7-3 – Continuação da tabela, 7-2.

Para a avaliação das deformações horizontais procedeu-se de modo semelhante. Considerou-se como espessura da camada horizontal a distância entre as posições das hastes H5 e H6 da linha CL4 e das hastes H5 e H4 da linha CL3. As linhas estão definidas em relação às Cabines de Leitura (CL), (figura, 7-1). Contudo as linhas CL2 e CL1 adotaram-se como espessura da camada, a distância entre o ponto de instalação e a face de jusante da barragem, conforme dado apresentado na tabela, 7-1.

Na figura, 7-2, mostra o gráfico dos recalques no eixo da barragem. O gráfico está montado de maneira a apresentar o recalque em cada camada no tempo e em relação à Caixa Sueca inferior, desta forma, tem-se o recalque total incremental, ou se a estrutura fosse executada de uma só vez.



Figura, 7-2 – Recalque acumulado incremental.

O CR16 apresenta um comportamento anômalo. O distúrbio mostrado no início das leituras, indicando uma expansão do aterro não é lógico, logo na continuação dos estudos, apesar de que serão mostrados os cálculos, não será utilizado na análise das trajetórias de tensão.

As tabelas, 7-4 e 7-5 mostram as deformações horizontais calculadas pelos dois processos.

Data	Deformação Horizontal (m)							
	CL4 - H5	CL4 - H6	CL4-H5>H6	CL3 - H4	CL3 - H5	CL3-H4>H5	CL2 - H3	CL1 - H2
14-nov-97	0,000	0,000	0,000					
17-nov-97	0,045	0,046	-0,001					
18-nov-97	0,042	0,043	-0,001					
19-nov-97	0,047	0,048	-0,001					
20-nov-97	0,046	0,047	-0,001					
21-nov-97	0,050	0,051	-0,001					
24-nov-97	0,053	0,053	0,000					
27-nov-97	0,047	0,049	-0,002					
1-dez-97	0,051	0,048	0,003					
4-dez-97	0,048	0,048	0,000					
8-dez-97	0,048	0,054	-0,006					
11-dez-97	0,046	0,058	-0,012					
15-dez-97	0,047	0,064	-0,017					
18-dez-97	0,050	0,069	-0,019	0,000	0,000	0,000		
9-jan-98	0,036	0,071	-0,035	0,024	0,001	0,023		
14-jan-98	0,015	0,059	-0,044	0,059	0,029	0,030		
22-jan-98	0,010	0,073	-0,063	0,072	0,063	0,009		
5-fev-98	-0,030	0,081	-0,111	0,080	0,067	0,013		
5-fev-98	-0,030	0,081	-0,111	0,080	0,068	0,012		
11-fev-98	-0,051	0,080	-0,131	0,089	0,071	0,018		
18-fev-98	-0,058	0,089	-0,147	0,092	0,068	0,025		
25-fev-98	-0,080	0,079	-0,159	0,110	0,057	0,052		
6-mar-98	-0,082	0,088	-0,170	0,117	0,045	0,072		
11-mar-98	-0,087	0,088	-0,175	0,110	0,037	0,073		
18-mar-98	-0,087	0,092	-0,179	0,099	0,025	0,074		
25-mar-98	-0,097	0,084	-0,181	0,106	0,006	0,100		
1-abr-98	-0,094	0,089	-0,183	0,098	-0,022	0,120		
8-abr-98	-0,089	0,097	-0,186	0,099	-0,060	0,159		
16-abr-98	-0,110	0,078	-0,188	0,087	-0,057	0,144	0,000	
22-abr-98	-0,102	0,088	-0,190	0,088	-0,068	0,156	0,010	
7-mai-98	-0,119	0,100	-0,219	0,108	-0,085	0,193	0,022	
14-mai-98	-0,120	0,099	-0,219	0,117	-0,093	0,210	0,018	
20-mai-98	-0,123	0,099	-0,222	0,119	-0,095	0,213	0,016	
27-mai-98	-0,123	0,099	-0,222	0,122	-0,106	0,227	0,014	
10-jun-98	-0,125	0,099	-0,223	0,122	-0,104	0,226	0,015	
17-jun-98	-0,126	0,105	-0,231	0,121	-0,118	0,239	0,010	
24-jun-98	-0,131	0,107	-0,238	0,118	-0,118	0,237	0,002	
1-jul-98	-0,129	0,104	-0,233	0,119	-0,121	0,240	-0,007	
8-jul-98	-0,127	0,106	-0,233	0,116	-0,124	0,240	-0,016	
22-jul-98	-0,122	0,109	-0,231	0,106	-0,135	0,241	-0,026	
29-jul-98	-0,123	0,115	-0,238	0,106	-0,143	0,249	-0,027	
6-ago-98	-0,123	0,114	-0,237	0,108	-0,153	0,261	-0,027	
12-ago-98	-0,120	0,114	-0,234	0,107	-0,159	0,267	-0,018	
19-ago-98	-0,119	0,116	-0,235	0,107	-0,166	0,273	-0,020	
26-ago-98	-0,119	0,115	-0,234	0,110	-0,181	0,291	-0,012	
3-set-98	-0,117	0,116	-0,233	0,121	-0,182	0,303	-0,024	
10-set-98	-0,118	0,119	-0,238	0,119	-0,181	0,300	-0,018	
17-set-98	-0,117	0,120	-0,237	0,126	-0,183	0,308	-0,022	0,001
30-set-98	-0,112	0,117	-0,229	0,134	-0,183	0,317	-0,022	0,000

Tabela, 7-4 – Deformações horizontais acumuladas.

