



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DA ERODIBILIDADE DE UM SOLO DA CIDADE DE  
BARREIRAS-BA UTILIZANDO UM EQUIPAMENTO  
INDERBITZEN**

**LETÍCIA SANTOS DE OLIVEIRA PURIFICAÇÃO RIBEIRO**

**BARREIRAS-BA  
AGOSTO-2018**

**LETÍCIA SANTOS DE OLIVEIRA PURIFICAÇÃO RIBEIRO**

**ANÁLISE DA ERODIBILIDADE DE UM SOLO DA CIDADE DE  
BARREIRAS-BA UTILIZANDO UM EQUIPAMENTO  
INDERBITZEN**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal  
do Oeste da Bahia, como requisito à obtenção do  
grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. MSc. Vinícius de Oliveira Kühn

**BARREIRAS-BA**

**AGOSTO-2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

R484 Ribeiro, Letícia Santos de Oliveira Purificação.

Análise da erodibilidade de um solo da cidade de Barreiras-BA utilizando um equipamento Inderbitzen. / Letícia Santos de Oliveira Purificação Ribeiro. – 2018. 67f.

Orientador: Prof. Dr. MSc. Vinícius de Oliveira Kühn

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, 2018.

1. Solos. 2. Barreiras – Município da Bahia. I. Kühn, Vinícius de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 631.4

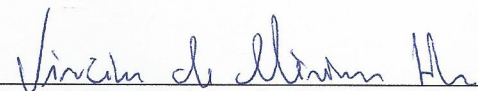
LETÍCIA SANTOS DE OLIVEIRA PURIFICAÇÃO RIBEIRO

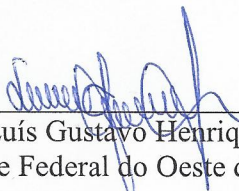
ANÁLISE DA ERODIBILIDADE DE UM SOLO DA CIDADE DE  
BARREIRAS-BA UTILIZANDO UM EQUIPAMENTO  
INDERBITZEN

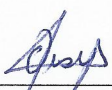
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Oeste da Bahia, como  
requisito parcial à obtenção do grau de  
Engenheiro Civil.

Aprovada em 23 de AGOSTO de 2018

**Banca Examinadora**

Orientador (a):   
Prof. MSc. Vinícius de Oliveira Kühn  
Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB

  
Prof. DSc. Luís Gustavo Henriques do Amaral  
Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB

  
Prof. DSc. Oisy Hernández Menéndez  
Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre ter direcionado o melhor caminho a seguir a cada escolha que tive que fazer durante essa jornada.

Aos meus pais, Raquel e Valdinei, pelo amor incondicional, por confiarem em meu potencial de ser uma boa filha, aluna e futura profissional e pelo apoio oferecido a mim a minha vida inteira.

Aos meus irmãos, Alícia e Gabriel, por serem meu pilar. Por serem a minha paz em momentos difíceis e me fazerem enxergar a vida da forma mais amável possível.

Ao professor Vinícius por toda orientação, amizade e por ter sido a pessoa que me motivou a escolher a área mais interessante e instigante da Engenharia Civil como tema desse trabalho.

Aos meus amigos Galindo e Miguel pela ajuda indispensável nas etapas mais importantes desse projeto. Gratidão eterna.

A todos os meus amigos e amigas pelos momentos de descontração e conversas que foram essenciais em todos os anos de curso.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

## RESUMO

O estudo da erodibilidade de um solo é de extrema relevância, no que se refere ao uso e ocupação do solo, podendo monitorar o seu desempenho quando sujeito a intempéries e prever o seu comportamento evitando o risco de falhas catastróficas. Este trabalho foi motivado pela complexidade do tema e falta de estudos diretos sobre erosão dos solos no Oeste da Bahia, tendo como objetivo a construção de um aparelho de Inderbitzen e o estudo da erodibilidade de um solo na cidade de Barreiras-BA. Para isso, fez-se um levantamento sobre os tipos de ensaios realizados para estudo da erodibilidade dos solos, escolhendo a melhor referência para a construção do equipamento para o ensaio de Inderbitzen. Coletaram-se amostras deformadas para os ensaios de caracterização, que foram realizados seguindo as normas técnicas nacionais, e indeformadas para os ensaios de erodibilidade utilizando trabalhos de referência na área. Constata-se que se trata de um solo predominantemente arenoso, não plástico, com uma pequena porcentagem de argila em sua granulometria e os resultados apresentados pelos ensaios de Inderbitzen e de desagregação mostram que é um solo de erodibilidade média. Relaciona-se a perda de solo das amostras com fatores como declividade, velocidade e altura da lâmina d'água, observando que o solo tende a erodir mais quando a declividade e a velocidade do fluxo d'água aumentam, e a lâmina d'água no escoamento laminar diminui. Nota-se a presença de raízes e vazios não regulares nas amostras indeformadas que, por não serem quantificados, dificultam a compreensão da influência desses fatores na erodibilidade do solo. Por fim, comparam-se os resultados obtidos nos ensaios e suas análises com os trabalhos dos autores de referência.

**Palavras-chave:** erodibilidade; Ensaio de Inderbitzen; Ensaio de desagregação.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critério da erodibilidade do solo a partir do valor da taxa de erodibilidade. ....	27
Tabela 2 - Frações granulométricas do solo. ....	42
Tabela 3 - Resultados ensaio de Inderbitzen e índices físicos (Vazão: 3 l/min) .....	44
Tabela 4 - Resultados ensaio de Inderbitzen e índices físicos (Vazão: 4,5 l/min) .....	44
Tabela 5 - Resultados ensaio de Inderbitzen e índices físicos (Vazão: 6 l/min) .....	44
Tabela 6 - Média e desvio padrão dos Índices físicos. ....	45
Tabela 7 - Parâmetros de erodibilidade do Ensaio de Inderbitzen. ....	54
Tabela 8 - Índices físicos (amostras do Ensaio de Desagregação). ....	55

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamento do ensaio de Inderbitzen - concepção original. ....	22
Figura 2 - Equipamento de Inderbitzen empregado na pesquisa Estabilidade de Taludes - IPR/COPPE/TRAFECON (1975-1978).....	22
Figura 3 - Desenho do aparelho Inderbitzen utilizado por Fácio em 1991. ....	23
Figura 4 - Aparelho Inderbitzen modificado desenvolvido por Fácio em 1991.....	24
Figura 5- Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS.....	25
Figura 6 - Curva típica perda de solo acumulada por unidade de área x tempo de ensaio para o ensaio Inderbitzen.....	26
Figura 7 - Definição dos parâmetros $K$ e $\theta_{crit}$ a partir dos resultados do ensaio Inderbitzen.....	27
Figura 8 - Vistas superior e lateral da rampa do aparelho Inderbitzen adaptado por Fragassi.....	28
Figura 9 - Resultado dos ensaios de Inderbitzen para a fração $> 0,074$ mm (medido). .	28
Figura 10 - Ensaio de desagregação por imersão total, após um período de 15 minutos. .....	30
Figura 11 - Evolução do ensaio de desagregação por imersão progressiva. ....	30
Figura 12 - Localização da área de estudo no Campus Reitor Edgard Santos da UFOB. .....	32
Figura 13 - Processos morfogenéticos ocorrentes no Município de Barreiras-BA. ....	33
Figura 14 - Coleta das amostras indeformadas.....	34
Figura 15 - Amostras indeformadas cobertas por papel filme. ....	34
Figura 16 - Etapa do ensaio de massa específica em andamento. ....	35
Figura 17 - Etapa do ensaio de granulometria em andamento. ....	36
Figura 18 - Dimensões do equipamento de Inderbitzen construído.....	37
Figura 19 - Anéis de aço utilizados no ensaio de Inderbitzen. ....	38
Figura 20 - Detalhe da placa do Aparelho de Inderbitzen utilizado nos ensaios. ....	39
Figura 21 - Ensaio de Inderbitzen em andamento. ....	40
Figura 22 - Amostra 6-45 para Ensaio de Inderbitzen (vazão: 6 l/min; inclinação: 45°). .....	41
Figura 23 - Amostras indeformadas para o ensaio de desagregação.....	41
Figura 24 - Curvas de distribuição granulométrica do solo. ....	43

Figura 25- Curva de perda de solo acumulada ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (min) para a vazão de 3 l/min.....	46
Figura 26 - Curva de perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (min) para a vazão de 4,5 l/min. .....	46
Figura 27 - Curva de perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (min) para a vazão de 6 l/min. .	47
Figura 28 - Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de 3 l/min.	48
Figura 29 - Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de 4,5 l/min. .....	48
Figura 30 - Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de 6 l/min.	49
Figura 31 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e Inclinação da rampa ( $^\circ$ ) para as vazões em estudo.....	50
Figura 32 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e Vazão (l/min) para as inclinações em estudo.....	50
Figura 33 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e Lâmina d'água (mm) para as para as vazões em estudo.....	51
Figura 34 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e Velocidade do fluxo d'água (m/s) para as vazões em estudo.....	52
Figura 35 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico $\tau h$ (Pa) para a vazão de 3 l/min.....	53
Figura 36 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico $\tau h$ (Pa) para a vazão de 4,5 l/min.....	53
Figura 37 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico $\tau h$ (Pa) para a vazão de 6 l/min.....	54
Figura 38 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico $\tau h$ (Pa) ensaio de Inderbitzen.....	55
Figura 39 - Ensaio de Desagregação (1 min). ....	56
Figura 40 - Ensaio de Desagregação (15 min). ....	57
Figura 41 - Ensaio de Desagregação (30 min). ....	57
Figura 42 - Ensaio de Desagregação (30 min). ....	58
Figura 43 - Ensaio de Desagregação (60 min). ....	58
Figura 44 - Ensaio de Desagregação (24 h).....	59
Figura 45 - Sistema Unificado de classificação de Solos (SUCS). ....	66
Figura 46 - Sistema de classificação do TRB (Transportation Research Board). ....	66

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>ORIGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>TIPOS DE EROSÕES.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Erosão Superficial.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Erosão Subterrânea ou <i>piping</i>.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Erosão Hídrica.....</b>	<b>16</b>
2.2.3.1	Erosão Laminar.....	16
2.2.3.2	Erosão em Ravinas.....	17
2.2.3.3	Voçorocas.....	17
<b>2.2.4</b>	<b>Erosão Eólica.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Erosão Glacial.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS TROPICAIS.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Ensaio de Inderbitzen.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Ensaio de desagregação.....</b>	<b>29</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>ENSAIOS LABORATORIAIS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Coleta de amostras.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Ensaio de caracterização.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio de erodibilidade de solo.....</b>	<b>36</b>
3.2.3.1	Ensaio de Inderbitzen.....	37
3.2.3.2	Ensaio de desagregação.....	41
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Ensaio de caracterização do solo.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de Inderbitzen.....</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de Desagregação.....</b>	<b>55</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>60</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO A - Classificação dos solos (SUCS e TRB) .....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A erosão dos solos é um processo comumente visto no meio ambiente por se tratar de um fenômeno natural onde partículas de solo são desagregadas e arrastadas de um lugar para o outro por agentes externos. Contudo, a ação do homem atua de forma a acelerar os processos erosivos gerando, muitas vezes, graves problemas ambientais. A remoção de vegetação em margens de rios, por exemplo, atua diminuindo a infiltração da água da chuva, aumentando a velocidade de escoamentos superficiais e consequentemente facilitando a remoção de partículas do solo.

Segundo Camapum de Carvalho et al. (2006), a rapidez e intensidade com que esse processo acontece são determinadas pela soma dos fatores que possibilitaram a isso, como tempo, volume de chuva, incidência do vento no local, inclinação do terreno, tipo de solo erodido, a compactação natural desse solo, mudança de temperatura, entre outros.

As consequências desse fenômeno interferem diretamente na paisagem local, na qualidade do solo e dos rios, e na vida da população, social e economicamente. Quando ocorre em áreas rurais pode comprometer a atividade agrícola, diminuindo a fertilidade dos solos, assoreando nascentes de rios e reservatórios, reduzindo a biodiversidade comprometendo fauna e flora. Em alguns casos pode chegar a comprometer o abastecimento de água das cidades e até mesmo geração de energia elétrica, ocasionando graves prejuízos.

Nas zonas urbanas os efeitos são notáveis principalmente em comunidades carentes nas residências construídas em áreas de risco, em encostas, sem nenhum tipo de projeto para a segurança dos moradores. Nesses casos quando há chuva em abundância, podem ocorrer deslizamentos de terra, que causam soterramento de casas e riscos à vida das populações. Esses deslizamentos também podem acarretar em fechamento de rodovias, ferrovias e outras vias de transporte.

A erodibilidade do solo é a propriedade que determina o grau de facilidade com que os grãos de solo se desagregam e são transportados de um ponto a outro por agentes erosivos. O estudo dessa propriedade vem sendo aprimorado com o passar dos anos, fazendo-se ajustes nos ensaios já conhecidos e adicionando-se novas técnicas para o conhecimento do solo estudado.

Dentre as técnicas de análise de erodibilidade dos solos, o ensaio de Inderbitzen é um dos mais utilizados para esse tipo de estudo, pela simplicidade da execução e do

baixo custo de instalação do equipamento. Apesar de ter sido proposto por Inderbitzen em 1961, e ainda não haver normatização, outros autores já apresentaram versões modificadas e aprimoradas do mesmo, com o objetivo de torna-lo fiel às condições em que o terreno natural estaria submetido.

O ensaio de Inderbitzen objetiva simular o escoamento superficial que acontece no solo natural, ao se utilizar de alguns fatores existentes que tenham influência na formação de uma erosão, como a declividade e a vazão da água da chuva que escorre superficialmente sobre o terreno.

Esse tipo de estudo geotécnico é extremamente relevante no que diz respeito ao uso e ocupação do solo, já que é possível prever o comportamento do solo em um determinado local. Para obras de aterro, barragens, estruturas de contenção e canais, por exemplo, antecipar o desempenho do solo submetido a condições conhecidas e monitorar as mudanças que ocorrem nele, pode ser útil para a escolha do melhor local, com um risco mínimo de falhas catastróficas.

Apesar de ser um estudo direto da erodibilidade, com resultados que avaliam qualitativa e quantitativamente os solos em questão, existem poucos trabalhos com esse enfoque no Oeste da Bahia. A maior parte deles, em relação à erosão dos solos, utiliza técnicas de geoprocessamento para mapear erosões ou a susceptibilidade a erosões nas bacias hidrográficas da região.

## **1.1 OBJETIVO**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho foi estudar a erodibilidade de um solo coletado na cidade de Barreiras-BA fazendo uso de um Equipamento Inderbitzen.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar levantamento sobre os tipos de ensaios para estudo da erodibilidade dos solos;
- Construir o equipamento de Inderbitzen adotando a melhor referência encontrada;
- Coletar amostras de solo indeformadas e deformadas para ensaios;

- Caracterizar fisicamente o solo coletado realizando os ensaios normatizados;
- Analisar a erodibilidade do solo, por meio dos ensaios de Inderbitzen e de desagregação;

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 ORIGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS**

A crosta terrestre caracteriza-se por diferentes formas de elevações e depressões que constituem o seu relevo. Os processos geomorfológicos geralmente refletem não apenas a inter-relação entre variáveis como clima, geologia e morfologia, por exemplo, mas também a sua evolução no tempo. Nesse caso, ao tratar desses processos, deve-se ter a noção do espaço em que o processo ocorre e a sua velocidade. Uma vez se tratando de processos erosivos também se faz necessário considerar a origem da ação dinâmica, o local, o momento e a velocidade de ocorrência (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006).

Erosão é o fenômeno natural que consiste no desgaste da superfície terrestre promovido por diversos processos de remoção, físicos, químicos e biológicos, causando uma mudança no cenário local (SUGUIO, 2003). Segundo Magalhães (2001) é descrita também como um processo mecânico que pode suceder tanto em superfície como em profundidade em alguns tipos de solo sob condições relevantes de intemperismo, em que é possível ser agravada pela ação dinâmica do homem.

De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2006), o processo erosivo depende de fatores externos, tais como o potencial de erosividade da chuva, as condições de infiltração e escoamento superficial, a declividade do terreno e comprimento do talude ou encosta e, ainda, de fatores internos, como gradiente crítico, desagregabilidade e erodibilidade do solo. Define-se erosividade da chuva como a capacidade de ação das gotas em causar o destacamento e o transporte do solo, e erodibilidade como a resistência do solo ao processo erosivo (MORTARI, 1994).

Os principais agentes responsáveis pelo movimento de massa são os ventos, que ocorrem pela abrasão de partículas de rocha e solo em suspensão; a água, atuando mediante chuvas, ondas do mar, lagos, riachos e rios pelo impacto ou carregamento de solo; e as mudanças climáticas, que podem ser percebidas, por exemplo, nas fissuras em rochas ao longo do tempo. O homem também é caracterizado como agente deflagrador causando desmatamentos, cortes de estradas, construção de barragens, ocupação desordenada das encostas, mineração, etc. (STEPHAN, 2010). Dependendo do tipo, grau e local da erosão as consequências podem alcançar a população em termos de

desmoronamento de casas, perda de área utilizável, assoreamento de rios, lagos e riachos, e até morte de animais por efeito de acidentes.

