

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL - FECIV

KAREN RANIERY DINIZ ARAÚJO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO DE UM SOLO LATERÍTICO EM
FUNÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO.

Uberlândia
2025

KAREN RANIERY DINIZ ARAÚJO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO DE UM SOLO LATERÍTICO EM
FUNÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO.

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Rodrigo Pires Leandro

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A663 Araújo, Karen Raniery Diniz, 2001-
2025 Avaliação do potencial erosivo de um solo laterítico em função
da energia de compactação. [recurso eletrônico] / Karen Raniery
Diniz Araújo. - 2025.

Orientador: Rodrigo Pires Leandro.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil. I. Leandro, Rodrigo Pires ,1978-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

KAREN RANIERY DINIZ ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO DE UM SOLO LATERÍTICO EM
FUNÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO.**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Uberlândia, dezembro de 2025

Banca Examinadora:

Rodrigo Pires Leandro – Faculdade de Engenharia Civil (FECIV)

Alisson Filmiano – Faculdade de Engenharia Civil (FECIV)

Carlos Eugênio – Faculdade de Engenharia Civil (FECIV)

Dedico este trabalho à minha família,
pelo apoio constante, e a todos que, de
alguma forma, caminharam comigo até
aqui.

AGRADECIMENTOS

Sou profundamente grata primeiramente a Deus, aos meus pais e à minha irmã, pelo amor, pela paciência e por estarem ao meu lado em todos os momentos, tornando possível cada etapa desta caminhada.

Expresso minha gratidão ao professor Rodrigo Pires Leandro pelo apoio, incentivo e orientação ao longo desta trajetória acadêmica.

Agradeço aos colegas que caminharam comigo ao longo dessa jornada, pelo apoio, pelas trocas e pela parceria que contribuíram para a realização deste trabalho.

Estendo também meu agradecimento aos demais professores, pelos ensinamentos que enriqueceram minha formação.

RESUMO

A erosão de um solo pode ser definida como um processo natural de desagregação, transporte e deposição, influenciada por fatores como condições pluviométricas, relevo, cobertura vegetal, e características do material. Sua intensidade pode ser agravada pelo tipo de uso e ocupação do terreno, gerando riscos ambientais e econômicos, como observado em margens de rodovias, onde a erosão compromete sistemas de drenagem, causa assoreamento de corpos d'água, danifica pavimentos e eleva o potencial de risco de acidentes. Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo é avaliar a influência da energia de compactação na suscetibilidade à erosão de um solo laterítico. Utilizou-se um equipamento de Inderbitzen modificado para simular o efeito *splash* mediante aplicação de fluxo de água sobre uma superfície inclinada. Dois níveis de compactação foram testados, coletando-se o material erodido em intervalos diferentes de tempo. A principal conclusão do trabalho foi que o aumento da energia de compactação é eficaz para reduzir a erodibilidade superficial de um solo laterítico, devendo ser considerada no projeto de obras de terra compactada como, por exemplo, execução de acostamentos e bordas de pavimentos rodoviários.

Palavras-chave: erosão do solo; energia de compactação; solo laterítico; erodibilidade; ensaio de inderbitzen modificado.

ABSTRACT

Soil erosion can be defined as a natural process of detachment, transport, and deposition, influenced by factors such as rainfall conditions, topography, vegetation cover, and material characteristics. Its intensity can be aggravated by land use and occupation, generating environmental and economic risks, as commonly observed along highway embankments, where erosion compromises drainage systems, causes sedimentation of water bodies, damages pavements, and increases the potential risk of accidents. In this context, the main objective of this study is to evaluate the influence of compaction energy on the erosion susceptibility of a lateritic soil. A modified Inderbitzen apparatus was used to simulate splash erosion by applying a water flow over an inclined surface. Two compaction levels were tested, and the eroded material was collected at different time intervals. The main conclusion of this study is that increasing compaction energy is effective in reducing the surface erodibility of a lateritic soil, and should be considered in the design of compacted earth structures, such as highway shoulders and pavement edges.

Keywords: soil erosion; compaction energy; lateritic soil; erodibility; modified Inderbitzen test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aparelho desenvolvido por Inderbitzen (1961).....	15
Figura 2 - Fluxograma do método experimental	17
Figura 3 - Distribuição granulométrica do solo estudado na profundidade de 0,5m (Fonte: Lopes, 2023)	18
Figura 4 – Desenho esquemático do perfil de solos da região de coleta.....	19
Figura 5 - (a) Extração de um dos CPs compactado; (b) CP compactado	20
Figura 6 - Curvas de compactação na energia normal e modificada.....	20
Figura 7 - Relação Mini-MCV × PI	22
Figura 8 - Relação PI × Teor de Umidade.....	23
Figura 9 - Compactação da amostra	24
Figura 10 - Extração da amostra.....	25
Figura 11 - Anel de adensamento utilizado para a moldagem das amostras.....	25
Figura 13 – Desenho esquemático do corte frontal do aparelho de Inderbitzen construído (dimensões em cm).....	27
Figura 14 – Desenho esquemático em 3D do aparelho de Inderbitzen construído	27
Figura 15 - Equipamento montado	28
Figura 16 - (a) Realização do ensaio de Inderbitzen e; (b) Secagem do material desprendido.....	29
Figura 17 - Porcentagem de massa desprendida por tempo de ensaio	31
Figura 18 - Percentual de massa erodida em relação à massa total desprendida por tempo de ensaio	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de materiais.....	28
Tabela 2 - Porcentagem de massa desprendida por tempo de ensaio.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
LP	Limite de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
IP	Índice de Plasticidade
IL	Índice de Laterização
Mini-MCV	Miniatura Compactado em Cinco Golpes (do método MCT)
MCT	Método de Classificação de Solos Tropicais
SPT	Standard Penetration Test (Sondagem de Simples Reconhecimento)
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	Transportation Research Board
LA	Areia de Comportamento Laterítico (classe do MCT)
SM-CS	Silty, Clayey Sand (areia siltosa-argilosa, classificação SUCS)
CP	Corpo de Prova

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3	MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EROSIVO	23
4	CONSTRUÇÃO DO APARELHO DE INDERBITZEN MODIFICADO	25
5	REULTADOS E DISCUSSÃO	30
6	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A erosão hídrica de um solo devido à ação da chuva, pode ser definida como um processo natural de desagregação, transporte e deposição das partículas que podem ser intensificado por atividades humanas como desmatamento, agricultura sem manejo adequado e ocupações urbanas irregulares (Barreto, 2007; Jesuz e Cabral, 2019). Esse fenômeno impacta diretamente a degradação ambiental, reduz a produtividade agrícola e compromete a estabilidade de obras geotécnicas, afetando também o desenvolvimento social.

O processo erosivo, quando não controlado, provoca perda significativa de material superficial, reduz a capacidade de suporte do solo e acelera sua degradação estrutural. Esses efeitos resultam em assoreamento de cursos d'água, comprometimento de áreas agricultáveis, instabilidade de taludes e danos a infraestruturas próximas, tornando o tema relevante tanto do ponto de vista social quanto ambiental.

As rodovias, em especial, alteram a conectividade hidrológica e sedimentar de uma bacia hidrográfica e são especialmente sensíveis aos processos erosivos em função de atuarem como canais para o transporte das águas e dos sedimentos. Esse processo é agravado em situações de falhas nos dispositivos de drenagem, desague inapropriado e terrenos suscetíveis a este fenômeno. Esse cenário representa prejuízos sociais e econômicos em função da maior demanda por manutenção rodoviária, maior número de acidentes, fechamentos de trechos rodoviários e recuperação de áreas atingidas (Forman and Alexander, 1998; Fu et al., 2010; Zhai et al., 2025).