Data	Deformação Horizontal (m)							
	CL4 - H5	CL4 - H6	CL4-H5>H6	CL3 - H4	CL3 - H5	CL3-H4>H5	CL2 - H3	CL1 - H2
8-out-98	-0,109	0,124	-0,233	0,161	-0,185	0,346	-0,019	0,003
14-out-98	-0,104	0,130	-0,234	0,178	-0,175	0,352	-0,026	0,014
22-out-98	-0,104	0,137	-0,241	0,176	-0,181	0,357	-0,032	0,025
22-out-98	-0,104	0,143	-0,247	0,176	-0,177	0,354	-0,050	0,023
28-out-98	-0,099	0,143	-0,242	0,201	-0,184	0,385	-0,068	0,022
11-nov-98	-0,099	0,151	-0,250	0,217	-0,171	0,388	-0,093	0,043
19-nov-98	-0,105	0,157	-0,262	0,211	-0,162	0,373	-0,107	0,061
25-nov-98	-0,102	0,156	-0,258	0,228	-0,172	0,400	-0,107	0,074
2-dez-98	-0,101	0,158	-0,259	0,240	-0,155	0,395	-0,136	0,078
8-dez-98	-0,098	0,163	-0,261	0,240	-0,151	0,391	-0,161	0,091
8-dez-98	-0,098	0,168	-0,266	0,249	-0,164	0,413	-0,182	0,102
9-dez-98	-0,096	0,168	-0,264	0,255	-0,152	0,407	-0,188	0,120
19-dez-98	-0,094	0,168	-0,262	0,269	-0,146	0,416	-0,198	0,136
6-jan-99	-0,093	0,173	-0,266	0,272	-0,142	0,414	-0,204	0,129
13-jan-99	-0,093	0,172	-0,265	0,274	-0,144	0,418	-0,201	0,129
20-jan-99	-0,093	0,178	-0,271	0,273	-0,134	0,407	-0,191	0,143
27-jan-99	-0,093	0,180	-0,273	0,274	-0,132	0,406	-0,196	0,144
3-fev-99	-0,091	0,180	-0,271	0,278	-0,131	0,409	-0,191	0,141
10-fev-99	-0,091	0,182	-0,273	0,277	-0,134	0,411	-0,191	0,140
17-fev-99	-0,092	0,182	-0,274	0,279	-0,131	0,410	-0,192	0,150
24-fev-99	-0,093	0,184	-0,277	0,282	-0,133	0,415	-0,186	0,152
3-mar-99	-0,091	0,183	-0,274	0,288	-0,130	0,418	-0,185	0,155
18-mar-99	-0,089	0,187	-0,276	0,285	-0,125	0,410	-0,183	0,160
31-mar-99	-0,092	0,187	-0,279	0,287	-0,125	0,412	-0,177	0,158
8-abr-99	-0,096	0,184	-0,280	0,287	-0,130	0,417	-0,177	0,158
14-abr-99	-0,095	0,181	-0,276	0,290	-0,129	0,419	-0,177	0,156
21-abr-99	-0,097	0,184	-0,281	0,297	-0,128	0,425	-0,176	0,154
5-mai-99	-0,093	0,183	-0,276	0,293	-0,128	0,421	-0,179	0,165
2-jun-99	-0,093	0,187	-0,280	0,292	-0,122	0,415	-0,181	0,157
1-jul-99	-0,093	0,187	-0,280	0,291	-0,128	0,419	-0,173	0,159
28-jul-99	-0,091	0,188	-0,279	0,291	-0,130	0,421	-0,169	0,158
4-ago-99	-0,096	0,189	-0,285	0,296	-0,135	0,431	-0,168	0,158
9-set-99	-0,099	0,189	-0,288	0,299	-0,131	0,430	-0,166	0,161
26-out-99	-0,101	0,186	-0,287	0,300	-0,129	0,429	-0,161	0,168
29-nov-99	-0,098	0,186	-0,284	0,300	-0,131	0,431	-0,163	0,175
29-nov-99	-0,098	0,199	-0,297	0,312	-0,132	0,444	-0,164	0,182
7-dez-99	-0,101	0,199	-0,300	0,312	-0,124	0,436	-0,159	0,202
22-dez-99	-0,102	0,199	-0,301	0,312	-0,124	0,436	-0,159	0,211
22-dez-99	-0,102	0,197	-0,299	0,312	-0,124	0,436	-0,159	0,211
28-dez-99	-0,102	0,197	-0,299	0,312	-0,125	0,437	-0,160	0,211
31-dez-99	-0,102	0,197	-0,299	0,312	-0,125	0,437	-0,160	0,211
3-jan-00	-0,103	0,197	-0,300	0,312	-0,125	0,437	-0,161	0,210
6-jan-00	-0,103	0,197	-0,300	0,312	-0,126	0,438	-0,161	0,209
10-jan-00	-0,103	0,197	-0,300	0,312	-0,126	0,438	-0,160	0,213
13-jan-00	-0,102	0,198	-0,300	0,312	-0,126	0,438	-0,160	0,213
17-jan-00	-0,103	0,198	-0,301	0,312	-0,126	0,438	-0,160	0,214
20-jan-00	-0,103	0,197	-0,300	0,311	-0,125	0,436	-0,162	0,215
24-jan-00	-0,103	0,197	-0,300	0,313	-0,123	0,436	-0,162	0,216
27-jan-00	-0,103	0,197	-0,300	0,315	-0,119	0,434	-0,161	0,216
31-jan-00	-0,104	0,197	-0,301	0,318	-0,117	0,435	-0,160	0,216
3-fev-00	-0,105	0,196	-0,301	0,321	-0,115	0,436	-0,159	0,216
7-fev-00	-0,108	0,195	-0,303	0,323	-0,112	0,435	-0,159	0,216
10-fev-00	-0,109	0,192	-0,301	0,326	-0,114	0,440	-0,159	0,216
14-fev-00	-0,102	0,191	-0,293	0,325	-0,115	0,440	-0,158	0,217
17-fev-00	-0,101	0,198	-0,299	0,322	-0,117	0,439	-0,158	0,217
21-fev-00	-0,096	0,198	-0,294	0,326	-0,113	0,439	-0,156	0,218
24-fev-00	-0,077	0,222	-0,299	0,327	-0,109	0,436	-0,149	0,219

Tabela, 7-5 – Continuação da tabela 7-4.

7.2 MÉTODO DE CÁLCULO

Para a avaliação da trajetória de tensões com base nos estudo e análise feitas com os dados obtidos pela instrumentação e controle tecnológico, considerou-se as seguintes hipóteses:

- O material seria isotrópico.
- As considerações de tensões são pontuais.
- A movimentação da instrumentação é ortogonal, horizontal para as hastes e vertical para as caixas suecas.

Os módulos de deformabilidade, para efeito de cálculo, serão adotados os módulos secantes à curva tensão x deformação do enrocamento. O critério de cálculo obedece a “Lei de Hook”, onde o módulo sempre está associado ao incremento de carga e conseqüente de deformação.

7.3 TENSÕES VERTICAIS

As tensões verticais para fins de cálculos das trajetórias de tensões e das curvas tensão x deformação verticais são obtidas matematicamente com a equação:

$$\sigma = \gamma \times h \quad [1]$$

Onde:

$\sigma \rightarrow$ Tensão de carregamento (em MPa)

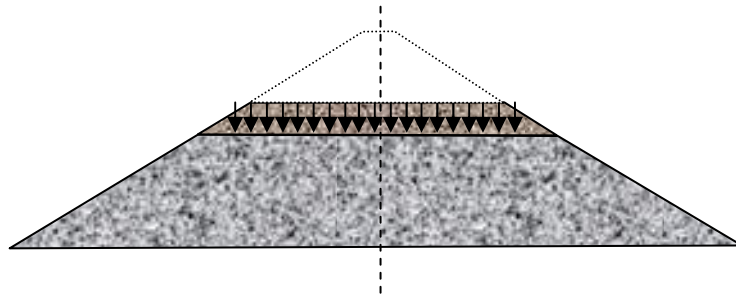
$\gamma \rightarrow$ Densidade do material (em MPa)

$h \rightarrow$ Altura de aterro sobre a Caixa Sueca

7.4 MÓDULO DE DEFORMABILIDADE.

Conforme já discutido para o cálculo do módulo de deformabilidade no período construtivo foram utilizados os dados das caixas suecas, (deslocamentos verticais) e adotado um peso específico médio do enrocamento obtido no controle tecnológico igual a 2,215 t/m³.

O carregamento considerado foi o incremento relativo ao alteamento do aterro da barragem, figura, 7-3.



Figura, 7-3 – Construção por camada – incremento de carga sobre a Caixa Sueca.

O método de cálculo adotado é a própria lei de Hook adaptado conforme proposto em artigo publicado no “Journal of Geotechnical and geoviromental engineering ASCE” em outubro de 2003, por Gavan Hunter e Robin Fell, cuja equação matemática é:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [2]$$

Onde:

$E \rightarrow$ Módulo de deformabilidade (em MPa)

$\sigma \rightarrow$ Tensão de carregamento (em MPa)

$\varepsilon \rightarrow$ Deformação específica (%)

A deformação específica é dada por:

$$\varepsilon = \frac{R}{C} \quad \text{Equação [3]}$$

Onde:

$\varepsilon \rightarrow$ deformação específica (%)

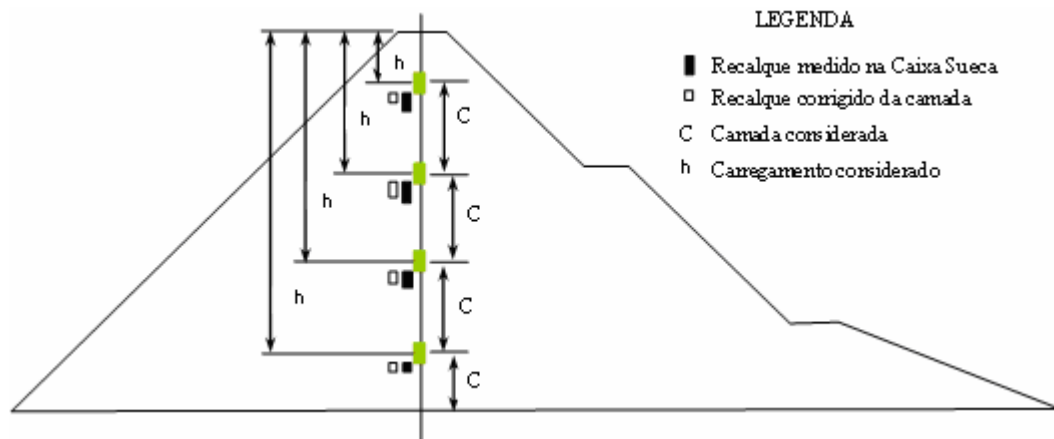
$R \rightarrow$ Recalque corrigido da camada (m)

$C \rightarrow$ Espessura da camada (m)

Substituindo-se na equação [2] os valores das equações [1] e [3] temos:

$$E = \frac{\gamma \times h \times C}{R} \quad [4]$$

A figura, 7-4, ilustra o método.



