

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

UMA NOVA ABORDAGEM PARA ANÁLISE DE
RUPTURA POR GALGAMENTO DE
BARRAGENS HOMOGÊNEAS DE SOLO
COMPACTADO

Aloysio Portugal Maia Saliba

Belo Horizonte

2009

Aloysio Portugal Maia Saliba

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA ANÁLISE DE
RUPTURA POR GALGAMENTO DE
BARRAGENS HOMOGÊNEAS DE SOLO
COMPACTADO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: modelagem física e matemática em hidráulica.

Orientadores: Carlos Barreira Martinez
Terezinha da Silva Jesus Espósito

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2009

S165n Saliba, Aloysio Portugal Maia
Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado [manuscrito] / Aloysio Portugal Maia Saliba .— 2009.
xiii, 120 f. , enc. : il.

Orientadores: Carlos Barreira Martinez.
Terezinha da Silva Jesus Espósito.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia e apêndices

1. Engenharia sanitária – Teses. 2. Meio ambiente – Teses . 3. Saneamento – Teses. 4. Recursos Hídricos – Teses. I. Martinez, Carlos Barreira . II. Espósito, Terezinha da Silva Jesus. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Av. Contorno 842 – 7º andar 30110-060 Belo Horizonte – BRASIL

Tel: 55 (31) 3238-1882 Fax: 55 (31) 3238-1882 posgrad@desa.ufmg.br

www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Uma Nova Abordagem para Análise de Ruptura por Galgamento de Barragens Homôneas de Solo Compactado

ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. CARLOS BARREIRA MARTINEZ

Profa TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO

Prof. GUSTAVO FERREIRA SIMÕES

Prof. LÚCIO FLÁVIO DE SOUSA VILLAR


Prof. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

Prof. MARCELO GIULIAN MARQUES

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Mauro da Cunha Naghettini
Coordenador


Prof. Carlos Barreira Martinez
Orientador

Belo Horizonte, 10 de março de 2009.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de muitos esforços pessoais, além daqueles do autor. Portanto, nada mais justo que agradecer a estas pessoas:

- à equipe do Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, por suportar a poeira e a bagunça decorrente da manipulação de solo em um laboratório de hidráulica: equipe de limpeza, funcionários, professores, demais orientados e alunos, muito obrigado. Agradecimento especial ao Marcus, Walfrido, Fernando e Paulo Roberto, pelo auxílio nos testes de erodibilidade;
- ao programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos da UFMG, pelo apoio e incentivo, mesmo nos momentos mais difíceis;
- aos amigos Ângelo, Andreza, Joana, Nery, Magno, Paulo, Robson, Sabrina, Sérgio, Zorzal, Renan, Marcus, Anderson, dentre outros, pelo estímulo e interesse;
- à Golder Associates, empresa que me apoiou no início e na conclusão deste trabalho, muito obrigado. Márcio Resende, José Mário Mafra, Evandro Gimenez e Ana Paula Viana em especial, muito obrigado;
- à Fundação Estadual do Meio Ambiente que prontamente disponibilizou acesso a dados sobre acidentes envolvendo barragens, em especial a Alexandre Guimarães e Rosângela Gurgel;
- à professora Terezinha Espósito, pelo olhar atento e apoio na geotecnia;
- ao professor Carlos Barreira Martinez, amigo e mestre, e sua esposa Edna;
- aos meus familiares, pelo apoio incondicional.

Acima de tudo, à minha família, Cristiane e Clara, por compreender meu afastamento durante o trabalho e apoiar seu desenvolvimento. Sem vocês eu não suportaria esta missão.

RESUMO

Barragens têm sido consideradas como alternativas viáveis para geração de energia, disposição de rejeitos, dentre outros, tendo em vista critérios de redução de custos, apesar de introduzir no sistema os riscos associados à ruptura. No Brasil, um dos tipos mais comuns de arranjo de barragem é aquele com maciço em solo compactado. Uma vez que o risco de uma atividade resulta do produto entre a probabilidade de falha e as consequências associadas, mantidas as probabilidades de falha, a redução das consequências da ruptura implica na redução dos riscos da atividade. Com este intuito foram estudados mecanismos intervenientes em rupturas por galgamento para identificar aspectos chave na mitigação destes riscos, acoplando os pontos de vista da hidráulica e da geotecnia. A pesquisa bibliográfica realizada identificou o grau de compactação do maciço como um dos aspectos chave neste sentido.

Os modelos de análise de ruptura de barragens em geral tratam os processos erosivos segundo o ponto de vista da teoria de transporte de sedimentos, admitidos como não coesivos, e com granulometria bastante distinta daquelas presentes nos maciços de barragens de solo compactado. Em lugar das equações de transporte de sedimentos utilizadas nas modelagens de ruptura, a metodologia proposta neste trabalho se vale do conceito de erodibilidade, que é o resultado de condições do material, do escoamento e de geometria do problema em análise. A metodologia prevê a realização de ensaios de erodibilidade, correlacionados ao grau de compactação e às velocidades de escoamento, para determinação da função erodibilidade. Essa função substitui as equações de transporte de sedimentos nos modelos de ruptura.

Para verificar a influência do grau de compactação na ruptura, foram realizados ensaios geotécnicos em amostras de solo obtidas em Belo Horizonte, MG, que foram submetidas a testes de erodibilidade a graus de compactação de 95% e 100%, em um aparato desenvolvido pelo autor. Os resultados apontaram diferenças significativas na erodibilidade do material. Foram também avaliados os processos em condições de escoamento oblíquo às camadas de compactação, verificando-se a existência de fenômenos adicionais no processo de erosão. Afim de demonstrar a aplicabilidade desta metodologia, foi realizado um estudo de caso valendo-se dos dados da ruptura da UHE Euclides da Cunha, admitindo-se a validade das equações de erodibilidade obtidas neste trabalho. Os resultados indicaram tempo de resposta duas vezes maior e vazão de pico efluente 19% menor, quando o grau de compactação cresce de 95% para 100%.

ABSTRACT

Dams have been considered as feasible alternatives to hydropower generation, tailings disposal etc in terms of costs, besides their inherent risks. In Brazil, dams are quite common. As the risks can be defined as the product of probability of failure and associated consequences, at the same probability level, reducing consequences also implies in lower risk levels. Erosion mechanisms observed on dam overtopping were studied in order to indentify the key aspects of risk reduction, with respect to hydraulic and geotechnical engineering. As identified on this research and from other authors, the compaction strongly interferes on soil erodibility.

Dam-break models treat erosion from sediment transport theory point of view, that means assumptions of non cohesive properties and rough granulometry, if compared to finer soils as clays common in Brazil. In spite of sediment transport equations, this work uses the concept of erodibility, which considers materials erodibility, flow and geometry properties to each specific problem. The proposed methodology states that for every dam-break study, an erodibility test must be done and correlated to soil compaction, in order to define a erodibility function that can replace sediment transport equations on dam-break models.

To assess soil compaction influence over a earthfill dam-break, geotechnical studies were carried out in soil samples obtained from Belo Horizonte, Minas Gerais, that were tested on a erosion apparatus designed by the author. Results indicate that there are significant differences on soil erodibility as soil compaction index raises from 95% to 100%. Influences of soil layers orientation relative to flow were also investigated on a flume, which results indicate that there are other processes interacting on dam breach erosion, besides flow erosion can be viewed as a trigger for them all. In order to assess the methodology applicability, one case study was done using Euclides da Cunha hydropower dam-break data, using the erodibility function obtained for Belo Horizonte soil, making an assumption that geotechnical properties could be considered the same. Results indicate differences by a factor of 2 to breach formation time and peak outflow 19% lower when compaction index raises from 95% to 100%.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| LISTA DE FIGURAS | VI |
| LISTA DE TABELAS..... | IX |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS | X |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 BARRAGENS NO BRASIL..... | 2 |
| 1.2 EVENTOS DE GALGAMENTO DE BARRAGENS..... | 5 |
| 1.2.1 Açude de Orós..... | 5 |
| 1.2.2 UHE Euclides da Cunha e UHE Armando Sales de Oliveira..... | 6 |
| 1.2.3 Barragem de contenção de rejeitos São Francisco..... | 8 |
| 1.3 A IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO SOBRE RUPTURAS DE BARRAGENS..... | 9 |
| 1.4 RELEVÂNCIA DO TRABALHO | 10 |
| 2 OBJETIVOS..... | 12 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL..... | 12 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 3.1 MECANISMOS DE RUPTURA DE BARRAGENS POR GALGAMENTO..... | 13 |
| 3.1.1 Fase 1: até a década de 70..... | 14 |
| 3.1.2 Fase 2: década de 80 em diante..... | 15 |
| 3.2 PROPAGAÇÃO HIDRODINÂMICA..... | 20 |
| 3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E EROSÃO..... | 25 |
| 3.3.1 Tensão de cisalhamento..... | 25 |
| 3.3.2 Tensão de cisalhamento crítica..... | 27 |
| 3.3.3 Equações de transporte de sedimentos..... | 29 |
| 3.3.4 Erodibilidade..... | 30 |
| 3.3.5 Aparatos existentes para determinação de parâmetros de erosão..... | 32 |
| 3.4 MODELAGEM NUMÉRICA..... | 35 |
| 3.4.1 Modelos de propagação unidimensionais..... | 36 |
| 3.4.2 Modelos de brecha..... | 39 |
| 4 METODOLOGIA PROPOSTA | 48 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MATERIAL UTILIZADO..... | 48 |
| 4.1.1 Ensaios de caracterização..... | 49 |
| 4.1.2 Ensaios de compactação..... | 51 |
| 4.1.3 Ensaios de adensamento..... | 52 |
| 4.1.4 Ensaios de cisalhamento direto..... | 53 |
| 4.1.5 Ensaios de compressão triaxial..... | 54 |
| 4.1.6 Ensaios de permeabilidade a carga variável..... | 56 |
| 4.2 OBSERVAÇÃO DO MECANISMO DE RUPTURA..... | 56 |
| 4.3 APARATO DE TESTE DE ERODIBILIDADE..... | 58 |
| 4.3.1 Aparato de teste em conduto livre..... | 58 |
| 4.3.2 Aparato de teste em conduto forçado..... | 64 |
| 4.4 METODOLOGIA DE ENSAIO..... | 68 |
| 4.5 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS CAMADAS DE COMPACTAÇÃO..... | 75 |
| 4.6 AMPLIAÇÃO DO PRAZO DE RUPTURA EM FUNÇÃO DO AUMENTO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO..... | 78 |
| 5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA | 80 |
| 5.1 RESULTADOS E ANÁLISE DOS TESTES DE ERODIBILIDADE EM CAMADAS PARALELAS..... | 80 |
| 5.2 OBSERVAÇÃO E ANÁLISE DOS TESTES DE ERODIBILIDADE EM CAMADAS OBLÍQUAS..... | 95 |
| 6 ESTUDO DE CASO | 101 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 117 |
| 7.1 | COMENTÁRIOS FINAIS | 117 |
| 7.2 | CONCLUSÕES | 118 |
| 7.3 | RECOMENDAÇÕES..... | 119 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 121 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Seção típica de uma barragem de terra. | 4 |
| Figura 1.2: Maciço do Açude de Orós após o galgamento. | 6 |
| Figura 1.3: Maciço da UHE Euclides da Cunha após o galgamento, em 21/01/1977. | 7 |
| Figura 1.4: Maciço da UHE Armando Sales de Oliveira após o galgamento, em 21/01/1977. | 7 |
| Figura 1.5: Brecha originada na ruptura da BSF. | 8 |
| Figura 3.1: Representação de trecho de curso de água para derivação das equações de Saint-Venant. | 20 |
| Figura 3.2: Diagrama de Shields (material não coesivo). | 28 |
| Figura 3.3: Diagrama de erodibilidade. | 32 |
| Figura 3.4: Diagrama tensão versus deformação para fluidos. | 37 |
| Figura 3.5: Representação da brecha no modelo BREACH. | 42 |
| Figura 4.1: Local de coleta da amostra de solo utilizada nos ensaios. | 48 |
| Figura 4.2: Curvas Granulométricas das 3 amostras analisadas. | 50 |
| Figura 4.3: Curvas de compactação obtidas. | 51 |
| Figura 4.4: Curva de adensamento do solo utilizado (GC = 100%). | 52 |
| Figura 4.5: Trajetória de tensões no cisalhamento direto. | 53 |
| Figura 4.6: Evolução dos deslocamentos no ensaio de cisalhamento direto. | 53 |
| Figura 4.7: Envoltória de tensões efetivas. | 54 |
| Figura 4.8: Diagrama tensão versus deformação axial (triaxial CU). | 55 |
| Figura 4.9: Envoltória de resistência (triaxial CU). | 55 |
| Figura 4.10: Esquema do primeiro canal utilizado. | 59 |
| Figura 4.11: Foto do primeiro canal utilizado. | 59 |
| Figura 4.12: Vista lateral do segundo canal utilizado. | 60 |
| Figura 4.13: Vista do trecho inicial do segundo canal utilizado. | 61 |
| Figura 4.14: Instalação de degraus no fundo do segundo canal. | 61 |
| Figura 4.15: Comporta instalada no segundo canal. | 62 |
| Figura 4.16: Vazão alcançada no aparato em função da altura da lâmina d água. | 62 |
| Figura 4.17: Aparato de jato paralelo no interior do segundo canal. | 63 |
| Figura 4.18: Trincas formadas na compactação do solo sobre o fundo do canal acrílico. | 63 |
| Figura 4.19: Detalhe dessa conexão e da ligação entre o mangote e a seção de teste. | 64 |
| Figura 4.20: Vista lateral e em planta do aparato de conduto forçado. | 66 |
| Figura 4.21: Detalhe da seção de teste do aparato de conduto forçado. | 66 |
| Figura 4.22: Foto do aparato de conduto forçado. | 67 |
| Figura 4.23: Foto da seção de teste do aparato de conduto forçado. | 67 |
| Figura 4.24: Foto do sistema de fechamento final da tampa do aparato de conduto forçado. | 67 |
| Figura 4.25: Comparação entre os valores de teor de umidade obtidos pelos métodos da estufa e da frigideira. | 70 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.26: Procedimento de compactação do solo no aparato de conduto forçado utilizando o soquete de Proctor Normal..... | 71 |
| Figura 4.27: Volume de erosão a ser medido pelo método de areia..... | 72 |
| Figura 4.28: Procedimento de colocação de areia dentro do volume erodido..... | 73 |
| Figura 4.29: Medição pelo método indireto..... | 74 |
| Figura 4.30: Aparato para avaliação da erodibilidade em camadas oblíquas..... | 75 |
| Figura 4.31: Pontaletes no fundo da seção do canal que recebeu o maciço para teste..... | 76 |
| Figura 4.32: Vista superior do batente colocado na região da saia do maciço para teste..... | 77 |
| Figura 4.33: Vista lateral do batente colocado na região da saia do maciço para teste..... | 77 |
| Figura 5.1: Exemplo dos efeitos da má compactação junto à parede..... | 81 |
| Figura 5.2: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 1 m/s para ambos os graus de compactação estudados..... | 85 |
| Figura 5.3: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 2 m/s para ambos os graus de compactação estudados..... | 86 |
| Figura 5.4: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 3 m/s para ambos os graus de compactação estudados..... | 87 |
| Figura 5.5: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 4 m/s para ambos os graus de compactação estudados..... | 88 |
| Figura 5.6: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 5 m/s para ambos os graus de compactação estudados..... | 89 |
| Figura 5.7: Erosão versus tempo para escoamento sobre material compactado a 95% de grau de compactação..... | 90 |
| Figura 5.8: Erosão versus tempo para escoamento sobre material compactado a 100% de grau de compactação..... | 90 |
| Figura 5.9: Erodibilidade versus velocidade média de escoamento para GC igual a 95%..... | 92 |
| Figura 5.10: Erodibilidade versus velocidade média de escoamento para GC igual a 100%..... | 92 |
| Figura 5.11: Enquadramento da erodibilidade do solo pela velocidade de escoamento segundo Briaud (2008)..... | 93 |
| Figura 5.12: Enquadramento da erodibilidade do solo pela tensão de cisalhamento de escoamento segundo Briaud (2008)..... | 94 |
| Figura 5.13: Evolução dos processos erosivos..... | 95 |
| Figura 5.14: Detalhe do processo erosivo observado durante os ensaios no canal do laboratório (solo solto)..... | 96 |
| Figura 5.15: Perfil de erosão no solo solto..... | 97 |
| Figura 5.16: Sequência de evolução do processo erosivo a 95% de GC..... | 98 |
| Figura 5.17: Vista de jusante da seção transversal do maciço com GC 95% após o teste..... | 99 |
| Figura 5.18: Vista de jusante da seção transversal do maciço com GC 100% após o teste..... | 100 |
| Figura 6.1: Barragem como reconstruída a partir de 1997..... | 102 |
| Figura 6.2: Hidrógrafa de entrada ao reservatório no evento de cheia em 1977..... | 102 |
| Figura 6.3: Corte transversal da barragem..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.4: Corte longitudinal da barragem e vista aérea frontal..... | 103 |
| Figura 6.5: Corte longitudinal da barragem na seção de ruptura. | 104 |
| Figura 6.6: Hidrogramas de entrada e saída e armazenamento decorrentes da ruptura para 95% de grau de compactação do maciço..... | 111 |
| Figura 6.7: Evolução dos níveis de água, altura e nível de fundo da brecha junto à crista do maciço decorrentes da ruptura para 95% de grau de compactação do maciço. | 112 |
| Figura 6.8: Evolução da geometria do talude de jusante decorrente da ruptura para 95% de grau de compactação do maciço..... | 112 |
| Figura 6.9: Hidrogramas de entrada e saída e armazenamento decorrentes da ruptura para 100% de grau de compactação do maciço..... | 113 |
| Figura 6.10: Evolução dos níveis de água, altura e nível de fundo da brecha junto à crista do maciço decorrentes da ruptura para 100% de grau de compactação do maciço. | 114 |
| Figura 6.11: Evolução da geometria do talude de jusante decorrente da ruptura para 100% de grau de compactação do maciço..... | 114 |
| Figura 6.12: Comparação entre os hidrogramas efluentes obtidos pela abordagem proposta e no programa HEC-RAS. | 116 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 – Classes de erodibilidade. | 31 |
| Tabela 4.1 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca obtidos..... | 51 |
| Tabela 4.2 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca obtidos..... | 69 |
| Tabela 4.3 – Custo unitário de compactação de solo | 79 |
| Tabela 5.1 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca em função do grau de compactação desejado..... | 80 |
| Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos testes de erosão realizados no aparato nº 3..... | 83 |
| Tabela 5.3 – Resultados obtidos nos testes de erodibilidade realizados no aparato nº 3. | 84 |
| Tabela 6.1 – Ficha cadastral da barragem estudada. | 101 |
| Tabela 6.2 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 95% de GC. | 106 |
| Tabela 6.3 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 100% de GC. | 109 |
| Tabela 6.4 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura. | 110 |
| Tabela 6.5 – Parâmetros de entrada para simulação no programa HEC-RAS. | 115 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|--------------------|---|
| A | área média da seção transversal no trecho ou área de medição do volume erodido no interior do aparato |
| a | base da seção transversal do aparato de erodibilidade |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | American Society of Testing and Materials |
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| ARS | Agricultural Research Service |
| b | altura da seção transversal do aparato de erodibilidade |
| b | inverso do expoente da forma da função tensão-deformação do fluido, ou largura máxima da brecha |
| b_o | largura inicial da brecha |
| b_{om} | largura final da brecha |
| b_i | largura do fundo da brecha avaliada no instante i |
| β | coeficiente de Boussinesq |
| \bar{B}_* | largura média adimensional da brecha |
| B_o, B_{om} | largura da brecha inicial e final, respectivamente, no modelo BREACH |
| BSF | barragem de rejeitos de São Francisco |
| c_v | fator de correção para a velocidade de aproximação |
| CADAM | Concerted Action on Dambreak Modeling |
| CBDB | Comitê Brasileiro de Barragens |
| CEMAGREF | Institut de recherche finalisée de référence pour la gestion durable des eaux e des territoires |
| CPH | Centro de Pesquisas Hidráulicas |
| CIRIA | Construction Industry Research and Information Association |
| d_{30} | diâmetro equivalente à abertura da malha da peneira em que 30% do material peneirado fica retido |
| d_{50} | diâmetro equivalente à abertura da malha da peneira em que 50% do material peneirado fica retido |
| d_{50c}, d_{50s} | diâmetro equivalente à abertura da malha da peneira em que 50% do material peneirado fica retido do núcleo impermeável e do solo do maciço no modelo BREACH |
| d_{90} | diâmetro equivalente à abertura da malha da peneira em que 90% do material peneirado fica retido |
| \vec{dA} | vetor normal diferencial da área de seção transversal |
| d_s | diâmetro das partículas |
| dV | diferencial do volume de controle |
| DNOCS | Departamento Nacional de Obras Contra as Secas |
| DSO | Dam Safety Office |

| | |
|------------------|---|
| EFA | erosion function apparatus |
| F | força resultante da tensão de cisalhamento resultante do atrito fluido-leito |
| F_g | forças gravitacionais projetadas no talude |
| F_f | forças de atrito |
| F_{ce} | forças decorrentes de contração ou expansão repentina da seção transversal |
| F_p | forças decorrentes de variação de pressão |
| F_{pb} | forças decorrentes de variação de pressão aplicada nos contornos (leito do canal) da superfície de controle |
| F_{pl}, F_{pr} | forças decorrentes de variação de pressão no fluido à esquerda e à direita da superfície de controle |
| F_i | forças viscosas devido à concentração de sedimentos em suspensão |
| F_w | forças devidas ao vento atuando na superfície líquida |
| FEAM | Fundação Estadual do Meio Ambiente |
| FHWA | Federal Highway Administration |
| FS | fator de segurança |
| g | aceleração da gravidade |
| G | gravidade específica dos grãos do solo |
| GC | grau de compactação |
| h | elevação do nível de água imediatamente a montante do maciço, profundidade do escoamento |
| h_b | elevação do fundo da brecha calculada |
| h_{bm} | elevação final do fundo da brecha |
| h_u | elevação da crista da barragem |
| HEC | Hydrologic Engineering Center |
| I | índice de erodibilidade |
| ICOLD | International Committee on Large Dams |
| IMPACT | Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty |
| k_0 | coeficiente adimensional que varia conforme o tipo de ruptura |
| k_s | fator de correção em função de efeitos de afogamento de jusante |
| K_{ce} | coeficiente de contração ou expansão |
| log | logaritmo na base 10 |
| l_m | espessura da camada de mistura |
| n | coeficiente de Manning-Strickler |
| NBR | Norma Brasileira |
| m | expoente da função erodibilidade |
| Mc | massa de areia inicialmente contida na caixa padrão |
| Mm^3 | milhões de metros cúbicos |
| MP | Ministério Público |
| Mt | milhões de toneladas |
| n | expoente da função erodibilidade |

| | |
|-----------------|---|
| NA | nível de água |
| p | expoente da função erodibilidade |
| P | peso da partícula |
| PMP | precipitação máxima provável |
| Q | vazão |
| Q _b | vazão efluente da brecha |
| q | aporte lateral de vazão unitário no trecho |
| Re | número de Reynolds |
| Re _* | número de Reynolds de cisalhamento do grão |
| R _h | raio hidráulico |
| RAS | River Analysis System |
| RPM | Rio Paracatu Mineração |
| S | declividade longitudinal do fundo do canal |
| S _f | declividade da linha de energia do escoamento imposta por fenômenos de atrito |
| S _e | declividade da linha de energia do escoamento imposta por fenômenos turbulentos |
| S _i | declividade da linha de energia do escoamento imposta por forças viscosas |
| SAMARCO | SAMARCO Mineração |
| t | tempo |
| t _b | tempo medido até o instante b |
| t _{FB} | tempo de formação da brecha |
| t _i | tempo medido até o instante i |
| TAC | termo de ajustamento de conduta |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |
| UHE | Usina Hidrelétrica |
| USACE | United States Corps of Engineers |
| USBR | United States Bureau of Reclamation |
| \vec{V} | vetor velocidade |
| V _c | volume da caixa padrão |
| V _i | volume acumulado calculado |
| V _r | volume do reservatório acumulado e |
| V _{w*} | volume de armazenamento adimensional acima da elevação final da brecha |
| x | eixo de coordenadas longitudinal |
| t _b | tempo decorrido desde o início da brecha |
| t _{f*} | tempo de formação da brecha adimensional |
| u _* | velocidade cisalhante |
| v | velocidade longitudinal em qualquer ponto da profundidade |
| WCD | World Commission on Dams |
| y | profundidade de escoamento |
| y _c | profundidade crítica na entrada da brecha |

| | |
|-----------------------------------|---|
| z | profundidade ou declividade dos taludes laterais da brecha |
| z_0 | constante de integração do perfil de velocidades logarítmico |
| \dot{z} | erodibilidade do material |
| \dot{z}_i | erodibilidade média do solo até o instante i |
| α | ângulo formado entre o fundo do canal e a horizontal no trecho |
| ΔM | variação da massa de areia contida na caixa padrão |
| $\Delta\tau$ e $\Delta\sigma$ | flutuações das tensões cisalhante e normal impostas pelo fluido devido à turbulência |
| Δt_i | tempo acumulado |
| ξ | erodibilidade do material |
| ε/D | rugosidade relativa |
| ϕ | taxa de transporte de sedimentos adimensional ângulo de atrito |
| γ_m | peso específico do fluido |
| κ | constante de von Kármán ou viscosidade aparente do fluido |
| $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ | coeficientes da função erodibilidade |
| ν_m | viscosidade do fluido |
| θ | fator de ponderação da integração no método das diferenças finitas no esquema implícito |
| ρ | densidade do fluido |
| ρ_m | densidade da mistura de fluido e sedimentos |
| ρ_0 | grau de não-linearidade no desenvolvimento da brecha |
| τ | tensão de cisalhamento |
| τ_0 | tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento |
| τ_v | tensão de cisalhamento devido às forças viscosas impostas pelo fluido |
| τ^* | parâmetro de Shields |
| τ^*_c | tensão cisalhante adimensional crítica |

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, acidentes e rupturas de barragens de usos diversos têm sido observados em território nacional. No entanto, observada a tradição do Brasil no setor de construção e operação de barragens, relativamente poucos esforços foram feitos no sentido de contabilizar os riscos de ruptura inerentes a essas atividades.

Modernamente, a evolução do conceito de sustentabilidade ambiental tem justificado a inserção de estudos de análise de risco em todas as fases da vida de uma barragem, independentemente da utilização proposta. O risco de uma atividade é definido como o produto entre a probabilidade de insucesso e as consequências advindas deste insucesso (USACE, 1996).

Desta forma, mantidas as probabilidades de ocorrência do galgamento, justifica-se pesquisar as rupturas de barragens para identificar alternativas que resultem em consequências menores e, portanto, em riscos menores ainda na etapa de estudos de viabilidade do empreendimento.

Cabe lembrar que a redução das consequências pode também influenciar as probabilidades de ruptura por galgamento. A probabilidade de ruptura de um maciço por galgamento é composta pelo produto entre a probabilidade de galgamento e a probabilidade deste galgamento provocar o desenvolvimento de um processo erosivo tal que leve à formação de uma brecha (vala) no maciço, provocando a liberação do armazenamento do reservatório a montante (ruptura).

Neste sentido, a escolha de graus de compactação mais elevados em barragens com maciços homogêneos em solo poderia amenizar o desenvolvimento do processo erosivo no talude de jusante na ocasião de um galgamento de tal forma que a ruptura não mais ocorresse, ou fosse também amenizada. Assim, a redução das consequências poderia reduzir o risco de ruptura, atuando em seus dois fatores componentes.

Alguns dos usos de barragens amplamente difundidos no meio técnico nacional são a geração de energia e acumulação de sedimentos (rejeitos de mineração, industriais *etc*), em virtude do baixo custo associado quando comparado a alternativas tecnológicas de geração de energia e disposição de rejeitos de mineração.

Porém, há que se lembrar que nos estudos de viabilidade de barragens desenvolvidos no Brasil não se incluem custos e riscos decorrentes de eventuais acidentes e rupturas, seja na operação ou no descomissionamento. Uma vez que as consequências destes eventos podem ser vultosas, torna-se recomendável quantificar seus efeitos, já que podem alterar significativamente a escolha da alternativa mais viável técnica, ambiental e economicamente.

Há registros de utilização das barragens pela Humanidade desde a Antiguidade (CARVALHO, 2007). Segundo definição do International Committee on Large Dams – ICOLD, uma grande barragem é aquela cuja altura máxima ultrapassa 15 m, ou 5 m caso seu reservatório acumule mais de 3 Mm³. No ano 2000 havia mais de 45000 grandes barragens em todo o mundo, sendo que as hidrelétricas responsáveis pela geração de cerca de 19% da energia mundial (WCD, 2000).

1.1 Barragens no Brasil

No Brasil, o início da construção de barragens remonta ao final do século XIX, quando uma seca prolongada na região nordeste motivou a construção de diversos açudes para abastecimento (CBDB, 1982a). De fato, remonta ao início do século XX a concepção do projeto do açude de Orós, diversas vezes alterado até sua implantação em 1961 pelo governo de Juscelino Kubitschek.

Em termos de geração hidrelétrica, a primeira unidade de maior porte instalada no Brasil foi a Usina de Marmelos, no município de Juiz de Fora, em 1889, no rio Paraibuna, com potência instalada de 4 MW.

A partir de 1950, houve um esforço no sentido da instalação de centrais de grande porte, acima de 30 MW de potência instalada, visando sanar os problemas de abastecimento pelos quais passava o país. De 1960 a 1980 foram construídas diversas das maiores usinas hidrelétricas (UHE) brasileiras, tais como Três Marias (1960), Ilha Solteira (1978), Itaipu (1982) e Tucuruí (1984). Outras UHE de grande porte estão previstas para implantação a partir de 2009: UHE Santo Antônio e UHE Jirau, ambas no rio Madeira, além da UHE Belo Monte, no rio Xingu.

Além dos usos de recreação, abastecimento e geração de energia, o Brasil conta com um grande número de barragens para acumulação de rejeitos. Em 2007, somente o Estado de

Minas Gerais contava com 606 estruturas cadastradas junto à Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, das quais 72% apresentavam de médio a alto potencial de risco ambiental (FEAM, 2008).

A indústria da mineração vem há muito tempo utilizando a técnica de construção de aterros hidráulicos como alternativa de disposição de rejeitos (ESPÓSITO, 2000). Em virtude da exuberância econômica do setor, a partir de 1995 notou-se o aumento da necessidade de contenção deste refugo do processo de mineração, fazendo com que as barragens para contenção de rejeitos assumam dimensões progressivamente maiores, e se enquadrem na classe de grandes barragens.

Como exemplos de barragens de contenção de rejeitos no Estado de Minas Gerais, citam-se: barragem de rejeitos da concentração de ouro de propriedade Rio Paracatu Mineração (RPM), no município de Paracatu, MG, com altura máxima de 80 m e capacidade final de armazenamento de um bilhão de metros cúbicos; barragem de rejeitos do Germano, que recebe rejeitos provenientes da concentração de minério de ferro, de propriedade da SAMARCO, no município de Mariana, com 165 m de altura e capacidade de 70 milhões de metros cúbicos de armazenamento previstos, ambas localizadas no Estado de Minas Gerais (FEAM, 2007).

Em termos de arranjo, método construtivo e material constituinte, diversas opções têm sido usadas nos maciços de barragens construídas no Brasil. Todavia, a presença de solos bem desenvolvidos, além de aspectos econômicos, fez com que grande parte destas estruturas fosse composta por solo compactado. Tipicamente, os maciços são ditos homogêneos no sentido de que o material é proveniente de uma única jazida, sendo compactados em camadas conforme especificações de projeto. No Brasil são conhecidas como “barragens de terra”.

Neste arranjo podem estar previstos um filtro vertical e um dreno horizontal. O filtro vertical é essencialmente constituído por material com características de filtro quando comparados ao material coesivo utilizado no maciço, e tem a função de conduzir a água percolada pelo maciço, quando do estabelecimento da superfície freática, até o dreno horizontal, sem todavia permitir o carreamento de finos (erosão interna).

O dreno horizontal tem a função de conduzir a percolação coletada pelo filtro, ou mesmo proveniente da fundação, até o pé da barragem, descartando-a sem permitir que se

desenvolvam processos de erosão interna. Na saída do dreno horizontal, é comum ser disposto material de proteção (enrocamento), devidamente transicionado, de forma a evitar a contaminação ou a erosão do dreno horizontal, que constitui o dreno de pé.

Em geral, o material do filtro vertical e do dreno horizontal são os mesmos, havendo variação nas dimensões de implantação. A Figura 1.1 apresenta a seção típica de uma barragem de terra.

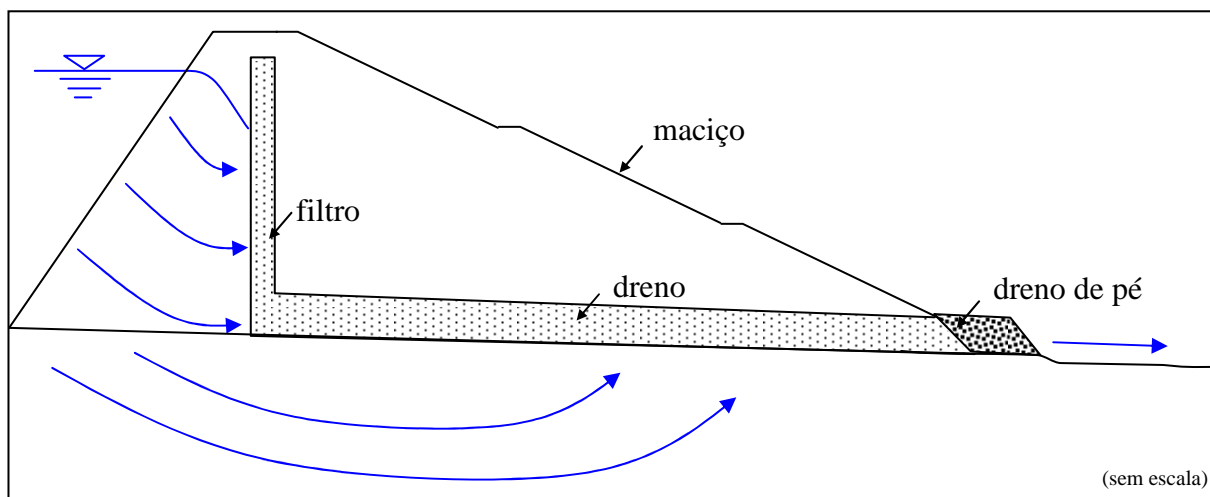


Figura 1.1: Seção típica de uma barragem de terra.

Na fase de projeto da barragem, são investigados os materiais de construção disponíveis nas proximidades do barramento, em função da redução de custos de construção. Nos materiais das jazidas identificadas, realizam-se ensaios geotécnicos (granulometria, permeabilidade, compactação, adensamento, resistência), de forma a fundamentar a escolha do melhor material disponível para a composição do maciço.

São também avaliadas as condições geotécnicas da fundação (colapsividade, permeabilidade, deformabilidade, resistência, caracterização *etc*) de forma a compatibilizar cargas e condições hidráulicas ocorrentes entre o maciço e a fundação. É comum a remoção de uma camada superficial do material de fundação em virtude de características geotécnicas dos materiais presentes, que podem impor condições de trabalho indesejáveis ao maciço.

Os ensaios de determinação dessas características geotécnicas são todos normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, exceto o ensaio triaxial, em que se seguem orientações da American Society for Testing and Materials – ASTM.

1.2 Eventos de galgamento de barragens

No Brasil, diversas rupturas de barragens têm sido reportadas nos últimos anos. A seguir, descrevem-se algumas destas rupturas por galgamento.

1.2.1 Açude de Orós

O Açude de Orós está localizado no município de Orós, Estado do Ceará, aproximadamente a 450 km de Fortaleza, no rio Jaguaribe, e drena uma área de 25.000 km². Trata-se de um reservatório de uso múltiplo, tendo como finalidades: a perenização do rio Jaguaribe; irrigação do médio e baixo Jaguaribe; piscicultura; culturas agrícolas de áreas de montante; turismo e aproveitamento hidrelétrico (DNOCS, 2009).

Extensivamente estudado desde 1919, o projeto previa barragem com altura máxima de 54 m, crista na El. 209 m com 10 m de largura, taludes montante 2,5H:1,0V e taludes jusante 2,0H:1,0V. A barragem teve sua construção iniciada em 1958, com maciço em terra zonada, composto por:

- núcleo impermeável, correspondente à maior parte do maciço, constituído por mistura de argila, silte e areia e algum pedregulho, espalhado e compactado em camadas de 15 cm por meio de rolos pé-de-carneiro. Ocupa no topo praticamente toda a largura da pista e se estende com talude 1,0H:1,0V tanto para montante como para jusante. A massa específica aparente seca máxima deste material era de 1820 kg/m³ no teor de umidade de 14,5% (umidade ótima), 1795 kg /m³ a 13,5% de teor de umidade e de 1750 kg/m³ a 12,5% de teor de umidade;
- zona intermediária, constituída por mistura de areia e pedregulho, obtidos de escavação no leito do rio e de afluentes, compactada em camadas de 30 cm pela passagem de rolos vibratórios;
- zona exterior, constituída por enrocamento obtido da escavação do vertedouro e de pedreira, lançado em camadas horizontais com cerca de 1 m de espessura.

Às 00:17 de 26/03/1960, quando a crista do maciço ainda estava próxima à El. 190 m, houve o galgamento devido à insuficiência das obras de desvio, a uma taxa de cerca de 400 m³/s, com lâmina máxima de cerca de 0,80 m, sendo que todo o processo se desenvolveu ao longo de 12 h a 18 h (POWLEDGE *et al.*, 1989b).

Após várias tentativas para conter o transbordamento, julgou-se recomendável controlar o acidente abrindo uma vala no eixo do vertedouro utilizando explosivos, às 10:00 do dia 26/03/1960, por onde a água passou a fluir em catarata, erodindo o maciço no eixo do vertedouro até a fundação. O desgaste do topo da barragem recoberto pelas águas foi pequeno, conformando um canal bem definido, de paredes quase verticais na fenda central (Figura 1.2).

Como resultado da ruptura, a cidade de Limoeiro do Norte ficou praticamente toda alagada durante a manhã do dia 27/10/1960. Não houve registro de mortes.



Figura 1.2: Maciço do Açude de Orós após o galgamento.

Fonte: José Rastelli. Disponível em <http://limoeirodonorte.blogspot.com/2008/07/aude-ors-em-1960.html>. Acesso em 13/01/2009.

1.2.2 UHE Euclides da Cunha e UHE Armando Sales de Oliveira

Em 19/01/1977, decorrente de uma precipitação de 260 mm nas 24 h precedentes, a barragem da UHE Euclides da Cunha sofreu galgamento junto à ombreira direita da barragem, que apresentava desnível de cerca de 30 cm em relação à crista do maciço como um todo. A UHE Euclides da Cunha encontra-se instalada no rio Pardo, a cerca de 6 km a jusante de São José do Rio Pardo, SP.

O galgamento teve início às 20:30 do dia 19/01/1977, mas a ruptura propriamente dita somente ocorreu às 03:30 do dia 20/01/1977 (CARVALHO, 2007), com lâmina máxima de cerca de 1,20 m (POWLEDGE *et al.*, 1989b). A Figura 1.3 apresenta a brecha aberta pelo galgamento, que apresentava taludes laterais praticamente verticais.



Figura 1.3: Maciço da UHE Euclides da Cunha após o galgamento, em 21/01/1977. Fonte: CBGB (1982b).

A cheia resultante da ruptura levou cerca de meia hora para atingir a UHE Armando Sales de Oliveira, localizada a 6 km a jusante, cuja ruptura ocorreu às 04:00 do dia 20/01/1977, também com lâmina máxima de cerca de 1,20 m (POWLEDGE *et al.*, 1989b). A Figura 1.4 apresenta a brecha aberta pelo galgamento, que apresentava taludes laterais bastante íngrimes.



Figura 1.4: Maciço da UHE Armando Sales de Oliveira após o galgamento, em 21/01/1977. Fonte: CARVALHO (2007).

1.2.3 Barragem de contenção de rejeitos São Francisco

A Barragem de Rejeitos de São Francisco (BSF), pertencente à Rio Pomba Mineração, está localizada no município de Miraf, MG. A barragem armazena os rejeitos resultantes da lavagem de bauxita, não havendo produtos tóxicos dispostos (FEAM, 2008).

Ao longo de 2006, houve um derramamento acidental de 400.000 m³ de rejeitos ao longo do córrego Bom Jardim, devido a um vazamento no vertedor tulipa. Após investigação, ficou acordado com o Ministério Público (MP), em Termo de Ajustamento de Conduta (TAC), que a empresa dotaria a barragem de um vertedor de crista livre até 31/10/2006.

Em 10/01/2007, parte do maciço da barragem rompeu provocando novo vazamento para o córrego Bom Jardim. Foram liberados 2 Mm³ de resíduos, inundando cerca de 400 estabelecimentos comerciais e desalojando cerca de 2000 pessoas. Nesta data, houve precipitação de 121,3 mm em 4 h, evento com recorrência de 180 anos (FEAM, 2008).

Não houve mortes associadas ao evento, mas a ruptura provocou o assoreamento significativo do córrego Bom Jardim, danos ambientais e a propriedades rurais, bem como a suspensão temporária de abastecimento público de diversas cidades nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. A Figura 1.5 apresenta a brecha em sua configuração final (FEAM, 2008).



Figura 1.5: Brecha originada na ruptura da Barragem São Francisco.

Fonte: FEAM (2008).

1.3 A importância do conhecimento sobre rupturas de barragens

A importância do conhecimento sobre rupturas de barragens decorre da ordem de grandeza dos impactos causados ao meio ambiente e às comunidades vizinhas na ocorrência de um evento de ruptura.

Dependendo da bacia hidrográfica em que ocorre, a ruptura de uma barragem pode resultar em vazões de pico bastante superiores às aquelas observadas em eventos naturais. O trânsito do hidrograma ao longo dos cursos de água a jusante pode, inclusive, causar alterações morfológicas significativas provocando, além da inundação, o avanço do leito do curso de água sobre municipalidades *etc* (MAHDI, 2006).

No caso de barragens de contenção de rejeitos, há ainda que se considerar os danos provenientes da contaminação causada pelos rejeitos, seja apenas pelo assoreamento do curso de água causado pela descarga de sedimentos, como pela liberação de materiais tóxicos. Segundo Davies (2002), a frequência de ruptura de barragens de contenção de rejeitos foi cerca de 10 vezes maior que a frequência de ruptura de barragens com outras funções nos últimos 30 anos.

Conhecer adequadamente o hidrograma decorrente de um evento de ruptura permite a determinação dos tempos de alerta e evacuação de áreas a jusante, bem como dos níveis de inundação e velocidades de escoamento associados, determinados por meio de propagação hidrodinâmica. A partir daí, pode-se elaborar um plano de emergência realista, que proporcione a minimização do número de vítimas, das perdas econômicas e de danos ao meio ambiente.

O conhecimento das características do hidrograma, das velocidades de escoamento e níveis no talude e no curso de água a jusante podem também ser utilizados ainda na fase de projeto. Numa abordagem de análise de risco, o projeto do barramento passaria por uma análise de ruptura. Conforme as características resultantes, pode-se então intervir no projeto, de forma a obter maiores tempos de ação para evacuação de áreas a jusante, por exemplo.

Em relação às comunidades, além da possibilidade de mortes, há também impactos de ordem social. Um evento de ruptura de barragem de rejeitos pode levar à falência uma mineradora, em virtude da extensão dos danos e dos custos de reparação associados, resultando na perda

de empregos diretos e indiretos, em sua maioria, locais. No caso das UHE e barragens de abastecimento há também a quebra de geração e a falta de água decorrentes, que vão contribuir para a deterioração do quadro sócio-econômico regional.

1.4 Relevância do trabalho

O número de mortes causadas por rupturas de barragens, independentemente do uso que se faça de seu reservatório, é bastante alto, sendo comum em alguns eventos falar-se de centenas de mortes. Penman (1998) aponta alguns dos eventos de ruptura notáveis:

- Ruptura da barragem do Estrocho de Rientes, que em 1802 inundou a cidade de Lorca, na Espanha, matando cerca de 600 pessoas;
- Ruptura da barragem de South Fork, nos Estados Unidos em 1889, cujo galgamento levou a a ruptura em 3,5 h, matando 2209 pessoas;
- Ruptura de 2 barragens de rejeito no rio Stava, na Itália em 1985, cuja cheia atingiu velocidades de escoamento médias de 30 km/h a 60 km/h, dizimando as cidades de Stava e de Tereso, e matando 269 pessoas;
- Ruptura da barragem n° 4 de Virgínia, na África do Sul, cujo galgamento em 1994 levou à abertura de uma brecha de 50 m de largura no barramento, liberando 1,2 Mt de rejeitos, e destruiu o subúrbio de Merriespruit. Dezesete pessoas morreram no episódio.

Não fossem estes aspectos suficientes, os danos causados ao meio ambiente, bem como as perdas econômicas, já configuram relevância suficiente aos esforços de compreensão dos fenômenos envolvidos nas rupturas, de forma a evitá-las ou minimizar seus efeitos.

Além disso, é bastante comum que estudos de viabilidade resultem na adoção de barragens como alternativa mais viável para disposição de rejeitos e geração de energia, fundamentando-se na premissa de custos de infra-estrutura, ambientais, operacionais e de descomissionamento menores, principalmente no caso de rejeitos inertes.

Esta premissa vem se mostrando falsa em virtude da crescente frequência de acidentes envolvendo barragens, oficialmente reportados ou não, a partir da década de 80, que têm imputado custos vultosos aos empreendedores, anteriormente não contabilizados.

Por outro lado, os organismos financiadores têm exigido dos empreendedores a previsão de custos de operação e manutenção da alternativa a ser adotada no descomissionamento ainda na etapa de viabilidade dos empreendimentos, como também a elaboração de planos de ações emergenciais que incorporem resultados de estudos de ruptura, tais como o tempo disponível para o alerta e a desocupação do vale a jusante. Há procedimentos definidos internacionalmente para a análise de risco de rupturas de barragens, com modelos matemáticos para previsão do escoamento, do número de vítimas, para quantificação de danos *etc*, conforme aponta Quintela *et al.* (2001).

No entanto, segundo Broich (1999), há diversos aspectos a investigar nas rupturas de barragens, tais como as influências dos sedimentos, da proteção do talude de jusante, do material do núcleo coesivo e mesmo da não homogeneidade dos materiais componentes do barramento de barragens zonadas. Segundo este autor, o conhecimento dessas influências permitirá o desenvolvimento de modelos numéricos que melhor representem o processo.

Adicionalmente, muitas vezes pequenas barragens e açudes têm potencial de ruptura elevado, pois são construídos com materiais e técnicas duvidosas, como aponta Menescal (2005). A ruptura desses pequenos barramentos em cascata pode inclusive servir de gatilho para rupturas de barramentos maiores, como frequentemente ocorre no estado do Ceará, na época das chuvas. Os diques são construídos na época das secas, como alternativa de emprego para a população flagelada na forma de frentes de trabalho. Porém, se ter a quantidade de água adequada à correta compactação do maciço, estas estruturas rompem já no enchimento, sendo popularmente denominadas “barragens Sonrisal” (MENESCAL, 2005).

Estes aspectos reforçam a necessidade de aumento do conhecimento físico sobre o mecanismo de formação da brecha, considerando as características geotécnicas do material do maciço e dos rejeitos, além das condições de montante e jusante.

É neste contexto que se inserem os objetivos deste trabalho, detalhados a seguir.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma nova abordagem para avaliação da ruptura de barragens homogêneas com maciço em solo compactado por galgamento que considere parâmetros hidráulicos e geotécnicos.

2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos correspondem à aplicação da metodologia proposta a um solo laterítico típico do quadrilátero ferrífero, comumente empregado na construção de barragens de solo compactado homogêneas, procurando:

- avaliar o processo erosivo decorrente da passagem do escoamento por sobre o talude de jusante, dando origem a uma abertura no maciço (brecha) pela qual se desenvolve a liberação do volume acumulado no reservatório a montante, buscando compreender os fenômenos hidráulicos e geotécnicos envolvidos;
- avaliar a influência do grau de compactação na ruptura por galgamento do maciço e a eficácia da adoção de graus de compactação maiores como medida de prevenção ou adiamento da ruptura.

Os maciços de solo homogêneo foram estudados por representarem a maioria das barragens brasileiras, como também por representarem cerca de 76% dos eventos de ruptura registrados pelo ICOLD até 1980 (QUINTELA *et al.*, 2001). Cerca de 70% desses acidentes ocorrem em barragens com altura máxima inferior a 30 m nos 10 primeiros anos de vida. Blight e Fourie (2005) apontam que das 22 maiores rupturas de barragens de rejeitos das quais se tinha conhecimento até então, quatro eram resultantes de galgamento.

Adicionalmente, pretende-se desenvolver um estudo de caso buscando determinar qual o custo incremental envolvido na ampliação do tempo de ruptura, em cenários de construção do maciço a 95% e a 100% de grau de compactação. Acredita-se que este exercício é importante para avaliar a sensibilidade do maciço à erosão proporcionada pelo galgamento em ambos os casos, bem como os efeitos no hidrograma decorrente da ruptura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Do ponto de vista metodológico, a quantificação das consequências da ruptura de uma barragem passa pela previsão dos níveis e vazões nas áreas de jusante, além dos respectivos intervalos de tempo decorridos a partir do início da ruptura. Assim, cabe primeiramente determinar a hidrógrafa gerada pelo desenvolvimento da brecha no barramento para, em seguida, realizar a propagação numérica da onda gerada pelo vale de jusante, incorporando as singularidades hidráulicas existentes.

Para realização dessas tarefas, observam-se duas grandes correntes metodológicas (WAHL, 1998):

- utilização de análises estatísticas de outras rupturas, definindo formulações empíricas para os valores de interesse, como vazões de pico, tempo de formação da brecha *etc.* Esta abordagem predominou até meados da década de 80;
- utilização de modelos hidráulicos numéricos para a propagação hidrodinâmica da onda de cheia, acoplada a modelos paramétricos ou baseados nas formulações disponíveis para os processos erosivos decorrentes da ruptura no maciço da barragem como, por exemplo, do método de Meyer-Peter e Müeller (FREAD, 1991), para o desenvolvimento da brecha.

Para compreender a dinâmica da evolução metodológica da análise de rupturas de barragens foram levantadas na literatura informações sobre os mecanismos de ruptura, os modelos de erosão e modelos numéricos mais utilizados neste sentido, descritos a seguir.

3.1 Mecanismos de ruptura de barragens por galgamento

Os mecanismos de ruptura de barragens têm atraído a atenção da comunidade científica desde o século XIX, devido a alguns eventos isolados como o da ruptura da barragem de South Fork (Johnstown, USA) em 1889 (CHANSON, 2004).

Observam-se diferenças no processo de ruptura de barragens conforme o gatilho do processo. Por exemplo, o tempo de formação da brecha em rupturas decorrentes de galgamento é diferente daquelas decorrentes de erosão interna ou de instabilização do maciço. Identificam-se duas fases de estudo destes mecanismos de ruptura, conforme descrito nos itens seguintes.

3.1.1 Fase 1: até a década de 70

Até o início da década de 60 predominou o conceito de ruptura abrupta dos maciços, independentemente do material constituinte, fazendo-se analogia com abertura rápida de comportas, utilizando-se o método das características na análise numérica unidimensional (CHANSON, 2004).

Inicialmente foram desenvolvidas abordagens para estudo de rupturas de barragens em canais com leito seco a jusante, posteriormente estendidas a canais com leito já ocupado por escoamento prévio.

Esta analogia permanece válida até hoje em determinadas situações, tais como rupturas de barragens com maciço em concreto (RAHMAN e CHAUDRY, 1998), ou mesmo com maciços em solo em situações de ruptura dos taludes por liquefação, conforme mostram Jeyapalan *et al.* (1983).

Na década de 70, o aumento da frequência de rupturas em âmbito mundial fez com que se voltassem as atenções ao fenômeno, buscando documentar e analisar as ocorrências. Estas ocorrências motivaram a verificação de muitos vertedores existentes. De fato, conforme aponta Broich (2002), é recomendável o diagnóstico dos vertedouros após eventos como estes para identificar erros nas estimativas de cheia de projeto.

Em muitos casos, a revisão da cheia de projeto resultava na incapacidade dos vertedores pela inserção desses novos eventos extremos na base de dados hidrológicos utilizada. Este foi um dos aspectos que levaram à proposição de metodologias alternativas para dimensionamento de vertedores, tais como a utilização da Precipitação Máxima Provável (PMP).

Conforme a magnitude dos custos inerentes à adequação de vertedouros, havia a motivação para a análise das consequências do galgamento em termos da resistência do maciço ao escoamento, dando início a linhas de pesquisa de formação da brecha, como também em termos dos efeitos da liberação do armazenamento da barragem para jusante num curto intervalo de tempo, o que deu origem a linhas de pesquisa sobre propagação hidrodinâmica.

No caso da ruptura por galgamento, Ponce e Tsvoglou (1981) avaliam que se pode concluir que o processo não se dá de maneira abrupta a partir dos registros disponíveis, havendo o desenvolvimento gradual de uma brecha segundo a ação erosiva do escoamento. De fato,

observando as ocorrências de rupturas por galgamento, constata-se o desenvolvimento da brecha ao longo de horas seguidas em muitos casos.

3.1.2 Fase 2: década de 80 em diante

Tendo em vista as necessidades de avaliação da resistência dos maciços de barragens ao galgamento, estudou-se o mecanismo de desenvolvimento da brecha, buscando acoplar a hidráulica do escoamento no talude de jusante aos modelos de transporte de sedimentos.

Vários trabalhos importantes foram desenvolvidos, como os que deram origem ao modelo DAMBRK, posteriormente substituído pelo modelo FLDWAV (FREAD *et al.*, 1998), para propagação hidrodinâmica das cheias decorrentes de ruptura de barragens. No entanto, estes modelos pressupõem a geometria da brecha e seu tempo de formação como parâmetros de entrada obtidos a partir de equações empíricas ou de eventos similares.

Numa tentativa de eliminar estas deficiências, Fread (1991) propôs um modelo de simulação de brecha denominado BREACH. Neste modelo, o escoamento ocorre no talude de jusante de maciço homogêneo em solo compactado, cujos parâmetros geotécnicos são especificados, erodindo-o segundo taxa definida pela equação de Meyer-Peter e Müeller para o transporte de sedimentos em canais com declividades acentuadas (até 25%; SMART, 1984).

No entanto, Ponce e Tsvoglou (1981) já argumentavam que o estabelecimento *a priori* da taxa de erosão vertical na formação da brecha faz com que os resultados do modelo sejam apenas aproximados, visto que determina diretamente a forma e a duração da onda de cheia decorrente da ruptura, o que ainda constituía um problema deste modelo.

Wahl (2004) também rejeita esta definição *a priori*, e lembra que o tempo de formação da brecha corresponde ao intervalo em que o processo erosivo produz o rebaixamento da crista, liberando o volume armazenado a montante. Desta forma, o tempo decorrido após o galgamento não é necessariamente igual ao tempo de formação da brecha, pois o processo erosivo pode não se desenvolver no talude de jusante após o galgamento conforme sua resistência à erosão ou à interrupção do processo.

O conhecimento deste intervalo de tempo é fundamental para a implantação das medidas mitigadoras, tais como evacuação de áreas a jusante, embora poucas ferramentas estejam

disponíveis neste sentido (WAHL, 2004). Numa abordagem conservadora, a maioria das modelagens de ruptura admite que a formação da brecha ocorre assim que a crista do barramento é galgada.

Impasses como este ocorreram ao longo das décadas de 80 e 90, motivando esforços no meio técnico internacional no sentido de coletar dados para propor ou selecionar modelos de ruptura que melhor representassem o fenômeno. A seguir descrevem-se as iniciativas mais importantes, cuja base de dados gerada tem sido utilizada na validação de modelos de brecha.

3.1.2.1 Corps of Engineers

O United States Corps of Engineers (USACE) realizou com a Universidade do Colorado em Boulder estudos de galgamento em maciços de terra homogêneos e maciços em enrocamento com núcleo argiloso utilizando uma centrífuga, o que permitiu aplicar conceitos de semelhança às forças envolvidas. Os ensaios foram realizados em maciços de enrocamento e terra homogênea, sendo que o maciço de enrocamento rompeu em 15 s enquanto o maciço em terra não desenvolveu brecha ao longo de 16 min de testes (POWLEDGE *et al.*, 1989a).

Numa segunda fase, construiu-se um maciço em terra homogênea com 1,8 m de altura buscando comparar resultados ao modelo da centrífuga. Embora o volume erodido tenha apresentado boa correlação aos resultados coletados na centrífuga, o mesmo não ocorreu em relação aos perfis de erosão obtidos. Ainda assim, foram propostas relações para o escoamento e para as taxas de erosão medidas na centrífuga (POWLEDGE *et al.*, 1989a).

3.1.2.2 Federal Highway Administration

De 1983 a 1985, o Federal Highway Administration (FHWA) contratou estudos em canais com dimensões de 3,4 m de altura por 0,9 m de largura por 24,4 m de extensão, em que foram simulados galgamentos de maciços com 1,8 m de altura, largura de crista entre 3,0 m a 6,7 m, com taludes 2H:1V a montante e 3H:1V a jusante. O material utilizado era composto por argila e silte argiloso, eventualmente com cobertura asfáltica na crista (POWLEDGE *et al.*, 1989a).

Foram simuladas proteções do talude de jusante utilizando uma mistura de diferentes espécies de grama, *geotêxteis*, gabiões, geogrelha e solo cimento composto por areia, solo e 11% de cimento em massa, com slump nulo.

Os resultados apontaram a proteção por gabiões e por solo cimento como as mais eficazes na prevenção da formação da brecha (POWLEDGE *et al.*, 1989a), sendo que nenhuma erosão foi detectada utilizando estes sistemas de proteção em profundidades de escoamento de até 1,2 m.

Posteriormente estes estudos foram estendidos em parceria com o Bureau of Reclamation (USBR) em canais com dimensões de 1,2 m de altura, com capacidade de descarga de até 2,85 m³/s. Nesta fase estudaram-se também a utilização de três tipos de blocos de concreto pré-moldados comercialmente disponíveis atirantados por cabos de aço, binda asfáltica e geotêxtil.

Foram realizadas 57 simulações e, novamente, os melhores resultados foram obtidos com a utilização de gabião ou solo cimento. A solução em blocos de concreto funcionou adequadamente para um dos tipos de bloco, resistindo a até 1,2 m de lâmina de água, enquanto dos demais tipos de bloco de concreto, um apresentou desempenho intermediário, tendo resistido a até 1,0 m de lâmina de água, e o outro insatisfatório, falhando com uma lâmina de água de apenas 0,30 m (POWLEDGE *et al.*, 1989a).

3.1.2.3 Construction Industry Research and Information Association

A Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) desenvolveu ao longo dos anos de 1983 a 1986 um programa de testes de revestimentos em produtos geotêxteis e em concreto na proteção de canais gramados, em condições de escoamento supercríticas, justificando-se a necessidade do desenvolvimento de testes em grande escala (POWLEDGE *et al.*, 1989a).

Neste sentido, foram construídos dez canais no talude montante de uma barragem desativada, com declividade longitudinal 2,5H:1V, 25 m de extensão, com seção trapezoidal, sendo que cinco deles foram revestidos por blocos de concreto pré-moldado comercialmente disponíveis, quatro por geotêxteis e um por grama, a ser utilizado como controle, o qual foi semeado e mantido ao longo dos 20 meses anteriores ao teste.

De modo geral, todos os revestimentos apresentaram desempenho superior ao gramado. Enquanto os geotêxteis foram testados até a falha do revestimento, detectada por erosão do subsolo, 4 dos 5 blocos de concreto não desenvolveram falhas na vazão máxima da instalação. A condição de descarga máxima equivalia a uma carga hidráulica de cerca de 0,76 m na crista ou vazão específica de 1 m³/s.m (POWLEDGE *et al.*, 1989a).

3.1.2.4 Bureau of Reclamation

De 1983 a 1985, o United States Bureau of Reclamation (USBR) desenvolveu estudos de medidas corretivas para tornar os pequenos barramentos capazes de suportar galgamentos.

Foram ensaiados nove maciços homogêneos em solo compactado com 0,65 m de altura, compostos por areia argilosa compactada em camadas de 76,2 mm, a 95% e 108% de grau de compactação, submetidos a vazões de 3,7 m³/s.m a 8,1 m³/s.m, em configurações de talude de jusante de 6H:1V e 4H:1 V e diferentes proteções superficiais, com escala geométrica 1:15.

As análises dos resultados foram feitas de forma qualitativa, no sentido de determinar que tipo de revestimento funcionava melhor. Um resultado bastante interessante foi a constatação de que maciços compactados a 102% da energia do ensaio Proctor Normal desenvolviam cerca de 50% menos erosão quando comparados a maciços compactados a 95% da energia desse mesmo ensaio (POWLEDGE *et al.*,1989a).

3.1.2.5 Agricultural Research Service

Em 1987, o Agricultural Research Service (ARS) desenvolveu estudos para quantificar a erosão desenvolvida em vertedores gramados. Segundo Powledge *et al.* (1989a) os resultados poderiam também ser estendidos a rupturas de barragens por galgamento. Dentre as conclusões deste estudo, citam-se:

- As rupturas estão associadas à formação de fossas no revestimento, devido à velocidade ou às pressões desenvolvidas, que se tornam pontos de evolução da erosão;
- Uma vez que as discontinuidades parecem ser os pontos de início do desenvolvimento dos processos erosivos, a manutenção de uma superfície uniforme parece ter potencial significativo para evitar ou retardar as rupturas.

3.1.2.6 Concerted Action on Dambreak Modelling

O programa Concerted Action on Dambreak Modelling (CADAM) foi desenvolvido na Comunidade Europeia (CE) ao longo dos anos de 1998 a 2000. Em relação ao desenvolvimento das brechas, foram desenvolvidos modelos em laboratório e em escala real. Dentre os resultados mais importantes do programa citam-se (HR WALLINGFORD, 2000):

- incertezas na modelagem da brecha podem ser as maiores contribuições na incerteza geral na modelagem, sendo a capacidade de representação do desenvolvimento e de localização da brecha bastante limitadas nos modelos em geral;
- o modelo BREACH, amplamente utilizado, tem limitações significativas;
- altas concentrações de sedimentos no escoamento alteram significativamente a velocidade de propagação da onda para jusante.

3.1.2.7 Investigation of Extreme Flood Processes & Uncertainty

De forma a preencher as lacunas indicadas no CADAM, a CE deu início ao programa Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty (IMPACT), de 2003 a 2005, objetivando a determinação e redução dos riscos associados às cheias extremas, com causas naturais ou decorrentes da ruptura de barragens ou de sistemas de proteção contra enchentes.

No âmbito dos estudos de formação da brecha, foram desenvolvidos cinco testes de escala real, dos quais dois por galgamento de maciços de 6 m de altura, compostos por silte argiloso e enrocamento com núcleo argiloso. Além destes testes, foram também desenvolvidos 22 testes em protótipos (escala geométrica 1:10), dos quais oito rupturas por galgamento em maciço de solo coesivo. Foram também realizadas simulações numéricas a partir dos dados obtidos de forma a validar e desenvolver modelos numéricos, além do desenvolvimento de metodologia para identificação das probabilidades da localização da brecha em defensas lineares. Dentre os resultados obtidos, citam-se (HR WALLINGFORD, 2005):

- os ensaios de campo e laboratório indicaram que a brecha tem paredes praticamente verticais, ao contrário do que a maioria dos modelos numéricos propõe;
- a erosão lateral geralmente se dá por ruptura de taludes, cujo material é rapidamente removido por arraste, e não de maneira contínua;
- maciços compostos por materiais coesivos tendem a formar degraus no início do processo erosivo (*headcut erosion*), o que afeta particularmente o tempo de formação da brecha;
- a velocidade de formação da brecha é diretamente relacionada às propriedades do solo e da condição do maciço;

- a localização da brecha no maciço determina sobremaneira a evolução do processo. Brechas nas ombreiras que encontram materiais resistentes não compensam a perda de desenvolvimento no interior do maciço;
- a estrutura do maciço (homogênea ou heterogênea) é importante na evolução da brecha.

A partir dos resultados anteriormente apontados, pode-se concluir que as brechas decorrentes de galgamentos de barragens homogêneas com maciço em solo coesivo ocorrem em intervalos de tempo que podem ser longos, mas sujeitas a processos descontínuos como a formação de degraus ao longo dos taludes (*headcut erosion*). Em geral, os escoamentos são turbulentos, rasos e acelerados, o que limita a aplicabilidade das equações de transporte de sedimentos conforme aponta Powledge *et al.* (1989a).

3.2 Propagação hidrodinâmica

Entende-se por propagação hidrodinâmica a determinação dos níveis de água e velocidades associadas à passagem de um hidrograma em um curso de água. As equações de Saint-Venant foram propostas em 1871 para descrever o movimento de uma partícula fluida em termos das forças normais e cisalhantes impostas nesta situação (CHANSON, 2004). Seja um trecho de curso de água em regime de escoamento gradualmente variado, conforme apresentado na Figura 3.1, em que se define um volume de controle.

