

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Daniel Luiz Teixeira Ferreira

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA EROSÃO HÍDRICA EM
TALUDES DE PILHAS DE ESTÉRIL E VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO
DE CAL COMO REVESTIMENTO DE PROTEÇÃO**

Belo Horizonte
2025

Daniel Luiz Teixeira Ferreira

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DA EROÇÃO HÍDRICA EM
TALUDES DE PILHAS DE ESTÉRIL E VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO USO
DE CAL COMO REVESTIMENTO DE PROTEÇÃO**

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

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Transporte de Sedimentos

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Zegarra Tarqui

Belo Horizonte
2025

F383p

Ferreira, Daniel Luiz Teixeira.

Proposta de método para avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril e verificação da eficiência do uso de cal como revestimento de proteção [recurso eletrônico] / Daniel Luiz Teixeira Ferreira. - 2025.

1 recurso online (126 f.: il., color.) : pdf.

Orientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Taludes (Mecânica do solo) - Teses. 4. Cal - Teses. 5. Chuvas - Teses. 6. Métodos de simulação - Teses. 7. Erosão - Teses. I. Tarqui, Jorge Luis Zegarra. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

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

"Proposta de Método Para Avaliação da Erosão Hídrica Em Taludes de Pilhas de Estéril e Verificação da Eficiência do Uso de Cal Como Revestimento de Proteção"

DANIEL LUIZ TEIXEIRA FERREIRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI

Profa EDNA MARIA DE FARIA VIANA - Coorientadora

Prof. ANDRÉ FERREIRA RODRIGUES

ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

Profa ANA LUIZA DE OLIVEIRA BORGES

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Eduardo Coutinho de Paula
Coordenador

Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui
Orientador

Belo Horizonte, 09 de abril de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 11/04/2025, às 13:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Ferreira Rodrigues, Professor do Magistério Superior**, em 15/04/2025, às 08:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Luiza de Oliveira Borges, Usuário Externo**, em 16/04/2025, às 13:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aloysio Portugal Maia Saliba, Usuário Externo**, em 20/04/2025, às 20:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Professor do Magistério Superior**, em 29/04/2025, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 30/04/2025, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4098806** e o código CRC **C44A9F44**.

*Dedico essa dissertação à minha família,
pelo carinho e suporte constante durante
toda a minha jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço às instituições que foram fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação, a UFMG, a CAPES, a FAPEMIG e o CNPQ, reconhecendo ainda o apoio do Centro de Pesquisas Hidráulicas CPH - UFMG. Agradeço também à Loctest Laboratório de Geotecnia por oferecer, generosa e gratuitamente, os ensaios da pesquisa.

Minha sincera gratidão à Geoestável Consultoria e Projetos, que me proporcionou todo o suporte aos estudos, além de possibilitar a convivência com profissionais inspiradores. Em especial, agradeço à Sarah Luiz pelo constante incentivo, apoio e paciência, e ao André Barata, pela parceria durante todo o curso de mestrado.

Agradeço profundamente à meu orientador, Prof. Dr. Jorge Tarqui, pelo apoio, conhecimento e confiança depositada durante todo esse processo acadêmico. Também gostaria de agradecer à minha coorientadora Prof. Dr.(a) Edna Viana por todas as contribuições realizadas ao longo da pesquisa.

Sempre fundamentais em todos os aspectos da minha vida, agradeço enormemente à minha família, pelo carinho incondicional e por não medir esforços para me proporcionar tudo o que não puderam ter. Agradeço também a todos os meus amigos e à minha namorada, que me ajudam a levar a vida com mais leveza.

Gratidão a todos que fizeram parte da minha jornada nesses últimos dois anos, certamente cada um contribuiu, mesmo que indiretamente, para que esse mestrado se tornasse possível.

“Em algum lugar, algo incrível está esperando para ser descoberto.”
— Carl Sagan

RESUMO

A mineração é uma atividade antrópica necessária para o desenvolvimento econômico do Brasil, no entanto, na busca por recursos naturais, a atividade mineradora provoca alterações das paisagens e da biodiversidade local, podendo ultrapassar o limite de resiliência do sistema natural. A extração mineral configura-se em uma atividade que impulsiona os processos erosivos, por exemplo, por meio da retirada da cobertura vegetal para abertura das lavras e dos locais de depósito de materiais indesejados, ou seja, de rejeito e de estéril, que deixam o solo exposto aos agentes erosivos, aumentando os riscos de assoreamento e de eutrofização dos corpos hídricos, entre outros. Atualmente, é uma prática comum em empreendimentos de mineração a disposição de material estéril em pilhas, sendo seus taludes sujeitos à erosão hídrica. Dessa forma, a determinação da erosão hídrica é relevante para que sejam realizados os devidos planejamentos dessas obras de engenharia, em busca de implantações ambientalmente sustentáveis. Além disso, faz-se necessário a busca por elementos capazes de reduzir tal erosão, de forma a minimizar o transporte e a deposição de material. Sendo assim, essa dissertação buscou avaliar a erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril, em parcelas experimentais de laboratório, a partir do experimento de Inderbitzen modificado, com o uso de um simulador de chuvas, e verificar a eficiência do uso de cal como revestimento de proteção. Os experimentos foram realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH) da UFMG e seus procedimentos metodológicos consistiram em: (i) determinar a concentração de cal ótima a ser utilizada como revestimento de proteção dos taludes, a partir dos ensaios de perda de massa por imersão; (ii) calibrar o simulador de chuvas, buscando representatividade para o índice pluviométrico pré-definido; (iii) realizar o experimento de Inderbitzen Modificado para o índice pluviométrico calibrado na etapa anterior, simulando a declividade típica de taludes de pilhas de estéril, sem e com a aplicação de cal. Como resultados, a concentração mássica ótima obtida a partir dos ensaios de perda de massa por imersão, para o material ensaiado, foi de 4%. Com relação ao simulador de chuvas, os resultados obtidos em termos de intensidade média, coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), D50 das gotas e energia cinética, foram satisfatórios frente à intensidade de chuva desejada, de 96 mm/h. Já para os ensaios de Inderbitzen Modificado, a taxa erosão total média para as amostras sem aplicação de cal foi de 0,2666 g/cm², quando avaliado o fator erodibilidade (k), a partir da equação universal de perda de solos (USLE), chegou-se ao resultado de 0,4677 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, indicando que a disposição do estéril em pilhas, com as configurações adotadas na presente pesquisa, pode causar incrementos na erodibilidade do material em cerca de 10 vezes acima do esperado para o solo local em suas condições naturais, quando comparado a valores de literatura. A taxa de erosão total média para as amostras com aplicação de cal foi de 0,3587 g/cm², indicando que a forma de aplicação escolhida não foi eficaz para o material estudado, já que nos ensaios de perda de massa por imersão a adição da cal se mostrou eficiente, com redução média da ordem de 81% de perda de massa.

Palavras-chave: Erosão Hídrica, Pilha de Estéril, Inderbitzen Modificado, Simulador de Chuvas, cal.

ABSTRACT

Mining is an anthropogenic activity essential for Brazil's economic development. However, in the pursuit of natural resources, mining activities cause alterations in landscapes and local biodiversity, potentially exceeding the resilience limit of natural systems. Mineral extraction is an activity that accelerates erosion processes, for example, through the removal of vegetation cover for the opening of mining pits and the deposition of unwanted materials, such as tailings and waste, which leave the soil exposed to erosive agents, increasing the risk of siltation, eutrophication of water bodies, among other impacts. It is common practice in mining enterprises to dispose of waste in piles dumps, whose slopes are subject to water erosion. Therefore, determining water erosion is relevant to ensure proper engineering planning for these structures, aiming for environmentally sustainable implementations. Additionally, seeking elements capable of reducing such erosion is necessary to minimize material transport and deposition. Thus, this work aimed to evaluate water erosion on waste dumps slopes in laboratory-scale experimental plots using the modified Inderbitzen experiment with a rainfall simulator and to verify the efficiency of using lime as a protective coating. The experiments were conducted at the Hydraulic Research Center (CPH) of UFMG, and the methodological procedures included: (i) determining the optimal lime concentration to be used as a protective coating for the slopes, based on immersion mass loss tests; (ii) calibrating the rainfall simulator to achieve representativeness for the predefined rainfall index; (iii) conducting the modified Inderbitzen experiment for the calibrated rainfall index from the previous step, simulating the typical slope gradient of waste dumps, both with and without lime application. As for the results, the optimal mass concentration obtained from the immersion mass loss tests for the tested material was 4%. The results regarding the average rainfall intensity, Christiansen's uniformity coefficient (CUC), D50 of the raindrops, and kinetic energy were satisfactory for the target rainfall intensity of 96 mm/h. For the modified Inderbitzen tests, the average total erosion rate for the samples without lime application was 0.2666 g/cm². When assessing the erodibility factor (k) using the Universal Soil Loss Equation (USLE), the result obtained was 0.4677 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, indicating that the disposal of waste in piles dumps, with the configurations adopted in the present study, may lead to an increase in the erodibility of the material by approximately 10 times compared to what is expected for the local soil under natural conditions, when compared to values reported in the literature. The average total erosion rate for the samples with lime application was 0.3587 g/cm², indicating that the chosen application method was ineffective for the tested material, as the immersion mass loss tests showed that adding lime was effective, reducing mass loss by an average of 81%.

Keywords: Water Erosion, Waste Dump, Modified Inderbitzen, Rainfall Simulator, Lime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de projeto de um <i>sump</i> escavado	24
Figura 2 - Ensaios de erodibilidade específica (perda de massa por imersão) da Metodologia MCT	30
Figura 3 - Modelo de equipamento proposto por Freire (2001) para o ensaio denominado Inderbitzen Modificado.....	32
Figura 4 – Efeito da altura de queda e do diâmetro na velocidade terminal da gota.	36
Figura 5 – Curvas de energia cinética em função da intensidade de chuvas naturais	37
Figura 7 – Local de retirada das amostras de estéril.....	46
Figura 8 – Amostras de estéril recolhidas	46
Figura 9 - Determinação da quantidade inicial de água a ser adicionada à amostra até atingir a coesão	48
Figura 10 – Armazenamento das porções de solo em sacos de polietileno.....	49
Figura 11 – Adição de cal a amostra.....	50
Figura 12 - Acondicionamento das amostras homogeneizadas com cal em sacos de polietileno.	50
Figura 13 - Equipamento utilizado para o ensaio de compactação Mini-MCV	51
Figura 14 - Corpos de prova após preenchimento dos recipientes de imersão com água destilada	52
Figura 15 - Corpo de prova em recipiente de imersão e cápsula de alumínio para recolher material desprendido	53
Figura 16 – Distância entre local de retirada das amostras de estéril e a estação pluviométrica adotada	56
Figura 17 - Simulador de chuvas utilizado	57
Figura 18 – Avaliação da intensidade do simulador de chuvas.....	58
Figura 19 – Bandeja com farinha sob a área efetiva do simulador de chuvas previamente à realização do experimento.....	59
Figura 20 – Caixa metálica para conformação das amostras	60
Figura 21 - Rampa inclinada em 2H:1V	61
Figura 22 – Configuração utilizada nos ensaios de Inderbitzen Modificado.....	61
Figura 23 – Material pré-aplicação de cal	63
Figura 24 - Material pós-aplicação de cal.....	63

Figura 25 - Distribuição granulométrica.....	65
Figura 26 - Curva de compactação - Ensaio de compactação Proctor Normal.	67
Figura 27 - Perda de massa por imersão - Pi (%) <i>versus</i> teor de umidade (%) – Amostras Iniciais	70
Figura 28 - Perda de massa por imersão - Pi (%) <i>versus</i> teor de umidade (%) – Amostras Totais	71
Figura 29 – Grânulos de farinha secos	77
Figura 30 - Gráfico Volume de água acumulado (%) x Diâmetro médio das gotas (mm)	78
Figura 31 – Exemplo de amostra durante a realização dos ensaios sem a aplicação de cal.....	81
Figura 32 – Registro do material recolhido seco após 72h em estufa a 110°C.....	82
Figura 33 – Resultados por amostra da taxa de perda de solo por intervalo por tempo de simulação, amostras sem adição de cal.....	84
Figura 34 - Resultados por amostra da taxa de perda de solo acumulada por tempo de simulação, amostras sem adição de cal.....	85
Figura 35 – Material retido na caixa após realização de um experimento de Inderbitzen Modificado	86
Figura 36 - Exemplo de amostra durante a realização dos ensaios com a aplicação de cal.....	91
Figura 37 - Resultados por amostra da taxa de perda de solo por intervalo por tempo de simulação, amostras com adição de cal.....	93
Figura 38 - Resultados por amostra da taxa de perda de solo acumulada por tempo de simulação, amostras com adição de cal.....	94
Figura 39 - Material retido na caixa após realização de um experimento de Inderbitzen Modificado com cal.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do solo.....	42
Tabela 2 – Classificação da estrutura	42
Tabela 3 - Classificação do coeficiente de permeabilidade.....	42
Tabela 4 - Quantis de Altura de Chuva selecionados (mm)	56
Tabela 5 – Configurações definidas para os ensaios de Inderbitzen Modificado	64
Tabela 6 - Caracterização física da amostra de estéril	64
Tabela 7 - Valores de Perda de massa por imersão (Pi) com os respectivos teores de umidades e massa específica aparente seca (MEAS) das amostras iniciais em diferentes teores de cal	69
Tabela 8 - Valores de Perda de massa por imersão (Pi) com os respectivos teores de umidades e massa específica aparente seca (MEAS) das amostras adicionais em diferentes teores de cal	70
Tabela 9 - Redução média de Pi por teor de cal aplicado	72
Tabela 11 - Resultados para CUC entre os potes 10 a 15 por teste realizado	73
Tabela 10 - Resumo dos resultados de verificação da intensidade do simulador de chuvas.....	74
Tabela 12 – Resultados obtidos a partir da aplicação do método da farinha	76
Tabela 13 – Resultados para diâmetro médio das gotas e volume de água por peneira	77
Tabela 14 – Resultados dos cálculos dos tempos de queda das gotas	78
Tabela 15 – Valores de velocidade terminal e energia cinética das gotas	79
Tabela 16 – Resumos dos resultados de intensidade média obtidos entre os potes 10 a 15	80
Tabela 17 – Resultados obtidos de Energia Cinética e de EI30 (Fator R)	80
Tabela 18 – Verificação da intensidade média da precipitação e sua uniformidade por ensaio.....	82
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de Inderbitzen Modificado para as amostras sem cal.....	83
Tabela 20 – Resumos dos resultados de perda de solo total – Amostras sem cal ...	86
Tabela 21 – Valores de referência de erodibilidade para solos classificados como Cambissolo Háplico.....	89

Tabela 22 – Verificação da intensidade média da precipitação e sua uniformidade por ensaio.....	91
Tabela 23 - Resultados dos ensaios de Inderbitzen Modificado para as amostras com cal.....	92
Tabela 24 – Resumos dos resultados de perda de solo total – Amostras com cal ...	94
Tabela 25 – Resumos dos resultados de perda de solo total.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Taxa de perda de solo

C – Fator de uso e manejo de cobertura do solo

CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen

D50 – Diâmetro médio da distribuição das gotas do simulador de chuvas

F – Fator de forma

IP – Índice de Plasticidade

K – Fator erodibilidade do material

L – Fator de comprimento do declive

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCV – *Moisture Condition Value*

MCT – Miniatura, Compactado, Tropical

MEAS – Massa Específica Aparente Seca

P – Fator de práticas conservacionistas

Pi – Perda de massa

R – Fator erosividade da chuva

S – Fator de inclinação do declive

USLE – Equação Universal de Perda de Solos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Contexto da disposição de material em pilhas no cenário atual da mineração no Brasil	21
3.2	Erosão hídrica em pilhas de estéril	23
3.3	O uso da cal para a redução da erodibilidade dos solos	25
3.4	Ensaio de avaliação da erodibilidade em solos	28
3.4.1	Critério de erodibilidade MCT	29
3.4.2	O ensaio de Inderbitzen modificado	30
3.5	A Equação Universal de Perda de Solos - USLE	37
3.5.1	Fator Erosividade (R)	39
3.5.2	Fator Erodibilidade (K)	40
3.5.3	Fatores Comprimento do Declive (L) de Grau do Declive (S)	43
3.5.4	Fator Cobertura e Manejo (C) e Fator Prática Conservacionista (P)	44
4	MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1	Caracterização das amostras	46
4.2	Ensaio de compactação mini-MCV	47
4.2.1	Preparação das amostras	48
4.2.2	Adição de cal	49
4.2.3	Execução do Ensaio de compactação mini-MCV	50
4.3	Ensaio de perda de massa por imersão	51
4.3.1	Cálculo da perda de massa por imersão (Pi)	53
4.4	Calibração do simulador de chuvas	55
4.4.1	Definição dos índices pluviométricos a serem adotados nos ensaios	55
4.4.2	Preparo para avaliação da calibração do simulador de chuvas	56
4.5	Ensaio de Inderbitzen Modificado	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	Caracterização física das amostras	64
5.1.1	Granulometria	64
5.1.2	Curva de compactação – Ensaio de Compactação Proctor Normal	66
5.2	Ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão	68
5.3	Calibração do simulador de chuvas	72

5.3.1	Coeficiente de conformidade de Christiansen.....	72
5.3.2	Calibração da intensidade real e da intensidade média da chuva simulada 73	
5.3.3	Diâmetro médio das gotas	76
5.3.4	Altura e tempo de queda das gotas	78
5.3.5	Velocidade terminal e energia cinética das gotas	79
5.3.6	Fator Erosividade (R) da chuva simulada	79
5.4	Ensaio de Inderbitzen Modificado	81
5.4.1	Ensaio sem a aplicação de cal.....	81
5.4.2	Ensaio com a aplicação de cal.....	90
6	CONCLUSÕES	97
7	RECOMENDAÇÕES.....	103
	REFERÊNCIAS.....	104
	APÊNDICE A – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras sem adição de cal	116
	APÊNDICE B – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 1%de concentração mássica.....	117
	APÊNDICE C – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 2%de concentração mássica.....	118
	APÊNDICE D – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 3%de concentração mássica.....	119
	APÊNDICE E – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 4%de concentração mássica.....	120
	ANEXO A – Resultados dos ensaios de caracterização física do material realizados pelo laboratório de geotecnia Loctest.....	121

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade antrópica necessária para o desenvolvimento econômico do Brasil, no entanto, na busca por recursos naturais, a atividade mineradora provoca alterações das paisagens e da biodiversidade local, podendo ultrapassar o limite de resiliência do sistema natural. Sendo assim, a mineração possui um potencial significativo de degradação ambiental (NASCIMENTO, 2015).

A extração mineral configura-se em uma atividade que impulsiona os processos erosivos, por exemplo, por meio da retirada da cobertura vegetal para abertura das lavras e dos locais de depósito de materiais indesejados, ou seja, de rejeito e estéril (MARTÍN DUQUE et al, 2015), que deixam o solo exposto aos agentes erosivos, aumentando o risco de assoreamento, de eutrofização dos corpos hídricos (BRITO, 2012) e de contaminação por elementos tóxicos (SANCHEZ-LOPEZ et al, 2015).

Com relação aos materiais indesejados na atividade de mineração, há de se ressaltar a diferença em seus conceitos. O rejeito é o material resultante do processo de beneficiamento do minério, ou seja, é o material residual após a separação do mineral durante o processo industrial, sendo comumente depositados em barragens ou pilhas de rejeitos. Já o estéril é o material removido durante a mineração, composto basicamente por rochas ou solos que não possuem teor de minério para serem economicamente explorados, sendo normalmente armazenado em barragens, aterros ou pilhas de estéril.

As pilhas de estéril, foco do presente estudo, são construídas em camadas formando taludes para sua execução, que possuem o objetivo de garantir a estabilidade estrutural e de prevenir deslizamentos, sendo tais pilhas usualmente localizadas em áreas próximas às operações de extração e demandam planejamento cuidadoso para minimizar impactos ambientais. Além da extração vegetal para a abertura dos locais de disposição para essas estruturas, seus taludes também possuem potencial erosivo frente à ação da chuva, denominada erosão hídrica, principalmente quando não protegidos por cobertura vegetal, algo que na prática pode se estender por vários períodos chuvosos (GOMES, 2012).

De acordo com De Carvalho et al. (2006), a erosão provocada pela água da chuva inicia-se com o salpicamento das gotas, fenômeno conhecido como "splash", que desagrega a estrutura. Em seguida, ocorre a erosão superficial, que pode evoluir para a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. Dessa forma, a prevenção da erosão superficial causada pela chuva é essencial para evitar a intensificação desse processo e a formação de voçorocas, que pode causar consequências na estabilidade das pilhas de estéril e degradação ambiental nos arredores.

No cenário nacional, tem-se observado a aplicação de técnicas de drenagem superficial e outras estratégias de controle para mitigar os efeitos da erosão hídrica em pilhas de estéril. Medidas como a construção de canais de drenagem, revestimentos vegetativos e a implementação de geotêxteis são cada vez mais comuns no setor mineral, buscando reduzir o impacto das chuvas sobre essas estruturas e prevenir processos erosivos que possam comprometer sua estabilidade (SANTOS et al., 2023).

Diante disso, a identificação e o controle da erosão causada pela água da chuva são fundamentais para o planejamento das pilhas de estéril, tanto na fase de construção, quanto nas etapas de manutenção e de fechamento. Assim, é necessário buscar alternativas para minimizar esse fenômeno, reduzindo o transporte e a deposição de materiais, a fim de garantir implantações ambientalmente sustentáveis.

Nesse sentido, conforme citado por Moreira (2023), tem crescido o número de estudos sobre efeito da cal na erodibilidade dos solos, apesar da pouca aplicação até agora. No âmbito da mineração, dado o contexto apresentado, o uso da cal pode ser relevante, pois torna-se mais vantajoso a prevenção da erosão em detrimento da contenção dos sedimentos gerados por processos erosivos provenientes das pilhas, tornando possível a redução das dimensões das estruturas que possuem tal finalidade.

Nesse contexto apresentado, este estudo propõe um método para avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril, a partir de ensaios de laboratório, com amostras de estéril retiradas de um empreendimento mineral situado na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, levando em consideração as condições de campo comumente utilizadas para tais estruturas e os

índices pluviométricos da região. Além disso, a presente pesquisa avalia o uso de cal como revestimento de proteção para taludes de pilhas de estéril em busca da redução desse fenômeno.

Por falta de referência bibliográfica em estudos que avaliam a erosão hídrica especificamente em pilhas de estéril, esta pesquisa baseou-se na extensa bibliografia que analisa tal fenômeno em solos para propor o método de avaliação, já que, conforme citado anteriormente, o estéril é formado por rochas ou solos que não possuem concentração suficiente de minério para serem economicamente explorados.

Portanto, os ensaios propostos para avaliação, sendo eles os ensaios de caracterização do material, de perda de massa por imersão e de Inderbitzen Modificado, e as análises realizadas, baseiam-se em referências bibliográficas relativas à solos, ou seja, este estudo busca nortear uma forma de avaliação para a erosão hídrica em material estéril. A validação dessa proposta requer monitoramento de áreas de pilhas de estéril a longo prazo, podendo ser necessários ajustes para as devidas compatibilizações.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Definir uma metodologia para avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril em parcelas experimentais de laboratório.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Avaliar a erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril, por meio da aplicação do ensaio de Inderbitzen Modificado em laboratório, considerando condições de campo em termos de declividade e de índice pluviométrico, e confrontar os resultados obtidos com a revisão bibliográfica.
- Analisar em laboratório, por meio dos ensaios de perda de massa por imersão, da metodologia MCT, e de Inderbitzen Modificado, a eficiência do uso de cal como revestimento de proteção na redução da taxa de erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Contexto da disposição de material em pilhas no cenário atual da mineração no Brasil

A mineração no Brasil tem passado por significativas mudanças nos últimos anos, principalmente no que se refere à gestão de rejeitos e estéreis. Historicamente, a principal forma de disposição desses materiais foi realizada por meio de barragens de rejeitos e sedimentos, utilizadas amplamente na mineração de ferro e outros minérios. Entretanto, com o passar do tempo, eventos de ruptura de barragens, como os desastres de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, expuseram os riscos associados a esse tipo de estrutura, levando à revisão de normas regulatórias e incentivando a adoção de alternativas mais seguras e sustentáveis (ANM, 2020).

A proibição das barragens com alteamento a montante, pela Lei nº 14.066/2020, impulsionou a busca por métodos alternativos de disposição de rejeitos. Entre essas alternativas, destaca-se o empilhamento de rejeito filtrado, também conhecido como "dry stacking". Esse método consiste na filtração dos rejeitos para reduzir sua umidade, permitindo sua disposição em pilhas estáveis, reduzindo drasticamente os riscos geotécnicos associados à liquefação, principal causa dos rompimentos de barragens de rejeito (MENDES et al., 2016). O empilhamento de rejeitos filtrados oferece vantagens significativas, como maior segurança estrutural, redução da contaminação ambiental e reutilização de água, fator essencial para a mineração em regiões com baixa disponibilidade hídrica. Contudo, também apresenta desafios, como altos custos iniciais de implantação, necessidade de equipamentos especializados e exigência de maior espaço para a disposição das pilhas (SILVA et al., 2022).

Além da mudança na gestão de rejeitos, há também uma evolução na disposição de estéreis, materiais sem valor econômico extraídos durante a lavra. Tradicionalmente, esses materiais eram alocados em pilhas de estéril de maneira convencional, sem grandes preocupações ambientais ou de reaproveitamento. Contudo, com o avanço das diretrizes ambientais e sociais, tem-se buscado alternativas para reduzir os impactos dessas estruturas. Entre essas soluções estão a revegetação das pilhas, o incremento da estabilização geotécnica, para evitar erosão e deslizamentos, e até mesmo, o reprocessamento de estéreis para recuperação de minérios residuais,

impulsionado pelo desenvolvimento de novas tecnologias de beneficiamento (ANGLO AMERICAN, 2022).

A disposição de estéreis em pilhas requer avaliação criteriosa de aspectos geotécnicos, uma vez que, em grandes volumes, esses materiais podem impactar a estabilidade das áreas mineradas e a drenagem do solo (MENDONÇA E FERREIRA, 2021). Dessa forma, a mineração moderna tem investido em estudos detalhados de engenharia para o planejamento adequado dessas estruturas, garantindo menor impacto ambiental e maior segurança operacional.

As pilhas de estéril no Brasil enfrentam desafios significativos relacionados à normatização e regulamentação. Diferentemente das barragens de rejeitos, regulamentadas, por exemplo, pela Lei nº 14.066/2020 e pela Resolução ANM nº 95/2022, essas estruturas não possuem uma regulamentação específica estabelecida por lei no que diz respeito ao planejamento, projeto, construção e monitoramento. Embora existam normas como a ABNT NBR 13029:2017, que especifica requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilhas, essa norma é considerada superficial em relação ao monitoramento e às especificidades técnicas necessárias para garantir a estabilidade e segurança das estruturas.

No cenário nacional, tem-se observado a aplicação de técnicas de drenagem superficial e outras estratégias de controle para mitigar os efeitos da erosão hídrica em pilhas de estéril. Medidas como a construção de canais de drenagem, revestimentos vegetativos e a implementação de geotêxteis são cada vez mais comuns no setor mineral, buscando reduzir o impacto das chuvas sobre essas estruturas e prevenir processos erosivos que possam comprometer sua estabilidade (SANTOS et al., 2023).

No entanto, apesar dos avanços na implementação dessas soluções, pouco tem sido feito no que se refere ao entendimento da susceptibilidade aos processos erosivos (i.e., erodibilidade) das pilhas de estéril. Tanto ensaios específicos para caracterização da suscetibilidade do material à erosão, quanto estudos de longo prazo para monitoramento e quantificação da perda de material ao longo dos anos ainda são escassos no país (OLIVEIRA E SOUZA, 2022). A ausência de dados sistemáticos

dificulta uma compreensão mais aprofundada sobre a dinâmica erosiva dessas pilhas, limitando a eficácia das medidas de mitigação adotadas e aumentando os riscos ambientais associados ao transporte de sedimentos para corpos hídricos e áreas vizinhas.

Diante desse cenário, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos e metodologias que permitam uma avaliação mais precisa da taxa de erosão e da erodibilidade das pilhas de estéril, incorporando tanto abordagens laboratoriais, quanto ferramentas de monitoramento em campo. Apenas com uma base de dados robusta será possível aprimorar as práticas de controle da erosão dessas estruturas, minimizando seus impactos ambientais e operacionais.

3.2 Erosão hídrica em pilhas de estéril

O estéril é um agregado natural composto de um ou mais minerais, desprovido de valor econômico, retirado da mina para liberar o minério desejado. É o produto minerado, mas que não é processado antes do destino em pilhas de estéril. (ROBERTSON et al., 1985).

Segundo Aragão (2008), os estéreis são descartados em pilha na condição natural. A disposição deste material se dá de forma contínua durante toda a etapa de extração do minério e dependerá das áreas disponíveis nas proximidades do empreendimento.