Figura, 7-4 – Método de cálculo dos módulos de deformabilidade.

7.5 TENSÕES HORIZONTAIS

Pela condição imposta de isotropia do material, para as mesmas tensões em direções iguais ocorrem deformações iguais, conseqüentemente módulos de deformabilidade igual em todas as direções. Desta forma para o cálculo das tensões horizontais usa-se a “Lei de Hook”.

Como $E_h = E_v$ a tensão horizontal será:

$$E = \frac{\sigma_h}{\varepsilon_h} \text{ Equação [2]}$$

$$\sigma_h = E \times \varepsilon_h \text{ Equação [5]}$$

7.6 CÁLCULOS DAS TENSÕES E DOS MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE.

Nas tabelas, 7-6 e 7-7 são mostrados os valores das tensões verticais, deformações específicas verticais e os módulos de deformabilidade obtidos nos estudos.

Tensão Vertical (σ_y) (MPa)				DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)				MÓDULO DE DEFORMABILIDADE (Mpa)			
CR-5	CR10	CR14	CR16	CR-5	CR10	CR14	CR16	CR-5	CR10	CR14	CR16
0,08				0,00%							
0,15				0,07%				227,5			
0,19				0,24%				78,2			
0,22				0,41%				52,7			
0,22				0,51%				42,7			
0,24				0,64%				37,7			
0,26				0,90%				29,2			
0,30				1,09%				27,6			
0,34				1,51%				22,7			
0,44				1,81%				24,0			
0,50				2,39%				20,9			
0,55				2,77%				20,0			
0,65				3,19%				20,5			
0,69	0,06			3,39%	0,04%			20,3	181,0		
0,75	0,13			3,92%	0,70%			19,2	47,0		
0,89	0,26			4,25%	1,15%			20,9	56,1		
1,02	0,40			4,72%	1,67%			21,6	65,9		
1,30	0,67			5,60%	2,18%			23,1	160,5		
1,30	0,67			5,78%	2,41%			22,4	133,1		
1,39	0,77			5,96%	2,93%			23,3	86,6		
1,50	0,87			6,06%	3,23%			24,7	79,6		
1,50	0,87			6,15%	3,74%			24,3	56,9		
1,50	0,87			6,27%	4,03%			23,8	50,5		
1,50	0,87			6,35%	4,47%			23,6	41,3		
1,50	0,87			6,43%	5,00%			23,3	33,9		
1,50	0,87			6,49%	5,19%			23,1	32,1		
1,50	0,87			6,54%	5,46%			22,9	29,6		
1,50	0,87	0,29		6,63%	5,56%			22,5	29,4		
1,50	0,87	0,29		6,75%	5,67%	0,19%		22,2	29,3	377,9	
1,67	1,05	0,47		7,25%	5,79%	2,51%		23,1	38,8	20,7	
1,67	1,05	0,47		7,34%	5,91%	2,84%		22,8	38,1	19,0	
1,67	1,05	0,47		7,39%	6,04%	3,03%		22,6	36,8	18,8	
1,68	1,06	0,48		7,42%	6,23%	3,21%		22,7	35,2	19,4	
1,68	1,06	0,48		7,50%	6,55%	3,63%		22,4	32,4	18,8	
1,68	1,06	0,48		7,55%	6,55%	3,72%		22,3	32,8	18,2	
1,68	1,06	0,48		7,58%	7,57%	3,86%		22,2	25,1	28,2	
1,68	1,06	0,48		7,58%	7,76%	3,99%		22,2	24,0	29,5	
1,68	1,06	0,48		7,61%	7,86%	4,16%		22,1	23,6	28,5	
1,68	1,06	0,48		7,68%	7,97%	4,17%		21,9	23,4	30,3	
1,68	1,06	0,48		7,79%	8,14%	4,17%		21,6	22,9	34,4	
1,68	1,06	0,48		7,84%	8,22%	4,29%		21,5	22,7	33,5	
1,68	1,06	0,48		7,91%	8,30%	4,32%		21,3	22,6	34,8	
1,68	1,06	0,48		7,96%	8,39%	4,49%		21,2	22,4	33,1	
1,68	1,06	0,48		8,00%	8,47%	4,70%		21,1	22,1	30,6	
1,68	1,06	0,48		8,05%	8,65%	4,84%		20,9	21,5	31,5	
1,68	1,06	0,48		8,11%	8,77%	5,01%		20,8	21,2	30,8	
1,68	1,06	0,48		8,18%	8,90%	5,20%		20,6	20,9	29,9	
1,72	1,09	0,51	1,00	8,24%	9,00%	5,40%		20,8	21,4	30,0	
1,78	1,16	0,58	0,03	8,35%	9,08%	5,67%	-0,27%	21,4	22,7	30,7	-12,3

Tabela, 7-6 – Tensão vertical, deformação específica vertical e módulo de deformabilidade.

