

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

Marcela Laert Moreira

**TRATAMENTO DO SOLO COM CAL PARA PREVENÇÃO DE EROSÃO
HÍDRICA: UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA USO EM TALUDES DE
PILHA DE ESTÉRIL**

Belo Horizonte

2023

Marcela Laert Moreira

**TRATAMENTO DO SOLO COM CAL PARA PREVENÇÃO DE EROSÃO
HÍDRICA: UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA USO EM TALUDES DE
PILHA DE ESTÉRIL**

Versão Final

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador(a): Aloysio Portugal Maia Saliba

Coorientador(a): Karla Cristina Araújo Pimentel Maia

Belo Horizonte

2023

Moreira, Marcela Laert.

M838t

Tratamento do solo com cal para prevenção de erosão hídrica
[recurso eletrônico] : uma proposta de metodologia para uso em taludes
de pilha de estéril / Marcela Laert Moreira. – 2023.
1 recurso online (117. : il., color.) : pdf.

Orientador: Aloysio Portugal Maia Saliba.

Coorientadora: Karla Cristina Araújo Pimentel Maia.

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

Apêndices: f. 101-117.

Bibliografia: f. 93-100.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Geotecnia - Teses. 2. Erosão - Teses. 3. Solo - Teses. 4. Cal - Teses. 5. Mineração
- Teses. 6. Sedimentos (Geologia) - Teses.
7. Taludes (Mecânica do solo) - Teses. 8. Aterros - Teses. 9. Solo - Uso - Planejamento
- Teses. 10. Mecânica do solo - Teses. I. Saliba, Aloysio Portugal Maia. II. Maia, Karla
Cristina Araújo Pimentel. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDU: 656(043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Ângela Cristina Silva CRB/6 2361
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

FOLHA DE APROVAÇÃO

TRATAMENTO DO SOLO COM CAL PARA PREVENÇÃO DE EROÇÃO HÍDRICA: UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA USO EM TALUDES DE PILHA DE ESTÉRIL

MARCELA LAERT MOREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração GEOTECNIA.

Aprovada em 24 de fevereiro de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba - Orientador (UFMG)
Karla Cristina Araujo Pimentel Maia - Coorientadora (Vale SA)
Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui (UFMG)
Prof. Márcia Maria dos Anjos Mascarenha (UFG)

Belo Horizonte, 24 de fevereiro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Márcia Maria dos Anjos Mascarenha, Usuária Externa**, em 24/02/2023, às 11:12, 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, Membro**, em 24/02/2023, às 12:23, 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, Professor do Magistério Superior**, em 24/02/2023, às 13:32, 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 **Karla Cristina Araujo Pimentel Maia, Usuário Externo**, em 01/03/2023, às 09:53, 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 **1962363** e o código CRC **6871A966**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Aloysio Portugal Maia Saliba que me guiou durante todo o caminho e tornou possível a realização deste trabalho, por acreditar e investir no meu potencial e sempre incentivar para continuar.

A minha coorientadora Karla Cristina Araújo Pimentel Maia, pelo exemplo profissional e pessoal, por todo apoio e conhecimento repassado.

Aos professores das disciplinas cursadas durante o mestrado agradeço aos ensinamentos.

Aos professores que compuseram a banca agradeço pela disposição em contribuir com o trabalho.

A coordenação do curso de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes da UFMG, ao professor José Elievam Bessa Júnior, a professora Leise Kelli de Oliveira e a secretária Larissa Sousa da Silva agradeço por todo apoio e compressão.

A Fundação Christiano Ottoni da Escola de Engenharia da UFMG e ao Programa de P&D ANEEL / SEFAC, agradeço pela concessão da bolsa que permitiu minha dedicação integral aos estudos e à pesquisa.

A SOLOCAP pela solícita ajuda nos ensaios geotécnicos.

Ao Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFMG), ao professor Jorge Luis Zegarra Tarqui e a professora Edna Maria de Faria Viana agradeço por todo apoio para a montagem dos equipamentos dos testes realizados neste trabalho.

A minha família e amigos agradeço por tornarem possível a realização desta etapa.

"The most fruitful research grows out of practical problems"

(Ralph B. Peck)

RESUMO

Processos erosivos em taludes de pilha de estéril ocasionados por chuvas podem acarretar prejuízos estruturais, econômicos e ambientais. O tratamento de solos com cal é conhecido e usado extensamente em todo mundo para construção de aterros para estradas e rodovias. É um processo que visa a estabilização do solo, melhorando trabalhabilidade e propriedades mecânicas após a compactação. Alguns estudos têm sido realizados avaliando a influência da cal na erodibilidade do solo, nos quais foi observado que esse tratamento aumentou a resistência à erosão do solo. Sabendo-se que o tratamento do solo com cal apresenta potencial de uso, e a necessidade de estudar e propor técnicas alternativas, complementares ou mais econômicas que as existentes para mitigar processos erosivos, o presente trabalho verificou a eficiência desse tratamento no aumento da resistência à erosão hídrica para utilização em taludes de pilha de estéril. Para tal, foram realizados ensaios de perda de massa por imersão da metodologia MCT e ensaios de erosão no aparato EFA (*Erosion Function Apparatus*) em amostras com diferentes porcentagens de cal em massa (1%, 2%, 3% e 4%) e sem cal como referência. Os resultados indicaram que a erodibilidade dos solos tratados com 2% a 3% de cal em massa, foi reduzida de 10 a 27,4 vezes, respectivamente. Esse grau de redução tem potencial para diminuir ou eliminar a necessidade de implantação de diques de contenção de sedimentos em pilhas de estéril, reduzindo os riscos inerentes à atividade mineral.

Palavras-chave: Erodibilidade; Estabilização do Solo; Cal; Pilha de Estéril.

ABSTRACT

Rainfall erosion in waste dumps can cause structural, economic, and environmental damage. The treatment of soils with lime is known and used widely worldwide for the construction of landfills for roads and highways. It is a process that aims at soil stabilization, improving workability and mechanical properties after compaction. Some studies have been conducted evaluating the influence of lime on soil erodibility, in which it was observed that this treatment increased resistance to soil erosion. Knowing that the treatment of soil with lime has potential for use, and the need to study and propose alternative techniques, complementary or more economical than existing ones to mitigate erosive processes, it is intended to verify the efficiency of this treatment in increasing the resistance to surface erosion caused by the impact of raindrops on the soil surface of mine waste dump. For this, mass loss tests by immersion of the MCT methodology and experiment tests in the EFA apparatus (Erosion Function Apparatus) were carried out in Exhibitions with different percentages of lime in mass (1%, 2%, 3% and 4%) and without lime as a reference. The results indicated that the erodibility of soils treated with 2% to 3% lime by mass was reduced by 10 to 27.4 times, respectively. This degree of reduction has the potential to reduce or eliminate the need to implement sediment containment dikes in waste rock piles, taking into account the risks inherent to mining activities.

Keywords: Erodibility; Soil Stabilization; Lime Mine Waste Dump.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Erosão por salpicamento ou <i>splash</i> (IPT, 1991 apud Basso, 2013).	21
Figura 3.2: Equipamento do ensaio de Inderbitzen (1961) – concepção original (Bastos, 2004).	26
Figura 3.3: Equipamento de Inderbitzen empregado na pesquisa Estabilidade de Taludes IPR/COPPE/TRAFECON (1975–1978) (Bastos, 2004).	27
Figura 3.4: Modelo de equipamento proposto por Freire (2001) denominado Inderbitzen Modificado (Freire, 2001 apud Lemos, 2002).	28
Figura 3.5: Ensaio de Inderbitzen Modificado (Freire, 2001 apud Higashi, 2006).	29
Figura 3.6: Equipamento de Inderbitzen com gotejamento (Higashi, 2006).	30
Figura 3.7: Equipamento de Inderbitzen e simulador de chuva (Lemos, 2002).	30
Figura 3.8: Modelo de aparelho de Inderbitzen Modificado, escala em metros (Quirino, Moraes e Melo, 2013).	31
Figura 3.9: Ensaio de desagregação por imersão total, após um período de 15 minutos. (Santos, 1997).	33
Figura 3.10: Ensaio de desagregação (imersão parcial) (Nascimento <i>et al.</i> , 2019).	34
Figura 3.11: Amostras de solos submetidas aos ensaios de desagregação (Bastos, 1999).	36
Figura 3.12: Ensaios de (a) infiltrabilidade e (b) erodibilidade específica (perda por imersão modificado) da Metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1995 apud Bastos, 1999).	38
Figura 3.13: Critério de erodibilidade pela Metodologia MCT (Bastos, 1999).	39
Figura 3.14: Diagrama esquemático do aparato EFA (Adaptado Briaud, 2008)	40
Figura 3.15: Classificação erosiva do solo segundo a velocidade média de escoamento ou a tensão de cisalhamento hidráulico (Saliba, 2009).	40
Figura 3.16: Microestrutura de um solo laterítico. (Guimarães, 2002).	
Figura 3.17: Microestrutura de um solo saprolítico. (Guimarães, 2002).	43
Figura 3.18: Mapa de solos do Brasil. (Embrapa, 2011).	45
Figura 3.19: Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. UFV - CETEC - UFLA - FEAM . Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente. (Feam, 2010).	46

Figura 3.20: <i>Crumb test</i> realizado em solo siltoso, não tratado com cal (acima, escala em minutos) e tratado com 2% de cal (abaixo, escala em horas) (Herrier <i>et al.</i> , 2014).....	52
Figura 3.21: (a) Construção de um dique experimental com material tratado com cal, (b) aplicação e compactação com um rolo pé de carneiro, (c) visão geral do dique tratado com cal e (d) visão geral dos dois diques (tratado com cal e não tratado, à direita) (Herrier <i>et al.</i> , 2014).	53
Figura 3.22: Os testes de erosão superficial MoJet foram realizados em (a) solo não tratado e em (b) solo tratados com cal, apresentando aumento do fluxo para 2 l / min. As fotos da esquerda de cada série foram tiradas antes do teste, e as fotos à direita ao final do teste (Herrier <i>et al.</i> , 2014).....	54
Figura 3.23: Imagens microscópicas do solo não tratado e tratado. (a) e (b) solo não tratado, (c) e (d) solo tratado com cura de 24 h. À esquerda são imagens com resolução de 1 mm e à direita são imagens com resolução de 500 µm (Elandalousi <i>et al.</i> , 2018).	56
Figura 3.24: Seção típica de uma pilha de estéril (Gomes, 2012).	57
Figura 4.1: Local da retirada das amostras do solo (Google Earth 2020, imagem de 31/07/2020).	60
Figura 4.2: Aspecto físico natural do solo coletado.	61
Figura 4.3: Determinação da primeira quantidade de água a ser adicionada na amostra até obter coesão.	63
Figura 4.4: Acondicionamento das porções de solo em sacos de polietileno.....	64
Figura 4.5: Pesagem da quantidade de cal a ser adicionada a amostra de solo.	65
Figura 4.6: Adição de cal a amostra.	66
Figura 4.7: Acondicionamento das amostras em sacos de polietileno.	66
Figura 4.8: Equipamento utilizado para o ensaio de compactação Mini-MCV.	66
Figura 4.9: Preparação para o ensaio de compactação Mini-MCV.....	67
Figura 4.10: Extração de 10 mm do corpo de prova.	67
Figura 4.11: Medição de 10 mm de massa extrudada do corpo de prova.	69
Figura 4.12: Preparação dos corpos de prova para o ensaio de perda de massa por imersão. .	69

Figura 4.13: Corpos de prova após preenchimento dos recipientes de imersão com água destilada.....	70
Figura 4.14: Corpo de prova em recipiente de imersão e cápsula de alumínio para recolher material desprendido.....	71
Figura 4.15: Diagrama esquemático do aparato EFA (Adaptado Briaud, 2008)	74
Figura 4.16: Classificação erosiva do solo segundo a velocidade média de escoamento ou a tensão de cisalhamento hidráulico (Saliba, 2009).	75
Figura 4.17: Vista lateral e em planta do aparato de teste EFA (Mantovanelli, 2016).	76
Figura 4.18: Vista lateral e em planta do aparato de teste EFA (Mantovanelli, 2016).	76
Figura 4.19: Caixa de inspeção do aparato EFA.	77
Figura 4.20: Sistema de ascensão da amostra por um pistão manual.....	77
Figura 4.21: Moldes dos corpos de prova (a), equipamento de compactação Mini-MCV adaptado (b) e soquete de compactação adaptado (c).....	80
Figura 4.22: Acondicionamento das amostras.....	80
Figura 4.23: Amostra durante o ensaio.....	81
Figura 4.24: Amostra não erodida em sua totalidade retida do equipamento.	82
Figura 5.1: Distribuição granulométrica.....	84
Figura 5.2: Curva de compactação - Ensaio de compactação Proctor Normal.	
Figura 5.3: Perda de massa por imersão - P_i (%) <i>versus</i> umidade (%).	87
Figura 5.4: Comparação da erodibilidade das amostras segundo Briaud (2008).	89
Figura 5.5: Comparação da erodibilidade das amostras.	90
Figura 5.6: Formação de novas camadas da pilha de estéril (Adaptado Maia, 2008).	92
Figura 5.7: Retaludamento da face em conformação ao projeto geotécnico da pilha (Adaptado Maia, 2008).....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Suscetibilidade à erosão pela textura dos solos (Llopis Trillo, 1999).....	24
Tabela.3.2: Abordagem Holmgren e Flanagan (1977) aplicada à interpretação do ensaio de desagregação (Sales <i>et al.</i> , 2017).....	35
Tabela 5.1: Índices físicos do solo natural	82
Tabela 5.2: Indicadores de valores do índice de plasticidade para a eficiência do tratamento do solo com cal.	83
Tabela 5.3: Indicadores de valores da porcentagem de solos finos para a eficiência do tratamento do solo com cal.....	84
Tabela 5.4: Valores de Perda de massa por imersão (Pi) e respectivas umidades e massa. específica aparente seca (MEAS) das amostras com diferentes teores de cal.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	19
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
3.1	EROSÃO	20
3.1.1	<i>Erosão por impacto</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Erosão superficial ou laminar</i>	<i>22</i>
3.2	AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DO SOLO.....	23
3.2.1	<i>Erodibilidade do solo</i>	<i>23</i>
3.2.2	<i>Avaliação da erodibilidade.....</i>	<i>25</i>
3.2.2.1	Ensaio de Inderbitzen (Inderbitzen, 1961).....	25
3.2.2.2	Ensaio de Inderbitzen Modificado (Freire, 2001).....	27
3.2.2.3	Ensaio de desagregação (Fonseca e Ferreira, 1981)	32
3.2.2.4	Metodologia MCT	37
3.2.2.5	Ensaio de erodibilidade no aparato EFA - <i>Erosion Function Apparatus</i>	39
3.3	SOLOS TROPICAIS	41
3.3.1	<i>3.5.1 Solos lateríticos</i>	<i>42</i>
3.3.2	<i>Solo saprolítico.....</i>	<i>42</i>
3.3.3	<i>Solos no Brasil.....</i>	<i>43</i>
3.3.4	<i>Solos em Minas Gerais</i>	<i>45</i>
3.4	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS COM CAL	46
3.4.1	<i>Fatores que interferem na estabilização do solo com cal</i>	<i>48</i>
3.4.2	<i>Estudos de estabilização do solo com cal contra erosão.....</i>	<i>51</i>
3.5	PILHA DE ESTÉRIL	57
4	MATERIAIS E MÉTODOS	60
4.1	MATERIAIS	60
4.1.1	<i>Solo estudado.....</i>	<i>60</i>
4.1.2	<i>Cal hidratada - Tipo CH-III</i>	<i>61</i>

4.2	MÉTODOS	61
4.2.1	<i>Caracterização física do solo</i>	61
4.2.2	<i>Ensaio de compactação mini-MCV</i>	62
4.2.2.1	Preparação das amostras	62
4.2.2.2	Adição de cal	64
4.2.2.3	Execução do Ensaio de compactação mini-MCV	66
4.2.3	<i>Ensaio de perda de massa por imersão</i>	68
4.2.3.1	Cálculo da perda de massa por imersão (Pi)	71
4.2.4	<i>Ensaio de erodibilidade no aparato EFA - Erosion Function Apparatus</i>	73
4.2.4.1	Preparação das amostras para os ensaios de erodibilidade no aparato EFA	78
4.2.4.2	Execução do ensaio de erodibilidade no aparato EFA	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	82
5.1.1	<i>Granulometria</i>	83
5.1.2	<i>Curva de compactação – Ensaio de Compactação Proctor Normal</i>	85
5.2	ENSAIO DE COMPACTAÇÃO MINI-MCV E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO	85
5.3	ENSAIO DE ERODIBILIDADE NO APARTO DE TESTE EFA	88
5.4	APLICAÇÃO DA TÉCNICA EM TALUDES DE PILHA DE ESTÉRIL	91
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	94
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	95
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

1 INTRODUÇÃO

Talude em uma pilha de estéril é a superfície inclinada na face formada pela disposição do estéril, que por sua vez é o material sólido resultante do decapeamento da mina, que não se presta à exploração econômica, cuja remoção se torna necessária para a lavra do minério. Na prática, não são incomuns casos em que os taludes de pilhas de estéril não recebem um sistema de proteção contra a erosão durante a fase de operação, que pode se estender por vários períodos chuvosos.

A pilha de deposição de estéril produz sedimentos provenientes da erosão hidráulica que podem ser ocasionados pela perda de solo devido às chuvas e também por problemas no sistema de drenagem superficial da pilha. A geração de sedimentos provocada pelos processos erosivos se torna um grande problema ambiental, uma vez que todo o material carreado, se não controlado, tende a invadir áreas naturais, muitas vezes protegidas ambientalmente, assoreando cursos de água, prejudicando o bom desenvolvimento da vida aquática e da vida útil dos cursos d'água. Portanto, processos erosivos em taludes de pilha de estéril podem acarretar prejuízos estruturais, econômicos e ambientais (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006; Gomes, 2012).

Desta 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 mais profunda (sulco, ravina, voçoroca), que podem ocasionar mais perda de solo, e consequentemente 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 uma barragem, ou dique, de contenção de sedimentos gerados por erosão da pilha de estéril, localizado a jusante da pilha. 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. Adicionalmente, barragens e diques trazem consigo riscos relativos à ruptura, que devem ser gerenciados. Diante disto, torna-se mais

vantajoso a prevenção da erosão em detrimento da contenção dos sedimentos gerados por processos erosivos provenientes da pilha.

Atualmente, existem diversas técnicas utilizadas para prevenção do desenvolvimento de processos erosivos em taludes de obras civis e também aplicadas à taludes de pilhas de estéril da atividade minerária, dentre elas, recobrimento vegetal, hidrossemeadura, geossintéticos, biomantas, concreto projetado, barreiras contra fluxo, emulsão asfáltica, dentre outras. Na prática, muitas vezes os taludes não recebem uma proteção adequada devido à grande extensão das áreas a serem protegidas e ao alto custo relativo das alternativas mais conhecidas.

É também comum que os taludes permaneçam sem proteção até que uma área significativa seja criada, de forma a reduzir o custo unitário de aplicação da solução escolhida permitindo, assim, que fiquem expostos às intempéries e, conseqüentemente, aos processos erosivos.

Desta forma, torna-se importante estudar e propor técnicas alternativas ou complementares às técnicas existentes, para mitigação de processos causadores de erosões em taludes de pilhas de estéril. Estas técnicas precisam apresentar custos menores que às alternativas tradicionalmente aplicadas, ser uma tecnologia que dependa de insumos amplamente disponíveis e de aplicação simples, preferencialmente utilizando equipamentos já encontrados nas frentes de trabalho.

O tratamento de solos com cal é conhecido e usado extensamente em todo mundo para construção de aterros para estradas e 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).

Alguns estudos têm sido realizados avaliando a influência do tratamento de cal na erodibilidade do solo. Dentre eles, Herrier *et al.* (2014), que avaliaram o tratamento do solo com cal como um material resistente à erosão em um dique de terra. Eles 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. O aumento da coesão deve-se também pelas chamadas reações pozolânicas entre a cal, as partículas de sílica e alumina dissolvidas, a argila e a água, com acréscimo significativo de resistência se comparado ao solo não tratado. Também foi observado que o tratamento com cal diminuiu a permeabilidade e aumentou a resistência à erosão interna e superficial do solo.

Em um estudo sobre o uso de solução de cal para mitigação de processos erosivos em margens de reservatório, Nascimento *et al.* (2019) realizaram ensaios de Inderbitzen, desagregação, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e granulometria a laser em amostras de solos estabilizados com concentrações de cal em 1%, 2% e 4% e tempos de cura de 1, 7, 28 e 56 dias. Verificou-se que o tratamento aumentou a resistência do solo quanto à erodibilidade superficial e à estabilidade estrutural. Em relação à erodibilidade superficial, a concentração da solução de cal de 1% em massa se mostrou adequada. No entanto, para que se tenha um ganho na estabilidade estrutural, foi necessário concentração da solução de cal superior a 2% e tempo de cura maior que 28 dias.

Santos (2009) propôs uma técnica comercialmente denominada Cal-Jet, no qual se pulveriza uma calda de cal na proporção de 3:1 (relação de 3 litros de água e 1 quilograma de cal) em taludes propensos à erosão. Segundo o autor, esta é uma solução de baixo custo quando comparada a outras já existentes no controle de erosões. Contudo, a eficiência e concentração de cal na solução dependem do tipo de solo a ser tratado.

Portanto, o tratamento de solos com cal é uma técnica amplamente utilizada para melhoria e estabilização de solos na construção de estradas, rodovias, ferrovias, plataformas, e atualmente, têm crescido o número de estudos sobre efeito da cal na erodibilidade dos solos para utilização em estruturas hidráulicas, apesar da pouca aplicação até agora. Contudo, os princípios do tratamento de cal para redução da erosão em taludes de obras civis permanecem pouco ou nada aplicados ou estudados.

Diante deste contexto, este estudo avalia o tratamento de amostras de solo com cal para prevenção da erosão superficial gerada por chuva em taludes de pilha de estéril e propõe uma metodologia para avaliação da aplicabilidade desta técnica a partir de ensaios geotécnicos e hidráulicos, de forma a verificar o potencial de aumento da resistência à erosão do solo.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Esta pesquisa teve como objetivo geral a avaliação, em laboratório, da eficiência do uso da cal na redução da erodibilidade do solo e propor uma metodologia para o uso da técnica em taludes de pilha de estéril. Para tanto, foram objetivos específicos da pesquisa:

- Analisar a influência da cal na erodibilidade das amostras de solo tratadas com cal (0%, 1%, 2%, 3% e 4%) a partir dos resultados dos ensaios de perda de massa por imersão da metodologia MCT, e dos ensaios de erosão no aparato EFA (*Erosion Function Apparatus*) de forma a verificar o potencial de aumento da resistência à erosão do solo;
- Havendo potencial de ganhos de resistência à erosão, determinar os teores de cal mais eficientes;
- Descrever uma metodologia para aplicação da técnica em taludes de pilha de estéril.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo abordará considerações básicas sobre erosão, erodibilidade dos solos, avaliação da erodibilidade, solos tropicais, estabilização dos solos com cal e pilhas de estéril.

