

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA**

**Ensaio de Inderbitzen modificado em solos com adição de fibras naturais e lodo de  
tratamento de esgotos sanitários**

Bruno Ribeiro Rocha

Itajubá, 23 de novembro de 2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA**

Bruno Ribeiro Rocha

Ensaio de Inderbitzen modificado em solos com  
adição de fibras naturais e lodo de tratamento de  
esgotos sanitários

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado  
Profissional em Engenharia Hídrica como parte dos  
requisitos para obtenção de Título de Mestre em  
Engenharia Hídrica.

Área de concentração: Geração hidroelétrica

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra: Adinele Gomes Guimarães

23 de novembro de 2021

Itajubá

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha família e amigos pelo suporte emocional e financeiro, sem os quais não seria capaz de terminar este projeto.

Agradeço à minha orientadora, Professora Adinele, pela paciência e animação sempre presentes em nossas conversas, desde muito antes deste estudo, essenciais em não me deixar desistir.

Agradeço à Professora Márcia pela ajuda durante todo o processo em que estive longe, e por me emprestar parte dos materiais do LSAN, sem os quais eu não seria capaz de realizar os ensaios.

Agradeço aos meus professores que fizeram parte da minha formação como ser humano, ensinando muito mais do que simples conteúdos em sala.

Agradeço ao técnico Fabiano, sem o qual metade dos ensaios que fiz seriam descartados por estarem incorretos.

Agradeço também ao CEQUAN por permitir o uso de seus equipamentos, sem os quais não seria capaz de produzir parte dos materiais necessários ao estudo.

Mesmo com toda a distância, vocês foram meu pilar para acrescentar mais um (pequeno) pedaço de conhecimento ao mundo. Este documento pertence, definitivamente, tanto a vocês quanto a mim.

“Passei por coisas terríveis na minha vida, e algumas delas de fato ocorreram.”

(Samuel Langhorne Clemens)

## Resumo

A erosão do solo é um fator natural, mas que vem sendo acelerado pela ação do homem sobre o ambiente. Possuindo diversos agentes causadores, a erosão é responsável pela perda de diversas toneladas de solo todos os anos, assoreando corpos d'água, aumentando a possibilidade de inundações e diminuindo a fertilidade do solo. A erodibilidade é definida como a tendência do solo em ter suas partículas desprendidas e carregadas pelos agentes erosivos. Dentre as metodologias existentes para avaliação da erodibilidade, destaca-se o da rampa de Inderbitzen e suas versões modificadas. Solos estabilizados por adição são caracterizados pela inserção de elementos que distribuem os esforços de tração pelo maciço que se estende para além da interface de rompimento. Neste contexto, este estudo busca avaliar as capacidades de uma nova metodologia do ensaio de Inderbitzen, modificada com a adição de um simulador de chuva, para análise de erodibilidade do solo puro e solo estabilizado com adição de fibras de cana de açúcar e lodo de tratamento de esgoto sanitário. Ambos os materiais de estabilização foram com base em suas capacidades de alterar as propriedades do solo. O estudo propõe também uma nova metodologia de ensaio com base nas modificações aplicadas à rampa de Inderbitzen original, apresentando ao fim documento que descreve os procedimentos de ensaio. Conclui-se que a metodologia consegue reproduzir parcialmente as características naturais de escoamento superficial, com limitações com relação à inclinação da rampa. A modificação do solo com fibras naturais não mostrou resultados positivos, elevando o índice de erodibilidade e consequentemente a quantidade de sólidos carregados pelo fluxo de água.

Palavras-chave: Inderbitzen; erodibilidade; solos modificados.

## **Abstract**

Soil erosion is a natural factor that has been accelerated by human behavior over the environment. Caused by a range of agents, erosion is responsible for the loss of tons of soil material every year, silting water bodies, raising flooding chances, and reducing soil fertility. Erodibility can be described as the tendency of soil particles to detach and be carried away by erosive agents. Among existing methodologies that assess erodibility, one can highlight the Inderbitzen ramp methodology. Soils modified by addition of materials are characterized by the insertion of elements that better distribute the tensions amongst the soil massif and beyond the slip interface. In this context, this study evaluates the capacity of a modified Inderbitzen methodology with the addition of a rain simulator to assess the erodibility of pure soil and soil modified with sugarcane fibers and sewage treatment sludge. Both materials were chosen based on their ability to change soil properties. This study also proposes a new test methodology based on the modifications applied on the original Inderbitzen ramp, presenting the new test procedures at the end of the document. This study concluded that the methodology could reproduce surface runoff up to a point, with limitations about the ramp inclination. The modified soil with natural fibers was not capable to improve soil resistance to erosion, consequently increasing the quantity of soil carried by the water flux.

**Keywords:** Inderbitzen; erodibility; modified soils.

## Lista de Ilustrações

Figura 1 - Fases do processo de erosão Fonte: Lourenço et al, 2019 .....	10
Figura 2 - Rampa de Inderbitzen (1961) Fonte: Adaptado de Inderbitzen, 1961, apud Lemos, 2002.....	12
Figura 3 - Aparelho de Inderbitzen utilizado por Fácio (1991) Fonte: Lemos, 2002.....	15
Figura 4 - Aparelho de Inderbitzen Modificado de Freire (2001) Fonte: Lemos, 2002 .....	16
Figura 5 - Esquemático do equipamento do método de Griebeler Fonte: Pruski et al (2009).....	17
Figura 6 - Critério de classificação gráfica para a metodologia MCT Fonte: Nogami e Villibor, 1995, apud Moraes, 2015.....	23
Figura 7 - Equipamento de penetração de cone de laboratório Fonte: Alcântara, 1997, apud Moraes, 2015.....	24
Figura 8 – Comparação de custos Fonte: DER, 1986, apud Benjamim, 2006 .....	28
Figura 9 - Fluxograma do procedimento adotado no estudo Fonte: Autoria própria .....	30
Figura 10 - Local de retirada das amostras de solo Fonte: Autoria própria.....	31
Figura 11 – Lodo Antes e após desagregação mecânica Fonte: Autoria própria.....	33
Figura 12 - Processo de produção de fibras Fonte: Autoria própria.....	34
Figura 13 - Solo puro e solo modificado com 1,5% de fibras de cana, em umidade ótima Fonte: Autoria própria.....	35
Figura 14 – Lodo e solo puro, previamente à mistura e ajuste de umidade Fonte: Autoria própria .....	36
Figura 15 – Corpo de prova Fonte: Autoria própria .....	36
Figura 16 – Mistura solo-lodo na proporção de 1:0,125 Fonte: Autoria própria.....	37
Figura 17 - Rampa de Inderbitzen após modificações (vista 1) Fonte: Autoria própria.....	38
Figura 18 – Rampa de Inderbitzen após modificações (vista 2) Fonte: Autoria própria.....	39
Figura 19 – Corpos de prova após a execução do ensaio Fonte: Autoria própria .....	40
Figura 20 – Recipiente contendo solo decantado após retirada do excesso de água Fonte: Autoria própria.....	41
Figura 21 – Compilação gráfica do índice de erodibilidade Fonte: Autoria própria .....	44

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Quadro resumo dos métodos diretos .....	18
Tabela 2 – Valores comuns para prática conservacionista .....	20
Tabela 3 - Critérios para erodibilidade para ensaio de penetração de cone de laboratório .....	25
Tabela 4 - Critérios para erodibilidade para ensaio de penetração de cone de laboratório aliado a metodologia MCT .....	25
Tabela 5 - Propriedades do solo estudado.....	32
Tabela 6 – Determinação do teor de umidade do lodo .....	32
Tabela 7 - Média das massas das amostras .....	43
Tabela 8 - Resultados do ensaio de Inderbitzen Modificado .....	43
Tabela 9 - Erodibilidade média.....	44
Tabela 10 – Resultados de ensaios para solo puro.....	45
Tabela 11 - Resultados de ensaios para solo modificado com lodo .....	45

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

MCT – Miniatura, Compactado, Tropical

RUSLE – Equação Universal de Perda dos Solos / *Revised Universal Soil Loss Equation*

UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente / Upflow Anaerobic Sludge Blanket

USLE – Equação Universal de Perda dos Solos / *Universal Soil Loss Equation*

WEPP – Projeto de Predição de Erosão Hídrica / *Water Erosion Prediction Project*

## Lista de Símbolos

$A$  - perda de solo por unidade de área, em  $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$

$C$  - uso e manejo do solo, adimensional

$DP$  - variação da penetração natural

$DPA$  - variação da penetração saturada

$E$  - índice de erodibilidade

$K$  - erodibilidade, em  $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$

$L$  - comprimento do declive, adimensional

$m$  - massa erodida, em g

$P$  - prática conservacionista, adimensional

$p$  - coeficiente de sorção

$P$  - coeficiente de perda de massa por imersão

$P_{sat}$  - penetração média da amostra saturada

$P_{nat}$  - penetração média da amostra natural

$R$  - erosividade da chuva, em  $MJ \cdot mm \cdot há^{-1} \cdot h^{-1}$

$S$  - grau do declive, adimensional

## Sumário

1. Introdução.....	9
2. Revisão Bibliográfica .....	9
2.1. Erosão do solo .....	9
2.2. Metodologias para análise da erodibilidade do solo .....	11
2.2.1. Ensaio direto.....	12
2.2.1.1. Inderbitzen .....	12
2.2.1.2. Inderbitzen adaptado.....	14
2.2.1.3. Método de Griebeler .....	16
2.2.2. Ensaio indireto.....	18
2.2.2.1. Equação Universal de Perda dos Solos (USLE) .....	18
2.2.2.2. Outros modelos de predição de erosão hídrica .....	20
2.2.2.3. Sorção e perda de massa por imersão do método MCT.....	21
2.2.2.4. Penetração de cone de laboratório .....	23
2.3. Barragens de aterro.....	25
2.4. Solos estabilizados .....	26
3. Metodologia.....	30
3.1. Retirada do solo.....	31
3.2. Coleta do lodo e determinação de umidade .....	32
3.3. Preparo das fibras .....	33
3.4. Produção dos corpos de prova.....	34
3.5. Adaptações na rampa .....	37
3.6. Operação de ensaio com solo modificado com fibras naturais .....	39
3.7. Operação de ensaio com solo modificado com lodo de esgoto sanitário.....	41

4. Resultados e tratamento de dados.....	43
4.1. Solo modificado com fibras naturais.....	43
4.2. Solo modificado com lodo de esgotos sanitários .....	45
5. Conclusões.....	46
Apêndices.....	48
Apêndice A – Metodologia de ensaio com rampa de Inderbitzen modificada .....	49
Anexos .....	54
Anexo A – Detalhes da rampa de Inderbitzen .....	55
Referências.....	60

## **1. Introdução**

Barragens de aterro são construídas de materiais naturais compactados, como o solo, ou materiais processados, como rochas e brita. A partir do material de construção, podem ser classificadas como barragens de terra (de seção homogênea, zoneada ou aterro hidráulico) ou de enrocamento (núcleo de terra ou barragens com membrana impermeável) (ANA<sup>2</sup>, 2021).

Os taludes que compõe a barragem devem estar sempre em bom estado de conservação. Uma proteção inadequada dos taludes de uma barragem de terra ou enrocamento, à montante ou jusante, pode acarretar a erosão da face dos taludes pelas ondas ou correntezas da água represada, ou pelo escoamento das águas das chuvas. Taludes muito inclinados também podem tornar-se instáveis se saturados pela água pluvial (OLIVEIRA, 2008).

A erosão ocorre quando um fluido, como a água, provoca o carregamento de partículas do barramento. Normalmente, a ação do impacto das águas pluviais e o escoamento das enxurradas provoca a formação de ravinamentos que progridem e originam grandes erosões. O fluxo elevado de águas pluviais pode provocar erosão geral ou localizada, e inclusive acarretar o escorregamento de segmentos de revestimentos pré-fabricados das (ANA<sup>1</sup>, 2021).

De acordo com Couto (2015), a erodibilidade é a tendência que um determinado solo possui em ter suas partículas carregadas por agentes erosivos, como o vento e a água. Os métodos de avaliação do efeito da erosão podem ser classificados em diretos ou indiretos, dependendo da metodologia utilizada para se obter o fator erodibilidade. Dentre estas metodologias, destaca-se o método direto da rampa de Inderbitzen.

O aparelho de Inderbitzen consiste em uma rampa de inclinação ajustável e com um orifício circular em sua parcela final, possibilitando a fixação de amostras de solo. Sendo limitada por todos os lados, é capaz de simular um fluxo de água que flui naturalmente de sua parte mais alta para a parcela inferior. Por meio do ensaio, é possível simular a erosão da amostra, sendo o material erodido captado ao sair da rampa e posteriormente pesado para o cálculo de índice de erodibilidade (LEMOS, 2002).

Métodos de reforço de solos para estabilização e contenção de taludes consistem em introduzir elementos com alta resistência à tração, como fitas, malhas de aço e geotêxteis, e se apresentam como uma boa alternativa para muros de gravidade e flexão. A construção de muros de arrimo e

estruturas análogas representa um alto custo no orçamento total de uma obra, podendo até mesmo ultrapassar em valor o restante das atividades. Além do solo e dos elementos de reforço, também são comuns elementos de face, geralmente com função de evitar a erosão e instabilidades locais e proteger a face dos muros (BENJAMIM, 2006).

Dentro deste contexto, este estudo busca compreender melhor o comportamento quanto a erodibilidade de solos modificado com fibras naturais e lodo de tratamento de esgoto utilizando uma rampa de Inderbitzen modificada com um simulador de chuva. O estudo busca avaliar o funcionamento da rampa de Inderbitzen modificada e apontar se as modificações aplicadas são adequadas, bem como apresentar um novo procedimento de ensaio englobando estas modificações.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Erosão do solo

A erosão é a ação de retirada, dissolução e condução de fragmentos dos solos e das rochas por agentes erosivos. A perda de sedimentos pelo processo erosivo de forma lenta é um fator natural e responsável por esculpir a superfície do planeta, também chamado de erosão geológica ou normal (GUERRA e CUNHA, 2006; SILVA et al, 2015).

A erosão é um processo muito complexo e influenciado por diversos agentes. Ela envolve interações diretas e indiretas de diversos fatores, desde características geológicas e geomorfológicas do solo, os tipos de solos, o clima e a vegetação de cobertura, bem como as ações do homem – esta última interferindo também nas condições naturais de cada um dos outros fatores (ARAÚJO et al., 2013).

Enquanto a erosão geológica é considerada um processo lento de suavização do solo, a erosão antrópica é causada pela influência do homem, que eleva a velocidade de degradação. Em ambos os casos, o solo é desagregado, transportado e depositado em um local diferente do original. Se ocorrer em um curto período de tempo, a erosão antrópica é extremamente prejudicial (SILVA, 1995).

A ação biológica, do vento, da temperatura e da água, esta última também chamada de erosão hídrica, a mais representativa entre todos, são alguns dos possíveis agentes causadores de erosão a serem citados (SILVA, 1995).