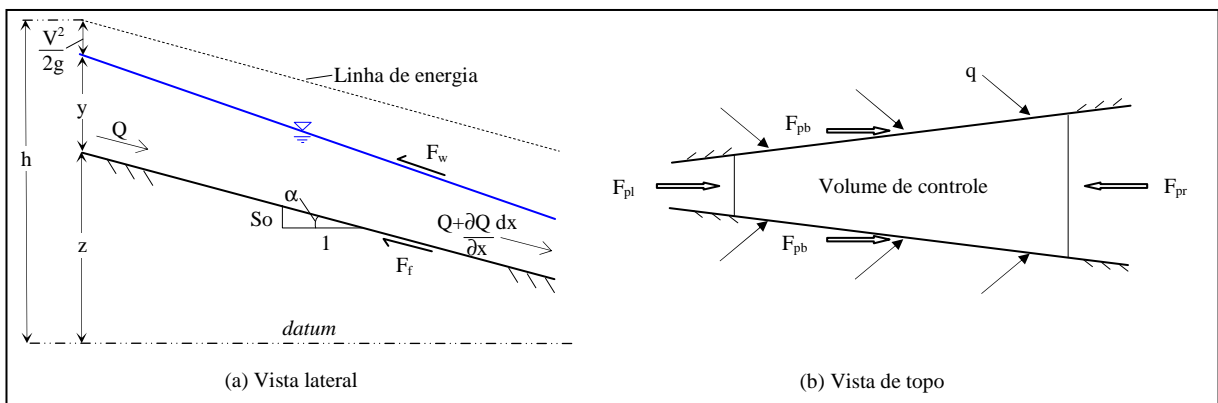


Figura 3.1: Representação de trecho de curso de água para derivação das equações de Saint-Venant.

Fonte: adaptado de CHOW (1988).

Aplicando-se o Teorema do Transporte de Reynolds à equação da continuidade no volume de controle (Figura 3.1), tem-se que (CHOW, 1988):

$$\frac{d}{dt} \int_{v.c.} \rho \cdot dV + \int_{s.c.} \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.1)$$

na qual:

ρ é a densidade do fluido [M.L⁻³];

dV é o diferencial do volume de controle [L³];

\vec{V} é o vetor velocidade [L.T⁻¹];

t é o tempo [T];

$d\vec{A}$ é o vetor normal diferencial da área de seção transversal [L²], com módulo igual à variação da área, direção normal à superfície e sentido para fora do volume de controle.

No segundo termo da equação 3.1, nota-se um produto escalar entre os vetores \vec{V} e $d\vec{A}$, que introduz a variação da massa decorrente do fluxo de entrada ou saída do volume de controle pelas seções transversais de montante e jusante do trecho em análise. Adicionalmente, definindo o volume do trecho de curso de água como o produto entre a área média da seção transversal e a extensão do trecho (dx), este termo pode ser reescrito por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{v.c.} \rho \cdot dV + \int_{s.c.} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} &= \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot dx)}{dt} + \int_{entrada} \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} - \int_{saída} \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = \\ &= \rho \cdot dx \frac{\partial A}{\partial t} + \rho \left[-(Q + q \cdot dx) + \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) \right] = \rho \cdot dx \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \int_{v.c.} \rho \cdot dV + \int_{s.c.} \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (3.2)$$

na qual:

A é a área média da seção transversal no trecho [L²];

t é o tempo [T];

x é o eixo de coordenadas longitudinal [L];

Q é a vazão [L³.T⁻¹];

q é o aporte lateral de vazão unitário no trecho [L².T⁻¹].

A equação 3.2 pode ser aplicada a escoamentos em regime permanente ou não, e a canais com seções prismáticas ou não. Porém, o fluido é considerado incompressível (ρ é constante). No caso de rupturas de barragens, em geral o aporte unitário lateral de vazão unitário (q) é desconsiderado face à velocidade de escoamento na direção longitudinal.

Aplicando o teorema do transporte de Reynolds à conservação do momento (Figura 3.1), tem-se (CHOW, 1988):

$$\sum \bar{F} = \frac{d}{dt} \int_{v.c.} \bar{V} \cdot \rho \cdot dV + \int_{s.c.} \bar{V} \cdot \rho \cdot \bar{V} \cdot d\bar{A} \quad (3.3)$$

na qual:

ρ é a densidade do fluido [M.L⁻³];

dV é o diferencial do volume de controle [L³];

\bar{V} é o vetor velocidade [L.T⁻¹];

t é o tempo [T];

$d\bar{A}$ é o vetor normal diferencial da área de seção transversal [L²], com módulo igual à variação da área, direção normal à superfície e sentido para fora do volume de controle.

Em termos físicos, a equação 3.3 expressa que a soma das forças aplicadas ao volume de controle é igual ao momento armazenado no volume de controle descontado das saídas de momento pela superfície de controle.

Diversas forças podem ser identificadas como atuando no escoamento ao longo de um talude de barragem, tais como forças gravitacionais projetadas no talude (F_g), de atrito (F_f), decorrentes de contração ou expansão repentina da seção transversal (F_{ce}), decorrentes de variação de pressão (F_p), forças viscosas devido à concentração de sedimentos em suspensão (F_i), ou mesmo devidas ao vento atuando na superfície líquida (F_w). Desprezando-se os efeitos de vento, pode-se escrever (CHOW, 1988):

$$F_g = \text{sen} \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot dx \quad (3.4)$$

$$F_f = S_f \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot dx \quad (3.5)$$

$$F_{ce} = S_e \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot dx \quad (3.6)$$

$$F_i = S_i \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot dx \quad (3.7)$$

$$F_p = \frac{\partial y}{\partial x} \cdot \cos \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot A \cdot dx \quad (3.8)$$

nas quais:

ρ é a densidade do fluido [M.L⁻³];

g é a aceleração da gravidade [$L.T^{-2}$];
 A é a área média da seção transversal no trecho [L^2];
 x é o eixo de coordenadas longitudinal [L];
 α é o ângulo formado entre o fundo do canal e a horizontal no trecho;
 y é a profundidade de escoamento, medida na vertical [L];
 S_f é a declividade de atrito (adimensional);
 S_e é a declividade turbulenta (*eddy loss slope*), originada de contrações e expansões decorrentes da erosão do talude, mudanças abruptas de seção *etc* (adimensional);
 S_i é a declividade viscosa, decorrentes das forças viscosas resultantes da mistura de água e sedimentos (adimensional).

A declividade de atrito (S_f) é calculada, na maioria dos modelos de propagação, admitindo-se a validade da equação de Manning (CHANSON, 2004):

$$S_f = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R_h^{2/3}} \right)^2 \quad (3.9)$$

na qual:

n é o coeficiente de Manning-Strickler [$T.L^{-1/3}$];
 A é a área média da seção transversal no trecho [L^2];
 R_h é o raio hidráulico [L], igual à razão entre área molhada e perímetro molhado;
 Q é a vazão no trecho [$L^3.T^{-1}$].

Desta forma, ao admitir esta validade, vê-se o escoamento transiente como uma sucessão de escoamentos permanentes, válidos em cada intervalo de tempo.

A declividade turbulenta (S_e) é calculada em função da variação de velocidade entre duas seções consecutivas, por meio de um coeficiente de contração ou expansão (CHOW, 1988):

$$S_{ce} = \frac{K_{ce}}{2g} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (3.10)$$

na qual:

K_{ce} é o coeficiente de contração ou expansão [L^{-1}];
 A é a área média da seção transversal no trecho [L^2];
 Q é a vazão no trecho [$L^3.T^{-1}$];
 g é a aceleração da gravidade [$L.T^{-2}$].

Por fim, a declividade viscosa (S_i) é calculada a partir do modelo de viscosidade do fluido no trecho, conforme o modelo de propagação adotado. Substituindo as equações 3.4 a 3.8 na equação 3.3, vem:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta \cdot Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} \cos \alpha - g (\sin \alpha - S_f - S_e - S_i) = 0 \quad (3.11)$$

na qual β é o coeficiente de Boussinesq do escoamento.

No caso de rupturas de barragem, esperam-se valores unitários para o coeficiente de Boussinesq em função do caráter prismático e alinhamento longitudinal reto das brechas (HENDERSON, 1966). Na equação 3.11 identificam-se sete termos, da esquerda para a direita:

- um termo de aceleração local, que incorpora as alterações no momento do escoamento devido às mudanças temporais na velocidade de escoamento;
- um termo de aceleração convectivo, que incorpora as variações no momento do escoamento ao longo do canal;
- um termo de pressão, que incorpora as alterações no momento do escoamento devido às variações de profundidade no trecho;
- um termo gravitacional, que incorpora as alterações no momento do escoamento devido à declividade longitudinal;
- um termo de atrito, que incorpora as alterações no momento do escoamento em virtude das perdas por atrito entre o fluido e as paredes do canal;
- um termo turbulento, que incorpora as alterações no momento do escoamento em virtude de contração e expansão entre seções consecutivas;
- um termo viscoso, que incorpora as alterações no momento do escoamento devido às forças viscosas.

Em geral, admite-se que a declividade do trecho é suave ($\sin \alpha \approx S_0$) e que as linhas de fluxo têm declividade suave, ou seja, efeitos de turbulência são desprezíveis (não há formação de vórtices: $F_e = 0$). No caso das rupturas de barragens, ao menos no trecho do talude de jusante, não se julgam apropriadas estas aproximações.

Por exemplo, julga-se adequado que as forças de erosão turbulenta sejam consideradas ao menos no trecho de propagação ao longo do talude de jusante do maciço devido aos fenômenos de erosão em degraus observados nos experimentos desenvolvidos neste trabalho.

De fato, Wahl (2004) aborda que uma das limitações de muitos modelos de brecha, tais como o BREACH, decorrem da não representação deste fenômeno que domina a evolução do desenvolvimento da brecha em maciços de solo coesivo compactado.

Na equação 3.11 os termos relativos à velocidade (Q/A) são médios na seção (profundidade e largura), uma vez que se trata de uma formulação unidimensional. Porém, sabe-se que a velocidade em uma seção transversal varia tanto na profundidade, quanto na largura, além de sofrer oscilações devidas à turbulência, para as mesmas condições de vazão.

3.3 Transporte de sedimentos e erosão

3.3.1 Tensão de cisalhamento

Segundo Chanson (2004), o transporte de sedimentos em um canal com leito móvel ocorre sempre que a tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento nas paredes excede um valor limite. A tensão de cisalhamento ou tensão trativa (τ_0) imposta pelo escoamento ao leito em condições de regime permanente é definida por (HENDERSON, 1966):

$$\tau_0 = \gamma_m \cdot R_h \cdot S_f \quad (3.12)$$

na qual:

γ_m é o peso específico do fluido [$M.L^{-2}.T^{-2}$];

R_h é o raio hidráulico [L];

S_f é a declividade da linha de energia do escoamento (adimensional).

Essa tensão de cisalhamento pode também ser entendida como imposta pelo escoamento do mesmo fluido a uma velocidade cisalhante (u_*), definida por (JULIEN, 1998):

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_m} \quad (3.13)$$

na qual:

τ_0 é a tensão de cisalhamento [$M.L^{-1}.T^{-2}$];

ρ_m é a densidade do fluido [$M.L^{-3}$].

Prandtl, fazendo uma analogia ao movimento dos gases, propôs que a tensão cisalhante imposta pelo escoamento ao leito fosse definida por (JULIEN, 1998):

$$\tau = \tau_v + \rho_m \cdot \kappa^2 \cdot z^2 \cdot \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \quad (3.14)$$

na qual:

τ_v é a tensão de cisalhamento devido às forças viscosas impostas pelo fluido [M.L⁻¹.T⁻²];

κ é a constante de von Kármán, igual a 0,4;

ρ_m é a densidade do fluido [M.L⁻³];

l_m é a camada de mistura [L];

V é a velocidade de escoamento [L.T⁻¹].

Na equação 3.14 observam-se dois termos, o primeiro devido às forças viscosas e o segundo devido a efeitos de turbulência. Também se observa que o termo turbulento prevalece acima de um dado valor de profundidade, definida como a espessura da camada limite (δ). Assumindo que esta camada é pouco espessa, a tensão trativa (τ_0) será na fronteira ($z=\delta$) igual àquela imposta pelo escoamento ($\tau=\tau_0$). Das equações 3.13 e 3.14, vem:

$$\tau_0 = \rho_m \cdot u_*^2 = \rho_m \cdot \kappa^2 \cdot z^2 \cdot \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 \Rightarrow \frac{v}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3.15)$$

na qual:

v é a velocidade longitudinal em qualquer ponto da profundidade z [L.T⁻¹];

u_* é a velocidade cisalhante [L.T⁻¹], conforme definido na eq. 3.13;

z_0 é uma constante de integração (m), igual à profundidade em que a velocidade é nula [L].

A validade da equação 3.15 implica que o perfil de velocidades ao longo da profundidade é logarítmico. Para escoamentos turbulentos em superfícies planas e lisas (JULIEN, 1998):

$$z_0 \cong \frac{V_m}{9 \cdot u_*} \quad (3.16)$$

na qual:

ν_m é a viscosidade do fluido [L².T⁻¹].

Substituindo a equação 3.16 na equação 3.15 e integrando ao longo da profundidade, obtém-se que:

$$u_* = \left[5,75 \log \left(\frac{u_* h}{\nu_m} \right) + 3,25 \right] \cdot V \quad (3.17)$$

na qual:

\log é o logaritmo na base 10;

V é a velocidade média de escoamento [$L.T^{-1}$];

h é a profundidade do escoamento [L].

Portanto, para um escoamento turbulento em superfície lisa, na qual o diâmetro representativo dos grãos (d_s) é muito inferior à espessura da camada limite e plana, pode-se utilizar a equação 3.17 para calcular a velocidade cisalhante, e assim a tensão de cisalhamento imposta pelo fluido ao leito a partir da velocidade média e profundidade do escoamento.

3.3.2 Tensão de cisalhamento crítica

Para estudar a erosão do leito de um canal, o material constituinte é admitido como constituído por partículas esféricas, sujeitas apenas ao peso próprio, empuxo e forças de arraste decorrentes do escoamento. Negligenciando as forças de arraste, o transporte (movimento) se inicia assim que as forças cisalhantes decorrentes do escoamento excedem certo percentual do peso próprio. Para tornar comparáveis diversas situações e materiais sujeitos ao transporte, define-se o parâmetro de Shields (τ_* - CHANSON, 2004):

$$\tau_* = \frac{F}{P} = \frac{R_h \cdot S_f}{(G-1) \cdot d_s} \quad (3.18)$$

na qual:

F é a força resultante da tensão de cisalhamento resultante do atrito fluido-leito [$M.L.T^{-2}$];

P é o peso da partícula [$M.L.T^{-2}$];

d_s é o diâmetro das partículas, usualmente adotado igual ao d_{50} (diâmetro mediano) para efeito de representatividade [L];

R_h é o raio hidráulico resultante do escoamento [L];

S_f é a declividade da linha de energia do escoamento (adimensional);

G é a gravidade específica dos grãos do solo (adimensional).

O parâmetro de Shields pode ser entendido como um número adimensional para avaliar a condição de mobilidade de um leito. Nesta proposição não se consideram forças de contato entre as partículas, como também não é válida para declividades acentuadas.

Dunn (1959) procurou determinar a relação entre propriedades geotécnicas de materiais coesivos, por meio do teste de palheta (*vane test*), e a tensão de cisalhamento crítica, através de um ensaio de jato submerso. O índice de plasticidade (IP) do solo foi o parâmetro que mostrou melhor correlação à tensão de cisalhamento crítica, indicando que quanto maiores os

valores do IP, maiores os valores da tensão de cisalhamento crítica. Este resultado também foi confirmado nos experimentos de Wan e Fell (2004).

Observações experimentais indicam que o limite para o início do movimento (τ_{*c}) é fundamentalmente função da turbulência do escoamento imposta ao grão, introduzindo-se o conceito de número de Reynolds cisalhante do grão (Re_*), definido por (CHANSON, 2004):

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d_s}{\nu} \quad (3.19)$$

na qual:

u_* é a velocidade cisalhante [$L.T^{-1}$];

d_s é o diâmetro representativo das partículas do material constituinte do leito [L];

ν é a viscosidade dinâmica [$L^2.T^{-1}$].

O gráfico da variação do parâmetro de Shields e do número de Reynolds cisalhante define o conhecido diagrama de Shields (Figura 3.2).

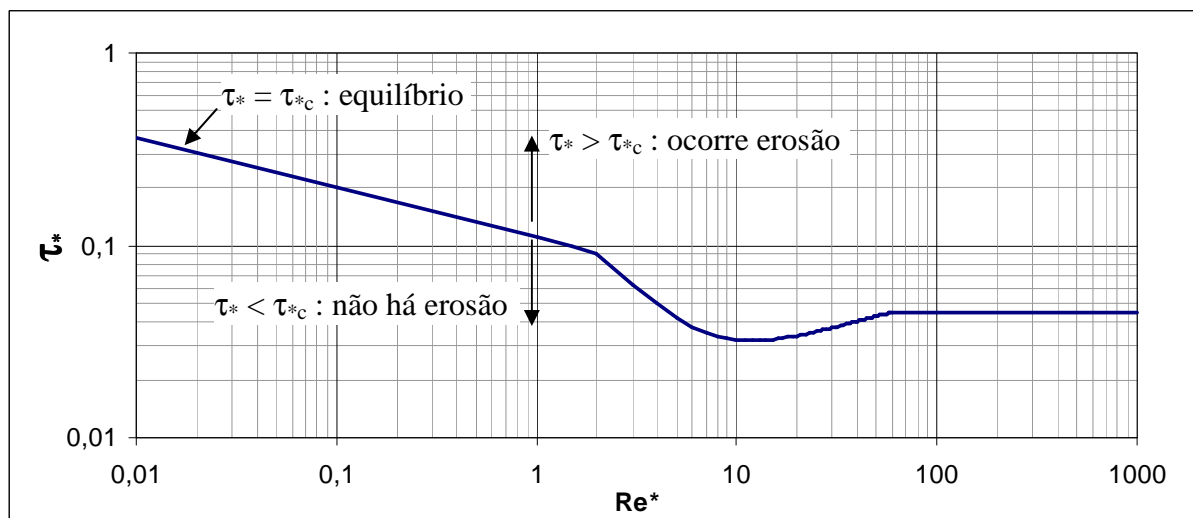


Figura 3.2: Diagrama de Shields (material não coesivo).

Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2006).

No diagrama de Shields reconhecem-se três regiões distintas (GRAF, 1971):

- Re_* inferior a 2, em que o diâmetro representativo dos grãos é inferior à espessura da camada limite (δ), e os contornos são ditos suaves;
- Re_* superior a 60, em que a camada limite tem sua formação interrompida pela rugosidade dos grãos, e os contornos são ditos rugosos;

- Re_* entre 2 e 60 em que há uma zona de transição (trecho curvo da Figura 3.2).

Superfícies planas compostas por solos coesivos compactados ($d_{50} < 0,012$ mm) se comportam como contornos suaves para lâminas variando de 0,10 m a 2 m e velocidades de escoamento de até 5 m/s (escoamentos turbulentos).

3.3.3 Equações de transporte de sedimentos

As equações de transporte de sedimentos são utilizadas para representar o transporte do material do leito ao longo do escoamento, ou seja, o transporte aluvionar. Trata-se de um processo de destacamento de partículas que são transportadas junto ao fundo ou em suspensão, conforme as forças atuantes permitam.

Conforme as velocidades de escoamento aumentam, observam-se perfis de erosão do leito que variam de superfícies onduladas, dunas, dunas periódicas, anti-dunas a degraus (CHANSON, 2004). Estas formas interferem na tensão de cisalhamento imposta pelo fluido ao leito.

A partir de dados experimentais, diversos autores ajustaram equações de transporte empíricas baseadas na tensão de cisalhamento (CHANG, 1980), válidas para leito liso e condições subcríticas, como é o caso da equação de Meyer-Peter e Müller (SMART, 1984):

$$\phi = \frac{q_s}{\sqrt{(G-1)gd_s^3}} = 8 \cdot (\tau_* - \tau_{*c})^{1,5} \quad (3.20)$$

na qual:

G é a gravidade específica do grão (adimensional);

g é a aceleração da gravidade [$L.T^2$];

d_s é o diâmetro representativo das partículas do material constituinte do leito [L];

τ_* e τ_{*c} são as tensões cisalhantes adimensionais do fluido e crítica;

ρ é a densidade do fluido [$M.L^{-3}$];

ϕ é a taxa de transporte de sedimentos (adimensional).

Horn *et al.* (citado por CHANSON, 2004) realizaram medidas em campo do transporte de sedimentos durante eventos de cheia em Queensland, Austrália. A utilização das equações de transporte de sedimentos clássicas resultaram em erros de até uma ordem de grandeza se comparadas aos resultados de campo, colocando as incertezas envolvidas na mesma ordem de grandeza que as decorrentes da utilização de relações empíricas em estudos de ruptura.

Estima-se que estes erros sejam maiores quanto mais se afaste de condições de escoamento subcrítico, para o qual a maioria das formulações foi desenvolvida.

3.3.4 Erodibilidade

Modernamente, a quantificação dos processos erosivos tem evoluído em direção ao conceito de erodibilidade. A erodibilidade de um material é definida como a taxa de erosão vertical a que o material está sujeito quando exposto a uma dada velocidade de escoamento. Esta definição não é plenamente satisfatória, visto que a velocidade varia conforme o campo de escoamento. De fato, a velocidade do escoamento é nula na interface solo/água. Uma definição mais satisfatória relaciona a taxa de erosão e a velocidade de escoamento à tensão trativa (BRIAUD, 2008):

$$\frac{\dot{z}}{V} = \lambda_0 \cdot \left(\frac{\tau_0 - \tau_c}{\rho \cdot V^2} \right)^m + \lambda_1 \cdot \left(\frac{\Delta\tau}{\rho \cdot V^2} \right)^n + \lambda_2 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{\rho \cdot V^2} \right)^p \quad (3.21)$$

na qual:

\dot{z} é a erodibilidade do material [L.T⁻¹];

V é a velocidade média de escoamento [L.T⁻¹];

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ são coeficientes da função erodibilidade [L.T⁻¹];

m, n e p são expoentes da função erodibilidade (adimensionais);

ρ é a densidade do fluido [M.L⁻³];

$\Delta\tau$ e $\Delta\sigma$ são as flutuações das tensões cisalhante e normal impostas pelo fluido devido à turbulência [M.L⁻¹.T⁻²];

τ_0 e τ_c são as tensões trativa e cisalhante crítica [M.L⁻¹.T⁻²], respectivamente.

Desconsiderando os efeitos de turbulência, a forma da equação 3.21 compara-se às das equações de transporte. A diferença entre as abordagens reside do fato de que a erodibilidade deixa livre para o usuário adaptar a forma e o tipo de função à base de dados disponíveis. Lambermont e Lebon (1978), utilizando resultados de testes de erosão desenvolvidos em canais por Partheniades (1965, 1986), encontraram funções relacionando erodibilidade e tensão cisalhante dessa natureza.

Obviamente, diversos autores têm pesquisado formas para esta função em diferentes condições de escoamento e material. Wan e Fell (2004) reportam que diversos testes de erosão têm resultado em relações lineares entre a erodibilidade e a tensão de cisalhamento.

Visto que o gráfico de erodibilidade é sempre traçado em papel bilogartimo, estes autores propuseram uma outra forma da equação 3.21:

$$\log(\xi) = -I \cdot \log(\tau_0 - \tau_c) \quad (3.22)$$

na qual:

ξ é a erodibilidade do material [M.T⁻¹.L²];

I é índice de erodibilidade (adimensional);

τ_0 e τ_c são as tensões cisalhantes calculada e crítica em questão [M.L⁻¹.T⁻²].

Partido desta equação, Wan e Fell (2004) propuseram o índice de erodibilidade, que permite classificar os solos quanto à velocidade de erosão em seis classes (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Classes de erodibilidade.

| Classe | Índice de erodibilidade | Erosão |
|--------|-------------------------|----------------------|
| 1 | <2 | extremamente rápida |
| 2 | 2-3 | muito rápida |
| 3 | 3-4 | moderadamente rápida |
| 4 | 3-5 | moderadamente lenta |
| 5 | 5-6 | muito lenta |
| 6 | >6 | extremamente lenta |

Fonte: Wan e Fell (2004).

Para efeito desta classificação, Wan e Fell (2004) analisaram amostras de solo compactadas a 95% de grau de compactação, com energia do ensaio Proctor Normal. Os ensaios no trabalho destes autores foram direcionados para fenômenos de erosão interna.

De maneira análoga, Briaud (2008) também propõe a classificação de solos e rochas quanto à erodibilidade em seis classes, conforme mostrado na Figura 3.3. Nesta figura apresenta-se a erodibilidade tanto em função da velocidade quanto para tensão de cisalhamento, embora estas variáveis tenham escalas diferentes em relação à erodibilidade.

Neste diagrama, apresentam-se as faixas previstas para o comportamento a partir da experiência de quinze anos de testes de erosão realizados em diversos materiais utilizando um aparelho denominado Erosion Function Aparatus (EFA), reportada por Briaud (2008).

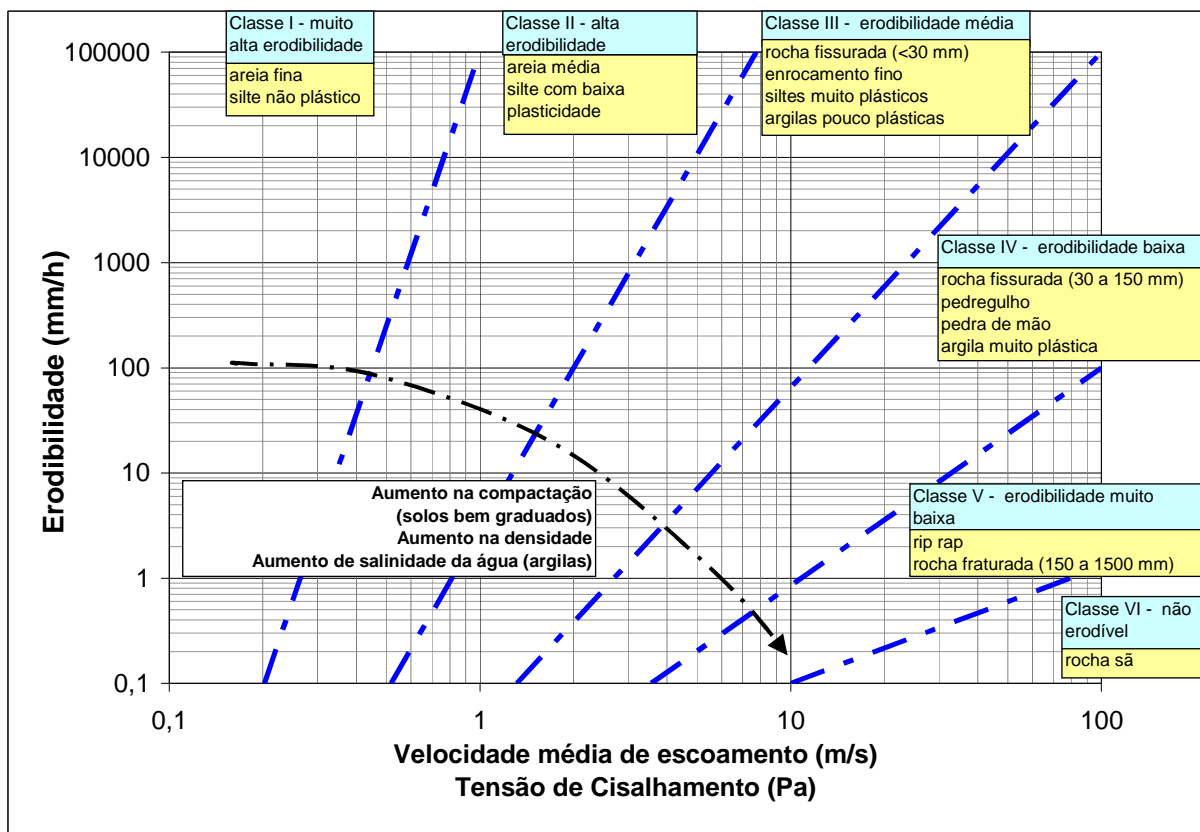


Figura 3.3: Diagrama de erodibilidade.

Fonte: Adaptado de Briaud (2008).

3.3.5 Aparatos existentes para determinação de parâmetros de erosão

Segundo Wan e Fell (2004), identificam-se seis classes de aparatos para testes de erodibilidade:

- em canais (flume tests – INDERBITZEN, 1961; SMART, 1984; PARTHENIADES, 1986; KAMPHUIS *et al.*, 1990; RICKENMANN, 1991; BARCELOS, 2005);
- em jatos, para investigar efeitos erosivos de jatos em bacias de dissipação de vertedores ou sobre o fundo de canais em solo (DUNN, 1959);
- em cilindros rotativos concêntricos, visando determinar a tensão cisalhante crítica e a erodibilidade de solos coesivos (MASCH *et al.*, 1963; PARTHENIADES, 1965; RAUDKIVI e TAN, 1984);
- testes para modelagem de erosão em trincas ou cavidades em condutos forçados (CHRISTENSEN e DAS, 1973; WAN e FELL, 2004);
- EFA, proposto por Briaud *et al.* (2001), projetado para modelar erosão no entorno de pilares de pontes, para solos coesivos ou não.

Os aparatos que mais se adequam aos objetivos deste trabalho são os relacionados ao escoamento em canais e o EFA, que são a seguir descritos.

3.3.5.1 Testes em canais

Testes em canais são os mais comuns quando se trata de avaliar a erodibilidade em cursos de água, pois a investigação deste fenômeno teve origens na necessidade de dimensionamento de canais em solo ou com revestimentos erodíveis, mas estáveis a um certo risco (LANE, 1955; DUNN, 1959; CHANG, 1980). Em geral, os ensaios são feitos pela disposição ou compactação de solos no fundo dos canais, avaliando-se as taxas de erosão.

Patherniades (1965) estudou processos erosivos em argilas depositadas na baía de São Francisco, EUA, simulando o processo em um canal plano, com 18 m de extensão e seção retangular com base de 0,30 m por 0,38 de altura, em ambiente salino. Os resultados indicaram que as taxas de erosão dependiam fortemente da tensão cisalhante média, crescendo rapidamente uma vez excedido o valor limite. Segundo este autor, materiais coesivos contendo óxidos de ferro apresentaram maiores resistências à erosão nas mesmas condições. Resultados semelhantes foram apontados por Wan e Fell (2004) e reportados por Barcelos (2005).

Grande parte dos trabalhos se refere a depósitos aluvionares. Smart (1984) realizou experimentos em canais com declividades longitudinais variando entre 4% e 20% em um canal com 6 m de extensão e 0,20 m de largura e sedimentos com d_{50} acima de 0,4 mm. Nestas condições, este autor verificou que a equação 3.20 subestimava a taxa de erosão observada, propondo novas formas:

$$\phi = \begin{cases} 4,2 \cdot S^{0,6} \cdot \frac{V}{u_*} \cdot \tau_* \cdot (\tau_* - \tau_{*c}) \dots\dots\dots d_{90}/d_{30} < 1,5 \\ 4 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} S^{0,6} \cdot \frac{V}{u_*} \cdot \tau_* \cdot (\tau_* - \tau_{*c}) \dots\dots\dots 1,50 < d_{90}/d_{30} < 8,5 \end{cases} \quad (3.23)$$

na qual:

V é a velocidade média [L.T⁻¹];

u_* é a velocidade cisalhante [L.T⁻¹];

τ_* e τ_{*c} são os parâmetros de Shields do escoamento e crítico, respectivamente (adimensionais);

S é a declividade longitudinal (adimensional, 0,04 < S < 0,20);

d_{90} e d_{30} são os diâmetros equivalentes às peneiras em que 90% e 30% do material ficam retidos, respectivamente [L].

Os resultados indicaram que o conteúdo e o tipo de argila presente são importantes no desenvolvimento do processo erosivo, além de identificar outros aspectos importantes como a rugosidade superficial, vazão, tensão trativa e duração do escoamento.

3.3.5.2 Erosion Function Apparatus

Briaud *et al.* (2001) propuseram um aparato denominado erosion function apparatus (EFA). O EFA consiste de um conduto forçado, com seção retangular (101,6 mm de base, 50,8 mm de altura e 1,22 m de extensão), em cujo fundo há um orifício ($d=76,2$ mm) para conexão de um amostrador Shelby.

O aparato está acoplado a uma bomba capaz de permitir uma faixa de variação nas velocidades de escoamento de 0,1 m/s a 6 m/s, e a um medidor de vazão digital. O procedimento de teste conta com os seguintes passos:

- deixa-se a amostra no aparato cheio de água durante 1 h;
- empurra-se a amostra de solo em direção ao interior do aparato de forma a deixar 1 mm de protuberância no interior do conduto forçado, ajustando a velocidade de escoamento para 0,3 m/s e registrando-se o tempo necessário para desbastar esta protuberância;
- se o intervalo de tempo for maior que 1 h, ajusta-se novamente 1 mm de protuberância de solo, aumentando a velocidade para 0,6 m/s, registrando o tempo necessário ao desgaste;
- repete-se o procedimento para 1 m/s, 1,5 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4,5 m/s e 6 m/s.

A velocidade de escoamento é obtida do medidor de vazão, a tensão de cisalhamento pelo ábaco de Moody e a taxa de erosão dividindo-se a altura erodida (1mm) pelo tempo gasto. Para obter o valor do fator de fricção (f) no ábaco de Moody, calcula-se a rugosidade relativa:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{d_{50} \cdot (a + b)}{4 \cdot a \cdot b} \quad (3.24)$$

na qual:

ε/D é a rugosidade relativa (adimensional);

d_{50} é o diâmetro mediano dos grãos [L];

a e b são a base e a altura da seção transversal do aparato [L].

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando o EFA por este autor desde então (BRIAUD, 2008). Briaud *et al.* (2007) analisou as rupturas dos diques decorrentes da passagem do furacão Katrina sobre Nova Orleans, USA, por galgamento. Foram retiradas amostras dos diques (rompidos e não rompidos) para determinar a erodibilidade do material constituinte no EFA. Os resultados indicaram que o grau de compactação tem maior influência na erodibilidade para solos com maior teor de finos.

3.4 Modelagem numérica

Muitos autores abordam que a análise de ruptura de barragens pode ser feita pela aplicação de modelos matemáticos de propagação unidimensionais (CHANSON, 2004; FREAD *et al.*, 1998; HENDERSON, 1966). Esta premissa é verdadeira sempre que as velocidades de escoamento na direção longitudinal são bastante superiores às componentes transversais e verticais.

No caso da ruptura de barragens, esta premissa tem validade no talude de jusante da barragem desde que não haja o afogamento do escoamento em decorrência das condições de contorno a jusante. Porém, na propagação da onda de cheia ao longo de quilômetros após a localização da barragem, modelagens bidimensionais ou tridimensionais podem implicar em diferenças significativas nos níveis de água e velocidades de escoamento previstas em função da melhor representação do armazenamento lateral e de outras singularidades.

Os modelos matemáticos de propagação hidrodinâmica aplicados à análise de rupturas de barragens consideram o desenvolvimento da brecha por meio de equações empíricas ou de formulações matemáticas experimentais advindas da teoria do transporte de sedimentos, em geral com geometria supostamente trapezoidal. A taxa de erosão do maciço determina o tempo de formação da brecha, a forma e a amplitude da hidrógrafa gerada, tendo impactos decisivos na quantificação dos danos e vítimas a jusante (WAHL, 2004).

Para efeito deste trabalho, serão descritos os modelos de propagação unidimensionais, visto que o objetivo reside na hidrógrafa gerada pela brecha, e não a propagação no curso de água em si. Ainda assim, um modelo de análise de ruptura tridimensional, em que se analisa a formação da brecha de maneira acoplada será descrito.

3.4.1 Modelos de propagação unidimensionais

3.4.1.1 FLDWAV

O programa FLDWAV é o resultado do aprimoramento do programa DAMBRK, anteriormente desenvolvido pelo National Weather Service – NWS. O programa permite a solução das equações de Saint-Venant unidimensionais incluindo todos os termos na equação 3.7 (onda dinâmica), acopladas a formulações representativas de escoamento bruscamente variados adotadas em singularidades como pontes e bueiros, ou representativas do desenvolvimento de brechas como no caso do galgamento de barragens (FREAD, 1998).

No caso de uma ruptura de barragem por galgamento, definidas as condições de contorno de montante (nível do reservatório e hidrógrafa de entrada) e de jusante (declividade longitudinal para condições de escoamento uniforme a partir da última seção transversal), o programa resolve as equações de Saint-Venant adotando um esquema numérico de diferenças finitas implícito a quatro pontos.

O programa tem capacidade para determinar as velocidades e profundidades de escoamento associadas tanto para escoamento newtonianos (água) ou não newtonianos, como ocorre nas rupturas de barragens de rejeitos ou de contenção de sedimentos. Neste caso, o termo viscoso (S_i) da equação 3.11 é escrito por (FREAD, 1991):

$$S_i = \frac{\kappa}{\gamma} \cdot \left[\frac{(b+2) \cdot Q}{A \cdot R_h^{b+1}} + \frac{(b+2) \cdot (\tau_0 / \kappa)^b}{2 \cdot R_h^b} \right]^{1/b} \quad (3.25)$$

na qual:

κ é a viscosidade aparente do fluido [$T \cdot L^{-1}$];

τ_0 é a tensão de cisalhamento imposta pelo fluido [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$];

γ é o peso específico do fluido [$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2}$];

A é a área média da seção transversal no trecho [L^2];

R_h é o raio hidráulico [L];

Q é a vazão no trecho [$L^3 \cdot T^{-1}$];

b é o inverso do expoente da forma da função tensão-deformação do fluido (ex: quadrática: $m=2 \Rightarrow b=0,5$).

A Figura 3.4 Ilustra os tipos de função tensão-deformação utilizados na modelagem de escoamentos newtonianos e não newtonianos.

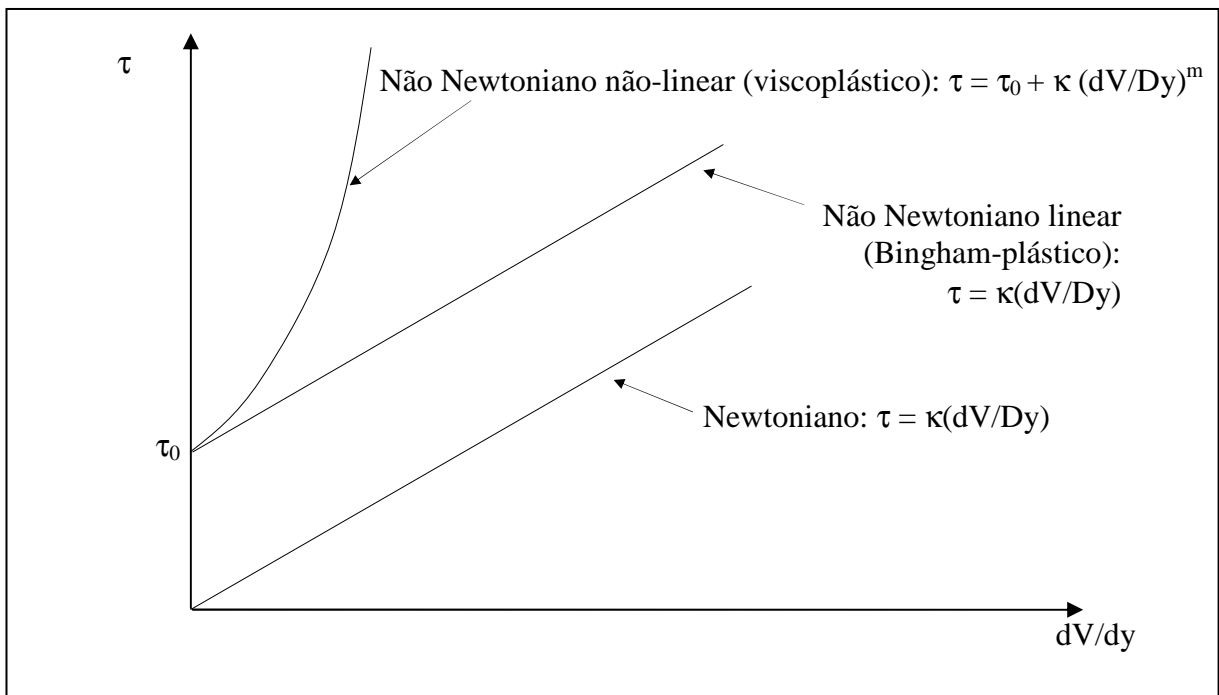


Figura 3.4: Diagrama tensão versus deformação para fluidos.

Fonte: Adaptado de O'Brien e Julien (1985).

Os parâmetros do modelo de função tensão-deformação do fluido para escoamentos não newtonianos podem ser estimados a partir das concentrações de sedimentos em volume no fluido (C_v), conforme O'Brien e Julien (1985), válidas para valores de C_v entre 20% e 50%. Segundo estes autores, a utilização de modelos não newtonianos é necessária quando C_v ultrapassa 20%, mas valores acima de 50% indicam que ocorre movimento de massa.

A vazão efluente da brecha (Q_b) é calculada a partir da formulação aplicável a vertedores de soleira espessa (FREAD, 1998):

$$Q_b = c_v \cdot k_s \cdot \left[3,1 \cdot b_i \cdot (h - h_b)^{1,5} + 2,45 \cdot z \cdot (h - h_b)^{2,5} \right] \quad (3.26)$$

na qual:

c_v é um fator de correção para a velocidade de aproximação [$L^{0,5} \cdot T^{-1}$];

b_i é a largura do fundo da brecha avaliada no instante i [L];

h é a elevação do nível de água imediatamente a montante do maciço [L];

h_b é a elevação do fundo da brecha [L], calculada a partir do tempo de formação;

z é a declividade dos taludes laterais da brecha (adimensional: 0 = vertical; 1 = 1V:1H, etc);

k_s é um fator de correção em função de efeitos de afogamento de jusante (adimensional).

Na equação 3.26, observa-se que a elevação e a largura do fundo da brecha determinam a vazão instantânea e, assim, a hidrógrafa efluente da ruptura. De fato, o modelo FLDWAV prevê as seguintes possibilidades para cálculo dessas variáveis (FREAD, 1998):

$$h_b = h_u - (h_u - h_{bm}) \cdot \left(\frac{t_b}{t_{FB}} \right)^{\rho_0} \quad (3.27)$$

na qual:

h_b é a elevação do fundo da brecha, no instante t_b [L];

t_b é o tempo decorrido desde o início da brecha [T];

h_u é a elevação da crista da barragem [L];

h_{bm} é a elevação final do fundo da brecha, em geral adotada igual à elevação do fundo do reservatório [L];

t_{FB} é o tempo de formação da brecha [T], fornecido pelo usuário;

ρ_0 é um parâmetro que representa o grau de não-linearidade no desenvolvimento da brecha (adimensional), e varia de 1 a 4, embora geralmente a linearidade seja assumida ($\rho_0 = 1$);

$$b_i = b_{om} \cdot \left(\frac{t_b}{t_{FB}} \right)^{\rho_0} \quad (3.28)$$

na qual:

b_i é a largura da brecha no instante i [L];

b_{om} é a largura máxima da brecha [L].

O método numérico utilizado segue o esquema implícito a quatro pontos, utilizando um fator de ponderação (θ). Este fator define a localização do ponto no interior da grade de cálculo em que as derivadas parciais e a função são avaliadas, e pode variar entre 0 e 1. Porém, Fread (1991) menciona que, no esquema implícito, o valor de θ deve estar situado entre 0,5 e 1,0, sendo que quanto mais próximo de 0,5 mais precisas serão as aproximações, recomendando um valor de 0,55 a 0,60.

3.4.1.2 HEC-RAS

O Hydrologic Corps of Engineers (HEC) desenvolveu o programa River Analysis System (HEC-RAS), que se trata de um ambiente computacional no qual resolvem-se as equações de Saint-Venant unidimensionais, em regimes permanente ou transitório, em leito fixo ou móvel, permitindo acoplar singularidades diversas tais como pontes, bueiros, reservatórios laterais e, recentemente, analisar ruptura de barragens. O esquema numérico utilizado também é o de diferenças finitas implícito a quatro pontos (BRUNER, 2008).

Muito do desenvolvimento matemático e computacional do programa DAMBRK foi aproveitado no algoritmo desse programa. O grande diferencial do programa HEC-RAS em relação ao FLDWAV reside na interface e nas estruturas e diferentes tipos de armazenamento e áreas de escoamento inefetivas possíveis de acomodar em cada modelagem. Além disso, os resultados podem ser facilmente exportados para planilhas, figuras e até mesmo desenhos em formato de plataformas de Sistema de Informação Geográfica.

Neste aspecto, um utilitário recentemente desenvolvido possibilita a exportação dos resultados diretamente para a plataforma Arc-GIS, fazendo com que o desenho das manchas de inundação decorrentes da passagem das cheias seja feita automaticamente e sobrepostas a imagens e fotografias aéreas.

3.4.2 Modelos de brecha

Pode-se classificar as metodologias para determinação da evolução e das características da brecha em três classes: aplicação de modelos numéricos paramétricos, fisicamente embasados ou por meio de relações empíricas (FREAD, 1991; WAHL, 2004).

3.4.2.1 Relações Empíricas

Em estudos de análise de risco de ruptura de barragens de solo compactado, é comum a utilização de métodos baseados na análise de dados de rupturas para previsão dos parâmetros da brecha, como também do tempo de falha e da vazão de pico na ruptura (WAHL, 2004).

Diversas abordagens foram propostas a partir de ajuste de equações por regressão a um banco de dados de rupturas. Wahl (2004) coletou estas informações nas diversas fontes, compilando um banco de dados único com 108 pontos, e verificou que há carência de dados sobre grandes barragens, sendo que em 75% dos casos a altura dos maciços é inferior a 15 m.

Numa análise de incerteza, esse mesmo autor comparou os resultados da aplicação das equações empíricas propostas pelos diversos autores aos pontos do banco de dados. Os resultados indicaram que erros de predição de até $\pm 75\%$ na largura da brecha não são incomuns (70 a 80 casos testados), e que chegam a uma ordem de grandeza no tempo de falha e vazão de pico (30 a 40 casos testados). Em resumo, os resultados encontrados por este autor indicam incertezas de $\pm 33\%$, $\pm 100\%$ e $\pm 50\%$ a $\pm 100\%$ para largura da brecha, tempo de falha e vazão de pico, respectivamente. Observou ainda que, das equações empíricas analisadas,

aquelas que produziram menores incertezas nas vazões de pico foram as propostas por Froehlich (1995), da ordem de $\pm 33\%$.

Froehlich (2008), propôs um rearranjo destas equações, ajustando-as a um banco de dados de 74 casos, que incluem a ruptura da barragem de Orós, CE. Para a largura da brecha, Froehlich (2008) propõe:

$$\bar{B}_* = 0,27 \cdot k_0 \cdot V_{w*}^{0,32} \quad (3.29)$$

na qual:

\bar{B}_* é a largura média adimensional da brecha [L], definida pela razão entre a largura média e a altura da brecha;

k_0 é um coeficiente adimensional que varia conforme o tipo de ruptura (1,3 para galgamento e 1,0 para erosão interna);

V_{w*} é o volume de armazenamento adimensional acima da elevação final da brecha, definido pela razão entre o volume de armazenamento nesta elevação e o cubo da altura da brecha.

Esta equação apresenta coeficiente de regressão igual a 62,9%, para uma amostra com 69 pontos, com desvio padrão do logaritmo neperiano da largura da brecha adimensional igual a 0,4602. Para o tempo de formação da brecha, Froehlich (2008) propõe:

$$t_{f*} = 63,2 \cdot V_{w*}^{0,50} \quad (3.30)$$

na qual:

t_{f*} é o tempo de formação da brecha adimensional, definido pela raiz quadrada da razão entre o tempo de formação da brecha e o produto entre altura da brecha e aceleração da gravidade;

V_{w*} é o volume de armazenamento adimensional acima da elevação final da brecha, definido pela razão entre o volume de armazenamento nesta elevação e o cubo da altura da brecha.

Esta equação apresenta coeficiente de regressão igual a 92,9%, para uma amostra de 23 pontos, com desvio padrão do logaritmo neperiano do tempo de formação da brecha adimensional igual a 0,2979.

Em relação aos taludes da brecha, Froehlich (2008) propõe declividades iguais a 1H:1V para rupturas por galgamento e 0,70H:1V para rupturas por erosão interna, com coeficiente de determinação de apenas 5%, para 70 casos, e desvio padrão do logaritmo da declividade igual a 0,8273. Embora bastante elevadas, estas declividades de taludes laterais estão em discordância com o observações de brechas reais, cujas paredes são praticamente verticais.

3.4.2.2 BREACH

O modelo BREACH foi desenvolvido com o objetivo de prever as características da brecha (tempo de formação e dimensões) formada em uma barragem de terra decorrente de rupturas por galgamento ou erosão interna (FREAD, 1991).

O programa foi desenvolvido numa tentativa de preencher as falhas decorrentes da utilização do programa FLDWAV definindo-se os parâmetros da brecha por meio de formulações empíricas. Assim, em uma análise de ruptura, esta nova metodologia consistia em realizar a simulação no BREACH para determinar o hidrograma efluente do maciço rompido, que seria propagado no FLDWAV para determinação das áreas atingidas, e os respectivos tempos, profundidades e velocidades de escoamento, considerando as demais singularidades (áreas de armazenamento, pontes, bueiros *etc*).

A vantagem apontada pelos autores (FREAD, 1991) residia no fato de o programa BREACH acoplar equações de transporte de sedimentos e características geotécnicas do material do maciço às equações de Saint-Venant, que seriam resolvidas conjuntamente, de forma que as características da brecha (tempo de formação e dimensões) não seriam mais parâmetros de entrada, mas calculadas pelo modelo a partir da erodibilidade do material do maciço quando exposto às condições de escoamento decorrentes da ruptura.

São dados de entrada do programa:

- características hidráulicas: hidrógrafa de cheia, nível de água a montante, curva de descarga do vertedor, revestimento do talude jusante (solo nu, grama, enrocamento), viscosidade do fluido;
- características geométricas: curva cota x volume do reservatório, declividades dos taludes, largura da crista, altura da barragem;
- características geotécnicas do maciço: coesão, peso específico e ângulo de atrito do material constituinte do núcleo impermeável e da camada externa.

A Figura 3.5 a seguir mostra a representação de brecha utilizada no programa BREACH.

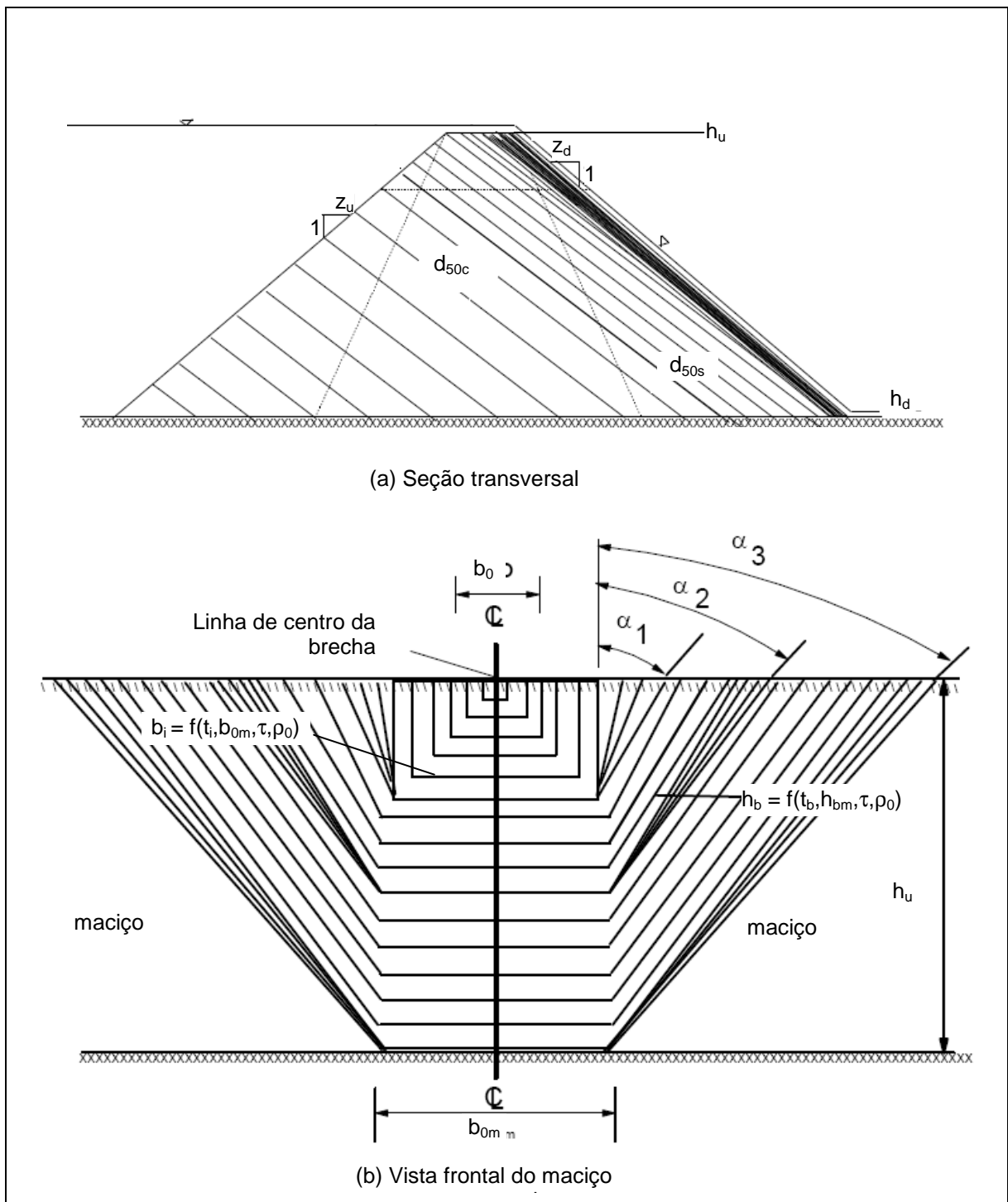


Figura 3.5: Representação da brecha no modelo BREACH.

Fonte: Adaptado de Fread (1991).

A simulação tem início pela laminação da hidrógrafa de entrada no reservatório (*level pool routing*) conhecidos o nível de água a montante inicial, a curva de descarga do vertedor e a curva cota x volume, até que o nível de água exceda a cota de coroamento do maciço.

A partir deste instante, o programa acopla uma equação de vertedor em soleira espessa para representar a brecha, com largura inicial de 30 cm, mantendo sempre a proporção de altura

igual à metade da base da brecha, que corresponde à seção hidráulica retangular de máxima eficiência.

Conhecendo o revestimento do talude de jusante, o escoamento é propagado até atingir a velocidade limite do revestimento, utilizando no caso de talude gramado as equações propostas por Chow (1973). Atingido o limite, assume-se que toda a grama é arrancada, dando início à erosão, inicialmente estipulada com 30 cm de base por 15 cm de altura.

Assumindo profundidade crítica na entrada da brecha, desprezando a carga de velocidade, como condição de montante na propagação hidrodinâmica unidimensional ao longo do talude ou seja:

$$y_c = \frac{2}{3}(h - h_b) \quad (3.31)$$

na qual:

y_c é a profundidade crítica na entrada da brecha [L];

h é a elevação do nível de água no reservatório [L] em cada instante;

h_b é a elevação do fundo da brecha [L] em cada instante.

A erosão da brecha é calculada por dois métodos: mantendo a relação entre largura da base e profundidade do escoamento e a partir da evolução dos taludes laterais da configuração vertical (canal retangular) para o mais abatido (canal trapezoidal final) em até 3 etapas, com ângulos progressivamente mais suaves. Dos dois métodos escolhe-se o que resulta na maior taxa de erosão.

No entanto, a brecha tem uma capacidade de transporte de sedimentos limitada. Neste caso, esta capacidade é estimada pela equação proposta por Smart (1984), valendo-se de equações para a tensão cisalhante crítica para materiais coesivos e não coesivos, relacionadas ao índice de plasticidade do material e ao diâmetro mediano. Além do problema relacionado às limitações da equação proposta por Smart ($d_s > 0,4$ mm, $4\% < S < 20\%$), Briaud *et al.* (2001), enumeram diversas características que além do d_{50} e do IP interferem na erodibilidade dos solos coesivos, como é o caso do teor de óxido de ferro.

Após atingir a fundação, o programa admite que a brecha não mais pode erodir na vertical, desenvolvendo-se para montante. Obviamente, cabe ao usuário verificar a validade desta premissa. O talude de jusante ao longo da brecha vai então sendo progressivamente abatido.

Neste processo, não há menção à formação de degraus, que são observados em experimentos e em rupturas reais (WAHL, 1998). Trata-se de um processo de erosão continuamente distribuído por toda a brecha.

3.4.2.3 RUPRO

O modelo RUPRO foi desenvolvido no Institut de Recherche Finalisée de Référence pour la Gestion Durable des Eaux e des Territoires (CEMAGREF) para solução das equações de Saint-Venant, de maneira análoga ao algoritmo utilizado no BREACH, mas com a possibilidade de utilizar abordagens uni ou bidimensionais (PAQUIER e RECKING, 2005). As equações são resolvidas segundo um esquema a quatro pontos pelo método de Runge-Kutta.

A brecha tem geometria retangular, e é iniciada por um pequeno canal na crista, que é erodido até atingir a fundação da barragem, quando então começa a alargar segundo a taxa de erosão. A taxa de erosão é calculada em cada intervalo de tempo segundo a equação de Meyer-Peter e Müller, admitindo condições de tensão de cisalhamento crítica de materiais não coesivos ($\tau_{*c} = 0,047$).

O modelo foi utilizado em análises realizadas no programa IMPACT (14 testes em laboratório, altura do modelo igual a 0,30 m), 5 testes em escala real (altura do modelo igual a 6 m) e 1 caso real. Os resultados encontrados indicaram desvios médios em relação aos observados da ordem de 8% para o tempo de pico do hidrograma efluente e 19% para a vazão máxima, considerados satisfatórios tendo em vista as incertezas nos parâmetros de entrada. No entanto, em relação à largura final da brecha, o desvio médio chegou a 81%, o que demonstra que a brecha ainda não está bem descrita no modelo (PAQUIER e RECKING, 2005).

3.4.2.4 DEICH-P

O programa DEICH-P vem sendo desenvolvido desde o início da década de 90 pela Universidade das Forças Armadas de Munique, Alemanha, sendo que desde 1995 está em uso e em desenvolvimento contínuo (BROICH, 2005a).

Trata-se de um modelo paramétrico, que resolve as equações de Navier-Stokes bidimensionais, acopladas a formulações de transporte de sedimentos coesivas ou não, ou em

degraus, sendo que as condições críticas necessárias ao desenvolvimento da brecha derivam dos ensaios desenvolvidos pela CIRIA (POWELEDGE *et al.*, 1989b). O material do maciço é caracterizado pelas propriedades geotécnicas e materiais do núcleo e do camada externa.

A brecha tem geometria trapezoidal com taludes constantes (2V:1H), evoluindo por rebaixamento do fundo paralelamente à crista segundo uma taxa de erosão. A taxa de erosão é calculada em cada intervalo de tempo segundo as equações de Meyer-Peter e Müller, Smart, Bagnold ou Engelung-Hansen, aplicáveis a solos não coesivos. A erosão é igualmente distribuída na brecha até que atinge-se a fundação, quando então a brecha pode apenas alargar com taludes laterais paralelos.

Durante o programa IMPACT, foram testadas outras abordagens de transporte, envolvendo formação de degraus e formulações que incorporassem a coesão do solo. No primeiro caso, tenta-se reproduzir a formação de degraus no maciço coesivo durante a formação da brecha, mas os valores obtidos nas simulações não aderiram aos resultados de nenhum dos experimentos realizados. Já a busca de formulações que incorporassem a coesão do solo foram motivadas pela facilidade de acoplamento aos modelos hidrodinâmicos e pela possibilidade de mensuração dos parâmetros envolvidos (BROICH, 2005a).

Nas simulações de barragens zonadas, o programa tem a habilidade de verificar a estabilidade geotécnica do núcleo coesivo à medida que o talude de jusante é erodido, o que agrega flexibilidade ao modelo, pois permite a inclusão de rupturas repentinas por instabilização do maciço no mecanismo de formação da brecha.

O modelo foi utilizado na análise dos resultados do programa IMPACT, da mesma forma que o RUPRO (BROICH, 2005b). Em relação ao ensaio de campo (maciço com 6 m de altura), foi observado que um maciço em condições saturadas não se comportava como material não coesivo, como também não erodia em fatias como muitas vezes observado em materiais coesivos rígidos, sendo proposto que em tais casos seja utilizada uma abordagem com material coesivo, mas com resistência ao cisalhamento relativamente reduzida.

Em relação aos ensaios de laboratório, foi observado que a largura da crista e a declividade do curso de água a jusante não afetaram os resultados de maneira sensível. O modelo DEICH_P tende a superestimar a largura final da brecha, assim como os demais modelos testados, o que pode ser explicado pela declividade dos taludes laterais da brecha admitidas nas simulações,

geralmente inferiores a 1V:1H, em contradição às paredes verticais observadas em muitos casos.

Mesmo no caso de maciços coesivos, o uso de formulações que não incorporavam a coesão do solo forneceu resultados mais próximos dos observados que quando se usava formulações que consideravam a coesão nas equações de transporte de sedimentos. No entanto, foi observado que o grau de compactação do maciço tinha grande influência na resistência ao galgamento, enquanto a coesão em si não se mostrava tão relevante quanto esperado (BROICH, 2005b).

3.4.2.5 Modelos tridimensionais

Recentemente, Wang e Bowles (2006a) desenvolveram um modelo denominado tridimensional para simulação da ruptura de uma barragem por galgamento composta por material não coesivo. No entanto, o modelo resolve as equações de Saint-Venant bidimensionais, acopladas às equações de transporte para determinação da taxa de erosão para materiais não coesivos e à análise de estabilidade de taludes tridimensional, baseado no método de Bishop.

A evolução da brecha é feita de maneira análoga ao realizado no modelo BREACH, em três etapas:

- Fase 1, quando a erosão do talude se dá para montante, abatendo o talude até que a crista seja rebaixada em 0,30 m. Nesta fase apenas as equações de transporte são utilizadas;
- Fase 2, do final da fase 1 até que a brecha atinja a fundação do maciço, são utilizadas as equações de transporte e verificadas as condições de estabilidade para reproduzir quaisquer rupturas movimentos de massa instantâneos;
- Fase 3, em que a brecha apenas se alarga segundo os dois mecanismos.

O modelo foi testado comparando-se os resultados numéricos aos medidos no teste n° 2 realizado no programa IMPACT (WANG e BOWLES, 2006b), para maciços não coesivos. Os resultados encontrados apontaram desvios entre os valores observados e previstos de 1% na vazão de pico e de 5% na largura final da brecha. Em simulações de barragens hipotéticas, as simulações indicaram que barragens que têm maior parte do armazenamento alocada em

elevações próximas da crista (vales mais abertos) tendem a produzir vazões de pico maiores numa ruptura.

Finalmente, foi verificado que o tipo de equação de transporte utilizada afeta sensivelmente os resultados, ou seja, é fundamental que a equação de transporte seja válida para o material constituinte do maciço da barragem, recomendando-se que a erodibilidade seja estimada a partir de testes para diferentes solos não coesivos (WANG e BOWLES, 2006b).

Tendo em vista os resultados obtidos nos trabalhos relacionados nesta revisão bibliográfica, partiu-se para a elaboração de um modelo físico para análise do mecanismo de formação da brecha em maciços construídos em solo homogêneo compactados conforme a prática brasileira.

Nos capítulos seguintes abordam-se a metodologia proposta e sua aplicação, bem como os resultados encontrados.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Conforme descrito nos itens anteriores, as diversas metodologias de análise de ruptura de barragens apóiam-se na determinação do hidrograma gerado a partir do desenvolvimento de uma brecha no maciço da barragem, cujo desenvolvimento é simulado a partir de premissas geométricas e das equações de transporte de sedimentos.

A metodologia aqui proposta busca eliminar algumas destas premissas geométricas e utilizar a função erodibilidade para simular o desenvolvimento da brecha, cujo resultado em termos de evolução temporal resulta em um hidrograma de ruptura.

Neste sentido, foram investigados os mecanismos de ruptura envolvidos no processo erosivo decorrentes de um galgamento e a determinação da função erodibilidade de um solo típico do da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, em graus de compactação (GC) variando entre 95% e 100%. Nos itens seguintes, apresentam-se a caracterização geotécnica do solo utilizado nos ensaios e os aparatos de testes de erodibilidade desenvolvidos.