## **2.2 TIPOS DE EROSÕES**

O processo erosivo que se desenvolve na superfície terrestre sobre condições naturais é chamado de Erosão Geológica, enquanto aquelas que resultam do aumento da taxa de erosão geológica por um desequilíbrio ambiental devido às atividades humanas é conhecida como Erosão Acelerada (MAGALHÃES, 2001).

Segundo Magalhães (2001), pode-se classificar as erosões quanto às formas de desgaste do solo, como erosão superficial e subterrânea, e de acordo com o agente atuante, como água (erosão hídrica), vento (erosão eólica) e geleira (erosão glacial).

### **2.2.1 Erosão Superficial**

As precipitações podem evaporar-se, infiltrar-se ou ficar na superfície do solo e, diante disso, a erosão superficial é originada a partir do escoamento da água que não se infiltra. Está diretamente relacionada ao transporte dos agregados que podem se desprender do bloco pelo impacto da água, ou aqueles arrancados pela força trativa existente entre água e solo (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). O escoamento age em função da declividade do terreno, das condições climáticas do local, e a erosividade da água vai depender de variáveis como a densidade e velocidade do escoamento, espessura da lamina d'água, inclinação e da presença de vegetação local (MAGALHÃES, 2001).

O poder do escoamento superficial, comprovado por uma grande parte das observações, está relacionado a regiões semiáridas ou com vegetação esparsa, colocando um peso muito grande na cobertura vegetal como controlador do escoamento superficial (GUERRA, 2007). Esse fator faz com que a remoção do solo aconteça de forma lenta porque diminui a energia cinética das gotas de chuva e a sua eficiência em desprender as partículas, além de ser imprescindível para a estabilização das encostas principalmente pela ação das raízes (COELHO NETTO, 2003 apud MENDES, 2006).

Segundo Mendes (2006), a erosão superficial é o primeiro estágio do processo erosivo evoluindo conforme a formação das ravinas, podendo culminar na formação de voçorocas, que compreende o estágio terminal do processo.

## **2.2.2 Erosão Subterrânea ou *piping***

Esse tipo de erosão é normalmente formado por conta do gradiente hidráulico, diferença de nível da água, ou do aumento da taxa de infiltração formando canais de fluxo no interior do maciço de solo (LIMA, 2003). Isso pode ser agravado por perfurações abertas pelo sistema radicular de plantas, animais escavadores e outros fatores, que influenciam na coesão e granulometria do solo, grandes determinantes para a evolução das erosões (MAGALHÃES, 2001).

Segundo Lima (2003), a erosão subterrânea pode acontecer por dois processos: o arraste conhecido também como *dragging*, que é provocado pela percolação da água principalmente em solos granulares; e o alargamento de macro poros pela ação das tensões cisalhantes, que são comuns em materiais coesivos e em solos granulares não saturados.

## **2.2.3 Erosão Hídrica**

A erosão hídrica pode ser dividida em laminar, ravinas e voçorocas conforme itens a seguir.

### **2.2.3.1 Erosão Laminar**

Rego (1978) caracteriza a erosão laminar pela perda quase uniforme de solo em finas camadas e afirma que é causada pela ação conjunta do pingo de chuva e do escoamento superficial. Primeiro, com a precipitação, os pingos de chuva têm o contato direto com grãos fazendo com que esses desagreguem de forma uniforme e posteriormente sejam carregados pelo escoamento.

Blocos rochosos existentes do local e cobertura vegetal, por exemplo, interrompem o fluxo da água que provoca a erosão laminar, fazendo com que esse fluxo contorne os possíveis obstáculos (REGO, 1978).

Geralmente esse tipo de processo não deixa traços visíveis e, por isso, podem continuar agindo por anos, sendo notado depois por conta do empobrecimento do solo ou pelo assoreamento de áreas à jusante. Por esse motivo, esses efeitos são vistos facilmente em zonas rurais, que acabam desestabilizando as plantações atingindo a cobertura de suas raízes (LIMA, 2003). Assume-se, então, uma grande relevância para

evitar esse tipo de erosão em áreas agrícolas adotando técnicas de manejo adequadas, e até o desuso de insumos e defensivos agrícolas que intensificam a erodibilidade do solo (MORTARI, 1994).

Por conta dos impactos socioeconômicos e ambientais que podem ser gerados pelas erosões laminares, é importante que se tenha uma atenção maior a esse tipo de erosão principalmente em países de clima tropical com mantos de solo erodíveis e ocorrência de chuvas torrenciais (MORTARI, 1994).

Quando o fluxo de água uniforme encontra obstáculos, pode-se formar filetes de água concentrada ocasionando a formação de sulcos, pequenos canais abertos com profundidade de até 10 cm. Com a atuação mais expressiva de agentes erosivos, pode haver uma maior concentração de água fazendo o sulco se desenvolver formando ravinas (LIMA, 2003).

#### 2.2.3.2 Erosão em Ravinas

De acordo com STEPHAN (2010), a erosão em ravinas, ou ravinamento, acontece quando a água do escoamento superficial atinge pequenas depressões, ganha velocidade e profundidade, transportando sedimentos a ponto de formar canais com traçados bem definidos. A autora ainda afirma que com a falta drenagem apropriada e cobertura vegetal, os canais se tornam mais fundos a cada ano podendo atingir metros de profundidade.

As ravinas são formadas, normalmente, quando a velocidade de fluxo da água aumenta na encosta para velocidades superiores a 30 cm/s (ELLISON, 1947 apud GUERRA, 2007).

Quando não são remediadas em seu estágio inicial, tendem a aumentar em largura e em profundidade podendo formar erosões em canais mais profundos ou voçorocas (REGO, 1978).

#### 2.2.3.3 Voçorocas

É considerado o estágio mais avançado da erosão, quase sempre provindo de um ravinamento. Pode parecer um buraco, caverna ou um canal bem profundo, dependendo de sua forma e dimensões e tais dimensões podem assumir proporções que instabilizem grande parte de um maciço ou talude (REGO, 1978).

Na voçoroca efetivam-se vários processos erosivos, em conjunto ou separado, como erosão superficial, interna, solapamentos, desabamentos, escorregamento de taludes e quedas de blocos. Esse fato faz da voçoroca o tipo de erosão cujo poder destrutivo é superior aos dos outros estágios, tornando mais difícil o seu controle e elevando o custo de recuperação da área degradada (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

#### **2.2.4 Erosão Eólica**

É atribuída ao vento e atua com mais intensidade em regiões de clima seco, como desertos, regiões áridas e semiáridas, ou ocasionalmente em zonas litorâneas. A areia que é transportada pelo vento encontra-se mais concentrada na superfície do terreno e pode se estender por amplas áreas e, inclusive, atuar contra a declividade do terreno diferentemente de outros tipos de erosão, como a hídrica, por exemplo, (SUGUIO, 2003).

#### **2.2.5 Erosão Glacial**

Este tipo de erosão é desenvolvido através de detritos rochosos que são transportados no interior das geleiras, dando origem a pavimentos estriados, que é uma superfície rochosa polida e estriada, rebaixada e moderadamente lisa, produzida por abrasão glacial; vales em “U”, que tem essa nomenclatura por conta do seu perfil transversal; circos glaciais, que são os anfiteatros formados nas cabeceiras dos vales; e vertentes côncavas, que possuem relevo com divisores de água pontiagudos e muito irregulares (SUGUIO, 2003).

### **2.3 PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS TROPICAIS**

A formação dos solos se dá a partir do intemperismo que faz com que a rocha se desagregue e transforme-se em um material solto, juntamente com folhas e animais decompostos.

As regiões tropicais são, normalmente, caracterizadas apenas por duas estações climáticas: a seca e a chuvosa. No período seco ocorre fixação do ferro e do alumínio deixados na superfície do solo e a consolidação do cimento ferro-aluminoso, que é importante na formação dos solos lateríticos. No período de chuva a abundância da água

impulsiona a retirada e o transporte de sílica das partículas mais próximas à superfície do terreno. (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015)

Os solos lateríticos ocupam a parte mais superficial, resultantes de processos pedológicos em condições bem drenadas e clima úmido tropical. Geralmente se apresentam de forma homogênea e as suas variedades argilosas formam torrões razoavelmente resistentes, enquanto as variedades arenosas se caracterizam pelos frequentes vazios intergranulares, caracterizando o solo laterítico como “poroso” pela sua aparência macroscópica (NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F., 1983).

Já os solos saprolíticos, também tropicais, segundo os mesmos autores, são originados pela decomposição e/ou desagregação de uma rocha consolidada podendo, portanto, determinar essa rocha matriz a partir de sua macroestrutura herdada. Caso essa macroestrutura seja destruída por processos geológicos ou pedológicos, o solo não pode ser classificado como saprolítico.

Camapum de Carvalho et al. (2015) destaca uma série de características dos solos lateríticos e saprolíticos que interferem diretamente no seu comportamento, assumindo grande influência nos processos erosivos.

Sobre solos lateríticos se destacam:

1. Índices de vazios de solos lateríticos normalmente maiores do que seriam se associados com a distribuição granulométrica. Eles são função do processo de intemperismo;
2. A distribuição de poros é caracterizada pela presença marcante de macro e de micro poros;
3. Resistências mais baixas e compressibilidades mais altas como consequência da estrutura do solo e de sua pedogênese;
4. Em consequência dos elevados índices de vazios e presença de macro porosidade, as permeabilidades são normalmente mais altas do que aquelas associadas à distribuição granulométrica.
5. Assume textura granular, podendo afetar parâmetros hidráulicos e mecânicos, como a estabilidade estrutural por agentes externos de sobrecarga e produtos químicos;

Sobre o solo saprolítico, as principais características são:

1. Riqueza em minerais primários, geralmente inertes, e em argilominerais expansivos, propiciando o solapamento dos pés dos taludes;

2. Apresentam granulometria variada, considerando-se que as rochas apresentam granulação desde fina até grosseira, podendo ocorrer erosão pela simples atuação da força da água;

Com relação aos trabalhos sobre erodibilidade de solos na Região Oeste da Bahia, alguns trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos. Dois deles têm como objetivo o mapeamento de regiões susceptíveis a erosão nas Bacias Hidrográficas dos Rios Grande, Corrente, Carinhanha e afluentes do São Francisco (Andrade et al., 2002; Valladares et al., 2002). Outro trabalho objetiva analisar estimativas de perda de solo para condições atuais de uso e ocupação da Bacia do rio de Ondas (Fistarol et al., 2016).

As três produções têm em comum a forma como a pesquisa foi realizada, fazendo-se uso de ferramentas de geoprocessamento para localizar áreas sujeitas ao processo de erosão. Nenhum deles estuda a erodibilidade do solo de forma direta no Oeste da Bahia.

## **2.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS**

Erodibilidade dos solos é a propriedade que determina o grau da facilidade com que as partículas de solo se desagregam e são transportadas por um agente erosivo. Trata-se de uma das mais complexas características para o estudo dos solos por estar em função de uma série de fatores como a mineralogia, granulometria, compacidade, estrutura e teor de umidade.

Os ensaios para a avaliação da erodibilidade se tornam imprescindíveis em situações onde existam áreas com alto potencial de erosão como, por exemplo, em encostas de morros, bacias hidrográficas, taludes de cortes em rodovias, aterros, áreas declivosas ocupadas e barragens, assim como localidades com alto índice pluviométrico e ventos de alta intensidade.

Bastos (1999) destaca alguns ensaios específicos que fornecem elementos para a análise qualitativa e quantitativa da erodibilidade de determinados solos. São eles os ensaios de Inderbitzen, os ensaios pela Metodologia MCT (ensaio de infiltrabilidade e ensaio de erodibilidade específica), ensaios propostos pelo LNEC, ensaios de desagregação, ensaios para a avaliação da dispersibilidade, ensaios de estabilidade de agregados e de resistência à penetração de cone de laboratório. Com relação à análise da

erodibilidade interna de um solo pode-se empregar o ensaio do furo de agulha (*Pinhole Test*).

A escolha dos ensaios realizados foi feita baseado no estudo dos solos coletados, para que fosse possível fazer a avaliação da erodibilidade mais adequada a solos residuais não saturados de intemperismo tropical e subtropical. E assim como Bastos, Milititsky e Gehling (2000) e Grando et al. (2009), Lima (2003) também dá um destaque aos ensaios de Inderbitzen e de desagregação, como os principais ensaios para a caracterização da erodibilidade dos solos.

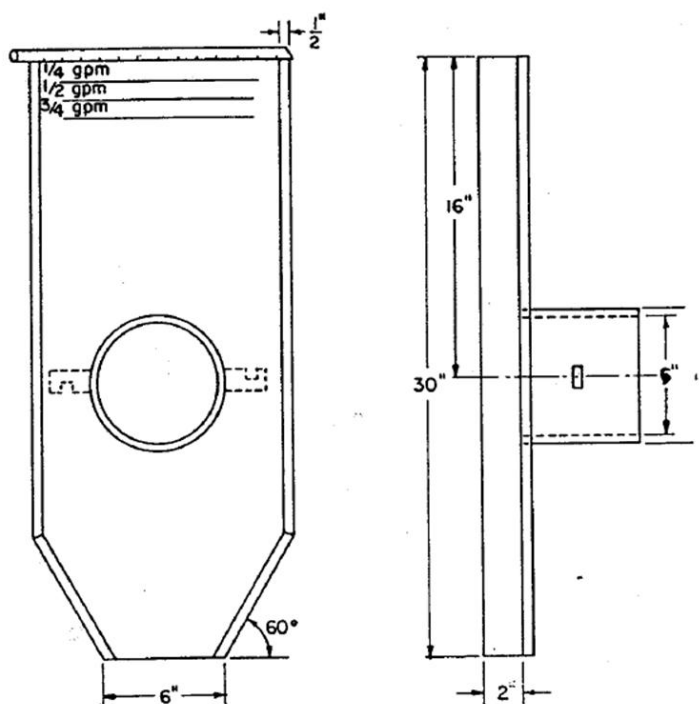
#### **2.4.1 Ensaio de Inderbitzen**

O ensaio de Inderbitzen é um dos mais utilizados para a avaliação da erodibilidade, por simular de forma simples, direta e com baixo custo o comportamento do solo diante de um fluxo d'água superficial, permitindo determinar a influência de fatores como umidade do solo, declividade da rampa, vazão e duração do fluxo. O equipamento foi inicialmente apresentado por Inderbitzen em 1961, e tiveram suas dimensões várias vezes modificadas e adaptadas, para um melhor estudo de caso, por outros autores.

O ensaio tem como objetivo calcular a quantidade de solo erodido em uma amostra de 152 mm de diâmetro, submetida a um escoamento laminar de vazão específica em uma rampa de inclinação conhecida (FÁCIO, 1991). As dimensões do equipamento propostas por Inderbitzen (1961) estão apresentadas na Figura 1. Os resultados são expressos em gráficos da “perda de solo x tempo” e da “velocidade de erosão x tempo”.

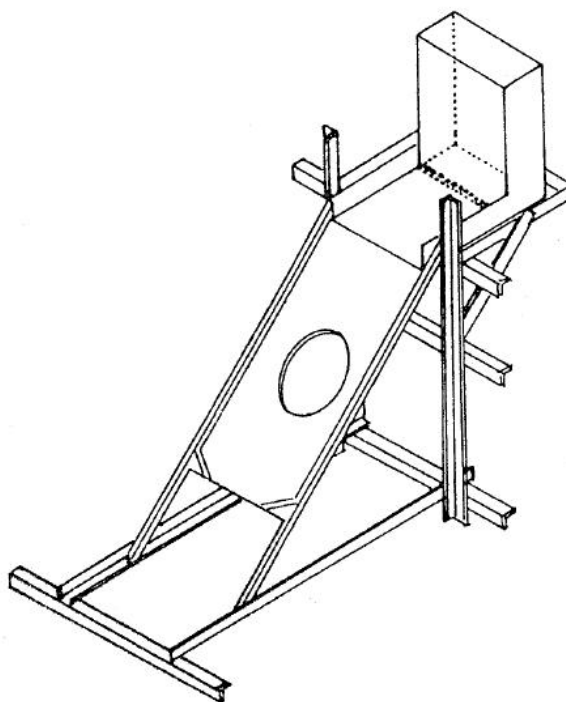
Bastos (1999) consta que o ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil no período de 1975 a 1978, na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECON), e que o equipamento utilizado na pesquisa, apresentado na Figura 2, foi construído com base no esboço do equipamento do LNEC, trazido pelo engenheiro Salomão Pinto.

Figura 1 - Equipamento do ensaio de Inderbitzen - concepção original.