A chuva é o agente de maior relevância no processo de erosão hídrica por gerar dois fatores: o impacto das gotas de chuva no solo (também chamado de efeito *splash*) e o escoamento superficial. A ação provocada pelo *splash* é produto da energia cinética das gotas de chuva, e constitui o estágio inicial do processo erosivo, preparando as partículas do solo para serem transportadas pelo escoamento superficial. Mais detalhes podem ser observados na Figura 1 (LOURENÇO et al, 2019).

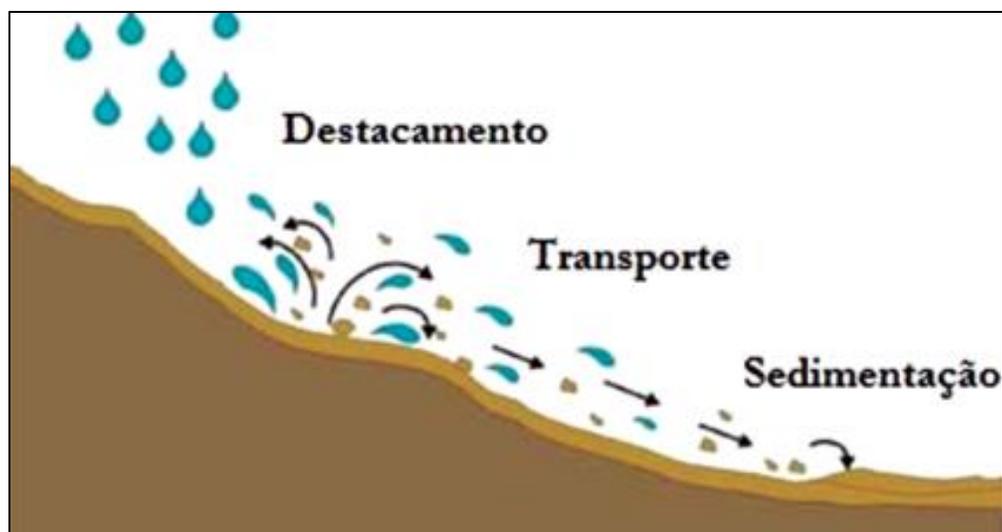


Figura 1 - Fases do processo de erosão  
 Fonte: Lourenço et al, 2019

A erosão hídrica ocorre em três etapas: desagregação, transporte e deposição. O processo de desagregação se inicia com o contato das gotas da chuva com o solo, desagregando as partículas do mesmo pela dissipação de energia cinética. Em sequência, caso a capacidade de absorção seja menor do que a quantidade de chuva, as partículas desagregadas são carregadas pelo escoamento superficial. Por último, ocorre a deposição destes grãos em locais mais baixos, como rios e lagos (BASTOS et al., 2001).

A degradação por erosão hídrica pode se apresentar em diferentes estágios. A erosão laminar ou superficial é caracterizada pela remoção de uma fina camada do solo, carregada pela água. Com o avanço do processo, surgem sulcos por onde a água tem preferência de passagem, que por fim podem evoluir para voçorocas, caso a erosão não seja controlada (MENDES, 2006).

O processo erosivo antrópico provoca a perda de toneladas de sedimentos por ano, reduzindo a fertilidade do solo e a produtividade agrícola, bem como assoreando rios e lagos. Ela constitui, portanto, o principal impacto negativo gerado pelo uso inadequado do solo. Foi estimado que aproximadamente 1 bilhão de toneladas de material de solo foram erodidos nacionalmente no ano de 2001, em sua maioria gerada pelo transporte eólico e pluvial. (DEMARCHI et al., 2014; LEPSCH, 2010).

## **2.2. Metodologias para análise da erodibilidade do solo**

A erodibilidade pode ser definida como a maior ou menor inclinação com que as partículas do solo se desprendem e são transportadas por agentes erosivos, como a água e o vento. Ela é diferente para cada solo, e um dos fatores mais importantes no estudo da erosão. O tamanho dos grãos é considerado um dos fatores mais relevantes para a ocorrência da erosão (COUTO, 2015).

A capacidade que um agente erosivo possui em desagregar e transportar grãos do solo é chamado de erosividade e, no caso da chuva, é uma relação entre sua intensidade e duração. Chuvas de menor intensidade e maior duração podem exibir o mesmo poder erosivo de uma chuva curta e de alta intensidade (WISCHMEIER et al., 1978).

De acordo com Lemos et al. (2007), existem descritos na literatura diversos métodos para compreender e avaliar o processo de erosão, sejam eles modelos determinísticos, probabilísticos ou qualitativos, ou ensaios laboratoriais.

Os métodos de avaliação da erosão podem ser divididos em dois tipos: diretos e indiretos. Os que executam análises obtendo diretamente a característica desejada – neste caso, o fator erodibilidade – são chamados de métodos diretos. Os que obtém o fator erodibilidade indiretamente através de outros ensaios são chamados de métodos indiretos. Dentre os métodos diretos, destacam-se os ensaios de Inderbitzen (original e modificados) e de Griebeler. Dentre os métodos indiretos, destacam-se as equações de perda de solo, sorção e perda de massa por imersão do método MCT e penetração de cone de laboratório.

Métodos indiretos, como as equações de perda de solo, são utilizadas com um conjunto de dados (geralmente com auxílio de um SIG) para obtenção de dados de erosão de áreas maiores, como cidades e estados. O restante dos métodos indiretos e os métodos diretos do ensaio de Inderbitzen avaliam mais pontualmente os solos, sendo melhor empregados em estudos mais aprofundados sobre áreas mais limitadas.

## 2.2.1. Ensaios diretos

### 2.2.1.1. Inderbitzen

A concepção do equipamento, também conhecido como Erosômetro, foi realizado por Inderbitzen em 1961. O aparelho original consiste em uma rampa metálica de 76,20 cm de comprimento com inclinação ajustável e um orifício circular de 15,24 cm de diâmetro para fixação da amostra de solo indeformada em sua parcela inferior final. A simulação do fluxo de água era feita por recipientes com líquido, mantidos em nível constante, que vertiam em um cano metálico na parcela superior inicial da rampa. Uma ilustração da rampa é apresentada na Figura 2 (INDERBITZEN, 1961, apud LEMOS, 2002).

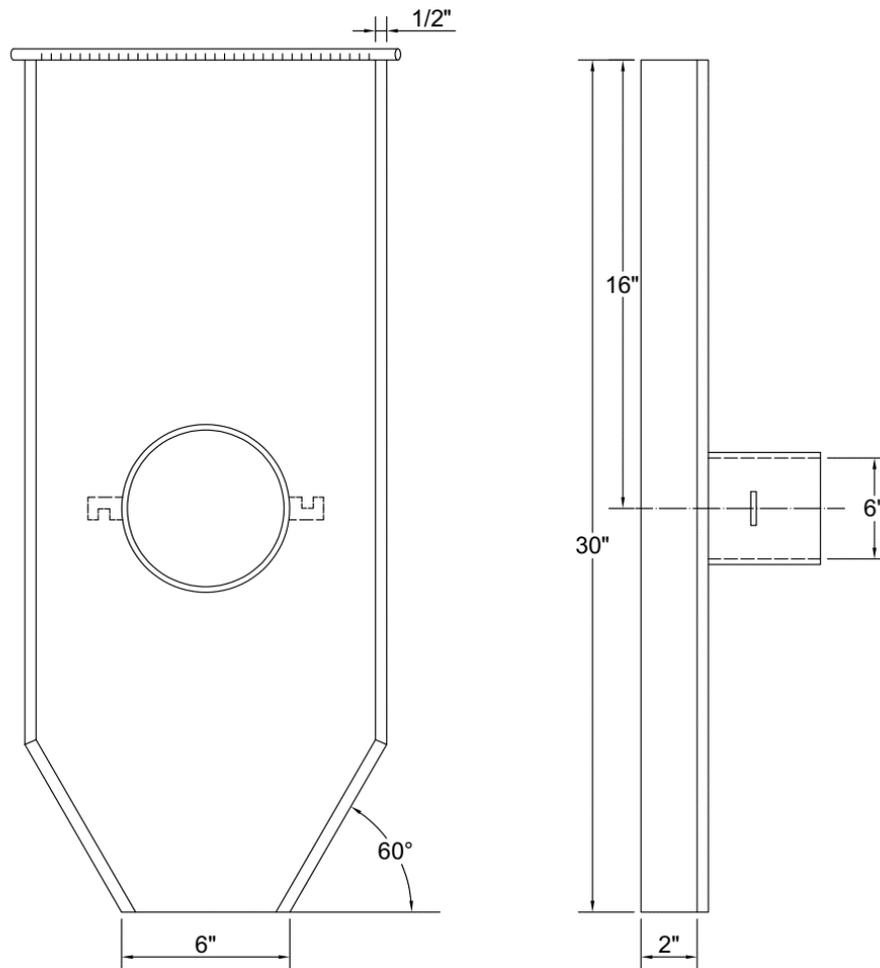


Figura 2 - Rampa de Inderbitzen (1961)  
Fonte: Adaptado de Inderbitzen, 1961, apud Lemos, 2002

Como a superfície do corpo de prova coincide com o plano da rampa, o ensaio permite simular o efeito do escoamento superficial sobre o solo gerado pela chuva. A variação da inclinação da rampa e do fluxo de água permitem também simular diferentes inclinações de taludes, intensidades de chuva e escoamento superficial. Características do solo também podem ser modificadas, como a umidade e o grau de compactação (LEMOS, 2002).

O material erodido é carregado pelo fluxo de água e coletado por peneiras ao fim da rampa durante tempos pré-determinados de ensaio, sendo ao fim levado à estufa ensaio para secagem e pesagem. Com as massas secas acumuladas obtidas nos respectivos tempos de coleta, a medida de erosão é calculada por meio da Equação 1. Através dela, é possível analisar a erodibilidade do solo e compará-lo com ensaios executados em diferentes tipos de solo (SILVA e MELO, 2016).

$$E = \frac{P_s}{A} \quad (1)$$

Onde:

$E$  é a medida da erosão, em g/cm<sup>2</sup>

$P_s$  é a massa do solo seco, em g

$A$  é a área superficial do corpo de prova, em cm<sup>2</sup>

O estudo de Inderbitzen foi de grande relevância para a análise da susceptibilidade dos solos à erosão no mundo e de grande valor para pesquisadores brasileiros, visto que a elevada pluviosidade torna recorrente o fenômeno nos solos no país (SILVA e MELO, 2016).

A primeira utilização do ensaio de Inderbitzen no Brasil ocorreu na pesquisa “Estabilidade de Taludes” realizada entre os anos de 1975 e 1978 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Realizado em conjunto com a COPPE/UFRJ e TRAFECOM, o estudo possuía o propósito de avaliar a erodibilidade dos solos presentes nos taludes da via Dutra, sendo executados ensaios com duração de 5 minutos em solos com diferentes teores de umidade e diferentes inclinações da rampa (BASTOS, 1999).

Devido à imprecisão inerente ao ensaio, os resultados devem ser considerados apenas uma estimativa do efeito da chuva sobre o solo testado. Recomenda-se a simulação de chuva sobre o corpo de prova com o uso de um irrigador tipo chuveiro (INDERBITZEN, 1961, apud LEMOS, 2002).

Devido a sua fácil implementação, simplicidade e baixo custo, é um dos métodos com mais estudos realizados e com grande utilização no meio geotécnico (BASTOS, 1999, e TOMASI, 2015).

### **2.2.1.2. Inderbitzen adaptado**

Graças à possibilidade de variação de diversos fatores envolvidos no ensaio, tanto do estado do solo como da configuração da rampa, e com o objetivo de ampliar o campo de pesquisa e adaptar o método as suas necessidades, diversos pesquisadores realizaram modificações no aparelho inicialmente apresentado por Inderbitzen em 1961 (SILVA e MELO, 2016).

O primeiro autor a propor uma padronização do ensaio e modificação do equipamento foi Fácio (1991). O equipamento foi feito com três rampas paralelas para ensaios simultâneos, bacia de uniformização de fluxo e fixação roscável para as amostras, agora com 10 cm de diâmetro. A rampa também foi reduzida para 33 cm de largura e alongada 130 cm de comprimento. Para além destas modificações, o autor sugere a fixação da vazão e da declividade em 50 ml/s e 10°, respectivamente, bem como um tempo de ensaio de 20 minutos. A versão modificada da nova rampa pode ser observada na Figura 3.

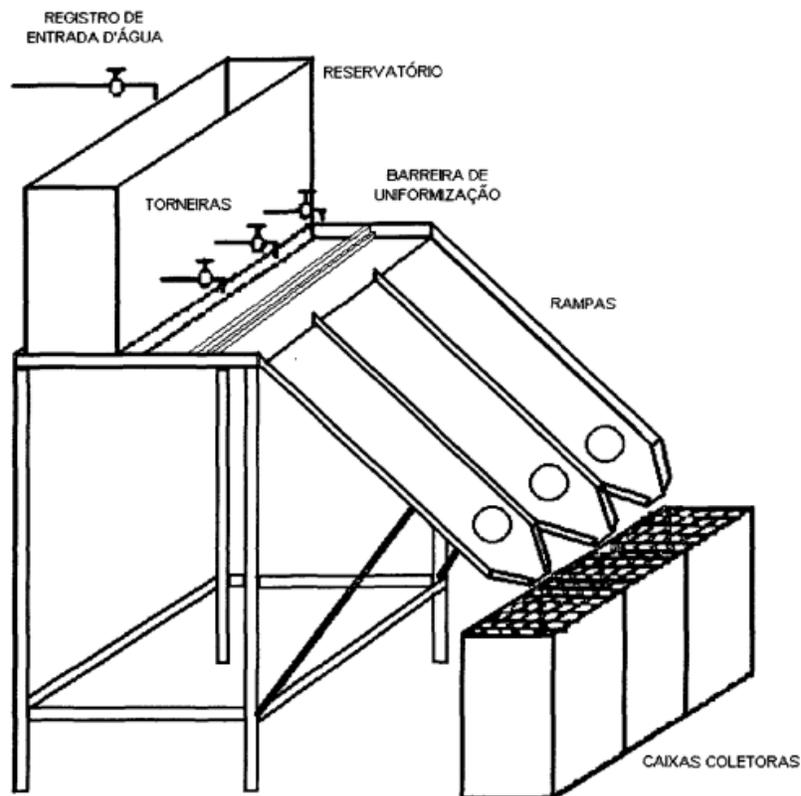


Figura 3 - Aparelho de Inderbitzen utilizado por Fácio (1991)  
Fonte: Lemos, 2002

Outra modificação, denominada Inderbitzen Adaptado, foi realizada por Freire (2001). Nesta nova metodologia, a rampa original é substituída por uma grelha apoiada sobre uma estrutura tubular, agora com apenas duas possíveis inclinações. Neste modelo, a amostra é colocada sobre a grelha onde é simulado o impacto das gotas de chuva sobre o solo através de um “chuveiramento”, sendo a vazão controlada por um manômetro. A amostra utilizada não é mais do tipo indeformada, mas sim prismática não confinada. O material erodido é coletado por um recipiente localizado abaixo da grelha, sendo posteriormente pesado. Mais detalhes podem ser observados na Figura 4 (SILVA e MELO, 2016).