4.1 Caracterização geotécnica do material utilizado

Para construção dos maciços de terra homogênea foram coletados cerca de 4 m³ de solo argiloso no Vale do Sereno, Nova Lima, MG, em obra de engenharia em fase de terraplenagem (coordenadas UTM 610255 E e 7789960 N). Este material foi escolhido considerando as características argilosas por meio de análise táctil visual. A Figura 4.1 apresenta o material conforme disposto *in situ*.



Figura 4.1: Local de coleta da amostra de solo utilizada nos ensaios.

O material foi coletado por meio de pá carregadeira e transportado via caminhão até a Escola de Engenharia da UFMG, onde foi disposto sobre lona plástica no interior do Laboratório Didático do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Posteriormente, parte deste material foi transportado para o CPH e armazenado em caixas plásticas.

Para a avaliação geotécnica do comportamento do solo foram realizados ensaios de caracterização (massa específica dos grãos, granulometria completa e limites de Atterberg), compactação, cisalhamento direto, permeabilidade e triaxial CU (consolidado não drenado). Os ensaios geotécnicos seguiram as recomendações das normas a seguir:

- NBR 6459 – Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984a);
- NBR 6508 – Grãos que passam na peneira 4,8mm: determinação da massa específica (ABNT, 1984b);
- NBR 7180 – Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984c);
- NBR 7181 – Análise Granulométrica (ABNT, 1984d);
- NBR 7182 – Ensaio de Compactação (ABNT, 1986);
- NBR 14848 – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável (ABNT, 2000);
- ASTM 4767 – Standard Test Method for Consolidated – Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soil (ASTM, 2004).

A seguir, apresenta-se a caracterização geotécnica do solo utilizado nos ensaios de erosão. Ressalta-se que nem todas essas propriedades foram utilizadas neste trabalho, mas optou-se por apresentá-las com vistas à possível utilização por terceiros. As planilhas de dados obtidos nos ensaios geotécnicos realizados no laboratório de solos da UFMG encontram-se no Anexo I, enquanto os resultados dos ensaios triaxiais desenvolvidos no laboratório de solos da CEMIG encontram-se no Anexo II.

4.1.1 Ensaios de caracterização

A etapa de caracterização compreendeu os ensaios de massa específica dos grãos, limites de Atterberg e granulometria completa. No ensaio de massa específica dos grãos o valor da massa específica foi determinado 5 vezes para 4 das 6 amostras selecionadas. O valor final foi

determinado pela média dos valores medidos, eliminando-se os pontos discrepantes em mais de $0,02 \text{ g/cm}^3$ no cálculo da média, resultando em massa específica de $3,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Em relação aos limites de Atterberg, cada uma das seis amostras teve limites de plasticidade (LP) e liquidez (LL) determinados 5 vezes. O valor final foi determinado a partir da média dos valores medidos, eliminando-se os resultados que diferissem mais que 5% em relação à média. Os valores de LL médios encontrados foram iguais a $45,8\% \pm 0,3\%$ e de LP médios foram iguais a $36,3\% \pm 0,3\%$.

As análises granulométricas foram realizadas em 3 das 6 amostras selecionadas. Os resultados indicaram tratar-se de um material classificado como argila areno-siltosa segundo a ABNT. As curvas granulométricas obtidas para as 3 amostras são apresentadas no Anexo I. A fração argilosa é superior a 40% em todos os casos (Figura 4.2).

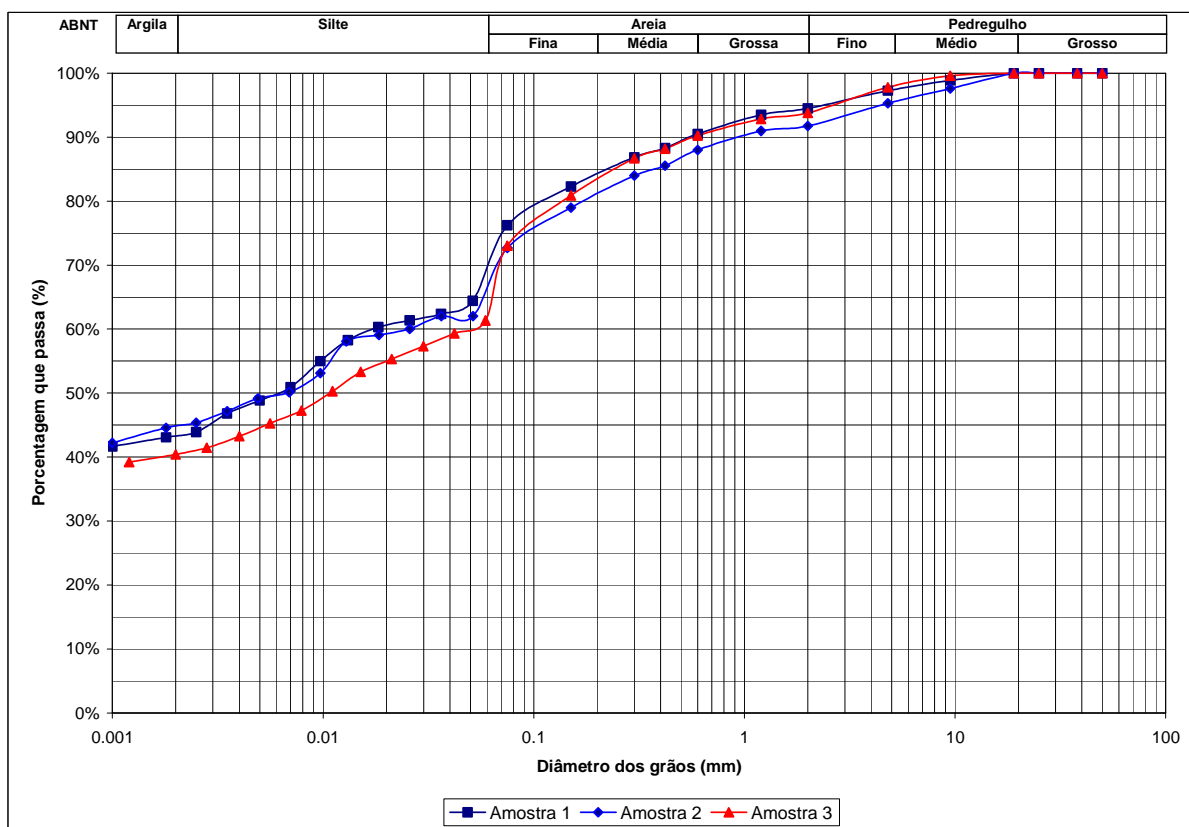


Figura 4.2: Curvas Granulométricas das 3 amostras analisadas.

A partir dos valores de LL e LP foi determinado o valor do índice de plasticidade (IP), que se apresentou igual a $9,5\% \pm 0,5\%$. A partir desse valor e da fração argilosa (menor que 0,002 mm) presente, foi calculado o índice de atividade das argilas (IA), obtendo-se um valor médio igual a $0,200 \pm 0,004$, indicando característica de argilas inativas.

4.1.2 Ensaios de compactação

Foram realizados ensaios de compactação para definir a massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótima para compactação do maciço, conforme recomendações da NBR 7182 (ABNT, 1986), utilizando a energia do ensaio Proctor Normal (Tabela 4.1). A Figura 4.3 apresenta as curvas de compactação obtidas

Tabela 4.1 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca obtidos

| Amostra | Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) | Umidade ótima (%) |
|------------------------------|--|-------------------|
| 1 | 1,73 | 23,2 |
| 2 | 1,73 | 23,4 |
| 3 | 1,72 | 23,5 |
| 4 | 1,76 | 23,0 |
| 5 | 1,72 | 24,5 |
| 6 | 1,74 | 23,7 |
| Amplitude amostral | 0,04 | 1,5 |
| Média Aritmética | 1,73 | 23,6 |
| Desvio Padrão | 0,02 | 0,5 |
| Coefficiente de variação (%) | 0,87 | 2,2 |

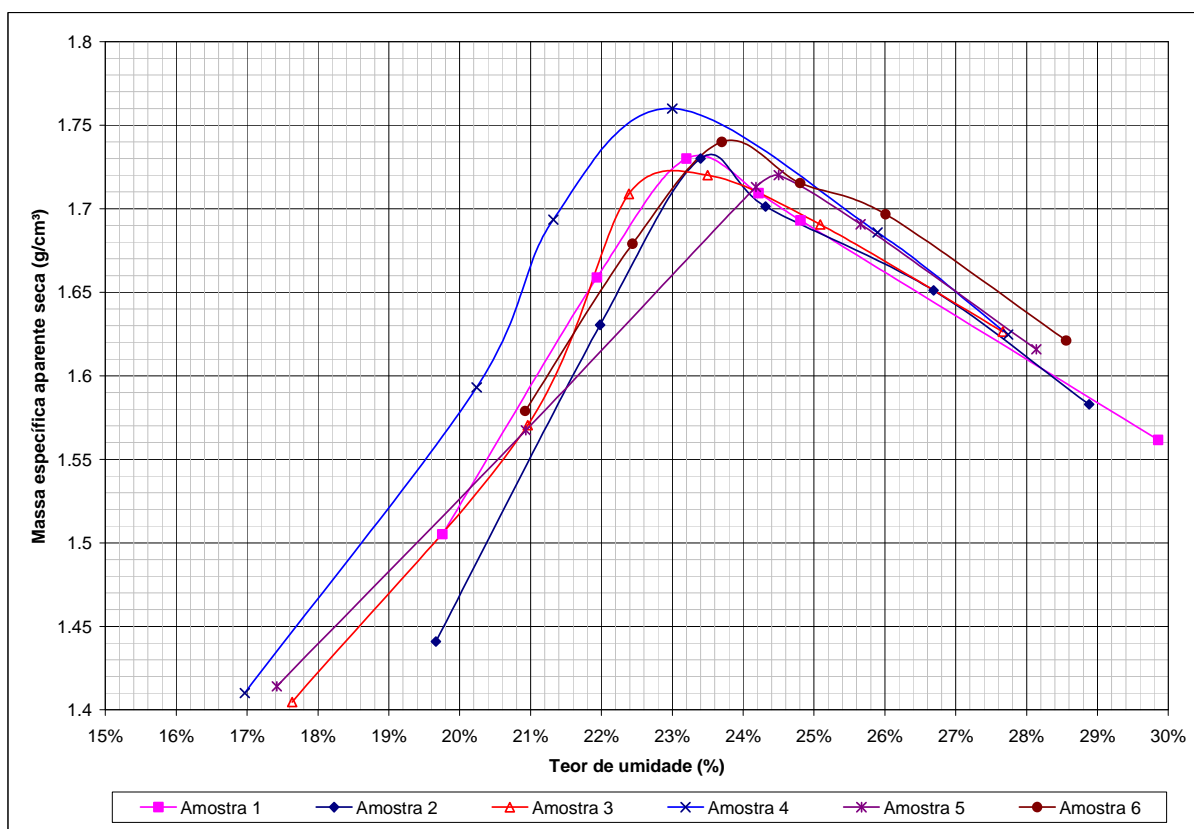


Figura 4.3: Curvas de compactação obtidas.

Na Tabela 4.1 observa-se que a amplitude amostral foi de 0,04 g/cm³ e 1,5%, enquanto a dispersão da amostra apresentou-se igual a 0,87% e 2,2% para a massa específica aparente

seca máxima e umidade ótima, respectivamente. A partir desses resultados pode-se dizer que a massa específica aparente seca máxima da amostra de solo corresponde a $1,73 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de $23,6 \pm 0,5 \%$. A baixa dispersão amostral observada é indicativa de amostra homogênea.

4.1.3 Ensaios de adensamento

Foram realizados ensaios de adensamento em nove corpos de prova compactados nas condições de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima ($GC = 100\%$). Os ensaios foram realizados para carregamentos de 13 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1600 kPa, determinando-se os índices de vazios inicial e final.

A partir dos valores de índice de vazios final e carregamento, foi traçada a curva de adensamento (Figura 4.4), obtendo-se a tensão de pré-adensamento pelo método Pacheco Silva (PINTO, 2002), cujo valor se apresentou igual a 185 kPa.

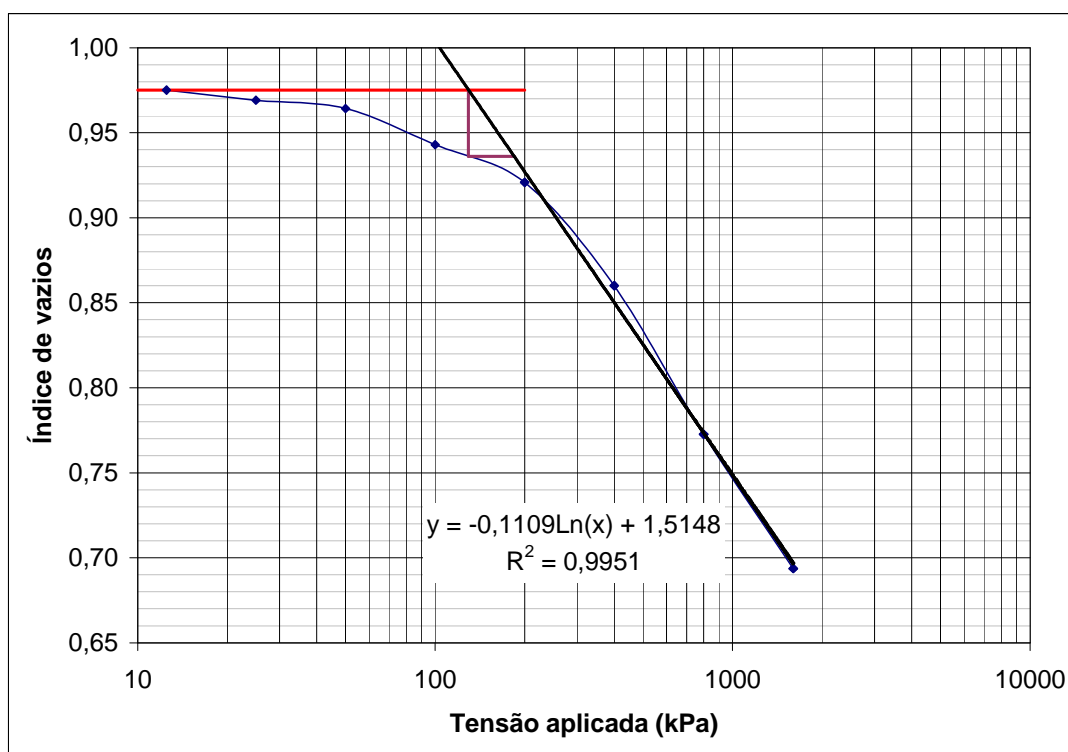


Figura 4.4: Curva de adensamento do solo utilizado ($GC = 100\%$).

O solo em questão se apresentará acima das tensões de pré-adensamento em pontos no interior de um maciço homogêneo a profundidades a partir de 8,6 m e 10,9 m na saturação e na umidade ótima, respectivamente ($G=3,278$; $w_{ot}=23,6\%$; $\rho_{dm\acute{a}x}=1,73 \text{ g/cm}^3$). Estes valores

são pequenos quando comparados às alturas máximas dos maciços mais frequentes no Brasil, sendo por isto realizados ensaios triaxiais na condição CU.

4.1.4 Ensaios de cisalhamento direto

Foram moldados três corpos de prova na massa específica aparente seca máxima e umidade ótima, submetidos ao ensaio de cisalhamento direto no Laboratório de Geotecnia da UFMG, às tensões confinantes de 200 kPa, 300 kPa e 400 kPa, acima da tensão de pré-adensamento. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6 a seguir.

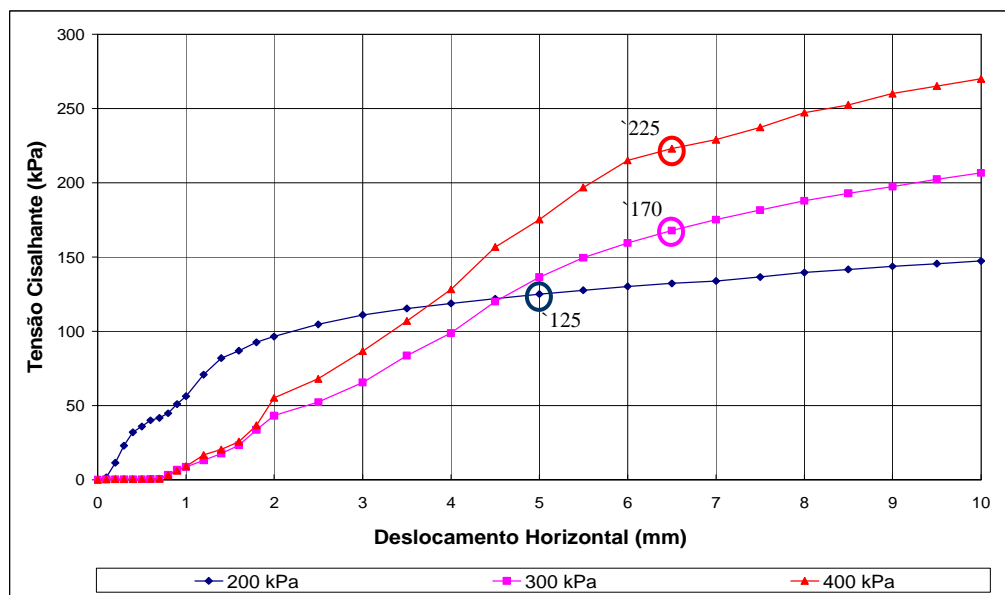


Figura 4.5: Trajetória de tensões no cisalhamento direto.

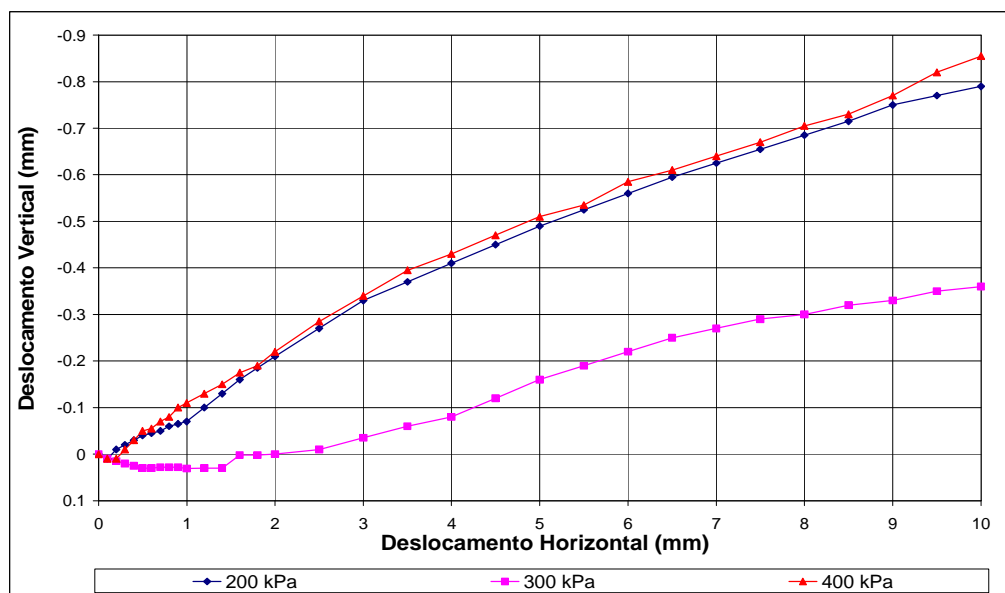


Figura 4.6: Evolução dos deslocamentos no ensaio de cisalhamento direto.

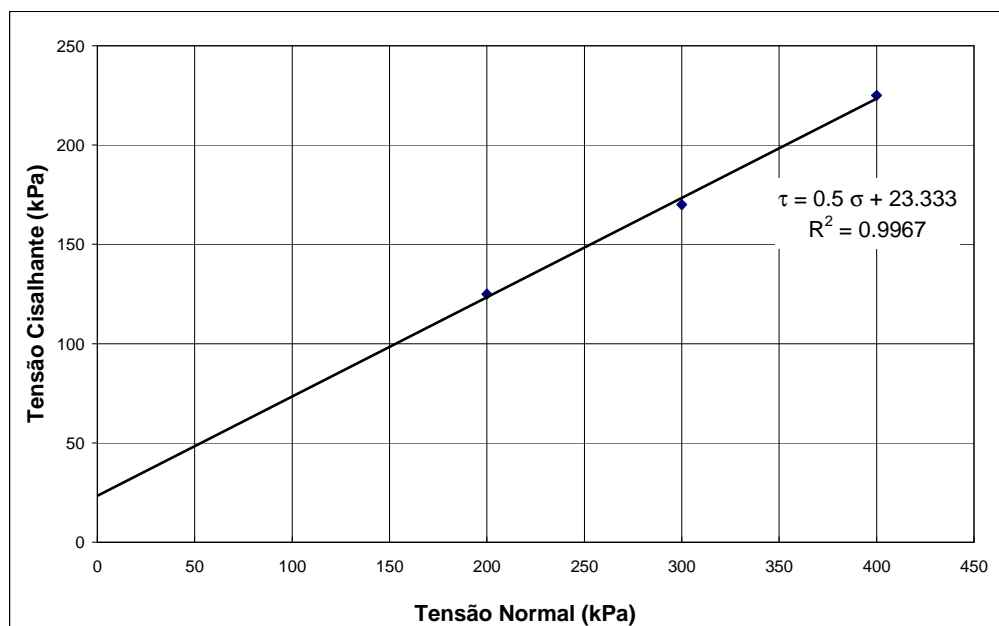


Figura 4.7: Envoltória de tensões efetivas.

Os resultados indicaram tensões de cisalhamento efetivas correspondentes a 125 kPa, 170 kPa e 225 kPa. A esses resultados, ajustou-se a envoltória de tensões efetivas apresentada na Figura 4.7. A partir desta envoltória, foram obtidos os valores de coesão e ângulo de atrito do solo, iguais a 23 kPa e 26,6°, respectivamente.

4.1.5 Ensaios de compressão triaxial

Foram moldados três corpos de prova nas condições de massa específica aparente seca máxima umidade ótima, compactados com energia Proctor Normal, com 50,8 mm de diâmetro e 110 mm de altura. Estes corpos de prova foram submetidos aos ensaios de cisalhamento triaxial consolidado e não drenado (CU), no Laboratório de Geotecnia da CEMIG, a tensões confinantes totais e efetivas de 100 kPa, 400 kPa e 800 kPa (CEMIG, 2007). Os resultados dos ensaios são apresentados no Anexo II. A utilização de tensões confinantes de 100 kPa se deveu ao fato de os resultados do ensaio de adensamento só terem sido disponibilizados após o início dos ensaios triaxiais.

A utilização do ensaio CU buscou refletir as condições nas quais um maciço de barragem em solo homogêneo será submetido quando da ruptura por galgamento. A Figura 4.8 apresenta o diagrama tensão x deformação obtido nos ensaios.

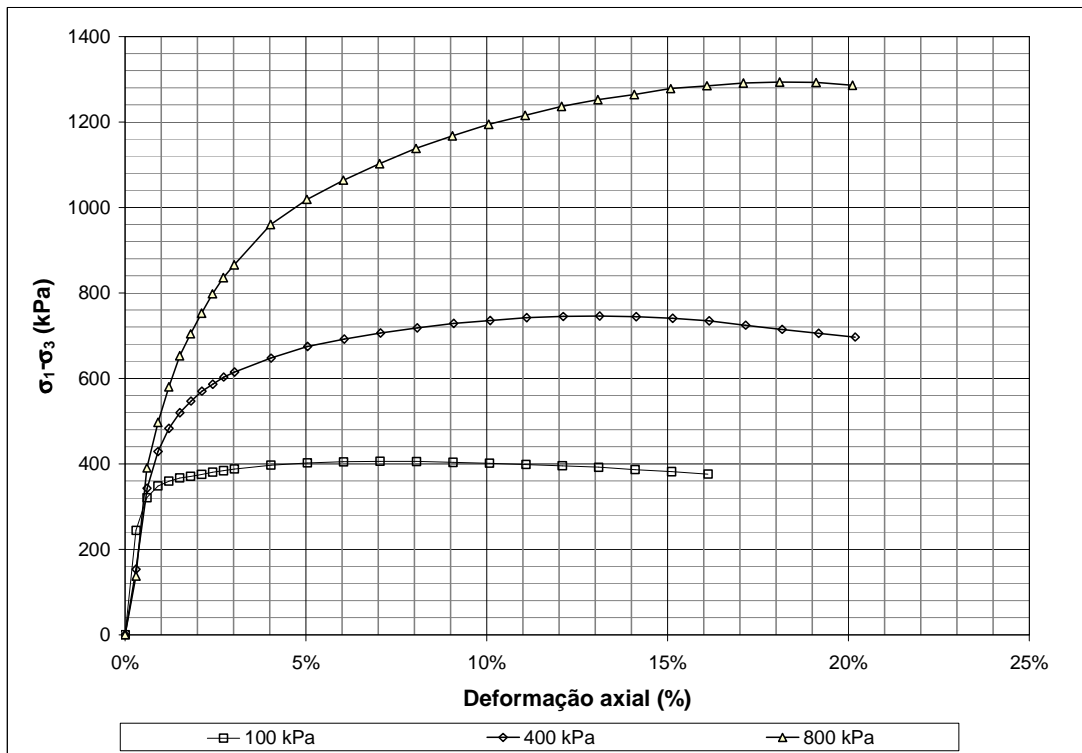


Figura 4.8: Diagrama tensão versus deformação axial (triaxial CU).

Aos resultados ajustou-se a envoltória de resistência apresentada na Figura 4.9, permitindo obter os valores da coesão efetiva (c') e do ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ'), iguais a 83 kPa e $24,1^\circ$, respectivamente.

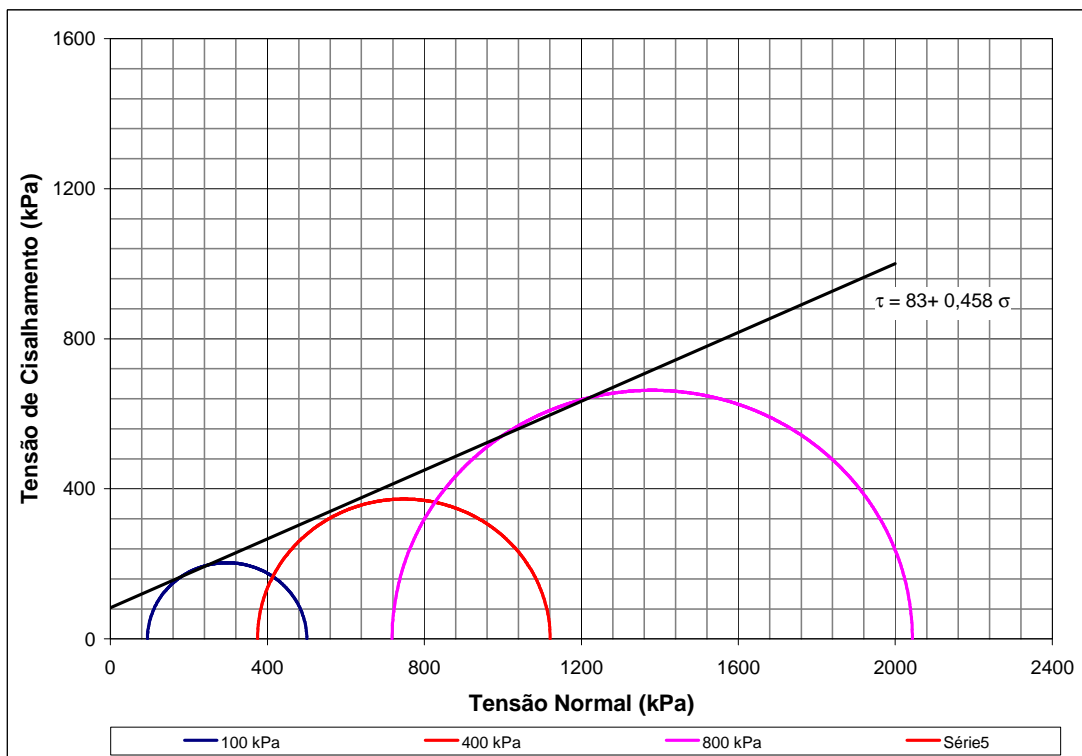


Figura 4.9: Envoltória de resistência (triaxial CU).

4.1.6 Ensaios de permeabilidade a carga variável

Foram realizados ensaios de permeabilidade a carga variável, nas condições definidas pela compactação, ou seja, na massa específica aparente seca máxima e teor de umidade ótimo. O valor encontrado para o coeficiente de permeabilidade foi 10^{-5} cm/s. Pode-se dizer que esse valor é típico de um material com condições de permeabilidade média a baixa.

4.2 Observação do mecanismo de ruptura

A partir dos resultados coletados nos experimentos anteriormente descritos na revisão bibliográfica (POWELEDGE *et al.*, 1989a e 1989b; HR WALLINGFORD, 2005), o processo erosivo de desenvolvimento da brecha a partir do galgamento de uma barragem com maciço homogêneo e constituído por solo coesivo envolve as seguintes etapas:

- nos primeiros instantes após o galgamento, a velocidade de escoamento segue aumentando proporcionalmente às vazões afluentes. A erosão tem início apenas quando as condições de escoamento (tensão cisalhante) excedem a capacidade de resistência (tensão cisalhante crítica) do material do maciço ou da camada de proteção superficial (grama, enrocamento *etc*);
- excedida a resistência do maciço, a erosão do talude de jusante se dá conforme a erodibilidade do solo compactado quando submetido às velocidades de escoamento decorrentes. No trecho de talude mais próximo da crista ocorre a formação de uma zona de subpressão, em função do descolamento formado entre a linha de água (que lembra o perfil Creager) e o talude. O escoamento é turbulento, mas as cavidades desenvolvidas na superfície do talude são ainda pequenas para provocar outros efeitos erosivos;
- à medida que o processo evolui, a vazão aumenta e a erosão no talude começa a ocorrer em pontos mais frágeis, tais como fissuras ou trincas decorrentes da ação das intempéries (umedecimento e secagem sucessivas) e do processo de compactação, ampliando as cavidades, aumentando a rugosidade da superfície e, conseqüentemente, a turbulência. Quanto maior a turbulência, maiores as oscilações de pressão, o que acelera o processo de destacamento de aglomerados de grãos, conforme visto na equação 3.21
- em geral, o ponto de contato entre o talude e o nível de água de jusante, no qual ocorre mudança brusca de velocidade de escoamento, está sujeito a erodir mais rapidamente em

função da mudança abrupta de direção de escoamento, provocando uma variação significativa de momento neste ponto;

- a evolução das cavidades induz a formação de degraus, conforme a camada de compactação, ou múltiplos dela, em função da dissipação de energia e momento criadas;
- a erosão evolui regressivamente até que as condições de estabilidade do maciço não são mais atendidas. Supondo que o sistema de drenagem interna esteja funcionando a contento previamente ao galgamento, as sucessivas rupturas se darão em condições de talude seco, visto que a saturação pelo escoamento decorrente do galgamento é um processo muito mais lento que a percolação no talude de jusante;
- tendo em vista as condições de material seco no talude de jusante, pressões de sucção desenvolvem-se nos poros do solo compactado, provocando a sustentação de taludes altos em ângulos bastante elevados, de maneira similar ao observado em voçorocas, o que condiz com observações de experimentos e rupturas que apontam para declividades de taludes laterais das brechas praticamente verticais (POWELEDGE, 1989 a e b);
- a erosão se desenvolve até que a fundação seja atingida, sendo que daí por diante a brecha apenas se alarga até atingir a condição de equilíbrio, cessando a erosão;
- o hidrograma efluente é gerado a partir da solução das equações de Saint-Venant, mas admitindo condições de escoamento críticas na entrada da brecha, e avaliando os efeitos de afogamento provocado pela passagem das vazões efluentes no vale de jusante. O hidrograma cessa assim que a elevação do nível de água a montante for menor ou igual à elevação do fundo da brecha.

Estas etapas foram também observadas nos ensaios piloto desenvolvidos no âmbito deste trabalho, conforme se verá mais adiante.

No entanto, os modelos de brecha incorporam algumas dessas características, mas não todas. Porém, a grande fragilidade dos metodologias de análise de ruptura tradicionais reside na utilização de equações de transporte de sedimentos, desenvolvidas para canais relativamente suaves, quando comparadas às declividades dos taludes, e materiais não coesivos.

Neste trabalho, propõe-se que seja utilizada a função erodibilidade em lugar das equações de transporte, determinada para cada maciço de solo coesivo a ser estudado. Assim, a análise de

ruptura de um maciço de barragem constituído por solo coesivo por galgamento deve ser realizada segundo a metodologia a seguir:

- determinação das características do maciço: materiais constituintes, parâmetros geotécnicos (granulometria, grau de compactação, parâmetros de resistência);
- determinação das condições de ruptura, ou seja, velocidades e profundidades de escoamento na ruptura. Neste sentido, análises tradicionais podem ser feitas, mesmo utilizando equações de transporte para materiais não coesivos;
- a partir das faixas de variação de velocidades e profundidades esperadas, determinação das condições para o ensaio de erodibilidade do material do maciço compactado no mesmo grau de compactação;
- determinação da erodibilidade do material a partir dos resultados de ensaios de erodibilidade, para diferentes tempos de exposição, para correlacionar à velocidade média de escoamento por meio das relações entre essa grandeza e a velocidade cisalhante (ver equação 3.21);
- a erosão do maciço deve ser calculada utilizando a erodibilidade obtida nos ensaios em lugar das equações de transporte, definindo a geometria da brecha em cada instante e, conseqüentemente, o hidrograma efluente.

4.3 Aparato de teste de erodibilidade

Para a determinação da erodibilidade de um solo compactado, foi desenvolvido no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) um conjunto de aparatos de teste. Esses aparatos operam em sistemas de condutos livres e forçado conforme descrito a seguir.

4.3.1 Aparato de teste em conduto livre

Utilizaram-se dois canais hidráulicos com seção transversal retangular para os testes em condutos livres. O primeiro é construído em aço, concreto e vidro e foi utilizado para os testes iniciais. Devido à necessidade de adaptações e de instalação de um conjunto de acessórios no aparato, optou-se por utilizar um segundo canal que é construído em acrílico e alumínio.

O primeiro canal é constituído por uma calha hidráulica com 12 m de comprimento e com seção transversal de 0,30 m de largura por 0,50 m de altura. Esse canal é construído em

alvenaria e vigas de aço e concreto e tem as suas paredes de vidro. A declividade do canal é de 1%. O canal é alimentado por um conjunto moto-bomba de 15 cv e possui um conjunto de comportas eletricamente controladas que permite controlar a vazão e o nível. As Figuras 4.10 e 4.11 a seguir apresentam um esquema desse canal.

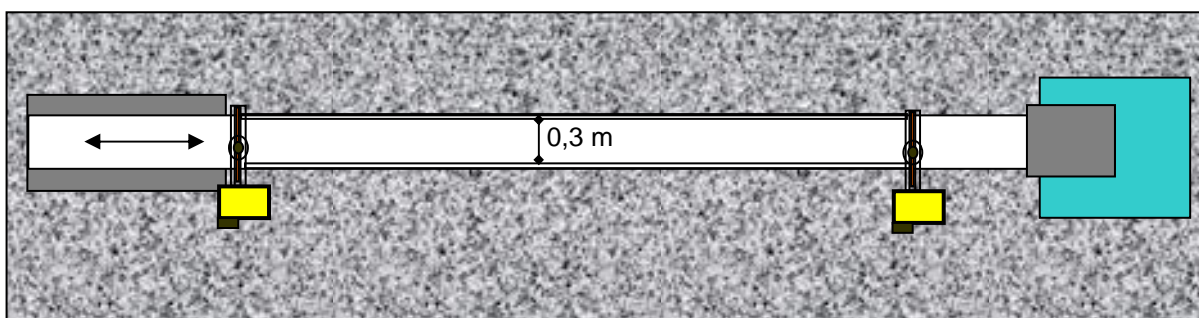
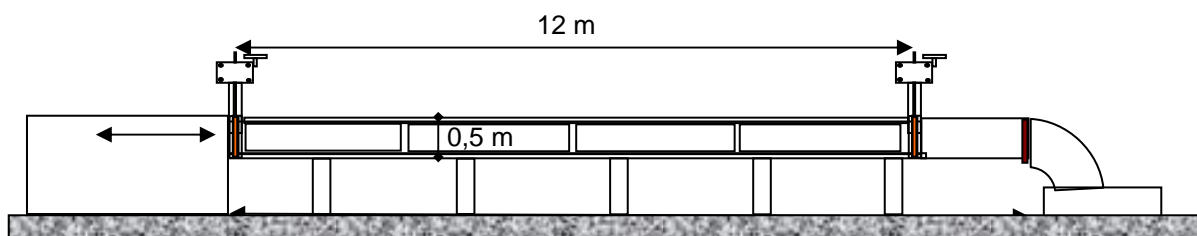


Figura 4.10: Esquema do primeiro canal utilizado.



Figura 4.11: Foto do primeiro canal utilizado.

Esse canal já se encontrava no laboratório de hidráulica e foi adaptado para as primeiras experiências que se destinaram a visualização do processo erosivo quando do galgamento das estruturas. O controle de vazão no canal foi feito por meio do acionamento da comporta de montante e da válvula de entrada no canal.

Foi testado nesse canal um sistema de identificação de erosão por meio de fitas e de fios metálicos dispostos transversalmente ao maciço em cada camada de compactação, que não funcionou adequadamente, pois os fios e fitas rompiam-se durante a compactação. Estas dificuldades motivaram modificações na metodologia de ensaio que permitissem a quantificação do processo erosivo no material.

Partiu-se então para um segundo arranjo de teste, em canal acrílico apoiado sobre treliça de alumínio, prismático, horizontal, com seção retangular com base de 0,30 m por 0,45 m de altura, e 10 m de extensão. O trecho final do canal tem cerca de 2 m de extensão com declividade 1V:3H. Este canal foi alimentado por uma bomba com capacidade de adução de 1 m³/min.

As Figuras 4.12 e 4.13 a seguir mostram uma vista do canal de acrílico utilizado.



Figura 4.12: Vista lateral do segundo canal utilizado.



Figura 4.13: Vista do trecho inicial do segundo canal utilizado.

4.3.1.1 Adaptações introduzidas nos aparatos para teste

Com o intuito de se iniciar os testes de erosão no solo foram instalados dois degraus, um com 1 m e outro com 0,60 m de extensão e 5 cm de altura cada, para formar uma cavidade com dimensões de 0,40 m por 0,05 m de profundidade e 0,30 m de largura na qual foi compactado solo com o auxílio de um soquete Proctor Normal. A Figura 4.14 a seguir mostra essa adaptação no fundo do canal de acrílico.

Entretanto este arranjo foi logo abandonado visto que as velocidades de escoamento não ultrapassavam os 0,6 m/s no solo, o que praticamente não causava erosão.



Figura 4.14: Instalação de degraus no fundo do segundo canal.

Então, implementou-se uma comporta imediatamente a montante do solo compactado, operada em aberturas variando entre 2,9 cm e total (9 cm), permitindo obter velocidades de escoamento de até cerca de 2 m/s no solo. Aberturas inferiores a 2,9 cm provocavam o galgamento do canal. Um esquema dessa comporta pode ser visto na Figura 4.15.

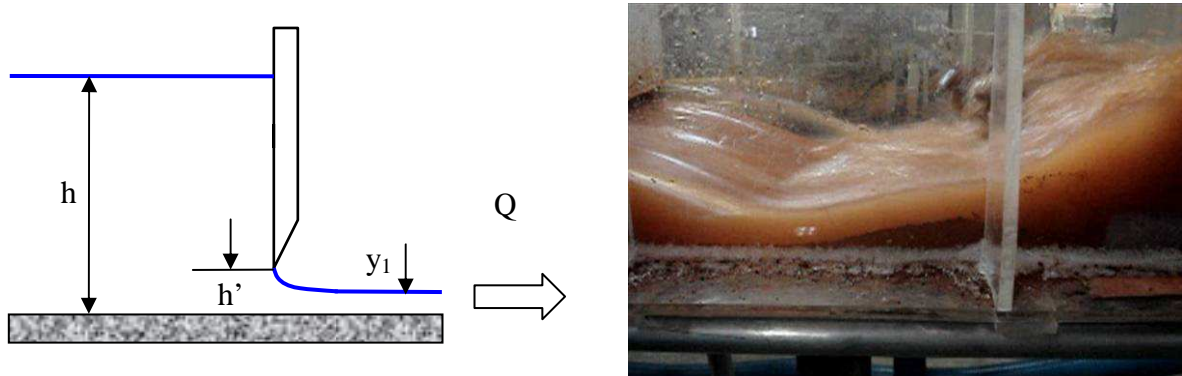


Figura 4.15: Comporta instalada no segundo canal.

Para cada lâmina de água no canal a montante da comporta (h) há correspondente vazão (Q) e velocidade do fluxo na saída (Figura 4.16).

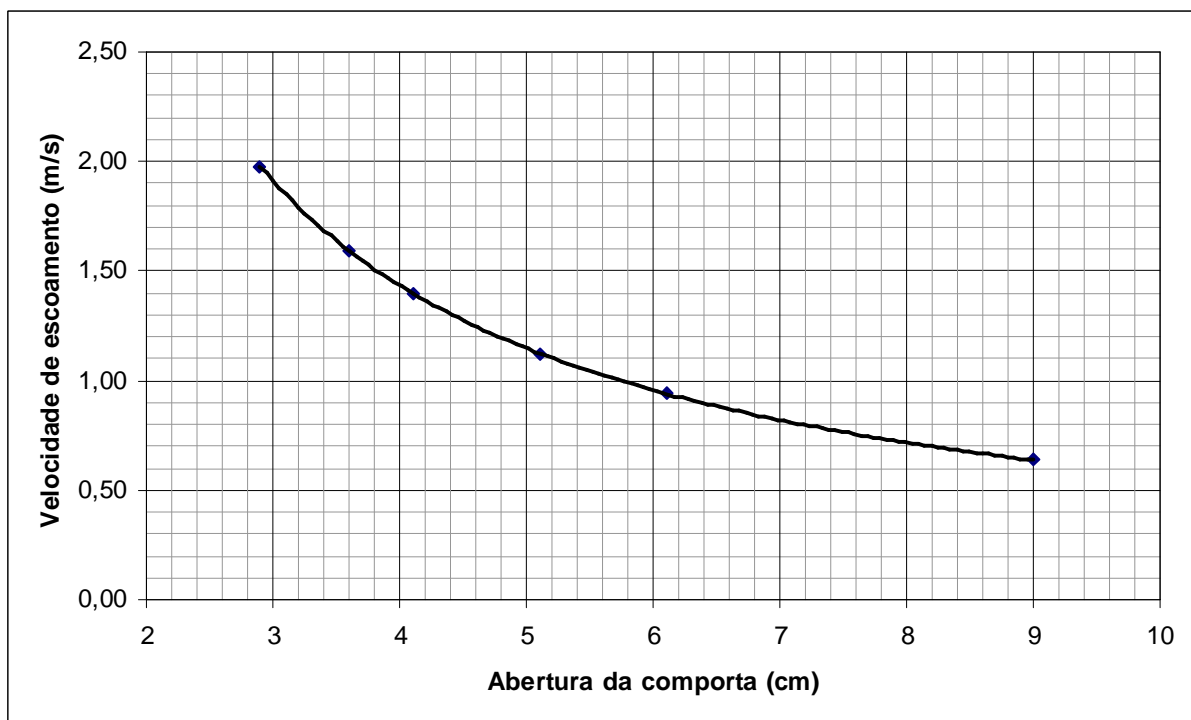


Figura 4.16: Vazão alcançada no aparato em função da altura da lâmina d água.

A velocidade de 2 m/s também se mostrou insuficiente para iniciar o processo erosivo. Dessa forma, incluiu-se uma nova modificação que consistiu na colocação de um conduto forçado ($d = 101,6$ mm) no interior do canal, para liberar o escoamento em forma de jato projetado

paralelamente ao fundo do canal por meio de um defletor. Este arranjo permitia obter velocidades de até 5 m/s. A Figura 4.17 mostra uma foto dessa modificação.

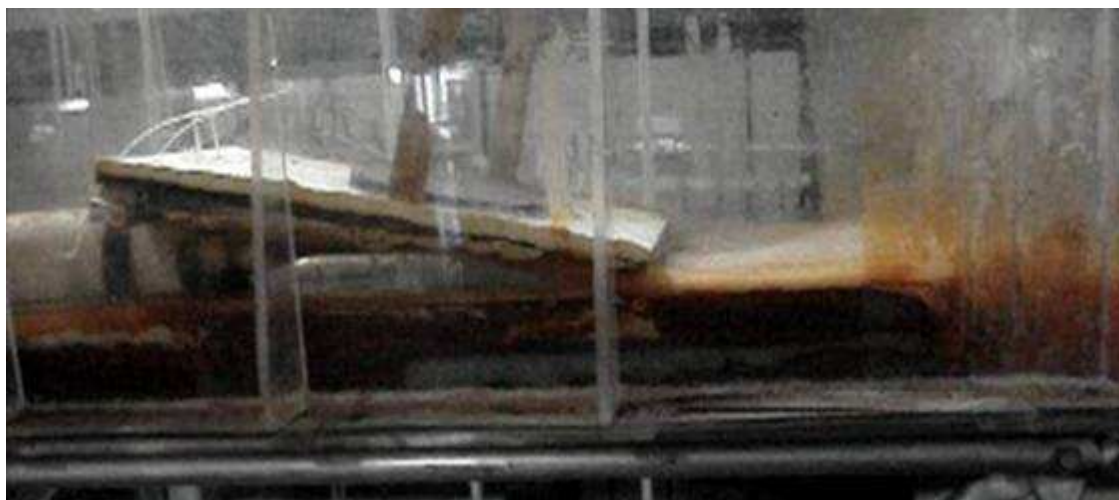


Figura 4.17: Aparato de jato paralelo no interior do segundo canal.

No entanto, dificuldades de vedação entre o defletor e as paredes, bem como o eventual afogamento do escoamento conforme o ângulo do defletor, levaram ao abandono do aparato.

Outra dificuldade observada quando da utilização do canal em acrílico foi que a camada de solo compactado trincava à medida que enrijecia (Figura 4.18), pois o acrílico é um material elástico, devolvendo parte da energia de compactação na forma de esforço vertical ascendente. Desta forma, os resultados eram afetados pela deformação do canal na compactação, pois estas trincas eram via de regra pontos de início da erosão. Devido a isso optou-se por construir um novo aparato em conduto forçado.



Figura 4.18: Trincas formadas na compactação do solo sobre o fundo do canal acrílico.

4.3.2 Aparato de teste em conduto forçado

O aparato de teste em conduto forçado consiste de um conjunto moto-bomba, com capacidade de recalque de até 1 m³/min, conectado por meio de um mangote com 76,2 mm de diâmetro a uma caixa em acrílico revestida por resina de fibra de vidro e areia de forma a suportar as pressões impostas.

A saída do mangote é conectada a um tubo de 101,6 mm de diâmetro, que foi moldado de forma a efetuar a transição entre a seção tubular e uma seção quadrada com 16 cm de base por 2 cm de altura. Esta saída foi conectada a uma seção retangular em acrílico com as mesmas dimensões, dividida em três câmaras para provocar o alinhamento do fluxo ao longo de 50 cm de extensão. A Figura 4.19 mostra um detalhe dessa conexão e da ligação entre o mangote e a seção de teste.

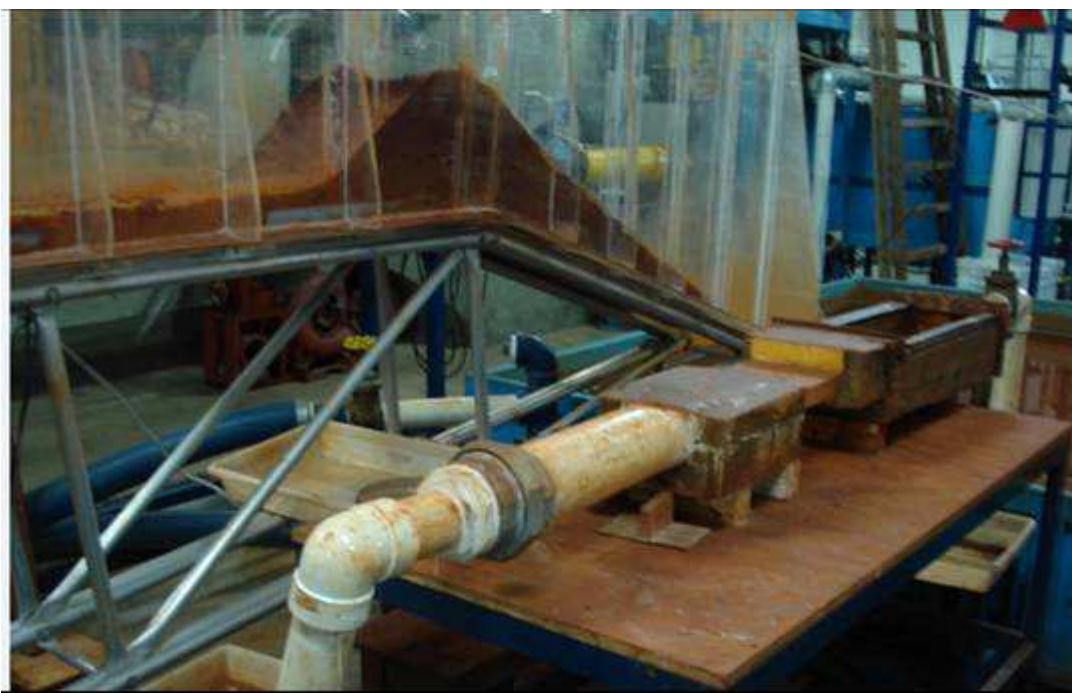


Figura 4.19: Detalhe dessa conexão e da ligação entre o mangote e a seção de teste.

Na saída deste trecho foi acoplada uma caixa, com rebaixo de 5 cm em relação à saída, 0,16 m de largura e 0,50 m de extensão, de forma a permitir a compactação de uma camada de no mínimo 5 cm de solo que seria exposta à velocidade de escoamento. Sobre esta caixa acoplou-se uma tampa em acrílico que permitiu a operação em conduto forçado e a visualização da erosão.

Para evitar que o efeito elástico do material do aparato provocasse a formação de trincas nos corpos de prova optou-se por fazer o corpo principal do aparato com concreto. Os testes iniciais no entanto mostraram que após alguns ensaios o concreto apresentava fissuras. Dessa forma optou-se por utilizar um concreto especial constituído por agregado fino (areia) misturado com resina na proporção (em volume) de uma parte de resina para cada três partes de areia.

O resultado obtido com esse material foi bastante satisfatório pois permitiu que se fizesse a compactação do solo sem a formação de trincas e o corpo do aparato não apresentou fissuras durante a confecção dos ensaios. Uma outra vantagem do uso desse material é a facilidade de reparo das junções com as tubulações de alimentação e do mecanismo de fechamento. Com relação a forma de fechamento, adotaram-se três tipos de mecanismos:

- o primeiro mecanismo de fechamento era formado por um conjunto de hastes rosqueadas instaladas como “parafuso prisioneiro” com porcas com abas. Esse sistema se mostrou muito difícil de operar pois exigia um elevado esforço de instalação. Devido a esse fato foi modificado logo no início dos ensaios;
- o segundo mecanismo era constituído de um conjunto de parafusos prisioneiros de aço inox que eram aparafusados a tampa de acrílico com porcas também de aço inox por meio de uma parafusadeira elétrica. Esse mecanismo após algumas operações apresentou ruptura dos parafusos e desgaste das porcas, sendo substituído pelo terceiro sistema;
- o terceiro sistema de fechamento era constituído por um conjunto de hastes de aço carbono com ranhuras que eram fixadas por meio de pinos prisioneiros nas paredes laterais do canal. Devido ao fato de não se ter movimentos de aperto de parafusos esses pinos deixaram de se romper e se mostraram como uma solução eficiente.

Este aparato permitiu ensaios com velocidades de escoamento de até 5 m/s, bem como compactação uniforme e sem trincas aparente em virtude do acesso mais fácil em relação ao canal acrílico e do apoio rígido. Em relação às pressões reinantes, foram realizadas medições piezométricas em que foram observados valores sempre abaixo de 2 mca, aceitáveis quando comparados àqueles observados em condutos livres, principalmente nas rupturas quando as lâminas de água podem ultrapassar os 2 m.

As Figuras 4.20 a 4.24 seguir mostram esse aparato.

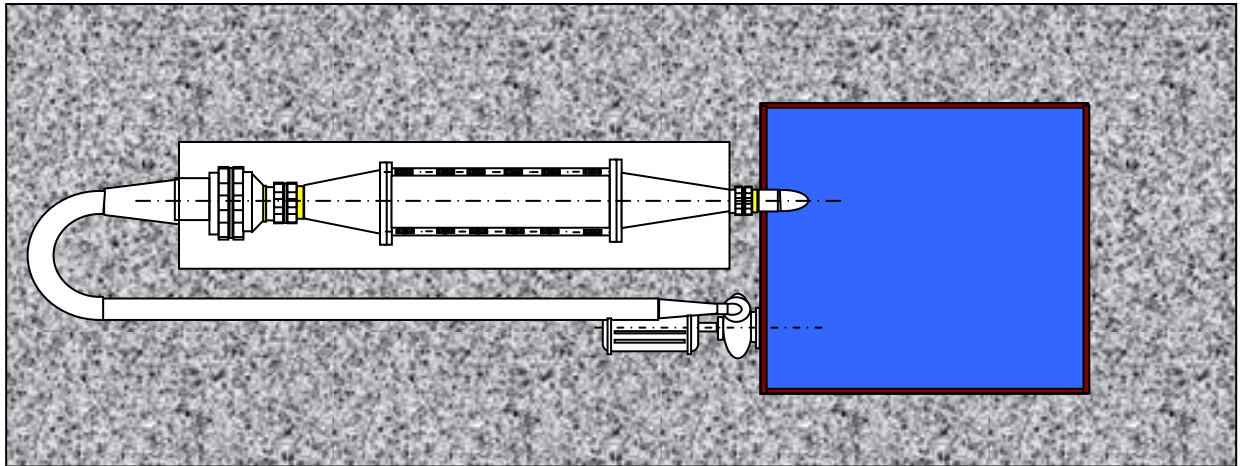
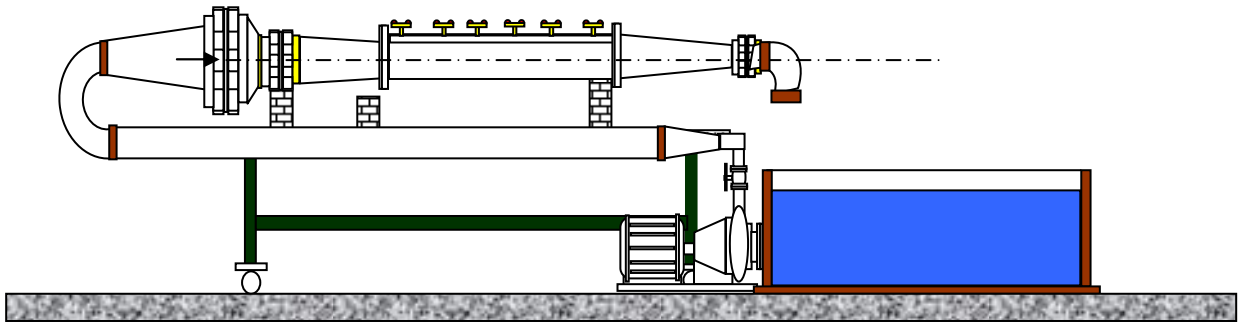


Figura 4.20: Vista lateral e em planta do aparato de conduto forçado.

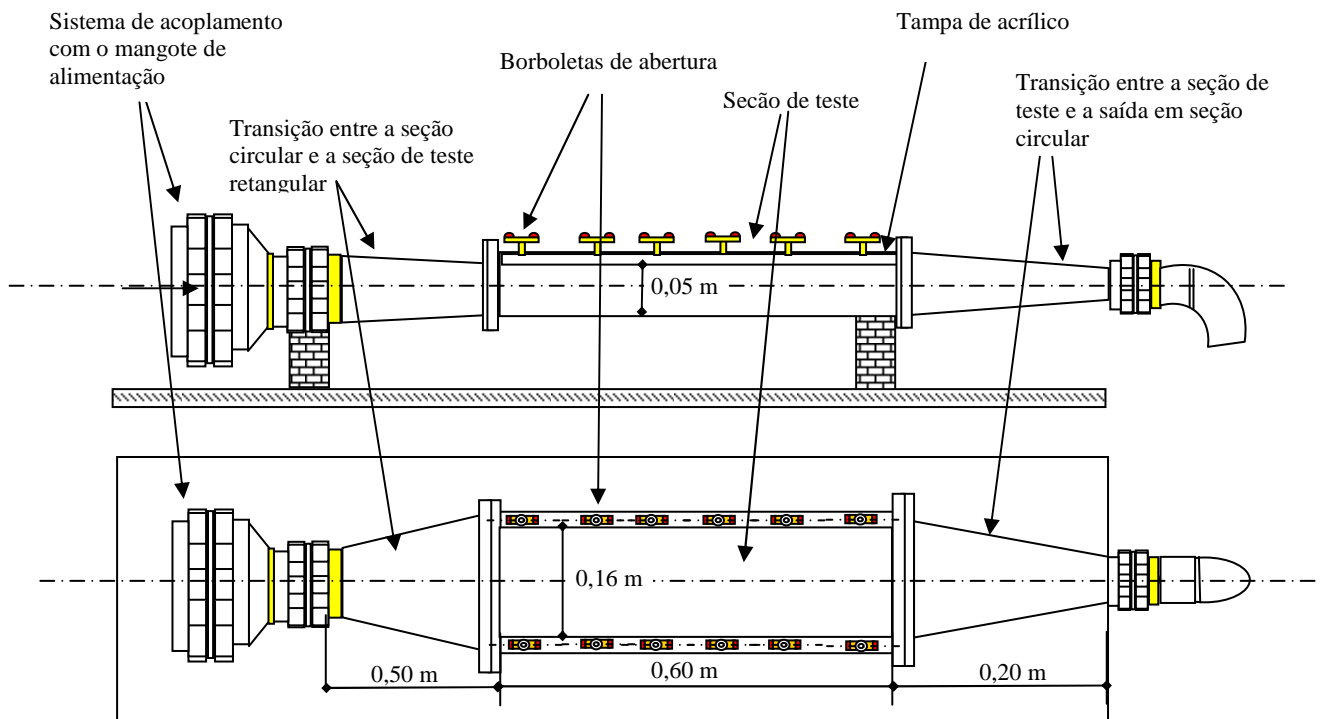


Figura 4.21: Detalhe da seção de teste do aparato de conduto forçado.



Figura 4.22: Foto do aparato de conduto forçado.



Figura 4.23: Foto da seção de teste do aparato de conduto forçado.



Figura 4.24: Foto do sistema de fechamento final da tampa do aparato de conduto forçado.

4.4 Metodologia de ensaio

Os testes foram realizados conforme os passos a seguir:

- conhecida a curva de compactação do solo (Proctor Normal), determina-se a umidade necessária à compactação do material para a obtenção do grau de compactação desejado;
- determina-se a umidade do solo na condição natural;
- corrige-se a umidade do solo, adicionando água até atingir o teor de umidade necessário à obtenção do GC pretendido no ramo seco da curva de compactação com a energia Proctor Normal;
- compacta-se o solo na caixa acrílica utilizando o mesmo soquete utilizado no ensaio Proctor Normal, em camada única;
- determina-se a vazão necessária à obtenção da velocidade média de escoamento desejada, ajustando-se a rotação da bomba por meio de um inversor de frequência;
- determina-se o volume erodido a cada medida.

A metodologia de cada um desses passos é descrita a seguir.

4.4.1.1 Determinação da umidade

A determinação da umidade natural do solo, como disposto no CPH, foi realizada pelo método da frigideira, que consiste na secagem do material em frigideira aquecida, como é comum na construção de muitas barragens no Brasil.

O solo é acondicionado em frigideira e, à medida em que aquece, libera vapor de água. Ao longo do aquecimento, o operador coloca uma lâmina de vidro sobre a frigideira, na qual o vapor se condensa provocando o embaçamento. O solo é continuamente aquecido até que o vidro não mais embaça. Nesta situação, a amostra é considerada seca.

O solo é pesado antes e depois do aquecimento, em balança com precisão de 2g. Desta forma, utilizou-se uma amostra de 500 g de solo em cada pesagem, conduzindo a um erro de cerca de 0,4% neste processo.

Para verificar a margem de erro na determinação do teor de umidade, coletou-se uma amostra do solo a ser utilizado nos experimentos, nas mesmas condições de umidade, determinando-se

o teor de umidade pelo método da frigideira e por secagem em estufa. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.2 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca obtidos

| Amostra no teor de umidade natural* | Frigideira (%) | Estufa (%) |
|---|----------------|------------|
| 1 | 2,0 | 1,8 |
| 2 | 2,0 | 1,8 |
| 3 | 2,0 | 1,8 |
| Amplitude amostral | 0,0 | 0,1 |
| Média Aritmética | 2,0 | 1,8 |
| Desvio Padrão | 0,0 | 0,0 |
| Coefficiente de variação | 0,0 | 0,02 |
| Amostra em teor de umidade próximo ao ótimo | Frigideira (%) | Estufa (%) |
| 1 | 23,9 | 22,4 |
| 2 | 23,8 | 21,9 |
| 3 | 24,0 | 22,0 |
| Amplitude amostral | 0,2 | 0,5 |
| Média Aritmética | 23,9 | 22,1 |
| Desvio Padrão | 0,0 | 0,3 |
| Coefficiente de variação | 0,0 | 1,3 |
| Amostra em teor de umidade acima do ótimo | Frigideira (%) | Estufa (%) |
| 1 | 34,6 | 32,1 |
| 2 | 34,5 | 32,2 |
| 3 | 34,5 | 32,2 |
| Amplitude amostral | 0,1 | 0,1 |
| Média Aritmética | 34,5 | 32,2 |
| Desvio Padrão | 0,2 | 0,1 |
| Coefficiente de variação | 0,0 | 0,2 |

*Como armazenado no laboratório.

Conforme se observa na Tabela 4.2, a diferença entre os métodos em valores absolutos não é significativa, quando comparada ao erro da própria determinação do teor de umidade na frigideira conforme descrito. De fato, considerando que a massa de solo na umidade natural a ser utilizada no aparato nº 3 é da ordem de 5 kg e 7 kg, o teor de umidade poderia apresentar um desvio de cerca de 0,2% em relação ao valor assumidamente utilizado na compactação.

A Figura 4.25 apresenta uma comparação entre os valores obtidos para o teor de umidade de diferentes amostras do solo utilizado pelos métodos da frigideira e da estufa, na condição natural (como armazenado no laboratório), abaixo da ótima e acima da umidade ótima.

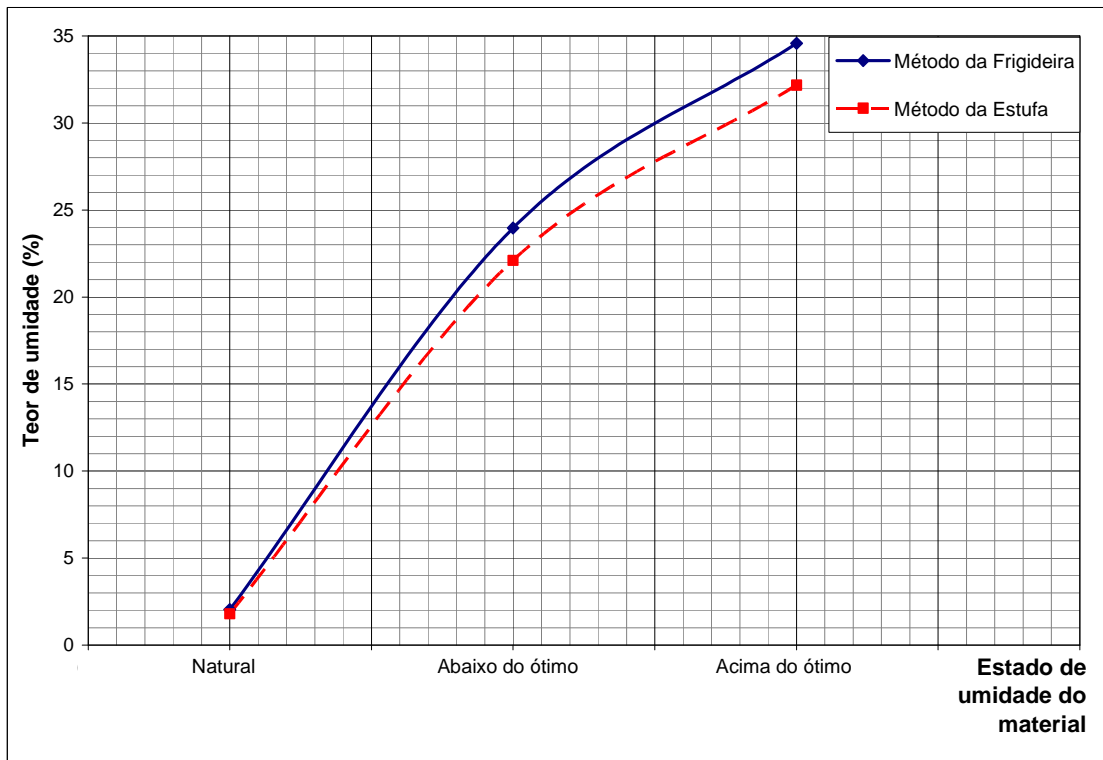


Figura 4.25: Comparação entre os valores de teor de umidade obtidos pelos métodos da estufa e da frigideira.

