UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA PERDA DE MASSA DE UM SOLO ARENOSO LATERÍTICO SUBMETIDO AO EFEITO DE ONDAS

MARCUS DIVINO DE CASTRO

D0232G20
GOIÂNIA-GO
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

[X] Dissertação [ ] Tese

2. Nome completo do autor

Marcus Divino de Castro

3. Título do trabalho

Influência da sucção na perda de massa de um solo arenoso laterítico submetido ao efeito de ondas

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [ ] NÃO[1]

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:
a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.
Casos de embargo:
- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.

Documento assinado eletronicamente por **Márcia Maria Dos Anjos Mascarenha**, **Professora do Magistério Superior**, em 22/09/2020, às 21:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **MARCUS DIVINO DE CASTRO**, **Discente**, em 22/09/2020, às 22:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1569562** e o código CRC **4E354B30**.

MARCUS DIVINO DE CASTRO

INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA PERDA DE MASSA DE UM SOLO ARENOSO LATERÍTICO SUBMETIDO AO EFEITO DE ONDAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientadora: Profª. Dra. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha.

Coorientador: Prof. Dr. Gilson de F. N. Gitirana Jr.

D0232G20
GOIÂNIA-GO
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Castro, Marcus Divino de
Influência da sucção na perda de massa de um solo arenoso laterítico submetido ao efeito de ondas [manuscrito] / Marcus Divino de Castro. - 2020.
CXX, 120 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha; co orientador Gilson de Faria Neves Gitirana Jr..
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental(EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2020.
Bibliografia.
Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Erodibilidade. 2. Latossolo. 3. Canal hidráulico. 4. Sucção. I. Anjos Mascarenha, Márcia Maria dos, orient. II. Título.

CDU 624

UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **233** da sessão de Defesa de Dissertação de **Marcus Divino de Castro** que confere o título de Mestre(a) em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, na área de concentração em **Geotecnia**.

Ao/s **vinte e nove dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte**, a partir da(s) **14:00**, **por meio de videoconferência**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **"Influência da sucção na perda de massa de um solo arenoso laterítico submetido ao efeito de ondas"**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (PPGGECON/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Maurício Martines Sales (PPGGECON/UFG)**, membro titular interno; Professor(a) Doutor(a) **Olavo Francisco dos Santos Junior (CT-UFRN)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Márcia Maria dos Anjos Mascarenha**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e nove dias do mês de outubro do ano de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Documento assinado eletronicamente por **Maurício Martines Sales**, **Professor do Magistério Superior**, em 29/10/2020, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Olavo Francisco dos Santos Júnior**, **Usuário Externo**, em 30/10/2020, às 00:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Márcia Maria Dos Anjos Mascarenha**, **Professora do Magistério Superior**, em 30/10/2020, às 13:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **MARCUS DIVINO DE CASTRO**, **Discente**, em 30/10/2020, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1600845** e o código CRC **9B7B3F38**.

DEDICATÓRIA

A toda minha família: esposa, filhos e mãe, por tolerar minhas ausências momentâneas durante as horas dedicadas ao mestrado e pelo suporte familiar dispensado a mim durante todo esse período, pela compreensão quanto ao sacrifício das horas de lazer adiadas, de sorte que sem todo esse apoio não seria possível chegar à concretização desse objetivo. A todos os docentes que me propiciaram um aprofundamento nos conhecimentos adquiridos em geotecnia e a todos os discentes, colegas que me ajudaram nessa longa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente direciono os meus agradecimentos a Furnas Centrais Elétricas, na pessoa do gerente da Gerência de Serviços e Suporte Tecnológico – GST.E, Engenheiro Renato Marques Cabral, e do gerente da Divisão de Instrumentação e Suporte Tecnológico – DIST.E, Geólogo Carlos Antônio Reis da Silva, por me liberarem das atividades laborais durante todo o período de tempo dedicado ao mestrado e franquearem a mim, a utilização dos laboratórios e técnicos da GST.E, seguindo a tradição de Furnas, no que se refere a sempre proporcionar oportunidades de aperfeiçoamento profissional contínuo a seus funcionários.

Agradeço ainda ao gerente da Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil – DTEC.E de Furnas Centrais Elétricas, Engenheiro Alexandre Pereira de Castro, e em especial à competente colega, Engenheira Marta Pereira da Luz, por inserir minha pesquisa no projeto P&D ANEEL, intitulado "Desenvolvimento e Utilização de Técnicas de Bioengenharia em Solos para Fins de Controle de Processos Erosivos no Âmbito de Empreendimentos de Usinas Hidrelétricas, em Especial em Margens de Reservatórios", o que propiciou a alocação das horas-homem dos técnicos de Furnas, disponibilização de equipamentos e de toda infra-estrutura necessária à execução de grande parte da minha pesquisa nos laboratórios da GST.E, e ao colega e companheiro de jornada profissional, Engenheiro Marlon Silva Schliewe, desde os tempos de trabalho nos laboratórios de controle tecnológico das obras do AHE Simplício e da UHE Santo Antônio, por me apresentar o canal hidráulico utilizado na pesquisa, informando de todos os seus detalhes de funcionamento, etapas de execução dos ensaios de erodibilidade e apoio na execução dos ensaios executados nas instalações da GST.E.

Ao colega de Furnas, Geólogo Ricardo Moreira Vilhena, pelo treinamento ministrado referente aos ensaios de erodibilidade devido ao impacto de ondas, utilizando o canal hidráulico da EECA da UFG, e aos dedicados e competentes técnicos de Furnas: Ademar F. Santana, Sílvio César Rêgo, Helmar A. Cortes, Joaquim Luiz da Conceição e Renato Batista.

Agradeço ao PPG GECON e à EECA da UFG, na pessoa da professora Dra. Márcia Maria dos Anjos Mascarenhas, por ter gentilmente aceitado me orientar nessa pesquisa, sempre de forma atenciosa, simpática e paciente, e ao professor Dr. Gilson de F. N. Gitirana Jr., por ter sido meu coorientador, emprestando um pouco do seu vasto conhecimento no assunto tema da

pesquisa e enriquecendo este trabalho com suas pertinentes sugestões e revisões.

Aos demais docentes do mestrado em Geotecnia do PPG GECON/UFG, que ampliaram meu conhecimento nesta instigante área da engenharia, algo que, com certeza levarei comigo para o resto da minha vida profissional. Também direciono parte dos meus agradecimentos aos colegas, discentes à época, em especial ao Emílio Faria Vaz e ao Vinícius Naves de Oliveira, que forneceram treinamento quanto à operação dos equipamentos utilizados na determinação das curvas características das amostras estudadas e à aluna de iniciação científica Arielly Fernandes, pela execução dos ensaios de granulometria, utilizando o granulômetro a laser da EECA da UFG.

Agradeço ao professor Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária – PPGEAS e gestor do Laboratório de Hidráulica da UFG, por ceder as instalações deste laboratório, não só para abrigar o canal hidráulico, como também durante a execução dos ensaios de erodibilidade.

Finalmente, agradeço ao técnico do laboratório de Geotecnia do PPG GECON, João C. de Lima Júnior, e em especial ao técnico do laboratório de hidráulica, Tomás da Rosa Simões, pela disponibilidade, suporte e apoio, fundamentais para a execução dos ensaios de erodibilidade no canal hidráulico, sem os quais não seria possível empreender essa pesquisa.

Todo o conhecimento que não leva a novas perguntas rapidamente morre: não consegue manter a temperatura necessária para a manutenção da vida.

Wislawa Szymborska

RESUMO

Dentre as causas de assoreamento em grandes reservatórios, a deposição de sedimentos no fundo dos mesmos, decorrentes da erosão das suas margens, é uma das que mais acarreta diminuição do volume útil destes corpos hídricos. Estudos recentes indicam que a erodibilidade de um solo é significativamente afetada pela sua sucção inicial, com diferenças relativas entre o solo inicialmente saturado e relativamente seco da ordem de 300%. Face ao exposto, este trabalho tem por objetivo avaliar a perda de massa de um solo laterítico arenoso situado na borda do reservatório da usina hidrelétrica de Itumbiara, localizada no Rio Paranaíba, na divisa dos estados de Goiás e Minas Gerais, Brasil, devido ao impacto de ondas, considerando a influência da sucção inicial. Para simular o fenômeno em questão, foram realizados ensaios de erodibilidade em corpos de prova de amostras indeformada e deformada do referido solo, compactados estaticamente em diferentes umidades, submetendo-os ao impacto de ondas geradas em um canal hidráulico, numa frequência e inclinação pré-estabelecidas, quais sejam, 0,56 Hz e 30°, respectivamente, desencadeando assim, erosão hídrica na superfície exposta do solo. As umidades utilizadas na moldagem dos corpos de prova foram definidas a partir da curva característica solo-água da amostra, obtida por meio dos seguintes equipamentos: *tempe cell*, placa de pressão e WP4. As perdas de massa oriundas da erosão hídrica foram determinadas após os ensaios e ao longo da distância no canal, incluindo a determinação da granulometria dos sedimentos. Os resultados de perda de massa do solo foram confrontados com as sucções iniciais dos corpos de prova, indicando um aumento das taxas de erodibilidade do solo com o crescimento da sucção inicial, enquanto que a distribuição de sedimentos ao longo do canal hidráulico seguiu a tendência geral de deposição de sedimentos observada em reservatórios de água.

Palavras-chave: Erodibilidade. Latossolo. Canal hidráulico. Sucção.

ABSTRACT

Among the causes of silting up in large reservoirs, the sediments deposition at bottom them, resulting from the erosion on its margins, is one those causes the most decrease the useful volume these water bodies. Recent studies indicate that soil erodibility is significantly affected by its initial suction, with relative differences between initially saturated and relatively dry soil in order of 300%. Given the above, this study aims to evaluate the sandy lateritic soil mass loss of reservoir's edge Itumbiara hydroelectric power plant, located on Paranaíba River, on border the states of Goiás and Minas Gerais, Brazil, due the waves impact, considering the suction influence. To simulate the phenomenon in question, erodibility tests were carried out on undisturbed and disturbed specimens the referred soil, statically compacted in differents water contents, subjecting its to the waves impact generated in a wave flume, at a pre-established frequency and inclination, which were 0.56 Hz and 30°, respectively, thus triggering hydraulic erosion on the exposed soil surface. The water contents used in the specimens moulding were defined from the samples soil-water characteristic curves, obtained through the following equipments: tempe cell, pressure plate and WP4. Mass losses from hidraulic erosion were determined after the tests and along the distance of wave flume, including the sediments granulometry determination. The soil mass loss results were compared with the initial specimens suctions, indicating an increase in soil erodibility rates with the growth of initial suction, while that the sediment distribution along the wave flume followed the general trend of sediment deposition observed in water reservoirs.

Keywords: Erodibility. Latosol. Wave flume. Suction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos de onda de acordo com o Período e Energia Relativa (escala arbitrária).....31
Figura 2.2 – Elementos característicos de uma onda senoidal. Adaptado pelo autor de (U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS,2002).....33
Figura 2.3 – Órbitas das partículas e linhas de corrente de uma onda que se propaga em águas profundas.....35
Figura 2.4 – Órbitas das partículas e linhas de corrente de uma onda que se propaga em águas rasas.....36
Figura 2.5 – Campo de ondas do reservatório da UHE Ilha Solteira para um vento de 5,92 m/s, soprando na direção Norte-nordeste (VIEIRA, *et al*., 2011).....38
Figura 2.6 – Área do reservatório da UHE Itumbiara de maior potencial erosivo devido às ondas. Adaptado pelo autor de (VILHENA *et al*., 2019).....39
Figura 2.7 – Seção longitudinal de um canal hidráulico dotado de um aba para a geração de ondas. Adaptado pelo autor de (PALMEIRA e TATTO, 2015).....40
Figura 2.8 – Aspecto do modelo físico experimentel (a) e blocos de concreto utilizados na geração de ondas por deslizamento de terra (b). (WANG *et al*., 2016).....41
Figura 2.9 – Resultados experimentais e numéricos do decaimento da altura relativa da onda máxima ao longo do tempo, no ponto de instalação do medidor de altura de ondas WG3. Adaptado de (WANG *et al*., 2016).....42
Figura 2.10 – Faixas de classificação de erodibilidade de siltes, em relação à velocidade crítica (BRIAUD, GOVINDASAMY e SHAFII, 2017).....44
Figura 2.11 – Mapa de susceptibilidade de erosão hídrica laminar e linear das bordas do reservatório da UHE Itumbiara. Adaptado pelo autor de (VILHENA *et al*, 2019).....47
Figura 2.12 – Configuração utilizada no estudo experimental de Ji *et al*. (2016). Adaptado pelo autor (JI *et al*., 2016).....50
Figura 2.13 – Aspecto do colapso de um talude no canal hidráulico (JI *et al*., 2016).....50
Figura 2.14 – Morfologia dos taludes após impacto das ondas geradas no canal hidráulico, sobre diferentes declividades. Adaptado pelo autor de (JI *et al*., 2016).....51
Figura 2.15 – Configuração do canal hidráulico para simulação do impacto de uma onda de *dambreak* sobre um dique de areia uniforme. Adaptado pelo autor de (EVANGELISTA, 2015).....52

Figura 2.16 – Influência da sucção no volume erodido de um solo granular submetido à erosão devido à chuva. Adaptado pelo autor de (CUOMO *et al*., 2016).....54
Figura 2.17 – Sucção x massa erodida no ensaio de Inderbitzen (ALMEIDA *et al.*, 2015).....56
Figura 2.18 – Sucção inicial x Erodibilidade no ensaio de Inderbitzen (OLIVEIRA, 2019).....57
Figura 3.1 – Resumo das etapas executivas da pesquisa.....61
Figura 3.2 - Ponto de coleta das amostras de solo – Margem direita do reservatório da UHE Itumbiara, Brasil.....62
Figura 3.3 – Variação temporal do nível do reservatório da UHE Itumbiara e elevação do ponto de coleta das amostras – Período: 08/09/2009 a 08/09/2019 (Furnas Centrais Elétricas, 2019).....63
Figura 3.4 – Coleta das amostras: (a) Amostra deformada. (b) Determinação da massa específica natural do solo. (c) Bloco de amostra indeformada. (d) Amostra indeformada para determinação da CCSA.....64
Figura 3.5 – Componentes da placa de pressão do tipo "*Tempe Cell*" utilizado na EECA da UFG - desmontado.....66
Figura 3.6 – Prato extrator de pressão do tipo *Fredlund SWCC Device*, modelo SWC-150.....67
Figura 3.7 – Potenciômetro de espelho resfriado modelo WP4C.....67
Figura 3.8 – Moldagem dos corpos de prova com a amostra deformada, compactada estaticamente: (a) Chapas internas e porta-amostra, (b) Compactação estática na prensa hidráulica manual, (c) Corpo de prova após compactação e (d) Rasamento do excesso de solo compactado acima do topo do porta-amostra.....71
Figura 3.9 – Aspersão de água sobre a superfície exposta de um corpo de prova.....72
Figura 3.10 – (a) Corpo de prova sumetido à secagem em estufa e (b) Aspecto da superfície de um corpo de prova após secagem em estufa, a 42° C, por 48 hs.....72
Figura 3.11 – Moldagem de um corpo de prova a partir de um bloco de amostra indeformada.....73
Figura 3.12 – Aspecto do canal hidráulico. (MENEZES, 2017).....74
Figura 3.13 – (a) Detalhe da rampa e (b) Detalhe do porta-amostra (MENEZES, 2017).....74
Figura 3.14 – Corpo de prova acoplado à rampa do canal hidráulico.....75

Figura 3.15 – (a) - Vista superior dos sedimentos espalhados ao longo do fundo do canal hidráulico, após ensaio. (b) - Coleta dos sedimentos espalhados ao longo do fundo do canal. (c) - Passagem dos sedimentos coletados nas peneiras de malha 2,0 mm e 74μm.....76
Figura 3.16 – Delimitação das 6 diferentes regiões ao longo do canal hidráulico (SCHLIEWE, 2018).....77
Figura 3.17 – Modelo de granulômetro a laser empregado na determinação da distribuição granulométrica dos sedimentos coletados ao longo do canal hidráulico.....77
Figura 4.1 – Perfil de umidade e aspecto visual do solo ao longo da profundidade no ponto de coleta das amostras em 08/09/2019.....80
Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo com e sem defloculante.....81
Figura 4.3 – Classificação da amostra de solo segundo os ensaios expeditos da metodologia MCT.....82
Figura 4.4 – Difratometria de raios-X em amostra integral do solo.....83
Figura 4.5 – (a) Imagem indicando agregações de argila e oxi-hidróxidos e macroporos entre agregações. (b) Imagem apresentando uma agregação de óxi-hidróxidos e argila.....84
Figura 4.6 – (a) Imagem mostrando partículas de quartzo e macroporos entre as mesmas. (b) Imagem indicando agregações de oxi-hidróxidos com microporos intra-agregações.....84
Figura 4.7 – Gráfico com resultados da técnica de EDX, indicando a incidência predominante de oxigênio, alumínio, ferro e silício na amostra em estudo, compatível com oxi-hidróxidos de ferro e alumínio.....85
Figura 4.8 – Gráfico com resultados da técnica de EDX, indicando a incidência p redominante de silício, alumínio, oxigênio e ferro na amostra em estudo, compatível com quartzo e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio.....85
Figura 4.9 – Curva característica solo-água das amostras remoldadas e indeformadas, nas trajetórias de secagem e molhagem, em relação ao teor de umidade gravimétrico.....87
Figura 4.10 – Curva característica solo-água das amostras remoldadas e indeformada, nas trajetórias de secagem e molhagem, em relação ao grau de saturação.....87
Figura 4.11 – Curvas de distribuição da densidade do tamanho dos poros (PSD) em relação aos seus diâmetros (Å), referente ao solo estudado, obtidas a partir das CCSA's das amostras deformadas e indeformadas.....88
Figura 4.12 – Teores de umidade iniciais de cada corpo de prova remoldado por compactação estática e valores de sucção associados.....90
Figura 4.13 – Teores de umidade iniciais de cada corpo de prova indeformado e valores de sucção associados.....91

Figura 4.14 – Gráfico Sucção inicial (kPa) x Perda de Massa (%) – Corpos de prova remoldados por compactação estática.....92
Figura 4.15 – Aspecto dos corpos de prova após ensaios de erodibilidade: (a) Corpo de prova confeccionado com a amostra indeformada, w = 15,7% e (b) Corpo de prova confeccionado com a amostra remoldada, w = 14,8%.....94
Figura 4.16 – Distribuição de sedimentos ao longo das 6 regiões do canal hidráulico em g/m².....96
Figura 4.17 – Distribuição de sedimentos ao longo das 6 regiões do canal hidráulico em percentagem.....97
Figura 4.18– Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 12,2%.....99
Figura 4.19 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 14,8%.....99
Figura 4.20 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 20,0%.....100
Figura 4.21 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 25,0%.....100
Figura 4.22 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 30,0%.....101
Figura 4.23 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região B, compreendendo o trecho de 3,0 a 4,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.....102
Figura 4.24 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região C, compreendendo o trecho de 2,0 a 3,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.....103
Figura 4.25 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região D, compreendendo o trecho de 1,0 a 2,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.....103
Figura 4.26 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região E, compreendendo o trecho de 0,5 a 1,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.....104
Figura 4.27 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região F, compreendendo o trecho de 0,0 a 0,5 m distante da extremidade do canal hidráulico.....104

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Tipos de erosão hídrica e mecanismos de formação.....45

Quadro 2.2 – Principais ensaios para avaliação da erosão hídrica de um solo.....48

Quadro 3.1 – Relação dos ensaios de caracterização realizados na amostra coletadas.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resultados dos parâmetros físicos do solo.....81

Tabela 4.2 – Resultados dos parâmetros referentes ao ensaio de Azul de Metileno e Pastilha.....82

Tabela 4.3 – Análise do solo por meio de fluorescência de raios-X.....86

Tabela 4.4 – Relação dos teores de umidade iniciais dos corpos de prova moldados com a amostra remoldada por compactação estática e os valores de sucção inicial associados.....90

Tabela 4.5 – Relação dos teores de umidade iniciais dos corpos de prova moldados com a amostra indeformada e os valores de sucção inicial associados.....91

Tabela 4.6 – Perdas de massa de corpos de prova moldados com amostras deformada e indeformada.....94

Tabela 4.7 – Distribuição dos sedimentos ao longo do canal hidráulico, devido à perda de massa dos corpos de prova durante os ensaios de erodibilidade.....96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas em português:

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
APRH	- Associação Portuguesa de Recursos Hídricos;
CA	- Coeficiente de Atividade;
CCSA	- Curva Característica Solo Água;
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica;
DRX	- Difração de Raios-X;
EDX	- Espectometria por Energia Dispersiva;
EECA	- Escola de Engenharia Civil e Ambiental;
GST.E	- Gerência de Serviços e Suporte Tecnológico;
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia;
MCT	- Miniatura Compactada Tropical;
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura;
NBR	- Norma Brasileira;
P&D	- Pesquisa e Desenvolvimento;
PSD	- Densidade do Tamanho do Poros;
SE	- Superfície Específica Total;
SIG	- Sistema de Informações Geográficas;
SSB	- Sistema de Segurança de Barragens;
SUCS	- Sistema Universal de Classificação de Solos;
UFG	- Universidade Federal de Goiás;
UHE	- Usina Hidrelétrica.

Abreviaturas em inglês:

ASTM	- *American Society for Testing and Materials;*
RUSLE	- *Revisited Universal Soil Loss Equation;*
SWAN	- *Simulating Waves Nearshore;*
U. S.	- *United States;*
USLE	- *Universal Soil Loss Equation;*
USPED	- *Unit Stream Power-based Erosion Deposition;*
BCW	- *Bank Collapse Width.*

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas minúsculas:

a - Amplitude da onda (m);

b - Largura do rio no canal (m);

c’ – Parâmetro classificatório de solos tropicais pela metodologia MCT;

d - Densidade relativa;

e_w - Conteúdo de água do solo;

e_{wL} - Índice de vazios dos macroporos do solo;

e_{wS} - Índice de vazios dos microporos do solo;

f – Frequência (s^{-1});

g - Aceleração da gravidade (m/s^2);

h - Profundidade da água (m);

h_0 - Nível estático da água no canal (m);

k -Número de onda (m^{-1});

l - Comprimento do bloco (m),

$m_{>74\mu m}$ - Massa seca do material sedimentado no fundo do canal, passante na peneria de malha 2,0 mm e retido na peneira de malha 74 μm, correspondentes às regiões de A a F (g);

$m_{<74\mu m}$ - Massa seca do material sedimentado no fundo do canal, passante na peneira de malha 74 μm, correspondentes às regiões de A a F (g);

m_f - Massa final da amostra, após o ensaio (g);

m_i - Massa inicial da amostra, antes do ensaio (g);

m_L - Parâmetro da Equação de Durner (1994), que depende da inclinação da linha que relaciona o conteúdo de água dos macroporos e a sucção;

m_S - Parâmetro da Equação de Durner (1994), que depende da inclinação da linha que relaciona o conteúdo de água dos microporos e a sucção

m_t - Perda de massa total da amostra (g);

n_L - Inclinação da linha que relaciona o conteúdo de água dos macroporos e a sucção;

n_S - Inclinação da linha que relaciona o conteúdo de água dos microporos e a sucção;

t – Tempo (s);

t - Espessura do bloco (m);

u_a - Poropressão de ar nos poros do solo (kPa);

u_w - Poropressão de água nos poros do solo (kPa);

v_x - Componentes do vetor de velocidade com relação ao eixo x (m/s);

v_z - Componentes do vetor de velocidade com relação ao eixos z (m/s);

w - Largura do bloco (m);

w_i - Teor de umidade inicial da amostra. Determinado previamente ao ensaio (%);

w_f - Teor de umidade final da amostra. Determinado após o ensaio (%);

wL – Limite de liquidez (%);

wP - Limite de plasticidade (%).

Letras romanas maiúsculas:

C - Fator de cobertura vegetal do solo;

C – celeridade de onda (m/s);

E_c - Energia cinética de onda em Joule (J);

Ep - Energia potencial da onda em Joule (J);

E_w - Energia total da onda em Joule (J);

F - *Fetch* ou pista efetiva (km);

H - altura da onda (m);

$H_{máx}$ - Altura máxima da onda (m);

IP - Índice de plasticidade (%);

K - Fator de erodibilidade do solo;

L - Comprimento de onda (m):

L - Fator de comprimento de rampa;

L – Comprimento da onda (m);

P - Fator de práticas de cultivo e manejo do solo;

R - Fator de erodibilidade da chuva;

S - Fator de declividade do terreno;

T – Período de onda (s);

U - Velocidade do vento (m/s);

X1 - Ângulo de inclinação do talude (°);

X2 - Nível d'água (m);

X3 - Altura da onda (cm);

X4 - d_{60} do material do talude (mm);

Letras gregas:

α_L - Valor de entrada de ar dos macroporos (kPa);

α_S - Valor de entrada de ar dos microporos (kPa);

$\eta(x,t)$ - Nível d'água no ponto *x* (m);

ρ_s - Massa específica dos grãos do solo (g/cm³);

ρ_w - Massa específica da água (kg/m³);

ω - Frequência angular ($2\pi/T$) (s^{-1});

σ_w - Freqüência da onda (s^{-1});

v - Velocidade de impacto do bloco na água (m/s).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....31
2.1. ONDAS GERADAS EM RESERVATÓRIO E SUA MODELAGEM.....31
2.2. PERDA DE MASSA DE SOLOS SITUADOS EM BORDAS DE RESERVATÓRIO.....43
2.3. A INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA PERDA DE MASSA DE SOLOS TROPICAIS NÃO SATURADOS.....52
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....61
3.1. DESCRIÇÃO DO LOCAL DE AMOSTRAGEM.....62
3.2. COLETA DAS AMOSTRAS.....64
3.3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....65
3.3.1. Ensaios de caracterização do solo.....65
3.3.2. Ensaios de erodibilidade no canal hidráulico.....69
3.3.2.1. Preparação dos corpos de prova.....69
3.3.2.2. Procedimento experimental.....73
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....79
4.1. PERFIL DE UMIDADE NO PONTO DE AMOSTRAGEM DO SOLO.....79
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....80
4.3. CURVAS CARACTERÍSTICAS SOLO-ÁGUA.....86
4.4. INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA PERDA DE MASSA DO SOLO.....90
4.5. INFLUÊNCIA DA CIMENTAÇÃO DO SOLO NA SUA PERDA DE MASSA.....94
4.6. INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE INICIAL NA DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS.....95
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....107
REFERÊNCIAS.....111

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os reservatórios de barragens estão entre os responsáveis pelas mudanças das características hidrodinâmicas dos ecossistemas onde estão inseridos, devido aos processos erosivos que se instalam em suas bordas. Esses processos podem ser originados pela ação das ondas geradas nos reservatórios, que promovem a deposição de sedimentos nos mesmos ao longo do tempo (VILHENA *et al.*, 2019).

A erosão hídrica do solo e a posterior deposição dos sedimentos resultantes exercem influência na sustentabilidade dos reservatórios. A sedimentação contribui para a diminuição do volume útil dos reservatórios ao longo do tempo, reduzindo a capacidade de geração de energia e o volume de água disponível para abastecimento (LUZ *et al.*, 2016).

Segundo informa Carvalho *et al*. (2000), a partir de estudos efetuados em 1994 pela Eletrobrás, estima-se que a perda média da capacidade de armazenamento dos reservatórios de usinas hidrelétricas brasileiras devido à sedimentação, é da ordem de 0,5% ao ano. Essa taxa anual correspondeu a aproximadamente 2×10^9 m³ de perda de volume de armazenamento anualmente, à época, com tendência de aumento devido à intensificação da ocupação do solo.

Os sedimentos presentes em reservatórios de hidrelétricas são parcialmente resultantes do impacto de ondas nas suas bordas, que desagregam as partículas de solo e as depositam no seu fundo. Este tipo de erosão depende da geração de ondas nos reservatórios e está relacionada à intensidade e direção preponderante dos ventos atuantes na superfície do espelho d'água. A erodibilidade do perfil de solo dos taludes das bordas dos reservatórios, que está ligada à sua geomorfologia, topografia, pedologia, cobertura vegetal, uso e ocupação do solo e às suas propriedades geotécnicas, também influencia essa geração de sedimentos. Trata-se, portanto, de um fenômeno a ser estudado de uma maneira multidisciplinar.

Para Ji *et al.* (2016), o colapso das margens dos reservatórios devido ao impacto de ondas, são bastante influenciados pela inclinação dos seus taludes, distribuição granulométrica do solo,

densidade do material, altura das ondas e flutuações do nível da água. Rubio (2014) elenca como indicadores do desenvolvimento dos processos erosivos em margens de reservatórios, o relevo e a declividade das margens, a mineralogia, a granulometria e a permeabilidade do solo, a velocidade e direção dos ventos, a extensão do *fetch*, a ocupação do solo e a sua cobertura vegetal.

Em que pese à relevância do problema da erosão em bordas de reservatório, as pesquisas acadêmicas direcionadas à avaliação da erodibilidade dos solos pelo impacto de ondas são ainda incipientes. Entretanto essas pesquisas vêm crescendo gradualmente. Nesse aspecto, podem ser mencionados o projeto de P&D Bioengenharia, coordenado por Furnas Centrais Elétricas e os recentes trabalhos de Menezes (2017), Schliewe (2018) e Vilhena (2019) que estudaram a erodibilidade de solos lateríticos arenosos, devido ao impacto de ondas, por meio de simulações em um canal hidráulico.

O conhecimento da influência da sucção na erodibilidade do solo devido ao impacto de ondas é importante para a estimativa das taxas de erosão das margens de um reservatório e do nível de sedimentos aportados para o mesmo. Tal fato é ainda mais crítico quando se considera os solos tropicais das margens dos reservatórios brasileiros que, em decorrência da sua elevada porosidade e às diferentes condições pluviométricas anuais do clima tropical, apresentam-se ao longo do ano com grandes variações de sucção, que proporcionam diferenças relativas entre taxas de erodibilidade da ordem de 300%, considerando-se o solo inicialmente saturado e relativamente seco (Almeida, Rocha e Gitirana Jr, 2013). Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência da sucção inicial na perda de massa de solos lateríticos não saturados, causada pelo efeito do impacto das ondas em margens de reservatórios.

Adicionalmente, apresentam-se como objetivos específicos da pesquisa:

- Comparar as taxas de erodibilidade devido ao impacto de ondas, entre corpos de prova confeccionados com amostras de solo deformadas, remoldadas por compactação estática, e corpos de prova confeccionados a partir de amostras de solo indeformadas;

- Correlacionar os valores de sucção inicial do solo com as suas respectivas perdas de massa, obtidas nos ensaios de erodibilidade devido ao impacto de ondas;

- Avaliar a distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos do destacamento de grãos do solo ao longo do canal hidráulico, durante os ensaios de erodibilidade.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

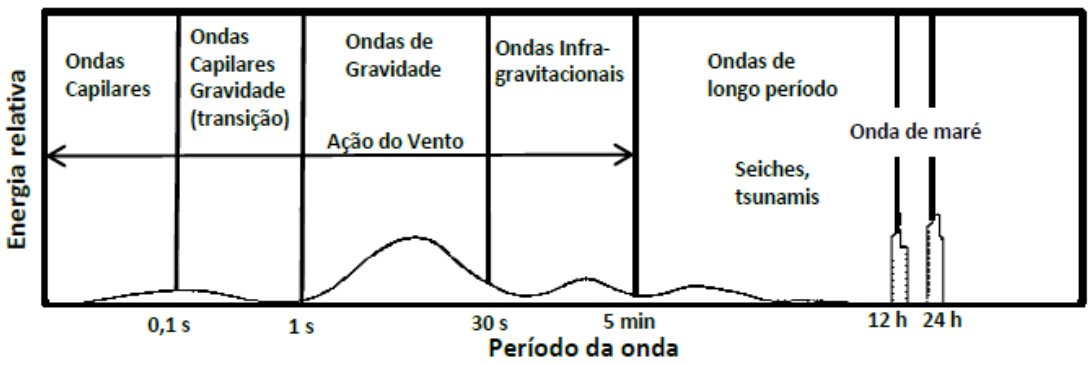
Neste capítulo serão abordados aspectos relacionados às ondas geradas em reservatórios, considerando as suas características principais, classificação, formação, modelagem matemática e ensaios de simulação de ondas em escala reduzida. Discorre-se ainda, sobre a erosão associada ao impacto de ondas em reservatórios, abordando os fatores que influenciam este processo erosivo nos solos das suas bordas, com foco na sucção matricial.

2.1 ONDAS GERADAS EM RESERVATÓRIOS E SUA MODELAGEM

Ondas são manifestações de forças atuando em um fluído, tendendo a deformá-lo contra ação da gravidade e da tensão superficial, as quais atuam em conjunto para manter o seu nível original. Portanto, a geração de ondas requer algum tipo de força, tal como aquela originada por rajadas de vento ou pelo impacto de uma pedra na água (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

Todo movimento vertical da superfície da água pode ser definido como uma onda (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017). Este movimento pode atingir variadas alturas, amplitudes, frequências e comprimentos. Em razão da variedade das ondas existentes, buscou-se classificá-las de acordo com o seu período, comprimento e origem. A Figura 2.1 apresenta os tipos mais frequentes de ondas.

Figura 2.1 – Tipos de onda de acordo com o Período e Energia Relativa (escala arbitrária).



Disponível em: http://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html, acessado em 28/09/2018.

De acordo com o período, as ondas geradas pelo vento se subdividem em dois grupos: as ondas gravitacionais de superfície, cujo movimento é ditado pela ação da gravidade, com períodos superiores a 1/4 s e de frequente ocorrência em reservatórios. O segundo tipo de onda são as capilares, fortemente influenciadas pela tensão superficial da água e com períodos inferiores a 1/4 s (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017).