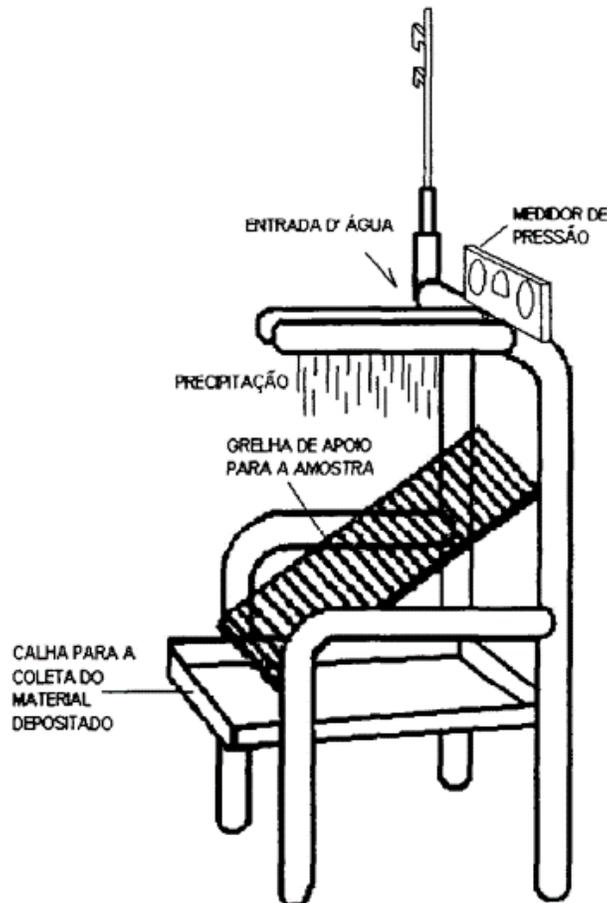


Figura 4 - Aparelho de Inderbitzen Modificado de Freire (2001)  
 Fonte: Lemos, 2002

Analogamente ao método original de Inderbitzen, estudos com dispositivos similares ao de Freire (2001) utilizaram a Equação 1 para encontrar o potencial de erodibilidade, utilizando a massa de material erodido coletado pelo equipamento e a área superficial original da amostra (SILVA e MELO, 2016).

### 2.2.1.3. Método de Griebeler

O equipamento foi desenvolvido por Griebeler (2002) com o intuito de obter a erodibilidade e a tensão crítica do solo, constituído de ensaios realizados no próprio local a ser estudado. Ele é constituído por uma calha de chapas metálicas, que delimitam o canal de solo a ser ensaiado, por um sistema de armazenamento e derivação de água e um conjunto de filtragem e coleta, situado

ao fim da calha e munido de uma malha de 200 mm de abertura. Mais detalhes podem ser observados na Figura 5.

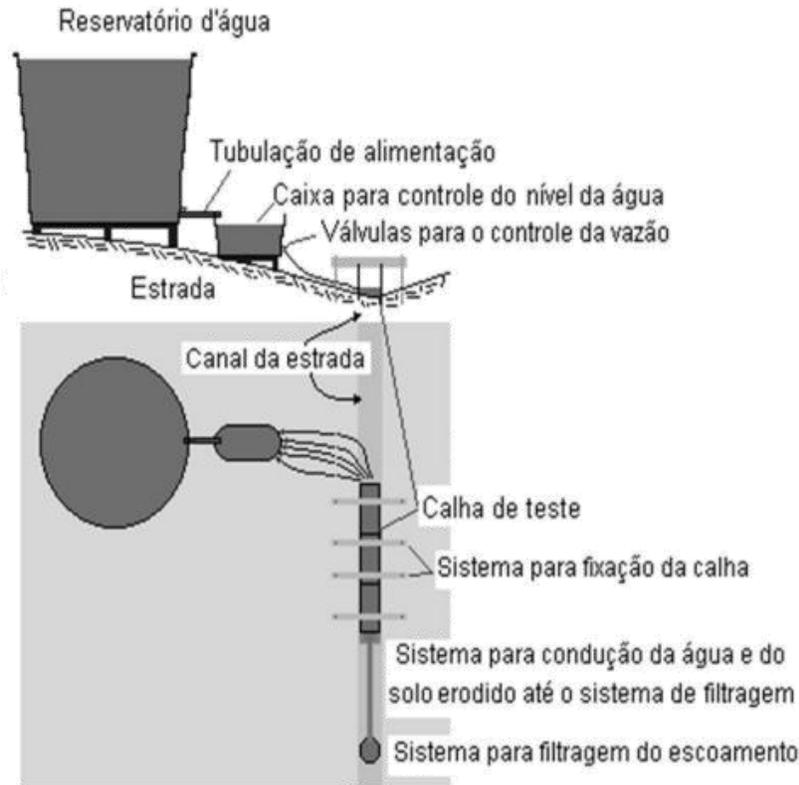


Figura 5 - Esquemático do equipamento do método de Griebeler  
Fonte: Pruski et al (2009)

Como vantagem, o estudo pelo método de Griebeler permite uma maior representatividade das condições reais do solo, o que não ocorre com o ensaio de Inderbitzen, já que ele necessita de amostras que, mesmo indeformadas, acarretam alterações na estrutura do solo. O método, entretanto, possui a necessidade de grande quantidade de mão de obra e volume de água, e só pode ser executado em local com um mínimo grau de declividade (PRUSKI et al, 2009).

A Tabela 1 apresenta o resumo dos métodos diretos já citados e suas características mais importantes, bem como alguns outros métodos relevantes ao histórico de desenvolvimento da rampa de Inderbitzen.

Tabela 1 – Quadro resumo dos métodos diretos

Referência	Características do ensaio	Dimensões dos corpos de prova	Variáveis de ensaio		
			Vazão	Inclinação	Tempo
Inderbitzen (1961)	Rampa de 76,20cm de comprimento	Circular, 15,24cm de diâmetro	Constante	Ajustável	120 min
Fonseca e Ferreira (1981)	Rampa de 78cm de comprimento e 34cm de largura	Circular, diâmetro de 15,24cm	3,54 e 18,84 L/min	44° a 59°	5 – 120 min
Fácio (1991)	Rampa tripla, 33 de largura, 130cm de comprimento	Circular, 10cm de diâmetro	Constante, 50 ml/s	Fixa, 10°	20 min
Bastos (1999)	Rampa de 60cm de comprimento e 25cm de largura	Circular, 9,76cm de diâmetro	3 e 6 L/min	0° a 54°	1 – 20 min
Freire (2001)	Grelha com simulador de chuva	Prismático, não confinado	NA	NA	90 – 600 min
Griebeler (2002)*	Conduto metálico in situ e peneiramento	NA	NA	Do local de ensaio	NA
Quirino et al (2013)	Grelha com simulador de chuva	Circular, 20cm de diâmetro	1,96 L/min	NA	90 min

\*Não é um método baseado em Inderbitzen

NA – Não aplicável

Fonte: Adaptado de Silva (2016)

## 2.2.2. Ensaio indiretos

### 2.2.2.1. Equação Universal de Perda dos Solos (USLE)

A Equação Universal de Perda dos Solos foi desenvolvida em 1954 pelo Serviço de Pesquisa Agrícola com o propósito de criar uma metodologia para auxiliar no planejamento do território. A equação permite ao planejador prever a erosão média do solo para diversas combinações de plantações, técnicas de gerenciamento de solo e práticas de controle, e escolher a melhor opção entre elas (WISCHMEIER et al., 1978).

A Equação Universal de Perda dos Solos (*Universal Soil Loss Equation* - USLE) destaca-se como um dos primeiros modelos de predição a serem criados, sendo apresentado em 1978. No modelo, a erosão é um produto de variados fatores, expressa pela Equação 2 (NASCIMENTO et al., 1999).

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

Onde:

$A$  é a perda de solo por unidade de área, em  $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$

$R$  é a erosividade da chuva, em  $MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot ano^{-1}$

$K$  é a erodibilidade, em  $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$

$LS$  é o fator topográfico, adimensional

$C$  é o uso e manejo do solo, adimensional

$P$  é a prática conservacionista, adimensional

O fator de erosividade da chuva ( $R$ ) é estabelecido como o produto da intensidade máxima de uma precipitação de 30 minutos ( $I_{30}$ ) e o valor da energia cinética da chuva ( $E_c$ ), sendo esta última a somatória de todos os intervalos da precipitação. Uma vez que medições diretas são praticamente inviáveis, a erodibilidade dos solos ( $K$ ) é usualmente avaliada indiretamente através de outras propriedades. O fator topográfico ( $LS$ ) pode ser encontrado através da Equação 3 para qualquer combinação de comprimento e inclinação de declive (CARVALHO, 2008, apud COUTO, 2015).

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} (1,36 + 0,97 \cdot S + 0,1385 \cdot S^2) \quad (3)$$

Onde

$L$  é o comprimento do declive, adimensional

$S$  é o grau do declive, adimensional

A variável de uso e manejo do solo ( $C$ ) é a relação do solo erodido entre uma cultura e manejo específicos e do local totalmente descoberto. Em locais sem vegetação, o valor de  $C$  se aproxima de 1, enquanto em locais com florestas virgens o valor se aproxima de  $10^{-3}$ . Por fim, a variável ligada a prática conservacionista ( $P$ ) é a relação entre a perda de solo em um terreno cultivado com determinada prática conservacionista e a perda de solo ao se plantar no sentido do declive, permanecendo as condições padrão de relevo, uso e manejo (CARVALHO, 2008, apud COUTO, 2015).

Dentre as práticas conservacionistas mais comuns, podem ser citadas a rotação de culturas, terraceamento, plantio em faixas de contorno, plantio em curvas de nível, canais escoadouros e cordões de vegetação permanente. Alguns valores comuns de  $P$  podem ser observados na Tabela 2 (COUTO, 2015).

Tabela 2 – Valores comuns para prática conservacionista

Prática conservacionista	P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas com plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: Pruski, 2009, apud Bertoni e Lombardi Neto, 1990

### 2.2.2.2. Outros modelos de predição de erosão hídrica

A *RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)* foi desenvolvida na década de 1990 com base na *USLE*, sendo assim denominada por ser uma revisão da equação original. Apresenta variações no cálculo dos coeficientes da equação original, a citar: informatização dos algoritmos; novos valores e correções da erosividade da chuva ( $R$ ); criação de valores de erodibilidade do solo ( $K$ ) adaptável às estações do ano; criação de subfatores para cálculo do uso e manejo do solo ( $C$ ) com base em uso anterior do solo, plantação, cobertura da superfície e rugosidade do solo; novo

algoritmo para o cálculo do comprimento ( $L$ ) e grau ( $S$ ) do declive e novos valores para a prática conservacionista ( $P$ ) (RENARD, 1991).

Outro importante modelo de predição de erosão hídrica é chamado de WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, ou Projeto de Predição de Erosão Hídrica, em tradução livre), baseado em fundamentos de infiltração e mecânica do solo, hidrologia, hidráulica e previsões de precipitação. Em comparação a modelos como a USLE e RUSLE, o WEPP possui a capacidade de estimar a perda de solo em diferentes escalas de espaço e tempo. Através dele é possível analisar tanto um declive completo quanto uma pequena parcela dele, estimando em uma escala de dias, meses ou anos a quantidade de solo erodido ou depositado (FLANAGAN, 1995).

Através de comparação direta entre USLE, RUSLE e WEPP utilizando solos brasileiros é possível concluir que todos os três modelos superestimam a quantidade de solo erodido em comparação à realidade. Entretanto, quando se compara a eficiência dentre os três modelos, RUSLE e WEPP apresentam superioridade com relação a USLE. De uma forma geral, o modelo WEPP apresenta uma melhor precisão, seguida pela RUSLE, e em último lugar a USLE (AMORIM et al., 2010).

### **2.2.2.3. Sorção e perda de massa por imersão do método MCT**

O ensaio de sorção e perda de massa por imersão foi baseado no método MCT, proposto inicialmente em 1979. Dada a necessidade de testes desenvolvidos especificamente para solos brasileiros, mais especificamente solos do estado de São Paulo, e com metodologia simples e barata, o ensaio se baseia em dois processos: sorção e perda de massa por imersão. Originalmente, ambos os métodos utilizam amostras não deformadas de 4 cm de diâmetro interno e 2 cm de altura (NOGAMI et al., 1979).

O processo de sorção é realizado com a colocação da amostra sobre a superfície da água, com sua face inferior equivalente ao nível do líquido. O resultado obtido é o coeficiente de sorção  $p$ , dado pela relação entre a altura de percolação da água pela raiz quadrada do tempo em minutos de ensaio (NOGAMI et al., 1979).

O processo de perda de massa por imersão deve ser feito após o ensaio de sorção, com a fixação de uma pedra porosa na base da amostra, que deve ser imersa em água de forma que seu topo se

mantenha a cerca de 2mm acima da superfície do líquido. A pedra porosa deve ser retirada ao cessarem as aparentes modificações na superfície superior da amostra, evitando sempre a inclinação do conjunto. O restante deve ser imergido na água, mantendo a altura da superfície livre inferior da amostra ao menos 3 cm acima da superfície do recipiente que contém o líquido. Após 24h de imersão, é calculado o coeficiente de perda de massa  $P$ , dado em porcentagem, pela relação entre a massa desprendida e o valor inicial da amostra seca. Por fim, é possível encontrar o índice de erodibilidade do solo utilizando a relação expressa pela Equação 4. Caso o índice de erodibilidade do solo seja inferior à unidade, o solo possui alta erodibilidade, sendo recomendadas medidas de proteção do mesmo (NOGAMI et al., 1979).

$$E = \frac{52 \cdot p}{P} \quad (4)$$

Onde

$E$  é o índice de erodibilidade

$p$  é o coeficiente de sorção

$P$  é o coeficiente de perda de massa por imersão

O mesmo critério de avaliação foi apresentado graficamente por Nogami e Villibor (1995), como apresentado na Figura 6, resultado de um número maior de ensaios. O critério também foi confirmado por outros autores, em ensaios realizados em diferentes solos (MORAES, 2015).