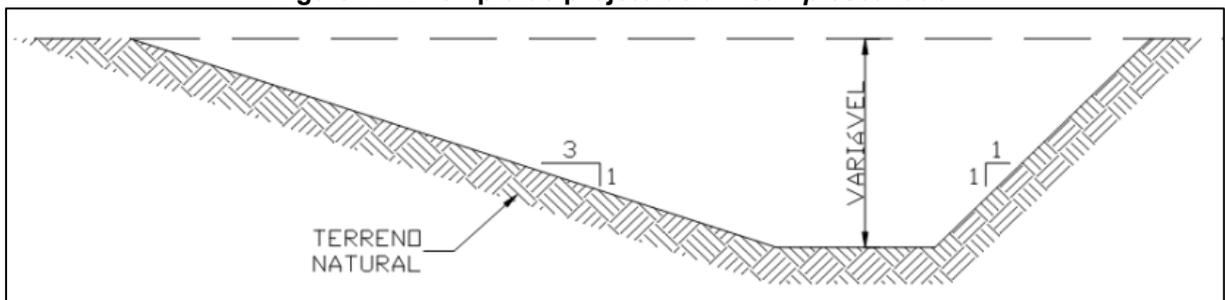
A pilha de deposição de estéril produz sedimentos provenientes da erosão hídrica que podem ser ocasionados pela perda de material devido à intensidade, duração e frequência dos eventos de precipitação e por problemas no sistema de drenagem superficial da pilha (SALIBA, 2009), os quais potencializam a formação e concentração do escoamento superficial direto.

A geração de sedimentos provocada pelos processos erosivos se torna um grande problema ambiental, uma vez que todo o material carregado, se não controlado, tende a invadir áreas naturais, muitas vezes protegidas ambientalmente, assoreando cursos de água, prejudicando suas vidas úteis e o ecossistema aquático. Portanto, processos erosivos em taludes de pilha de estéril podem acarretar prejuízos estruturais, econômicos e ambientais (DE CARVALHO et al., 2006; GOMES, 2012).

Dessa forma, torna-se importante a prevenção da erosão superficial na face externa do talude de pilha de estéril para evitar a evolução dos próximos estágios de erosão (sulco, ravina, voçoroca), que podem ocasionar mais perda de materiais e, conseqüentemente, a geração de mais sedimentos, além de comprometer a estabilidade geotécnica do talude por alterar sua geometria a ponto de induzir a ocorrência de rupturas profundas de extrema gravidade (SALIBA, 2009).

É uma prática comum a construção de um dique ou um *sump* escavado, conforme apresentado na Figura 1, de contenção de sedimentos, localizado a jusante das pilhas de estéril. Trata-se de uma solução que não é totalmente eficiente, pois a retenção da fração fina dos materiais estéreis transportados depende de uma geometria de reservatório particularmente alongada e profunda, associadas a baixas velocidades de escoamento (SALIBA, 2009).

Figura 1 – Exemplo de projeto de um *sump* escavado



Fonte: Vale (2021)

O dimensionamento dos sistemas de contenção de sedimentos normalmente baseia-se em literaturas internacionais, como a *Environmental Protection Agency – EPA* (1976), em que para as atividades de mineração são apresentados valores de contribuição específica de sedimentos variando de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, determinados a partir do monitoramento em empreendimentos nos Estados Unidos. No Brasil, tem sido prática a adoção do limite superior dessa faixa para cálculo da contribuição de sedimentos em áreas de mineração (PINHEIRO, 2011).

No entanto, o processo de erosão depende de vários fatores meteorológicos (duração, intensidade e frequência da precipitação), pedológicos/geológicos (profundidade, granulometria, permeabilidade, agregação, dentre outros), topográficos (declividade, comprimento de rampa), densidade de cobertura vegetal e práticas conservacionistas

(SOARES, 2019). Dessa forma, a utilização de valores de contribuição específica de sedimentos, com referência em literaturas internacionais, pode não ser adequada para a realidade dos empreendimentos que a aplicam.

A escassez de estudos específicos sobre a suscetibilidade à erosão hídrica em pilhas de estéril tem levado pesquisadores a adaptarem metodologias originalmente desenvolvidas para solos naturais (COSTA, 2018). Por exemplo, a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), amplamente utilizada para estimar perdas de solo em áreas agrícolas, tem sido aplicada em contextos de mineração para prever o comportamento erosivo de pilhas de estéril, apesar da possibilidade de diferenças significativas na composição e na estrutura desses materiais. Estudos, como o realizado por Gomes (2012), destacam a aplicação da USLE em áreas de mineração, evidenciando a necessidade de ajustes nos parâmetros devido às particularidades das pilhas de estéril.

3.3 O uso da cal para a redução da erodibilidade dos solos

O tratamento de solos com cal é conhecido e usado extensamente em todo o mundo para a construção de aterros de estradas e de rodovias. É um processo que visa a estabilização do solo, melhorando sua trabalhabilidade e suas propriedades mecânicas após a compactação (EADES et al., 1966; LITTLE, 1995; BELL, 1996; DASH e HUSSAIN, 2011; HERRIER, et al., 2012).

O mecanismo da estabilização do solo pela cal ocorre por meio de diversas reações químicas de curto e longo prazo, onde a estrutura do solo é modificada e, conseqüentemente, suas propriedades. A cal melhora a capacidade dos grãos de argila se ligarem à água na sua superfície e pode evoluir para a produção de ligações cimentícias que agregam resistência ao solo (LITTLE, 1995).

As reações pozolânicas, que possuem ação cimentante, ocorrem entre a sílica e o alumínio presentes no solo em reação com a cal hidratada. Little (1995) refere-se à ocorrência das ligações pozolânicas como um fator para a estabilização do solo, nas quais silicatos de cálcio hidratados e alumínios hidratados de cálcio são formados. Azevêdo (2010) ressalta que a cimentação de origem pozolânica gera uma maior resistência contra a ação da água, devido à maior coesão entre as partículas.

Alguns estudos têm sido realizados avaliando a influência do tratamento de cal na erodibilidade do solo. Dentre eles Herrier et al. (2014) avaliaram o tratamento do solo com cal como um material resistente à erosão em um dique de terra. Tais autores observaram que o solo tratado com cal pode ser considerado um material "cimentado", em que ligações coesivas entre as partículas finas do solo são induzidas pela ação da cal. Foi observado que o tratamento com cal diminuiu a erodibilidade e aumentou a resistência à erosão interna e superficial do solo.

De acordo com Oliveira (2010), ao utilizar cal para estabilização de solos, deve-se considerar diversos fatores que influenciam o sucesso do tratamento. Dentre esses fatores, destacam-se as propriedades do solo, porém, também é necessário levar em conta o tipo de equipamento empregado na dispersão, mistura e compactação do material, visto que esses aspectos impactam diretamente os resultados obtidos no processo.

Quanto às propriedades do solo, os principais fatores incluem:

- i. Teor de argila presente no solo;
- ii. Índice de plasticidade;
- iii. Propriedades mineralógicas das argilas;
- iv. Porcentagem de matéria orgânica;
- v. pH do solo;
- vi. Concentração de sulfatos.

O teor de argila é particularmente relevante quando o objetivo é a estabilização do solo, ou seja, aumentar sua resistência mecânica. A plasticidade, por sua vez, é geralmente associada a solos argilosos, tornando o índice de plasticidade um parâmetro importante no tratamento com cal.

As propriedades mineralógicas das argilas influenciam características como a superfície específica, capacidade de troca iônica e plasticidade, resultando em diferentes reações com a cal. Solos com argilas sódicas ou potássicas, cujos íons são facilmente substituídos pelo cálcio, apresentam melhor interação com a cal.

Existem algumas diretrizes que estabelecem os valores mínimos de partículas argilosas e índices de plasticidade necessários para a eficácia do tratamento com cal, como:

- *National Lime Association*: Índice de Plasticidade superior a 10%;
- Estado de Illinois: Teor de argila superior a 7% e Índice de Plasticidade superior a 8%;
- *U. S. Air Force Soil Stabilization Index System (SSIS, 1976)*: Percentual de material passado na peneira nº 200 (75 µm) maior que 25% e índice de plasticidade superior a 10%.

Essas diretrizes indicam uma preferência pelo uso de cal em solos argilosos, excluindo aqueles com pouca ou nenhuma plasticidade. Segundo Oliveira (2010), essa tendência se deve ao comportamento observado em solos siltosos ou arenosos, que possuem predominantemente minerais como quartzo, feldspato e mica, em contraste com solos argilosos. Contudo, apesar dessa preferência, o tratamento com cal não deve ser descartado nesses tipos de solo, desde que a análise laboratorial comprove sua viabilidade, levando em consideração os objetivos específicos do tratamento, as características do solo e o tipo de cal utilizada.

A prática tem mostrado que a cal reage de forma eficaz com solos de granulometria fina, média ou moderadamente fina, resultando em menor plasticidade, maior trabalhabilidade, redução da expansividade e aumento da resistência do solo.

Por outro lado, o teor de matéria orgânica pode prejudicar as reações de cimentação, pois suas partículas complexas têm a capacidade de adsorver íons de cálcio, inibindo as reações superficiais da cal com as partículas de argila e dificultando a formação das reações pozolânicas. Conforme Medeiros, Silva e Furlan (2019), teores de matéria orgânica abaixo de 1% não apresentam interferência significativa. Já a Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A. (2007), sugere o limite máximo de 1% de matéria orgânica para aplicação de cal em leitos de pavimento e de 2% para as demais aplicações.

Para que as reações pozolânicas ocorram adequadamente, o pH do meio deve ser elevado. Neves (2009) afirma que valores acima de 10,5 são suficientes para liberar

sílica e alumínio das argilas. Entretanto, a Gestión de Infraestructuras de Andalucía S.A. (2007) recomenda que o pH seja superior a 12.

A presença de sulfatos no solo também pode representar um problema, pois pode levar à formação de compostos expansivos, como a etringita ou o monossulfatoaluminato. Esses compostos surgem a partir da combinação de cálcio, alumínio, água e sulfatos e são responsáveis por processos expansivos capazes de gerar altas pressões. Experiências relatadas indicam que concentrações de sulfatos em torno de 1% já são suficientes para causar danos significativos (GTS, 2000)

Com relação às concentrações de cal em porcentagem por massa de material, autores como Herrier et al. (2014), Nascimento *et al.* (2019) e Mehenni *et al.* (2016) indicam valores de 1% a 4% para aplicação em taludes de solo. Moreira (2023) ao realizar ensaios de compactação mini-MCV e ensaio perda de massa por imersão, da metodologia MCT, para um solo argilo areno siltoso, chegou à faixa ótima de concentração de 2% a 3% de cal em massa.

Conforme citado por Moreira (2023), tem crescido o número de estudos sobre efeito da cal na erodibilidade dos solos, apesar da pouca aplicação até agora. No âmbito da mineração, dado o contexto apresentado, o uso da cal pode ser relevante, pois torna-se mais vantajoso a prevenção da erosão em detrimento da contenção dos sedimentos gerados por processos erosivos provenientes das pilhas, tornando possível a redução das dimensões das estruturas que possuem tal finalidade.

Nesse sentido, este estudo avalia o tratamento em laboratório de amostras de estéril com cal hidratada aplicada sobre suas superfícies para prevenção da erosão hídrica, tomando como base os estudos citados que verificaram a eficiência do uso de cal na redução da erodibilidade em solos.

3.4 Ensaios de avaliação da erodibilidade em solos

A determinação da erodibilidade em solos tem sido uma ferramenta importante para identificar, entender e até mesmo propor soluções quando do surgimento de processos erosivos. De Carvalho *et al.*, (2006) e Bastos, (1999) dizem que a erodibilidade pode ser avaliada de forma direta, por meio de ensaios específicos ou ainda de forma indireta tais como os realizados durante a caracterização física,

química e mineralógica, ensaios esses comumente utilizados em estudos geotécnicos.

No Brasil, para a avaliação da erodibilidade de forma direta, tem sido comumente utilizado o ensaio de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961), o ensaio de Inderbitzen Modificado (FREIRE, 2001), o ensaio de agulha ou *pinhole test* e o ensaio de torrão ou *crumb test* (SHERARD *et al.*, 1976a e 1976b) e para avaliação indireta tem sido utilizado o ensaio de desagregação ou *slaking test* (FONSECA E FERREIRA, 1981), o critério de erodibilidade MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1979) e critérios baseados na caracterização física do solo (DE CARVALHO *et al.*, 2006; SALES *et al.*, 2017).

A seguir estão descritos os ensaios utilizados na presente pesquisa, sendo eles o critério de erodibilidade MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1979) e o ensaio Inderbitzen Modificado (FREIRE, 2001).

3.4.1 Critério de erodibilidade MCT

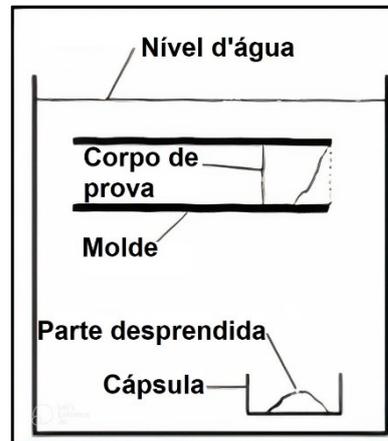
De acordo com Bastos (1999), um novo direcionamento na pesquisa sobre a erodibilidade dos solos tropicais e subtropicais ocorreu devido aos estudos realizados com base na Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Segundo Nogami e Villibor (1995), a classificação MCT cobre lacunas deixadas pelas classificações geotécnicas tradicionais e pela isolada associação de pedologia e geologia na previsão do comportamento dos solos tropicais frente à erosão.

A grande preocupação gerada em virtude dos fenômenos erosivos em taludes de corte e o insucesso na aplicação, entre outros, dos critérios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal – LNEC para cortes em solos do Estado de São Paulo, levaram o professor Job Nogami a desenvolver uma nova metodologia para avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos tropicais (BASTOS, 1999).

O critério de erodibilidade, apresentado por Nogami e Villibor (1979) é essencialmente empírico e baseado na correlação com o comportamento frente à erosão de muitos taludes de corte. Segundo os autores, as duas propriedades que permitem prever o comportamento dos solos tropicais frente à erosão hídrica são a infiltrabilidade e a erodibilidade específica. A erodibilidade específica, foco da presente pesquisa, é representada pela perda de massa por imersão. Ensaios específicos para quantificar

essas propriedades foram incorporados à metodologia MCT e são esquematizados na Figura 2.

Figura 2 - Ensaio de erodibilidade específica (perda de massa por imersão) da Metodologia MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1995) apud Bastos (1999)

No ensaio de perda de massa por imersão, a estabilidade do solo à ação da água é avaliada usando-se corpos de prova já compactados, a partir dos ensaios de compactação mini-MCV, que são extraídos parcialmente (10 mm) dos cilindros e depois imersos em água, por pelo menos 20 horas. O material desprendido é recolhido e submetido à secagem, a fim de se obter o peso seco desprendido do corpo de prova. O percentual de perda de solo seco, em massa, em relação à massa seca extraída da amostra, representa a erodibilidade específica (P_i).

As metodologias dos ensaios de compactação mini-MCV e de massa por imersão estão descritas em maiores detalhes nos itens 4.2 e 4.3, respectivamente.

3.4.2 O ensaio de Inderbitzen modificado

O controle dos efeitos dos fatores relacionados ao processo de erosão em experimentos de campo é extremamente difícil, porém, em laboratório, esse controle pode ser otimizado. Além disso, experimentos de controle de erosão no campo demandam recursos financeiros e tempo bem maiores do que ensaios em laboratório (BASTOS, 1999; JACINTHO et al., 2006).

Experimentos em laboratório permitem avaliar a susceptibilidade à erosão de cada classe de material em função de diferentes parâmetros, como intensidade e duração da precipitação, densidade de cobertura vegetal e declividade. Os resultados

contribuem para diversas finalidades, como avaliação da estabilidade geotécnica de taludes (BASTOS et al., 2000; MORAIS et al., 2004; SOARES et al., 2019) e elaboração de mapas de susceptibilidade de solos à erosão hídrica (HEIDEMANN, 2014).

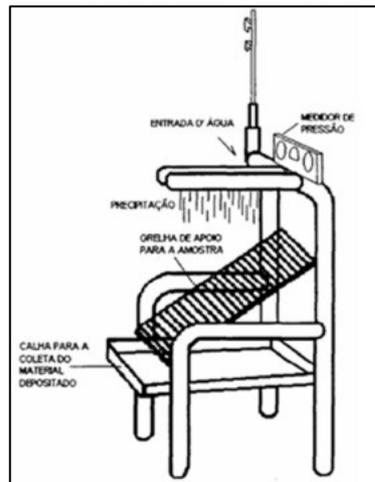
Segundo Sales et al. (2017), o ensaio de Inderbitzen tem sido amplamente aplicado em diversas pesquisas e consiste basicamente em uma rampa de inclinação variável, na qual é colocada uma amostra de solo, submetida a um fluxo em lâmina em profundidade constante e de vazão constante previamente determinada. Segundo o autor, como não existe uma norma para o ensaio, os arranjos experimentais existentes no país diferem consideravelmente, advindos em grande parte de trabalhos de pós-graduação de diferentes programas brasileiros.

Ao longo dos anos outros equipamentos e procedimento para ensaios de Inderbitzen foram sendo desenvolvidos, com base nos anteriores, para a avaliação da erodibilidade no Brasil, com modificações nos materiais, nas geometrias ou no procedimento (STEPHAN, 2010).

Os resultados obtidos a partir do ensaio Inderbitzen representam de forma eficiente os efeitos erosivos do escoamento superficial. Porém, não simula o fenômeno da desagregação de partículas provocado pelo impacto das gotas durante um evento de precipitação.

Nesse sentido, Freire (2001) propôs um novo ensaio, similar ao Inderbitzen, que procurou representar as condições do solo no campo, durante eventos de precipitações. O novo ensaio foi denominado pelo autor de ensaio Inderbitzen Modificado, no qual é simulado o impacto das gotas de chuva através de um “chuveiramento” sobre a amostra. Seu objetivo com as alterações era suprir as limitações observadas no aparelho de Inderbitzen original, propondo um ensaio que representasse também a ação do impacto das gotas de chuva no solo. A Figura 3 apresenta um desenho esquemático do equipamento proposto.

Figura 3 - Modelo de equipamento proposto por Freire (2001) para o ensaio denominado Inderbitzen Modificado



Fonte: (Lemos, 2002 apud Freire, 2001).

Esse equipamento permite avaliar a erodibilidade do solo em diferentes inclinações (simulando diferentes declividades), variando a intensidade e a duração da precipitação e do escoamento superficial (THOMA et al., 2020). Enquanto o equipamento tradicional avalia o efeito apenas do escoamento, o equipamento modificado simula também o efeito da precipitação. Essa modificação é importante por permitir a simulação do desprendimento de partículas pelo impacto das gotas de chuva, além do efeito cisalhante do escoamento superficial.

Os resultados dos experimentos realizados a partir do ensaio de Inderbitzen Modificado podem ter seus valores aplicados na equação universal de perda de solos (USLE), proposta por Wischmeier e Smith (1978), para a obtenção do fator erodibilidade (K) por determinação direta, dentro outras aplicações. Mais detalhes a respeito da USLE estão fornecidos no item 3.5.

3.4.2.1 Calibração do simulador de chuvas para o ensaio de Inderbitzen Modificado

Para simular o efeito da precipitação no ensaio de Inderbitzen Modificado, é necessário realizar a calibração do equipamento de forma a torná-lo representativo com relação às características das chuvas desejadas. Para isso, deve-se determinar o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), o diâmetro médio das gotas, a altura e o tempo de queda, a velocidade terminal das gotas e a energia cinética.

3.4.2.1.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Para a verificação da uniformidade da precipitação que ocorre em toda a superfície de captação, colocam-se recipientes espalhados aleatoriamente na superfície de captação para medir o volume coletado em certo período esperado que se tenha vazão constante nos aspersores do simulador de chuvas.

De posse dos valores de volume, faz-se o tratamento estatístico, conforme apresentado na equação 1.

$$CUC = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_m|}{nx_m} \right] \quad (1)$$

Sendo CUC o coeficiente de uniformidade de Christiansen (%), x_i o volume coletado em cada recipiente (mm^3), x_m é a média dos volumes coletados e n é o número de recipientes.

Segundo Miguntanna (2009), valores de CUC superiores a 70% são considerados suficientes para um simulador de chuvas.

3.4.2.1.2 Calibração da intensidade real e da intensidade média da chuva simulada

Para a determinação da intensidade real da precipitação simulada, pode-se utilizar coletores posicionados sobre a área efetiva do simulador de chuvas por certo tempo, conforme apresentado na equação 2 proposta por Ribeiro (2006).

$$I = \left(\frac{V_c / S}{t} \right) 60 \quad (2)$$

Sendo I a intensidade real da precipitação (mm/h), V_c o volume de água coletado (L), S a área da seção de coleta (m^2) e t o tempo de teste (h).

A intensidade média (I_m) da chuva simulada é estimada a partir da média aritmética das intensidades reais calculadas em cada coletor.

3.4.2.1.3 Diâmetro médio das gotas

Para a determinação do diâmetro médio das gotas, emprega-se o método da farinha, proposto por Hudson (1964) e utilizado em diversos outros estudos (MONTEBELLER et al., 2001; HERNGREN, 2005; CARVALHO et al., 2012).

Esse método consiste em utilizar uma bandeja, de área conhecida, coberta por farinha não compactada, com pelo menos 2 cm de espessura, e expô-la ao centro do simulador de chuvas por 4 segundos. Em seguida, a farinha é seca por pelo menos 24 horas em temperatura ambiente e os grãos formados são separados por uma série de peneiras. Esses grãos são então secos em estufa por 48 horas a 60° C e, enfim, quantificados e pesados em balança.

Carvalho et al. (2012) elaborou uma curva de calibração para o método da farinha, em que foram correlacionadas as massas da gota e do grânulo. O experimento consistiu em medir a massa de água média contida em gotas produzidas por agulhas hipodérmicas de várias aberturas e micropipetas, em seguida foram construídos grânulos por gotejamento de água, a partir dos instrumentos citados, numa bandeja com farinha de trigo, que foram peneirados, secos em estufa e pesados. A partir de então, foi possível correlacionar, para cada diâmetro médio de grânulo, a massa de água da gota e a massa do grânulo.

Como resultado, os autores chegaram na equação 3, que possui coeficiente de determinação de 0,88.

$$\frac{M_{go}}{M_{gr}} = 1,6015 M_{gr}^{0,1192} \quad (3)$$

Sendo M_{go} a massa da gota (mg) e M_{gr} a massa do grânulo (mg).

A partir da equação 3, da massa e do número de grânulos obtidos para cada classe de peneira, pode-se calcular a massa de água média da gota. O diâmetro pode ser obtido considerando a gota como esfera, segundo a equação 4.

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \quad (4)$$

Sendo D o diâmetro médio da gota (mm), m é a massa média da gota (mg) e ρ é a massa específica da água (mg/mm³).

O volume de água por peneira pode ser obtido multiplicando-se o número de gotas pelo volume da gota relativo a cada peneira, sendo esse obtido pela equação 5.

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad (5)$$

Sendo V o volume da gota de água (mm³) e D o diâmetro médio da gota.

Ao acumular-se o volume de água por peneira, pode-se traçar um gráfico que expressa a relação entre o volume de água acumulado e o diâmetro médio da gota retida em cada peneira, sendo possível determinar o D50, ou seja, o diâmetro médio apresentado por 50% das gotas para dada intensidade.

O teste é executado para diferentes pressões da bomba utilizada no simulador de chuvas, de forma determinar qual pressão produz gotas com D50 entre 2,0-2,5 mm, que é similar ao diâmetro D50 de chuvas naturais, segundo Miguntanna (2009).

3.4.2.1.4 Altura e tempo de queda

Para a obtenção da altura de queda (z), em metros, deve-se medir a distância entre a superfície de captação e a extremidade do aspersor.

Para a obtenção do tempo de queda das gotas (T), em segundos, pode-se utilizar a equação 6, conforme proposto por Lima et al. (1993).

$$T = \operatorname{arccosh} [\exp(ZC)](gC)^{-0,5} \quad (6)$$

Em que g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²) e C é o coeficiente de atrito com o ar, calculado pela equação 7.

$$C = (0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3)(1,109D)^{-1} \quad (7)$$

Sendo D o diâmetro médio da gota (mm), conforme apresentado no item 3.4.2.

3.4.2.1.5 Velocidade terminal das gotas

A velocidade terminal (v_t) das gotas, em m/s, pode ser calculada utilizando a equação 8, conforme proposto por Gunn e Kinzer (1949).

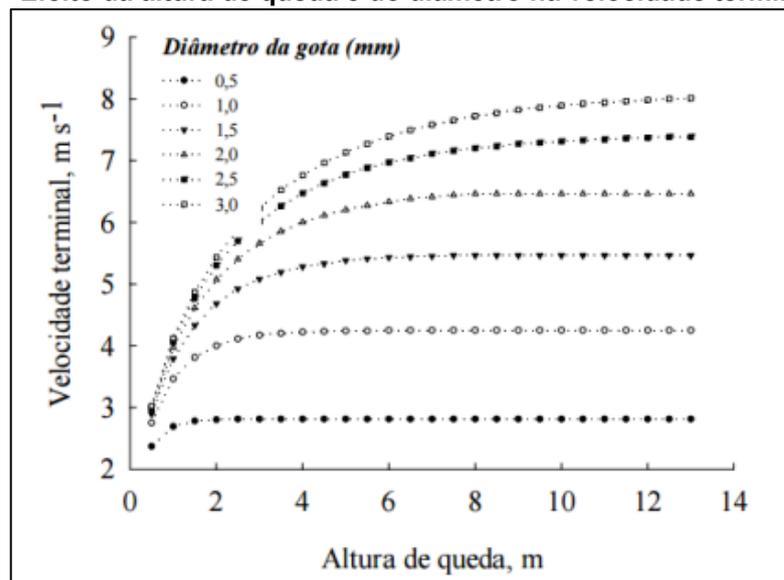
$$v_t = 3,8 D - 1,2, \text{ se } D \leq 1\text{mm},$$

$$v_t = 9,25 (1 - e^{-0,6D}), \text{ se } D > 1\text{mm}, \quad (8)$$

Na qual v_t é a velocidade terminal das gotas (m/s) e D é o diâmetro médio das gotas (mm).

A Figura 4 apresenta o efeito da altura de queda e do diâmetro da gota na velocidade terminal, segundo Lima et al. (1993).

Figura 4 – Efeito da altura de queda e do diâmetro na velocidade terminal da gota



Fonte: Lima et al. (1993)

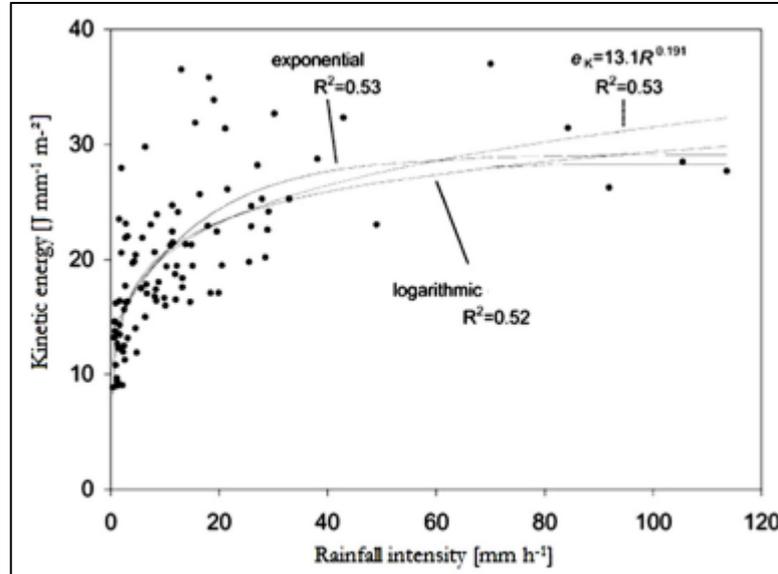
3.4.2.1.6 Energia cinética das gotas

Sendo m a massa média das gotas, em kg, conforme apresentado no item 3.4.3, e v_t a velocidade terminal das gotas, em m/s, conforme apresentado no item 3.4.5, é possível calcular a energia cinética (Ec), em joules, através da equação 9.

$$Ec = \frac{m v_t^2}{2} \quad (9)$$

Segundo Van Dijk et al. (2002), a energia cinética de chuvas naturais com intensidade superiores a 40 mm/h é da ordem de 25 J/mm/m², conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Curvas de energia cinética em função da intensidade de chuvas naturais



Fonte: Van Dijk et al. (2002).

O limite proposto por Tossel et al. (1987) entre a relação de energia cinética das chuvas produzidas por simuladores de chuvas e das chuvas naturais é de no mínimo 75%.