Fonte: Inderbitzen, 1961 apud Bastos, 1999.

Figura 2 - Equipamento de Inderbitzen empregado na pesquisa Estabilidade de Taludes - IPR/COPPE/TRAFECON (1975-1978).



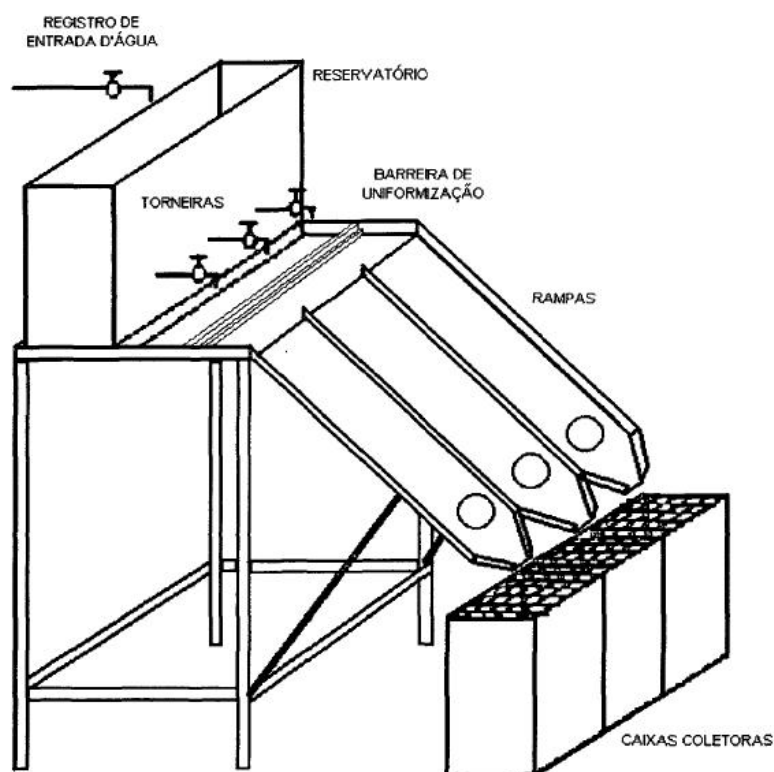
Fonte: Fonseca e Ferreira, 1981 apud Bastos, 1999.

De acordo com o mesmo autor, em 1981, um professor chamado Job Nogami destacou algumas restrições do ensaio. Ele evidencia que o processo não leva em consideração a infiltração da água no solo, que é um dos aspectos mais importantes da erosão em climas tropicais, e sugere acrescentar ao ensaio a simulação da chuva, para que pudesse ser reproduzido o efeito desagregador que a gota na chuva causa no solo.

Existem alguns projetos de adaptações e modificações do aparelho Inderbitzen, que continuam sendo aprimoradas ao longo do tempo por pesquisadores e estudantes para que possa ser utilizado com maior eficácia. Algumas alterações são realizadas para que o ensaio consiga simular o processo erosivo tão fielmente que os resultados sejam cada vez mais precisos.

Em sua dissertação, Fácio (1991), projetou e construiu uma versão modificada do aparelho Inderbitzen, onde fosse capaz de variar a inclinação da rampa (5, 10, 20, 40 e 60 graus), a caixa d'água que alimenta o sistema foi dimensionada para uma variação maior da vazão e diminuiu-se o diâmetro do corpo de prova para que fosse possível a realização de três ensaios ao mesmo tempo, tornando o equipamento alterável e o ensaio mais ágil.

Figura 3 - Desenho do aparelho Inderbitzen utilizado por Fácio em 1991.



Fonte: LEMOS, 2002.

Outras modificações do aparelho foram a largura da rampa de 1000 mm para 333 mm e os corpos de prova que, originalmente, seriam de 152 mm de diâmetro para 100 mm. Sobre as caixas coletoras em frente a cada rampa, apresentadas na Figura 4, estão as peneiras de números 50, 100 e 200.

Figura 4 - Aparelho Inderbitzen modificado desenvolvido por Fácio em 1991.



Fonte: FÁCIO, 1991.

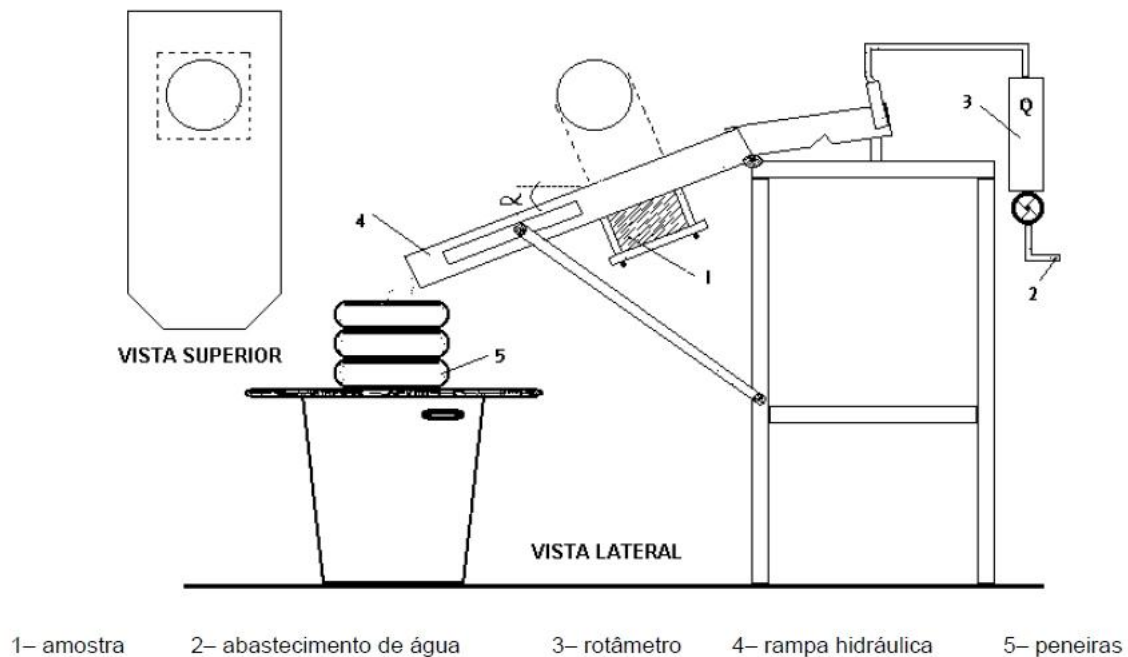
Por se tratar de diferentes tipos de solo e uma versão modificada do equipamento Inderbitzen, Fácio (1991) objetivou-se a determinar os parâmetros vazão e tempo de ensaio que tornasse os resultados mais significativos. Além disso, foi determinado que fosse viável uniformizar as condições de umidade dos solos e anular eventuais forças de sucção da amostra em seu estado natural, realizando um “embebimento” das amostras até atingir um nível de saturação próximo a 100%.

Assim, seguindo o estudo do IPR (1979), ele levou em consideração que o fenômeno da erosão é mais significativo nos primeiros 5 min e então determinou os outros parâmetros. Depois de repetir os ensaios usando diversas vazões e declividades, redefiniram, também, o melhor tempo a ser usado. Delimitou-se que os parâmetros mais

apropriados para o ensaio em questão são: vazão de 3 l/min, declividade de 10 graus, tempo de ensaio de 20 minutos e tempo de embebedimento da amostra de 15 min.

Bastos (1999) realiza o ensaio com um aparelho Inderbitzen também modificado, construído no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LMS/UFRGS). O equipamento compreende uma rampa em chapa metálica com 25 cm de largura e um orifício que acopla uma amostra de 9,76 cm de diâmetro, como apresentado na Figura 5.

Figura 5- Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS.



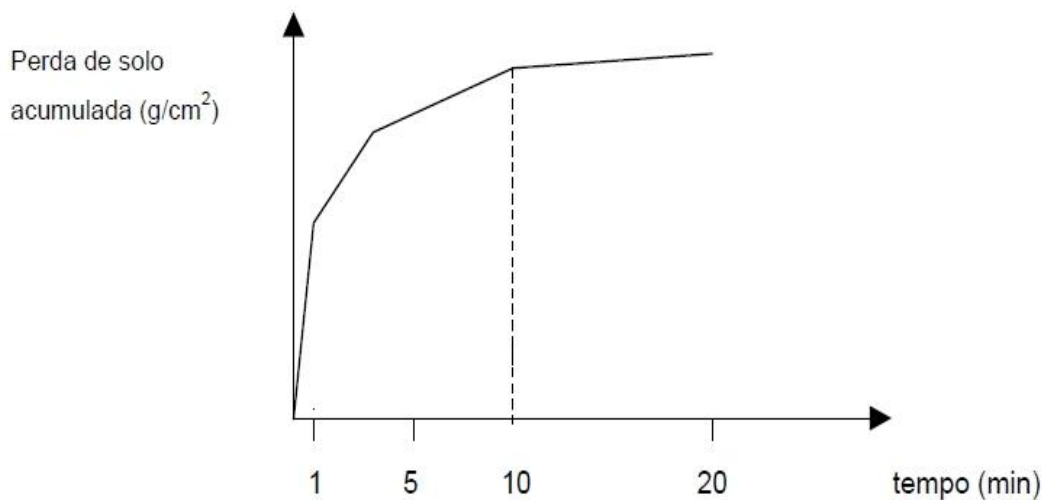
Fonte: BASTOS, 1999.

O sistema também é composto por baldes plásticos de 60 litros e um conjunto de peneiras nas malhas 4,8 mm (peneira #4), 2,0 mm (peneira #10), 0,42 mm (peneira #40) e 0,074 mm (peneira #200).

Os parâmetros adotados por Bastos (1999) foram: inclinações da rampa de 10°, 26°, 45° e 54°; tempo de ensaio de 20 min, substituindo os baldes nos tempos 1 min, 5, 10, e 20 min, para individualizar as medições; vazões de 3 e 6 l/min; e condições prévias de umidade das amostras como: secas ao ar, umidade natural e pré umedecidas.

Os resultados foram expressos em peso seco de solo erodido acumulado por unidade de área da amostra (g/cm<sup>2</sup>) com relação ao tempo de ensaio formando uma curva, apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Curva típica perda de solo acumulada por unidade de área x tempo de ensaio para o ensaio Inderbitzen.



Fonte: BASTOS, 1999.

Percebendo que a curva tende a se estabilizar após os 10 min de ensaio, são calculados os gradientes de erosão (em  $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) entre os trechos 0 a 1 min e 1 a 10 min. Como apresentado na Figura 7, esses valores são plotados no gráfico contra a tensão cisalhante hidráulica atuante no ensaio,  $\tau_h$  (em Pa), estimada pela equação:

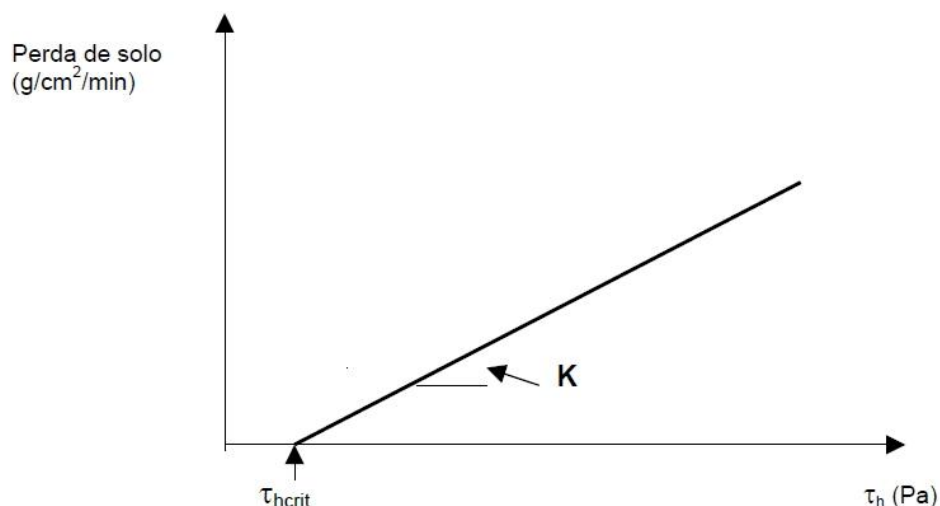
$$\tau_h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (1)$$

em que:

$\gamma$  = peso específico da água ( $\text{N/m}^3$ );  
 $h$  = altura da lâmina de fluxo (m); e  
 $d$  = declividade da rampa (%).

Para determinar quantitativamente a erodibilidade desse solo, segundo Bastos (1999), é plotado o gráfico de Perda de solo por área por minuto ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) x Tensão hidráulica  $\tau_h$  (Pa), pra cada vazão de ensaio. A partir dele, são ajustadas retas em que é possível estimar os parâmetros de erodibilidade: tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\tau_{hcrit}$  (Pa), que corresponde ao máximo valor de  $\tau_h$  para erosão nula, e a taxa de erodibilidade,  $K$  ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ), que representa o gradiente de perda de solo em relação às tensões hidráulicas aplicadas.

Figura 7 - Definição dos parâmetros  $K$  e  $\tau_{hcrit}$  a partir dos resultados do ensaio Inderbitzen.



Fonte: BASTOS, 1999.

Tabela 1 - Critério da erodibilidade do solo a partir do valor da taxa de erodibilidade.

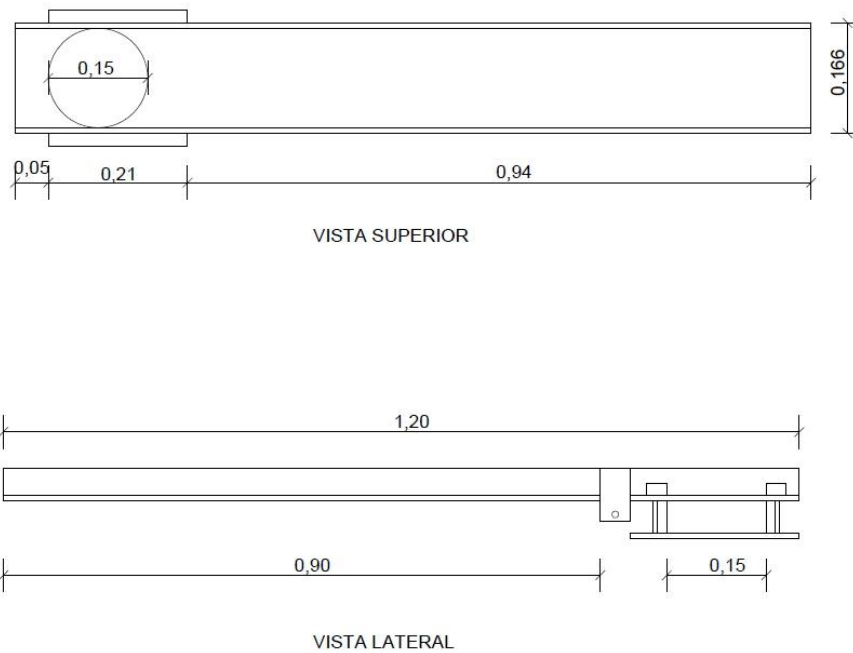
Erodibilidade do solo	$K$ (g/cm²/min/Pa)
Baixa	$K < 0,001$
Média	$0,001 \leq K \leq 0,1$
Alta	$K > 0,1$

Fonte: BASTOS, 1999

Santos (1997) e Fragassi (2001) modificaram o aparelho de Inderbitzen de forma que a largura da prancha coincidissem com o diâmetro do orifício onde vai ser encaixada a amostra, para que fosse assegurado que o fluxo da água escoasse somente sobre a amostra. As dimensões da rampa desenvolvida por Fragassi estão apresentadas na Figura 8. O material usado para a confecção da prancha foi o PVC por conta da facilidade de confecção e por propiciar uma superfície lisa e nivelada, possibilitando o escoamento laminar sobre a rampa.