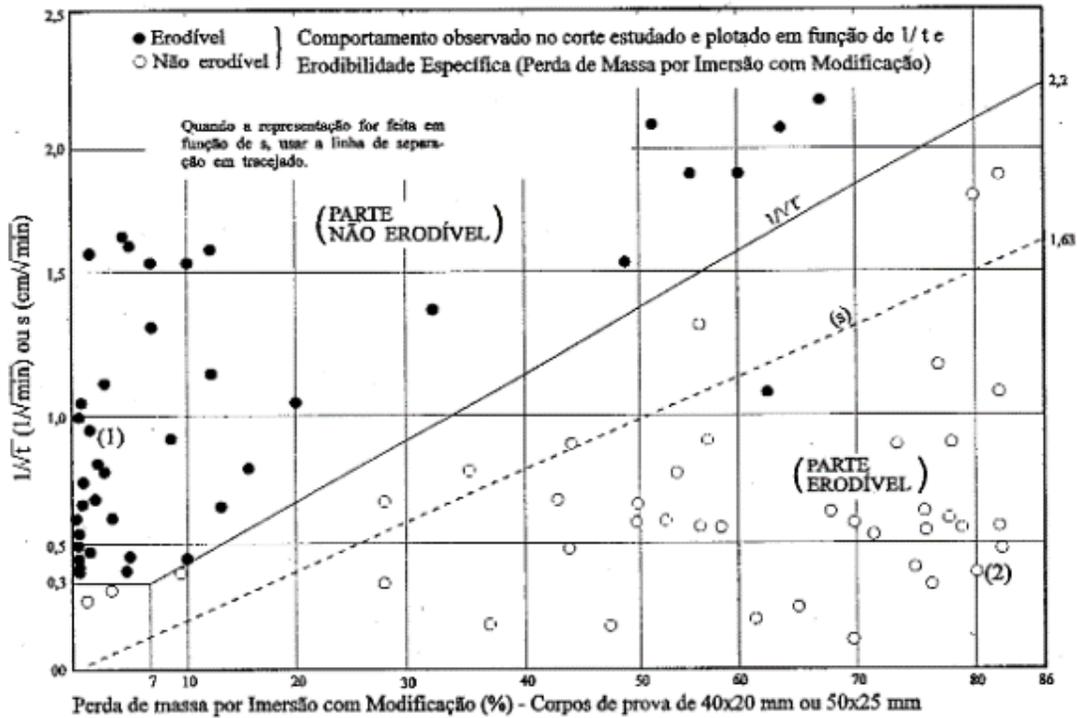


Figura 6 - Critério de classificação gráfica para a metodologia MCT  
 Fonte: Nogami e Villibor, 1995, apud Moraes, 2015

#### 2.2.2.4. Penetração de cone de laboratório

O objetivo do ensaio de penetração de cone de laboratório é relacionar a penetração do equipamento em amostras em estados saturados e em condições naturais, utilizando para isso amostras indeformadas. As amostras são saturadas por capilaridade utilizando pedras porosas, sob as quais são colocados os corpos de prova até se notar a presença de água em sua face superior (BURGOS, 1999).

O equipamento foi adaptado com base no instrumento empregado na determinação do limite de liquidez de argilas remoldadas, montado a partir de um Aparelho de Vicat. Como ilustrado pela Figura 7, ele possui um conjunto de penetração com 300g de massa, composto por um cone com 30° de abertura e 35mm de altura, que cai de uma altura de 10mm. O ensaio consiste em obter a média da penetração do cone em nove pontos da amostra, utilizando três amostras diferentes, todas com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Com os valores obtidos é possível calcular a variação de penetração natural (DP) e saturada (DPA) de acordo com as Equações 5 e 6 (ALCÂNTARA, 1997, apud MORAES, 2015).

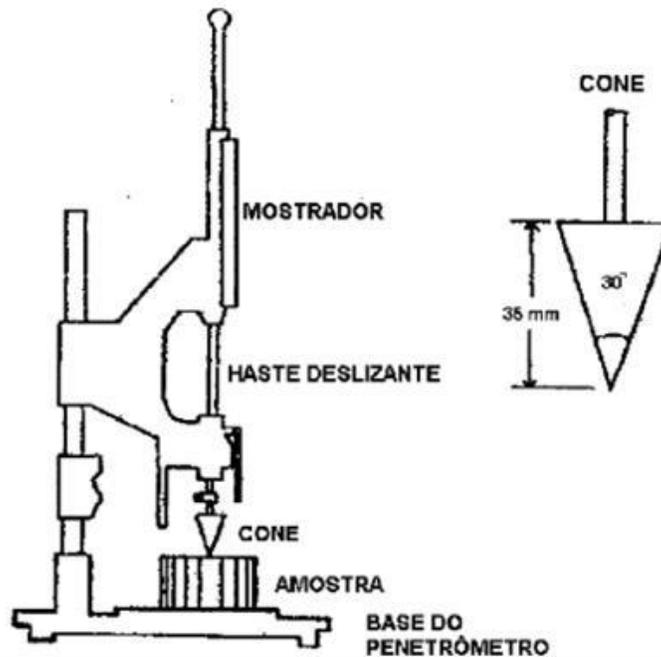


Figura 7 - Equipamento de penetração de cone de laboratório  
 Fonte: Alcântara, 1997, apud Moraes, 2015

$$DP (\%) = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{nat}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$DPA (\%) = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{sat}} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

$P_{sat}$  é a penetração média da amostra saturada

$P_{nat}$  é a penetração média da amostra natural

A classificação do solo, apresentada na Tabela 3, é feita com base nos valores de DP e DPA. Em conjunto com o ensaio da metodologia MCT, também é possível refinar os solos quanto à erodibilidade através dos critérios expressos na Tabela 4 (ALCÂNTARA, 1997, apud MORAES, 2015).

Tabela 3 - Critérios para erodibilidade para ensaio de penetração de cone de laboratório

$DP > 4,5 \cdot P_{nat}$	Solo com alta erodibilidade
$DP < 4,5 \cdot P_{nat}$	Solo com baixa a nenhuma erodibilidade

Fonte: Alcântara, 1997, apud Moraes, 2015

Tabela 4 - Critérios para erodibilidade para ensaio de penetração de cone de laboratório aliado a metodologia MCT

$DP > 46,4 \cdot p + 25$ ou $DPA > 21,4 \cdot p + 20$	Solo com alta erodibilidade
$DP < 46,4 \cdot p + 25$ ou $DPA < 21,4 \cdot p + 20$	Solo com baixa a nenhuma erodibilidade

Fonte: Adaptado de Alcântara, 1997, apud Moraes, 2015

### 2.3. Barragens de aterro

As barragens de aterro são estruturas com seção trapezoidal compostas por materiais naturais, como o solo, ou processados, como rochas e britas. Dentre elas, destacam-se as barragens de terra, compostas apenas por materiais naturais (argila, areia e silte) e que podem ser homogêneas, zoneadas ou de aterro hidráulico. Barragens de terra são adaptáveis a diversas situações, mas seu processo de construção pode ser muito afetado pelas condições climáticas, geralmente sendo paralisado em períodos chuvosos. As barragens de terra são empregadas principalmente em regiões de planícies, onde a topografia plana tornaria onerosa barragens de concreto extensas, compondo cerca de 82% das barragens brasileiras (ANA<sup>2</sup>, 2021; SOUZA, 2013; SAYÃO, 2009).

Com exceção de materiais orgânicos, silte, rocha moída e argilas com limites de liquidez superiores a 80%, a maioria dos solos pode ser utilizado para construção de barragens de terra. Enfatiza-se também a busca por materiais capazes de permitir baixa permeabilidade, como siltes e argilas (ANA<sup>2</sup>, 2021; CRUZ, 2004).

A barragem homogênea é construída com praticamente um único material que permitem níveis aceitáveis de percolação após sua compactação. Os taludes de montante e jusante possuem

inclinações diferentes para atenderem ao princípio da estabilidade. Nos casos em que pequenas quantidades de material permeável é utilizado para a construção de drenos para controle de percolação, as barragens são chamadas de homogêneas modificadas e podem adotar taludes mais inclinados do que uma barragem totalmente homogênea. Na presença de solo argiloso, areno-siltoso ou areno-argiloso, são recomendadas alturas de até 10m. Na inexistência de material suficiente para a construção de uma barragem homogênea, adota-se uma barragem de perfil zoneado ou misto. Este tipo de barragem possui materiais mais permeáveis alocados nas zonas mais externas do perfil, enquanto os materiais menos permeáveis (como as argilas) são utilizados na parte central do perfil (ANA<sup>2</sup>, 2021).

Dentre os estudos imprescindíveis às barragens de terra, destaca-se a estabilidade dos taludes de montante e jusante e a proteção contra erosão superficial. A declividade para taludes à montante e à jusante deve ser, respectivamente, de 3,5:1 e 3:1,0 para solos siltosos compactados. Para além da inclinação, recomenda-se também a instalação de banquetas de 3 a 4 metros de largura em intervalos verticais de 10 a 15 metros para instrumentalização e manutenção da barragem (CRUZ, 2004; SOUZA, 2013).

A erosão superficial é diferente para cada tipo de talude. Os taludes à montante estão sujeitos ao efeito das ondas, enquanto os taludes à jusante estão sujeitos ao efeito da água da chuva. A erosão dos taludes à montante pode ser prevenido através de uma camada de enrocamento lançado, ou rip-rap, formado por pedras grandes o suficiente para não se deslocarem e resistentes ao impacto das ondas. A erosão dos taludes à jusante pode ser prevenida com o uso de vegetação rasteira, banquetas, canaletas de drenagem, ou construção de uma camada granular superficial composta de cascalho ou brita (SOUZA, 2013).

#### **2.4. Solos estabilizados**

A estabilização de solos é um método de melhoramento das propriedades do solo através da adição de outros materiais, elevando sua resistência. Dentre os diferentes métodos, pode-se citar as estabilizações do tipo mecânica, química, térmica, elétrica e por inclusões.

A estabilização mecânica é alcançada pela alteração da granulometria, principalmente através de compactação e/ou vibração. A estabilização química envolve a adição de material com propriedade cimentícia ou aglomerante, criando um novo material composto após interações

físico-químicas entre as partículas de solo, o ligante e a água. A estabilização térmica é feita através de aquecimento ou resfriamento, que atuam na água presente no solo (removendo-a ou congelando-a) e alteram sua resistência. A estabilização elétrica é feita através de osmose inversa, drenando a água presente no solo e elevando sua resistência (AFRIN, 2017 e CAJADA, 2017).

O processo de estabilização do solo por inclusões consiste, de uma forma geral, na introdução de elementos que possuam resistência à tração relativamente elevada, tais como fitas metálicas, malhas de aço e geotêxteis. Uma vez que os solos possuem resistência à tração inferior a resistência à compressão, a interação solo-reforço é a principal responsável pela resistência do maciço, redistribuindo as tensões e deformações. Diferentemente de uma estrutura convencional, um sistema de estabilização interna envolve os reforços presentes no interior da massa de solos e estendidos além da massa potencial de ruptura (BENJAMIM, 2006).

Solos estabilizados podem ser adotados como alternativa a estruturas convencionais, como muros de gravidade e de flexão. O principal atrativo é o custo total que, como apresentado pela Figura 8, pode ser 50% inferior quando comparado com estruturas convencionais. Aliado a isso, a fácil adaptação a diversos tipos de solos e taludes, a não exigência de equipamentos e materiais especializados e os métodos de cálculo simplificado são outros fatores que acrescem a atratividade do método (BENJAMIM, 2006).

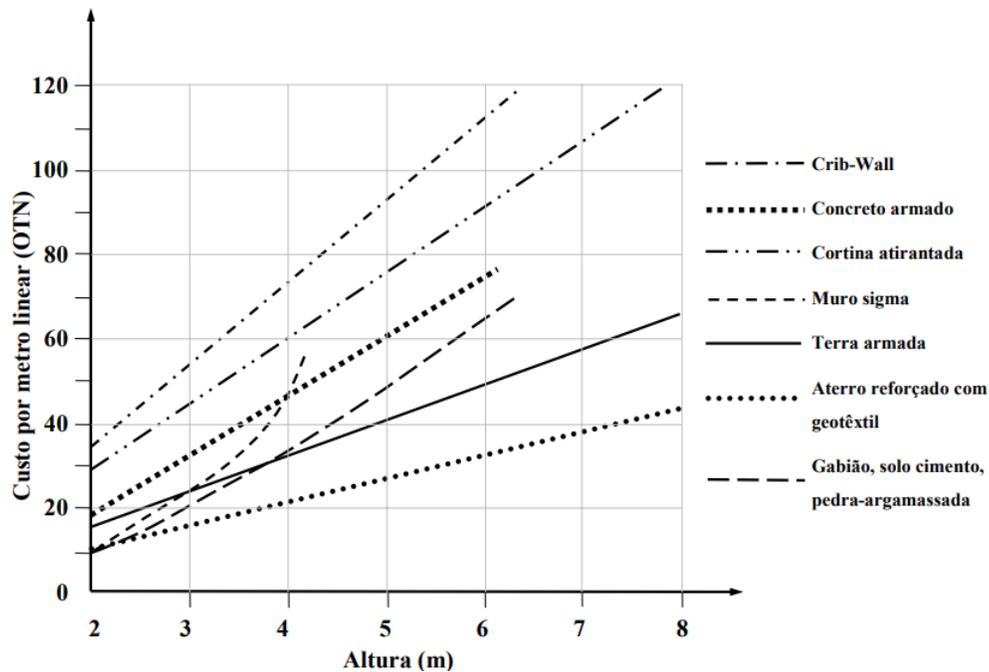


Figura 8 – Comparação de custos  
 Fonte: DER, 1986, apud Benjamim, 2006

Dada a sua simplicidade, a utilização de solos estabilizados possibilita a construção de taludes mais íngremes e com material local, facilitando a execução de obras em locais de difícil acesso e a dispensa da construção de fundações específicas. Com o desenvolvimento do método, as técnicas de execução também proporcionam total controle do desempenho destas obras (ANANIAS et al, 2009).

O método de reforço por adição pode ser dividido em dois tipos: reforços ordenados e reforços de fibras aleatoriamente distribuídas. O reforço ordenado consiste na inserção de geossintéticos ou tiras de metal galvanizado em um orientação desejada, de forma análoga ao realizado em estruturas de concreto. Por sua vez, o reforço aleatório é feito sem uma direção específica, distribuindo aleatoriamente as fibras no solo a ser reforçado, o que eleva a resistência ao cisalhamento em comparação ao solo não reforçado (SHUKLA et al, 2009).

Gray e Al-Refeai (1986) realizaram estudos utilizando fibras naturais e fibras de vidro com comprimentos entre 13 e 38 mm e diâmetro entre 0,3 e 1,75 mm, aleatoriamente distribuídas. Foram observados aumentos lineares na resistência do solo até um acréscimo de 2% de fibras em massa de solo seco. O aumento na resistência também foi proporcional ao aumento do aspecto da

fibra (relação comprimento-diâmetro). Corpos de prova confeccionados similarmente mostraram maior resistência quando modificados com as fibras aleatoriamente distribuída do que quando modificados por tecido orientado e contínuo.

No método aleatório, entretanto, foi observada a necessidade de um comprimento mínimo das fibras e de um teor máximo de 2%. Tamanhos de fibras inferiores ao mínimo observado acarretavam o arrancamento das fibras durante ensaios, enquanto teores superiores a 2% pouco acrescentavam à resistência do solo reforçado

Em estudos executados por Pradhan et al (2011), o aumento máximo da resistência em um solo composto por 33% areia fina, 28% silte e 39% argila é observado com a presença de 0,4% em fibras de polipropileno de 20 mm de comprimento. Outros estudos, entretanto, apontam para quantidades ótimas entre 0,3% e 1,5% de fibras, e comprimentos que variam entre 6mm e 25mm.

A necessidade da utilização de materiais ambientalmente sustentáveis voltou a atenção para o reforço com fibras naturais, como as de coco, bambu e cana de açúcar. A idade, origem, e o processo de produção das fibras são alguns dos pontos mais influentes na resistência final do material (HEJAZI et al, 2012).