No cerrado brasileiro, predominam ciclos intensos de chuva e seca, que favorecem a formação de solos de comportamento laterítico, cuja resistência à ação da água pode ser precária quando em estado natural e sob a intensa ação das águas pluviais no período chuvoso (Mathias e Nunes, 2019; Vargas, 1977; Nogami e Villibor, 1995). A compreensão dos impactos desse fenômeno é fundamental para o desenvolvimento de medidas preventivas e para o dimensionamento adequado de obras sujeitas à ação da água.

Nesse contexto, a compactação de solos desempenha papel essencial no aumento da resistência e na redução da suscetibilidade à erosão. Ao diminuir o índice de vazios e aumentar a densidade, o solo se torna menos permeável e mais resistente ao cisalhamento, desde que o teor de umidade esteja adequado para promover uma estruturação estável das partículas. A relação entre energia de compactação, umidade ótima e densidade seca

influencia diretamente o comportamento mecânico e hidráulico do solo, determinando sua capacidade de resistir à ação da água e, consequentemente, seu potencial erosivo.

Dessa forma, a correta especificação da energia de compactação para os solos utilizados na construção de acostamentos, bordos de pavimentos e dispositivos de drenagem deve ser cuidadosamente considerada no projeto, com o objetivo de minimizar a desagregação e o transporte de partículas desses elementos. Contudo, é crucial considerar que a redução da taxa de infiltração, pode aumentar o volume e a velocidade do escoamento superficial. Este escoamento concentrado pode provocar a erosão de sulcos e voçorocas em áreas a jusante (Campos, 2014). Portanto, o projeto geotécnico também deve buscar gerenciar esse tipo de escoamento gerado em áreas compactadas.

Diante desse cenário, o objetivo principal desse trabalho é avaliar a influência da energia de compactação de um solo de comportamento laterítico quanto à suscetibilidade à erosão pelo efeito decorrente da ação do impacto das gotas de chuva (*splash*). Além disso, o objetivo secundário foi desenvolver e aplicar um aparelho de Inderbitzen modificado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A erosão hídrica corresponde ao processo de desagregação do solo provocado pela ação da água, podendo ocorrer por impacto direto das gotas de chuva, escoamento superficial ou ambos. O estágio inicial desse processo é denominado efeito *splash*, que consiste na desagregação das partículas do solo pelo impacto das gotas de água, diminuindo a infiltração e aumentando o potencial de transporte de sedimentos (Guerra e Mendonça, 2004).

A erodibilidade é definida como a suscetibilidade do solo à erosão sob a ação de agentes externos. Essa propriedade depende de fatores como granulometria, coesão, estrutura e teor de matéria orgânica (Stephan, 2010). Solos mal estruturados e com baixa densidade tendem a se desagregar com maior facilidade, enquanto solos compactados apresentam maior resistência à erosão.

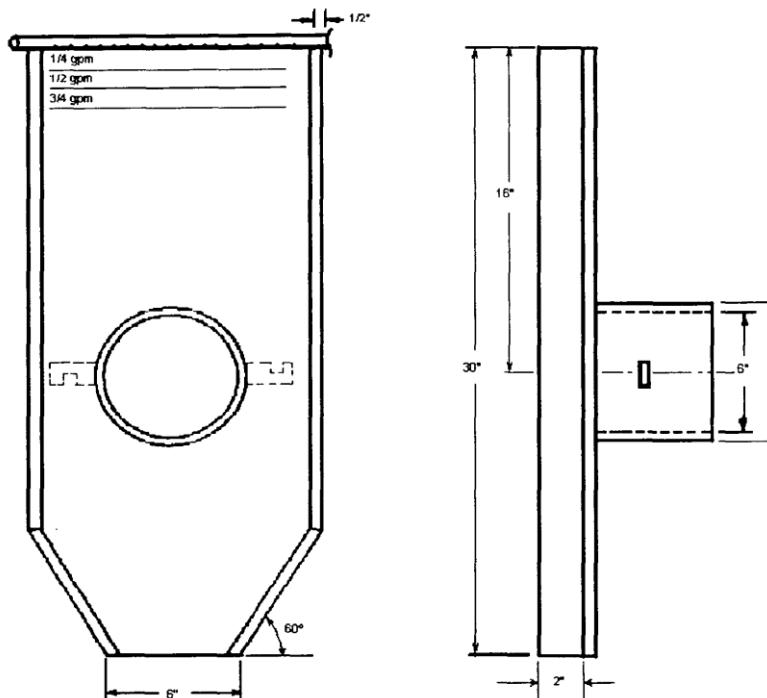
A avaliação da erodibilidade em laboratório permite simular condições controladas, facilitando a análise dos efeitos de variáveis como energia de compactação, umidade e inclinação da superfície. Ensaios em escala reduzida são especialmente úteis para verificar a influência da compactação na resistência do solo, sendo essa uma das variáveis mais relevantes na engenharia de taludes, canais e fundações superficiais (Vargas, 1977).

Além dos processos iniciais de desagregação, a erosão hídrica também envolve mecanismos de retrogressão e aprofundamento do canal escoado, que tendem a se intensificar quando o solo apresenta zonas de fraqueza estrutural ou heterogeneidade na compactação. Em áreas inclinadas, o fluxo superficial pode gerar pontos de instabilidade que evoluem para cortes mais profundos, promovendo o recuo da cabeceira e ampliando a capacidade de transporte de sedimentos. Esse comportamento favorece a formação de voçorocas, que se caracterizam pela progressão longitudinal e vertical do entalhe erosivo, influenciada pela interação entre infiltração, resistência das paredes e concentração do escoamento. A compreensão dessas etapas avançadas é essencial para prever a evolução de processos erosivos em campo, especialmente em solos lateríticos sujeitos a variações de umidade e distúrbios no estado de compactação.

O ensaio de Inderbitzen foi originalmente proposto por Inderbitzen (1961) (Figura 1) como um método simples para avaliar a suscetibilidade de solos à erosão superficial. Na configuração inicial, o solo era submetido a um fluxo contínuo de água que escoava sobre uma rampa metálica lisa, com inclinação fixa. O objetivo era medir a quantidade

de material removido ao longo do tempo, permitindo avaliar a resistência do solo ao impacto das gotas e ao escoamento concentrado. Essa versão não possuía dispositivos de controle refinado de vazão ou de uniformização do fluxo, o que limitava a repetibilidade do ensaio.

Figura 1 - Aparelho desenvolvido por Inderbitzen (1961)



Fonte 1 - Inderbitzen (1961)

Diversos autores propuseram adaptações a esse procedimento ao longo dos anos, buscando aperfeiçoar o controle das condições de ensaio e ampliar a representatividade dos mecanismos erosivos avaliados. Trabalhos como os de Freire (2001) e Higashi (2006) apresentam versões modificadas do equipamento, mantendo o princípio geral do método, mas introduzindo alterações na forma de aplicação da água e na configuração da rampa. A principal diferença em relação ao aparelho original é que as versões modificadas passam a considerar não apenas a erosão por escoamento superficial, mas também o efeito do impacto das gotas de água na superfície da amostra, permitindo avaliar o processo splash de maneira mais realista. Essas adaptações têm sido amplamente utilizadas em estudos posteriores, incluindo Kaiber e Romanini (2017), que reforçam a aplicabilidade do método para solos tropicais.