A geração de ondas em grandes espelhos d'água constitui um fenômeno de grande variabilidade espacial, que obedece a leis de conservação de energia, onde ocorre transferência de energia, principalmente eólica, para a água. Essa transferência de energia é proveniente do atrito gerado no contato entre o vento e a água. As tensões de atrito causam deformação na superfície livre da água, formando pequenas ondas, denominadas "capilares", que tendem a ser amortecidas pela tensão superficial da água, restaurando a sua superfície plana. À medida que o vento atua, estas ondas crescem progressivamente, vencendo a ação da tensão superficial da água, transformando-se em ondas gravitacionais (MARQUES, 2014).

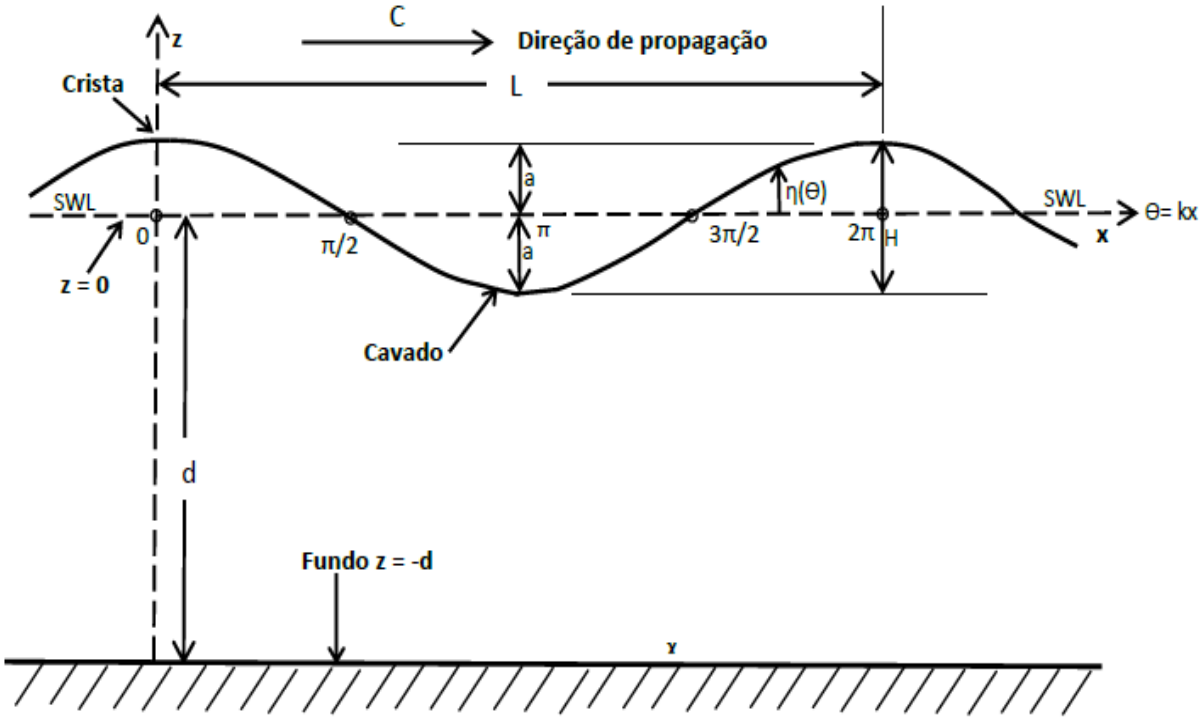
O crescimento das ondas aumenta a exposição das mesmas aos ventos, intensificando a referida transferência de energia. Neste processo instável, é gerada uma crescente diferença de pressão entre o lado correspondente à superfície da onda na qual o vento incide e o lado oposto a este, acelerando o processo de crescimento das ondas (GONÇALVES, 2014).

As ondas se propagam em direção às margens do corpo hídrico, encontrando nesse trajeto profundidades cada vez mais reduzidas, que as modifica devido à refração, difração e arrebentação, onde perdem praticamente toda energia acumulada (MATTOSINHO, 2016).

De acordo com a Figura 2.2, o ponto de maior altura da onda, em relação ao nível médio da superfície da água, denomina-se "crista", enquanto o ponto mais baixo, entre duas cristas, é denominado "cavado". A distância "*L*", equivalente a duas cristas ou cavados sucessivos, é denominado de comprimento da onda. A distância "*a*", entre o nível médio da água e uma crista ou cavado, é denominada de amplitude da onda, e corresponde à semi-diferença entre uma crista e um cavado, isto é, a metade da altura da onda (*H/2*). O tempo demandado para que duas cristas sucessivas passem por um mesmo ponto é denominado de período (*T*) e a quantidade de cristas que passam em um mesmo ponto por unidade de tempo, geralmente em segundos, é denominada de frequência (*f*). A velocidade do perfil de onda, conhecida por celeridade (*C*) ou velocidade de fase, é obtida pela razão entre o comprimento da onda e o seu período, $C = L/T$. A declividade da onda corresponde ao quociente entre a altura da onda e o

seu comprimento (*H/L*) (DEAN; DALRYMPLE, 1991; MARQUES, 2014; U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2002)

Figura 2.2 – Elementos característicos de uma onda senoidal. Adaptado pelo autor de (*U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS*, 2002).



A energia de uma onda corresponde à somatória das suas parcelas de energia cinética e potencial. Observa-se, ao calcular tais parcelas, que ambos os valores obtidos são iguais e variam ao longo do comprimento da onda (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017). A energia total por unidade de largura de onda pode ser descrita pela Equação 2.1.

$$E_w = E_c + E_p = \rho_w \, gH^2L/8 \tag{2.1}$$

onde: E_w é a energia total da onda em Joule (J), E_c é a parcela correspondente à energia cinética de onda em Joule (J), E_p é a parcela correspondente à energia potencial da onda em Joule (J), ρ_w é a massa específica da água em kg/m³, g é a aceleração da gravidade em m/s², *H* é a altura da onda em m e *L* é o comprimento da onda em m.

Em meados do século XIX, Airy (1841[1] *apud* DEAN; DALRYMPLE, 1991) propôs um modelo para a obtenção dos parâmetros de uma onda. Este modelo simplifica o que ocorre na prática, ao considerar apenas um sinusoidal na teoria proposta, pois na natureza as ondas são constituídas por uma interposição de sinusoidais. Essa simplificação tem uma razoável acurácia para fins de engenharia (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

A teoria de Airy considera uma onda plana, cujo formato permanece inalterado ao longo da direção perpendicular ao sentido de propagação das ondas. Assim, adotando-se um referencial que acompanha a onda na sua velocidade de fase ou celeridade, o campo de movimento, a distribuição pressiométrica e a elevação superficial permanecem constantes ao longo do trajeto. Este tipo de configuração só pode ocorrer quando a amplitude da onda é muito pequena em relação à profundidade do corpo d'água e ao comprimento da mesma. Em razão do exposto, a teoria de Airy também é denominada de teoria de ondas de pequena amplitude ou teoria de ondas planas.

A teoria de ondas planas se baseia na solução da equação de Laplace, bidimensional, para o potencial de velocidades, a partir de uma série de hipóteses, quais sejam, o fluido é invíscido, incompressível e homogêneo, o movimento é irrotacional, sem geração de vórtices, a pressão atmosférica é constante, a tensão superficial pode ser desprezada e o fundo do meio onde se encontra o fluido é impermeável.

O desenvolvimento da teoria de Airy, considerando as hipóteses supramencionadas, bem como algumas condições de contorno aplicadas aos laplacianos, permite a determinação da altura de uma onda harmônica senoidal, de acordo com a Equação 2.2.

$$\eta\,(x,t) = a\,sen(kx - \omega t) \qquad (2.2)$$

onde: $\eta(x,t)$ é o nível d'água no ponto x(m), a é a amplitude de onda, considerando o tempo t (s), k é o número de onda ($2\pi/L$) (m^{-1}) e ω é a frequência angular ($2\pi/T$) (s^{-1}). O número de onda corresponde à quantidade cíclica de cristas por unidade de distância, enquanto que a frequência angular fornece a quantidade de radianos por unidade de tempo (MARQUES, 2014).

[1]AIRY, G. B. **Tides and waves**, s. n. s.1. 1841.

A partir da Equação 2.1, são encontradas as componentes da velocidade nas direções ortogonais x e y, que definem a trajetória orbital de uma partícula infinitesimal do fluido, conforme apresentado nas Equações 2.3 e 2.4.

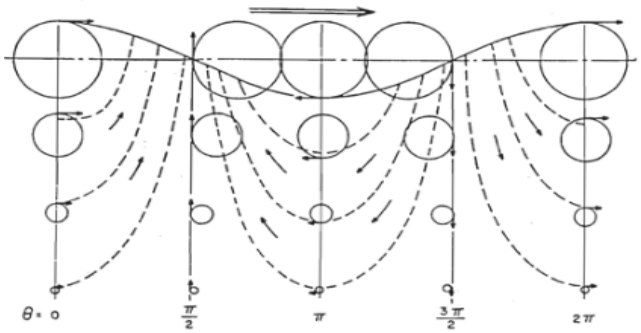
$$v_x = \frac{H}{2}\sigma_w \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)}\cos(kx - \sigma_w t) \tag{2.3}$$

$$v_z = \frac{H}{2}\sigma_w \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)}\sin(kx - \sigma_w t) \tag{2.4}$$

onde: v_x e v_z são componentes do vetor de velocidade com relação aos eixos *x* e *z* (m/s), *H* é a altura da onda (m), σ_w é a frequência da onda (s^{-1}), *k* é o número da onda (m^{-1}) e *h* a profundidade da água (m).

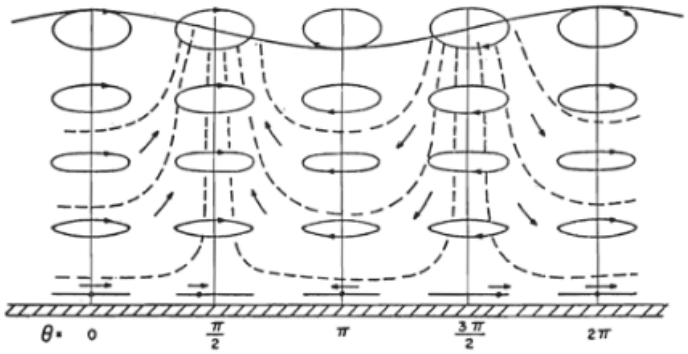
De acordo com Dean e Dalrymple (1991) , quando as águas são profundas, ou seja, a relação entre a profundidade do corpo hídrico e o comprimento da onda (*h/L*) é superior a 1/20, as partículas se movem em trajetórias circulares. À medida que estas se distanciam da superfície, o raio das referidas trajetórias diminui exponencialmente, tornando-se desprezível em profundidades superiores à metade da altura da onda. Com a diminuição da sua profundidade relativa (*h/L*), o fundo do corpo d'água começa a interferir no formato das ondas, tornando-as cada vez mais irregulares. Nesta situação as trajetórias orbitais circulares assumem um formato elíptico. Em águas rasas (*h/L* < 1/20), a celeridade e o comprimento da onda variam com a profundidade, mantendo-se, no entanto, o período constante. Quando a profundidade relativa do corpo d'água (*h/L*) se situa dentro do intervalo entre 1/2 a 1/20, ocorrerá uma situação intermediária às duas situações descritas anteriormente. As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram as trajetórias das partículas e linhas de corrente de ondas que se propagam em águas profundas e rasas, respectivamente.

Figura 2.3 – Órbitas das partículas e linhas de corrente de uma onda que se propaga em águas profundas.



Disponível em: http://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html, acessado em 28/09/2018.

Figura 2.4 – Órbitas das partículas e linhas de corrente de uma onda que se propaga em águas rasas.



Disponível em: http://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html, acessado em 28/09/2018.

Os estudos das ondas geradas pelos ventos se desenvolveram bastante durante a Segunda Guerra Mundial, devido à necessidade da previsão de ondas para o desembarque de tropas em regiões costeiras. Tal fato originou os modelos paramétricos, onde é possível a determinação da altura das ondas a partir das características do vento (intensidade, direção e duração), profundidade do corpo hídrico e o comprimento da pista de vento, denominado *fetch* (MARQUES, 2014).

A distância que o vento viaja sobre a água em direção constante é chamado de *fetch*. A geometria dos reservatórios interiores contribui para a ocorrência de pequenos *fetchs*, devido ao seu formato, que se apresenta frequentemente dentrítico. Assim, o *fetch* em mar aberto é maior do que em reservatórios interiores, proporcionando às ondas oceânicas muito mais energia e longas distâncias para crescer (VILHENA, *et al.*, 2019).

O *fetch* é, portanto, um conceito geométrico obtido pontualmente, a partir de uma direção pré-definida e da geometria das margens dos reservatórios, que geralmente apresentam formato irregular e dentrítico, o que induz uma maior dificuldade em se obter tal parâmetro com exatidão (MARQUES; ANDRADE; GUETTER, 2013).

Em águas oceânicas o *fetch* é determinado com maior exatidão a partir de cartas sinóticas. Próximo à costa, dispensa-se tais cartas e o *fetch* passa a ser determinado simplesmente pela distância horizontal normal, na direção do vento, da praia à estrutura a ser projetada. Já em águas interiores, devido à grande influência do formato das margens, utiliza-se comumente o método de Saville (1954) na determinação do *fetch*. Tal método consiste basicamente na construção de 19 linhas radiais, partindo-se do ponto de incidência da onda e estendendo até as margens, em intervalos de 5º, de maneira que cada linha extrema forme um ângulo de 45º

com a direção do vento. O *fetch* então é calculado a partir da média ponderada do comprimento dessas linhas, tendo os cossenos dos referidos ângulos como pesos, conforme a Equação 2.5.

$$F = \frac{\Sigma_i \, x_i \cos \alpha_i}{\Sigma_i \cos \alpha_i} \tag{2.5}$$

A *American Society of Civil Engineers* (1948[2] *apud* MARQUES, 2005) apresenta três fórmulas paramétricas empíricas, relacionando a velocidade dos ventos e o *fetch* em determinada direção, para o cálculo das ondas máximas geradas pelos ventos. A primeira equação, denominada SGM, é a mais utilizada, encontrando-se apresentada pela Equação 2.6. A segunda é equação de Wolf, apresentada pela Equação 2.7 e a última equação é a de Creager, cuja formulação é apresentada pela Equação 2.8.

$$H_{máx} = 0{,}4724(UF)^{0{,}5} - 3{,}6942F^{0{,}25} + 8{,}2 \tag{2.6}$$

$$H_{máx} = (0{,}0623U - 1{,}1653)F^{0{,}5} \tag{2.7}$$

$$H_{máx} = 2{,}6581F^{0{,}37}U^{0{,}48}/3{,}41 \tag{2.8}$$

Nessas três equações o parâmetro *F*, refere-se ao *fetch* ou pista efetiva (km), *U* é a velocidade do vento (m/s) e $H_{máx}$ representa a altura máxima da onda (m), na direção do *fetch*.

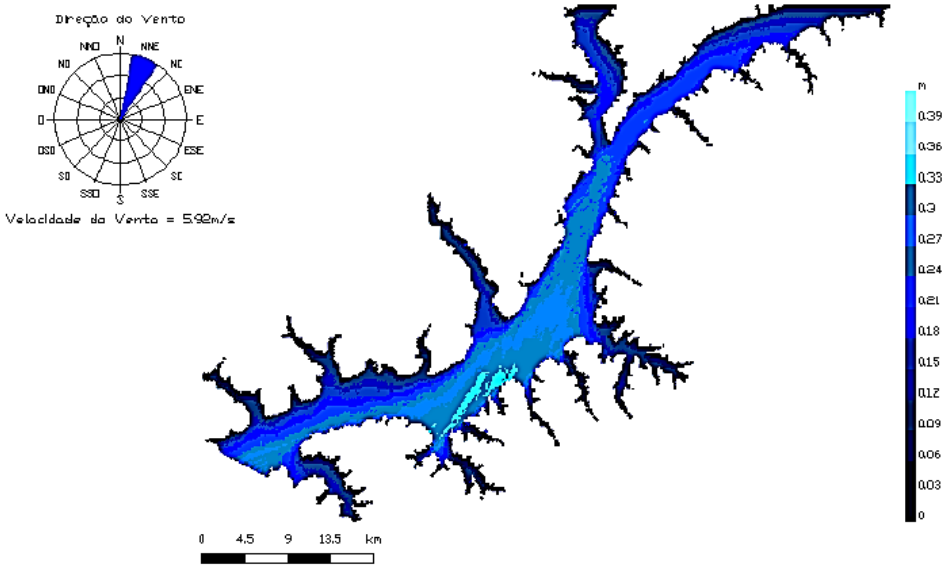
D'armada (2012) empregou a equação 2.8, a partir da determinação dos *fetchs* pelo método de Saville (1954), para estimar as alturas máximas das ondas ao longo de cinco diferentes direções, em 19 pontos do reservatório da UHE Porto Colômbia, para obter o potencial erosivo do embate das ondas nas suas margens. Os dados referentes ao ventos preponderantes, no que se refere às suas velocidades e direção, foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

[2]AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1948). **Review of slope protection methods**. Comitte on Earth Dams of the Soil Mechanics and Foundations Division. Procedings. 74 (6).845:854.

Marques e Guetter (2011) desenvolveram um software para obter a distribuição espacial das ondas geradas pela ação de ventos severos no reservatório da UHE Itaipu, empregando um modelo paramétrico denominado SMB, cujos dados de entrada foram os *fetchs*, obtidos pelo método de Saville (1954), empregando-se imagens de satélite georreferenciadas do reservatório. A velocidade e direção dos ventos preponderantes foram medidas por anemômetros instalados em estações meteorológicas próximas ao reservatório, durante um período de 8 anos. Os dados dos ventos passaram por tratamento estatístico, permitindo-se estimar o campo de ondas no reservatório da UHE Itaipu considerando 10, 20, 50 e 100 anos de período de retorno. Observou-se que os ventos oriundos da direção noroeste foram os mais intensos, gerando ondas superiores a 2,0 m de altura, para um período de retorno de 20 anos. A estimativa dos *fetchs* a partir do software eliminou a subjetividade na determinação desse parâmetro.

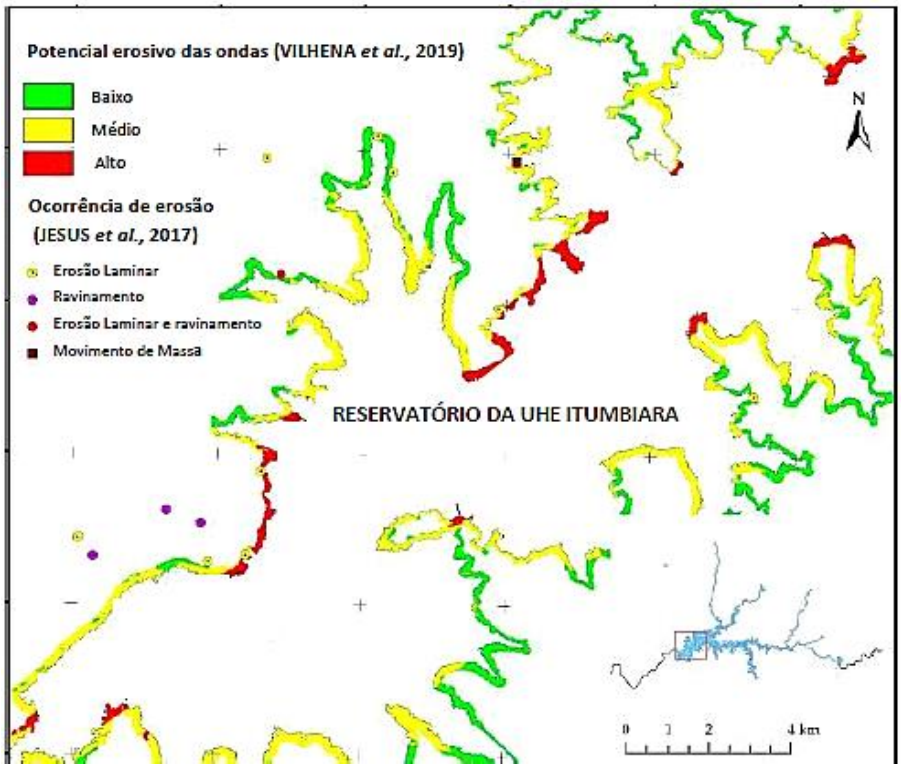
Vieira *et al.* (2011) empregaram o modelo numérico SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) e o software OndisaCAD, para a estimativa da altura de ondas a partir de equações paramétricas, utilizando dados de vento medidos durante seis meses por anemômetros, para determinar o campo de ondas do reservatório da UHE Ilha Solteira. Os dois modelos apresentaram-se, qualitativamente, bastante fidedignos ao campo de ondas real observado no reservatório. A Figura 2.5 apresenta o campo de ondas obtido pelo software OndisaCAD, para um vento soprando pela direção Norte-nordeste, a uma velocidade de 5,92 m/s, para o Reservatório da UHE Ilha Solteira.

Figura 2.5 – Campo de ondas do reservatório da UHE Ilha Solteira para um vento de 5,92 m/s, soprando na direção Norte-nordeste (VIEIRA, *et al*., 2011).



Vilhena *et al.* (2019) avaliaram o potencial erosivo das ondas geradas pelo vento nas margens do reservatório da UHE Itumbiara, a partir de uma análise baseada no sistema de informação geográfica (SIG), utilizando uma ferramenta de modelagem de ondas a partir do *fetch*, denominada WAVE, desenvolvida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos. Os *fetchs* foram calculados em cada ponto da malha, considerando 16 direções distintas, formando um ângulo de 22,5º entre si, empregando-se o método desenvolvido pelo *Shore Protection Manual* (SPM). Os dados de entrada para a modelagem, referentes às direções preponderantes dos ventos e respectivas velocidades, foram obtidos a partir de medições empregando um sensor acústico *Doppler*, denominado SODAR, e um anemômetro ultrassônico. Essa análise permitiu identificar o potencial erosivo das ondas ao longo das margens do reservatório da UHE Itumbiara, permitindo identificar as zonas que requerem maiores intervenções para implantação de ações preventivas e corretivas contra a erosão marginal devido ao impacto de ondas. Estes locais encontram-se predominantemente na margem direita do reservatório, onde ocorrem os maiores *fetchs*, para ventos soprando nas direções azimutais 45º e 67,5º. A Figura 2.6 ilustra o mapa da do reservatório da UHE Itumbiara onde estão apresentadas as suas margens classificadas pelo potencial erosivo das ondas.

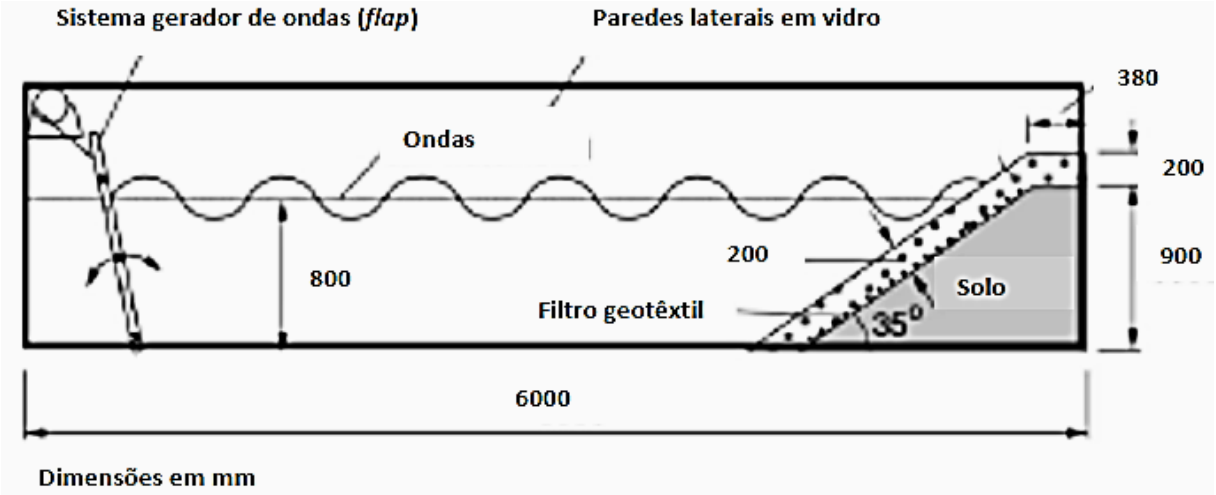
Figura 2.6 – Área do reservatório da UHE Itumbiara de maior potencial erosivo devido às ondas. Adaptado pelo autor de (VILHENA *et al.*, 2019).



Os experimentos em laboratórios, executados em modelos físicos, complementam as observações de campo, uma vez que o processo completo de evolução do formato das ondas é de difícil medição no campo (CHENG; HSU, 2013).

O estudo experimental de ondas geralmente envolve o emprego de canais hidráulicos em que ocorre a geração controlada de ondas em uma massa de água de determinada altura, empregando-se diversos meios, tais como: queda de um peso sob a lâmina d'água, levantamento de uma massa d'água do fundo do canal, pela liberação de um volume de água armazenado, por meio da abertura repentina de uma comporta ou pelo movimento oscilatório da extremidade de uma pá vertical, denominada aba (WU *et al.*, 2016). A Figura 2.7 apresenta a seção longitudinal de um canal hidráulico, com ondas geradas por uma aba (PALMEIRA e TATTO, 2015).

Figura 2.7 – Seção longitudinal de um canal hidráulico dotado de uma aba para a geração de ondas. Adaptado pelo autor de (PALMEIRA e TATTO, 2015).



Para cada meio de geração de ondas em canais hidráulicos, existe uma função de transferência que associa as características do meio gerador das ondas com as características destas, como frequência, altura e comprimento. Schliewe (2018) calibrou o sistema gerador de ondas do canal hidráulico da EECA da UFG, o qual é constituído por uma aba, calculando-se as características das ondas a partir da variação da velocidade de rotação e frequência de movimentação do motor que impulsiona a aba, considerando as extensões do curso da aba, ou seja, da máxima distância longitudinal percorrida pela aba no seu movimento oscilatório, para diversas profundidades. O referido autor utilizou a Equação 2.9, proposta por Souza e Morishita (2003), baseada em ondas de pequena amplitude, a qual se constitui uma função de

transferência entre a altura de onda e o curso da aba em determinada profundidade do canal hidráulico.

$$\frac{H}{S_f} = 4\frac{senh(k_w h)}{k_w h}\frac{k_w h senh(k_w h) - \cosh(k_w h) + 1}{senh(2k_w h) + 2k_w h} \tag{2.9}$$

onde: H (cm) é a altura da onda, h (cm) é a profundidade da água no canal hidráulico,S_f (cm) é o curso da aba na profundidade h e k_w é o número da onda, definido pela pela relação $2\pi/L$, onde L é o comprimento da onda.

Wang *et al*. (2016) empregaram um modelo físico experimental, constituído por um protótipo em escala do fundo do rio Yangtzé, nas proximidades do reservatório da usina de Três Gargantas, na China, e um modelo numérico em 3D, para modelar as ondas de impulso geradas por deslizamentos de taludes, em águas profundas, de rios dotados de topografia complexa. Toda a complexa topografia do rio, na região escolhida, foi reproduzida pelo protótipo, o qual foi ainda instrumentado com sensores de velocidade e 13 medidores de altura de ondas (WG1 a WG13) distribuídos ao longo do canal do protótipo. A geração das ondas ocorreu pelo impacto de blocos de concreto deslizando sobre uma rampa em ângulos de 5º a 75º. Uma câmera de alta velocidade foi empregada para capturar todo o processo de formação de ondas nos ensaios realizados. Foram realizados 49 ensaios, variando-se os ângulos da rampa supracitada, a massa e as dimensões dos blocos geradores das ondas e, consequentemente, as velocidades de deslizamento, as alturas e as amplitudes das ondas geradas. A Figura 2.8 apresenta o aspecto do modelo físico utilizado (a) e os blocos de concreto utilizados na geração de ondas por deslizamento de terra (b).

Figura 2.8 – Aspecto do modelo físico experimental (a) e blocos de concreto utilizados na geração de ondas por deslizamento de terra (b). (WANG *et al*., 2016).

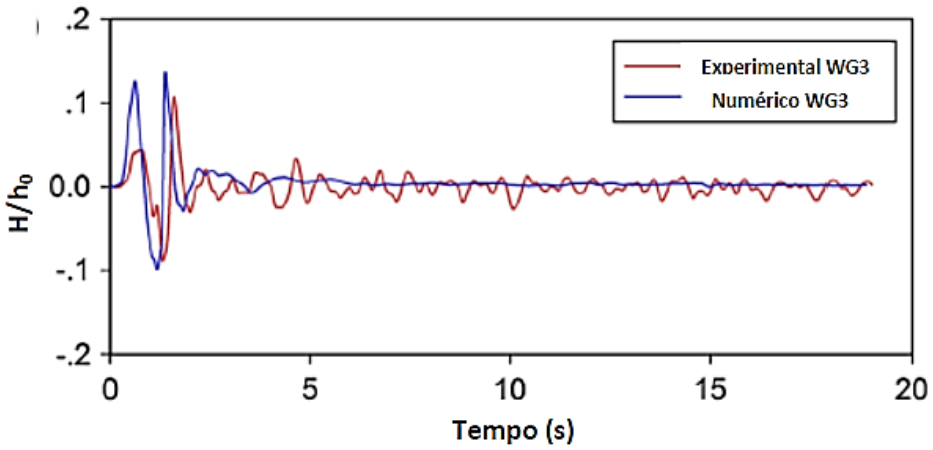
A modelagem física permitiu estabelecer uma equação empírica que relaciona a altura máxima da onda gerada pelo deslizamento de um bloco, velocidade e ângulo de deslizamento, as dimensões do canal do rio nos locais instrumentados e as dimensões dos blocos geradores das ondas. A Equação 2.10, obtida por regressão múltipla não-linear, foi proposta para estimar a altura máxima das ondas principais, a partir do modelo físico.

$$\frac{H_{máx}}{h_0} = 1{,}17\frac{v}{\sqrt{gh_0}}(sen^2\alpha + 0{,}6cos^2\alpha)\left(\frac{lt}{bh_0}\right)^{0{,}15}\left(\frac{w}{b}\right)^{0{,}45} \quad (2.10)$$

onde: $H_{máx}$, é a altura máxima da onda (m), v é a velocidade de impacto do bloco na água (m/s), α é o ângulo de deslizamento do bloco (º), g é a acelaração da gravidade (m/s²), l é o comprimento do bloco (m), t a espessura do bloco (m), w é a largura do bloco (m), h_0 é o nível estático da água no canal (m) e b é a largura do rio no canal (m).

Um modelo numérico, obtido pelo método SPH, foi adotado para modelar as ondas impulsivas geradas por deslizamentos de terra, o qual apresenta a vantagem de ser livre de malhas, sobre uma abordagem Lagrangeana, ideal para superfícies de fluxo livre com grandes deformações, a partir da resolução aproximada da equação completa de Navier-Stokes. Os resultados dessa modelagem numérica foram validados pelos resultados experimentais, onde foram abordadas a amplitude da máxima onda, a aceleração e o tempo de chegada dessa onda na margem oposta e o decaimento da mesma ao longo do canal, devido aos efeitos de refração e reflexão da onda (WANG *et al*., 2016). A Figura 2.9 apresenta os resultados experimentais e numéricos do decaimento da altura relativa (H/h_0) da onda máxima ao longo do tempo, no ponto de instalação do medidor de altura de ondas WG3.

Figura 2.9 – Resultados experimentais e numéricos do decaimento da altura relativa da onda máxima ao longo do tempo, no ponto de instalação do medidor de altura de ondas WG3. Adaptado de (WANG *et al*., 2016).



Para estudar as ondas geradas em grandes reservatórios, Cheng e Hsu (2013) utilizaram um canal hidráulico, onde a geração de ondas ocorria pela súbita abertura de uma comporta, para avaliar a evolução do formato das ondas ao interceptarem um obstáculo submerso trapezoidal. Palmeira e Tatto (2015), Menezes (2017), Schliewe (2018) utilizaram canais hidráulicos com ondas geradas por uma aba ou "batedor", onde os primeiros autores avaliaram o comportamento de filtros geotêxteis dispostos em taludes sujeitos ao impacto de ondas e os segundos e terceiros autores, avaliaram a influência da energia das ondas e da declividade dos taludes sujeitos ao embate de ondas na erodibilidade do solo, com a diferença de que o segundo utilizou amostras de solo deformadas, compactadas quasi-estaticamente, enquanto o terceiro utilizou amostras indeformadas.

2.2 PERDA DE MASSA DE SOLOS SITUADOS EM BORDA DE RESERVATÓRIO

A erodibilidade se caracteriza pela suscetibilidade do solo à ação de agentes erosivos, ou seja, à facilidade com que suas partículas são removidas e transportadas pelos agentes erosivos existentes (BASTOS; MILITITSKY; GEHLING, 2000; NOGAMI; VILLIBOR, 1995). Segundo Pandey *et al.* (2016), os agentes erosivos naturais e antrópicos influenciam sobremaneira o processo de destacamento, transporte e deposição dos materiais dos solos.

As variadas causas e taxas de erosão existentes, embora diferentes de uma situação para outra, podem ser muitas vezes atribuídas a fatores climáticos, tais como, precipitação, temperatura, vento, dentre outros, atuando em conjunto, com ou sem predomínio de um fator apenas. Devido ao grande número de variáveis e diferentes mecanismos envolvidos, uma descrição matemática completa destes fatores é de difícil obtenção (GRABRIELI *et al.*, 2012).