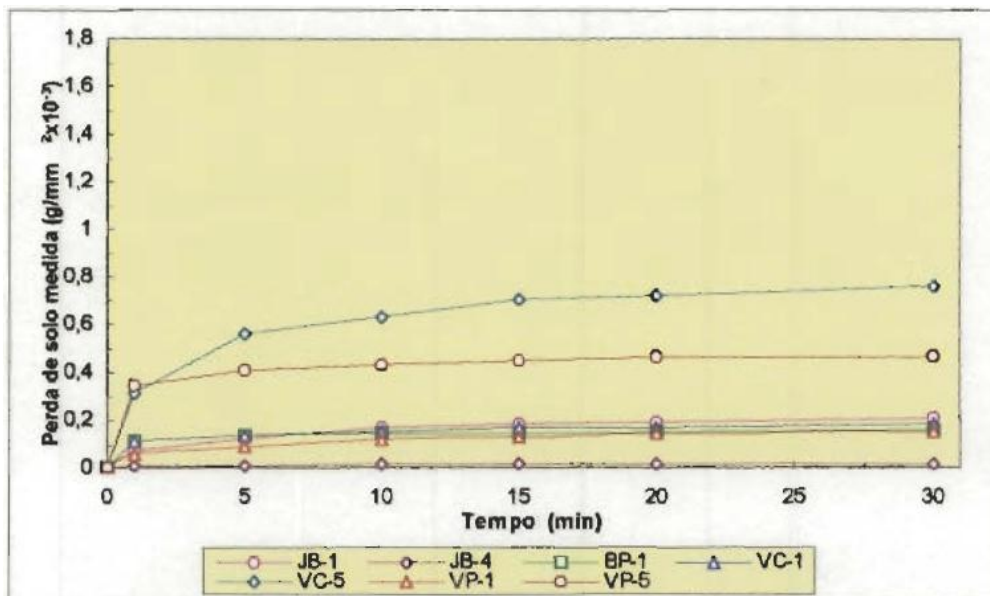
Como Santos (1997) reduz a dimensão da rampa apresentada por Fácio (1991) para 100 mm, reduziu-se proporcionalmente a vazão, que havia sido definida como 50 ml/s para 17,5 ml/s. O tempo foi aumentado para 30 min visando caracterizar melhor o comportamento da curva perda de solo versus tempo, como no exemplo apresentado na Figura 9. Cada um dos gráficos apresentados na figura representa um tipo de solo ensaiado.

Figura 8 - Vistas superior e lateral da rampa do aparelho Inderbitzen adaptado por Fragassi.



Fonte: FRAGASSI, 2001.

Figura 9 - Resultado dos ensaios de Inderbitzen para a fração > 0,074 mm (medido).



Fonte: SANTOS, 1997.

Os resultados são analisados e comparados com outros já existentes de solos semelhantes, em conjunto com os ensaios de caracterização do solo e outros ensaios de erodibilidade, como o de desagregação, por exemplo.

## 2.4.2 Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação, também conhecido como *Slakig Test*, é um ensaio qualitativo e tem como objetivo analisar a estabilidade de uma amostra de solo indeformada quando submersa em água.

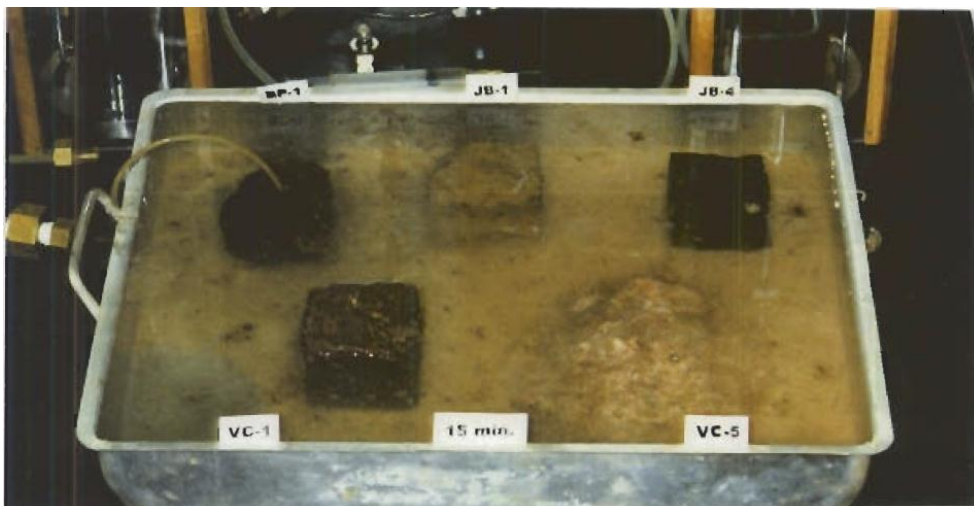
As amostras utilizadas para esse ensaio devem ser indeformadas, estarem na umidade natural e ter dimensões de 6,0 cm de cada lado, em forma cúbica. Rego (1978) descreve que as amostras devem ser colocadas dentro de uma bandeja com água, com altura de 2,0 cm (um terço da altura da amostra) e se registra o tempo de saturação, o tempo que aparece a primeira fissura e, se for o caso, o tempo de desagregação da amostra. Se o solo não desagregar após 24 horas de ensaio, significa que tem um bom comportamento, caso contrário, mostram um mau comportamento.

Santos (1997) se baseia uma metodologia diferente para a realização deste ensaio. As amostras cúbicas indeformadas de 6,0 cm de lado são colocadas em duas bandejas e analisadas de maneiras distintas. Na primeira bandeja, as amostras ficam completamente submersas por 24 horas. Na segunda, as amostras devem ser colocadas sobre uma pedra porosa, deixando o nível da água na altura da base da amostra por 30 min e depois aumentando sucessivamente para 1/3, 2/3, por 15 min cada fase, até que a amostra esteja completamente coberta por água completando, posteriormente, às 24 horas. O ensaio realizado pode ser observado nas Figuras 10 e 11.

Utilizando essa metodologia de Santos (1997), é correto afirmar que poderá ser observado, além do comportamento do solo submerso em água, a rapidez da ascensão capilar do solo em cada uma das amostras retiradas, o que pode ser observado na Figura 11.

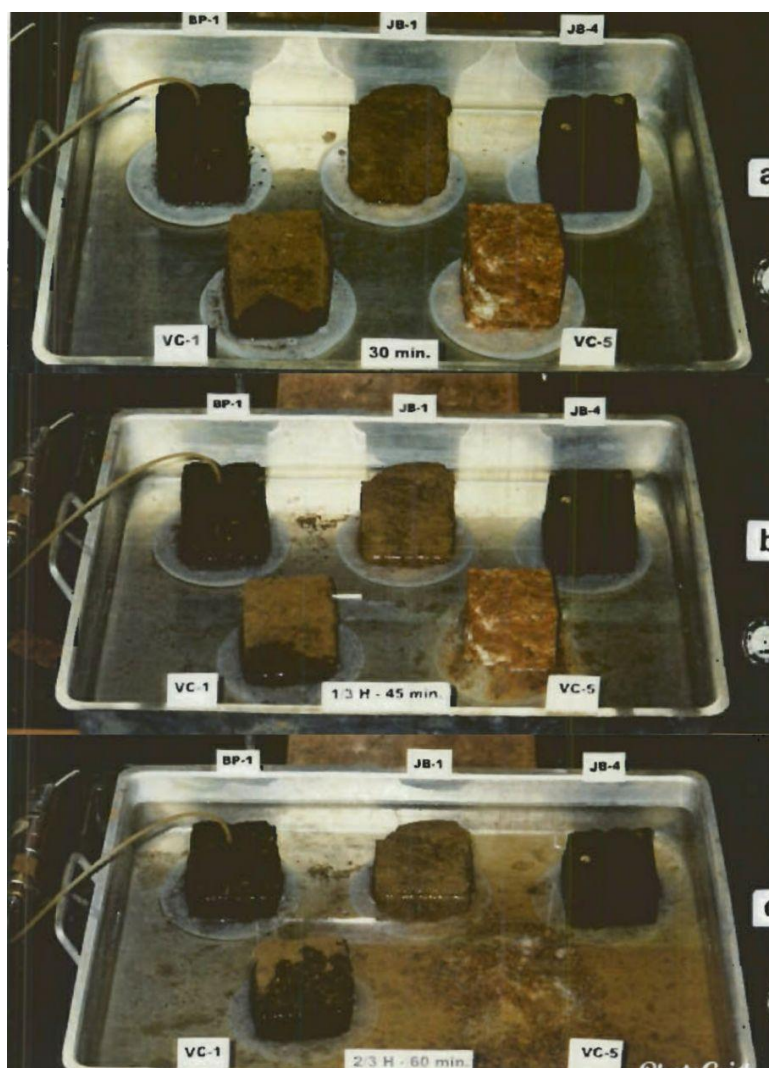
O resultado do ensaio é puramente qualitativo. Em cada uma das etapas é registrado o comportamento da amostra e descritos o caráter, intensidade e velocidades dos processos de: umedecimento, expansão, abatimentos, fraturamentos, rupturas, dispersão e outros (BASTOS, 1999).

Figura 10 - Ensaio de desagregação por imersão total, após um período de 15 minutos.



Fonte: SANTOS, 1997.

Figura 11 - Evolução do ensaio de desagregação por imersão progressiva.



Fonte: SANTOS, 1997.

Santos (1997) destaca que Holmgran & Flanagan, em 1977, desenvolveram, após uma série de ensaios de desagregação em amostras remoldadas, uma classificação aos tipos de reação à inundação. Ela se divide em:

- **Sem resposta:** quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais;
- **Abatimento (*Slumping*):** quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado. MECANISMO: Hidratação e desaeração que atuam gerando pressões positivas que desagregam o solo;
- **Fraturamento:** quando a amostra se quebra em fragmentos mantendo a forma original das faces externas. MECANISMO: Expansão osmótica. Quando a concentração de íons dentro da fase sólida é maior do que a da solução ambiente, a água tende a mover-se para dentro do solo a fim de reduzir esta concentração, expandindo e conseqüentemente fraturando.
- **Dispersão:** quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma “nuvem” coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve. MECANISMO: ocorre quando as pressões de expansão são grandes o suficiente para causar separação entre partículas individuais. A presença de sódio no sistema é a principal condição para a ocorrência desse fenômeno, mas fatores como concentração de sais, o pH do solo e umidade inicial também podem influenciar.

Com os resultados do ensaio de desagregação, é possível fazer uma boa correlação com os resultados do ensaio de Inderbitzen já que, provavelmente, as amostras que se desagregam são as que apresentam uma perda maior de solo no Inderbitzen, enquanto as que perdem uma quantidade pequena de solo devem permanecer inteiras durante a imersão (SANTOS, 1997).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para a coleta das amostras de solo para estudo está situada no Campus Reitor Edgard Santos da Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB, próximo ao Centro de Referência em Recuperação de Áreas Degradadas (CRAD), localizada na cidade de Barreiras-BA, indicada pela seta vermelha na Figura 12.

Figura 12 - Localização da área de estudo no Campus Reitor Edgard Santos da UFOB.



Fonte: Google Maps, 2018.

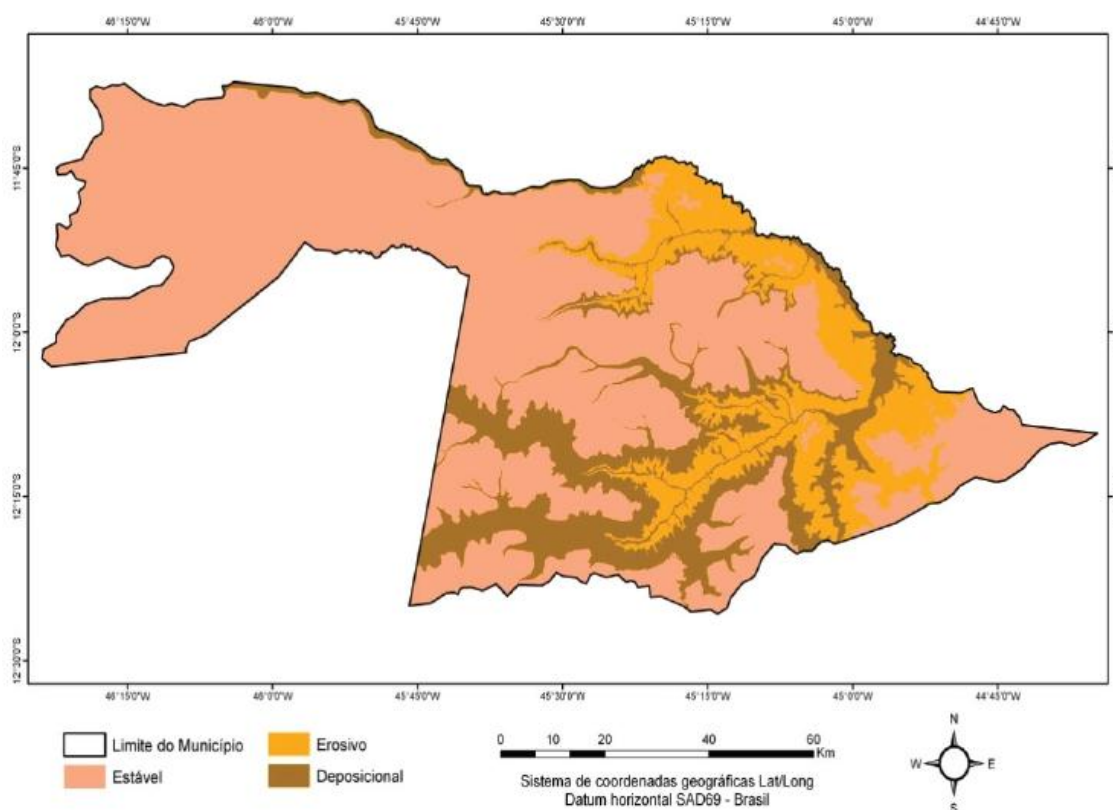
Segundo Passo et al. (2010) a posição geográfica da cidade de Barreiras, mesorregião do extremo Oeste Baiano, garante que as temperaturas se mantenham muito elevadas por quase todo o ano variando entre 26°C e 20°C, médias máximas e mínimas. Já com relação à pluviosidade anual, é registrada uma variação de 800 mm a 1600 mm, concentrada entre os meses de novembro a março com umidade relativa média do ar de 70%.

Os solos predominantes nas chapadas de Barreiras são o Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média, o Neossolo Quartzarênico e solos hidromórficos associados às Veredas. Em geral, são constituídos por solos com baixa fertilidade natural, variando de profundos a muito profundos, permeáveis, de textura média e/ou arenosa, saturados com alumínio trocável e relacionados aos arenitos, já nas depressões, há associações de

Cambissolos e Latossolos de textura argilosa (MORAES, 2003 apud PASSO et al., 2010).

O mapeamento geomorfológico mostra que 69,1% das áreas apresentam-se estáveis, representando o maior potencial para uso agrícola devido à topografia plana, 15,4% representam áreas onde o processo erosivo é mais atuante, com altas declividades e grandes desníveis, enquanto os outros 15,5% da área encontram-se em equilíbrio, com predominância de processos deposicionais (PASSO et al., 2010). A Figura 13 mostra o mapeamento dos processos morfogenéticos na cidade de Barreiras.

Figura 13 - Processos morfogenéticos ocorrentes no Município de Barreiras-BA.



Fonte: Passo et al. (2010).

## 3.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

### 3.2.1 Coleta de amostras

A coleta de amostras para ensaios de caracterização e de erodibilidade dos solos foi executada entre os dias 9 e 24 de julho de 2018. As amostras foram coletadas

durante o dia, no período da manhã, o tempo estava seco com baixa umidade do ar e bastante ensolarado em todos os dias de coleta.

Com o auxílio de ferramentas para escavação do solo, como enxada, talhadeira, cavador e pá, foram cravados os anéis de aço de, aproximadamente, 8,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. As amostras foram enroladas com papel filme para conservar o solo indeformado dentro dos anéis. O mesmo foi feito para a coleta do bloco de solo indeformado com dimensões aproximadas de 25 cm x 16 cm x 16 cm, como apresentados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Coleta das amostras indeformadas.



Fonte: Autora.

Figura 15 - Amostras indeformadas cobertas por papel filme.



Fonte: Autora.

As amostras indeformadas foram empregadas nos ensaios de erodibilidade. Foram coletados, também, 3 kg de solo deformado para a realização dos ensaios de caracterização.

Para as coletas de todas as amostras foi retirada, aproximadamente, 15 cm da parte superior do terreno para que fosse usado um solo inalterado por intempéries nos ensaios. O material superficial apresentava solo solto e raízes grandes, o que dificultava a retirada das amostras indeformadas. Por conta da pouca umidade e escassez de chuva, o solo foi previamente umedecido para que a cravação dos anéis na coleta das amostras indeformadas fosse possível.

### 3.2.2 Ensaios de caracterização

Os ensaios de caracterização do solo foram realizados no laboratório de Geotecnia da UFOB. São eles: ensaio de massa específica dos grãos, análise granulométrica e limites de Atterberg. As amostras foram preparadas como indicado na norma NBR 6457 (ABNT, 1986), com secagem prévia ao ar até próximo da umidade higroscópica.

Para a determinação da massa específica real dos grãos, foi utilizada a norma NBR 6508 (ABNT, 1984a). A Figura 16 mostra uma das etapas do ensaio, em que é aferida a massa do solo com água dentro do picnômetro e, em seguida, apenas a massa da água com mesmo volume.

Figura 16 - Etapa do ensaio de massa específica em andamento.