Neste estudo, adotou-se uma versão modificada inspirada nesses referenciais, preservando o funcionamento básico do equipamento, porém com ajustes construtivos que permitiram o controle da vazão, a inclinação ajustável da rampa e a coleta dos sedimentos em diferentes intervalos de tempo.

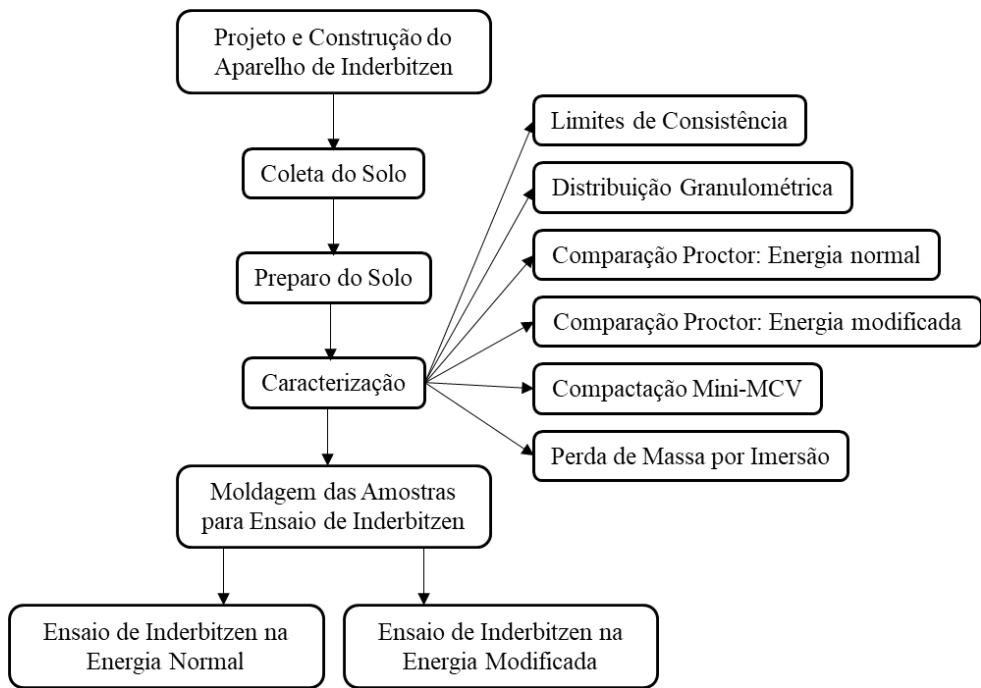
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método experimental foi elaborado de modo a viabilizar a avaliação da influência da energia de compactação de um solo laterítico sobre seu potencial erosivo, utilizando um aparelho de Inderbitzen modificado, projetado e construído especificamente para este estudo.

O solo foi coletado em Uberlândia (MG), após remoção da camada superficial, e subsequentemente submetido a secagem em estufa ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) e homogeneização em peneira de 4,8 mm. A caracterização geotécnica seguiu normas ABNT, incluindo a determinação dos limites de consistência (LL - NBR 6459:1984; LP - NBR 7180:1984), análise granulométrica (NBR 7181:1984) e ensaio de compactação *Proctor* (NBR 7182:2016). Complementarmente, foram realizados os ensaios de mini-MCV e perda de massa por imersão, conforme o método de classificação de solos tropicais de Nogami e Villibor (1995) que indicou se tratar de uma areia de comportamento laterítico (LA).

Para avaliação do potencial erosivo, corpos de prova (CPs) cilíndricos foram moldados no teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima, considerando dois níveis distintos de compactação. O fluxograma esquemático do método experimental é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do método experimental

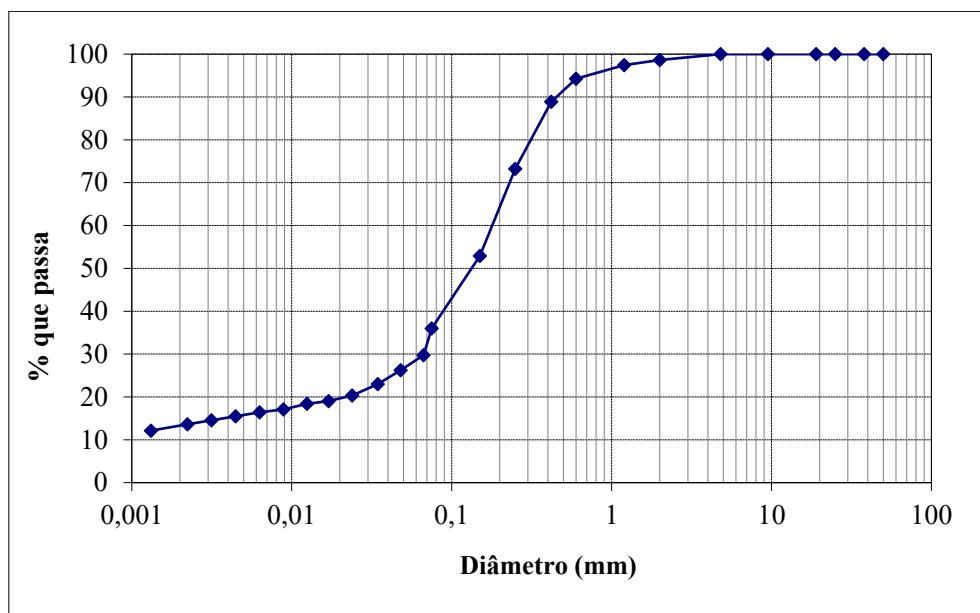


Fonte 2 - Autora (2025)

O solo coletado apresentou LL de 26% para um LP de 19%, resultando em 7% para o índice de Plasticidade (IP). De acordo com o valor obtido para o IP, o solo pode ser classificado como de baixa plasticidade, o que indica menor teor de argila ativa e menor coesão entre as partículas, características que influenciam diretamente sua suscetibilidade à erosão.

A análise granulométrica foi realizada conforme a ABNT NBR 7181:1984, utilizando peneiramento seco para a fração grossa e sedimentação para a fração fina. Na Figura 3 é mostrada a distribuição granulométrica do solo estudado obtida a partir de dados apresentados por Lopes (2023).