3.1 Erosão

Erosão é definida como um mecanismo de desprendimento ou dissolução, transporte e depósito dos materiais do solo ou rocha por meio de agentes erosivos. Devido ao clima que caracterizam as regiões tropicais, a chuva, associada às características geológicas e fisiográficas, constitui-se em um dos principais elementos desencadeadores dos processos de erosão (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006; Guerra, 2009).

O processo erosivo depende de fatores externos, como o potencial de erosividade da chuva, as condições de infiltração e escoamento superficial, a declividade e comprimento do talude ou encosta e, ainda, de fatores internos, como gradiente crítico, desagregabilidade e erodibilidade do solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

A erosão hídrica é definida como as transformações impostas ao solo devido à ação hídrica, a qual pode possuir diversas origens, o que possibilita a demonstração, em parte, dessa classificação quanto ao grau de erodibilidade e à origem do agente erosivo, caso esse seja fluvial, pluvial etc. A erosão hídrica possui significativo impacto no planejamento urbano e, consequentemente, é a maior influenciadora nas mudanças impostas à superfície terrestre, tornando-se ainda mais evidente quando intensificada pelo ser humano, motivo pelo qual, esse projeto irá concentrar esforços na análise de áreas nas quais há a possibilidade de erosão devido à ação pluvial. A erosão pluvial, responsável por grandes movimentações de terra, por vezes, deixa de ser definida como causa para pequenas perdas de partículas, as quais podem, aos poucos, ganhar grandes proporções (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

A erosividade é definida como a capacidade de ação do agente erosivo (das gotas de chuva, do escoamento superficial, de fluidos agressivos, dentre outros) em causar o destacamento e o transporte do solo. Já a erodibilidade é definida como a resistência do solo ao processo erosivo,

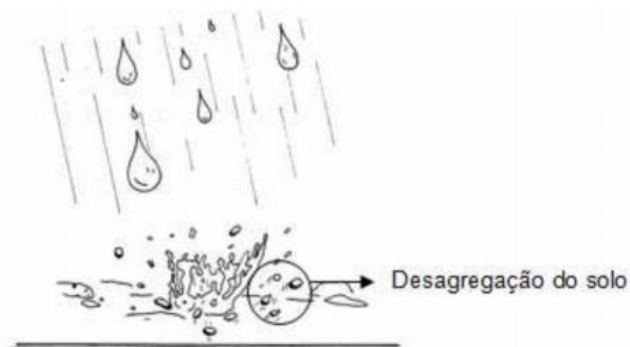
incluindo, além de suas características intrínsecas, fatores secundários, como os ciclos de umedecimento e secagem e a composição da água que interage com o solo (Sales *et al.*, 2017).

As erosões causadas pelas chuvas se classificam em três tipos principais, a erosão superficial, a erosão interna e a erosão linear (sulco, ravina, voçoroca), segundo o seu estágio de evolução. Nesta revisão será dado o enfoque à erosão superficial, por ser o tipo de erosão a ser considerado neste estudo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

3.1.1 Erosão por impacto

A ação hídrica pode abranger diversos mecanismos, um dos itens mais relevantes é o evento de desagregação resultante dos impactos das gotículas de água, provenientes da ação pluvial, sobre uma camada de solo, o que acarretará maior desprendimento (Bloise *et al.*, 2001; Imeson e Curfs, 2006). Alguns usam o conceito de erosão por salpicamento ou por *splash*, o qual evidencia o som resultante do impacto da gotícula sobre superfície de solo. Essa é uma das principais causas da erosão pluvial, como pode ser observado na Figura 3.1, o que influencia em um aumento gradual da porção de solo que será carregada e em uma maior erosão laminar, em virtude da maior quantidade de massa em escorregamento.

Figura 3.1: Erosão por salpicamento ou *splash* (IPT, 1991 apud Basso, 2013).



Freire (2001) descreve que a fase de remoção de partículas (desagregação), conhecida por erosão por *splash*, ou ainda como “por salpicamento”, ocorre basicamente como um resultado das forças causadas pelo impacto das gotas de chuva. Uma gota quando bate em um solo molhado, remove partículas que estão envolvidas por uma película de água. Além das partículas

serem transportadas pelo impacto das gotas de chuva, algumas são deslocadas pelo choque proporcionado por sedimentos que batem uns contra os outros.

Para Selby (1993), a erosão pelo impacto da gota da chuva é responsável por quatro efeitos:

- Desagregação das partículas do solo;
- Pequeno deslocamento lateral (rastejamento);
- Saltação de partículas juntamente com as gotas de chuva (*splash*);
- Distribuição das partículas.

De acordo com Sá (2001), as chuvas torrenciais ou pancadas de chuvas mais intensas constituem a forma mais agressiva de impacto da água no solo, acelerando o processo erosivo.

Guerra e Cunha (1995) afirmam que em uma forte tempestade tropical, uma massa de 350 t de água (35 mm) pode ser despejada em uma área de um hectare no período de apenas meia hora. Essa energia é suficiente para quebrar a estrutura do solo, formando crostas na superfície, o que dificulta a infiltração.

A formação de crostas, segundo Higashi (2006) pode ser interpretada como um rearranjo de partículas, conferindo ao solo uma nova estrutura com menor índice de vazios, e, portanto, com menor valor de permeabilidade. Esta diminuição da capacidade de permitir o fluxo gera o escoamento superficial, responsável pela segunda etapa do processo erosivo.

3.1.2 Erosão superficial ou laminar

A erosão superficial, também chamada laminar, é proveniente do desprendimento ocasionado por um fluxo de água em uma superfície de solo, o qual, como citado anteriormente, é potencializado em razão do impacto das partículas. Simultaneamente, além de desagregação, há aumento da quantidade de grãos que propiciam uma maior energia e resultam em maior poder de arraste. O poder erosivo da água em movimento e sua capacidade de transporte dependem da densidade e da velocidade de escoamento, bem como da espessura da lâmina d'água e, principalmente, da inclinação da vertente ou relevo. A formação de filetes no fluxo superficial amplia o potencial de desprendimento e arraste das partículas de solo, dando, quase

sempre, origem aos sulcos que evoluem para ravinas podendo chegar à condição de voçoroca (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

3.2 Avaliação da erodibilidade do solo

A determinação da erodibilidade dos solos tem sido uma ferramenta importante para identificar, entender e até mesmo propor soluções quando do surgimento de processos erosivos. Para maior compreensão da erodibilidade dos solos e sua determinação foram levantadas informações na literatura descritas a seguir.

3.2.1 Erodibilidade do solo

A erodibilidade é um dos principais fatores condicionantes da erosão dos solos. Pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes (Bastos, 1999).

Segundo Bacellar (2000), a erodibilidade é um índice que expressa a suscetibilidade à erosão de um material a um determinado agente erosivo. No caso da erosão hídrica, a erodibilidade pode ser visualizada como dependente do balanço de forças opostas, as forças atuantes dos agentes erosivos e as resistentes do material. A partir do conceito de erodibilidade, diversos autores se propuseram a avaliar as condições físicas e químicas dos solos, na busca por uma propriedade dos mesmos que estivesse diretamente relacionada ao desencadeamento do processo erosivo.

Diversos autores enfatizam ser a textura (tamanho dos grãos) um dos fatores mais relevantes na magnitude dos efeitos erosivos sobre um dado solo. Llopis Trillo (1999) propôs um sistema hierárquico destes efeitos em função da textura dos solos (Tabela 3.1), baseado no Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Tabela 3.1: Suscetibilidade à erosão pela textura dos solos (Llopis Trillo, 1999).

Símbolo	Descrição do Solo - Classificação Unificada	Erodibilidade
GW	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia bem graduados, com poucos ou sem finos.	Menos Erodível Mais Erodível
GP	Pedregulho e mistura de pedregulho e areia mal graduados, com poucos ou sem finos.	
SW	Areias e areis pedregulhosas bem graduadas, com poucos ou sem finos.	
GM	Cascalho siltoso, misturas de cascalho e areia, areia e silte.	
CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada, argilas gordas.	
CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa ou média, argilas pedregulhosas, argilas arenosas, argilas siltosas, argilas magras.	
OL	Siltes orgânicos, siltes e argilas orgânicas de plasticidade baixa.	
MH	Siltes inorgânicos, solos arenosos finos ou siltosos micáceos e diatomáceos, solos elásticos	
SC	Areias argilosas	
SM	Areias siltosas	
ML	Siltes inorgânicos e areias muito finas, pó-de-pedra, areias finas siltosas ou argilosas e siltes argilosos pouco plásticos	

Para Grabowski (2011) As partículas que compõem o sedimento, geralmente erodido em regiões mais suscetíveis, são compostas de minerais característicos da rocha-mãe, matéria orgânica, areia, silte e argila, em maior ou menor proporção. São essas quantidades que definem um solo ser mais argiloso ou arenoso, por exemplo e, conseqüentemente influenciam na capacidade de um solo sofrer erosão.

Wang (2013) argumenta que a erodibilidade deveria levar em consideração os diferentes agentes erosivos atuantes, bem como as condições de superfície e climáticas às quais o material está exposto, uma vez que tanto as forças exógenas quanto as propriedades do solo variam em função do tempo e do espaço durante um mesmo evento. Assim, por exemplo, no início de uma precipitação, o solo possui pouca quantidade de água à medida que o evento chuvoso evolui, a saturação favorece o escoamento superficial, com variações da permeabilidade in situ.

Na literatura técnica os estudos sobre erodibilidade vêm de diferentes áreas do conhecimento: Agronomia, Hidráulica de Canais e menos frequentemente do meio geotécnico (Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica). No âmbito da Engenharia Geotécnica, as pesquisas no estudo da erodibilidade e dos fatores que condicionam à resistência a erosão ainda são muito escassas se comparadas com a importância dos problemas geotécnicos gerados. Segundo Bastos (2004), sua quantificação direta esbarra em dificuldades práticas decorrentes da pequena

magnitude das tensões envolvidas e da necessidade de se representar complexas condições ambientais.

3.2.2 Avaliação da erodibilidade

A determinação da erodibilidade dos solos com enfoque geotécnico tem sido uma ferramenta importante para identificar, entender e até mesmo propor soluções quando do surgimento de processos erosivos. Camapum de Carvalho *et al.*, (2006) e Bastos, (2004) 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 nos 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 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 (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006; Sales *et al.*, 2017).

Briaud *et al.* (2001) propuseram um aparato denominado *Erosion Function Apparatus* (EFA) capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos sujeitos a diferentes velocidades de escoamento.

A seguir serão descritos os ensaios de Inderbitzen (Inderbitzen, 1961), o ensaio de Inderbitzen modificado (Freire, 2001), o ensaio de desagregação ou *slaking test* (Fonseca e Ferreira, 1981), e os ensaios utilizados no presente trabalho, o critério de erodibilidade MCT (Nogami e Villibor, 1979) e o *Erosion Function Apparatus* (Briaud *et al.*, 2001).

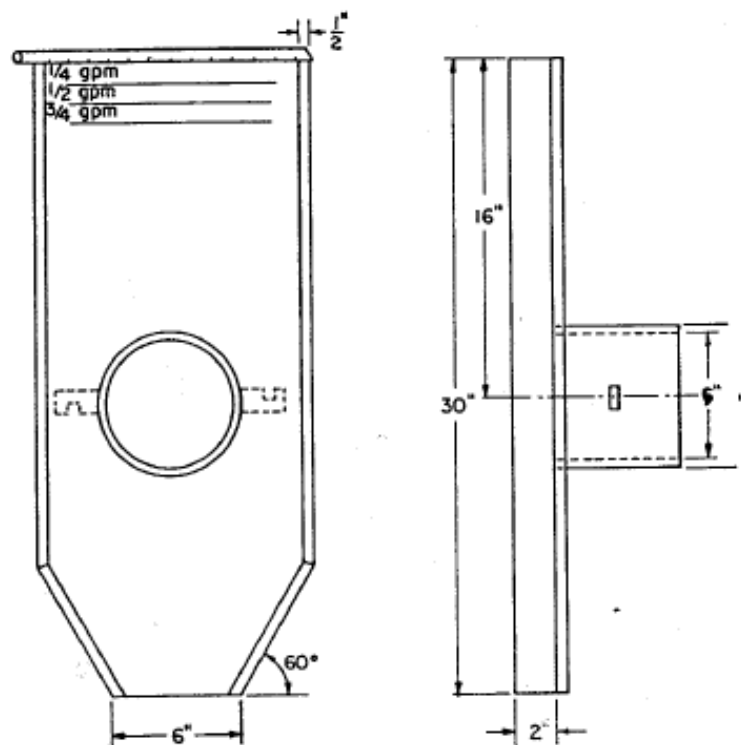
3.2.2.1 Ensaio de Inderbitzen (Inderbitzen, 1961)

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 indeformada de solo, submetida a um fluxo laminar uniforme de vazão constante previamente determinada. 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.

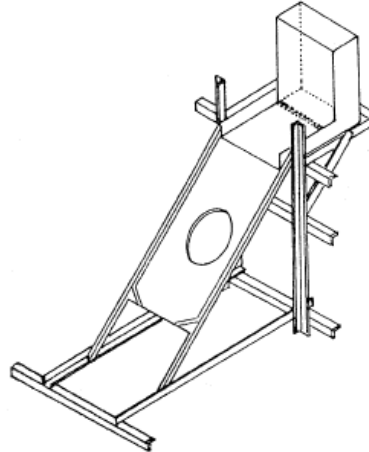
Inderbitzen (1961) apresenta a concepção original de um canal hidráulico e de um método de ensaio empregados na avaliação da erodibilidade. Com a divulgação no meio geotécnico, o ensaio tomou o nome de ensaio de Inderbitzen (erosômetro ou ainda ensaio de erosão). A Figura 3.2 ilustra o detalhamento do equipamento de Inderbitzen original. No ensaio é medida a perda de solo em amostras cuja superfície coincide com um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo d'água com vazão controlada. Segundo o autor, o equipamento simula em condições próximas às reais como o solo se comporta frente a um fluxo d'água superficial, permitindo determinar a influência de fatores como a compactação do solo, a declividade da rampa, a vazão e a duração do fluxo. Os resultados são expressos em gráficos da perda de solo e tempo de exposição e da velocidade de erosão e tempo de exposição.

Figura 3.2: Equipamento do ensaio de Inderbitzen (1961) – concepção original (Bastos, 2004).



Na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECON), desenvolvida no período de 1975 a 1978, o ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio para avaliação da erodibilidade dos solos. O equipamento de Inderbitzen empregado, ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Equipamento de Inderbitzen empregado na pesquisa Estabilidade de Taludes IPR/COPPE/TRAFECON (1975–1978) (Bastos, 2004).



Ao longo dos anos outros equipamentos e procedimento para ensaios de Inderbitzen foram sendo desenvolvidos com base nos anteriores para a avaliação da erodibilidade de solos brasileiros, com modificações nos materiais, nas geometrias ou no procedimento, configuram algumas outras propostas como foi publicado por Stephan (2010).

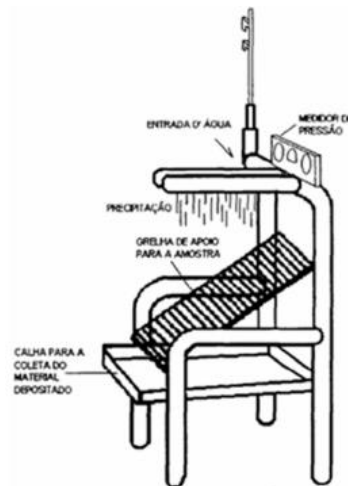
3.2.2.2 Ensaio de Inderbitzen Modificado (Freire, 2001)

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 da água em uma precipitação.

Freire (2001) propôs um novo ensaio, similar ao Inderbitzen, que procurou representar as condições do solo no campo, durante as precipitações atmosféricas, o novo ensaio foi denominado pelo autor de ensaio Inderbitzen Modificado, no qual simula 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. Seu novo equipamento consistia em uma estrutura tubular, na qual foi apoiada uma grelha com apenas duas possibilidades de inclinação, sendo disposta uma amostra de solo prismática não confinada debaixo de duas linhas de “chuveiramento” a uma altura de 20 cm, conforme a Figura 3.4, sendo que a vazão era controlada através de um manômetro.

Figura 3.4: Modelo de equipamento proposto por Freire (2001) denominado Inderbitzen Modificado (Freire, 2001 apud Lemos, 2002).



O corpo de prova não é confinado, podendo ser constituído por uma amostra indeformada em bloco, ou por um cilindro compactado e seccionado longitudinalmente ao meio (Freire e Galvão, 2002). Sob a rampa de apoio, tem-se um primeiro recipiente para coleta da água e dos sedimentos carregados, que posteriormente é escoado para um segundo recipiente para decantação e, finalmente, para um conjunto de peneiras (Figura 3.5).

Figura 3.5: Ensaio de Inderbitzen Modificado (Freire, 2001 apud Higashi, 2006).



O procedimento do ensaio segundo Chamecki e Silva (2004) pode ser descrito da seguinte forma:

- O solo é posicionado sobre uma grade ou tela inclinada, de maneira que o corpo de prova fique também inclinado e forme uma pequena rampa de solo;
- Tubos perfurados posicionados em cima do corpo de prova, criam escoamentos verticais e diretos em diversos pontos do solo, provocando impacto e erosão. A pressão de chuveiramento é controlada manometricamente e a amostra deve estar posicionada de maneira que o chuveiramento na sua face superior seja pleno;
- O excesso de água que não chega a se infiltrar no corpo de prova, provoca a formação de um escoamento superficial sobre o mesmo, complementando a erosão pluvial;
- A água que escoar é captada através de recipientes e peneirada. A erosão é calculada em porcentagem de massa, através da razão entre o peso de material retido em cada peneira depois de seco (após 24 h de permanência em estufa a 110 °C) e o peso total seco do corpo de prova antes do ensaio, calculado em função de seu peso e umidade.

Chamecki e Silva (2004) apresentam um estudo da erosão hídrica em argilas rijas da Formação Guabirotuba. Em seu trabalho, é realizado entre outros experimentos, o ensaio de Inderbitzen Modificado (Freire, 2001) para amostras indeformadas, na umidade natural e após secagem ao ar por quinze dias. A pesquisa concluiu que a simulação dos processos erosivos através deste tipo de ensaio e do Inderbitzen (1961) são os que apresentam melhores resultados, principalmente pela possibilidade da realização de comparações e simulações.

Freire (2001) denominou seu trabalho como “Grau de Erodibilidade do Solo – GES” e relacionou o resultado do ensaio com o de cisalhamento direto, observando os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito. Um recurso eficiente no estudo de erodibilidade, segundo o autor, sua proposta simula satisfatoriamente a ação da chuva em campo, simples e de baixo custo. Demonstrou, também, a diminuição dos índices de vazios e permeabilidade, a partir da primeira hora de ensaio, devido ao impacto da gota e os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, no ensaio de cisalhamento direto, não apresentaram relação direta com o "Grau de Erodibilidade do Solo".

Higashi (2006) empregou o ensaio Inderbitzen Modificado por Freire (2001) para análise do potencial erosivo dos solos do município de Tubarão objetivo o mapeamento geotécnico da região (Figura 3.6). Visando também simular o efeito da chuva, Lemos (2002) apresenta o ensaio de Inderbitzen submetido simultaneamente a um simulador de chuva (Figura 3.7).

Figura 3.6: Equipamento de Inderbitzen com gotejamento (Higashi, 2006).

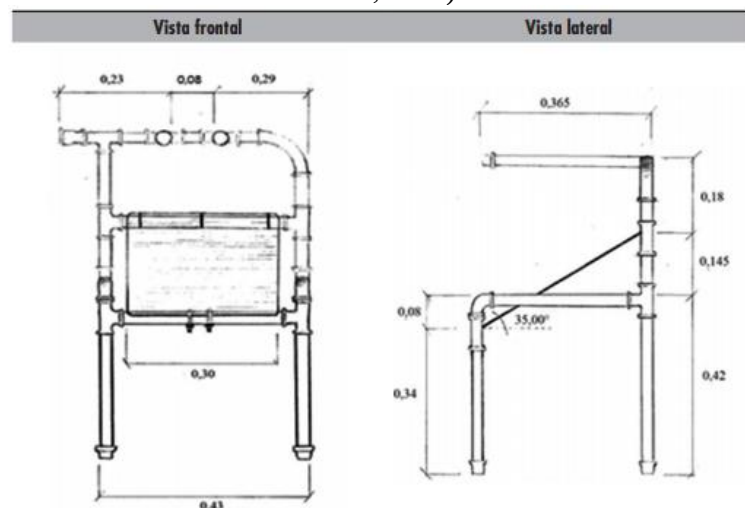


Figura 3.7: Equipamento de Inderbitzen e simulador de chuva (Lemos, 2002).



Análogo ao equipamento desenvolvido por Freire (2001), alunos da Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão, desenvolveram seu próprio equipamento de Inderbitzen Modificado ao realizarem o trabalho “Construção de um modelo para análise do índice de erodibilidade do solo em uma região do município de Catalão – Goiás” no ano de 2013 (Figura 3.8). O equipamento consistiu em uma estrutura tubular, como proposto por Freire (2001), composta por uma grelha localizada abaixo de duas linhas de “chuveiramento”, sendo que a amostra é colocada sobre a grelha. Durante o ensaio, o solo é erodido e transportado por gravidade para um recipiente de acumulação. Para prosseguir com o ensaio, todo o material que estava no recipiente de acumulação passa pela peneira de abertura de 0,075 mm (QUIRINO; MORAIS; MELO, 2013).

Figura 3.8: Modelo de aparelho de Inderbitzen Modificado, escala em metros (Quirino, Morais e Melo, 2013).



Ainda de acordo com os autores supracitados, posteriormente à realização do ensaio, deve ser reservada a quantidade de material erodido retido no recipiente de acumulação e na peneira de malha de 0,075 mm. Após a retirada, o material segue para secagem em estufa e pesagem do material seco. Para encontrar o potencial de erodibilidade (E), os autores utilizaram a (Equação 3.1, na qual é dividida a quantidade acumulada de solo retido no recipiente e na peneira pela área superficial da amostra.

$$E = \frac{P_s}{A} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Em que,

E é a medida da erosão (g/cm²);

P_s é o peso do solo seco (g);

A é a área superficial (cm²).