3.5 A Equação Universal de Perda de Solos - USLE

Desenvolvida no Agricultural Research Service junto à Universidade de Purdue (EUA), a Equação Universal de Perda de Solos (USLE) surgiu da evolução de equações de perdas de solo elaboradas anteriormente e da reunião e interpretação analítica e estatística de dados de perdas de solo e de água. Os experimentos se deram em várias parcelas experimentais sob condições naturais e simuladas de chuvas (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Loch e Roseweel (1992) explicam que, em virtude do embasamento totalmente empírico, o emprego da USLE sem os experimentos demanda pesquisas para a adaptação dos fatores conforme as condições locais, já que esses foram estabelecidos com base em experimentos de parcelas padrão nos Estados Unidos, com solo exposto, inclinação fixa de 9% e comprimento de 22,1 m.

Na década de 50, baseando-se em trabalhos já existentes e em suas próprias experimentações, Wischmeier, em parceria com Smith, combinou vários fatores como erosividade (R), erodibilidade (K), topografia (LS), cobertura vegetal (C) e as práticas de conservação agrícolas (P). Então nasce a primeira versão da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), aperfeiçoada em 1965 e novamente em 1978, ferramenta para estimar a taxa média de perda de solos devido à erosão hídrica em áreas agrícolas, florestais e outros tipos de cobertura do solo, apresentada na equação 10.

A equação é expressa da seguinte forma:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (10)$$

Sendo:

- A (Taxa de perda do solo): Representa a perda média anual de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);
- R (Fator de erosividade da chuva): Mede o impacto e a intensidade das chuvas, calculando a energia cinética associada à precipitação e sua capacidade de gerar erosão ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$);
- K (Fator de erodibilidade do solo): Representa a susceptibilidade do solo à erosão com base em suas propriedades físicas e químicas, como textura, estrutura, permeabilidade e matéria orgânica ($t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$);
- L (Fator de comprimento do declive): Relaciona-se ao comprimento da área inclinada. Encostas mais longas aumentam o volume de água que flui, intensificando a erosão (adimensional);
- S (Fator de inclinação do declive): Refere-se à inclinação do terreno. Encostas mais íngremes facilitam o escoamento superficial e aumentam o potencial erosivo (adimensional);
- C (Fator de uso e manejo de cobertura do solo): Indica o impacto da cobertura vegetal ou práticas agrícolas sobre a erosão. Terrenos bem protegidos com vegetação sofrem menos erosão (adimensional);
- P (Fator de práticas conservacionistas): Avalia a eficiência de práticas de manejo adotadas para reduzir a erosão, como terraceamento ou plantio em contorno (adimensional).

De acordo com Wischmeier e Smith (1978), originalmente o modelo buscava prever a perda de solo universal, ou seja, sem distinguir a erosão entre difusa ou concentrada. Entretanto, Amorim, Silva e Pruski (2009) afirmam que o modelo não estima a erosão em sulcos em fase mais avançada. Apesar da aceitação universal da USLE, a forma de erosão linear do tipo voçoroca, estreitamente relacionada a fatores hidrológicos e geomorfológicos complexos, não foi contemplada pelos fatores da equação. Nesse sentido, a aplicação do modelo, principalmente em escala regional, é limitada à análise de erosão laminar (DAAE e IPT, 1989).

3.5.1 Fator Erosividade (R)

Segundo Carvalho (1994), o fator erosividade da chuva (R) representa a competência da chuva em ocasionar erosão em uma área sem proteção, sendo também conhecido como “índice de Wischmeier”. Ele representa toda ação erosiva gerada pelo impacto, salpico e a turbulência combinada com a enxurrada que transporta o sedimento desprendido.

Conforme Wischmeier e Smith (1978), a erosividade é determinada através do cálculo do EI30, sendo esse o produto da energia cinética da chuva (E_c) pela sua máxima intensidade em 30 minutos (I_{30}). Segundo os autores, o intervalo de 30 minutos captura adequadamente o impacto erosivo médio de eventos pluviométricos intensos, principalmente em climas tropicais e subtropicais, onde chuvas com alta energia cinética são comuns.

A energia cinética das gotas de chuva é calculada, segundo Wischmeier e Smith (1958) e convertida para o sistema internacional de unidades por Foster et al. (1981), como:

$$E_c = 0,119 + 0,0879 \log I \quad (11)$$

Em que E_c é a energia cinética das gotas ($\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}$) e I é a intensidade da chuva (mm h^{-1}).

O índice de erosão EI30 é obtido pela equação 12.

$$EI30 = E_c \times I30 \quad (12)$$

Em que EI_{30} é o índice de erosão ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$), E_c é a energia cinética da chuva ($MJ\ ha^{-1}\ mm$) e I_{30} é a intensidade máxima da chuva em 30 minutos ($mm\ h^{-1}$).

O somatório dos valores de EI_{30} de cada chuva, separadamente, em determinado período, proporciona uma estimativa numérica da erosividade da chuva dentro daquele período. Por fim, a soma de todos os valores de EI_{30} para chuvas maiores que 10 mm ou menores, mas que proporcionam consideráveis perdas de solo, em um ano em determinado local, determina o valor anual de R (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

No Brasil, o programa nacional de levantamento e interpretação de solos (PronaSolos) disponibilizou um estudo inédito sobre erosividade e vulnerabilidade dos solos locais à erosão hídrica, conduzido pela Embrapa Solos e divulgado em 2023, que se baseou em dados históricos e análises realizadas ao longo de décadas, com destaque para o período entre 1986 e 2019, para a criação de mapas dinâmicos de vulnerabilidade. Dentre tais mapas, foi elaborado o mapa de erosividade das chuvas no Brasil, em que é possível obter valores estimados anuais de erosividade da chuva ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) para qualquer local de referência dentro do território brasileiro.

3.5.2 Fator Erodibilidade (K)

A erodibilidade do solo (K) é a relação entre a intensidade de erosão e a erosividade da chuva, para um solo específico mantido continuamente sem cobertura. Representa a susceptibilidade do solo à erosão, da mesma forma que também representa a resistência à erosão (CARVALHO, 1994).

O fator K de cada solo depende de suas propriedades intrínsecas, principalmente as de ordens físicas e químicas. (WISCHMEIER & SMITH, 1978). As propriedades físicas exercem diferentes influências na resistência do solo contra a erosão, entre elas a estrutura, a textura, que compreende o agrupamento das partículas em classes conforme o tamanho, a taxa de infiltração, a permeabilidade, a densidade e a porosidade (SILVA et al., 2003). Dentre essas, as mais expressivas e que estão mais intensamente relacionadas à erodibilidade são a capacidade de infiltração e a estabilidade estrutural (BRADY E WEIL, 2002 apud SILVA e ÁLVARES, 2005). Com relação às características químicas, o conteúdo de matéria orgânica é o mais

importante, porém sua relação é mais significativa para solos de textura mais arenosa (WISCHMEIER e MANNERING, 1969).

A difusão da equação USLE intensificou as pesquisas referentes ao fator erodibilidade com o auxílio de simuladores de chuva que possibilitaram obter, em curto período, enorme número de dados (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012). Afinal, a erodibilidade apresenta uma grande variabilidade espacial e temporal, elucidada pela diversidade climática, que resulta no potencial erosivo das chuvas, e a variabilidade do solo, que influencia na susceptibilidade à erosão (BERTOL et al., 2002).

Existem três modos distintos de se determinar a erodibilidade do solo. O primeiro consiste em determinar o fator K em condições de campo, sob chuva natural; no entanto, esse método é demorado. O segundo é semelhante ao primeiro, contudo se fundamenta na quantificação do fator K em razão das perdas do solo e do fator erosividade, sob condições de chuva simulada, sendo esse o caso da presente pesquisa. Esses dois métodos são considerados padrões e refletem a erodibilidade do solo como é preconizada na Equação Universal de Perda de Solo (USLE), sendo denominados de métodos de determinação direta. O terceiro método é fundamentado em regressões múltiplas que contenham como variáveis independentes atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo ou a relações desses correlacionados com o fator K obtido pelos métodos padrão (SILVA et al., 2000) e é denominado de determinação indireta.

Wischmeier e Smith (1978) propuseram a equação 13 para a determinação indireta do fator K para solos que apresentam porcentagens de silte e areia fina menores que 70%.

$$100K = 2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3) \quad (13)$$

Em que:

$M = (\%silte + \%areiafina)(100 - \%argila)$, sendo os limites apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Componentes do solo

Componente	Faixa (mm)
Argila	0-0,002
Silte	0,002-0,05
Areia Fina	0,05-0,1
Areia Grossa	0,1-2

Fonte: Wischmeier e Smith (1978)

a: Teor de matéria orgânica (%);

b: Estrutura do solo, sendo os limites apresentados na Tabela 2;

Tabela 2 – Classificação da estrutura

Classificação	Estrutura
1	Granular muito fina
2	Granular fina
3	Granular média ou grande
4	Bloco ou maciço

Fonte: Wischmeier e Smith (1978)

c: Permeabilidade do solo, sendo os limites apresentados na Tabela 3;

Tabela 3 - Classificação do coeficiente de permeabilidade

Textura	Permeabilidade (cm/s)	Classificação
Argila siltosa, argila	<2,8E-05	6 - Muito baixa
Argila siltosa, argila arenosa	2,8E-05 a 5,6E-05	5 - Baixa
Argila arenosa	5,6E-05 a 1,4E-04	4 - Baixa a moderada
Silte	1,4E-04 a 5,6E-04	3 - Moderada
Areia argilosa	5,6E-04 a 1,7E-03	4 - Alta
Areia	>1,7E-03	5 - Muito alta

Fonte: HANN et al. (2002)

De acordo com Baptista (1997), os resultados obtidos por meio da equação desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), devem ser multiplicados pelo fator de conversão 0,1317, para que possa ser utilizado no sistema internacional de unidades, em $t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$.

Apesar de pouca informação com relação à erodibilidade de materiais utilizados em pilhas de estéril, é possível encontrar na literatura informações relacionadas à erodibilidade de solos. Nesse contexto, o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), desenvolvido pela Embrapa (2013), é de extrema valia.

O SiBCS é um sistema taxonômico que categoriza os solos do Brasil com base em suas propriedades morfológicas, físicas e químicas. A partir da adoção de uma estrutura hierárquica multinível, o sistema classifica os solos em ordem, subordem, grande grupo, subgrupo, família e espécie, permitindo uma caracterização detalhada e adaptada às condições tropicais predominantes no país.

A classificação considera critérios como horizontes diagnósticos, mineralogia, fertilidade natural, textura e estrutura, possibilitando sua aplicação em estudos de manejo, conservação ambiental e planejamento agrícola.

A partir da classificação proposta no SiBCS, é possível encontrar autores, como Corrêa; Moraes; Pinto (2015), Silva et al. (2009), Mannigel et al., (2002), Gomes (2012), entre outros, que avaliaram a erodibilidade de solos brasileiros.

3.5.3 Fatores Comprimento do Declive (L) de Grau do Declive (S)

O fator topografia do relevo, representado pela declividade e comprimento do terreno, possui fundamental influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade de material carregado pela erosão hídrica estão sujeitos à velocidade com que escorre e essa velocidade é um produto do comprimento do lançante e do grau de declividade do terreno (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

O comprimento da rampa é uma característica topográfica que possui muita influência nas perdas de solo por erosão. Embora as perdas de água diminuam com o comprimento da rampa, devido ao maior caminho percorrido pelo escoamento superficial e, conseqüentemente, mais possibilidade de infiltração, a velocidade aumenta em razão do movimento uniformemente acelerado. Essa, por sua vez, aumenta a competência de transporte de sedimentos, de forma a aumentar também a perda de solo (BERTONI, 1959).

Da mesma forma, a declividade do terreno influencia a quantidade de perda de solo por erosão, pois dela dependem o volume e a velocidade das enxurradas. Quanto mais declivoso o terreno, maior é a velocidade do escoamento e, conseqüentemente, menor é a taxa de infiltração, aumentado, assim, o escoamento superficial (BERTONI, 1959).

Respectivamente representados por L e S, os dois fatores foram analisados separadamente na construção da equação universal de perda de solo. Porém, na aplicação prática da equação, os dois fatores foram considerados como um único fator, o fator topográfico, ou LS (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

O fator LS concebe a relação entre as perdas de solo em uma área com declividade e comprimento de encosta quaisquer e as perdas que ocorrem em uma parcela unitária padrão, com 22,1 m de comprimento e 9% de declividade (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Assim, fundamentalmente, esse fator foi acurado para segmentos de declives uniformes e não muito acentuados (SILVA, SCHULZ e CAMARGO, 2003).

Determinar o valor de L e S considerando complexidades referentes à morfologia do declive (reto, côncavo, convexo ou uma combinação de ambos) trouxe aos pesquisadores o desafio de propor, por meio de equações matemáticas, o comportamento desses fatores e condições distintas (OLIVEIRA et al., 2010).

Conforme proposto por Wischmeier e Smith (1978), o fator LS para uma área com declividade e comprimento de encosta diferentes da parcela unitária padrão, pode ser calculado por:

$$LS = \left(\frac{L^{0,5}}{100}\right) \times (1,36 + 0,975 S + 0,1385 \times S^2) \quad (14)$$

Em que S é a inclinação da encosta (%) e L é o comprimento da encosta (m).

3.5.4 Fator Cobertura e Manejo (C) e Fator Prática Conservacionista (P)

A vegetação é a proteção natural do solo contra a ação erosiva da água, logo da erosão hídrica. As implicações básicas sobre os efeitos da cobertura vegetal podem ser assim classificadas: (a) proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; (b) dispersão da água, interceptando e evaporando as gotas de chuvas, antes que elas alcancem o chão; (c) decomposição das raízes das plantas que, formando canalículos no solo, aumentam a infiltração da água; (d) aumento da capacidade de retenção de água, melhorando a estrutura do solo pela adição de matéria orgânica; (e) redução da velocidade do escoamento superficial pelo aumento do atrito (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012).

Quando a chuva precipita em um terreno coberto por vegetação espessa, a gota de água se divide em diversas gotículas, diminuindo, assim, sua força de impacto, ou sua energia cinética. Quando não há nenhuma cobertura, a gota faz desprender e salpicar as partículas de solo, que posteriormente são facilmente transportados pela água vertente, cumprindo as funções da água no processo erosivo: desprender, transportar e depositar. Por isso, em uma área descoberta, as perdas de solos serão um produto de todos os termos da equação universal de perda de solo descrito anteriormente R, K, L, S, no entanto, se houver algum tipo de cultura na área, as perdas serão reduzidas devido à proteção proporcionada ao solo (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

O fator de uso e manejo do solo (C) é a relação entre as perdas de solo de um terreno com um determinado tipo de cobertura e as perdas correspondentes de um terreno conservado continuamente descoberto, assim, nas mesmas condições em que o fator K é avaliado. (SILVA, SCHULZ e CAMARGO, 2003)

Já o fator de prática conservacionista (P) é a relação entre a intensidade esperada de perdas com determinada prática conservacionista e aquelas de quando a cultura está plantada no sentido do declive (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012). A prática significa o tipo de tecnologia adotada no terreno como, por exemplo, terraceamento ou plantio em nível.

Bertoni e Lombardi Neto (1985) trabalham os dois fatores de maneira dissociada: o fator C apenas como “uso e manejo” e o fator P como “prática conservacionista” (MATA et al., 2007). Todavia, para Wischmeier e Smith (1978), os fatores C e P estão significativamente relacionados, por isso não devem ser analisados separadamente. O efeito combinado das variáveis cobertura e manejo do solo é representado pelo fator CP.

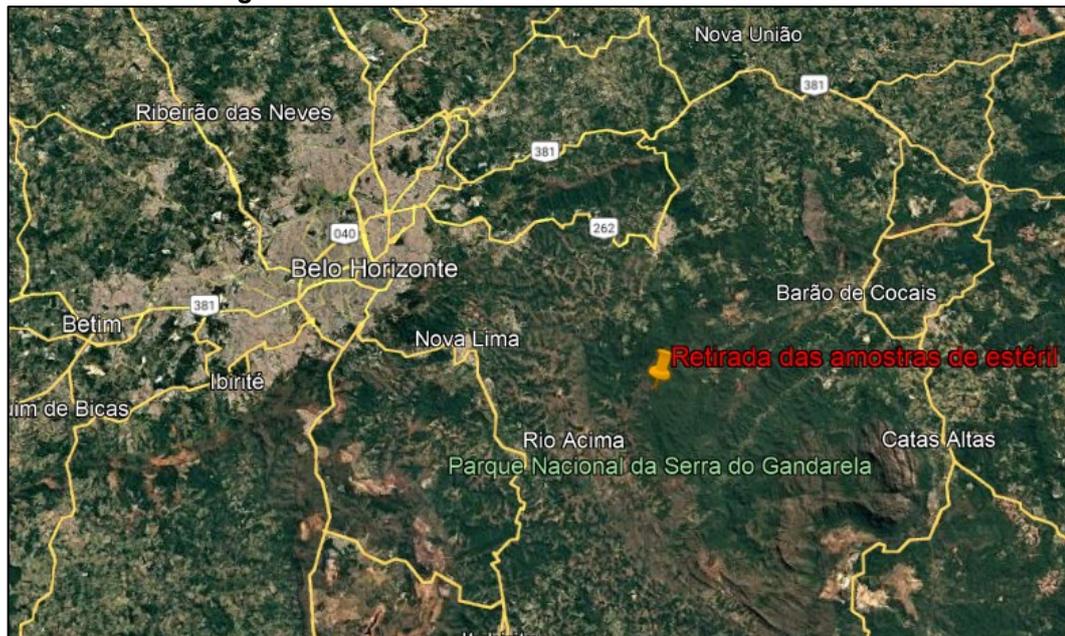
4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa consistiu na caracterização das amostras de estéril, na realização dos ensaios de compactação mini-MCV e na realização dos ensaios de perda de massa por imersão, ambos da metodologia MCT, na calibração do simulador de chuvas e nos experimentos de Inderbitzen Modificado.

4.1 Caracterização das amostras

Foram obtidos cerca de 200 kg de amostra de estéril, retirados de um empreendimento mineral localizado na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Local de retirada das amostras de estéril



Fonte: Google Earth (2024)

A Figura 7 mostra o aspecto físico do estéril coletado.

Figura 7 – Amostras de estéril recolhidas



Fonte: Autor (2024)

Um dos sacos de amostra de estéril recolhido, de cerca de 20 kg, foi submetido aos ensaios de caracterização física do material, sendo realizados na Loctest, laboratório

de geotecnia acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO – CGCRE, segundo a norma ABNT NBR ISSO/IEC 17025:2017. Os ensaios de caracterização realizados foram os seguintes: Massa Específica (γ_s): NBR 6458 (ABNT, 2017); Granulometria: NBR 7181 (ABNT, 2018) e NBR 13602 (ABNT, 1996); Limite de Liquidez (wL): NBR 6459 (ABNT, 2017); Limite de Plasticidade (wP): NBR 7180 (ABNT, 2016); e Ensaio de compactação Proctor Normal: NBR 7182 (ABNT, 2016).

4.2 Ensaio de compactação mini-MCV

O ensaio de compactação mini-MCV faz parte da metodologia MCT, proposta por Nogami e Villibor (1979) e citada no item 3.4.1 deste trabalho. Esse foi regulamentado pelo antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), que agora faz parte do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), seguindo a norma DNER-ME 228-94 (1994). Seguindo a proposta de Moreira (2023), o ensaio de compactação mini-MCV foi realizado com o objetivo de preparar corpos de prova contendo diferentes porcentagens de cal, visando realizar testes de perda de massa por imersão e verificar o efeito da cal na erodibilidade das amostras.

Foram conduzidos cinco ensaios: M0, para amostras de material sem cal, M1 para amostras com concentração de 1% de cal em massa, M2 com 2%, M3 com 3% e M4 com 4%. Em cada ensaio, foram preparadas seis amostras em níveis variáveis de umidade, totalizando 30 amostras, que passaram pelo processo de compactação no ensaio mini-MCV e, em seguida, foram testadas quanto à perda de massa por imersão, conforme a metodologia MCT.

Para tanto foi utilizada nesta pesquisa a cal hidratada dolomítica do tipo CH-III, da marca ITAÚ, que atendeu todos os requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003). A cal hidratada em comparação a cal virgem, é mais facilmente encontrada no mercado para compra, não necessita de tempo de hidratação, podendo ser utilizada imediatamente, e não oferece os riscos de queimadura ao aplicador.

Os ensaios foram realizados no Centro de Pesquisa e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFMG).

4.2.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas de acordo com a norma DNER-ME 258/94. Primeiramente, a amostra é colocada em um tabuleiro, destorroada e deixada para secar ao ar até alcançar a umidade próxima à higroscópica. Em seguida, a amostra é peneirada em uma malha de 2 mm, com as frações retidas sendo destorroadas utilizando almofariz e mão de gral de porcelana revestida com borracha.

Para cada ensaio, foram separadas seis porções de aproximadamente 325g, às quais foram adicionadas água em quantidades suficientes para obter níveis de umidade progressivamente maiores, com busca por um aumento aproximado de 2% entre as porções. A primeira quantidade de água foi determinada adicionando água à amostra e homogeneizando até que a mistura adquirisse certa coesão, conforme ilustrado na Figura 8. Após a homogeneização, cada porção foi armazenada em sacos de polietileno por 24 horas, como mostrado na Figura 9.

Figura 8 - Determinação da quantidade inicial de água a ser adicionada à amostra até atingir a coesão



Fonte: Autor (2024)

Figura 9 – Armazenamento das porções de solo em sacos de polietileno



Fonte: Autor (2024)

4.2.2 Adição de cal

Após 24 horas de repouso das amostras de solo e antes da adição de cal, foram coletadas porções para determinar o teor de umidade utilizando o método de secagem em estufa, conforme a norma NBR 6457/2016.

Para isso, 100g do material de cada amostra foi retirado dos sacos de polietileno e seco em estufa a 110°C por 24h. Após seco, o material foi pesado novamente, sendo a diferença entre as massas pré-pesagem e pós-pesagem dividida pela massa pós-pesagem igual ao percentual de umidade das amostras.

Conforme sugerido por Moreira (2023), com base nos resultados dos estudos de Herrier et al. (2014), Mehenni et al. (2016), Elandaloussi et al. (2018) e Nascimento et al. (2019), foram empregados teores de cal em concentrações de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% em massa. Para cada porção de amostra, a mistura de solo e cal foi realizada adicionando a respectiva porcentagem de cal em massa e homogeneizando a amostra, conforme ilustrado na Figura 10 e na Figura 11.

Figura 10 – Adição de cal a amostra



Fonte: Autor (2024)

Figura 11 - Acondicionamento das amostras homogeneizadas com cal em sacos de polietileno.



Fonte: Autor (2024)

4.2.3 Execução do Ensaio de compactação mini-MCV

A execução dos ensaios de compactação mini-MCV da metodologia MCT foi realizada conforme a norma DNER-ME 228-94 (1994). O equipamento utilizado para o ensaio de compactação denominado mini-MCV é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Equipamento utilizado para o ensaio de compactação Mini-MCV



Fonte: Autor (2024)

O ensaio foi conduzido da seguinte forma: com o auxílio de um funil, 200g de material foram colocados no molde, onde foram aplicadas energias crescentes por meio de uma série de golpes com o soquete, até que se observasse um aumento significativo na massa específica para os diferentes teores de umidade, resultando em uma série de curvas de compactação. Para cada conjunto de golpes aplicados, as leituras foram feitas com o auxílio de um extensômetro. O ensaio foi encerrado quando a diferença entre a leitura após n golpes e a leitura após $4n$ golpes foi inferior a 2 mm, ou leituras sucessivas obtiveram diferença menor que 0,1 mm.

Após a finalização do processo de compactação, o corpo de prova foi pressionado para fora do cilindro de compactação utilizando um aparelho extrator, de modo que 10 mm do corpo de prova ficassem expostos. Essa parte exposta, de 10 mm de comprimento, é chamada de massa extrudada. Assim, o corpo de prova está pronto para a realização do ensaio de perda de massa por imersão, conforme a metodologia MCT (NOGAMI E VILLIBOR, 1979).

4.3 Ensaio de perda de massa por imersão

O ensaio de perda de massa por imersão faz parte da metodologia MCT proposta por Nogami e Villibor (1979), citada no item 3.4.1 deste trabalho, e foi regulamentada pela antiga norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER),

atualmente incorporado ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), conforme a norma DNER-ME 256/94 (1994).

Após a retirada do corpo de prova do equipamento de compactação mini-MCV, com 10 mm extrudados, esse é colocado horizontalmente em um recipiente com uma cápsula para coletar o material que se desprenderá durante a imersão em água. O recipiente de imersão é preenchido suavemente com água destilada até que o nível de água ultrapasse pelo menos 1 cm acima da superfície externa do molde (Figura 13 e Figura 14). Nos primeiros minutos, observa-se o comportamento do corpo de prova, anotando-se possíveis peculiaridades, como desagregação, formação de bolhas, inchaço e trincamento.

Após no mínimo 20 h de imersão, o corpo de prova é retirado do recipiente, mantendo-o na posição horizontal para evitar derramamento de solo. Em seguida, verifica-se se os 10 mm de massa extrudada se romperam ou não. Caso haja ruptura, deve-se registrar se ela ocorreu por desagregação (ou desprendimento de material) ou em formato de bolacha (sem desagregação).

Após as observações, a cápsula de alumínio posicionada sob os 10 mm de solo é retirada do recipiente de imersão. Se houver solo na cápsula, é necessário anotar sua forma: se está desagregado (ou solto) ou em formato de bolacha (ou sem desagregação). Caso haja solo na cápsula, esse deve ser seco em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C por 24h, para determinar a massa seca do material que se desprendeu do corpo de prova.

Figura 13 - Corpos de prova após preenchimento dos recipientes de imersão com água destilada



Fonte: Autor (2024)

Figura 14 - Corpo de prova em recipiente de imersão e cápsula de alumínio para recolher material desprendido



Fonte: Autor (2024)

4.3.1 Cálculo da perda de massa por imersão (P_i)

Conforme Nogami e Villibor (1979), a perda de massa por imersão (P_i) de um corpo-de-prova compactado no ensaio Mini-MCV é obtida pela equação 16.

$$P_i = \frac{F \times M_d}{M_e} \times 100 \quad (16)$$

Em que:

P_i é a perda de massa por imersão (%);

F é o fator forma, o qual depende da forma da massa de solo desprendida do corpo-de-prova durante o período de imersão;

M_d é a massa de solo desprendida do corpo-de-prova, que ficou depositada na cápsula de alumínio e foi seca em estufa (g);

M_e é a massa do corpo-de-prova extrudida (ou comprimida para fora) do cilindro de compactação (g);

Sendo,

$$M_e = A \times \rho_s \quad (17)$$

Em que:

A é a área da seção transversal do cilindro de compactação do corpo-de-prova (cm^2);

ρ_s é a massa específica seca do corpo-de-prova (g/cm^3).

Onde:

$$\rho_s = \frac{\rho_w}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} \quad (18)$$

e,

w é o teor de umidade do solo utilizado para moldar o corpo-de-prova (%);

ρ_w é a massa específica úmida do corpo-de-prova (g/cm^3);

E,

$$\rho_w = \frac{Pu}{A \times hcp} \quad (19)$$

Na qual,

Pu é a massa de solo para moldar 1 (um) corpo-de-prova no ensaio Mini-MCV = 200g;

A é a área da seção transversal do cilindro de compactação do corpo-de-prova (cm^2) = 19,63 cm^2 ;

hcp é a altura final do corpo-de-prova compactado no ensaio Mini-MCV (cm).

Quanto ao fator forma (F) do ensaio de perda de massa por imersão, esse está relacionado à forma como o material se desprende do corpo-de-prova compactado, destacando-se que:

- a) Se o solo se apresentar desagregado ou em forma de material solto na cápsula de alumínio retirada de dentro do recipiente do ensaio de perda de massa por imersão, o fator forma (F) a ser utilizado na equação da perda de massa por imersão será igual a 1 (um);
- b) Se o solo se apresentar em forma de uma bolacha (ou disco) na cápsula de alumínio retirada de dentro do recipiente do ensaio perda de massa por imersão, o fator forma (F) a ser utilizado na equação da perda de massa por imersão será igual a 0,5 (meio);

c) Se o solo não se desprender do corpo-de-prova, o fator forma (F) a ser utilizado na equação da perda de massa por imersão será igual a 0 (zero).

4.4 Calibração do simulador de chuvas

4.4.1 Definição dos índices pluviométricos a serem adotados nos ensaios

Pinheiro (2011) realizou uma análise de frequência para a mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, com base nos dados de 45 estações pluviométricas presentes no local. Para isso, o autor utilizou o método regionalização da curva adimensional de frequências, denominado método *index-flood* (“cheia-índice”). Nesse método, os postos localizados em uma região hidrologicamente homogênea seguem a mesma distribuição de frequências (isto é, possuem amostras oriundas de populações regidas pela mesma distribuição), à exceção de um fator local chamado *index-flood*, característico de cada posto, conforme mencionado pelo próprio autor.

No estudo, foi usada a metodologia dos momentos-L aplicada à análise regional de frequência de variáveis hidrológicas, proposta por Hosking e Wallis (1997). Dentre outras vantagens, esta metodologia utiliza algumas estatísticas construídas para minimizar as subjetividades envolvidas na definição de regiões homogêneas, etapa que constitui um dos pontos cruciais da regionalização, qualquer que seja o método escolhido.