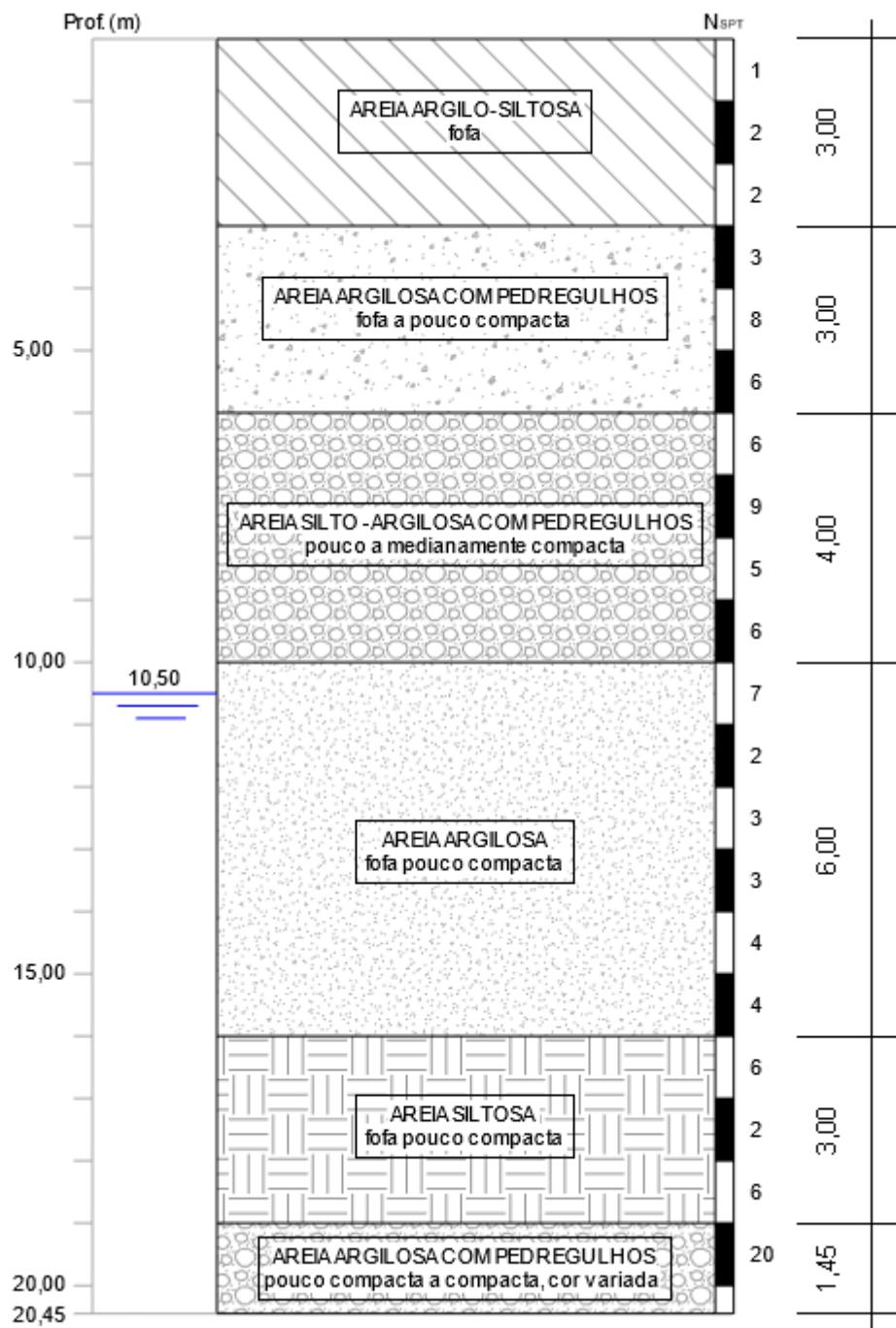
Figura 3 - Distribuição granulométrica do solo estudado na profundidade de 0,5m (Fonte: Lopes, 2023)



Fonte 3 – Adaptado de Lopes (2023)

Analizando-se a Figura 3, nota-se que, na peneira de abertura de malha de 0,075 mm, tem-se menos que 35% de material passante. Assim, pode-se classificar o solo como sendo do grupo A-2-6. Além disso, com base nos ensaios de caracterização realizados por Lopes (2023), e nos resultados apresentados por Oliveira (2022), identificou-se que o solo nos primeiros 5 metros de profundidade corresponde ao grupo das areias argilo-siltosas. A amostra foi coletada a 0,5 m de profundidade, apresentou 62,2% de areia fina, 9,7% de areia média, 1,4% de areia grossa, além de 15,8% de argila e 10,9% de silte, totalizando 26,7% de finos. Na figura 4 é mostrado o desenho esquemático do perfil de solos na região de coleta.

Figura 4 – Desenho esquemático do perfil de solos da região de coleta.



Fonte 4 – Adaptado de Oliveira (2022)

Para avaliar a influência da energia de compactação na resistência do solo à erosão, foram moldadas amostras com dois diferentes níveis de energia do método Proctor: normal e modificada.

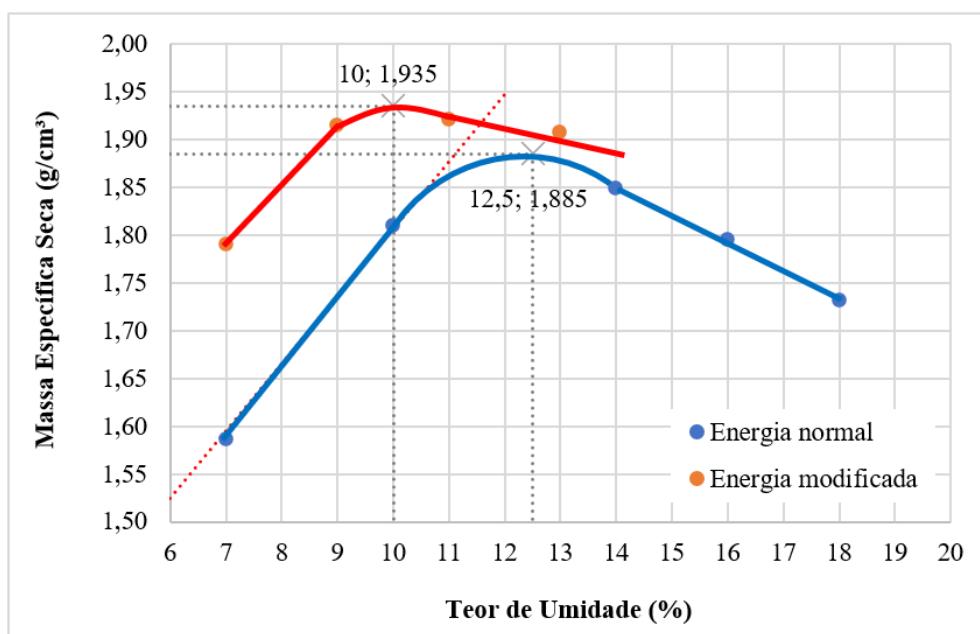
Para determinar o teor de umidade ótimo e a massa específica seca máxima, foram moldados cinco corpos de prova (CPs) em cada condição de energia. Na Figura 5 é mostrado um dos CPs compactados e na Figura 6 as curvas de compactação obtidas.

Figura 5 - (a) Extração de um dos CPs compactado; (b) CP compactado



Fonte 5 – Autora (2025)

Figura 6 - Curvas de compactação na energia normal e modificada



Fonte 6 – Autora (2025)

Analizando-se a Figura 6, observa-se que a massa específica seca máxima foi de 1,885 g/cm³ na energia normal e de 1,935 g/cm³ na energia modificada, correspondentes aos teores de umidade ótimos de 12,5% e 10%, respectivamente. Os resultados dos ensaios de compactação foram utilizados para a moldagem das amostras utilizadas nos ensaios de avaliação do potencial erosivo no aparelho de Inderbitzen modificado.