3.2.2.3 Ensaio de desagregação (Fonseca e Ferreira, 1981)

O ensaio de desagregação também conhecido como *slaking test*, evoluiu do chamado *crumb test*, ensaio preconizado para identificação de solos dispersivos através da imersão de agregados de solo em água. Como desagregação (ou *slaking*) entende-se o processo de ruína de uma amostra de solo não confinada, exposta ao ar e na sequência imersa em água (MORIWAKI E MITCHELL, 1977). O objetivo maior deste ensaio é a verificação da estabilidade à desagregação de uma amostra de solo cúbica ou cilíndrica, independente da dispersão do material. A aplicação do ensaio de desagregação para fins geotécnicos foi idealizada pela engenheira Anna Margarida Fonseca, ao estudar propriedades dos solos para fins de fundação durante a construção de Brasília (Sales *et al.*, 2017)

Na pesquisa IPR/COPPE/TRAFECON (1975–1978), o ensaio de desagregação foi indicado como critério qualitativo na investigação da erodibilidade de solos em taludes de estradas. Fonseca (1981) propôs o uso da velocidade de desagregação como um índice classificatório para a erodibilidade de solos superficiais de taludes. Os resultados obtidos pelo ensaio para solos originados de gnaiss foram comparados com ensaios de Inderbitzen e o comportamento

in situ dos materiais em taludes de referência (REGO, 1978). Santos (1997) apresenta resultados de ensaios de desagregação para solos de erosões de Goiânia, também os comparando com os resultados de ensaios de Inderbitzen.

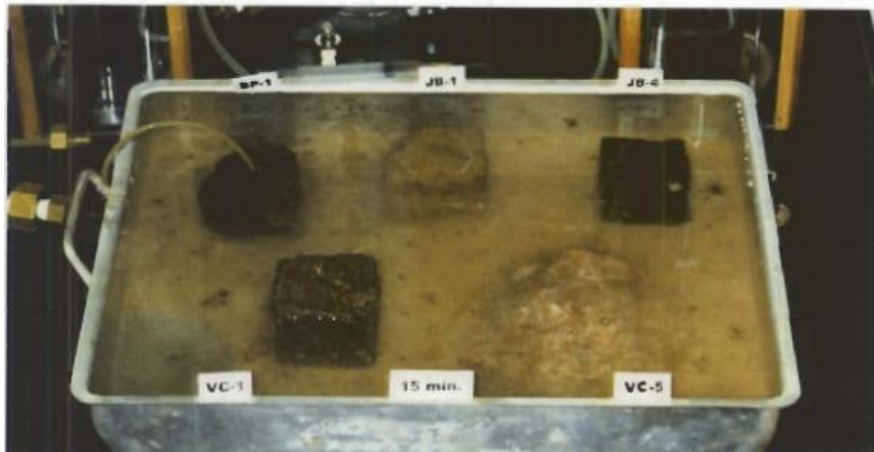
A metodologia deste ensaio consiste em colocar amostras indeformadas do solo em estudo sob submersão.

Rego (1978) e Fonseca e Ferreira (1981) sugerem a utilização de amostras (indeformadas) cúbicas com 6cm de lado, moldadas (por “talhamento”) na umidade natural, parcialmente submersas, com nível da água a 1/3 da altura das amostras, ou seja, 2cm.

As amostras de saprolito, horizonte que no campo se apresentava mais erodível, levaram de 5 a 40 minutos para se desagregarem. As amostras do horizonte de transição entre o solo residual maduro e o saprolito, que apresentava em campo resistência regular à erosão, se desagregaram em cerca de 12 horas. Por fim, o solo residual maduro e o colúvio, que apresentavam bom comportamento em campo, não se desagregaram (Ferreira, 1981 e Rego, 1978).

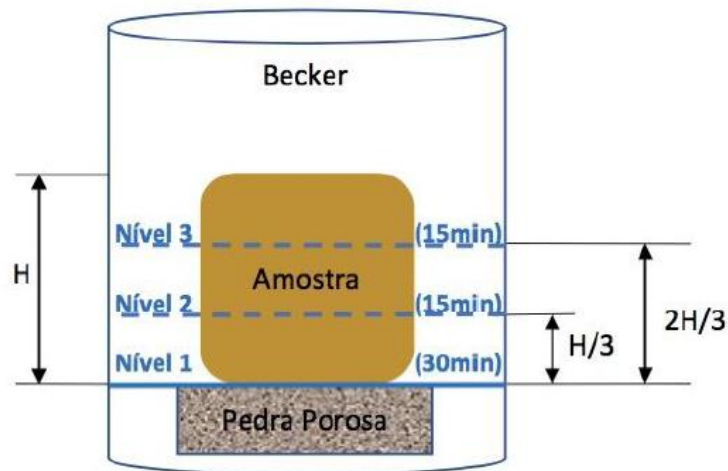
Outras metodologias foram apresentadas por Santos (1997). Nestas propostas, as amostras continuam sendo cúbicas, com 6cm de lado, porém, as condições de submersão e o tempo dos ensaios são outros (Figura 3.9). Na primeira delas, conforme descreve o autor, as amostras foram submetidas à imersão total desde o início do ensaio prosseguindo sob esta condição até o final do ensaio, 24 horas depois.

Figura 3.9: Ensaio de desagregação por imersão total, após um período de 15 minutos. (Santos, 1997).



Na segunda sugestão de Santos (1997) as amostras foram colocadas primeiramente sobre uma pedra porosa com nível d'água sendo mantido na altura da base da amostra por um período de 30 minutos. A seguir, a altura d'água era aumentada sucessivamente para $1/3$, $2/3$, até a submersão total das amostras, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos (Figura 3.10). Após a submersão total, o ensaio prosseguia até o período de 24 horas.

Figura 3.10: Ensaio de desagregação (imersão parcial) (Nascimento *et al.*, 2019).



Neste ponto do ensaio os solos apresentavam comportamentos semelhantes aos verificados pela metodologia anterior, indicando que, pelo menos para os solos estudados por este autor, a adoção das diferentes metodologias não implicou na alteração dos resultados obtidos.

O autor conclui que os ensaios apresentam boa correlação com as observações de campo, com as amostras que mais se desagregaram tendo sido as que se mostravam mais erodíveis em campo, enquanto as que não apresentaram reação no ensaio correspondiam aos solos pouco erodíveis.

Na interpretação dos resultados, os trabalhos referem-se, em geral, à abordagem de Holmgren e Flanagan (1977) para *crumb test*, identificando como principal mecanismo observado o abatimento provocado pelo processo de saturação das amostras, que anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo (Tabela 3.2).

Tabela.3.2: Abordagem Holmgren e Flanagan (1977) aplicada à interpretação do ensaio de desagregação (Sales *et al.*, 2017).

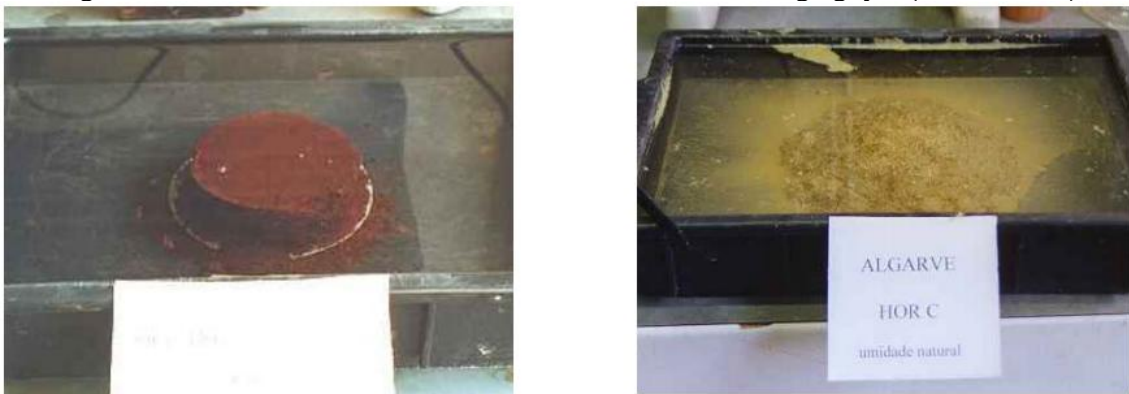
RESPOSTA	COMPORTAMENTO
sem resposta	amostra mantém-se intacta
abatimento (“slumping”)	desintegração total da amostra causada por mecanismos de hidratação e desaeração
fraturamento	amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas. O principal mecanismo atribuído ao processo é a expansão osmótica
dispersão	amostra mostra evidência de dispersão coloidal. As paredes tornam-se difusas e forma-se uma “nuvem” coloidal

O resultado do ensaio é puramente qualitativo. Em cada uma destas etapas é registrado o comportamento da amostra. São descritos o caráter, a intensidade e a velocidade dos processos atuantes: umedecimento, expansão, abatimentos, fraturamentos, rupturas, dispersão e outros. Embora o caráter deste método seja qualitativo e não quantitativo, devido à simplicidade, praticidade e a estreita relação com os fenômenos associados aos processos naturais que o mesmo apresenta, o ensaio se destaca, potencialmente e de modo eficaz, como uma prévia avaliação indireta da erodibilidade dos solos. Aliado a isso, de acordo com Bastos *et al.* (1999) este ensaio é indicado como critério preliminar na avaliação qualitativa da erodibilidade devido ao fato de ser um ensaio considerado simples e de dar bons resultados, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de erosão (Sales *et al.*, 2017).

Bastos (1999) realizou ensaios de desagregação com os solos residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre. Amostras cilíndricas ($\Phi = 9,76$ cm e $h = 5$ cm) coletadas em anéis biselados de PVC foram condicionadas a duas situações distintas de umidade: secas ao ar por um período mínimo de 72 horas e na umidade natural. Cuidadosamente extraídas do molde de amostragem, as amostras são dispostas sobre uma superfície porosa e submetidas a um processo de lenta submersão (Figura 3.11), segundo os seguintes estágios:

- (a) Água destilada na base por 30 min;
- (b) Água destilada a 1/3 e 2/3 da amostra por períodos de 15 min e
- (c) Submersão total, permanecendo por 24 horas.

Figura 3.11: Amostras de solos submetidas aos ensaios de desagregação (Bastos, 1999).



Na descrição qualitativa da amostra, durante o ensaio, são observadas as seguintes dinâmicas erosivas nas amostras: abatimento (*slumping*); fraturamento no topo; ruptura nas bordas; velocidade de desagregação; grau de dispersão das partículas de solo; velocidade de ascensão capilar; e inchamento.

O resultado deste ensaio, como foi enfatizado, é puramente qualitativo. A relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade é evidente. Os solos considerados altamente erodíveis desagregam totalmente em água. Entretanto, não é verificada uma relação direta do potencial de desagregação com os níveis intermediários e baixos de erodibilidade (Bastos, 1999).

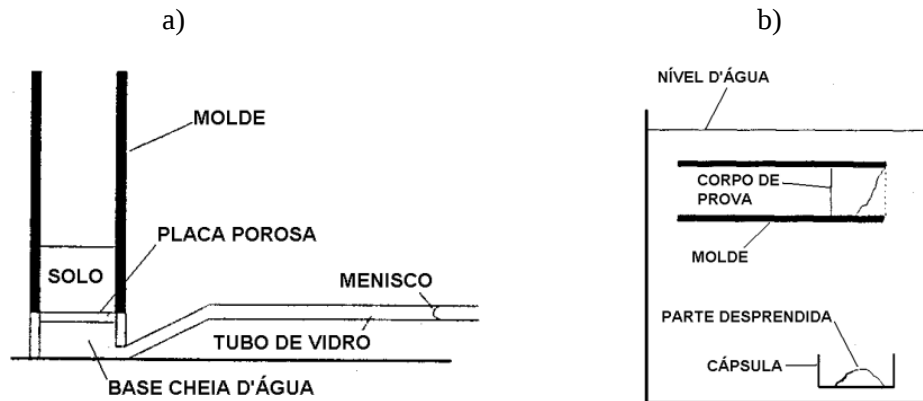
3.2.2.4 Metodologia MCT

De acordo com Bastos (1999), um novo direcionamento na pesquisa sobre a erodibilidade dos solos tropicais e subtropicais foi devido aos estudos realizados com base na Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Segundo Nogami e Villibor (1979), 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). Segundo Nogami, um método adequado à previsão da erodibilidade deve levar em conta a taxa de infiltração d'água através da superfície do talude, o efeito da secagem sobre o comportamento dos solos sob inundação e a necessidade do uso de amostras indeformadas nos ensaios.

O critério de erodibilidade, apresentado por Nogami e Villibor (1979), é essencialmente empírico e baseado na correlação com o comportamento frente à erosão de um grande número de cortes. 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 infiltrabilidade, propriedade hidráulica de solos não saturados, representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície e é quantificada pelo coeficiente de sorção. A erodibilidade específica é representada pela perda de massa por imersão. Ensaios específicos para quantificar estas propriedades foram incorporados à Metodologia MCT e são esquematizados na Figura 3.12

Figura 3.12: Ensaios de (a) infiltrabilidade e (b) erodibilidade específica (perda por imersão modificado) da Metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1995 apud Bastos, 1999).



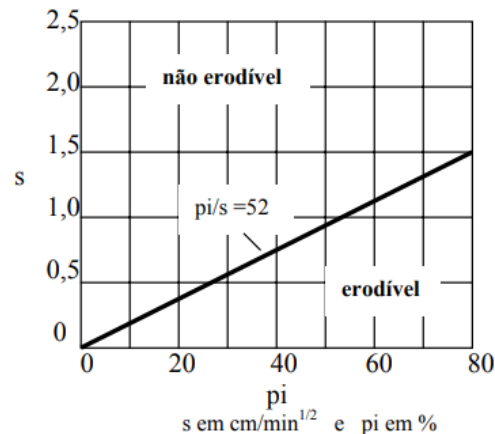
De acordo com Bastos (1999), a infiltrabilidade, propriedade hidráulica de solos não saturados, representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. É controlada, sobretudo pelas tensões de sucção. Nos climas tropicais e subtropicais úmidos, apesar da elevada pluviosidade, devido à forte evapotranspiração e à boa drenagem da maioria solos residuais, a infiltrabilidade é mais representativa que a permeabilidade saturada como a propriedade que regula a quantidade de escoamento superficial. A velocidade com que ocorre a infiltração é medida em um ensaio específico pelo coeficiente de sorção (*sorptivity*).

O chamado ensaio de infiltrabilidade consiste em submeter uma amostra cilíndrica, confinada lateralmente pelo tubo de amostragem, a um fluxo ascendente por ascensão capilar. A velocidade de infiltração é quantificada através da cronometragem do fluxo por um tubo capilar horizontal no nível da base da amostra. Os resultados das leituras da distância percorrida no tubo capilar são plotados pelo tempo cronometrado (em $\text{min}^{1/2}$). Uma curva ajustada aos pontos mostra um nítido encurvamento, com um íngreme trecho retilíneo inicial seguido por outro de tendência horizontal, significando que a frente de umidade atinge o topo do corpo de prova. O gradiente do trecho retilíneo inicial da curva é o coeficiente de sorção s (em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$). O valor de s é geralmente determinado em amostras na umidade natural e em amostras previamente secas ao ar. No caso de amostras compactadas pode ser interessante a realização do ensaio para diferentes umidades de compactação.

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, 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 ao peso seco total da amostra representa a erodibilidade específica (π_i).

A partir dos dados de coeficiente de sorção (s em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) e perda de massa por imersão modificado (π_i em %), Nogami e Villibor (1979) estabelecem a relação $\pi_i/s = 52$ como limite ao critério de erodibilidade (Figura 3.13). Solos com $\pi_i/s > 52$ são considerados erodíveis, alertando para adequadas medidas de proteção à erosão em taludes de corte.

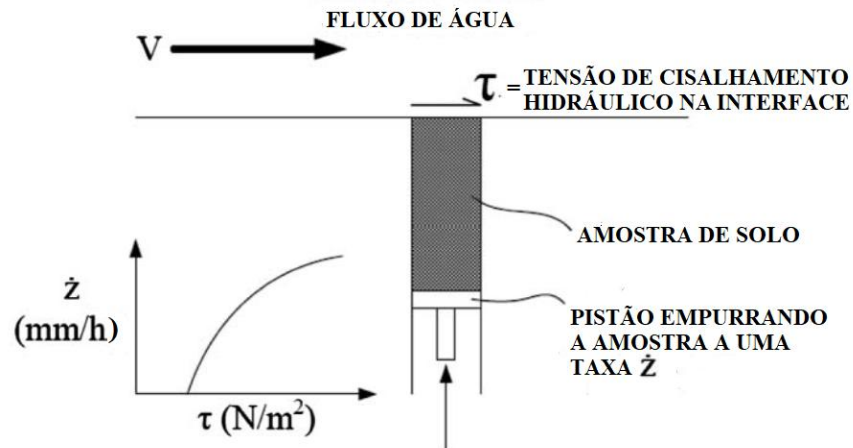
Figura 3.13: Critério de erodibilidade pela Metodologia MCT (Bastos, 1999).



3.2.2.5 Ensaio de erodibilidade no aparato EFA - *Erosion Function Apparatus*

O *Erosion Function Apparatus* é um aparato do tipo pistão, desenvolvido e apresentado por Briaud (2001) capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos sujeitos a diferentes velocidades de escoamento. É um teste de erosão de laboratório que consiste em ter uma amostra de solo empurrada pelo fundo de um conduíte tão rápido quanto é erodido pelo fluxo de água que passa sobre ele (Figura 3.14).

Figura 3.14: Diagrama esquemático do aparato EFA (Adaptado Briaud, 2008)



A erodibilidade do solo ou rocha é definida como a relação entre a taxa de erosão $\dot{Z}$ da superfície do solo e a velocidade da água v ou tensão de cisalhamento hidráulica na interface τ . A taxa de erosão ($\dot{Z}$) é calculada através da razão entre a altura da amostra erodida (h) e pelo tempo (t) observado ao longo do ensaio, conforme a (Equação 3.2) a seguir:

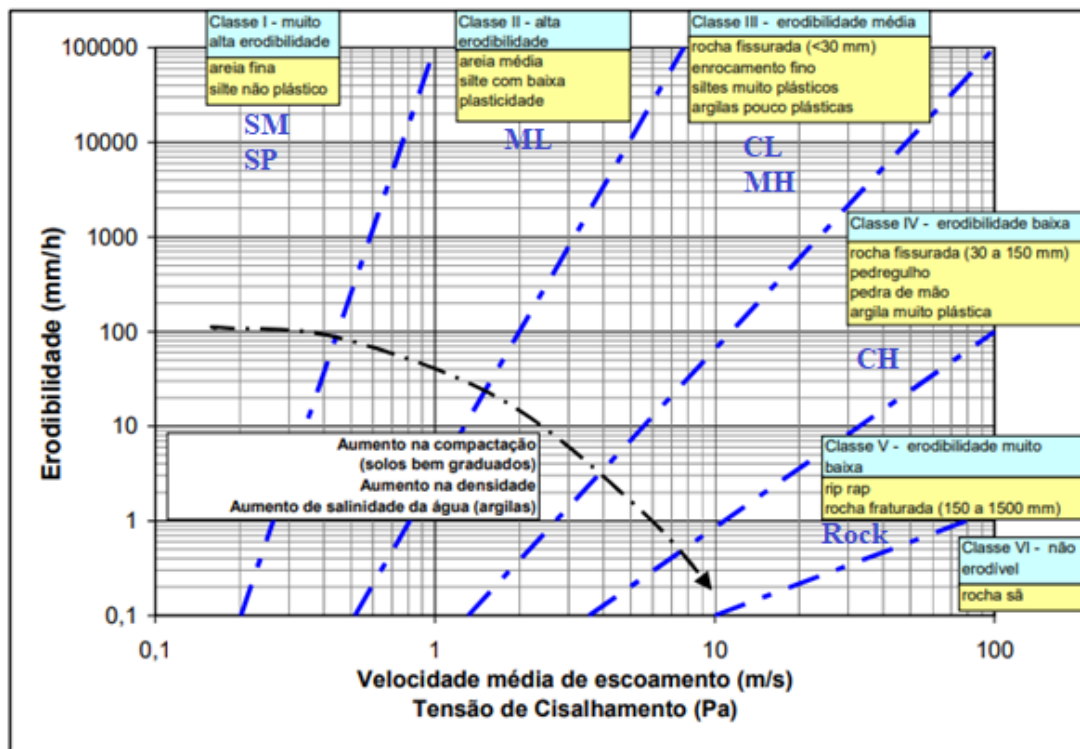
$$\dot{Z} = \frac{h}{t} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Essa relação é chamada de função de erosão e serve como base fundamental da lei constitutiva para problemas de erosão do solo muito parecido com a curva tensão/deformação.

Os resultados geralmente são apresentados em forma gráfica, plotando-se a taxa de erosão calculada – de acordo com os tempos observados durante a execução do ensaio para se erodir uma amostra com altura pré-determinada, $h=1,0$ mm - pela velocidade de escoamento e/ou tensão cisalhante empregada pelo fluxo.

Baseado em testes realizados nos últimos 30 anos, Briaud (2008) propôs uma classificação da erosão em função da velocidade média de escoamento ou da tensão de cisalhamento, com escalas diferentes em relação à erodibilidade e relacionou à classificação do solo do Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS - Figura 3.15).

Figura 3.15: Classificação erosiva do solo segundo a velocidade média de escoamento ou a tensão de cisalhamento hidráulico (Saliba, 2009).



O aparato de ensaio EFA foi proposto inicialmente por Briaud *et al.* (DATA) para modelar erosão no entorno de pilares de pontes. De acordo com Mantovanelli (2016), este equipamento também foi utilizado para estudar diversas barragens ao redor da cidade de Nova Orleans (EUA) após a tragédia do furacão Katrina, em 2005. Devido à sua facilidade operacional, este equipamento permite que amostras coletadas em campo usando amostradores ambientais e/ou Shelby sejam levadas ao laboratório e ensaiadas para diferentes velocidades de fluxo.

3.3 Solos tropicais

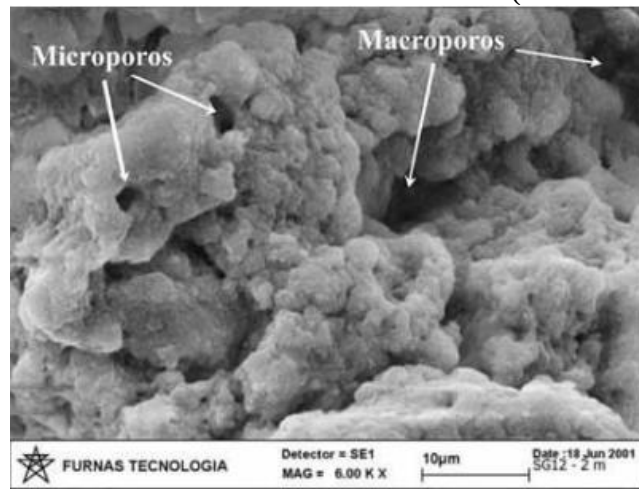
Os solos tropicais apresentam particularidades tanto nas propriedades físico-químicas, como no comportamento hidromecânico, em decorrência dos processos geológicos e/ou pedológicos em regiões tropicais úmidas (Committee on Tropical Soils of ISSMFE, 1985).