A partir da aplicação das metodologias citadas, foram obtidas relações de Intensidade-Duração-Frequência (IDF). Os quantis de altura de chuvas apresentados na Tabela 4 foram os definidos para a presente pesquisa, por motivos de proximidade entre o local de obtenção das amostras de estéril e a estação pluviométrica adotada, de propriedade da empresa Vale, que distam cerca de 10 km, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Distância entre local de retirada das amostras de estéril e a estação pluviométrica adotada



Fonte: Google Earth (2024)

Tabela 4 - Quantis de Altura de Chuva selecionados (mm)

Duração <i>d</i>	Tempo de retorno <i>T</i> (anos)										
	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1.000	10.000
6 min	11,4	14,5	16,6	18,6	19,2	21,1	20,6	22,3	24,5	26,2	31,8
10 min	18,5	23,4	26,6	29,6	30,5	33,4	34,4	37,0	40,5	43,1	51,5
15 min	24,1	30,4	34,5	38,3	39,6	43,2	45,3	48,8	53,2	56,4	67,0
20 min	28,1	35,4	40,1	44,5	46,0	50,2	53,1	57,1	62,2	65,9	78,1
30 min	33,7	42,5	48,0	53,3	55,0	60,0	64,1	68,8	74,9	79,3	93,7
1 hora	43,3	54,5	61,6	68,3	70,4	76,7	82,8	88,9	96,6	102,2	120,3
2 horas	56,1	70,9	80,5	89,5	92,4	101,1	109,6	118,0	129,0	137,0	163,5
3 horas	63,6	80,5	91,5	101,9	105,3	115,3	125,3	135,1	147,9	157,4	188,8
4 horas	68,9	87,3	99,3	110,8	114,4	125,5	136,4	147,2	161,3	171,9	206,7
6 horas	76,4	96,9	110,4	123,2	127,3	139,7	152,0	164,2	180,3	192,3	231,9
8 horas	81,7	103,7	118,2	132,0	136,4	149,8	163,1	176,3	193,7	206,7	249,9
10 horas	85,8	109,0	124,3	138,8	143,5	157,7	171,7	185,7	204,1	217,9	263,8
12 horas	89,2	113,3	129,2	144,4	149,3	164,1	178,8	193,4	212,6	227,1	275,1
18 horas	96,7	122,9	140,2	156,9	162,1	178,3	194,4	210,5	231,6	247,5	300,4
24 horas	102,0	129,7	148,1	165,7	171,3	188,5	205,5	222,6	245,0	262,0	318,3

Fonte: Pinheiro (2011)

4.4.2 Preparo para avaliação da calibração do simulador de chuvas

Conforme apresentado no item 3.4.2.1, ao se trabalhar com chuva simulada, alguns critérios devem ser levados em conta. Tossel et al. (1987) estipularam que o simulador deve ser apto a atender os seguintes quesitos, a saber: (i) capacidade de simular chuvas de modo contínuo; (ii) expor a relação entre a energia cinética da chuva

produzida e a natural superior a 75%; (iii) o raio de ação útil da área molhada deve estar de acordo com o coeficiente de uniformidade de Christiansen superior a 80% e (iv) produzir gotas de diâmetro médio similar ao de chuvas naturais.

O equipamento utilizado na presente pesquisa possui 2,40m de largura, 2,40m de comprimento e 2,95m de altura, sendo esse apresentado na Figura 16. Para a obtenção dos resultados, contou-se com uma bomba hidráulica de potência de $\frac{3}{4}$ CV e, na saída da tubulação, de diâmetro de 2,54 cm, para o aspersor, de diâmetro interno de abertura de 1 cm, utilizou-se uma válvula de gaveta para controlar a vazão de saída, de forma que essa foi ajustada até que a correta calibração foi alcançada.

Figura 16 - Simulador de chuvas utilizado



Fonte: Autor (2024)

Quanto à avaliação do simulador de chuvas para a determinação da intensidade real da precipitação simulada, foram realizados 6 testes, em que foram dispostos 15 frascos coletores cilíndricos numerados, com 10 cm de diâmetro de abertura superior e 10 cm de altura, posicionados sobre uma mesa, de 60 cm de largura, 90 cm de comprimento e 30 cm de altura, locada sob a área efetiva do simulador de chuvas durante 6 minutos, com exceção do teste 2, que teve duração de 10 minutos.

A intensidade real da precipitação (mm/h) foi obtida a partir do volume de água coletado em cada frasco (L) dividido pela área da seção de coleta (m²) e o tempo de teste (h), conforme apresentado na equação 1. A intensidade média (I_m) da chuva

simulada é estimada a partir da média aritmética das intensidades reais calculadas em cada coletor.

A Figura 17 apresenta a configuração avaliada. Para tanto, a mesa em que os frascos coletores foram posicionados encontra-se afastada 1 metro longitudinalmente e 0,25 metros transversalmente da base de referência do simulador de chuvas, de forma a estar posicionada exatamente sob a área efetiva desse e em local idêntico em todos os ensaios realizados.

Figura 17 – Avaliação da intensidade do simulador de chuvas



Fonte: Autor (2024)

Para a determinação do diâmetro médio das gotas empregou-se o método da farinha, proposto por Hudson (1964), conforme descrito no item 3.4.2.1.3. Para tanto, os grânulos obtidos após a bandeja coberta por farinha, com 3 cm de espessura, ser exposta por 4 segundos sob a área efetiva do simulador de chuvas e mantido a temperatura ambiente por 24 h, foram passados nas peneiras de abertura de 4,00mm, 3,35mm, 2,00mm 1,70mm e 1,18mm, separados em potes e deixados em estufa por 2 dias a 60° C.

A Figura 18 apresenta a bandeja contendo a farinha previamente à realização dos experimentos.

Figura 18 – Bandeja com farinha sob a área efetiva do simulador de chuvas previamente à realização do experimento



Fonte: Autor (2024)

A partir dos dois ensaios descritos, de calibração da intensidade real e intensidade média da chuva simulada e da aplicação do método da farinha, proposto por Hudson (1964), foi possível avaliar os demais critérios que devem ser levados em conta por um simulador de chuvas, a partir da aplicação das equações descritas no item 3.4.2.1.

Por ser tratar de uma região tropical, em que chuvas intensas são mais comuns, buscou-se períodos de retorno mais curtos para refletir as condições reais de erosão. Dessa forma, foi definido para a avaliação nos ensaios de Inderbitzen Modificado, o período de retorno (TR) de 10 anos. Além disso, tal período de retorno está em conformidade com o estipulado pelo EPA (1976), em que, para projetos de dimensionamento de sistemas de contenção de sedimentos, indica-se a adoção do TR de 10 anos para a obtenção do volume de escoamento superficial recebido pela estrutura.

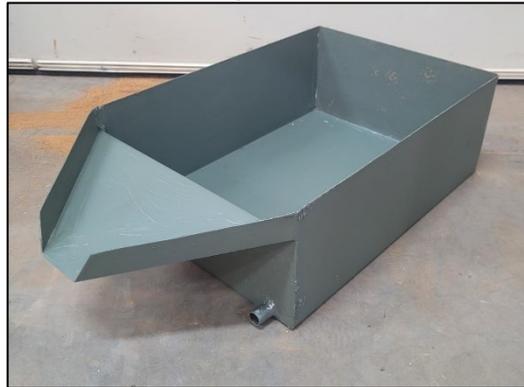
De acordo com Wischmeier e Smith (1958), ao avaliar o fator erosividade das chuvas (R) na equação universal de perda de solo (USLE), o intervalo de 30 minutos captura adequadamente o impacto erosivo médio de eventos pluviométricos intensos, principalmente em climas tropicais e subtropicais, onde chuvas com alta energia cinética são comuns.

Portanto, os ensaios de Inderbitzen Modificado na presente pesquisa buscaram representar a chuva de intensidade relativa ao período de retorno de 10 anos e 30 minutos de duração, sendo essa de 96 mm/h, de acordo com os valores apresentados da Tabela 4.

4.5 Ensaio de Inderbitzen Modificado

No ensaio de Inderbitzen Modificado, as amostras de estéril foram conformadas em caixas metálicas de 30 cm de largura por 40 cm de comprimento e 15 cm de profundidade, contendo um dreno inferior e um bico de saída com função de direcionamento do material erodido para recolha, conforme fotografia apresentada na Figura 19.

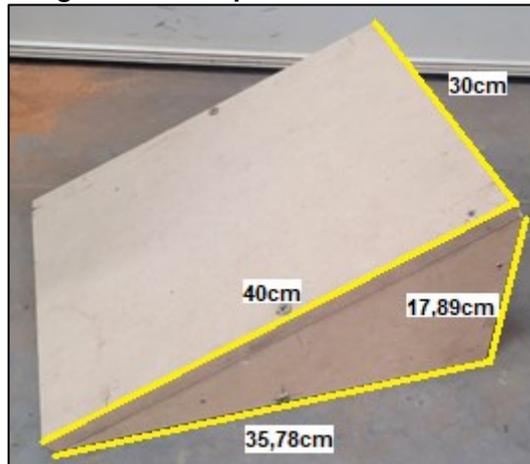
Figura 19 – Caixa metálica para conformação das amostras



Fonte: Autor (2024)

A adição do estéril às caixas metálicas foi feita após o peneiramento do material em uma peneira de abertura de 8 mm, com o objetivo de se evitar grandes pedregulhos e reduzir, mesmo que parcialmente, a grande heterogeneidade do material, sendo esses inseridos nas caixas metálicas até atingir a altura do bico de saída.

Tais caixas foram posicionadas sobre uma rampa inclinada, de declividade de 2H:1V, definida de acordo com o cenário mais comum aplicado na prática para taludes de pilhas de estéril. Para isso, foi confeccionada em MDF uma rampa inclinada de base igual a 35,78 cm, altura de 17,89 cm, largura de 30 cm e comprimento de 40 cm, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Rampa inclinada em 2H:1V

Fonte: Autor (2024)

Para a aplicação dos ensaios, a caixa metálica e a rampa inclinada foram apoiadas sobre uma mesa, de 60 cm de largura, 90 cm de comprimento e 30 cm de altura, de forma a permitir a recolha do material erodido. A Figura 21 apresenta a configuração utilizada nos ensaios de Inderbitzen Modificado.

Figura 21 – Configuração utilizada nos ensaios de Inderbitzen Modificado

Fonte: Autor (2024)

Para a realização dos ensaios, definiu-se por saturar em 100% o material em laboratório, com o objetivo de tornar os ensaios replicáveis em suas exatas condições prévias. Para realizar a saturação, as amostras foram inicialmente conformadas às

caixas metálicas, sendo plugado o dreno inferior existentes nessas, e adicionado água de forma a se estabelecer uma lâmina d'água sobre as amostras por pelo menos 24 horas.

Ressalta-se que as amostras foram adicionadas as caixas metálicas sem qualquer compactação aplicada, o que não é uma realidade nas pilhas de estéril. Em geral, nessas estruturas, os taludes são esteirados para atingirem a inclinação de 2H:1V, havendo certo grau de compactação nas faces.

O estéril erodido durante os experimentos foi recolhido a cada 5 minutos, por meio de baldes coletores, sendo posteriormente transferidos para recipientes de vidro e levados em estufa, com o objetivo de quantificar o material recolhido em cada intervalo de tempo.

Com relação ao uso de cal, a definição da concentração mássica a ser utilizada foi realizada a partir dos resultados da amostra mais eficiente de acordo com os ensaios de perda de massa por imersão, descrito no item 4.3.

Já com relação à aplicação da cal, definiu-se por realizar a remoção de cerca de 5 cm do material da camada superior das amostras sem a adição de cal, após a realização de seus ensaios de Inderbitzen Modificado, desagregá-los e deixá-los ao ar livre por pelo menos 24h, com o objetivo de reduzir suas umidades, o que facilita o manuseio.

Na sequência, tais materiais foram pesados em balança de precisão, adicionados cal a concentração mássica definida a partir dos ensaios de perda de massa por imersão, misturados até obtenção de homogeneização e mantidos ao ar livre por mais 24h, até que foram recolocados às caixas metálicas para reconformação das amostras, sendo na novamente saturadas na sequência, a partir do método citado anteriormente.

A Figura 22 apresenta um exemplo de material pré-aplicação de cal e a Figura 23 apresenta um exemplo de material pós-aplicação de cal, já homogeneizado.

Figura 22 – Material pré-aplicação de cal



Fonte: Autor (2025)

Figura 23 - Material pós-aplicação de cal



Fonte: Autor (2025)

Para a presente pesquisa, definiu-se por realizar o total de 5 ensaios para cada condição de material considerada, ou seja, com e sem aplicação de cal. Ressalta-se que em todos os ensaios realizados foram dispostos 3 potes coletores circundando as amostras, com o objetivo de verificar a intensidade média da precipitação e sua uniformidade, de acordo com o Coeficiente de conformidade de Christiansen (CUC).

Para cada ensaio realizado foi medida a massa seca de material recolhido (g), a taxa de erosão por intervalo de amostragem (g/cm^2), obtida através da divisão entre a massa seca de material recolhido e a área superficial da caixa, de 1200 cm^2 , a taxa de erosão por minuto ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$), obtida pela divisão entre a taxa de erosão por intervalo de recolha por 5 minutos, sendo esse o período de intervalo, e a taxa de erosão total (g/cm^2), definida pelo somatório da multiplicação entre a taxa de erosão por minuto e o intervalo de coleta do material, sendo considerada a taxa de erosão constante no último intervalo recolhido até 30 minutos.

A Tabela 5 resume as configurações definidas para os ensaios de Inderbitzen Modificado.

Tabela 5 – Configurações definidas para os ensaios de Inderbitzen Modificado

Declividade do talude	Condição do material	Pluviometria	Número de Ensaios
2H:1V (50%)	Sem cal	TR 10 anos e 30 minutos	5
	Com cal (Concentração mássica definida nos ensaios de perda de massa por imersão)		5

Fonte: Autor (2024)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização física das amostras

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos de massa específica dos grãos, umidade higroscópica, umidade natural e Limites de Atterberg, em concentrações mássicas.

Tabela 6 - Caracterização física da amostra de estéril

Massa Específica dos grãos (g/cm³)	3,36
Umidade higroscópica (%)	7,25
Umidade natural (%)	14,05
Limite de Liquidez - LL (%)	47,00
Limite de Plasticidade - LP (%)	32,00
Índice de Plasticidade - IP (%)	15,00

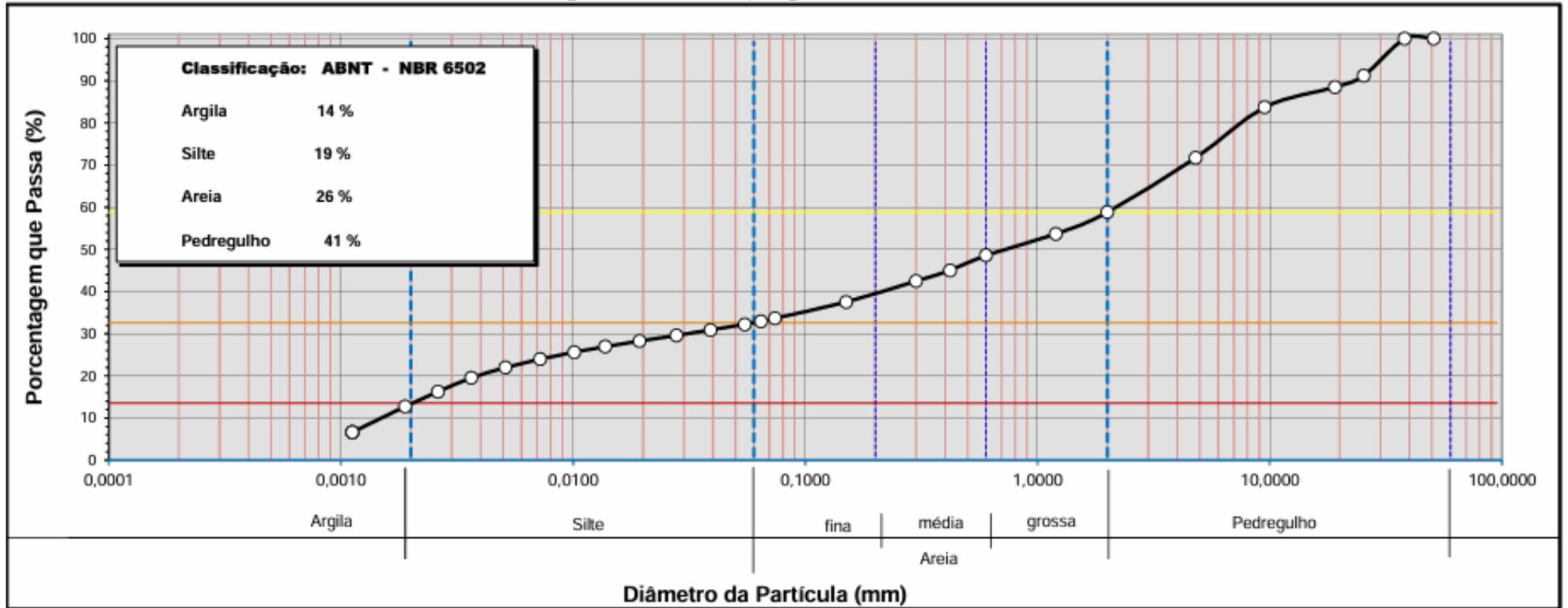
Fonte: Loctest (2024)

De acordo com as especificações que relacionam o Índice de Plasticidade (IP) com a eficiência do tratamento do material com cal, descritas no item 3.3, o estéril em estudo, de IP igual a 15%, atende aos valores dos indicadores estipulados pela *National Lime Association* e pela *U. S. Air Force Soil Stabilization Index System* (SSIS, 1976), que indicam que o material deve ter índice de plasticidade superior a 10%, e ao estipulado pelo Estado de Illinois, que indica que o material deve ter índice de plasticidade superior a 8%.

5.1.1 Granulometria

A Figura 24 apresenta a curva de distribuição granulométrica, sendo o estéril avaliado constituído por 14% de argila, 19% de silte, 26% de areia e 41% de pedregulho.

Figura 24 - Distribuição granulométrica



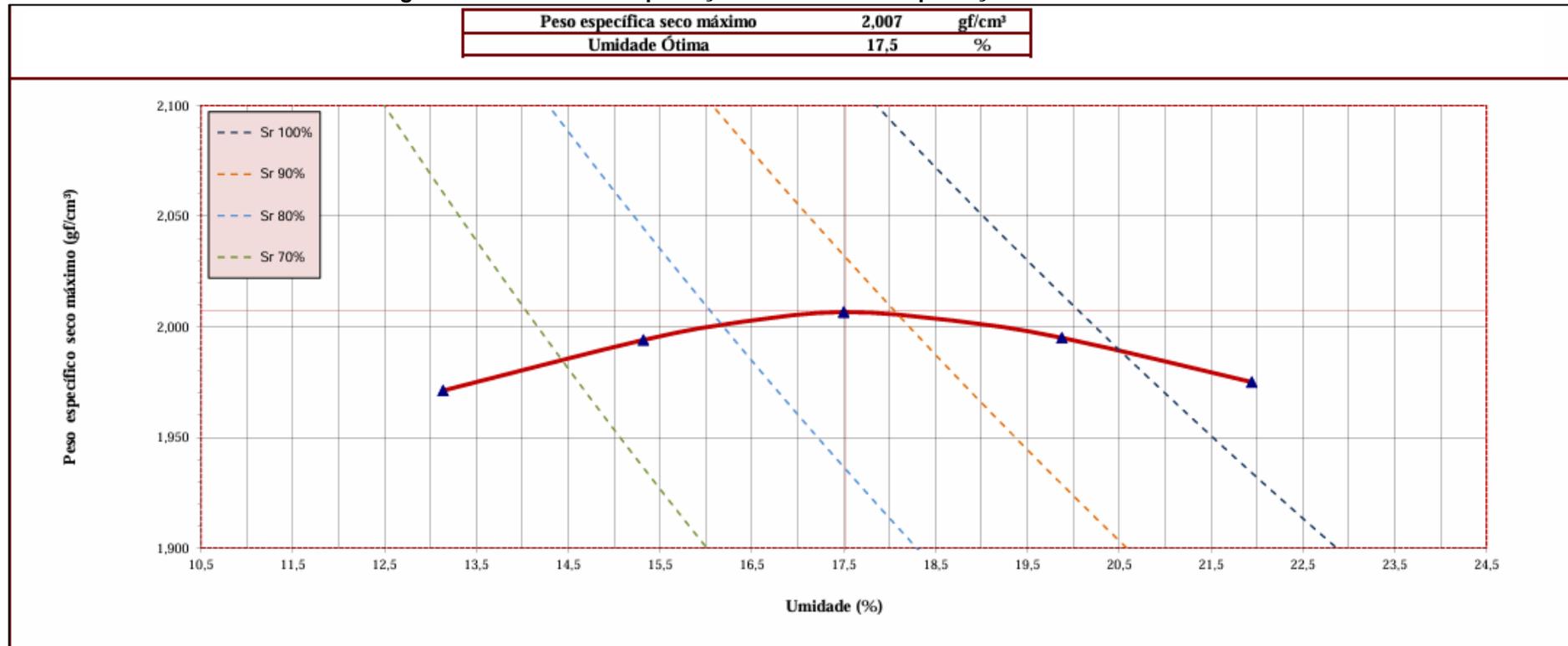
A curva granulométrica evidencia que se trata de um material classificado como pedregulho areno silto argiloso marrom avermelhado, sendo formado por 34% de partículas menores que 0,074mm, ou seja, 34% de material passante na peneira de nº 200 (\varnothing 0,074mm).

Conforme as especificações que relacionam a porcentagem de finos com a eficiência do tratamento com cal, descritas no item 3.3, o estéril estudado atende aos valores dos indicadores do Estado de Illinois, que indica que a porcentagem de argila deve ser superior a 7%, e o estéril avaliado possui 14%, e ao valor do indicador da *U. S. Air Force Soil Stabilization Index System* (SSIS, 1976), que indica que a porcentagem de material passado na peneira nº 200 deve ser superior a 25%, sendo que o estéril avaliado possui 34%.

5.1.2 Curva de compactação – Ensaio de Compactação Proctor Normal

A Figura 25 apresenta a curva de compactação obtida a partir do ensaio de Proctor Normal (ABNT NBR 7182:2016). A massa específica aparente seca máxima obtida é da ordem de 2,007g/cm³ e a umidade ótima de 17,5%.

Figura 25 - Curva de compactação - Ensaio de compactação Proctor Normal.



Fonte: Loctest (2024)

A umidade ótima de um material, obtida a partir do ensaio de compactação Proctor Normal, indica o teor de umidade no qual o material atinge sua máxima massa específica seca sob uma determinada energia de compactação, ou seja, representa a umidade ideal para a compactação eficiente do material, garantindo maior estabilidade e menor permeabilidade.

Ressalta-se que todos os resultados referentes aos ensaios realizados pelo laboratório Loctest encontram-se no Anexo A.

5.2 Ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão

Os apêndices A, B, C, D e E contêm as planilhas com os resultados dos ensaios compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras em diferentes porcentagens de cal.

Inicialmente, foram avaliadas 5 amostras em diferentes teores de umidade nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão. Na sequência, tendo em vista os resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal, realizou-se uma amostra adicional para cada porcentagem mássica de cal avaliada, em busca de teores de umidades inferiores à umidade ótima, já que as 5 amostras iniciais tinham teores de umidade superiores à 17,5%.

Com base nos valores obtidos, para as 5 amostras iniciais, nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, apresenta-se na Tabela 7 um resumo das perdas de massa por imersão (P_i), com os respectivos teores de umidade e massa específica aparente seca (MEAS), para os diferentes teores de cal utilizados.

Cabe mencionar que o fator de forma (F), apresentado na equação 16, foi igual a 1 em todos os casos, ou seja, o material se apresentou sempre solto na cápsula de alumínio retirada de dentro do recipiente do ensaio perda de massa por imersão.

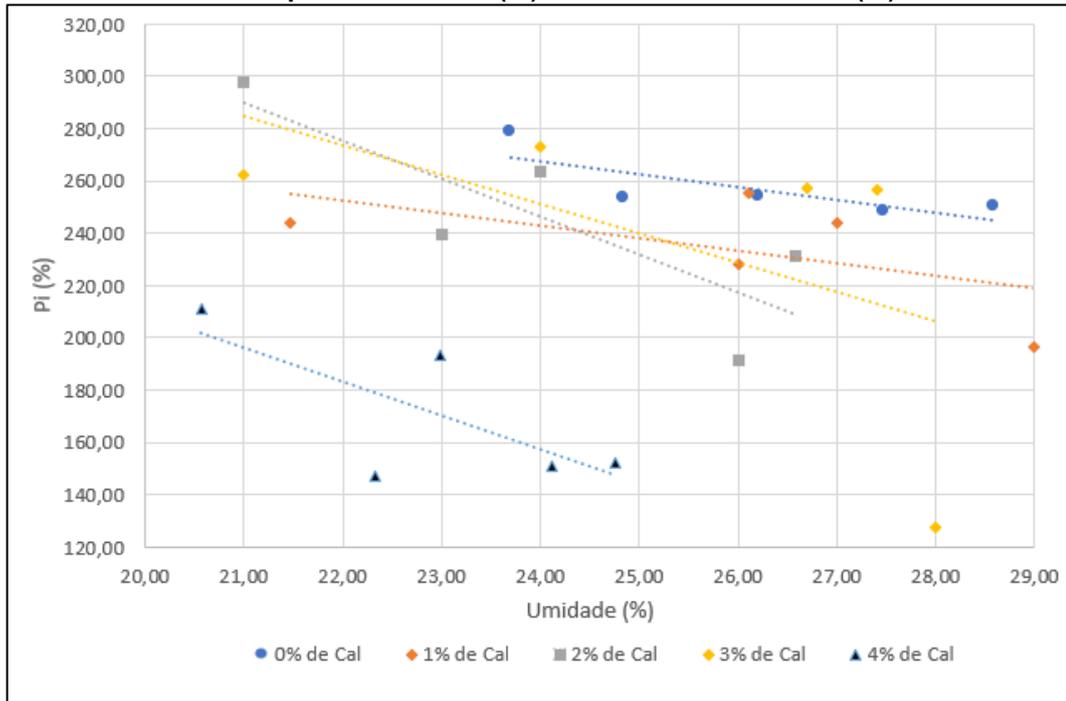
Na Figura 26 é apresentado o gráfico de perdas de massa por imersão (P_i) das amostras com diferentes teores de cal *versus* teor de umidade, elaborado a partir dos resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de Perda de massa por imersão (Pi) com os respectivos teores de umidades e massa específica aparente seca (MEAS) das amostras iniciais em diferentes teores de cal

Teor de Cal (%)	Umidade (%)	MEAS (g/cm ³)	Pi (%)
0	23,7	1,73	278,57
	24,9	1,68	253,15
	26,2	1,63	254,22
	27,5	1,62	248,37
	28,6	1,56	250,35
1	21,5	1,84	244,18
	26,0	1,63	228,34
	26,1	1,65	255,19
	27,0	1,65	244,05
	29,0	1,56	196,36
2	21,0	1,81	297,95
	23,0	1,72	239,66
	24,0	1,70	263,36
	26,0	1,65	191,12
	26,6	1,63	231,03
3	21,0	1,85	262,14
	24,0	1,74	272,96
	26,7	1,62	256,96
	27,4	1,63	256,73
	28,0	1,68	127,60
4	20,6	1,84	211,34
	22,3	1,75	147,31
	23,0	1,75	193,46
	24,1	1,71	151,23
	24,8	1,71	151,92

Fonte: Autor (2024)

Figura 26 - Perda de massa por imersão - Pi (%) versus teor de umidade (%) – Amostras Iniciais



Fonte: Autor (2024)

Já para as amostras adicionais, os resultados obtidos nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, estão resumidos na Tabela 8, em termos das perdas de massa (Pi), com os respectivos teores de umidade e massa específica aparente seca (MEAS), para os diferentes teores de cal utilizados.