Outros estudos, como o de Sampaio et al (2012), apontam que a utilização de lodo de esgoto pode melhorar os aspectos físicos do solo, como porosidade e umidade. Costa et al (2011) afirmam que a adição de matéria orgânica tem sido utilizada em busca da melhoria de características físicas e químicas de solos degradados, e que a aplicação de lodo de esgoto higienizado com cal virgem mostra-se uma opção promissora para acelerar o crescimento de vegetação que promova a cobertura do solo, reduzindo o impacto das águas da chuva. Em um estudo sobre pavimentação, Pereira (2012) obteve maior resistência à compressão simples e redução da massa específica após a adição de cinza de lodo de esgotos provenientes de fossas sanitárias.

Os esgotos domésticos são oriundos de redes hidráulico prediais e de estabelecimentos públicos, comerciais e similares. São compostos por águas utilizadas para fins higiênicos (banheiros, cozinhas lavanderias e outros), sendo constituídos por cerca de 99,93% de água. (MENDONÇA e MENDONÇA, 2017). De acordo com Jordão e Pessoa (1995), o lodo é um dos subprodutos do tratamento de esgotos, sendo a maior parcela dos rejeitos formados.

### 3. Metodologia

Uma vez que não existem normas técnicas para o procedimento de ensaio com a rampa de Inderbitzen, uma metodologia foi definida com base nas características do equipamento e suas modificações. Esta metodologia é apresentada como uma proposta nos apêndices, parte dos produtos deste estudo. Para a obtenção dos objetivos previstos neste estudo, foram percorridas seis etapas: retirada de amostras de solo; coleta e caracterização do lodo; produção das fibras; produção dos corpos de prova; execução do ensaio com a rampa; e definição do índice de erodibilidade. Mais detalhes podem ser observados na Figura 9. Os ensaios aqui apresentados foram realizados no Laboratório de Geotecnia (LGTEC), presente no Campus Itajubá da Universidade Federal de Itajubá.

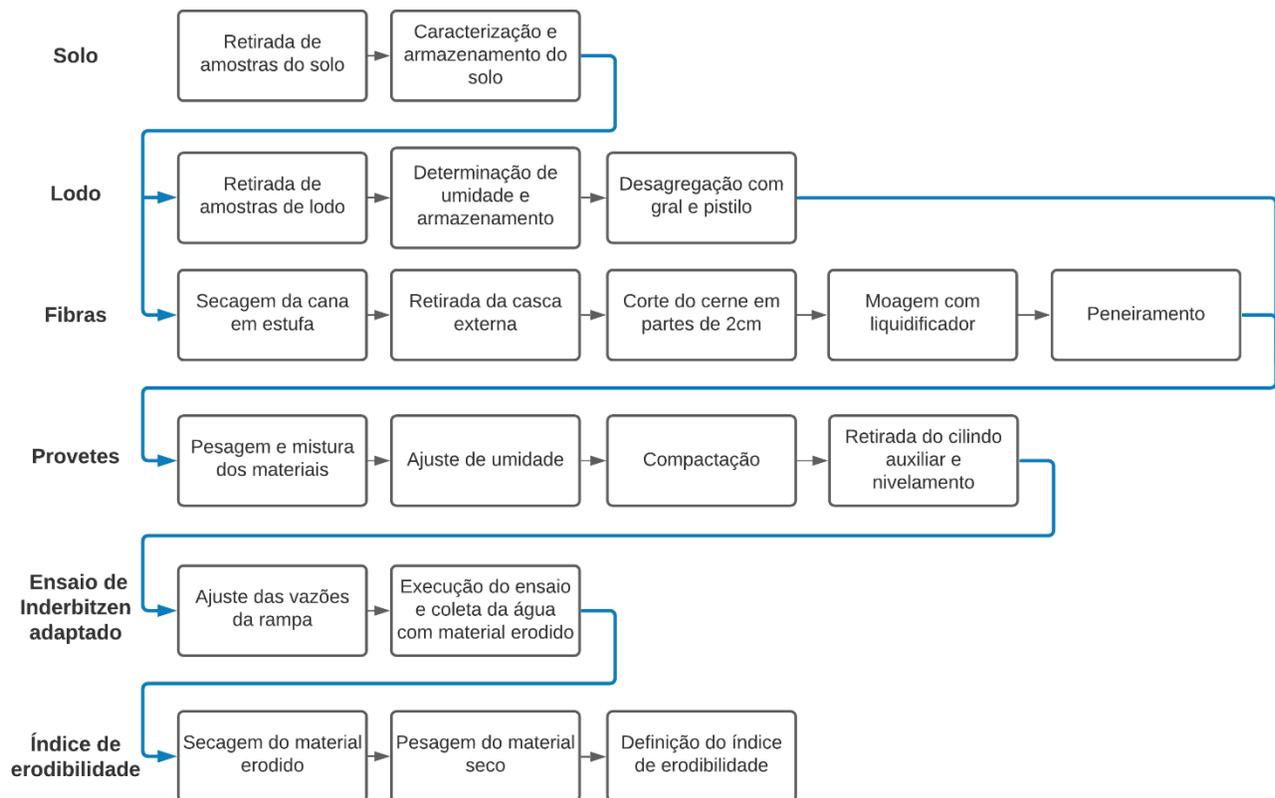


Figura 9 - Fluxograma do procedimento adotado no estudo

Fonte: Autoria própria

### 3.1. Retirada do solo

A amostra de solo foi retirada de uma jazida localizada nas proximidades da prefeitura de Itajubá – MG, a uma profundidade de aproximadamente 5,20 metros em relação a superfície com camada vegetal original, como apresentado pela Figura 10. O material foi retirado do referido local devido à proximidade com a universidade e por ser constituído majoritariamente de silte, o que possibilita seu uso para obras de contenção hidráulica.



Figura 10 - Local de retirada das amostras de solo  
Fonte: Autoria própria

As amostras foram do tipo deformadas, onde não se mantém a estrutura original. O armazenamento foi feito em sacos, que por sua vez foram guardados em tambores fechados, garantindo a manutenção da umidade do solo ao longo do período de ensaios. Mais informações sobre o material são apresentadas na Tabela 5. Os limites de liquidez e plasticidade foram obtidos empregando a NBR 6459 (ABNT<sup>2</sup>, 2017) e NBR 7180 (ABNT<sup>3</sup>, 2016), respectivamente. O teor de umidade ótimo e peso específico seco máximo foram determinados através da NBR 7182 (ABNT<sup>5</sup>, 2016). A composição granulométrica do solo foi determinada com a realização dos ensaios de peneiramento e sedimentação da NBR 7181 (ABNT<sup>4</sup>, 2016). O peso específico seco máximo foi obtido empregando a NBR 6458 (ABNT<sup>1</sup>, 2016).

Tabela 5 - Propriedades do solo estudado

Propriedade		Valores
Textura	Argila	11 %
	Silte	56 %
	Areia	33 %
Limite de Liquidez		48 %
Limite de plasticidade		34 %
Compactação	Teor de umidade ótimo	20 %
	Peso específico seco máximo	15 kN/m <sup>3</sup>
Peso específico dos grãos		2,6 g/cm <sup>3</sup>

### 3.2. Coleta do lodo e determinação de umidade

O lodo utilizado neste estudo é proveniente de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e foi coletado do leito de secagem da Estação de Tratamento de Esgoto Sapucaí, localizada em Itajubá, operada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais. De forma a adotar a dosagem correta de água na mistura para o corpo de prova a ser produzido, o lodo teve sua umidade definida através da amostragem apresentada na Tabela 6, realizada previamente a desagregação mecânica. Após a recepção e amostragem, o material foi armazenado em um tambor selado de forma a preservar suas características.

Tabela 6 – Determinação do teor de umidade do lodo

Amostra	Teor de Umidade	Teor de Umidade (média)
1	54,57%	65,57%
2	63,16%	
3	65,57%	

Além da determinação de umidade, o lodo também precisou ser desagregado com o auxílio de um gral e pistilo, como ilustrado pela Figura 11.



Figura 11 – Lodo Antes e após desagregação mecânica  
Fonte: Autoria própria

### 3.3. Preparo das fibras

De acordo com Mothé (2003), as fibras naturais possuem grande potencial de aplicação na indústria da construção civil, uma vez que são recursos naturais renováveis de baixo custo e impacto ambiental. Dentre estas fibras, destacam-se curauá, coco, sisal, abacaxi e a cana de açúcar. As fibras utilizadas no ensaio eram provenientes de bagaço de cana de açúcar, escolha também justificada pela grande disponibilidade, sendo o estado de Minas Gerais responsável por cerca de 10% da produção nacional de cana, de acordo com dados do IBGE (2021).

O bagaço da cana foi inicialmente seco a 110 °C e 0% de umidade durante 96h em estufa de secagem (modelo SOLAB SL100). Após a retirada, a cana era então descascada e o cerne era cortado em pedaços menores (de aproximadamente 2,0 cm de comprimento) com a ajuda de um alicate, como apresentado pela Figura 12. A produção de fibras se deu de forma que a quantidade de material fosse suficiente para produzir pelo menos 18 corpos de prova, uma vez que o tamanho do corpo de prova era conhecido e o teor de fibras baseado nas pesquisas de Rangel (2018).



Figura 12 - Processo de produção de fibras  
Fonte: Autoria própria

Os pedaços cortados de cerne eram então moídos com o auxílio de um liquidificador convencional. O resultado do processo do liquidificador era então peneirado para se retirarem partículas de tamanho particularmente grande ou pequeno, uniformizando a amostra. Apenas as partes retidas na peneira de 2mm eram utilizadas, e as fibras finais possuíam aproximadamente entre 1,0 e 2,0 cm de comprimento.

#### **3.4. Produção dos corpos de prova**

A produção dos corpos de prova foi feita em semelhança ao ensaio de Proctor Normal, utilizando como molde o cilindro auxiliar (colarinho) de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, dando-se 19 golpes em uma única camada com um soquete de 2,5 kg. A energia de compactação adotada foi de 3,69 kg/cm<sup>3</sup> (em comparação com os 5,72kg/cm<sup>3</sup> do Proctor Normal). A alteração da energia de compactação e número de camadas se mostrou necessária uma vez que, em contraste com o ensaio Proctor Normal, foi adotado o molde auxiliar (colarinho) como confinamento para o corpo de prova, e não o molde principal.

Todos os corpos de prova foram ensaiados no mesmo dia em que foram produzidos, e as características dos materiais eram mantidas constantes entre ensaios. Foram utilizadas três composições na produção dos corpos de prova: solo puro; solo modificado com adição de 1,5% da massa de solo seco em fibras, com base em Rangel (2018); solo modificado com adição de 1,25% da massa de solo seco em lodo, com base em Coelho (2015).

O teor de umidade de 20% foi o padrão adotado na produção dos corpos de prova, sendo, entretanto, necessário adicionar uma maior quantidade de líquido na produção com o material modificado com fibras e lodo, uma vez que ambos os materiais possuem a característica de absorver a umidade presente na mistura. A produção do material é apresentada nas Figura 13 e Figura 14, destacando-se a modificação por fibras e por lodo, respectivamente.



Figura 13 - Solo puro e solo modificado com 1,5% de fibras de cana, em umidade ótima  
Fonte: Autoria própria



Figura 14 – Lodo e solo puro, previamente à mistura e ajuste de umidade  
Fonte: Autoria própria

Além do cilindro auxiliar do ensaio Proctor, foi também utilizado o molde principal. Após a compactação, o molde principal era retirado e a amostra era nivelada à altura do cilindro auxiliar. O resultado final é apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Corpo de prova  
Fonte: Autoria própria

Gray e Leiser (1989) e Chuquipiondo (2007) apontam a correlação entre o índice de vazios e a maior erodibilidade dos solos. Ainda, de acordo com Feuerharmel (2000) e Hoare (1979), a inclusão de fibras aleatoriamente distribuídas acarreta um aumento do índice de vazios e da

porosidade do material, sendo este aumento proporcional à quantidade de fibras. Portanto, o processo de compactação é de suma importância no resultado final das amostras ensaiadas.

O preparo da mistura de solo-lodo foi realizado de forma análoga, sendo inicialmente definida uma proporção de 1:0,5 com base nos experimentos de Coelho et al. (2015). Entretanto, devido ao baixo peso específico do lodo, foi necessário reduzir a proporção para 1:0,125, uma vez que o volume de lodo frente ao solo foi muito superior ao esperado. A Figura 16 ilustra a mistura solo-lodo utilizada.



Figura 16 – Mistura solo-lodo na proporção de 1:0,125  
Fonte: Autoria própria

### 3.5. Adaptações na rampa

A rampa de Inderbitzen existente no Laboratório de Geotecnia da Unifei possui estrutura metálica com ajustes de inclinação regulados por porcas do tipo borboleta, possibilitando uma variação entre 16° e 50°, aproximadamente. Internamente, a rampa é revestida por vidro, possuindo um canal de 11 cm de largura e 150 cm de comprimento. Mais detalhes da rampa podem ser observados no Anexo A. Neste trabalho foram adotadas para investigação as inclinações de 16°, 30° e 50°.

De forma a facilitar a operação da rampa, diversificar as opções de ensaio e propor uma nova metodologia, foram instalados dois canos para direcionamento do fluxo de água e um reservatório localizado na parte superior da estrutura metálica. Como citado por Lemos (2002) e

recomendado por Inderbitzen (1961), foi também instalado um sistema de simulação de chuva composto por dois encanamentos paralelos, dotados de pequenos furos na face inferior. O fluxo de água era direcionado do reservatório superior para a rampa e para o simulador de chuva através de um par de registros para cada linha (um para ajuste e um para abertura e fechamento do fluxo). Por fim, de forma a manter o nível de água constante no reservatório superior, foi instalado um extravasor ligado a uma mangueira. Mais detalhes podem ser observados nas Figuras 17 e 18.



Figura 17 - Rampa de Inderbitzen após modificações (vista 1)  
Fonte: Autoria própria



Figura 18 – Rampa de Inderbitzen após modificações (vista 2)  
Fonte: Autoria própria

### **3.6. Operação de ensaio com solo modificado com fibras naturais**

Dada a inexistência de normas técnicas para o ensaio da rampa de Inderbitzen, o estudo adotou metodologias similares à original apresentada por Inderbitzen (1961) e Fácio (1991), porém com a adição do simulador de chuva em simultâneo à simulação de escoamento superficial. Ao fim do estudo, a proposta de metodologia adotada será resumida e apresentada como um dos produtos deste trabalho.

O ensaio na rampa foi dividido em três etapas, em um total de 10 minutos: a primeira etapa consistiu em 3 minutos de simulação de chuva; a segunda etapa consistiu em 5 minutos de simulação de chuva e escoamento superficial; a terceira etapa consistiu em 2 minutos de

simulação de escoamento superficial. O ensaio foi assim dividido de forma a simular o processo de chuva, em que o solo inicialmente é saturado, se inicia o escoamento superficial após a saturação, e então a chuva termina e apenas um escoamento superficial residual ocorre.

A vazão utilizada na rampa foi de 50 ml/s, seguindo o recomendado por Fácio (1991). A vazão utilizada no simulador de chuva foi fixada em 15ml/s, baseada em um evento de 50 minutos de duração, tempo de recorrência (TR) de 10 anos e intensidade de 53mm/h, utilizando a Equação de Chuva IDF de Itajubá estudada por Leite (2015). O TR escolhido é comumente adotado em bueiros e obras de escoamento pluvial, como apresentado no Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (2005).