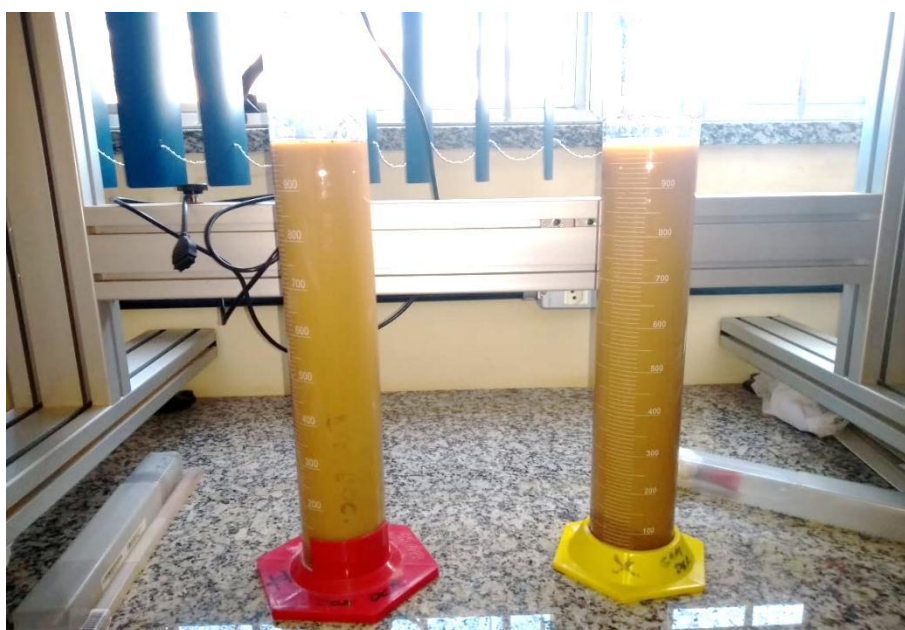


Fonte: Autora.

A análise granulométrica do solo foi executada de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984b) que subdivide o ensaio em duas partes: o peneiramento e a sedimentação.

Uma das etapas da sedimentação é mostrada na Figura 17, em que são aferidas densidades e temperaturas, em intervalos determinados, para solos em duas provetas. Na proveta com base vermelha o solo está em suspensão com defloculante e na de base amarela apenas com água destilada. A realização do ensaio de granulometria com e sem defloculante fornece indícios sobre a presença de agregações em solos tropicais.

Figura 17 - Etapa do ensaio de granulometria em andamento.



Fonte: Autora.

Para os ensaios de limites de Atterberg, Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, foram utilizadas as especificações das normas NBR 6459 (ABNT, 1984c) e NBR 7180 (ABNT, 1984d), respectivamente.

### **3.2.3 Ensaios de erodibilidade de solo**

Nesta seção serão apresentados os ensaios que determinam qualitativa e quantitativamente a erodibilidade do solo em estudo, sendo eles: ensaio de Inderbitzen e ensaio de desagregação. Ambos os ensaios não são normatizados, de forma que a execução dos mesmos foi realizada utilizando como base trabalhos de referência na área.

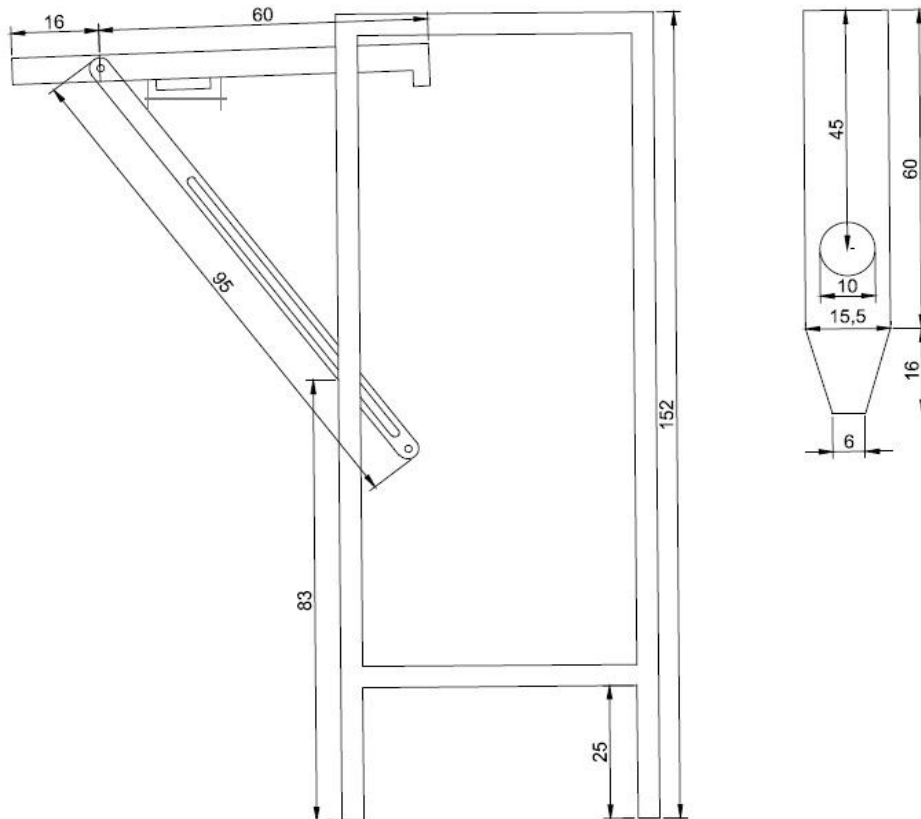
### 3.2.3.1 Ensaio de Inderbitzen

Por se tratar de um ensaio relativamente simples e adaptável, o aparelho de Inderbitzen já foi modificado, da proposta original de Inderbitzen (1961), por alguns autores em suas pesquisas.

Para este ensaio de Inderbitzen, foi construído o equipamento baseando-se nas dimensões adaptadas que são descritas por Bastos (1999), por apresentar um estudo mais completo da erodibilidade dos solos, com conclusões quantitativas. O procedimento de ensaio e os parâmetros aqui utilizados também foram definidos baseando-se nos dados em comum fornecidos por Bastos (1999), Fácio (1991) e Santos (1997), assim como a análise dos seus resultados, a fins de comparação dos resultados e de uma análise mais completa.

A Figura 18 mostra o desenho do equipamento construído e suas dimensões.

Figura 18 - Dimensões do equipamento de Inderbitzen construído.



Fonte: Autora.

As dimensões da rampa foram escolhidas baseando-se no Bastos (1999), colocando um espaço de 2,75 cm de cada lado da amostra até a lateral da rampa, evitando que a influência das laterais afete a uniformidade do escoamento.

A rampa do equipamento foi feita de aço inox e sua adaptação tem inclinações que variam de 0° a 45° graus. O abastecimento da água pra o ensaio é realizado a partir de uma mangueira, de ½” de diâmetro, conectada a uma torneira, enquanto a medição da vazão volumétrica é realizada antes de cada ensaio com o auxílio de uma proveta de 1 litro e um cronômetro em cinco medições.

Os anéis de aço utilizados para a retirada das amostras (Figura 19) foram identificados e suas dimensões e pesos aferidos para os cálculos dos índices físicos do solo ( $e$ , índice de vazios,  $w$ , umidade,  $n$ , porosidade,  $S$ , Saturação,  $\rho_n$ , massa específica natural e seca,  $\rho_d$ ).

Figura 19 - Anéis de aço utilizados no ensaio de Inderbitzen.



Fonte: Autora.

Durante a realização dos testes iniciais, foi observado que, devido à baixa aspereza do aço inox utilizado na rampa, a água escoada não percorria toda a área da rampa, mas sim por caminhos preferenciais. É importante lembrar, que durante o ensaio busca-se simular uma condição mais próxima possível das condições de erosão em campo, sendo assim mais prudente o emprego de materiais mais ásperos, que sejam semelhantes à aspereza dos solos. Foram empregadas lixas d'água, de gramatura 320, sobre a rampa para que fosse possível obter uma lâmina de água uniforme escoando

sobre a amostra ensaiada, e aproximar as condições de escoamento da superfície da rampa à superfície dos solos em campo.

A amostra indeformada retirada com o anel de aço foi regularizada em suas superfícies, pesada e acoplada no orifício do equipamento.

Na parte inferior da rampa, abaixo do orifício, existe uma placa de aço retangular para o apoio do anel. Ela serve para regular a altura da amostra de forma que sua superfície se encontre no nível da rampa, evitando alteração de velocidade da água sobre a amostra. A placa pode ser regulada por quatro parafusos em suas extremidades (Figura 20).

Figura 20 - Detalhe da placa do Aparelho de Inderbitzen utilizado nos ensaios.



Fonte: Autora.

Para impedir que a água escoasse para fora do equipamento, entre o anel e o orifício, usou-se massa epóxi para a vedação apropriada, pelo fácil manuseio e eficácia do material.

Posteriormente foi ligada a torneira, adaptada para a vazão especificada e, com a peneira granulométrica de malha 200 (abertura de 0,075 mm) posicionada em frente à rampa, coletou-se o solo extraído da amostra, substituindo-se a peneira nos tempos de 1 min, 5, 10, 20 e 30 min, sem interromper o escoamento pela rampa. A altura da lâmina

d'água para cada ensaio foi medida com o auxílio de um paquímetro digital em cinco pontos da rampa para uma melhor precisão nos resultados.

Na Figura 21, apresenta-se o aparelho de Inderbitzen durante a realização de um dos ensaios. Foram colocadas algumas peneiras embaixo da peneira de malha #200, apenas para fornecer altura para a coleta do solo desagregado.

Figura 21 - Ensaio de Inderbitzen em andamento.



Fonte: Autora.

Para a escolha dos parâmetros de inclinação e vazão, foi realizado um comparativo entre as referências utilizadas. Enquanto Fácio (1991) utilizou vazão de 3 l/min e inclinações de 5°, 10° e 20°, Bastos (1999) utilizou de duas vazões, 3 l/min e 6 l/min, e inclinações de 10°, 26°, 45° e 54°. Para uma melhor representação dos dados e um maior conhecimento do solo estudado, foram escolhidas três vazões, 3 l/min, 4,5 l/min e 6 l/min, para quatro inclinações, 5°, 10°, 26° e 45°.

O solo extraído das amostras em cada ensaio foi colocado na estufa para a secagem e depois pesado. Após a realização do ensaio, é verificado em que local houve erosão da amostra de solo ensaiada. A Figura 22 apresenta uma das amostras antes e após a realização do ensaio. A seta vermelha indica o sentido aproximado do fluxo da água sobre a amostra no momento do ensaio.

Figura 22 - Amostra 6-45 para Ensaio de Inderbitzen (vazão: 6 l/min; inclinação: 45°).



Fonte: Autora.

### 3.2.3.2 Ensaio de desagregação

Para este ensaio foram utilizadas duas amostras indeformadas de dimensões de, aproximadamente, 6 cm x 6cm x 6cm (Figura 23), uma pedra porosa e água destilada.

Figura 23 - Amostras indeformadas para o ensaio de desagregação.



Fonte: Autora.

Foram seguidos os dois processos realizados por Santos (1997) colocando primeiramente, a amostra dentro de um recipiente fundo sobre a pedra porosa com água destilada até a sua base por 30 min. Depois foi acrescentada mais água para que sua altura cobrisse 1/3 da amostra e então 2/3, por 15 min cada fase, até que a amostra estivesse completamente coberta por água, terminando o ensaio após 24h. O outro processo consistia em colocar a amostra no recipiente fundo com imersão total de água destilada e observar o seu comportamento também até 24 horas de ensaio.

Em cada uma dessas etapas foi observado e registrado o comportamento das amostras. Os cubos foram pesados antes e depois do ensaio, assim como o solo que desagregou de cada um deles.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio de caracterização do solo

A análise granulométrica foi realizada com e sem o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio), que atua separando as partículas do solo, vencendo suas forças elétricas de atração, de forma a sedimentarem separadamente. As porcentagens da composição do solo estão apresentadas na Tabela 2, de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 2 - Frações granulométricas do solo.

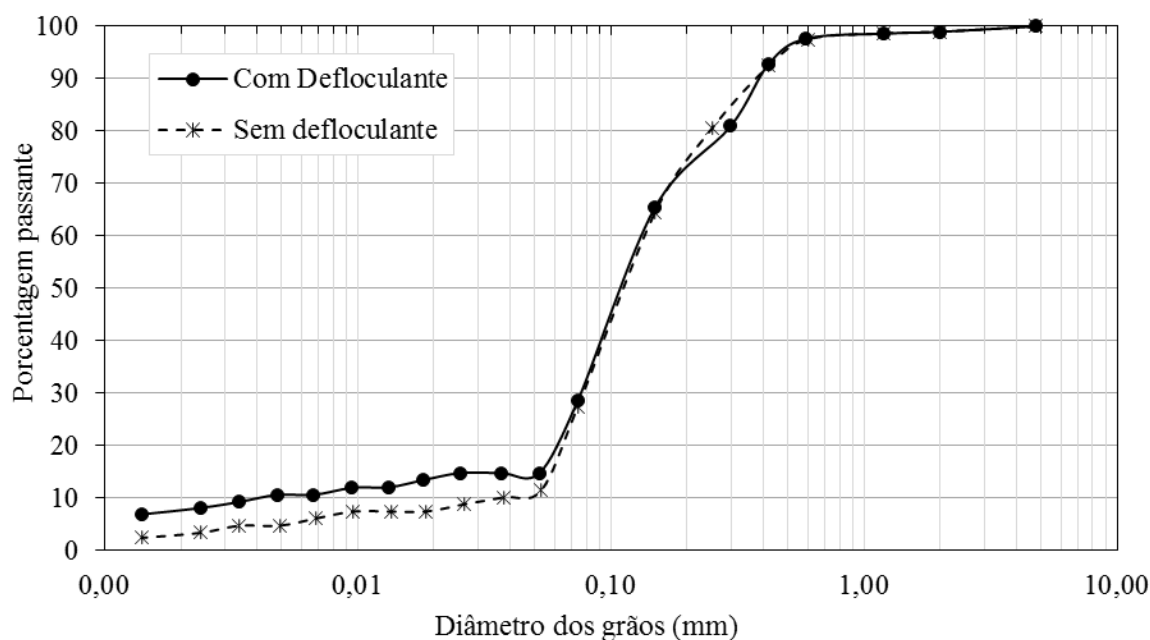
Material	Frações granulométricas sem defloculante (%)	Frações granulométricas com defloculante (%)
Pedregulho	1,02	1,02
Areia Grossa	1,43	1,32
Areia Média	33,10	32,26
Areia Fina	51,56	50,58
Silte	9,46	6,65
Argila	3,43	8,17

Fonte: Autora.

Os resultados apresentam pequenas diferenças nas porcentagens de areias, silte e argila, entre os ensaios com e sem defloculante. Essas diferenças devem-se ao fato de que as partículas de argila presentes no solo que estão ligados aos grãos de dimensões maiores, no primeiro ensaio, se desagregam e sedimentam separadamente com uso de

defloculante. A Figura 24 apresenta o gráfico contendo as curvas granulométricas dos ensaios realizados. Não se observou uma diferença significativa entre as curvas granulométricas com e sem defloculante, indicando que o solo em questão não apresenta muitas agregações.

Figura 24 - Curvas de distribuição granulométrica do solo.



Fonte: Autora.

O solo foi classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) (Anexo A), para os dois ensaios, como SM solo arenoso com finos e Segundo o sistema de classificação do TRB (*Transportation Research Board*), o solo está inserido no grupo A-2-4 como areia siltosa, sem defloculante, e areia argilosa, com defloculante. A massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm é de 2,578 g/cm<sup>3</sup> e não apresenta limites de liquidez e plasticidade, como é típico de solos arenosos.

## 4.2 Ensaio de Inderbitzen

Os ensaios de Inderbitzen foram realizados visando à quantificação da erodibilidade do solo para as três vazões adotadas para o ensaio e as análises foram realizados baseando-se nos estudos realizados por Bastos (1999). Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentados os índices físicos ( $e$ , índice de vazios,  $w$ , umidade,  $n$ , porosidade,  $S$ ,

Saturação,  $\rho_n$ , massa específica natural e seca,  $\rho_d$ ) de cada uma das amostras (antes do ensaio), resultados de perda de solo total e tensão hidráulica calculada ( $\tau_h$ ).