Segundo Mio (2005), o entendimento tanto do comportamento, quanto a identificação da variabilidade de solos tropicais está relacionada a sua gênese e estrutura. Sendo assim, Villibor *et al.* (2009), dividiram os solos tropicais em duas grandes classes: solos lateríticos e solos saprolíticos.

3.3.1 3.5.1 Solos lateríticos

São solos profundamente intemperizados, com ocorrência superficial e são característicos de regiões tropicais úmidas com boa drenagem (Villibor *et al.*, 2009). Possuem alta porosidade, distribuição bimodal dos poros, com predomínio de macroporos (entre os agregados) e microporos (interior dos agregados) e agregações metaestáveis, diante da variação de umidade ou estado de tensão (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015 - Figura 3.16).

Figura 3.16: Microestrutura de um solo laterítico. (Guimarães, 2002).



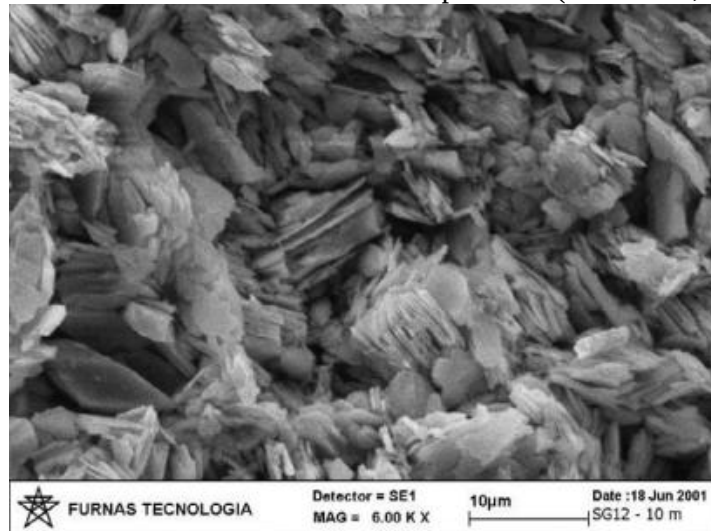
Segundo Cardoso (2002), a alitização (eliminação total da sílica e geração de oxihidróxidos de ferro e alumínio) corresponde a um processo típico que leva a formação dos solos profundamente intemperizados. Logo, a mineralogia dos solos lateríticos é composta principalmente por caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio e quartzo, esse último geralmente mineral primário devido à alta resistência ao intemperismo, mas também neoformado como sugerido por Senaha (2019). Devido à presença desses óxidos, Villibor e Alves (2019), atribuem a estes solos comumente colorações de vermelho, amarelo, alaranjado e marrom.

3.3.2 Solo saprolítico

São considerados solos residuais jovens e se desenvolvem devido a decomposição e/ou desagregação *in situ* da rocha matriz, preservando suas estruturas. Localizam-se de maneira subjacente aos solos superficiais e são constituídos principalmente por minerais primários,

sendo comum a presença de argilominerais expansivos. Quanto a sua microestrutura, as partículas apresentam-se de maneira individualizada, Figura 3.17 (Camapum de Carvalho *et al.*, 2015; Villibor e Alves, 2019).

Figura 3.17: Microestrutura de um solo saprolítico. (Guimarães, 2002).



3.3.3 Solos no Brasil

No Brasil, de acordo com Espindola e Daniel (2008), pesquisadores principalmente do campo da geomorfologia, usualmente associavam os corpos lateríticos (nódulos, concreções, blocos gigantescos, “piçarras”, carapaças e couraças) à evolução do relevo. Em Minas Gerais elas foram referidas por “canga”, ocupando posições regionais das “terras altas”. Espindola e Daniel (2008) citam o uso de lateritas em Ouro Preto no século XVIII como material de construção e calçamento.

Segundo Camapum *et al.*, (2015), um ponto de frequentes desencontros está na conceituação de solos feita pela pedologia. Nesse caso, os solos lateríticos são confundidos – ou divididos – entre latossolos e plintossolos. O Manual Técnico de Pedologia do IBGE (BRASIL, 2018) mostra diversos casos em que a laterita aparece como sendo plintita, e, alguns casos, como sendo latossolo que compreendem o horizonte pedológico B. No entanto, para os engenheiros geotécnicos, importa saber que a evolução pedogenética é que dá origem a esses solos e que eles têm uma estrutura porosa, por vezes, levemente cimentada pelos óxidos e hidróxidos de

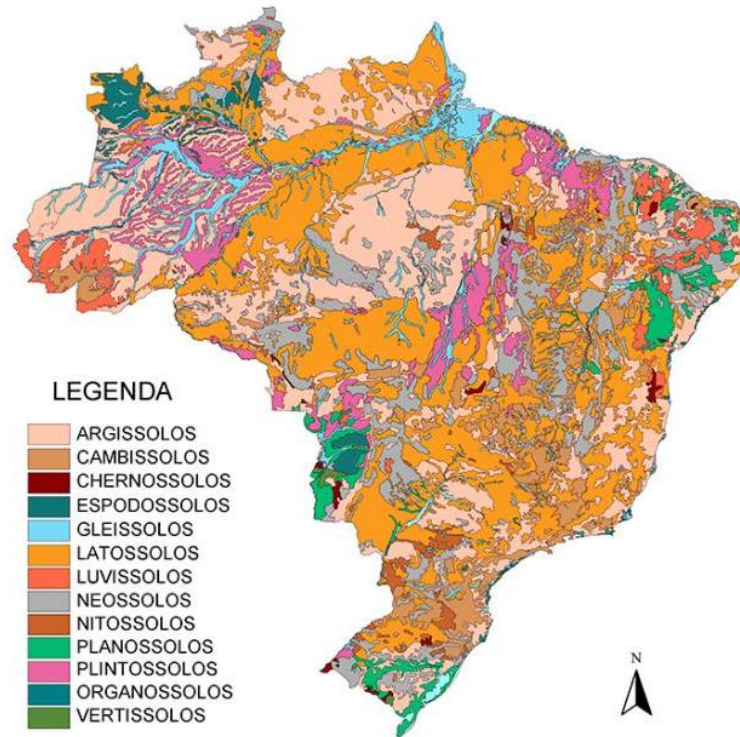
ferro e alumínio. Essa cimentação pode se tornar muito forte e, assim, tem-se as concreções lateríticas (Camapum *et al.*, 2015).

De vasta ocorrência na área territorial do Brasil, os solos lateríticos podem ser localizados com base no mapeamento pedológico realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos (EMBRAPA, 1978), pois as classes pedológicas denominadas por latossolos e argissolos, quando tratadas pela classificação geotécnica M.C.T. (Miniatura, Compactado, Tropical), uma sistemática de classificação de solos tropicais proposta por Nogami e Villibor (1995), enquadram-se como de comportamento laterítico (Camapum *et al.*, (2015).

Conforme Camapum *et al.* (2015), no Brasil há predominância de três tipos de solos, os latossolos, argissolos e neossolos, que juntos abrangem cerca de 70% do território nacional, segundo o *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) – IBGE (Figura 3.18).

Os latossolos e argissolos ocupam aproximadamente 58% da área e são solos mais profundos, altamente intemperizados, ácidos e de baixa fertilidade natural. Em certos casos, também ocorrem solos de média a alta fertilidade, em geral pouco profundos em decorrência de seu baixo grau de intemperismo. Estes se enquadram principalmente nas classes dos neossolos, luvisolos, planossolos, nitossolos, chernossolos e cambissolos.

Figura 3.18: Mapa de solos do Brasil. (Embrapa, 2011).



No mapa, a predominância de latossolos, plintossolos e argissolos é nítida. Esses solos são os que, mais frequentemente, a geotecnia chama de solos lateríticos. As maiores extensões desses solos se localizam nas regiões do Planalto Central, Norte e Centro Sul do país.

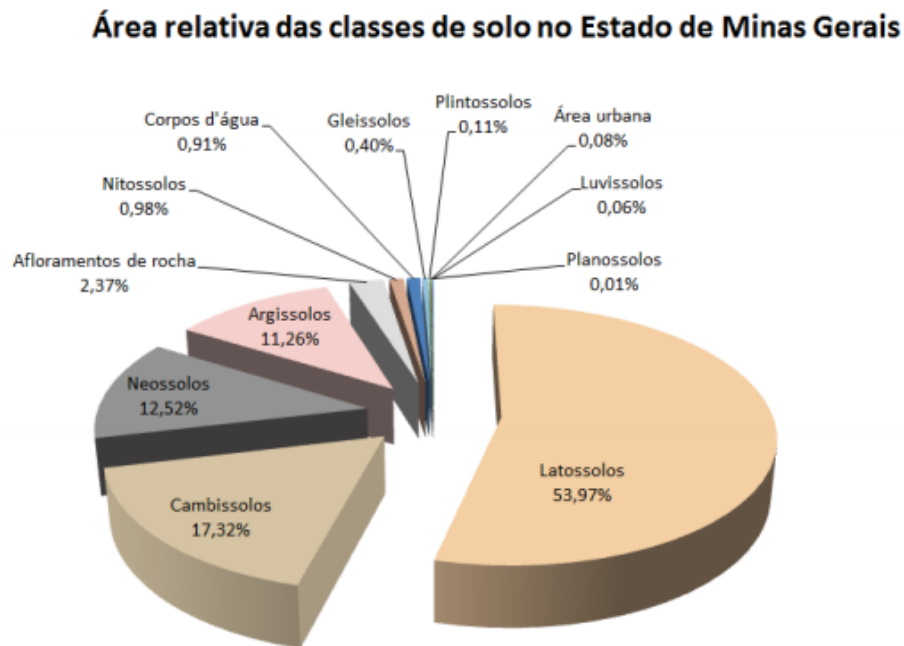
Por outro lado, os neossolos e nitossolos, que a geotecnia mais frequentemente denomina de saprólitos ou residuais jovens, concentram-se nas áreas de grande declividade (serras) e na região Nordeste, em que chove menos. Os vertissolos e planossolos comuns em áreas de várzeas se fazem presentes em grandes extensões no Rio Grande do Sul, no Pantanal Mato-grossense e em Roraima. Se for considerada a disponibilidade de água e clima, a planície do Solimões e do Amazonas também deveriam ter esses mesmos solos. Contudo, nesta última região, predominam os solos lateríticos. Desse modo, o embasamento rochoso também faz diferença na formação do solo (Camapum *et al.*, 2015).

3.3.4 Solos em Minas Gerais

O Mapa de solos do Estado de Minas Gerais (2010), UFV - CETEC - UFLA – FEAM possui as seguintes principais classes de solos, descritas por ordem de importância quanto às suas distribuições espaciais: latossolos que representam 53,97% da área de Minas Gerais, divididos

em Latossolos vermelho-amarelo distrófico (28,65%) e Latossolos vermelho distrófico (21,36%). A segunda classe de solo com maior ocorrência é a de Cambissolo (17,32 %), seguido pela ocorrência de Neossolos (12,52%) e Argissolos (11,56%) como mostra a Figura 3.19.

Figura 3.19: Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. UFV - CETEC - UFLA - FEAM . Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente. (FEAM, 2010).



3.4 Estabilização dos solos com cal

O tratamento de solos com cal é conhecido e usado extensamente em todo mundo para construção de aterros para estradas e 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 de estabilização do solo pela cal ocorre através de várias reações químicas de curto e longo prazo que alteram sua estrutura e consequentemente suas propriedades. A cal melhora a capacidade das partículas de argila se ligarem à água na superfície, e também pode progredir para a produção de ligações cimentícias que agregam resistência ao solo (Little, 1995).

A primeira reação, chamada troca iônica, ocorre na superfície da estrutura dos argilominerais, que possuem em sua superfície cátions tais como Mg^{2+} , Na^{+} e K^{+} , que são facilmente

substituídos pelos cátions Ca^{2+} presentes na cal. Por promover forças atrativas entre as camadas superficiais desses argilominerais, o solo mostra menores mudanças quanto ao volume na presença da água (CPR, 2014).

O próximo mecanismo, denominado floculação ou aglomeração entre as partículas de argila, causa proximidade elétrica entre as partículas de argila e a cal, permitindo apenas a adsorção de água entre solo e partículas de cal. Essa aproximação reduz a quantidade de água que o solo pode reter sem afetar sua estrutura. Esse fenômeno provoca uma diminuição no índice de plasticidade do solo devido ao aumento do limite de plasticidade e/ou diminuição do limite de liquidez e aumento da resistência devido ao atrito entre as partículas (Azevêdo, 2010).

As reações pozolânicas, que possuem ação cimentante, acontecem quando a sílica e o alumínio presentes no solo reagem com a cal hidratada. Little (1995) aponta a ocorrência das ligações pozolânicas como um fator de estabilização do solo com a formação de silicatos de cálcio hidratados e alumínios hidratados de cálcio. Azevêdo (2010) destaca que a cimentação pozolânica produz maior resistência à ação da água devido a maiores forças coesiva entre as partículas. O mesmo autor salienta ainda que o solo estabilizado com cal não pode ser tratado como impermeável, porém como um solo que sofre mais lentamente à erosividade da água.

No último estágio, o dióxido de carbono presente no ar provoca a carbonização e forma um frágil agente cimentante, o carbonato de cálcio e de magnésio.

Este é um processo indesejável na estabilização do solo porque os íons de cálcio são ‘roubados’ desses produtos resultantes das reações pozolânicas. De acordo com o CPR (2014) o impacto é insignificante.

Little (1995) aponta que geralmente os solos com potencial para serem estabilizados com cal devem ter o índice de plasticidade superior a 10 e grãos passantes na peneira nº 200 acima de 25%. A classificação do Sistema Unificado (SUCS), os solos CH, CL, MH, SC, SM, GC, SW-SC, SP-SC, SM-SC, GP-GC ou GM-GC podem ser estabilizados. O mesmo autor também destaca outros fatores que influenciam a interação solo-cal, como: a presença de compostos orgânicos no solo, a porcentagem de argila, a mineralogia, o intemperismo, a pedologia, a geologia e o clima.

As reações após a adição de cal ao solo ocorrerão desde que a quantidade de cal seja suficiente para promover tais reações, principalmente as chamadas reações pozolânicas. Para Eades e Grim (19664 apud Little, 1995) a quantidade de cal adicionada deve manter o pH de 12,4 que solubiliza a sílica e o alumínio presentes no solo, o que promove a formação de Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) e Mono-hidreto de cálcio (CAH). Estas concentrações são denominadas de Consumo Inicial de Cal (ICL) e Concentração Ótima de Cal (OLC). A concentração ideal da cal também pode ser determinada pela redução no índice de plasticidade e ou pelos ganhos de resistência (Jung e Bobet, 2008). Concentrações acima da ótima podem não influenciar positivamente no acréscimo de resistência (Bell, 1996). Na prática Ingles (1987 apud Bell, 1996), indica o uso de 1% de cal a cada 10% de argila presente no solo.

James e Pandian (2015) mostram que a utilização de uma mistura de solo expansivo, cal e fosfogesso, geram efeitos positivos no ganho de resistência não confinada ao longo do tempo. Os autores também comparam a estabilização utilizando somente cal e apontam que a adição de até 1% de fosfogesso aumenta a resistência ao longo de 28 dias de cura.

Bell (1996) destaca a redução no índice de plasticidade da montmorilonita quando mais de 2% de cal é adicionada, e o aumento deste índice no caso da caulinita. O autor também afirma que o peso específico seco é reduzido enquanto que a umidade ótima aumenta, mas que os ganhos na resistência compensam essa mudança. A resistência a compressão não drenada foi máxima para os dois tipos de argilominerais a 4% de adição de cal a 28 dias de cura.

Angelim (2005) realizou uma comparação entre o uso de cal em pó e cal diluída na mistura com solo para compactação nos teores de 3% e 6%. O autor destaca que nos resultados das amostras onde em seu preparo utilizou-se a cal diluída em água, os valores de densidade seca máxima foram ligeiramente superiores que aquelas nas quais a cal foi misturada em pó ao solo, sendo que o parâmetro CBR, que representa a resistência do solo, para amostra tratada com cal diluída foi cerca de 60% superior àquela mistura com cal em pó.

3.4.1 Fatores que interferem na estabilização do solo com cal

Segundo Neves (2009), ao aplicar cal para corrigir ou estabilizar solos, vários fatores devem ser considerados dos quais pode depender o sucesso do tratamento. São mencionados aqui os

fatores relacionados às propriedades do solo. No entanto, outros fatores como o equipamento utilizado para dispersar, misturar e até compactar o material também são fatores que afetam os resultados finais do processamento.

Entre os fatores de natureza dos solos podem ser destacados os seguintes:

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

A porcentagem de argila no solo deve ser levada em consideração, principalmente se o objetivo visa estabilizar o solo, ou seja, aumentar significativamente sua resistência mecânica. As partículas de argila fornecem sílica e alumina, que são necessárias para o desenvolvimento das reações pozolânicas, importantes para o aumento da resistência do solo.

A plasticidade geralmente está associada a solos argilosos, o que permite que o índice de plasticidade também seja referenciado como um fator condicionante no tratamento de solos com cal.

Diferentes propriedades mineralógicas das argilas levam a diferentes superfícies específicas, capacidade de troca iônica, plasticidade e juntas levam a diferentes reações com a cal. Solos onde as argilas são sódicas ou potássicas, cujos íons são facilmente trocados por cálcio, oferecem melhor interação com a cal.

Existem vários indicadores que sugerem quantidades mínimas que o solo deve ter, de partículas argilosas ou de índice de plasticidade para garantir a eficiência do tratamento com cal, como:

- i. *National Lime Association*:
Índice de Plasticidade > 10%;
- ii. Estado de Illinois:

Porcentagem em argila > 7%;

Índice de Plasticidade > 8%;

iii. *U. S. Air Force Soil Stabilization Index System* (SSIS, 1976):

Passados na peneira nº 200 (75 μ m) > 25%;

Índice de Plasticidade > 10%.

Como mostram esses exemplos, as regulamentações e especificações favorecem o uso de cal em solos argilosos, excluindo solos não plásticos. Segundo Neves (2009) essa preferência se baseia no tratamento com cal dos solos siltosos ou arenosos que geralmente consistem em quartzo, feldspato e mica em comparação com o tratamento em solos argilosos. Esses conceitos baseados na teoria geral, mas não exclui a possibilidade do tratamento com cal nesse tipo de solo. A adequação do solo ao tratamento com cal deve ser feita tendo em conta a finalidade a que se destina este tratamento e sempre determinada por ensaios laboratoriais, que avaliam a resposta do solo ao tratamento, tendo em conta vários aspetos, ou tipo de solo ou cal usado.

A experiência tem demonstrado que a cal pode reagir com solos de granulometria média, moderadamente finos e finos, resultando em plasticidade reduzida, trabalhabilidade melhorada, redução da expansibilidade e aumento da resistência. De acordo com a classificação uniforme, são CH, CL, MH, SC, SM, GC, SW-SC, SP-SC, SM-SC, GP-GC ou GM-GC podem ser potencialmente capazes de serem estabilizados com cal (Dallas. N. Little, 1995).

A percentagem de matéria orgânica influencia negativamente no desenvolvimento da ação de cimentação. A matéria orgânica é constituída por partículas complexas que podem adsorver cátiões de cálcio, inibindo assim a reação superficial da cal com as partículas de argila prejudicando a formação das reações pozolânicas. Segundo Castelló (2003 apud NEVES, 2009), conteúdos inferiores a 1% de matéria orgânica não apresentam problemas. Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. (2007), define como porcentagens máximas de matéria orgânica:

i. Um por cento (1%) para leitos de pavimento;

ii. Dois por cento (2%) para demais aplicações;

Para ocorrência das reações pozolânicas mencionadas, o pH do meio tem de ser manter alto ($\text{pH} > 10,5$) para que se libertem a sílica e o alumínio da argila. (Neves, 2009). No entanto, conforme a Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S.A. (2007) indicam que o pH do meio deve ser superior a 12.

A presença de sulfato pode levar à formação de um produto reativo que consiste em cálcio, alumina, água e sulfatos (Etringite ou Monosulfatoaluminato). Este composto constitui um problema pelo seu potencial expansivo resultante do seu processo de formação e pode ocorrer associada a um elevado potencial de pressão. Portanto, conforme experiência mostra, a ação do sulfato pode ser muito prejudicial a partir de conteúdos da ordem de 1% (GTS, 2000 apud NEVES, 2009).

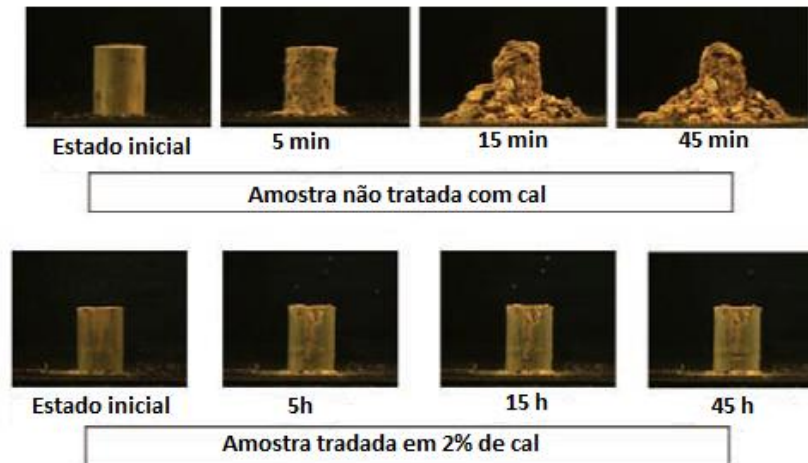
3.4.2 Estudos de estabilização do solo com cal contra erosão

Diversos estudos têm mostrado melhorias das propriedades hidráulicas dos solos por meio da adição de algum estabilizante químico. Dentre esses estudos, podem ser citados os trabalhos de Bell (1996), Zhang & Cao (2002); Angelim (2005); Ahmed *et al.* (2011); Dash & Hussain (2012) e James & Pandian (2016).

Alguns estudos têm sido realizados avaliando a influência do tratamento de cal na erodibilidade de solos que possuem argila em sua composição. Dentre eles, Herrier *et al.* (2014), avaliaram o tratamento do solo com cal como um material resistente à erosão em um dique de terra. Eles observaram que o solo tratado com cal pode ser considerado um material "cimentado", onde ligações coesivas são induzidas pela ação da cal. O aumento da coesão deve-se também pelas chamadas reações pozolânicas entre a cal, as partículas de sílica e alumina dissolvidas, a argila e a água, formando um material com reduzida deformabilidade.