Tensão Vertical (σ_y) (MPa)				DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA (%)				MÓDULO DE DEFORMABILIDADE (Mpa)			
CR-5	CR10	CR14	CR16	CR-5	CR10	CR14	CR16	CR-5	CR10	CR14	CR16
1,87	1,25	0,67	0,12	8,42%	9,18%	5,90%	-0,50%	22,2	24,2	33,3	-24,2
1,88	1,26	0,68	0,13	8,47%	9,28%	6,64%	-1,21%	22,2	24,1	25,8	-11,0
1,95	1,33	0,75	0,20	8,56%	9,40%	7,09%	-1,30%	22,8	25,2	25,4	-15,6
1,99	1,37	0,79	0,24	8,60%	9,50%	7,38%	-1,04%	23,2	25,7	25,1	-23,5
2,08	1,46	0,88	0,33	8,67%	9,88%	7,64%	-0,92%	24,0	25,8	29,3	-36,2
2,11	1,48	0,90	0,35	8,71%	9,88%	7,90%	-0,83%	24,2	26,3	27,7	-42,5
2,11	1,48	0,90	0,35	8,74%	10,08%	8,31%	-0,86%	24,1	25,5	26,0	-41,4
2,11	1,48	0,90	0,35	8,77%	10,21%	8,37%	-0,35%	24,0	25,1	26,7	-100,2
2,11	1,48	0,90	0,35	8,81%	10,35%	8,55%	-0,34%	23,9	24,6	26,4	-104,4
2,11	1,48	0,90	0,35	8,81%	10,43%	8,72%	-0,36%	23,9	24,2	25,9	-97,5
2,11	1,48	0,90	0,35	8,81%	10,68%	8,88%	-0,43%	23,9	23,3	26,7	-81,6
2,11	1,48	0,90	0,35	8,84%	10,70%	9,03%	-0,43%	23,8	23,3	25,7	-82,8
2,11	1,48	0,90	0,35	8,90%	10,76%	9,23%	-0,36%	23,7	23,3	24,7	-98,3
2,11	1,48	0,90	0,35	8,91%	10,88%	9,30%	-0,09%	23,6	22,9	25,2	-389,0
2,11	1,48	0,90	0,35	8,92%	10,97%	9,30%	-0,05%	23,6	22,6	25,8	-761,0
2,11	1,48	0,90	0,35	8,92%	11,04%	9,34%	-0,06%	23,6	22,4	26,1	-603,6
2,11	1,48	0,90	0,35	8,94%	11,25%	9,36%	-0,03%	23,6	21,7	27,7	-1.346,4
2,11	1,48	0,90	0,35	8,95%	11,26%	9,37%	0,01%	23,5	21,7	27,7	3.500,7
2,11	1,48	0,90	0,35	8,96%	11,26%	9,39%	0,00%	23,5	21,7	27,6	-8.751,6
2,11	1,48	0,90	0,35	8,96%	11,29%	9,41%	0,03%	23,5	21,7	27,7	1.094,0
2,11	1,48	0,90	0,35	8,97%	11,31%	9,48%	0,00%	23,5	21,6	27,3	-8.751,6
2,11	1,48	0,90	0,35	9,00%	11,31%	9,48%	0,01%	23,4	21,7	27,3	4.375,8
2,11	1,48	0,90	0,35	9,00%	11,33%	9,50%	-0,01%	23,4	21,6	27,3	-3.500,7
2,11	1,48	0,90	0,35	9,00%	11,34%	9,54%	-0,01%	23,4	21,6	27,0	-3.500,7
2,11	1,48	0,90	0,35	9,01%	11,36%	9,57%	-0,01%	23,4	21,6	27,0	-4.375,8
2,11	1,48	0,90	0,35	9,02%	11,36%	9,58%	0,02%	23,3	21,6	26,9	1.750,3
2,11	1,48	0,90	0,35	9,03%	11,39%	9,60%	0,06%	23,3	21,5	27,0	603,6
2,15	1,53	0,95	0,40	9,05%	11,41%	9,62%	0,07%	23,8	22,1	28,4	596,7
2,15	1,53	0,95	0,40	9,06%	11,27%	9,67%	0,05%	23,7	22,6	26,7	757,3
2,15	1,53	0,95	0,40	9,07%	11,44%	9,70%	0,07%	23,7	22,1	27,9	547,0
2,15	1,53	0,95	0,40	9,08%	11,45%	9,74%	0,05%	23,7	22,1	27,7	729,3
2,15	1,53	0,95	0,40	9,11%	11,47%	9,77%	0,05%	23,6	22,1	27,7	757,3
2,15	1,53	0,95	0,40	9,14%	11,48%	9,78%	0,05%	23,5	22,1	27,6	820,4
2,25	1,63	1,05	0,50	9,16%	11,51%	9,80%	0,06%	24,6	23,6	30,7	848,7
2,25	1,63	1,05	0,50	9,15%	11,54%	9,85%	0,08%	24,6	23,4	30,5	600,3
2,25	1,63	1,05	0,50	9,16%	11,56%	9,89%	0,09%	24,5	23,4	30,3	546,9
2,25	1,63	1,05	0,50	9,16%	11,57%	9,95%	0,13%	24,5	23,4	29,9	390,7
2,25	1,63	1,05	0,50	9,17%	11,59%	9,97%	0,17%	24,5	23,3	29,9	300,1
2,25	1,63	1,05	0,50	9,17%	11,59%	9,97%	0,17%	24,5	23,3	29,9	300,1
2,25	1,63	1,05	0,50	9,18%	11,59%	9,97%	0,16%	24,5	23,3	29,9	311,5
2,25	1,63	1,05	0,50	9,19%	11,59%	9,97%	0,16%	24,5	23,3	29,9	311,5
2,25	1,63	1,05	0,50	9,18%	11,59%	9,97%	0,16%	24,5	23,3	29,9	315,5
2,25	1,63	1,05	0,50	9,18%	11,60%	9,98%	0,16%	24,5	23,3	29,9	315,5
2,25	1,63	1,05	0,50	9,21%	11,61%	9,98%	0,16%	24,4	23,3	30,0	319,6
2,25	1,63	1,05	0,50	9,20%	11,61%	9,98%	0,16%	24,4	23,3	30,0	319,6
2,25	1,63	1,05	0,50	9,21%	11,61%	9,98%	0,17%	24,4	23,3	30,0	300,1
2,25	1,63	1,05	0,50	9,23%	11,61%	9,99%	0,17%	24,4	23,4	30,0	300,1
2,25	1,63	1,05	0,50	9,28%	11,62%	10,00%	0,16%	24,2	23,5	29,9	303,8
2,25	1,63	1,05	0,50	9,43%	11,63%	10,03%	0,15%	23,9	23,9	29,7	337,1
2,25	1,63	1,05	0,50	9,44%	11,69%	10,09%	0,13%	23,8	23,7	29,8	378,6
2,25	1,63	1,05	0,50	9,45%	11,71%	10,13%	0,14%	23,8	23,7	29,6	356,2
2,25	1,63	1,05	0,50	9,46%	11,71%	10,13%	0,14%	23,8	23,7	29,7	361,9
2,25	1,63	1,05	0,50	9,46%	11,76%	10,13%	0,15%	23,8	23,5	30,1	332,6
2,25	1,63	1,05	0,50	9,47%	11,79%	10,20%	0,08%	23,8	23,4	29,8	631,1
2,25	1,63	1,05	0,50	9,40%	11,79%	10,21%	0,06%	23,9	23,2	29,7	769,1

Tabela, 7-7 – Continuação da tabela, 7-6.

As tabelas, 7-8 e 7-9 mostram as deformações específicas horizontais e as tensões horizontais obtidas no estudo.

Deformação Específica Horizontal (%)				Tensão Horizontal σ_h (Mpa)			
CL4 - H6	CL3 - H5	CL2 - H4	CL1 - H3	CL4 - H7	CL3 - H6	CL2 - H5	CL1 - H4
0,000%				0,000			
0,003%				0,007			
0,003%				0,002			
0,003%				0,002			
0,003%				0,001			
0,003%				0,001			
0,000%				0,000			
0,006%				0,002			
0,009%				0,002			
0,000%				0,000			
0,019%				0,004			
0,037%				0,008			
0,053%				0,011			
0,059%	0,000%			0,012	0,000		
0,109%	0,072%			0,021	0,034		
0,138%	0,093%			0,029	0,052		
0,197%	0,029%			0,042	0,019		
0,347%	0,040%			0,080	0,065		
0,347%	0,039%			0,078	0,052		
0,409%	0,057%			0,095	0,049		
0,459%	0,077%			0,113	0,061		
0,497%	0,164%			0,121	0,093		
0,531%	0,225%			0,127	0,114		
0,547%	0,229%			0,129	0,095		
0,559%	0,232%			0,130	0,079		
0,566%	0,312%			0,130	0,100		
0,572%	0,374%			0,131	0,111		
0,581%	0,498%			0,131	0,146		
0,588%	0,451%	0,000%		0,130	0,132	0,000	
0,594%	0,489%	0,016%		0,137	0,189	0,003	
0,684%	0,604%	0,036%		0,156	0,230	0,007	
0,684%	0,655%	0,029%		0,155	0,241	0,005	
0,694%	0,667%	0,026%		0,157	0,235	0,005	
0,694%	0,710%	0,023%		0,156	0,230	0,004	
0,698%	0,705%	0,024%		0,156	0,231	0,004	
0,721%	0,747%	0,016%		0,160	0,188	0,005	
0,744%	0,740%	0,003%		0,165	0,178	0,001	
0,728%	0,750%	0,012%		0,161	0,177	0,004	
0,728%	0,750%	0,027%		0,160	0,175	0,008	
0,722%	0,754%	0,044%		0,156	0,173	0,015	
0,744%	0,778%	0,045%		0,160	0,177	0,015	
0,740%	0,815%	0,045%		0,158	0,184	0,016	
0,732%	0,833%	0,030%		0,155	0,186	0,010	
0,733%	0,853%	0,033%		0,154	0,189	0,010	
0,731%	0,909%	0,020%		0,153	0,196	0,006	
0,728%	0,947%	0,040%		0,151	0,201	0,012	
0,743%	0,938%	0,030%		0,153	0,196	0,009	
0,740%	0,964%	0,036%	0,003%	0,154	0,206	0,011	0,000
0,714%	0,992%	0,036%	0,000%	0,153	0,225	0,011	0,000

Tabela, 7-8 – Deformação Específica horizontal e Tensão horizontal.