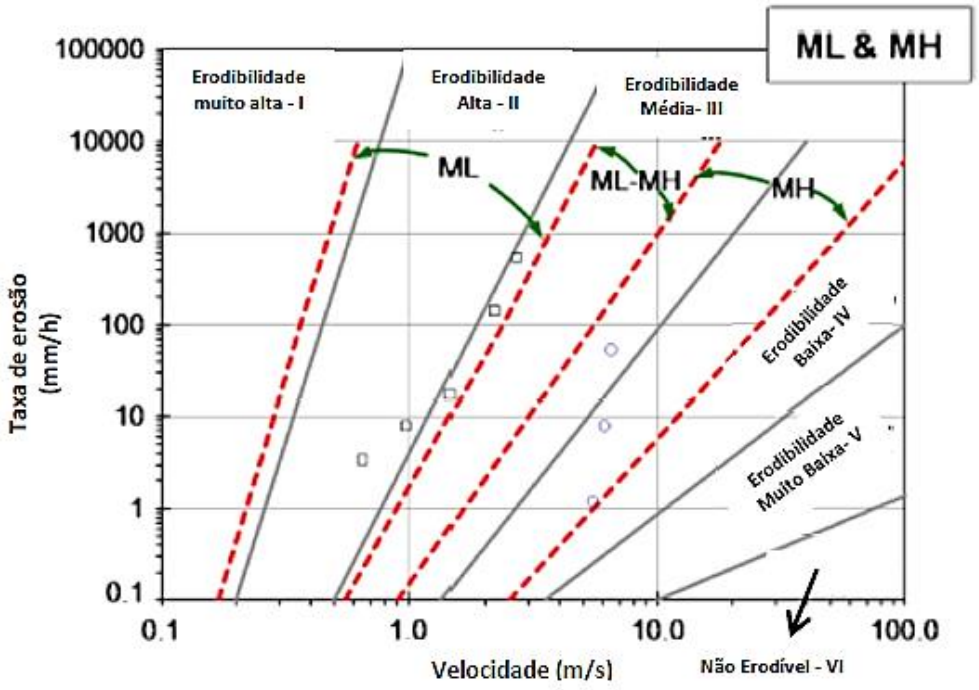
Bastos, Mititsky e Gehling (2000) consideram a erodibilidade uma das propriedades mais complexas de se avaliar em um solo, tendo em vista o grande número de fatores de ordem química, física, biológica e mecânica que a influenciam. No que tange às propriedades intrínsecas do solo, a erodibilidade é fortemente influenciada pelo seu nível de infiltração, conteúdo de matéria orgânica e pela sua estrutura (ZULIZIANA; RAZAK; AHMAD, 2017).

Diferentes tipos de solos apresentam distintos níveis de erodibilidade, uma vez que as propriedades dos solos exercem um papel fundamental neste parâmetro. Enquanto nos solos com textura granular a erodibilidade é fortemente influenciada pela gravidade e pelo atrito

entre os seus grãos, para os solos finos a erodibilidade é influenciada pelas forças eletrostáticas entre suas partículas (BRIAUD; GOVINDASAMY; SHAFII, 2017).

Briaud, Govindasamy e Shafii (2017), em seus estudos sobre a relação entre a erodibilidade do solo devido à ação do fluxo de água sobre a sua superfície e a classificação do solo pelo sistema unificado, *SUCS*, inferiram que solos granulares mal graduados (SP) e siltes de baixa plasticidade (ML) apresentam maior nível de erodibilidade em relação a areias bem graduadas (SW), de maior massa específica, e em relação a argilas de maior plasticidade (CH). Os referidos autores estabeleceram um sistema de classificação quanto à erodibilidade de cada solo segundo a classificação SUCS, em relação à velocidade crítica, a partir da qual o processo de destacamento das partículas do solo se inicia. A Figura 2.10 apresenta o gráfico da Taxa de Erosão (mm/h) em função da Velocidade Crítica (m/s), no qual é possível visualizar 6 distintas faixas de classificação, de acordo com os níveis de erodibilidade de solos classificados como siltes (MH e ML) pelo sistema unificado, *SUCS*.

Figura 2.10 – Faixas de classificação de erodibilidade de siltes, em relação à velocidade crítica (BRIAUD, GOVINDASAMY e SHAFII, 2017).



Jesus (2013) destaca que a erosão hídrica, em função das enormes consequências de ordem ambiental, social e econômica, é o tipo de erosão mais estudada no meio técnico, tanto com vistas a ampliar o entendimento da dinâmica desse processo erosivo, quanto no sentido de se

propor medidas de mitigação. Camapum de Carvalho *et al.* (2006) afirmam que nos estudos sobre erosão hídrica em solos, comumente faz-se distinção entre erodibilidade e erosividade. Esta última refere-se ao potencial que os diversos agentes erosivos (chuva, gelo, vento, ondas de rios, lagos e mares) possuem em promover a perda de massa de um solo. Face ao exposto, depreende-se que processos erosivos se instalam, quando a resistência do solo à erosão (erodibilidade) é insuficiente para manter a sua integridade, quando o mesmo é submetido à erosividade de um determinado agente erosivo.

Os processos erosivos hidráulicos resultam da interação entre os seguintes componentes: a erodibilidade do material, a erosividade do fluido (na maior parte dos casos, a água) e a geometria do obstáculo impactando o fluxo. Neste processo, o fluido fornece a carga e a erodibilidade do material fornece a resistência, enquanto que os obstáculos induzem a distúrbios no fluxo de água (BRIAUD; GOVINDASAMY; SHAFII, 2017). Grabrieli *et al.* (2012) destacam que tem sido empreendidos atualmente grandes esforços na direção de melhorar o entendimento dos processos erosivos hidráulicos, causados principalmente pela chuva e por fluxos internos e subterrâneos de água no solo.

No Quadro 2.1 encontra-se um resumo dos principais tipos de erosão hídrica e mecanismos de evolução.

Quadro 2.1 – Tipos de erosão hídrica e mecanismos de formação.

Tipo de erosão hídrica	**Agente erosivo**	**Mecanismos de evolução**
Superficial	Precipitações pluviométricas	Desagregação das partículas do solo pelo impacto das gotas de chuva no terreno (efeito *splash*) ou pela força de tração na interface água-superfície do terreno, devido ao escoamento da água, que supera a resistência ao cisalhamento do solo. (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).
Superficial laminar	Ondas de rios, reservatórios e mares	Arrebentação das ondas provoca uma remoção uniforme do solo, em camadas, quando as margens dos corpos hídricos possuem relevo suave. (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).
Interna	Fluxo concentrado no interior do solo.	Remoção das partículas do interior do solo, de forma concentrada, em regiões de maior permeabilidade, dando origem à "tubificação" ("*piping*") ou de maneira dispersa, quando há a "esqueletização" do solo. (JESUS, 2013).

Santos Jr *et al.* (2017) chamam a atenção para a similaridade entre a dinâmica da erosão laminar em bordas de reservatório pelo embate de ondas e em falésias sujeitas ao impacto de ondas marítimas. As ondas, nestes casos, podem provocar incisão no pé do talude e ocasionar

o seu posterior solapamento.

Guimarães *et al.* (2017), ao discorrerem sobre as características dos solos que influenciam a erosão em bordas dos reservatórios de regiões tropicais, correlacionaram os principais tipos de solos existentes nos perfis pedológicos das suas margens com as suas respectivas erodibilidades, chegando a conclusão de que os solos saprolíticos são mais propensos à erosão, devido à presença de argilominerais expansivos do tipo 2:1 na sua constituição e além disso, como também ocorre em outros tipos de solo, devido ao aprisionamento do ar em seus poros durante o avanço de frentes de molhagem proveniente das ondas, o que acarreta no aumento da sua poropressão de ar, até o momento no qual esta grandeza ultrapassa a coesão do solo, rompendo a estrutura do mesmo.

Os solos lateríticos, por sua vez, são mais sensíveis às variações da sucção matricial, entretanto, as cimentações existentes neste tipo de solo diminuem consideravelmente a sua erodibilidade, em relação aos solos saprolíticos (GUIMARÃES *et al.*, 2017).

Luiz *et al.* (2017), fazendo referência à ação erosiva da água, afirmam que a elevação do nível do lençol freático original de terrenos impactados pela implantação de um grande reservatório compromete a capacidade de armazenamento de água do solo, ampliando, dessa forma, o escoamento superficial neste terreno. Esse fato pode, aliado à remoção de vegetação e à alteração das condições de drenagem superficial e sub-superficial, contribuir com a deflagração e intensificação de erosão hídrica em bordas de reservatórios.

Romão e Souza (2017) elaboraram o mapeamento dos pontos de maior susceptibilidade aos processos erosivos hídricos, laminares e lineares, das bordas do reservatório da UHE Itumbiara, a partir do conhecimento da erodibilidade dos materiais integrantes do seu perfil geológico, correlacionando-a com o estado de alteração e grau de faturamento desses materiais, composição mineralógica, classes de textura, estruturas geológicas e a profundidade dos materiais inconsolidados ao longo do perfil de alteração.

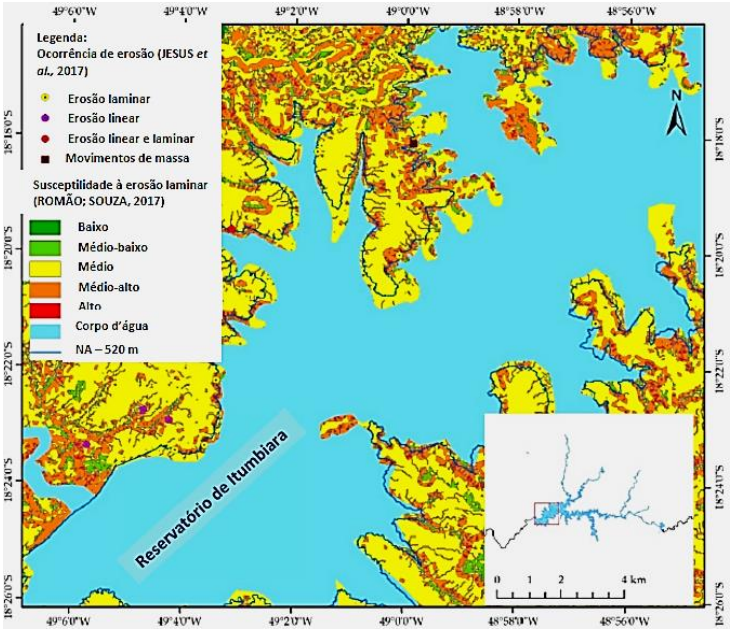
Para mapear os pontos mais susceptíveis à erosão hídrica laminar, Romão e Souza (2017) avaliaram os aspectos geológicos e hidrogeológicos das bordas do reservatório da UHE Itumbiara. Adicionalmente, a fim de identificar os pontos mais susceptíveis à erosão hídrica linear, estes autores avaliaram as condições do fluxo subsuperficial de água e de infiltração do perfil geológico das bordas do reservatório dessa usina.

A litologia predominante das margens do reservatório da UHE Itumbiara é composta basicamente de rochas xistosas, cobertas por materiais inconsolidados residuais jovens (Cambissolo, Latossolo e Neossolo Litólico), os quais possuem elevada erodibilidade. As áreas mais susceptíveis à erosão hídrica linear correspondem aos maiores níveis, com alturas referentes às drenagens variando entre 16 e 50 m. Quanto ao aspecto hidrogeológico, as rochas xistosas, pertencentes à Unidade B do Grupo Araxá, possuem baixa porosidade e baixo ângulo de mergulho, acarretando dessa maneira um maior escoamento superficial das águas pluviais em relação à infiltração, facilitando assim, a deflagração de erosão linear nas bordas do reservatório da UHE Itumbiara (ROMÃO; SOUZA, 2017).

Jesus *et al.* (2017), considerando os aspectos relacionados à geomorfologia, cobertura do solo e fatores climáticos, associados a informações empíricas de campo e imagens de satélite, identificou os principais pontos de ocorrência de erosão, classificando-as por tipo, ao longo das bordas do reservatório da UHE Itumbiara.

A Figura 2.11 apresenta o mapa de susceptibilidade das bordas do reservatório da UHE Itumbiara à erosão hídrica laminar e linear, considerando os estudos de Romão e Souza (2017) e Jesus *et al.* (2017).

.Figura 2.11 – Mapa de susceptibilidade de erosão hídrica laminar e linear das bordas do reservatório da UHE Itumbiara. Adaptado pelo autor de (VILHENA *et al*, 2019)



A avaliação da erosão hídrica do solo pode ser realizada por meio de ensaios de análise direta, indireta, quantitativa ou qualitativa de tal grandeza, conforme resumido no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Principais ensaios para avaliação da erosão hídrica de um solo.

Ensaio	**Tipo de avaliação**	**Metodologia**	**Parâmetro determinado**
Perda de massa por imersão	Direta e quantitativa	Determinar a massa desprendida de amostras de solo contidas em moldes cilíndricos quando submersas em água	Massa de solo desprendida (Pi)
Inderbtizen	Direta e quantitativa	Determinação da perda de massa em amostras de solo cujas superfícies coincidem com o plano de um canal, por onde incide um fluxo de água com vazão controlada. (BASTOS; MILITITSKY; GEHLING, 2000).	Percentagem de perda de massa da amostra em relação à sua massa original.
Desagregação	Indireta e qualitativa	Avaliação visual do aspecto das amostras de solo submersas total ou parcialmente em água, no que diz respeito à forma das amostras ao final do ensaio.	Critério de avaliação visual estipulado por Holmgren e Flanagan (1977[3] *apud* JACINTHO *et al.*, 2006).
Flume Test	Direta e quantitativa	Sujeitar um corpo de prova de um solo ao impacto de ondas geradas em um canal hidráulico (MENEZES, 2017; SCHLIEWE, 2018; VILHENA, 2019).	Perda de massa do corpo de prova (%) em relação à sua massa original.

Quanto à modelagem dos processos erosivos, destaca-se o modelo de previsão de erosão hidráulica mais empregado mundialmente: a Equação Universal de Perda de Massa de Solo (*USLE – Universal Soil Loss Equation*), publicada por Wischmeier e Smith (1978).

Tal modelo fornece a previsão de perda de massa anual do solo, em função de parâmetros adimensionais com influência no processo: a erosividade da água, a erodibilidade do solo, a topografia local, a cobertura vegetal e as práticas de cultivo de manejo do solo (BASTOS, 1999). A USLE está apresentada na equação 2.11.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{2.11}$$

onde: A é a taxa de erosão, R é o fator de erosividade da chuva, K é o fator de erodibilidade do solo, L é o fator de comprimento de rampa, S é o fator de declividade do terreno, C é o fator de cobertura vegetal do solo e P é o fator de práticas de cultivo e manejo do solo. Estes parâmetros são obtidos em parcelas experimentais (PANDEY *et al.*, 2016).

[3]HOLMGREN, G. G. S.; FLANAGAN, C. P. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. Dispersive clays, Related Piping and Erosion in Geotechnical Projects, **ASTM Special Technical Publication**, 623, p. 218-239, 1977.

Vários autores utilizaram modelos derivados da USLE em seus trabalhos, como os modelos RUSLE (*Revisited Universal Soil Loss Equation)* e USPED (*Unit Stream Power-based Erosion Deposition*) associados a técnicas de sensoriamento remoto e dados multi-temporais de imagens de satélites, para elaborar o modelo digital do terreno, mapas de textura do solo e dados de chuva, integrados e processados por aplicação em SIG (Sistema de Informações Geográficas) para se obter os parâmetros das modelagens supracitadas, como fizeram Aiello, Adamo e Canora (2015) ao determinarem a perda de massa de uma bacia hidrográfica do sul da Itália.

De maneira similar, entretanto somente empregando o modelo RUSLE, Chang e Bayes (2013) determinaram os locais de maior susceptibilidade à erosão hidráulica na bacia de um lago no estado de Ohio, EUA.

Duarte *et al.* (2016) criaram aplicativos para elaboração de mapas de áreas com risco de erosão no norte de Portugal, baseados na modelagem RUSLE, em conjunto com o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Cuomo, Sala e Pierri (2016) validaram experimentalmente a eficiência de um modelo numérico em simular de maneira realística processos erosivos em taludes, desencadeados por precipitações pluviométricas, onde constataram que a declividade do talude, o recobrimento vegetal da sua superfície exposta, a rugosidade superficial dos mesmos e a intensidade das chuvas, foram os parâmetros que mais influenciaram a erodibilidade hidráulica pluvial.

O modelo de simulação da erodibilidade do solo, a partir de ensaios *Interbtizen*, empregado por Oliveira (2019), indicou uma maior perda de massa do solo com o aumento da sua sucção inicial, além disso, observou-se que o tempo de ensaio também influenciou os resultados das perdas de massa obtidas.

Ji *et al.* (2016) empregaram um canal hidráulico para simular a erodibilidade de taludes de solo sujeitos ao impacto de ondas de reservatórios, concomitantemente à ocorrência de eventos pluviométricos, gerados por aspersores durante os experimentos. Um *scanner laser* 3D foi utilizado para quantificar a extensão do colapso e a morfologia dos taludes após as simulações. Avaliou-se separadamente todos os fatores que influenciam o colapso destes taludes, tais como: inclinação, granulometria e densidade do solo, altura da onda do reservatório e flutuação do seu nível d'água. Os resultados obtidos indicaram que a erosão dos

taludes foi mais influenciada pela inclinação do talude, densidade, proporção de argila, altura da onda e flutuação do nível do reservatório, em escala decrescente de relevância. A Figura 2.12 apresenta a configuração utilizada no estudo experimental empreendido por Ji *et al.* (2016) e a Figura 2.13 ilustra o aspecto do colapso de um talude no canal hidráulico.

Figura 2.12 – Configuração utilizada no estudo experimental de JI *et al*. (2016). Adaptado pelo autor (JI *et al*., 2016).

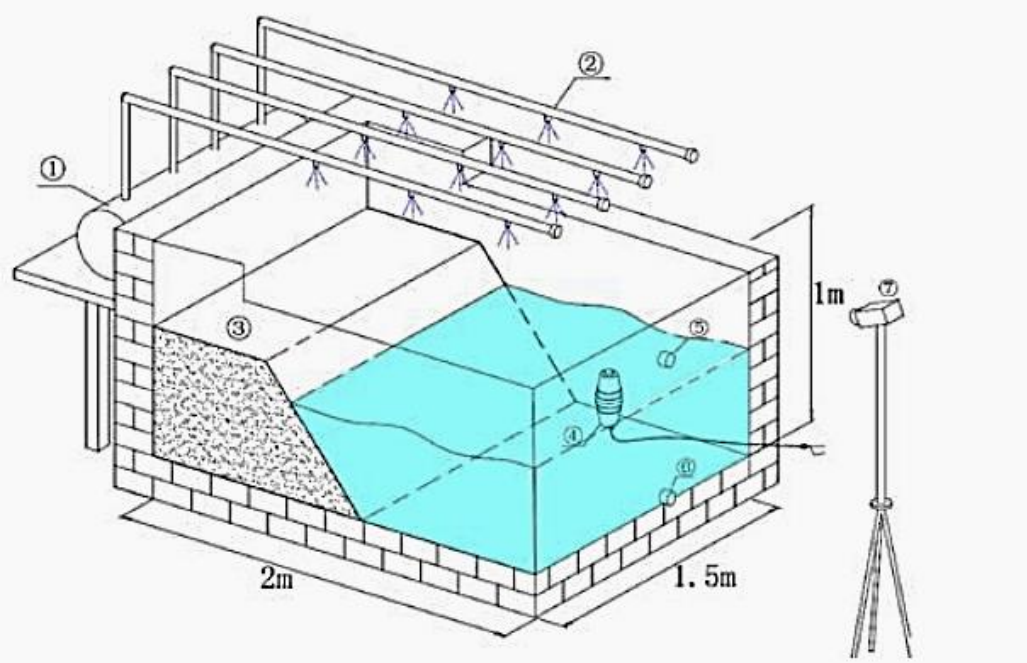
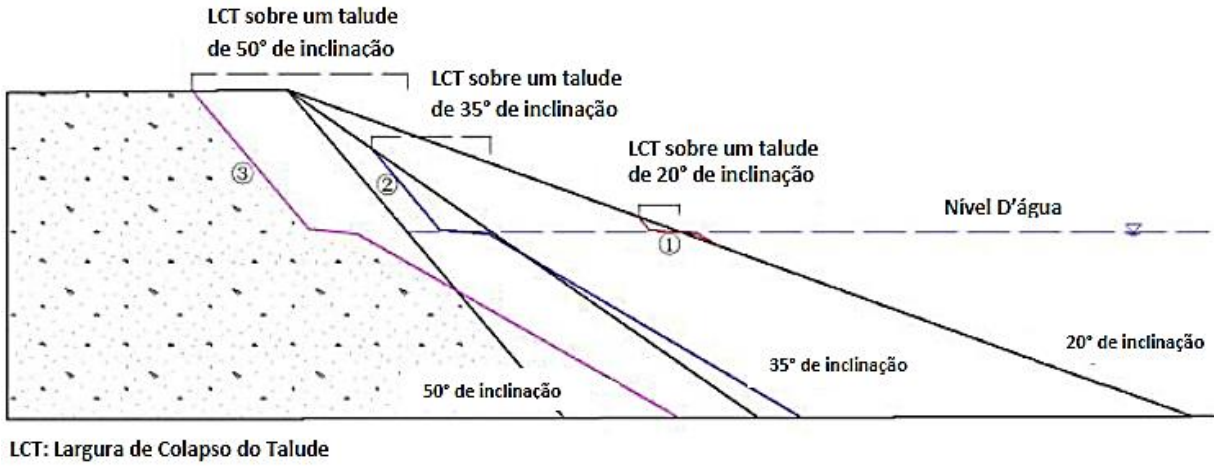


Figura 2.13 – Aspecto do colapso de um talude no canal hidráulico (JI *et al*., 2016).

De maneira geral, o colapso das bordas de reservatórios, devido ao impacto de ondas, aumenta gradualmente com o crescimento do ângulo de inclinação dos seus taludes. Assim, quando os taludes são suaves, as ondas promovem erosão laminar, enquanto que, para inclinações mais íngremes, os taludes são repentinamente colapsados. Esse comportamento também foi encontrado por Schliewe (2018).

No que tange à composição dos materiais dos taludes das bordas dos reservatórios, observa-se que quanto menor a proporção de argila e maior a de areia, maior será o volume de massa colapsando sobre o impacto das ondas, devido à redução das forças coesivas. Quanto à altura das ondas que incidem nos taludes marginais dos reservatórios de água, verifica-se que a largura de colapso dos mesmos aumentará continuamente com o crescimento da altura das ondas, devido ao aumento da energia destas (proporcional ao quadrado da sua altura), e consequentemente, da sua capacidade de destacamento e transporte dos materiais destes taludes. No que diz respeito à altura do nível do reservatório, constata-se que o colapso dos taludes de bordas de reservatório aumenta suavemente com o crescimento do nível d'água. Finalmente, conclui-se que quanto mais densos os materiais dos taludes dos reservatórios, menos suscetíveis à perda de massa os mesmos serão (JI *et al.*, 2016). Não foi avaliada a influência dos eventos pluviométricos no colapso dos taludes, durante os experimentos. A Figura 2.14 ilustra o aspecto da morfologia dos taludes após o impacto de ondas no canal hidráulico empregado na modelagem experimental de Ji *et al*. (2016), considerando-se diferentes ângulos de inclinação para os taludes ensaiados.

Figura 2.14 – Morfologia dos taludes após impacto das ondas geradas no canal hidráulico, sobre diferentes declividades. Adaptado pelo autor de (JI *et al*., 2016).



Ji *et al*. (2016), empregando o método de regressão multivariável estabeleceu uma relação

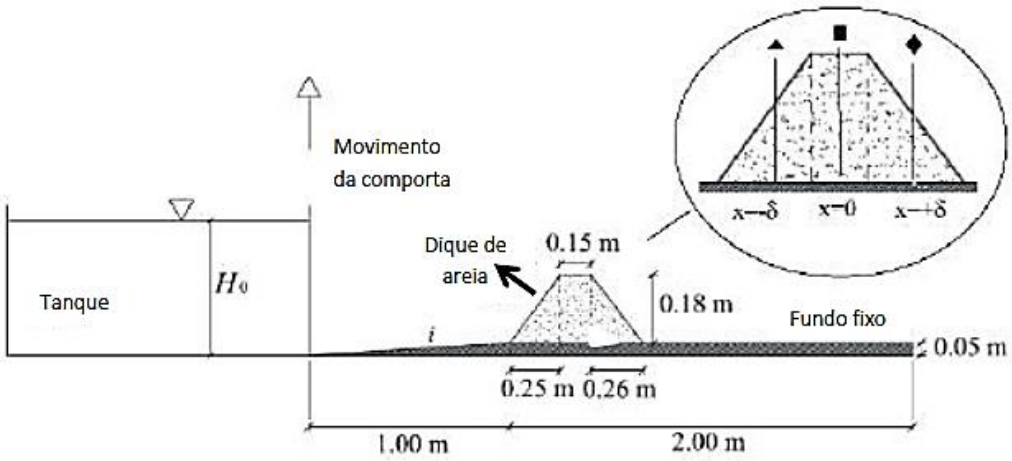
entre a largura de colapso do talude (*Bank Collapse Width* - BCW) e os 5 principais fatores que influenciam essa grandeza, conforme pode ser visualizado na Equação 2.12.

$$BWC = 2{,}5919e - 2{,}886d(0{,}4189X1 - 0{,}2554X2 + 0{,}3348X3 + 14{,}3529X4) \qquad (2.12)$$

onde, *BCW* é a largura do colapso do talude em m, *X1* é o ângulo de inclinação do talude (°), *X2* é o nível d'água (m), *X3* é a altura da onda (cm), *X4* é do d_{60} do material do talude (mm) e *d* é densidade relativa.

Evangelista (2015) confirmou a grande influência da coesão aparente nos processos erosivos, ao simular o impacto de uma onda de *dambreak* em um pequeno dique construído em areia uniforme, dentro de um canal hidráulico instrumentado. A onda foi gerada pela abertura repentina de uma comporta, com água armazenada a montante. A perda da coesão aparente com a onda de *dambreak* foi brusca, diferentemente do que ocorre com o impacto de ondas menores contra os taludes de diques, onde a perda de coesão é gradual. A Figura 2.15 ilustra a configuração do canal hidráulico utilizado por Evangelista (2015) para simular o impacto de uma onda de *dambreak* sobre um dique de areia uniforme.

Figura 2.15 – Configuração do canal hidráulico para simulação do impacto de uma onda de *dambreak* sobre um dique de areia uniforme. Adaptado pelo autor de (EVANGELISTA, 2015).



2.3 A INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA PERDA DE MASSA DE SOLOS TROPICAIS NÃO SATURADOS

Em regiões tropicais, é frequente a ocorrência de solos não saturados, em função da sazonalidade climática da região, onde predominam duas estações distintas: a estação chuvosa

e a estação seca. Em razão disso, o perfil do solo tropical compreendido entre o lençol freático e a superfície do terreno, denominada região ativa, apresenta-se durante boa parte do ano em situação não saturada (ALMEIDA *et al.*, 2015; MASCARENHA *et al.*, 2015).

Gitirana Jr, Marinho e Soto (2015) ressaltam que o intemperismo influencia o formato das suas curvas de retenção de solos tropicais, que apresentam aspecto bimodal, com dois valores de entrada de ar. O menor valor de entrada de ar refere-se aos macroporos do solo, enquanto o maior valor corresponde aos microporos do solo. Tal fato ressalta a relação entre a curva característica dos solos tropicais e a distribuição dos diâmetros dos seus poros, caracterizando-se por vazios interagregações (maiores diâmetros de poros) e vazios intragregações (menores diâmetros de poros).

Nos macroporos do solo predomina a retenção devido à capilaridade, com a formação de meniscos. Nos microporos, a retenção devido à adsorção de água na superfície do grão do solo tende a ter papel mais importante. Essa característica dos solos tropicais não saturados explica como se dá a variação da coesão do solo e sua influência sobre a erodibilidade do mesmo, pois ocorrendo a formação de meniscos, a ação erosiva da água tem que rompê-los para conseguir arrancar partículas do solo, enquanto que, se o solo estiver muito pouco saturado, não haverá formação de meniscos e, consequentemente, a ação erosiva da água conseguirá arrancar partículas de solo mais facilmente, uma vez que não encontrará obstáculos a vencer.

Gabrieli *et al.* (2012) destacam que pequenos teores de umidade em taludes de solo granular aumentam a sua estabilidade geral e explica o fato da existência de taludes com grandes ângulos na natureza, excedendo muitas vezes o ângulo de atrito efetivo do solo. Este comportamento pode ser devido à coesão real entre os grãos do solo, por cimentação de suas partículas, como também, no caso de taludes de solos não saturados, da coesão aparente gerada pelo aumento da sucção. Nestes últimos taludes, os processos erosivos podem se desencadear bruscamente, devido a variações no teor de umidade do solo (molhagem ou evaporação) decorrentes das condições climáticas atmosféricas.

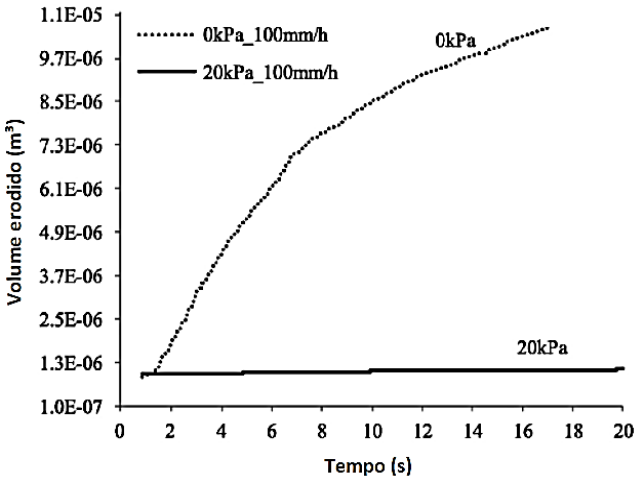
Os solos lateríticos, devido à presença de macroporos, possuem boa drenagem, o que contribui para que os mesmos apresentem-se frequentemente não saturados e consequentemente, com apreciável coesão aparente. No entanto, no período chuvoso, tal coesão é reduzida pelo umedecimento do solo, que se encontrava com baixo grau de

saturação. Este fato ocorre principalmente nas primeiras chuvas e gera maiores perdas de massa do solo, se comparada às chuvas posteriores, onde o solo já se encontra bem mais saturado (ALMEIDA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2009).

Em muitos taludes naturais de solos granulares, a água pode estar no estado pendular, ou seja, quando o teor de umidade do solo superficial é muito baixo, próximo do residual. Nessa situação o ar nos poros do solo está conectado, e a pequena quantidade de água existente é dividida entre pares de grãos, formando a então chamada "ponte de capilaridade", "anel pendular" ou meniscos, que tendem a aumentar a estabilidade destes taludes. Por outro lado, o grau de saturação destes solos muda continuamente, acompanhando as variações sazonais das condições atmosféricas, imprimindo nestes taludes, consequentemente, diferentes condições de estabilidade ao longo do tempo (GABRIELI *et al.*, 2012).

Cuomo *et al.* (2016) avaliaram a influência de diversos parâmetros na erosão de taludes de solos grossos devido às precipitações pluviométricas, dentre eles, as forças capilares atuantes neste tipo de solo, quando no estado não-saturado. Tais autores fizeram simulações experimentais e numéricas considerando primeiramente uma sucção nula e posteriormente igual a 20 kPa, de um solo granular integrante de um talude com inclinação de 36º, sob o qual incidiu uma chuva de 100 mm/h de intensidade. Ao final dos experimentos, obteve-se um menor volume de solo erodido para uma maior sucção do solo, conforme pode ser visualizado na Figura 2.16. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que quanto menor a força capilar atuante, ou seja, menor a sucção, pior serão as condições gerais de estabilidade do talude e, consequentemente, mais suscetível o solo será aos processos erosivos.

Figura 2.16 – Influência da sucção no volume erodido de um solo granular submetido à erosão devido à chuva. Adapatado pelo autor de (CUOMO *et al.*, 2016).



Segundo Bastos (1999) e Bastos, Gehling e Milititsky (2001), aqueles solos cuja coesão aparente é drasticamente reduzida com o umedecimento, pela ação de fluxos de água superficiais, são os mais suscetíveis à erosão. Nestes solos, o ganho de coesão aparente, ocasionada pelo aumento da sucção do solo, entre dois eventos pluviométricos, constitui considerável parcela de resistência ao cisalhamento.

A presença de grandes reservatórios de água, antes inexistentes, interfere na dinâmica de umedecimento e saturação do solo das suas bordas, levando à ocorrência de grandes variações na sucção do mesmo, quando em contato com o corpo d'água. Essa situação é agravada pela sazonalidade dos níveis dos reservatórios, que oscilam bastante durante o ano, ampliando os efeitos de secagem e molhagem. A diminuição da sucção do solo promove a redução da sua coesão aparente, tornando-o mais suscetível a processos erosivos (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2014, 2015).

Os estudos referentes à avaliação da influência da sucção na erodibilidade de solos, geralmente associam os resultados de perda de massa (ensaios de *Inderbitzen*) e os resultados de perda de estabilidade estrutural (ensaio de desagregação), com a variação da sucção dos solos, a partir das suas respectivas curvas de retenção solo-água.