A partir do ensaio *crumb test* (ASTM D 6572-06), utilizado para avaliação da dispersibilidade de solos argilosos, Herrier *et al.* (2014), verificaram que a amostra não tratada com cal entrou em colapso após 15 minutos de imersão, enquanto a amostra tratada com 2% de cal não sofreu degradação, mesmo após 45 horas de imersão (Figura 3.20). Também verificaram, a partir de outros ensaios, que o tratamento com cal diminuiu a permeabilidade e aumentou a resistência à erosão interna e superficial do solo.

Figura 3.20: *Crumb test* realizado em solo siltoso, não tratado com cal (acima, escala em minutos) e tratado com 2% de cal (abaixo, escala em horas) (Herrier *et al.*, 2014).



Este artigo descreveu os resultados obtidos correspondentes à um programa de pesquisa lançado pela empresa Lhoist empresa mundial de produção de cal calcítica, cal dolomítica e minerais, em parceria com universidades e institutos de pesquisa (IRSTEA, IFSTTAR, LRPC Angers, CER Rouen, *Université Libre de Bruxelles*). Uma série de propriedades mecânicas, de estabilidade, de permeabilidade e de resistência à erosão foram relacionadas aos solos tratados, o que permitiu o desenvolvimento, tratamento e controle dessa técnica, de acordo com um método específico de tratamento e compactação.

As experiências de laboratório foram seguidas pela construção de um dique experimental em grande escala usando a metodologia e a tecnologia especificadas, em uma estrutura de solo siltoso tratada com cal virgem a 2,5%. O dique foi construído em 6 camadas de 30cm cada após compactação, totalizando uma altura de 1,80 m. Um segundo dique menor foi construído em 3 camadas de 30cm cada após compactação, totalizando uma altura de 0,9 m, usando o mesmo solo, mas sem tratamento com cal, para fins de comparação. A Figura 3.21 a seguir mostra a construção do dique experimental tratado com cal e do dique não tratado.

Para testes de erosão interna dos diques construídos foi realizado o ensaio HET (*Hole Erosion Test*), desenvolvido pelo instituto francês IRSTEA, realizado para determinar as características

de erosão interna do solo, tensão crítica de cisalhamento, coeficiente de taxa de erosão e índice de taxa de erosão. Para isso, um furo articular de 6 mm de diâmetro é pré-perfurado no eixo do núcleo e um fluxo de água controlado é imposto no conduíte para que ele possa aumentar enquanto a evolução do diâmetro é monitorada. O teste determina a resistência à erosão interna do solo.

Figura 3.21: (a) Construção de um dique experimental com material tratado com cal, (b) aplicação e compactação com um rolo pé de carneiro, (c) visão geral do dique tratado com cal e (d) visão geral dos dois diques (tratado com cal e não tratado, à direita) (Herrier *et al.*, 2014).

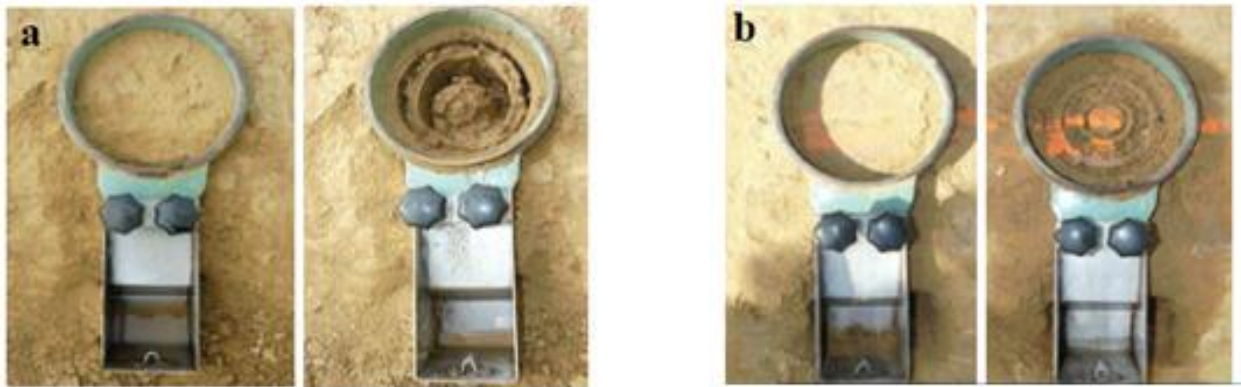


Na interpretação dos resultados do teste de erosão do furo (HET) realizado por Herrier *et al.* (2014) foi identificado um aumento significativo da tensão crítica com o tratamento com cal. Após 30 dias da construção do dique, a resistência à erosão interna foi 7 vezes maior no dique com tratamento de cal quando comparada ao dique sem tratamento, o que correspondeu a um acréscimo de 800 Pa.

Também foram realizados testes de erosão superficial através do ensaio MoJet (*Mobile Jets Erosion Test*) realizados in situ nas encostas dos diques secos. O procedimento consiste em pulverizar 6 jatos de água rotativos perpendiculares a uma superfície da amostra, com um fluxo

de água de 600 ml/min, para recuperar as partículas erodidas e pesar sua massa seca. Na interpretação dos resultados do ensaio MoJet realizado por Herrier *et al.* (2014), houve um aumento da resistência à erosão a partir da observação da quantidade de solo recuperado após o teste que foi reduzido 25 vezes (fluxo normal de 600 ml / min durante 15 min) ou 12,5 vezes (modificação protocolo: 5 min a 2 l / min), como pode ser visto nas Figura 3.22a (solo não tratado) Figura 3.22b (solo tratado).

Figura 3.22: Os testes de erosão superficial MoJet foram realizados em (a) solo não tratado e em (b) solo tratados com cal, apresentando aumento do fluxo para 2 l / min. As fotos da esquerda de cada série foram tiradas antes do teste, e as fotos à direita ao final do teste (Herrier *et al.*, 2014).



Em um estudo sobre o uso de solução de cal para mitigação de processos erosivos em margens de reservatório, Nascimento *et al.* (2019) realizaram ensaios de Inderbitzen, desagregação, microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X e granulometria a laser em amostras de solos estabilizados com concentrações de cal de 1%, 2% e 4% e tempos de cura de 1, 7, 28 e 56 dias. Verificou-se que o tratamento aumentou a resistência do solo quanto à erodibilidade superficial e à estabilidade estrutural. Em relação à erodibilidade superficial, a concentração da solução de cal de 1% se mostrou adequada. No entanto, segundo os autores, para obter um ganho na estabilidade estrutural foi necessário concentração da solução de cal superior a 2% e tempo de cura maior que 28 dias.

Mehenni *et al.* (2016) avaliaram o efeito do tratamento de cal sobre erosão interna de solos compactados. O solo estudado foi um solo siltoso do norte da França tratado com cal virgem de 1 e 3%. Os experimentos mediram a erosão interna usando o ensaio HET (*Hole Erosion Test*). Um novo ensaio HET aprimorado foi desenvolvido para aplicar uma alta pressão de entrada de

até 650 kPa e, assim, gerar uma tensão de cisalhamento hidráulico de até 10.000 Pa. A resistência à erosão interna foi quantificada pelo coeficiente de erosão do solo e pela tensão crítica de cisalhamento. O tratamento com cal aumentou a resistência à erosão interna do solo, aumentando a tensão crítica de cisalhamento. O efeito ao tratamento com 1 ou 3% de cal ocorreu rapidamente, sem alterações significativas com o aumento do tempo de cura em até 30 dias.

Em estudo sobre a efetividade do tratamento de cal em solos contra erosão interna para uso em aterro e estruturas hidráulicas, Elandalousi *et al.* (2018) apontaram que o tratamento usando um teor mínimo de cal de apenas 1%, é uma possível solução corretiva para solos arenosos contendo uma certa quantidade de argila potencialmente erodíveis. O estudo consistiu em um teste de erosão que se constituía de em uma coluna de sufusão com um dispositivo de carregamento hidráulico automatizado, no ensaio crumb test, no ensaio de compressão não confinada e na Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, porosidade de intrusão de mercúrio).

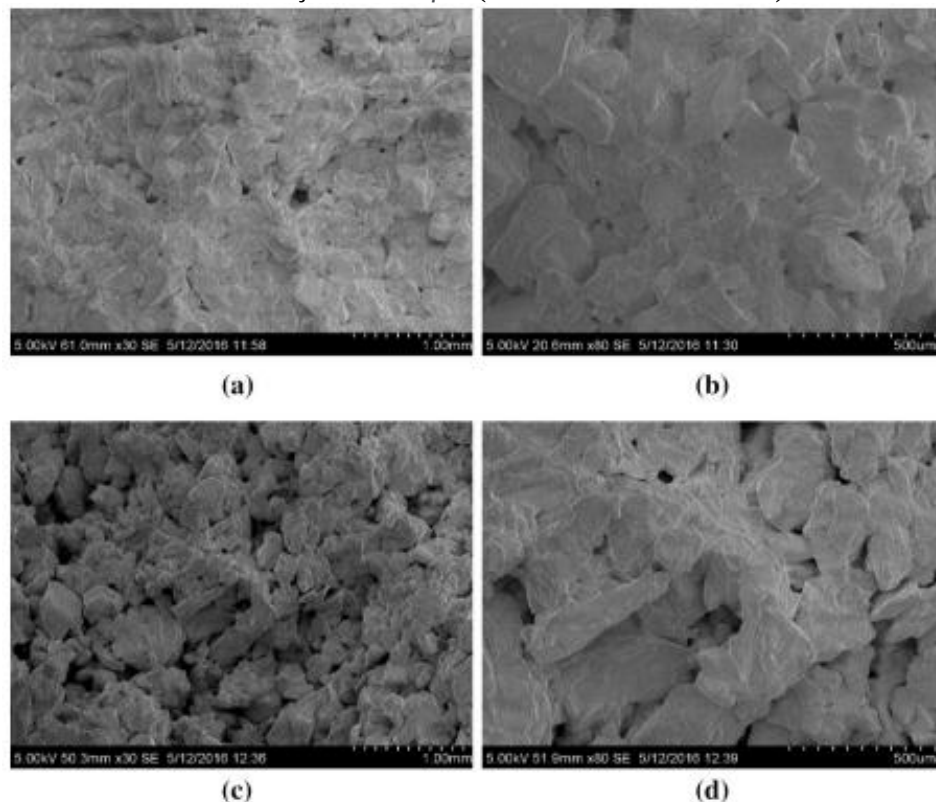
Comparações dos resultados em solos tratados e não tratados mostraram que o tratamento com cal foi eficaz após apenas 24 horas de tratamento. A sufusão é interrompida, a aglomeração das partículas geradas pelo tratamento parece ser mantida após a imersão das amostras e a resistência à compressão não confinada (UCS) é aprimorada. Após o tempo de cura de 24h do solo tratado, o aumento do tempo de cura até 3 meses não teve mudança subsequente na eficiência do tratamento com cal. Segundo os autores essa estabilização relativamente rápida parece estar relacionada à aglomeração das partículas finas.

A Figura 3.23a (amostra não tratada), mostra que sua microestrutura é totalmente diferente da Figura 3.23b (amostra tratada). Na amostra não tratada, é observado um filme de partículas de argila que cobre e conecta os grãos de areia. Um pequeno número de poros inter-agregados pode ser observado, esses macroporos vieram da compactação (Nguyen, 2015 apud Elandalousi *et al.*, 2018). Para as amostras tratadas com cal, foi observado um grupo de aglomerados que variam consideravelmente em tamanho.

É possível observar a partir da imagem da amostra tratada Figura 3.23d, a organização fortemente unida entre partículas de argila e grãos de quartzo. Para as amostras tratadas com cal, a estrutura é menos estanque do que a estrutura do solo não tratado como se pode observar

na Figura 3.23d. As partículas são agregadas devido à adição da cal que forma um filme que reveste as partículas de quartzo.

Figura 3.23: Imagens microscópicas do solo não tratado e tratado. (a) e (b) solo não tratado, (c) e (d) solo tratado com cura de 24 h. À esquerda são imagens com resolução de 1 mm e à direita são imagens com resolução de 500 μm (Elandalousi *et al.*, 2018).



Santos (2009) propôs uma técnica comercialmente denominada Cal-Jet, no qual se pulveriza uma calda de cal na proporção de 3:1 (relação de 3 litros de água e 1 quilograma de cal) em taludes propensos à erosão. Segundo o autor, esta é uma solução de baixo custo quando comparada a outras já existentes no controle de erosões. Contudo, a eficiência e concentração de cal na solução dependem do tipo de solo a ser tratado.

Portanto, o tratamento de solos siltosos e argilosos com cal (óxido ou hidróxido de cálcio) é uma técnica amplamente utilizada para melhoria e estabilização de solos na construção de

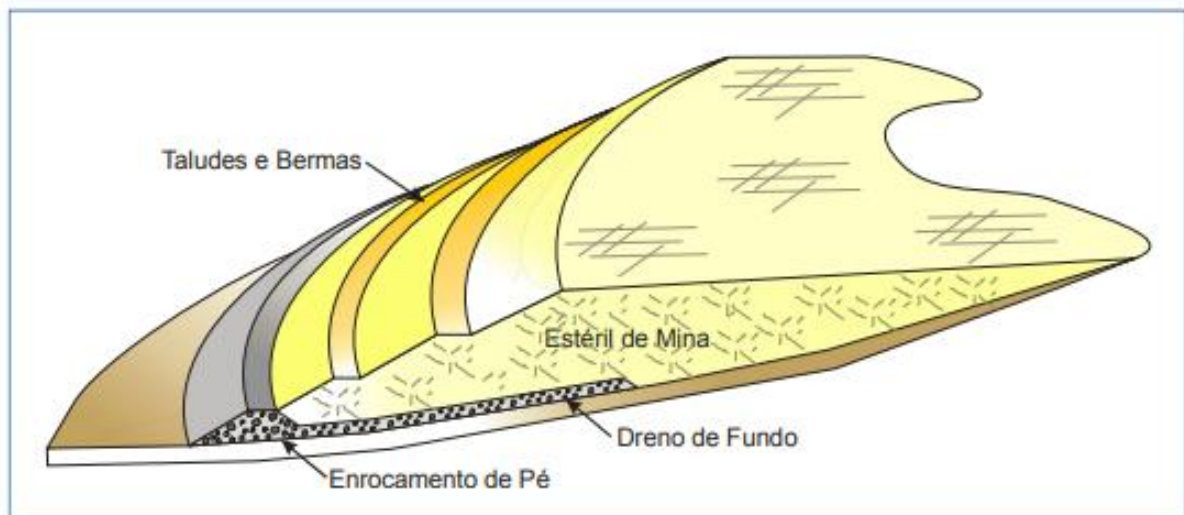
estradas, rodovias, ferrovias, plataformas, e atualmente, têm crescido o número de estudos sobre efeito da cal na erodibilidade dos solos para utilização em estruturas hidráulicas, apesar da pouca aplicação até agora. Contudo, os princípios do tratamento de cal para redução da erosão em taludes de obras civis permanecem pouco ou nada aplicados ou estudados.

Neste sentido, sabendo-se que o tratamento do solo com cal, apresenta potencial de uso, e a necessidade de propor técnicas alternativas, complementares ou mais econômicas às técnicas existentes para mitigação de processos causadores de erosões em taludes de obras civis, o presente trabalho tem como objetivo verificar a eficiência do tratamento do solo com cal para utilização em taludes de pilha de estéril.

3.5 Pilha de estéril

O estéril representa o material resultante do decapeamento, incluindo o solo nas partes superiores do perfil estratigráfico, cuja remoção se torna necessária para a lavra do minério. Podendo ser composto por partículas de rochas e de solo com diferentes granulometrias, contendo também ar, água e matéria orgânica. Tal material não possui valor econômico agregado, porém, necessita ser transportado e estocado. A disposição do estéril é comumente feita sob a forma de pilhas, conforme mostra a Figura 3.24, e a construção destas estruturas corresponde a uma parcela significativa nos custos de uma empresa de mineração (Petronilho, 2010).

Figura 3.24: Seção típica de uma pilha de estéril (Gomes, 2012).



Estudos geotécnicos, assim como os estudos hidrológicos e hidrogeológicos das pilhas de estéril são extremamente importantes, visando à segurança e estabilidade dessas estruturas. Problemas relacionados à saturação do maciço, devido à inexistência de sistemas de drenagem adequados, e às características de resistência do material de fundação e do estéril, podem gerar grandes deformações. Estas deformações, por sua vez, podem aumentar o custo relativo à manutenção do depósito, além de causar grande impacto ambiental (Saliba, 2007).

Para Eaton *et al.*, (2005) a disposição da pilha de estéril deve ser feita correntemente por meio de camadas espessas, formando uma sucessão de plataforma de lançamento espaçada com intervalo de 10 metros ou mais. A estabilidade da pilha pode aumentar, controlando a largura, o comprimento e o espaçamento das plataformas, com recurso da berma como acesso para os equipamentos, execução de um sistema de drenagem superficial e controle da erosão pela proteção vegetal, além de suavizar a inclinação do talude geral.

Segundo McCarte (1990), as pilhas frequentemente alcançam áreas extensas e determinados cuidados necessitam ser estabelecidos para controlar o escoamento superficial. A água superficial deve ser direcionada de modo a impedir a saturação dos taludes, para evitar o desenvolvimento de superfície freática dentro da pilha de estéril, para proteger a estrutura contra a perda de finos por *piping*, além de minimizar erosões e rupturas por fluxo de água na face externa do talude. A água pluvial deve ser coletada e encaminhada para o sistema de canal de drenagem superficial.

A pilha de deposição de estéril produz sedimentos provenientes da erosão hidráulica que podem ser ocasionados pela perda de solo devido às chuvas e também por problemas no sistema de drenagem superficial da pilha. A geração de sedimentos provocada pelos processos erosivos se torna um grande problema ambiental, uma vez que todo o material carreado, se não controlado, tende a invadir áreas naturais, muitas vezes protegidas ambientalmente, assoreando cursos de água e destruindo a vegetação local (Gomes, 2012).

Desta 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 mais profunda (sulco, ravina, voçoroca), que podem ocasionar mais perda de solo, consequentemente 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 uma barragem, ou dique, de contenção de sedimentos gerados por erosão da pilha de estéril, localizado a jusante da pilha. 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. Adicionalmente, barragens e diques trazem consigo riscos relativos à ruptura, que devem ser gerenciados. Diante disto, torna-se mais vantajoso a prevenção da erosão em detrimento da contenção dos sedimentos gerado por processos erosivos provenientes da pilha.

Atualmente, existem diversas técnicas utilizadas para prevenção do desenvolvimento de processos erosivos em taludes de obras civis e também aplicadas à taludes de pilhas de estéril da atividade minerária, dentre elas, recobrimento vegetal, hidrossemeadura, geossintéticos, biomantas, concreto projetado, barreiras contra fluxo, emulsão asfáltica, dentre outras. Na prática, muitas vezes os taludes não recebem uma proteção adequada devido à grande extensão das áreas a serem protegidas e ao alto custo relativo das alternativas mais conhecidas.

É também comum que os taludes permaneçam sem proteção até que uma área significativa seja criada, de forma a reduzir o custo unitário de aplicação da solução escolhida permitindo, assim, que fiquem expostos às intempéries e, conseqüentemente, aos processos erosivos.

Desta forma, torna-se importante estudar e propor técnicas alternativas ou complementares às técnicas existentes, para mitigação de processos causadores de erosões em taludes de pilhas de estéril. Estas técnicas precisam apresentar custos menores que às alternativas tradicionalmente aplicadas, ser uma tecnologia que dependa de insumos amplamente disponíveis e de aplicação simples, preferencialmente utilizando equipamentos já encontrados nas frentes de trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia seguida por este estudo consistiu na caracterização e preparação das amostras do solo, na preparação das amostras de solo com cal e na realização dos ensaios de compactação mini-MCV e ensaio perda de massa por imersão da metodologia MCT.

4.1 Materiais

4.1.1 Solo estudado

O solo utilizado na presente pesquisa foi retirado de um campo experimental localizado no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFMG). A Figura 4.1 a seguir apresenta a localização do ponto de coleta de solo.

Figura 4.1: Local da retirada das amostras do solo (Google Earth 2020, imagem de 31/07/2020).



O solo foi retirado a uma profundidade de aproximadamente 1,0 m e classificado em uma análise tátil-visual como uma argila areno siltosa vermelha. A Figura 4.2 mostra o aspecto físico natural do solo coletado.

Figura 4.2: Aspecto físico natural do solo coletado.



4.1.2 Cal hidratada - Tipo CH-III

A cal hidratada utilizada na pesquisa foi a 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.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização física do solo

Os ensaios de caracterização física do solo foram realizados na Solocap Geotecnologia Rodoviária Ltda, laboratório de ensaios acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO – CGCRE, segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017. Os ensaios de

caracterização de solo 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 (w_L): NBR 6459 (ABNT, 2017); Limite de Plasticidade (w_P): NBR 7180 (ABNT, 2016); e Ensaio de compactação Proctor Normal: NBR 7182 (ABNT, 2016).

4.2.2 Ensaio de compactação mini-MCV

O ensaio de compactação mini-MCV faz parte da metodologia MCT proposta por Villibor e Nogami (2009), vista no item 3.2.2.4 deste trabalho, e normatizado pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente incorporado ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), norma DNER-ME 228-94 (1994). O ensaio de compactação mini-MCV foi realizado com o intuito de preparar os corpos de prova, com diferentes porcentagens de cal, para a execução de ensaios de perda de massa por imersão, que teve como objetivo a avaliação do efeito da cal erodibilidade das amostras.

Foram realizados cinco ensaios sendo, M0 o ensaio referente a amostras de solo sem adição de cal, M1 o ensaio referente a amostras com adição de 1% de cal em massa, M2 o ensaio referente a amostras com adição de 2% de cal em massa, M3 o ensaio referente a amostras com adição de 3% de cal em massa e M4 o ensaio referente a amostras com adição de 4% de cal em massa.

Para cada ensaio, foram preparadas cinco amostras cada uma com teores de umidades diferentes. No total foram preparadas 25 amostras que passaram pelo processo de compactação no ensaio de compactação mini-MCV, formando 25 corpos de prova ensaiados posteriormente no ensaio de perda de massa por imersão da metodologia MCT. A execução do ensaio de compactação mini-MCV é necessária para a posterior realização do ensaio de perda de massa por imersão da metodologia MCT que foi utilizado no presente estudo para avaliar a erodibilidade das amostras de solo com e sem a adição de cal.

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

4.2.2.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras foi realizada segundo a norma do DNER-ME 258/94. Primeiramente a amostra foi acomodada em um tabuleiro, destorroada e seca ao ar até próximo

à umidade higroscópica. Em seguida a amostra foi passada na peneira de 2 mm, destorroando as frações retidas com uso de almofariz e mão de gral de porcelana revestida de borracha.