Tabela 3 - Resultados ensaio de Inderbitzen e índices físicos (Vazão: 3 l/min)

<b>Vazão (l/min)</b>	<b>3</b>			
Inclinação da rampa (°)	5	10	26	45
e	0,678	0,672	0,598	0,648
w (%)	12,72	16,13	13,79	14,03
S (%)	46,91	60,03	57,72	54,11
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,54	1,54	1,61	1,56
$\rho_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,73	1,79	1,84	1,78
n (%)	0,404	0,402	0,374	0,393
Perda de solo (g)	0,38	5,14	15,35	5,69
$\tau_h$ (Pa)	0,75	2,36	4,83	8,60

Fonte: Autora

Tabela 4 - Resultados ensaio de Inderbitzen e índices físicos (Vazão: 4,5 l/min)

<b>Vazão (l/min)</b>	<b>4,5</b>			
Inclinação da rampa (°)	5	10	26	45
e	0,651	0,648	0,644	0,681
w (%)	13,28	14,06	12,78	13,09
S (%)	50,97	54,26	49,62	48,03
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,56	1,56	1,57	1,53
$\rho_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,77	1,78	1,77	1,73
n (%)	0,394	0,393	0,392	0,405
Perda de solo (g)	0,24	1,41	2,29	11,54
$\tau_h$ (Pa)	1,73	2,15	4,78	8,90

Fonte: Autora

Tabela 5 - Resultados ensaio de Inderbitzen e índices físicos (Vazão: 6 l/min)

<b>Vazão (l/min)</b>	<b>6</b>			
Inclinação da rampa (°)	5	10	26	45
e	0,603	0,744	0,646	0,626
w (%)	13,57	15,41	15,30	12,71
S (%)	56,31	51,79	59,24	50,76
$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,61	1,48	1,57	1,59
$\rho_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,83	1,71	1,81	1,79
n (%)	0,376	0,427	0,392	0,385
Perda de solo (g)	0,74	2,53	9,27	27,25
$\tau_h$ (Pa)	2,28	3,35	5,90	10,10

Fonte: Autora.

A Tabela 6 apresenta os valores médios e desvio padrão dos índices físicos de todas as amostras ensaiadas.

Tabela 6 - Média e desvio padrão dos Índices físicos.

	<b>w (%)</b>	<b>e</b>	<b><math>\rho_a</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>n (%)</b>	<b><math>\rho_n</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Média	13,905	0,653	1,560	0,395	1,777
Desvio padrão	0,901	0,027	0,025	0,010	0,029

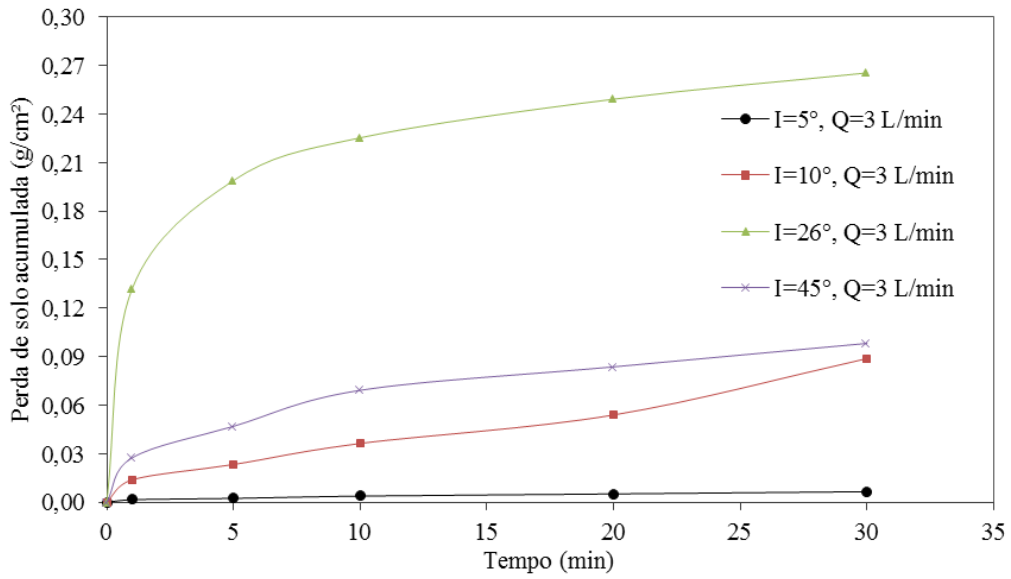
Fonte: Autora.

Com esses dados é possível perceber que os índices físicos não diferem consideravelmente entre as amostras, como o índice de vazios que apresentou um desvio padrão de 0,027 e a porosidade de apenas 0,01%. Como se refere a uma coleta de solo natural, em campo, é comum que os valores dos índices físicos não sejam iguais. Trata-se de um solo tropical não uniforme, com a presença de raízes em alguns casos. É importante salientar que as amostras apresentam teor de umidade natural diferente por conta da umidificação do solo no momento da coleta, como já foi exposto na seção 3.2.1.

Nas Figuras 25, 26 e 27 apresenta-se a relação entre perda de solo, acumulada na peneira de malha #200, por área da amostra (g/cm<sup>2</sup>) e os tempos de ensaio delimitados, para cada uma das vazões e inclinações. É importante ressaltar que diâmetros de partículas menores que 0,075 mm passam pela peneira e não foram contabilizados, como realizado por Fácio (1991) e Bastos (1999). Porém, como o solo em estudo apresenta 82,84% de areia e apenas 14,82% de silte e argila, acredita-se que o impacto dessa perda não foi suficiente para prejudicar as análises.

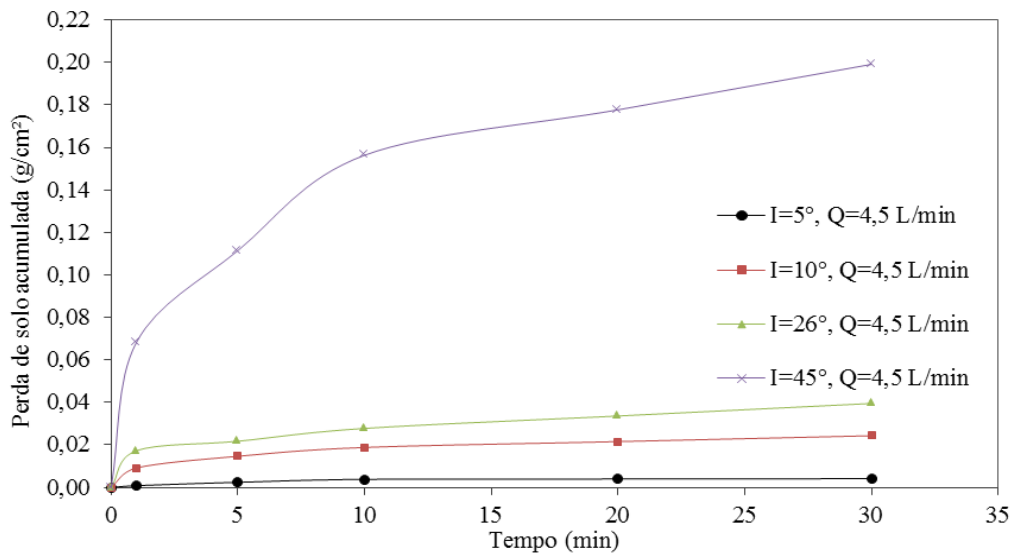
A observação da relação entre a perda de solo e o tempo nas figuras, possibilita a verificação da tendência de aumentar a perda de solo com o aumento da inclinação da rampa, a uma mesma vazão. Isso indica uma vulnerabilidade do solo à erosão em locais com relevo acentuado, como encostas e taludes, como observado por Fácio (1999).

Figura 25- Curva de perda de solo acumulada ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (min) para a vazão de 3 l/min.



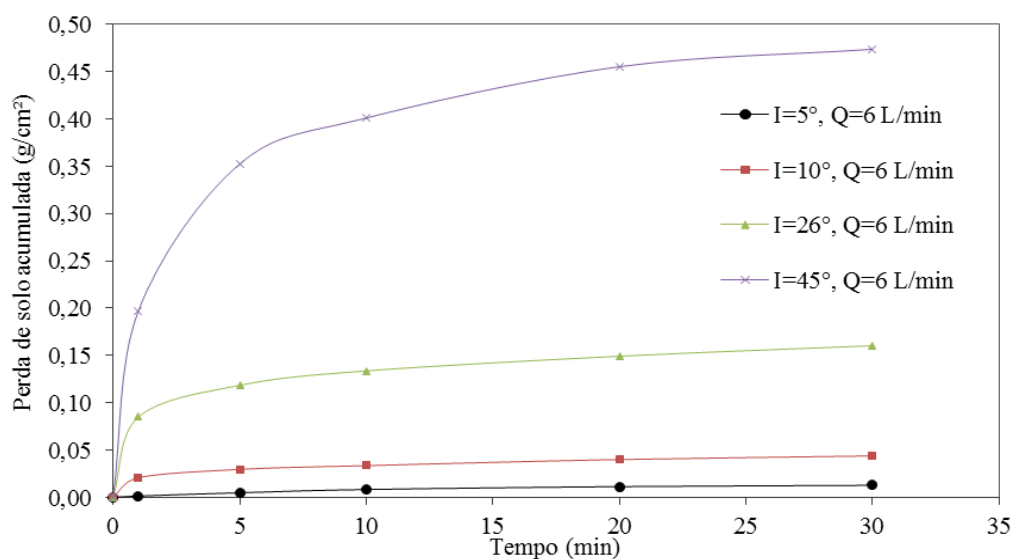
Fonte: Autora.

Figura 26 - Curva de perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (min) para a vazão de 4,5 l/min.



Fonte: Autora.

Figura 27 - Curva de perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (min) para a vazão de 6 l/min.



Fonte: Autora.

Contudo, essa tendência não foi observada para as maiores declividades, no ensaio com vazão de 3 l/min, nesse caso a amostra 3-45 (inclinação  $45^\circ$ ) perdeu uma quantidade menor de solo que a amostra 3-26 (inclinação  $26^\circ$ ), como mostrado na Figura 25.

Nota-se que, para algumas amostras, a perda de solo acumulada por área da amostra é crescente nos primeiros minutos e depois tende a se estabilizar. O formato hiperbólico das curvas obtidas é semelhante ao que se observa nos trabalhos de Fácio (1991), Santos (1997), Stephan (2010) e Campos (2014).

Por conta da tensão de cisalhamento hidráulico alta, para as inclinações de  $45^\circ$ ,  $26^\circ$  e  $10^\circ$ , a perda de solo é notável logo no primeiro minuto de ensaio onde o solo tende a desagregar uma quantidade maior superficialmente. Contudo, as perdas de solo nas amostras 3-10 e 4,5-45 não se estabilizaram nos 30 minutos de ensaio, tendendo a perder mais solo a partir do minuto 20.

As Figuras 28, 29 e 30 mostram a situação das amostras antes e depois do ensaio de cada uma das amostras. As setas vermelhas indicam o fluxo da água sobre a amostra no momento do ensaio de maneira aproximada.

Na Figura 28 é possível observar que a amostra 3-45 realmente não perdeu tanto solo quanto se era esperado, comparada à amostra 3-26. Uma razão dessa irregularidade poderia ser a presença de mais raízes finas, que podem agir evitando que o solo seja desagregado com facilidade, pois observando os outros parâmetros de comparação,

como o índice de vazios e porosidade, por exemplo, não existem diferenças consideráveis em seus valores. Esse dado divergente se apresentará bastante evidente nas análises seguintes e estará identificado por um círculo vermelho tracejado.

Figura 28 - Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de 3 l/min.



Fonte: Autora.

Figura 29 - Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de 4,5 l/min.



Fonte: Autora.

Figura 30 - Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de 6 l/min.



Fonte: Autora.

As mudanças de cores presentes nas imagens devem-se ao jogo de luz do local no momento da foto.

Observando a amostra 4,5-5 na Figura 29, nota-se uma raiz protuberante próximo à superfície da amostra. Sabe-se que a presença de vegetação e raízes auxilia na resistência do solo a intempéries tornando-o menos erodível, mas, nesse caso, a presença significativa da raiz na amostra fez com que a perda de solo se concentrasse ao redor dela. Podemos supor que a influência dessa raiz na amostra de solo se tornaria mais evidente se estivesse sido ensaiada a inclinação ou vazão maior.

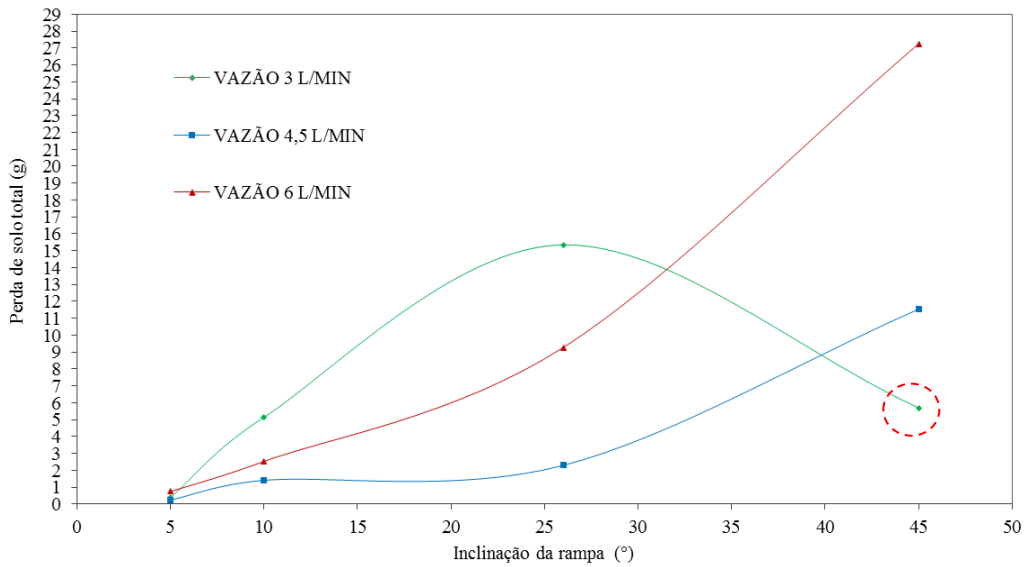
Nota-se uma tendência de erosão maior próximo ao anel e menos no meio da amostra. Para as inclinações de 5°, 10° e 26°, o ponto mais deteriorado da amostra é o que primeiro o fluxo d'água atinge na hora do ensaio, enquanto para a inclinação de 45° nota-se a erosão ocorrendo por toda lateral da amostra.

É possível que o motivo dessa erosão das bordas da amostra ocorra por um ressalto hidráulico pequeno causado pela lâmina d'água e pelo fato das laterais das amostras estarem mais instáveis, por conta da coleta com o anel. Como os ensaios realizados com inclinação de 45° são os que apresentam as menores lâminas d'água, e

maiores velocidades, o transporte de grãos de solo se torna mais fácil pelas laterais por onde a água está entrando na amostra.

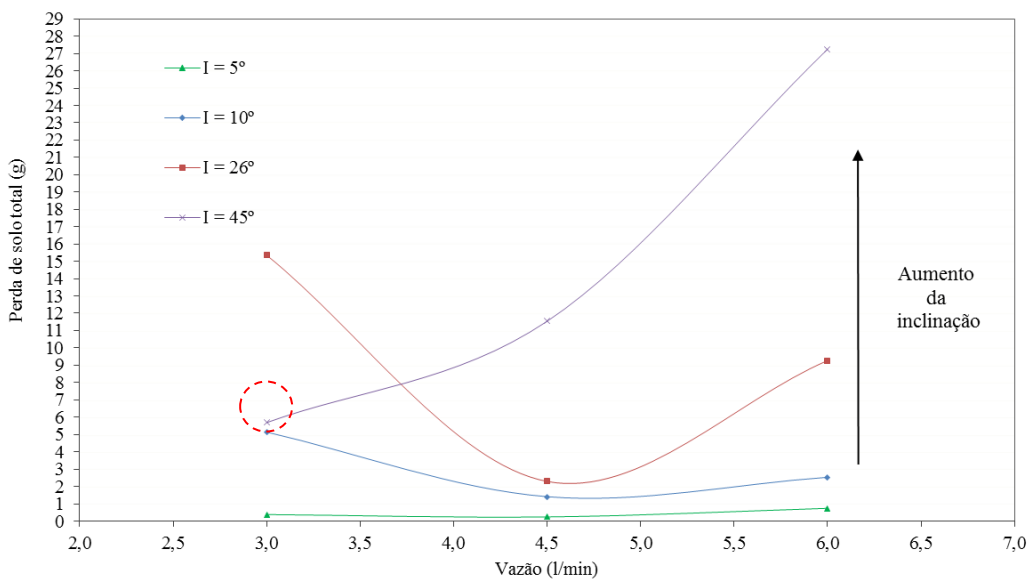
As Figuras 31 e 32 mostram gráficos que relacionam a perda de solo com a inclinação da rampa e vazão, para cada amostra ensaiada.

Figura 31 - Relação entre a Perda de solo (g/cm<sup>2</sup>) e Inclinação da rampa (°) para as vazões em estudo.



Fonte: Autora.

Figura 32 - Relação entre a Perda de solo (g/cm<sup>2</sup>) e Vazão (l/min) para as inclinações em estudo.