4.4.1.2 Correção da umidade

Após determinado o teor de umidade natural, conhecida a umidade para obtenção do grau de compactação desejado, corrigiu-se a umidade da amostra descontando a umidade natural e acrescentando a massa de água correspondente.

Após a adição de água foi feita nova determinação do teor de umidade para conferência. Enquanto o novo teste era feito, a amostra era guardada em saco plástico, fechado, para evitar a perda de umidade. Previamente à compactação, confirmado o teor de umidade, o material armazenado no saco plástico era homogeneizado por agitação.

4.4.1.3 Compactação

A compactação da camada foi feita com aplicação de golpes utilizando o soquete Proctor Normal. No ensaio Proctor Normal a energia de compactação é igual a 594 kJ/m³ (DAS, 2007). Uma vez que se trata de uma camada de apenas 5 cm de espessura, o material foi compactado em camada única. Não foram observadas trincas decorrentes desse golpeamento. De fato, após os testes verificou-se que o solo restante ainda se apresentava monolítico.

O número de golpes necessário à compactação foi calculado multiplicando-se a energia do ensaio Proctor Normal (594 kJ/m^3) pelo volume da camada ($0,60 \text{ m} \times 0,16 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} = 2,9 \text{ L}$), dividindo-se pela energia de cada golpe ($2,497 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,3048 \text{ m} = 7,47 \text{ J}$), obtendo-se 230 golpes.

Metade dos golpes era dada com o operador de um lado do aparelho e a outra metade do outro lado do aparelho, pois se observou que alguns ensaios em que o operador estava em apenas um dos lados, o lado oposto era negligenciado devido à distância.

A Figura 4.26, a seguir, mostra um procedimento de compactação do solo no aparato de conduto forçado utilizando o soquete de Proctor Normal.



Figura 4.26: Procedimento de compactação do solo no aparato de conduto forçado utilizando o soquete de Proctor Normal.

4.4.1.4 Ajuste da vazão de teste

A vazão de teste foi ajustada com o auxílio de medidor digital de vazão e de um inversor de frequência, acoplados ao circuito. Para isso procedeu-se ao ensaio prévio do sistema de forma a se obter uma tabela que correlaciona a rotação a vazão da bomba.

O acionamento das bombas nesse sistema foi feito por meio de um inversor de frequência. Este equipamento permite controlar a rotação do motor e assim regular a vazão da bomba. O inversor permite bombear em baixas vazões em relação às vazões nominais, e se constituem em um importante sistema de regulagem, pois o controle é feito interferindo-se na característica da bomba (variando a rotação), e não por dissipação de energia (válvula).

4.4.1.5 Medição do volume erodido – método direto

A medição dos volumes erodidos foi realizada pelo nivelamento da superfície com areia seca, com massa específica conhecida. A areia seca naturalmente foi disposta numa caixa de volume e massa conhecidas, que é pesada antes e após o nivelamento da superfície do solo.

Após a compactação e previamente à passagem do escoamento pelo aparato, a superfície irregular do solo é coberta por areia seca e nivelada, marcando-se os níveis nas paredes do aparato. Este volume inicial incorpora a rugosidade superficial do solo compactado.

O solo foi submetido ao escoamento em intervalos de tempo constantes, interrompendo-se apenas para a realização das medidas de volume erodido (Figura 4.27). Os intervalos foram propositalmente variados para observar se haveria influência na erodibilidade calculada.

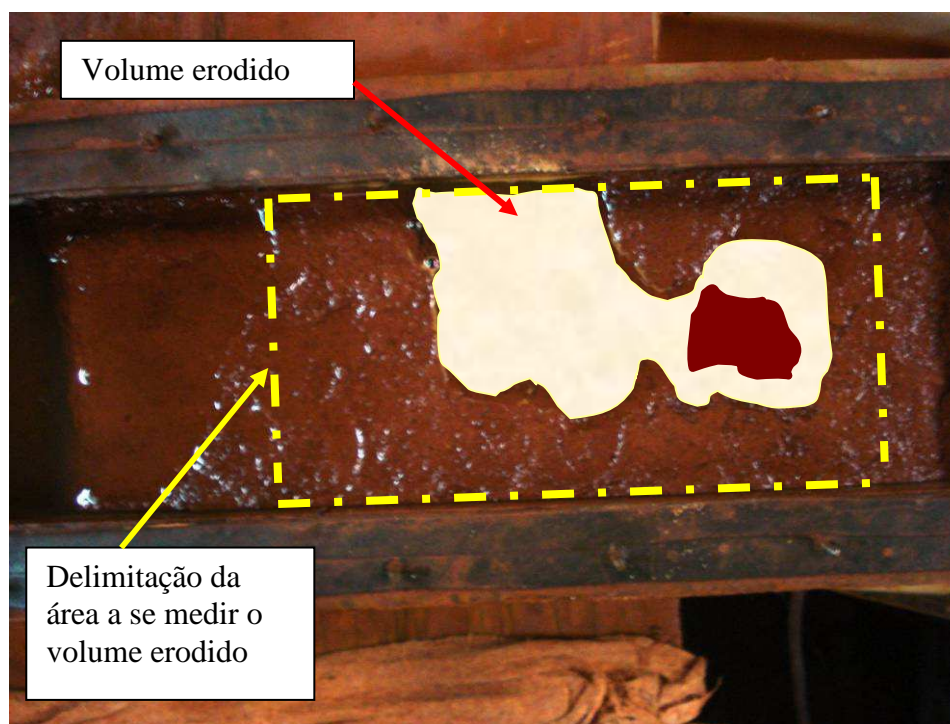


Figura 4.27: Volume de erosão a ser medido pelo método do volume de areia.

A Figura 4.28 apresenta o procedimento de colocação de areia no aparato. Devido ao fato da areia ser depositada sobre a superfície e não receber nenhuma energia de compactação, sua retirada ocorreu mediante a lavagem do material nos primeiros segundos imediatamente após a retomada dos testes.

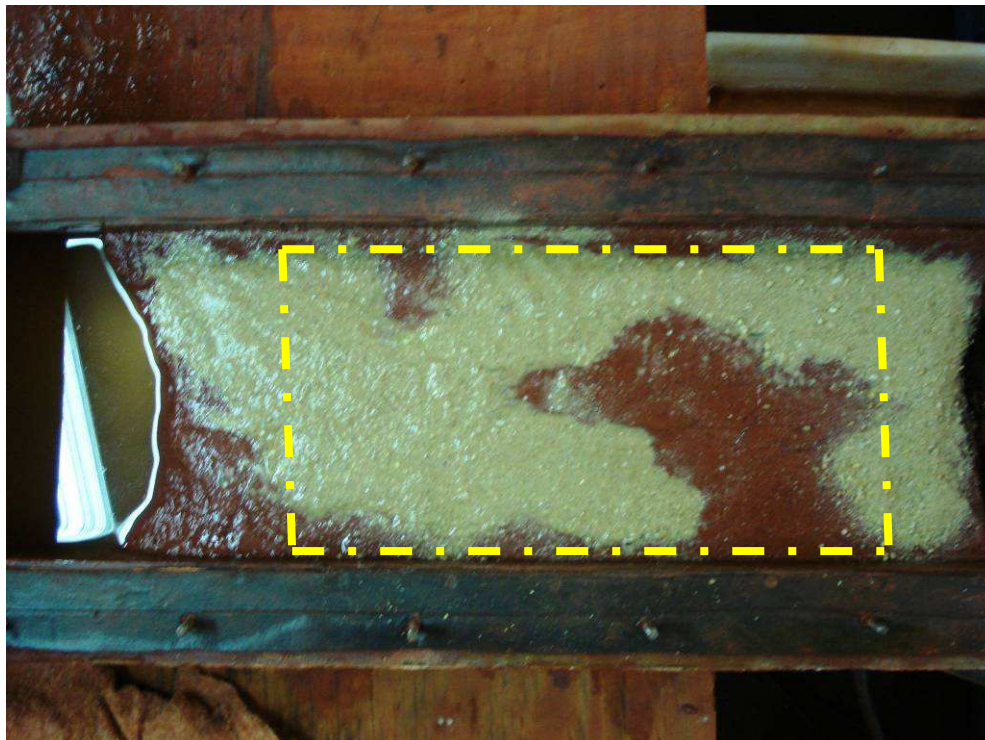


Figura 4.28: Procedimento de colocação de areia dentro do volume erodido.

O volume erodido em cada intervalo de tempo é determinado conforme a seguir:

- previamente ao ensaio, dispõe-se areia sobre a superfície do solo compactado, nivelando com desempenadeira e marcando o nível obtido nas paredes do aparato, para definir uma superfície de referência
- o volume de referência é definido pesando-se a massa de areia contida numa caixa padrão, antes e após a disposição do material sobre o solo compactado, por:

$$V_i = \frac{\Delta M}{M_c} \cdot V_c \quad (4.1)$$

na qual:

ΔM é a variação da massa de areia contida na caixa padrão [M];

M_c é a massa de areia inicialmente contida na caixa padrão [M];

V_c é o volume da caixa padrão, determinado a partir de suas dimensões [L³] (1284 mL);

V_i é o volume acumulado calculado [L³].

4.4.1.6 Medição do volume erodido – método indireto

Para estimar a precisão do método direto, foram realizadas medições utilizando a técnica de “shadow moiré”. A técnica consiste na projeção de luz sobre uma grade de referência, com um padrão de linhas (franjas) e intervalos transparentes pré-determinados. Uma fonte de luz ilumina esta grade, gerando sombras na superfície a determinar (Figura 4.29). As sombras sofrem distorções conforme a profundidade da superfície, permitindo obter o relevo sem nenhuma interferência física (toque) na superfície (RIBEIRO, 2006).



(a) Aplicação na superfície erodida

(b) Aplicação na superfície de referência

Figura 4.29: Medição pelo método indireto.

No processo de medição tentam-se vários espaçamentos de franja (40, 60, 80 e 100 franjas), utilizando para isto uma superfície com relevo conhecido como referência (Figura 4.29 b). O volume é calculado a partir da superfície gerada pelo sistema com espaçamento de franjas que melhor representa a superfície conhecida. Utilizando esta metodologia para medição da profundidade do arco medial plantar de seres humanos, Costa (2006) reporta erros de cerca de 2 mm em valores máximos de 35 mm de profundidade.

Realizaram-se duas medições: previamente ao teste, determinou-se a superfície do solo compactado, utilizada como superfície de referência no cálculo do volume erodido; após o teste, determinou-se a superfície do solo erodido, sendo a diferença entre estas duas superfícies correspondente ao volume erodido.

Desta forma, realizou-se um ensaio de erodibilidade no aparato nº 3 medindo-se o volume pelo método direto (areia) e pelo método indireto (shadow moiré). O volume erodido obtido pelo método direto foi igual a 337 mL, o método indireto obteve um valor igual a 360 mL, ou seja, cerca de 6% de desvio. Logo, o método direto foi considerado preciso para os objetivos deste trabalho, sendo adotado nas medidas de erodibilidade.

4.4.1.7 Cálculo da erodibilidade

Uma vez calculado o volume erodido repetiu-se, a cada intervalo de tempo, o procedimento de medida até que a erosão atingisse o fundo do aparato em qualquer ponto.

A erodibilidade foi calculada pela razão entre o volume erodido acumulado, a área de medição (0,30 m x 0,16 m = 0,048 m²) e o tempo acumulado, ou seja:

$$\dot{z}_i = 0,06 \frac{V_i}{A \cdot \Delta t_i} \quad (4.2)$$

na qual:

\dot{z}_i é a erodibilidade média do solo até o instante i (mm/h);

V_i é o volume acumulado calculado (mL);

A é a área de medição do volume erodido no interior do aparato (0,048 m², ver Figura 4.23a)

Δt_i é tempo acumulado desde o início do teste até o instante i (min).

4.5 Influência da orientação das camadas de compactação

Conforme apresentado na Figura 5.13, durante o galgamento existem efeitos associados ao desenvolvimento do escoamento em direção oblíqua às camadas de compactação.

Para confirmar a ocorrência destes efeitos, utilizou-se um canal acrílico, com seção retangular de base igual a 0,30 m e altura de 0,45 m, extensão de 10 m, acoplado a um conjunto moto-bomba com capacidade de adução de até 1 m³/min, conforme apresenta a Figura 4.30. Uma vez que se buscaram apenas resultados observacionais, não se instalaram instrumentos.

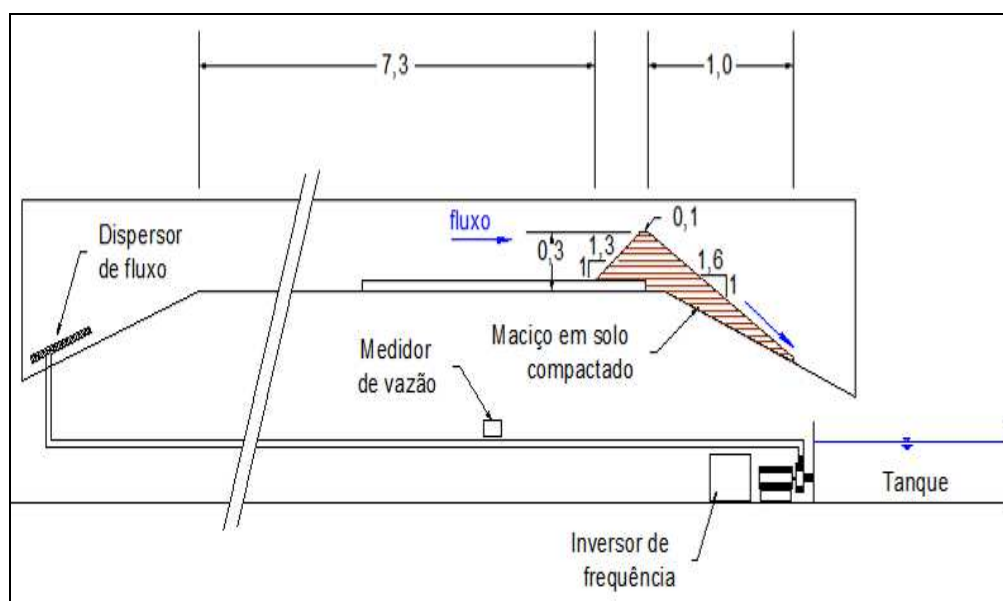


Figura 4.30: Aparato para avaliação da erodibilidade em camadas oblíquas.

Para se proceder a compactação do solo nesse canal e evitar o efeito provocado pela flexibilidade do acrílico optou-se por calçar o fundo do canal com um conjunto de pontaletes e com uma placa de amortecimento. Dessa forma, evitaram-se também os esforços oriundos da aplicação da energia de compactação sobre a estrutura do canal. A Figura 4.31 mostra uma vista lateral do canal de teste com o modelo de maciço a ser ensaiado, onde se pode ver os pontaletes no fundo da seção do canal que recebeu o maciço para teste.

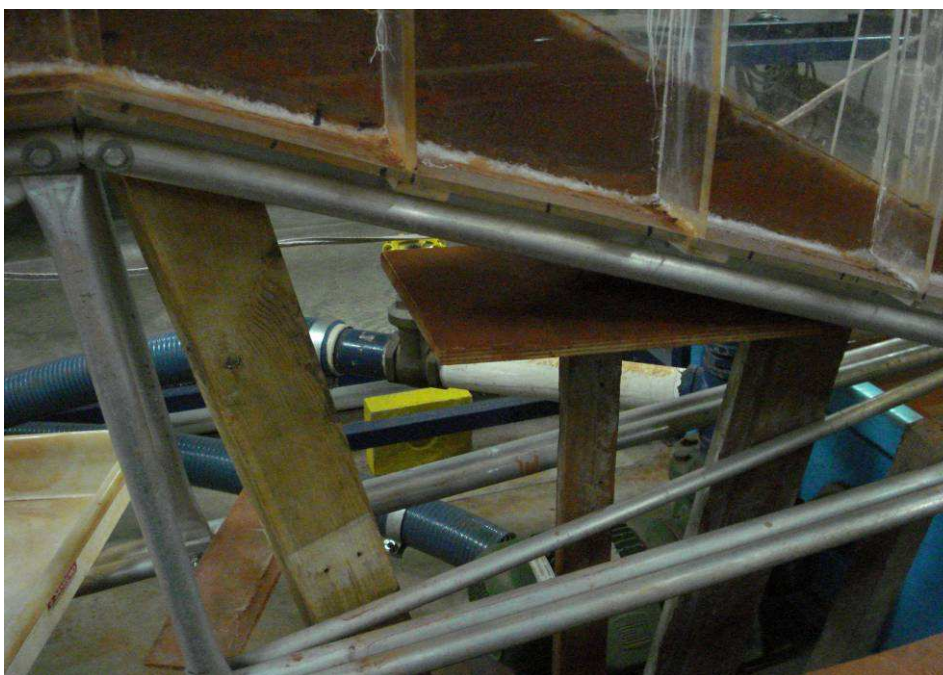


Figura 4.31: Pontaletes no fundo da seção do canal que recebeu o maciço para teste.

Devido a declividade do canal na região da saída do maciço, notou-se que o material que era compactado deslizava sobre a superfície de acrílico. Assim, optou-se por instalar um batente nessa região. Dessa forma o material deixou de descolar da base do canal e foi possível moldar a barragem. As Figuras 4.32 e 4.33 mostram detalhes desse batente colocado no canal de acrílico.

Percebeu-se que apesar de a superfície do talude de jusante se apresentar aparentemente lisa após a compactação, houve a formação de rugosidade significativa após a passagem do escoamento (Figura 4.32), mesmo sem que houvesse início de processo erosivo significativo. Esta rugosidade parece ter sido induzida pela forma de compactação utilizada (golpeamento por soquete), mas que não comprometeram os resultados obtidos, visto que o modelo foi construído apenas com intuits observacionais e não de medição de variáveis do escoamento ou do processo erosivo desenvolvido.

Neste canal, tentaram-se diversas alternativas de instrumentação do maciço para efeito de monitoramento da evolução da brecha, tais como passagem de fios metálicos entre camadas de compactação, papel alumínio e lâmina de ouro de forma a interromper circuitos quando pela ruptura do maciço, sem sucesso.

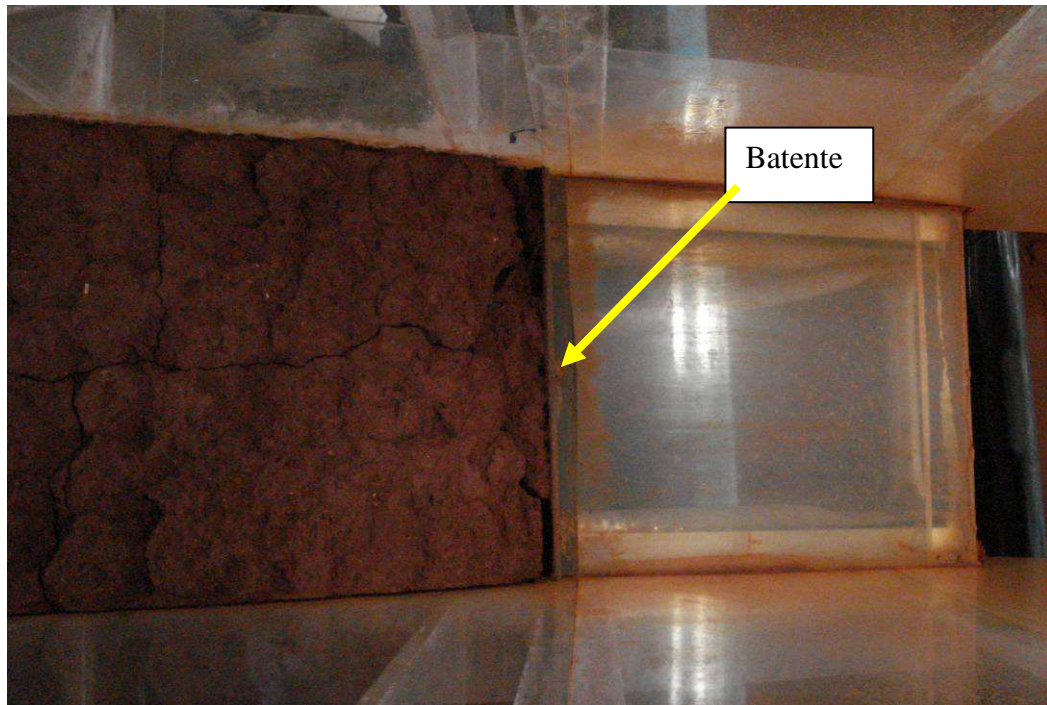


Figura 4.32: Vista superior do batente colocado na região da saia do maciço para teste.

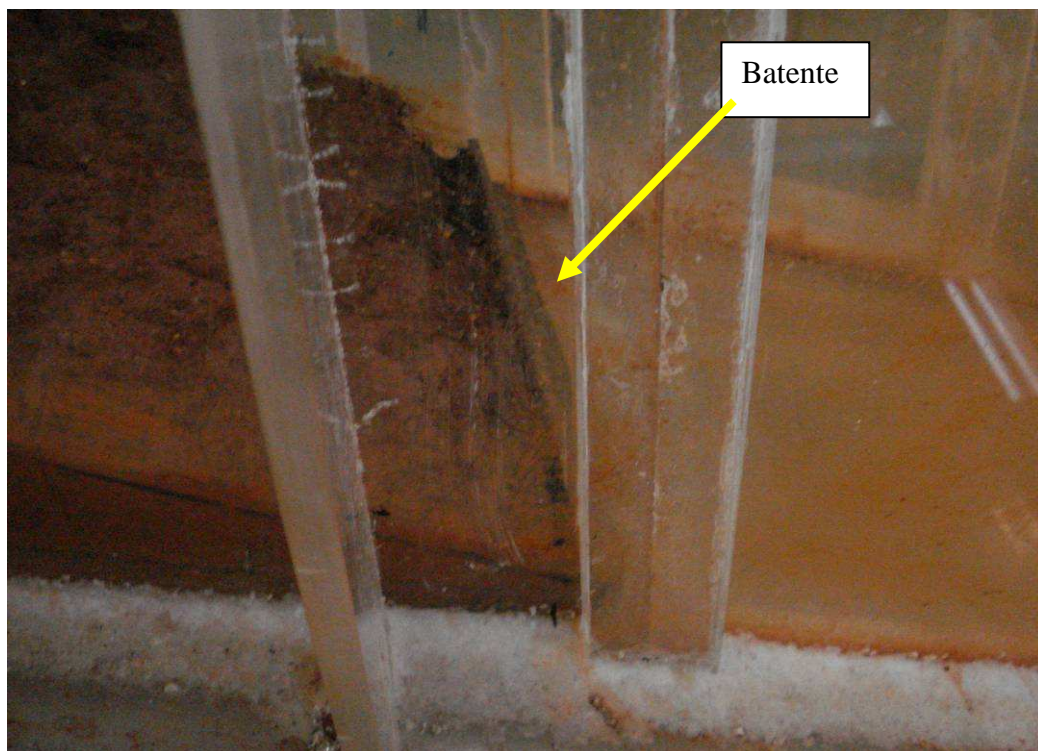


Figura 4.33: Vista lateral do batente colocado na região da saia do maciço para teste.

4.6 Ampliação do prazo de ruptura em função do aumento do grau de compactação

Quando do evento de ruptura de uma barragem, um dos principais motivos de perdas de vida está relacionado ao tempo disponível para retirada das populações a jusante. De uma forma geral pode-se dizer que tempos muito reduzidos podem causar um grande número de perdas de vidas. Portanto, ampliar o prazo de ruptura pode ser uma estratégia para reduzir os danos causados às populações e propriedades a jusante dos barramentos.

De posse dos resultados obtidos nos ensaios de erosão apresentados nos itens anteriores, pode-se fazer uma correlação entre o tempo de erosão do material compactado para diversos graus de compactação (GC), como também estimar qual o custo incremental para aumentar o tempo de ruptura total do maciço. Neste sentido, admitindo-se constantes os efeitos dos demais parâmetros geotécnicos na erosão do maciço, sugere-se o seguinte procedimento:

- ensaiar a amostra de material que irá compor o maciço e determinar a erodibilidade do material para GC de 95 e 100%;
- obter o hidrograma de entrada no reservatório e a partir dele calcular a altura de galgamento correspondente;
- partindo dos dados de erodibilidade, altura de lâmina de água e velocidades obtidas em função das equações tradicionais de hidráulica (capítulo 3), estimar o tempo de erosão no maciço para GC de 95 e 100%;
- partindo dos dados de erosão e adotando-se uma geometria de formação de brecha (Figura 3.5) estimar o rebaixamento do talude a cada 10 minutos;
- repetir o procedimento até o reservatório chegar ao nível da brecha ou até o final do hidrograma;
- com os tempos obtidos para atingir o final da ruptura, determina-se o lapso de tempo entre a ruptura de um maciço com GC de 95 e 100%;
- de posse do volume total do maciço e aplicando os custos de compactação do solo a diferentes graus de compactação, determinados a partir de um processo de composição de custos (Tabela 4.3), obter o custo incremental para ampliar o tempo de ruptura da barragem, que pode ser apresentado em valor total (R\$) ou unitário (R\$/h de aumento de tempo de ruptura) para cada hidrograma de entrada.

Tabela 4.3 – Custo unitário de compactação de solo

| Insumos necessários para compactação de solo | 95% PROCTOR NORMAL | | 100% PROCTOR NORMAL | |
|--|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| | custo de produção (R\$) | volume produzido (m ³) | custo de produção (R\$) | volume produzido (m ³) |
| Grade de disco | 4,14 | | 4,14 | |
| Motoniveladora | 158,65 | | 148,63 | |
| Rolo de aço vibratório | 188,09 | | 188,09 | |
| Rolo de pé de carneiro | 112,88 | | 112,88 | |
| Caminhão tanque | 264,16 | 601,5 | 176,11 | 400,0 |
| Tratores agrícolas | 50,72 | | 41,67 | |
| Serventes | 13,44 | | 13,44 | |
| Encarregado de turma | 15,99 | | 15,99 | |
| Produção da equipe | 808,07 | | 700,95 | |
| Custo unitário (R\$ / m ³) | | 1,34 | | 1,75 |

Fonte: Informador das Construções (2008).

Pela análise dos dados apresentados na Tabela 4.3, pode-se notar que aumentar o grau de compactação de 95% para 100% corresponde a um acréscimo de custo unitário de aproximadamente 30%. Desta forma, conforme a magnitude do lapso de tempo observado entre as rupturas de maciços compactados a 95% e a 100% de GC pode ser justificável investir mais na compactação do maciço com vistas também à redução dos efeitos de um galgamento, e não só com objetivos estritamente geotécnicos.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

5.1 Resultados e análise dos testes de erodibilidade em camadas paralelas

Tendo em vista a importância do grau de compactação na erodibilidade de solos coesivos (BRIAUD *et al.*, 2001) conforme levantado na revisão bibliográfica, foram realizados 54 testes de erodibilidade em camadas orientadas paralelamente ao fluxo, metade com grau de compactação (GC) de 95% e metade com GC igual a 100%.

A partir dos ensaios de compactação realizados no solo utilizado, obteve-se massa específica aparente seca máxima igual a $1,73 \text{ g/cm}^3 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade ótimo igual a $23,6\% \pm 0,5\%$, que foram utilizados na compactação da camada a 100% do GC.

Uma vez que é comum utilizar no Brasil GC iguais a 95%, 98% e 100% nas obras de terra, no ramo seco, inicialmente se pretendia avaliar a erodibilidade nessas condições. Neste sentido, foram obtidos os valores de massa específica aparente seca máxima e teor de umidade na compactação a partir dos seis ensaios realizados, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de umidade ótima e massa específica aparente seca em função do grau de compactação desejado.

| Grau de Compactação | 95% | | 98% | | 100% | |
|-----------------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| | Massa específica aparente seca (g/cm ³) | Teor de Umidade (%) | Massa específica aparente seca (g/cm ³) | Teor de Umidade (%) | Massa específica aparente seca (g/cm ³) | Teor de Umidade (%) |
| 1 | 1,64 | 21,6 | 1,70 | 22,6 | 1,73 | 23,2 |
| 2 | 1,64 | 22,1 | 1,70 | 22,9 | 1,73 | 23,4 |
| 3 | 1,63 | 21,7 | 1,69 | 22,2 | 1,72 | 23,5 |
| 4 | 1,67 | 21,0 | 1,72 | 21,8 | 1,76 | 23,0 |
| 5 | 1,63 | 22,4 | 1,69 | 23,6 | 1,72 | 24,5 |
| 6 | 1,65 | 22,0 | 1,71 | 23,0 | 1,74 | 23,7 |
| Amplitude amostral | 0,04 | 1,4 | 0,04 | 1,8 | 0,04 | 1,5 |
| Média Aritmética | 1,65 | 21,8 | 1,70 | 22,7 | 1,73 | 23,6 |
| Desvio Padrão | 0,01 | 0,5 | 0,01 | 0,63 | 0,02 | 0,5 |
| Coefficiente de variação(%) | 0,87 | 2,2 | 0,9 | 2,8 | 0,9 | 2,2 |

No entanto, não foram realizados ensaios com GC igual a 98%, visto que os intervalos de teor de umidade na compactação se sobrepõem em até 0,5%, considerando as margens de erro previstas nos ensaios. Desta forma, optou-se por realizar ensaios apenas para 95% e 100% na expectativa de evitar que uma eventual sobreposição de intervalos interferisse nos resultados.

Utilizando o aparato n° 3 (Figuras 4.20 e 4.21), foram realizados testes de erodibilidade com solo compactado a 95% e 100% de GC, com energia do ensaio Proctor Normal. Foram realizados ensaios com velocidades médias de escoamento variando de 1 m/s a 5 m/s.

Uma vez que a camada compactada tem a mesma orientação que o escoamento, neste ensaio procura-se avaliar a parcela da erodibilidade devida às tensões cisalhantes (primeiro termo da equação 3.21), visto que assim que as fossas erodidas aumentam de tamanho, efeitos associados à turbulência começam a interferir (demais termos da equação 3.21).

O aparato, conforme concebido, permite uma escavação máxima de 50 mm. Sempre que este limite era atingido em qualquer ponto da área de medição o ensaio era interrompido.

Nos primeiros ensaios, observou-se que as erosões ocorriam sempre junto às paredes do aparato, no lado oposto ao que o operador estava durante a compactação (Figura 5.1).



Figura 5.1: Exemplo dos efeitos da má compactação junto à parede.

Este efeito (Figura 5.1) foi associado à dificuldade de compactação, pois após a primeira centena de golpes do soquete Proctor Normal, o operador começa a ter dificuldades em compactar, principalmente as áreas mais distantes, para as quais precisa estender o braço. Estes ensaios foram descartados, sendo que a partir de então, a compactação foi realizada alternando a posição do operador em relação ao aparato.

Os dados de volume foram obtidos por medição pelo método direto (areia) e foram convertidos em erodibilidade, distribuindo-se o volume erodido igualmente pela seção de medição (0,30 m x 0,16 m), convertidos para unidades de mm/h, conforme apresentado nos itens 4.4.1.5 (pág. 72) e 4.4.1.7 (pág. 75).

Nos Apêndices I e II apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de erodibilidade. A Tabela 5.2 apresenta o resumo dos resultados obtidos para erosão, agrupados segundo a velocidade de teste e em cada coluna agrupados pelo mesmo intervalo de tempo para permitir a visualização da dispersão dos resultados. A Tabela 5.3 apresenta os resultados de erodibilidade calculados a partir dos resultados apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos testes de erosão realizados no aparato nº 3.

| Velocidade (m/s) | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | | 4 | | | | 5 | | | | | |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|----|------|
| GC (%) | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | | |
| Item | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | t (min) | Z (mm) | | |
| Medidas | 5 | 1,66 | 10 | 0,16 | 5 | 0,17 | 3 | 0,39 | 3 | 0,90 | 3 | 0,99 | 2 | 0,29 | 1 | 0,26 | 2 | 0,97 | 5 | 0,79 | | |
| | 5 | 2,56 | 10 | 0,22 | 5 | 0,52 | 5 | 0,30 | 3 | 1,25 | 5 | 1,08 | 2 | 0,39 | 2 | 0,80 | 2 | 1,20 | 5 | 1,01 | | |
| | 15 | 3,10 | 10 | 0,31 | 6 | 0,65 | 6 | 0,69 | 6 | 2,69 | 5 | 0,71 | 3 | 0,28 | 3 | 0,82 | 3 | 2,72 | 5 | 1,12 | | |
| | 15 | 4,11 | 20 | 0,51 | 9 | 0,76 | 10 | 0,85 | 6 | 3,23 | 6 | 1,52 | 3 | 0,64 | 5 | 1,01 | 3 | 2,92 | 5 | 1,14 | | |
| | 20 | 3,50 | 20 | 0,56 | 10 | 0,34 | 11 | 0,85 | 10 | 1,68 | 10 | 1,76 | 3 | 0,87 | 5 | 1,07 | 4 | 3,93 | 10 | 1,54 | | |
| | 20 | 4,69 | 30 | 0,89 | 10 | 0,72 | 15 | 0,56 | 10 | 1,69 | 10 | 2,59 | 3 | 1,02 | 8 | 1,58 | 4 | 5,34 | 10 | 1,85 | | |
| | 25 | 3,48 | 30 | 1,14 | 10 | 1,01 | 20 | 1,10 | 11 | 4,72 | 10 | 2,12 | 4 | 1,16 | 10 | 1,85 | 5 | 4,98 | 10 | 1,92 | | |
| | 30 | 7,06 | 30 | 1,24 | 15 | 0,94 | 21 | 1,10 | 15 | 2,44 | 11 | 2,42 | 4 | 1,41 | 10 | 2,11 | 5 | 6,18 | 10 | 2,39 | | |
| | 35 | 9,05 | 40 | 0,97 | 15 | 1,49 | 30 | 0,77 | 15 | 6,00 | 15 | 1,44 | 5 | 2,64 | 13 | 2,49 | 6 | 6,36 | 10 | 3,24 | | |
| | | | | | 50 | 1,10 | 20 | 2,37 | 30 | 1,67 | 20 | 2,80 | 20 | 3,10 | 5 | 3,25 | 15 | 3,67 | 7 | 5,82 | 20 | 3,10 |
| | | | | | 20 | 3,34 | 31 | 1,18 | 20 | 3,52 | 20 | 3,00 | 5 | 3,91 | 18 | 3,88 | 15 | 10,13 | | | 25 | 2,58 |
| | | | | | 20 | 4,35 | 45 | 1,28 | 25 | 4,49 | 20 | 3,26 | 5 | 5,69 | 20 | 3,10 | | | | | 45 | 5,21 |
| | | | | | 25 | 4,64 | 60 | 1,85 | 30 | 8,58 | 21 | 3,69 | 6 | 3,17 | 35 | 8,93 | | | | | 65 | 7,62 |
| | | | | | 30 | 3,74 | 90 | 2,78 | 35 | 5,61 | 30 | 4,16 | 6 | 6,98 | | | | | | | | |
| | | | | | 40 | 8,87 | 120 | 6,65 | 30 | 5,72 | 7 | 8,25 | | | | | | | | | | |
| | | | | | 40 | 11,22 | 30 | 4,04 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 30 | 3,68 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 31 | 5,23 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 40 | 6,23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 90 | 8,54 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 120 | 10,74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabela 5.3 – Resultados obtidos nos testes de erodibilidade realizados no aparato nº 3.

| Velocidade (m/s) | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | | 4 | | | | 5 | | | |
|------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|---------|--------------------|
| GC (%) | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | | 95 | | 100 | |
| Item | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) | t (min) | \dot{z}_i (mm/h) |
| Medidas | 5 | 19,86 | 10 | 0,98 | 5 | 1,99 | 3 | 3,62 | 3 | 17,98 | 3 | 10,54 | 2 | 8,72 | 1 | 15,53 | 2 | 29,12 | 5 | 9,45 |
| | 5 | 30,70 | 10 | 1,31 | 5 | 6,20 | 5 | 2,24 | 3 | 25,07 | 5 | 9,30 | 2 | 11,78 | 2 | 24,00 | 2 | 36,08 | 5 | 12,11 |
| | 15 | 12,39 | 10 | 1,84 | 6 | 6,50 | 6 | 3,29 | 6 | 26,94 | 5 | 8,32 | 3 | 5,50 | 3 | 16,47 | 3 | 54,47 | 5 | 13,46 |
| | 15 | 16,43 | 20 | 1,53 | 9 | 5,05 | 10 | 1,53 | 6 | 32,31 | 6 | 9,34 | 3 | 12,88 | 5 | 12,11 | 3 | 58,41 | 5 | 13,68 |
| | 20 | 10,51 | 20 | 1,69 | 10 | 2,06 | 11 | 5,11 | 10 | 10,11 | 10 | 13,00 | 3 | 17,45 | 5 | 12,78 | 4 | 58,90 | 10 | 9,22 |
| | 20 | 14,06 | 30 | 1,77 | 10 | 4,31 | 15 | 3,34 | 10 | 10,12 | 10 | 15,54 | 3 | 20,42 | 8 | 11,82 | 4 | 80,09 | 10 | 11,07 |
| | 25 | 8,35 | 30 | 2,29 | 10 | 6,05 | 20 | 1,71 | 11 | 25,75 | 10 | 9,00 | 4 | 17,45 | 10 | 11,07 | 5 | 59,78 | 10 | 11,52 |
| | 30 | 14,12 | 30 | 2,48 | 15 | 3,76 | 21 | 1,85 | 15 | 9,75 | 11 | 11,45 | 4 | 21,20 | 10 | 12,63 | 5 | 74,10 | 10 | 14,35 |
| | 35 | 15,52 | 40 | 1,46 | 15 | 5,96 | 30 | 7,71 | 15 | 24,00 | 15 | 12,70 | 5 | 31,72 | 13 | 11,51 | 6 | 63,64 | 10 | 19,45 |
| | | | 50 | 1,32 | 20 | 7,10 | 30 | 6,89 | 20 | 8,40 | 20 | 9,78 | 5 | 39,00 | 15 | 14,66 | 7 | 49,85 | 20 | 9,30 |
| | | | | | 20 | 10,03 | 31 | 4,66 | 20 | 10,56 | 20 | 8,08 | 5 | 46,94 | 18 | 12,94 | 15 | 40,53 | 25 | 6,19 |
| | | | | | 20 | 13,06 | 45 | 3,15 | 25 | 10,77 | 20 | 19,84 | 5 | 68,23 | 20 | 9,30 | | | 45 | 6,94 |
| | | | | | 25 | 11,14 | 60 | 2,29 | 30 | 17,16 | 21 | 15,15 | 6 | 31,67 | 35 | 15,30 | | | 65 | 7,04 |
| | | | | | 30 | 7,48 | 90 | 1,85 | 35 | 9,62 | 30 | 13,22 | 6 | 69,78 | | | | | | |
| | | | | | 40 | 13,31 | 120 | 3,32 | | | 30 | 10,55 | 7 | 70,71 | | | | | | |
| | | | | | 40 | 16,82 | | | | | 30 | 10,13 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | 30 | 5,69 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | 31 | 5,37 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | 40 | 8,46 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | 90 | 5,74 | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | 120 | 7,35 | | | | | | | | | |

A seguir, apresentam-se os gráficos de erosão elaborados a partir dos resultados apresentados na Tabela 5.2. A estes resultados sempre se procurou ajustar uma equação do tipo potência, motivada pela forma da função de erodibilidade apresentada na equação 3.21.

A Figura 5.2 apresenta o gráfico da erosão versus o tempo a que o solo compactado foi submetido a um escoamento com velocidade média igual a 1 m/s, em ambos os GC estudados.

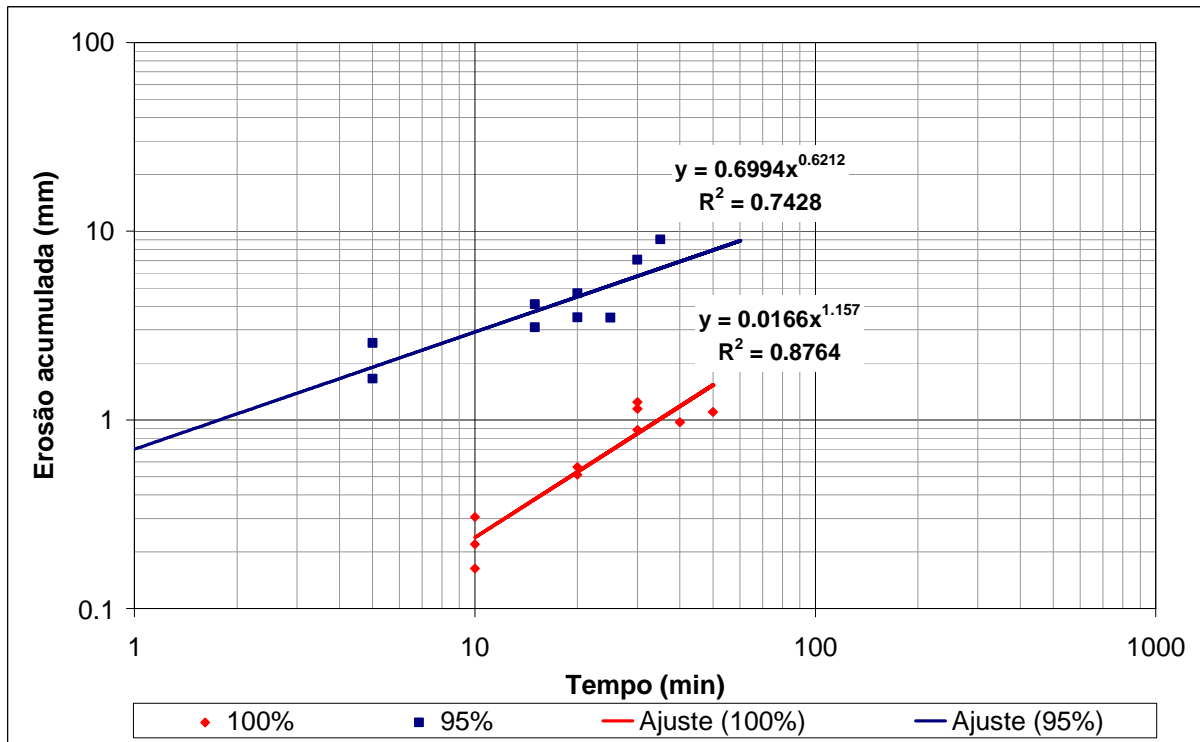


Figura 5.2: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 1 m/s para ambos os graus de compactação estudados.

Na Figura 5.2 observa-se que a erosão acumulada em um mesmo instante no solo compactado a 95% e a 100% de grau de compactação é de 15 a 5 vezes maior no primeiro caso quando avaliada entre 10 minutos e 1 hora de teste, respectivamente.

Durante a realização dos ensaios pôde-se observar que prevaleceram mecanismos de erosão de grão, associados às condições de escoamento menos turbulentas ($7683 < Re < 11551$; $0,30 < Re_* < 0,31$).

A Figura 5.3 apresenta o gráfico da erosão versus o tempo a que o solo compactado foi submetido a um escoamento com velocidade média igual a 2 m/s, em ambos os GC estudados.

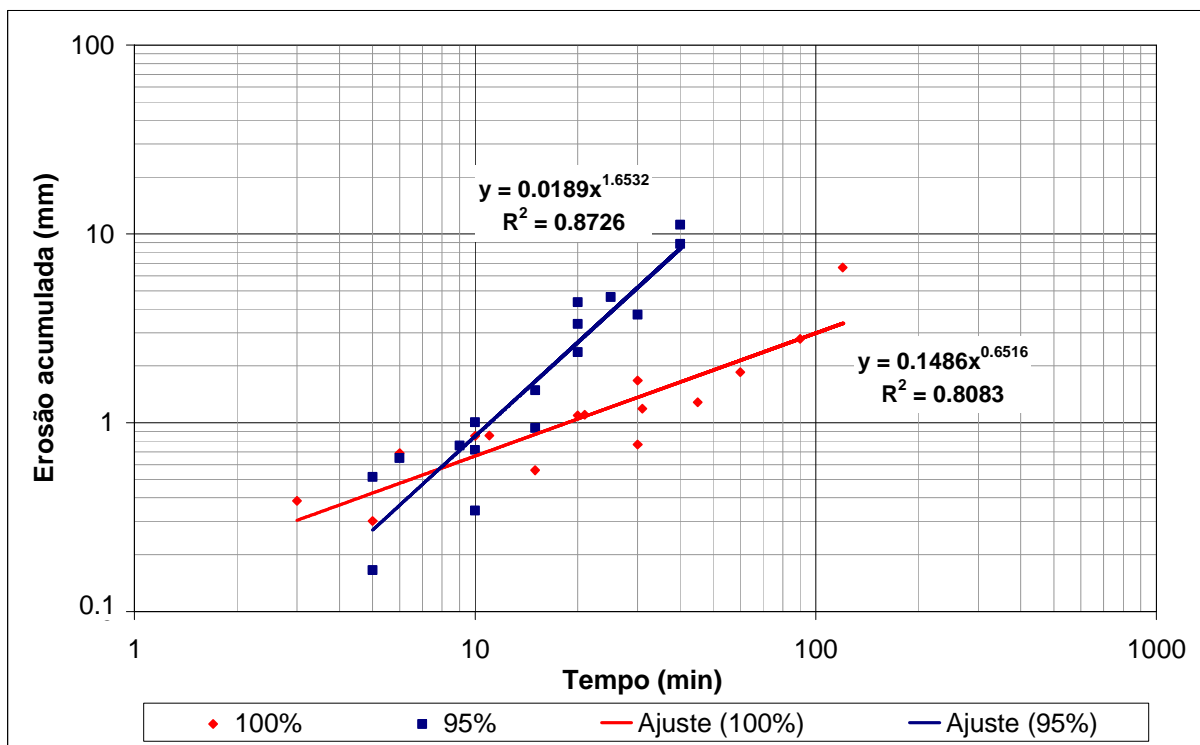


Figura 5.3: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 2 m/s para ambos os graus de compactação estudados.

Na Figura 5.3 observa-se que a erosão acumulada em um mesmo instante no solo compactado a 95% e a 100% de grau de compactação chega a ser 5 vezes maior no primeiro caso para 40 minutos de teste.

Durante a realização dos ensaios pôde-se observar que prevaleceram mecanismos de erosão de grão apenas no caso de grau de compactação igual a 100%, mesmo nas condições de turbulência encontradas nestes testes ($15367 < Re < 23102$; $0,55 < Re_* < 0,58$). Acredita-se que esta velocidade está próxima da velocidade crítica (associada à tensão de cisalhamento crítica – $2,2 \text{ Pa} < \tau_c < 7,8 \text{ Pa}$) deste solo quando compactado a 95% de grau de compactação.

O cruzamento entre curvas observado nesta figura decorre da variabilidade do processo erosivo nos instantes iniciais, quando qualquer problema da compactação na superfície é imediatamente traduzido em forma de erosão, trazendo dificuldades na diferenciação entre as duas situações do ponto de vista de medição do volume erodido com o método utilizado. Recomenda-se, portanto, que as curvas apresentadas sejam utilizadas a partir de 10 minutos de escoamento. De fato, ambas as curvas convergem matematicamente para zero na origem.

A Figura 5.4 apresenta o gráfico da erosão versus o tempo a que o solo compactado foi submetido a um escoamento com velocidade média igual a 3 m/s, em ambos os GC estudados.

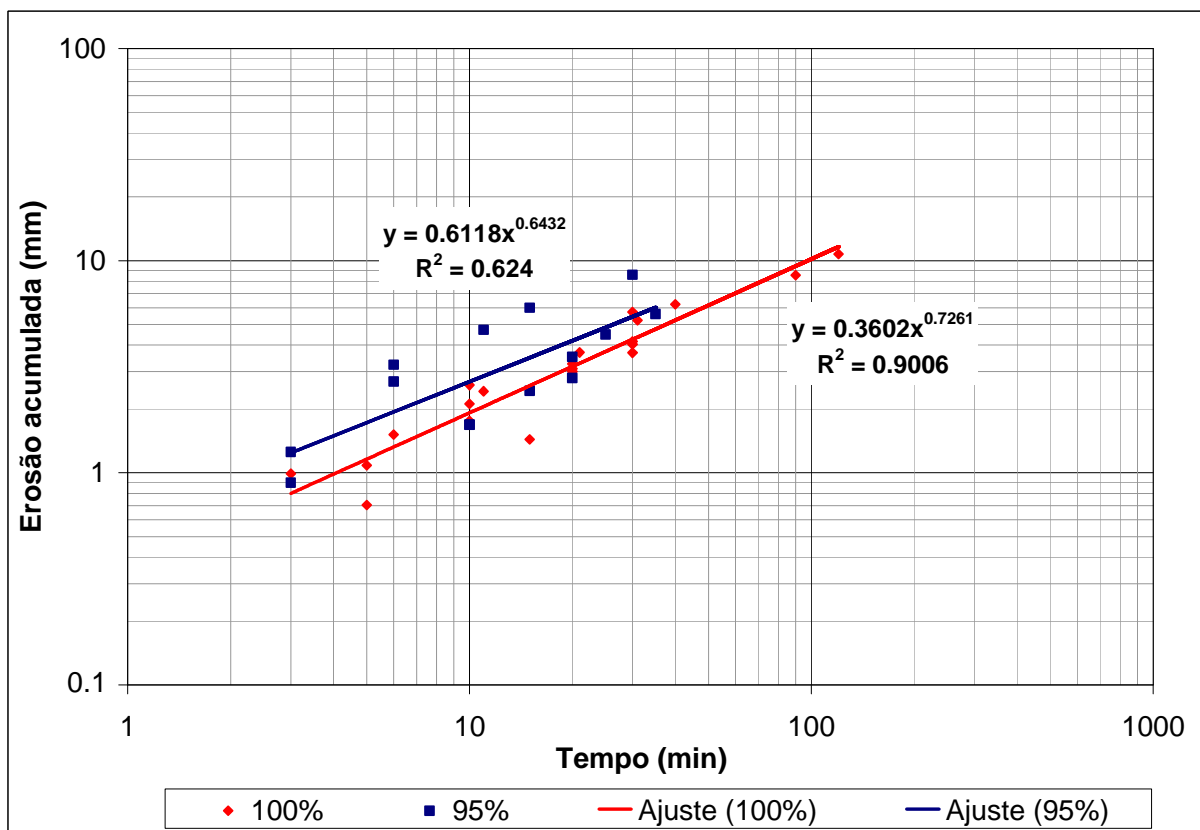


Figura 5.4: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 3 m/s para ambos os graus de compactação estudados.

Na Figura 5.4 observa-se que a erosão acumulada em um mesmo instante no solo compactado a 95% e a 100% de grau de compactação é de cerca de 1,5 vezes maior no primeiro caso, para intervalos de teste variando entre 3 e 30 minutos.

Durante a realização dos ensaios observou-se que prevaleceram mecanismos de erosão semelhantes em ambos os GC ($23051 < Re < 34653$; $0,80 < Re_* < 0,84$). Acredita-se que esta velocidade está próxima da velocidade crítica (associada à tensão de cisalhamento crítica – $8,5 \text{ Pa} < \tau_c < 17,7 \text{ Pa}$) deste solo quando compactado a 100% de grau de compactação, o que explicaria o paralelismo das curvas.

A Figura 5.5 apresenta o gráfico da erosão versus o tempo a que o solo compactado foi submetido a um escoamento com velocidade média igual a 4 m/s, em ambos os GC estudados.

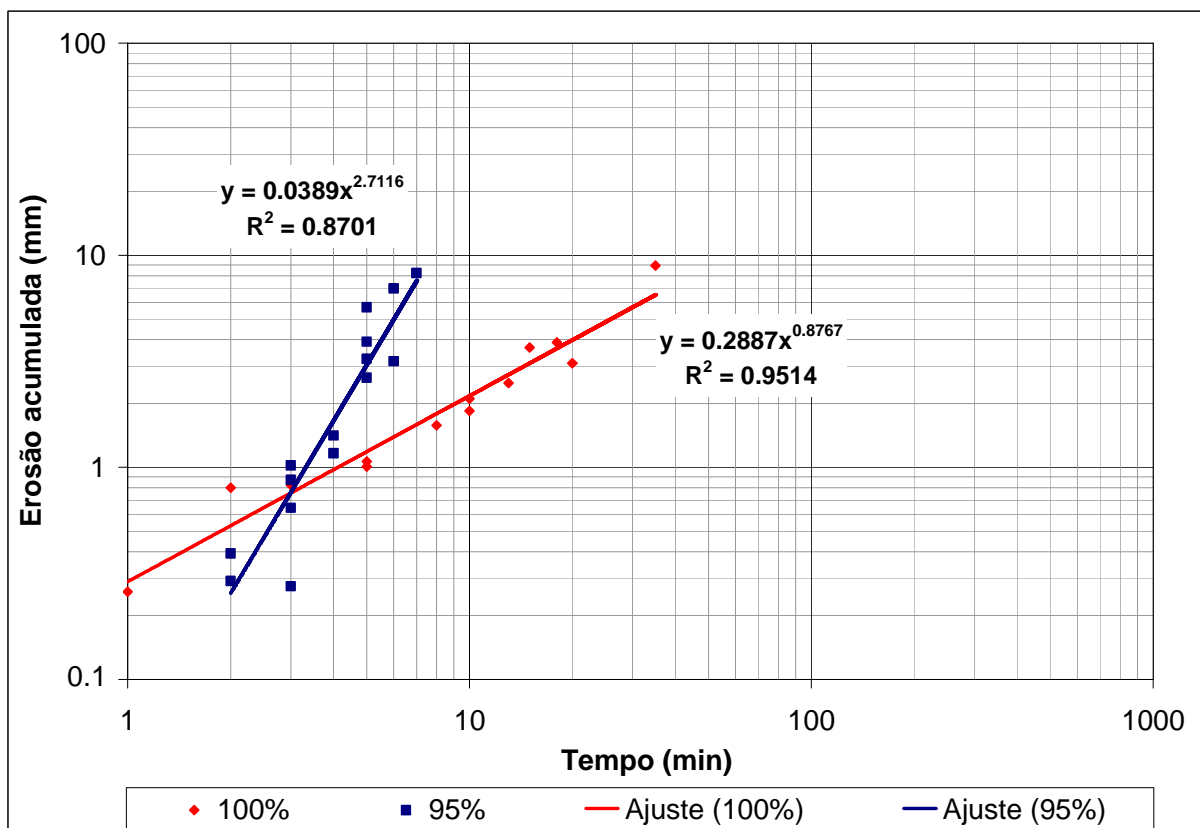


Figura 5.5: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 4 m/s para ambos os graus de compactação estudados.

Na Figura 5.5 observa-se que a erosão acumulada em um mesmo instante no solo compactado a 95% e a 100% de grau de compactação chega a ser 4 vezes maior no primeiro caso para 7 minutos de ensaio.

Durante a realização dos ensaios pôde-se observar que prevaleceram mecanismos de erosão por destacamento de aglomerados, em geral na forma de placas orientadas conforme a compactação nas condições de escoamento observadas ($30734 < Re < 46203$; $1,039 < Re_* < 1,086$).

Novamente, acredita-se que o cruzamento entre curvas observado nesta figura decorre da variabilidade do processo erosivo nos instantes iniciais, quando qualquer problema da compactação na superfície é imediatamente traduzido em forma de erosão, trazendo dificuldades na diferenciação entre as duas situações do ponto de vista de medição do volume erodido com o método utilizado. Recomenda-se, portanto, que as curvas apresentadas sejam utilizadas a partir de 3 minutos de escoamento. Novamente, ambas as curvas convergem matematicamente para zero na origem.

A Figura 5.6 apresenta o gráfico da erosão versus o tempo a que o solo compactado foi submetido a um escoamento com velocidade média igual a 5 m/s, em ambos os GC estudados.

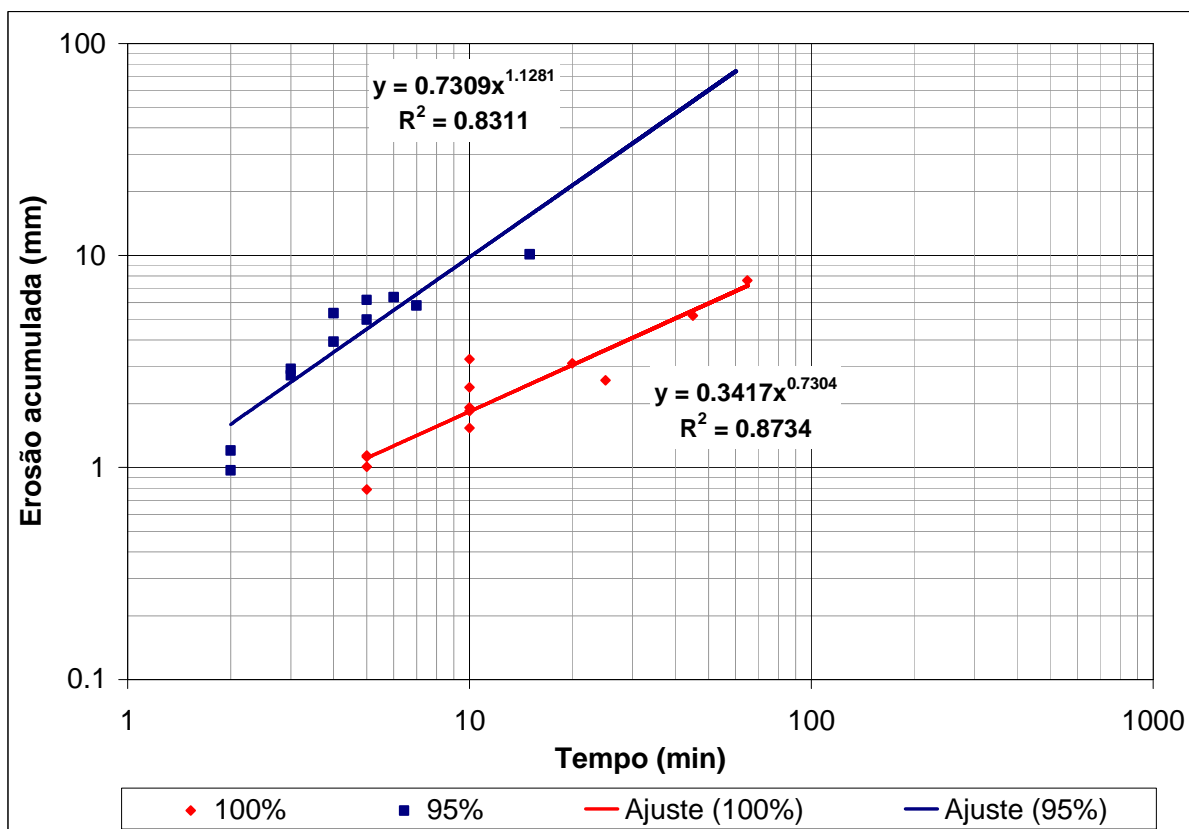


Figura 5.6: Erosão versus tempo para escoamento em velocidade média de 5 m/s para ambos os graus de compactação estudados.

Na Figura 5.6 observa-se que a erosão acumulada em um mesmo instante no solo compactado a 95% e a 100% de grau de compactação chega a ser 5 a 10 vezes maior no primeiro caso quando avaliada entre 5 minutos e 1 hora de teste, respectivamente.

Durante a realização dos ensaios pôde-se observar que prevaleceram mecanismos de erosão por destacamento de aglomerados, na forma de placas orientadas conforme a compactação nas condições de escoamento observadas ($38418 < Re < 57754$; $1,272 < Re^* < 1,328$).

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados obtidos para as diversas velocidades de escoamento ensaiadas, em condições de compactação de 95% e 100% de GC.

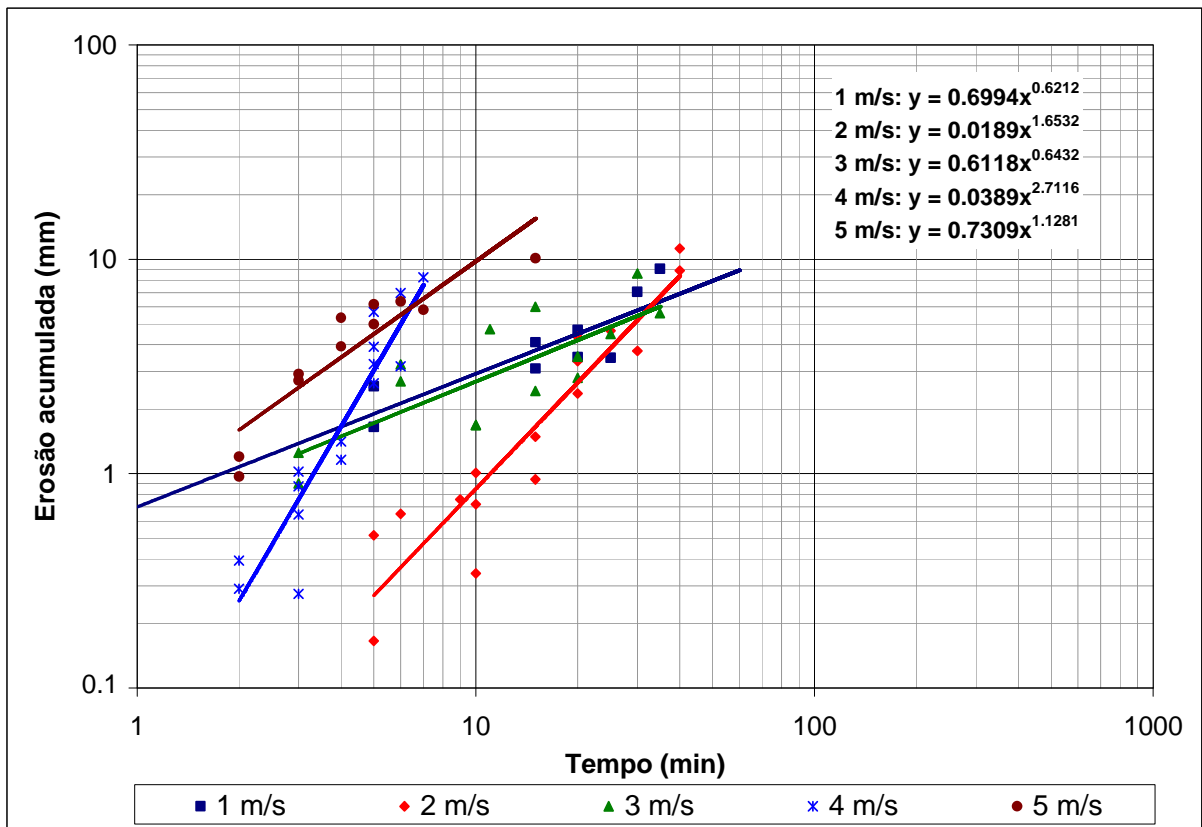


Figura 5.7: Erosão versus tempo para escoamento sobre material compactado a 95% de grau de compactação.

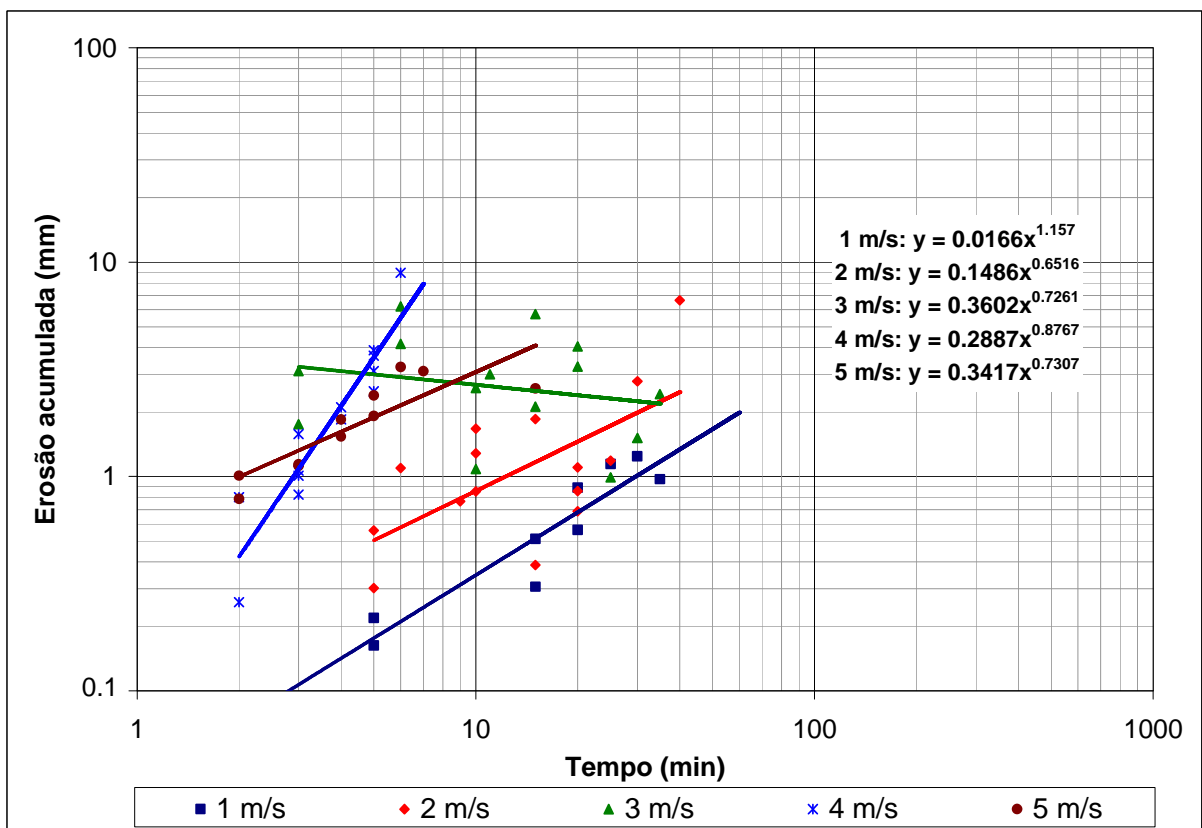


Figura 5.8: Erosão versus tempo para escoamento sobre material compactado a 100% de grau de compactação.