Para cada ensaio foram separadas cinco porções com cerca de 300g e adicionada, a cada uma delas, água em quantidade tal que se consiga obter porções que tenham umidades sucessivamente crescentes de cerca de 2%. A primeira quantidade de água é obtida adicionando água à amostra e homogeneizando até atingir certa coesão, conforme mostra a Figura 4.3. Após homogeneização, cada porção obtida foi acondicionada em saco de polietileno por um período de 24 horas, como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.3: Determinação da primeira quantidade de água a ser adicionada na amostra até obter coesão.



Figura 4.4: Acondicionamento das porções de solo em sacos de polietileno.



4.2.2.2 Adição de cal

Após 24h em repouso das amostras de solo e antes da adição de cal, foram retiradas porções para determinação do teor de umidade pelo método da secagem em estufa segundo a norma NBR 6457/2016.

Com bases nos resultados obtidos nos estudos de Herrier *et al.* (2014), Mehenni *et al.* (2016), Elandalousi *et al.* (2018) e Nascimento *et al.* (2019) foram utilizados teores de cal de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de cal em massa. Para cada porção de amostra, a mistura de solo com cal foi feita adicionando determinada porcentagem de cal em massa e homogeneizando a amostra, conforme mostra as Figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

Figura 4.5: Pesagem da quantidade de cal a ser adicionada a amostra de solo.



Figura 4.6: Adição de cal a amostra.



Figura 4.7: Acondicionamento das amostras em sacos de polietileno.



4.2.2.3 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 4.8.

Figura 4.8: Equipamento utilizado para o ensaio de compactação Mini-MCV.



O ensaio foi realizado da seguinte maneira, com o auxílio de um funil (Figura 4.9), 200g de material foram introduzidos dentro do molde onde foram aplicadas energias crescentes,

seguindo uma série de golpes com o soquete, até se conseguir um aumento sensível de densidade para os vários teores de umidade, obtendo-se uma família de curvas de compactação. Para cada série de golpes realizados foram efetuadas as leituras com a ajuda do extensômetro. O ensaio foi finalizado quando a diferença entre a leitura obtida após 4n golpes e a obtida após n golpes foi menor que 2 mm.

Figura 4.9: Preparação para o ensaio de compactação Mini-MCV.



Depois de finalizado o processo de compactação, com a utilização do aparelho extrator, o corpo-de-prova é pressionado para fora do cilindro de compactação, de modo que o corpo-de-prova saia 10 mm do interior do cilindro de compactação (Figura 4.10). Os 10 mm do corpo-de-prova que ficam para fora do cilindro de compactação denomina-se massa extrudada. Dessa forma o corpo de prova está preparado para a realização do ensaio de perda de massa por imersão da metodologia MCT.

Figura 4.10: Extração de 10 mm do corpo de prova.



4.2.3 Ensaio de perda de massa por imersão

O ensaio de perda de massa por imersão faz parte da metodologia MCT proposta por Villibor e Nogami (2009), vista no item 3.2.2.4 deste trabalho, e normatizado pelo extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atualmente incorporado ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), norma DNER-ME 256/94 (1994).

O corpo de prova, depois de retirado do equipamento de compactação mini-MCV com 10mm extrudado (Figura 4.11), é colocado na posição horizontal dentro de um recipiente com uma cápsula para recolher o material desprendido após a imersão de água (Figura 4.12). O recipiente de imersão é preenchido com água destilada, de maneira contínua e suave, até que a lâmina de água atinja pelo menos 1cm acima da superfície externa do molde (Figuras 4.13 e 4.14). Observa-se nos primeiros minutos, nos primeiros minutos, o comportamento do corpo de prova, anotando eventuais peculiaridades, tais como: desagregação, desprendimento de bolhas, inchamento e trincamento.

Após pelo menos 20 (vinte) horas, retirar o corpo de prova do recipiente de imersão, mantendo-o na posição horizontal, a fim de evitar o derramamento de solo. Na sequência, observa-se os 10 mm de massa extrudada do corpo-de-prova, e são feitas anotações se os 10 mm de massa extrudada rompeu ou não. Caso tenha havido alguma ruptura dos 10 mm de massa extrudada,

anota-se na folha de ensaio como foi a ruptura, a qual pode ser uma ruptura por desagregação (ou soltura de material) ou uma ruptura em forma de bolacha (ou sem desagregação).

Após as anotações, retira-se a cápsula de alumínio de dentro do recipiente de imersão, a qual estava embaixo dos 10 mm de solo e observa-se se há solo dentro, caso houver, deve-se anotar a forma de como o solo se encontra. O solo pode se encontrar dentro da cápsula em uma forma desagregada (ou de material solto) ou em uma forma de bolacha (ou de material sem desagregação). Na sequência, caso houver solo na cápsula de alumínio, o mesmo deverá ser secado em uma estufa com temperatura entre 105° e 110° C, para que seja determinada a massa seca que foi desprendida do corpo-de-prova.

Figura 4.11: Medição de 10 mm de massa extrudada do corpo de prova.



Figura 4.12: Preparação dos corpos de prova para o ensaio de perda de massa por imersão.



Figura 4.13: Corpos de prova após preenchimento dos recipientes de imersão com água destilada.



Figura 4.14: Corpo de prova em recipiente de imersão e cápsula de alumínio para recolher material desprendido.



4.2.3.1 Cálculo da perda de massa por imersão (P_i)

A perda de massa por imersão (P_i) de um corpo-de-prova compactado no ensaio Mini-MCV é obtida pela seguinte equação:

$$P_i = \frac{F \times Md}{Me} \times 100 \quad (\text{Equação 4.1})$$

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;

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

e sendo:

$$Me = A \times \rho_s \quad (\text{Equação 4.2})$$

em que:

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

A é a área da seção transversal do cilindro de compactação do corpo-de-prova (cm²);

ρ_s é a massa específica seca do corpo-de-prova (g/cm³).

:E ainda,

$$\rho_s = \frac{\rho}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} \quad (\text{Equação 4.3})$$

Na qual,

ρ_s é a massa específica seca do corpo-de-prova (g/cm³);

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

ρ é a massa específica úmida do corpo-de-prova (g/cm³);

e também,

$$\rho = \frac{Pu}{A \times hcp} \quad (\text{Equação 4.4})$$

em que:

ρ é a massa específica úmida do corpo-de-prova (g/cm³);

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 (cm²);

$hcp = An$ são a altura final do corpo-de-prova compactado no ensaio Mini-MCV (cm).

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

a) Se o solo se apresentar desagregado ou em forma de material solto na cápsula de alumínio retirada de dentro da piscina do ensaio perda de massa por imersão;

Então, 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 da piscina do ensaio perda de massa por imersão;

Então, o fator forma (F) a ser utilizado na equação da perda de massa por imersão será igual a 0,5 (meio).

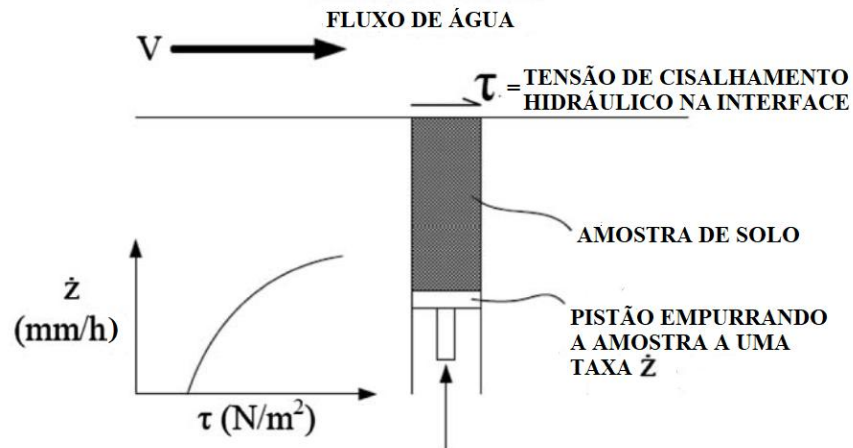
c) Se o solo se não se desprender do corpo-de-prova;

Então, fator forma (F) a ser utilizado na equação da perda de massa por imersão será igual a 0 (zero).

4.2.4 Ensaio de erodibilidade no aparato EFA - *Erosion Function Apparatus*

Conforme visto no item 3.2.2.5 deste trabalho, o *Erosion Function Apparatus* é um aparato do tipo pistão, desenvolvido e apresentado por Briaud (2001) capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos sujeitos a diferentes velocidades de escoamento. É um teste de erosão de laboratório que consiste em ter uma amostra de solo empurrada pelo fundo de um condúite tão rápido quanto é erodido pelo fluxo de água que passa sobre ele (Figura 4.15).

Figura 4.15: Diagrama esquemático do aparato EFA (Adaptado Briaud, 2008)



A erodibilidade do solo ou rocha é definida como a relação entre a taxa de erosão $\dot{Z}$ da superfície do solo e a velocidade da água v ou tensão de cisalhamento hidráulica na interface τ . A taxa de erosão do solo é calculada segundo a equação a seguir:

$$\dot{Z} = \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{h}{t} \quad (\text{Equação 4.5})$$

na qual,

$\dot{Z}$ é a taxa de erosão do solo para uma velocidade de teste (mm/h);

h é a altura da amostra de solo erodida ($h=1$ mm);

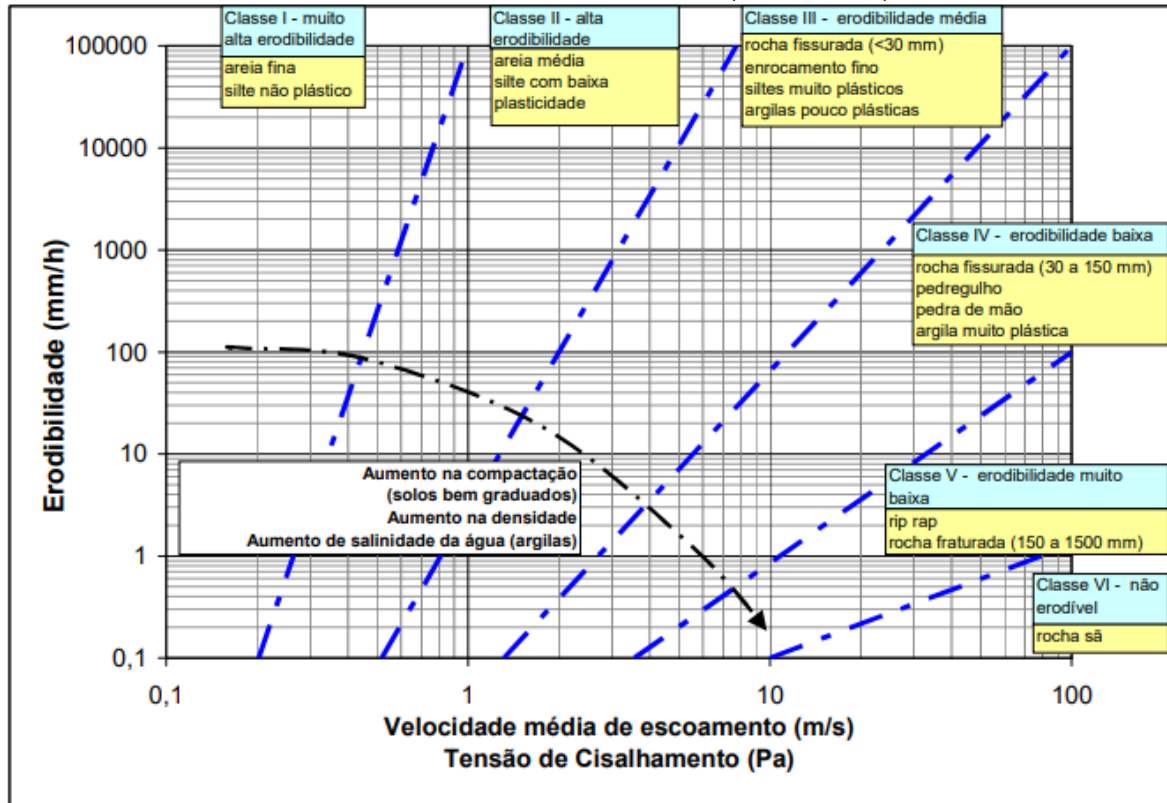
t é o tempo necessário para que ocorra a erosão total da amostra de solo (h).

Os resultados geralmente são apresentados em forma gráfica, plotando-se a taxa de erosão calculada – de acordo com os tempos observados durante a execução do ensaio para se erodir uma amostra com altura pré-determinada, $h=1,0$ mm - pela velocidade de escoamento e/ou tensão cisalhante empregada pelo fluxo.

Baseado em testes realizados nos últimos 30 anos, Briaud (2008) propôs uma classificação da erosão em função da velocidade média de escoamento ou da tensão de cisalhamento, com

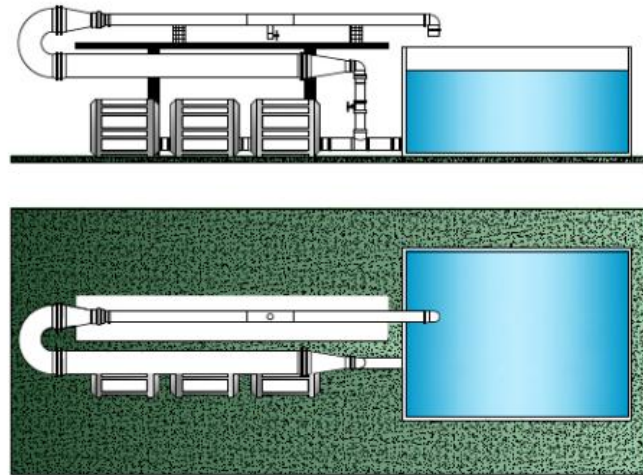
escalas diferentes em relação à erodibilidade e relacionou à classificação do solo do Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) conforme apresenta a Figura 4.16.

Figura 4.16: Classificação erosiva do solo segundo a velocidade média de escoamento ou a tensão de cisalhamento hidráulico (Saliba, 2009).



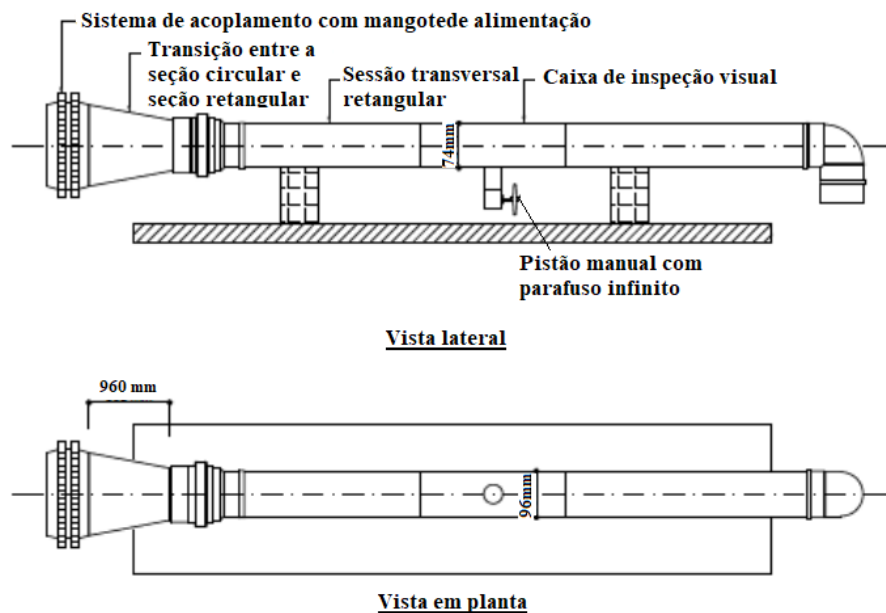
Os testes no aparato EFA foram realizados no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH/UFMG). O equipamento consiste de um conduto forçado, com seção retangular (101,6 mm de base, 50,8 mm de altura e 1,22 m de extensão). Possui um conjunto moto-bomba, com capacidade máxima até 68 m³/h, e velocidade média de escoamento máxima de 2,5 m/s, conectado por meio de um mangote a um reservatório de fibra de vidro com capacidade de 1000 litros, conforme apresentado na Figura 4.17. A vazão é medida a partir de um medidor de vazão digital.

Figura 4.17: Vista lateral e em planta do aparato de teste EFA (Mantovanelli, 2016).



A saída do mangote é conectada a um tubo com 101,6 mm de diâmetro que foi ajustado de forma a efetuar a transição entre a seção tubular a uma seção retangular com 96 mm de largura por 74 mm de altura. A tubulação de transição tem 960 mm de extensão, onde foram instaladas placas paralelas para provocar o alinhamento do fluxo previamente à zona de teste. A Figura 4.18 apresenta o detalhe.

Figura 4.18: Vista lateral e em planta do aparato de teste EFA (Mantovanelli, 2016).



Ao longo da tubulação retangular, há uma caixa de inspeção com paredes em acrílico para realizar a visualização da amostra no momento do teste (Figura 4.19). Suas dimensões são as mesmas da tubulação retangular. Na parte inferior da caixa de inspeção há uma abertura de 45 mm de diâmetro para a colocação da amostra de solo a ser ensaiada. O sistema de ascensão da amostra é realizado através de um pistão com parafuso com rosca infinito, controlado através de uma manivela manual, conforme mostra a Figura 4.19.

Figura 4.19: Caixa de inspeção do aparato EFA.



Figura 4.20: Sistema de ascensão da amostra por um pistão manual.



4.2.4.1 Preparação das amostras para os ensaios de erodibilidade no aparato EFA

A partir dos resultados dos ensaios de perda de massa por imersão com diferentes percentagens de cal, determinou-se a realização de testes de erodibilidade no aparato EFA com as percentagens que se mostraram mais adequadas (2% e 3%) e amostras sem cal como referência. Primeiramente foram feitas séries de ensaios sem cal, com 2% de cal e 24h de cura, com 3% de cal e 24h de cura. Para avaliar a influência do tempo de cura na erodibilidade das amostras, foram realizados ensaios com 2% de cal e 7 dias de cura, e 2% de cal 14 dias de cura. No total foram preparadas e ensaiadas 28 amostras que passaram pelo processo de compactação no equipamento de compactação mini-MCV, e ensaiados posteriormente no aparato de teste EFA. Conhecida a curva de compactação do solo (Proctor Normal), determinou-se a utilização de umidades abaixo da umidade ótima (20,7%). As umidades das amostras variaram entre 16,88% a 18,95%. Foram utilizadas umidades dentro do ramo seco da curva de compactação, por se considerar o uso de menor umidade mais adequado para a aplicação da técnica em pilhas de estéril, pois umidades maiores umidade gerariam maior compactação e consequentemente maior impermeabilização do material na pilha. Isso poderia impossibilitar a vegetação da área,

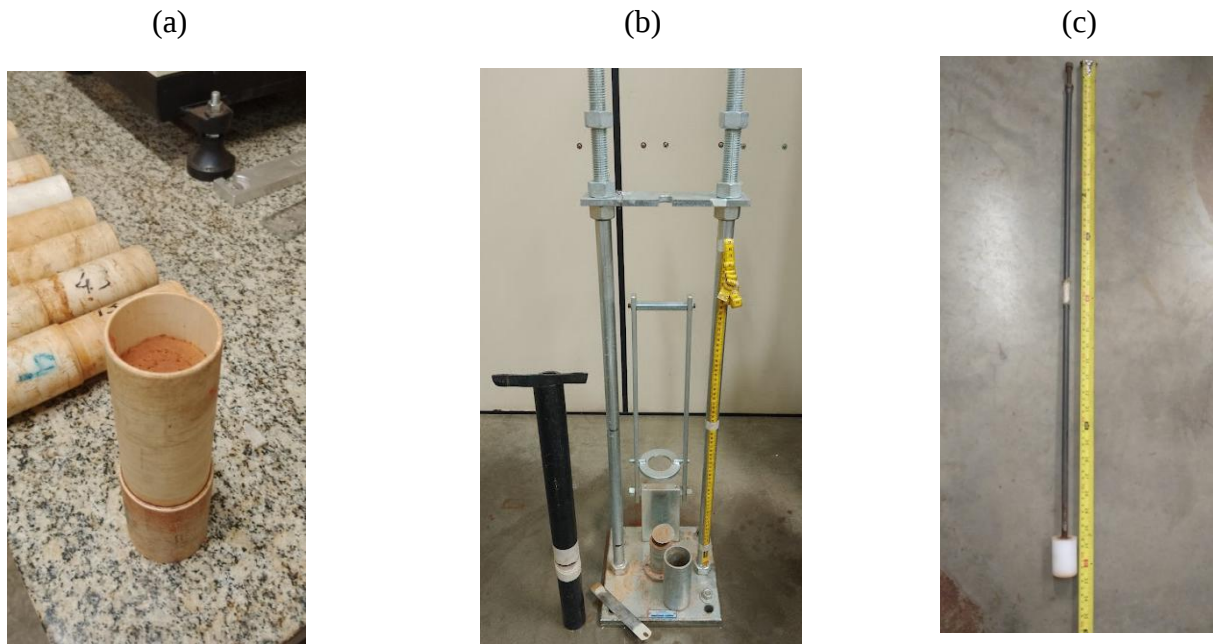
caso queiram usar essa técnica de controle de erosão posteriormente. Além disso, uma maior quantidade de água poderiam acarretar maiores custos para empresa com caminhão pipa e mão-de-obra.

Conforme indica a Norma NBR 6457:2016, o solo foi acomodado em um tabuleiro, destorroado e seco ao ar até próximo à umidade higroscópica. Em seguida, foi passado na peneira de 2 mm, destorroando as frações retidas com uso de almofariz e mão de gral de porcelana revestida de borracha.

Para cada série de ensaio eram preparadas 4 amostras, sendo 100g de massa de solo cada. Separava-se 500g de solo e adicionava-se água 75 ml de água, a fim de se obter umidade em torno de 18%. Para homogeneização da umidade as amostras eram acondicionadas em sacos de polietileno e mantidas por 24h antes de serem moldadas. Após 24h, eram adicionadas quantidades de cal hidratada para atingir as concentrações de 2% e 3%, exceto os ensaios sem cal. Assim que se adicionava a cal, os corpos de corpo eram moldados no equipamento de compactação utilizado no ensaio mini-MCV.

O equipamento de compactação mini-MCV foi adaptado para o molde do corpo de prova a ser utilizado no aparato EFA (Figura 4.21), os moldes eram feitos de PVC com 41 mm de diâmetro e 165 mm de altura. Foi utilizada mesma energia de compactação do ensaio Proctor Normal para compactar as amostras, em torno de $5,7 \text{ Kg.cm/cm}^3$. Para a compactação de cada amostra era separada 100g de massa, colocada no equipamento de compactação com ajuda de um funil e compactada com 37 golpes, utilizando um soquete adaptado de massa igual a 500g a uma altura de queda de 305 mm.