Também se utilizou as curvas de compactação para determinação do Índice de Laterização (IL) de Ignatius (1991) que se utiliza da inclinação do ramo seco da curva de compactação *Proctor* dos solos como parâmetro para classificá-los como lateríticos ou não lateríticos. O IL pode ser calculado pela equação 1 e valores maiores do que 0,3 são indicativos de solos de comportamento laterítico. O IL obtido para o solo foi de 0,36, sendo indicativo de comportamento laterítico, corroborando os resultados de mini-MCV e perda de massa por imersão que resultaram na classe LA do método MCT.

$$IL = \frac{\frac{\Delta \rho_s}{\rho_{s;máx}}}{\frac{\Delta w}{w_{ót}}} \quad \text{eq.}$$

(1)

Em que,

IL é o índice de laterização;

$\Delta \rho_s$ é a variação vertical da massa específica seca no ramo seco da curva de compactação;

$\rho_{s;máx}$ é a massa específica seca máxima;

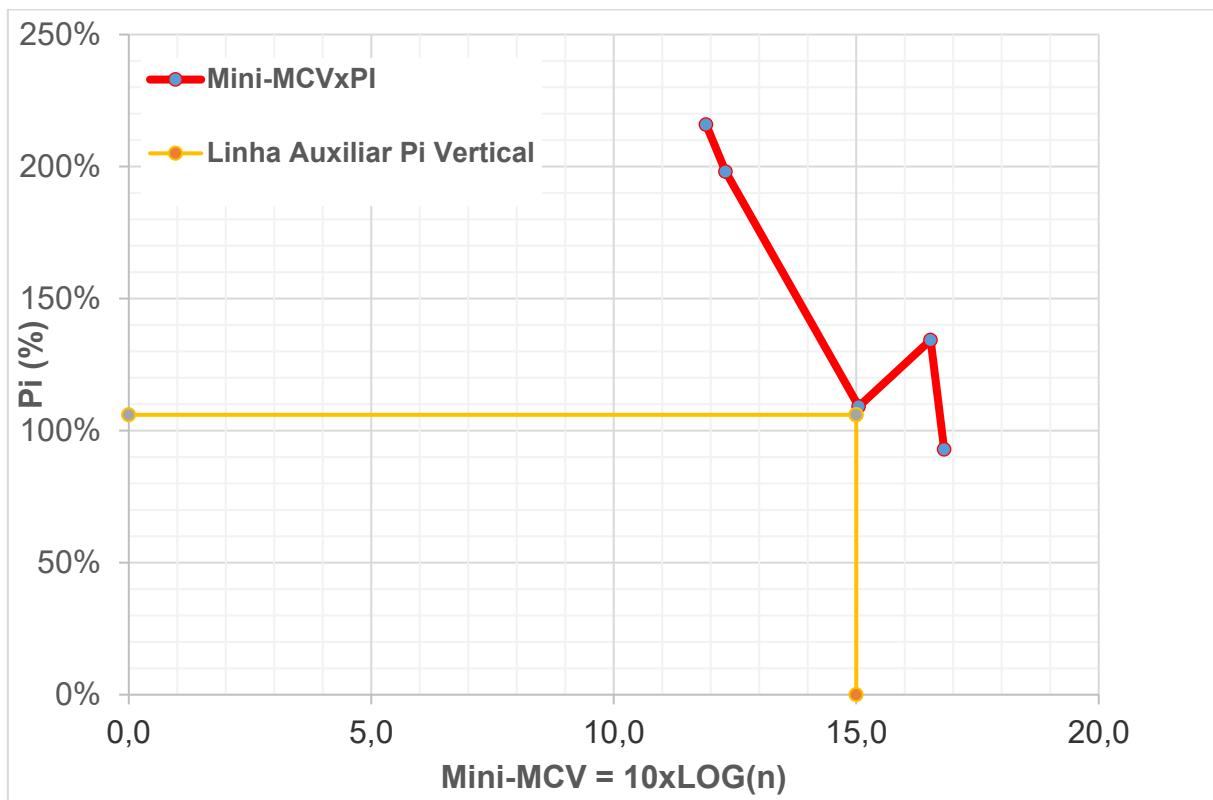
Δw é a variação do teor de umidade no ramo seco da curva de compactação;

$w_{ót}$ é o teor de umidade ótimo.

O ensaio Mini-MCV, proposto na metodologia MCT, é utilizado para avaliar o comportamento de solos finos sob compactação dinâmica reduzida. Esse procedimento permite identificar a resistência do material em baixos teores de umidade, além de auxiliar na diferenciação entre solos lateríticos e não lateríticos.

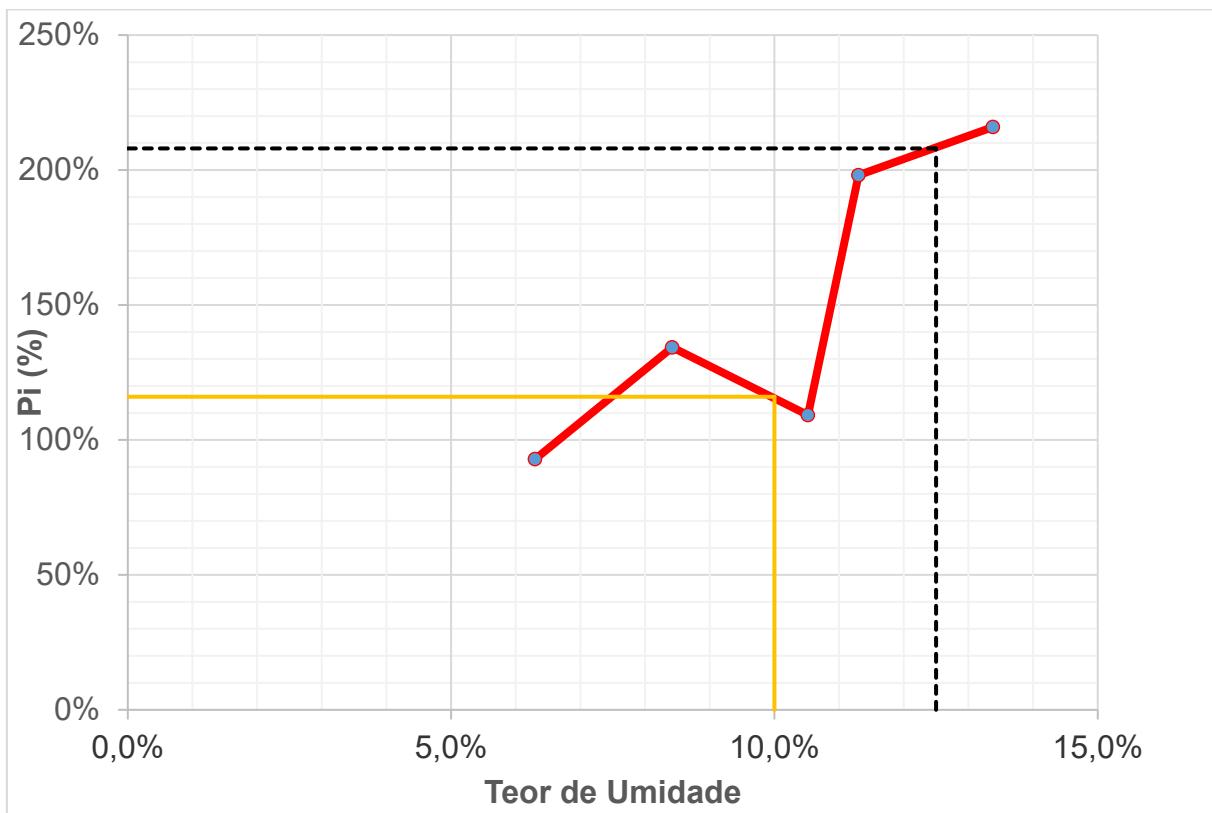
A Figura 7 apresenta a relação entre os valores de Mini-MCV e o Índice de Plasticidade (PI) obtidos para o solo estudado. A posição do solo no diagrama confirma sua tendência de apresentar baixa compressibilidade, pouca sensibilidade volumétrica e resposta mais estável à compactação, características típicas dos solos lateríticos.