Ambos os valores foram calibrados com a ajuda de uma proveta graduada e um cronômetro. Como cada um dos componentes possuíam um par de registros, um era utilizado para regular a vazão, e outro era aberto ou fechado completamente para permitir a passagem da água durante os procedimentos de ensaio. O nível do reservatório superior era mantido constante com a ajuda de um ladrão e com um fluxo de entrada de água contínuo através de uma mangueira.

Com as vazões calibradas, os corpos de prova eram então posicionados na base da rampa ainda nos moldes metálicos, presos por dois parafusos sextavados, garantindo a melhor selagem possível e evitando vazamentos de água pelas juntas, certificando que todo o solo e água fossem coletados pelos recipientes posicionados ao fim da rampa. A Figura 19 apresenta exemplos dos corpos de prova após a execução do ensaio, tendo sido realizadas três repetições para cada inclinação (16°, 30° e 50°) e para cada tipo de material (com e sem fibras).



Figura 19 – Corpos de prova após a execução do ensaio  
Fonte: Autoria própria

Após o ensaio, os recipientes contendo a água e o solo erodido eram marcados e deixados para decantar por 24h. Ao fim deste período, com o solo já ao fundo, a parcela superior de água era retirada utilizando sucção com o auxílio de uma mangueira. Uma vez retirada a maior quantidade possível do líquido sem causar o levantamento do material decantado, como mostrado na Figura 20, o restante era virado em béqueres de vidro. Os recipientes eram ainda lavados, sendo essa água também coletada e colocada em um segundo béquer, garantindo que todo o solo era transferido para o novo recipiente, inclusive as partículas mais finas.



Figura 20 – Recipiente contendo solo decantado após retirada do excesso de água  
Fonte: Autoria própria

Ao fim, os béqueres eram colocados para secagem em estufa, pesados e a massa de solo era então anotada. A partir destes dados foi possível definir a exata quantidade de solo erodida em cada ensaio da rampa, calculando o valor da erodibilidade de cada amostra.

### **3.7. Operação de ensaio com solo modificado com lodo de esgoto sanitário**

A operação de ensaio das amostras de lodo seguiu processo similar ao do solo modificado com fibras. Neste caso, entretanto, a duração total é de 18 minutos e a inclinação fixa em 30°. Os

testes com lodo foram realizados previamente aos testes com fibra, sendo uma iteração inicial do procedimento aqui desenvolvido.

O ensaio é iniciado com 5 minutos de simulação de chuva, seguido de 10 minutos de simulação simultânea de chuva e escoamento superficial, e é finalizado com 3 minutos de simulação de escoamento superficial. Ao fim dos ensaios, o material erodido era deixado a decantar, o excesso de água retirado e o restante seco em estufa. Por fim, calcula-se o índice de erodibilidade.

#### 4. Resultados e tratamento de dados

##### 4.1. Solo modificado com fibras naturais

Os corpos de prova produzidos com e sem a presença de fibras apresentaram diferenças quanto à massa total, sendo essa variação e aproximadamente 5,9%, como apresentado pela Tabela 7.

Tabela 7 - Média das massas das amostras

Tipo de amostra	Massa média (g)
Sem fibra	739,5
Com fibra	698,5

Os resultados dos ensaios da rampa foram compilados e avaliados para um nível de confiança de 95%. As amostras 7 e 11 foram retiradas previamente por erros na execução do ensaio. Por fim, as amostras 14 e 20 foram retiradas por estarem fora do intervalo de confiança desejado. A Tabela 8 apresenta a compilação de dados final. A média final da erodibilidade por inclinação e tipo é apresentada na Tabela 9.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de Inderbitzen Modificado

Amostra	Inclinação da rampa	Tipo de amostra	Solo seco erodido (g)	Índice de erodibilidade (g/cm <sup>2</sup> )
1	30°	Sem fibra	63,91	0,81
2	30°	Sem fibra	102,20	1,30
3	30°	Sem fibra	80,74	1,03
4	16°	Sem fibra	29,23	0,37
5	16°	Sem fibra	34,25	0,44
6	16°	Sem fibra	46,10	0,59
8	50°	Sem fibra	19,86	0,25
9	50°	Sem fibra	13,39	0,17
10	50°	Sem fibra	36,55	0,47
12	30°	Com fibra	191,10	2,43
13	30°	Com fibra	197,91	2,52
15	16°	Com fibra	119,00	1,52
16	16°	Com fibra	127,31	1,62
17	16°	Com fibra	136,50	1,74
18	50°	Com fibra	308,60	3,93
19	50°	Com fibra	307,90	3,24

Tabela 9 - Erodibilidade média

Inclinação da rampa	Tipo de amostra	Índice de erodibilidade médio (g/cm <sup>2</sup> )	Índice de Erodibilidade médio (g/cm <sup>2</sup> .min)
16°	Sem fibra	0,47	0,05
30°	Sem fibra	1,05	0,10
50°	Sem fibra	0,30	0,03
16°	Com fibra	1,62	0,16
30°	Com fibra	2,48	0,25
50°	Com fibra	3,92	0,39

O aumento da inclinação da rampa resultou em um maior índice de erodibilidade das amostras, com exceção do solo puro na inclinação de 50° (contrariando a tendência de crescimento presente, por exemplo, nos ensaios de solo modificado com fibra). O solo modificado com fibra apresentou uma erodibilidade superior ao do solo puro em todas as inclinações avaliadas.

A Figura 21 apresenta a compilação dos índices de erodibilidade em forma gráfica e suas respectivas linha de tendência. A linha de tendência do solo modificado apresenta um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,98, enquanto a linha de tendência do solo puro apresenta um coeficiente de determinação de 0,83.

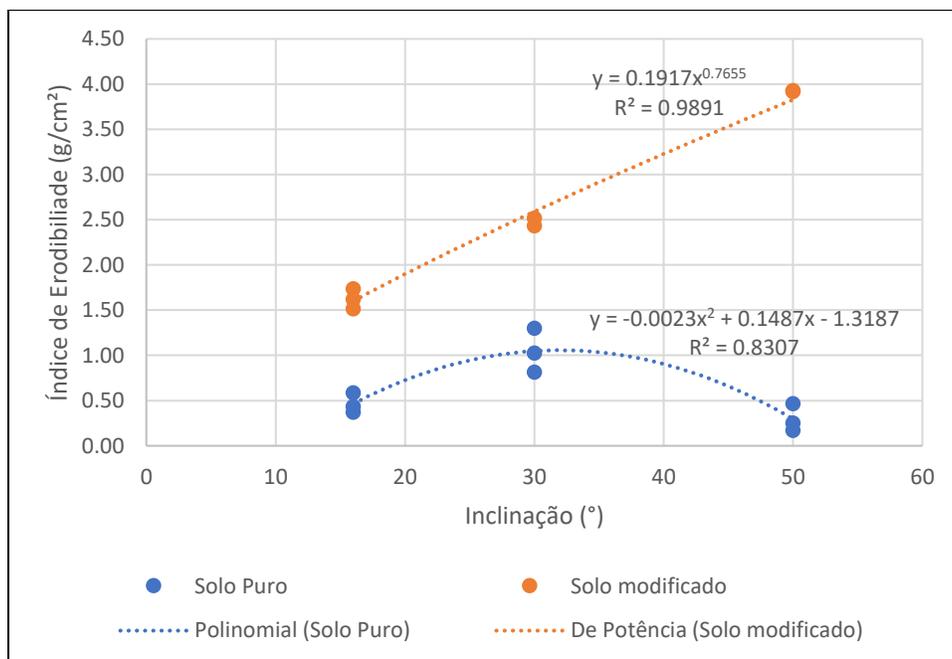


Figura 21 – Compilação gráfica do índice de erodibilidade  
 Fonte: Autoria própria

#### 4.2. Solo modificado com lodo de esgotos sanitários

Os resultados dos ensaios foram compilados e avaliados para um nível de confiança de 95%. A amostra 3 do conjunto de ensaios de solo puro foi retirada previamente por estar fora do intervalo de confiança desejado, sendo o resultado final e a média apresentados na Tabela 10. A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios realizados com solo modificado com lodo.

Tabela 10 – Resultados de ensaios para solo puro

Solo puro				
Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa erodida (g)	Índice de erodibilidade (g/cm <sup>2</sup> )	Índice de erodibilidade (g/cm <sup>2</sup> .min)
1	697,1	78,82	1,00	0,06
2	699,4	81,21	1,03	0,06
Média	697,6	98,64	<b>1,02</b>	<b>0,06</b>

Tabela 11 - Resultados de ensaios para solo modificado com lodo

Solo modificado com lodo				
Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa erodida (g)	Índice de erodibilidade (g/cm <sup>2</sup> )	Índice de erodibilidade (g/cm <sup>2</sup> .min)
1	610,2	108,2	1,38	0,08
2	624,7	89,2	1,14	0,06
3	595,7	139,5	1,78	0,10
Média	610,2	112,3	<b>1,43</b>	<b>0,08</b>

Através dos resultados, é possível notar que o índice de erodibilidade do solo modificado com lodo é cerca de 40% superior ao do solo puro. Observa-se também a existência de uma proximidade dos resultados de erodibilidade do solo puro aqui presentes e do solo puro testado com inclinação de 30° nos testes com modificação por fibras naturais.

## 5. Conclusões

Enquanto a metodologia original é capaz de cobrir diferentes vazões e inclinações de forma aceitável, a nova metodologia é também capaz de simular de forma aceitável o processo da chuva, sendo claramente observável a remoção de material nos locais de impacto das gotas. Portanto, em comparação ao ensaio original, o novo modelo de testes consegue acrescentar o fator de impacto direto da chuva na amostra, apresentando um realismo superior na simulação do processo de erosão.

A redução da erodibilidade do solo puro com inclinação de 50° pode indicar que, apesar de ampla, o intervalo de inclinação funcional da rampa deve ser revisto. Com a maior inclinação, o fluxo do escoamento superficial atinge maiores velocidades e, ao alcançar a amostra, pode estar “saltando” a abertura onde ela está posicionada, reduzindo o contato da água com o material estudado e diminuindo a quantidade de solo erodido. Como a presença das fibras acaba por reduzir a resistência do material à erosão, comentado posteriormente, o menor contato do fluxo de escoamento superficial com a amostra ainda é capaz de causar considerável carregamento de partículas, o que não ocorre com o solo puro. A limitação da rampa a inclinações inferiores a 50° não deve ser problema, uma vez que taludes de barragens geralmente não alcançam tal valor.

Outra plausível explicação para a redução da erodibilidade na inclinação de 50° é a pura decomposição de forças das gotas de chuva. Uma vez que a inclinação é superior, a parcela da força de impacto normal à superfície do solo possui menor intensidade, reduzindo a quantidade de energia transferida no efeito *splash*.

A modificação com fibras de cana não se mostrou uma boa opção para elevar a resistência à erosão do solo, causando o exato oposto efeito e reduzindo cerca de quatro vezes a resistência do solo. Dentre as possíveis razões, pode-se citar uma possível quantidade excessiva de fibras, uma energia de compactação muito baixa ou a compactação em uma única camada.

A compactação em única camada foi escolhida devido a pequena dimensão do corpo de prova produzido. Nos estudos com modificações utilizando fibras de polipropileno realizados por Pradhan (2011), a compactação foi realizada em três camadas em oposição à uma única camada. A compactação com o mesmo número de golpes, porém com mais camadas, geralmente resulta em um corpo de prova mais denso e com maior resistência mecânica. Esta diferença de

compactação pode ser também responsável pelo aumento da erodibilidade do solo, e deve ser avaliada em futuros estudos.

Uma vez que os corpos de prova compostos por solo puro tem cerca de 6% mais massa em comparação aos corpos de prova compostos por solo modificado, é possível afirmar que a presença das fibras causou diretamente o aumento da erodibilidade do solo, comprovando as observações de Feuerharmel (2000) e Hoare (1979). Isso reforça as ideias de Gray e Leiser (1989) e Chuquipiondo (2007), correlacionando um maior índice de vazios com uma maior erodibilidade do solo.

Assim como as fibras, a modificação pela adição de lodo não foi capaz de reduzir a erodibilidade do solo, elevando a mesma em cerca de 40% quando comparado ao solo puro. É possível que a presença de microorganismos, geradores de reações exotérmicas constantes, aliada à alta porosidade, tenham dificultado a retenção de umidade durante o preparo dos corpos de prova, dificultando a correta compactação das amostras.

Para futuros trabalhos, recomenda-se que seja tomado especial cuidado na manutenção da umidade dos materiais, principalmente do lodo, uma vez que a perda de água pode alterar drasticamente o processo de compactação. Também se recomenda o estudo de diferentes energias de compactação, da produção dos corpos de prova em diferentes números de camadas, e da modificação por fibras e lodo em diferentes proporções das aqui testadas. Salienta-se que o intervalo de inclinação adotado nos ensaios de solo modificado com fibras naturais também deve ser avaliado.

# Apêndices

## Apêndice A – Metodologia de ensaio com rampa de Inderbitzen modificada

	<b>ENSAIO DE INDERBITZEN MODIFICADO</b> <b>Método de ensaio</b>	<b>SET/2021</b>
---	--	-----------------

### SUMÁRIO

- 1 Objetivo**
- 2 Aparelhagem**
- 3 Energias de compactação**
- 4 Execução do ensaio**
- 5 Cálculos**
- 6 Resultados**

### 1 OBJETIVO

Esta norma prescreve a metodologia para determinar o índice de erodibilidade de solos, modificados ou não, de acordo com os processos especificados.

### 2 APARELHAGEM

A aparelhagem necessária para a execução do ensaio é a seguinte:

- Balanças que permitam pesar nominalmente 200g, 1,5kg e 5kg, com resoluções de 0,01g, 0,1g e 0,5g, respectivamente;
- Estufa capaz de manter temperatura entre 60°C e 65°C e entre 105°C e 110°C;
- Béquer de vidro com capacidade mínima de 3 litros (duas unidades por amostra ensaiada), e com massa conhecida;
- Água destilada em volume suficiente, em pisseta plástica;

- e) Bandejas com capacidade suficiente para armazenar o material utilizado na confecção dos corpos de prova;
- f) Molde cilíndrico (cilindro Proctor, com 10 cm de diâmetro e 12,73 cm de profundidade), com base e cilindro complementar de mesmo diâmetro;
- g) Papel filtro com diâmetro igual ao do molde empregado;
- h) Soquete metálico com massa de  $2500 \pm 10$  g dotado de dispositivo de controle de altura de queda (guia) com  $305 \pm 2$ mm;
- i) Recipientes plásticos ou de material similar com volume mínimo de 29 litros, com tampa;
- j) Bomba de sucção e mangueira com comprimento adequado para retirada de água após processo de decantação;
- k) Espátula de lâmina flexível com aproximadamente 2 cm de largura e 12 cm de comprimento;
- l) Proveta graduada e cronômetro;
- m) Rampa de Inderbitzen modificada.