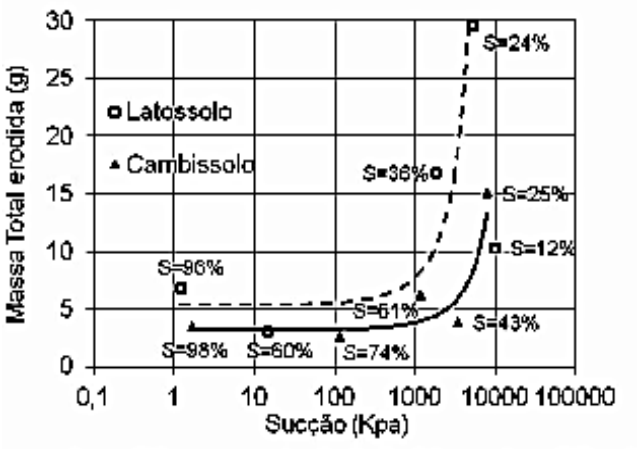
Sousa *et al.* (2016) utilizaram amostras de dois tipos de solo, coletadas em um mesmo perfil, com diferentes graus de intemperismo: uma argila laterítica plástica, coletada em uma camada mais superficial, a 1,5 m de profundidade, e um silte arenoso não laterítico e não plástico, coletado a 5,0 m de profundidade, para estudar a erodibilidade de solos tropicais não saturados. Para avaliar a erodibilidade destes solos frente a diferentes sucções, os autores submeteram as amostras a ensaios de desagregação por inundação total e parcial (a fim de simular a subida do lençol freático), variando a umidade inicial das mesmas, partindo-se de suas umidades higroscópicas, passando pelas suas umidades naturais no período seco e chuvoso, até os teores de umidade na condição saturada. As curvas de retenção solo-água das amostras foram determinadas previamente, a fim de correlacionar os resultados dos ensaios de desagregação, com a correspondente sucção para cada teor de umidade. Os resultados indicaram uma menor desagregação da argila laterítica plástica em relação ao silte arenoso não laterítico, tendo em vista a sua maior coesão, decorrente da cimentação entre as suas partículas, pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. O silte arenoso não laterítico apresentou desagregação em todos os ensaios, uma vez que em suas partículas essa cimentação não foi detectada.

Verificou-se ainda, que a influência da variação da sucção ocorreu somente na argila laterítica, uma vez que a mesma apresentou desagregação de partículas somente para os menores graus de saturação, enquanto que, o silte arenoso não laterítico apresentou desagregação independentemente do valor de sucção. Constatou-se também, que a presença de argilominerais expansivos na amostra de silte arenoso não laterítico contribuiu para o aumento da sua desagregação. Dessa forma, pode-se concluir que os solos mais intemperizados (lateríticos) são menos suscetíveis à erosão do que os menos intemperizados (não lateríticos) (SOUZA *et al.*, 2016).

Jesus (2013) observou um aumento da desagregação de solos lateríticos com a diminuição do teor de umidade natural dos mesmos, justificado pelo aumento da pressão da fase ar do solo, originado pelo avanço de frentes de molhagem durante os ensaios de perda de massa por imersão, que é mais intenso quanto mais seco estiver o solo.

Almeida *et al.* (2015) avaliaram a influência da sucção em solos com diferentes graus de intemperismo: um Latossolo e um Cambissolo. O Latossolo estudado localizava-se sobre um substrato rochoso de rochas do tipo granada gnaisse e granulitos paraderivativos, enquanto que o Cambissolo estudado está associado a rochas predominantemente xistosas, da unidade geológica do grupo Araxá. Foram realizados ensaios de *inderbitzen* e desagregação em amostras indeformadas dos solos, em diferentes graus de saturação iniciais. Os resultados indicaram perdas de massa da ordem de 5% para os dois tipos de solo, até valores de sucção de 1.000 kPa. A partir deste valor, as perdas de massa dos dois tipos de solo tenderam a crescer bruscamente com o aumento da sucção, com exceção do corpo de prova moldado a partir do latossolo, com 12% de grau de saturação, que não obedeceu a essa tendência, apresentando queda na erodibilidade, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 2.17.

Figura 2.17 – Sucção x massa erodida no ensaio de *Inderbitzen* (ALMEIDA *et al.*, 2015).

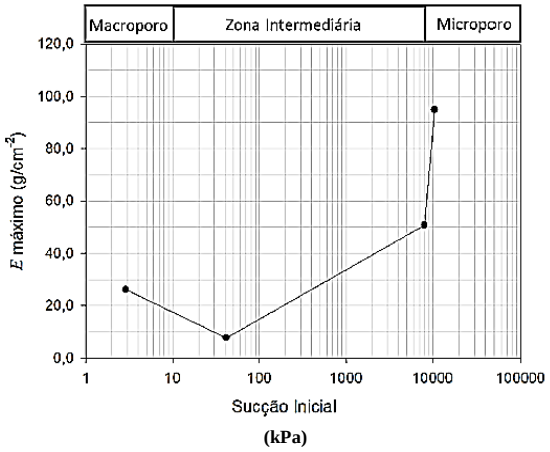


Almeida *et al.* (2015) constataram um crescimento da perda de massa em amostras de solo com a diminuição dos seus graus de saturação inicial, exceto para a amostra de latossolo com 12% de saturação. Isso ocorre devido ao fato de que em graus de saturação muito baixos, a sucção atua em nível microestrutural, por adsorção de água na superfície das partículas do solo, não chegando a formar meniscos nos espaços inter-partículas. Assim sendo, nestas condições, não há nenhuma contribuição para a elevação da coesão aparente do solo e consequentemente para a sua resistência à erosão hídrica, pois não há a formação de meniscos. Em níveis crescentes de grau de saturação, predomina a sucção devido à capilaridade, com formação de meniscos, que contribuem para a elevação da coesão aparente do solo.

Almeida, Rocha e Gitirana Jr. (2013) submeteram amostras de solo compactado com diferentes teores de umidade inicial, a ensaios de *Inderbitzen*, para correlacionar a variação da sucção com a erodibilidade destes solos. Para isso, foi determinada a curva característica solo-água das amostras ensaiadas, considerando uma trajetória de molhagem, para melhor simular a condição real de campo. Os resultados obtidos indicaram uma grande influência da sucção na erodibilidade do solo, chegando-se a diferenças da ordem de 300% entre a perda de massa das amostras mais secas e a perda de massa das amostras mais úmidas.

Oliveira (2019) concluiu que o potencial de destacamento de grãos do solo é maior para valores crescentes de sucção inicial, considerando solos remoldados por compactação estática submetidos a ensaios de *inderbitzen*. Este comportamento é explicado pelo fato de que em valores de sucção elevados, nos microporos, a água encontra-se adsorvida nos grãos do solo, sem formação de meniscos. Assim, quando o solo é repentinamente umedecido, perde a sua coesão aparente de forma brusca. A Figura 2.18 ilustra o referido comportamento.

Figura 2.18 – Sucção inicial x Erodibilidade no ensaio de *Inderbitzen* (OLIVEIRA, 2019).



Jacintho (2006), ao explicar os mecanismos de rompimento de taludes, que pode ocorrer pelo solapamento e posterior ruptura estrutural das suas bases, destaca o considerável aumento da poropressão de ar nos solos não saturados destes taludes, ocorrendo principalmente no início do período chuvoso, que a depender do valor, pode superar a coesão do solo, levando-os à desestabilização. Esse aumento da poropressão do ar está associado ao avanço das frentes de molhagem no interior do maciço e ao fluxo superficial de água sobre a superfície da encosta. Assim, quando a fase ar é contínua, essa frente de molhagem aprisiona o ar intersticial, comprimindo-o e consequentemente aumentando a sua pressão. Quando a fase ar é descontínua, este processo é irrelevante, uma vez que a variação de poropressão é mínima. Quando o solo não é totalmente inundado, há tempo para o ar escapar e não ocorre o referido aumento da poropressão de ar.

Gabrieli *et al.* (2012) utilizaram modelagem numérica para simular processos erosivos em taludes de solos granulares não saturados, devido ao efeito da evaporação. O modelo utilizado foi validado por resultados experimentais obtidos em um modelo físico de um talude construído por pequenas esferas de vidro, com água no estado pendular. A taxa de evaporação consistiu na diminuição do volume de água distribuída entre as esferas do talude, ao longo do tempo, o que provocou uma consequente redução nas forças capilares atuantes entre as esferas de vidro, acarretando em desestabilização do talude, primeiramente das esferas mais superficiais, que deslizaram em direção ao pé do talude, e posteriormente pelo deslizamento de uma camada rígida de esferas localizadas em camadas mais profundas do talude. A modelagem numérica de Gabrieli *et al.* (2012) mostrou-se eficiente para simular processos erosivos em taludes de solos granulares não saturados devido aos efeitos da evaporação da água intersticial destes solos.

Terra *et al.* (2015) realizaram análises numéricas para avaliar a influência da poropressão de ar na erodibilidade de um solo, por meio do ensaio de desagregação por imersão total em água. Estes autores utilizaram os resultados dos ensaios de desagregação em amostras indeformadas do Latossolo e do Cambissolo empregadas no trabalho de Almeida *et al.* (2015), e suas respectivas curvas características, em conjunto com as equações governantes acopladas de fluxo de ar e água, para simular o processo de aprisionamento de uma massa de ar no interior do solo, oriundo do avanço de uma frente de saturação de água, que resulta em um aumento da poropressão de ar, levando a uma completa desagregação do solo.

As análises numéricas empreendidas por Terra *et al.* (2015) consideraram a variação da carga

hidráulica imposta, tipo de solo e saturação inicial das amostras. Conclui-se, do referido trabalho, que quanto maior a carga hidráulica, maior a poropressão de ar gerada no centro da amostra, e, por conseguinte menor a pressão líquida atuante, levando a um substancial aumento no potencial de desagregação do solo. Quanto ao tipo de solo, observou-se que o Cambissolo, em virtude de possuir maior poropressão negativa inicial de água, apresentou um maior aumento de poropressão de ar, em relação ao Latossolo, e por isso, uma maior tendência à desagregação.

Terra (2016) também desenvolveu um modelo numérico para análise acoplada de fluxo de água e ar, com vistas a prever e simular os efeitos do aumento da poropressão de ar na estabilidade de taludes, decorrente do aprisionamento do ar nos poros do solo, ocasionado pelo avanço de frentes de molhagem produzidas por precipitações pluviométricas intensas, fenômeno denominado "efeito *Lisse*".

Terra *et al*. (2015) e Terra (2016) observaram que a desagregação e a consequente desestabilização de taludes, tais como os de voçorocas, se dá predominantemente pela base dos mesmos, sendo mais contundentes ao ocorrer em inundações após períodos de estiagem.

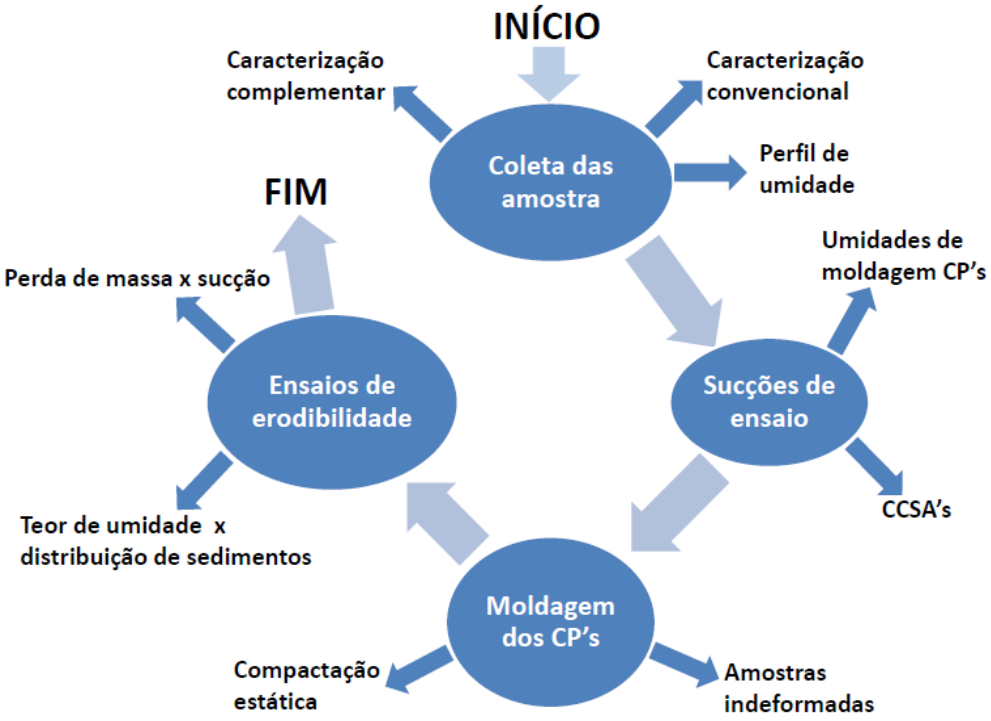
CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo se inicia com uma descrição do local e da amostragem do solo empregado na pesquisa, na forma deformada e indeformada. Na sequência, detalha-se o programa experimental, consistindo primeiramente na execução da caracterização convencional, análises química, mineralógica e microestrutural do solo e na determinação das suas curvas características solo-água (CCSA), nas trajetórias de secagem e molhagem. São ainda descritos os ensaios de erodibilidade pelo impacto de ondas, realizados em um canal hidráulico, em corpos de prova do solo, indeformados e remoldados estaticamente em diferentes umidades.

Os resultados dos ensaios de erodibilidade foram correlacionados com os valores de sucção matricial iniciais dos corpos de prova ensaiados, obtidos a partir da CCSA, de modo a ser possível avaliar a sua influência na perda de massa das amostras ensaiadas. O organograma apresentado na Figura 3.1 ilustra resumidamente as etapas executivas da pesquisa.

Figura 3.1 – Resumo das etapas executivas da pesquisa.



3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DA AMOSTRAGEM

As amostras, deformada e indeformada, foram coletadas em uma região das margens do reservatório da UHE Itumbiara com alto potencial erosivo devido ao impacto de ondas, segundo o mapa de susceptibilidade à erosão apresentado por Vilhena *et al.* (2019), constituindo-se de um horizonte de latossolo, classificado como arenoso-argiloso laterítico (LA'-LG', segundo a metodologia MCT).

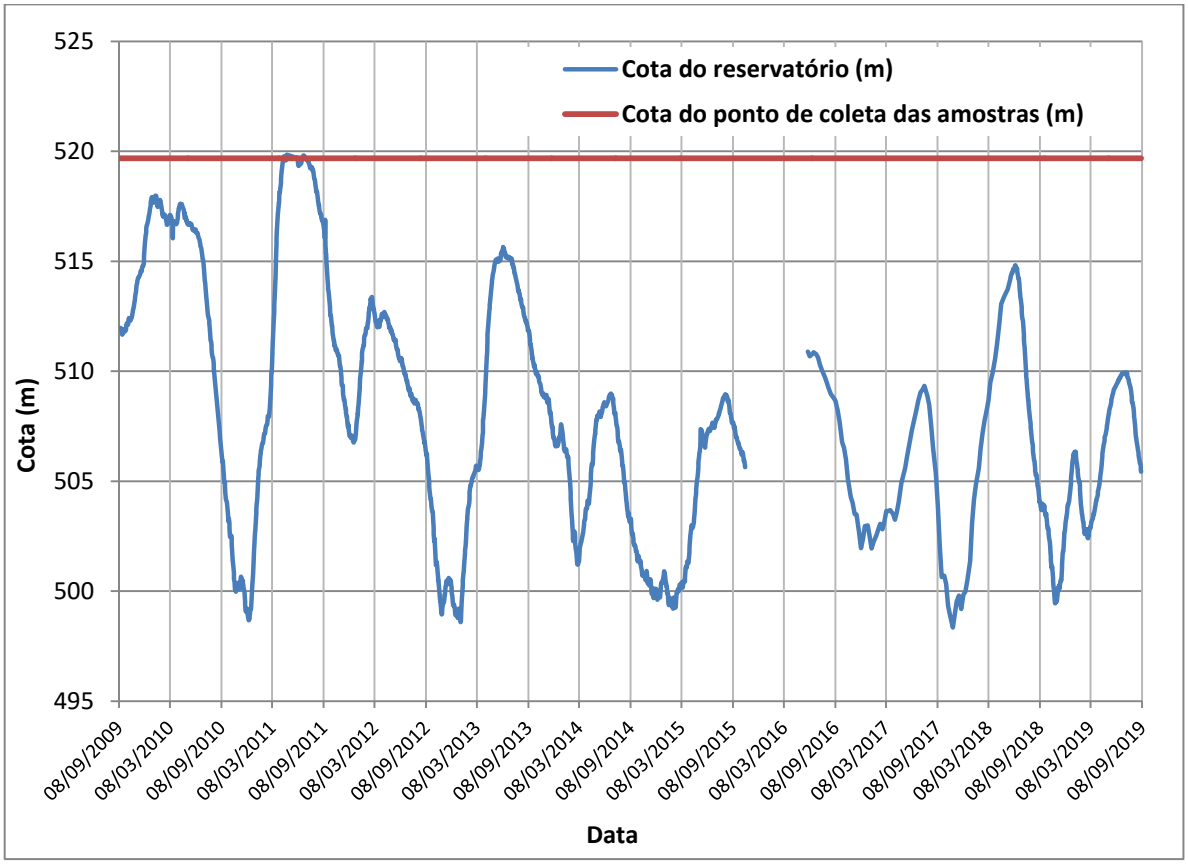
O ponto escolhido, localizado em uma praia fluvial da margem direita do reservatório da usina hidrelétrica de Itumbiara, no trecho médio do rio Paranaíba, entre os Estados de Goiás e Minas Gerais, possui as seguintes coordenadas: 18°23'01" S e 49°03'25" W. A Figura 3.2 apresenta uma imagem de satélite, meramente ilustrativa, do ponto de coleta das amostras de solo empregadas na pesquisa.

Figura 3.2 - Ponto de coleta das amostras de solo – Margem direita do reservatório da UHE Itumbiara, Brasil.

O ponto de coleta das amostras se encontra na elevação 519,684 m, estando 0,17 m abaixo do nível máximo (519,85 m) e a 21,3 m acima do nível mínimo (498,35 m) do reservatório, considerando os níveis dos últimos 10 anos. A Figura 3.3 apresenta o gráfico de variação do nível do reservatório da UHE Itumbiara, durante um período de 10 anos, entre setembro de 2009 e setembro de 2019, juntamente com a elevação do ponto de coleta das amostras deformadas e indeformadas. No período compreendido entre o início de outubro de 2015 ao final de maio de 2016, não houve registro das cotas do nível d'água do reservatório, por

problemas operacionais no sistema automatizado da régua limnimétrica que efetua a medição do nível do reservatório.

Figura 3.3 – Variação temporal do nível do reservatório da UHE Itumbiara e elevação do ponto de coleta das amostras – Período: 08/09/2009 a 08/09/2019 (Furnas Centrais Elétricas, 2019).



Na data de coleta da amostra deformada, 12/03/2019, a cota do reservatório era 503,220 m, enquanto que, na data de coleta das amostras indeformadas, 08/09/2019, a cota do reservatório era 505,430 m. A última vez que o reservatório atingiu a elevação referente ao ponto de coleta das amostras foi no período de março a junho de 2011.

Analisando-se a Figura 3.3, constata-se que os picos de cheia do reservatório da UHE Itumbiara ocorrem aproximadamente no meio de cada ano, enquanto que os seus níveis mínimos ocorrem por volta do período entre o final e o início de cada ano, revelando a existência de um atraso de cerca de dois meses, entre variações dos níveis do reservatório e as variações climáticas sazonais, ou seja, entre os períodos chuvoso e de seca.

3.2 COLETA DAS AMOSTRAS

As coletas das amostras basearam-se na NBR 9604 (ABNT, 2016a). A determinação do índice de vazios natural do solo foi feita indiretamente, relacionando-se a massa específica dos grãos do solo e a sua massa específica natural, determinada pelo método do cilindro de cravação, de acordo com a NBR 9813 (ABNT, 2016b). Na ocasião também foi determinada a umidade natural do solo, conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016c).

Para se conhecer o horizonte do solo no ponto de coleta das amostras e o gradiente de umidade ao longo do seu perfil, foram coletadas amostras deformadas deste solo a cada 50 cm de profundidade, em um furo executado com trado manual tipo concha, seguindo os preceitos da NBR 9603 (ABNT, 2015). A Figura 3.4 ilustra algumas das etapas de coleta das amostras utilizadas na pesquisa.

Figura 3.4 – Coleta das amostras: (a) Amostra deformada. (b) Determinação da massa específica natural do solo. (c) Bloco de amostra indeformada. (d) Amostra indeformada para determinação da CCSA.

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.3.1 Ensaios de caracterização do solo

Para a caracterização do solo, foram realizados ensaios convencionais, que permitiram classificá-lo segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), e ensaios expeditos específicos para solos tropicais, que permitiram classificá-lo segundo o sistema de classificação Miniatura Compactada Tropical (MCT), proposto por Nogami e Villibor (1994), respectivamente, conforme relacionado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Relação dos ensaios de caracterização realizados na amostra coletadas.

Ensaio	Norma/Metodologia
Grão de solos que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica (ρ_s)	NBR 6458 (ABNT, 2016d)
Solo – Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016e)
Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS – Método de ensaio	NBR 13602 (ABNT, 1996)
Solo – Determinação do limite de liquidez (w_L)	NBR 6459 (ABNT, 2016f)
Solo – Determinação do limite de plasticidade (w_P)	NBR 7180 (ABNT, 2016g)
Adsorção de azul de metileno e ensaio da pastilha	Metodologia proposta por e Nogami e Cozzolino (1985) e Fabbri (1994)

Para se conhecer a composição química, mineralógica e a microestrutura do solo, foram realizadas ainda análises por Difração de Raio-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Fluorescência de Raio-X e Espectometria por Energia Dispersiva (EDX). Estas análises foram realizadas nas instalações da Gerência de Serviços e Suporte Tecnológico (GST.E) de Furnas Centrais Elétricas, localizada em Aparecida de Goiânia-GO.

Após a coleta de amostras ao longo do perfil do solo, a partir de um furo a trado, determinou-se o teor de umidade em cada amostra coletada e fez-se uma avaliação táctil-visual expedita do aspecto do solo, no que tange à sua textura e coloração.

Para a determinação das curvas características solo-água (CCSA) das amostras deformada e indeformada do solo, nas trajetórias de secagem e molhagem, em toda sua extensão, empregou-se os métodos C e D descritos na norma técnica ASTM D 6836-02 (ASTM, 2003).

O método C da norma técnica ASTM D 6836-02 (ASTM, 2003) foi utilizado para determinar a CCSA utilizando-se a técnica de translação de eixos, em trajetória de secagem e molhagem,

permitindo obter a histerese da curva. Vale ressaltar que a trajetória de molhagem representa o umedecimento do solo quando submetido ao embate de ondas.

Uma placa de pressão com medição gravimétrica, denominada *Tempe Cell*, foi utilizada na determinação preliminar da CCSA do solo, via trajetória de secagem, para valores de sucção matricial até 90 kPa. A Figura 3.5 apresenta os componentes da placa de pressão do tipo "*Tempe Cell*", utilizada no laboratório de solos não saturados da Escola de Engenharia Civil e Ambiental - EECA da UFG.

Figura 3.5 – Componentes da placa de pressão do tipo "*Tempe Cell*" utilizado na EECA da UFG - desmontado.

Para a determinação das CCSAs definitivas das amostras deformadas e indeformadas do solo, nas trajetórias de secagem e molhagem, para valores de sucção matricial de 0 a 90 kPa, foi utilizado o prato extrator de pressão do tipo Fredlund SWCC *Device*, modelo SWC-150, com medição volumétrica da água liberada ou absorvida pela amostra, após a estabilização dos incrementos ou decréscimos de pressão aplicados, a partir de uma única amostra (SWC-150 *Brochure*, 2018). A Figura 3.6 apresenta o referido prato extrator de pressão. Destaca-se que a faixa de medição das sucções escolhida para este ensaio foi determinada a partir do conhecimento dos valores de entrada de ar e residual referentes aos macroporos do solo, obtidos na determinação preliminar da CCSA, via trajetória de secagem, utilizando-se a placa de pressão denominada *Tempe Cell*.

Figura 3.6 – Prato extrator de pressão do tipo Fredlund SWCC *Device*, modelo SWC-150.

Para complementar a determinação da CCSA no trecho superior a 90 kPa de sucção, foi empregado o método D da ASTM D 6836-02 (ASTM, 2003). Neste método, obtém-se a CCSA em termos da sucção total, com auxílio de um potenciômetro de ponto de orvalho que utiliza o método do espelho resfriado. O modelo do potenciômetro usado neste trabalho fornece diretamente o valor da sucção total do solo. A Figura 3.7 apresenta o aspecto desse equipamento.

Figura 3.7 – Potenciômetro de espelho resfriado modelo WP4C

A Equação 3.1 foi utilizada para a representação matemática das CCSA's do solo, a partir dos dados experimentais obtidos pelos ensaios com os equipamentos supracitados, a qual foi proposta por Durner (1994[1] *apud* MASCARENHA; CORDÃO NETO; SILVA, 2016), que modificou a equação de van Genuchten (1980), a fim de contemplar seu uso para solos de comportamento bimodal, típico de solos lateríticos, como o utilizado na pesquisa.

$$e_w = e_{wL}\left\{\frac{1}{1+[\alpha_L(u_a-u_w)]^{n_L}}\right\}^{m_L} + e_{wS}\left\{\frac{1}{1+[\alpha_S(u_a-u_w)]^{n_S}}\right\}^{m_S} \quad (3.1)$$

onde: e_w é o conteúdo de água do solo (%), e_{wL} é o índice de vazios dos macroporos do solo, e_{wS} é o Índice de vazios dos microporos do solo, α_L é o valor de entrada de ar dos macroporos (kPa), α_S é o valor de entrada de ar dos microporos (kPa), u_a é a poropressão de ar nos poros do solo (kPa) e u_w é a poropressão de água nos poros do solo (kPa).

Os parâmetros adimensionais m_L e m_S são obtidos a partir dos parâmetros n_L e n_S, também adimensionais, como uma simplificação da equação de van Genuchten (1980). O parâmetro n_L determina a inclinação da linha que relaciona o conteúdo de água e a sucção do solo na região de transição, enquanto o parâmetro n_s determina a inclinação da linha que relaciona o conteúdo de água e a sucção do solo após a umidade higroscópica.

Na determinação da CCSA da amostra deformada, o índice de vazios de moldagem correspondeu ao índice de vazios natural do solo. Para tanto, foi realizada a compactação quasi-estática dessa amostra em um anel circular, até ser atingido o referido índice de vazios. A CCSA da amostra indeformada foi determinada a partir da cravação cuidadosa de anéis biselados no solo, durante a moldagem dos blocos de amostra indeformada.

A CCSA em trajetória de molhagem, que melhor representa a variação de umidade do solo pelo impacto de ondas, permitiu a escolha de diferentes teores de umidade inicial para os corpos de prova submetidos a ensaios de erodibilidade no canal hidráulico, os quais corresponderam a valores de sucção abrangendo toda a extensão da CCSA, possibilitando assim, a avaliação da influência da sucção na perda de massa do solo por embate de ondas.

[1]DURNER,W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Res.,** 30 (2), p. 221-223, 1994

A partir das CCSA's das amostras deformada e indeformada, foram obtidas as curvas de distribuição de poros (densidades dos tamanhos dos poros, PSD, *versus* os diâmetros dos poros do solo), obtidas segundo a metodologia apresentada por Mascarenha (2008).

3.3.2 Ensaios de erodibilidade no canal hidráulico

3.3.2.1 Preparação dos corpos de prova

A partir da CCSA da amostra deformada, remoldada por compactação estática, em trajetória de molhagem, foram escolhidos cinco valores distintos de teor de umidade para a confecção dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios de erodibilidade no canal hidráulico, os quais estão distribuídos ao longo de toda essa CCSA.

Assim, para os corpos de prova confeccionados com a amostra remoldada por compactação estática, estes cinco teores de umidade corresponderam aos seguintes valores: teor de umidade do solo no dia da coleta, teor de umidade obtido após secagem do corpo de prova em estufa a 42° C por 48 hs, teor de umidade próximo à primeira entrada de ar, nos macroporos; teor de umidade próximo ao segundo valor de entrada de ar, nos microporos e teor de umidade do trecho inicial de sucção residual do solo, nos microporos. Todos os valores de sucção corresponderam a teores de umidade decorrentes da sazonalidade climática do local de coleta das amostras de solo.

Para se avaliar a influência das cimentações dos grãos do solo na erodibilidade devido ao impacto de ondas, foram confeccionados dois corpos de prova a partir de blocos de amostras indeformadas, sendo que um deles foi moldado no teor umidade natural do solo, igual a 15,7%, enquanto que o outro corpo de prova foi moldado com umidade abaixo desta, após secagem do mesmo em estufa por 48 hs, na temperatura de 42º C, correspondendo a um teor de umidade igual a 11,5%. Os resultados de perda de massa destes dois corpos de prova foram comparados com as perdas de massa de dois corpos de prova confeccionados com a amostra deformada, moldados em umidades similares.

Previamente à moldagem dos corpos de prova, a amostra deformada foi totalmente peneirada, na umidade natural, em uma peneira de malha 2,00 mm, a fim de se eliminar quaisquer raízes e materiais de diâmetro superior ao da abertura da peneira supramencionada.

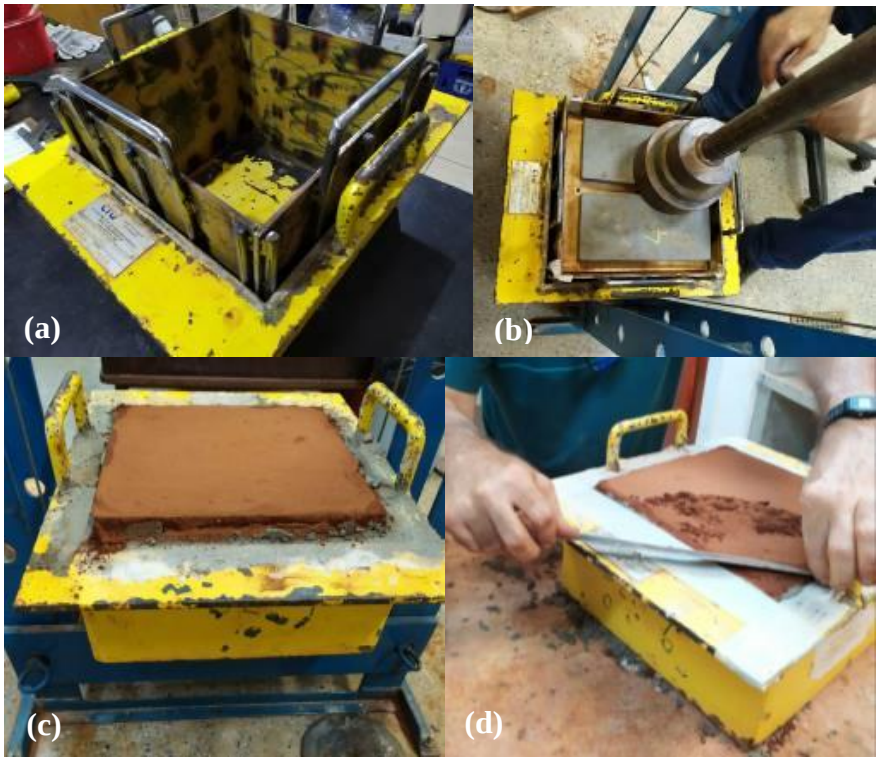
As moldagens dos corpos de prova confeccionados com a amostra deformada foram

executadas por meio de compactação quasi-estática do solo disposto no porta-amostra do ensaio de canal. Utilizou-se, para tanto, uma prensa hidráulica manual, compactando-se lentamente duas camadas de solo com alturas iguais de 10 cm, até se atingir o índice de vazios de campo, estando a amostra de solo no seu teor de umidade natural. Posteriormente rasou-se com uma régua biselada o excesso de solo compactado dos corpos de prova, até que os seus topos ficassem rentes com o topo do porta-amostra. O excesso de material foi proposital, para permitir o rasamento e a produção de uma superfície que não tenha ficado em direto contado com a placa de carregamento para compactação.

Todos os corpos de prova receberam a aplicação de um "cordão" de argamassa de cimento e areia natural, com traço 1:3 em massa e relação água/cimento igual a 0,45, em uma faixa de 1,5 cm de largura ao longo do perímetro da sua face exposta, para evitar a concentração da erosão na interface entre o porta-amostra e o solo, durante os ensaios de erodibilidade no canal hidráulico, e consequentemente o falseamento dos seus resultados, conforme recomendado por Menezes (2017).

Para viabilizar a aplicação desse cordão de argamassa, foram inseridos internamente ao porta-amostra, antes das moldagens dos corpos de prova, quatro chapas de aço de 5,0 mm de espessura, com dimensões iguais a 20,0 x 28,5 cm. Na parte posterior de cada chapa, foram soldadas 5 barras de aço circulares, com 10 mm de diâmetro e uma alça para remoção das mesmas do interior do porta-amostra. Tal configuração permitiu a obtenção de um espaçamento no perímetro dos corpos de prova, suficiente para aplicação do referido cordão de argamassa no contato solo/porta-amostra, simplesmente pela retirada de cada chapa, logo após a realização da compactação. A argamassa foi então inserida no espaço criado, imediatamente após a retirada de cada chapa. A Figura 3.8 ilustra a configuração das chapas no porta-amostra e as etapas de compactação estática dos mesmos na prensa hidráulica manual.

Figura 3.8 – Moldagem dos corpos de prova com a amostra deformada, compactada estaticamente: (a) Chapas internas e porta-amostra, (b) Compactação estática na prensa hidráulica manual, (c) Corpo de prova após compactação e (d) Rasamento do excesso de solo compactado acima do topo do porta-amostra (O autor, 2019).



Após a moldagem de cada corpo de prova com o solo na sua umidade natural, promoveu-se a molhagem ou a secagem dos mesmos, até serem atingidos os teores de umidade escolhidos para os ensaios de erodibilidade no canal hidráulico.