Intuitivamente, esperava-se que as curvas de erosão fossem trasladadas em relação ao tempo à medida que a velocidade de escoamento aumentava. Nas Figuras 5.7 e 5.8 nota-se, em geral, este comportamento, ainda que se observaram variações nas declividades das curvas. Exceções a essa regra foram observadas para velocidades de escoamento de 1 m/s a 95% de GC e para 3 m/s a 100% de GC.

No primeiro caso, atribui-se esta anomalia aos erros incorridos durante as primeiras medições realizadas no aparato, justamente para a velocidade de 1 m/s. Desta forma, estes valores foram desconsiderados na confecção da curva de erodibilidade.

No entanto, para velocidade de 3 m/s e 100% de GC, a curva obtida mostra um comportamento aproximadamente estável, ou seja, aponta para uma taxa constante independentemente do tempo de exposição do solo compactado à velocidade de escoamento. Apesar do comportamento inesperado, estes dados foram utilizados no traçado da função erodibilidade do solo a este GC, pois não havia outro motivo que fundamentasse o seu descarte.

É interessante notar também na Figura 5.7 que, excluída a curva obtida para 1 m/s, as curvas de 2 m/s e 3 m/s e 4 m/s e 5 m/s se encontram a partir de um intervalo de tempo próximo ao final do ensaio. Nesta situação, praticamente todo o material já havia erodido, sendo observada influência das fossas formadas na erosão (termo turbulento da eq. 3.21).

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam o gráfico da erodibilidade média em função da velocidade média de escoamento para GC igual a 95% e 100%, respectivamente. As Figuras 5.11 e 5.12 apresenta essas mesmas curvas representadas em conjunto, sobrepostas às faixas de resistência à erodibilidade conforme proposto por Briaud (2008). Segundo este critério o solo se comporta como um material de erodibilidade média em ambos os GC.

Na Figura 5.12 observa-se o distanciamento entre as curvas de erodibilidade obtidas para o solo compactado a 95% e 100% de GC. Mantendo-se a erodibilidade em 20 mm/h, observa-se que o material compactado a 100% de GC resiste a tensões de cisalhamento devidas ao escoamento cerca de 8 vezes maiores em relação ao solo compactado a 95% de GC.

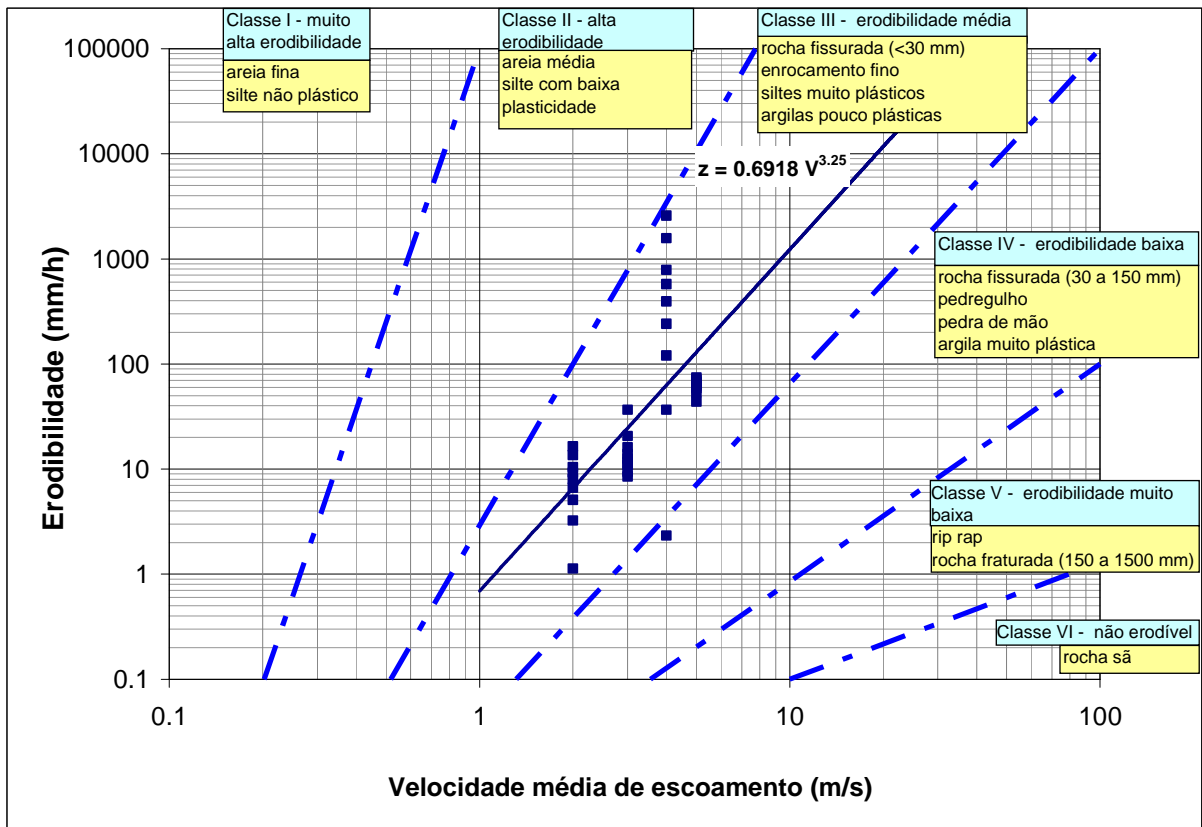


Figura 5.9: Erodibilidade versus velocidade média de escoamento para GC igual a 95%.

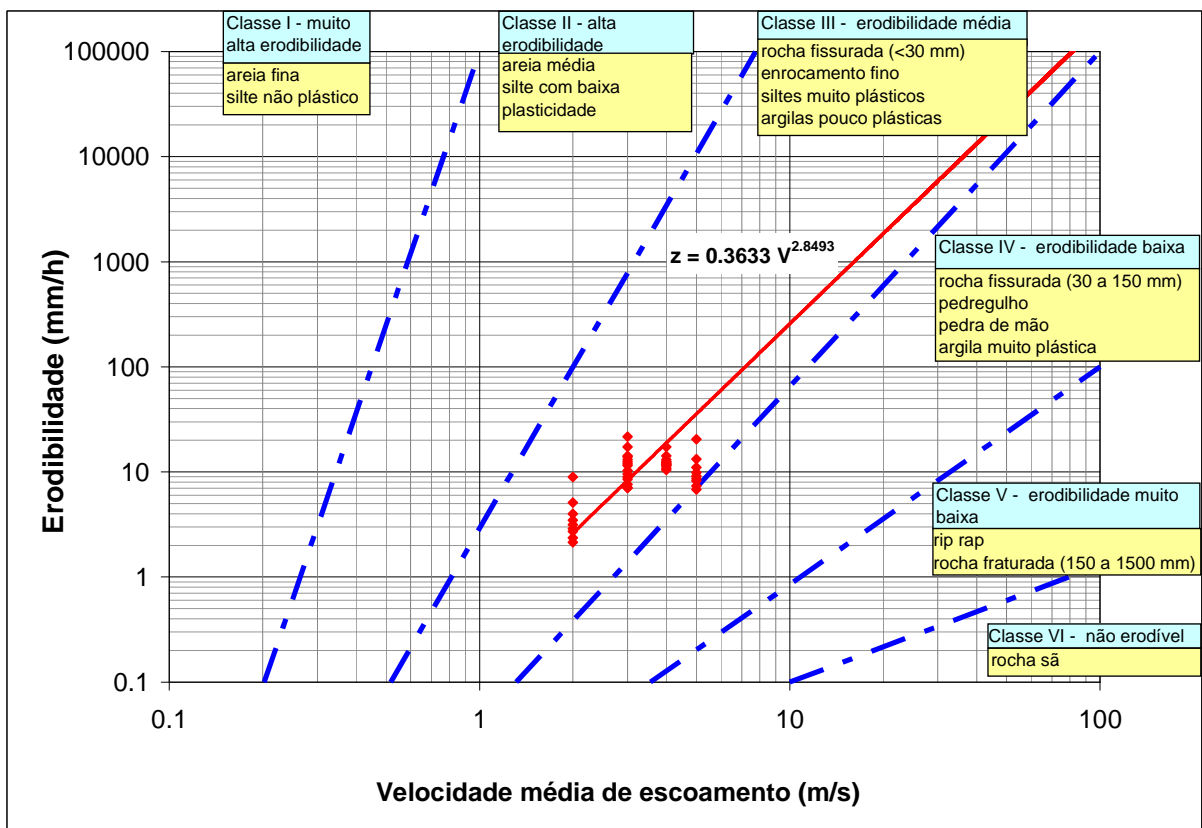


Figura 5.10: Erodibilidade versus velocidade média de escoamento para GC igual a 100%.

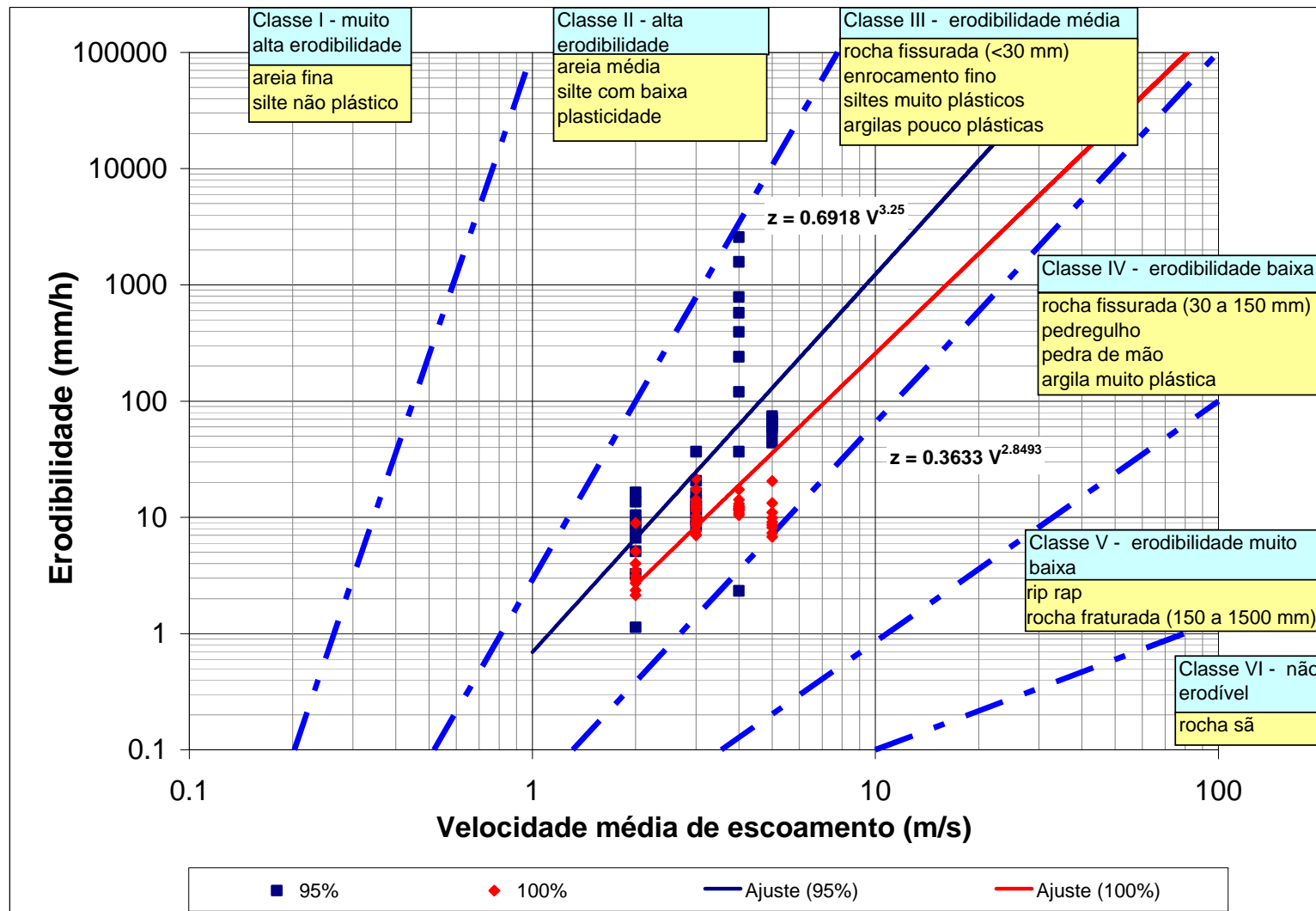


Figura 5.11: Enquadramento da erodibilidade do solo pela velocidade de escoamento segundo Braud (2008).

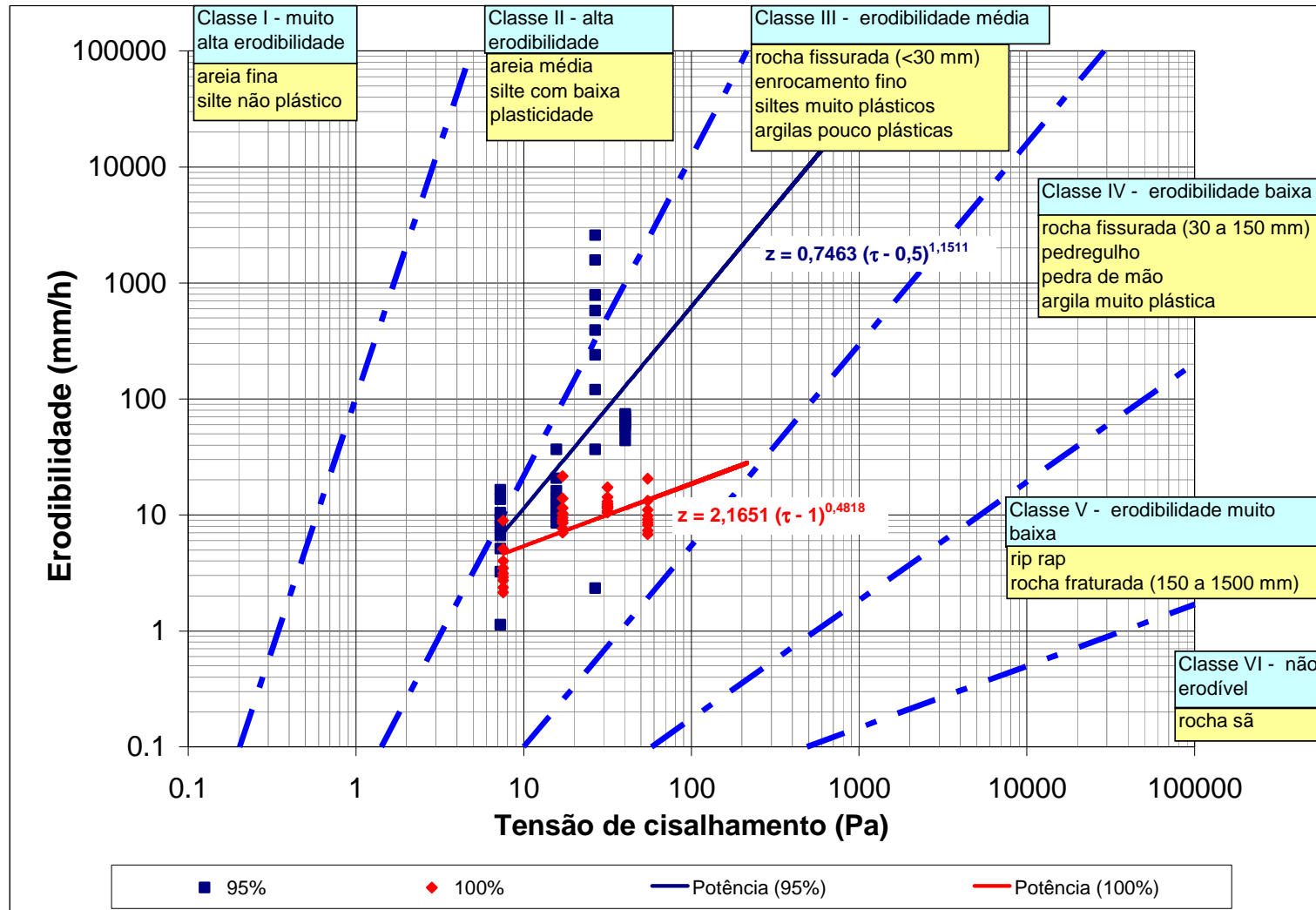


Figura 5.12: Enquadramento da erodibilidade do solo pela tensão de cisalhamento de escoamento segundo Briaud (2008).

5.2 Observação e análise dos testes de erodibilidade em camadas oblíquas

Na ocorrência de galgamento sobre um maciço de barragem, ocorrem dois fenômenos na evolução da erosão no talude: erosão por excesso de tensão cisalhante e erosão por variação da quantidade de movimento. A Figura 5.13 apresenta uma ampliação da seção do maciço da barragem com o objetivo de explicitar estes outros mecanismos.

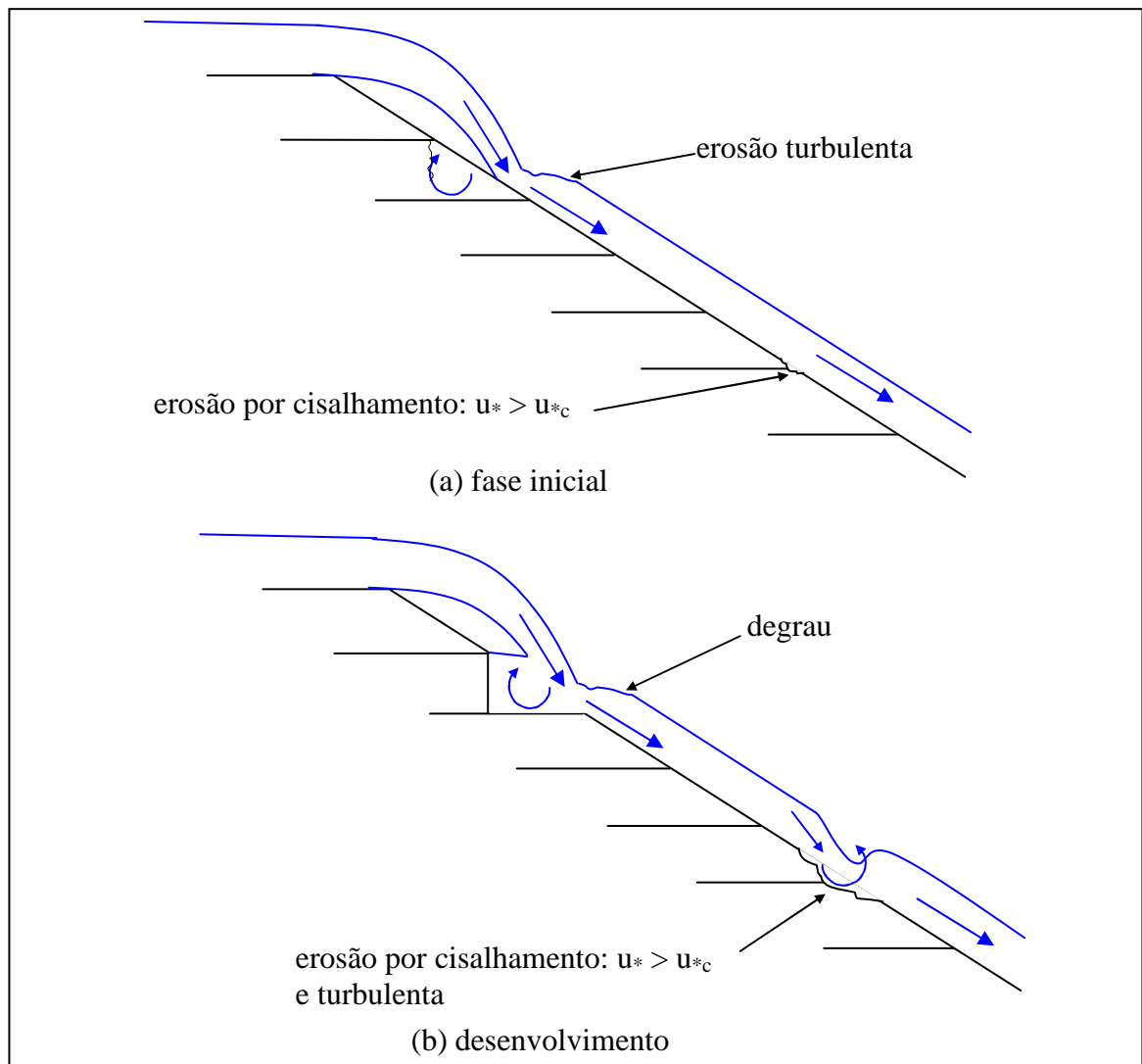


Figura 5.13: Evolução dos processos erosivos.

A erosão por excesso de tensão cisalhante é aquela causada pela tensão de cisalhamento associada ao escoamento ao longo do talude superior à crítica do material no respectivo grau de compactação. Nota-se a tendência de início do processo nas juntas de compactação do maciço.

A erosão causada pela variação da quantidade de movimento ocorre segundo dois mecanismos distintos. No primeiro, logo após a crista, o perfil da linha de água se descola do talude por efeito de inércia, formando um perfil Creager. A linha de água encontra o talude logo a jusante, conforme a vazão, em direção de escoamento não paralela ao talude.

Este fenômeno pôde ser observado pela construção de maciço em solo não compactado, com taludes 1V:2H a montante e a jusante, altura total de 30 cm e largura de crista igual a 6 cm, em canal prismático, com seção retangular revestido em vidro temperado, fundo plano e extensão de 10 m (Figura 5.14).



Figura 5.14: Detalhe do processo erosivo observado durante os ensaios no canal do laboratório (solo solto).

A imposição da mudança de direção no escoamento a partir do ponto de impacto a jusante provoca a variação na quantidade de movimento (Figura 5.13 a), que vai potencializar o processo erosivo inserindo um momento na camada de compactação em que o escoamento primeiro incide. Formam-se trincas, levando por fim ao arrancamento de uma cunha da camada, formando um degrau (Figura 5.13 b). Desta forma, estão também implícitos esforços de tração na camada decorrentes da dissipação do momento imposto pelo escoamento.

No segundo caso de erosão por variação de quantidade de movimento, a erosão decorrente do excesso de tensão cisalhante começa a se formar, preferencialmente nas juntas de compactação (Figura 5.13 a). A erosão começa a formar sulcos transversais cada vez mais profundos, induzindo a variação da quantidade de movimento progressivamente maior, que vai também contribuir para a intensificação do processo erosivo (Figura 5.13 b). Estes dois

fenômenos correspondem ao segundo e terceiro termos da função erodibilidade, conforme proposto por Briaud (2008), apresentado na equação 3.21.

Para confirmar os mecanismos descritos, foram construídos 3 maciços na geometria apresentada na Figura 4.30 utilizando o solo testado em diferentes graus de compactação quando submetidos a um escoamento com vazão de 10 L/s: solo solto na umidade natural, apenas levemente compactado por placa com dimensões de 0,30 m x 0,40 m; solo compactado a 95% de GC; solo compactado a 100% de GC. Todos os maciços foram compactados em camadas de aproximadamente 3 cm de altura final.

Outro objetivo destes testes era confirmar se a diferenciação em termos de erodibilidade do solo era mantida conforme se varia o GC quando entram em ação outros mecanismos de erosão. Os testes foram filmados e fotografados.

Em relação ao solo compactado na umidade natural (estado solto), verificou-se comportamento de partícula, típico transporte de sedimentos, atribuído à pouca ligação entre grãos. O material após disposto no canal se desfazia ao toque das mãos. A ruptura completa se deu 40 s após o início do galgamento, tendo a geometria do maciço evoluído até um perfil semelhante ao de asa de avião, até todo o material ser completamente removido (Figura 5.15).

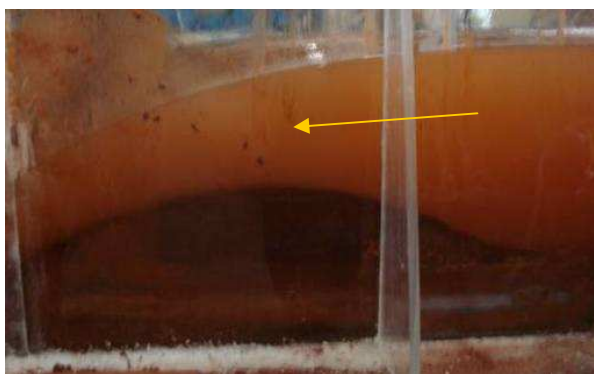


Figura 5.15: Perfil de erosão no solo solto.

A Figura 5.16 apresenta uma sequência de imagens ilustrativas da evolução do processo erosivo no maciço compactado a 95% de GC.



(a) Início do teste



(b) Formação de fossas



(c) Ruptura do pé



(d) Deflexão do escoamento



(e) Lâmina em perfil Creager



(f) Fim do teste

Figura 5.16: Sequência de evolução do processo erosivo a 95% de GC.

Em relação ao solo compactado a 95% de GC, verificou-se comportamento de aglomerados de partículas, sendo que o processo erosivo se deu segundo o destacamento de placas do maciço, em alguns casos iguais à espessura da camada de compactação.

Este destacamento provoca a formação de um degrau, que deflete o escoamento, agregando efeitos dissipativos (ressalto) e de subpressão (descolamento da lâmina), intensificando o processo erosivo. O ensaio foi realizado ao longo de 43 minutos.

A ruptura foi parcial (Figura 5.16), o que foi atribuído ao fato de o canal não permitir erosão a partir do instante em que o fundo é atingido (Figura 5.16 c) e, portanto, não permitindo a desestabilização das camadas mais a montante, onde a erosão é menor devido às velocidades de escoamento observadas.

A Figura 5.17 mostra a seção transversal do maciço na configuração final após o ensaio, em que se observa o mecanismo de ruptura segundo as camadas de compactação.



Figura 5.17: Vista de jusante da seção transversal do maciço com GC 95% após o teste.

O mesmo ensaio foi realizado no maciço compactado a 100% de GC, não se observando qualquer ruptura, apenas a erosão por destacamento de placas. Inspeccionando-se o maciço, observou-se que apresentava resistência à pressão dos dedos bastante superior aos demais realizados.

Durante o ensaio observou-se, que após a lavagem inicial da superfície que removeu o material mais solto, o processo erosivo se destacava nas juntas de compactação, tanto ao longo das camadas, quanto das juntas causadas pela justaposição dos golpes de compactação. A Figura 5.18 apresenta uma sequência de imagens ilustrativas da evolução do processo erosivo no maciço compactado a 100% de GC.



(a) Início do teste



(b) Erosão cisalhante



(c) Fim do teste

Figura 5.18: Vista de jusante da seção transversal do maciço com GC 100% após o teste.

Como se observa na sequência de fotos apresentadas na Figura 5.18, o escoamento ocorreu sem grandes perturbações, ao longo de cerca de 1,5 h. Este comportamento foi atribuído à erodibilidade reduzida do solo quando compactado a 100% de GC em relação à erodibilidade do solo compactado a 95% de GC, para as mesmas condições de escoamento. A menor erodibilidade retarda a formação das fossas e o início da atuação dos outros mecanismos erosivos que potencializam a erosão e o desenvolvimento da brecha.

6 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso pretende exemplificar a aplicação da metodologia proposta, de forma a visualizar como pode ser feita a avaliação do custo incremental no sentido de ampliar o tempo de ruptura do maciço, atenuar o a hidrógrafa de saída da barragem quando de um evento catastrófico e assim obter maior prazo para remoção de habitantes na área a ser inundada quando da ruptura da barragem.

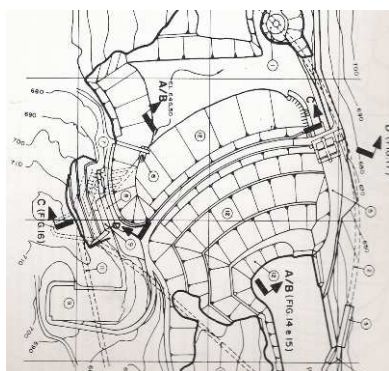
O estudo ora desenvolvido tem caráter apenas ilustrativo da aplicação da metodologia proposta, para demonstrar o ganho em termos de resistência à erosão do maciço em função do aumento do grau de compactação. Neste sentido, desenvolveu-se uma análise de ruptura da UHE Euclides da Cunha, colapsada por galgamento em 1977 e reconstruída posteriormente (CBGB, 1982b).

Apenas para ilustrar esta aplicação, foram admitidos como representativos do material componente do maciço dessa UHE os resultados dos ensaios realizados com o solo estudado neste trabalho, caracterizado nos itens 5.1 a 5.3. A ficha cadastral dessa UHE é apresentada na Tabela 6.1 a seguir. A Figura 6.1 mostra a barragem como reconstruída a partir de 1997.

Tabela 6.1 – Ficha cadastral da barragem estudada.

| Tipo de estrutura | Dados |
|-----------------------------------|--|
| BARRAGEM: | |
| Maciço | solo compactado |
| Altura máxima (m) | 60 |
| Largura de crista (m) | 10 |
| Extensão da crista(m) | 312 |
| Declividade do talude de jusante | 1V:2,4H |
| Declividade do talude de montante | 1V:3,3H até a El. 665,00 m 1V:2,4 H da El. 665,00 m em diante |
| RESERVATÓRIO: | |
| Nível máximo normal (m) | 665,00 |
| Nível de máxima cheia (m) | 668,95 |
| Elevação da crista (m) | 671,50 |
| Área inundada (km ²) | 4,3 |
| Volume total (hm ³) | 13,4 |
| DADOS GERAIS | |
| Início de construção | 1958 |
| Início de operação | 1960 |
| Colapso | 1977 (jan) |
| Início de reconstrução | 1977 (abril) |
| Fim da reconstrução | 1981 (março) |

Fonte: CBGB (1982b).



(a) Esquema da barragem em estudo.
 Fonte: CBGB (1982b).



(b) Vista geral da barragem.
 Fonte: Google (2008).

Figura 6.1: Barragem como reconstruída a partir de 1997.

A hidrógrafa a ser utilizada no estudo de caso é a mesma que atingiu o barramento em janeiro de 1977. A Figura 6.2 mostra a hidrógrafa de entrada. Já as Figuras de 6.2 a 6.5 mostram detalhes do maciço

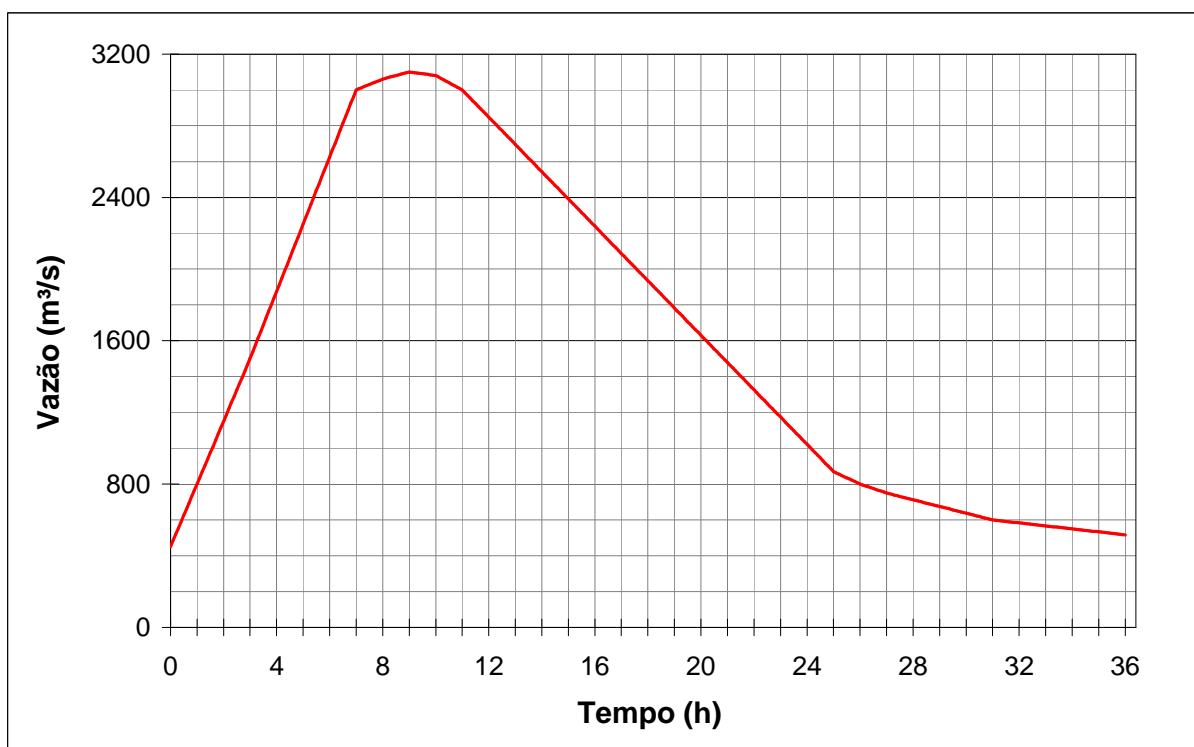


Figura 6.2: Hidrógrafa de entrada ao reservatório no evento de cheia em 1977.
 Fonte: CBGB (1982b).

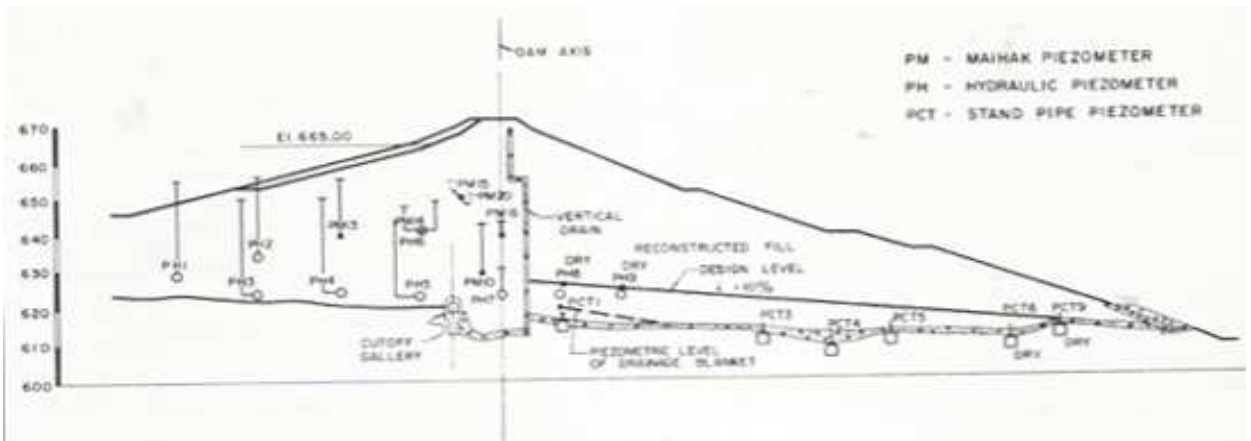
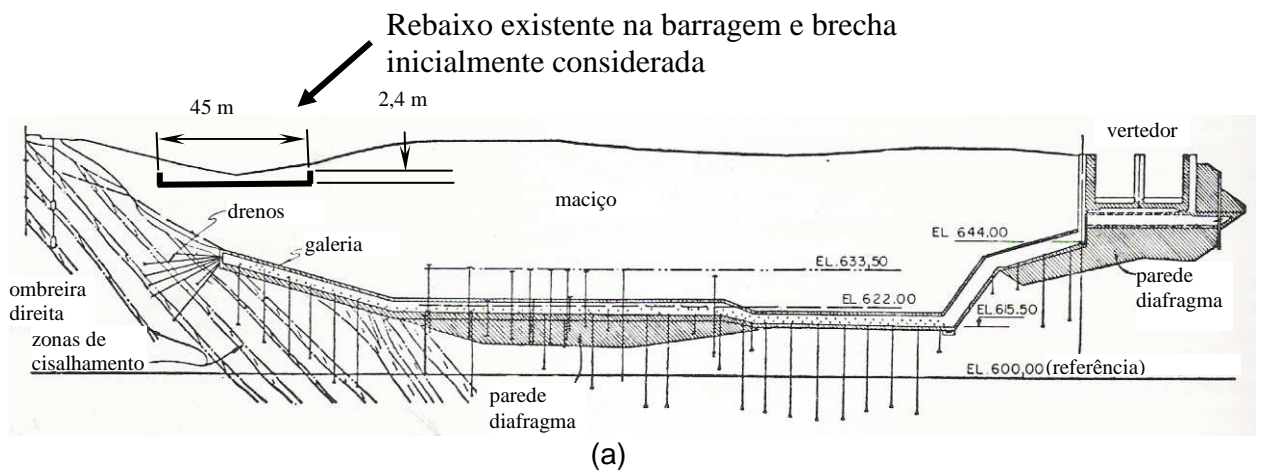


Figura 6.3: Corte transversal da barragem.

Fonte: CBGB (1982b).



(a)

Fonte: CBGB (1982b).



(b)

Fonte: Google (2008).

Figura 6.4: Corte longitudinal da barragem e vista aérea frontal.

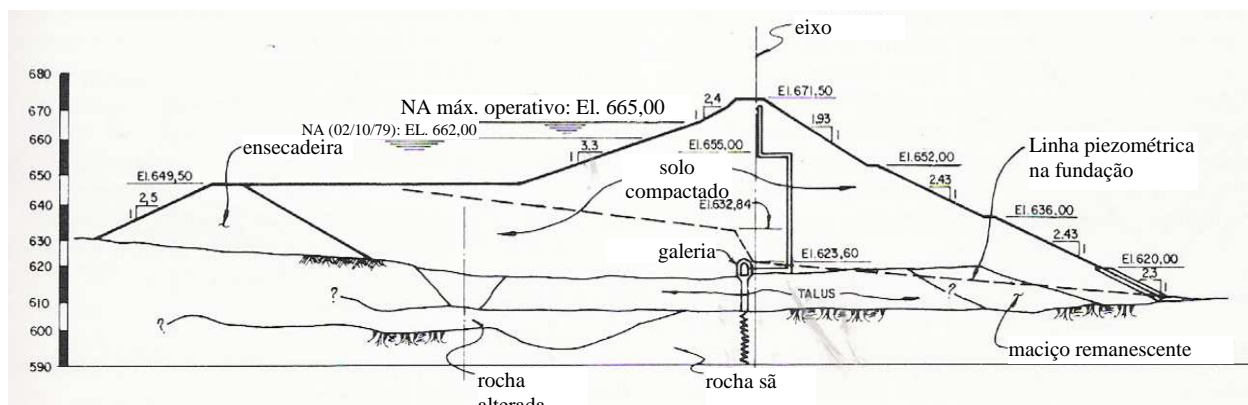


Figura 6.5: Corte longitudinal da barragem na seção de ruptura.

Fonte: CBGB (1982b).

A curva cota volume é dada pela equação a seguir (CBGB, 1982b):

$$V_r = 274.231(NA - 623) + 200.000.000 \quad (6.1)$$

na qual:

V_r é o volume do reservatório acumulado [L^3];

NA é o nível de água no reservatório [L].

A simulação das rupturas foi realizada em planilha eletrônica, com discretização temporal de 0,1 h. O procedimento de cálculo seguiu os seguintes passos, considerando que a ruptura se dará na ombreira direita no mesmo local em que se desenvolveu a brecha e, na reconstrução, foi deixado um rebaixo na crista da barragem (Figura 6.4):

- partindo do reservatório cheio (NA = 671,50 m) e vazão efluente praticamente nula (0,1 m³/s) e largura de brecha de 45 m, calcula-se a velocidade de escoamento a cada metro em que se avança no talude de jusante a partir da crista, considerando regime de escoamento gradualmente variado, ou seja:

$$U_L = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot g \cdot H_L}{R_h^{4/3} \cdot n^2 \cdot L}} \quad (6.2)$$

na qual:

L é a distância horizontal [L], medida a partir da crista do barramento;

H_L é a carga hidráulica total [L], avaliada no ponto L m a jusante da crista.

U_L é a velocidade a L m a jusante da crista [$L \cdot T^{-1}$];

g é a aceleração da gravidade [$L \cdot T^{-2}$];

n é o coeficiente de rugosidade de Manning [$T \cdot L^{-1/3}$];

R_h é o raio hidráulico [L].

Este processo é resolvido iterativamente, visto que o raio hidráulico é função da velocidade de escoamento e vice-versa. A carga hidráulica total (H_L) é calculada em cada ponto a jusante do maciço pela expressão:

$$H_L = z + \frac{U_c^2}{2 \cdot g} + y_c \quad (6.3)$$

na qual:

z é o desnível em relação à crista [L];

U_c é a velocidade de escoamento na crista, admitida igual à velocidade crítica [$L.T^{-1}$]

y_c ; é a profundidade de escoamento crítica [L];

g é a aceleração da gravidade [$L.T^{-2}$].

- a partir das velocidades de escoamento no talude jusante previamente determinadas, calcula-se em cada ponto do talude a erosão total causada pelo escoamento, utilizando as funções de erodibilidade obtidas para o GC analisado (Figura 5.11);
- este rebaixamento é processado de forma contínua, dando origem ao processo erosivo. No entanto, não se permite erosão na fundação (El. 623,0 m), por considerar que o material aluvionar foi previamente removido, estando o maciço em contato a material resistente (rocha);
- uma vez que as velocidades são maiores na medida em que se afasta para jusante a partir da crista, devido à transformação de energia potencial em cinética, maiores são as camadas erodidas, resultando na acentuação progressiva do talude de jusante. Ao atingir declividades longitudinais superiores a 1V:1H, considerou-se que o talude rompe e volta a ter declividade longitudinal 1V:1H, admitida como a geometria mínima estável (FS=1,0) para o próximo intervalo de tempo;
- os rebaixamentos da crista e rupturas de talude de jusante liberam volume armazenado no reservatório de montante. Este volume é liberado a partir da laminação das vazões afluentes pelo método de Puls (CHOW, 1988), reconstruindo-se as curvas de interpolação a cada intervalo de tempo, visto que a soleira vertente rebaixa e tem sua geometria alterada a cada intervalo de tempo.

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados das simulações na forma de planilhas de cálculo e o resumo dos resultados, respectivamente.

Tabela 6.2 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 95% de GC.

| Tempo (h) | Vazão afluente (m³/s) | Nível de água (m) | Volume reservado (m³) | Nível do fundo da brecha (m) | Largura da brecha (m) | Vazão efluente (m³/s) | Crista | | | Talude | | | |
|-----------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | | | | Altura da brecha (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Lâmina de água (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Declividade (S - 1V:SH) |
| 0,0 | 450,0 | 671,50 | 13,300,192 | 671,50 | 45,0 | 0,0 | 0,0 | 0,28 | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 0,00 | 2,00 |
| 1,0 | 800,0 | 675,27 | 14,333,865 | 670,71 | 45,0 | 708,4 | 0,8 | 10,73 | 1,55 | 0,84 | 18,79 | 9,55 | 1,54 |
| 2,0 | 1115,0 | 675,21 | 14,317,605 | 668,71 | 45,0 | 1191,9 | 2,8 | 12,76 | 2,72 | 1,14 | 23,33 | 19,30 | 1,02 |
| 2,1 | 1150,0 | 675,10 | 14,287,760 | 668,43 | 45,0 | 1238,9 | 3,1 | 12,93 | 2,83 | 1,16 | 23,81 | 20,62 | 0,97 |
| 2,2 | 1185,0 | 674,95 | 14,247,515 | 668,00 | 45,0 | 1319,6 | 3,5 | 13,10 | 2,96 | 1,15 | 25,44 | 25,59 | 0,94 |
| 2,3 | 1220,0 | 674,69 | 14,174,358 | 667,14 | 45,0 | 1491,8 | 4,4 | 13,36 | 3,16 | 1,27 | 26,18 | 28,08 | 0,94 |
| 2,4 | 1255,0 | 674,18 | 14,036,492 | 665,79 | 45,0 | 1749,1 | 5,7 | 13,81 | 3,51 | 1,44 | 27,05 | 31,24 | 0,93 |
| 2,5 | 1290,0 | 673,36 | 13,810,967 | 664,03 | 45,0 | 2048,8 | 7,5 | 14,39 | 4,01 | 1,64 | 27,78 | 34,06 | 0,93 |
| 2,6 | 1325,0 | 672,18 | 13,485,582 | 661,86 | 45,0 | 2373,9 | 9,6 | 14,98 | 4,57 | 1,86 | 28,38 | 36,50 | 0,92 |
| 2,7 | 1360,0 | 670,57 | 13,045,816 | 659,17 | 45,0 | 2754,2 | 12,3 | 15,56 | 5,17 | 2,13 | 28,71 | 37,88 | 0,92 |
| 2,8 | 1395,0 | 668,48 | 12,471,540 | 655,89 | 45,0 | 3191,2 | 15,6 | 16,16 | 5,85 | 2,46 | 28,87 | 38,57 | 0,91 |
| 2,9 | 1430,0 | 665,94 | 11,776,661 | 652,53 | 45,0 | 3494,2 | 19,0 | 16,75 | 6,58 | 2,71 | 28,63 | 37,54 | 0,91 |
| 3,0 | 1465,0 | 663,16 | 11,011,799 | 649,32 | 45,0 | 3650,0 | 22,2 | 17,15 | 7,11 | 2,89 | 28,11 | 35,37 | 0,91 |
| 3,1 | 1500,0 | 660,29 | 10,225,280 | 646,34 | 45,0 | 3684,6 | 25,2 | 17,37 | 7,40 | 2,99 | 27,42 | 32,64 | 0,91 |
| 3,2 | 1537,5 | 657,48 | 9,455,936 | 643,68 | 50,3 | 3627,1 | 27,8 | 17,26 | 7,26 | 2,73 | 26,35 | 28,69 | 0,91 |
| 3,3 | 1575,0 | 654,62 | 8,672,327 | 641,32 | 55,6 | 3838,8 | 30,2 | 17,08 | 7,01 | 2,71 | 25,43 | 25,54 | 0,91 |
| 3,4 | 1612,5 | 651,68 | 7,864,753 | 639,26 | 60,4 | 3835,2 | 32,2 | 16,62 | 6,41 | 2,62 | 24,29 | 22,02 | 0,92 |
| 3,5 | 1650,0 | 648,88 | 7,095,849 | 637,41 | 64,5 | 3699,0 | 34,1 | 16,03 | 5,70 | 2,47 | 23,19 | 18,92 | 0,92 |
| 3,6 | 1687,5 | 646,36 | 6,406,959 | 635,88 | 68,2 | 3465,7 | 35,6 | 15,44 | 5,05 | 2,30 | 22,06 | 16,09 | 0,93 |
| 3,7 | 1725,0 | 644,20 | 5,812,790 | 634,54 | 71,2 | 3247,7 | 37,0 | 14,89 | 4,48 | 2,17 | 21,05 | 13,83 | 0,93 |
| 3,8 | 1762,5 | 642,35 | 5,306,740 | 633,37 | 73,9 | 3051,2 | 38,1 | 14,42 | 4,04 | 2,05 | 20,17 | 12,03 | 0,93 |
| 3,9 | 1800,0 | 640,79 | 4,878,327 | 632,34 | 75,0 | 2891,4 | 39,2 | 14,07 | 3,73 | 1,98 | 19,43 | 10,66 | 0,93 |
| 4,0 | 1875,0 | 638,42 | 4,228,344 | 630,63 | 75,0 | 2604,0 | 40,9 | 13,63 | 3,37 | 1,91 | 18,22 | 8,65 | 0,94 |
| 4,1 | 1912,5 | 637,52 | 3,981,956 | 629,83 | 75,0 | 2552,3 | 41,7 | 13,54 | 3,30 | 1,91 | 17,81 | 8,03 | 0,94 |

Tabela 6.2 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 95% de GC. (continuação)

| Tempo (h) | Vazão afluente (m³/s) | Nível de água (m) | Volume reservado (m³) | Nível do fundo da brecha (m) | Largura da brecha (m) | Vazão efluente (m³/s) | Crista | | | Talude | | | |
|------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | | | | Altura da brecha (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Lâmina de água (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Declividade (S - 1V:SH) |
| 4,2 | 1950,0 | 636,73 | 3,765,134 | 629,12 | 75,0 | 2514,7 | 42,4 | 13,53 | 3,28 | 1,92 | 17,42 | 7,48 | 0,94 |
| 4,3 | 1987,5 | 636,03 | 3,573,440 | 628,47 | 75,0 | 2487,7 | 43,0 | 13,53 | 3,28 | 1,94 | 17,06 | 6,98 | 0,94 |
| 4,4 | 2025,0 | 635,40 | 3,399,118 | 627,82 | 75,0 | 2493,2 | 43,7 | 13,54 | 3,29 | 1,98 | 16,78 | 6,61 | 0,94 |
| 4,5 | 2062,5 | 634,81 | 3,238,009 | 627,24 | 75,0 | 2489,3 | 44,3 | 13,58 | 3,33 | 2,01 | 16,48 | 6,23 | 0,94 |
| 4,6 | 2100,0 | 633,19 | 2,793,045 | 626,72 | 75,0 | 4145,2 | 44,8 | 13,53 | 3,29 | 3,41 | 16,21 | 5,91 | 0,94 |
| 4,7 | 2137,5 | 631,05 | 2,207,842 | 626,31 | 75,0 | 3343,5 | 45,2 | 11,94 | 2,19 | 3,06 | 14,59 | 4,19 | 0,95 |
| 4,8 | 2175,0 | 629,96 | 1,909,828 | 625,98 | 75,0 | 2624,7 | 45,5 | 10,99 | 1,67 | 2,59 | 13,53 | 3,28 | 0,95 |
| 4,9 | 2212,5 | 629,51 | 1,785,923 | 625,72 | 75,0 | 2451,2 | 45,8 | 10,78 | 1,57 | 2,49 | 13,11 | 2,97 | 0,95 |
| 5 | 2250,0 | 629,20 | 1,701,399 | 625,47 | 75,0 | 2480,9 | 46,0 | 10,75 | 1,56 | 2,56 | 12,90 | 2,82 | 0,95 |
| 5,5 | 2437,5 | 629,54 | 1,794,182 | 624,27 | 75,0 | 1465,3 | 47,2 | 11,49 | 1,93 | 1,55 | 12,64 | 2,63 | 0,95 |
| 6 | 2625,0 | 630,50 | 2,057,618 | 623,00 | 75,0 | 2617,4 | 48,5 | 13,99 | 3,66 | 2,49 | 14,01 | 3,68 | 0,00 |
| 7 | 3000,0 | 631,10 | 2,221,000 | 623,00 | 75,0 | 2947,4 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 8 | 3060,0 | 631,29 | 2,273,092 | 623,00 | 75,0 | 3051,7 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | 3100,0 | 631,37 | 2,294,296 | 623,00 | 75,0 | 3094,5 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 3080,0 | 631,35 | 2,288,479 | 623,00 | 75,0 | 3082,7 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 11 | 3000,0 | 631,22 | 2,252,871 | 623,00 | 75,0 | 3011,1 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 12 | 2847,9 | 630,96 | 2,181,552 | 623,00 | 75,0 | 2869,2 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 13 | 2695,7 | 630,67 | 2,103,940 | 623,00 | 75,0 | 2717,5 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 14 | 2543,6 | 630,38 | 2,024,875 | 623,00 | 75,0 | 2565,7 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 15 | 2391,4 | 630,09 | 1,944,255 | 623,00 | 75,0 | 2414,0 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 16 | 2239,3 | 629,79 | 1,861,949 | 623,00 | 75,0 | 2262,4 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 17 | 2087,1 | 629,48 | 1,777,807 | 623,00 | 75,0 | 2110,8 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 18 | 1935,0 | 629,17 | 1,691,656 | 623,00 | 75,0 | 1959,2 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 19 | 1782,9 | 628,85 | 1,603,281 | 623,00 | 75,0 | 1807,7 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |

Tabela 6.2 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 95% de GC. (continuação)

| Tempo (h) | Vazão afluente (m³/s) | Nível de água (m) | Volume reservado (m³) | Nível do fundo da brecha (m) | Largura da brecha (m) | Vazão efluente (m³/s) | Crista | | | Talude | | | |
|-----------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | | | | Altura da brecha (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Lâmina de água (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Declividade (S - 1V:SH) |
| 20 | 1645,9 | 628,55 | 1,521,652 | 623,00 | 75,0 | 1671,5 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 21 | 1493,8 | 628,21 | 1,428,354 | 623,00 | 75,0 | 1520,1 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 22 | 1341,6 | 627,86 | 1,331,975 | 623,00 | 75,0 | 1368,9 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 23 | 1189,5 | 627,49 | 1,232,063 | 623,00 | 75,0 | 1217,8 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 24 | 1037,4 | 627,11 | 1,128,045 | 623,00 | 75,0 | 1066,9 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 25 | 885,2 | 626,72 | 1,019,169 | 623,00 | 75,0 | 916,2 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 26 | 807,0 | 626,46 | 948,094 | 623,00 | 75,0 | 822,1 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 27 | 755,0 | 626,30 | 904,434 | 623,00 | 75,0 | 765,9 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 28 | 716,2 | 626,18 | 871,603 | 623,00 | 75,0 | 724,6 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 29 | 678,7 | 626,07 | 841,342 | 623,00 | 75,0 | 687,2 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 30 | 641,2 | 625,96 | 810,570 | 623,00 | 75,0 | 649,9 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 31 | 603,7 | 625,84 | 779,213 | 623,00 | 75,0 | 612,6 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 32 | 585,0 | 625,77 | 759,188 | 623,00 | 75,0 | 589,1 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 33 | 568,3 | 625,72 | 744,735 | 623,00 | 75,0 | 572,3 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 34 | 551,7 | 625,66 | 730,239 | 623,00 | 75,0 | 555,7 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 35 | 535,0 | 625,61 | 715,605 | 623,00 | 75,0 | 539,1 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |
| 36 | 518,3 | 625,56 | 700,802 | 623,00 | 75,0 | 522,5 | 48,5 | - | - | - | - | - | - |

Tabela 6.3 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 100% de GC.

| Tempo (h) | Vazão afluente (m³/s) | Nível de água (m) | Volume reservado (m³) | Nível do fundo da brecha (m) | Largura da brecha (m) | Vazão efluente (m³/s) | Crista | | | Talude | | | |
|------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | | | | Altura da brecha (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Lâmina de água (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Declividade (S - 1V:SH) |
| 0,0 | 450,0 | 671,50 | 13,300,192 | 671,50 | 45,0 | 0,1 | 0,0 | 0,28 | 0,28 | 0,00 | 0,58 | 0,00 | 2,00 |
| 1,0 | 800,0 | 675,52 | 14,401,232 | 671,34 | 45,0 | 647,8 | 0,2 | 10,41 | 10,41 | 0,80 | 17,96 | 1,36 | 1,90 |
| 2,0 | 1115,0 | 676,73 | 14,734,205 | 670,99 | 45,0 | 1041,2 | 0,5 | 12,20 | 12,20 | 1,10 | 21,13 | 2,16 | 1,79 |
| 3,0 | 1465,0 | 677,51 | 14,947,374 | 670,46 | 45,0 | 1417,8 | 1,0 | 13,52 | 13,52 | 1,35 | 23,39 | 2,89 | 1,65 |
| 4,0 | 1837,5 | 678,05 | 15,095,969 | 669,76 | 45,0 | 1804,1 | 1,7 | 14,65 | 14,65 | 1,59 | 25,28 | 3,61 | 1,51 |
| 5,0 | 2250,0 | 678,39 | 15,188,668 | 668,82 | 45,0 | 2236,3 | 2,7 | 15,74 | 15,74 | 1,84 | 27,03 | 4,36 | 1,36 |
| 6,0 | 2625,0 | 677,96 | 15,072,790 | 667,84 | 45,0 | 2434,5 | 3,7 | 16,19 | 16,19 | 1,94 | 27,86 | 4,76 | 1,23 |
| 7,0 | 3000,0 | 677,44 | 14,929,009 | 666,72 | 45,0 | 2653,3 | 4,8 | 16,66 | 16,66 | 2,06 | 28,67 | 5,17 | 1,10 |
| 8,0 | 3060,0 | 677,47 | 14,937,834 | 665,45 | 45,0 | 3145,7 | 6,0 | 17,63 | 17,63 | 2,31 | 30,33 | 6,06 | 0,99 |
| 9,0 | 3100,0 | 674,47 | 14,115,491 | 661,87 | 45,0 | 3379,2 | 9,6 | 17,93 | 17,93 | 2,49 | 30,14 | 5,95 | 0,99 |
| 9,1 | 3098,0 | 674,10 | 14,013,941 | 661,49 | 45,0 | 3383,0 | 10,0 | 17,94 | 17,94 | 2,50 | 30,05 | 5,90 | 0,99 |
| 9,2 | 3096,0 | 673,73 | 13,910,719 | 661,11 | 45,0 | 3384,5 | 10,4 | 17,94 | 17,94 | 2,51 | 29,99 | 5,87 | 0,99 |
| 9,3 | 3094,0 | 673,35 | 13,806,507 | 660,73 | 45,0 | 3384,5 | 10,8 | 17,94 | 17,94 | 2,51 | 29,93 | 5,83 | 0,99 |
| 9,4 | 3092,0 | 672,96 | 13,701,720 | 660,35 | 45,0 | 3383,7 | 11,2 | 17,94 | 17,94 | 2,52 | 29,86 | 5,80 | 0,99 |
| 9,5 | 3090,0 | 672,58 | 13,596,604 | 659,97 | 45,0 | 3382,3 | 11,5 | 17,93 | 17,93 | 2,52 | 29,79 | 5,76 | 0,99 |
| 10,0 | 3080,0 | 670,66 | 13,069,578 | 658,07 | 45,0 | 3372,9 | 13,4 | 17,92 | 17,92 | 2,55 | 29,38 | 5,54 | 0,99 |
| 11,0 | 3000,0 | 666,71 | 11,986,463 | 654,31 | 45,0 | 3297,7 | 17,2 | 17,79 | 17,79 | 2,57 | 28,49 | 5,07 | 0,99 |
| 12,0 | 2847,9 | 662,75 | 10,899,948 | 650,72 | 45,0 | 3148,0 | 20,8 | 17,51 | 17,51 | 2,55 | 27,44 | 4,56 | 0,99 |
| 13,0 | 2695,7 | 658,80 | 9,817,213 | 647,39 | 47,6 | 3035,7 | 24,1 | 17,05 | 17,05 | 2,44 | 26,18 | 3,99 | 0,99 |
| 14,0 | 2543,6 | 654,63 | 8,674,658 | 644,59 | 53,3 | 2825,2 | 26,9 | 16,03 | 16,03 | 2,16 | 24,53 | 3,31 | 0,99 |
| 15,0 | 2391,4 | 651,32 | 7,765,882 | 642,31 | 58,0 | 2618,0 | 29,2 | 15,19 | 15,19 | 1,95 | 23,20 | 2,83 | 0,99 |
| 16,0 | 2239,3 | 648,59 | 7,018,203 | 640,39 | 61,9 | 2429,8 | 31,1 | 14,51 | 14,51 | 1,78 | 22,06 | 2,45 | 0,99 |
| 17,0 | 2087,1 | 646,28 | 6,383,896 | 638,76 | 65,2 | 2249,4 | 32,7 | 13,90 | 13,90 | 1,64 | 21,00 | 2,13 | 0,99 |
| 18,0 | 1935,0 | 644,27 | 5,833,680 | 637,35 | 68,0 | 2077,0 | 34,1 | 13,34 | 13,34 | 1,52 | 20,04 | 1,86 | 0,99 |

Tabela 6.3 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura a 100% de GC. (continuação)

| Tempo (h) | Vazão afluente (m³/s) | Nível de água (m) | Volume reservado (m³) | Nível do fundo da brecha (m) | Largura da brecha (m) | Vazão efluente (m³/s) | Crista | | | Talude | | | |
|-----------|-----------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| | | | | | | | Altura da brecha (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Lâmina de água (m) | Velocidade (m/s) | Erosão (m/h) | Declividade (S - 1V:SH) |
| 19,0 | 1782,9 | 642,51 | 5,350,077 | 636,13 | 70,5 | 1907,8 | 35,4 | 12,82 | 12,82 | 1,41 | 19,23 | 1,65 | 0,99 |
| 20,0 | 1645,9 | 641,09 | 4,961,881 | 635,17 | 72,5 | 1757,6 | 36,3 | 12,36 | 12,36 | 1,31 | 18,50 | 1,48 | 0,99 |
| 21,0 | 1493,8 | 639,69 | 4,576,472 | 634,22 | 74,4 | 1597,4 | 37,3 | 11,87 | 11,87 | 1,22 | 17,66 | 1,30 | 0,99 |
| 22,0 | 1341,6 | 638,46 | 4,240,669 | 633,43 | 75,0 | 1428,1 | 38,1 | 11,40 | 11,40 | 1,12 | 16,97 | 1,16 | 0,99 |
| 23,0 | 1189,5 | 637,38 | 3,942,743 | 632,73 | 75,0 | 1267,1 | 38,8 | 10,96 | 10,96 | 1,03 | 16,34 | 1,04 | 0,99 |
| 24,0 | 1037,4 | 636,38 | 3,669,109 | 632,12 | 75,0 | 1112,0 | 39,4 | 10,49 | 10,49 | 0,94 | 15,72 | 0,93 | 0,99 |
| 25,0 | 885,2 | 635,45 | 3,414,927 | 631,61 | 75,0 | 952,1 | 39,9 | 9,97 | 9,97 | 0,85 | 14,99 | 0,81 | 0,99 |
| 26,0 | 807,0 | 634,74 | 3,220,584 | 631,17 | 75,0 | 855,1 | 40,3 | 9,62 | 9,62 | 0,79 | 14,43 | 0,73 | 0,99 |
| 27,0 | 755,0 | 634,16 | 3,061,290 | 630,76 | 75,0 | 795,6 | 40,7 | 9,39 | 9,39 | 0,75 | 14,13 | 0,69 | 0,99 |
| 28,0 | 716,2 | 633,69 | 2,932,751 | 630,42 | 75,0 | 750,0 | 41,1 | 9,21 | 9,21 | 0,73 | 13,78 | 0,64 | 0,99 |
| 29,0 | 678,7 | 633,26 | 2,812,731 | 630,10 | 75,0 | 711,7 | 41,4 | 9,05 | 9,05 | 0,70 | 13,59 | 0,62 | 0,99 |
| 30,0 | 641,2 | 632,83 | 2,695,523 | 629,78 | 75,0 | 673,4 | 41,7 | 8,88 | 8,88 | 0,68 | 13,27 | 0,57 | 0,99 |
| 31,0 | 603,7 | 632,41 | 2,581,059 | 629,48 | 75,0 | 635,1 | 42,0 | 8,71 | 8,71 | 0,65 | 12,94 | 0,53 | 0,99 |
| 32,0 | 585,0 | 632,05 | 2,480,930 | 629,19 | 75,0 | 611,0 | 42,3 | 8,60 | 8,60 | 0,64 | 12,66 | 0,50 | 0,99 |
| 33,0 | 568,3 | 631,71 | 2,388,271 | 628,91 | 75,0 | 593,9 | 42,6 | 8,52 | 8,52 | 0,63 | 12,57 | 0,49 | 0,99 |
| 34,0 | 551,7 | 631,38 | 2,297,019 | 628,63 | 75,0 | 576,8 | 42,9 | 8,44 | 8,44 | 0,62 | 12,33 | 0,47 | 0,99 |
| 35,0 | 535,0 | 631,05 | 2,207,215 | 628,36 | 75,0 | 559,8 | 43,1 | 8,35 | 8,35 | 0,62 | 12,08 | 0,44 | 0,99 |
| 36,0 | 518,3 | 630,73 | 2,118,749 | 628,09 | 75,0 | 542,7 | 43,4 | 8,27 | 8,27 | 0,61 | 11,84 | 0,42 | 0,99 |

Tabela 6.4 – Resultados obtidos pela simulação da ruptura.

| Grau de Compactação (%) | Vazão de pico (m³/s) | Tempo para vazão de pico (h) | Dimensões finais da brecha (m) |
|-------------------------|----------------------|------------------------------|--|
| 95 | 3384 | 4,6 | 75 m de largura x 48,5 m de altura (ruptura total) |
| 100 | 4145 | 9,3 | 75 m de largura x 43,4 m de altura (ruptura parcial) |

Nas Tabelas 6.2 e 6.3 observa-se que enquanto o maciço compactado a 95% resiste a duas horas de escoamento em condições de erosão hidráulica pura, até que o processo de desmonte do maciço por ruptura geotécnica tenha início, no maciço compactado a 100% este processo tem início apenas oito horas após o início do galgamento. Esta diferença se reflete nas vazões de pico geradas, conforme discutido a seguir. A Figura 6.6 apresenta os hidrogramas afluente e efluente, bem como gráfico da evolução do armazenamento no reservatório, para a ruptura decorrente do galgamento do maciço compactado a 95% de GC.