Figura 4.21: Moldes dos corpos de prova (a), equipamento de compactação Mini-MCV adaptado (b) e soquete de compactação adaptado (c).



Após a compactação das amostras os moldes com as amostras eram retiradas do equipamento e armazenadas em sacos de polietileno até o momento do ensaio no aparato EFA, conforme mostra a Figura 4.22.

Figura 4.22: Acondicionamento das amostras



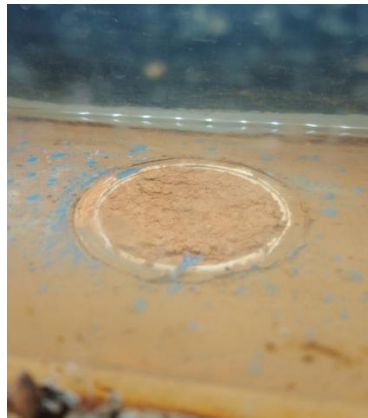
4.2.4.2 Execução do ensaio de erodibilidade no aparato EFA

Os testes foram realizados conforme os passos a seguir:

- Acopla-se a amostra de solo na caixa de inspeção do aparato de teste;
- Eleva-se manualmente a amostra com auxílio do pistão à referência de 1,0mm de altura;
- Ajusta-se a vazão necessária à obtenção da velocidade média de 2,5 m/s. Decidiu-se adotar a velocidade máxima do equipamento, considerando a condição mais favorável à erosão;
- Através da inspeção visual, anota-se o tempo necessário para erodir a amostra em sua totalidade;
- A partir do tempo do teste e da altura erodida calcula-se a taxa de erosão através da Equação 4.5.

A Figura 4.23 apresenta a amostra dentro do equipamento durante o ensaio.

Figura 4.23: Amostra durante o ensaio.



Nos dois primeiros ensaios realizados (sem cal e adição de 2% de cal/24h/w=16,88) as amostras erodiram em sua totalidade. No ensaio com 3% de cal as amostras apresentaram baixa erosão, decidiu-se limitar o tempo de ensaio em até 15 minutos, retirar a amostra do equipamento e medir com régua a altura erodida, como mostra a Figura 4.24.

Figura 4.24: Amostra não erodida em sua totalidade retida do equipamento.



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização física

A Tabela 5.1 apresenta os valores obtidos de densidade real dos grãos, umidade higroscópica e umidade natural e Limites de Atterberg (NBR 6458:2017; NBR 6457:2016; NBR 6459:2017; NBR 7180:2016).

Tabela 5.1: Índices físicos do solo natural

Densidade real dos grãos (g/cm ³)	2,65
Umidade higroscópica (%)	5,52
Umidade natural (%)	20,8
Limite de Liquidez (%)	54,0
Limite de Plasticidade (%)	32,0
Índice de Plasticidade (%)	22,0

De acordo com as especificações que relacionam o índice de plasticidade com a eficiência do tratamento do solo com cal, descritas no item 3.4.1, o solo em estudo atende aos valores dos indicadores (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Indicadores de valores do índice de plasticidade para a eficiência do tratamento do solo com cal.

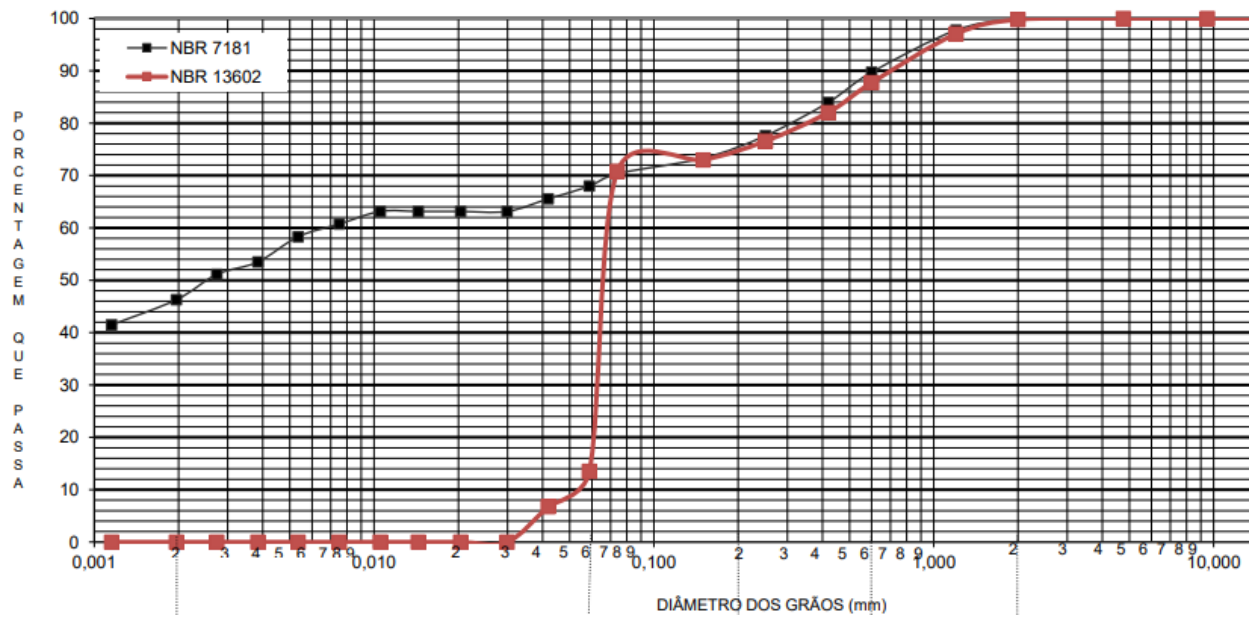
Especificação	Indicador	Solo natural
National Lime Association	Índice de Plasticidade (IP) > 10%	22%
Estado de Illinois	Índice de Plasticidade (IP) > 8%	22%
U. S. Air Force Soil Stabilization Index System (SSIS, 1976)	Índice de Plasticidade (IP) > 10%	22%

5.1.1 Granulometria

Foi realizada a classificação granulométrica a partir do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante, conforme a norma NBR 7181:2018. Foi realizado em conjunto com o método de ensaio de análise granulométrica da ABNT NBR 7181, o ensaio sedimentométrico comparativo, também conhecido como ensaio de dispersão SCS (NBR 13602:1996), sem o uso de defloculante.

A Figura 5.1 apresenta a distribuição granulométrica, realizada a partir dos resultados do ensaio de granulometria conforme a normas NBR 7181:2018 e NBR 13602:1996. A curva granulométrica evidencia que se trata de um solo predominantemente fino (silte e argila), conforme a classificação da ABNT/NBR 6202/95, sendo formado por 68% das partículas menores que 0,06mm. Uma fração fina relevante necessária para ocorrer ligações coesivas induzidas pela ação da cal, afinal essas reações são desencadeadas predominantemente entre os constituintes mineralógicos do solo, em especial a argila, e a cal.

Figura 5.1: Distribuição granulométrica.



NBR	ARGILA	SILTE	AREIA FINA	AREIA MÉD	AREIA GROSSA	PEDREGULHO	TOTAL
6502	46	22	8	14	10	0	100
13602	0	25	61	13	12	0	100

Conforme as especificações que relacionam a porcentagem de solos finos com a eficiência do tratamento do solo com cal, descritas no item 3.4.1, o solo em estudo atende aos valores dos indicadores (Tabela 5.3).

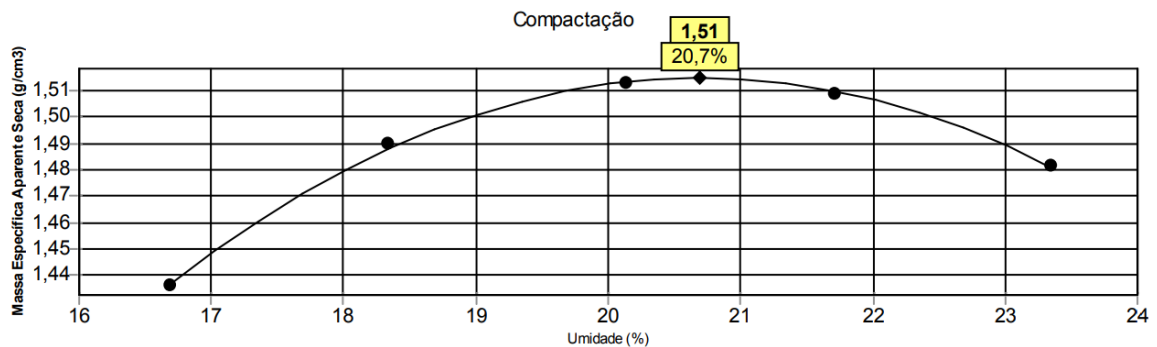
Tabela 5.3: Indicadores de valores da porcentagem de solos finos para a eficiência do tratamento do solo com cal.

Especificação	Indicador	Solo natural
Estado de Illinois	Porcentagem de argila > 7%	46%
U. S. Air Force Soil Stabilization Index System (SSIS, 1976)	Passados na peneira nº 200 (75 µm) > 25%	70%

5.1.2 Curva de compactação – Ensaio de Compactação Proctor Normal

A Figura 5.2 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 $1,515\text{g/cm}^3$ e a umidade ótima de 20,7%.

Figura 5.2: Curva de compactação - Ensaio de compactação Proctor Normal.



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 com diferentes porcentagens de cal.

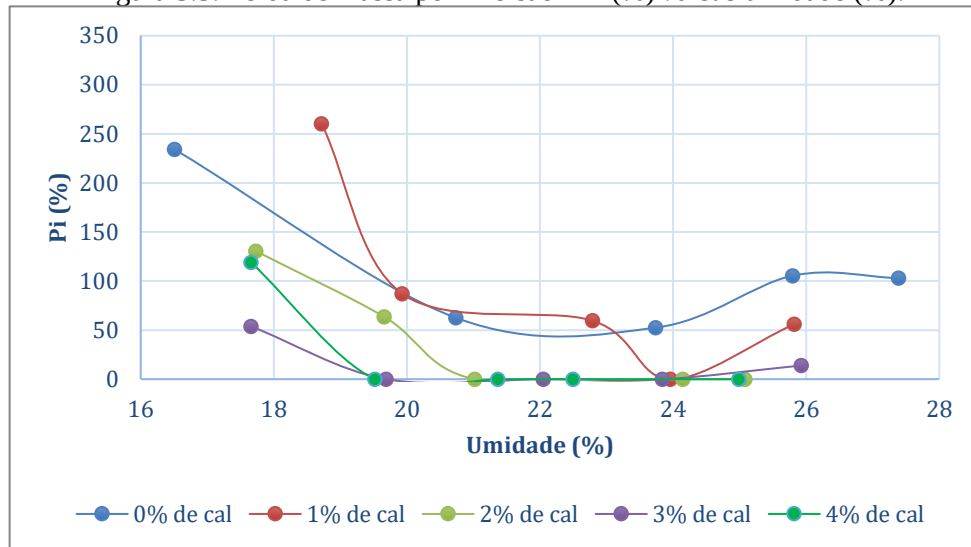
Com base nos valores obtidos nos ensaios de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão, apresenta-se na Tabela 5.4, um resumo das perdas de massa (P_i) e respectivas umidades e massa específica aparente seca (MEAS) para os diferentes teores de cal utilizados. Na Figura 5.3 apresenta-se o gráfico elaborado a partir dos resultados apresentados na Tabela 5.4 das perdas de massa (P_i) das amostras com diferentes teores de cal *versus* umidade.

Nas amostras de referência, sem adição de cal, observa-se a redução da erodibilidade com a aproximação do teor de umidade ao valor ótimo (20,7%) obtido pelo ensaio Proctor normal. A perda de massa por imersão atinge o valor mínimo de 52,53% um pouco acima da umidade ótima (23,74%) devido ao fato de que o fator de forma para esta umidade ser menor em virtude do fator de forma aplicado no cálculo da perda de massa, pois o desprendimento foi em forma de disco neste caso. Este resultado era esperado, pois a umidade ótima produz um arranjo mais compacto das partículas de solo, tornando-o menos suscetível à erosão quando comparado aos arranjos produzidos em outros teores de umidade.

Tabela 5.4: Valores de Perda de massa por imersão (Pi) e respectivas umidades e massa específica aparente seca (MEAS) das amostras com diferentes teores de cal.

Teor de cal (%)	Umidade (%)	MEAS (g/cm ³)	Pi (%)
0	16,51	1,695	234,13
	20,74	1,663	62,48
	23,74	1,665	52,53
	25,80	1,620	105,50
	27,39	1,522	102,98
1	18,72	1,724	260,44
	19,93	1,673	87,04
	22,79	1,621	59,59
	23,96	1,559	0
	25,82	1,521	56,01
2	17,73	1,709	130,53
	19,66	1,739	63,56
	21,02	1,667	0
	24,15	1,568	0
	25,08	1,530	0
3	17,66	1,718	53,76
	19,69	1,709	0
	22,05	1,652	0
	23,84	1,591	0
	25,93	1,539	13,96
4	17,66	1,713	118,9
	19,52	1,714	0
	21,37	1,657	0
	22,50	1,633	0
	24,99	1,563	0

Figura 5.3: Perda de massa por imersão - Pi (%) versus umidade (%).



Este mesmo comportamento se observa nas amostras adicionadas de cal, os valores que produziram a menor perda de massa situam-se ao redor da umidade ótima. No entanto, na medida em que se acrescenta mais cal à amostra, os valores de umidade que produzem a menor perda de massa por imersão se reduzem. Embora o teor de umidade esteja abaixo da ótima em alguns casos, esse comportamento demonstra que é a hidratação da cal produzindo a aglutinação de partículas o processo responsável pela redução da perda de massa, já que a energia de compactação sozinha não é suficiente para reduzi-la conforme demonstrado no comportamento da amostra de referência.

Porém, a adição de cal não deve ser ilimitada, pois pode produzir efeitos colaterais, tais como solubilização da cal em excesso no escoamento superficial, alterando condições de qualidade de água, como também resultaria em um desperdício de recursos. Analisando as amostras tratadas com cal, percebe-se que acima de 3% em massa, não há redução da perda de massa que justifique esse acréscimo de cal. Um teor de 1% de cal reduz a perda de massa, mas de forma ainda incipiente. Assim, os resultados indicam que valores de teor de cal entre 2% e 3% em massa seriam suficientes para reduzir a perda de massa, e consequentemente, a erodibilidade do solo exposto às intempéries.

A aplicação da cal em campo, na proteção da superfície de pilhas de estéril, deve se dar em condições de umidade no ramo seco. Não é simples hidratar o material em campo, demandando a utilização de caminhões pipa e captação de água nem sempre disponível. Assim, propõe-se

determinar o teor de cal para as condições mínimas de teor de umidade avaliadas, da ordem de 17%. Comparando os resultados obtidos nos teores de umidade em torno desse valor, observa-se que a perda de massa foi reduzida de cerca de 234% para cerca de 131% e 54%, 1,78 a 4,35 menores para teores de cal de 2% e 3% em massa, respectivamente.

5.3 Ensaio de erodibilidade no aparato de teste EFA

Os apêndices F, G, H, I, J e K contêm as planilhas com os resultados dos ensaios de erosão realizados no aparato EFA. Com base nos valores obtidos, a Figura 5.4 apresenta classificação da erodibilidade de forma gráfica, em função da velocidade média de escoamento seguindo a metodologia de Briaud (2008). Na Figura 5.5, apresenta-se a comparação da erodibilidade das amostras ensaiadas.

Figura 5.4: Comparação da erodibilidade das amostras segundo Briaud (2008).

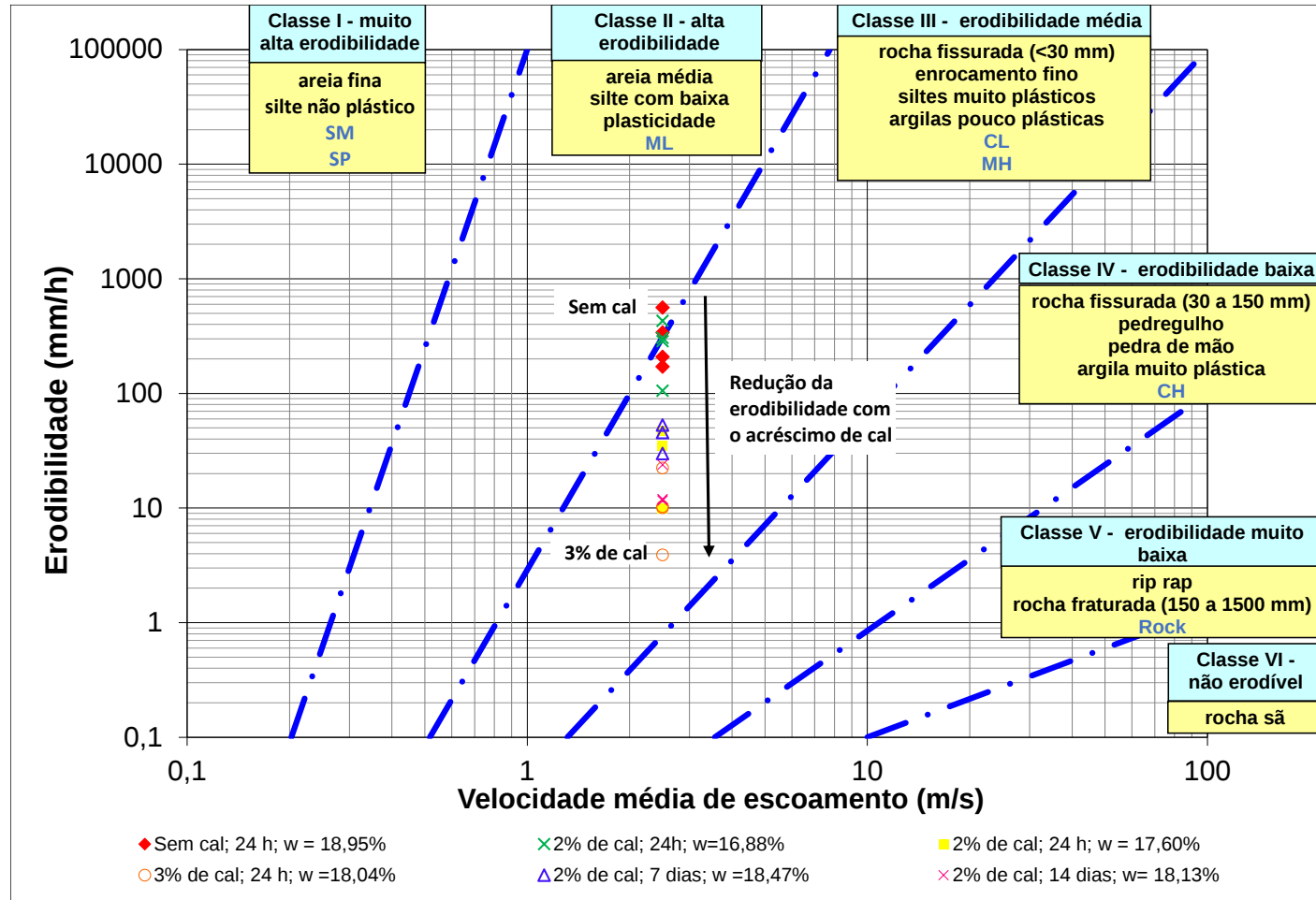
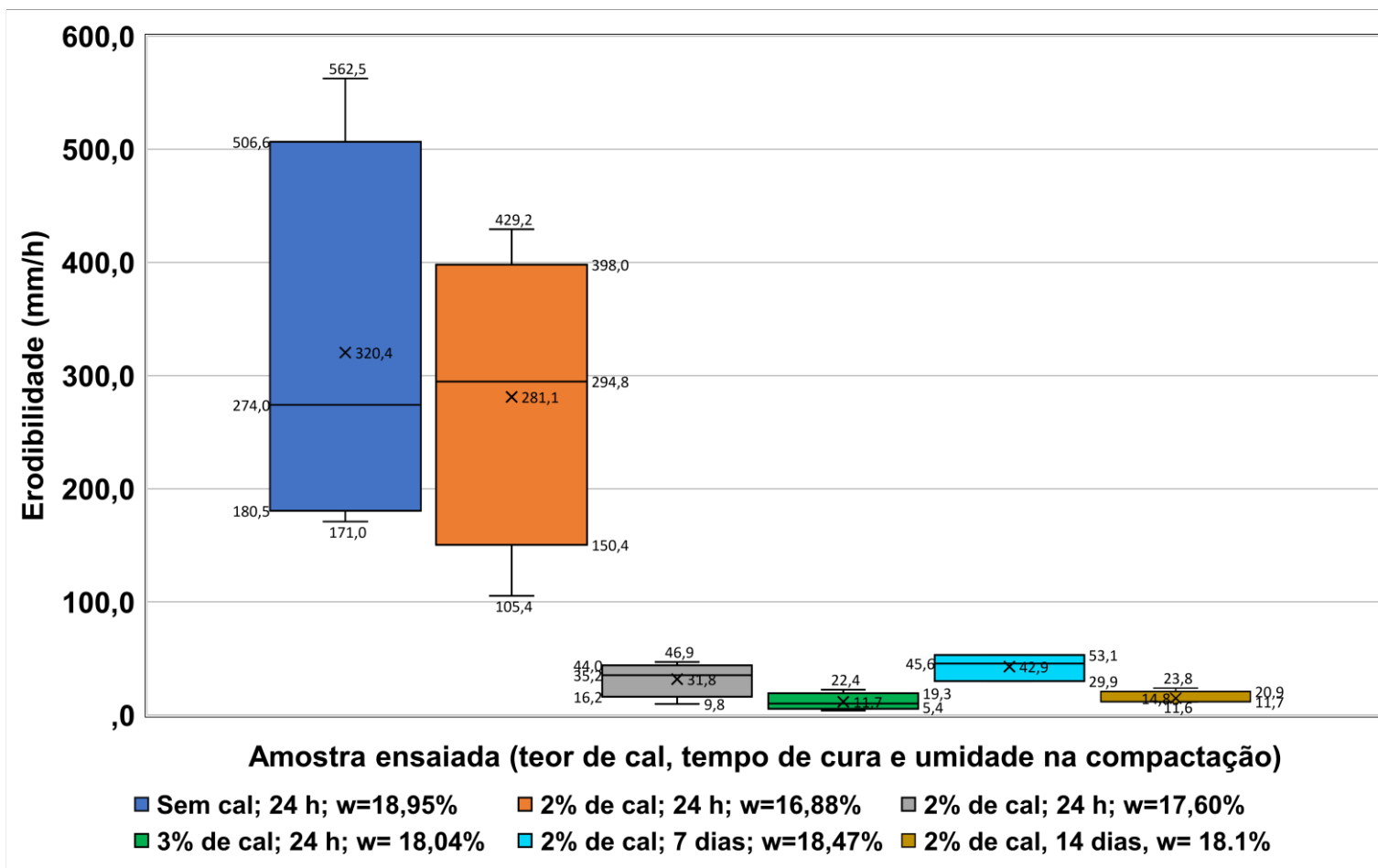


Figura 5.5: Comparação da erodibilidade das amostras.