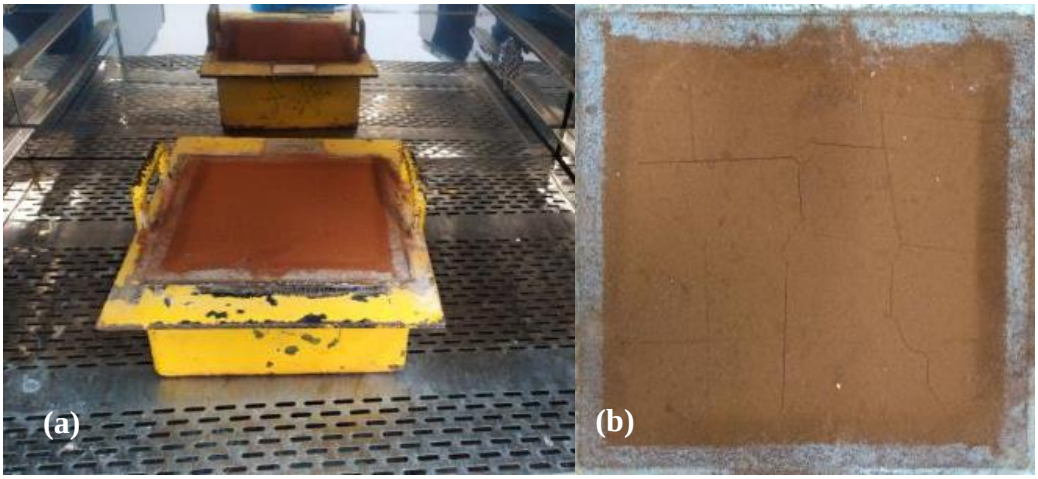
Para os corpos de prova com teores de umidade de ensaio superiores ao de moldagem, aspergiu-se água uniformemente, com auxílio de um borrifador, sob toda a superfície dos corpos de prova, em quantidades suficientes para atingir as umidades dos ensaios de erodibilidade.

Na sequência, os corpos de prova foram armazenados em um ambiente com temperatura e umidade controladas, estando devidamente protegidos contra perda de água por 48 horas, antes de serem submetidos aos ensaios de erodibilidade. Tal procedimento teve por finalidade permitir que a umidade proveniente da água adicionada se espalhasse de maneira uniforme ao longo de todos os pontos dos corpos de prova, além de permitir a cura da argamassa aplicada no perímetro da superfície exposta dos corpos de prova. A Figura 3.9 ilustra o acréscimo de água em um corpo de prova, após sua moldagem.

Figura 3.9 – Aspersão de água sobre a superfície exposta de um corpo de prova.

Para o corpo de prova com umidade de ensaio inferior à de moldagem, promoveu-se a secagem do mesmo em uma estufa com controle de temperatura, a 42° C, por 48 hs. A Figura 3.10 mostra este corpo de prova dentro da estufa com controle de temperatura e o aspecto da sua superfície após o processo de secagem.

Figura 3.10 – (a) Corpo de prova sumetido à secagem em estufa e (b) Aspecto da superfície de um corpo de prova após secagem em estufa, a 42° C, por 48 hs.



Para confecção dos corpos de prova advindos das amostras indeformadas, inseriu-se as mesmas, ainda totalmente recobertas com parafina, no porta-amostra. Posteriormente, recortou-se o topo da amostra que excedia a altura total do porta-amostra. Finalmente, aplicou-se argamassa em todo o perímetro dos corpos de prova. A Figura 3.11 ilustra a moldagem de um corpo de prova a partir de um bloco de amostra indeformada.

Figura 3.11 – Moldagem de um corpo de prova a partir de um bloco de amostra indeformada.

3.3.2.2 Procedimento experimental

Após a preparação, todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de impacto de ondas, utilizando-se o canal hidráulico construído por Menezes (2017), localizado no laboratório de hidráulica da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás – EECA/UFG.

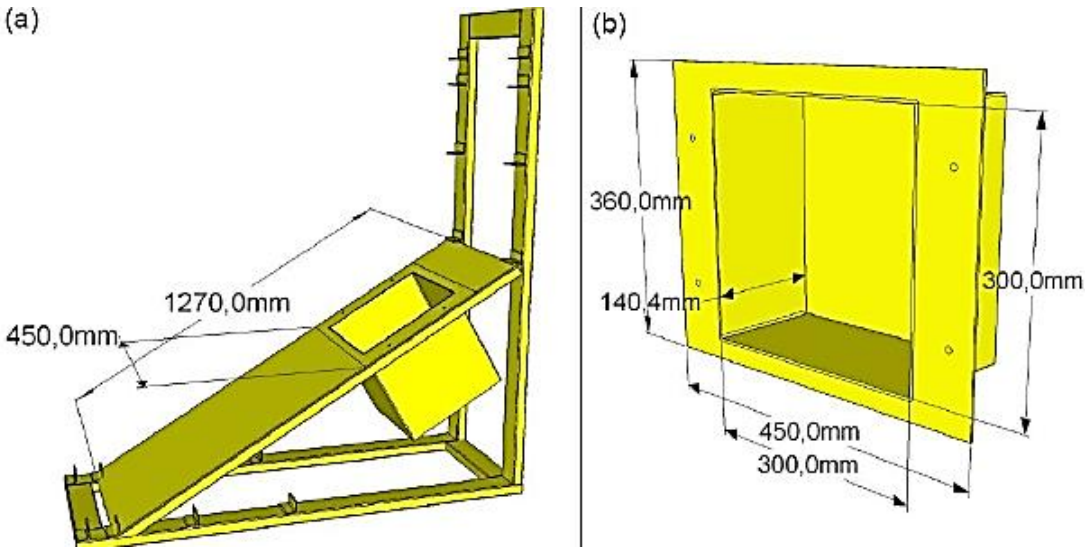
Este canal hidráulico possui comprimento igual a 10 m e seção transversal retangular de dimensões iguais 47 cm x 120 cm. Suas paredes são constituídas de chapas de vidro, fixadas em uma estrutura metálica, e o piso de chapas de aço. O canal é dotado de uma rampa móvel em uma de suas extremidades, que permite variar seu ângulo de inclinação em relação à horizontal. A rampa possui um espaço para acoplamento de um porta-amostra metálico de formato prismático.

Na extremidade oposta à rampa do canal, localiza-se um batedor que gera ondas em seu interior. Este batedor, do tipo aba, consiste basicamente de uma placa metálica ligada por meio de uma haste articulada a um disco metálico, solidário ao eixo longitudinal de rotação de um motor elétrico. A velocidade de rotação do motor, que define as frequências das ondas, é controlada por um inversor eletrônico de frequência.

As Figuras 3.12 e 3.13 ilustram o aspecto do canal hidráulico, o detalhamento da rampa e do porta-amostra, respectivamente.

Figura 3.12 – Aspecto do canal hidráulico. (MENEZES, 2017).

Figura 3.13 – (a) Detalhe da rampa e (b) Detalhe do porta-amostra (MENEZES, 2017).



Após a moldagem, os corpos de prova foram pesados antes de serem submetidos aos ensaios de erodibilidade. A próxima etapa do ensaio consistiu em encaixar o conjunto porta-amostra e corpos de prova à rampa do canal hidráulico. Destaca-se que as alças do porta-amostra ficaram dispostas na mesma direção de propagação das ondas, visto que se essas alças ficassem posicionadas paralelas às paredes do canal, não seria possível a descida e acoplamento dos corpos de prova na rampa, devido ao exíguo espaço disponível. As alças do porta-amostra, devido à sua posição, podem ter atuado como elementos redutores da energia das ondas, contudo esse efeito não foi avaliado na pesquisa.

Em seguida acionou-se a bomba centrífuga que transfere a água contida em 3 reservatórios para o canal. O volume de água empregado no ensaio correspondeu à metade da altura da superfície da amostra posicionada na rampa, estando a coluna d'água em repouso. A Figura 3.14 mostra um corpo de prova acoplado à rampa do canal hidráulico.

Figura 3.14 – Corpo de prova acoplado à rampa do canal hidráulico.

Os valores de inclinação da rampa e de frequência de ondas, empregados nos ensaios de erodibilidade no canal hidráulico foram iguais 30° e 0,56 Hz, respectivamente. A escolha desses valores é devido a esta condição apresentar uma maior perda de massa, conforme verificado por Menezes (2017).

Com o canal de ondas preenchido com água, inseriu-se no inversor de frequência do canal hidráulico o valor associado à frequência empregada na geração de ondas, conforme a calibração realizada por Schliewe (2018) e demais parâmetros apresentados no trabalho de Menezes (2017), acionando-se assim a aba do canal para a geração de ondas.

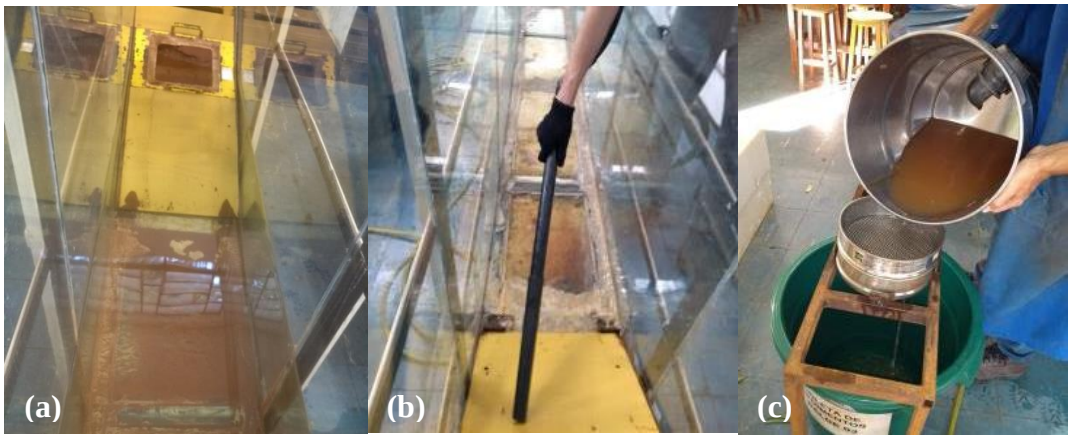
Decorrido o tempo de cada ensaio, que teve duração de 6 horas, retirou-se o conjunto porta-amostra e corpo de prova da rampa do canal e pesou-se o mesmo. A diferença entre as massas secas, inicial e final, dos corpos de prova, correspondeu à perda de massa obtida nos ensaios, de acordo com a equação 3.2.

$$m_t = \frac{m_i}{(1+w_i)} - \frac{m_f}{(1+w_f)} \quad (3.2)$$

onde m_t é a perda de massa total da amostra (g), m_i é a massa inicial da amostra, antes do ensaio (g), m_f corresponde à massa final da amostra, após o ensaio (g), w_i é o teor de umidade inicial da amostra, determinado previamente ao ensaio (%) e w_f corresponde ao teor de umidade final da amostra, determinado após o ensaio (%).

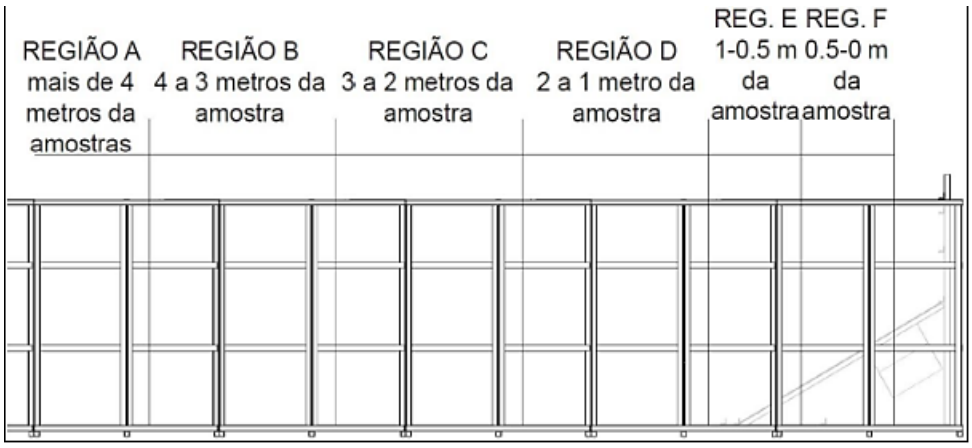
Transcorridos 24 horas da finalização de cada ensaio, promoveu-se o esvaziamento parcial do canal hidráulico, acionando-se a bomba centrífuga até obter-se uma reduzida lâmina d'água no fundo do canal e posterior coleta do material sedimentado no mesmo, utilizando-se um aspirador industrial. A Figura 3.15 ilustra os sedimentos depositados no fundo do canal, a coleta dos mesmos e a passagem desses nas peneiras de malha 2,0 mm e 74 μm.

Figura 3.15 – (a) - Vista superior dos sedimentos espalhados ao longo do fundo do canal hidráulico, após ensaio. (b) - Coleta dos sedimentos espalhados ao longo do fundo do canal. (c) - Passagem dos sedimentos coletados nas peneiras de malha 2,0 mm e 74μm.



A referida coleta dos sedimentos foi feita gradualmente, ao longo das 6 regiões delimitadas por Schliewe (2018), distribuídas por toda a extensão do canal hidráulico, conforme indicado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Delimitação das 6 diferentes regiões ao longo do canal hidráulico (SCHLIEWE, 2018).



Os sedimentos coletados em cada região do canal foram passados na peneira de malha 74 μm. Os materiais, retido e passante na peneira 74 μm, foram armazenados em recipientes separados por região do canal e submetidos à secagem em estufa a uma temperatura de 65 °C, por 48 horas, para a determinação das respectivas massas secas e distribuição granulométrica.

Para se conhecer a distribuição granulométrica do solo erodido ao longo do canal hidráulio, o material coletado por região, após os ensaios, foi ainda submetido a uma análise granulométrica, empregando-se um analisador automático de tamanho de partículas, que utiliza difração de laser e detectores fotoelétricos, abrangendo um campo de medição entre 0,02 e 2800 μm. A Figura 3.17 ilustra o aspecto do granulômetro a laser da EECA da UFG, utilizado na referida análise.

Figura 3.17 – Modelo de granulômetro a laser empregado na determinação da distribuição granulométrica dos sedimentos coletados ao longo do canal hidráulico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

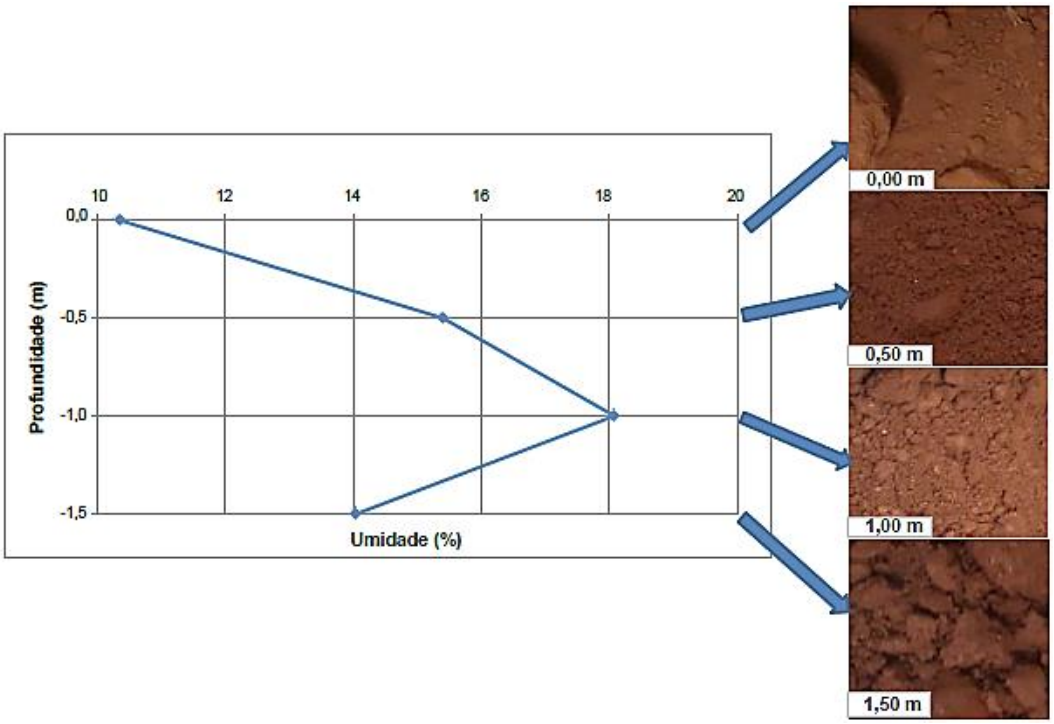
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados referentes à caracterização do solo em estudo, às curvas características solo-água das amostras remoldadas por compactação estática e indeformadas, os resultados dos ensaios de erodibilidade deste solo devido ao impacto de ondas, realizados no canal hidráulico da EECA/UFG, considerando a influência da sucção na sua perda de massa, e finalmente, a distribuição granulométrica dos sedimentos gerados durante os referidos ensaios.

4.1 PERFIL DE UMIDADE NO PONTO DE AMOSTRAGEM DO SOLO

Para se conhecer os horizontes do solo no ponto de coleta das amostras e o gradiente de umidade ao longo do seu perfil, foram amostradas, com trado manual tipo concha, 4 pequenas porções de solo a cada 0,50 m, até a profundidade de 1,50 m, sendo a primeira porção coletada na superfície do terreno natural.

A partir de 1,50 m de profundidade não foi possível efetuar nenhuma coleta, uma vez que se atingiu uma camada extremamente rija e rica em agregações, impedindo a penetração do trado amostrador manual. A Figura 4.1 apresenta o perfil de umidade, bem como o aspecto visual do solo encontrado em cada amostragem. As fotos de cada amostra retirada do furo a trado foram tiradas em um único dia e horário, no laboratório de solos de Furnas, em uma sala que apresentou o mesmo nível de iluminação para todas as amostras.

Figura 4.1 – Perfil de umidade e aspecto visual do solo ao longo da profundidade no ponto de coleta das amostras em 08/09/2019.



Analisando-se a Figura 4.1, depreende-se que visualmente, o horizonte do solo abaixo da superfície apresenta-se relativamente homogêneo, exceto pelo teor de umidade, até a profundidade de 1,0 m, caracterizando-se, pela presença predominante de pequenas e crescentes agregações de grãos de coloração avermelhada, com valores crescentes de umidade. A partir de 1,0 m de profundidade, observa-se a predominância de agregações lateríticas e decréscimo no valor do teor de umidade do solo.

A amostra deformada foi coletada na superfície do terreno, enquanto que os blocos de amostra indeformada foram coletados a 30 cm da superfície do terreno, estando, portanto, ambas as amostras localizadas em uma região de solo com aspecto relativamente homogêneo, quando se analisa o perfil apresentado na Figura 4.1.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização convencional, o solo coletado, tanto na superfície do terreno (amostra deformada), quanto a 30 cm abaixo deste (blocos de amostra indeformada), foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como um silte de baixa compressibilidade, identificado como ML,

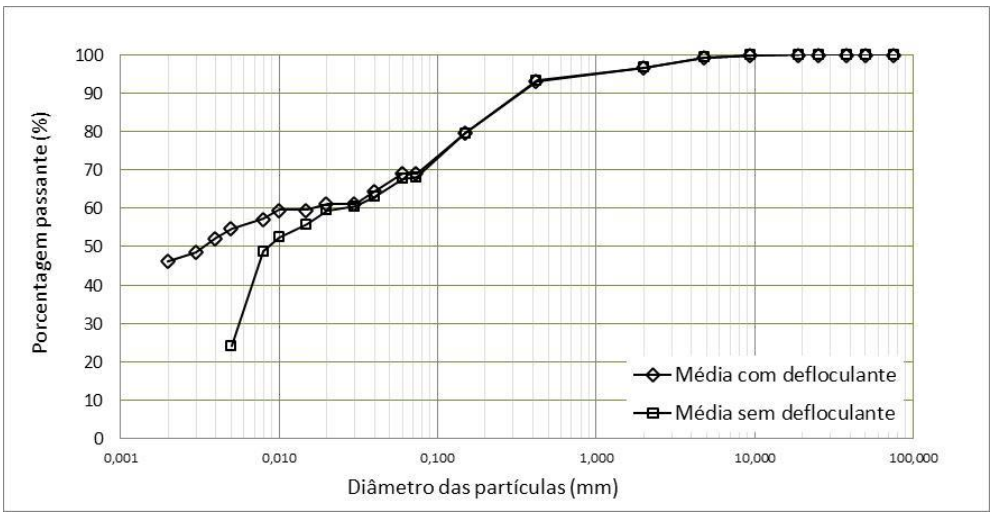
independente da utilização ou não do defloculante hexametafosfato de sódio na análise granulométrica. Destaca-se que toda a fração de argila do solo encontrava-se agregada.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização convencional do solo, representados pela média de três determinações, juntamente com suas respectivas variações, exceto para os valores de índice de vazios. A Figura 4.2 mostra as curvas granulométricas médias do solo, também representada pela média de três determinações, com e sem utilização do defloculante hexametafostato de sódio, com concentração igual a 0,0457 g/cm³.

Tabela 4.1 – Resultados dos parâmetros físicos do solo.

Parâmetros	**Valores médios**
ρ_s – massa específica dos grãos (g/cm³)	2,76 ± (0,01)
wL – limite de liquidez (%)	45 ± (1)
wP – limite de plasticidade (%)	30 ± (1)
IP – índice de plasticidade (%)	15± (2)
Índice de vazios no ponto de coleta da amostra deformada	1,14
Índice de vazios no ponto de coleta dos blocos de amostra indeformada	1,21
Distribuição do tamanho dos grãos com uso de defloculante	
Pedregulho (%)	3,3
Areia (%)	27,6
Silte (%)	22,8
Argila (%)	46,3
Distribuição do tamanho dos grãos sem uso de defloculante	
Pedregulho (%)	3,3
Areia (%)	32,8
Silte (%) + Argila (%)	63,9

Figura 4.2 – Curva granulométrica do solo com e sem defloculante.



O índice de vazios de remoldagem da amostra deformada, empregada na determinação das CCSA's, foi equivalente à média de três valores determinados *in-situ*, de forma indireta, durante a coleta dessa amostra, utilizando-se o método do cilindro de cravação prescrito na NBR 9813 (ABNT, 2016b), enquanto que o índice de vazios da amostra indeformada, utilizada na determinação das CCSA's, foi determinado a partir da média dos índices de vazios de dois blocos de amostra indeformada coletados, cujo valor foi ligeiramente maior que o da amostra deformada remoldada, conforme pode ser observado na Tabela 4.1.

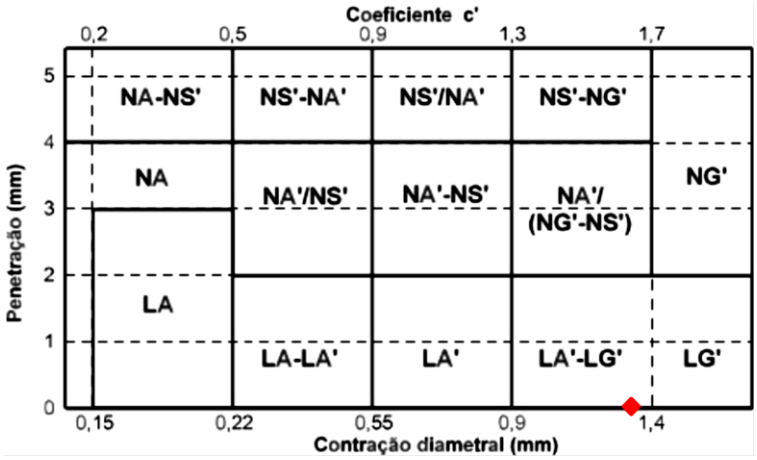
Os valores dos resultados apresentados na Tabela 4.1 e as curvas granulométricas da Figura 4.2 são similares àqueles encontrados por Schliewe (2018) e Vilhena (2019), que trabalharam com amostras coletadas na região do ponto de coleta supracitado.

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros classificatórios para solos tropicais, obtidos a partir dos ensaios expeditos (azul de metileno e método da pastilha) da metodologia MCT, que permitiram classificar o solo em arenoso-argiloso laterítico, identificado como LA'-LG'. A Figura 4.3 apresenta o ponto resultante do cruzamento do par de valores: coeficiente c' e penetração, no gráfico de classificação da metodologia MCT.

Tabela 4.2 – Resultados dos parâmetros referentes ao ensaio de Azul de Metileno e Pastilha.

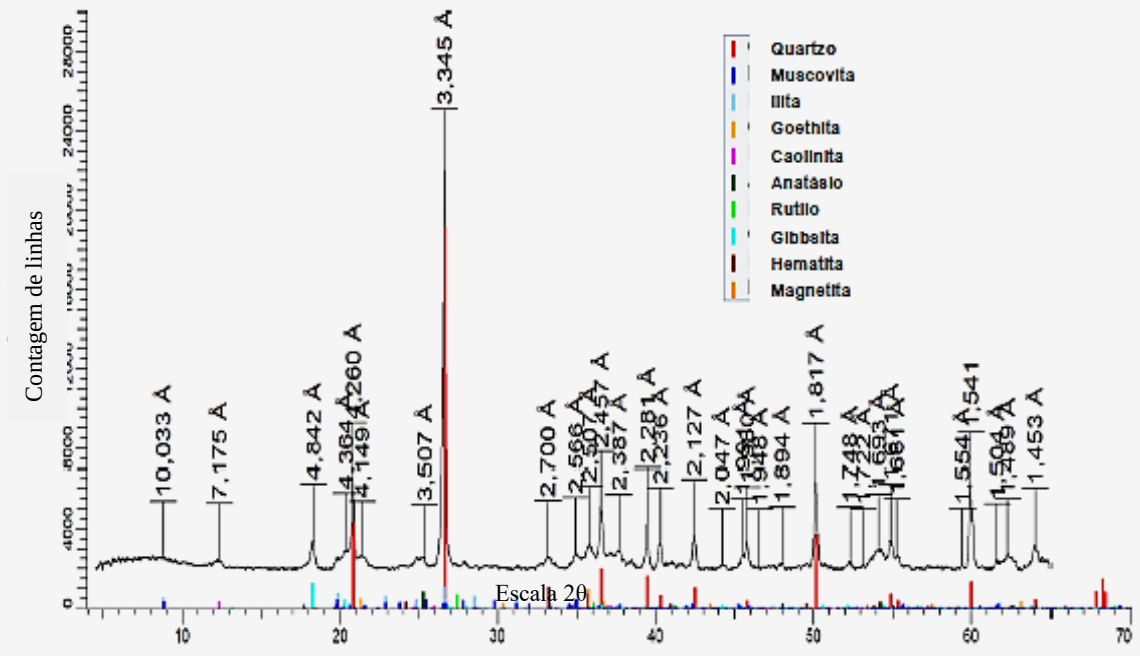
Método	**Parâmetro**	**Valor**
Azul de Metileno	SE (Superfície específica)	9,76 m²/g
	CTC (Capacidade de troca catiônica)	1,072 meq/100 g
	CA (Coeficiente de atividade dos argilominerais)	6,60
Pastilha	Plasticidade	Muito plástico
	Coeficiente c'	1,64
	Penetração	0,00 mm

Figura 4.3 – Classificação da amostra de solo segundo os ensaios expeditos da metodologia MCT .



Para se conhecer de maneira mais detalhada a composição mineralógica do solo em estudo, uma amostra integral deste foi submetida a uma única determinação de Difratometria de Raios-X, a partir do tratamento da amostra com etileno-glicol, a fim de se evidenciar os picos de leitura das distâncias interplanares e assim facilitar a identificação dos compostos minerais presentes no solo. A Figura 4.4 apresenta o resultado da Difratometria de Raios-X, onde se observa uma predominância de picos quartzo e secundariamente de gibbsita e caolinita, corroborando com o comportamento observado no ensaio expedito de azul de metileno.

Figura 4.4 – Difratometria de raios-X em amostra integral do solo.

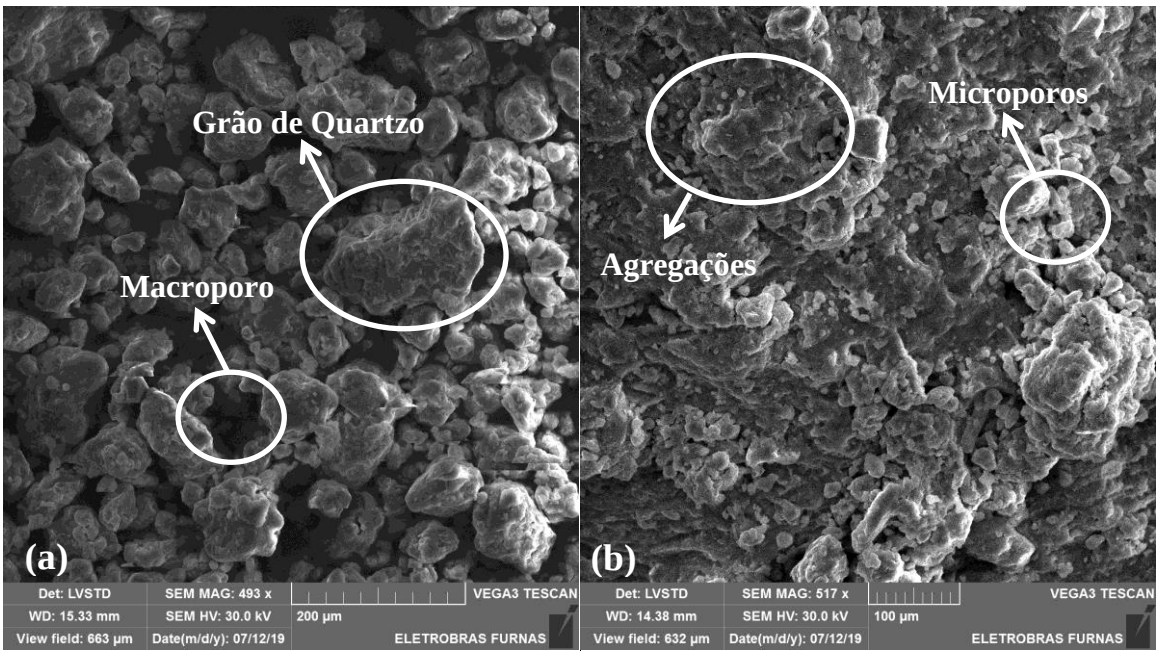


Adicionalmente, para possibilitar uma avaliação qualitativa da microestrutura da amostra de solo deformada, ou seja, do tamanho, quantidade, formato e distribuição das fases e poros presentes na mesma, executou-se análises de imagens obtidas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As Figuras de 4.5 e 4.6 apresentam as imagens mais representativas da amostra, obtida por meio da Técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que indicam estruturas típicas de solos com avançado grau de intemperismo, tais como os solos tropicais lateríticos. Pode-se observar pelas imagens, a presença de partículas de quartzo semi-arredondadas, agregações de óxi-hidróxidos (gibbsita e goethita) e argila, bem como a presença de macroporos entre agregações e de microporos intra agregações, consistindo em estruturas típicas de solos com avançado grau de intemperismo, tais como os solos tropicais lateríticos (CONCIANI *et al*.,2015).

Figura 4.5 – (a) Imagem indicando agregações de argila e oxi-hidróxidos e macroporos entre agregações. (b) Imagem apresentando uma agregação de óxi-hidróxidos e argila.

Figura 4.6 – (a) Imagem mostrando partículas de quartzo e macroporos entre as mesmas. (b) Imagem indicando agregações de oxi-hidróxidos com microporos intra-agregações.



Como parte da caracterização complementar do solo, o mesmo foi submetido à técnica de Espectometria por Energia Dispersiva (EDX) para se conhecer de modo semi-quantitativo, os elementos químicos constituintes.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os resultados de duas determinações realizadas por meio de

espectrometria por energia dispersiva (EDX), cujos gráficos indicam picos preponderantes dos seguintes elementos: oxigênio, alumínio, ferro e silício, indicativo da presença de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, silicato de alumínio, quartzo e de pequenos picos de titânio e potássio, totalmente compatíveis com solos tropicais de elevado grau de intemperismo.

Figura 4.7 – Gráfico com resultados da técnica de EDX, indicando a incidência predominante de oxigênio, alumínio, ferro e silício na amostra em estudo, compatível com oxi-hidróxidos de ferro e alumínio.