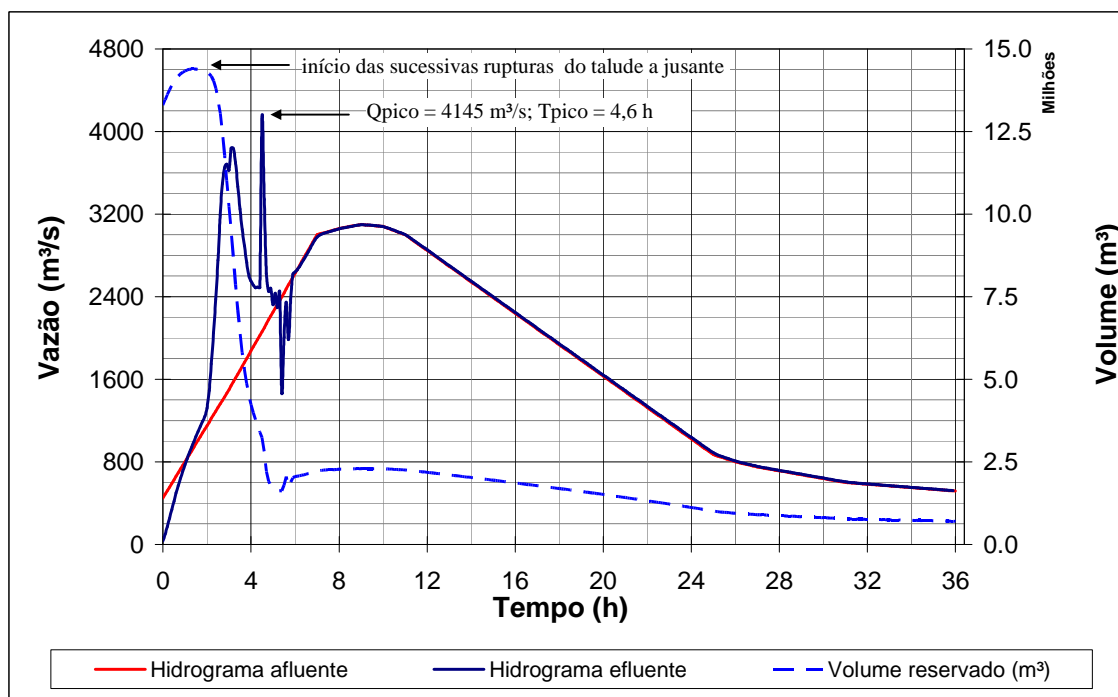


Figura 6.6: Hidrogramas de entrada e saída e armazenamento decorrentes da ruptura para 95% de grau de compactação do maciço.

Na Figura 6.6 observa-se que o hidrograma evolui de maneira praticamente análoga ao hidrograma afluente enquanto processo de abertura da brecha é apenas erosivo (tempo inferior a duas horas), ou seja, enquanto apenas a velocidade de escoamento impõe desgaste ao talude de jusante. A partir do momento em que as rupturas geotécnicas têm início, rebatendo o talude sucessivamente para a geometria 1V:1H em cada intervalo de tempo ($FS=1$), é que a brecha é efetivamente ampliada vertical e lateralmente, liberando o volume reservado em cerca de duas horas e meia e gerando um aumento expressivo no hidrograma efluente. A partir de seis horas de galgamento, a brecha está plenamente desenvolvida, e o hidrograma efluente se iguala ao afluente.

As Figuras 6.7 e 6.8 ilustram este processo.

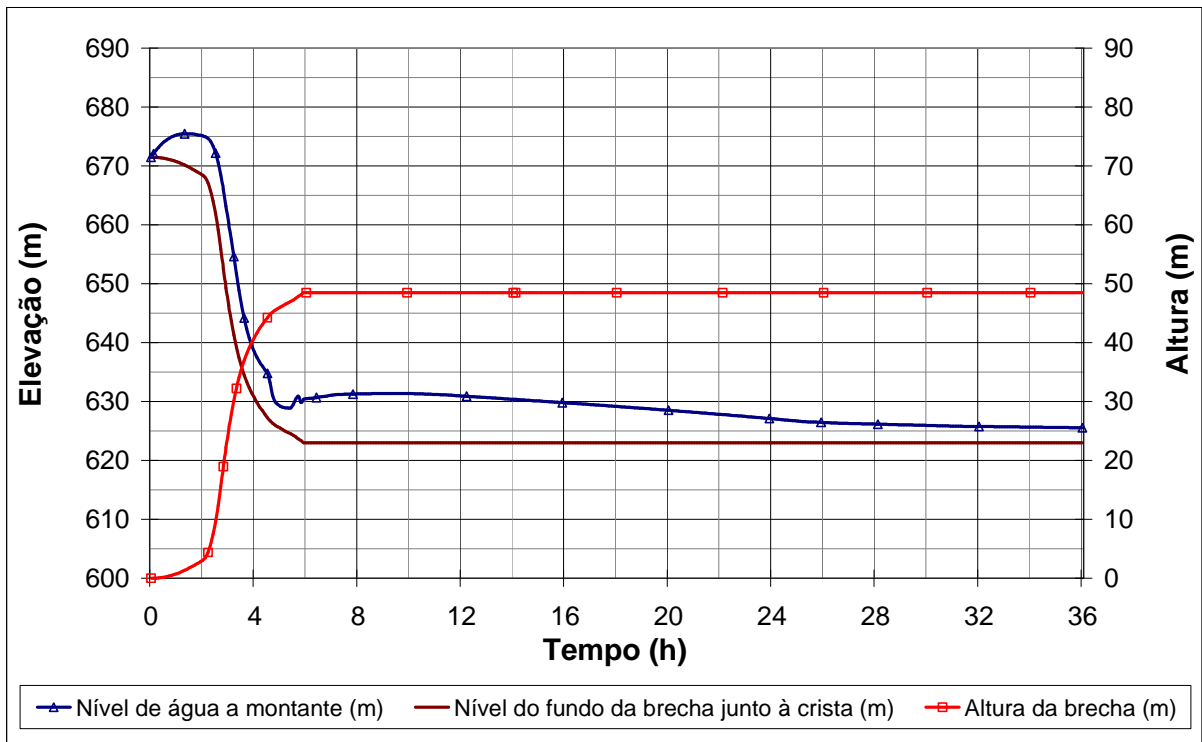


Figura 6.7: Evolução dos níveis de água, altura e nível de fundo da brecha junto à crista do maciço decorrentes da ruptura para 95% de grau de compactação do maciço.

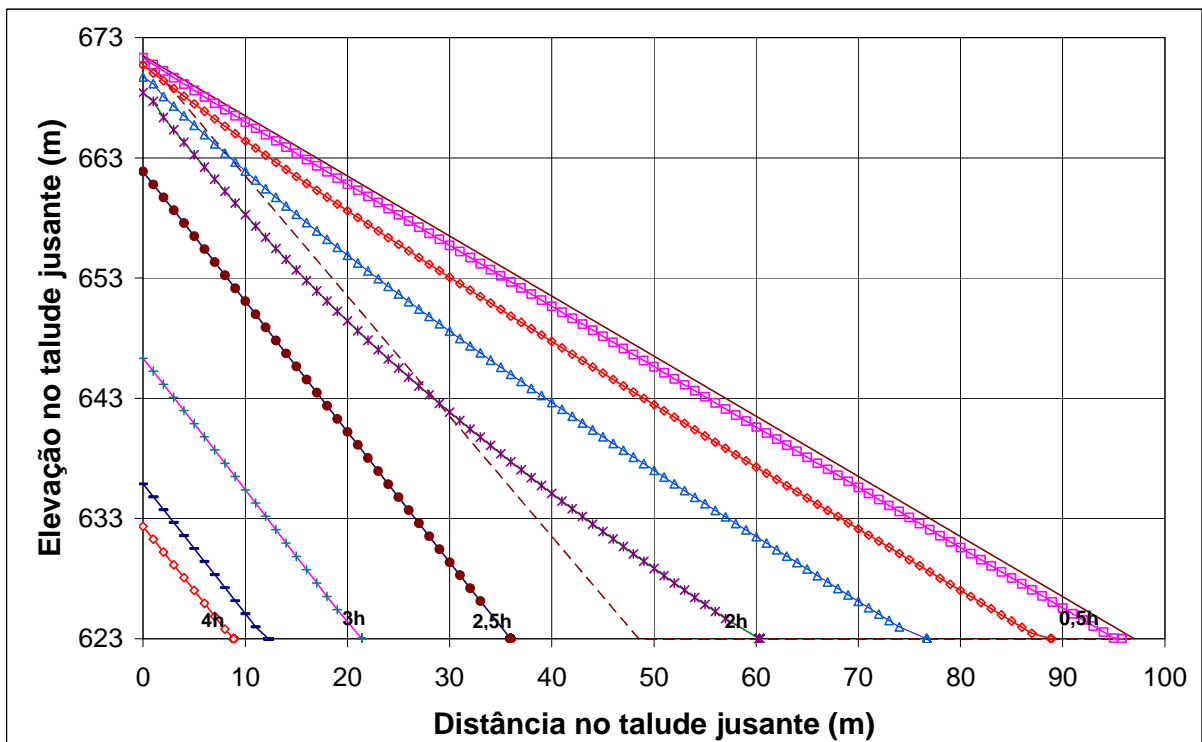


Figura 6.8: Evolução da geometria do talude de jusante decorrente da ruptura para 95% de grau de compactação do maciço.

Na Figura 6.7, de fato percebe-se que o aprofundamento da brecha é bastante intensificado a partir de duas horas a partir do galgamento. A Figura 6.8 mostra que o talude apenas começa a

atingir a declividade limite (1V:1H) a partir de duas horas de galgamento. A Figura 6.9 apresenta os hidrogramas afluente e efluente, bem como gráfico da evolução do armazenamento no reservatório, para a ruptura decorrente do galgamento do maciço compactado a 100% de GC.

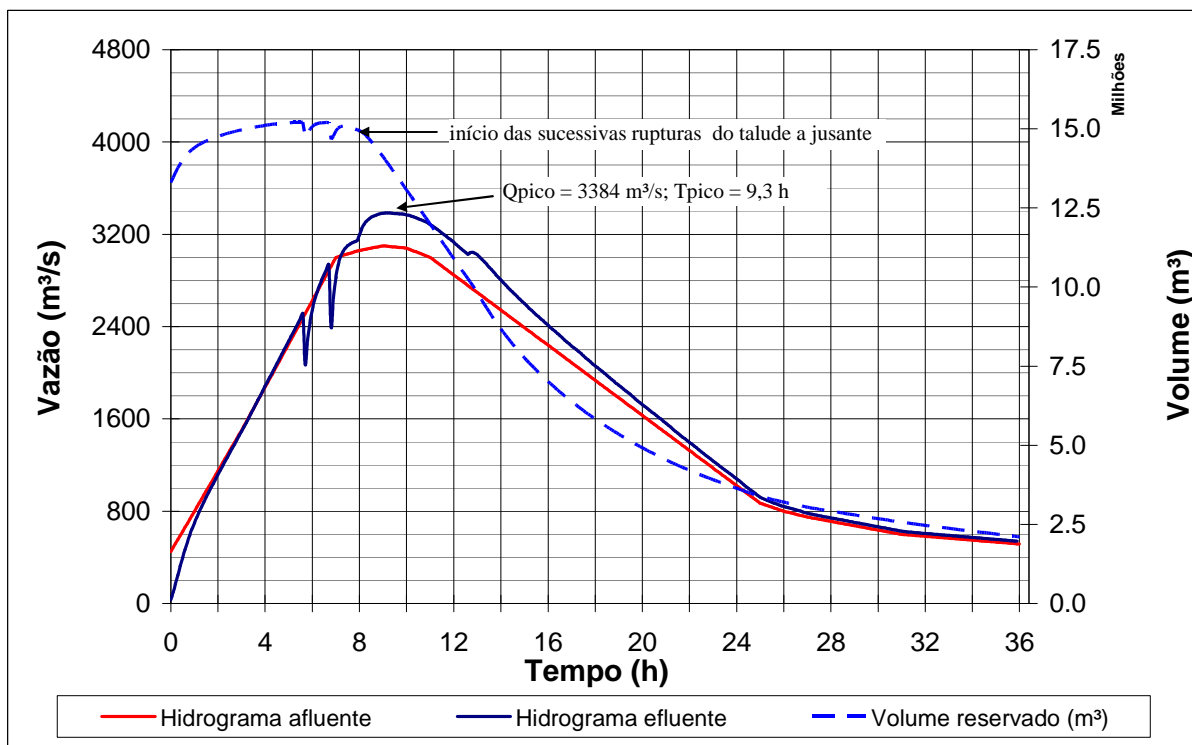


Figura 6.9: Hidrogramas de entrada e saída e armazenamento decorrentes da ruptura para 100% de grau de compactação do maciço.

Na Figura 6.9 observa-se que o hidrograma evolui de maneira praticamente análoga ao hidrograma afluente enquanto processo de abertura da brecha é apenas erosivo. No entanto, o tempo em que a brecha é ampliada apenas pelo processo erosivo é igual a oito horas, quatro vezes maior que no caso em que o grau de compactação do maciço é de 95% (duas horas - Figura 6.6).

Novamente, a partir do momento em que as rupturas geotécnicas têm início, o talude é sucessivamente rebatido para a geometria 1V:1H em cada intervalo de tempo (FS=1), ampliando a brecha vertical e lateralmente. Porém, a liberação do volume reservado se dá praticamente ao longo de todo o trânsito do hidrograma afluente (36 h), ao invés de em duas horas e meia como quando o maciço é compactado a 95% de GC.

As Figuras 6.10 e 6.11 ilustram este processo.

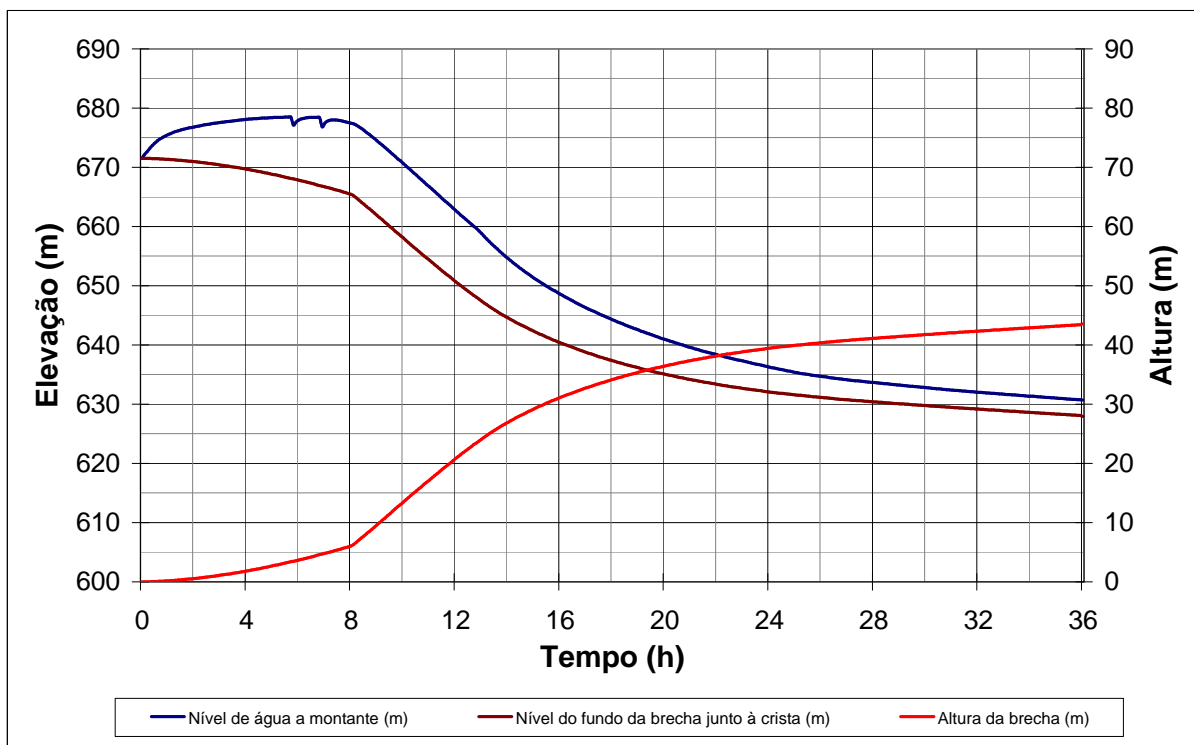


Figura 6.10: Evolução dos níveis de água, altura e nível de fundo da brecha junto à crista do maciço decorrentes da ruptura para 100% de grau de compactação do maciço.

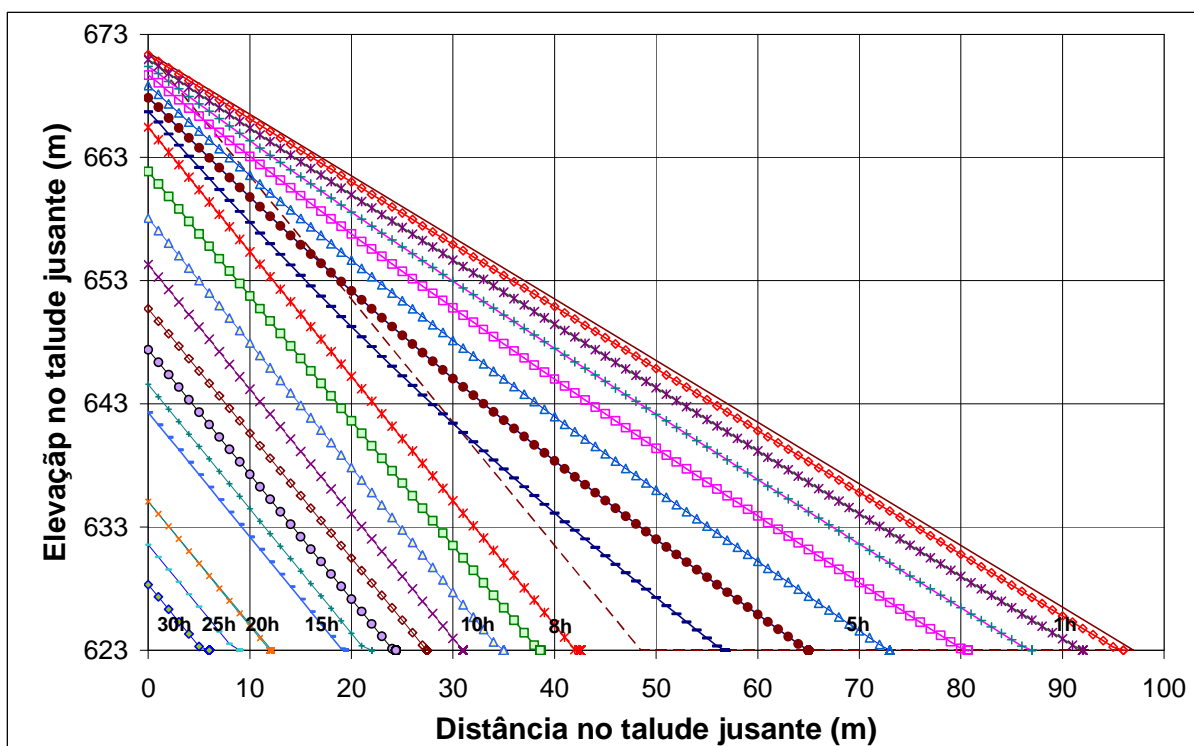


Figura 6.11: Evolução da geometria do talude de jusante decorrente da ruptura para 100% de grau de compactação do maciço.

Quando comparadas à vazão de pico do hidrograma afluente, igual a $3100 \text{ m}^3/\text{s}$ em 9 h após o início do galgamento, as vazões de pico resultantes implicam em acréscimos de vazão de 35%

e 9% para os maciços compactados a 95% e 100%, respectivamente. No entanto, no primeiro caso a vazão máxima ocorre em 4,6 h após o início do galgamento, adiantando a ocorrência da vazão de pico em relação ao hidrograma afluente. No segundo caso, a vazão de pico ocorre praticamente no mesmo instante, a 9,3 h após o início do galgamento.

O custo incremental devido à compactação para evitar este aumento na hidrógrafa efluente pode ser obtido calculando a diferença de custos de reconstrução nos casos, para a condição de 95% e 100% de GC.

O custo de compactação para a reconstrução do maciço a 95% de GC é igual a R\$ 2.948.000,00. (volume de compactação igual a 2.200.000 m³ aos custos unitários de compactação - Tabela 4.3).

No caso de se reconstruir o maciço com GC 100% ter-se-á um custo de reconstrução igual a R\$ 3.850.000,00 (volume de compactação igual a 2.200.000 m³ aos custos unitários de compactação - Tabela 4.3). Portanto, o custo incremental corresponde a R\$ 902.000,00.

O custo total da UHE Euclides da Cunha é de aproximadamente R\$ 290.000.000,00 (108 MW com custo unitário de 1250,00 US\$/kW (US\$1,00 = R\$2,07). Isso mostra que o custo dessa ação corresponde a menos de 0,5% do valor da obra.

Estes custos devem ser adicionados aos custos decorrentes dos danos causados a jusante pela hidrógrafa efluente que, obviamente, serão muito maiores quando o maciço é compactado a 95% de GC.

Para efeito de comparação de resultados, o cenário de ruptura a 95% de GC foi simulado no programa HEC-RAS nas mesmas condições iniciais e hidrograma afluente, com parâmetros apresentados na Tabela 6.5 e seções transversais com geometria retangular (largura igual a 310 m). A evolução da brecha foi assumida como igual à observada na Figura 6.7.

Tabela 6.5 – Parâmetros de entrada para simulação no programa HEC-RAS.

| Parâmetro | Valor |
|--|-------|
| Tempo de formação da brecha (h) | 6 |
| Largura final da brecha (m) | 75 |
| Altura final da brecha (m) | 48,5 |
| Coefficiente de Manning-Strickler (s.m ^{-1/3}) | 0,030 |
| Discretização temporal (min) | 6 |
| Fator de ponderação temporal (θ) | 0,60 |

O valor do fator de ponderação temporal (θ) foi admitido igual a 0,60, com vistas à maior precisão dos cálculos (USACE, 2008, p. 8-36). Porém, foram realizadas simulações com outros valores desse parâmetro (0,8 e 1,0), não sendo observadas variações significativas entre os resultados. A Figura 6.12 apresenta o hidrograma gerado a partir da simulação da ruptura da barragem no programa HEC-RAS, versão 4.0.0.

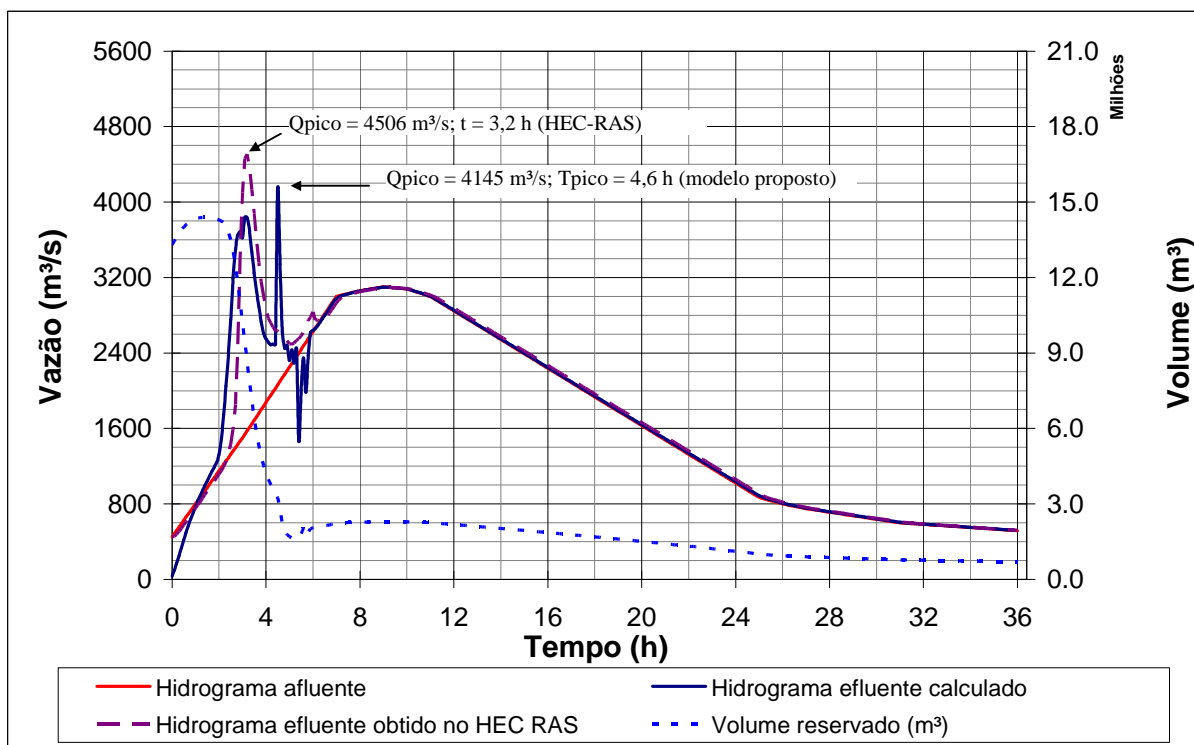


Figura 6.12: Comparação entre os hidrogramas efluentes obtidos pela abordagem proposta e no programa HEC-RAS.

Na Figura 6.12 observa-se que houve diferenças significativas entre os valores de tempo e vazão de pico obtidos no programa HEC-RAS e os valores obtidos pela abordagem proposta neste trabalho. Estas diferenças foram atribuídas às rupturas repentinas de taludes que a abordagem proposta permite acomodar, enquanto o programa HEC-RAS simula o desenvolvimento da brecha de maneira contínua.

Embora a evolução temporal da brecha obtido na simulação em que se consideraram as rupturas repentinas tenha sido utilizado como parâmetro de entrada para o programa HEC-RAS, versão 4.0.0, este último permite a discretização temporal da evolução da brecha em apenas 100 pontos, o que suaviza o processo e resulta em um hidrograma efluente com menos discontinuidades quando comparado ao hidrograma efluente obtido neste trabalho.

7 COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 Comentários finais

Os ensaios realizados no laboratório permitiram visualizar e quantificar um conjunto de parâmetros hidráulicos e geotécnicos que fornecem dados necessários para a análise de ruptura de barragens de solo compactado.

O estudo de caso apresentado foi realizado utilizando-se os dados de ensaio de um solo classificado como argila siltosa segundo a ABNT, sendo que a fração argilosa é superior a 43%.

O barramento utilizado como exemplo para a demonstração da metodologia foi o da UHE de Euclides da Cunha no Estado de São Paulo. A escolha dessa estrutura se deveu aos seguintes motivos:

- essa estrutura sofreu um galgamento em 1977 que provocou o colapso da barragem;
- devido a esse fato, existe disponível na literatura um razoável volume de informações sobre a configuração do barramento e sobre o fenômeno ocorrido;
- o galgamento dessa estrutura se deu com as comportas fechadas e portanto a hidrógrafa de entrada foi toda conduzida para o processo de ruptura;
- essa estrutura possui um rebaixamento na sua crista que pode ser utilizado como local inicial de processo erosivo (ver Figura 6.4 a).

O material geotécnico não é o mesmo utilizado na confecção do barramento e isso restringe as análises comparativas entre o fenômeno observado e o modelo de ruptura proposto.

O estudo de caso mostrou que para o caso de se utilizar um GC de 95% a estrutura apresenta um tempo de ruptura total de 4,6 h sendo que a profundidade da brecha final é de 48,5 m. A hidrógrafa de saída nesse caso apresenta um acréscimo de 35% no seu valor máximo passando de um valor máximo de 3100 m³/s (na hidrógrafa de entrada) para 4145 m³/s.

Esse acréscimo representa uma onda de cheia de proporções elevadas a jusante do barramento com consequências para as estruturas e populações de jusante. No caso da ruptura da UHE Euclides da Cunha a consequência mais visível a jusante foi a ruptura da barragem Armando

de Salles Oliveira (Limoeiro). A brecha final indicada pelo modelo, sob essa condição, tem uma área de seção transversal de aproximadamente 3.600 m².

No caso de se utilizar o material com GC de 100% a estrutura não rompe completamente, embora a brecha atinja 43,6 m de altura, correspondente a cerca de 90% da altura máxima do maciço. A hidrógrafa de saída nesse caso apresenta um valor máximo de 3384 m³/s, ou seja, um acréscimo de 9% sobre a hidrógrafa de entrada, substancialmente menor que o apresentado para o GC de 95% .

Deve-se no entanto alertar que o material utilizado nesse estudo de caso não corresponde ao existente no local e que dessa forma esses resultados não podem ser utilizados como conclusivos para o caso ocorrido no evento de ruptura em 1977, servindo apenas como exemplo de aplicação da metodologia.

7.2 Conclusões

O processo de ruptura de uma barragem é complexo e envolve um grande número de fenômenos que interagem entre si ao longo do evento. Tradicionalmente tem-se trabalhado com uma linha que prioriza a análise do transporte de sedimentos como elemento principal no processo de ruptura. Entretanto, ao analisar dezenas de relatos sobre rupturas de barragens, pode-se notar que o fenômeno de erosão tem uma grande influência no evento.

Dessa forma, esse trabalho apresenta uma metodologia destinada a dar suporte à análise da ruptura de barragens, enfocando o fenômeno de erosão. Para compreensão do processo de erosão foram construídas bancadas de laboratório que permitiram a visualização do fenômeno e da formação de fossas de erosão ao longo do paramento de jusante das barragens de pequena dimensão ensaiadas. Além disso, construiu-se um aparato em conduto forçado que permite a determinação da taxa de erosão em solos compactados. Os resultados permitem concluir que:

- o processo de ruptura de uma barragem é fortemente dependente do grau de compactação do solo utilizado na composição do maciço;
- a erosão devido ao escoamento não é o único processo interveniente na erosão do maciço;
- é possível estimar, mediante a realização de ensaios em laboratório, qual o tempo de ruptura de uma barragem submetida a uma hidrógrafa de entrada;

- a variação do GC tem uma influência significativa sobre a taxa de erosão do maciço, sendo possível estimar qual o custo incremental para se ampliar o tempo de ruptura de uma barragem, ou até mesmo para impedir que a mesma venha a sofrer um colapso total.

Ao final deste trabalho, ficaram evidentes a importância e relevância do conhecimento geotécnico do solo na erosão dos maciços de barragens compostos por solo compactado homogêneo em situação de galgamento. Conforme demonstrado, não apenas características do escoamento e geométricas da brecha são importantes na análise de ruptura, mas também o grau de compactação do maciço, cujo efeito é sensível na resistência à erosão do talude de jusante. Estes resultados mostraram-se coerentes aos obtidos em outras iniciativas, como as do USBR (POWELEDGE *et al.*, 1989a)

7.3 Recomendações

Ao final desse trabalho sugerem-se as seguintes ações para a continuidade dessa linha de pesquisa:

- aperfeiçoar os aparatos de teste, automatizando os ensaios, buscando placas mais espessas e compactadas com outros métodos de compactação, bem como ampliando a faixa de velocidades à luz dos resultados obtidos na simulação do estudo de caso;
- comparar os efeitos de diferentes técnicas de compactação e correlacionar aos parâmetros geotécnicos de resistência;
- investigar o efeito da turbulência sobre o processo erosivo de solos compactados;
- realizar ensaios com solos de massa específica de grão menor do que o aqui utilizado;
- incluir as bermas e diferentes coberturas no talude de jusante para avaliar os efeitos na dissipação de energia no processo erosivo;
- aplicar a metodologia a uma ruptura real, utilizando as características geotécnicas, hidráulicas e de erodibilidade do maciço;
- ampliar os testes efetuados, se possível com o material utilizado na confecção do maciço da UHE de Euclides da Cunha de forma a se poder fazer uma comparação entre os ensaios, e os dados disponíveis sobre a ruptura dessa estrutura;
- aperfeiçoar o método computacional de simulação, implementado em forma de planilha eletrônica, incluindo os processos de análise de estabilidade geotécnica, resalto hidráulico

e turbulência em cada intervalo de tempo, por meio de programação para agilizar os cálculos.

Dessa forma acredita-se ser possível obter uma ferramenta que permita estimar a hidrógrafa de saída de maneira mais fiel à realidade utilizando de parâmetros geotécnicos e de erodibilidade de solos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459. Determinação do limite de liquidez*. São Paulo, 1984.

_____. *NBR 6508. Grãos que passam na peneira 4,8 mm: determinação da massa específica*. São Paulo, 1984.

_____. *NBR 7180. Determinação do limite de plasticidade*. São Paulo, 1984.

_____. *NBR 7181. Análise granulométrica*. São Paulo, 1984.

_____. *NBR 7182. Solo: ensaio de compactação*. São Paulo, 1986.

_____. *NBR 14848. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. São Paulo, 2000.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING MATERIALS. *ASTM 4767. Standard test method for consolidated – undrained triaxial compression test on cohesive soil*. West Conshohocken, 2004.

BARCELOS, A. A. *Geração de sulcos em meio coesivo e caracterização hidrossedimentométrica de sua evolução*. 2005. 217 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BLIGHT, G. E., FOURIE, A. B. Catastrophe revisited – disastrous flow failures of mine and municipal solid waste. *Geotechnical and Geological Engineering*, Reston, v. 23, p. 219-248, 2005.

BOSS. *BOSS DAMBRK hydrodynamic flood routing: training manual*. 1. ed. Madison: BOSS International Inc., 2000. 250p.

BRIAUD, J-L., TING, F. C., K. CHEN, H. C., CAO, Y., HAN, S. W., KWAK, K. W. Erosion function apparatus for scour rate predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston, v. 127, n. 2, p.105-113, 2001.

BRIAUD, J-L., CHEN, H. C., GOVINDASAMY, A. V., STORESUND, R. Erosion tests on samples from the New Orleans levees. In: GEO-DENVER 2007: NEW PEAKS IN GEOTECHNICS, 2007, Denver. *Proceedings...* Denver: ASCE, 2007. p. 1-16.

BRIAUD, J-L. Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston, v. 134, n. 10, p.1425-1447, 2008.

BROICH, K. An overview of breach modelling. In: CONCERTED ACTIONS ON DAMBREAK MODELLING, 1999, Zaragoza. *Proceedings...* Zaragoza: HR Wallingford, 1999. p. 309-326.

_____. Determination of initial conditions for dam erosion due to overtopping and possible integration into a probabilistic design concept. In: IMPACT PROJECT WORKSHOP, 1, 2002, Wallingford. Wallingford: HR Wallingford, 2002.

_____. Description of breach model DEICH_P. In: HR WALLINGFORD. *Investigations of extreme flood processes & uncertainty (IMPACT) – Breach Formation Report*. Appendix 1.1. 2005a.

- _____. Modelling notes on breach model DEICH_P. In: HR WALLINGFORD. *Investigations of extreme flood processes & uncertainty (IMPACT) – Breach Formation Report*. Appendix 1.2. 2005b.
- BRUNER, G. W. *HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual – version 4.0*. Davies: *United States Corps of Engineers*, 2008.
- CAO, Z., PENDER, G., MENG, J. Explicit formulation of the Shields diagram for incipient motion of sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 132, n. 10, p. 1097-1099, 2006.
- CARVALHO, E. *Segurança de barragens: aspectos hidrológicos e hidráulicos*. 2007.
- CEMIG GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A. *Ensaio geotécnicos*. Documento nº GR/EC-LM-R177. Belo Horizonte: Laboratório de Materiais, maio de 2007. Relatório.
- CHANG, H. H. Stable alluvial canal design. *Journal of the Hydraulics Division*, Reston, v. 106, n. HY5, p. 873-891, 1980.
- CHANSON, H. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2. ed. Oxford: Elsevier, Butterworth e Heinemann, 2004.
- CHOW, V. T. *Open channel hydraulics*. International Edition 1973. Singapura: McGraw-Hill, 1973.
- _____. *Applied hydrology*. International Edition. Singapura: McGraw-Hill, 1988.
- CHRISTENSEN, R. W., DAS, B. M. Hydraulic erosion of remolded cohesive soils. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD. *Soil erosion: causes and mechanisms, prevention and control*. Washington: Highway Research Board, 1973. p.8-19.
- COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. *Barragens no Brasil*. São Paulo: Ed. Técnica Novo Grupo, 1982a. 279 p.
- _____. *Main brazilian dams: design, construction and performance*. São Paulo: Ed. Técnica Novo Grupo, 1982b. 653 p.
- COSTA, R. F. C. *Medição do arco medial plantar usando shadow moiré com deslocamento de fase*. 2006. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- DAS, B. M. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- DAVIES, M. P. Tailings Impoundment failures: are geotechnical engineers listening? *Geotechnical News*, Richmond, v. 22, n. 3, p. 31-36, setembro de 2002.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. Barragens do DNOCS – açude de Orós. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/oros.htm>>. Acesso em: 13/01/2009.
- DUNN, I. Tractive resistance of cohesive channels. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Reston, v. 85, n. SM-3, p. 1-24, 1959.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Gestão de barragens de rejeitos e resíduos em Minas Gerais: histórico, requisitos legais e resultados*. Belo Horizonte: FEAM, 2008. 92 p.

- _____. Banco de dados de barragens. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://www.feam.br/index.php?option=com_content&task=view&id=220&Itemid=128>. Acesso em: 09/01/2009.
- FREAD, D.L. *BREACH: an erosion model for earthen dam failures*. Maryland: *National Weather Service*, 1991.
- FREAD, D. L., LEWIS, J. M. *NWS FLDWAV model: theoretical description and user documentation*. Maryland: *National Weather Service*, 1998. 335 p.
- FROEHLICH, D. C. Embankment dam breach parameters revisited. In: ASCE CONFERENCE ON WATER RESOURCES ENGINEERING. *Proceedings...* New York: ASCE, 1995. p. 887–891.
- _____. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 134, n. 12, p. 1708-1721, 2008.
- GOOGLE. Imagem DigitalGlobe da UHE Euclides da Cunha. Disponível em: <www.earth.google.com>. Acesso em: 20/12/2008.
- GRAF, W. H. *Hydraulics of sediment transport*. 1. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1971. 513 p.
- HENDERSON, F. M. *Open channel flow*. New York: *The Macmillan Company*, 1966. 522 p.
- HORN, A., JOO, N., POLAWSKY, W. Sediment transport rates in highly episodic rivers systems: a preliminary comparison between empirical formulae and direct flood measurements. In: WATER 99 JOINT CONGRESS, 25TH HYDROLOGY AND WASTER RESEARCH SYMPOSIUM AND 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESEARCH AND ENVIRONMENT RESEARCH. *Proceedings...* Brisbane, Australia: International Association of Hydrology Research, 1999. v. 1. p. 238-243 *apud* CHANSON, H. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2. ed. Oxford: Elsevier, Butterworth e Heinemann, 2004.
- HR WALLINGFORD LTD. *Concerted action on dambreak modelling: dambreak modelling guidelines & best practice*. United Kingdom: União Europeia, 2000. Relatório.
- _____. *Investigation of extreme flood processes & uncertainty*. Final technical report. United Kingdom: União Europeia, 2005. Relatório.
- INDERBITZEN A. L. An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*, West Conshohocken, v.1, n.1, p. 553-554, 1961.
- INFORMADOR DAS CONSTRUÇÕES. Belo Horizonte: Ed. Informador das Construções, n.1582, out. 2008. p. 74-75.
- JEYAPALAN, J. K., DUNCAN, J. M., SEED, H. B. Investigation of flow failures of tailings dams. *Journal of Geotechnical Engineering*, Reston, v. 109, n. 2. p. 172-189, 1983.
- JULIEN, P. Y. *Erosion and Sedimentation*. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1998.
- KAMPHUIS, J. W., GASKIN, P. N., HOOGEDOORN, E. Erosion tests on four intact Ontario clays. *Canadian Geotechnical Journal*, Reston, v. 27, p. 692-696, 1990.
- LAMBERMONT, J., LEBON, G. Erosion of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, Reston, v. 16, n. 1, p. 27-44, 1978.

- LANE, W. L. Design of stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Reston, n. 280, p. 1234-1279, 1955.
- MAHDI, T. Pairing geotechnics and fluvial hydraulics for the prediction of the hazard zones of an exceptional flooding. *Natural Hazards*, Dordrecht, v. 1, n. 1, p. 225-236, 2006.
- MASH, F.D. ESPEY, W, H., MOORE, W. L. Measurements of the shear resistance of cohesive sediments. In: FEDERAL INTER-AGENCY SEDIMENTATION CONFERENCE. Symposium 1: land erosion and control. *Proceedings...* Jackson, Massachussets: Agricultural Research Service, 1963. p. 151-155.
- MENESCAL, R. A. (org.) *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos no Brasil*. 2. ed. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005. 314 p.
- O'BRIEN, J. S., JULIEN, P.Y. Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. In: SPECIALTY CONFERENCE - DELINEATION OF LANDSLIDE, FLASH FLOOD AND DEBRIS FLOW HAZARDS IN UTAH. Logan, Utah: Utah State University, 1985. p.260-279.
- PAQUIER, A., RECKING, A. Advances on breach models by Cemagref during Impact project. In: HR WALLINGFORD. *Investigations of extreme flood processes & uncertainty (IMPACT)* – Breach Formation Report. 2005. Relatório.
- PARTHENIADES, E. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*, Reston, v. 91, n. HY1, p. 105-139, 1965.
- _____. The present state of knowledge and needs for future research on cohesive sediment dynamics. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RIVER SEDIMENTATION, 3, 1986. *Proceedings...* Jackson, Massachussets: IRTCES, 1986.
- PENMAN, A. D. M. The need for dam safety. In: INTERNATIONAL COUNCIL ON METALS AND THE ENVIRONMENT. *United Nations Environment Programme: Case Studies on Tailings Management*. Reno, Nevada: ICME, 1998. p. 5-6.
- PINTO, C. S. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- PONCE, V. M. TSIVOGLOU, A.J. Modeling gradual dam breaches. *Journal of the Hydraulics Division*, Reston, v. 107, n. HY7, p. 829-838, 1981.
- PORTES, A. M. C. COUTO, R. I. *Ensaio de compactação*. Belo Horizonte: Laboratório de Geotecnia da EEUFMG, 2007. 15 p. Relatório.
- POWLEDGE, G. R., RALSTON, D. C., MILLER, P., CHEN, Y. H., CLOPPER, P., TEMPLE D. Mechanics of overflow erosion on embankments. I: research activities. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 115, n. 8, p. 1040-1055, 1989a.
- _____. Mechanics of overflow erosion on embankments. II: hydraulic and design considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 115, n. 8, p. 1056-1075, 1989b.
- QUINTELA, A. C., PINHEIRO, A. N., GOMES, A. S., AFONSO, J. R., ALMEIDA, J. M., CORDEIRO, M. S. *Curso de exploração e segurança de barragens*. Lisboa: Instituto da Água, 2001.
- RAHMAN, M., CHAUDRY, M. H. Simulation of dam-break flow with grid adaption. *Advances in Water Resources*, v. 21, n. 1, p. 1-9, 1998.
- RASTELLI, J. [*Barragem Rompida*]. 1960. Disponível em: <<http://limoeirodonorte.blogspot.com/2008/07/aude-ors-em-1960.html>>. Acesso em: 13/01/2009.

- RAUDKIVI, A. J., TAN, S. K. Erosion of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Research*, Zurich, v. 22, n. 4, p. 217-233, 1984.
- RIBEIRO, E. M. *Análise metrológica da técnica shadow moiré*. 2006. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- RICKENMANN, D. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 117, n. 11, p. 1419-1439, 1991.
- SMART, G. M. Sediment transport formula for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 110, n. 3, p. 267-276, 1984.
- UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS – River Analysis System*. User's Manual. Version 4.0. Davis: Hydrologic Engineering Center, março de 2008.
- _____. *Dam safety preparedness*. EP1110-2-13. Washington: United States Army Corps of Engineers, junho de 1996. 58 p.
- WAHL, T. L. *Prediction of embankment dam breach parameters: a literature review and needs assessment*. 1. ed. Maryland: United States Department of the Interior, Bureau of reclamation, Dam Safety Office, 1998. 60 p.
- _____. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 130, n. 5, p. 389-397, 2004.
- WAN, C. F., FELL, R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Reston, v. 130, n. 4, p. 373-380, 2004.
- WANG, Z., BOWLES, D. S. Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 1: Theory and methodology. *Advances in Water Resources*, v. 29, p. 1528-1545, 2006a.
- _____. Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 2: Validation and Applications. *Advances in Water Resources*, v. 29, p. 1490-1503, 2006b.
- WORLD COMISSION ON DAMS. *Dams and development: A new framework for decision-making*. London: EarthScan Publications Ltd., 2000. 403 p.

ANEXO I

RESULTADOS DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE SOLOS DA UFMG



| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| Análise Granulométrica | Amostra nº: 1 |
| IT - 008 | Início do Ensaio: 22/3/2007 |
| | Término do Ensaio: 24/3/2007 |

| Amostra Total | | |
|----------------|-----|---------|
| M _t | (g) | 1 000.0 |
| M _g | (g) | 52.47 |
| M _s | (g) | 933.07 |

| Amostra parcial | | |
|---------------------|-----|-------|
| M _{sed} | (g) | 71.4 |
| M _{s, sed} | (g) | 66.35 |

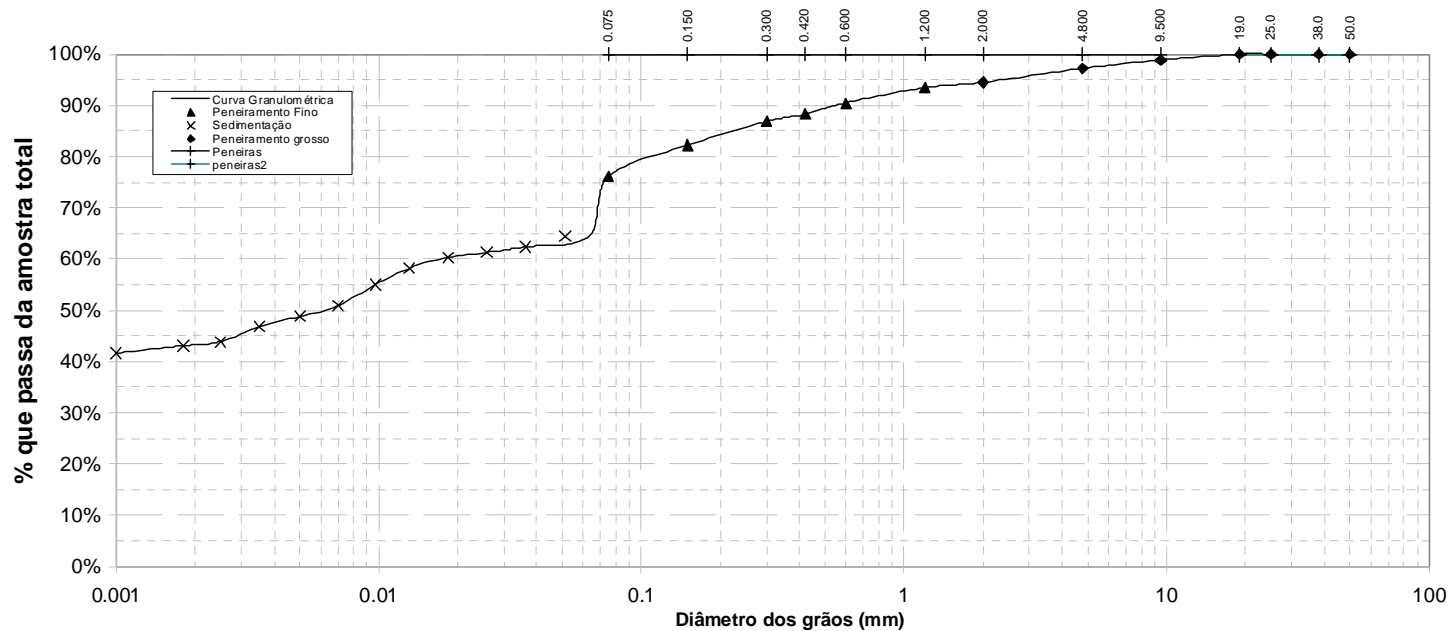
| Peneiramento Grosso | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------------|---------|
| # abertura (mm) | M _{si, ret} (g) | M _{si, ret, acum} (g) | Pg (%) |
| 50.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 38.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 25.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 19.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 9.5 | 10.57 | 10.57 | 98.87% |
| 4.8 | 15.08 | 25.65 | 97.25% |
| 2.0 | 25.65 | 51.30 | 94.50% |
| Prato | 1.17 | | |

| Peneiramento Fino | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------|--------|
| # abertura (mm) | M _{si, ret} (g) | M _{si, ret, acum} (g) | Pf (%) |
| 1.200 | 0.71 | 0.71 | 93.49% |
| 0.600 | 2.10 | 2.81 | 90.50% |
| 0.420 | 1.56 | 4.37 | 88.28% |
| 0.300 | 1.00 | 5.37 | 86.85% |
| 0.150 | 3.22 | 8.59 | 82.27% |
| 0.075 | 4.25 | 12.84 | 76.21% |
| Prato | 0.08 | | |

| Dados p/ Sedimentação | |
|-----------------------|---------------------------|
| Densímetro N° | 5538 |
| Vol. do densímetro | 40.00 cm ³ |
| Área proveta (A) | 29.10 cm ² |
| V/(2xA) | 0.69 (cm) |
| δ _s | 3.26 (g/cm ²) |

| Teor de Umidade | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|-------|-------|-------------|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cápsula N° | 555 | 226 | 228 | 330 | 553 |
| M _{c+s+w} (g) | 36.86 | 33.52 | 43.07 | 39.73 | 49.30 |
| M _{c+s} (g) | 35.37 | 32.68 | 40.99 | 37.85 | 48.43 |
| M _c (g) | 15.82 | 16.86 | 14.79 | 12.19 | 16.86 |
| M _s (g) | 19.55 | 15.82 | 26.20 | 25.66 | 31.57 |
| M _w (g) | 1.49 | 0.84 | 2.08 | 1.88 | 0.87 |
| w (%) | 7.6% | 5.3% | 7.9% | 7.3% | 2.8% |
| Utilizar valor na média (s/n) | s | n | s | s | n |
| w (para compor a média) | 7.6% | ñ utilizado | 7.9% | 7.3% | ñ utilizado |
| W _{médio} (%) | 7.6% | | | | |

| Sedimentação | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------|----------------|------------------|------|----------------|---|---|----------------|---------------------|--------|----------------------|--|--|
| Data (dd/mm/aa) | Hora (hh:mm:ss) | 8t (s) | L _i | Temperatura (°C) | R | L _c | δ _w = δ _{disp} (g/cm ³) | δ _w 10 ⁶ (g.s/cm ²) | z (cm) | z _c (cm) | d (mm) | P _{sed} (%) | | |
| | | 30 | 33.0 | 27.0 | -1.6 | 31.40 | 0.9965 | 8.72 | 11.4 | | 0.0513 | 64.41% | | |
| | | 60 | 32.0 | 27.0 | -1.6 | 30.40 | 0.9965 | 8.72 | 11.4 | | 0.0363 | 62.36% | | |
| | | 120 | 31.5 | 27.0 | -1.6 | 29.90 | 0.9965 | 8.72 | 11.5 | | 0.0258 | 61.34% | | |
| | | 240 | 31.0 | 27.0 | -1.6 | 29.40 | 0.9965 | 8.72 | 11.6 | 10.9 | 0.0183 | 60.31% | | |
| | | 480 | 30.0 | 27.0 | -1.6 | 28.40 | 0.9965 | 8.72 | 11.8 | 11.1 | 0.0131 | 58.26% | | |
| | | 900 | 28.5 | 26.5 | -1.7 | 26.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.1 | 11.4 | 0.0097 | 54.98% | | |
| | | 1800 | 26.5 | 26.5 | -1.7 | 24.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.5 | 11.8 | 0.0070 | 50.88% | | |
| | | 3600 | 25.5 | 26.5 | -1.7 | 23.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.7 | 12.0 | 0.0050 | 48.83% | | |
| | | 7200 | 24.5 | 26.5 | -1.7 | 22.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.9 | 12.2 | 0.0035 | 46.78% | | |
| | | 14400 | 23.0 | 27.0 | -1.6 | 21.40 | 0.9965 | 8.72 | 13.3 | 12.6 | 0.0025 | 43.90% | | |
| | | 28800 | 22.5 | 27.5 | -1.5 | 21.00 | 0.9964 | 8.62 | 13.4 | 12.7 | 0.0018 | 43.08% | | |
| | | 86400 | 22.0 | 26.5 | -1.7 | 20.30 | 0.9967 | 8.82 | 13.5 | 12.8 | 0.0010 | 41.65% | | |
| Obs: | | | | | | | Método de secagem da amostra: | Defloculante: | Operador: | | | | | |
| | | | | | | | AR | HMC | Ricardo/Andréa | | | | | |



| ABNT | | ASTM | | ASTM | | Diametros Equivalentes (mm) | |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------|--------|-------|-----------------------------|-------------------|
| Pedregulho (d > 2,0 mm): | 5.5% | Pedregulho (d > 4,8 mm): | 2.5% | Argila | 43.0% | D ₁₀ = | D ₅₀ = |
| Areia (0,06 < d < 2,0 mm): | 30.5% | Areia (0,075 < d < 4,8 mm): | 21.3% | Silte | 33.2% | D ₁₅ = | D ₆₀ = |
| Silte (0,002 < d < 0,06 mm): | 21.0% | Silte (0,002 < d < 0,075 mm): | 33.2% | Areia | 21.3% | D ₃₀ = | D ₈₅ = |
| Argila (d < 0,002 mm): | 43.0% | Argila (d < 0,002 mm): | 43.0% | Pod. | 2.5% | | |
| Classificação: | argila areno-siltosa | Classificação: | argila silto-arenosa | | | Início do Ensaio: | 22/3/2007 |
| Obs: | LL = 45% LP = 36% IP = 9% | | | | | Término do Ensaio: | 24/3/2007 |
| | | | | | | Operador: | R & A |
| | | | | | | Amostra nº: | 1 |



| | | |
|---|--------------------|-----------|
| Análise Granulométrica IT - 008 | Amostra nº: | 2 |
| | Início do Ensaio: | 22/3/2007 |
| | Término do Ensaio: | 24/3/2007 |

| Amostra Total | | |
|----------------|-----|---------|
| M _t | (g) | 1 000.0 |
| M _g | (g) | 78.64 |
| M _s | (g) | 934.92 |

| Amostra parcial | | |
|---------------------|-----|-------|
| M _{sed} | (g) | 71.7 |
| M _{s, sed} | (g) | 66.59 |

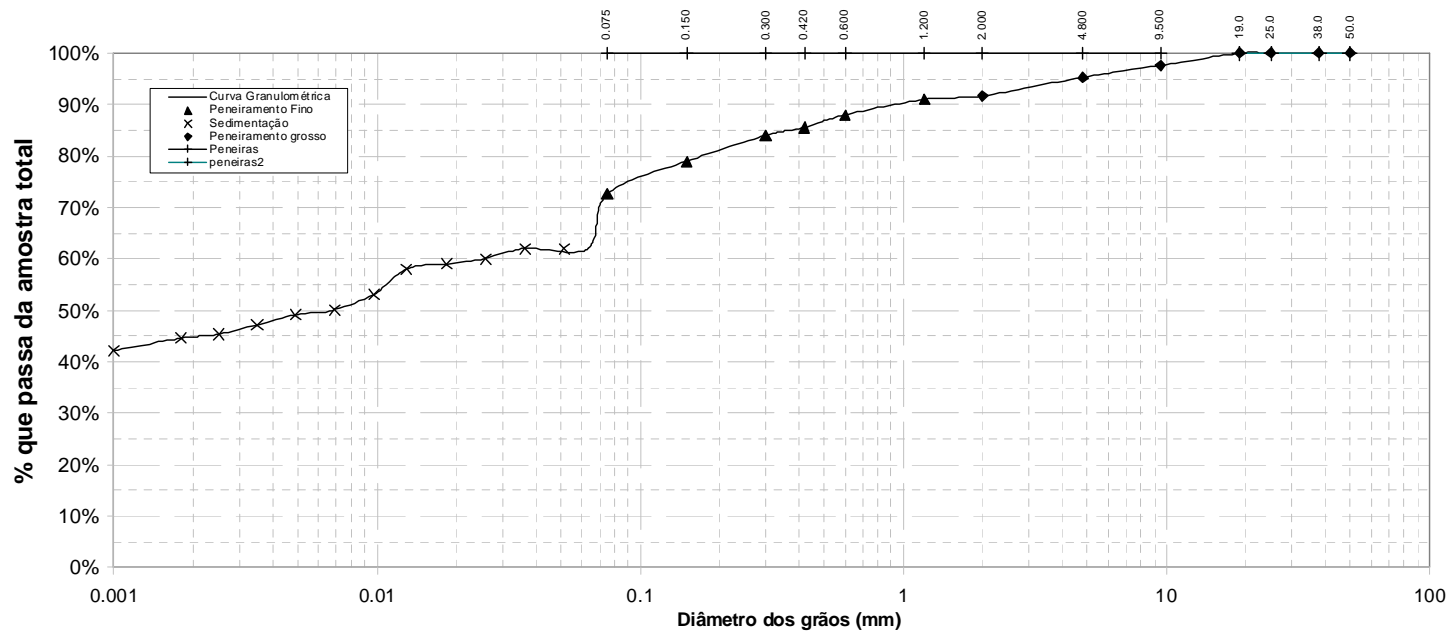
| Peneiramento Grosso | | | |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|---------|
| # abertura (mm) | M _{si,ret} (g) | M _{si,ret.acum} (g) | Pg (%) |
| 50.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 38.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 25.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 19.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 9.5 | 22.57 | 22.57 | 97.59% |
| 4.8 | 21.47 | 44.04 | 95.29% |
| 2.0 | 33.24 | 77.28 | 91.73% |
| Prato | 1.36 | | |

| Peneiramento Fino | | | |
|-------------------|-------------------------|------------------------------|--------|
| # abertura (mm) | M _{si,ret} (g) | M _{si,ret.acum} (g) | Pf (%) |
| 1.200 | 0.55 | 0.55 | 90.97% |
| 0.600 | 2.16 | 2.71 | 88.00% |
| 0.420 | 1.79 | 4.50 | 85.53% |
| 0.300 | 1.13 | 5.63 | 83.97% |
| 0.150 | 3.62 | 9.25 | 78.99% |
| 0.075 | 4.58 | 13.83 | 72.68% |
| Prato | 0.06 | | |

| Dados p/ Sedimentação | |
|-----------------------|---------------------------|
| Densímetro N° | 5538 |
| Vol. do densímetro | 40.00 cm ³ |
| Área proveta (A) | 28.89 cm ² |
| V/(2xA) | 0.69 (cm) |
| ξ _s | 3.27 (g/cm ²) |

| Teor de Umidade | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|-------|-------|-------------|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cápsula N° | 555 | 226 | 228 | 330 | 553 |
| M _{c+s+w} (g) | 36.86 | 33.52 | 43.07 | 39.73 | 49.30 |
| M _{c+s} (g) | 35.37 | 32.68 | 40.99 | 37.85 | 48.43 |
| M _c (g) | 15.82 | 16.86 | 14.79 | 12.19 | 16.86 |
| M _s (g) | 19.55 | 15.82 | 26.20 | 25.66 | 31.57 |
| M _w (g) | 1.49 | 0.84 | 2.08 | 1.88 | 0.87 |
| w (%) | 7.6% | 5.3% | 7.9% | 7.3% | 2.8% |
| Utilizar valor na média (s/n) | s | n | s | s | n |
| w (para compor a média) | 7.6% | ñ utilizado | 7.9% | 7.3% | ñ utilizado |
| W _{médio} (%) | 7.6% | | | | |

| Sedimentação | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|----------------|------------------|------|----------------|---|--|----------------|---------------------|--------|----------------------|--|--|
| Data (dd/mm/aa) | Hora (hh:mm:ss) | ξ t (s) | L _i | Temperatura (°C) | R | L _c | ξ _w = ξ _{disp} (g/cm ³) | ξ _w 10 ⁻⁴ (g.s/cm ²) | z (cm) | z _c (cm) | d (mm) | P _{sed} (%) | | |
| | | 30 | 33.0 | 26.5 | -1.7 | 31.30 | 0.9967 | 8.82 | 11.4 | | 0.0515 | 62.02% | | |
| | | 60 | 33.0 | 26.5 | -1.7 | 31.30 | 0.9967 | 8.82 | 11.4 | | 0.0364 | 62.02% | | |
| | | 120 | 32.0 | 26.5 | -1.7 | 30.30 | 0.9967 | 8.82 | 11.4 | | 0.0258 | 60.04% | | |
| | | 240 | 31.5 | 26.5 | -1.7 | 29.80 | 0.9967 | 8.82 | 11.6 | 10.9 | 0.0184 | 59.05% | | |
| | | 480 | 31.0 | 26.5 | -1.7 | 29.30 | 0.9967 | 8.82 | 11.5 | 10.8 | 0.0129 | 58.06% | | |
| | | 900 | 28.5 | 26.5 | -1.7 | 26.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.1 | 11.4 | 0.0097 | 53.10% | | |
| | | 1800 | 27.0 | 26.5 | -1.7 | 25.30 | 0.9967 | 8.82 | 12.4 | 11.7 | 0.0069 | 50.13% | | |
| | | 3600 | 26.5 | 26.5 | -1.7 | 24.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.5 | 11.8 | 0.0049 | 49.14% | | |
| | | 7200 | 25.5 | 26.5 | -1.7 | 23.80 | 0.9967 | 8.82 | 12.7 | 12.0 | 0.0035 | 47.16% | | |
| | | 14400 | 24.5 | 27.0 | -1.6 | 22.90 | 0.9965 | 8.72 | 12.9 | 12.2 | 0.0025 | 45.37% | | |
| | | 28800 | 24.0 | 27.5 | -1.5 | 22.50 | 0.9964 | 8.62 | 13.1 | 12.4 | 0.0018 | 44.58% | | |
| | | 86400 | 23.0 | 26.5 | -1.7 | 21.30 | 0.9967 | 8.82 | 13.3 | 12.6 | 0.0010 | 42.21% | | |
| Obs: | | | | | | | Método de secagem da amostra: | Defloculante: | Operador: | | | | | |
| | | | | | | | AR | | Ricardo/Andréa | | | | | |



| ABNT | | ASTM | | Diametros Equivalentes (mm) | |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------|
| Pedregulho (d > 2,0 mm): | 8.3% | Pedregulho (d > 4,8 mm): | 4.7% | D ₁₀ = | D ₅₀ = |
| Areia (0,06 < d < 2,0 mm): | 29.7% | Areia (0,075 < d < 4,8 mm): | 22.6% | D ₁₅ = | D ₆₀ = |
| Silte (0,002 < d < 0,06 mm): | 17.0% | Silte (0,002 < d < 0,075 mm): | 27.7% | D ₃₀ = | D ₈₅ = |
| Argila (d < 0,002 mm): | 45.0% | Argila (d < 0,002 mm): | 45.0% | | |
| Classificação: | | Classificação: | | | |
| Obs: | LL = 46% LP = 37% IP = 9% | | | Início do Ensaio: | 22/3/2007 |
| | | | | Término do Ensaio: | 24/3/2007 |
| | | | | Operador: | Ricardo |
| | | | | Amostra nº: | 2 |



| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| Análise Granulométrica | Amostra nº: 3 |
| IT - 008 | Início do Ensaio: 22/3/2007 |
| | Término do Ensaio: 24/3/2007 |

| Amostra Total | | |
|----------------|-----|---------|
| M _t | (g) | 1 000.0 |
| M _g | (g) | 59.01 |
| M _s | (g) | 933.54 |

| Amostra parcial | | |
|---------------------|-----|-------|
| M _{sed} | (g) | 72.1 |
| M _{s, sed} | (g) | 67.00 |