Deformação Específica Horizontal (%)				Tensão Horizontal σ_h (Mpa)			
CL4 - H6	CL3 - H5	CL2 - H4	CL1 - H3	CL4 - H7	CL3 - H6	CL2 - H5	CL1 - H4
0,728%	1,082%	0,032%	0,010%	0,162	0,262	0,011	-0,001
0,732%	1,101%	0,042%	0,048%	0,163	0,265	0,011	-0,007
0,753%	1,115%	0,053%	0,089%	0,172	0,281	0,014	-0,021
0,772%	1,106%	0,083%	0,082%	0,179	0,284	0,021	-0,030
0,757%	1,203%	0,112%	0,075%	0,182	0,310	0,033	-0,032
0,781%	1,212%	0,153%	0,149%	0,189	0,319	0,042	-0,062
0,818%	1,167%	0,176%	0,214%	0,197	0,298	0,046	-0,215
0,807%	1,250%	0,176%	0,259%	0,194	0,313	0,047	-0,271
0,810%	1,233%	0,224%	0,271%	0,194	0,303	0,059	-0,264
0,816%	1,221%	0,265%	0,318%	0,195	0,296	0,069	-0,259
0,831%	1,290%	0,300%	0,355%	0,199	0,301	0,080	-0,294
0,825%	1,272%	0,310%	0,419%	0,196	0,297	0,080	-0,412
0,818%	1,299%	0,326%	0,474%	0,194	0,302	0,081	-1,844
0,831%	1,295%	0,337%	0,450%	0,196	0,296	0,085	-3,421
0,828%	1,305%	0,331%	0,450%	0,196	0,295	0,085	-2,713
0,847%	1,270%	0,314%	0,501%	0,200	0,284	0,082	-6,747
0,853%	1,268%	0,323%	0,505%	0,201	0,276	0,090	17,665
0,848%	1,278%	0,315%	0,495%	0,199	0,278	0,087	-43,286
0,853%	1,284%	0,315%	0,491%	0,200	0,279	0,087	5,372
0,856%	1,281%	0,316%	0,525%	0,201	0,278	0,087	-45,946
0,866%	1,297%	0,307%	0,530%	0,203	0,280	0,084	23,213
0,856%	1,306%	0,305%	0,543%	0,200	0,283	0,083	-18,999
0,862%	1,281%	0,302%	0,560%	0,202	0,277	0,082	-19,615
0,872%	1,288%	0,291%	0,551%	0,204	0,278	0,079	-24,128
0,875%	1,304%	0,292%	0,551%	0,204	0,281	0,079	9,651
0,863%	1,310%	0,292%	0,544%	0,201	0,283	0,079	3,286
0,878%	1,327%	0,291%	0,537%	0,205	0,285	0,078	3,207
0,862%	1,316%	0,294%	0,578%	0,205	0,291	0,084	4,379
0,875%	1,296%	0,297%	0,547%	0,208	0,293	0,079	2,994
0,875%	1,309%	0,285%	0,555%	0,207	0,289	0,080	4,051
0,871%	1,316%	0,279%	0,552%	0,206	0,291	0,077	4,180
0,891%	1,346%	0,276%	0,552%	0,210	0,297	0,076	4,529
0,900%	1,344%	0,273%	0,562%	0,212	0,297	0,075	4,773
0,897%	1,341%	0,265%	0,588%	0,220	0,316	0,081	3,529
0,888%	1,347%	0,269%	0,610%	0,218	0,316	0,082	3,338
0,928%	1,387%	0,271%	0,635%	0,228	0,325	0,082	2,479
0,938%	1,363%	0,263%	0,708%	0,230	0,318	0,078	2,124
0,940%	1,363%	0,263%	0,739%	0,231	0,318	0,079	2,218
0,934%	1,363%	0,263%	0,739%	0,229	0,318	0,079	2,302
0,934%	1,366%	0,264%	0,739%	0,229	0,319	0,079	2,302
0,934%	1,366%	0,264%	0,739%	0,229	0,319	0,079	2,332
0,938%	1,366%	0,266%	0,736%	0,230	0,319	0,080	2,321
0,938%	1,369%	0,266%	0,732%	0,230	0,319	0,080	2,339
0,938%	1,369%	0,264%	0,746%	0,229	0,320	0,079	2,384
0,938%	1,369%	0,264%	0,746%	0,229	0,319	0,079	2,238
0,941%	1,369%	0,264%	0,749%	0,230	0,320	0,079	2,248
0,938%	1,362%	0,266%	0,752%	0,228	0,319	0,080	2,286
0,938%	1,363%	0,267%	0,756%	0,227	0,320	0,080	2,548
0,938%	1,356%	0,265%	0,756%	0,224	0,324	0,079	2,861
0,941%	1,360%	0,264%	0,756%	0,224	0,322	0,079	2,691
0,941%	1,363%	0,263%	0,756%	0,224	0,323	0,078	2,735
0,947%	1,360%	0,263%	0,755%	0,225	0,322	0,078	2,513
0,941%	1,375%	0,263%	0,755%	0,224	0,323	0,079	4,767
0,916%	1,375%	0,260%	0,759%	0,218	0,322	0,078	5,838
0,934%	1,372%	0,260%	0,759%	0,224	0,319	0,077	0,000
0,919%	1,372%	0,258%	0,762%	0,000	0,000	0,000	-1,126
0,935%	1,363%	0,246%	0,766%	0,228	0,437	0,080	0,000

Tabela, 7-9 – Continuação da tabela, 7-8.

7.7 RESULTADO DOS ESTUDOS DE AVALIAÇÃO DA TRAJETÓRIA DE TENSÕES

Nas tabelas, 7-10 e 7-11 mostram os cálculos de $P = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2}$ e $Q = \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2}$ para cada par de instrumentos, Caixa Sueca e Extensômetro de Haste considerados no estudo e localizados no eixo da barragem conforme mostra a figura, 7-1.

CR05 e CL4-H5		CR10 e CL3-H4		CR14 e CL2-H3		CR165 e CL1-H2	
$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$	$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$	$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$	$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$
0,041	0,041						
0,080	0,072						
0,094	0,092						
0,109	0,107						
0,109	0,107						
0,122	0,121						
0,131	0,131						
0,151	0,149						
0,173	0,171						
0,218	0,218						
0,252	0,248						
0,281	0,274						
0,332	0,321						
0,350	0,338	0,032	0,032				
0,388	0,366	0,082	0,048				
0,458	0,429	0,158	0,106				
0,531	0,489	0,208	0,189				
0,688	0,608	0,369	0,304				
0,687	0,609	0,363	0,311				
0,743	0,647	0,408	0,359				
0,805	0,691	0,467	0,406				
0,808	0,688	0,483	0,390				
0,811	0,685	0,493	0,380				
0,812	0,684	0,484	0,389				
0,813	0,683	0,476	0,397				
0,813	0,683	0,487	0,386				
0,813	0,683	0,492	0,381				
0,814	0,682	0,510	0,363				
0,813	0,683	0,502	0,370	0,146	0,146		
0,905	0,768	0,620	0,430	0,148	0,144		
0,915	0,759	0,640	0,410	0,238	0,231		
0,914	0,759	0,646	0,404	0,237	0,232		
0,921	0,763	0,648	0,413	0,237	0,232		
0,920	0,764	0,646	0,415	0,242	0,238		
0,920	0,764	0,646	0,415	0,242	0,238		
0,922	0,762	0,624	0,437	0,243	0,238		
0,925	0,759	0,619	0,442	0,241	0,240		
0,923	0,762	0,619	0,442	0,242	0,238		
0,922	0,762	0,618	0,443	0,244	0,236		
0,920	0,764	0,617	0,444	0,248	0,233		
0,922	0,762	0,619	0,442	0,248	0,233		
0,921	0,763	0,623	0,438	0,248	0,232		
0,920	0,765	0,624	0,437	0,245	0,235		
0,919	0,765	0,625	0,436	0,245	0,235		
0,919	0,766	0,628	0,433	0,243	0,237		
0,918	0,766	0,631	0,430	0,246	0,234		
0,919	0,766	0,628	0,433	0,245	0,236		
0,936	0,782	0,650	0,444	0,246	0,235	0,500	0,500
0,968	0,816	0,693	0,468	0,262	0,251	0,017	0,017