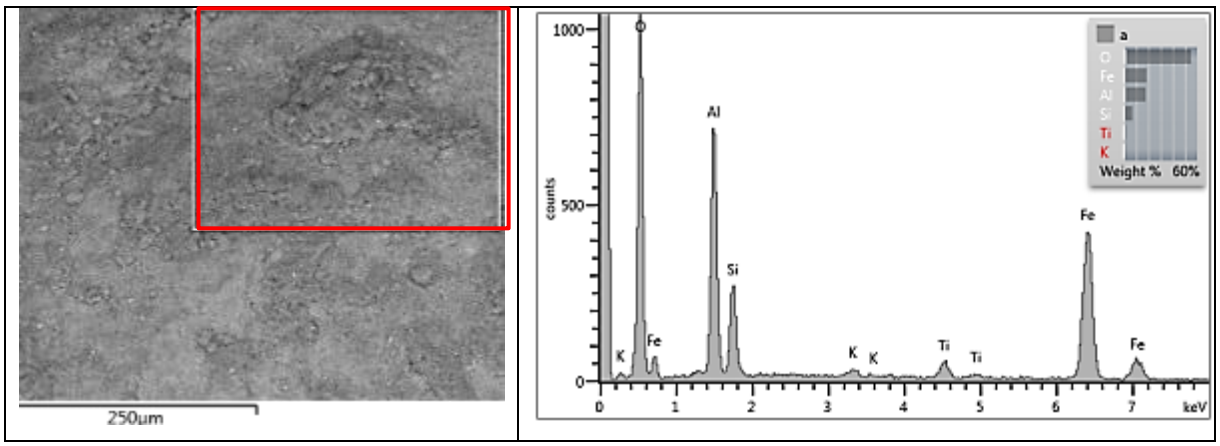
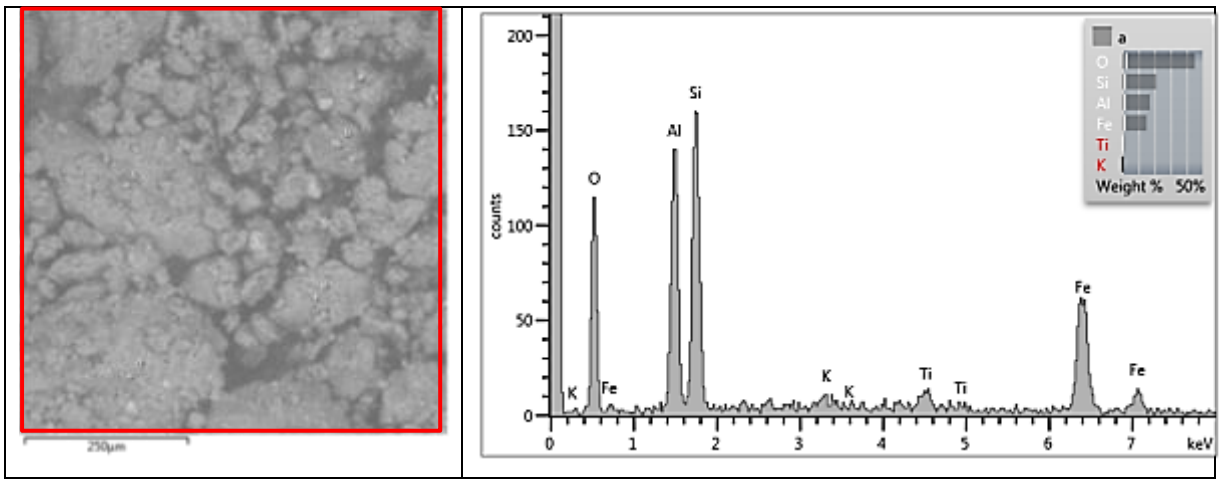


Figura 4.8 – Gráfico com resultados da técnica de EDX, indicando a incidência predominante de silício, alumínio, oxigênio e ferro na amostra em estudo, compatível com quartzo e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio.



A Tabela 4.3 apresenta os resultados da análise gravimétrica por fluorescência de raios-X, que possibilitou a determinação da proporção dos compostos químicos presentes no solo. Os resultados apresentam-se aderentes com as análises por MEV e EDX, indicando a presença predominante de quartzo e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio (goethita e gibbsita) na amostra de solo em estudo.

Tabela 4.3 – Análise do solo por meio de fluorescência de raios-X.

Elemento químico	Porcentagem gravimétrica (%)
Dióxido de Silício (SiO_2)	47,15
Anidro Sulfúrico (SO_3)	0,00
Sulfato de Cálcio ($CaSO_4$)=%SO_3 x 1,7	0,00
Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	13,32
Óxido de Magnésio (MgO)	0,40
Óxido de Alumínio (Al_2O_3)	20,75
Óxido de Cálcio (CaO)	0,08
Óxido de Sódio (Na_2O)	0,13
Óxido de Potássio (K_2O)	0,72
Equivalente Alcalino = % Na_2O + 0,658.K_2O	0,60
Óxido de Titânio (TiO_2)	3,33
Mn_2O_3	0,08
F	0,69
ZnO_2	0,11
P_2O_5	0,10
Perda ao fogo	12,54
Totalização (Σ)	**100,00**

4.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS SOLO-ÁGUA

As curvas características solo-água definitivas das amostras remoldadas e indeformadas foram determinadas, nas primeiras trajetórias de secagem e molhagem, utilizando-se um prato extrator de pressão do tipo Fredlund SWCC Device, modelo SWC-150, para valores de sução matricial até 90 kPa, e um potenciômetro de espelho resfriado, modelo WP4C, para valores de sucção acima de 90 kPa, via trajetória de secagem.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as CCSA's definitivas das amostras compactada estaticamente e indeformada, executadas em trajetórias de molhagem e secagem, em relação ao teor de umidade gravimétrico, com indicação do teor de umidade natural, e em relação ao grau de saturação, respectivamente. A Figura 4.11 apresenta as curvas de distribuição do tamanho dos poros, em relação aos seus diâmetros, obtidos a partir das CCSA's das amostras remoldadas e indeformadas

.

Figura 4.9 – Curva característica solo-água das amostras remoldadas e indeformadas, nas trajetórias de secagem e molhagem, em relação ao teor de umidade gravimétrico.

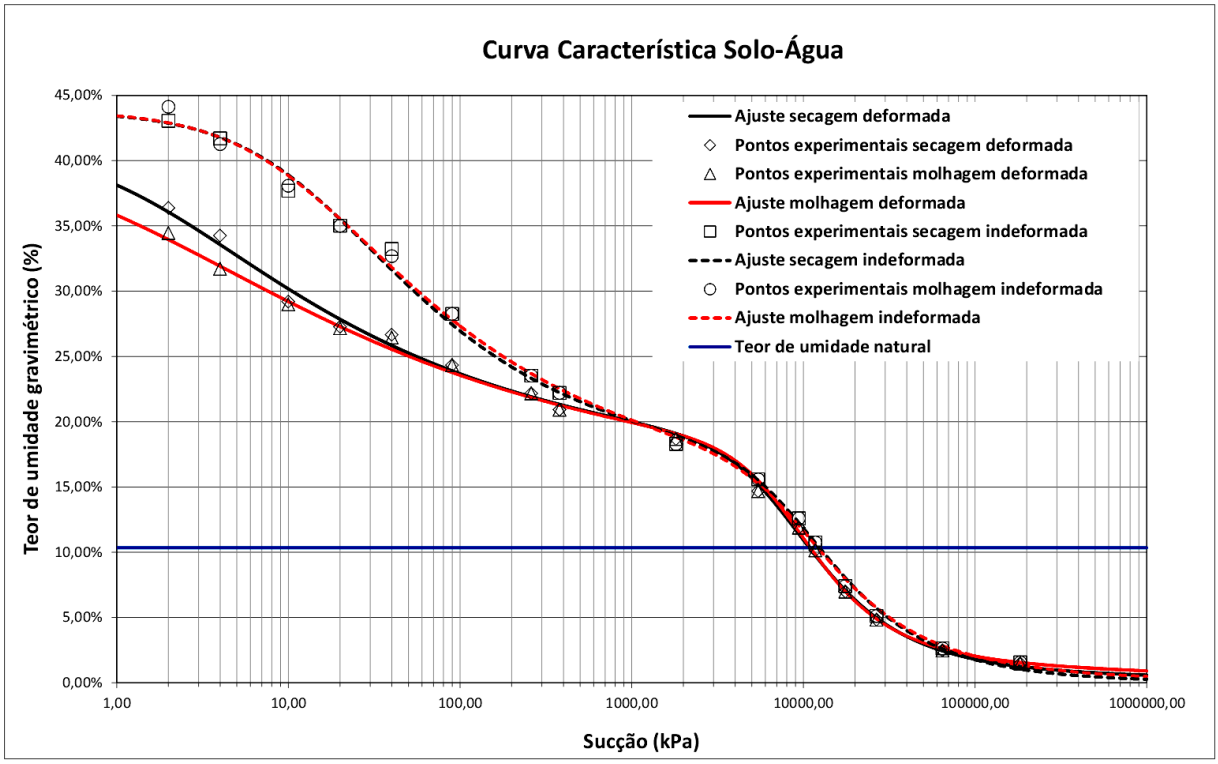


Figura 4.10 – Curva característica solo-água das amostras remoldadas e indeformada, nas trajetórias de secagem e molhagem, em relação ao grau de saturação.

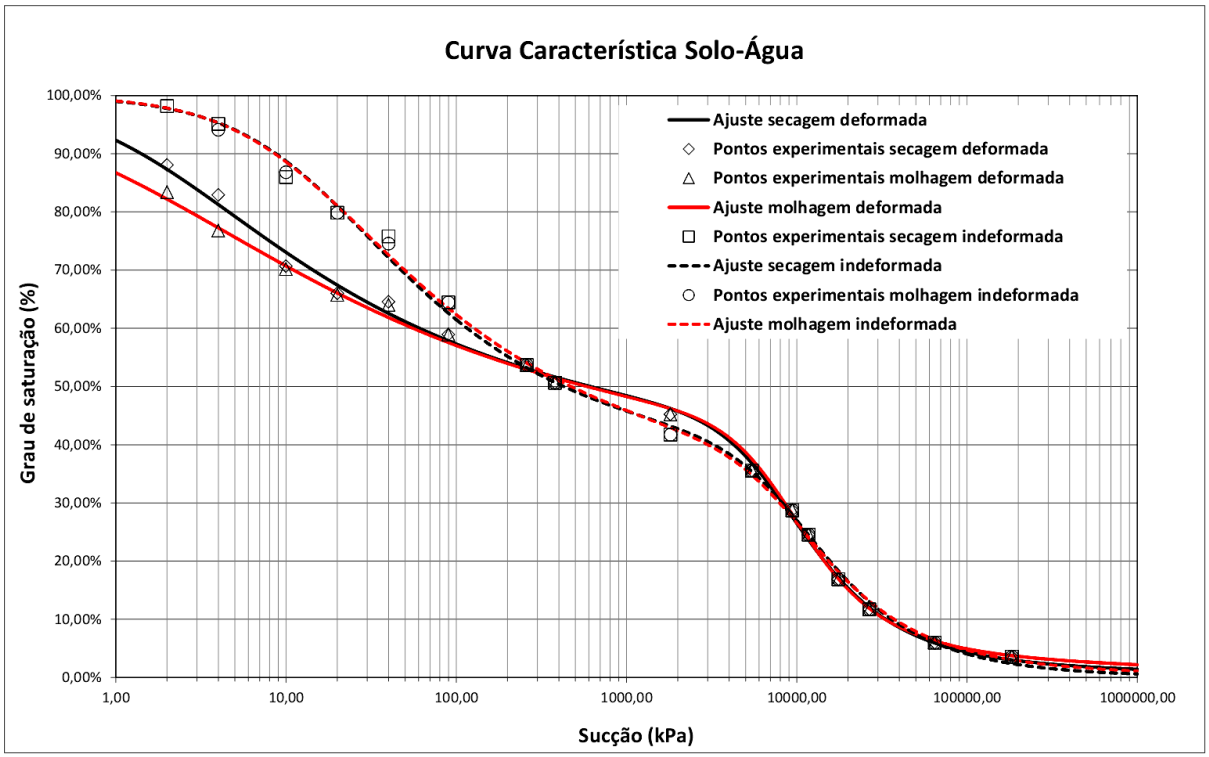
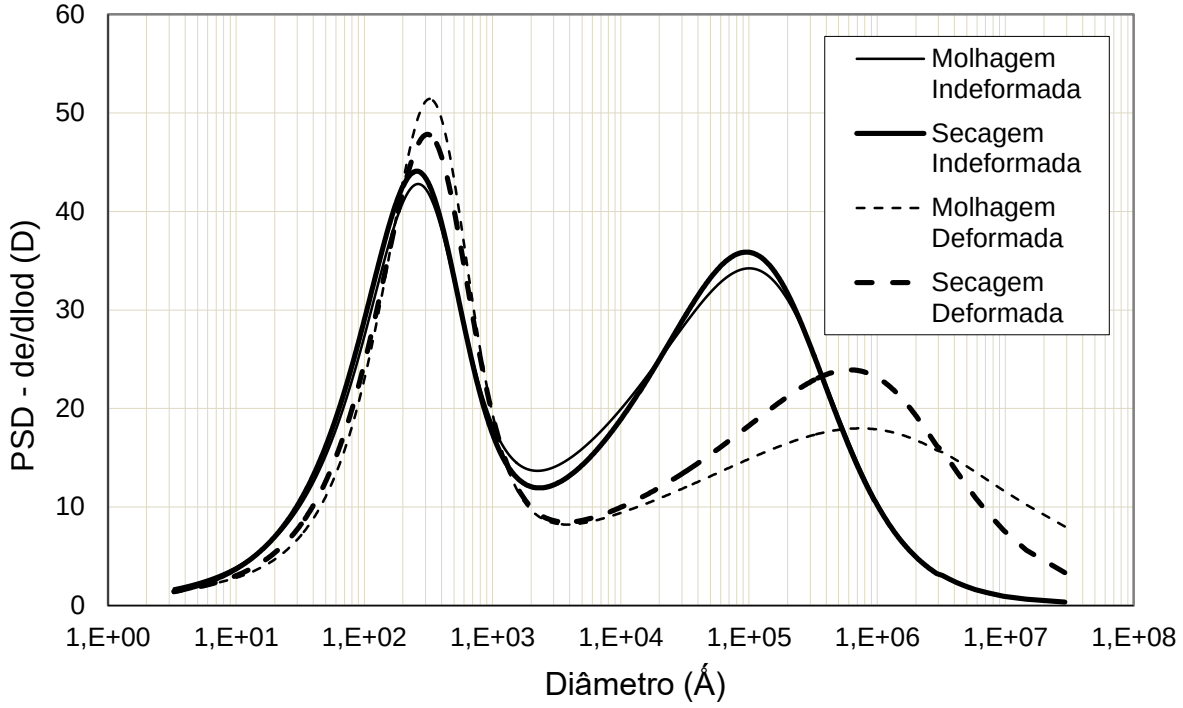


Figura 4.11 – Curvas de distribuição da densidade do tamanho dos poros (PSD) em relação aos seus diâmetros (Å), referente ao solo estudado, obtidas a partir das CCSA's das amostras deformadas e indeformadas.



As curvas das Figuras 4.9 e 4.10 indicaram um comportamento bimodal das CCSA's das amostras de solo, ou seja, a configuração das mesmas se caracteriza pela existência de dois valores de entrada de ar, relacionados aos macroporos e aos microporos, compatível com o comportamento de solos lateríticos (CAMAPUM DE CARVALHO e LEROUEIL, 2000; ORLANDO e*t al*., 2014), que possuem agregações formadas por argilo-minerais e agentes cimentantes amorfos, geralmente óxidos de ferro e alumínio (NOGAMI E VILLIBOR, 1995). Observou-se ainda, que a compactação estática não alterou a bimodalidade da CCSA.

A partir da Tabela 4.1, observa-se uma diferença de 0,07 entre o índice de vazios da amostra remoldada por compactação estática e o índice de vazios da amostra indeformada, o que corresponde a uma variação de 6,14% em relação ao menor desses valores. Esta variação contribuiu para alterar a macroestrutura das amostras do solo em estudo (Figura 4.11), apesar de que a compactação estática, mesmo atingindo o índice de vazios natural do solo, não conseguiria reproduzir totalmente a estrutura original do mesmo.

A dificuldade em se reproduzir a estrutura de amostras indeformadas do solo, a partir da remoldagem de amostras deformadas, aliada aos diferentes índices de vazios de ambas, gerou discrepâncias entre as CCSA's das amostras supracitadas, em níveis de sucção abaixo de

1.000 kPa, conforme verificado na Figura 4.11. Essa diferença estrutural entre amostras compactadas estaticamente e indeformada também foi verificada por Camapum de Carvalho (2004).

Analisando-se as curvas das Figuras 4.9 e 4.10 observa-se que ambas guardam grande similaridade entre si a partir de valores de sucção total acima de 1.000 kPa. Segundo Rocha *et al*. (2014), no trecho residual das CCSA's, neste caso a partir de 1.000 kPa, amostras deformadas e indeformadas apresentam valores semelhantes de sucção total, visto que não há influência da macro-estrutura do solo nesse nível de sucção.

Referente à amostra compactada estaticamente, constata-se que suas CCSA's nas trajetórias de secagem e molhagem, são relativamente próximas. Os seus primeiros valores de entrada de ar, referentes aos macroporos, se situam abaixo de 2 kPa e correspondem a teores de umidade gravimétrica pouco acima de 35,0%. Constatou-se ainda que tais curvas apresentam ligeira histerese a partir do trecho com sucção matricial abaixo de 30 kPa.

No que tange às CCSA's da amostra indeformada, verifica-se que os valores da primeira entrada de ar, referente aos macroporos, se situram em torno de 4,0 kPa, correspondentes a teores de umidade gravimétrica de aproximadamente 42,0%. As referidas curvas características não apresentam histerese entre si, compravando que o solo em seu estado natural sofreu inúmeros ciclos de secagem e molhagem (AL HAJ e STANDING, 2016; JAYANTH; IYER; SINGH, 2012).

O teor de umidade natural do solo superficial, obtido durante a coleta da amostra indeformada, é igual a 10,35%, correspondendo a um valor de sucção total aproximadamente igual a 10.000 kPa, já no segundo trecho de transição, ou seja, entre a segunda entrada de ar e o segundo trecho residual.

Observa-se, a partir da Figura 4.11, que a distribuição de poros nos macroporos diferenciam-se não apenas na densidade dos picos (maiores na amostra indeformada, devido às agregações), mas no diâmetro predominante dos mesmos (maiores na amostra remoldada), exigindo-se estudos adicionais para se compreender a razão do aumento do diâmetro dos poros na região dos macroporos da amostra deformada em relação à amostra indeformada.

4.4 INFLUÊNCIA DA SUCÇÃO NA PERDA DE MASSA DO SOLO

Os 5 teores de umidade inicial de cada corpo de prova, confeccionados a partir da amostra remoldada por compactação estática, corresponderam a valores de sucção que abrangeram toda a extensão da CCSA da amostra remoldada na trajetória de molhagem, que melhor representa a variação de umidade do solo devido ao impacto de ondas. A Figura 4.12representa graficamente a localização dos referidos teores de umidade e os correspondentes valores de sucção. A Tabela 4.4 apresenta esses teores de umidade e as respectivas sucções associadas.

Figura 4.12 – Teores de umidade iniciais de cada corpo de prova remoldado por compactação estática e valores de sucção associados.

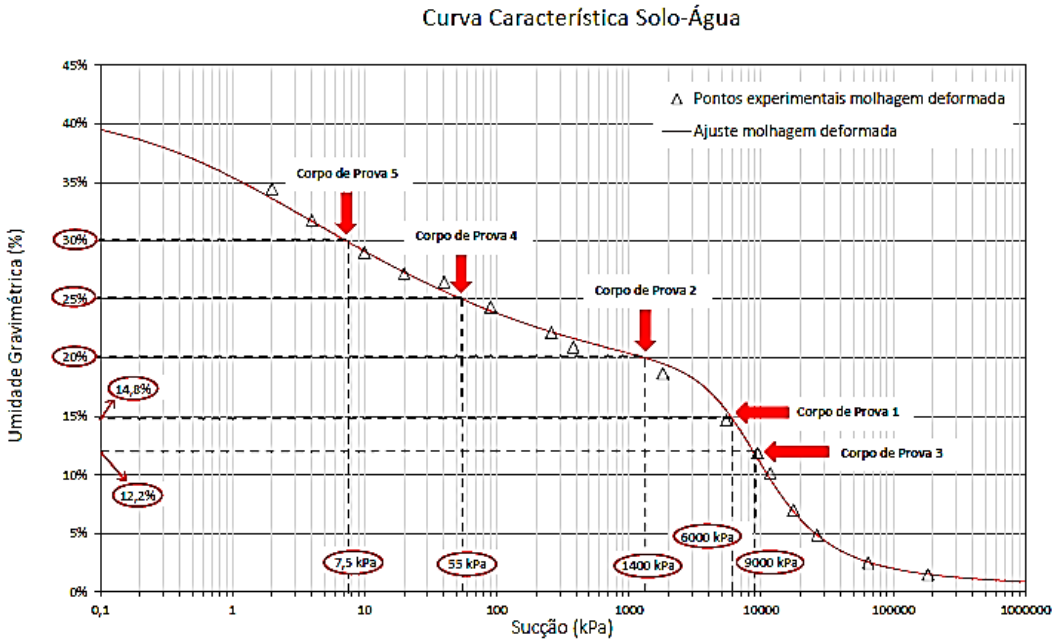


Tabela 4.4 – Relação dos teores de umidade iniciais dos corpos de prova moldados com a amostra remoldada por compactação estática e os valores de sucção inicial associados.

Corpo de prova	Teor de umidade inicial (%)	Grau de saturação inicial (%)	Sucção inicial (kPa)	Trecho da CCSA da amostra deformada, na trajetória de molhagem.
01	14,8	36,0	6000	Próximo ao segundo valor de entrada de ar.
02	20,0	47,0	1400	Trecho de transição entre os macro e microporos.
03	12,2	29,0	9000	Trecho de transição nos microporos.
04	25,0	60,0	55	Primeiro trecho de sucção residual, nos macroporos.
05	30,0	72,0	7,5	Próximo ao primeiro valor de entrada de ar.

A Figura 4.13 representa graficamente a localização dos teores de umidade referentes aos dois corpos de prova moldados com as amostras indeformadas e os correspondentes valores de sucção, considerando a CCSA da amostra indeformada, na trajetória de molhagem. Na Tabela 4.5 estão apresentados os teores de umidade inicial destes corpos de prova e os seus respectivos valores de sucção inicial.

Figura 4.13 – Teores de umidade iniciais de cada corpo de prova indeformado e valores de sucção associados.

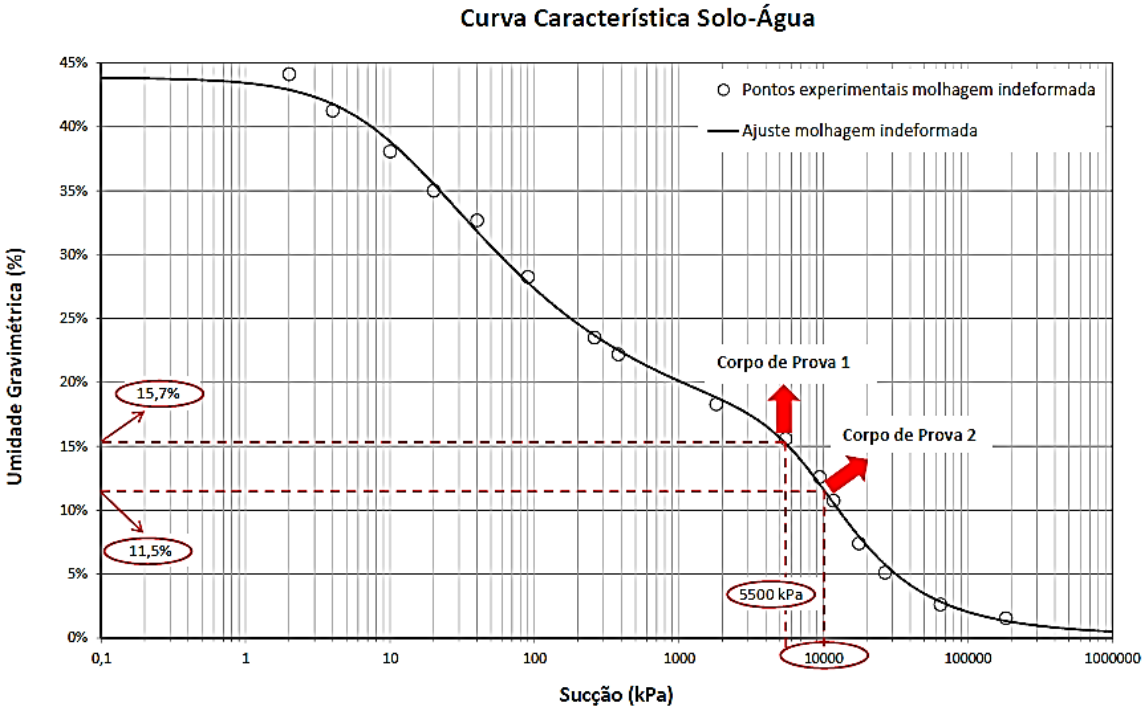
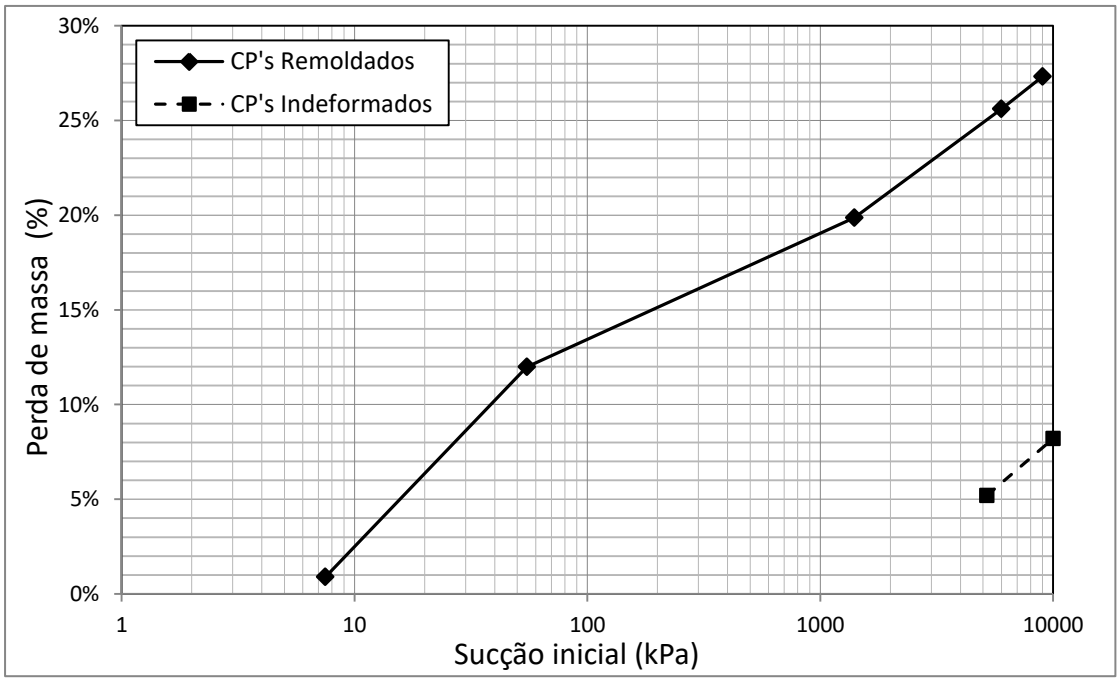


Tabela 4.5 – Relação dos teores de umidade iniciais dos corpos de prova moldados com a amostra indeformada e os valores de sucção inicial associados.

Corpo de prova	Teor de umidade inicial (%)	Grau de saturação inicial (%)	Sucção inicial (kPa)	Trecho da CCSA da amostra deformada, na trajetória de molhagem.
01	15,7	36,0	5500	Próximo ao segundo valor de entrada de ar.
02	11,5	28,0	10000	Início do trecho de transição, nos microporos.

A Figura 4.14 apresenta o gráfico Sucção inicial (kPa) x Perda de Massa (%), referente aos resultados dos ensaios de erodibilidade no canal hidráulico, considerando os corpos de prova remoldados por compactação estática e confeccionados com os blocos de amostra indeformada do mesmo solo.

Figura 4.14 – Gráfico Sucção inicial (kPa) x Perda de Massa (%) – Corpos de prova remoldados por compactação estática e confeccionados a partir de blocos indeformados.



Verifica-se na Figura 4.14, que as perdas de massa dos corpos de prova apresentaram valores crescentes com o aumento dos valores de sucção inicial, ou seja, quanto mais seco o corpo de prova, maior foi a sua erodibilidade. Essa tendência mostra-se aderente aos resultados obtidos em trabalhos que buscaram avaliar a influência da sucção na erodibilidade de solos tropicais. (ALMEIDA *et al*., 2015; ALMEIDA, ROCHA e GITIRANA JR., 2013; OLIVEIRA, 2019).

Durante os ensaios erodibilidade no canal hidráulico, metade da superfície exposta dos corpos de prova ficou totalmente submersa, onde verificou-se, para os corpos de prova com teores de umidade mais baixos (14,8% e 12,2%) a ocorrência de perda de massa quase que imediatamente após a submersão da metade inferior dos mesmos, comprovando que o avanço das frentes de molhagem causou a repentina perda de sucção inicial do solo, econsequentemente da sua coesão aparente, que proporcionava a estabilidade estrutural do solo (BASTOS, 1999).

Oliveira (2019) obteve, inicialmente, uma diminiuição da perda de massa com o aumento da sucção inicial na região dos macroporos, onde o solo apresentou um maior grau de saturação, porém a tendência de aumento de perda de massa com o aumento da sucção inicial mostrou-se predominante. Esse comportamento não foi observado nesta pesquisa, provavelmente devido ao maior nível de erosividade decorrente do impacto de ondas e ao maior tempo de ensaio (6

horas) em relação aos ensaios de *Inderbitzen* realizados por Oliveira (2019), que tiverem duração máxima de 1 hora. Além disso, na presente pesquisa, não se atingiu o valor de sucção mínimo obtido por Oliveira (2019), correspondente a cerca de 2,0 kPa. Nesta pesquisa, o mínimo valor de sucção inicial foi de 7,5 kPa, equivalente a um grau de saturação igual a 72,0%, o que provavalmente não foi suficiente para reproduzir o resultado que Oliveira (2019) obteve no trecho correspondente aos menores valores de sucção inicial do seu trabalho.

Adicionalmente, também não se observou nesta pesquisa, diminuição da erodibilidade com o aumento da sucção, conforme os resultados apresentados por Almeida *et. al* (2015), no ponto referente à sucção inicial de 10.000 kPa. Tal fato se justifica, além da maior erosividade do ensaio de perda de massa devido ao impacto de ondas em relação ao *Inderbitzen*, em razão de que o maior valor de sucção adotado nesta pesquisa se encontrou no inicio da microestrutura, enquanto Almeida *et. al* (2015) atingiu o valor residual de sucção. Esse comportamento também se repetiu nos ensaios de erodibilidade executados com os corpos de prova confeccionados com a amostra indeformada.

Verifica-se, portanto, que a atuação das frentes de molhagem causaram uma perda repentina da coesão aparente gerada pela sucção do solo, que garantia sua estabilidade frente aos processos erosivos, sendo maior a perda de estabilidade para os corpos de prova mais secos, conforme verificado por Camapum de Carvalho *et al.* (2014; 2015); Almeida *et al.* (2015); Silva *et al.* (2009) e Bastos (1999).

Além da perda da coesão aparente, tais frentes de molhagem também provocaram a desagregação do solo, o que foi confirmado pela visualização da perda de massa dos corpos de prova, eminentemente naqueles com menores teores de umidade inicial, antes mesmo da geração das ondas, no momento em que o nível d'água atingiu a superfície dos mesmos, durante o enchimento do canal hidráulico. Tal fato comprova, em termos qualitativos, a ocorrência de aprisionamento do ar intersticial do solo, acarretando em um brusco aumento da sua poropressão, que ao superar a coesão do solo provocou a sua desestabilização e a consequente perda de massa. (JACINTHO, 2006; TERRA *et al.*; 2015; GABRIELI *et al.*, 2012; JESUS, 2013).

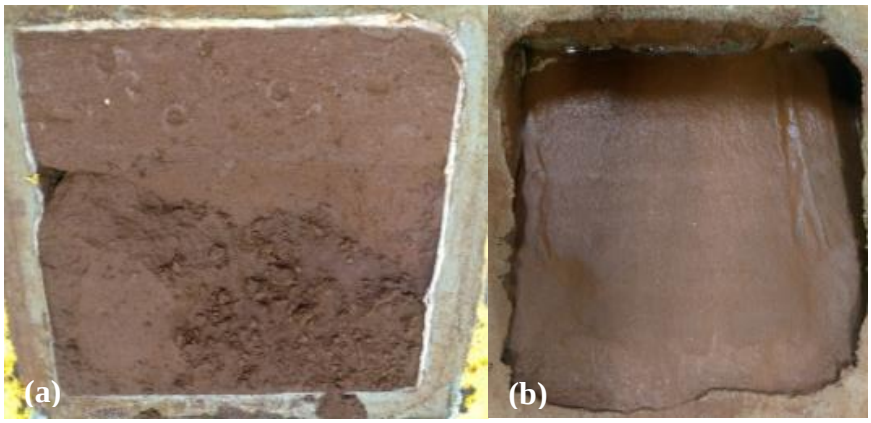
A relação: Sucção inicial (kPa) x Perda de massa (%) está relacionada à distribuição dos poros do solo. Neste aspecto, faz-se necessário a realização de campanhas adicionais de ensaios

similares ao da pesquisa, para se obter um banco de dados confiável, de modo a ser possível avaliar a variação da perda de massa devido ao impacto de ondas, com o nível de sucção em que o solo se encontra (se nos macroporos ou microporos do solo).

4.5 INFLUÊNCIA DA CIMENTAÇÃO DO SOLO NA SUA PERDA DE MASSA

Na Figura 4.15 visualiza-se o aspecto das superfícies de dois dos corpos de prova após os ensaios de erodibilidade, sendo um deles moldado a partir de um bloco de amostra indeformada, com teor de umidade igual a 15,7%, e o outro remoldado a partir da compactação estática da amostra deformada do mesmo solo, com teor de umidade igual a 14,8%.

Figura 4.15 – Aspecto dos corpos de prova após ensaios de erodibilidade: (a) Corpo de prova confeccionado com a amostra indeformada, w = 15,7% e (b) Corpo de prova confeccionado com a amostra remoldada, w = 14,8%.



A Tabela 4.6 apresenta as perdas de massa de 2 corpos de prova remoldados por compactação estática e de 2 corpos de prova confeccionados a partir de amostras indeformadas, estando os mesmos com teores de umidade similares a cada dupla.

Tabela 4.6 – Perdas de massa de corpos de prova confeccionados com as amostras remoldada e indeformada, com teores de umidade similares.