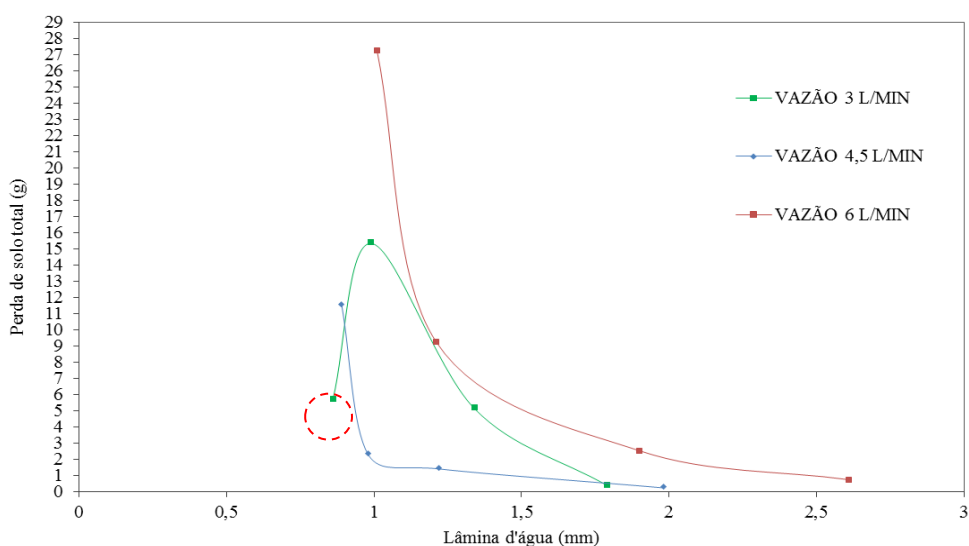


Fonte: Autora.

Podemos perceber na Figura 31 que o aumento da vazão não influenciou no aumento da perda de solo porque apesar da perda com vazão de 6 l/min se mostrar superior a de 4,5 l/min em qualquer inclinação, para as inclinações de 10° e 26° a perda com vazão de 3 l/min se apresenta superior a de 6 l/min.

Apesar das amostras se comportarem diferente do esperado com relação ao aumento da vazão, percebe-se na Figura 32 que a uma vazão de 6 l/min o aumento da inclinação da rampa faz crescer consideravelmente a quantidade de solo erodida. Então se conclui que, numa situação real de erosão desse solo, a declividade do terreno não afetaria tanto o movimento de solo a vazões pequenas como 3 l/min e 4,5 l/min, mas poderia ser um problema se a vazão fosse maior.

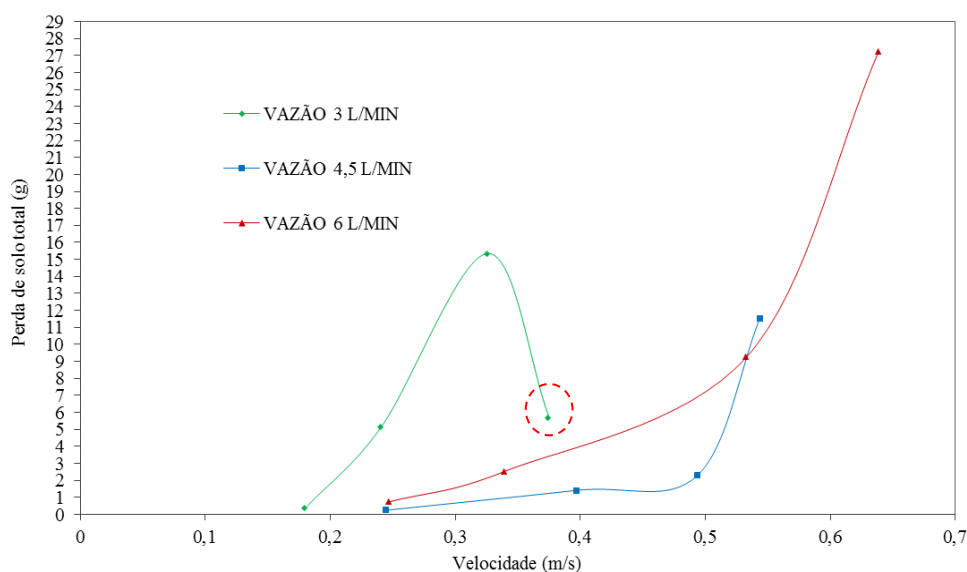
Figura 33 - Relação entre a Perda de solo (g/cm<sup>2</sup>) e Lâmina d'água (mm) para as para as vazões em estudo.



Fonte: Autora.

A Figura 33 mostra a tendência da perda de solo relacionada à altura da lâmina d'água, em que a amostra tende a diminuir a perda de solo com o aumento da altura da lâmina d'água. O contrário acontece quando se relaciona a perda de solo com a velocidade do fluxo d'água (Figura 34).

Figura 34 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e Velocidade do fluxo d'água ( $\text{m}/\text{s}$ ) para as vazões em estudo.



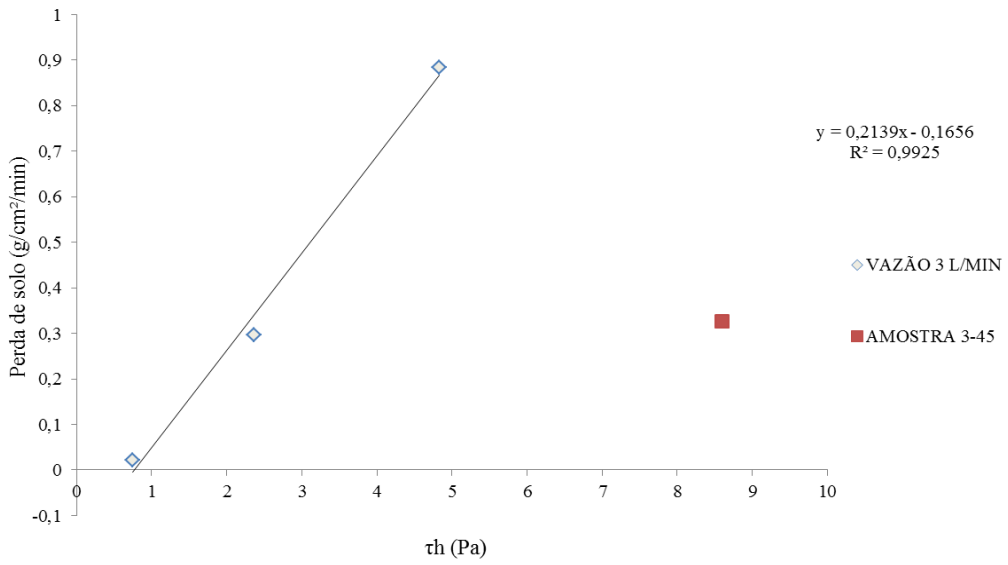
Fonte: Autora.

As Figuras 33 e 34 apresentam curvas opostas porque a velocidade do fluxo d'água é inversamente proporcional à altura da lâmina.

Para determinar quantitativamente a erodibilidade desse solo, segundo Bastos (1999), é plotado o gráfico de Perda de solo por área por minuto ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) x Tensão hidráulica  $\tau_h$  (Pa), pra cada vazão de ensaio. A partir dele, são ajustadas retas em que é possível estimar os parâmetros de erodibilidade: tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\tau_{hcrit}$  (Pa), que corresponde ao máximo valor de  $\tau_h$  para erosão nula, e a taxa de erodibilidade,  $K$  ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ), que representa o gradiente de perda de solo em relação às tensões hidráulicas aplicadas.

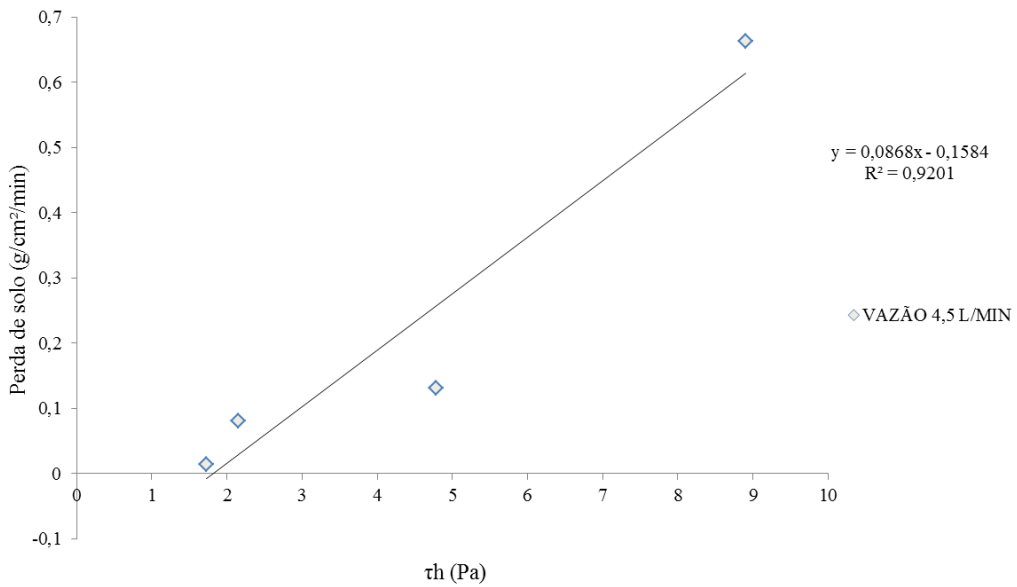
Os gráficos em questão são apresentados nas Figuras 35, 36 e 78, enquanto os valores dos parâmetros obtidos e a classificação da erodibilidade de acordo com Bastos (1999) apresentada aqui na Tabela 1 (p. 27) são mostrados na Tabela 7.

Figura 35 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico  $\tau_h$  (Pa) para a vazão de 3 l/min.



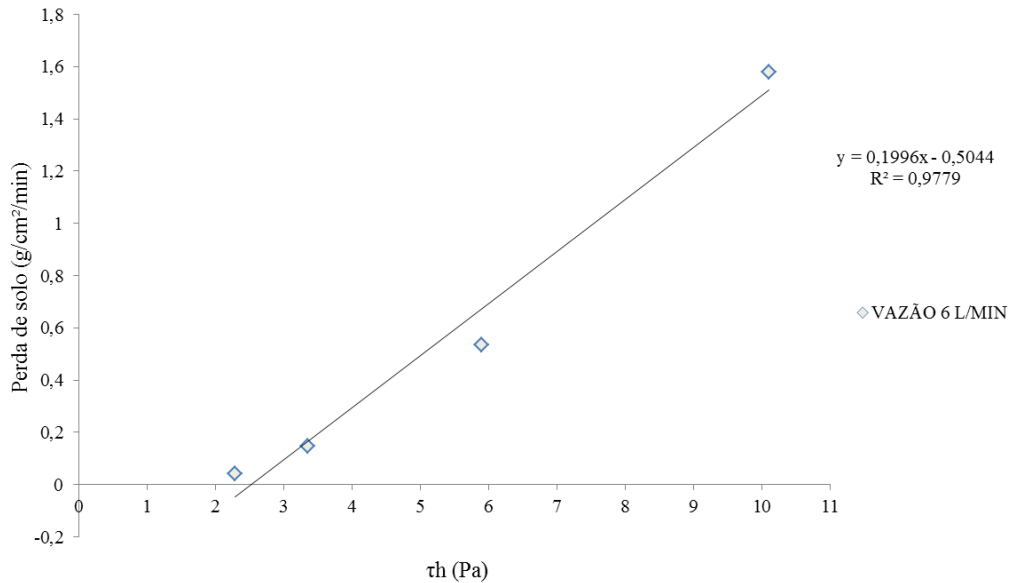
Fonte: Autora.

Figura 36 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico  $\tau_h$  (Pa) para a vazão de 4,5 l/min.



Fonte: Autora.

Figura 37 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico  $\tau_h$  (Pa) para a vazão de 6 l/min.



Fonte: Autora.

Tabela 7 - Parâmetros de erodibilidade do Ensaio de Inderbitzen.

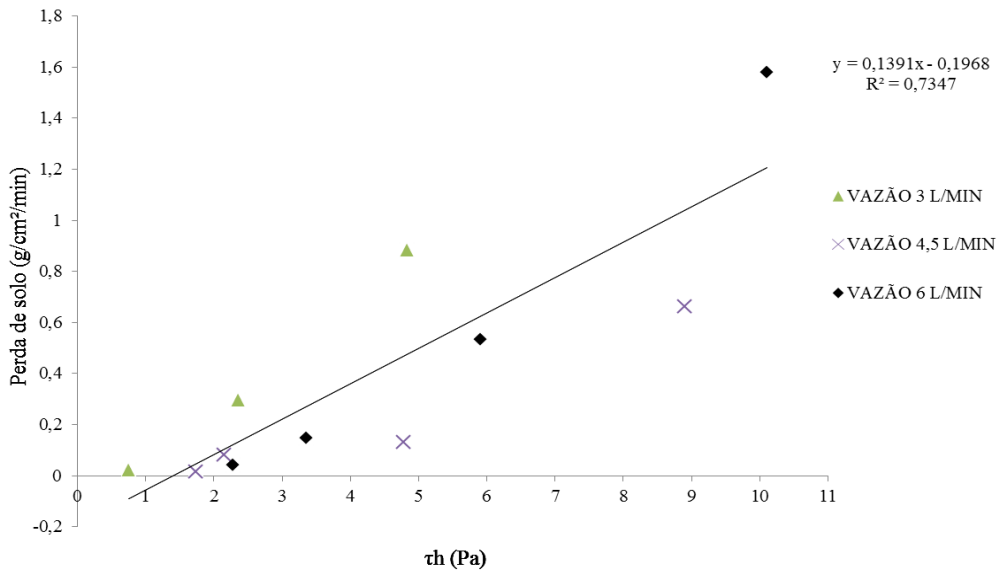
Vazão (l/min)	$\tau_{hcrit}$ (Pa)	K ( $\text{g/cm}^2/\text{min/Pa}$ )	Erodibilidade
3	0,774	0,002139	Média
4,5	1,825	0,000868	Baixa
6	2,527	0,001996	Média

Fonte: Autora

Como mostrado na Figura 35, o valor relacionado à Amostra 3-45 irregular foi retirado do ajuste da reta para que o resultado dos parâmetros não fosse comprometido.

Quando os dados de tensão de cisalhamento hidráulico e perda de solo das três vazões ensaiadas são relacionados conjuntamente, sem o valor da amostra 3-45, pode-se estabelecer uma única linha de tendência e classificar a erodibilidade do solo a partir da taxa de erodibilidade (K) obtida de  $0,001391 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ , que representa, aproximadamente, a média dos valores de K obtidos para cada vazão. (Figura 38).

Figura 38 - Relação entre a Perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) e a Tensão de cisalhamento hidráulico  $\tau_h$  (Pa) ensaio de Inderbitzen.



Fonte: Autora.

É possível comparar resultado da erodibilidade desse solo com dos solos avaliados por Bastos (1999), RS239C, que possui a mesma classificação e o índice de vazios próximo, sendo considerado, também, um solo de média erodibilidade.

### 4.3 Ensaio de Desagregação

Para analisar melhor os resultados do Ensaio de Desagregação, foram calculados os índices físicos das amostras ensaiadas. Como Santos (1997), também foram executados dois métodos: Imersão total e imersão parcial das amostras. Os índices físicos ( $e$ , índice de vazios,  $w$ , umidade,  $n$ , porosidade,  $S$ , Saturação,  $\rho_n$ , massa específica natural e seca,  $\rho_d$ ) de ambas, antes do ensaio, estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Índices físicos (amostras do Ensaio de Desagregação).

Índices Físicos	Imersão total	Imersão parcial
$e$	0,588	0,643
$w$ (%)	1,09	1,09
$S$ (%)	4,920	4,498
$\rho_d$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,624	1,569
$\rho_n$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,641	1,586
$n$ (%)	0,370	0,391

Fonte: Autora.