### 3 ENERGIA DE COMPACTAÇÃO

A energia de compactação utilizada nesta norma é referente a 19 golpes do soquete metálico em única camada ( $3,69\text{kg/cm}^3$ ), variando a localização do golpe no cilindro metálico a cada pancada. Outras variações de energia de compactação podem ser adotadas mediante apresentação de pormenores calculados através da expressão:

$$E = \frac{P \times h \times N \times n}{V}$$

Onde:

$E$  é a energia de compactação, por unidade de volume

$P$  é o peso do soquete, em kg

$h$  é a altura de queda do soquete, em cm

$N$  é o número de golpes por camada

$n$  é o número de camadas

$V$  é o volume do solo compactado, em  $\text{cm}^3$

## **4 EXECUÇÃO DO ENSAIO**

### 4.1. Produção do corpo de prova

- 4.1.1. Fixar o molde cilíndrico à sua base, acoplar o cilindro complementar e apoiar o conjunto em superfície rígida. Utilizar papel filtro entre a base e o cilindro para evitar a aderência do material com a base metálica.
- 4.1.2. Preparar o material a ser utilizado nos corpos de prova em sua umidade ótima. Caso a produção seja para mais de um provete, cobrir a amostra ou fechá-la com um saco plástico para evitar a perda de umidade.
- 4.1.3. Colocar o material em uma única camada, preencher totalmente o cilindro e cerca de 50% do cilindro auxiliar.
- 4.1.4. Posicionar cuidadosamente o soquete sobre o material a compactar. Aplicar 19 golpes no total, variando a localização a cada golpe e utilizando totalmente a amplitude da guia, buscando comprimir igualmente toda a área do cilindro.
- 4.1.5. Raspar material em contato com o cilindro auxiliar utilizando a espátula de lâmina até atingir a junção entre o cilindro e o cilindro auxiliar. Retirar o cilindro auxiliar cuidadosamente, sem realizar movimentos de torção ou rotação. Nivelar o corpo de prova, retirando o excesso de material que esteja além das dimensões do cilindro.
- 4.1.6. Retirar o cilindro da base, retirar o papel filtro da superfície do corpo de prova.

### 4.2. Execução do ensaio

- 4.2.1. Fixar na inclinação desejada para simulação da rampa.
- 4.2.2. Calibrar a vazão da rampa individualmente (simulador de chuva e simulador de escoamento superficial), utilizando um dos dois registros para ajuste fino e outro para abertura e fechamento total do fluxo, com o auxílio da proveta graduada e do cronômetro. Manter o reservatório superior em nível constante durante o processo de calibração.
- 4.2.3. Fixar o cilindro com o corpo de prova na abertura da parcela final da rampa. Verificar se a região de contato entre o cilindro e a superfície inferior da rampa está bem selada.
- 4.2.4. Posicionar recipiente plástico na base da rampa para coleta da água com o material erodido.

- 4.2.5. Iniciar ensaio pela abertura do simulador de chuva. Cronometrar 2 minutos e iniciar o escoamento superficial. Cronometrar 5 minutos e desligar o simulador de chuva. Cronometrar 3 minutos e desligar o simulador de escoamento.
- 4.2.6. Mover o recipiente plástico para local protegido e longe de contato e vibrações. Tampar e aguardar 24h.

#### 4.3. Separação do material erodido

- 4.3.1. Destampar cuidadosamente o recipiente após as 24h e verificar o estado de decantação. Com a decantação completa, utilizar bomba de sucção e cuidadosamente retirar a água de forma a não levantar o material decantado ou deixá-lo ser puxado pela bomba.
- 4.3.2. Após a retirada do excesso de água, virar o restante do líquido com o material decantado no primeiro béquer. Utilizar água destilada da pisseta para lavar o recipiente e despejar o restante do material lavado para o segundo béquer. Garantir que a totalidade do material seja lavado e esteja presente dentro dos béqueres.
- 4.3.3. Posicionar os béqueres na estufa para secagem. Atentar-se para possíveis limitações de temperatura do material estudado (matéria orgânica e similares), caso sejam necessárias avaliações laboratoriais posteriores.
- 4.3.4. Após secagem completa do material, pesar massa total erodida pelo ensaio.

## 5 CÁLCULOS

- 5.1. Determinar o índice de erodibilidade do material através da expressão:

$$E = \frac{4 \times m}{\pi \times D^2} = \frac{4 \times m}{\pi \times 100}$$

Onde,

$E$  é o índice de erodibilidade, em  $\text{g/cm}^2$

$m$  é a massa erodida, em g

$D$  é o diâmetro do cilindro, em cm

## **6 RESULTADOS**

### **6.1. Índice de erodibilidade**

Os resultados devem ser expressos em  $\text{g/cm}^2$  com precisão de duas casas decimais.

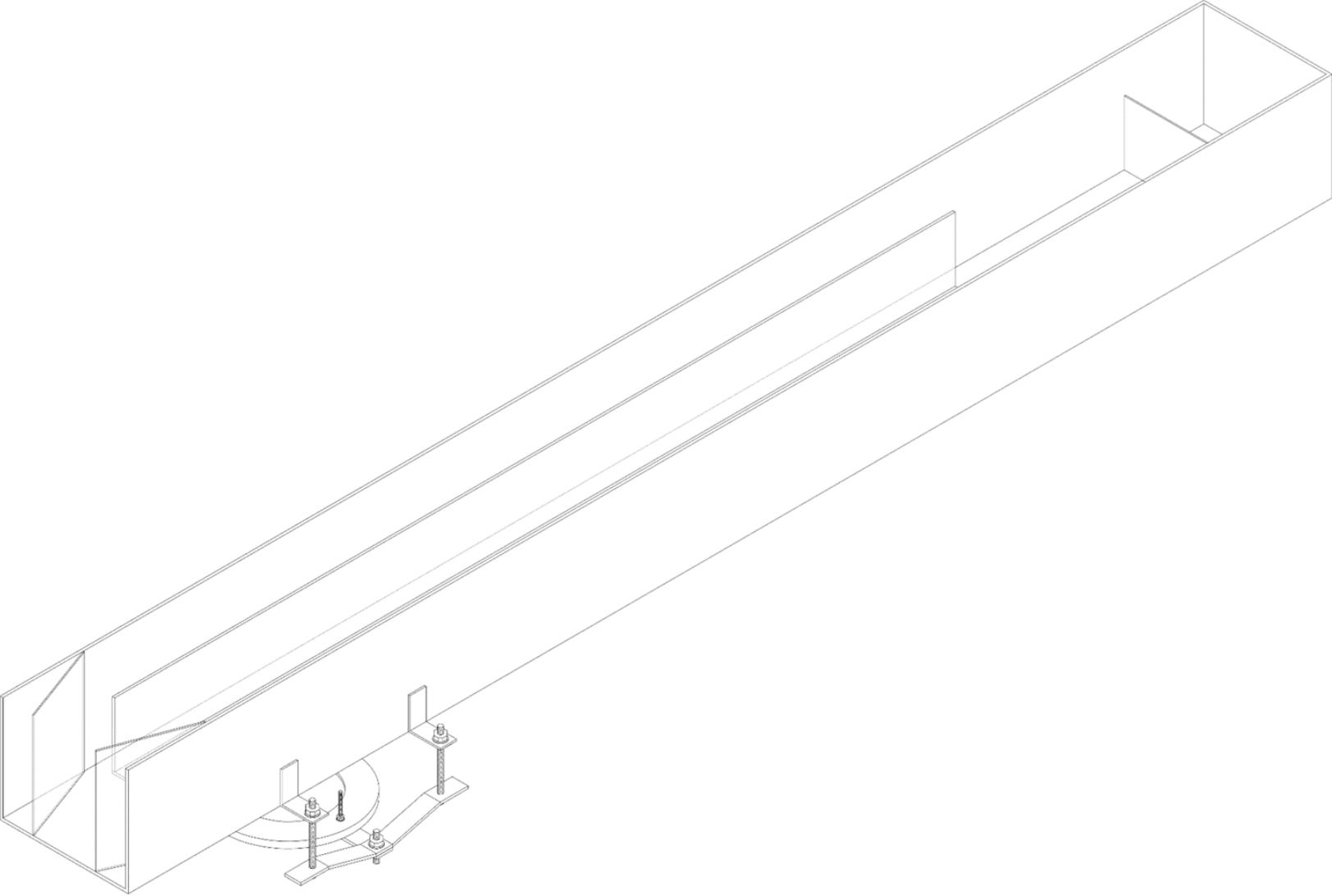
### **6.2. Gráfico índice de erodibilidade x inclinação**

No caso de existirem ensaios com diferentes inclinações, os resultados devem ser plotados com o índice de erodibilidade como eixo das ordenadas, com precisão de duas casas decimais, e inclinação como eixo das abcissas. Espera-se uma reta de tendência resultante com comportamento crescente.

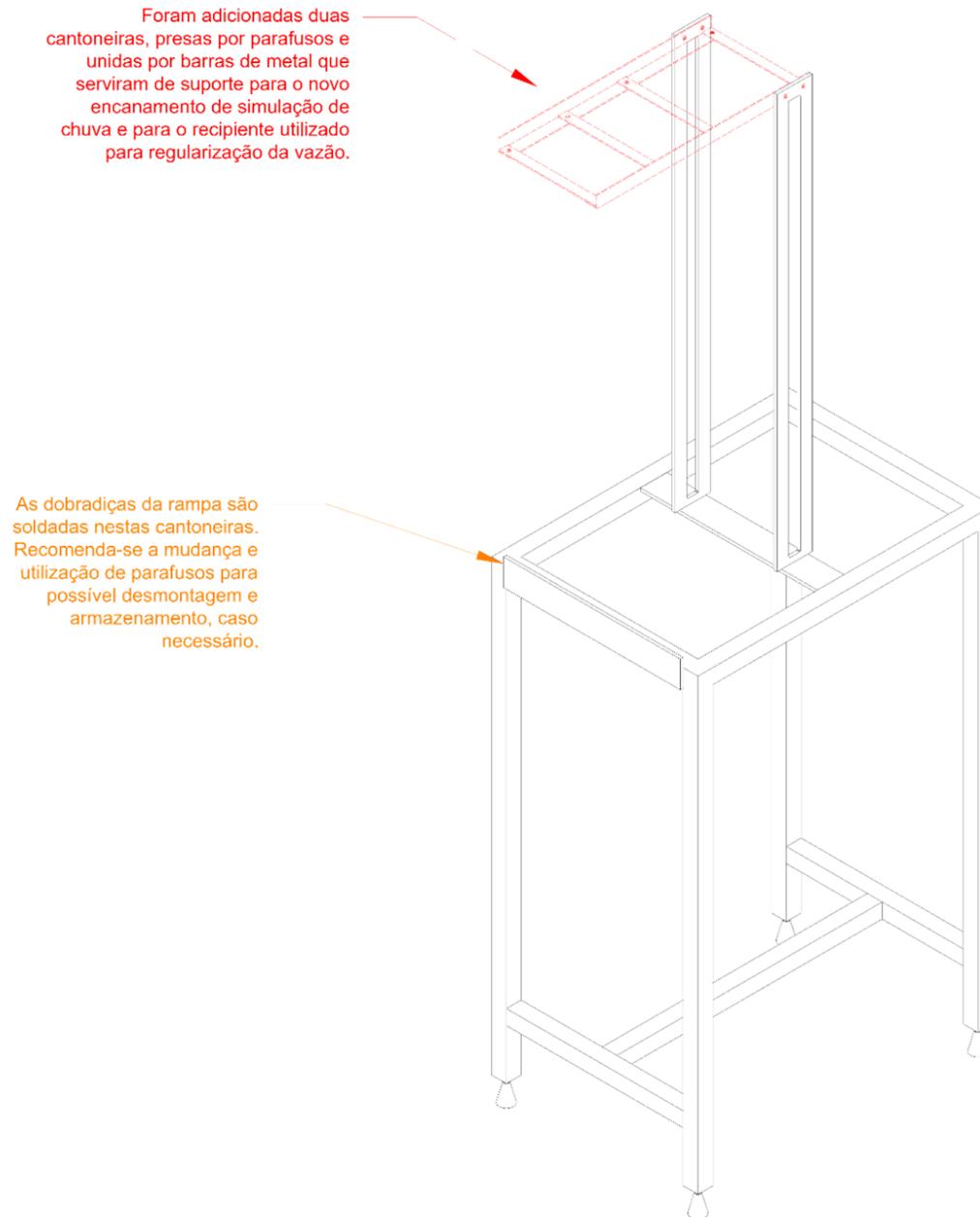
## **Anexos**

## **Anexo A – Detalhes da rampa de Inderbitzen**

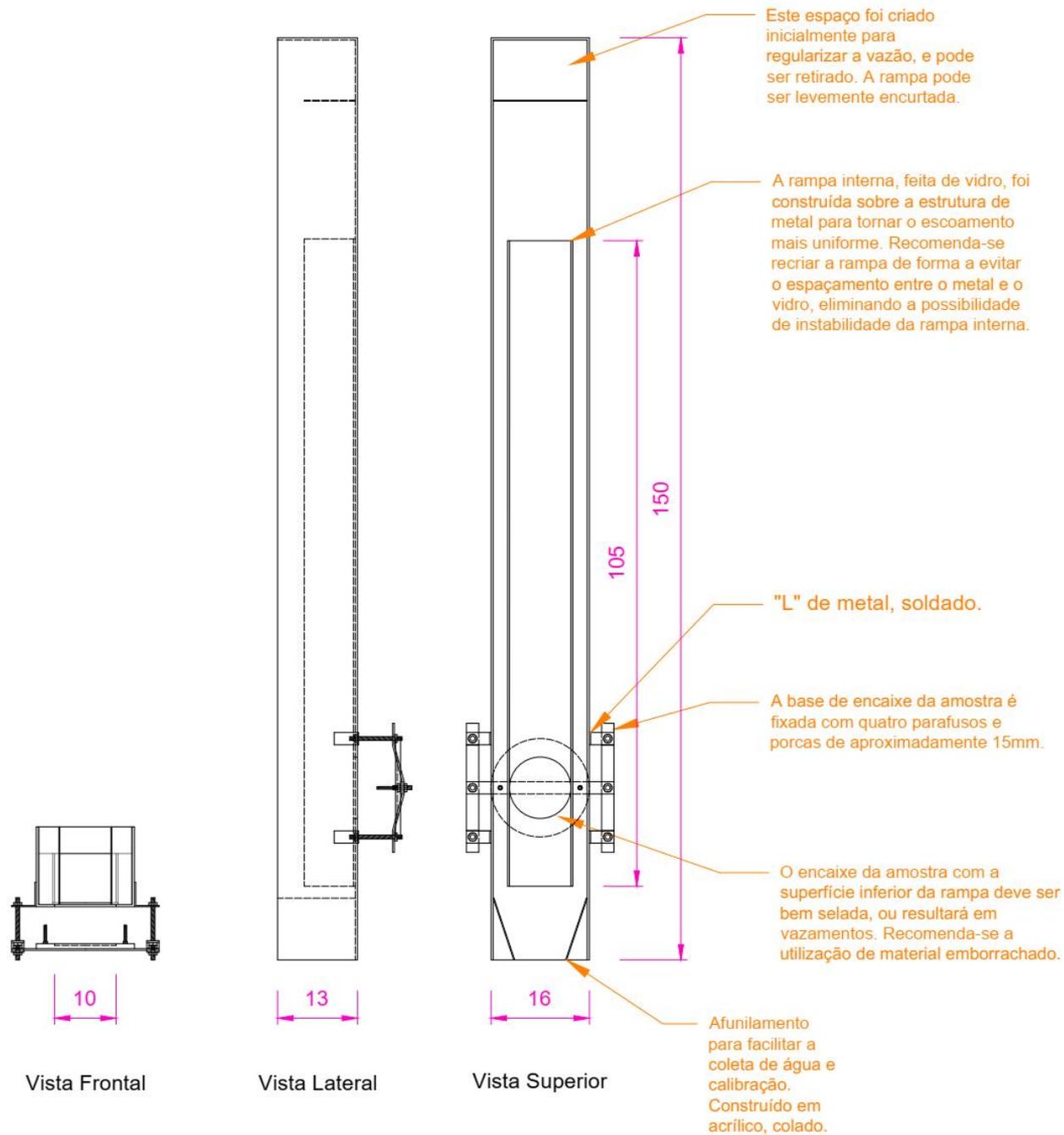
**Anexo A.1 – Rampa de Inderbitzen (vista isométrica da rampa)**