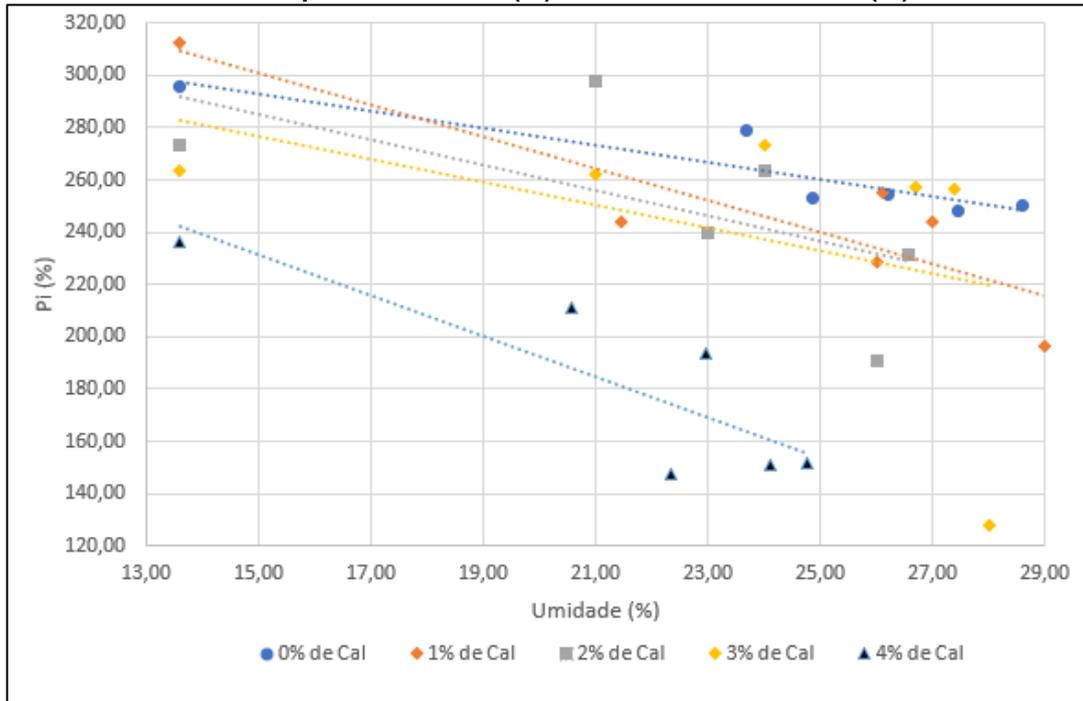
Na Figura 27 apresenta-se o gráfico de perdas de massa (Pi) das amostras com diferentes teores de cal *versus* teor de umidade, elaborado a partir dos resultados de todos os 6 ensaios para cada concentração mássica de cal avaliada.

Tabela 8 - Valores de Perda de massa por imersão (Pi) com os respectivos teores de umidades e massa específica aparente seca (MEAS) das amostras adicionais em diferentes teores de cal

Teor de Cal (%)	Umidade (%)	MEAS (g/cm ³)	Pi (%)
0	13,6	1,77	295,40
1	13,6	1,85	312,16
2	13,6	1,78	273,25
3	13,6	1,79	263,29
4	13,6	1,74	236,53

Fonte: Autor (2024)

Figura 27 - Perda de massa por imersão - Pi (%) versus teor de umidade (%) – Amostras Totais



Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados obtidos é possível perceber a tendência de redução da porcentagem de perda de massa por imersão tanto com o acréscimo de umidade, quanto com a adição de cal.

Apesar da preparação das amostras ter sido realizada conforme o indicado no item 4.2.1, houve certa dificuldade em controlar os teores de umidade dos ensaios. Isso pode ser explicado em virtude das amostras de estéril terem sido coletadas em campo durante um dia chuvoso, ou seja, essas foram armazenadas a diferentes teores de umidade, o que causou dificuldade de uniformidade entre as avaliações. Além disso, o armazenamento das amostras em sacos de polietileno por 24 horas pode ter sofrido impactos da temperatura ambiente, já que foram registradas ondas de calor na região do laboratório do CPH da UFMG durante a realização dos ensaios.

Dada a dispersão dos resultados apresentados na Figura 26 e na Figura 27, além da dificuldade de análise devido às influências da variação dos teores de umidade, buscou-se avaliar as perdas de massa por imersão (Pi) médias obtidas em cada amostra avaliada e verificar a redução encontrada a partir da aplicação de cada concentração mássica de cal testada, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Redução média de Pi por teor de cal aplicado

Teor de Cal (%)	Pi - Média (%)	Redução de Pi - Média (%)
0	263,34	-
1	246,72	16,63
2	249,39	13,95
3	239,95	23,40
4	181,96	81,38

Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados obtidos, fica claro que a redução de perda de massa é mais significativa para a amostra de concentração mássica de 4%, com média da ordem de 81% de redução, o que pode ser justificado pela composição granulométrica do material estudado, que necessita de maior concentração de cal para que ocorra sua reação em níveis desejados. Para as amostras com 1% e 2% e 3% de concentração de cal em massa, as reduções foram relativamente próximas entre si.

A aplicação da cal em campo, na proteção da superfície de pilhas de estéril, deve ser verificada frente a condições de umidade no ramo seco da curva de compactação, visto que muitas vezes não é simples hidratar o material *in situ*, o que demanda a utilização de caminhões pipa, sendo a captação de água nem sempre possível.

Assim, levando em consideração as condições de campo das pilhas de estéril, avalia-se especificamente os resultados obtidos para as amostras adicionais, com teor de umidade de 13,6%, apresentados na Tabela 8. Observa-se, portanto, que a perda de massa foi reduzida de cerca de 295%, para a amostra sem aplicação de cal, para cerca de 263% e 237%, por volta de 30% e 60% menores, para teores de cal de 3% e 4% em massa, respectivamente.

Portanto, em todas as análises realizadas, fica claro o destaque da eficiência, para as amostras de estéril avaliadas, do uso de cal em concentração mássica de 4%, sendo essa a utilizada nos ensaios de Inderbitzen Modificado.

5.3 Calibração do simulador de chuvas

5.3.1 Coeficiente de conformidade de Christiansen

Foi avaliado o Coeficiente de conformidade de Christiansen, para a verificação da uniformidade da precipitação que ocorre em toda a superfície de captação. De posse

dos valores de volume, fez-se o tratamento estatístico conforme apresentado na equação 1.

Segundo Tossel et al. (1987), valores de CUC superiores a 80% são considerados suficientes para um simulador de chuvas. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para CUC, em porcentagem, para a região de interesse sob o simulador de chuvas, ou seja, entre os potes coletores 10 a 15.

Tabela 10 - Resultados para CUC entre os potes 10 a 15 por teste realizado

Teste	CUC (%)
Teste 1	93,16
Teste 2	94,13
Teste 3	95,59
Teste 4	95,63
Teste 5	94,74
Teste 6	93,06
Média	94,39

Fonte: Autor (2024)

Portanto, obteve-se o valor médio de 94,39% para os seis testes realizados, sendo esse considerado suficiente para um simulador de chuvas, conforme Tossel et al. (1987).

5.3.2 Calibração da intensidade real e da intensidade média da chuva simulada

A Tabela 11 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a verificação da calibração do simulador de chuvas para 6 testes realizados, a partir do método descrito no item 4.4.2. Conforme mencionado, os testes tiveram 6 minutos de duração, com exceção do teste 2, que teve duração de 10 minutos, a fim de avaliação da constância do simulador frente a um período mais longo de simulação.

Tabela 11 - Resumo dos resultados de verificação da intensidade do simulador de chuvas

Pote		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Teste 1	Volume coletado (L)	0,120	0,108	0,102	0,104	0,094	0,082	0,088	0,092	0,076	0,080	0,074	0,072	0,090	0,080	0,072	
	Intensidade real (mm/h)	152,79	137,51	129,87	132,42	119,68	104,41	112,05	117,14	96,77	101,86	94,22	91,67	114,59	101,86	91,67	
	Intensidade média Potes 1 a 15 (mm/h)									113,23							
	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm/h)									99,31							
Teste 2	Volume coletado (L)	0,200	0,176	0,168	0,166	0,152	0,140	0,142	0,150	0,128	0,132	0,122	0,116	0,140	0,124	0,116	
	Intensidade real (mm/h)	152,79	134,45	128,34	126,81	116,12	106,95	108,48	114,59	97,78	100,84	93,20	88,62	106,95	94,73	88,62	
	Intensidade média Potes 1 a 15 (mm/h)									110,62							
	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm/h)									95,49							
Teste 3	Volume coletado (L)	0,130	0,118	0,112	0,098	0,102	0,092	0,092	0,092	0,082	0,084	0,080	0,076	0,088	0,080	0,076	
	Intensidade real (mm/h)	165,52	150,24	142,60	124,78	129,87	117,14	117,14	117,14	104,41	106,95	101,86	96,77	112,05	101,86	96,77	
	Intensidade média Potes 1 a 15 (mm/h)									119,01							
	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm/h)									102,71							
Teste 4	Volume coletado (L)	0,138	0,118	0,112	0,112	0,106	0,092	0,092	0,094	0,084	0,086	0,082	0,078	0,086	0,082	0,074	
	Intensidade real (mm/h)	175,71	150,24	142,60	142,60	134,96	117,14	117,14	119,68	106,95	109,50	104,41	99,31	109,50	104,41	94,22	
	Intensidade média Potes 1 a 15 (mm/h)									121,89							
	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm/h)									103,56							
Teste 5	Volume coletado (L)	0,134	0,118	0,108	0,112	0,098	0,090	0,094	0,096	0,082	0,086	0,082	0,078	0,090	0,084	0,074	
	Intensidade real (mm/h)	170,61	150,24	137,51	142,60	124,78	114,59	119,68	122,23	104,41	109,50	104,41	99,31	114,59	106,95	94,22	
	Intensidade média Potes 1 a 15 (mm/h)									121,04							

Pote		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm/h)									104,83						
Teste 6	Volume coletado (L)	0,144	0,126	0,118	0,122	0,104	0,092	0,098	0,088	0,080	0,088	0,080	0,074	0,092	0,082	0,074
	Intensidade real (mm/h)	183,35	160,43	150,24	155,34	132,42	117,14	124,78	112,05	101,86	112,05	101,86	94,22	117,14	104,41	94,22
	Intensidade média Potes 1 a 15 (mm/h)									124,10						
	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm/h)									103,98						

Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados obtidos nos 6 testes realizados, verifica-se que a intensidade média mínima e máxima, entre os potes 1 a 15, foram de 110,62 mm h⁻¹ e de 124,10 mm h⁻¹, respectivamente.

Porém, dado o tamanho da caixa coletora a ser utilizada nos ensaios de Inderbitzen Modificado, verificou-se que é possível utilizar a região ocupada por apenas 6 coletores. Dessa forma, avaliou-se também a intensidade média mínima e máxima apenas entre os potes 10 a 15, sendo essas de 95,49 mm h⁻¹ e de 104,83 mm h⁻¹, respectivamente. Tais valores são satisfatórios para a intensidade de chuva desejada, relativa ao período de retorno de 10 anos e 30 minutos de duração, de 96 mm h⁻¹.

Para a obtenção de tais resultados, contou-se com uma bomba hidráulica de potência de $\frac{3}{4}$ CV e, na saída da tubulação, de diâmetro de 2,54 cm, para o aspersor, de diâmetro interno de abertura de 1 cm, utilizou-se uma válvula de gaveta para controlar a vazão de saída, de forma que essa foi ajustada até que a correta calibração foi alcançada.

5.3.3 Diâmetro médio das gotas

Para a determinação do diâmetro médio das gotas empregou-se o método da farinha, proposto por Hudson (1964), conforme descrito no item 4.4.2. É importante citar que esse método foi aplicado apenas após a calibração da intensidade média da chuva no simulador de chuvas utilizado.

A Tabela 12 apresenta os resultados para a massa total dos grânulos e para o número de grânulo obtidos. Já a Figura 28 apresenta uma fotografia do aspecto final dos grânulos de farinha secos.

Tabela 12 – Resultados obtidos a partir da aplicação do método da farinha – Simulador de chuvas calibrado para a intensidade de 96 mm h⁻¹

Abertura da peneira	4,75mm	4,00mm	3,35mm	2,00mm	1,70mm	1,18mm
Massa do pote + grânulos de farinha (g)	8,64	7,13	19,69	52,86	19,93	19,63
Massa do pote (g)	8,56	6,89	19,28	50,4	19,4	16,43
Massa total dos grânulos de farinha (g)	0,08	0,24	0,41	2,46	0,53	3,2
Número de grânulos	1	5	14	251	125	1620

Fonte: Autor (2024)

Figura 28 – Grânulos de farinha secos



Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados obtidos foi possível relacionar a massa do grânulo com a massa da gota, equação 3, e enfim determinar o diâmetro médio das gotas, equação 4, e o volume de água por peneira, equação 5. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos.

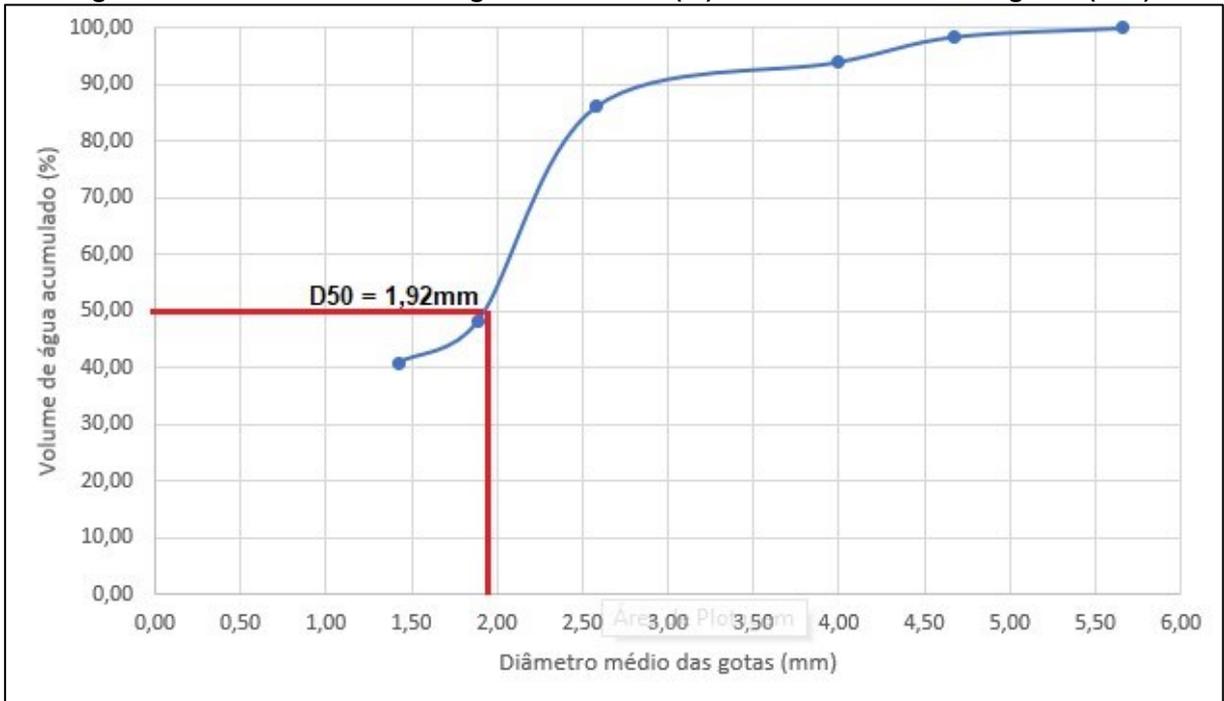
Tabela 13 – Resultados para diâmetro médio das gotas e volume de água por peneira

Abertura da peneira	1,18mm	1,70mm	2,00mm	3,35mm	4,00mm	4,75mm
Número de grânulos	1620	125	251	14	5	1
Massa total dos grânulos (g)	3,20	0,53	2,46	0,44	0,24	0,08
Massa por grânulo $\times 10^{-3}$ (g)	1,98	4,24	9,80	31,43	48,00	80,00
Relação entre as massas do grânulo e da gota	0,76	0,84	0,92	1,06	1,12	1,19
Massa da gota $\times 10^{-3}$ (g)	1,51	3,54	9,04	33,32	53,53	94,81
Diâmetro médio das gotas (mm)	1,42	1,89	2,58	3,99	4,68	5,66
Volume de água da gota (mm ³)	1,51	3,54	9,04	33,32	53,53	94,81
Volume de água (mm ³)	2439,59	442,57	2269,97	466,51	267,63	94,81
Volume de água (%)	40,79	7,40	37,95	7,80	4,47	1,59
Volume de água acumulado (%)	40,79	48,19	86,14	93,94	98,41	100,00

Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados obtidos, foi possível traçar a curva de volume de água acumulado por peneira calculado, em %, e o diâmetro médio da gota retida em cada peneira, em mm, sendo possível determinar o D50, ou seja, o diâmetro médio apresentado por 50% das gotas para dada intensidade. A Figura 29 apresenta o gráfico obtido, em que é possível verificar o valor do D50 de 1,92mm.

Figura 29 - Gráfico Volume de água acumulado (%) x Diâmetro médio das gotas (mm)



Fonte: Autor (2024)

Segundo Miguntanna (2009), o D50 para chuvas naturais está na faixa de 2,0mm-2,5mm. Dessa forma, o valor de D50 obtido, de 1,92mm, está muito próximo à faixa de referência para chuvas naturais, portanto, tal resultado é considerado suficiente para a proposta da presente pesquisa.

5.3.4 Altura e tempo de queda das gotas

A altura de queda foi medida entre a saída do aspersor e a base dos recipientes coletores, sendo essa de 2,50 m.

Já o tempo de queda foi calculado a partir da equação 6 e o coeficiente de atrito (C) calculado a partir da equação 7, sendo os resultados obtidos por peneira e para o D50 apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos cálculos dos tempos de queda das gotas

Abertura da peneira	1,18 mm	1,70 mm	D50=1,92 mm	2,00 mm	3,35 mm	4,00 mm	4,75 mm
Altura de queda (m)	2,50						
Diâmetro médio das gotas (mm)	1,42	1,89	1,92	2,58	3,99	4,68	5,66
Coeficiente de atrito - C	0,35	0,24	0,24	0,17	0,12	0,12	0,11
Tempo de queda (s)	0,82	0,79	0,79	0,77	0,75	0,75	0,75

Fonte: Autor (2024)

5.3.5 Velocidade terminal e energia cinética das gotas

A velocidade terminal e a energia cinética das gotas foram calculadas conforme apresentado na equação 8 e na equação 9, respectivamente, para cada diâmetro médio de gota obtido. A Tabela 15 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 15 – Valores de velocidade terminal e energia cinética das gotas

Abertura da peneira (mm)	1,18	1,70	2,00	3,35	4,00	4,75
Diâmetro médio das gotas (mm)	1,42	1,89	2,58	3,99	4,68	5,66
Velocidade terminal das gotas (m/s)	5,31	6,28	7,29	8,41	8,69	8,94
Energia cinética por gota (J)	2,12E-05	6,97E-05	2,40E-04	1,18E-03	2,02E-03	3,79E-03
Nº de grânulos	1620	125	251	14	5	1
Energia cinética total por peneira (J)	0,034	0,009	0,060	0,016	0,010	0,004
Energia cinética total (J)	0,134					
Volume de água (mm³)	2439,59	442,57	2269,97	466,51	267,63	94,81
Volume de água total (mm³)	5981,09					
Energia cinética total por volume total de água - EC_{média} (J/mm/m²)	22,37					

Fonte: Autor (2024)

Segundo Van Dijk et al. (2002), a energia cinética de chuvas naturais com intensidade superiores a 40 mm/h é da ordem de 25 J/mm/m². O limite proposto por Tossel et al. (1987) entre a relação de energia cinética das chuvas produzidas por simuladores de chuvas e das chuvas naturais é de no mínimo 75%.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o valor médio de energia cinética das gotas foi de 22,37 J/mm/m², ou seja, com relação de 89,48% da energia cinética das chuvas naturais, sendo essa superior ao valor mínimo de 75% proposto por Tossel et al. (1987). Portanto, o simulador de chuvas atende aos critérios estabelecidos para a avaliação da energia cinética para a presente pesquisa.

5.3.6 Fator Erosividade (R) da chuva simulada

A partir dos valores de intensidade média da chuva simulada para a região de interesse sob o simulador de chuvas, ou seja, entre os potes 10 a 15, apresentados na Tabela 12, é possível calcular o fator Erosividade (R) para um evento chuvoso de 30 minutos de duração, sendo esse o índice de erosão (EI30), conforme proposto na equação universal de perda de solos (USLE) e descrito no item 3.5.1 da presente dissertação.

Para isso, a Tabela 16 resume os resultados obtidos de intensidade média em cada teste de calibração, entre os potes 10 e 15, com a média de seus valores. A partir de então, utilizou-se o valor de energia cinética da chuva, de 0,2237 MJ/ha/mm, obtido no item 5.3.5 a partir da equação 9, além da avaliação do valor de energia cinética da chuva obtido por meio da equação 11, como forma de comparação. Obteve-se, então, os resultados de EI30, a partir da equação 12, considerando o valor médio das intensidades médias obtidas durante a calibração do simulador de chuvas, sendo tais resultados apresentados na Tabela 17.

Tabela 16 – Resumos dos resultados de intensidade média obtidos entre os potes 10 a 15

Teste	Intensidade média Potes 10 a 15 (mm h ⁻¹)
Teste 1	99,31
Teste 2	95,49
Teste 3	102,71
Teste 4	103,56
Teste 5	104,83
Teste 6	103,98
Média	101,65

Fonte: Autor (2024)

Tabela 17 – Resultados obtidos de Energia Cinética e de EI30 (Fator R)

Referências	Energia Cinética (MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹)	EI30 – Fator R (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹)
Equação 9 e Equação 12	0,2237	22,74
Equação 11 e Equação 12	0,2954	30,03

Fonte: Autor (2024)

A partir dos resultados obtidos, é possível verificar que a equação 11 apresenta valores mais conservadores de energia cinética com relação à equação 9. Tais resultados eram esperados tendo em vista que a equação 11 utiliza apenas um dado para obtenção da energia cinética, a intensidade da chuva (mm/h), enquanto a equação 9 depende de uma série de dados obtidos durante a calibração do simulador de chuvas, como massa média, diâmetro médio (D50) da distribuição das gotas, velocidade terminal das gotas, entre outros.

Na presente pesquisa, dado que há posse de dados suficientes para obtenção da energia cinética através da calibração do simulador de chuvas, definiu-se como pertinente os resultados obtidos a partir da equação 9 e, conseqüentemente, o valor do fator Erosividade (R) de 22,74 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

5.4 Ensaio de Inderbitzen Modificado

5.4.1 Ensaio sem a aplicação de cal

Inicialmente foram realizados testes de sensibilidade com o objetivo de avaliar o tempo necessário para a realização dos experimentos, ou seja, se de fato seriam necessários os 30 minutos de duração ou se seria possível reduzir esse intervalo. Também foram avaliadas a capacidade do equipamento, como volume do tanque de armazenamento de água utilizado para o simulador de chuvas frente ao período de realização dos ensaios e o período necessário de utilização da estufa para a secagem completa do material erodido.

Como resposta, foi obtido que o período de 25 minutos era suficiente para a realização dos ensaios, de forma que o equipamento funciona dentro de suas condições ideais e a quantidade material erodido encontra-se em uma tendência de estabilização. Com relação à estufa, com a recolha do estéril erodido a cada 5 minutos, foi verificada a necessidade de sua utilização a 110°C por 72 horas para a completa secagem do material recolhido, tendo em vista o volume de água presente em conjunto no balde coletor.

Após as análises de sensibilidade, foram ensaiadas 5 amostras de estéril sem a aplicação de cal. A Figura 30 apresenta um exemplo de amostra durante a realização dos ensaios de Inderbitzen Modificado e a Figura 31 apresenta um registro do material seco em estufa.

Figura 30 – Exemplo de amostra durante a realização dos ensaios sem a aplicação de cal



Fonte: Autor (2025)

Figura 31 – Registro do material recolhido seco após 72h em estufa a 110°C



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 18 apresenta os resultados de intensidade média da precipitação e sua uniformidade, de acordo com o Coeficiente de conformidade de Christiansen (CUC) para os 3 potes coletores circundando as amostras durante a realização dos ensaios.

Tabela 18 – Verificação da intensidade média da precipitação e sua uniformidade por ensaio

Pote		1	2	3
Ensaio 1	Volume coletado (L)	0,352	0,380	0,290
	Intensidade real (mm/h)	106,57	115,05	87,80
	Intensidade média (mm/h)			103,14
	CUC (%)			90,08
Ensaio 2	Volume coletado (L)	0,342	0,352	0,284
	Intensidade real (mm/h)	108,86	112,05	90,40
	Intensidade média (mm/h)			103,77
	CUC (%)			92,91
Ensaio 3	Volume coletado (L)	0,338	0,340	0,240
	Intensidade real (mm/h)	102,53	103,14	72,80
	Intensidade média (mm/h)			92,83
	CUC (%)			88,67
Ensaio 4	Volume coletado (L)	0,310	0,406	0,278
	Intensidade real (mm/h)	93,79	122,84	84,11
	Intensidade média (mm/h)			100,25
	CUC (%)			84,04
Ensaio 5	Volume coletado (L)	0,396	0,366	0,260
	Intensidade real (mm/h)	133,96	123,81	87,95
	Intensidade média (mm/h)			115,24
	CUC (%)			84,21

Fonte: Autor (2025)

Portanto, a intensidade média global, para os 5 ensaios realizados, foi de 103,04 mm/h e o CUC global foi de 87,98% (>80%), ou seja, satisfatórios para os fins desta pesquisa.

Os resultados obtidos para os ensaios de Inderbitzen Modificado sem aplicação de cal estão apresentados na Tabela 19. Ressalta-se que foi considerada a taxa de erosão constante no último intervalo recolhido até 30 minutos para avaliação.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de Inderbitzen Modificado para as amostras sem cal

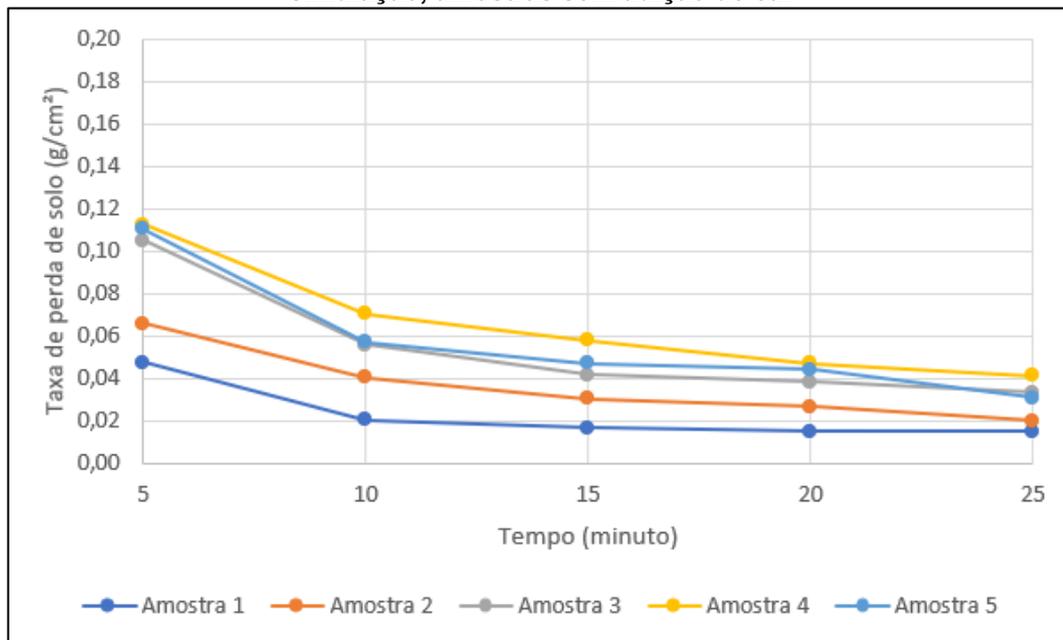
Resultados obtidos:	Intervalo de amostragem				
	0 a 5 minutos	5 a 10 minutos	10 a 15 minutos	15 a 20 minutos	20 a 25 minutos
Amostra 1					
Massa seca material (g)	56,83	24,47	20,25	17,89	18,30
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,0474	0,0204	0,0169	0,0149	0,0153
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0095	0,0041	0,0034	0,0030	0,0031
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,1300				
Amostra 2					
Massa seca material (g)	79,04	48,63	36,61	32,00	24,24
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,0659	0,0405	0,0305	0,0267	0,0202
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0132	0,0081	0,0061	0,0053	0,0040
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,2040				
Amostra 3					
Massa seca material (g)	125,86	67,00	50,00	45,80	39,97
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1049	0,0558	0,0417	0,0382	0,0333
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0210	0,0112	0,0083	0,0076	0,0067
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,3072				
Amostra 4					
Massa seca material (g)	135,06	84,59	69,33	56,46	49,72
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1126	0,0705	0,0578	0,0471	0,0414
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0225	0,0141	0,0116	0,0094	0,0083
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,3707				
Amostra 5					
Massa seca material (g)	132,74	68,65	56,36	53,23	37,28
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1106	0,0572	0,0470	0,0444	0,0311

Resultados obtidos:	Intervalo de amostragem				
	0 a 5 minutos	5 a 10 minutos	10 a 15 minutos	15 a 20 minutos	20 a 25 minutos
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0221	0,0114	0,0094	0,0089	0,0062
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,3213				

Fonte: Autor (2025)

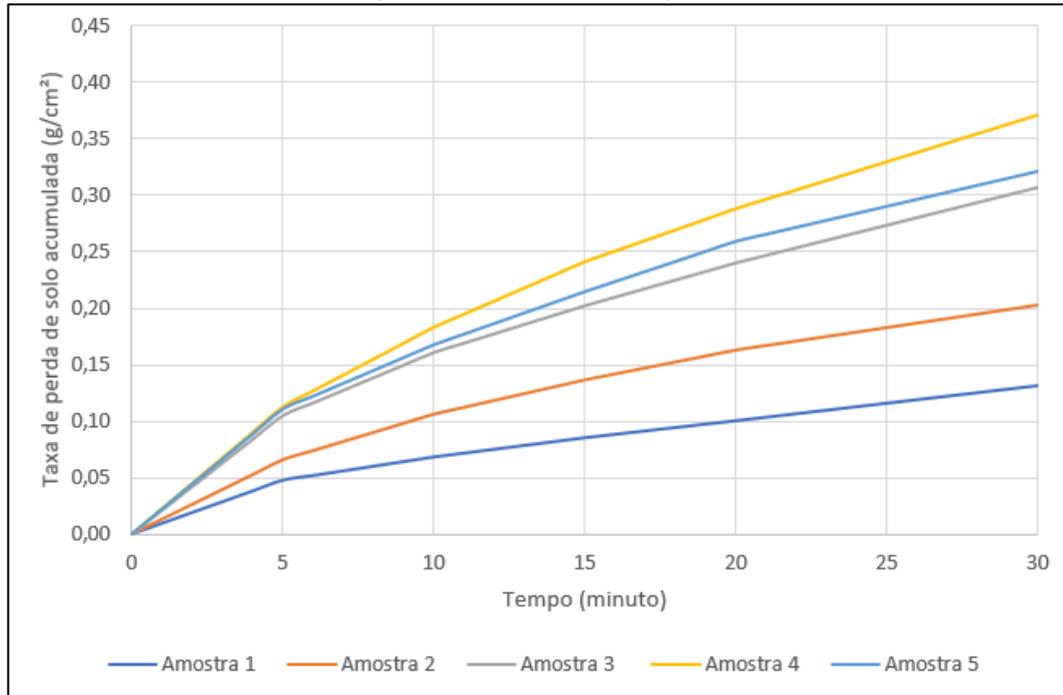
Para melhor visualização e interpretação dos resultados foram plotados gráficos que relacionam a taxa de erosão por intervalo de recolha por tempo de simulação e a taxa de erosão acumulada por tempo de simulação de cada amostra ensaiada, apresentados na Figura 32 e na Figura 33, respectivamente.