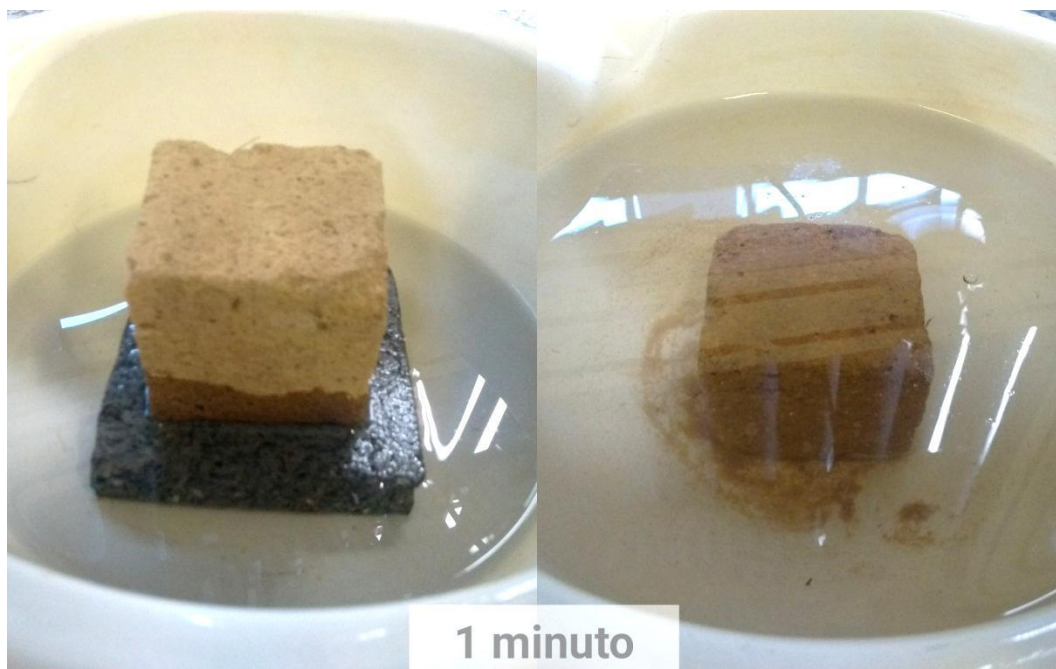
Visto que as amostras indeformadas para o Ensaio de Desagregação não seriam coletadas com a cravação de anéis de aço no terreno como no ensaio de Inderbitzen, o solo foi cortado e moldado em cubos em sua umidade de 1,09% para que nenhuma propriedade do solo fosse alterada antes do ensaio ser realizado. Vale ressaltar que no que se refere aos índices de vazios, massa específica natural e seca, os valores estão próximos as amostras utilizadas no ensaio de Inderbitzen.

Uma vez que dimensões dos dois cubos eram aproximadamente 6 cm x 6 cm x 6 cm e as amostras foram coletadas, moldadas e ensaiadas ao mesmo tempo, seus índices físicos (Tabela 9) não apresentam uma diferença significativa.

Nas Figuras 39 a 44 são apresentadas as amostras nos tempos de 1 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min e 24 horas, respectivamente.

Analisando a forma como as amostras se comportaram durante o ensaio, nota-se que pouco solo se desagregou e que não houve nenhum tipo de abatimento ou fraturamento das amostras, concluindo-se que o solo apresenta bom comportamento, sendo pouco erodível diante da imersão em água.

Figura 39 - Ensaio de Desagregação (1 min).



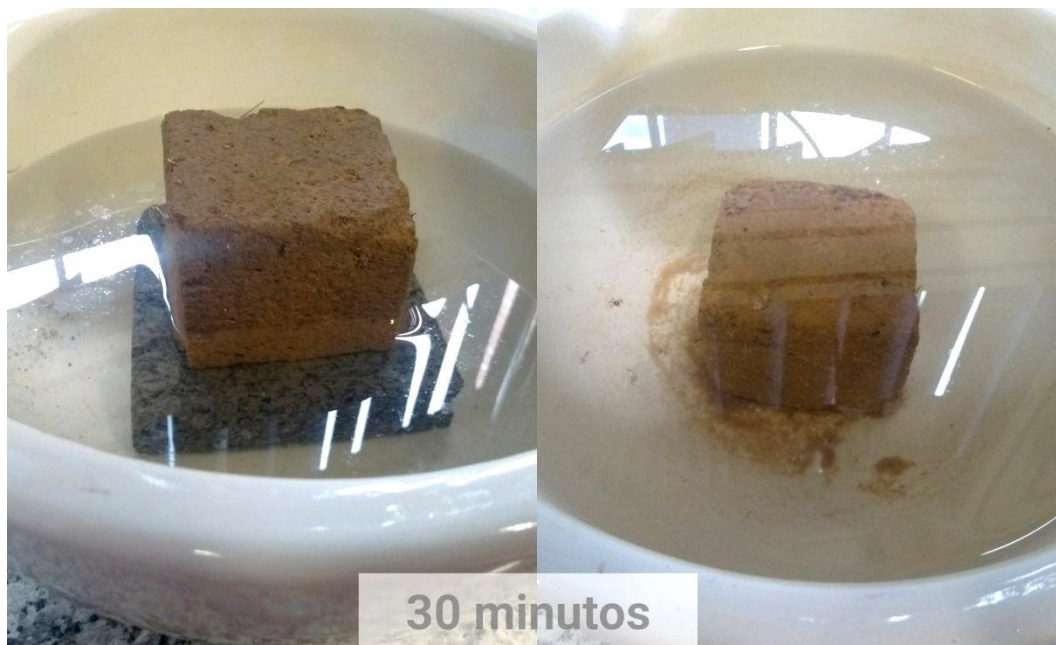
Fonte: Autora.

Figura 40 - Ensaio de Desagregação (15 min).



Fonte: Autora.

Figura 41 - Ensaio de Desagregação (30 min).



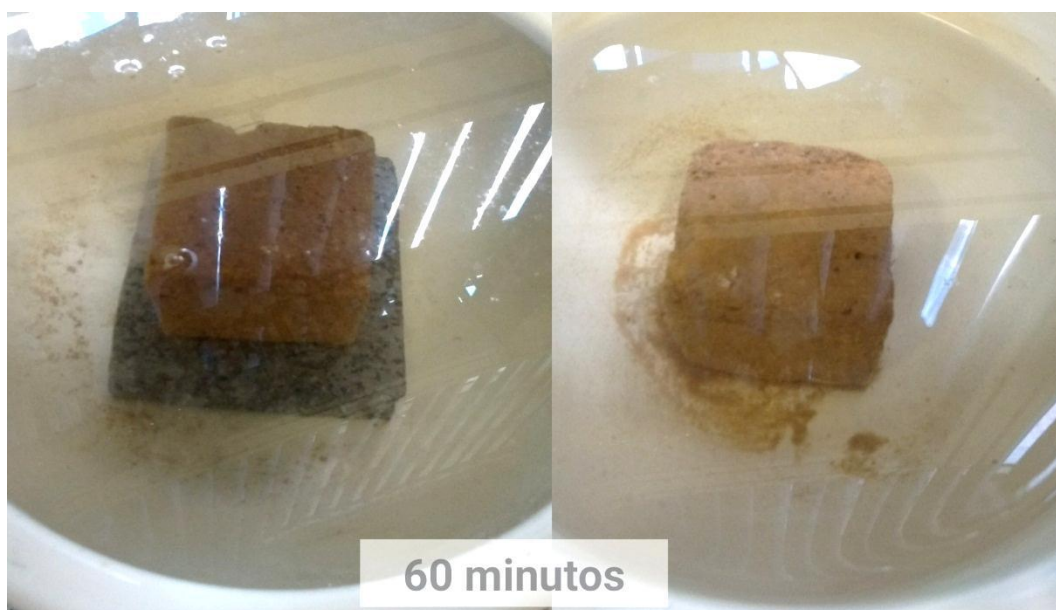
Fonte: Autora.

Figura 42 - Ensaio de Desagregação (30 min).



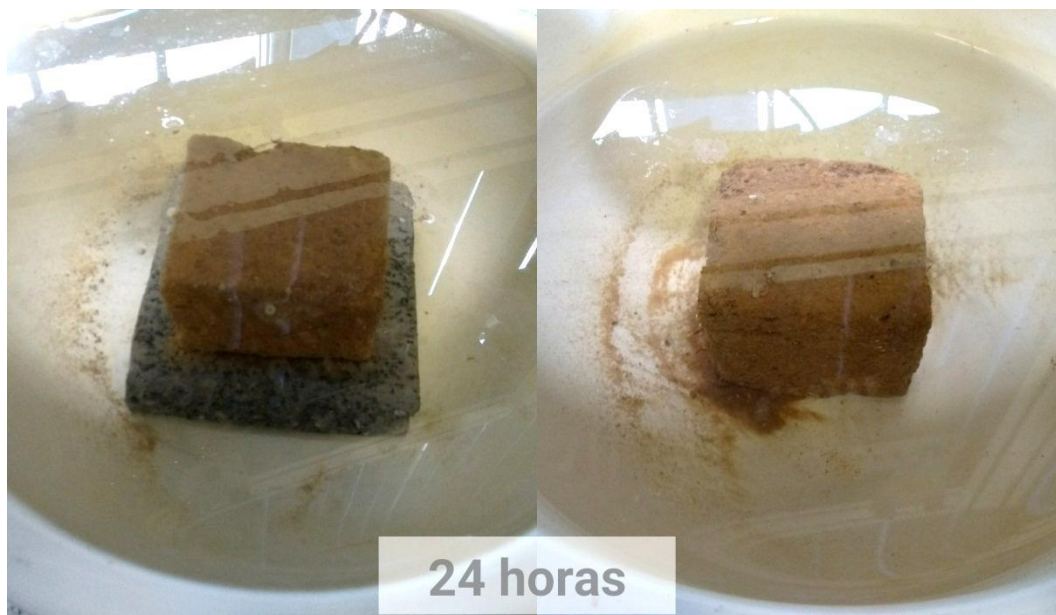
Fonte: Autora.

Figura 43 - Ensaio de Desagregação (60 min).



Fonte: Autora.

Figura 44 - Ensaio de Desagregação (24 h).



Fonte: Autora.

O solo desagregado com imersão total imediata da amostra foi 0,81 g, enquanto a amostra que foi imersa parcialmente desagregou 0,94 g. Os resultados do ensaio de desagregação são compatíveis com os resultados observados no ensaio de Inderbitzen (Tabela 8) que apontou erodibilidade baixa ou média.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado teve como objetivo a realização do estudo de um solo da cidade de Barreiras por meio de ensaios de caracterização e de erodibilidade, utilizando o equipamento de Inderbitzen construído para esse projeto. Fundamentando-se nos dados coletados de cada um dos ensaios, é realizada a análise individual e de como eles se relacionam.

Trata-se de um solo predominantemente arenoso com uma porcentagem pequena de argila, apresentando características de um solo não plástico. Apesar de conter uma porcentagem grande de areia fina, exibe um índice de vazios de aproximadamente 0,65, que geralmente são solos que na prática apresentam uma maior resistência a erosão. Como a análise granulométrica e os índices físicos de um solo não apresentam dados suficientes para definir a sua erodibilidade faz-se os ensaios diretos, de Inderbitzen e desagregação.

Os resultados apresentados com o ensaio de Inderbitzen nos mostram, quantitativamente, a erodibilidade do solo em estudo pela taxa de erodibilidade  $K$  ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ) para as vazões adotadas, concluindo-se que trata-se de um solo com erodibilidade média.

Além disso, foi possível relacionar a perda de solo da amostra com outros fatores como declividade, velocidade e altura da lâmina d'água. Conclui-se que o aumento da inclinação da rampa gera um aumento considerável na erosão na amostra, reforçando o fato do risco evidente de erosão em encostas e taludes com altas declividades. Nota-se, também, a tendência de aumento da perda de solo quando a velocidade da água aumenta e, conseqüentemente, a lâmina d'água diminui. Em alguns casos, com declividades mais acentuadas, existe um ressalto hidráulico que é notável quando a lâmina d'água está menor, fazendo aumentar a perda de solo daquela amostra tendo as laterais do anel como caminho preferencial.

Com o ensaio de desagregação é possível perceber o quanto o solo resiste quando inundado por 24h, imediatamente e parcialmente. Ambas as amostras se mostraram muito resistentes, não havendo colapso do solo ou quebra do bloco, apenas o despreendimento de uma fração pequena e aproximadamente 1 g de solo.

É importante ressaltar que por se tratar de um solo natural superficial, possui raízes e vazios que não são quantificados dentro das amostras, não se podendo concluir com precisão a influência desses fatores na erosão em geral. Cada caso deve ser

analisado separadamente e existe a possibilidade de haver resultados inesperados, comparando com os parâmetros já conhecidos e previsíveis.

Com isso pode-se sugerir, para trabalhos futuros:

- Executar o mesmo procedimento realizado neste trabalho em outras localidades do Oeste da Bahia, a fim de estabelecer comparações e ampliar os estudos na região;
- Estudar a erodibilidade de uma erosão já existente, coletando amostras em profundidades diferentes caracterizando seus horizontes;
- Desenvolver amostras de solo em laboratório com classificação granulométrica, compacidade e índice de vazios específicos, para estabelecer parâmetros relacionados à erodibilidade, com o ensaio de Inderbitzen;
- Ensaiar as amostras ampliando as vazões e inclinações, resultando num conjunto maior de informações para análises e comparações.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro/RJ, 1984a. 8p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro/RJ, 1984b. 13 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro/RJ, 1984c. 6p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro/RJ, 1984d. 3 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro/RJ, 1986. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro/RJ, 1995, 18 p.

ANDRADE, A.C. et al. **Estudo dos processos erosivos na Bacia do Rio Grande (BA) como subsídio ao planejamento agroecológico.** Embrapa Cerrados, Planaltina/DF, 2002. 26p.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 1999. 251p.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y.; MILITITSKI, J. **Avaliação Geotécnica da Erodibilidade dos Solos.** GEOSUL – II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Porto Alegre/RS, 2000.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, Brasília/DF, 2006. 464 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo/SP, 2015. 759p.

CAMPOS, C. J. M. **Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru - SP**. Dissertação de Mestrado na Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru/SP, 2014. 153p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 719. **Manual de Pavimentação. 3ª Edição**. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

FÁCIO, J.A. **Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília/DF, 1991. 120 p.

FISTAROL, P. H. B.; SANTOS, J. Y. G.; NAKAMURA, T. C. **Estimativa das perdas de solo na bacia do Rio de Ondas, Estado da Bahia**. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Barreiras/BA, 2016.

FRAGASSI, P.F.M. **Estudo da Erodibilidade dos Solos Residuais de Gnaisse da Serra de São Geraldo e de Viçosa**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UFV, Viçosa/MG, 2001.

GUERRA, A. J. T. **O início do Processo Erosivo**. In: Erosão e Conservação dos Solos - Conceitos, Temas e Aplicações. A. J. T. GUERRA.; SILVA, A, S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs.). 3ª ed. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

GRANDO, A.; MACIEL, C. B.; CORSEUIL, C. W.; MACCARINI, M.; KOBİYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R. **Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental**. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. MS: ABRH Anais... Campo Grande/MS, 2009. 19p.

LEMOS, C. F. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen.** Dissertação de Mestrado em Agronomia – área de concentração em Ciência do Solo – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2002.

LIMA, M. C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto a voçorocas.** Tese de Doutorado em Geotecnia. Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Brasília, Brasília/DF, 2003. 364 p.

MAGALHÃES, R. A. **Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle.** VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia/GO, 03 a 06 de maio de 2001.

MENDES, C.A.R. **Erosão em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ.** Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2006.

MORTARI, D. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no Distrito Federal.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, FT, UnB, DFG, Brasília/DF, 1994. 200p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação.** In: Anais da 18ª Reunião Anual da Pavimentação, Porto Alegre/RS: ABPv, 1983.

PASSO D. P.; MARTINS E. S.; GOMES M. P.; REATTO A.; CASTRO K. B.; LIMA L. A. S.; CARVALHO JÚNIOR O. A.; GOMES R. A. T. **Caracterização geomorfológica do município de Barreiras, Oeste Baiano, escala 1:100.000.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 294. Embrapa Cerrados, Brasília/DF, 2010. 31 p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3º ed. São Paulo: Oficina de Textos, São Paulo/SP, 2006. 247 p.

REGO, J. J. V. **Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaisse.** Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1978. 125 p.

SANTOS, R. M. M. **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília/DF, 1997.

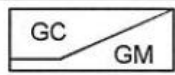
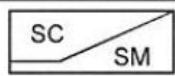
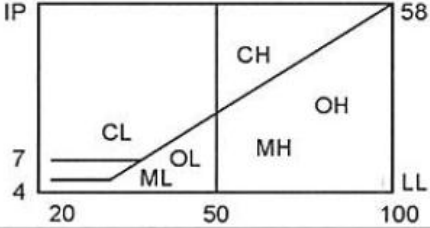
STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen.** Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2010. 165 p.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar.** Edgard Blücher Ltda. EDUSP, São Paulo/SP, 2003. 400p.

VALLADARES, G. S.; GUIMARÃES, M.; BATISTELLA, M. **Susceptibilidade à erosão das terras na região Oeste do Estado da Bahia.** Embrapa, Campinas/SP, 2002.

## ANEXO A - Classificação dos solos (SUCS e TRB)

Figura 45 - Sistema Unificado de classificação de Solos (SUCS).

% P #200 < 50	G > S : G		% P #200 < 5	GW    CNU > 4 e 1 < CC < 3	
				GP    CNU < 4 ou 1 > CC > 3	
			% P #200 > 12	GC	
				GM	
			5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S		% P #200 < 5	SW    CNU > 6 e 1 < CC < 3	
				SP    CNU < 6 ou 1 > CC > 3	
			% P #200 > 12	SC	
			SM		
		5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.		
% P #200 > 50	C	CL			
		CH			
	M	ML			
		MH			
	O	OL			
		OH			

Fonte: Pinto (2006).

Figura 46 - Sistema de classificação do TRB (Transportation Research Board).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A-7-5 A-7-6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT – IPR 719 (2006).