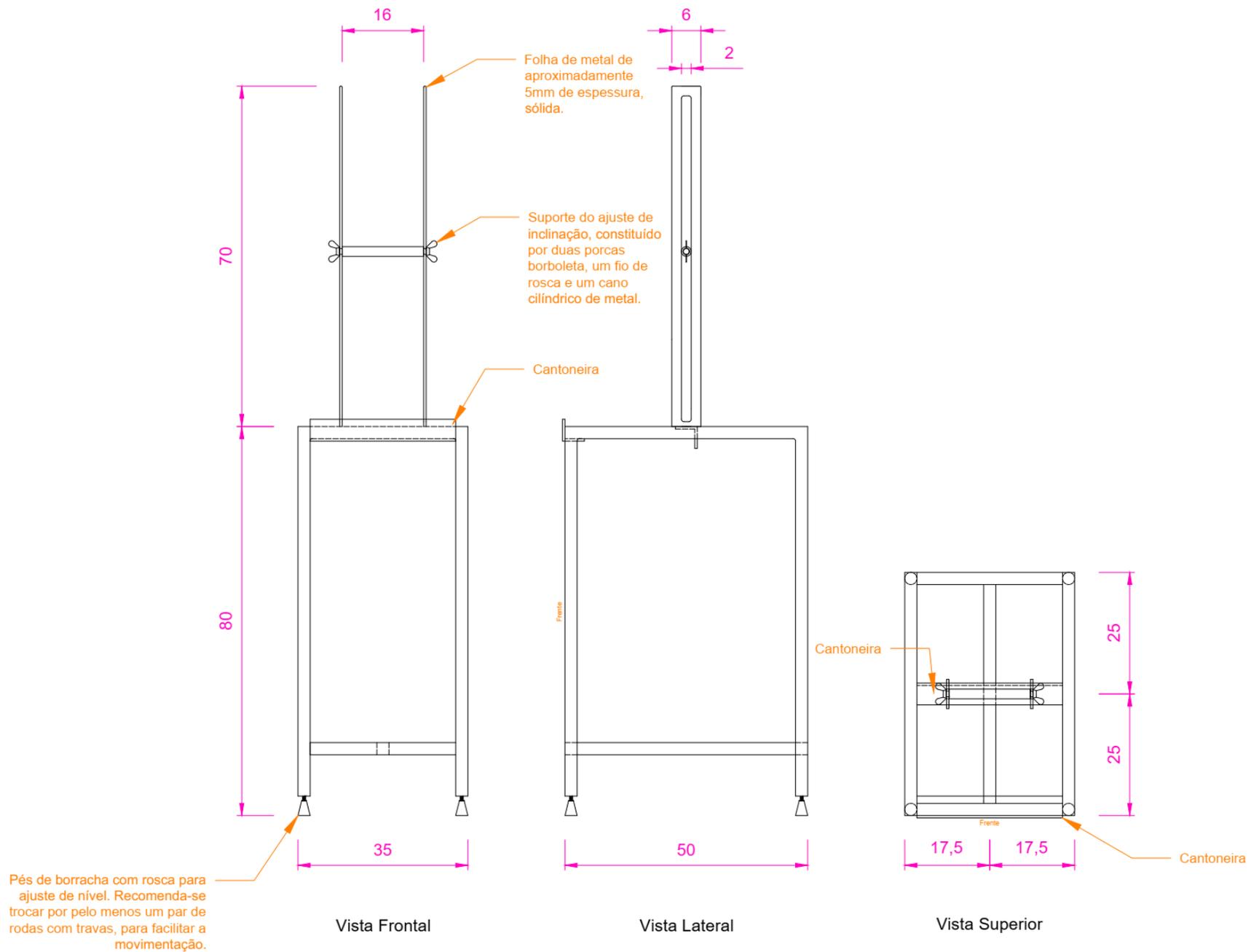
## Anexo A.2 – Rampa de Inderbitzen (vista isométrica da base)



### Anexo A.3 – Rampa de Inderbitzen (vistas frontal, lateral e superior da rampa)



## Anexo A.4 – Rampa de Inderbitzen (vistas frontal, lateral e superior da base)



## Referências

AFRIN, H. A review on different types soil stabilization techniques. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, vol 3. 6p. 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS<sup>1</sup>. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS<sup>2</sup>. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS<sup>3</sup>. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS<sup>4</sup>. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS<sup>5</sup>. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 2016.

ALCÂNTARA, MAT. **Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 128p. 1997.

AMORIM, RSS; SILVA, DD; PRUSKI, FF; MATOS, AT. Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. **Engenharia Agrícola**, n° 6, vol. 30, p. 1046 – 1049. Nov./dez. 2010.

ANA<sup>1</sup>. Curso de segurança de barragens. Módulo II: Inspeção e auscultação de barragens. Unidade 1: Anomalias em barragens. Disponível em: [https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/11/Unidade\\_1-modulo2.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/11/Unidade_1-modulo2.pdf). Acesso em: 15 set. 2021.

ANA<sup>2</sup>. Curso segurança de barragens. Módulo I: Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais. Unidade 9: barragens de terra e enrocamento. Disponível em: [https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/9/Unidade\\_9-modulo1.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/9/Unidade_9-modulo1.pdf) . Acesso em: 14 de set. 2021.

ANANIAS, EJ; TEXEIRA, AM; DURAN, JS. O uso crescente de solos reforçados para contenções em áreas urbanas: uma ênfase aos 20 anos da solução Terramesh no Brasil. **Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas**, São Paulo. Anais. 2009.

ARAUJO, RC. CAMPOS, TMP. Uso dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração para avaliar a erodibilidade. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, nº128, p. 67-85. jul. 2013.

BASTOS, CAD. **Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 303p. 1999.

BASTOS, CAB; GEHLING, WYY; MILITITSKY, J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e prática na Engenharia Civil**, nº 2, p. 9 – 18. mai. 2001.

BENJAMIM, CVS. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – USP, Universidade de São Paulo, São Carlos. 326p. 2006.

BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. **Livroceres**. Piracicaba. 392p. 1990.

BURGOS, PC; VILAR, OM; ALCÂNTARA, MAT. Um estudo preliminar da erodibilidade de alguns solos da cidade de Salvador – BA. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO), 1999. **Anais**. 1999.

BRASIL. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. 2ª ed, 133p. 2005.

CAJADA, JCA. **Estabilização química de diferentes solos com adição de fibras de polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Coimbra, Coimbra. 83p. 2017.

CARVALHO, NO. **Hidrossedimentologia prática**. Interciência, 2ª Ed, Rio de Janeiro. 2008.

CHUQUIPIONDO, IGV. **Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água: estudo de caso trecho de vazão reduzida Capim Branco**

**Araguari Minas Gerais.** Dissertação (Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 216p. 2007.

COELHO, RV; TAHIRA, FS; FERNANDES, F; FONTENELE, HB; TEIXEIRA, RS. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil.** Vol. 10, n° 2, p. 11-22. 2015.

COSTA, AN; COSTA, AFS; CAETANO, LCS. Aspectos químicos e físicos da disposição do lodo de ETE no solo. Vitória: **INCAPER**, p.32-35. 2011.

COUTO, BOC. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 125p. 2015.

CRUZ, PT. **100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos.** Oficina de Textos, 2ª Edição, São Paulo. 648p. 2004.

DEMARCHI, JC; ZIMBACK, CRL. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do ribeirão das perobas. **Energia na agricultura**, n. 2, vol. 29, p. 102 – 114. Abr/jun 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Boletim Técnico BT-1: Aterros Reforçados com Geotêxteis.**1986.

FÁCIO, J. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 122p. 1991.

FERNANDES, MM. **Mecânica dos solos: introdução à engenharia geotécnica.** Volume 2. Oficina de Textos. 1ª Ed. 450p. 2014.

FEUERHARMEL, MR. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno.** Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2000.

FLANAGAN, DC; ASCOUGH II, JC; NICKS, AD; NEARING, MA; LAFLEN, JM. Overview of the WEPP erosion prediction model. In: USDA – Water Erosion Prediction Project (WEPP). **NSERL**, report n° 10. 1995.

FREIRE, EP. Ensaio de Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: **Simpósio Nacional de Controle de Erosão**, Goiânia. 2001.

GUERRA, A. J. T. CUNHA, S. B. Degradação Ambiental. In: GUERRA, A. J. T. CUNHA, S. B. (Org). **Geomorfologia e Meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. Cap. 7.

Gray, DH; AL-REFEAI, T. Behaviour of fabric versus fiber reinforced sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, 804-820. 1986.

GRAY, DH; LEISER, AT. Biotechnical Slope Protection - Erosion Control. **Robert E. Krieger Publishing Co.**, Malabar, FL. 271 p. 1989.

GRIEBELER, N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 122p. 2002.

HEJAZI, MS; SHEIKHZADEH, M; ABTAHI, SM; ZADHOUSH, A. **A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers**. Construction and Building Materials, v. 30, p. 100 – 116. 2012.

HOARE, DJ. Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres. In: **International Conference on Soil Reinforcement**, Paris. Anais, v. 1, p. 47-52. 1979.

IBGE. Produção Agrícola – Lavoura Temporária. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/itajuba/pesquisa/14/10193?localidade1=31&localidade2=0>. Acesso em: 14 set. 2021.

INDERBITZEN, AL. **An erosion test for soils**. Materials Research & Standards, vol. 1, n° 7, p. 553 – 554. 1961.

JORDÃO, EP; PESSOA, CA. Tratamento de esgotos domésticos. 3 ed. Rio de Janeiro: **ABES**. 683 p. 1995.

LEITE, FFO. **Aplicação do modelo hidrológico HEC-HMS na análise da influência do uso e ocupação do solo nas vazões de bacias hidrográficas.** Dissertação (Graduação em Engenharia Hídrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 74p. 2015.

LEMOS, CF. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 97p. 2002.

LEMOS, CF. SILVEIRA, CT. MILANI, JR. OKA-FIORI, C. FIORI, AP. Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do Rio da Bucha (PR), através do aparelho de Inderbitzen. **Revista eletrônica do programa de pós-graduação em Geografia – UFPR**, vol. 2, n° 2, pag. 156-171. Jul./dez 2007.

LEPSCH, IF. Formação e conservação dos solos. **Oficina de Textos**, 2a ed., 216p. 2010.

LOURENÇO, L. NUNES, A. Catástrofes mistas: uma perspectiva ambiental. **Imprensa da Universidade de Coimbra**. 368p. 2019.

MENDES, CAR. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pouso no município de Bom Jardim – RJ.** Tese (Doutorado em Ciência em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 236p. 2006.

MENDONÇA, SR; MENDONÇA, LC. Sistemas Sustentáveis de Esgotos. **Blucher**, 2ª ed. 364p. 2017.

MORAES, DVS. **Avaliação do uso do ensaio de cone de laboratório para estimativa da erodibilidade.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 66p. 2015.

MOTHÉ, CG; ARAÚJO, CR. **Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de curauá.** Escola de Química, UFRJ. 5p. 2003.

NASCIMENTO, PC; LOMBARDI NETO, F. Razão de perdas de solo sob cultivo de três leguminosas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n° 1, p. 121 – 125. 1999.

NOGAMI, JS; VILLIBOR, DF. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Villibor, São Paulo, p. 169 – 196. 1995.

NOGAMI, JS; VILLIBOR, DF. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, n° 19, p.196 – 199. 1979.

OLIVEIRA, JRC. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. Dissertação (Graduação em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 284p. 2008.

PEREIRA, KLA. **Estabilização de um solo com cimento e cinza e lodo para uso em pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 125p. 2012

PINTO, CS. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. Oficina de textos. 3ª Ed. 368p. 2006.

PRADHAN, PK; KAR, RK. **Effect of random inclusion of polypropylene fibers on strength characteristics of cohesive soil**. Geotechnical and Geological Engineering, v. 30, p. 15 – 25. 2011.

PRUSKI, FF. Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2a Ed. Viçosa: **Ed UFV**. 279p. 2009.

PRUSKI, FF; SILVA, DD; MEHL, HU; MARQUES, EAG. Métodos para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em estradas não pavimentadas. **REVENG**. 10p. 2009.

RANGEL, ACM. **Avaliação pedológica e geotécnica de solos modificados com fibra de cana de açúcar**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 72p. 2018.

RENARD. KG; FOSTER, GR; WEESIES, GA. PORTER, JP. Revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, vol. 1, n° 45, p. 30 – 33. 1991.

SAMPAIO, TF; GUERRINI, IA; BACJES, C; HELIODORO, JCA; RONCHI, HS; TANGANELLI, KM; CARVALHO, NC; OLIVEIRA, FC. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo** [online], vol.36, n.5, p.1637-1645. 2012.

SAYÃO, A. **Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento.** Curso de Mestrado da PUC -RJ, Rio de Janeiro. 2009.

SHUKLA, SK; SIVAKUGAN, N; DAS, BM. Fundamental concepts of soil reinforcement – an overview. **International Journal of Geotechnical Engineering**, Vol.3. 14p. 2009.

SILVA, APN; MELO, MTS. Análise do Histórico de Desenvolvimento de Modelos de Aparelho de Inderbitzen para a Confecção de Tabelas Comparativas. In: Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão. **Blucher**, p. 51 – 64. 2016.

SILVA, MLN; FREITAS, DAF; CÂNDIDO, BM. **Manejo e conservação do solo e da água: guia de estudos.** Universidade Federal de Lavras, Lavras. 74p. 2015.

SILVA, MSL. Estudos da erosão. **Embrapa**, 22p. 1995.

SOUZA, MM. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC.** Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 139p. 2013.

TOMASI, LF. **Ensaio de Inderbitzen para avaliação da erodibilidade dos solos e rochas: aplicação nas regiões de Santa Maria, São Francisco de Assis e Porto Alegre/RS.** Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 83p. 2015.

WISCHMEIER, WH; SMITH, DD. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. **U.S. Department of Agriculture**, Agriculture Handbook, n° 537. 1978.