Figura 32 – Resultados por amostra da taxa de perda de solo por intervalo por tempo de simulação, amostras sem adição de cal



Fonte: Autor (2025)

Figura 33 - Resultados por amostra da taxa de perda de solo acumulada por tempo de simulação, amostras sem adição de cal



Fonte: Autor (2025)

A partir dos resultados, é possível perceber uma maior perda de solo nos 5 primeiros minutos, reduzindo progressivamente nos intervalos subsequentes, com uma certa tendência a estabilização entre as medições nos intervalos de 20 e 25 minutos. Esse fato pode ser explicado pela maior porção de material fino na camada superficial no início do experimento, que são prontamente erodidos no início do evento de precipitação. A Figura 34 apresenta a fotografia de uma amostra após a realização do experimento, nela é possível perceber a presença de material com aspecto mais granular retido na caixa, o que corrobora com tal explicação.

Figura 34 – Material retido na caixa após realização de um experimento de Inderbitzen Modificado



Fonte: Autor (2025)

Os valores de perda de solo total estão resumidos na Tabela 20, que apresenta a média geral dos resultados dos ensaios, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), definido como a razão entre o desvio padrão e a taxa de erosão total média (PEARSON, 1896).

Tabela 20 – Resumos dos resultados de perda de solo total – Amostras sem cal

Amostras	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Taxa de erosão total (g/cm ²)	0,1300	0,2040	0,3072	0,3707	0,3213
Taxa de erosão total média (g/cm²)	0,2666				
Desvio padrão	0,0975				
Coeficiente de variação (%)	36,58				

Fonte: Autor (2025)

Ao interpretar os resultados, percebe-se uma dispersão maior nas amostras 1 e 2 com relação às demais, o que resultou em um coeficiente de variação de 36,58%, que consiste em avaliação dos dados como de alta variabilidade. A dispersão obtida nas amostras 1 e 2 pode ser explicada pela heterogeneidade granulométrica do estéril ensaiado, que no caso desses dois ensaios pode ter contido parcelas mais grosseiras do material.

Como referências para os resultados obtidos, pode-se citar os estudos realizados por Thoma et al. (2020) e por Soares et al. (2019). O primeiro realizou ensaios de Inderbitzen Modificado para um solo do tipo Neossolo Litólico, sem aplicação de cobertura vegetal, sob a intensidade da chuva simulada de 300 mm/h, 30 minutos de duração e declividades das amostras de 5, 17,5 e 35%, obtendo como resultados perdas de solo de 0,32, 0,37 e 0,75 g/cm². Já o segundo realizou ensaios de Inderbitzen Modificado, com intensidade da chuva simulada de 56,04 mm/h, 120 minutos de duração e declividade das amostras de 20%, e obteve valores de perda de solo de 0,034 e 0,047 g/cm² nos horizontes B e C de um Latossolo, respectivamente. Quando avaliado os horizontes B e C de um Argissolo, com declividade das amostras de 45%, os valores obtidos foram de 0,039 e 0,051 g/cm², respectivamente. Em ambos os estudos citados, as amostras se encontravam em suas umidades naturais pré realização dos ensaios.

Cabe ressaltar que a diferença de tipo de material avaliado, de teor de umidade pré realização dos ensaios, de intensidade e duração da chuva simulada, de declividade, entre outros fatores adotados pode alterar significativamente os resultados, sendo tais estudos citados apenas a fim de referências de literatura de respostas obtidas para ensaios semelhantes já realizados.

5.4.1.1 Fator erodibilidade (K) do material estudado

Em busca de maiores referências para os resultados obtidos nos ensaios de Inderbitzen Modificado, calculou-se o fator erodibilidade (K) a partir de equação universal de perda de solos (USLE) com a aplicação da determinação direta.

A erodibilidade do solo expressa sua susceptibilidade à erosão, correspondendo à uma propriedade intrínseca que depende da sua capacidade de infiltração e de armazenamento da água, assim como das forças de resistência aos efeitos da chuva e do escoamento superficial (PRUSKI, 2009).

Para a determinação do fator K, é necessária a determinação dos fatores Comprimento do Declive (L) de Grau do Declive (S). A partir da aplicação da equação 14, dado o valor de S de 50% nos ensaios de Inderbitzen Modificado realizados e o

valor de L de 40 cm nas caixas metálicas utilizadas para a conformação das amostras, chegou-se ao resultado de LS de 2,51.

Com relação ao fator de erosividade (R) da chuva simulada, utilizou-se o valor obtido no item 5.3.6, de 22,74 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹. Cabe ressaltar que o fator R é obtido pela soma dos índices de erosão (EI30) de eventos ao longo de um ano (ou meses). A abordagem aqui utilizada é uma tentativa de determinar o fator K tendo em vista a chuva produzida no simulador de chuvas utilizado, ou seja, com a consideração apenas do EI30 simulado.

Em pesquisas futuras, sugere-se que essa avaliação seja realizada considerando diferentes eventos de chuva (intensidade, duração, distribuição das lâminas no tempo), para que seja possível ter uma referência média do valor de K. Além disso, os experimentos foram realizados com as amostras saturadas, sendo também sugerida a avaliação em diferentes teores de umidade, já que esses influenciam nos resultados.

Assim, a partir do fator de erosividade (R) da chuva simulada, de 22,74 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, obtido no item 5.3.6, e do valor médio da taxa de erosão de 0,2666 g/cm², apresentado na Tabela 20, além de remanejar a equação universal de perda de solos, equação 10, de forma a isolar o fator K e ajuste de unidades, chegou-se ao resultado de 0,4677 t h MJ⁻¹ mm⁻¹.

Como forma de interpretação do resultado obtido, ressaltando que para material estéril de atividades de mineração no Brasil pouco se tem de informação com relação à erodibilidade, buscou-se na literatura referências da avaliação em solos. Para tanto, primeiramente foi consultado o mapa de solos elaborado pela Embrapa e publicado pelo IBGE (IBGE – EMBRAPA, 2001), em busca da classificação do solo predominante na região de retirada das amostras de estéril, segundo o sistema brasileiro de classificação de solos, sendo obtida a classificação de Cambissolo Háplico.

De acordo com a EMBRAPA (2018), o Cambissolo Háplico é um tipo de solo jovem, pouco desenvolvido, que apresenta um horizonte B incipiente (com início de alterações químicas e físicas), mas ainda sem diferenciação clara de horizontes

pedogenéticos bem desenvolvidos. É um solo muito comum em áreas de relevo mais acidentado e em regiões onde o intemperismo ainda não teve tempo suficiente para criar horizontes bem definidos.

Tendo como base o tipo de solo predominante na região das amostras de estéril e sua classificação, foi possível obter na literatura valores de erodibilidade para solos de características semelhantes. Há diversos trabalhos que estimam a erodibilidade dos solos brasileiros considerando diferentes níveis categóricos existente no sistema brasileiro de classificação de solos. Nesta pesquisa, buscou-se identificar a erodibilidade de solos até o 2º nível categórico, ou seja, classificação como Cambissolo Háplico, estendendo-a aos demais níveis sempre que possível relacionar as condições granulométricas e buscando o tipo de relevo como ondulado ou forte ondulado, quando essa informação está presente.

Tabela 21 – Valores de referência de erodibilidade para solos classificados como Cambissolo Háplico

Classificação do solo	Erodibilidade (t h MJ⁻¹ mm⁻¹)	Referência
Cambissolo háplico, Tb distrófico, textura média, relevo forte ondulado	0,0536	Corrêa; Moraes; Pinto (2015)
Cambissolo háplico, Ta distrófico, textura média, relevo ondulado a forte ondulado	0,0403	
Cambissolo háplico, Ta eutrófico, textura média, relevo ondulado a forte ondulado	0,0512	
Cambissolo háplico, distrófico, típico (Estado de São Paulo)	0,0254 (horizonte A) - 0,0186 (horizonte B)	Mannigel et al., (2002)
Cambissolo háplico, distrófico, textura argilosa, típico (Lavras/MG)	0,0355	Silva et al. (2009)
Cambissolo háplico, distrófico, latossólico (Estado de São Paulo)	0,0433 (horizonte A) – 0,0267 (horizonte B)	Mannigel et al., (2002)
Cambissolo háplico Tb distrófico com Neossolo Litólico distrófico com Afloramento de Rocha, relevo forte ondulado e montanhoso.	0,046 - Valor adotado na bacia hidrográfica do Ribeirão do Carmo	Souza; Sobreira (2017)

Fonte: Autor (2025)

A partir dos valores de referência apresentados na Tabela 21, é possível analisar que os resultados obtidos para a erodibilidade do estéril avaliado na presente pesquisa, de 0,4677 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, estão uma ordem de grandeza acima dos valores de bibliografia para o solo predominante na região de obtenção das amostras. Portanto, tais resultados indicam que a disposição do estéril em pilhas, com as configurações adotadas na presente pesquisa, pode causar incrementos na erodibilidade do material em cerca de 10 vezes acima do esperado para o solo local em suas condições naturais.

É possível analisar que os valores obtidos para o fator K possuem grande influência da declividade avaliada, de 50%, da intensidade da chuva simulada, associada ao período de retorno de 10 anos e 30 minutos de duração, do teor de umidade da amostra, considerada saturada nos experimentos, e da falta de compactação para o material ensaiado. Porém, buscou-se, na presente pesquisa, chegar a valores máximos de erodibilidade para o estéril dada as configurações de campo de uma pilha.

É comum em pilhas de estéril que os materiais sejam compactados pelo tráfego dos equipamentos, sem controle de compactação, o que dificulta a reprodução dessa avaliação em laboratório.

Sugere-se que, em pesquisas futuras, as amostras sejam avaliadas a diferentes graus de compactação, de forma a verificar tal efeito na erodibilidade do material. Pode-se utilizar, por exemplo, o método do frasco de areia ao extrair as amostras em campo, a fim de se determinar o grau de compactação que a construção da pilha impôs, sendo possível reproduzi-lo em laboratório.

Além disso, faz-se necessário, em pesquisas futuras, a reprodução de tais experimentos em campo, a fim de validar os resultados obtidos em laboratório.

5.4.2 Ensaio com a aplicação de cal

Foram ensaiadas 5 amostras de estéril com a aplicação de cal, conforme descrito no item 4.5. A Figura 35 apresenta um exemplo de amostra durante a realização dos ensaios de Inderbitzen Modificado.

Figura 35 - Exemplo de amostra durante a realização dos ensaios com a aplicação de cal



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 22 apresenta os resultados de intensidade média da precipitação e sua uniformidade, de acordo com o Coeficiente de conformidade de Christiansen (CUC) para os 3 potes coletores circundando as amostras durante a realização dos ensaios.

Tabela 22 – Verificação da intensidade média da precipitação e sua uniformidade por ensaio

Pote		1	2	3
Ensaio 1	Volume coletado (L)	0,378	0,382	0,308
	Intensidade real (mm/h)	114,36	115,57	93,19
	Intensidade média (mm/h)			107,71
	CUC (%)			89,58
Ensaio 2	Volume coletado (L)	0,376	0,376	0,308
	Intensidade real (mm/h)	114,14	114,14	93,49
	Intensidade média (mm/h)			107,26
	CUC (%)			90,25
Ensaio 3	Volume coletado (L)	0,336	0,362	0,268
	Intensidade real (mm/h)	101,72	109,60	81,14
	Intensidade média (mm/h)			97,49
	CUC (%)			89,786
Ensaio 4	Volume coletado (L)	0,378	0,380	0,288
	Intensidade real (mm/h)	114,14	114,74	86,96
	Intensidade média (mm/h)			105,28
	CUC (%)			87,64
Ensaio 5	Volume coletado (L)	0,350	0,355	0,280
	Intensidade real (mm/h)	105,82	107,34	84,66
	Intensidade média (mm/h)			99,27
	CUC (%)			91,44

Fonte: Autor (2025)

Portanto, a intensidade média global, para os 5 ensaios realizados, foi de 103,40 mm/h e o CUC global foi de 89,74% (>80%), ou seja, satisfatórios para os fins desta pesquisa.

Os resultados obtidos para os ensaios de Inderbitzen Modificado sem aplicação de cal estão apresentados na Tabela 23. Ressalta-se que foi considerada a taxa de erosão constante no último intervalo recolhido até 30 minutos para avaliação.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios de Inderbitzen Modificado para as amostras com cal

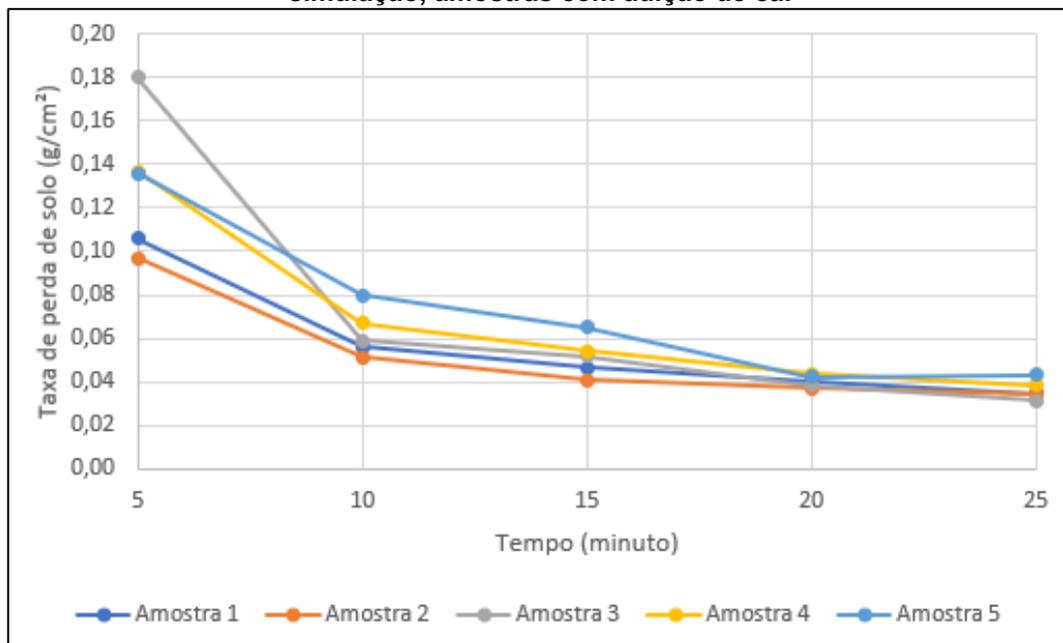
Resultados obtidos:	Intervalo de amostragem				
	0 a 5 minutos	5 a 10 minutos	10 a 15 minutos	15 a 20 minutos	20 a 25 minutos
Amostra 1					
Massa seca material (g)	127,34	67,1	55,89	48,39	41,75
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1061	0,0559	0,0466	0,0403	0,0348
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0212	0,0112	0,0093	0,0081	0,0070
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,3185				
Amostra 2					
Massa seca material (g)	116,06	61,5	49,21	44,35	40,89
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,0967	0,0513	0,0410	0,0370	0,0341
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0193	0,0103	0,0082	0,0074	0,0068
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,2941				
Amostra 3					
Massa seca material (g)	215,94	70,84	62,38	46,44	37,74
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1800	0,0590	0,0520	0,0387	0,0315
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0360	0,0118	0,0104	0,0077	0,0063
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,3926				
Amostra 4					
Massa seca material (g)	164,03	80,36	65,16	52,69	46,03
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1367	0,0670	0,0543	0,0439	0,0384
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0273	0,0134	0,0109	0,0088	0,0077
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,3786				
Amostra 5					
Massa seca material (g)	162,94	95,54	78,05	50,98	51,95
Taxa de erosão por intervalo (g/cm ²)	0,1358	0,0796	0,0650	0,0425	0,0433
Taxa de erosão por minuto (g/cm ² /min)	0,0272	0,0159	0,0130	0,0085	0,0087

Resultados obtidos:	Intervalo de amostragem				
	0 a 5 minutos	5 a 10 minutos	10 a 15 minutos	15 a 20 minutos	20 a 25 minutos
Taxa de erosão total em 30 minutos (g/cm ²)	0,4095				

Fonte: Autor (2025)

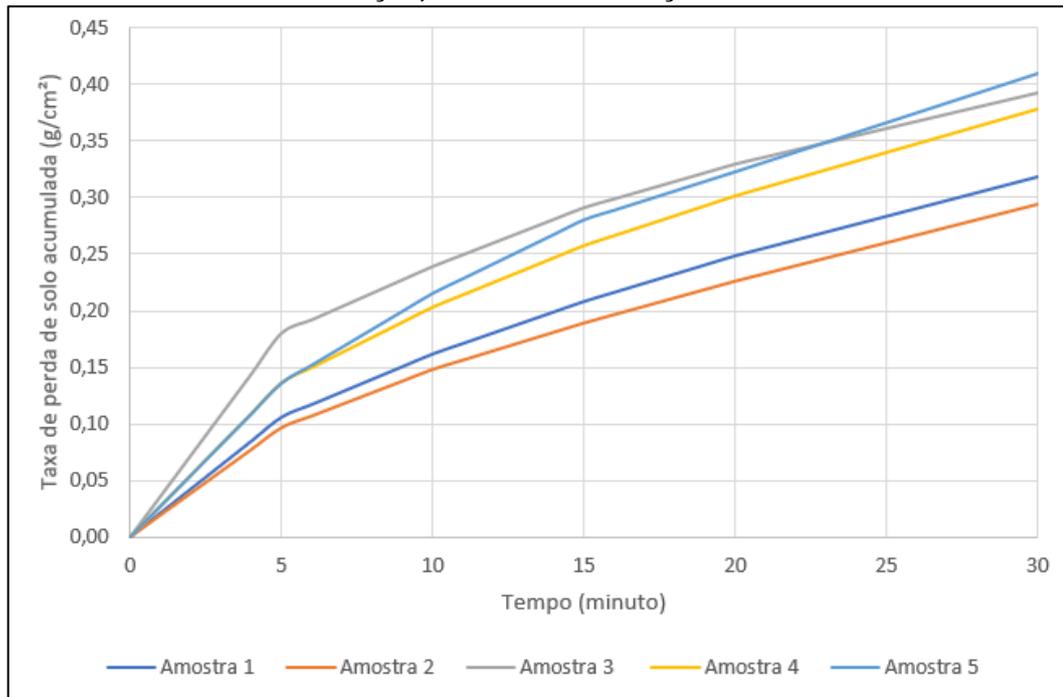
Para melhor visualização e interpretação dos resultados foram plotados gráficos que relacionam a taxa de erosão por intervalo de recolha por tempo de simulação e a taxa de erosão acumulada por tempo de simulação de cada amostra ensaiada, apresentados na Figura 36 e na Figura 37, respectivamente.

Figura 36 - Resultados por amostra da taxa de perda de solo por intervalo por tempo de simulação, amostras com adição de cal



Fonte: Autor (2025)

Figura 37 - Resultados por amostra da taxa de perda de solo acumulada por tempo de simulação, amostras com adição de cal



Fonte: Autor (2025)

Os valores de perda de solo total estão resumidos na Tabela 24, que apresenta a média geral dos resultados dos ensaios, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), definido como a razão entre o desvio padrão e a taxa de erosão total média (PEARSON, 1896).

Tabela 24 – Resumos dos resultados de perda de solo total – Amostras com cal

Amostras	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
Taxa de erosão total (g/cm²)	0,3185	0,2941	0,3926	0,3786	0,4095
Taxa de erosão total média (g/cm²)	0,3587				
Desvio padrão	0,0498				
Coeficiente de variação (%)	13,88				

Fonte: Autor (2025)

Ao interpretar os resultados dos ensaios, percebe-se que houve boa consistência entre os valores obtidos, o que resultou em um coeficiente de variação de 13,88%, que consiste em avaliação dos dados como de baixa variabilidade.

Os valores de perda de solo total para os ensaios realizados nas amostras com e sem cal estão resumidos na Tabela 25, que apresenta também a variação e a média global dos resultados dos ensaios.

Tabela 25 – Resumos dos resultados de perda de solo total

Amostras sem cal	Taxa de erosão (g/cm²)	Amostras com cal	Taxa de erosão (g/cm²)	Variação (%)
Amostra 1	0,1300	Amostra 1	0,3185	+145,01
Amostra 2	0,2040	Amostra 2	0,2941	+44,16
Amostra 3	0,3072	Amostra 3	0,3926	+27,79
Amostra 4	0,3707	Amostra 4	0,3786	+2,13
Amostra 5	0,3213	Amostra 5	0,4095	+27,45
Média	0,2666	Média	0,3587	+34,53
Média Global = 0,3126 g/cm²				

Fonte: Autor (2025)

A partir de análise dos resultados obtidos, é possível perceber que a aplicação de cal, para os ensaios de Inderbitzen Modificado, não obteve influência na redução da taxa de perda de solo com relação aos ensaios sem a aplicação de cal. Essa situação pode ser explicada pela forma de aplicação escolhida, já que nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, da metodologia MCT, a adição da cal se mostrou eficiente.

Acredita-se que, tanto a falta de compactação, quanto o tempo de reação de apenas 24 horas para a cal em conjunto com o estéril, foram definidores para a obtenção de tais resultados. Além disso, pode ser possível a energia cinética das gotas atuando em conjunto com o cisalhamento provocado pelo escoamento sobre a amostra foram suficientes para desfazer as estruturas formadas com a adição de cal.

Dessa forma, é sugerido que em pesquisas futuras seja avaliada a aplicação de cal com tempo de reação superiores ao utilizado, considerando também o emprego de compactação.

É possível verificar que a não reação da cal pode ter sido responsável por um certo incremento na taxa de erosão das amostras avaliadas, principalmente nos primeiros minutos dos ensaios, já que a cal foi um material fino, adicional, presente na camada de superfície durante os experimentos. Apesar dessa possibilidade, o fator K foi reavaliado no item seguinte, 5.4.2.1, a partir da média global das 10 amostras ensaiadas.

Com relação à taxa de perda de solo, novamente foi possível perceber uma maior perda de solo nos 5 primeiros minutos, reduzindo progressivamente nos intervalos

subsequentes, com uma certa tendência a estabilização entre as medições nos intervalos de 20 e 25 minutos. Conforme já mencionado, esse fato pode ser explicado pela maior porção de material fino na camada superficial no início do experimento, que rapidamente são erodidos nos primeiros minutos. A Figura 38 apresenta a fotografia de uma amostra após a realização do experimento, nela é possível perceber a presença de material com aspecto mais granular retido na caixa, o que corrobora com tal explanação.

Figura 38 - Material retido na caixa após realização de um experimento de Inderbitzen Modificado com cal



Fonte: Autor (2025)

5.4.2.1 Fator erodibilidade (K) do material estudado

A partir do fator LS igual a 2,51, conforme descrito no item 5.4.1.1, do fator de R da chuva simulada de $22,74 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, obtido no item 5.3.6, e da média global da taxa de erosão obtida nos ensaios de Inderbitzen Modificado, de $0,3126 \text{ g/cm}^2$, chegou-se ao valor de K de $0,5478 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Portanto, quando avaliado frente aos valores apresentados na Tabela 21, novamente ressalta-se que tais resultados indicam que a disposição do estéril em pilhas, com as configurações adotadas na presente pesquisa, pode causar incrementos na erodibilidade do material em cerca de 10 vezes acima do esperado para o solo local

em suas condições naturais. Ressalta-se a importância, em pesquisas futuras, da reprodução de tais experimentos em campo, a fim de validar os resultados obtidos em laboratório.

6 CONCLUSÕES

A presente dissertação apresentou uma proposta de método para a avaliação da erosão hídrica em taludes de pilhas de estéril, por meio de aplicação do ensaio de Inderbitzen Modificado, com base em referências bibliográficas existentes para avaliações em solos no Brasil. Além disso, avaliou-se a aplicação de cal como revestimento de proteção contra a erosão hídrica, por meio dos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, da metodologia MCT, e também por meio do ensaio de Inderbitzen Modificado.

Existem alguns parâmetros balizadores propostos por instituições americanas, como a *National Lime Association*, a *U. S. Air Force Soil Stabilization Index System* (SSIS, 1976) e o Estado de Illinois, que relacionam a porcentagem de argila e o índice de plasticidade com a eficiência do tratamento do material com cal. Dessa forma, uma amostra do estéril utilizado nesta pesquisa, de cerca de 20 kg, foi caracterizada no laboratório de geotecnia Loctest, sendo os resultados obtidos, apresentados no item 5.1, superiores aos valores dos mínimos dos indicadores estabelecidos pelas instituições citadas.

Com relação aos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, da metodologia MCT, os resultados obtidos indicaram a tendência de redução da porcentagem de perda de massa por imersão tanto com o acréscimo de umidade, quanto com a adição de cal.

Verificou-se certa dificuldade em controlar os teores de umidade dos ensaios, o que pode ser explicado em virtude das amostras de estéril terem sido coletadas em campo durante um dia chuvoso, ou seja, essas foram armazenadas a diferentes teores de umidade, o que causou dificuldade de uniformidade entre as avaliações. Além disso, o armazenamento das amostras em sacos de polietileno por 24 horas pode ter sofrido impactos da temperatura ambiente, já que foram registradas ondas de calor na região do laboratório do CPH da UFMG durante a realização dos ensaios.

Em tais ensaios, ficou claro que a redução de perda de massa é mais significativa para a amostra de concentração mássica de cal de 4%, com média da ordem de 81% de redução. Para as amostras com 1% e 2% e 3% de concentração de cal em massa, as reduções foram relativamente próximas entre si.

Levando em consideração que muitas vezes não é simples hidratar o estéril *in situ*, o que demanda a utilização de caminhões pipa, sendo a captação de água nem sempre possível, avaliou-se os resultados dos ensaios especificamente para as menores condições de umidade atingidas, de 13,6%. Observou-se que a perda de massa foi reduzida de cerca de 295%, para a amostra sem aplicação de cal, para cerca de 263% e 237% (por volta de 30% e 60% menores) para teores de cal de 3% e 4% em massa, respectivamente.

Portanto, em todas as análises realizadas, destacou-se a eficiência do uso de cal em concentração mássica de 4%, sendo essa a utilizada nos ensaios de Inderbitzen Modificado.

Quanto à calibração do simulador de chuvas, utilizado nos ensaios de Inderbitzen Modificado, nos 6 testes realizados, verificou-se que a intensidade média mínima e máxima, entre os potes 1 a 15, foram de 110,62 mm/h e de 124,10 mm/h, respectivamente. Porém, dado o tamanho da caixa coletora, analisou-se que é possível utilizar a região ocupada por apenas 6 coletores.

Dessa forma, avaliou-se também a intensidade média mínima e máxima apenas entre os potes 10 a 15, sendo essas de 95,49 mm/h e de 104,83 mm/h, respectivamente. Tais valores são satisfatórios para a intensidade de chuva desejada, relativa ao período de retorno de 10 anos e 30 minutos de duração, de 96 mm/h.