Corpo de prova	Tipo de Amostra	Teor de umidade (%)	Sucção inicial (kPa)	Perda de massa (%)
01	Indeformada	15,7	5500	5,2
02	Remoldada	14,8	6000	25,6
03	Indeformada	11,5	10000	8,2
04	Remoldada	12,2	9000	27,3

Analisando-se visualmente a superfície dos corpos de prova da Figura 4.15 e comparando-se os resultados das perdas de massa percentuais desses corpos de prova, apresentados na Tabela 4.6, fica nítida a grande influência das cimentações dos grãos do solo na erodibilidade devido à ação de ondas, atingindo-se diferenças de perda de massa da ordem de 20%, mesmo a amostra indeformada sendo mais porosa que a deformada, conforme verificado na Tabela 4.6.

Essa diferença entre as perdas de massa coincide com os resultados obtidos por Schliewe (2018), ao comparar os valores de taxas de erosão de amostras indeformadas em relação às taxas de erosão de amostras remoldadas por compactação estática obtidas por Menezes (2017), em ensaios de erodibilidade devido ao impacto de ondas.

Schliewe (2018) aponta que a maior taxa de erosão das amostras remoldadas em relação às indeformadas era esperado, visto que a energia de compactação aplicada na confecção dos corpos de prova de Menezes (2017) foi suficiente apenas para atingir o índice de vazios natural do solo.

A influência da estrutura do solo frente processos erosivos também é comentada por Bastos (1999), ao afirmar que o efeito das cimentações oriundas da evolução pedogenética do solo é eliminado na compactação, e a resistência à erosão passa a ser dependente apenas da nova estrutura gerada pela compactação do solo.

4.6 INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE INICIAL NA DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS

A Tabela 4.7 apresenta a distribuição da deposição de sedimentos no canal hidráulico, em g/m², obtida pela divisão da massa dos sedimentos depositados em cada região do canal, pelasua respectiva área horizontal de piso, ou seja, largura do canal multiplicada pelo comprimento de cada região. A Figura 4.16 apresenta graficamente, a referida distribuição de sedimentos no canal, em g/m², enquanto que a Figura 4.17 apresenta a distribuição de sedimentos no canal em termos percentuais.

Tabela 4.7 – Distribuição dos sedimentos ao longo do canal hidráulico, devido à perda de massa dos corpos de prova durante os ensaios de erodibilidade.

Amostra	Teor de umidade inicial (%)	Perda de massa por trecho do canal (g/m²)					
		A (4,0 m < L ≤ 10,0 m)	B (3,0 m < L ≤ 4,0 m)	C (2,0 m < L ≤ 3,0 m)	D (1,0 m < L ≤ 2,0 m)	E (0,5 m < L ≤ 1,0 m)	F (0,0 m < L ≤ 0,5 m)
Indeformada	15,7	0,0	37,2	19,8	142,5	525,8	196,1
Remoldada	14,8	56,8	66,0	206,3	862,9	4438,1	1867,6
Remoldada	20,0	0,0	0,0	118,1	469,6	5518,1	1055,4
Remoldada	12,2	179,4	148,3	349,7	820,7	4067,0	1872,0
Indeformada	11,5	0,0	0,0	49,2	163,2	1858,4	154,2
Remoldada	25,0	0,0	205,8	116,3	256,9	3145,2	239,1
Remoldada	30,0	0,0	0,0	3,8	40,0	215,5	4,3

Figura 4.16 – Distribuição de sedimentos ao longo das 6 regiões do canal hidráulico em g/m².

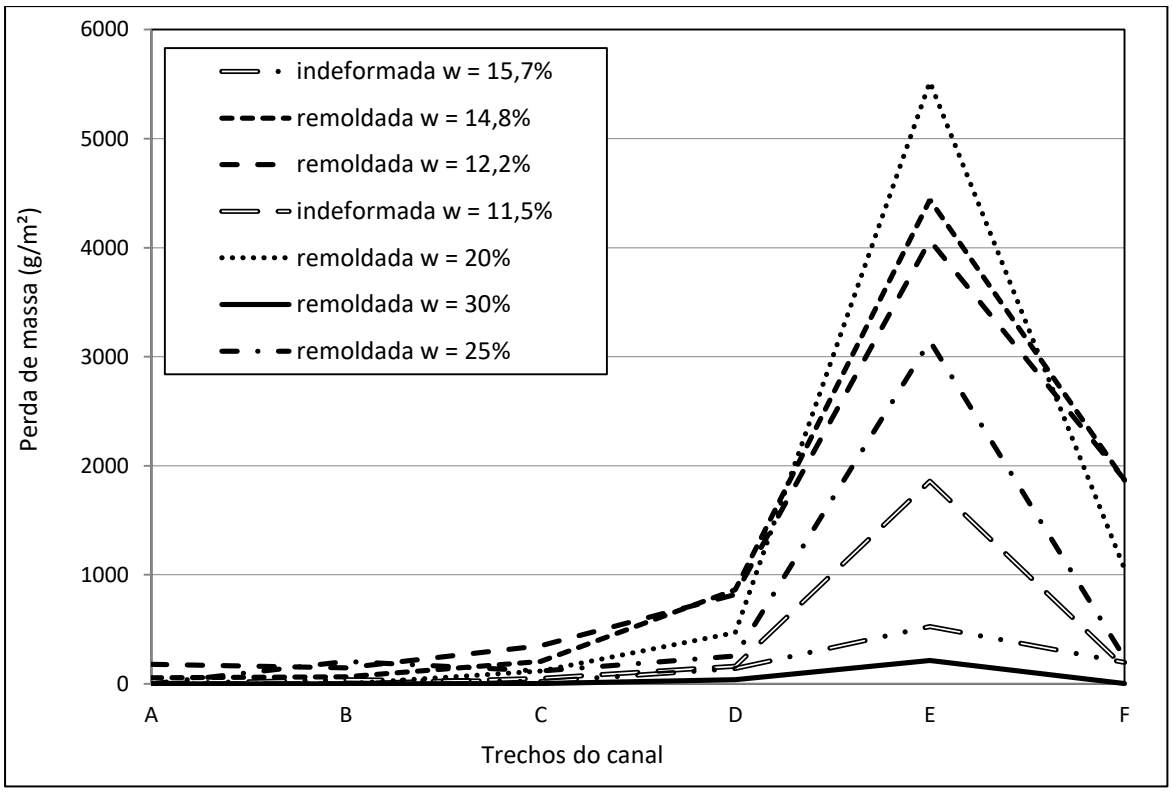
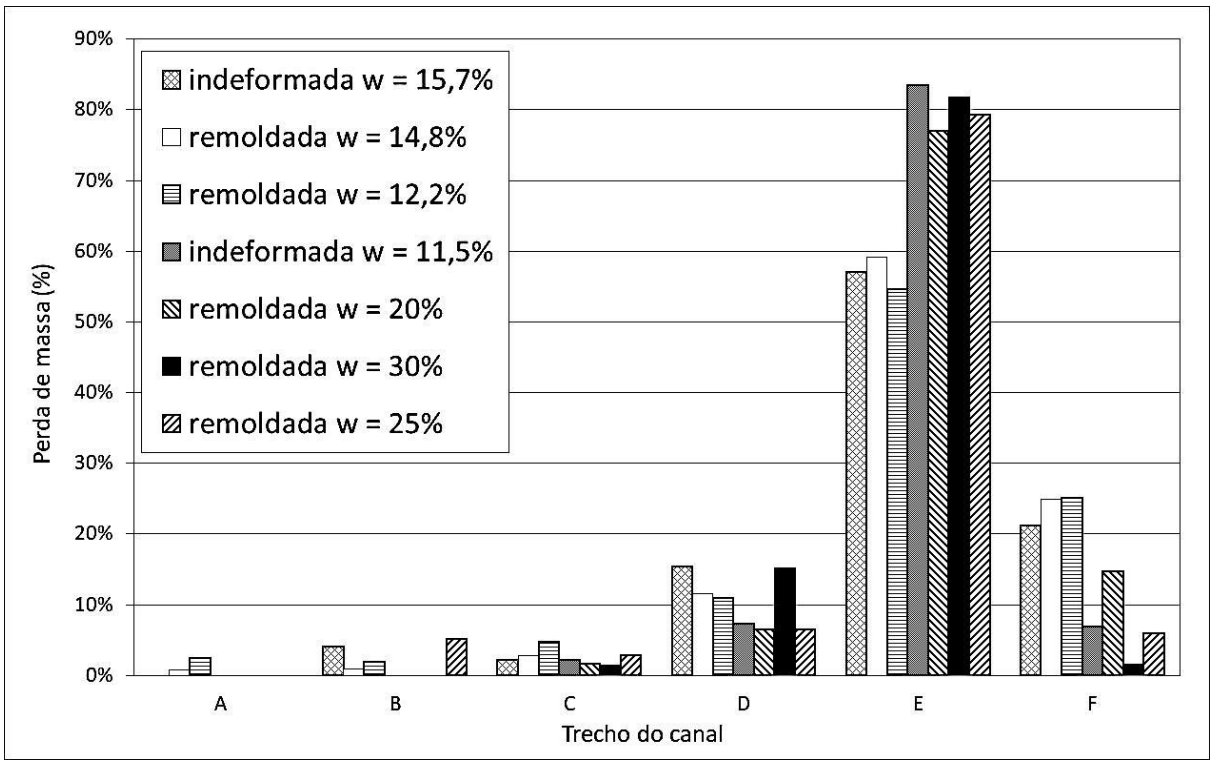


Figura 4.17 – Distribuição de sedimentos ao longo das 6 regiões do canal hidráulico em percentagem.



De maneira geral, observando-se os resultados apresentados na Tabela 4.7, as curvas da Figura 4.16 e o gráfico da Figura 4.17, constata-se um comportamento similar em todos os ensaios, caracterizado por uma maior concentração de sedimentos na região logo à frente da superfície dos corpos de prova, atingindo percentuais acima de 50% do total de sedimetnos, neste trecho. As concentrações de sedimentos tornaram-se cada vez mais reduzidas à medida que se distanciou dos corpos de prova. Adicionalmente, constatou-se diminuição de sedimentos depositados na região posterior à rampa do canal hidráulico. A redução da concentração de sedimentos com o aumento da distância em relação à superfície dos corpos de prova, apresentou tendência similar à encontrada por Maa (1988), em seu trabalho de monitoramento da concentração instantânea de sedimentos gerados pelo impacto de ondas em um canal hidráulico.

Em grandes reservatórios, a maior parte dos sedimentos gerados por erosão hidráulica se depositam logo na entrada do reservatório, ou seja, no delta do reservatório, à medida em que a velocidade de transporte de sedimentos reduz sobremaneira, com a formação do mesmo. Na região mais a montante do barramento ocorre o acúmulo de partículas mais grossas (pedregulhos e areias), que se sedimentam primeiro, formando os chamados depósitos de remanso. Ao se adentrar o reservatório, a granulometria dos sedimentos diminui

gradativamente, formando os depósitos de delta, caracaterizados por materiais de diversas granulometrias (areia fina, silte e argila), que avançam para o interior do corpo hídrico e, mais próximo ao barramento, formam-se os chamados depósitos de fundo, constituídos por materiais mais finos (silte e argila), que afetam o volume morto do reservatório. Adicionalmente, também existe os depósitos de margem (*overbank*), que se origina do acúmulo de material advindo dos sedimentos gerados pelas ondas, e que se acumulam próximos das margens dos reservatórios (VANONI, 1977; SANTOS, MIRANDA E MAUAD, 2018).

Face ao entendimento do comportamento geral de transporte e deposição de sedimentos em grandes reservatórios, depreende-se que o padrão de distribuição de sedimentos seguiu a têndencia observada nesses corpos hídricos, qual seja, depósito de material erodido mais próximo às margens do reservatório, quando se trata de erosão devido ao impacto de ondas (*overbank*).

A maior quantidade de sedimentos depositados, independente do teor de umidade inicial dos corpos de prova, se concentrou na região E, correspondente a um trecho entre 0,5 a 1,0 m distante da extremidade onde se localiza a rampa do canal hidráulico. Não deveria ocorrer acúmulo de sedimentos na região F (0,0 a 0,5 m), pois a rampa do canal simula o talude das bordas de um reservatório, de modo que todo sedimento gerado pela perda de massa do solo se acumularia no trecho entre o pé da rampa até a extremidade oposta do canal. Entretanto, devido à ausência de vedação entre a interface rampa-paredes do canal, houve acúmulo de sedimentos na região F (0,0 a 0,5 m). Embora a quantidade de sedimentos depositados na região F seja de menor monta em relação a da região E, esta se constituiu a segunda região de maior depósito ao longo do canal.

De maneira geral, o padrão de distribuição dos sedimentos depositados ao longo do canal foi bastante similar àquele obtido por Schliewe (2018) e Vilhena (2019), com a diferença de que nos trabalhos desses autores, a maior quantidade de sedimentos depositados ocorreu na região F, ou seja, correspondente a um trecho distante entre 0,0 e 0,5 m da extremidade onde se encontra a rampa do canal hidráulico e localizado atrás da mesma.

Uma explicação para a referida diferença entre distribuição de sedimentos obtida nesta pesquisa e a obtida nos trabalhos de Schliewe (2018) e Vilhena (2019), pode estar no fato de que o primeiro autor empregou frequências de ondas e declividades da rampa acima daquela

utilizada nessa pesquisa, exceto para os dois primeiros ensaios realizados. O segundo autor empregou uma declividade superior (45°) e uma frequência similar à desta pesquisa (0,50 Hz). Ressalta-se ainda o fato de que ambos utilizaram em todos os ensaios de erodibilidade, corpos de prova confeccionados a partir de amostras indeformadas.

As Figuras de 4.18 a 4.22 apresentam as curvas granulométricas dos sedimentos em cada região do canal hidráulico, para os ensaios realizados com os corpos de prova remoldados por compactação estática, obtidas pelas análises no granulômetro a laser.

Figura 4.18– Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 12,2%.

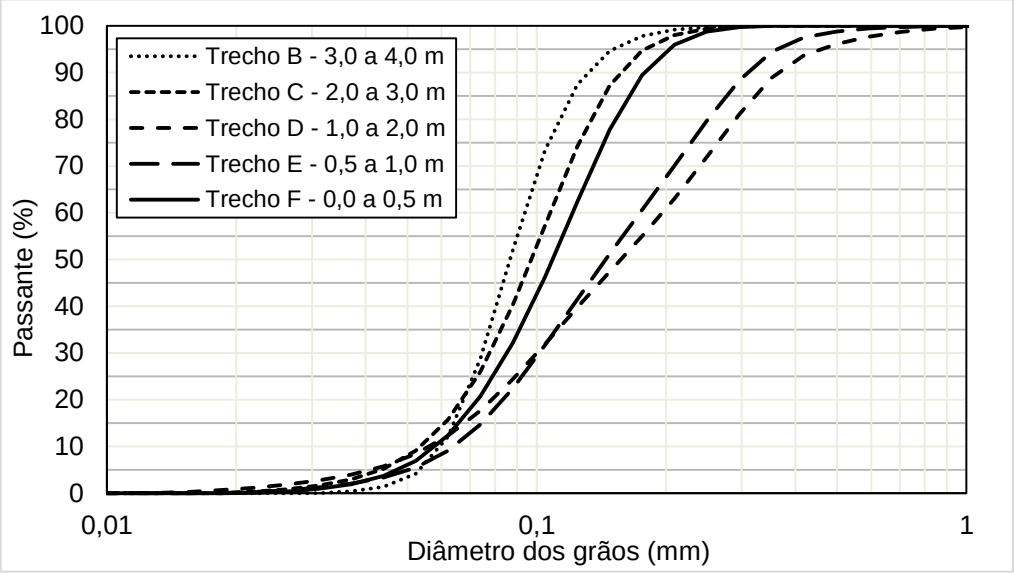


Figura 4.19 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 14,8%.

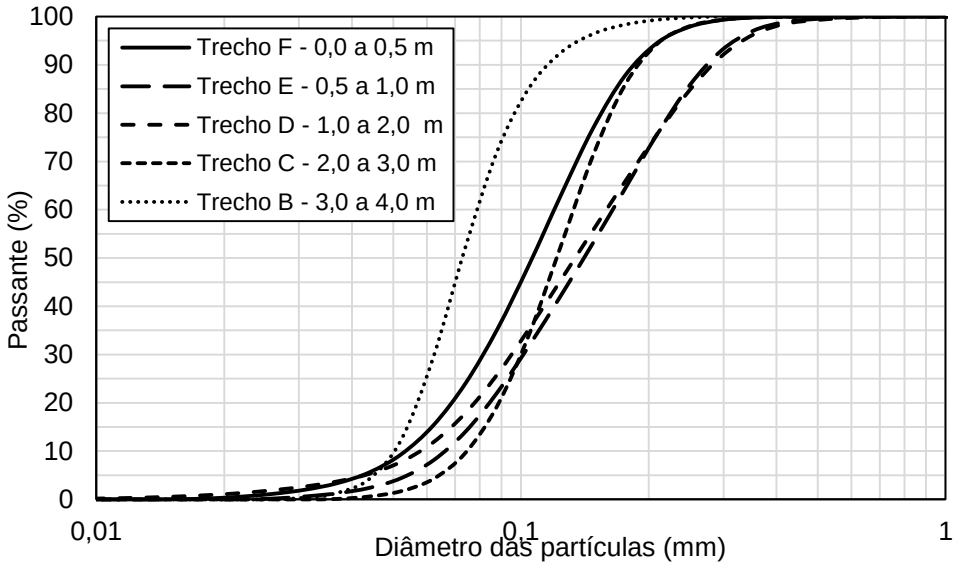


Figura 4.20 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 20,0%.

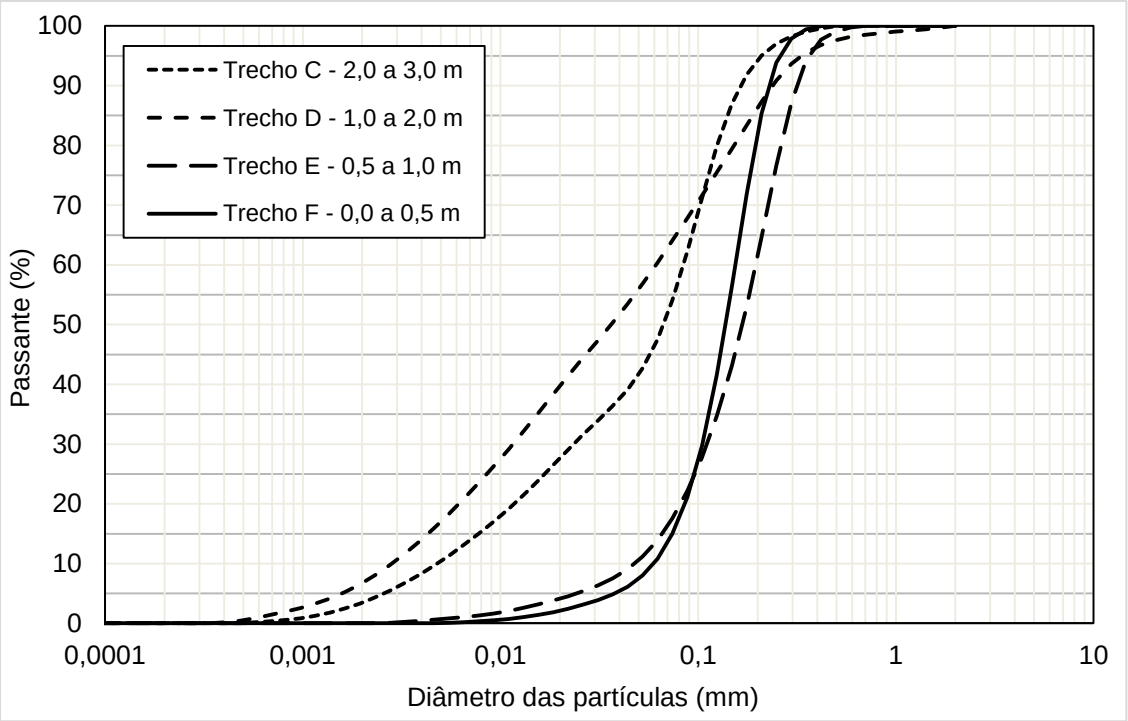


Figura 4.21 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 25,0%.

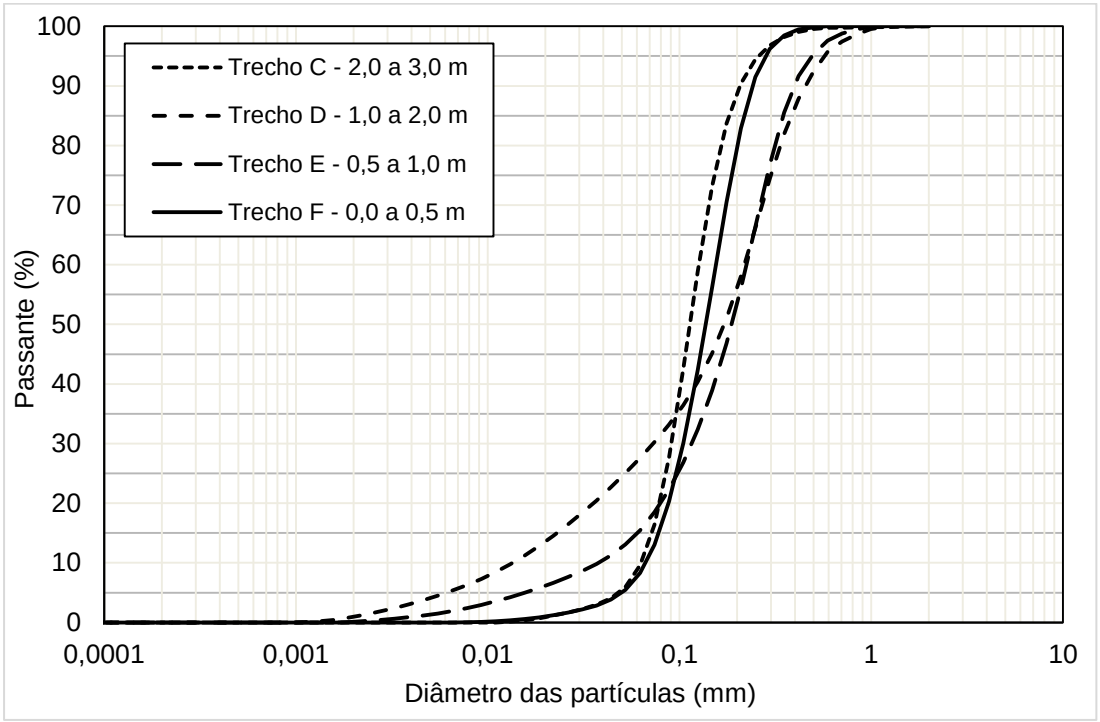
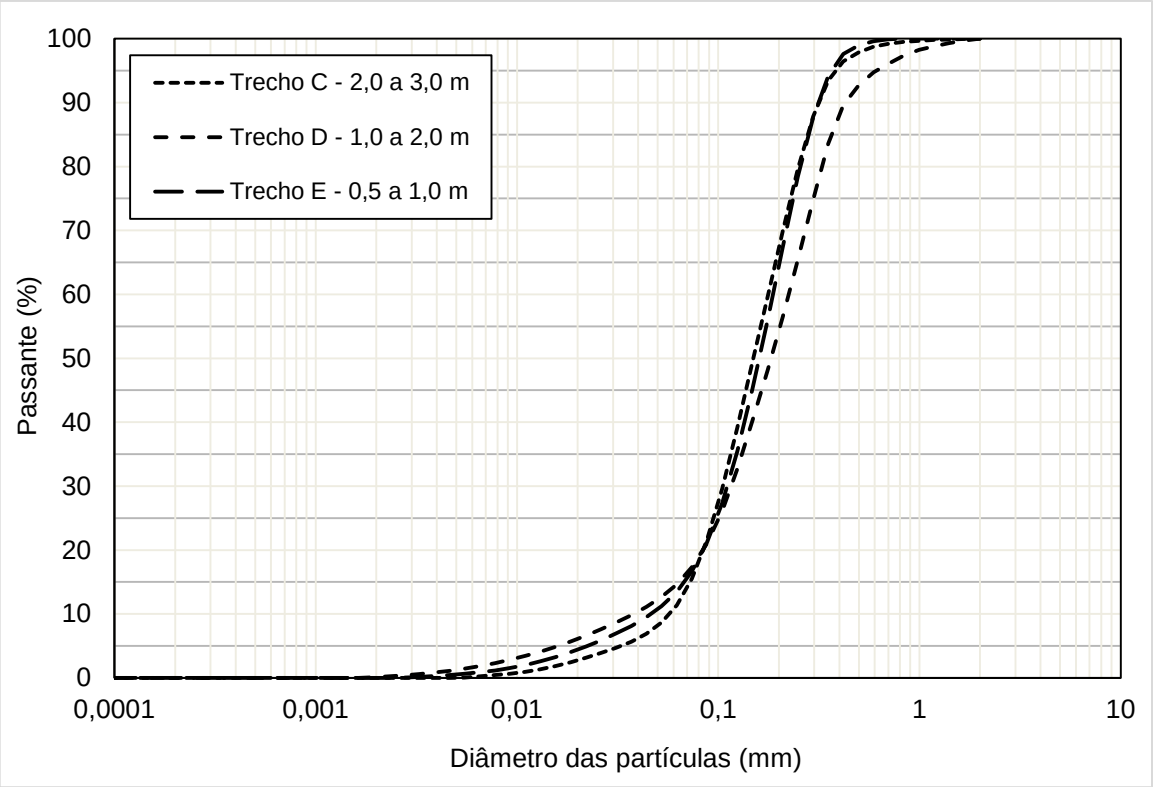


Figura 4.22 – Distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do canal, para o corpo de prova com umidade inicial igual a 30,0%.



Quanto às distribuições granulométricas dos sedimentos retidos na peneira de malha # 74 μm ao longo das 6 regiões do canal hidráulico, apresentadas nas Figuras de 4.18 a 4.22, constata-se uma tendência geral, em todos os ensaios, de diminuição do tamanho das partículas de sedimentos com o aumento da distância ao corpo de prova, ou seja, uma diminuição do tamanho das partículas da região E para a região B.

Na região F ocorreu a deposição de menores partículas, quando comparada à região E, contrariando a referida tendência. Isso comprova que a rampa do canal hidráulico, funcionou como uma barreira que impediu a deposição de grãos maiores na região F.

Na região A do canal, ou seja, a partir de 4,0 m de distância da extremidade onde se localizada a rampa, praticamente não se visualizou depósitos de sedimentos, razão pela qual não foram executadas análises granulométricas para os sedimentos acumulados nessa região.

A distribuição granulométrica dos sedimentos depositados ao longo do canal apresentou tendência similar à encontrada por Schliewe (2018) e Vilhena (2019), indicando a deposição da fração mais grossa dos sedimentos nas regiões mais próximas dos corpos de prova. Destaca-se ainda, que os referidos autores não detectaram nenhuma influência da rampa do

canal hidráulico na distribuição dos sedimentos.

Este padrão de distribuição granulométrica de sedimentos decorrentes de processos erosivos é predominante em grandes reservatórios, com acúmulo de frações mais grossas mais a montante do barramento e de materiais mais finos, tais como silte e argila, mais próximos ao barramento.(CABRAL *et al*., 2009; VANONI, 1977; SANTOS, MIRANDA; MAUAD 2018; LAWSON, 1985). Diante do exposto, infere-se portanto, que as superfícies dos corpos de prova representaram as margens do reservatório, sujeitas à erosão devido à ação das ondas, e o canal hidráulico o reservatório.

Nas Figuras 4.23 a .4.27, pode-se visualizar a distribuição granulométrica dos sedimentos depositados para cada região do canal hidráulico, em função da variação do teor de umidade inicial de cada corpo de prova remoldado por compactação estática, exceto para a região A, uma vez que não se constatou visualmente acúmulo de sedimentos nessa região.

Figura 4.23 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região B, compreendendo o trecho de 3,0 a 4,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.

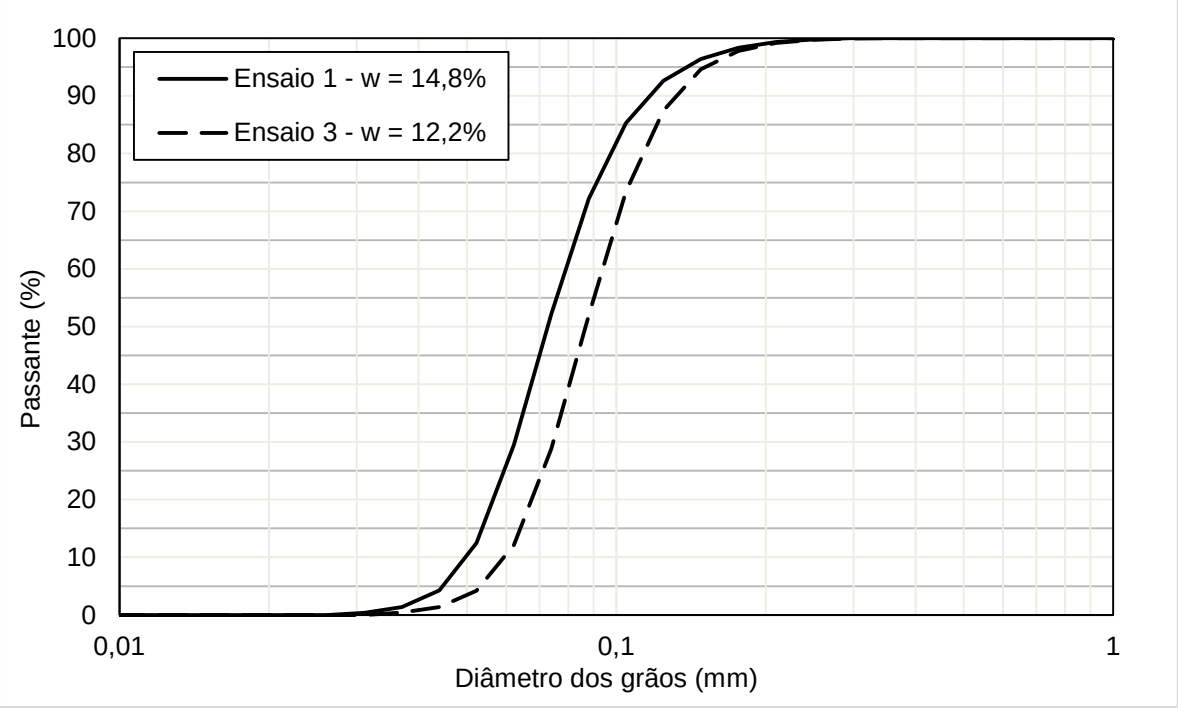


Figura 4.24 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região C, compreendendo o trecho de 2,0 a 3,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.

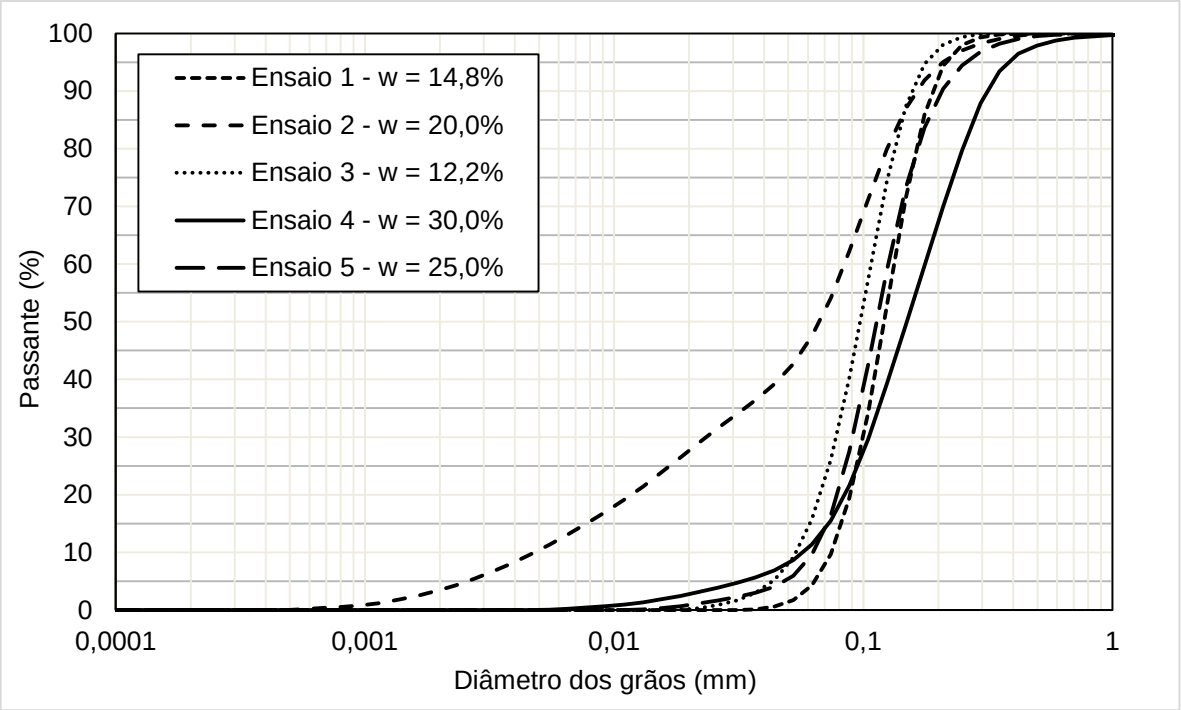


Figura 4.25 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região D, compreendendo o trecho de 1,0 a 2,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.