Figura 7 - Relação Mini-MCV × PI



A Figura 8 apresenta a variação do Índice de Plasticidade em função do teor de umidade. Nota-se que os valores permanecem em uma faixa reduzida, indicando baixa sensibilidade do solo à variação de umidade.

Figura 8 - Relação PI × Teor de Umidade



Fonte 8 - Autora (2025)

Os resultados obtidos nos ensaios Mini-MCV e na classificação MCT confirmam a natureza laterítica do solo estudado, reforçando seu comportamento granular e baixa plasticidade. Essas características justificam sua forte resposta ao aumento da energia de compactação e contribuem para a interpretação dos resultados obtidos no ensaio de erosão, especialmente quanto à redução significativa da massa desprendida na energia Modificada.

3.1 Preparação dos corpos de prova para avaliação do potencial erosivo

Após a determinação dos parâmetros de compactação, foram confeccionados os corpos de prova (CPs) para o ensaio de Inderbitzen. O solo previamente preparado foi colocado no cilindro de compactação e compactado até atingir a energia desejada (Figura 9). Para a compactação normal, o material foi moldado em três camadas, aplicando-se 26 golpes por camada. Já para a compactação modificada, o solo foi moldado em cinco camadas, com 27 golpes por camada. Em seguida, o CP foi extraído do cilindro utilizando

o extrator mecânico mostrado na Figura 10. A amostra foi então aparada, ajustada e moldada dentro do anel de adensamento, obtendo altura final de 3,148 cm e diâmetro de 7,93 cm, conforme apresentado na Figura 11. Após a moldagem, os CPs foram imediatamente encaminhados para a realização do ensaio.

Figura 9 - Compactação da amostra



Fonte 9 – Autora (2025)

Figura 10 - Extração da amostra



Fonte 10 – Autora (2025)

Figura 11 - Anel de adensamento utilizado para a moldagem das amostras



Fonte 11 – Autora (2025)

4 CONSTRUÇÃO DO APARELHO DE INDERBITZEN MODIFICADO

O equipamento utilizado neste estudo foi desenvolvido com base no conceito geral do ensaio de Inderbitzen (1961), mantendo a ideia fundamental de avaliar a erodibilidade

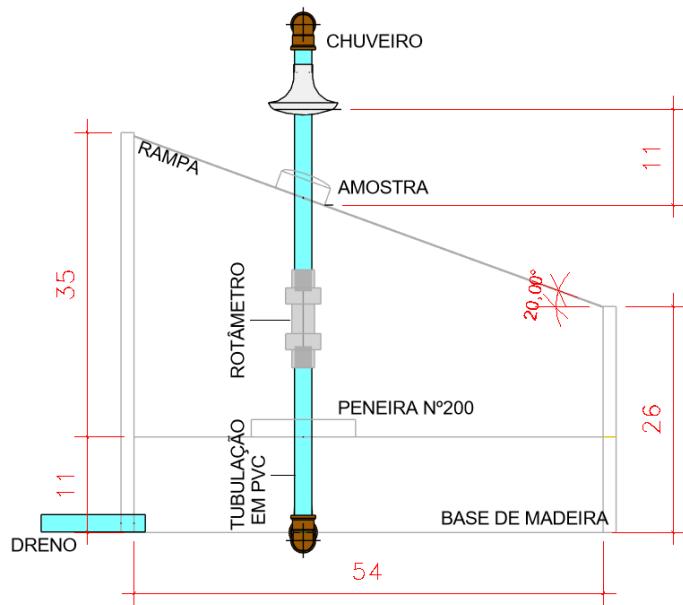
do solo por meio do material desprendido em uma rampa inclinada submetida a fluxo de água.

A principal adaptação implementada foi a substituição da lâmina contínua de água prevista no modelo original por um sistema de aplicação por chuveiro, permitindo uma distribuição mais uniforme e controlada do fluxo sobre a amostra. O sistema hidráulico foi construído com tubos e conexões de PVC soldável de 3/4", conectando a fonte de alimentação ao dispersor, com controle de vazão realizado por rotâmetro, garantindo fornecimento constante de 200 L/h durante os ensaios.

A estrutura do equipamento consiste em um tambor plástico seccionado longitudinalmente, utilizado como base para condução do escoamento superficial. Para conferir maior rigidez e estabilidade ao conjunto, foi acoplada uma estrutura em madeira fixada ao tambor. Sobre a rampa foi instalada a superfície inclinada onde os corpos de prova foram moldados, posicionada com inclinação fixa de 20°, conforme recomendado por Freire (2001) em estudos experimentais de erosão.

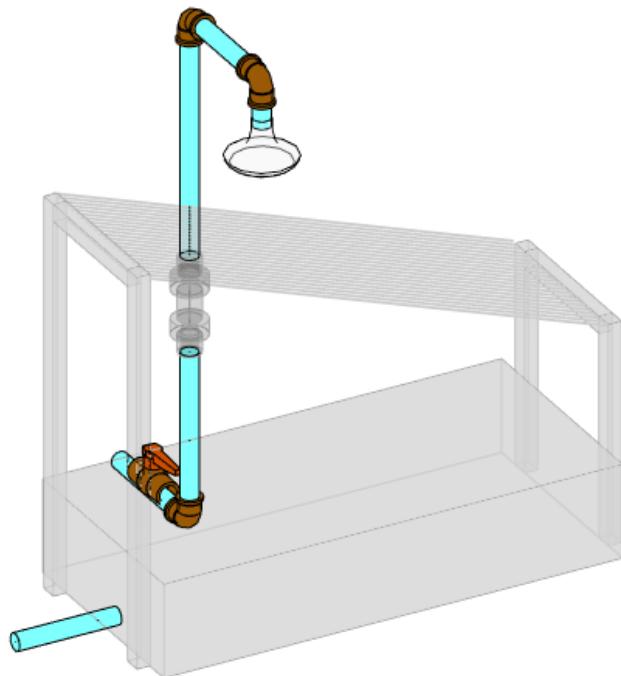
O dispositivo mantém um formato modular, permitindo montagem simples, transporte facilitado e boa acessibilidade aos componentes durante o ensaio. As Figuras 13 e 14 mostram o esquema para montagem final do equipamento, enquanto a Figura 15 apresenta o esquema construtivo adotado neste estudo, com identificação dos elementos utilizados. A Tabela 1 descreve os principais materiais empregados na construção do sistema experimental.

Figura 12 – Desenho esquemático do corte frontal do aparelho de Inderbitzen construído
(dimensões em cm)



Fonte 12 – Autora (2025)

Figura 13 – Desenho esquemático em 3D do aparelho de *Inderbitzen* construído



Fonte 13 – Autora (2025)

Tabela 1 - Lista de materiais

Item	Unidade	Quantidade	Letra indicativa
Joelho 90° soldável com Bucha de Latão 25 mm x 3/4"	Un	1	A
Luva soldável com rosca externa 25 mm x 3/4"	Un	1	B
Luva de redução soldável 25mm x 20mm	Un	1	C
Joelho 90° soldável 25 mm	Un	1	D
Luva soldável com bucha de latão 25 mm x 1/2"	Un	1	E
Chuveiro Água Fria - diâmetro 75 mm	Un	1	F
Rotâmetro - Medidor de Vazão	Un	1	G
Luva de redução soldável 25mm x 20mm	Un	1	H
Registro Esfera 3/4"	Un	1	I
Luva de redução soldável 32mm x 25mm	Un	1	J
Grelha de ferro	Un	1	K
Peneira nº 200	Un	1	L
Tambor de plástico (cortado ao meio)	Un	1	M
Caixote de madeira personalizado	Un	1	N
Conexão para mangueira Redução 3/4" x 1/2"	Un	1	O