Quando avaliado o Coeficiente de conformidade de Christiansen, para a verificação da uniformidade da precipitação que ocorre em toda a superfície de captação, o valor médio obtido foi de 94,39%, superior aos 80% considerados suficientes para um simulador de chuvas, segundo Tossel et al. (1987).

Ao aplicar o método da farinha, proposto por Hudson (1964), o D50 obtido para as gotas geradas pelo simulador de chuvas foi de 1,92 mm. Segundo Miguntanna (2009),

o D50 para chuvas naturais está na faixa de 2,0mm-2,5mm, ou seja, o valor de D50 obtido está muito próximo à faixa de referência. Portanto, tal resultado é considerado suficiente para a proposta da presente pesquisa.

Com relação à energia cinética da chuva gerada pelo simulador, verificou-se o valor médio de $22,37 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Segundo Van Dijk et al. (2002), a energia cinética de chuvas naturais com intensidade superiores a 40 mm/h é da ordem de $25 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$. O limite proposto por Tossel et al. (1987) entre a relação de energia cinética das chuvas produzidas por simuladores de chuvas e das chuvas naturais é de no mínimo 75%.

Dessa forma, obteve-se a relação de 89,48% entre a energia cinética da chuva simulada e a energia cinética das chuvas naturais, sendo essa superior ao valor mínimo de 75% proposto por Tossel et al. (1987). Portanto, o simulador de chuvas atende aos critérios estabelecidos para a avaliação da energia cinética para a presente pesquisa.

Ao se comparar a energia cinética obtida a partir dos dados do simulador de chuvas por meio da equação 9, de $22,37 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, como o valor da energia cinética a partir da equação 11, proposta por Wischmeier e Smith (1958), de $30,03 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$, foi possível verificar que essa apresenta valores mais conservadores de energia cinética com relação à aquela. Tais resultados eram esperados tendo em vista que a equação 11 utiliza apenas um dado para obtenção da energia cinética, a intensidade da chuva (mm/h), enquanto a equação 9 depende de uma série de dados obtidos durante a calibração do simulador de chuvas, como massa média, do diâmetro médio (D50) da distribuição das gotas, velocidade terminal das gotas, entre outros. Portanto, ao se avaliar o fator erosividade (R) da chuva simulada, a partir da energia cinética de $22,37 \text{ J mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e aplicação da equação 12, foi obtido o valor de $22,74 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Dada a calibração do simulador de chuvas, foi possível realizar os ensaios de Inderbitzen Modificado. Primeiramente foram ensaiadas as 5 amostras sem a aplicação de cal, chegando ao valor de taxa erosão total média de $0,2666 \text{ g/cm}^2$.

Com relação à taxa de perda de solo, foi possível perceber uma maior perda de solo nos 5 primeiros minutos, reduzindo progressivamente nos intervalos subsequentes, com uma certa tendência a estabilização entre as medições nos intervalos de 20 e 25 minutos. Esse fato pode ser explicado pela maior porção de material fino na camada superficial no início do experimento, que rapidamente são erodidos nos primeiros minutos.

Ao interpretar os resultados das 5 amostras ensaiadas, percebeu-se uma dispersão maior nas amostras 1 e 2 com relação às demais, o que resultou em um coeficiente de variação de 36,58%, que consiste em avaliação dos dados como de alta variabilidade. A dispersão obtida nas amostras 1 e 2 pode ser explicada pela heterogeneidade granulométrica do estéril ensaiado, que no caso desses dois ensaios pode ter contido parcelas mais grosseiras do material.

Quando avaliado o fator erodibilidade (K), a partir da equação universal de perda de solos (USLE), chegou-se ao resultado de $0,4677 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, ou seja, uma ordem de grandeza acima dos valores de bibliografia para o solo predominante na região de obtenção das amostras, apresentados na Tabela 21. Portanto, tais resultados indicam que a disposição do estéril em pilhas, com as configurações adotadas na presente pesquisa, pode causar incrementos na erodibilidade do material em cerca de 10 vezes acima do esperado para o solo local em suas condições naturais.

Ressalta-se a importância, em pesquisas futuras, da reprodução de tais experimentos em campo, a fim de validar os resultados obtidos em laboratório.

É possível analisar que os valores obtidos para o fator K possuem grande influência da declividade avaliada, de 50%, da intensidade da chuva simulada, associada ao período de retorno de 10 anos e 30 minutos de duração, do teor de umidade da amostra, considerada saturada nos experimentos, e da falta de compactação para o material ensaiado. Porém, buscou-se, na presente pesquisa, chegar a valores máximos de erodibilidade para o estéril dada as configurações de campo de uma pilha.

Foram também ensaiadas as 5 amostras com a aplicação de cal, a partir do ensaio de Inderbitzen Modificado, chegando ao valor de taxa erosão total média de $0,3587 \text{ g/cm}^2$.

Ao interpretar os resultados dos ensaios, percebe-se que houve boa consistência entre os valores obtidos, o que resultou em um coeficiente de variação de 13,88%, que consiste em avaliação dos dados como de baixa variabilidade.

Foi possível verificar que a aplicação de cal, para os ensaios de Inderbitzen Modificado, não obteve influência na redução da taxa de perda de solo com relação aos ensaios sem a aplicação de cal. Essa situação pode ser explicada pela forma de aplicação escolhida, já que nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, da metodologia MCT, a adição da cal se mostrou eficiente. Acredita-se que, tanto a falta de compactação, quanto o tempo de reação de apenas 24 horas para a cal em conjunto com o estéril, foram definidores para o a obtenção de tais resultados.

É possível verificar que a não reação da cal, devido a forma de aplicação utilizada, pode ter sido responsável por um certo incremento na taxa de erosão das amostras avaliadas, principalmente nos primeiros minutos dos ensaios, já que a cal foi um material fino, adicional, presente na camada de superfície durante os experimentos. Apesar dessa possibilidade, o fator K foi reavaliado a partir da média global da taxa de erosão obtida para as 10 amostras ensaiadas, de $0,3126 \text{ g/cm}^2$, por meio da aplicação da USLE, chegando-se ao valor de $0,5478 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Portanto, quando avaliado frente aos valores apresentados na Tabela 21, novamente ressalta-se que tais resultados para o fator K indicam que a disposição do estéril em pilhas, com as configurações adotadas na presente pesquisa, pode causar incrementos na erodibilidade do material em cerca de 10 vezes acima do esperado para o solo local em suas condições naturais.

Recomenda-se, novamente, a realização dos experimentos de Inderbitzen Modificado em campo, a fim de validar os resultados obtidos em laboratório.

Por fim, conclui-se que a proposta de método sugerida se mostrou eficiente nas avaliações realizadas, cabendo ressaltar as lições aprendidas na presente pesquisa, quais sejam:

- A ordem indicada na metodologia deve ser seguida, ou seja, os ensaios de perda de massa por imersão devem ser realizados apenas após a obtenção dos resultados dos ensaios de caracterização física do material. Dessa forma, as avaliações da perda de massa por imersão poderão ser feitas tendo conhecimento das características do material ensaiado e da umidade ótima de compactação, sendo possível buscar nesses ensaios teores umidades dentro de uma margem próxima a essa.
- Nos ensaios de Inderbitzen Modificado sem a aplicação de cal, a falta de consideração da compactação do material nas caixas metálicas em que as amostras são adicionadas resultará em taxas de perda de solo máximas para o estéril avaliado. Caso seja desejado refletir as condições de campo em taludes de pilhas de estéril, o grau de compactação dessas estruturas deve ser avaliado *in situ* e reproduzido nos experimentos.
- Nos ensaios de Inderbitzen Modificado com a aplicação de cal, ao conformar as amostras, indica-se o uso de compactação e a avaliação de períodos superiores a 24h para permitir a reação do material com a cal.
- Ainda nos ensaios de Inderbitzen Modificado com a aplicação de cal, recomenda-se evitar o reuso do material das amostras utilizadas nos ensaios de Inderbitzen Modificado sem a aplicação de cal, já que esse material pode ter sua composição granulométrica alterada pela ação da chuva simulada, com o material mais fino erodido, o que possivelmente dificulta a reação do estéril com a cal.

7 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa para aplicação à presente dissertação, para melhor compreensão do processo de avaliação da erosão hídrica no setor da mineração, recomenda-se:

- Realizar ensaios de Inderbitzen Modificado para amostras a diferentes teores de umidade e a diferentes graus de compactação, com o objetivo de avaliar seus efeitos na erodibilidade do solo. É importante levar em consideração o emprego de compactação na condição inicial do material em umidade próxima à umidade ótima;
- Realizar ensaios de Inderbitzen Modificado para diferentes declividades que também são comuns na prática para os taludes de pilhas de estéril;
- Realizar ensaios de Inderbitzen Modificado para amostras de rejeito e para diferentes amostras de estéril, tendo em vista a tendência no setor da mineração em se desenvolver pilhas de rejeito ou de estéril e rejeito;
- Realizar a aplicação de cal com tempo de reação superiores ao aplicado na presente pesquisa, de 1 dia, sem e com emprego de compactação e a diferentes teores de umidade, com o objetivo de avaliar a melhor maneira de facilitar a reação da cal com o material utilizado;
- Realizar o monitoramento a longo prazo do volume erodido de material a jusante de taludes de pilhas de estéril, com o objetivo de validar os resultados obtidos em laboratório para a avaliação da erosão hídrica.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 13602:1996 – **Determinação da granulometria de solos – Método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT. NBR 7175:2003 – **Cal hidratada para argamassas – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT. NBR 6457:2016 – **Determinação da capacidade de retenção de água em solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. NBR 7180:2016 – **Determinação do limite de plasticidade (wP) de solos**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. NBR 7182:2016 – **Ensaio de compactação – Método Proctor Normal para solos**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. NBR 6458:2017 – **Determinação da massa específica (γ_s) de solos**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR 6459:2017 – **Determinação do limite de liquidez (wL) de solos**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR 13029:2017 - **Pilhas de Estéril: Diretrizes Técnicas**. ABNT, 2017.

ABNT. NBR ISO/IEC 17025:2017 – **Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR 7181:2018 – **Determinação da granulometria de solos – Método de análise (parte I)**. Rio de Janeiro, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Normas Reguladoras para Disposição de Rejeitos e Estéreis**. Brasília: ANM, 2020.

AMORIM, R. S. S.; SILVA, S.; PRUSKI, F. F. **Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas**. In: PRUSKI, F. F. (editor). *Conservação de solo*

e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Viçosa: Editora UFV, p. 74-107, 2009.

ANGLO AMERICAN. **Relatório de Sustentabilidade**. Disponível em: <https://www.angloamerican.com>. 2022.

ARAGÃO, J. D. **Gestão de resíduos e rejeitos na mineração: impactos ambientais e alternativos**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal. Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal**. Dissertação de mestrado. Engenharia Geotécnica, UFOP, Ouro Preto, MG. 178p, 2010.

BAPTISTA, G.M.M. **Diagnóstico ambiental da Perda Laminar de solos por meio do geoprocessamento**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 112p, 1997.

BASTOS, B.A.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. **A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, v. 1, p. 17-25. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/1471>, 2000.

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

BELL, F. G. **Lime stabilization of clay minerals and soils**. Engineering geology. Vol 42, Issue 4 págs. 223-237, 1996.

BERTOL, I. et al. **Erodibilidade de um cambissolo húmico alumínico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Iages**. R. Bras. Ci. Solo, v. 26, Viçosa, 2002, p. 465-471.

BERTONI, J. **O espaçamento de terraços em culturas anuais, determinado em função das perdas por erosão**. Bragantia, Campinas, 1959.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação dos Solos**. Piracicaba: Livro Ceres, 392 p, 1985.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone Editora, 2012. 355 p.

BRADY, N.C. & WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall, 13th ed., 2002, 960 p.

BRITO, A. O. **Estudos da erosão no ambiente urbano, visando planejamento e controle ambiental no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal. Publicação PPG EFL. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília. 2012.

BRITO, H.; FANTINATTI, G. F.; SILVA, R. MA. N. da; SILVA, R.; ROCHA JÚNIOR, G. L. D. da; GUERRA, Q.; CORDEIRO, J. S. **Estimativa da produção de sedimentos da pilha de disposição de estéril (PDE) CONVAP, complexo minerador de Itabira (MG)**. São Paulo: UNESP, Geociências, v. 41, n. 1, p. 377–396, 2022.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações** (4ª ed.). Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988.

CARVALHO, M.F.; TARQUI, J. L. Z.; SILVA, V. S.; LOBO, B. R. de H. **Avaliação do Funcionamento de um Simulador de Chuva Pelo Método da Farinha**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, p115-124, 2012.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.

COSTA, G. W. O. **Critérios operacionais para redução da contribuição de sedimentos gerados em pilhas de estéril**. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2018.

CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. McGraw-Hill Book Company. New York, 1964.

CORRÊA, E.A.; MORAES, I.C.; PINTO, S.A. F. **Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do centro leste paulista**. *Geociências*, v. 34, n. 4, p.848-860, 2015.

DASH, S.K., HUSSAIN, M. **Lime stabilization of soils: reappraisal**. *Journal of materials in civil engineering*. Vol. 24, Issue 6, 2011.

DE CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; DE SOUZA, N. M.; MELO, M. T. **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC. xxxiv, 464 p, 2006.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAAE); INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas**. São Paulo: DAAE/IPT, 92p, 1989.

DNER-ME. Norma DNER-ME 228-94: **Procedimento de Controle da Qualidade em Obras de Pavimentação**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

DNER-ME. Norma DNER-ME 256/94 – **Requisitos para o controle de qualidade na execução de obras de pavimentação**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

EADES, J. L.; GRIM, R. E. **Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures**. *Highway Research Record*. Issue Number: 139, 1966.

ELANDALOUSSI, R., BENNABI, A., DUPLA, J. C., CANOU, J., BENAMAR, A., GOTTELAND, P. **Effectiveness of Lime Treatment of Coarse Soils Against Internal Erosion**. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3, 2001.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EMBRAPA SOLOS. **Cambissolos Háplicos**. Agência de Informação Tecnológica – Temáticas: Solos Tropicais – SIBCS. Brasília: EMBRAPA, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/cambissolos/cambissolos-haplicos>. Acesso em: 18 dez. 2024.

EPA – U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, **Erosion and Sediment Control, Surface Mining in Eastern U. S.**, EPA-625/3-76-006, 1976.

ESTADO DE ILLINOIS. **Diretrizes para Estabilização de Solos – Critérios de Teor de Argila e Índice de Plasticidade**. [S.l.]: Departamento de Transportes do Estado de Illinois, s.d.

FONSECA, A.M.M.C.C.; FERREIRA, C.S.M. **Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos**. In: Simpósio Brasileiro De Solos Tropicais, 1., Rio de Janeiro/RJ. Anais, Rio de Janeiro/RJ: COPPE/ABMS, 1981. p.646–667, 1981.

FOSTER, G.R.; McCOOL, D.K.; RENARD, K.G. & MOLDENHAUER, W.C. **Conversion of the universal loss equation to SI metric units**. J. Soil Water Conserv., 36:355-359, 1981.

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-GO. Meio Digital, 2001.

GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS DE ANDALUCÍA, S.A. **Memoria de Gestión Medio ambiental de Infraestructuras 2006-2007**. Sevilla: Junta de Andalucía, 2007.

GOMES, L. L. **Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela equação universal de perda do solo (EUPS) – pilha de estéril sul – Carajás/PA**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2012.

GTS. **Guide Technique: Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme.** France, 2000.

GUNN, R. D.; KINZER, W. H. **The terminal velocity of water drops.** Journal of the Aeronautical Sciences, v. 16, n. 2, p. 131–136, 1949.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments.** New York:Academic Press. 154p, 2002.

HEIDEMANN, M. **Mapa geotécnico de potencial erosivo de uma área de expansão urbana de Tubarão - SC.** Revista de Engenharia Civil IMED, v. 1, n. 1, p. 3-10. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v1n1p3-10>, 2014.

HERNGREN, L. **Build-up and wash-off process kinetics of PAHs and heavy metals on paved surfaces using simulated rainfall.** Tese (Doutorado) - Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, Australia, 2005.

HERRIER, G.; CHEVALIER, C.; FROUMENTIN, M.; CUISINIER, O.; BONELLI, S. **Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures.** 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France. 8 p, 2012.

HERRIER, G.; LECONTE, P.; NERINCX, N.; BONELLI, S.; MERCIER, F.; FRY, J.; TACKER, P.; PUIATTI, D. **Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures: state of the art and presentation of the art and presentation of the french digue elite project.** Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction Rostock, 10-12 April, 2014.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R., **Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments,** Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1997.

HUDSON, N. W. **The flour pellet method for measuring the size of raindrops.** Salisbury: Department of Conservation and Extension (Research Bulletin, 4), 1964.

INDERBITZEN, A.L. **An erosion test for soils.** *Materials Research & Standards*, v. 1, n. 7, p. 553-554, 1961.

JACINTHO, E.C.; CARVALHO, J.C.; CARDOSO, F.B.F.; SANTOS, R.M.M.; GUIMARÃES, R.C.; LIMA, M.C.G. **Solos tropicais e o processo erosivo.** In: CARVALHO, J.C.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. (org.). *Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro.* Brasília: UnB/ FINATEC. p. 93-156, 2006.

LEMOS, C.F. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen.** Curitiba/PR, 82p. Dissertação de Mestrado em Agronomia, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, 2002.

LIMA, L.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MARQUES, J.J.G.S.M. **O Salpicamento de Latossolos Provocado por Gotas de Chuva.** Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Goiânia, Brasil, 1993.

LITTLE, D. N. **Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime.** Lime Association of Texas. 94-78821. 219p, 1995.

LOCH, R.; ROSEWELL, C. **Laboratory methods for measurements of soil erodibilities (K factors) for the universal soil loss equation,** *Australian Journal of Soil Research*, n. 30, p. 233-248, 1992.

MAIDMENT, D.R. **Handbook of Hydrology,** McGraw-Hill, Inc. New York. 570p, 1993.

MANNIGEL, A.R.; CARVALHO, M.P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L.R. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo.** *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335 - 1340, 2002.

MARTÍN DUQUE, J. F.; ZAPICO, I.; OYARZUN, R.; LÓPEZ GARCÍA, J. A.; CUBAS, P. **A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain.** *Geomorphology*, v.239, p.1–16, 2015.

MATA, C. L. et al. **Avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva na bacia do rio Urucuia (MG) por meio da equação universal de perda de solos**. Revista Brasileira de Geomorfologia, São Paulo, v. 2, n. 8, p. 57-71, 2007.

MEDEIROS, A. A. de L.; SILVA, M. F. da; FURLAN, A. P. **Avaliação comparativa dos métodos de dosagem do pH e de Thompson para a estabilização com cal de dois solos tropicais**. In: Anais. Balneário Camboriú: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003174522>. Acesso em: 27 ago. 2024.

MEHENNI, A., O. CUISINIER, AND F. MASROURI. **Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils**. Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE) 28 (9):04016071. doi:10.1061/ (asce)mt.1943-5533.0001573, 2016.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA, P.T.S.; BESKOW, S.; VIOLA, M.R.; SILVA, A.M.; LIMA, E.S.; ALVES, G.J.; CHAVES, E. A. **Erosividade da chuva do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023. 48 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 286). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1159615/1/CNPS-BPD-286-2023.pdf>.

MENDES, M. F.; LIMA, R. M. F.; MENDES, C. R. **Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil**. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 68–74, jan./mar. 2016. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.11.003.

MENDONÇA, R; FERREIRA, L. **Gestão de Pilhas de Estéril e Rejeitos na Mineração Brasileira**. Revista Brasileira de Engenharia de Minas, 15(2), 45-62, 2021.

MIGUNTANNA, N. S. **Determining a set of surrogate parameters to evaluate urban stormwater quality**. 311 f. Dissertação (Mestrado) - Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, Australia, 2009.

MONTEBELLER, C.A.; CARVALHO, D.F.; SOBRINHO, T.A.; NUNES, A.C.S.; RUBIO, E. **Avaliação Hidráulica de um Simulador de Chuvas Pendular**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 5, No.1, 2001, pp. 1-5, 2001.

MORAIS, F.; BACELLAR, L.A.P.; SOBREIRA, F.G. **Análise da erodibilidade de saprolitos de gnaissé**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 6, p. 1055-1062, 2004.

MOREIRA, M. L. **Tratamento do solo com cal para prevenção de erosão hídrica: uma proposta de metodologia para uso em taludes de pilha de estéril**. Dissertação de mestrado. Programa de Mestrado em Geotecnia e Transportes, UFMG, Belo Horizonte, MG, 115p, 2023.

NASCIMENTO, A. R. V. J. **Atributos físicos e químicos de áreas degradadas pela mineração de scheelita na região tropical semiárida**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

NASCIMENTO, R. O.; MASCARENHA, M. M. A.; ANGELIM, R. R.; OLIVEIRA, R.B.; SALES, M. M.; LUZ, M. P. **Uso de solução de cal para mitigação de processos erosivos em um solo da UHE de Itumbiara**. Geociências (São Paulo. Online), v. 38, p. 279-295, 2019.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime Stabilization Construction Manual**. [S.l.]: National Lime Association, 1972.

NEVES, E. N. S. de A. C. **Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal: Modelos de Comportamento**. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos laterítico**. Villibor, São Paulo, 1979.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos laterítico**. Villibor, São Paulo, 1995.

OLIVEIRA, E. de. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade

Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/93651>. Acesso em: 25 ago. 2024.

OLIVEIRA, P.; SOUZA, C. **Erosão e Impacto Ambiental em Pilhas de Estéril: Um Estudo de Caso**. Anais do Congresso Brasileiro de Geotecnia, 2022.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. **Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos**. Revista Ambiente e Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 5, n. 2, 29 jul. 2010, p. 217-225.

PEARSON, K. **Mathematical contributions to the theory of evolution**. III. Regression, heredity, and panmixia. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character, v. 187, p. 253-318, 1896.

PINHEIRO, MÁRIO CICARELI. **Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

PRUSKI, F.F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª ed. atual. e ampl. Viçosa: Ed. UFV. 279 p., 2009.

RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultrassônica na desagregação de um Cambissolo**. Dissertação. Lavras, MG, 2006.

ROBERTSON, A. MACG., STEFFEN & KIRSTEN. **Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological Aspects**. Vancouver, Canada, 24p, 1985.

SALES, M. M.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; MASCARENHA, M. M. DOS A. **Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG. xxxiv, 584 p. – (GECON; v. 3), 2017.

SALIBA, A. P. M. **Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SANCHEZ-LOPEZ, A. S. et al. **Phytobarriers: Plants capture particles containing potentially toxic elements originating from mine tailings in semiarid regions.** *Environmental Pollution*. v.205, p.33-42, 2015.

SANTOS, M.; ALMEIDA, T.; COSTA, R. **Técnicas de Controle da Erosão em Áreas Mineradas.** *Engenharia Ambiental*, 28(1), 99-112, 2023.

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P. AND DECKER, R S. **Identification and nature of dispersive soils.** *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 102, no. GT4, p. 287-301, April, 1976a.

SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P., DECKER, R.S AND STEELE, E.F. **Pinhole test for identifying dispersive soils.** *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 102, no. GT1, p. 69-85, Jan, 1976b.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas.** São Carlos: RIMA, 138p, 2003.

SILVA, A. M.; ÁLVARES, C. A. **Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo.** *Geociências – Unesp, São Paulo*, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005.

SILVA, A.M.; SILVA, M.L. N.; CURI, N.; AVANZI, J.C.; FERREIRA, M.M. **Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais.** *R. Bras. Ci. Solo*, v. 33, p. 1811-1820, 2009.

SILVA, J.; GOMES, F.; & PEREIRA, D. **Dry Stacking na Mineração: Vantagens e Desafios.** *Revista Mineração Sustentável*, 10(3), 25-38, 2022.

SILVA, M. L. N. et al. **Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros.** *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 35, n. 6, jun., p. 1207-1220, 2000.

SOARES, D.L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E.V.; MARIA, L.; SOUZA, C.C. **Erodibilidade de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada.** *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, n. 1, p. 179-193, 2019.

SOUZA, L. A. de; SOBREIRA, F. G. **A avaliação da geração de sedimentos ao longo da bacia hidrográfica do Ribeirão do Carmo. Potencial natural de erosão, feições morfológicas e cicatrizes de movimentos de massa.** São Paulo: UNESP, Geociências, v. 36, n. 2, p. 285–299, 2017.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, 165p, 2010.

THOMA, A.C.; SANTA, P.S.; OLIVEIRA, V.L.; OLIVEIRA, W.L.; PRAT, B.V.; SILVA, A.C. **Avanços no desenvolvimento de equipamento para avaliação da erosão hídrica em laboratório.** Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 8, p. 61290-61300, 2020.

TOSSELL, ROBERT et al. **A portable rainfall simulator.** Canadian Agricultural Engineering, Ottawa, v. 29, n. 2, p. 155–162, 1987.

U.S. AIR FORCE. **Soil Stabilization Index System (SSIS).** Washington, D.C.: U.S. Air Force, 1976.

VAN DIJK, A. I. J. M.; BRUIJNZEEL, L. A.; ROSEWELL, C. J. **Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal.** Journal of Hydrology, v. 261, n. 1-4, p. 1-23, 2002.

VALE. **Tecnologias para Disposição de Rejeitos e Segurança na Mineração.** Disponível em: <https://www.vale.com>. 2021.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning.** Agriculture Handbook No. 537. U.S. Department of Agriculture, 1978.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. **Rainfall energy and its relationships to soil loss.** Trans. Am. Geoph. Union, 39:285-291,1958.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. **Relation of soil properties to its erodibility.** Soil Science Society American Proceedings, v. 33, p. 131-137, 1969.