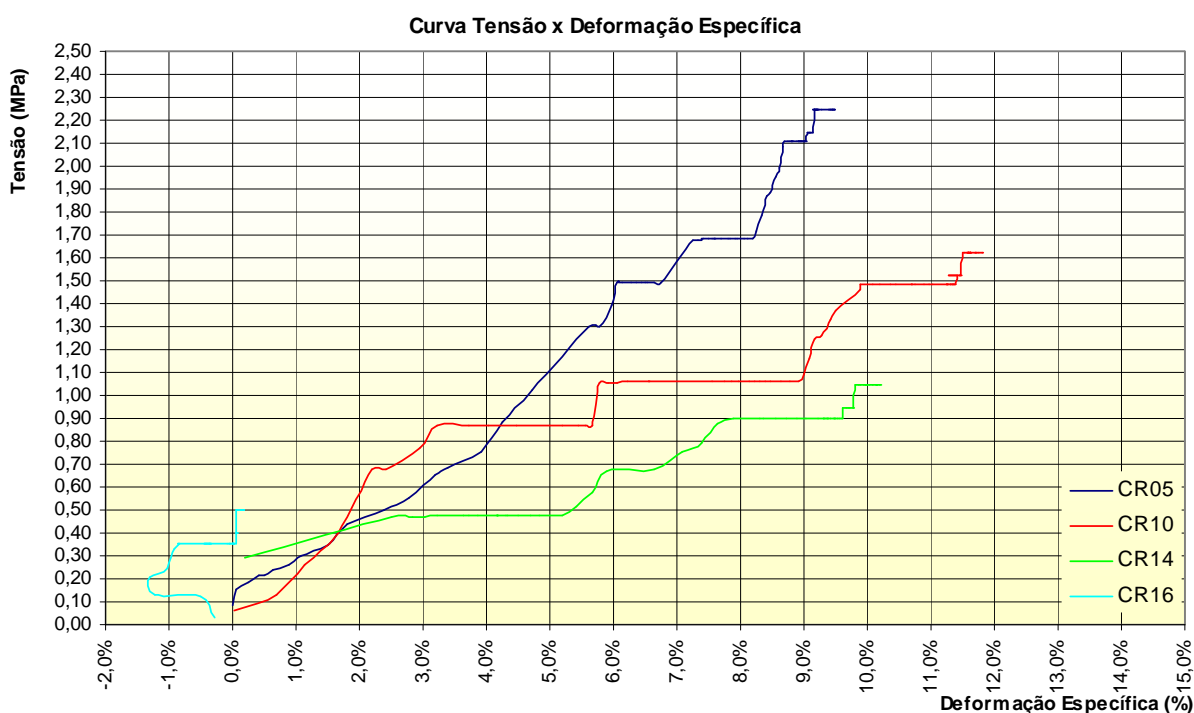
Tabela, 7-10 – Tabela com os valores de P e Q.

CR05 e CL4-H5		CR10 e CL3-H4		CR14 e CL2-H3		CR165 e CL1-H2	
$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$	$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$	$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$	$(\sigma_v + \sigma_h)/2$	$(\sigma_v - \sigma_h)/2$
1,017	0,855	0,756	0,494	0,295	0,285	0,060	0,062
1,023	0,860	0,763	0,498	0,340	0,329	0,063	0,070
1,063	0,891	0,806	0,525	0,347	0,333	0,092	0,112
1,087	0,908	0,828	0,544	0,386	0,365	0,107	0,137
1,132	0,951	0,885	0,575	0,412	0,379	0,150	0,182
1,147	0,958	0,900	0,582	0,461	0,418	0,146	0,208
1,151	0,954	0,890	0,592	0,474	0,428	0,070	0,285
1,149	0,956	0,898	0,584	0,474	0,427	0,042	0,313
1,149	0,956	0,893	0,589	0,480	0,421	0,045	0,310
1,150	0,955	0,889	0,593	0,485	0,416	0,048	0,307
1,152	0,953	0,891	0,591	0,491	0,411	0,030	0,324
1,151	0,954	0,889	0,593	0,491	0,411	-0,029	0,383
1,149	0,956	0,892	0,590	0,491	0,410	-0,745	1,099
1,151	0,954	0,889	0,593	0,493	0,408	-1,533	1,888
1,150	0,955	0,888	0,594	0,493	0,408	-1,179	1,534
1,152	0,953	0,883	0,599	0,492	0,410	-3,196	3,551
1,153	0,952	0,879	0,603	0,495	0,406	9,010	-8,655
1,152	0,953	0,880	0,602	0,494	0,407	-21,466	21,820
1,153	0,952	0,881	0,601	0,494	0,407	2,863	-2,509
1,153	0,952	0,880	0,602	0,494	0,407	-22,796	23,150
1,154	0,951	0,881	0,601	0,492	0,409	11,784	-11,429
1,153	0,952	0,883	0,599	0,492	0,409	-9,322	9,677
1,153	0,952	0,879	0,603	0,492	0,409	-9,630	9,985
1,154	0,951	0,880	0,602	0,490	0,411	-11,887	12,241
1,155	0,950	0,881	0,600	0,490	0,411	5,003	-4,648
1,153	0,952	0,882	0,600	0,490	0,411	1,820	-1,466
1,155	0,950	0,884	0,598	0,490	0,411	1,781	-1,426
1,177	0,972	0,909	0,618	0,492	0,409	2,389	-1,990
1,179	0,971	0,910	0,617	0,513	0,433	1,696	-1,298
1,178	0,971	0,908	0,619	0,513	0,433	2,225	-1,826
1,178	0,972	0,908	0,618	0,511	0,434	2,289	-1,891
1,180	0,970	0,912	0,614	0,511	0,435	2,464	-2,065
1,181	0,969	0,912	0,614	0,511	0,435	2,586	-2,187
1,235	1,014	0,971	0,655	0,513	0,432	2,014	-1,515
1,234	1,015	0,971	0,655	0,564	0,482	1,918	-1,420
1,238	1,011	0,975	0,651	0,564	0,482	1,489	-0,990
1,240	1,010	0,972	0,654	0,562	0,483	1,311	-0,813
1,240	1,009	0,972	0,654	0,562	0,483	1,358	-0,860
1,239	1,010	0,972	0,654	0,562	0,483	1,400	-0,902
1,239	1,010	0,972	0,654	0,562	0,483	1,400	-0,902
1,239	1,010	0,972	0,654	0,562	0,483	1,415	-0,917
1,239	1,010	0,972	0,654	0,562	0,483	1,410	-0,911
1,239	1,010	0,973	0,653	0,562	0,483	1,419	-0,920
1,239	1,010	0,973	0,653	0,562	0,483	1,441	-0,943
1,239	1,010	0,973	0,653	0,562	0,483	1,368	-0,870
1,239	1,010	0,973	0,653	0,562	0,483	1,373	-0,875
1,239	1,010	0,972	0,654	0,563	0,483	1,392	-0,894
1,238	1,011	0,973	0,653	0,563	0,483	1,523	-1,025
1,236	1,013	0,975	0,651	0,562	0,483	1,680	-1,181
1,237	1,013	0,974	0,652	0,562	0,483	1,595	-1,096
1,236	1,013	0,974	0,652	0,562	0,484	1,617	-1,118
1,237	1,012	0,974	0,652	0,562	0,484	1,506	-1,007
1,236	1,013	0,975	0,651	0,562	0,483	2,633	-2,134
1,233	1,016	0,974	0,652	0,561	0,484	3,168	-2,670
1,236	1,013	0,972	0,654	0,561	0,484	0,249	0,249

Tabela, 7-11 – Continuação da Tabela, 7-10.