Nota: Unidade - Un

Fonte 14 – Autora (2025)

Figura 14 - Equipamento montado

Fonte 15 – Autora (2025)

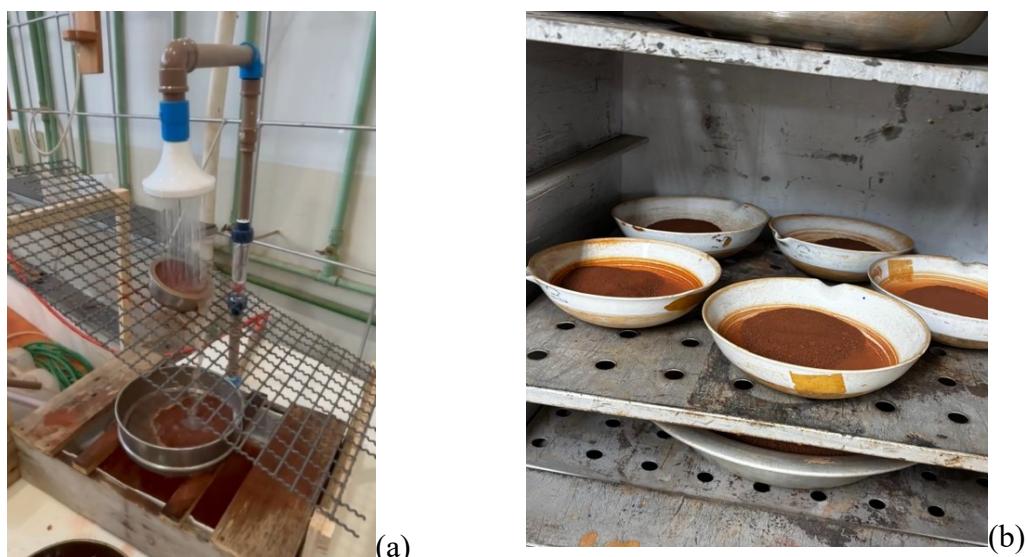
O aparelho de Inderbitzen modificado utilizado neste estudo permite o ajuste da inclinação da rampa entre x° e y° , sendo fixada em 20° , conforme recomendação de Freire

(2001) e amplamente empregada em estudos subsequentes de erosão acelerada. A vazão de água aplicada foi de 200 L/h, valor próximo ao adotado por Ide (2009), Kaiber e Romanini (2017) e Higashi (2006), correspondendo a aproximadamente 55,56 mL/s. Embora superior aos valores típicos de precipitação natural, essa vazão é usualmente empregada nesses ensaios por intensificar o processo erosivo e permitir melhor diferenciação do comportamento entre amostras.

O procedimento experimental seguiu a metodologia apresentada por Campos (2014), sendo que cada corpo de prova foi submetido ao fluxo de água por 5 minutos. A Figura 16 apresenta a execução do ensaio e a etapa de secagem da fração erodida em estufa.

A coleta do material desprendido foi realizada durante a execução contínua do ensaio, que teve duração total de 5 minutos. Para permitir a quantificação da erosão em diferentes momentos, adotaram-se três intervalos de coleta: 1, 2 e 5 minutos. O fluxo de água não foi interrompido; a cada tempo estabelecido, a peneira posicionada na extremidade inferior do equipamento era rapidamente substituída por outra limpa e seca, garantindo a continuidade da coleta sem interferir no ensaio. Dessa forma, os sedimentos acumulados até cada intervalo eram isolados, possibilitando avaliar a evolução da taxa de erosão ao longo do tempo. Após cada substituição, o material retido na peneira removida era transferido para recipientes identificados e encaminhado à estufa a 105 °C por 24 horas para determinação da massa seca.

Figura 15 - (a) Realização do ensaio de Inderbitzen e; **(b)** Secagem do material desprendido



Fonte 16 - Autora

5 REULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação do potencial erosivo do solo foi feita com base na massa de solo seco desprendida durante o fluxo hídrico no aparelho de Inderbitzen. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios para as duas energias de compactação utilizadas.

Tabela 2 - Porcentagem de massa desprendida por tempo de ensaio

Amostra	Energia de Compactação	Massa Seca Desprendida (g)	Tempo de Ensaio (min)			Massa Total Desprendida Seca (g)	Massa Total da Amostra Seca (g)
			1	2	5		
A1	Normal	Massa Desprendida (g)	46,17	28,84	102,24	177,25	307,51
		% em relação à massa do CP	15,0%	9,4%	33,2%	57,6%	
		% massa desprendida por minuto	15,0%	9,4%	11,1%	11,5%	
		% em relação à massa total desprendida	26,0%	16,3%	57,7%		
A2	Modificada	Massa Desprendida (g)	23,73	13,09	55,36	92,18	336,78
		% em relação à massa do CP	7,0%	3,9%	16,4%	27,4%	
		% massa desprendida por minuto	7,0%	3,9%	5,5%	5,5%	
		% em relação à massa total desprendida	25,7%	14,2%	60,1%		

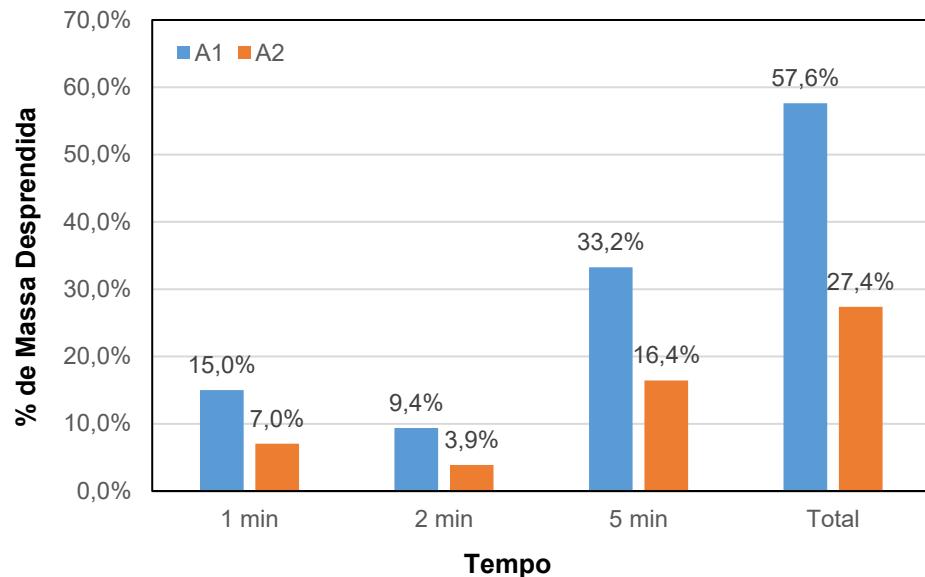
Fonte 17 – Autora (2025)

Analizando-se a Tabela 2, observa-se o efeito positivo do aumento da energia de compactação na redução do efeito *splash*. A perda total de massa desprendida na condição de energia normal (57,6%) foi mais de duas vezes superior àquela verificada para o maior nível de compactação (27,4%). Além disso, nota-se que a maior perda de massa acontece no primeiro minuto de ação do fluxo hídrico independentemente do nível de compactação do solo, provavelmente em decorrência do impacto direto das gotas de água com a superfície de menor coesão superficial.