APÊNDICE A – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras sem adição de cal

Ensaio de Compactação																								
Identificação	Amostras sem aplicação de cal																							
Número do cilindro	1			2			3			4			5			6								
Masso do solo úmido (g)	200			200			200			200			200			200								
Teor de Umidade (%)	23,7			24,9			26,2			27,5			28,6			13,6								
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n				
	0	75,09	-		0	75,44	-		0	73,95	-		0	69,52	-		0	68,43	-		0	85,02	-	
	1	66,02	9,07		1	63,13	12,31		1	61,38	12,57		1	57,54	11,98		1	55,8	12,63		1	73,81	11,21	
	2	58,8	7,22		2	56,4	6,73		2	54,92	6,46		2	51,78	5,76		2	51,79	4,01		2	67,38	6,43	
	3	55,29	3,51		3	53,1	3,30		3	51,87	3,05		3	50,4	1,38		3	51,5	0,29		3	64,22	3,16	
	4	52,93	2,36	13,1	4	51,17	1,93	11,96	4	51,44	0,43	9,94	4	50,05	0,35	7,49	4	51,25	0,25	4,55	4	61,99	2,23	11,82
	6	50,16	2,77		6	49,34	1,83		6	49,96	1,48		6	49,85	0,2		6	51,08	0,17		6	59,15	2,84	
	8	48,68	1,48	10,1	8	49,16	0,18	7,24	8	49,85	0,11	5,07	8	49,68	0,17	2,10	8	50,8	0,28	0,99	8	57,21	1,94	10,17
	12	48	0,68	7,29	12	48,95	0,21	4,15	12	49,66	0,19	2,21	12	49,46	0,22	0,94					12	54,87	2,34	9,35
	16	47,9	0,10	5,03	16	48,75	0,20	2,42	16	49,52	0,14	1,92									16	53,15	1,72	8,84
	24	47,78	0,12	2,38	24	48,52	0,23	0,82													24	51,67	1,48	7,48
	32	47,51	0,27	1,17																	32	51,60	0,07	5,61
	MEAS (g/cm³)	1,73			1,68			1,63			1,62			1,56			1,77							
Observação 1:	O critério de parada da compactação do corpo de prova ocorre quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor que 2mm ou quando leituras sucessivas possuem diferença menor que 0,1 mm																							
Observação 2:	MEAS = Massa específica aparente seca do corpo de prova																							
Perda de Massa por imersão																								
Cápsula	1			2			3			4			5			6								
Comprimento saliente (cm)	1			1			1			1			1			1								
Área (cm²)	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63								
Volume (cm³)	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63								
Massa extrudida - Me = A*MEAS (g)	34,03			33,02			32,00			31,72			30,62			34,73								
Massa do material seco - Ms (g)	94,80			83,58			81,35			78,79			76,65			102,59								
Pi = Ms*100/Msa (%)	278,57			253,15			254,22			248,37			250,35			295,40								
Observação:	Em todos os casos o fator de forma (F) foi igual a 1, pois o material na cápsula de alumínio se apresentou desagregado ou em forma de material solto																							

APÊNDICE B – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 1% de concentração mássica

Ensaio de Compactação																								
Identificação		Amostras com aplicação de cal em 1% de concentração mássica																						
Número do cilindro		1			2			3			4			5			6							
Masso do solo úmido (g)		200			200			200			200			200			200							
Teor de Umidade (%)		21,5			26,1			27,0			26,0			29,0			13,6							
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n				
	0	70,15	-		0	74,35	-		0	72,32	-		0	77,45	-		0	69,10	-		0	82,63	-	
	1	59,23	10,92		1	61,58	12,77		1	59,43	12,89		1	60,22	17,23		1	54,96	14,14		1	72,55	10,08	
	2	53,99	5,24		2	54,63	6,95		2	52,12	7,31		2	52,14	8,08		2	51,53	3,43		2	66,54	6,01	
	3	51,18	2,81		3	51,51	3,12		3	49,79	2,33		3	50,62	1,52		3	51,24	0,29		3	63,52	3,02	
	4	49,4	1,78	9,83	4	49,94	1,57	11,64	4	49,29	0,50	10,14	4	50,21	0,41	10,01	4	51,01	0,23	3,95	4	61,44	2,08	11,11
	6	47,25	2,15		6	49,35	0,59		6	48,98	0,31		6	50,03	0,18		6	50,85	0,16		6	58,59	2,85	
	8	46,2	1,05	7,79	8	49,24	0,11	5,39	8	48,74	0,24	3,38	8	49,85	0,18	2,29	8	50,74	0,11	0,79	8	56,79	1,90	9,75
	12	45,82	0,38	5,36	12	49,11	0,13	2,40	12	48,65	0,09	1,14	12	49,65	0,20	0,97					12	54,45	2,34	9,07
	16	45,74	0,08	3,66	16	49,01	0,10	0,93													16	53,05	1,40	8,39
																					24	51,34	1,71	7,25
																					32	50,33	1,01	6,46
																				48	49,22	1,11	5,23	
																				64	49,14	0,08	3,91	
MEAS (g/cm³)		1,84			1,65			1,65			1,63			1,56			1,85							
Observação 1:		O critério de parada da compactação do corpo de prova ocorre quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor que 2mm ou quando leituras sucessivas possuem diferença menor que 0,1mm																						
Observação 2:		MEAS = Massa específica aparente seca do corpo de prova																						
Perda de Massa por imersão																								
Cápsula		1			2			3			4			5			6							
Comprimento saliente (cm)		1			1			1			1			1			1							
Área (cm²)		19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63							
Volume (cm³)		19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63							
Massa extrudida - Me = A*MEAS (g)		36,14			32,37			32,37			31,97			30,56			31,09							
Massa do material seco - Ms (g)		88,24			82,61			79,00			79,00			75,00			82,00							
Pi = Ms*100/Msa (%)		244,18			255,19			244,05			228,34			196,36			164,01							
Observação:		Em todos os casos o fator de forma (F) foi igual a 1, pois o material na cápsula de alumínio se apresentou desagregado ou em forma de material solto																						

APÊNDICE C – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 2% de concentração mássica

Ensaio de Compactação																									
Identificação	Amostras com aplicação de cal em 2% de concentração mássica																								
Número do cilindro	1			2			3			4			5			6									
Masso do solo úmido (g)	200			200			200			200			200			200									
Teor de Umidade (%)	21,0			26,6			24,0			23,0			26,0			13,6									
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n					
	0	75,02	-		0	70,74	-		0	72,11	-		0	75,43	-		0	73,34	-		0	85,24	-		
	1	64,95	10,07		1	59,85	10,89		1	61,41	10,70		1	61,16	14,27		1	58,23	15,11		1	72,87	12,37		
	2	59,62	5,33		2	52,91	6,94		2	55,62	5,79		2	53,95	7,21		2	51,34	6,89		2	66,71	6,16		
	3	56,77	2,85		3	50,27	2,64		3	52,72	2,90		3	50,74	3,21		3	49,88	1,46		3	63,59	3,12		
	4	54,9	1,87	10,1	4	49,65	0,62	10,2	4	50,87	1,95	10,5	4	49,14	1,60	12,02	4	49,54	0,34	8,69	4	61,43	2,16	11,44	
	6	52,45	2,45		6	49,4	0,25		6	48,89	1,98		6	48,3	0,84		6	49,29	0,25		6	58,57	2,86		
	8	50,93	1,52	8,69	8	49,34	0,06	3,57	8	48,29	0,60	7,33	8	48,19	0,11	5,76	8	49,16	0,13	2,18	8	56,73	1,84	9,98	
	12	49,16	1,77	7,61	12	49,23	0,11	1,04	12	48,27	0,02	4,45	12	48,11	0,08	2,63	12	48,93	0,23	0,95	12	54,47	2,26	9,12	
	16	48,21	0,95	6,69																		16	53,07	1,40	8,36
	24	47,37	0,84	5,08																		24	51,41	1,66	7,16
	32	46,95	0,42	3,98																		32	51,35	0,06	5,38
	48	46,65	0,30	2,51																					
64	46,46	0,19	1,75																						
MEAS (g/cm ³)	1,81			1,63			1,70			1,72			1,65			1,78									
Observação 1:	O critério de parada da compactação do corpo de prova ocorre quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor que 2mm ou quando leituras sucessivas possuem diferença menor que 0,1mm																								
Observação 2:	MEAS = Massa específica aparente seca do corpo de prova																								
Perda de Massa por imersão																									
Cápsula	1			2			3			4			5			6									
Comprimento saliente (cm)	1			1			1			1			1			1									
Área (cm ²)	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63									
Volume (cm ³)	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63									
Massa extrudida - Me = A*MEAS (g)	35,58			32,09			33,41			33,80			32,44			34,89									
Massa do material seco - Ms (g)	106,00			74,15			88,00			81,00			62,00			95,33									
Pi = Ms*100/Me (g)	297,95			231,03			263,36			239,66			191,12			273,25									
Observação:	Em todos os casos o fator de forma (F) foi igual a 1, pois o material na cápsula de alumínio se apresentou desagregado ou em forma de material solto																								

APÊNDICE D – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 3% de concentração mássica

Ensaio de Compactação																								
Identificação		Amostras com aplicação de cal em 3% de concentração mássica																						
Número do cilindro	1			2			3			4			5			6								
Masso do solo úmido (g)	200			200			200			200			200			200								
Teor de Umidade (%)	21,0			27,4			24,0			26,7			28,0			13,6								
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n
	0	77,21	-		0	73,00	-		0	72,5	-		0	74,72	-		0	66,83	-		0	82,3	-	
	1	65,78	11,43		1	58,4	14,60		1	61,92	10,58		1	60,77	13,95		1	51,74	15,09		1	71,18	11,12	
	2	59,53	6,25		2	51,84	6,56		2	55,97	5,95		2	54,3	6,47		2	49,03	2,71		2	65,21	5,97	
	3	56,34	3,19		3	49,81	2,03		3	52,98	2,99		3	51,52	2,78		3	47,82	1,21		3	62,24	2,97	
	4	54,27	2,07	11,5	4	49,49	0,32	8,91	4	51,08	1,90	10,8	4	50,36	1,16	10,41	4	47,72	0,10	4,02	4	60,29	1,95	10,89
	6	51,57	2,70		6	49,33	0,16		6	48,76	2,32		6	49,93	0,43		6	47,55	0,17		6	57,73	2,56	
	8	50,07	1,50	9,46	8	49,17	0,16	2,67	8	47,9	0,86	8,07	8	49,87	0,06	4,43	8	47,47	0,08	1,56	8	56,00	1,73	9,21
	12	48,45	1,62	7,89	12	48,97	0,20	0,84	12	47,77	0,13	5,21	12	49,66	0,21	1,86					12	53,87	2,13	8,37
	16	47,6	0,85	6,67					16	47,59	0,18	3,49					16	52,53	1,34	7,76				
	24	46,82	0,78	4,75					24	47,34	0,25	1,42					24	51,00	1,53	6,73				
	32	46,4	0,42	3,67													32	50,93	0,07	5,07				
	48	45,94	0,46	2,51																				
	64	45,61	0,33	1,99																				
MEAS (g/cm ³)	1,85			1,63			1,74			1,62			1,68			1,79								
Observação 1:	O critério de parada da compactação do corpo de prova ocorre quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor que 2mm ou quando leituras sucessivas possuem diferença menor que 0,1mm																							
Observação 2:	MEAS = Massa específica aparente seca do corpo de prova																							
Perda de Massa por imersão																								
Cápsula	1			2			3			4			5			6								
Comprimento saliente (cm)	1			1			1			1			1			1								
Área (cm ²)	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63								
Volume (cm ³)	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			19,63								
Massa extrudida - Me = A*MEAS (g)	36,24			32,06			34,07			31,79			32,92			35,12								
Massa do material seco - Ms (g)	95,00			82,30			93,00			81,68			42,00			92,48								
Pi = Ms*100/Msa (%)	262,14			256,73			272,96			256,96			127,60			263,29								
Observação:	Em todos os casos o fator de forma (F) foi igual a 1, pois o material na cápsula de alumínio se apresentou desagregado ou em forma de material solto																							

APÊNDICE E – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão das amostras com adição de cal em 4% de concentração mássica

Ensaio de Compactação																														
Identificação	Amostras com aplicação de cal em 3% de concentração mássica																													
Número do cilindro	1					2					3					4					5					6				
Masso do solo úmido (g)	200					200					200					200					200					200				
Teor de Umidade (%)	20,6					22,3					23,0					24,1					24,8					13,6				
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n	n	Altura (mm)	Δh (mm)	n-4n		
	0	74,31	-		0	79,08	-		0	75,00	-		0	73,55	-		0	65,98	-		0	83,56	-		0	72,6	-			
	1	62,93	11,38		1	66,31	12,77		1	63,13	11,87		1	62,87	10,68		1	57,04	8,94		1	72,6	10,96							
	2	57,9	5,03		2	59,7	6,61		2	56,78	6,35		2	56,36	6,51		2	51,14	5,90		2	66,76	5,84							
	3	55,03	2,87		3	56,27	3,43		3	53,65	3,13		3	53,12	3,24		3	48,88	2,26		3	64,86	1,90							
	4	54,09	0,94	8,84	4	53,97	2,30	12,34	4	51,59	2,06	11,54	4	50,98	2,14	11,89	4	48,32	0,56	8,72	4	61,87	2,99	10,73						
	6	50,7	3,39		6	51,19	2,78		6	49,01	2,58		6	48,87	2,11		6	47,94	0,38		6	59,24	2,63							
	8	49,25	1,45	8,65	8	49,76	1,43	9,94	8	47,8	1,21	8,98	8	48,54	0,33	7,82	8	47,73	0,21	3,41	8	57,5	1,74	9,26						
	12	47,61	1,64	7,42	12	48,46	1,30	7,81	12	47,46	0,34	6,19	12	48,42	0,12	4,70	12	47,52	0,21	1,36	12	55,35	2,15	9,51						
	16	46,78	0,83	7,31	16	48,16	0,30	5,81	16	47,36	0,10	4,23	16	48,26	0,16	2,72	16	53,99	1,36	7,88										
	24	46,17	0,61	4,53	24	47,91	0,25	3,28	24	47,31	0,05	1,70	24	47,96	0,30	0,91	24	52,31	1,68	6,93										
	32	45,95	0,22	3,30	32	47,73	0,18	2,03									32	52,24	0,07	5,26										
	48	45,71	0,24	1,90	48	47,67	0,06	0,79																						
MEAS (g/cm³)	1,85					1,75					1,75					1,71					1,71					1,74				
Observação 1:	O critério de parada da compactação do corpo de prova ocorre quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor que 2mm ou quando leituras sucessivas possuem diferença menor que 0,1 mm																													
Observação 2:	MEAS = Massa específica aparente seca do corpo de prova																													
Perda de Massa por imersão																														
Cápsula	1					2					3					4					5					6				
Comprimento saliente (cm)	1					1					1					1					1					1				
Área (cm²)	19,63					19,63					19,63					19,63					19,63					19,63				
Volume (cm³)	19,63					19,63					19,63					19,63					19,63					19,63				
Massa extrudida - Me = A*MEAS (g)	36,16					34,39					34,37					33,63					33,67					34,25				
Massa do material seco - Ms (g)	76,42					50,66					66,49					50,86					51,15					81,01				
Pi = Ms*100/Me (g)	211,34					147,31					193,46					151,23					151,92					236,53				
Observação:	Em todos os casos o fator de forma (F) foi igual a 1, pois o material na cápsula de alumínio se apresentou desagregado ou em forma de material solto																													

ANEXO A – Resultados dos ensaios de caracterização física do material realizados pelo laboratório de geotecnia Loctest

				UMIDADE NATURAL NBR 6457	
REGISTRO	13056			CLIENTE:	DANIEL
N° CAP	328	501	419	PROJETO:	LOCTDAN-001
C + S + A (g)	21,53	18,46	19,40	LOCAL:	-
C + S (g)	19,59	16,79	17,59	FURO:	-
CAPSULA (g)	5,35	5,31	4,64	AMOSTRA:	-
AGUA (g)	1,94	1,67	1,81	PROF.:	- m
SOLO SECO (g)	14,24	11,48	12,95	MATERIAL:	-
UMIDADE (%)	13,62	14,55	13,98	OPERADOR:	SAMUEL
MÉDIA (%)	14,05			DATA:	14/10/2024
REGISTRO				CLIENTE:	
N° CAP				PROJETO:	
C + S + A (g)				LOCAL:	
C + S (g)				FURO:	
CAPSULA (g)				AMOSTRA:	
AGUA (g)				PROF.:	
SOLO SECO (g)				MATERIAL:	
UMIDADE (%)				OPERADOR:	
MÉDIA (%)				DATA:	
REGISTRO				CLIENTE:	
N° CAP				PROJETO:	
C + S + A (g)				LOCAL:	
C + S (g)				FURO:	
CAPSULA (g)				AMOSTRA:	
AGUA (g)				PROF.:	
SOLO SECO (g)				MATERIAL:	
UMIDADE (%)				OPERADOR:	
MÉDIA (%)				DATA:	
REGISTRO				CLIENTE:	
N° CAP				PROJETO:	
C + S + A (g)				LOCAL:	
C + S (g)				FURO:	
CAPSULA (g)				AMOSTRA:	
AGUA (g)				PROF.:	
SOLO SECO (g)				MATERIAL:	
UMIDADE (%)				OPERADOR:	
MÉDIA (%)				DATA:	
REGISTRO				CLIENTE:	
N° CAP				PROJETO:	
C + S + A (g)				LOCAL:	
C + S (g)				FURO:	
CAPSULA (g)				AMOSTRA:	
AGUA (g)				PROF.:	
SOLO SECO (g)				MATERIAL:	
UMIDADE (%)				OPERADOR:	
MÉDIA (%)				DATA:	
Obs.:					

		MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS ASTM D854 / ASTM D5550	
DADOS DO ENSAIO			
CLIENTE:	DANIEL	FURO:	-
REGISTRO:	13056	AMOSTRA:	-
PROJETO:	LOCTDAN-001	DATA:	11/10/2024
LOCAL:	-	PROF.:	- m
OPERADOR:	SAMUEL		

TEOR DE UMIDADE

Cápsula n°:		195	479	348
Massa bruta úmida	g	20,97	18,72	19,69
Massa bruta seca	g	19,55	17,47	18,40
Tara	g	5,81	5,22	6,09
Teor de umidade	%	10,33	10,20	10,48
Teor de umidade médio	%	10,34		

MASSA DE SOLO SECO

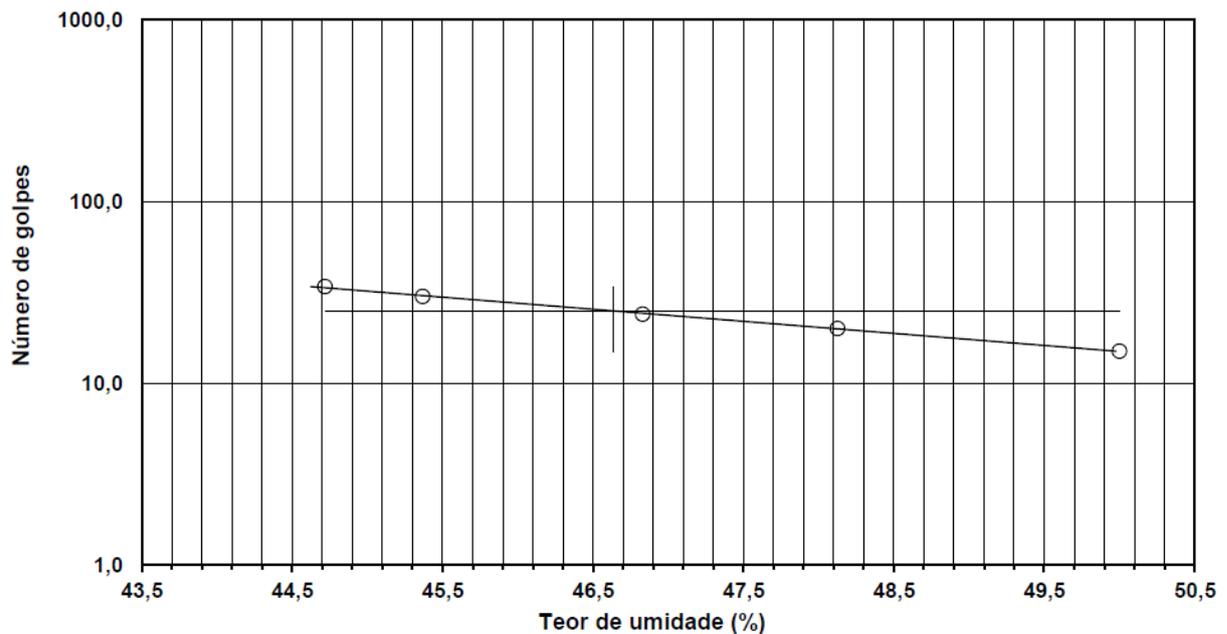
Massa do solo úmido	g	80,00
Teor de umidade médio	%	10,34
Massa de solo seco	g	72,50

Determinação		1	2	3	4	5
Picnômetro	n°	2	6	NA	NA	NA
Massa do picnômetro + Massa do solo + Massa da água	g	737,92	724,20	-	-	-
Temperatura	° C	23,4	23,5	-	-	-
Massa do picnômetro + Massa da água	g	687,00	673,16	-	-	-
Massa do solo seco	g	72,50	72,50	-	-	-
Massa específica da água	g/cm ³	0,9975	0,9975	-	-	-
Massa específica dos sólidos	g/cm ³	3,351	3,369	-	-	-
Média dos Resultado	g/cm ³	3,360				
Média dos Resultado	KN/m ³	32,95				

 Loctest <small>LABORATÓRIO DE GEOTECNIA</small>		LIMITES DE CONSISTÊNCIA LL E LP NBR 6459 E NBR 7180			
CLIENTE:	DANIEL	FURO:	-	REGISTRO:	13056
PROJETO:	LOCTDAN-001	AMOSTRA:	-	DATA:	14/10/2024
OBRA:	-	PROF.:	- m	OPERADOR:	FERNANDA
LOCAL:	-	Material:	-		

Resultados					
LL	47	%	LP	32	%
			IP	15	%

Limite de Liquidez (LL)									
Determinação	n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Cápsula	n°	145	479	195	644	319			
Massa bruta úmida	g	14,16	14,27	14,83	15,09	15,16			
Massa bruta seca	g	11,62	11,43	11,95	11,88	11,89			
Tara da cápsula	g	5,94	5,17	5,80	5,21	5,35			
Teor de umidade	%	44,72	45,37	46,83	48,13	50,00			
Número de golpes		34	30	24	20	15			



Limite de Plasticidade (LP)									
Determinação N°	n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Cápsula N°	n°	649	231	1015	22	37			
Massa bruta úmida	g	6,74	7,62	6,68	6,78	6,81			
Massa bruta seca	g	6,39	7,28	6,35	6,45	6,51			
Tara da cápsula	g	5,30	6,22	5,32	5,41	5,56			
Teor de umidade	%	32,11	32,08	32,04	31,73	31,58			



Análise Granulométrica por Peneiramento e Sedimentação

NBR 7181

CLIENTE: DANIEL	Furo: -	REGISTRO: 13056
PROJETO: LOCTDAN-001	Amostra: -	DATA DO ENS.: 11/10/2024
LOCAL: -	Profundidade: - m	OPERADOR: SAMUEL

Dados da Amostra

Massa total úmida	kg	2504,89
Massa seca retida #10. (acum)	kg	972,30
Massa úmida passante #10.	kg	1532,59
Massa seca passante #10. (acum)	kg	1388,98
Massa total seca	kg	2361,28

Teor de Umidade

Cápsula	Nº	195	479	348
Massa bruta úmida	g	20,97	18,72	19,69
Massa bruta seca	g	19,55	17,47	18,40
Tara da cápsula	g	5,81	5,22	6,09
Teor de umidade	%	10,33	10,20	10,48
Teor de umidade médio	%	10,34		

Peso Específico

Peso específico dos sólidos	g/cm³	3,360
Massa total	g	70,00
Massa seca	g	63,44

Peneiramento do Solo Granular

Peneiras	Material	Material		% que passa
		Retido acumulado	Que passa	
#	φ (mm)	g	g	
2"	50,8	0	2361,28	100
1 1/2"	38,1	0	2361,28	100
1"	25,4	208,11	2153,17	91
3/4"	19,1	272,05	2089,23	88
3/8"	9,5	384,83	1976,45	84
4	4,8	667,76	1693,52	72
10	2	972,3	1388,98	59

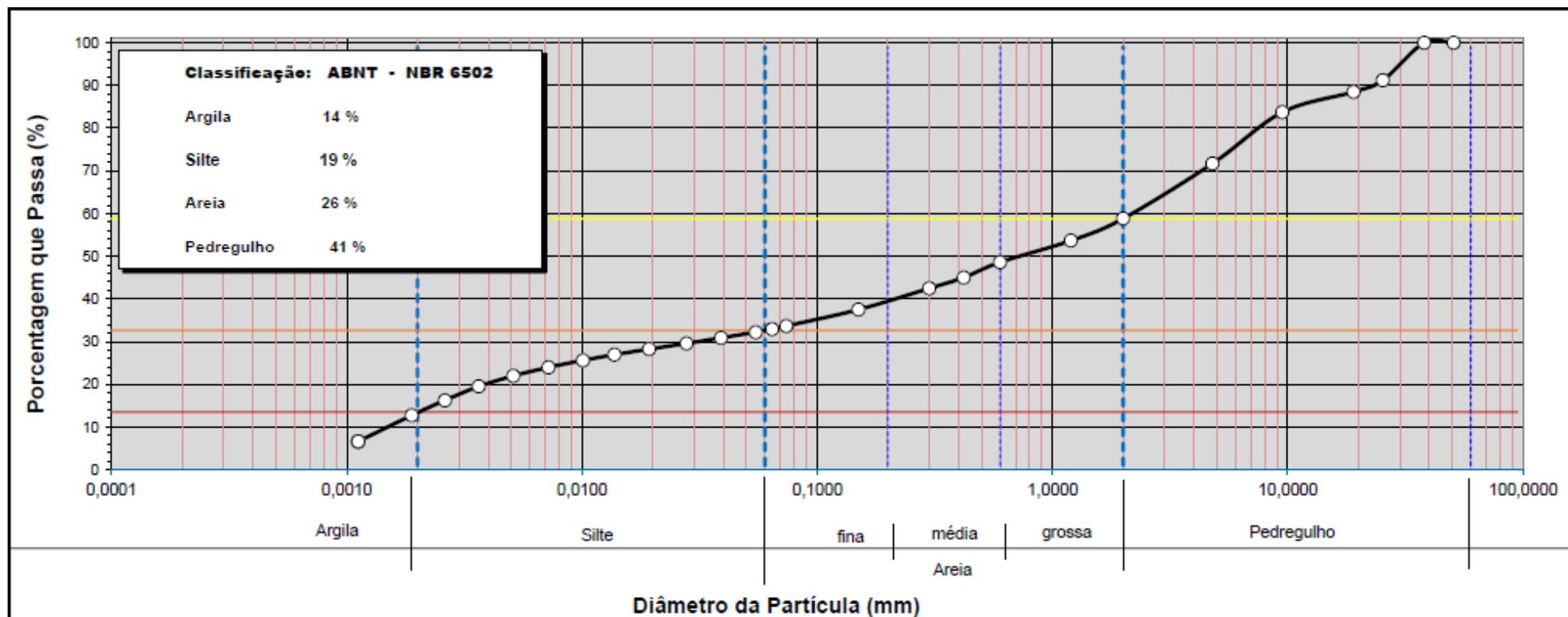
Peneiramento do Solo Fino

Peneiras	Material	Material		% que passa
		Retido	Que passa	
#	φ (mm)	g	g	
10	2	0,00	63,44	59
16	1,2	5,57	57,87	54
30	0,6	11,02	52,42	49
40	0,42	14,89	48,55	45
50	0,3	17,61	45,83	42
100	0,15	22,98	40,46	38
200	0,074	27,13	36,31	34

Sedimentação

Proveta	3	Densímetro		1	Defloculante	Hexametáfosfato de Sódio					
		Tempo min	Temp. °C			Leitura	Correção	Leitura corrigida	K	Z (cm)	f (mm)
14/09/24	09:25:00	0,25	22,2	1,02975							
		0,5	22,2	1,02800	0,00355	1,0245	0,01112	12,172	0,05487	32,22	
		1	22,2	1,02700	0,00355	1,0235	0,01112	12,354	0,03909	30,90	
		2	22,2	1,02600	0,00355	1,0225	0,01112	12,536	0,02784	29,58	
		4	22,2	1,02500	0,00355	1,0215	0,01112	12,063	0,01931	28,27	
		8	22,2	1,02400	0,00355	1,0205	0,01112	12,240	0,01376	26,95	
		15	22,2	1,02300	0,00355	1,0195	0,01112	12,418	0,01012	25,63	
		30	22,2	1,02175	0,00355	1,0182	0,01112	12,639	0,00722	23,98	
		60	23,1	1,02000	0,00331	1,0167	0,01100	12,950	0,00511	21,99	
		120	23,6	1,01800	0,00318	1,0148	0,01094	13,305	0,00364	19,53	
		240	23,7	1,01550	0,00315	1,0123	0,01093	13,749	0,00262	16,27	
		480	23,1	1,01300	0,00331	1,0097	0,01100	14,193	0,00189	12,77	
		1440	23,5	1,00825	0,00321	1,0050	0,01095	15,036	0,00112	6,65	

CLASSIFICAÇÃO: PEDREGULHO ARENO SILTO ARGILOSO MARROM AVERMELHADO



		ENSAIO DE COMPACTAÇÃO NBR-7182			
CLIENTE: DANIEL		FURO: -		REGISTRO: 13056	
PROJETO: LOCTDAN-001		AMOSTRA: -		DATA: 14/10/2024	
LOCAL: -		PROF.: - m		OPERADOR: VAGNER	
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO					
Energia : Normal - cilindro grande		Golpes / camadas 12		Camadas 5 Soquete: 4,5 kg	

UMIDADE HIGROSCÓPICA				
Cápsula	n°	363	114	85
Massa bruta úmida	g	114,43	133,39	114,99
Massa bruta seca	g	108,44	124,52	108,11
Tara da cápsula	g	15,16	12,75	14,89
Umidade	%	6,42	7,94	7,38
Umidade higroscópica	%	7,25		

Peso da amostra úmida total:	5000,00
Peso da amostra seca total:	4662,18
Peso da água:	337,82

UMIDADE DOS PONTOS																		
Pontos	n°	1			2			3			4			5			6	
Cápsula	n°	120	194	148	228	49	76	258	793	107	322	299	99	292	246	78		
Massa bruta úmida	g	52,21	47,22	56,45	82,17	100,87	116,41	75,47	66,73	76,50	104,05	83,44	91,34	102,34	101,72	117,71		
Massa bruta seca	g	47,80	43,25	51,31	73,05	88,93	102,86	66,50	58,79	67,12	89,23	71,87	78,12	86,25	85,75	99,07		
Tara da cápsula	g	14,10	12,96	12,43	12,87	11,66	14,59	14,69	14,93	12,21	14,87	12,60	12,60	12,86	13,35	13,78		
Umidade	%	13,09	13,11	13,22	15,15	15,45	15,35	17,31	18,10	17,08	19,93	19,52	20,18	21,92	22,06	21,85		
Umidade Média	%	13,14			15,32			17,50			19,88			21,95				

Determinação / Cilindro		1	22 - CBR	2	22 - CBR	3	22 - CBR	4	22 - CBR	5	22 - CBR	6	5 - CBR
Água adicionada	g	300		400		500		600		700			
Água adicionada	%	6,0		8,0		10,0		12,0		14,0			
Massa amostra + Cilindro	g	8500		8644		8765		8835		8870			
Tara do Cilindro	g	3872		3872		3872		3872		3872			
Volume do Cilindro	cm³	2075		2075		2075		2075		2075			
Massa amostra	g	4628		4772		4893		4963		4998			
Peso específico úmido	g/cm³	2,230		2,299		2,358		2,392		2,408			
Umidade do Ponto	%	13,1		15,3		17,5		19,9		21,9			
Peso específico seco	g/cm³	1,971		1,994		2,007		1,995		1,975			

Peso específica seco máximo	2,007	gf/cm³
Umidade Ótima	17,5	%