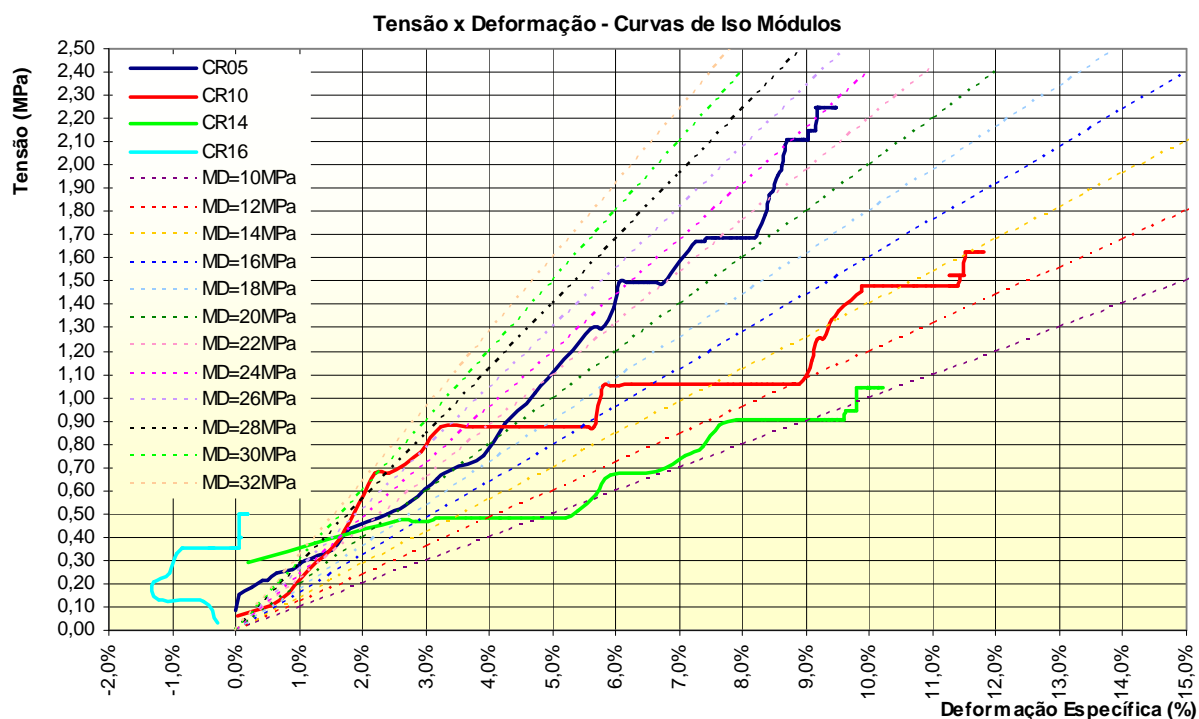
Os resultados mostram de uma maneira geral uma boa relação, indicando que o aprofundamento dos estudos com os resultados obtidos com a instrumentação são promissores. Percebem-se perturbações dos resultados nos estágios iniciais do carregamento e com os dados da Caixa Sueca posicionada mais no topo da barragem. Esta condição deve-se, pela desproporção entre deformação e carga aplicada. Normalmente tem-se uma camada espessa e o carregamento é muito pequeno. O efeito do peso próprio desta camada espessa influencia no processo de recalque.

Na figura, 7-5 apresenta o gráfico da curva tensão versus deformação. Somente a curva correspondente a CR16 é que apresenta resultados com distúrbios, uma das possíveis razões reside no fato do instrumento estar posicionado muito ao topo da barragem sendo o carregamento muito pequeno. Pode-se observar que com o passar do tempo a tendência é de que apresente dados mais consistentes.

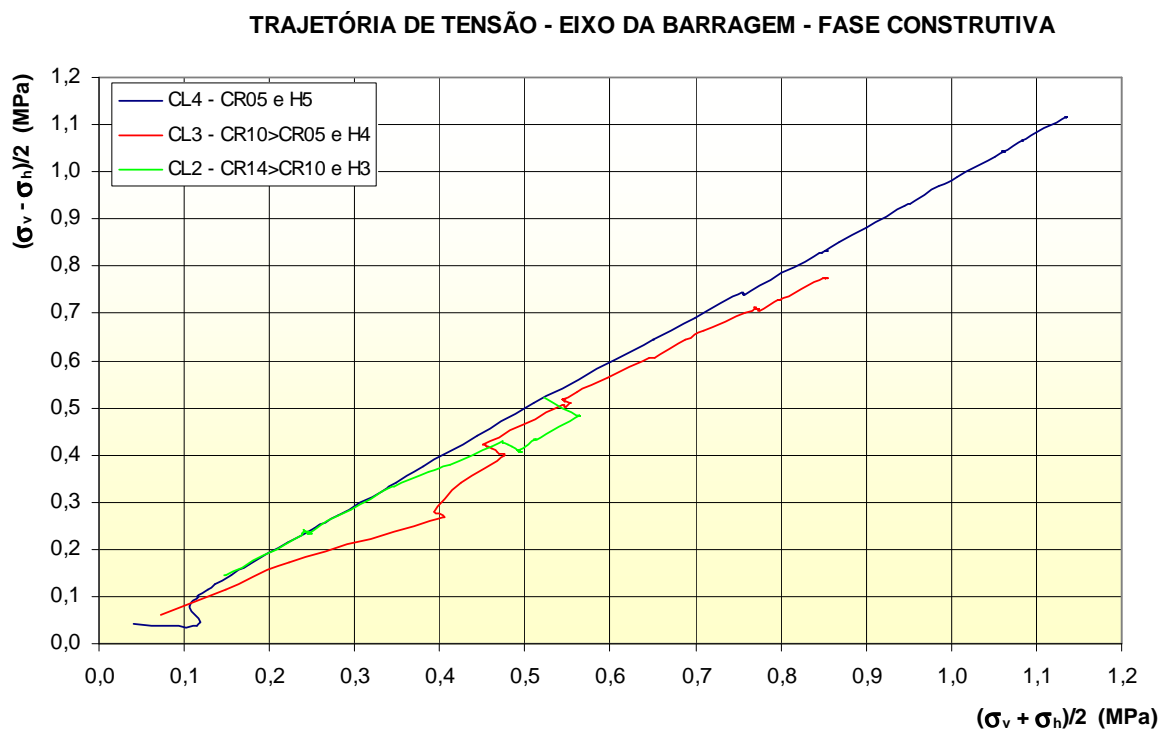


Figura, 7-5 – Curva Tensão Deformação.

No gráfico da figura, 7-6 foi plotado as “curvas” de iso módulos juntamente com as curvas de tensão deformação. O gráfico mostra a boa relação entre o uso de um módulo secante médio e o desenvolvimento da curva tensão deformação, a qual se desenvolve segundo uma linha de iso módulo mostrando uma correlação linear.



A trajetória de tensões no eixo da barragem é apresentada na figura, 7-7.



CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, e em diferentes ocasiões, a sua exeqüibilidade ficou ameaçada em função da disponibilidade de informações necessárias para a conclusão do mesmo. Porém, com as parcerias criadas, teve-se paulatinamente acesso aos dados de maneira a propiciar um desenvolvimento dos objetivos dentro de condições adequadas de confiabilidade e representatividade das informações. Isto possibilitou concluir que:

- Foi possível descrever de maneira simples a evolução das barragens de enrocamentos com face de concreto no Brasil. O trabalho mostra também que o estado da arte praticada no Brasil se reflete no mundo, podendo-se inclusive afirmar, que atualmente o Brasil é um exportador das novas práticas construtivas destas estruturas.
- Outra questão foi a da capacitação técnica e instrumental proporcionada. Pode-se considerar que este objetivo teve pleno sucesso. A parceria criada entre a entidade de ensino e da iniciativa privada, por meio do engajamento dos profissionais de ensino da UFSC e técnicos da Leme Engenharia, com o incentivo á pesquisa da Tractebel, mostrou-se totalmente viável. Os resultados alcançados estão presentes no desenvolvimento do laboratório de “Mecânica dos Enrocamentos”, a apresentação de dissertações de mestrado, e em andamento, teses de doutorado. Além disto está promovendo a troca de conhecimento, criando espaço para a pesquisa e fomentando o ensino de graduação.
- Finalizando os objetivos traçados, têm-se os estudos das trajetórias de tensão no maciço das barragens com base na instrumentação instalada na barragem. Apesar de ter sido apresentado somente um estudo que considerou as medições no eixo da estrutura, a análise é válida principalmente pelo fato de ter promovido a abertura destas informações para o meio acadêmico. Estudos envolvendo as informações dos materiais, ensaios tecnológicos de campo e dados da instrumentação em diferentes posições da barragem, forneceram novas informações para os estudos de laboratório. Transpondo os resultados dos estudos, juntamente com dados de campo para o laboratório, podem-se definir os tipos de ensaios laboratoriais que se aplicam para a obtenção de parâmetros para o dimensionamento da estrutura. Com isto pode-se elaborar critérios de amostragem e ensaios, para a determinação de parâmetros com os quais, podem-se melhorar as previsões do comportamento das estruturas de enrocamento.

- Apesar de ser um objetivo, a abordagem do controle tecnológico feitos durante a construção da barragem de enrocamento e o acompanhamento do desempenho por meio da instrumentação, item 3.4 e Capítulo 4 respectivamente, possibilitou dar uma melhor visão dos processos executivos das barragens de enrocamento com face de concreto. A preocupação com a qualidade, segurança destas estruturas e a busca do conhecimento com relação ao mecanismo de funcionamento das barragens é um fator sempre presente.

Diante do acima exposto os objetivos traçados para este trabalho foram satisfatoriamente alcançados.

É importante ainda salientar que as estruturas de enrocamento têm muito a ser estudada. Assim o desenvolvimento da “Mecânica dos Enrocamentos”, deve merecer apoio e dar-se continuidade aos trabalhos até agora desenvolvidos.

Desta forma sugere-se:

- Incentivo a pesquisa concernente as Barragens de Enrocamentos com Face de Concreto.
- Aumentar o intercambio de profissionais das empresas de projeto e construção com os centros de pesquisa.
- Disponibilização por parte dos detentores dos dados das instrumentações de auscultação para os estudos e pesquisas.
- Os estudos de Trajetória de Tensão devem envolver outras áreas da seção da estrutura da barragem, verificando a influência do confinamento.
- Promover estudos com outras barragens com características semelhantes.
- Transpor e simular em laboratório, as trajetórias obtidas com as informações de campo, de maneira a se obter os parâmetros para o dimensionamento dos novos projetos

CAPÍTULO 9 BIBLIOGRÁFICA

COOKE, J. B. The Development of Today's CFRD Dam. Anais do II Simpósio sobre barragens de enrocamento com face de concreto, Florianópolis, p. 14-15, 1999.

SHERARD, J. The Upstream Zone in Concrete-Face Rockfill Dams. Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction, and Performance. J. B. Cooke & J. L. Sherard, ASCE P.618, 1985.

CRUZ, P.T. 100 Barragens Brasileiras – Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. Oficina de Textos, p. 517, 1996.

ELETROSUL. Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai – Estudo de Inventário Hidroenergético, 1979

FITZPATRICK, M. D.; Cole, A. B.; Kinstler, F. L.; Knoop, B. P. Design of Concrete-Faced Rockfill Dams.

IMAIZUMI H., Sardinha A. E. A Study of Deformations in Concrete Faced Rockfill Dams. Concrete Face Rockfill Dams – Design, Construction and Performance. J. B. Cooke & J. L. Sherard, ASCE, p.528-540, 1985.

MAIA, P.C.A. - Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC - Rio, 351 p. Rio de Janeiro, 2001.

MARSAL, R. Mechanical properties of rockfill soil mixtures.1973.

MARSAL, R. Mechanical properties of rockfill soil mixtures.1965 livro (completar).

MARSAL, R. Mechanical properties of rockfill soil mixtures.1976 congresso (completar).

MARSAL, R. Mechanical properties of rockfill soil mixtures.1967(completar).

MATERÓN B. Transition material in the highest CFRDs. *Hydropower & Dams*, Issue Six, p. 33-40, 1998.

MATHESON, G. M. Relationship between compacted rockfill density and gradation, *J. Geotechnical Engineering ASCE*, vol. 112, n° 12, p 1119-1124, 1986.

MELLO, V. F. B. Fourteenth international congress in large dams, Vol. 5, Question 55, Discussions. Rio de Janeiro, 1982.

NEVES, E. Maranha das. Algumas considerações sobre a mecânica dos enrocamentos. *Solos e rochas*, São Paulo, 25, Set-Dez, 2002.

OLDCOP, L.A.;Alonso. E. A model for rockfill compressibility. *Geotechnique*. V 51, no 2, p 11-139. 2001.

PACHECO, Débora; Ensaio de Compressão Unidimensional em Amostras de Grandes Dimensões: Desenvolvimento do Equipamento e Realização de Ensaios em Basalto da UHE Machadinho. Dissertação de Mestrado, UFSC, 2004.

PENMAN, A. D. M.; Burland, J. B.; Charles J. A. Observed and predicted deformations in a large embankment dam during construction. *Proc. of the ICE*, v. 49, May, 1971.

PEIXOTO M., Saboya Jr. F. - Análise de movimentações diferenciais entre a face e o maciço em barragens de enrocamento. II Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, *Anais*, p.119-128, 1998.

RAMMANURTHY, T.; Gupta, K. K. Prediction of the behavior of rockfill materials. *Proceedings, 3rd Australian-New Zealand Conference on Geomechanics*, Vol. 3:13-18, Wellington, 1980.

SABOYA JR., F.; Byrne, P. M. Parameters for stress and deformations analysis of rockfill dams. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, p. 690-701, 1993.

SABOYA JR., F. Considerações sobre compressibilidade de enrocamentos e determinação de parâmetros para análise numérica de barragens de enrocamento com face de concreto. Anais do II Simpósio sobre barragens de enrocamento com face de concreto, Florianópolis, p. 99-110, 1999.

SINGER, S. Estudo Experimental da Resistência ao Cisalhamento dos Basaltos Desagregados e Desagregáveis de Capivara. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 92 p., 1973.

VEIGA PINTO, A. A. Características de resistência e deformabilidade dos materiais de enrocamento. Geotecnia n°27. Lisboa: 1979.

VEIGA PINTO, A. A. Previsão do Comportamento Estrutural de barragens de enrocamento. Proc. 53-11-7384. Lisboa: 1983.

VEIGA PINTO, A. A.; Neves, E. Maranha das. Modelling collapse on rockfill dams. Computers and Geotechnics, vol. 6, issue 2, p 131-153, 1988.