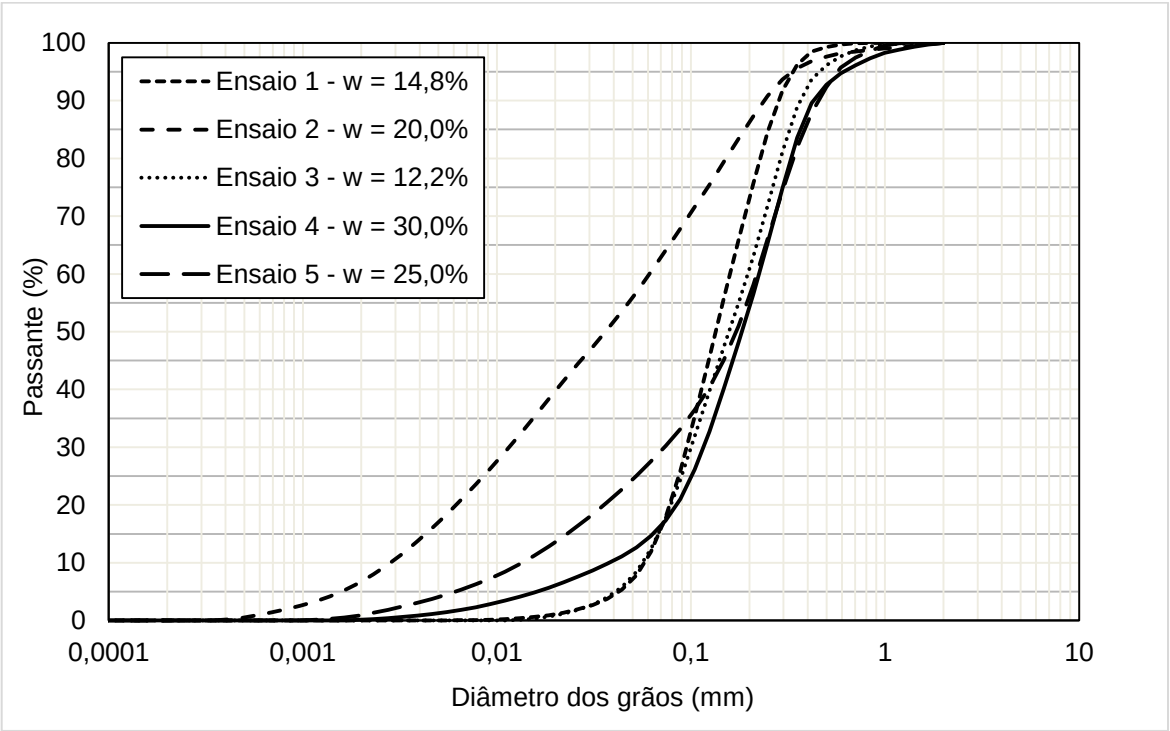


Figura 4.26 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região E, compreendendo o trecho de 0,5 a 1,0 m distante da extremidade do canal hidráulico.

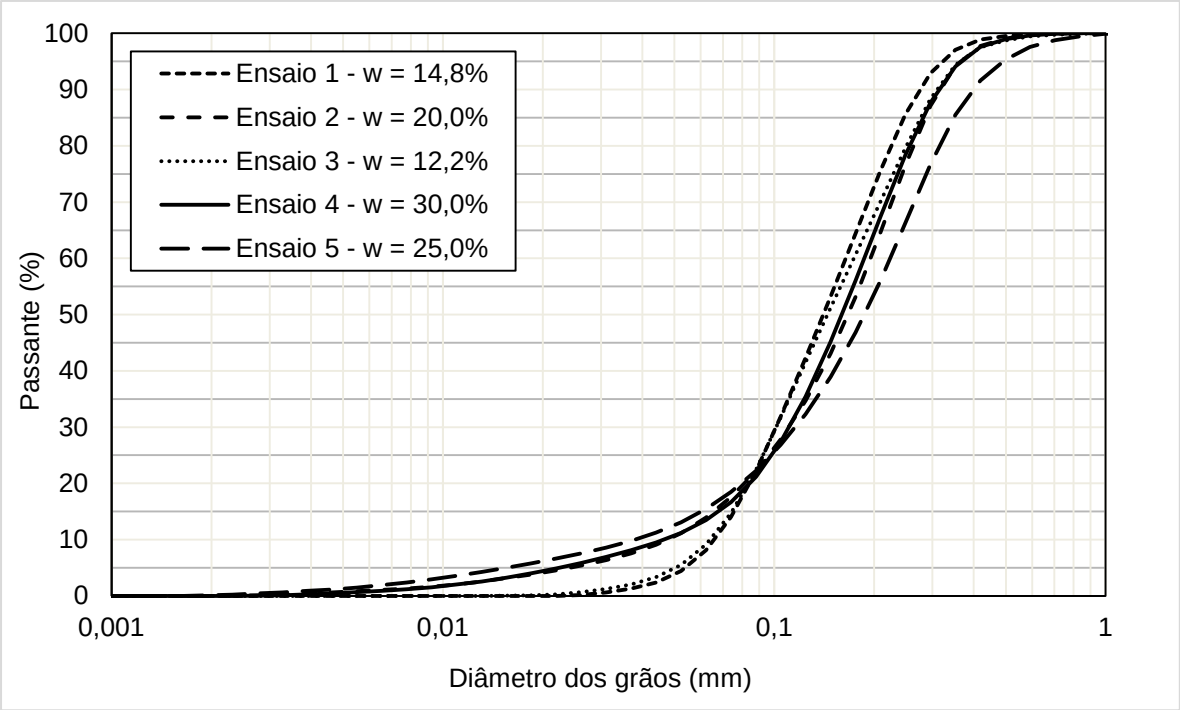
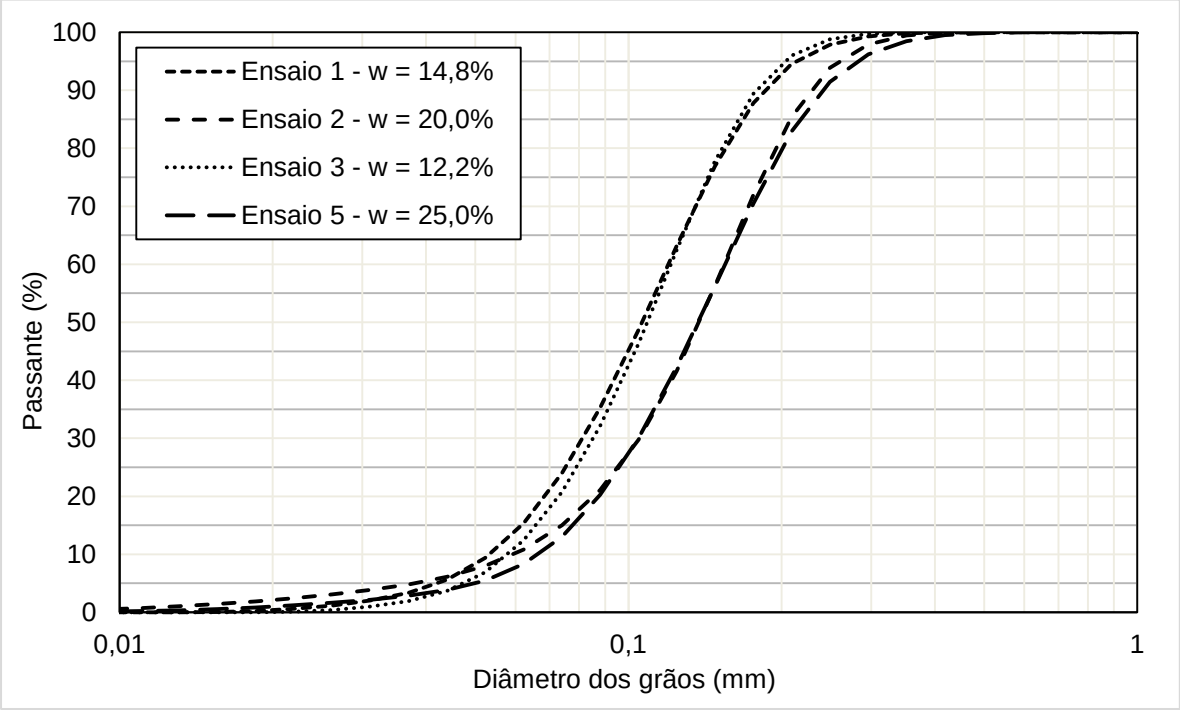


Figura 4.27 – Distribuição granulométrica dos sedimentos depositados na região F, compreendendo o trecho de 0,0 a 0,5 m distante da extremidade do canal hidráulico .



Analisando-se detalhadamente as Figuras 4.23 a 4.27, verifica-se que o teor de umidade inicial dos corpos de prova remoldados por compactação estática não exerceu influência

significativa na distribuição grunulométrica dos sedimentos distribuídos ao longo do canal hidráulico, quando se considera as regiões E e F, mais próximas dos corpos de prova, obtendo-se desvios padrões da ordem de 6,0%, pouco acima do desvio padrão máximo (5,0%) geralmente encontrado nas análises granulométricas utilizando o granulômetro a laser da EECA da UFG

Nas regiões do canal mais distantes dos corpos de prova (regiões B, C e D), encontrou-se uma alta variabilidade entre as distribuições granulométricas dos sedimentos coletados em cada ensaio de erodibilidade, quando se considera a alteração do teor de umidade inicial, obtendo-se valores crescentes de desvio padrão, que variou de 7,0% a 15,0%.

De modo geral, nas regiões C e D, constatou-se que, para os corpos de prova com maior teor de umidade inicial (25% e 30%), os sedimentos apresentaram-se com textura mais grossa, quando comparados aos teores de umidade iniciais menores (12,2%, 14,8% e 20%), por outro lado, para o teor de umidade inicial de 20%, os sedimentos apresentaram-se com textura mais fina. Não se observou uma tendência clara quanto à influência do teor de umidade inicial na distribuição granulométrica dos sedimentos dispostos nessas duas regiões.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A metodologia utilizada na pesquisa mostrou-se eficiente para avaliar a influência da sucção inicial de corpos de prova confeccionados a partir de amostras remoldadas por compactação estática, e indeformadas, na erodibilidade do solo. Observou-se que a perda de massa destes corpos de prova é diretamente proporcional à sua sucção inicial e por conseguinte, inversamente proporcional ao teor de umidade inicial. Constatou-se ainda que essa relação é aproximadamente linear, quando se considera corpos de prova remoldados por compactação estática, colocando-se os valores correspondentes à sucção inicial em escala logarítimica. Esses resultados estabelecem uma relação clara entre a estrutura do solo, no que se refere à sucção nos seus macros e microporos, e a sua erodibilidade..

Os resultados das caracterizações convencionais e complementares apresentaram-se compatíveis com as características típicas de solos lateríticos, como a presença de agregações de partículas do solo, macroporos entre agregações e microporos intra-agregações, e ocorrência de minerais comumente encontrados neste tipo de solo, quais sejam, óxidos hidróxidos de ferro e alumínio (goethita e gibsita) e quartzo, os quais também foram similares a resultados de caracterização de pesquisas pretéritas realizadas com o solo coletado no mesmo local.

A análise comparativa referente aos resultados dos ensaios de erodibilidade, executados com corpos de prova confeccionados com amostras remoldadas por compactação estática e indeformada, com umidades iniciais aproximadamente similares, indicou maiores taxas de erodibilidade para os corpos de prova remoldados, atingindo diferenças da ordem de 20% em relação às taxas obtidas para os corpos de prova confeccionados com os blocos indeformados, o que confirma a grande influência que a cimentação natural dos grãos do solo exerce na sua taxa de erodibilidade. Este é o fator principal que impede o aumento das taxas de erodibilidade, quando se considera o efeito do impacto das ondas nos taludes naturais de solo laterítico.

Cabe ressaltar ainda, que aliada à cimentação natural dos grãos dos solos lateríticos, também contribui para a resistência aos processos erosivos destes tipos de solo, a sua estrutura, no que tange ao formato e o intertravamento dos aglomerados advindos da cimentação.

Quanto à distribuição granulométrica dos sedimentos gerados pelo impacto de ondas nos corpos de prova, constatou-se que, quanto mais distante dos corpos de prova, mais finos foram os sedimentos.

Não se observou uma influência clara do teor de umidade inicial na distribuição granulométrica dos sedimentos advindos da perda de massa dos corpos de prova remoldados por compactação estática. Nesse quesito, constatou-se aparentemente que, para maiores teores de umidade, a textura dos sedimentos torna-se mais grosseira. Os resultados das análises da distribuição granulométrica dos sedimentos de laboratório indicou uma grande similaridade em relação ao transporte e distribuição de sedimentos em reservatórios.

No sentido de ampliar a compreensão sobre o fenômeno da erodibilidade devido ao impacto de ondas em grandes reservatórios, o qual se constitui um dos principais fatores de perda de capacidade destes, sugere-se, para um aprofundamento do conhecimento deste tema, algumas linhas gerais de pesquisa a serem futuramente desenvolvidas:

- Avaliar o avanço das frentes de molhagem durante os ensaios de erodibilidade, mediante instrumentação de diferentes regiões dos corpos de prova com tensiômetros, para possibilitar o monitoramento das sucções do solo durante os referidos ensaios;
- Executar ensaios para avaliação da influência da sucção na perda de massa em corpos de prova de amostras indeformadas, a partir da variação do seu teor de umidade inicial;
- Realizar estudos de campo, monitorando a perda de massa de um talude real, devido ao impacto de ondas, empregando medições periódicas para determinar a variação do volume de solo perdido em determinado período, por meio de um *scanner*. Paralelamente, monitorar ainda as sucções ao longo desse mesmo período, com tensiômetros instalados neste talude, em diferentes pontos, e posteriormente correlacionar as perdas de massa obtidas com as sucções medidas;
- Efetuar modelagem numérica da perda de massa de um solo devido ao impacto de ondas, considerando a influência da sucção inicial, declividade do talude, energia das ondas, grau de compactação, dentre outros;

- Estudar a erodibilidade devido ao impacto de ondas, associando-se ainda a influência das precipitações pluviométricas, mediante a simulação de chuvas com diferentes pluviosidades incidindo sobre a superfície dos corpos de prova durante os ensaios de erodibilidade;
- Avaliar a influência da sucção inicial do solo na perda de massa devido ao impacto de ondas, considerando diferentes tipos de solo, além do solo laterítico;
- Realizar estudos similares ao desta pesquisa, empregando-se canais hidráulicos com dimensões aproximadamente iguais (largura e comprimento), no sentido de se analisar o fator de forma do canal, na perda de massa do solo devido à ação de ondas.

REFERÊNCIAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250**: Identificação e descrição de amostras de solo obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, RJ. 1982, 3 p.

ABNT_____. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ. 2016c. 8 p.

ABNT_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 2016d. 10 p.

ABNT_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ. 2016f. 5 p.

ABNT_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ. 2016g. 3 p.

ABNT_____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ. 2016e. 12 p.

ABNT_____. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2016a. 9 p.

ABNT_____. **NBR 9813**: Solo - Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação, Rio de Janeiro, RJ. 2016b. 8 p.

ABNT_____. **NBR 13602**: Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 1996, 5 p.

ABNT_____. **NBR 9603**: Sondagem a trado - Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2015, 5 p.

AIELLO, A.; ADAMO, M.; CANORA, F. Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy. **Catena**. Elsevier, New York, 131, p. 174-185, 2015. DOI: 10.016/j.catena.2015.04.003.

AL HAJ, K. M. A.; STANDING, J. R. Soil water retention curves representing two tropical clay soils from Sudan. **Géotechnique**. ICE Publishing, London, U. K., 66, p. 71-84, 2016. DOI: 10.1680/jgeot.15.P.086.

ALMEIDA, J. G. R.; ROCHA, M. F.; GITIRANA JR, G. F. N. A Influência da Sucção na Erodibilidade de um Solo Compactado: estudo de caso em um solo erosivo do Córrego Barreiro. *In*: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE E 6º SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS – GEOCENTRO 3, 2013, Cuiabá, Mato Grosso. **Anais...**Cuiabá: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2013. p. 63-69.

ALMEIDA, J. G. R.; ROMÃO, P. A.; MASCARENHA, M. M. A.; SALES, M. M. Erodibilidade de Solos Tropicais não Saturados nos Municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO.**Geociências**. São Paulo, Volume 34. P. 441-451. 2015.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RECURSOS HÍDRICOS - APRH. **Glossário de ondas marinhas**. Disponível em: http://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html. Acessado em 28/09/2018.

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6836-02:** Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Chararcteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge. 20p. West Conshohocken, PA, 2003.

ASTM_____. **ASTM D5298-10:** Standard Test Methods for Measurement of Soil Potential Using Filter Paper. 6p. West Conshohocken, PA, 2010.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y.Y.; MILITITSKY, J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil.** Ed. Dunas. Rio Grande, Rio Grande do Sul. Vol. 1, nº 2, p. 9-18, 2001. ISSN 1677-3047.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J; GEHLING, W. Y. Y. Avaliação da erodibilidade dos solos sob o enforque geotécnico – pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil.** Ed. Dunas. Rio Grande, Rio Grande do Sul. Vol. 1, nº 1, p. 17-25, 2000. ISSN 1677-3047.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 303 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

BRIAUD, J. L.; GOVINDASAMY, A. V.; SHAFII, I. Erosion charts for selected geomaterials. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE. Reston, VA, 143, p. 1-13, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001771.

CABRAL, J. B. P.; FERNANDES, L. A.; SCOPEL, I.; BECEGATO, V. A.; FIORI, A. P. Avaliação do estado de assoreamento do reservatório de Cachoeira Dourada (GO/MG). **Sociedade & Natureza**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. Vol. 21, n° 1, p. 97-119, 2009. ISSN 0103-1570.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C. Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. *In*: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, Vilar, O. M., EESC-USP, v. 2. São Carlos, Brasil. **Anais...**p. 1-22. 2004.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C.; BARBOSA, M. C.; MENDONÇA, R. M. G.; FARIAS, W. M.; CARDOSO, F. B. F. **Capítulo 3: Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados.** *In*: CARVALHO, J. C.; JÚNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, p 39-78.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C.; GOUTTE, M.; GITIRANA JR., G. F. N.; MASCARENHA, M. M. A.; GUIMARÃES, R. C.; LUZ, M. P. A sucção no contexto dos processos erosivos. *In*: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG. ABMS. Goiânia-GO. **Anais...** p. 1-8. 2014.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁCIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A.**Capítulo 2: Processos Erosivos.** *In*: CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro.** Brasília: Editora FINATEC, 2006, p 39-91.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C; LEROUEIL, S. Modelo de normalização da curva caracterítisca. *In*: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Brasília-DF. **Anais...** p. 96-106. 2000.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília. ANEEL, 2000. 140 p.

CHANG, T. J.; BAYES, T. Development of erosion hotspots for a watershed. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering.** ASCE. Reston, VA, 139, p. 1011-1017, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000648.

CHENG, M. H.; HSU, J. R. C. Effect of frontal slope on waveform evolution of a depression interfacial solitary wave across a trapezoidal obstacle. **Ocean Engineering**. Elsevier. New York, 59, p. 164-178, 2013. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.12.011.

CONCIANI, W.; BURGOS, P. C.; BEZERRA, R. L. **Capítulo 2: Origem e formação dos solos, perfis de intemperismo**. *In*: CARVALHO, J.C.; GITIRANA JR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, p 21-37.

CUOMO, S.; CHAREYRE, B.; D'ARISTA, P.; SALA, M. D.; CASCINI, L. Micromechanical modelling of rainsplash erosion in unsaturated soils by Discrete Element Method. **Catena**. Elsevier, New York, 147, p. 146-152, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.07.007.

CUOMO, S.; SALA, M. D.; PIERRI, M. Experimental evidences and numerical modelling of runoff and soil erosion in flume tests. **Catena**. Elsevier, New York, 147, p. 61-70, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.06.044.

D'ARMADA, J. C. R. **Como as ondas geradas pelo vento e as características da vegetação ciliar influenciam erosões em margens de reservatórios: UHE Porto Colômbia, um estudo de caso**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water Waves Mechanics for Engineers and Scientists.** 1ª Edição. World Scientific Publishing, 1991. Volume 2. 353 p.

DUARTE, L.; TEODORO, A. C.; GONÇALVES, J. A.; SOARES, D.; CUNHA, M. Assessing soil erosion risk using RUSLE through a GIS open source desktop and web application. **Environmental Monitoring and Assessment**. Springer International Publishing, New York, 188, p. 1-16, 2016. DOI: 10.1007/s10661-016-5349-5.

EVANGELISTA, S. Experiments and numerical simulations of dike erosion due to a wave impact. **Water**. MDPI, Basel, Switzerland, 7, p. 5831-5848, 2015. DOI: 10.3390/w7105831.

FABBRI, G.T.P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno.** 1994. 157 f.Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos - SP, 1994.

FORMIGA, K. T. M.; VASCO, J. R. G.; PEREIRA, T. S. R. **Capítulo 12: Monitoramento e modelagem de ondas em reservatório**. *In:* SALES, M. M.; CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUZA, N. M.; ANGELIM, R. R. (Org.). **Erosão em Borda de Reservatório**. 1ª Edição, Série GECON. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, 2017. Volume 3.p 257-276.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND M. D.**Unsaturated soil mechanics in engineering practice**. New Jersey: John Wiley& Sons INC, 2012, 909 p.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Sistema de Segurança de Barragens - SSB**. Disponível em http://intranet/SSBFurnas/. Acessado em 12/09/2019.

GABRIELI, F.; LAMBERT, P.; COLA, S.; CALVETTI, F. Micromechanical modelling of erosion due to evaporation in a partially wet granular slope. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**. John Wiley & Sons, Ltd., New Jersey, 36, p. 918-943, 2012. DOI: 10.1002/nag.

GITIRANA JR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A. **Capítulo 9: A curva de retenção de água de materiais porosos.** *In*: CARVALHO, J.C.; JÚNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, p 205-229.

GONÇALVES, I. A. **Parametrização dos efeitos da quebra de ondas oceânicas e gotículas na modelagem numérica dos processos de troca de CO_2, momentum e calor na interface oceano-atmosfera**. 2014. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2014.

GUIMARÃES, R. C.; SILVA, H. H. A. B.; OLIVEIRA, R. B.; GONZÁLES, Y. V.; FARIAS, W. M.; CARVALHO, J. C. **Capítulo 10: A micromorfologia no contexto das erosões de borda de reservatórios.***In:* SALES, M. M.; CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUZA, N. M.; ANGELIM, R. R. (Org.). **Erosão em Borda de Reservatório**. 1ª Edição, Série GECON. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, 2017. Volume 3. p 209-227.

JACINTHO, E. C.; CARVALHO, J. C.; CARDOSO, F. B. F; SANTOS, R. M. M; GUIMARÃES, R. C.; LIMA, M. C. G. **Capítulo 3: Solos tropicais e o processo erosivo.** *In*: CARVALHO, J.C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro.** Brasília: Editora FINATEC, 2006, p 92-156.

JAYANTH, S.; IYER, K.; SINGH, D. N. Influence of drying and wetting cycles on SWCCs of fine-grained soils. **Journal of Testing and Evaluation.** ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. v. 40, 3, p. 376-386, 2012. DOI: 10.1520/JTE104184.

JESUS, A. S. **Investigação multidisciplinar de processos erosivos lineares: estudo de caso da cidade de Anápolis-GO**. 2013. 367 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2013.

JESUS, A. S.; SOUSA, M. S.; NASCIMENTO, D. T. F.; ROMÃO, P. A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Capítulo 8: A influência de aspectos geomorfológicos, de cobertura do solo e climáticos no surgimento e evolução de processos erosivos no entorno de reservatório**. *In:* SALES, M. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUZA, N. M.; ANGELIM, R. R. (Org.). **Erosão em Borda de Reservatório**. 1ª Edição, Série GECON. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, 2017. Volume 3. p 171-194.

JI, F.; LIU, C.; ZHOU, H.; LIU, H.; LIAO, Y. Identifying the influences of geological factors on reservoir bank collapse by a model test, VA, USA. **Environmental Monitoring and Assessment**. Springer-Verlag. Berlin, 77, p. 127-139, 2016. DOI: 10.1007/s10064-016-0951-x.

LAWSON, D. E. **Erosion of northern reservoir shores, and analysis at application of pertinent literature**. 1985. CRREL. Monograph 85-1, USACE: Hanover, NH, USA, p. 35-37, 1985.

LUIZ, G. C.; GITIRANA JR, G. F. N.; ROMÃO, P. A.; ALMEIDA, F. P. **Capítulo 6: Interação solo-atmosfera e a sua relação com erosão em borda de reservatórios**. *In:* SALES, M. M.; CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUZA, N. M.; ANGELIM, R. R. (Org.). **Erosão em Borda de Reservatório**. 1ª Edição, Série GECON. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, 2017. Volume 3.p 127-151.

LUZ, M. P.; BEEVERS, L. C.; CUTHBERTSON, A. J. S.; MEDERO, G. M.; DIAS, V. S., NASCIMENTO, D. T. F. The mitigation potential of buffer strips for reservoir sediment yields: The Itumbiara Hydroelectric Power Plant in Brazil.**Water**. MDPI, Basel, Switzerland, 8, p. 1-12, 2016. DOI: 10.3390/w7105831. DOI: 10.3390/w8110489.

MAA, J. P. Y.. Laboratory measurements of instantaneous sediment concentration under waves. **Journal of Oceanic Engineering**. IEEE. Piscataway, NJ, 4, v. 13, p. 299-302, 1988. ISSN: 0364-9059.

MARQUES, M. **Modelagem paramétrica bidimensional para simulação do campo de ondas em águas continentais**. 2013. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos, Universidade Federal do Paraná, 2014.

MARQUES, M.; ANDRADE, F. O.; GUETTER, A. K. Conceito do campo de fetch e sua aplicação ao reservatório de Itaipu. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos. São Carlos, Brasil, 18, p. 243-253, 2013. ISSN: 2318-0331.

MARQUES, M. **Um sistema automatizado para estimativa de ondas geradas por vento em reservatórios de barragens**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, 2005.

MASCARENHA, M. M. A.; CORDÃO NETO, M. P.; SILVA, M. T. M. G. Alternative Method for Analysing Hydromechanical Behavior of Unsaturated Soils. **Soils and Rocks**, São Paulo, 39, p. 29-39, 2016. ISSN 1980-9743.

MASCARENHA, M. M. A.; MAHLER, C. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; NACINOVIC, M. G. G.; BANDEIRA, A. P. N.; ALMEIDA, J. G. R. **Capítulo 21: Erosão.** *In*: CARVALHO, J.C.; JÚNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015, p 581-612.

MASCARENHA, M. M. A. **Influência da microestrutura no comportamento hidro-mecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações**. 2008. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Publicação G. TD – 056/08, Brasília-DF, 2008.

MATTOSINHO, G. O. **Dissipação de energia de ondas geradas por ventos em reservatórios de barragens, devido à presença de vegetação**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia – UNESP, Ilha Solteira-SP, 2016.

MENEZES, A. V. **Proposta metodológica para estudo de perda de massa de solos situados em bordas de reservatório devido ao efeito de ondas por meio de um canal hidráulico.** 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

NOGAMI, J. S.; COZZOLINO, V. M. N. A identificação de solos tropicais: dificuldades e proposta de um método preliminar. *In*: XX REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. **Anais**. Fortaleza-CE, ABPv, 1985. p. 117-134

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. *In*: X CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais**. Foz do Iguaçu – PR, v.4, 1994. p. 1293-1300.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Editora Villibor, 1995, 233 p.

OLIVEIRA, V. N. **Avaliação e modelagem de ensaios *Inderbitzen* com medição de sucção matricial**. 2019. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

ORLANDO, P. D. G.; MENDES, R. M.; MARINHO, F. A. M. Soil water retention curves of the unsaturated residual soil from the brazilian coast. **Geomechanics from Micro to Macro - Soga et al (Eds)**. Taylor & Francis Group, London, U. K. v. 1, p. 1431-1436, 2015. ISBN 978-1-138-02707-7.

PALMEIRA, E. M.; TATTO, J. Behavior of geotextile filters in armoured slopes subjected to the action of waves. **Geotextiles and Geomembranes.** Elsevier. New York, 43, p. 46-55, 2015. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2014.11.003.0266-1144.

PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**. Elsevier, New York, 147, p. 595-620, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.08.002.0341-8162.

ROCHA, M . F.; VARGAS, C. A. L.; GITIRANA JR, G. F. N.; DIEMER, F. Estudo comparativo de técnicas de medição de sucção total do solo: papel filtro e um potenciômetro de ponto de orvalho. *In*: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 2014, Goiânia, Goiás, **Anais...**Goiânia: ABMS, 2014. p. 1-8.

ROMÃO, P. A.; SOUZA, N. M.. **Capítulo 7: Aspectos geológicos e hidrogeológicos na deflagração e evolução da erosão hídrica em margens de reservatórios**. *In:* SALES, M. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUZA, N. M.; ANGELIM, R. R. (Org.). **Erosão em Borda de Reservatório**. 1ª Edição, Série GECON. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, 2017. Volume 3. p 153-170.

RUBIO, M. F. **Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios. Pesquisa & Desenvolvimento no estudo de caso nas UHEs Chavantes e Rosana (Rio Paranapanema, SP/PR)**. 2014. 283 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2014.

SANTOS, B. B.; MIRANDA, R. B.; MAUAD, F. F. Análises granulométricas do sedimento de leito no reservatório de Mogi-guaçu – SP. *In*: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS – I PARTÍCULAS DAS AMÉRICAS, 2018, Vitória, Espírito Santo, **Anais...**Vitória: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2018. p. 1-8.

SANTOS JR, O. F.; NETO, O. F.; CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; CAMPOS, L. E. P.; SCUDELARI, A. C.; SEVERO, R. N. F. **Capítulo 16: Erosão continental, costeira e de bordas de reservatório**. *In:* SALES, M. M.; CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUZA, N. M.; ANGELIM, R. R. (Org.). **Erosão em Borda de Reservatório**. 1ª Edição, Série GECON. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Goiás, 2017. Volume 3. p 345-367.

SCHLIEWE, M. S. **Estudo experimental da erosão pela ação de ondas de um solo laterítico situado nas margens do reservatório de Itumbiara**. 2018. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira Ciências do solo**, v. 33, p. 1811-1820, 2009.

SILVA, T. O.; NASCIMENTO, R. C.; FARIA, J. W. S.; PITANGA, H. N.; LIMA, D. C.; SANT'ANNA, G. L. Soil susceptibility to accelerated hydric erosion: geotechnical evaluation of cut slopes in residual soil profiles. **Acta Scientiarum Technology.** Universidade Estadual de Maringá. Maringá, Paraná. Vol. 37, nº 4, p. 331-337, 2015. DOI: 10.4025/actascitechnol.v37i4.26096.

SOUSA, A. C. R. C.; MASCARENHA, M. M. A.; JESUS, A. S.; SILVA, M. R. Influência da Sucção na Estabilidade Estrutural de Solos Tropicais Não Saturados no Município de Silvânia-GO. *In*: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais. **Anais...**Belo Horizonte: ABMS, 2016. p. 1-8.

SOUZA, C. A. G. F.; MORISHITA, H. M. Evaluation of a Flap Type Wave Generator, 2003, São Paulo. *Proceedings*: **COBEM 2003, 17th International Congress of Mechanical Engineering**, ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, p. 9.

SWC-150 Brochure – Fredlund SWCC Device. GCTS Testing Systems. United States of America. 4 p. 2018. *home page*: https://www.gcts.com/pdf/SWC-150.pdf. Último acesso: 08/01/2019.

TERRA, V. S. **Avaliação de mecanismos não convencionais de instabilização de taludes: O papel das poropressões de ar**. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

TERRA, V. S.; GITIRANA JR. G. F. N.; MASCARENHA, M. M. A.; DOMINGOS, V. H.; ALMEIDA, J. G. R. Influência da Poropressão de Ar no Ensaio de Desagregação por Imersão Total em Água. *In*: VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Fortaleza, CE, 2015. **Anais...**Editora Gráfica Fotolaser, 2015, p. 280-287.

U. S. CORPS OF ENGINEERS. Coastal Engineering Manual. – Part II. Washington (D. C.). **Government Printing Office**, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America**. USA, v 44, n. 5. p. 892-898. 1980.

VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. ASCE, American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1977, 743p.

VIEIRA, A. S.; MACIEL, G. F.; FORTES, C. J. E. M.; MINUSSI, C. R. PROPOSTA DE DOIS SIMULADORES DE ONDAS GERADAS POR VENTO EM ÁGUAS RESTRITAS: SWAN E ONDISACAD. *In*: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Maceió-AL. **Anais...**p. 1-18. 2011.

VILHENA, R. M. **Soil stabilization with lime for reservoir shoreline erosion control**. 2019. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

VILHENA, R. M.; MASCARENHA, M. M. A.; SALES, M. M.; ROMÃO, P. A.; LUZ, M. P. Estimating the wind-generated wave erosivity potential: the case of the Itumbiara dam reservoir.**Water**. MDPI, Basel, Switzerland, 11, 342, p. 1-18, 2019. DOI: 10.3390/w11020342.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos** – Tecnologia do Uso de Solos Finos Lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009, 147 p.

WANG, W.; GUANGQI, C.; KUNLONG, Y.; WANG, Y.; ZHOU, S.; LIU, Y. Modeling of landslice generated impulsive waves considering complex topography in reservoir area. **Environ. Earth Sci.**. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 372, p. 1-15, 2016. DOI: 10.1007/s12665-016-5252-y.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predcting rainfall erosion losses. A guide of conservation planning. **USDA Handbook.** Washington, n° 537, 57 p. 1978.

WU, N. J.; HSIAO, S. C.; CHEN, H. H.; YANG, R. Y. The study on solitary waves generated by a piston-type wave maker. **Ocean Engineering**. Volume 117, p. 114-129, 2016. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.03.020.

ZULIZIANA, S.; RAZAK, M. A. A. A.; AHMAD, N. Predicting of Soil Erosion with Regarding to Rainfall Erosivity and Soil Erodibility. *In*: 3 rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY (intCET 2017). **Proceedings…** Putrajaya, Malásia: American Institute of Physics, 2017. p. 1-6.