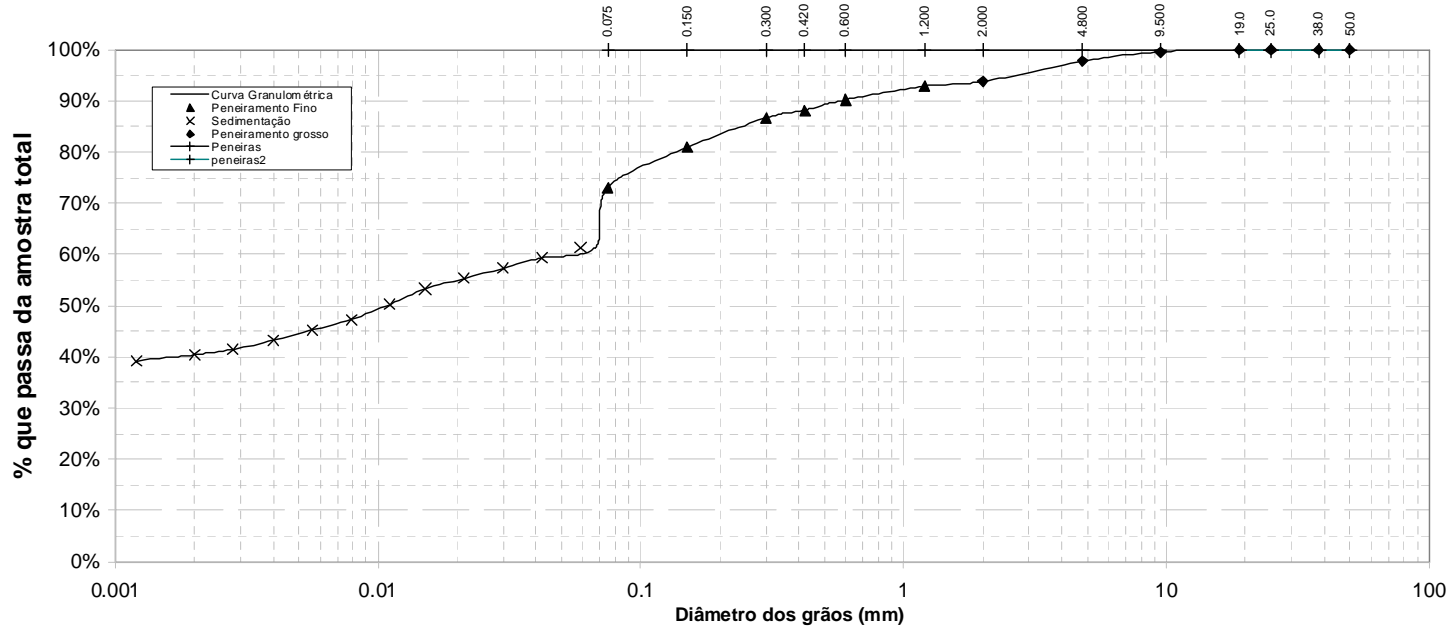
| Peneiramento Grosso | | | |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|---------|
| # abertura (mm) | M _{si,ret} (g) | M _{si,ret.acum} (g) | Pg (%) |
| 50.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 38.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 25.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 19.0 | 0.00 | 0.00 | 100.00% |
| 9.5 | 3.78 | 3.78 | 99.60% |
| 4.8 | 16.88 | 20.66 | 97.79% |
| 2.0 | 37.21 | 57.87 | 93.80% |
| Prato | 1.14 | | |

| Peneiramento Fino | | | |
|-------------------|-------------------------|------------------------------|--------|
| # abertura (mm) | M _{si,ret} (g) | M _{si,ret.acum} (g) | Pf (%) |
| 1.200 | 0.67 | 0.67 | 92.86% |
| 0.600 | 1.87 | 2.54 | 90.24% |
| 0.420 | 1.46 | 4.00 | 88.20% |
| 0.300 | 1.07 | 5.07 | 86.70% |
| 0.150 | 4.16 | 9.23 | 80.88% |
| 0.075 | 5.59 | 14.82 | 73.05% |
| Prato | 0.07 | | |

| Dados p/ Sedimentação | |
|-----------------------|---------------------------|
| Densímetro N° | 23 |
| Vol. do densímetro | 48.00 cm ³ |
| Área proveta (A) | 29.03 cm ² |
| V/(2xA) | 0.83 (cm) |
| ξ _s | 3.28 (g/cm ²) |

| Teor de Umidade | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|-------|-------|-------------|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cápsula N° | 555 | 226 | 228 | 330 | 553 |
| M _{c+s+w} (g) | 36.86 | 33.52 | 43.07 | 39.73 | 49.30 |
| M _{c+s} (g) | 35.37 | 32.68 | 40.99 | 37.85 | 48.43 |
| M _c (g) | 15.82 | 16.86 | 14.79 | 12.19 | 16.86 |
| M _s (g) | 19.55 | 15.82 | 26.20 | 25.66 | 31.57 |
| M _w (g) | 1.49 | 0.84 | 2.08 | 1.88 | 0.87 |
| w (%) | 7.6% | 5.3% | 7.9% | 7.3% | 2.8% |
| Utilizar valor na média (s/n) | s | n | s | s | n |
| w (para compor a média) | 7.6% | ñ utilizado | 7.9% | 7.3% | ñ utilizado |
| W _{médio} (%) | 7.6% | | | | |

| Sedimentação | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|----------------|------------------|------|----------------------------------|---|--|---------------|---------------------|--------------------------|----------------------|--|
| Data (dd/mm/aa) | Hora (hh:mm:ss) | ξ t (s) | L _i | Temperatura (°C) | R | L _c | ξ _w = ξ _{disp} (g/cm ³) | ξ _w 10 ⁻⁴ (g.s/cm ²) | z (cm) | z _c (cm) | d (mm) | P _{sed} (%) | |
| | | 30 | 33.0 | 26.5 | -2.5 | 30.50 | 0.9967 | 8.82 | 15.0 | | 0.0590 | 61.34% | |
| | | 60 | 32.0 | 26.5 | -2.5 | 29.50 | 0.9967 | 8.82 | 15.2 | | 0.0420 | 59.33% | |
| | | 120 | 31.0 | 26.5 | -2.5 | 28.50 | 0.9967 | 8.82 | 15.4 | | 0.0299 | 57.32% | |
| | | 240 | 30.0 | 26.5 | -2.5 | 27.50 | 0.9967 | 8.82 | 15.5 | 14.7 | 0.0212 | 55.31% | |
| | | 480 | 29.0 | 26.5 | -2.5 | 26.50 | 0.9967 | 8.82 | 15.7 | 14.9 | 0.0151 | 53.30% | |
| | | 900 | 27.5 | 26.5 | -2.5 | 25.00 | 0.9967 | 8.82 | 16.0 | 15.2 | 0.0111 | 50.28% | |
| | | 1800 | 26.0 | 26.5 | -2.5 | 23.50 | 0.9967 | 8.82 | 16.3 | 15.5 | 0.0079 | 47.26% | |
| | | 3600 | 25.0 | 26.5 | -2.5 | 22.50 | 0.9967 | 8.82 | 16.4 | 15.6 | 0.0056 | 45.25% | |
| | | 7200 | 24.0 | 26.5 | -2.5 | 21.50 | 0.9967 | 8.82 | 16.6 | 15.8 | 0.0040 | 43.24% | |
| | | 14400 | 23.0 | 27.0 | -2.4 | 20.60 | 0.9965 | 8.72 | 16.8 | 16.0 | 0.0028 | 41.43% | |
| | | 28800 | 22.5 | 27.5 | -2.4 | 20.10 | 0.9964 | 8.62 | 16.9 | 16.1 | 0.0020 | 40.42% | |
| | | 86400 | 22.0 | 26.5 | -2.5 | 19.50 | 0.9967 | 8.82 | 17.0 | 16.2 | 0.0012 | 39.22% | |
| Obs: | | | | | | Método de secagem da amostra: AR | | | Defloculante: | | Operador: Ricardo/Andréa | | |



| ABNT | | ASTM | | Diametros Equivalentes (mm) | |
|------------------------------|-------|-------------------------------|-------|-----------------------------|-------------------|
| Pedregulho (d > 2,0 mm): | 6.2% | Pedregulho (d > 4,8 mm): | 2.2% | D ₁₀ = | D ₅₀ = |
| Areia (0,06 < d < 2,0 mm): | 23.8% | Areia (0,075 < d < 4,8 mm): | 24.7% | D ₁₅ = | D ₆₀ = |
| Silte (0,002 < d < 0,06 mm): | 23.0% | Silte (0,002 < d < 0,075 mm): | 26.0% | D ₃₀ = | D ₈₅ = |
| Argila (d < 0,002 mm): | 47.0% | Argila (d < 0,002 mm): | 47.0% | Operador: | |
| Classificação: | | Classificação: | | Amostra nº: | |
| Obs: | | Início do Ensaio: | | | |
| | | Término do Ensaio: | | | |



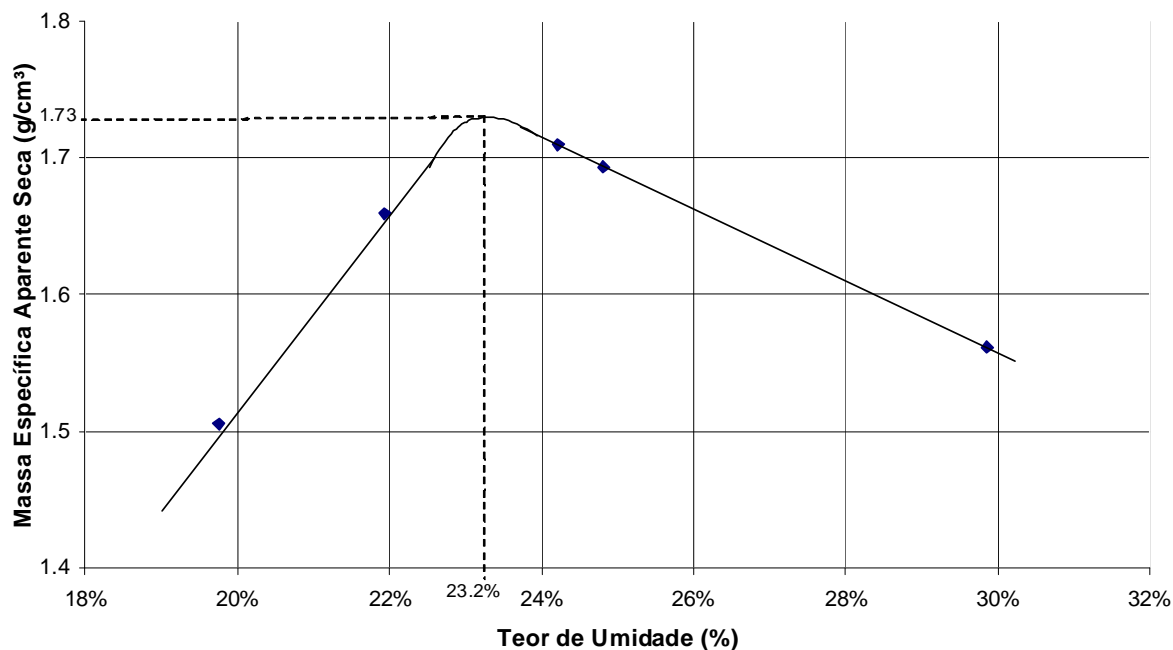
| | |
|--------------------|--------------------------|
| COMPACTAÇÃO | Amostra nº: 1 |
| IT - 010 | Data: 31/3/2007 |
| | Operador: Ricardo |

| | |
|--|-----------------------------|
| Energia de Compactação Utilizada (N/M): N | Cilindro (P/G): P |
| Número de Golpes por Camada: 26 | Número de Camadas: 3 |

| COMPACTAÇÃO | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|
| Determinação Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cilindro Nº | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | |
| Massa do Cilindro (g) | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | | |
| Massa Solo + Cilindro (g) | 3945.40 | 4025.30 | 4034.90 | 3940.60 | 3734.10 | | |
| M (solo) (g) | 1901.80 | 1981.70 | 1991.30 | 1897.00 | 1690.50 | | |
| Volume do Cilindro (cm³) | 937.84 | 937.84 | 937.84 | 937.84 | 937.84 | | |
| ρ (g/cm³) | 2.03 | 2.11 | 2.12 | 2.02 | 1.80 | | |
| ρ_d (g/cm³) | 1.56 | 1.69 | 1.71 | 1.66 | 1.51 | | |
| Usar Valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

| TEOR DE UMIDADE | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|--------|---|---|
| Determinação Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula Nº | 148 | 152 | 176 | 66 | 90 | | |
| M_{c+s+w} (g) | 104.50 | 118.32 | 118.37 | 86.00 | 103.86 | | |
| M_{c+s} (g) | 86.15 | 99.66 | 100.20 | 73.96 | 89.89 | | |
| M_c (g) | 24.69 | 24.45 | 25.17 | 19.08 | 19.18 | | |
| M_s (g) | 61.46 | 75.21 | 75.03 | 54.88 | 70.71 | | |
| M_w (g) | 18.35 | 18.66 | 18.17 | 12.04 | 13.97 | | |
| w (%) | 29.9% | 24.8% | 24.2% | 21.9% | 19.8% | | |
| Utilizar valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

Obs.:





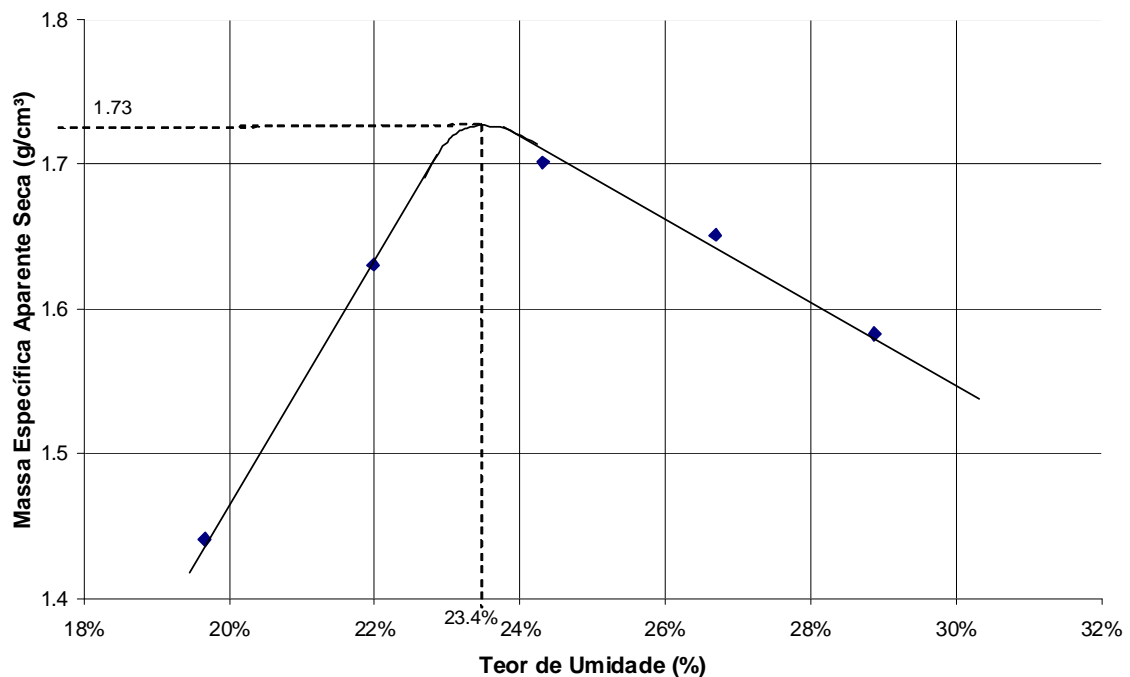
| | |
|-------------|-------------------|
| COMPACTAÇÃO | Amostra nº: 2 |
| IT - 010 | Data: 14/4/2007 |
| | Operador: Ricardo |

| | | | |
|---|----|--------------------|---|
| Energia de Compactação Utilizada (N/M): | N | Cilindro (P/G): | P |
| Número de Golpes por Camada: | 26 | Número de Camadas: | 3 |

| COMPACTAÇÃO | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cilindro N° | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | |
| Massa do Cilindro (g) | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | | |
| Massa Solo + Cilindro (g) | 3660.70 | 3908.90 | 4027.10 | 4005.30 | 3956.80 | | |
| M (solo) (g) | 1617.10 | 1865.30 | 1983.50 | 1961.70 | 1913.20 | | |
| Volume do Cilindro (cm³) | 937.84 | 937.84 | 937.84 | 937.84 | 937.84 | | |
| ρ (g/cm³) | 1.72 | 1.99 | 2.11 | 2.09 | 2.04 | | |
| ρ_d (g/cm³) | 1.44 | 1.63 | 1.70 | 1.65 | 1.58 | | |
| Usar Valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

| TEOR DE UMIDADE | | | | | | | |
|----------------------|-------|--------|-------|-------|--------|---|---|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula N° | 22 | 156 | 133 | 152 | 143 | | |
| M_{C+S+W} (g) | 95.84 | 113.41 | 95.35 | 96.18 | 124.63 | | |
| M_{C+S} (g) | 83.16 | 97.11 | 79.55 | 81.07 | 101.82 | | |
| M_c (g) | 18.68 | 22.96 | 14.57 | 24.45 | 22.84 | | |
| M_s (g) | 64.48 | 74.15 | 64.98 | 56.62 | 78.98 | | |
| M_w (g) | 12.68 | 16.30 | 15.80 | 15.11 | 22.81 | | |
| w (%) | 19.7% | 22.0% | 24.3% | 26.7% | 28.9% | | |
| Utilizar valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

Obs.:





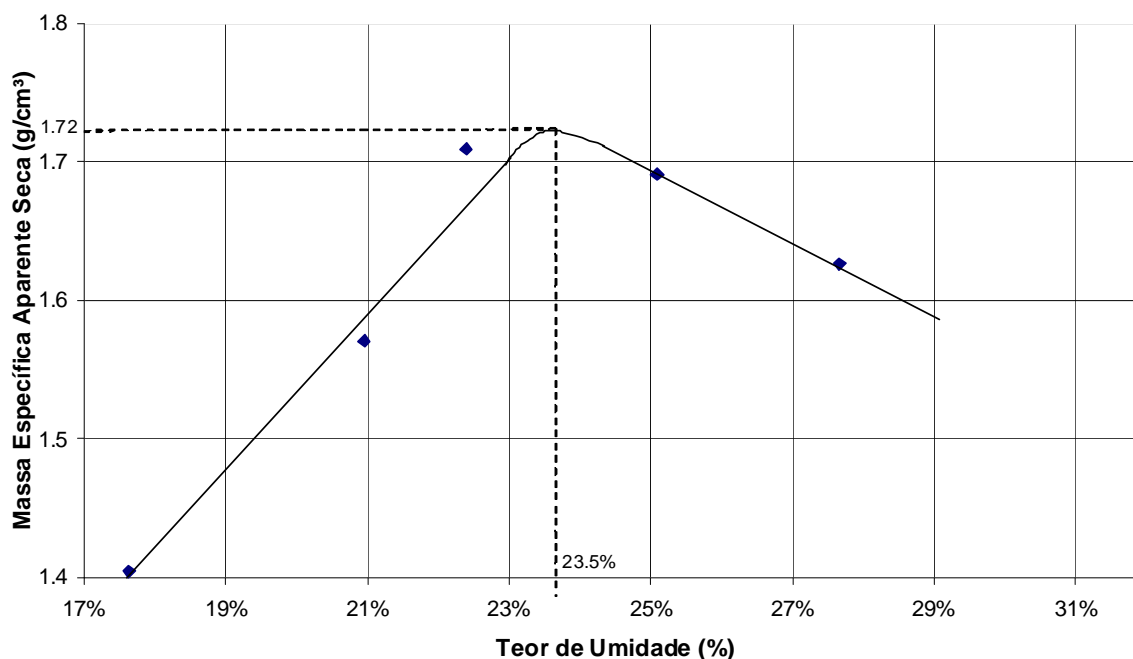
| | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|
| COMPACTAÇÃO IT - 010 | Amostra nº: | 3 |
| | Data: | 14/4/2007 |
| | Operador: | Ricardo |

| | | | |
|---|----|--------------------|---|
| Energia de Compactação Utilizada (N/M): | N | Cilindro (P/G): | P |
| Número de Golpes por Camada: | 26 | Número de Camadas: | 3 |

| COMPACTAÇÃO | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|
| Determinação Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cilindro Nº | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | |
| Massa do Cilindro (g) | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | 2043.60 | | |
| Massa Solo + Cilindro (g) | 3593.20 | 3825.10 | 4005.10 | 4026.80 | 3990.90 | | |
| M (solo) (g) | 1549.60 | 1781.50 | 1961.50 | 1983.20 | 1947.30 | | |
| Volume do Cilindro (cm ³) | 937.84 | 937.84 | 937.84 | 937.84 | 937.84 | | |
| ρ (g/cm ³) | 1.65 | 1.90 | 2.09 | 2.11 | 2.08 | | |
| ρ_d (g/cm ³) | 1.40 | 1.57 | 1.71 | 1.69 | 1.63 | | |
| Usar Valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

| TEOR DE UMIDADE | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|-------|---|---|
| Determinação Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula Nº | 148 | 59 | 197 | 90 | 161 | | |
| M_{c+s+w} (g) | 113.28 | 104.59 | 117.49 | 94.72 | 89.23 | | |
| M_{c+s} (g) | 100.00 | 89.81 | 100.44 | 79.57 | 75.18 | | |
| M_c (g) | 24.69 | 19.29 | 24.29 | 19.18 | 24.39 | | |
| M_s (g) | 75.31 | 70.52 | 76.15 | 60.39 | 50.79 | | |
| M_w (g) | 13.28 | 14.78 | 17.05 | 15.15 | 14.05 | | |
| w (%) | 17.6% | 21.0% | 22.4% | 25.1% | 27.7% | | |
| Utilizar valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

Obs.:





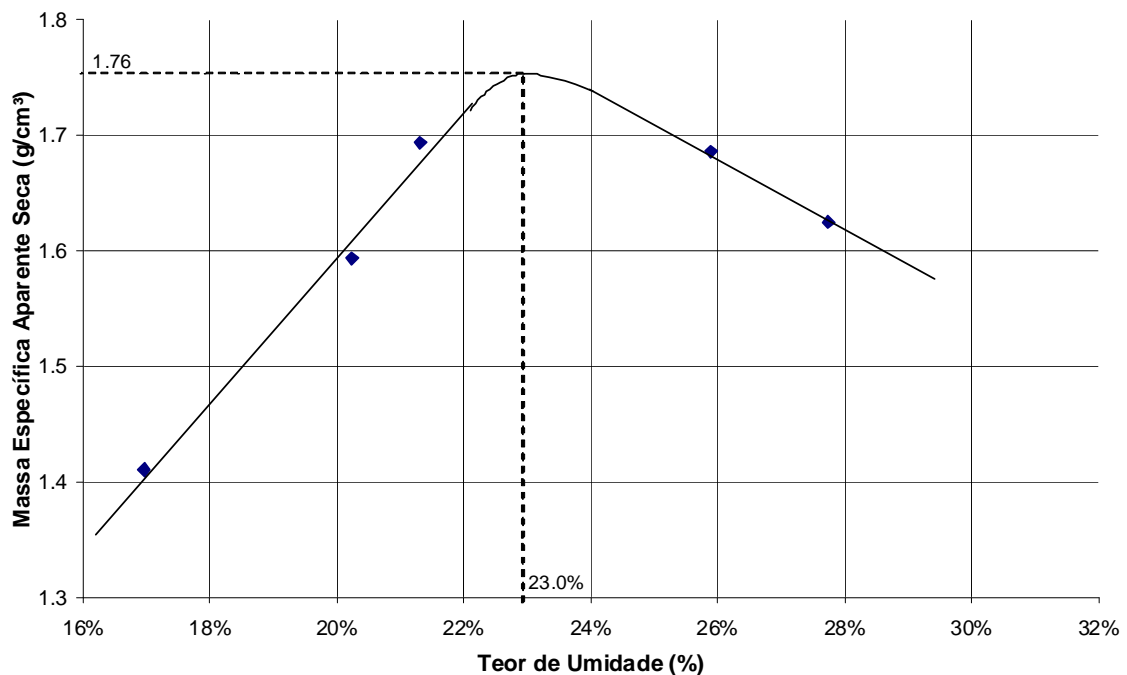
| | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|
| COMPACTAÇÃO IT - 010 | Amostra nº: | 4 |
| | Data: | 14/4/2007 |
| | Operador: | Andréa |

| | | | |
|---|----|--------------------|---|
| Energia de Compactação Utilizada (N/M): | N | Cilindro (P/G): | P |
| Número de Golpes por Camada: | 26 | Número de Camadas: | 3 |

| COMPACTAÇÃO | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cilindro N° | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | | |
| Massa do Cilindro (g) | 2051.30 | 2051.30 | 2051.30 | 2051.30 | 2051.30 | | |
| Massa Solo + Cilindro (g) | 3600.10 | 3980.50 | 4044.20 | 4000.00 | 3850.00 | | |
| M (solo) (g) | 1548.80 | 1929.20 | 1992.90 | 1948.70 | 1798.70 | | |
| Volume do Cilindro (cm³) | 939.00 | 939.00 | 939.00 | 939.00 | 939.00 | | |
| ρ (g/cm³) | 1.65 | 2.05 | 2.12 | 2.08 | 1.92 | | |
| ρ_d (g/cm³) | 1.41 | 1.69 | 1.69 | 1.62 | 1.59 | | |
| Usar Valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

| TEOR DE UMIDADE | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula N° | 10 | 25 | 158 | 98 | 87 | | |
| M_{c+s+w} (g) | 164.00 | 137.21 | 150.20 | 125.32 | 121.13 | | |
| M_{c+s} (g) | 146.97 | 122.80 | 132.12 | 107.92 | 108.02 | | |
| M_c (g) | 46.60 | 55.21 | 62.30 | 45.20 | 43.25 | | |
| M_s (g) | 100.37 | 67.59 | 69.82 | 62.72 | 64.77 | | |
| M_w (g) | 17.03 | 14.41 | 18.08 | 17.40 | 13.11 | | |
| w (%) | 17.0% | 21.3% | 25.9% | 27.7% | 20.2% | | |
| Utilizar valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

Obs.:





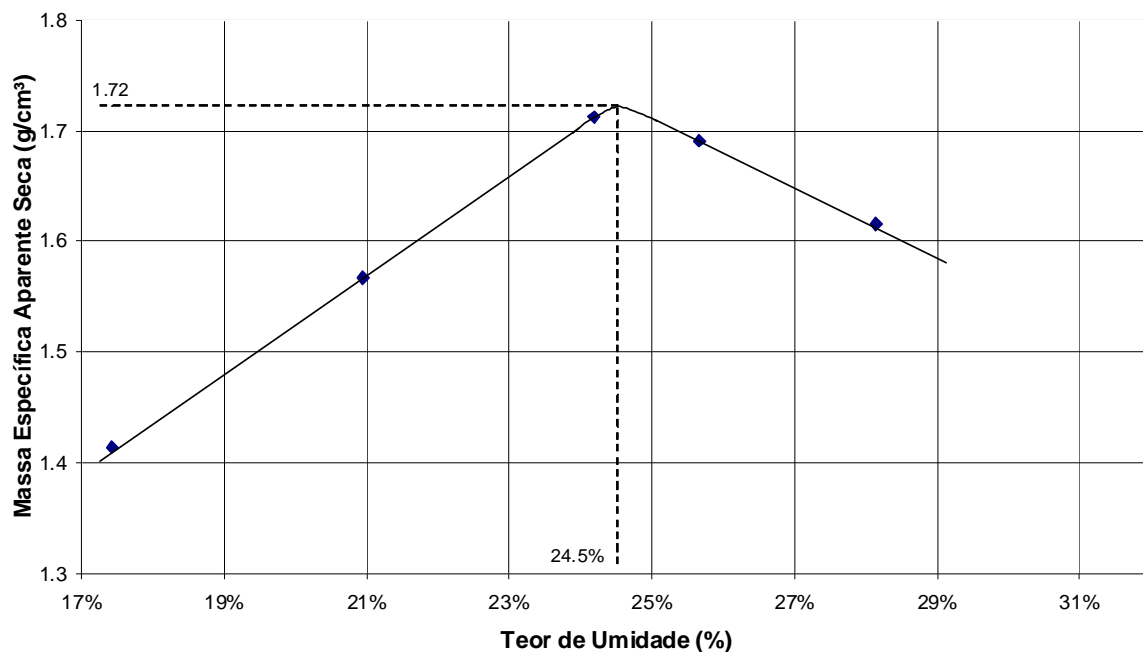
| | |
|--------------------|-------------------------|
| COMPACTAÇÃO | Amostra nº: 5 |
| IT - 010 | Data: 14/4/2007 |
| | Operador: Andréa |

| | |
|--|-----------------------------|
| Energia de Compactação Utilizada (N/M): N | Cilindro (P/G): P |
| Número de Golpes por Camada: 26 | Número de Camadas: 3 |

| COMPACTAÇÃO | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|
| Determinação Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cilindro Nº | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | | |
| Massa do Cilindro (g) | 2051.30 | 2051.30 | 2051.30 | 2051.30 | 2051.30 | | |
| Massa Solo + Cilindro (g) | 3610.50 | 4048.80 | 4046.20 | 3995.50 | 3831.20 | | |
| M (solo) (g) | 1559.20 | 1997.50 | 1994.90 | 1944.20 | 1779.90 | | |
| Volume do Cilindro (cm³) | 939.00 | 939.00 | 939.00 | 939.00 | 939.00 | | |
| ρ (g/cm³) | 1.66 | 2.13 | 2.12 | 2.07 | 1.90 | | |
| ρ_d (g/cm³) | 1.41 | 1.71 | 1.69 | 1.62 | 1.57 | | |
| Usar Valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

| TEOR DE UMIDADE | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|
| Determinação Nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula Nº | 14 | 53 | 82 | 64 | 3 | | |
| M_{C+S+W} (g) | 165.01 | 137.59 | 154.60 | 103.64 | 120.18 | | |
| M_{C+S} (g) | 147.60 | 121.71 | 134.63 | 93.73 | 107.11 | | |
| M_C (g) | 47.65 | 56.04 | 56.80 | 58.51 | 44.68 | | |
| M_s (g) | 99.95 | 65.67 | 77.83 | 35.22 | 62.43 | | |
| M_w (g) | 17.41 | 15.88 | 19.97 | 9.91 | 13.07 | | |
| w (%) | 17.4% | 24.2% | 25.7% | 28.1% | 20.9% | | |
| Utilizar valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

Obs.:





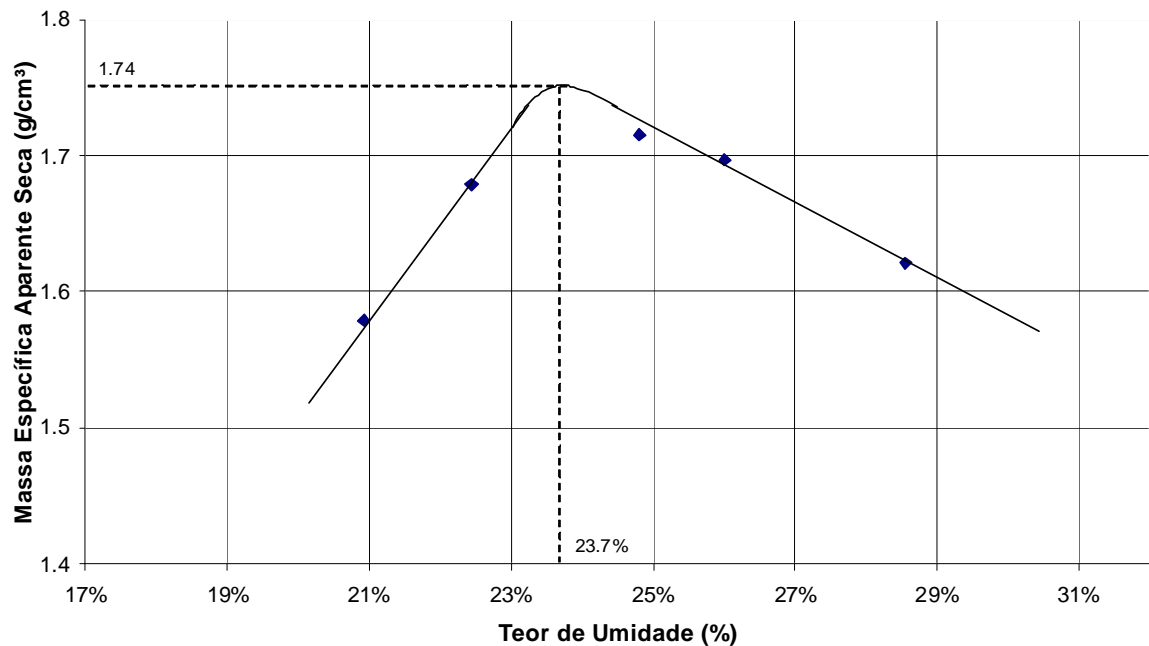
| | | |
|--------------------------------|-------------|-----------|
| COMPACTAÇÃO IT - 010 | Amostra nº: | 6 |
| | Data: | 14/4/2007 |
| | Operador: | Andréa |

| | | | |
|---|----|--------------------|---|
| Energia de Compactação Utilizada (N/M): | N | Cilindro (P/G): | P |
| Número de Golpes por Camada: | 26 | Número de Camadas: | 3 |

| COMPACTAÇÃO | | | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---|---|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cilindro N° | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | | |
| Massa do Cilindro (g) | 2036.70 | 2036.70 | 2036.70 | 2036.70 | 2036.70 | | |
| Massa Solo + Cilindro (g) | 3968.90 | 4048.80 | 4046.20 | 3995.50 | 3831.20 | | |
| M (solo) (g) | 1932.20 | 2012.10 | 2009.50 | 1958.80 | 1794.50 | | |
| Volume do Cilindro (cm³) | 939.89 | 939.89 | 939.89 | 939.89 | 939.89 | | |
| ρ (g/cm³) | 2.06 | 2.14 | 2.14 | 2.08 | 1.91 | | |
| ρ_d (g/cm³) | 1.68 | 1.72 | 1.70 | 1.62 | 1.58 | | |
| Usar Valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

| TEOR DE UMIDADE | | | | | | | |
|----------------------|--------|-------|--------|-------|--------|---|---|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula N° | 4 | 66 | 91 | 178 | 179 | | |
| M_{c+s+w} (g) | 180.41 | 79.50 | 105.79 | 78.24 | 111.08 | | |
| M_{c+s} (g) | 154.69 | 67.49 | 89.74 | 68.67 | 97.29 | | |
| M_c (g) | 40.07 | 19.07 | 28.03 | 35.16 | 31.38 | | |
| M_s (g) | 114.62 | 48.42 | 61.71 | 33.51 | 65.91 | | |
| M_w (g) | 25.72 | 12.01 | 16.05 | 9.57 | 13.79 | | |
| w (%) | 22.4% | 24.8% | 26.0% | 28.6% | 20.9% | | |
| Utilizar valor (s/n) | s | s | s | s | s | | |

Obs.:





| | | |
|---|--------------------|--------|
| Cisalhamento Direto IT - 016 | Amostra nº: | 1 |
| | Início do Ensaio: | 1/6/07 |
| | Término do Ensaio: | 9/6/07 |

| CP1 | | | | | | |
|--------------|------------|-----------------------------------|--------------|-----------------|----------|--|
| Leitura (mm) | Carga (kN) | Area Corrigida (cm ²) | Tensão (kPa) | Deformação (mm) | | |
| | | | | Horizontal | Vertical | |
| 0,000 | 0,000 | 100,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 0,011 | 0,017 | 99,900 | 1,652 | 0,100 | 0,010 | |
| 0,076 | 0,114 | 99,800 | 11,423 | 0,200 | -0,010 | |
| 0,152 | 0,228 | 99,700 | 22,869 | 0,300 | -0,020 | |
| 0,212 | 0,318 | 99,600 | 31,928 | 0,400 | -0,030 | |
| 0,238 | 0,357 | 99,500 | 35,879 | 0,500 | -0,040 | |
| 0,265 | 0,398 | 99,400 | 39,990 | 0,600 | -0,045 | |
| 0,276 | 0,414 | 99,300 | 41,692 | 0,700 | -0,050 | |
| 0,296 | 0,444 | 99,200 | 44,758 | 0,800 | -0,060 | |
| 0,337 | 0,506 | 99,100 | 51,009 | 0,900 | -0,065 | |
| 0,371 | 0,557 | 99,000 | 56,212 | 1,000 | -0,070 | |
| 0,466 | 0,699 | 98,800 | 70,749 | 1,200 | -0,100 | |
| 0,538 | 0,807 | 98,600 | 81,846 | 1,400 | -0,130 | |
| 0,570 | 0,855 | 98,400 | 86,890 | 1,600 | -0,160 | |
| 0,606 | 0,909 | 98,200 | 92,566 | 1,800 | -0,185 | |
| 0,630 | 0,945 | 98,000 | 96,429 | 2,000 | -0,210 | |
| 0,680 | 1,020 | 97,500 | 104,615 | 2,500 | -0,270 | |
| 0,718 | 1,077 | 97,000 | 111,031 | 3,000 | -0,330 | |
| 0,742 | 1,113 | 96,500 | 115,337 | 3,500 | -0,370 | |
| 0,760 | 1,140 | 96,000 | 118,750 | 4,000 | -0,410 | |
| 0,776 | 1,164 | 95,500 | 121,885 | 4,500 | -0,450 | |
| 0,792 | 1,188 | 95,000 | 125,053 | 5,000 | -0,490 | |
| 0,804 | 1,206 | 94,500 | 127,619 | 5,500 | -0,525 | |
| 0,816 | 1,224 | 94,000 | 130,213 | 6,000 | -0,560 | |
| 0,824 | 1,236 | 93,500 | 132,193 | 6,500 | -0,595 | |
| 0,830 | 1,245 | 93,000 | 133,871 | 7,000 | -0,625 | |
| 0,842 | 1,263 | 92,500 | 136,541 | 7,500 | -0,655 | |
| 0,856 | 1,284 | 92,000 | 139,565 | 8,000 | -0,685 | |
| 0,864 | 1,296 | 91,500 | 141,639 | 8,500 | -0,715 | |
| 0,872 | 1,308 | 91,000 | 143,736 | 9,000 | -0,750 | |
| 0,878 | 1,317 | 90,500 | 145,525 | 9,500 | -0,770 | |
| 0,884 | 1,326 | 90,000 | 147,333 | 10,000 | -0,790 | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

$$\sigma \text{ (kPa)} = 200,00$$

$$\tau \text{ (kPa)} = 125,00$$



| | | |
|----------------------------|--------------------|--------|
| Cisalhamento Direto | Amostra nº: | 1 |
| | Início do Ensaio: | 1/6/07 |
| | Término do Ensaio: | 9/6/07 |
| IT - 016 | | |

| CP2 | | | | | | |
|--------------|------------|-----------------------------------|--------------|-----------------|----------|--|
| Leitura (mm) | Carga (kN) | Area Corrigida (cm ²) | Tensão (kPa) | Deformação (mm) | | |
| | | | | Horizontal | Vertical | |
| 0,000 | 0,000 | 100,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| 0,002 | 0,003 | 99,900 | 0,300 | 0,100 | 0,010 | |
| 0,002 | 0,003 | 99,800 | 0,301 | 0,200 | 0,015 | |
| 0,002 | 0,003 | 99,700 | 0,301 | 0,300 | 0,020 | |
| 0,002 | 0,003 | 99,600 | 0,301 | 0,400 | 0,025 | |
| 0,002 | 0,003 | 99,500 | 0,302 | 0,500 | 0,030 | |
| 0,002 | 0,004 | 99,400 | 0,362 | 0,600 | 0,030 | |
| 0,004 | 0,006 | 99,300 | 0,604 | 0,700 | 0,028 | |
| 0,022 | 0,033 | 99,200 | 3,327 | 0,800 | 0,028 | |
| 0,044 | 0,066 | 99,100 | 6,660 | 0,900 | 0,028 | |
| 0,057 | 0,086 | 99,000 | 8,636 | 1,000 | 0,031 | |
| 0,086 | 0,129 | 98,800 | 13,057 | 1,200 | 0,030 | |
| 0,116 | 0,174 | 98,600 | 17,647 | 1,400 | 0,030 | |
| 0,152 | 0,228 | 98,400 | 23,171 | 1,600 | 0,002 | |
| 0,220 | 0,330 | 98,200 | 33,605 | 1,800 | 0,002 | |
| 0,282 | 0,423 | 98,000 | 43,163 | 2,000 | 0,000 | |
| 0,340 | 0,510 | 97,500 | 52,308 | 2,500 | -0,010 | |
| 0,424 | 0,636 | 97,000 | 65,567 | 3,000 | -0,035 | |
| 0,538 | 0,807 | 96,500 | 83,627 | 3,500 | -0,060 | |
| 0,632 | 0,948 | 96,000 | 98,750 | 4,000 | -0,080 | |
| 0,764 | 1,146 | 95,500 | 120,000 | 4,500 | -0,120 | |
| 0,864 | 1,296 | 95,000 | 136,421 | 5,000 | -0,160 | |
| 0,942 | 1,413 | 94,500 | 149,524 | 5,500 | -0,190 | |
| 0,999 | 1,499 | 94,000 | 159,415 | 6,000 | -0,220 | |
| 1,046 | 1,569 | 93,500 | 167,807 | 6,500 | -0,250 | |
| 1,086 | 1,629 | 93,000 | 175,161 | 7,000 | -0,270 | |
| 1,120 | 1,680 | 92,500 | 181,622 | 7,500 | -0,290 | |
| 1,152 | 1,728 | 92,000 | 187,826 | 8,000 | -0,300 | |
| 1,177 | 1,766 | 91,500 | 192,951 | 8,500 | -0,320 | |
| 1,198 | 1,797 | 91,000 | 197,473 | 9,000 | -0,330 | |
| 1,221 | 1,832 | 90,500 | 202,376 | 9,500 | -0,350 | |
| 1,240 | 1,860 | 90,000 | 206,667 | 10,000 | -0,360 | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

$$\sigma \text{ (kPa)} = 300,00$$

$$\tau \text{ (kPa)} = 170,00$$



| | | |
|--|--------------------|--------|
| Cisalhamento Direto IT - 016 | Amostra nº: | 1 |
| | Início do Ensaio: | 1/6/07 |
| | Término do Ensaio: | 9/6/07 |

| CP3 | | | | | |
|--------------|------------|-----------------------------------|--------------|-----------------|----------|
| Leitura (mm) | Carga (kN) | Área Corrigida (cm ²) | Tensão (kPa) | Deformação (mm) | |
| | | | | Horizontal | Vertical |
| 0,000 | 0,000 | 100,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,002 | 0,003 | 99,900 | 0,300 | 0,100 | 0,010 |
| 0,003 | 0,005 | 99,800 | 0,451 | 0,200 | 0,010 |
| 0,003 | 0,005 | 99,700 | 0,451 | 0,300 | -0,010 |
| 0,003 | 0,005 | 99,600 | 0,452 | 0,400 | -0,030 |
| 0,004 | 0,006 | 99,500 | 0,603 | 0,500 | -0,050 |
| 0,004 | 0,006 | 99,400 | 0,604 | 0,600 | -0,055 |
| 0,005 | 0,008 | 99,300 | 0,755 | 0,700 | -0,070 |
| 0,020 | 0,030 | 99,200 | 3,024 | 0,800 | -0,080 |
| 0,040 | 0,060 | 99,100 | 6,054 | 0,900 | -0,100 |
| 0,060 | 0,090 | 99,000 | 9,091 | 1,000 | -0,110 |
| 0,110 | 0,165 | 98,800 | 16,700 | 1,200 | -0,130 |
| 0,134 | 0,201 | 98,600 | 20,385 | 1,400 | -0,150 |
| 0,168 | 0,252 | 98,400 | 25,610 | 1,600 | -0,175 |
| 0,240 | 0,360 | 98,200 | 36,660 | 1,800 | -0,190 |
| 0,360 | 0,540 | 98,000 | 55,102 | 2,000 | -0,220 |
| 0,442 | 0,663 | 97,500 | 68,000 | 2,500 | -0,285 |
| 0,560 | 0,840 | 97,000 | 86,598 | 3,000 | -0,340 |
| 0,688 | 1,032 | 96,500 | 106,943 | 3,500 | -0,395 |
| 0,820 | 1,230 | 96,000 | 128,125 | 4,000 | -0,430 |
| 0,998 | 1,497 | 95,500 | 156,754 | 4,500 | -0,470 |
| 1,110 | 1,665 | 95,000 | 175,263 | 5,000 | -0,510 |
| 1,240 | 1,860 | 94,500 | 196,825 | 5,500 | -0,535 |
| 1,348 | 2,022 | 94,000 | 215,106 | 6,000 | -0,585 |
| 1,390 | 2,085 | 93,500 | 222,995 | 6,500 | -0,610 |
| 1,420 | 2,130 | 93,000 | 229,032 | 7,000 | -0,640 |
| 1,464 | 2,196 | 92,500 | 237,405 | 7,500 | -0,670 |
| 1,516 | 2,274 | 92,000 | 247,174 | 8,000 | -0,705 |
| 1,540 | 2,310 | 91,500 | 252,459 | 8,500 | -0,730 |
| 1,578 | 2,367 | 91,000 | 260,110 | 9,000 | -0,770 |
| 1,600 | 2,400 | 90,500 | 265,193 | 9,500 | -0,820 |
| 1,620 | 2,430 | 90,000 | 270,000 | 10,000 | -0,855 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

$$\sigma \text{ (kPa)} = 400,00$$

$$\tau \text{ (kPa)} = 225,00$$



| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra nº: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

DADOS INICIAIS DO CORPO DE PROVA

| TEOR DE UMIDADE - IT 001 | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|---|---|---|----------|
| Determinação N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Cápsula N° | 446 | 333 | 133 | | | | |
| M _{c+s+w} (g) | 55.09 | 53.69 | 59.24 | | | | |
| M _{c+s} (g) | 49.07 | 47.28 | 51.77 | | | | |
| M _c (g) | 19.44 | 15.36 | 14.57 | | | | |
| M _s (g) | 29.63 | 31.92 | 37.20 | | | | |
| M _w (g) | 6.02 | 6.41 | 7.47 | | | | |
| w (%) | 20.3% | 20.1% | 20.1% | | | | |
| Utilizar valor na média (s/n) | s | s | s | | | | |
| w _i (%) | 20.2% | | | | | | |
| Obs.: | | | | | | | Operador |

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| M _{anel} (g) | 34.34 |
| d _i (cm) | 5.1 |
| h _i (cm) | 2 |
| ρ _s (g) | 3.29 |
| M _{conj} (g) | 116.99 |
| M _i (g) | 82.65 |
| V _i (cm ³) | 40.856508 |
| ρ _i (g/cm ³) | 2.022933531 |
| ρ _d (g/cm ³) | 1.683439832 |
| e _i | 0.954331802 |
| S _t (%) | 0.695233389 |
| ρ _w (g/cm ³) | 1.00 |

| DADOS ADICIONAIS AO ENSAIO | |
|--|-------------|
| Obtenção do Corpo de Prova - Deformado ou Indeformado | Deformado |
| Processo de Moldagem do Corpo de Prova (p/ CP de origem deformada) | Compactação |
| Método para determinação do Coeficiente de Adensamento | |
| Método para determinação da Tensão de Pré-Adensamento | |

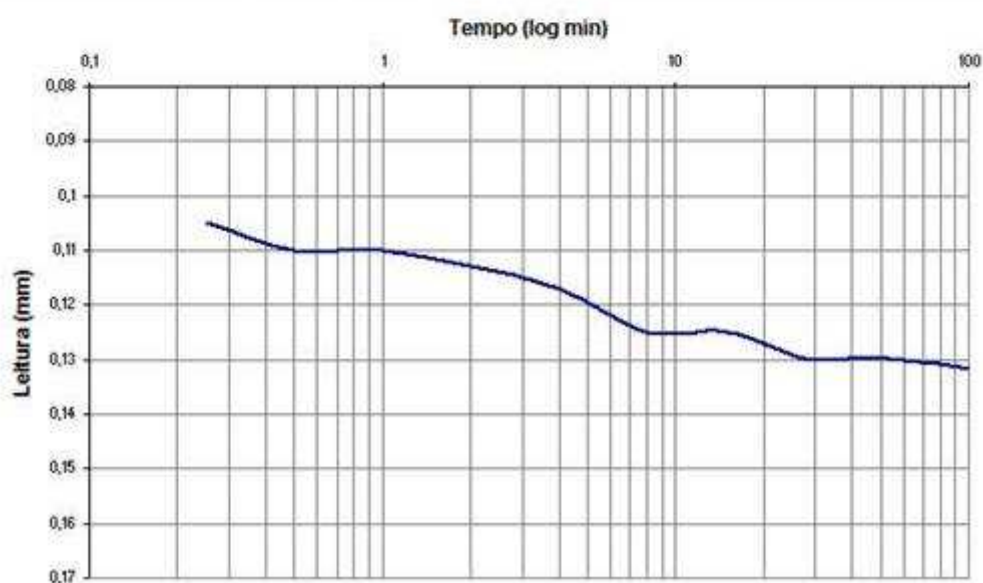


| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra n°: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

| | | | |
|-----------------|------|---------|--------|
| Carregamento n° | 1 | ei | 0,9751 |
| σ (kPa) | 13 | hs (cm) | 1,01 |
| hi (cm) | 2,00 | er | 0,9692 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 0,080 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 0,105 |
| 0,5 | 0,110 |
| 1 | 0,110 |
| 2 | 0,113 |
| 4 | 0,117 |
| 8 | 0,125 |
| 15 | 0,125 |
| 30 | 0,130 |
| 60 | 0,130 |
| 120 | |
| 240 | |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 0,140 |
| | |
| | |
| | |

Coefficiente de Adensamento - Casagrande



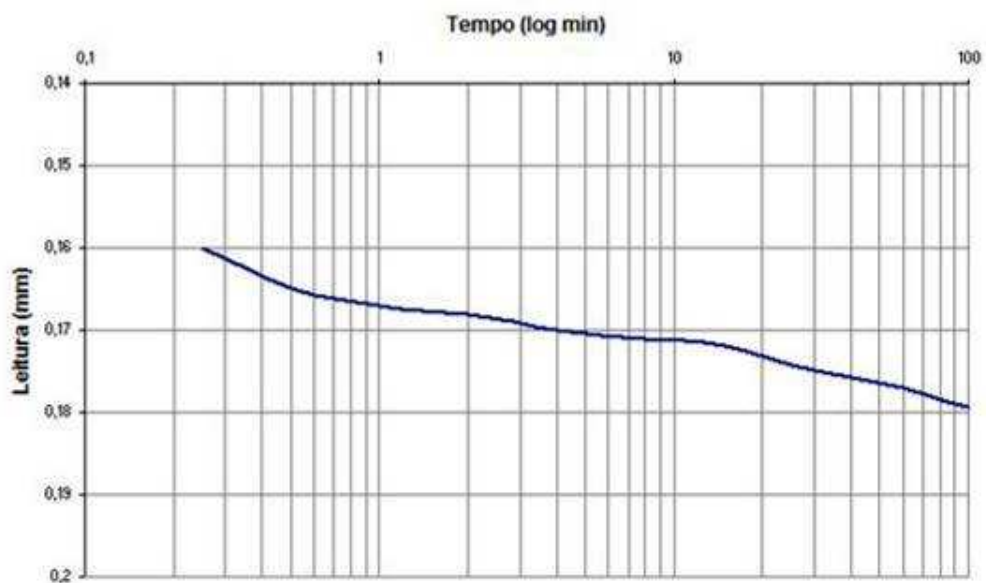


| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra nº: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

| | | | |
|-----------------|------|------------|--------|
| Carregamento nº | 1 | e_i | 0,9692 |
| σ (kPa) | 25 | h_s (cm) | 1,01 |
| h_i (cm) | 1,99 | e_f | 0,9642 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 0,140 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 0,160 |
| 0,5 | 0,165 |
| 1 | 0,167 |
| 2 | 0,168 |
| 4 | 0,170 |
| 8 | 0,171 |
| 15 | 0,172 |
| 30 | 0,175 |
| 60 | 0,177 |
| 120 | 0,180 |
| 240 | 0,180 |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 0,190 |
| | |
| | |
| | |

Coefficiente de Adensamento - Casagrande





ADENSAMENTO

IT - 014

Amostra n°:

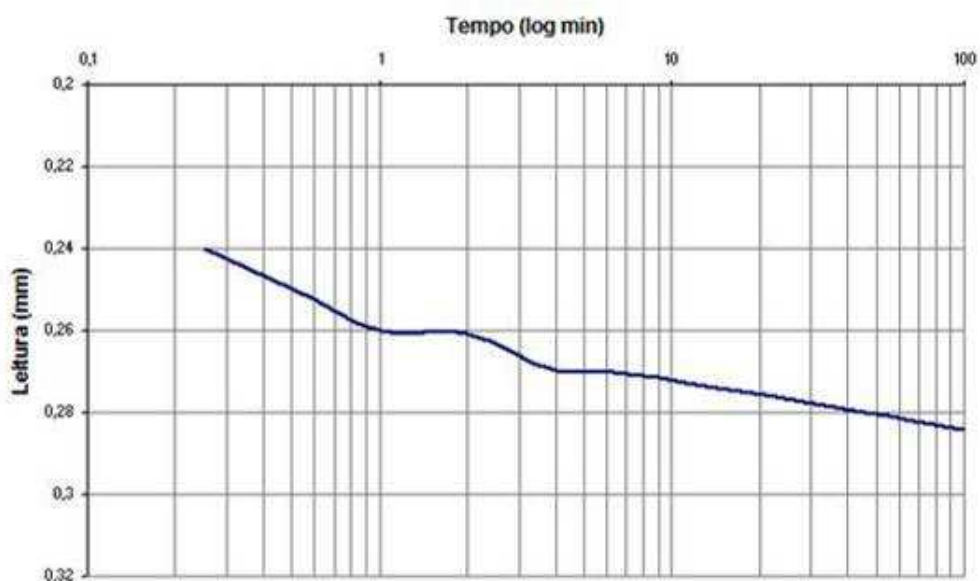
Data:

Responsável:

| | | | | |
|-----------------|------|--|------------|--------|
| Carregamento n° | 1 | | e_i | 0,9642 |
| σ (kPa) | 50 | | h_s (cm) | 1,01 |
| h_i (cm) | 1,98 | | e_f | 0,9533 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 0,190 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 0,240 |
| 0,5 | 0,250 |
| 1 | 0,260 |
| 2 | 0,261 |
| 4 | 0,270 |
| 8 | 0,271 |
| 15 | |
| 30 | |
| 60 | |
| 120 | 0,285 |
| 240 | 0,290 |
| 480 | 0,300 |
| 960 | |
| 1440 | 0,300 |
| | |
| | |
| | |

Coeficiente de Adensamento - Casagrande





ADENSAMENTO

IT - 014

Amostra n°:

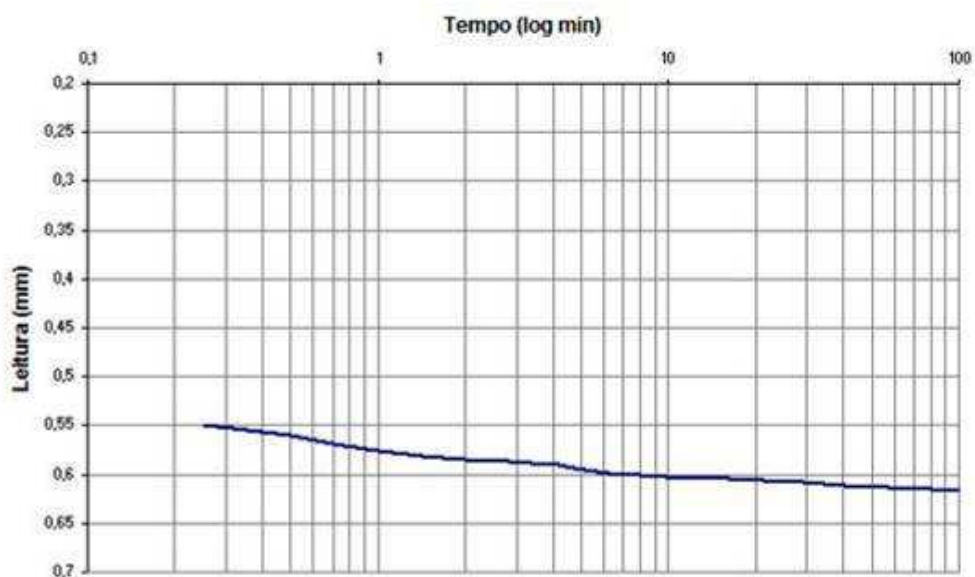
Data:

Responsável:

| | | | | |
|-----------------|------|--|---------|--------|
| Carregamento n° | 1 | | ei | 0,9525 |
| σ (kPa) | 100 | | hs (cm) | 1,00 |
| hi (cm) | 1,96 | | ef | 0,9301 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 0,405 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 0,550 |
| 0,5 | 0,560 |
| 1 | 0,575 |
| 2 | 0,585 |
| 4 | 0,590 |
| 8 | 0,600 |
| 15 | |
| 30 | |
| 60 | |
| 120 | |
| 240 | |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 0,630 |
| | |
| | |
| | |

Coeficiente de Adensamento - Casagrande



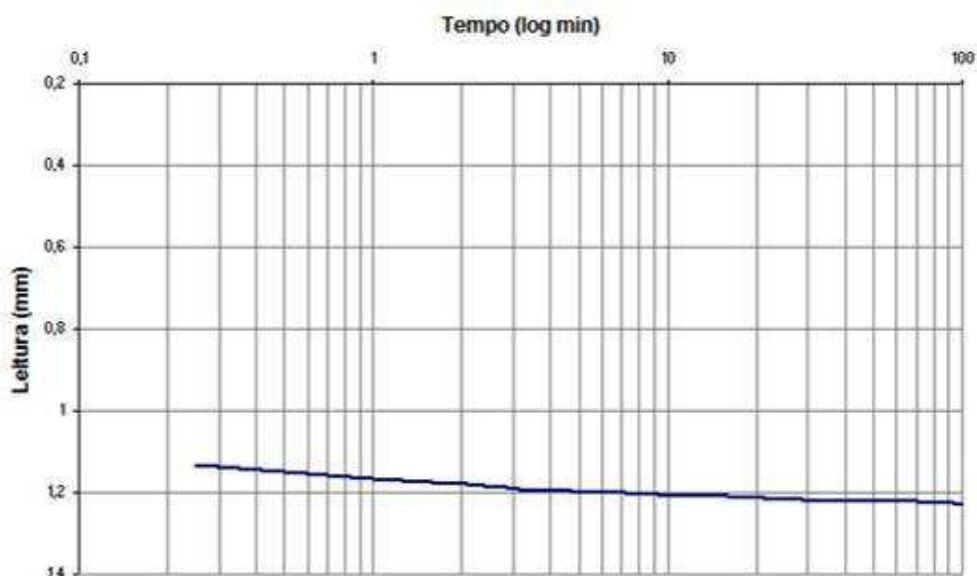


| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra n°: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

| | | | |
|-----------------|------|---------|--------|
| Carregamento n° | 1 | ei | 0,9267 |
| σ (kPa) | 200 | hs (cm) | 1,01 |
| hi (cm) | 1,94 | ef | 0,8655 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 0,630 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 1,130 |
| 0,5 | 1,150 |
| 1 | 1,165 |
| 2 | 1,180 |
| 4 | 1,195 |
| 8 | |
| 15 | |
| 30 | |
| 60 | |
| 120 | |
| 240 | 1,235 |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 1,245 |
| | |
| | |
| | |

Coefficiente de Adensamento - Casagrande



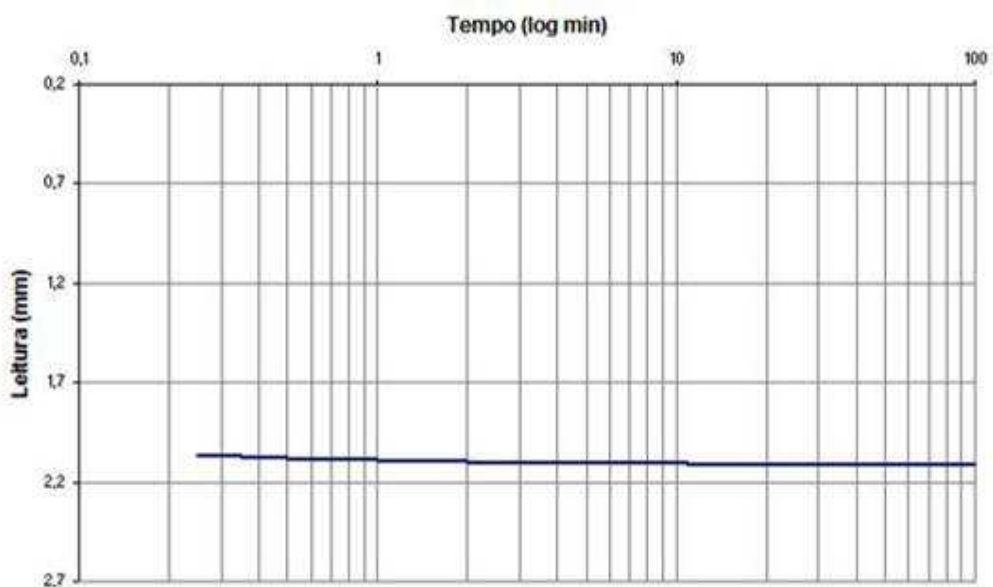


| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra n°: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

| | | | | |
|-----------------|------|--|---------|--------|
| Carregamento n° | 1 | | ei | 0,8655 |
| σ (kPa) | 400 | | hs (cm) | 1,01 |
| hi (cm) | 1,88 | | ef | 0,7775 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 1,245 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 2,065 |
| 0,5 | 2,078 |
| 1 | 2,090 |
| 2 | 2,100 |
| 4 | 2,110 |
| 8 | 2,110 |
| 15 | 2,111 |
| 30 | 2,112 |
| 60 | 2,115 |
| 120 | |
| 240 | |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 2,130 |
| | |
| | |
| | |

Coefficiente de Adensamento - Casagrande



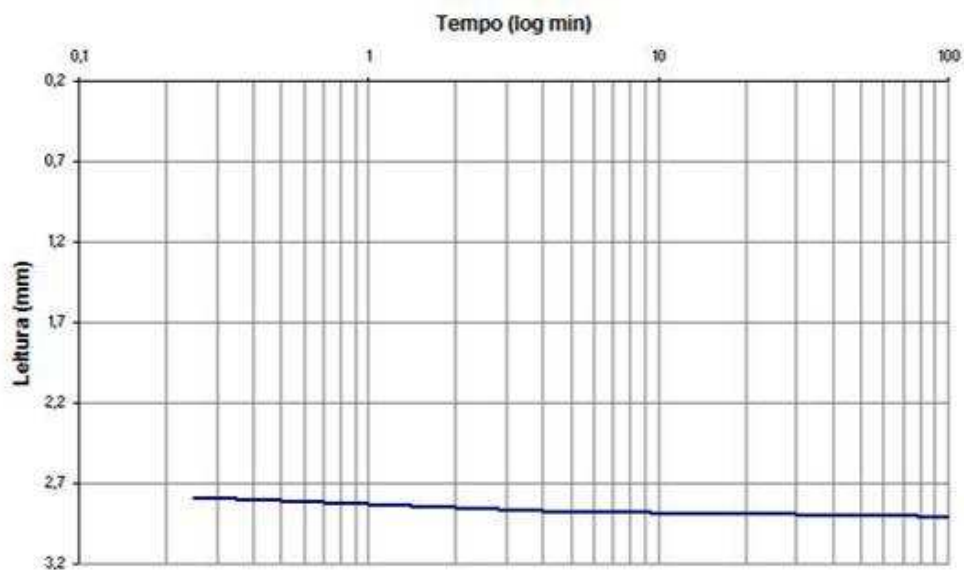


| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra n°: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

| | | | |
|-----------------|------|---------|--------|
| Carregamento n° | 1 | ei | 0,7775 |
| σ (kPa) | 800 | hs (cm) | 1,01 |
| hi (cm) | 1,79 | er | 0,6979 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 2,130 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 2,780 |
| 0,5 | 2,810 |
| 1 | 2,830 |
| 2 | 2,850 |
| 4 | 2,865 |
| 8 | 2,880 |
| 15 | 2,890 |
| 30 | 2,895 |
| 60 | 2,900 |
| 120 | 2,910 |
| 240 | |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 2,930 |
| | |
| | |
| | |

Coefficiente de Adensamento - Casagrande



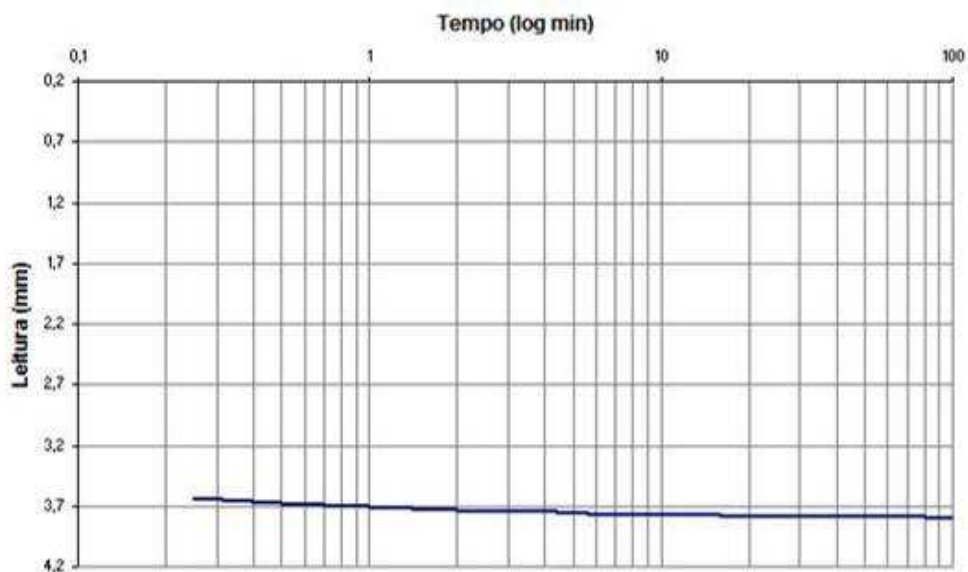


| | | |
|--------------------------------|--------------|--|
| ADENSAMENTO IT - 014 | Amostra n°: | |
| | Data: | |
| | Responsável: | |

| | | | |
|-----------------|------|---------|--------|
| Carregamento n° | 1 | ei | 0,6979 |
| σ (kPa) | 1600 | hs (cm) | 1,01 |
| hi (cm) | 1,71 | er | 0,6094 |

| Tempo (min) | Leitura (mm) |
|-------------|--------------|
| 0 | 2,930 |
| 0,125 | |
| 0,25 | 3,630 |
| 0,5 | 3,680 |
| 1 | 3,710 |
| 2 | 3,735 |
| 4 | 3,750 |
| 8 | 3,770 |
| 15 | |
| 30 | |
| 60 | |
| 120 | |
| 240 | |
| 480 | |
| 960 | |
| 1440 | 3,820 |
| | |
| | |
| | |

Coefficiente de Adensamento - Casagrande



**UFMG****UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GEOTECNIA

ADENSAMENTO

IT - 014

Amostra nº:

Data:

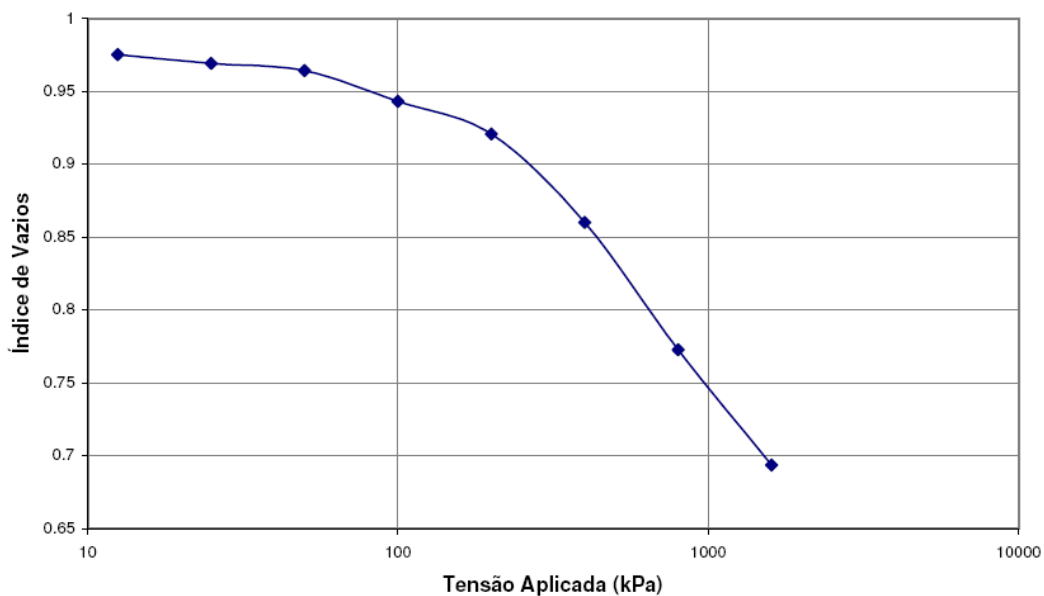
Responsável:

| ΔH (mm) | H (mm) | e_i | e_f | σ (kPa) |
|-----------------|--------|-------|-------|----------------|
| 0.000 | 20.000 | 0.975 | 0.975 | 12.5 |
| 0.060 | 20.000 | 0.975 | 0.969 | 25.0 |
| 0.050 | 19.940 | 0.969 | 0.964 | 50.0 |
| 0.210 | 19.890 | 0.964 | 0.943 | |
| 0.005 | 19.680 | 0.943 | 0.943 | 100.0 |
| 0.225 | 19.675 | 0.943 | 0.921 | 200.0 |
| 0.615 | 19.450 | 0.921 | 0.860 | 400.0 |
| 0.885 | 18.835 | 0.860 | 0.773 | 800.0 |
| 0.800 | 17.950 | 0.773 | 0.694 | 1600.0 |
| 0.890 | 17.150 | 0.694 | 0.606 | |
| | 16.260 | 0.606 | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Tensão de Pré-Adensamento

Pacheco Silva

Casagrande



ANEXO II

RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS REALIZADOS NO LABORATÓRIO DE SOLOS DA CEMIG

CEMIG GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S. A.
Gerência de Engenharia Civil da Geração – GR/EC
Laboratório de Materiais



Centro de Pesquisas Hidráulicas e
Recursos Hídricos da UFMG

Ensaio Geotécnicos

| | |
|--|-------------------------|
| ELABORAÇÃO: GR/EC – LABORATÓRIO DE MATERIAIS | CONTROLE DE ALTERAÇÕES: |
| VERIFICAÇÃO: RMN | VISTO: |
| APROVAÇÃO: CJC | VISTO: |
| DATA: 24/05/07 | |

Ficha Técnica

Título :

Relatório GR/EC-LM-R177 – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG
Ensaio Geotécnicos

Palavras Chaves :

Relatório GR/EC-LM-R177 – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG
Ensaio Geotécnicos

Resumo:

Neste relatório são apresentados resultados de ensaios de compressão triaxial rápido, adensado, com medida de poropressão - CU (\bar{R}).