Ainda analisando-se a Tabela 2, verifica-se que a taxa de perda de massa por minuto também é maior para o primeiro minuto e, em seguida, torna-se semelhante para os demais tempos de ensaio. Ao final do ensaio a taxa de perda de massa foi duas vezes maior para a condição de compactação na energia normal (11,5% por minuto) em comparação com a energia modificada (5,5% por minuto). Essa maior resistência ao

processo erosivo na condição de energia modificada pode ser creditada ao menor volume de vazios e maior contato entre partículas e consequente travamento granular da estrutura.

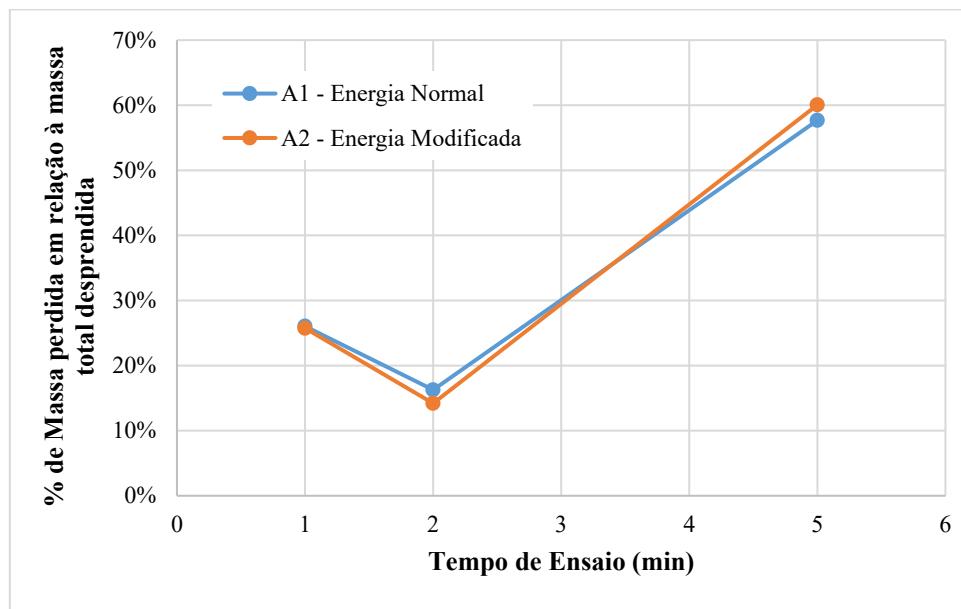
Figura 16 - Porcentagem de massa desprendida por tempo de ensaio



Fonte 18 - Autora (2025)

Apesar de ser notável o efeito da energia de compactação sobre o potencial erosivo do solo, observa-se que o percentual relativo de massa erodida em relação ao total de massa desprendida não é função do nível de compactação. Nota-se que os percentuais de perda de massa são similares para as duas condições testadas de energia. Esse comportamento fica ainda mais evidente pela análise da Figura 18.

Figura 17 - Percentual de massa erodida em relação à massa total desprendida por tempo de ensaio



Fonte 19 – Autora (2025)

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a influência das energias de compactação normal e modificada sobre o comportamento erosivo de um solo, utilizando-se o ensaio de Inderbitzen modificado.

A principal conclusão foi que o incremento da energia de compactação promove um aumento significativo da resistência à ação erosiva induzida pelos impactos das gotas de água (efeito splash), provavelmente em função da redução do índice de vazios, do maior contato intergranular e da coesão aparente. Além disso, verificou-se que a taxa de desprendimento de partículas é mais elevada no início do fluxo hídrico, possivelmente devido à maior suscetibilidade da camada superficial não consolidada ao impacto inicial das gotas de água.

Observou-se, ainda, que a razão entre a massa erodida e a massa total desprendida manteve-se praticamente inalterada para as diferentes energias de compactação, sugerindo que esse parâmetro seja controlado predominantemente pelas características geotécnicas intrínsecas do material, como distribuição granulométrica, plasticidade e estrutura.

Por fim, alerta-se que o benefício do aumento da energia de compactação na redução do efeito splash restringe-se à aplicação em obras que utilizem o solo

compactado. No entanto, o projetista deverá considerar que ter-se-á menor infiltrabilidade, aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial.

Recomenda-se, para investigações subsequentes, a avaliação do comportamento erosivo de solos com distintas composições e propriedades físico-químicas, bem como a análise da eficácia de diferentes sistemas de proteção superficial sob variadas declividades de encosta.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984b.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984c.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- BARRETO, R. C. Erosão e conservação dos solos em áreas de pastagens degradadas no sul do estado do Pará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 4, p. 815–825, 2007.
- CAMPOS, C. J. M. de. Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru – SP. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/2a597571-6a89-4603-8f2c-77d32d84f9b6>
- FORMAN, R.T., ALEXANDER, L.E., 1998. Roads and their major ecological effects. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 207–231. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207>
- FREIRE, E. P. Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia, 2001. Anais... Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/507650476/Ensayo-Inderbitzen-Modificado-Freire-2001>.
- FU, B., NEWHAM, L., FIELD, J., 2009. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. *Math. Comput. Simul.* 2679–2688. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.07.013>.
- GUERRA, A. J. T.; MENDONÇA, J. K. S. Erosão dos solos e a questão ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Org.). *Reflexões sobre a geografia física do Brasil*. São Paulo: Bertrand Brasil, 2004.
- HIGASHI, R. A. R. Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://www.tede.ufsc.br/teses/PECV0428.pdf>.
- IDE, D. M. Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-22032010-094227/>. Acesso em: 11 dez. 2025.

IGNATIUS, S. G. (1991). Solos Tropicais: Proposta de Índice Classificatório.” Solos e Rochas, São Paulo, 14, 89 – 93.

INDERBITZEN, A. P. L. An erosion test for soils. Materials Research and Standards, Philadelphia, v. 1, p. 553–554, 1961.

JESUZ, J. L.; CABRAL, M. J. Impactos da erosão no solo e práticas conservacionistas no Cerrado brasileiro. *Revista Cerrados*, v. 17, n. 2, p. 67–79, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados>

KAIBER, A. L. C.; LUCENA, E. R.; FERREIRA, R. T. L.; ROMANINI, A. Avaliação da erodibilidade de misturas solo–RCC para camada de revestimento primário em estradas rurais não pavimentadas utilizando o equipamento de Inderbitzen modificado. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 7, n. 2, p. 8–17, 2017. Disponível em: <https://www.abge.org.br/volume-9-numero-01-e-02-2019>.

LOPES, Alisson Filmiano Andrade. *Análise experimental e numérica de radier estaqueado isolado com uma estaca em solo tropical na condição in situ*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39023>

MATHIAS, F. R.; NUNES, D. E. Monitoramento da degradação de solos em áreas agrícolas do Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 43, e0180123, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/i/2019.v43/>.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Pavimentação de baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo: Villibor, , 1995, p. 240.

OLIVEIRA, Eduardo Augusto dos Santos. Análise experimental e numérica do comportamento de sapata estaqueada em solo tropical. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5055>. Acesso em: 31/07/2025.

STEPHAN, C. Conservação de solos e controle da erosão hídrica. 2. ed. Viçosa: UFV, 2010.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

ZHAI, Y., FANG, H., WU, Z., GAO, X., LI, C., ZHIDKIN, A., & TAN, G. (2024). Erosion and roads: A review. *Earth-Science Reviews*. 1 – 18. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105246>