1 - INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios de laboratório realizados em amostra deformada coletada no município de Nova Lima – MG, nas coordenadas UTM 610255 E e 7789960 N.

Os ensaios foram realizados conforme solicitação e programa de ensaios elaborado pelo Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG.

2 - DESENVOLVIMENTO

2.1 - Identificação da Amostra

Foi recebida pelo Laboratório uma amostra deformada assim identificada:

| Identificação do Cliente | Registro do Laboratório |
|--------------------------|-------------------------|
| CPH / UFMG | D-089/07-018 |

2.2 - Ensaios Realizados

| Nome do Ensaio | Quantidade |
|--|------------|
| Compressão triaxial rápido, adensado, com medida de poropressão - CU (\bar{R}) – CPs de 2" | 03 |

2.3 – Metodologia dos Ensaios de Compressão Triaxial CU (\bar{R})

Foram realizados ensaios de compressão triaxial rápido, adensado, com medida de poropressão (\bar{R}) com pressões confinantes de 100; 400 e 800 KPa.

Os ensaios foram realizados conforme a Instrução de Trabalho IT-GR/EC-18.

2.3.1 - Moldagem

Os corpos-de-prova foram moldados com diâmetro de 2" e altura de 11,0 cm, através de compactação por pisoteamento, com massa específica aparente seca de $1,73 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e umidade de $23,55 \pm 0,52\%$.

As moldagens foram realizadas conforme a Instrução de Trabalho IT-GR/EC-13.

2.3.2 - Montagem

Na montagem do sistema foram utilizadas pedras porosas comuns no topo e na base do corpo-de-prova.

2.3.3 - Adensamento

O adensamento dos corpos-de-prova foi realizado aplicando-se a pressão confinante do ensaio, permitindo-se a drenagem pela base e pelo topo do corpo-de-prova, mantida por um período mínimo de 21 horas.

2.3.4 - Carregamento Axial

O carregamento axial foi aplicado ao corpo-de-prova através de prensa de deformação controlada com velocidade de deformação axial de aproximadamente 0,09 %/min.

Os ensaios foram conduzidos até a deformação axial de 20% ou até a deformação axial suficiente para a definição do patamar após o pico de ruptura. O critério de ruptura adotado foi o de tensão axial máxima.

3 - ANEXOS

- Relatório Fotográfico;
- Planilhas de cálculo impressas contendo os dados dos ensaios de compressão triaxial rápido, adensado, com medida de poropressão - CU (\bar{R}), características dos corpos-de-prova, curvas de tensão x deformação axial, poropressão x deformação axial, ($\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$) x deformação axial, círculos de Mohr e trajetórias de tensões;

Observação: os valores de ângulo de atrito e coesão apresentados nos ensaios de compressão triaxial são apenas sugestivos, ficando a critério do cliente a avaliação final.

OBSERVAÇÕES:

- 1) Os resultados apresentados neste Relatório referem-se exclusivamente às amostras relacionadas no item 2.1 e ensaiadas nas condições especificadas no item 2.3;
- 2) Para copiar este Relatório, adotar os seguintes critérios:
 - Reproduzir o Relatório de Ensaio por inteiro;
 - Rubricar todas as páginas, atestando que confere com o original.
- 3) Para adquirir novas cópias autenticadas solicitar junto à :

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO

LABORATÓRIO DE MATERIAIS

Rua Nadir, nº 720, Bairro Caiçara/Adelaide

Belo Horizonte - Minas Gerais

CEP.: 30770-420

Telefax.: (31) 3411-4405 ou 3412-3011

Arquivo: Relatório GR/EC-LM-R177 – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG

HD:001

Data : 24/05/07

RMN/pic/hnsc

c.c.: Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG



Foto 1 – Amostra D-089/07-018 - CPs Triaxiais após ruptura
(da esquerda para a direita, CPs 01, 02 e 03)

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL \bar{R} (CU) DADOS DOS CP's

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|-----------|--------------|-----------|-----------|--|
| AMOSTRA: | | CPH / UFMG | | | | | | |
| PROGRAMA Nº: | | 018/07 | AMOSTRA Nº: | | D-089/07-018 | DATA: | 18/05/07 | |
| CONDIÇÃO MOLDAGEM : | | COMPACTAÇÃO POR PISOTEAMENTO | | | | | | |
| MASSA ESPECÍFICA SECA (g/cm³): | | 1,730 | UMIDADE ÓTIMA (%): | | 23,55 | | | |
| CORPO DE PROVA | | Nº | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | |
| ANTES DO ENSAIO | TEOR DE UMIDADE | CÁPSULA | Nº | | | | | |
| | | SOLO ÚMIDO + TARA | (g) | | | | | |
| | | SOLO SECO + TARA | (g) | | | | | |
| | | ÁGUA | (g) | | | | | |
| | | TARA | (g) | | | | | |
| | | SOLO SECO | (g) | | | | | |
| | | TEOR DE UMIDADE | (%) | 23,5 | 23,5 | 23,5 | | |
| | | DADOS DOS CORPOS DE PROVA | ALTURA | (cm) | 11,00 | 11,00 | 11,00 | |
| | DIÂMETRO | | (cm) | 5,05 | 5,05 | 5,05 | | |
| | ÁREA | | (cm²) | 20,00 | 20,00 | 20,00 | | |
| | VOLUME | | (cm³) | 220,00 | 220,00 | 220,00 | | |
| | CORPO DE PROVA ÚMIDO | | (g) | 471,45 | 471,43 | 471,41 | | |
| | MASSA ESP. AP. ÚMIDA | | (g/cm³) | 2,143 | 2,143 | 2,143 | | |
| | MASSA ESP. AP. SECA | | (g/cm³) | 1,735 | 1,735 | 1,735 | | |
| | GRAU DE COMPACTAÇÃO | | (%) | 100,3 | 100,3 | 100,3 | | |
| | DESVIO DE UMIDADE | | (%) | -0,1 | -0,1 | -0,1 | | |
| | MASSA ESP. DOS GRÃOS | | (g/cm³) | | | | | |
| | ÍNDICE DE VAZIOS | | | | | | | |
| | GRAU DE SATURAÇÃO | (%) | | | | | | |
| TEOR DE UMIDADE APÓS O ENSAIO | CÁPSULA Nº | Nº | | | | | | |
| | SOLO ÚMIDO + TARA | (g) | | | | | | |
| | SOLO SECO + TARA | (g) | | | | | | |
| | ÁGUA | (g) | | | | | | |
| | TARA | (g) | | | | | | |
| | SOLO SECO | (g) | | | | | | |
| | TEOR DE UMIDADE | (%) | | | | | | |

| | | | | | | |
|------------|------|--------------|-----|--------|--|----------|
| EXECUÇÃO: | PCA | VERIFICAÇÃO: | RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO | DATA: |
| DIGITAÇÃO: | HNSC | APROVAÇÃO: | CJC | VISTO: | <input type="checkbox"/> REPROVADO | 24/05/07 |

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL \bar{R} (CU) ADENSAMENTO ISOTRÓPICO

| AMOSTRA: | | CPH / UFMG | | | | | |
|------------------------|-------|-----------------|-------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--|
| PROGRAMA Nº: | | 018/07 | AMOSTRA Nº: D-089/07-018 | | | DATA: 18/05/07 | |
| Volume Inicial (cm³) = | | 220,00 | Altura Inicial (cm) = | | 11,00 | | |
| σ_3 (kgf/cm²) = | | 1,00 | σ_3 (kPa) = | | 100 | Cte. da bureta cm² = 1,00 | |
| Data | Hora | Tempo (minutos) | Leitura na Bureta Base + Topo | Variação de Leituras | Variação de Volume ΔV (cm³) | CP. Nº 01 | |
| 17/05/07 | 10:48 | 0 | 44,0 | 0,0 | 0,00 | ΔV (cm³) = 4,8 | |
| | | 1/8 | 42,0 | 2,0 | 2,00 | | |
| | | 1/4 | 41,7 | 2,3 | 2,30 | VOLUME FINAL V.F. (cm³) = 215,200 | |
| | | 1/2 | 41,2 | 2,8 | 2,80 | | |
| | | 1 | 40,9 | 3,1 | 3,10 | | |
| | | 2 | 40,5 | 3,5 | 3,50 | | |
| | | 4 | 40,2 | 3,8 | 3,80 | ÁREA FINAL S.F. (cm²) = 19,707 | |
| | | 8 | 39,9 | 4,1 | 4,10 | | |
| | | 15 | 39,7 | 4,3 | 4,30 | ALTURA FINAL H.F. (cm) = 10,920 | |
| | | 30 | 39,5 | 4,5 | 4,50 | | |
| 60 | 39,4 | 4,6 | 4,60 | | | | |
| 120 | 39,2 | 4,8 | 4,80 | | | | |
| 17/05/07 | 17:20 | 392 | 39,2 | 4,8 | 4,80 | | |
| 18/05/07 | 08:15 | 1287 | 40,3 | 3,7 | 3,70 | | |
| σ_3 (kgf/cm²) = | | 4,00 | σ_3 (kPa) = | | 400 | Cte. da bureta cm² = 1,00 | |
| Data | Hora | Tempo (minutos) | Leitura na Bureta Base + Topo | Variação de Leituras | Variação de Volume ΔV (cm³) | CP. Nº 02 | |
| 17/05/07 | 13:23 | 0 | 43,8 | 0,0 | 0,00 | ΔV (cm³) = 6,1 | |
| | | 1/8 | 41,4 | 2,4 | 2,40 | | |
| | | 1/4 | 41,3 | 2,5 | 2,50 | VOLUME FINAL V.F. (cm³) = 213,900 | |
| | | 1/2 | 41,2 | 2,6 | 2,60 | | |
| | | 1 | 41,1 | 2,7 | 2,70 | | |
| | | 2 | 41,0 | 2,8 | 2,80 | | |
| | | 4 | 40,9 | 2,9 | 2,90 | ÁREA FINAL S.F. (cm²) = 19,627 | |
| | | 8 | 40,6 | 3,2 | 3,20 | | |
| | | 15 | 40,3 | 3,5 | 3,50 | ALTURA FINAL H.F. (cm) = 10,898 | |
| | | 30 | 39,7 | 4,1 | 4,10 | | |
| 60 | 39,1 | 4,7 | 4,70 | | | | |
| 120 | 39,2 | 4,6 | 4,60 | | | | |
| 18/05/07 | 12:20 | 1377 | 38,3 | 5,5 | 5,50 | | |
| σ_3 (kgf/cm²) = | | 8,00 | σ_3 (kPa) = | | 800 | Cte. da bureta cm² = 1,00 | |
| Data | Hora | Tempo (minutos) | Leitura na Bureta Base + Topo | Variação de Leituras | Variação de Volume ΔV (cm³) | CP. Nº 03 | |
| 17/05/07 | 14:40 | 0 | 42,4 | 0,0 | 0,00 | ΔV (cm³) = 3,6 | |
| | | 1/8 | 40,2 | 2,2 | 2,20 | | |
| | | 1/4 | 40,2 | 2,2 | 2,20 | VOLUME FINAL V.F. (cm³) = 216,400 | |
| | | 1/2 | 40,1 | 2,3 | 2,30 | | |
| | | 1 | 40,1 | 2,3 | 2,30 | | |
| | | 2 | 40,0 | 2,4 | 2,40 | | |
| | | 4 | 39,8 | 2,6 | 2,60 | ÁREA FINAL S.F. (cm²) = 19,781 | |
| | | 8 | 39,7 | 2,7 | 2,70 | | |
| | | 15 | 39,6 | 2,8 | 2,80 | ALTURA FINAL H.F. (cm) = 10,940 | |
| | | 30 | 39,3 | 3,1 | 3,10 | | |
| 60 | 39,2 | 3,2 | 3,20 | | | | |
| 120 | 39,0 | 3,4 | 3,40 | | | | |
| 17/05/07 | 17:25 | 165 | 38,8 | 3,6 | 3,60 | | |
| 18/05/07 | 14:30 | 1430 | 38,8 | 3,6 | 3,60 | | |

| | | | | | | |
|------------|------|--------------|-----|--------|--|----------|
| EXECUÇÃO: | PCA | VERIFICAÇÃO: | RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO <input type="checkbox"/> REPROVADO | DATA: |
| DIGITAÇÃO: | HNCS | APROVAÇÃO: | CJC | VISTO: | | 24/05/07 |

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL \bar{R} (CU) CP 1

AMOSTRA: CPH / UFMG

PROGRAMA Nº: 018/07 AMOSTRA Nº: D-089/07-018 DATA: 18/05/07

DADOS DO CP

Nº: 1 \varnothing (")= 2 H_i (cm)= 11,00 H_0 (cm)= 10,920 A_0 (cm²) = 19,707
 σ_3 (kgf/cm²) = 1,00 CONTRA PRESSÃO (kgf/cm²) = Vel. %/min = 0,09091
 σ_3 (kPa) = 100,00 CONTRA PRESSÃO (kPa) =

DADOS DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO E ANEL DINAMOMÉTRICO

TRANSDUTOR Nº: TPR 13 Cte.= 1,1830 Li= 10943 Lic.= 8350,78

ANEL/CÉLULA Nº: CCE 01 Cte.= /

| ΔH cm ³ 10 ⁻³ | L | μ leitura | P kgf | $\epsilon = \Delta H/H_0$ | $A = A_0/1 - \epsilon$ | P/A kgf/cm ² | μ kgf/cm ² | $\bar{\sigma}_3$ kPa | $\bar{\sigma}_1$ kPa | $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$ |
|--|--------|------------------|----------|---------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0,000 | 10.943,00 | 0,00 | 0,000 | 19,707 | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| 33 | 48,300 | 10.944,00 | 48,30 | 0,003 | 19,767 | 2,44 | 0,02 | 98,19 | 342,55 | 3,49 |
| 66 | 63,600 | 10.945,00 | 63,60 | 0,006 | 19,827 | 3,21 | 0,04 | 96,39 | 417,17 | 4,33 |
| 99 | 69,300 | 10.946,00 | 69,30 | 0,009 | 19,887 | 3,48 | 0,05 | 94,59 | 443,05 | 4,68 |
| 132 | 71,700 | 10.947,00 | 71,70 | 0,012 | 19,948 | 3,59 | 0,07 | 92,78 | 452,21 | 4,87 |
| 165 | 73,400 | 10.947,00 | 73,40 | 0,015 | 20,009 | 3,67 | 0,07 | 92,78 | 459,61 | 4,95 |
| 198 | 74,400 | 10.947,00 | 74,40 | 0,018 | 20,071 | 3,71 | 0,07 | 92,78 | 463,47 | 5,00 |
| 231 | 75,500 | 10.947,00 | 75,50 | 0,021 | 20,133 | 3,75 | 0,07 | 92,78 | 467,79 | 5,04 |
| 264 | 76,800 | 10.947,00 | 76,80 | 0,024 | 20,195 | 3,80 | 0,07 | 92,78 | 473,07 | 5,10 |
| 297 | 77,800 | 10.947,00 | 77,80 | 0,027 | 20,258 | 3,84 | 0,07 | 92,78 | 476,83 | 5,14 |
| 330 | 78,800 | 10.947,00 | 78,80 | 0,030 | 20,321 | 3,88 | 0,07 | 92,78 | 480,56 | 5,18 |
| 440 | 81,500 | 10.947,00 | 81,50 | 0,040 | 20,534 | 3,97 | 0,07 | 92,78 | 489,68 | 5,28 |
| 550 | 83,400 | 10.947,00 | 83,40 | 0,050 | 20,752 | 4,02 | 0,07 | 92,78 | 494,67 | 5,33 |
| 660 | 84,900 | 10.947,00 | 84,90 | 0,060 | 20,975 | 4,05 | 0,07 | 92,78 | 497,56 | 5,36 |
| 770 | 86,100 | 10.946,00 | 86,10 | 0,071 | 21,202 | 4,06 | 0,05 | 94,59 | 500,68 | 5,29 * |
| 880 | 86,900 | 10.946,00 | 86,90 | 0,081 | 21,434 | 4,05 | 0,05 | 94,59 | 500,01 | 5,29 |
| 990 | 87,400 | 10.946,00 | 87,40 | 0,091 | 21,672 | 4,03 | 0,05 | 94,59 | 497,88 | 5,26 |
| 1100 | 88,000 | 10.944,00 | 88,00 | 0,101 | 21,914 | 4,02 | 0,02 | 98,19 | 499,76 | 5,09 |
| 1210 | 88,300 | 10.944,00 | 88,30 | 0,111 | 22,163 | 3,98 | 0,02 | 98,19 | 496,61 | 5,06 |
| 1320 | 88,700 | 10.943,00 | 88,70 | 0,121 | 22,417 | 3,96 | 0,00 | 100,00 | 495,69 | 4,96 |
| 1430 | 88,900 | 10.943,00 | 88,90 | 0,131 | 22,677 | 3,92 | 0,00 | 100,00 | 492,04 | 4,92 |
| 1540 | 88,600 | 10.942,00 | 88,60 | 0,141 | 22,942 | 3,86 | -0,02 | 101,81 | 487,99 | 4,79 |
| 1650 | 88,600 | 10.941,00 | 88,60 | 0,151 | 23,215 | 3,82 | -0,04 | 103,61 | 485,27 | 4,68 |
| 1760 | 88,300 | 10.941,00 | 88,30 | 0,161 | 23,493 | 3,76 | -0,04 | 103,61 | 479,46 | 4,63 |
| 1870 | | | | 0,171 | 23,779 | | | | | |
| 1980 | | | | 0,181 | 24,072 | | | | | |
| 2090 | | | | 0,191 | 24,371 | | | | | |
| 2200 | | | | 0,201 | 24,679 | | | | | |

OBS.:

| | | | | |
|-----------------|------------------|--------|--|----------|
| EXECUÇÃO: PCA | VERIFICAÇÃO: RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO | DATA: |
| DIGITAÇÃO: HNSC | APROVAÇÃO: CJC | VISTO: | <input type="checkbox"/> REPROVADO | 24/05/07 |

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL $\bar{\sigma}$ (CU) CP 2

AMOSTRA: CPH / UFMG

PROGRAMA Nº: 018/07 AMOSTRA Nº: D-089/07-018 DATA: 18/05/07

DADOS DO CP

Nº: 2 \varnothing (")= 2 Hi (cm)= 11,00 H₀ (cm)= 10,898 A₀ (cm²) = 19,627
 σ_3 (kgf/cm²) = 4,00 CONTRA PRESSÃO (kgf/cm²) = Vel. %/min = 0,09091
 σ_3 (kPa) = 400,00 CONTRA PRESSÃO (kPa) =

DADOS DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO E ANEL DINAMOMÉTRICO

TRANSDUTOR Nº: TPR 13 Cte.= 1,1830 Li= 10940 Lic.= 8355,36

ANEL/CÉLULA Nº: CCE 01 Cte.= /

| ΔH cm*10 ⁻³ | L | μ leitura | P kgf | $\epsilon = \Delta H/H_0$ | $A = A_0/1 - \epsilon$ | P/A kgf/cm ² | μ kgf/cm ² | $\bar{\sigma}_3$ kPa | $\bar{\sigma}_1$ kPa | $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$ |
|-----------------------------------|---------|------------------|----------|---------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0,000 | 10.940,00 | 0,00 | 0,000 | 19,627 | 0,00 | 0,00 | 400,00 | 400,00 | 1,00 |
| 33 | 30,200 | 10.941,00 | 30,20 | 0,003 | 19,686 | 1,53 | 0,02 | 398,19 | 551,60 | 1,39 |
| 66 | 67,700 | 10.942,00 | 67,70 | 0,006 | 19,746 | 3,43 | 0,04 | 396,39 | 739,23 | 1,86 |
| 99 | 84,900 | 10.943,00 | 84,90 | 0,009 | 19,807 | 4,29 | 0,05 | 394,58 | 823,22 | 2,09 |
| 132 | 95,900 | 10.943,00 | 95,90 | 0,012 | 19,867 | 4,83 | 0,05 | 394,58 | 877,28 | 2,22 |
| 165 | 103,500 | 10.944,00 | 103,50 | 0,015 | 19,929 | 5,19 | 0,07 | 392,78 | 912,13 | 2,32 |
| 198 | 109,300 | 10.944,00 | 109,30 | 0,018 | 19,990 | 5,47 | 0,07 | 392,78 | 939,55 | 2,39 |
| 231 | 114,300 | 10.945,00 | 114,30 | 0,021 | 20,052 | 5,70 | 0,09 | 390,97 | 960,99 | 2,46 |
| 264 | 117,900 | 10.945,00 | 117,90 | 0,024 | 20,114 | 5,86 | 0,09 | 390,97 | 977,13 | 2,50 |
| 297 | 121,700 | 10.946,00 | 121,70 | 0,027 | 20,177 | 6,03 | 0,11 | 389,17 | 992,34 | 2,55 |
| 330 | 124,400 | 10.946,00 | 124,40 | 0,030 | 20,240 | 6,15 | 0,11 | 389,17 | 1003,80 | 2,58 |
| 440 | 132,400 | 10.946,00 | 132,40 | 0,040 | 20,453 | 6,47 | 0,11 | 389,17 | 1036,52 | 2,66 |
| 550 | 139,400 | 10.947,00 | 139,40 | 0,050 | 20,670 | 6,74 | 0,13 | 387,36 | 1061,77 | 2,74 |
| 660 | 144,600 | 10.948,00 | 144,60 | 0,061 | 20,892 | 6,92 | 0,14 | 385,56 | 1077,69 | 2,80 |
| 770 | 149,100 | 10.949,00 | 149,10 | 0,071 | 21,119 | 7,06 | 0,16 | 383,76 | 1089,76 | 2,84 |
| 880 | 153,300 | 10.949,00 | 153,30 | 0,081 | 21,351 | 7,18 | 0,16 | 383,76 | 1101,76 | 2,87 |
| 990 | 157,300 | 10.950,00 | 157,30 | 0,091 | 21,588 | 7,29 | 0,18 | 381,95 | 1110,60 | 2,91 |
| 1100 | 160,500 | 10.951,00 | 160,50 | 0,101 | 21,830 | 7,35 | 0,20 | 380,15 | 1115,37 | 2,93 |
| 1210 | 163,800 | 10.951,00 | 163,80 | 0,111 | 22,078 | 7,42 | 0,20 | 380,15 | 1122,06 | 2,95 |
| 1320 | 166,300 | 10.952,00 | 166,30 | 0,121 | 22,332 | 7,45 | 0,22 | 378,35 | 1123,03 | 2,97 |
| 1430 | 168,500 | 10.953,00 | 168,50 | 0,131 | 22,591 | 7,46 | 0,23 | 376,55 | 1122,42 | 2,98 * |
| 1540 | 170,100 | 10.953,00 | 170,10 | 0,141 | 22,857 | 7,44 | 0,23 | 376,55 | 1120,75 | 2,98 |
| 1650 | 171,300 | 10.953,00 | 171,30 | 0,151 | 23,128 | 7,41 | 0,23 | 376,55 | 1117,20 | 2,97 |
| 1760 | 171,900 | 10.954,00 | 171,90 | 0,161 | 23,407 | 7,34 | 0,25 | 374,75 | 1109,15 | 2,96 |
| 1870 | 171,600 | 10.955,00 | 171,60 | 0,172 | 23,692 | 7,24 | 0,27 | 372,95 | 1097,24 | 2,94 |
| 1980 | 171,400 | 10.955,00 | 171,40 | 0,182 | 23,984 | 7,15 | 0,27 | 372,95 | 1087,58 | 2,92 |
| 2090 | 171,300 | 10.956,00 | 171,30 | 0,192 | 24,284 | 7,05 | 0,29 | 371,15 | 1076,56 | 2,90 |
| 2200 | 171,300 | 10.956,00 | 171,30 | 0,202 | 24,591 | 6,97 | 0,29 | 371,15 | 1067,75 | 2,88 |

OBS.:

| | | | | |
|-----------------|------------------|--------|--|----------|
| EXECUÇÃO: PCA | VERIFICAÇÃO: RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO | DATA: |
| DIGITAÇÃO: HNCS | APROVAÇÃO: CJC | VISTO: | <input type="checkbox"/> REPROVADO | 24/05/07 |

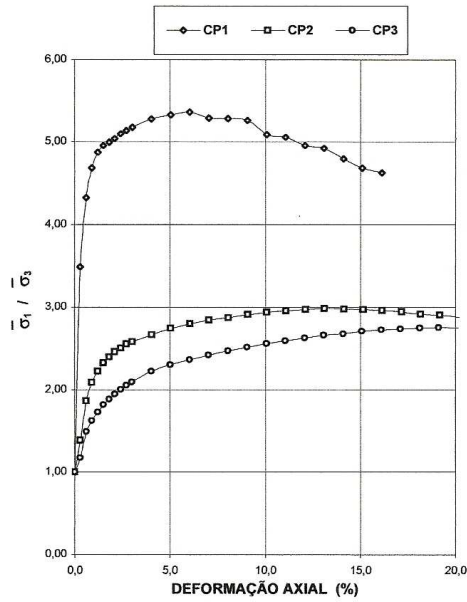
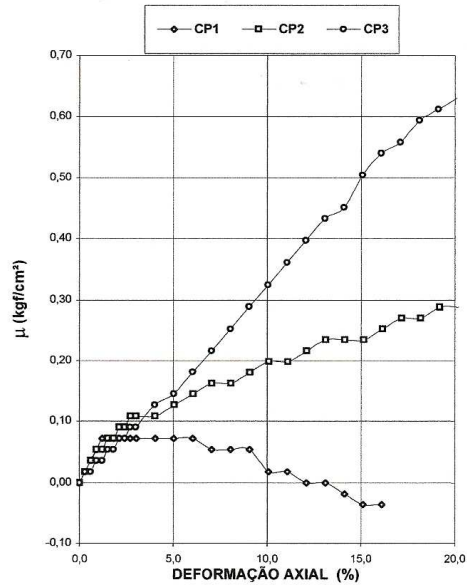
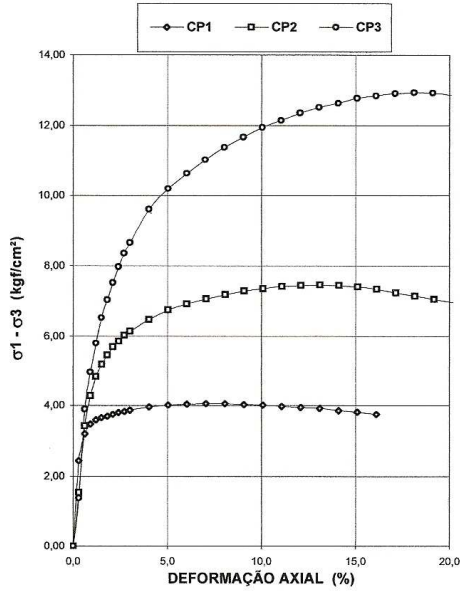
GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL R (CU) GRÁFICOS

AMOSTRA: CPH / UFMG
 PROGRAMA Nº: 018/07 AMOSTRA Nº: D-089/07-018 DATA: 18/05/07



| | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|---------|------------------------------|--------------|-------|
| CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL | DESCRIÇÃO: | | | | |
| | LIMITE DE LIQUIDEZ | % | | | |
| | LIMITE DE PLASTICIDADE | % | | | |
| | MASSA ESPEC. DOS GRÃOS | g/cm³ | | | |
| | % ARGILA | % SILTE | % AREIA | % PEDREGULHO | |
| CORPO DE PROVA Nº | | 1 | 2 | 3 | 4 5 |
| CONDIÇÕES DE ENSAIO | PROCESSO DE MOLDAGEM | | COMPACTAÇÃO POR PISOTEAMENTO | | |
| | DIÂMETRO | cm | 5,05 | | |
| | ALTURA | cm | 11,00 | | |
| | UMIDADE | % | 23,5 | 23,5 | 23,5 |
| | MASSA ESP. AP. SECA | g/cm³ | 1,735 | 1,735 | 1,735 |
| | ÍNDICE DE VAZIOS | | | | |
| | GRAU DE SATURAÇÃO | % | | | |
| | GRAU DE COMPACT. | % | 100,3 | 100,3 | 100,3 |
| | DESVIO DE UMIDADE | % | -0,1 | -0,1 | -0,1 |
| | GRAD. DE PERCOLAÇÃO | | 9,09 | | |
| FASE ADENS. E SATURAÇÃO | TEMPO ADENSAMENTO | h | 21 | 23 | 24 |
| | CONTRA PRESSÃO | kgf/cm² | | | |
| | PRESSÃO CONFINANTE | kgf/cm² | 1,00 | 4,00 | 8,00 |
| FASE DE RUPTURA | VELOC. DE CARREG. | %/min | 0,091 | | |
| | σ1 | kgf/cm² | 5,01 | 11,22 | 20,34 |
| | σ3 | kgf/cm² | 0,95 | 3,77 | 7,41 |
| | σ1 | kgf/cm² | 5,06 | 11,46 | 20,93 |
| | σ3 | kgf/cm² | 1,00 | 4,00 | 8,00 |
| | UMID. APÓS RUPTURA | % | | | |

| | | | | | |
|------------|--------------|-----|--------|--|----------|
| DIGITAÇÃO: | VERIFICAÇÃO: | RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO | DATA: |
| HNSC | APROVAÇÃO: | CJC | VISTO: | <input type="checkbox"/> REPROVADO | 24/05/07 |

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL \bar{R} (CU)

GRÁFICOS

AMOSTRA: CPH / UFMG

PROGRAMA Nº: 018/07

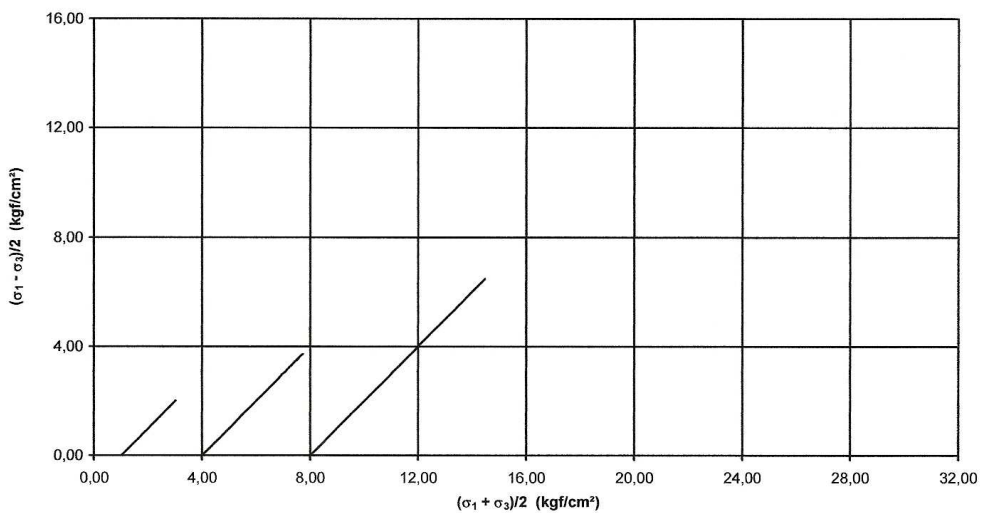
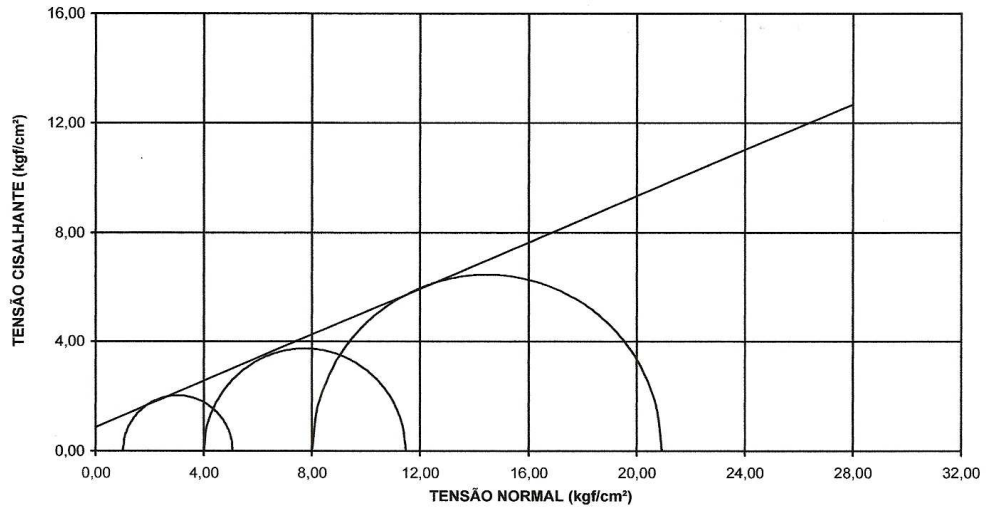
AMOSTRA Nº: D-089/07-018

DATA: 18/05/07

TENSÕES TOTAIS

Ângulo de Atrito (ϕ): 22,9 °

Coesão (c): 0,87 kgf/cm²



Obs.:

| | | | | | |
|------------|--------------|-----|--------|--|----------|
| DIGITAÇÃO: | VERIFICAÇÃO: | RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO | DATA: |
| HNSC | APROVAÇÃO: | CJC | VISTO: | <input type="checkbox"/> REPROVADO | 24/05/07 |

GERÊNCIA DE ENGENHARIA CIVIL DA GERAÇÃO - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PLANILHA DE CÁLCULO



COMPRESSÃO TRIAXIAL \bar{R} (CU)

GRÁFICOS

AMOSTRA: CPH / UFMG

PROGRAMA Nº: 018/07

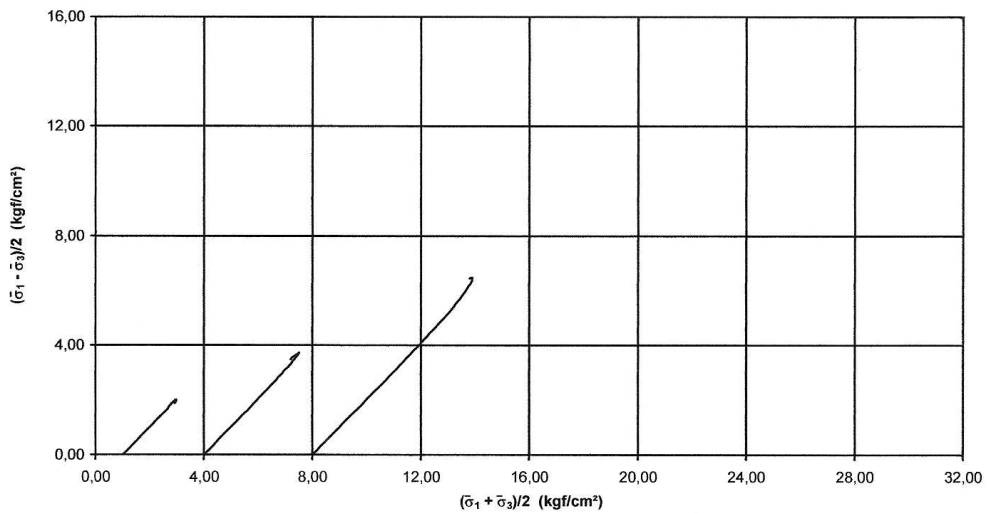
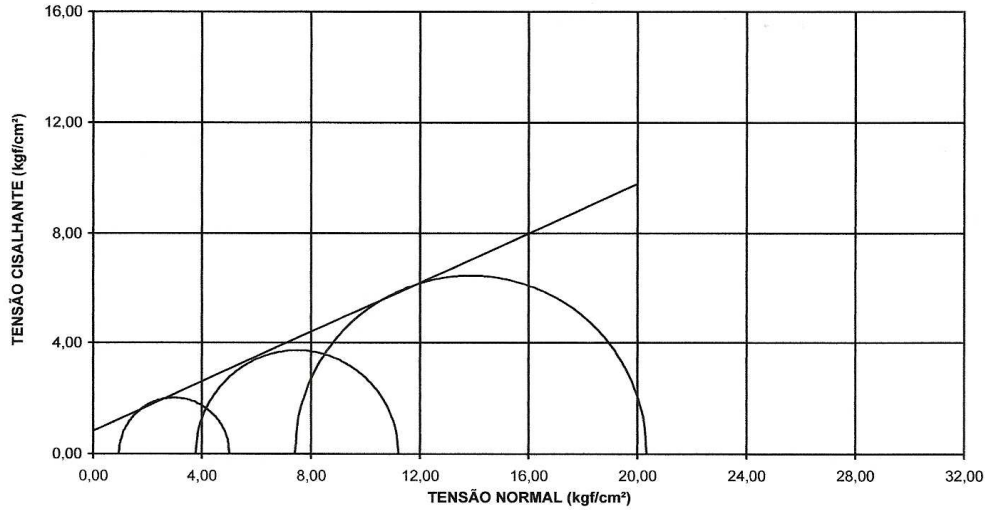
AMOSTRA Nº: D-089/07-018

DATA: 18/05/07

TENSÕES EFETIVAS

Ângulo de Atrito (ϕ): 24,1 °

Coesão (C): 0,83 kgf/cm²



Obs.:

| | | | | | |
|------------|--------------|-----|--------|--|----------|
| DIGITAÇÃO: | VERIFICAÇÃO: | RMN | VISTO: | <input checked="" type="checkbox"/> APROVADO | DATA: |
| HNSC | APROVAÇÃO: | CJC | VISTO: | <input type="checkbox"/> REPROVADO | 24/05/07 |

APÊNDICE I

DADOS DOS ENSAIOS DE EROÇÃO REALIZADOS NO CPH

95% DE GRAU DE COMPACTAÇÃO

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | Vazão | | | Velocidade m/s | Massa (g) | | Volume (mL) |
|----------------|-------------------|-------|------|-------------------|-------------------|-----------|------|----------------|
| | | L/min | L/s | m ³ /s | | Início | Fim | |
| Data | 6/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 2000 | 500 | 8,3 | 0,008 | 2,6 | | | |
| 1 | 2550 | 608 | 10,1 | 0,010 | 3,2 | 2372 | 2338 | 21 |
| 2 | | | | | | 2338 | 2154 | 115 |
| 3 | | | | | | 2154 | 1822 | 208 |
| 4 | | | | | | 1822 | 1204 | 386 |
| Data | 7/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 895 | 195 | 3,3 | 0,003 | 1,0 | | | |
| Data | 7/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1980 | 390 | 6,5 | 0,007 | 2,0 | 2354 | 2328 | 16 |
| 5 | | | | | | 2328 | 2250 | 49 |
| 10 | | | | | | 2250 | 2014 | 149 |
| 15 | | | | | | 2014 | 1118 | 565 |
| Data | 10/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2342 | 2318 | 15 |
| 2 | | | | | | 2318 | 2278 | 25 |
| 3 | | | | | | 2278 | 2082 | 124 |
| 5 | | | | | | 2082 | 1778 | 193 |
| 7 | | | | | | 1778 | 1374 | 256 |
| 10 | | | | | | 1374 | 728 | 410 |
| Data | 11/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3132 | 768 | 12,8 | 0,013 | 4,0 | 2340 | 2228 | 71 |
| 2 | | | | | | 2228 | 2022 | 131 |
| 3 | | | | | | 2022 | 1730 | 185 |
| 5 | | | | | | 1730 | 1440 | 184 |
| 10 | | | | | | 1440 | 1012 | 272 |
| 15 | | | | | | 1012 | 570 | 281 |
| 20 | | | | | | 2608 | 2188 | 267 |
| Data | 12/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3500 | 861 | 14,4 | 0,014 | 4,5 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | | | | | | 2498 | 2400 | 58 |
| 3 | | | | | | 2400 | 2162 | 140 |
| 4 | | | | | | 2162 | 1842 | 188 |
| 5 | | | | | | 1842 | 1436 | 239 |
| 7 | | | | | | 1436 | 962 | 279 |
| Data | 12/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3132 | 776 | 12,9 | 0,013 | 4,0 | | | 0 |
| 2 | | | | | | | | 0 |
| 3 | | | | | | | | 0 |
| 8 | | | | | | 2470 | 2470 | 0 |
| 13 | | | | | | 2470 | 2444 | 16 |
| 23 | | | | | | 2444 | 2242 | 121 |
| 30 | | | | | | 2242 | 2012 | 137 |
| Data | 13/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3132 | 776 | 12,9 | 0,013 | 4,0 | 2458 | 2454 | 2 |
| 3 | | | | | | 2454 | 2432 | 13 |
| 5 | | | | | | 2432 | 2172 | 156 |
| 7 | | | | | | 2172 | 1512 | 396 |

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | Vazão | | | Velocidade m/s | Massa (g) | | Volume (mL) |
|----------------|-------------------|-------|------|-------|-------------------|-----------|------|----------------|
| | | L/min | L/s | m³/s | | Início | Fim | |
| Data | 13/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3132 | 776 | 12,9 | 0,013 | 4,0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | | | | | | 2228 | 2182 | 31 |
| 5 | | | | | | 2182 | 1776 | 273 |
| Data | 14/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3132 | 776 | 12,9 | 0,013 | 4,0 | | | 0 |
| 2 | | | | | | 2362 | 2332 | 19 |
| 3 | | | | | | 2332 | 2254 | 49 |
| 4 | | | | | | 2254 | 2146 | 68 |
| 5 | | | | | | 2146 | 1944 | 127 |
| 6 | | | | | | 1944 | 1702 | 152 |
| Data | 14/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3132 | 776 | 12,9 | 0,013 | 4,0 | | | 0 |
| 2 | | | | | | 2342 | 2320 | 14 |
| 3 | | | | | | 2320 | 2254 | 42 |
| 4 | | | | | | 2254 | 2166 | 56 |
| 5 | | | | | | 2166 | 1870 | 188 |
| 6 | | | | | | 1870 | 1342 | 335 |
| Data | 17/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3500 | 876 | 14,6 | 0,015 | 4,6 | | | 0 |
| 2 | | | | | | 2302 | 2230 | 47 |
| 3 | | | | | | 2230 | 2028 | 131 |
| 4 | | | | | | 2028 | 1632 | 256 |
| 5 | | | | | | 1632 | 1174 | 296 |
| 6 | | | | | | 1174 | 702 | 305 |
| Data | 18/11/2008 | | | | | | | |
| 1 | 3500 | 876 | 14,6 | 0,015 | 4,6 | | | 0 |
| 10 | | | | | | 2294 | 2108 | 121 |
| 20 | | | | | | 2108 | 1824 | 185 |
| 30 | | | | | | 1824 | 1452 | 242 |
| 40 | | | | | | 1452 | 1048 | 263 |
| 50 | | | | | | 1048 | 530 | 337 |
| Data | 19/11/2008 | | | | | | | |
| 2 | 3500 | 876 | 14,6 | 0,015 | 4,6 | | | 0 |
| 5 | | | | | | 2298 | 2194 | 67 |
| 8 | | | | | | 2194 | 1846 | 226 |
| 11 | | | | | | 1846 | 1404 | 287 |
| 15 | | | | | | 1404 | 654 | 486 |
| Data | 19/11/2008 | | | | | | | |
| 2 | 3500 | 876 | 14,6 | 0,015 | 4,6 | 2328 | 2244 | 54 |
| 5 | | | | | | 2298 | 2194 | 66 |
| 8 | | | | | | 2194 | 1846 | 222 |
| 11 | | | | | | 1846 | 1404 | 282 |
| 15 | | | | | | 1404 | 654 | 479 |
| Data | 20/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 3500 | 876 | 14,6 | 0,015 | 4,6 | 2128 | 1960 | 119 |
| 3 | | | | | | 1960 | 1694 | 70 |
| 8 | | | | | | 1694 | 1380 | 132 |
| 13 | | | | | | 1380 | 1074 | 127 |
| 23 | | | | | | 1074 | 622 | 219 |

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | Vazão | | | Velocidade m/s | Massa (g) | | Volume (mL) |
|----------------|-------------------|-------|------|-------------------|-------------------|-----------|------|----------------|
| | | L/min | L/s | m ³ /s | | Início | Fim | |
| Data | 20/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 3500 | 876 | 14,6 | 0,015 | 4,6 | 2344 | 2238 | 67 |
| 2 | | | | | | 2238 | 2074 | 37 |
| 4 | | | | | | 2074 | 1762 | 131 |
| 6 | | | | | | 1762 | 1418 | 151 |
| 14 | | | | | | 1418 | 1082 | 146 |
| 25 | | | | | | 1082 | 728 | 157 |
| 40 | | | | | | 2322 | 1914 | 194 |
| 60 | | | | | | 1914 | 1418 | 251 |
| 90 | | | | | | 1418 | 876 | 280 |
| Data | 21/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2316 | 1838 | 307 |
| 5 | | | | | | 1838 | 1838 | 0 |
| 10 | | | | | | 1838 | 1234 | 81 |
| 15 | | | | | | 1234 | 574 | 117 |
| 20 | | | | | | 2362 | 1604 | 169 |
| 25 | | | | | | 1604 | 772 | 215 |
| 35 | | | | | | 2318 | 1420 | 269 |
| Data | 24/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2410 | 2184 | 139 |
| 5 | | | | | | 2184 | 2184 | 0 |
| 15 | | | | | | 2184 | 1854 | 64 |
| 18 | | | | | | 1854 | 1288 | 209 |
| Data | 24/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2414 | 2150 | 162 |
| 10 | | | | | | 2150 | 2150 | 0 |
| 20 | | | | | | 2150 | 2150 | 0 |
| 30 | | | | | | 2150 | 1866 | 12 |
| 40 | | | | | | 1866 | 1460 | 87 |
| 50 | | | | | | 1460 | 982 | 131 |
| 60 | | | | | | 982 | 448 | 165 |
| Data | 25/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2382 | 2168 | 133 |
| 10 | | | | | | 2168 | 1824 | 81 |
| 20 | | | | | | 1824 | 1394 | 134 |
| 30 | | | | | | 1394 | 732 | 412 |
| Data | 26/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2222 | 2068 | 104 |
| 3 | | | | | | 2068 | 1850 | 43 |
| 6 | | | | | | 1850 | 1466 | 155 |
| 11 | | | | | | | | |
| Data | 26/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 2529 | 576 | 9,6 | 0,010 | 3,0 | 2324 | 2066 | 165 |
| 3 | | | | | | 2066 | 1714 | 60 |
| 6 | | | | | | 1714 | 1254 | 129 |
| 11 | | | | | | 1254 | 642 | 227 |
| 15 | | | | | | 2262 | 1576 | 288 |
| 21 | | | | | | 1576 | 492 | 551 |

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | Vazão | | | Velocidade m/s | Massa (g) | | Volume (mL) |
|----------------|-------------------|-------|-----|-------------------|-------------------|-----------|------|----------------|
| | | L/min | L/s | m ³ /s | | Início | Fim | |
| Data | 27/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1980 | 384 | 6,4 | 0,006 | 2,0 | 2302 | 1990 | 200 |
| 10 | | | | | | 1990 | 1656 | 16 |
| 20 | | | | | | 1656 | 1172 | 114 |
| 30 | | | | | | 1172 | 586 | 180 |
| 40 | | | | | | 2284 | 1326 | 426 |
| Data | 27/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1980 | 384 | 6,4 | 0,006 | 2,0 | 2294 | 1968 | 212 |
| 3 | | | | | | 1968 | 1510 | 86 |
| 6 | | | | | | 1510 | 1136 | 31 |
| 9 | | | | | | 1136 | 754 | 36 |
| 15 | | | | | | 754 | 318 | 71 |
| Data | 27/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1980 | 384 | 6,4 | 0,006 | 2,0 | 2254 | 1944 | 206 |
| 5 | | | | | | 1944 | 1622 | 8 |
| 10 | | | | | | 1622 | 1260 | 34 |
| 15 | | | | | | 1260 | 882 | 45 |
| 20 | | | | | | 882 | 330 | 161 |
| 25 | | | | | | 2314 | 1648 | 223 |
| Data | 27/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1980 | 384 | 6,4 | 0,006 | 2,0 | 2494 | 2174 | 189 |
| 5 | | | | | | 2174 | 1812 | 25 |
| 10 | | | | | | 1812 | 1410 | 48 |
| 20 | | | | | | 1410 | 736 | 209 |
| 40 | | | | | | 2458 | 1246 | 538 |
| Data | 28/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 192 | 3,2 | 0,003 | 1,0 | 2200 | 1966 | 160 |
| 5 | | | | | | 1966 | 1552 | 123 |
| 10 | | | | | | 1552 | 1062 | 175 |
| 15 | | | | | | 1062 | 539 | 197 |
| 20 | | | | | | 2228 | 1656 | 225 |
| Data | 28/11/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 192 | 3,2 | 0,003 | 1,0 | 2288 | 1932 | 232 |
| 2 | | | | | | 1932 | 1584 | 0 |
| 7 | | | | | | 1584 | 384 | 550 |
| | | | | | | 2272 | 2082 | |
| Data | 1/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 192 | 3,2 | 0,003 | 1,0 | 2322 | 2026 | 190 |
| 5 | | | | | | 2026 | 1606 | 79 |
| 10 | | | | | | 1606 | 1230 | 51 |
| 15 | | | | | | 1230 | 702 | 149 |
| 25 | | | | | | 2334 | 1774 | 167 |
| 35 | | | | | | 1774 | 794 | 435 |
| Data | 1/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 192 | 3,2 | 0,003 | 1,0 | 2288 | 2108 | 117 |
| 10 | | | | | | 2108 | 1844 | 55 |
| 20 | | | | | | 1844 | 1406 | 168 |
| 30 | | | | | | 1406 | 706 | 339 |
| Data | 2/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 192 | 3,2 | 0,003 | 1,0 | 2380 | 2018 | 225 |
| 10 | | | | | | 2018 | 318 | 833 |

APÊNDICE II

DADOS DOS ENSAIOS DE EROÇÃO REALIZADOS NO CPH

100% DE GRAU DE COMPACTAÇÃO

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | VAZÃO | | | Velocidade (m/s) | Mi (g) | Mf (g) | Ve (mL) |
|----------------|------------------|---------|-------|--------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| | | (L/min) | (L/s) | (m³/s) | | | | |
| Data | 3/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 192 | 3,2 | 0,0032 | 1,0 | 2388 | 1874 | 280 |
| 10 | | | | | | 1874 | 1410 | 8 |
| 20 | | | | | | 1410 | 944 | 9 |
| 30 | | | | | | 944 | 424 | 43 |
| 40 | | | | | | 2370 | 1848 | 47 |
| 50 | | | | | | 1848 | 1316 | 53 |
| 0 | 1358 | 384 | 6,4 | 0,0064 | 2,0 | | | |
| 5 | | | | | | 1316 | 756 | 14 |
| 15 | | | | | | 2344 | 1764 | 27 |
| 30 | | | | | | 1764 | 1168 | 37 |
| 45 | | | | | | 1168 | 532 | 62 |
| 60 | | | | | | 2410 | 1730 | 89 |
| 0 | 1358 | 576 | 9,6 | 0,0096 | 3,0 | | | |
| 10 | | | | | | 1730 | 914 | 84 |
| 20 | | | | | | 2320 | 1400 | 149 |
| 30 | | | | | | 1400 | 398 | 200 |
| 40 | | | | | | 2392 | 1230 | 299 |
| Data | 4/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 288 | 4,8 | 0,0048 | 1,0 | 2516 | 2250 | 155 |
| 10 | | | | | | 2250 | 1966 | 11 |
| 20 | | | | | | 1966 | 1658 | 25 |
| 30 | | | | | | 1658 | 1298 | 55 |
| 0 | 1358 | 570 | 9,5 | 0,0095 | 2,0 | | | |
| 10 | | | | | | 1298 | 868 | 41 |
| 20 | | | | | | 868 | 418 | 53 |
| 30 | | | | | | 2342 | 1884 | 80 |
| 0 | 1358 | 864 | 14,4 | 0,0144 | 3,0 | | | |
| 5 | | | | | | 1884 | 1344 | 52 |
| 10 | | | | | | 1344 | 690 | 124 |
| 20 | | | | | | 2374 | 1689 | 144 |
| 30 | | | | | | 1689 | 798 | 275 |
| Data | 5/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 288 | 4,8 | 0,0048 | 1,0 | 2312 | 2066 | 158 |
| 10 | | | | | | 2066 | 1724 | 62 |
| 20 | | | | | | 1724 | 1304 | 112 |
| 30 | | | | | | 1304 | 836 | 143 |
| 0 | 1358 | 570 | 9,5 | 0,0095 | 2,0 | | | |
| 10 | | | | | | 2162 | 1722 | 5 |
| 20 | | | | | | 1722 | 1270 | 13 |
| 30 | | | | | | 1270 | 752 | 59 |
| 0 | 1358 | 864 | 14,4 | 0,0144 | 3,0 | | | |
| 10 | | | | | | 2258 | 1536 | 117 |
| 20 | | | | | | 1536 | 688 | 201 |
| 30 | | | | | | 2260 | 1364 | 232 |

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | VAZÃO | | | Velocidade (m/s) | Mi (g) | Mf (g) | Ve (mL) |
|----------------|-------------------|---------|-------|--------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| | | (L/min) | (L/s) | (m³/s) | | | | |
| Data | 6/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 1358 | 288 | 4,8 | 0,0048 | 1,0 | 2400 | 2062 | 197 |
| 10 | | | | | | 2062 | 1718 | 15 |
| 20 | | | | | | 1718 | 1354 | 27 |
| 30 | | | | | | 2206 | 1828 | 60 |
| 0 | 1358 | 570 | 9,5 | 0,0095 | 2,0 | | | |
| 10 | | | | | | 1828 | 1338 | 76 |
| 20 | | | | | | 1338 | 798 | 110 |
| 30 | | | | | | 2378 | 1624 | 256 |
| 0 | 1358 | 864 | 14,4 | 0,0144 | 3,0 | | | |
| 10 | | | | | | 1624 | 734 | 102 |
| 20 | | | | | | 2458 | 1480 | 156 |
| 30 | | | | | | 1480 | 442 | 194 |
| Data | 10/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 3510 | 880 | 14,7 | 0,0147 | 5,4 | 2448 | 2140 | 186 |
| 1 | | | | | | 2140 | 1730 | 61 |
| 2 | | | | | | 1730 | 1216 | 124 |
| 7 | | | | | | 1216 | 448 | 277 |
| Data | 10/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 3510 | 660 | 11,0 | 0,0110 | 4,0 | 2592 | 2408 | 104 |
| 1 | | | | | | 2408 | 2202 | 12 |
| 2 | | | | | | 2202 | 1950 | 38 |
| 3 | | | | | | 1950 | 1696 | 40 |
| 8 | | | | | | 1696 | 1378 | 76 |
| 13 | | | | | | 1378 | 982 | 120 |
| 18 | | | | | | 982 | 468 | 186 |
| Data | 11/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 3510 | 330 | 5,5 | 0,0055 | 2,0 | 2260 | 1932 | 217 |
| 3 | | | | | | 1932 | 1576 | 19 |
| 6 | | | | | | 1576 | 1198 | 33 |
| 11 | | | | | | 1198 | 808 | 41 |
| 21 | | | | | | 808 | 400 | 53 |
| 31 | | | | | | 2174 | 1760 | 57 |
| 90 | | | | | | 1760 | 1230 | 134 |
| 120 | | | | | | 1230 | 420 | 319 |
| Data | 12/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | 3510 | 490 | 8,2 | 0,0082 | 3,0 | 2450 | 2172 | 184 |
| 3 | | | | | | 2172 | 1772 | 48 |
| 6 | | | | | | 1772 | 1334 | 73 |
| 11 | | | | | | 1334 | 830 | 116 |
| 21 | | | | | | 2460 | 1864 | 177 |
| 31 | | | | | | 1864 | 1156 | 251 |
| 90 | | | | | | 1268 | 320 | 410 |
| 120 | | | | | | 2324 | 1216 | 516 |
| Data | 20/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 844 | | | 5,2 | 2220 | 1756 | 313 |
| 5 | | | | | | 1756 | 1236 | 38 |
| 10 | | | | | | 1236 | 602 | 115 |

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | VAZÃO | | | Velocidade (m/s) | Mi (g) | Mf (g) | Ve (mL) |
|----------------|-------------------|---------|-------|--------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| | | (L/min) | (L/s) | (m³/s) | | | | |
| Data | 22/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 844 | | | 5,2 | 2430 | 2142 | 175 |
| 5 | | | | | | 2142 | 1764 | 55 |
| 10 | | | | | | 1764 | 1220 | 156 |
| 15 | | | | | | 1220 | 414 | 315 |
| 20 | | | | | | | | |
| Data | 23/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 653 | | | 4,3 | 2464 | 2058 | 243 |
| 10 | | | | | | | | |
| Data | 23/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 653 | | | 4,3 | 2478 | 2096 | 227 |
| 5 | | | | | | 2096 | 1628 | 51 |
| 10 | | | | | | 1628 | 1076 | 101 |
| 15 | | | | | | 1076 | 398 | 176 |
| 25 | | | | | | | | |
| Data | 29/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 653 | | | 4,5 | 2492 | 2152 | 201 |
| 5 | | | | | | 2152 | 1730 | 48 |
| 10 | | | | | | 1730 | 1240 | 89 |
| 20 | | | | | | 1240 | 648 | 149 |
| 35 | | | | | | 2428 | 1394 | 428 |
| 55 | | | | | | | | |
| Data | 30/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 805 | | | 4,9 | 2464 | 2114 | 209 |
| 5 | | | | | | 2114 | 1674 | 54 |
| 10 | | | | | | 1674 | 1170 | 92 |
| 20 | | | | | | 2468 | 1440 | 406 |
| 40 | | | | | | | | |
| Data | 30/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 885 | | | 5,4 | 2476 | 1954 | 311 |
| 10 | | | | | | 1954 | 1308 | 74 |
| 25 | | | | | | 1308 | 578 | 124 |
| 45 | | | | | | 2444 | 1516 | 250 |
| 65 | | | | | | 1516 | 396 | 366 |
| Data | 31/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 482 | | | 3,0 | 2442 | 2054 | 235 |
| 5 | | | | | | 2054 | 1610 | 34 |
| 15 | | | | | | 1610 | 1108 | 69 |
| 30 | | | | | | 1108 | 428 | 177 |
| 50 | | | | | | | | |
| Data | 31/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 482 | | | 3,0 | 2444 | 2028 | 251 |
| 5 | | | | | | 2028 | 1528 | 51 |
| 15 | | | | | | 1528 | 896 | 130 |
| 30 | | | | | | 2448 | 1056 | 588 |
| 50 | | | | | | | | |
| Data | 31/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 865 | | | 5,3 | 2394 | 2092 | 182 |
| 5 | | | | | | 2092 | 1674 | 1 |

| Tempo (min) | Rotação (rpm) | VAZÃO | | | Velocidade (m/s) | Mi (g) | Mf (g) | Ve (mL) |
|----------------|-------------------|---------|-------|--------|---------------------|-----------|-----------|------------|
| | | (L/min) | (L/s) | (m³/s) | | | | |
| 10 | | | | | | 1674 | 1240 | 11 |
| 20 | | | | | | 2448 | 498 | 924 |
| Data | 31/12/2008 | | | | | | | |
| 0 | | 865 | | | 5,3 | 2382 | 2056 | 197 |
| 10 | | | | | | 2056 | 1616 | 14 |
| 15 | | | | | | 1616 | 890 | 187 |