Das Figura 5.4 e Figura 5.5 observa-se a redução da erodibilidade com o aumento da porcentagem de cal. As amostras com 2% de cal ($w=16,88\%$) apresentam valores de taxa de erosão aproximados aos apresentados nas amostras sem cal ($w=18,95\%$), devido à umidade de compactação das amostras com 2% de cal ser menor, no limite do ensaio de compactação.

Nesse caso, uma hipótese seria que a disponível seria insuficiente para que as reações ocorram. Medidas efetuadas em amostras previamente e posteriormente à adição de cal indicaram que há um consumo de umidade de cerca de metade do teor de cal em massa. Os resultados das amostras com 2% de cal e umidade maior ($w=17,60\%$) apresentaram erodibilidade média (31,8 mm/h) cerca de 10 vezes menor em relação às amostras sem cal (320,4 mm/h), demonstrando a efetividade da adição de cal na redução da erodibilidade do solo.

A erodibilidade média das amostras com 3% de cal (11,7 mm/h) é 27,4 vezes menor em relação à erodibilidade média das amostras sem cal e 2,71 vezes menor em relação às amostras com 2% de cal ($w=17,60\%$).

As amostras com 2% de cal e diferentes tempos de cura apresentaram valores diferentes de erodibilidade média, sendo 31,8 mm/h das amostras com 24h ($w=17,60\%$), 42,9 mm/h das amostras com 7 dias ($w=18,47\%$) e 14,8 mm/h das amostras com 14 dias ($w=18,1\%$). Portanto, o tempo de 7 dias não houve ganho de resistência à erosão, porém com 14 dias apresentou taxa de erosão 2,15 vezes menor em relação a 24h, mostrando que maior tempo de cura influencia no ganho de resistência, pois ocorrem maiores reações entre a cal e solo.

5.4 Aplicação da técnica em taludes de pilha de estéril

Os resultados dos ensaios de perda de massa por imersão e no aparato de teste EFA indicam o potencial dessa técnica na redução da geração de sedimentos em pilhas de estéril, que podem se reduzir de 10 a 27,4 vezes, resultando em diques de contenção proporcionalmente menores, ou tornando medidas pontuais e localizadas (paliçadas e outras técnicas de bioengenharia) viáveis, dispensando a necessidade de diques. A eliminação de diques é uma demanda atual da sociedade brasileira, que vem se tornando avessa aos riscos envolvidos na construção de barragens.

Para determinação da porcentagem de cal mais eficiente para a aplicação da técnica em taludes de pilhas de estéril, deve-se realizar ensaios de erodibilidade em laboratório podendo ser utilizados diversos testes, como os ensaios utilizados no presente trabalho, o ensaio de perda de

massa da metodologia MCT e o ensaio no aparato de teste EFA (Erosion Function Apparatus), dentre outros como o ensaio de Inderbitzen (Inderbitzen, 1961), o ensaio de agulha ou pinhole test, o ensaio de torrão ou crumb test (Sherard *et al.*, 1976a e 1976b), o ensaio de desagregação ou slaking test (Fonseca e Ferreira, 1981), o critério de erodibilidade MCT ou o ensaio HET (Hole Erosion Test).

A proposta deste trabalho é a aplicação da técnica em taludes de pilhas de estéril construídas pelo método ascendente, em que camadas vão sendo desenvolvidas em horizontes. O caminhão para o transporte de estéril descarrega o material na plataforma aberta, formando pequenas pilhas de forma cônica, após a disposição do estéril, um trator nivela o material formando uma camada de espessura uniforme de até 1,5 m de espessura, como mostra a Figura 5.6. O processo se repete até a altura final de projeto da pilha. Sua finalização requer um retaludamento de sua face (“rebatimento”) no sentido de uma atenuação da inclinação, de modo a ser atendido o fator de segurança de projeto (Figura 5.7) e minimização de processos erosivos.

Figura 5.6: Formação de novas camadas da pilha de estéril (Adaptado Maia, 2008).

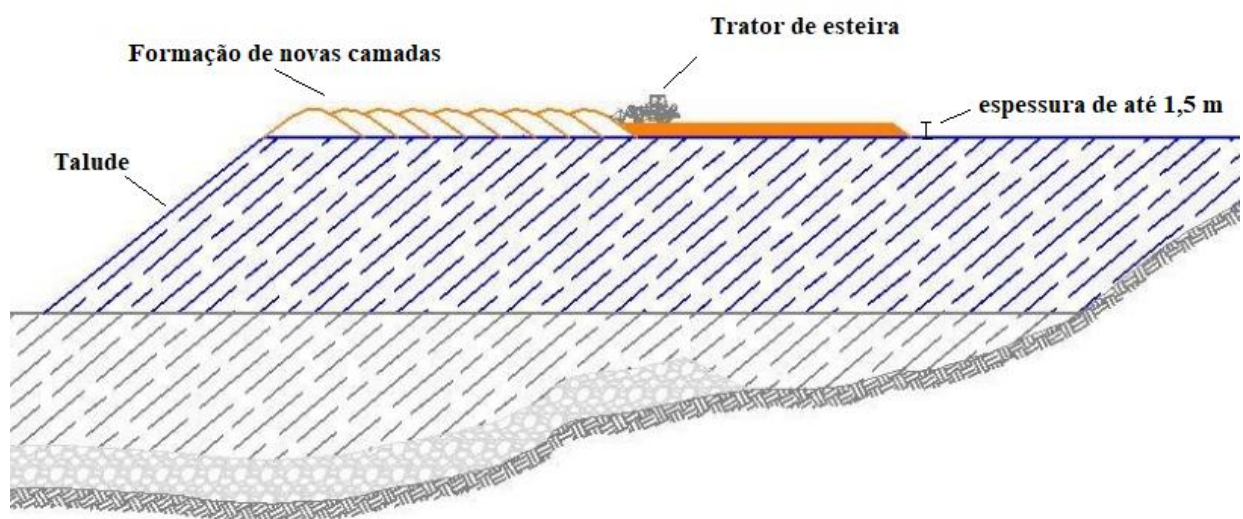
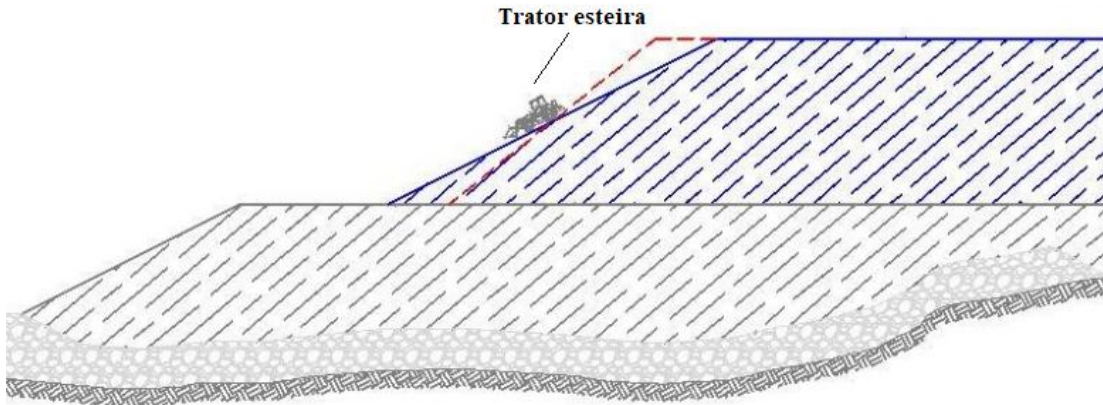


Figura 5.7: Retaludamento da face em conformação ao projeto geotécnico da pilha (Adaptado Maia, 2008).



Uma vez definida em laboratório a porcentagem de cal mais eficiente, propõe-se que no momento disposição da pilhade estéril, depois de finalizado cada banco, certo volume de solo adicionado do teor de cal determinando por esta metodologia seja umidificado e aplicado superficialmente nos taludes e camadas já finalizadas e compactado pelo próprio tráfego dos tratores de esteira. A espessura da camada pode ser tão pequena quanto a prática permita, visualizando-se espessuras a partir de 5 cm.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 Considerações finais

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar, em laboratório, da eficiência do uso da cal na redução da erodibilidade do solo para aplicação em taludes de pilha de estéril, para obter uma metodologia nacional para aplicação desta técnica de combate a processos de erosão hídrica.

A metodologia definida se apoiou nos ensaios de perda de massa por imersão da metodologia MCT e nos ensaio de erosão no aparato EFA (Erosion Function Apparatus). A metodologia de tratamento do solo com cal proposta neste estudo consiste em 4 passos:

1. Coletar amostra do solo (estéril) a ser tratado, e determinar granulometria e índices físicos para avaliar a suscetibilidade do solo ao tratamento;
2. Realizar ensaios de erodibilidade em laboratório de amostras com cal, de 1% a 5% e sem cal como referência, podendo ser utilizados diversos tipos de ensaios, como os ensaios utilizados no presente trabalho, o ensaio de perda de massa da metodologia MCT e o ensaio no aparato de teste EFA (Erosion Function Apparatus), dentre outros como o ensaio de Inderbitzen (Inderbitzen, 1961), o ensaio de agulha ou pinhole test, o ensaio de torrão ou crumb test (Sherard et al., 1976a e 1976b), o ensaio de desagregação ou slaking test (Fonseca e Ferreira, 1981), o critério de erodibilidade MCT ou o ensaio HET (Hole Erosion Test);
3. Determinar a faixa ótima de tratamento a partir da análise de resultados da perda de massa;
4. Realizar testes em campo tratando certa área de pilha existente, com solo avaliado pela metodologia, monitorando a geração de sedimentos e comparando a outra área no mesmo banco e pilha sem tratamento, para determinar a real eficiência da técnica eliminando qualquer efeito de escala.

Neste trabalho, foram realizados ensaios em amostras com porcentagens de cal variando de 1% a 4% em massa, cujos resultados foram comparados ao solo sem adição de cal (amostra de referência). Como principais conclusões da pesquisa, têm-se que:

- 1) O estudo mostrou que estabilização química do solo utilizando a cal hidratada é uma alternativa satisfatória. A mistura de cal em massa proporcionou a redução da perda de massa de 1,78 a 4,35 vezes quando comparado ao solo sem tratamento, na faixa ótima de teores de cal determinada (2% a 3% em massa);
- 2) O acréscimo de cal mesmo no ramo seco da curva de compactação tem efeito equivalente ao obtido pela compactação na umidade ótima do ponto de vista da redução da erodibilidade. Todavia, a técnica tem vantagens do ponto de vista da reabilitação futura da área tratada, visto que a redução se dá pela aglutinação de partículas e não pela compactação ótima, com potencial para tornar o desenvolvimento vegetal mais fácil;
- 3) O controle da erosão banco a banco permite também incrementar a segurança da estrutura, que ficará menos vulnerável à processos erosivos decorrentes da ausência ou inadequação de um sistema de drenagem superficial;
- 4) A redução da erodibilidade tem ainda impactos nas estruturas de controle ambiental necessárias à operação de pilhas de estéril. Atualmente, diques de contenção são amplamente utilizados. Ao reduzir a erodibilidade, há potencial para reduzir ou eliminar a necessidade destas estruturas, que poderiam ser substituídas por técnicas mais simples de controle (bioengenharia, por exemplo), e com menores riscos.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

A partir do estudo realizado nesta dissertação, recomenda-se para pesquisas futuras:

- Para confirmar o potencial de redução da erodibilidade após a aplicação de cal, realizar testes com um simulador de chuva para eventos extremos frequentes (1 a 2 anos de período de retorno), considerando a erosão superficial causada pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo;
- Na faixa de teores de cal sugerida (2% a 3% em massa), coletar amostras de água superficial e analisar se houve efeitos na qualidade da água, descartando futuros problemas de controle ambiental;
- Realizar testes em campo tratando certa área de pilha existente, com solo avaliado pela metodologia, monitorando a geração de sedimentos e comparando a outra área no

mesmo banco e pilha sem tratamento, para determinar a real eficiência da técnica eliminando qualquer efeito de escala.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrantes, J. R.C.B.O; De Lima, J. L.M.P. (2012) *Modelação hidrológica de zonas urbanas costeiras em laboratório com recurso a simulador de chuva e a canal de terra*. Conferencie: 15º Encontro de Engenharia Sanitária e Ambiental, At Évora, Portugal. DOI: 10.13140/2.1.5023.2645
- Aguar, V.G. (2009) *Bacia Hidrográfica do Córrego Granada – Aparecida de Goiânia – GO: os processos erosivos e a dinâmica espacial urbana*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 95p.
- Angelim, R. R. (2005) *Influência do procedimento de mistura da cal hidratada ao solo no comportamento do solo estabilizado para fins de pavimentação rodoviária*. In: II Simpósio sobre solos tropicais e processos erosivos no centro-oeste, Goiânia.
- Assunção, H. F. D. et al. (2004). *Uso de Pluviômetros vetoriais para estimar a Energia Cinética das Chuvas*. Universidade Federal de Goiás, 6p.
- Azevêdo, A. L. C. (2010) *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.
- Basso, L. (2013) *Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis-RS*, 140f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Blanquies, J.; Scharff, M.; Hallock, B. (2003) *The Design and Construction of a Rainfall Simulator*. In: 34th. Annual Conference and Expo. Las Vegas, Nevada.
- Bastos, C. A. B. (1999) *Avaliação de Métodos de Proteção para Taludes em Estradas Não-Pavimentadas*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 303p.
- Bastos, C. A. B. (2004) *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Bell, F. G. (1996) *Lime stabilization of clay minerals and soils*. Engineering geology. Vol 42, Issue 4 Pags 223-237.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (1990) *Conservação do solo*. 5 ed. São Paulo: ícone, 335p.
- Bloise, G.L.F.; Carvalho Júnior, O.A.; Reatto, A.; Guimarães, R.F.; Martins, E.S.; Carvalho, A.P.F. (2001) *Avaliação da suscetibilidade natural à erosão dos solos da bacia do Olaria-DF*. Planaltina: Embrapa Cerrados.
- Briaud, J.; Ting, F.; Chen, H.; Cao, Y.; Han, S.; Kwak, K. (2001) *Erosion function apparatus for scour rate predictions*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, n. 2.
- Briaud, J.-L. (2008) *Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 134, p. 1-12.
- Brodie, I.; Rosewell, C. (2007) *Theoretical Relationships Between Rainfall Intensity and Kinetic Energy Variants Associated with Stormwater Particle Washoff*. Journal of Hydrology, n.340, 30/03/2007, p.40-47.
- Camapum de Carvalho, J.; Lima, M. C.; Mortari, D. (2001) *Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas*. In: 7º Simpósio nacional de controle de erosão, ABGE. Goiânia – GO. Documento eletrônico em CD-ROM, 10 p.
- Camapum de Carvalho, J.; Sales, M. M.; de Souza, N. M.; Melo, M. T. (2006) *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC. xxxiv, 464 p.
- Chamecki, P.R.; Silva, E.T. (2004). *Erosão hídrica em argilas da formação Guabirotuba: Comportamento e parâmetros em ensaios e simulações em laboratório*. Curitiba-PR, p.131-138.
- Chuquipiondo, I. G. V. (2007) *Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água: estudo de caso Trecho de vazão reduzida Capim Branco I Araguari, Minas Gerais*. Dissertação de mestrado. UFMG. Belo Horizonte, 156 p.
- Couto, B. O. C.; Gomes, R. C. Ferreira, L. D.; Pereira, E. L.; Corteletti, R.C. (2016) *Análise de erodibilidade de dois diferentes solos no município de Itabira - MG*. IN: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Belo Horizonte, ABMS.

- Crivelli, P.; Paterna, E.; Lehning, M. (2019) *Spatiotemporal dynamics of snow erosion, deposition and horizontal mass flux*. Journal of Glaciology by Cambridge University. Volume 65, Issue 250, pp. 249-262.
- CPR (2014) *Estudo do comportamento mecânico de solos estabilizados com cal hidratada*. Relatório. Concessionária Nova Dutra - Grupo CCR129p.
- Dash, S.K., Hussain, M. (2011) *Lime stabilization of soils: reappraisal*. Journal of materials in civil engineering. Vol. 24, Issue 6.
- Eaton, T., Broughton, S., Berger, K. C., (2005). *Piteau Associates Engineering Ltd Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps*. Under Licence from the British Columbia Ministry of Energy and Mines - Mine Dump Committee.
- Eades, J. L.; Grim, R. E. (1966) *Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures*. Highway Research Record. Issue Number: 139.
- Egodawatta, P.; Thomas, E.; Goonetilleke, A. (2007) Mathematical Interpretation of Pollutant Wash-off from Urban Road Surfaces Using Simulated Rainfall. Water Research.41: 3025 - 3031 p.
- Elandaloussi, R., Bennabi, A., Dupla, J. C., Canou, J., Benamar, A., Gotteland, P. (2018) *Effectiveness of Lime Treatment of Coarse Soils Against Internal Erosion*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature.
- Freire, E.P. (2001) *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.
- Freire, E.P. e Galvão, L. (2002) *Avaliação do grau de erodibilidade do solo através do ensaio Inderbitzen Modificado*. Anais do Congresso Nacional de Geotecnia, 8, Lisboa, Sociedade Portuguesa de Geotecnia e LNEC. p. 419-426.
- Fonseca, A.M.M.C.C.; Ferreira, C.S.M. (1981) *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.
- Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de Taludes*. São Paulo: Oficina de textos. 192p.

- Gomes, L.L. (2012) *Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela equação universal de perda do solo (EUPS) – pilha de estéril sul – Carajás/PA*. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Guerra, A. J. T. (2009) *Erosão e conservação dos solos*– 3ª ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, pg. 339.
- Guerra, A. J. T. & Cunha, S. B. (1995) *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*. 2a Edição. Editora Bertrand Brasil. Rio de Janeiro – RJ.
- Guimarães, R.C. (2002). *Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas Escavadas*. Dissertação de Mestrado, FT, UnB, Brasília, DF, 183 p.
- Herngren, L.; R. Sukpum; Goonetilleke, A.; De Silva, D. Y. (2005) *Rainfall Simulation as a Tool for Urban Water Quality Research*. Environmental Engineering Science. 22: 378 - 383 p.
- Herrier, G.; Chevalier, C.; Froumentin, M.; Cuisinier, O.; Bonelli, S. (2012) *Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures*. 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France. 8 p.
- Herrier, G.; Leconte, P.; Nerincx, N.; Bonelli, S.; Mercier, F.; Fry, J.; Tachker, P.; Puiatti, D. (2014) *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.
- Higashi, R.A.R. (2006) *Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 486p.
- Holmgren, G.G.S.; Flanagan, C.P. (1977) *Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test*. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.623, p.218–239. (Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, Eds: Sherard, J.L. and Decker, R.S.).

- Hudson, N. W. (1981) *Soil Conservation*. In.: Chapter 3. The physics of rainfall. 2. ed. Ithaca, New York: Bastsford, London and Cornell University Press, 324 p. Imeson, A.; Curfs, M. (2006) *Erosão do solo*. Lucinda, Land Care in Desertification Affected Areas, From Science Towards Application, série fascículo B, n. 1, 15p
- Inderbitzen, A.L. (1961) *An erosion test for soils*. Materials Research & Standards, Philadelphia, v.1, n.7, p.553–554.
- James, J.; Padian, P. K. (2014) *Effect of phosphogypsum on strength of lime stabilized expansive soil*. Gradevinar, v.66, n.12. p.1109-1116.
- Jung, C.; Bobet, A. (2008) *Post-construction evaluation of lime-treated soils*. Final Report. n. FHWA/IN/JTRP-2007/25. 231p.
- Marinello, F.; Pezzuolo, A.; Gasparini, F.; Arvidsson, J.; sartori, L. (2015) *Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization*. Springer US, Precision Agric 16: 601.
- Mays, J. W. (2005) *Water Resources Engineering*. Arizona: John Wiley & Sons. 842 p.
- McCarter, M. K. (1990). *Design and Operating Considerations for Mine Waste Embankments*. Source: Surface Mining, p. 890 - 899.
- Mehenni, A., O. Cuisinier, and F. Masrouri. (2016) *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
- Moriwaki, Y.; Mitchell, J.K. (1977) *The role of dispersion in the slaking of intact clay*. ASTM Special Technical Publication. Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, Eds: Sherard, J.L. and Decker, R.S.). Philadelphia, n.623, p.172–190.
- Nascimento, R. O.; Mascarenha, M. M. A.; Angelim, R. R.; Oliveira, R.B.; Sales, M. M.; Luz, M. P. (2019) *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.
- Nimer, E.; (1979) *Clima da Região Sudeste*. In: Geografia do Brasil. Rio de Janeiro/IBGE, Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. ISBN: 8524002824.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos laterítico*. Villibor, São Paulo.

- Laws, J. O. (1941) *Measurements of the fall velocities of water drops and rain drops*. Trans. American Geophysical Union, Washington: D. C., v. 22, p. 709-721.
- Lemos, C.F. (2002) *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.
- Lima, D. C.; Röhm, S. A.; Barbosa, P. S. A. (1993) *A estabilização dos solos III: Misturas solo-cal para fins rodoviários*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa.
- Little, D. N. (1995) *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime*. Lime Association of Texas. 94-78821. 219p.
- Maia, A. (2018) *Pilhas na Mineração. Uso e Aspectos de Projeto*. Notas de aula. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Mantovanelli, G. B. (2016) *Uma abordagem experimental para a obtenção da taxa de erosão de solos através de um aparato do tipo pistão*. Tese de mestrado: UFES. Vitória.
- Miguntanna, N.S. (2009) *Determining a Set of Surrogate Parameters to Evaluate Urban Stormwater Quality*. Faculty of Built Environment and Engineering Msc Thesis, Queensland University of Technology, Australia. 229 p.
- Pérez-Latorre; F. J.; Castro, L. de; Delgado, A. (2010) *A comparison of Two Variable Intensity Rainfall Simulators for Runoff Studies*. Soil & Tillage Research: 11-16 p.
- Petronilho, M. R. (2010) *Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análises de risco*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto.
- Pinto, N. L. D. S.; Holtz, A. C. T.; Martins, J. A.; F. L. S. Gomide. (2007) *Hidrologia Básica*. São Paulo: Edgard Blucher. 267 p.
- Quirino, G. A. ; Moraes, L. S. ; Silva, P. B. ; Melo, M. T. S. (2014) Erodibilidade de solos: comparação entre os ensaios Inderbitzen modificado e slaking test. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia. XVII Brazilian Congress Of Soil Mechanics And Geotechnical Engineering.
- Rego, J. J. V. (1978) *Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaisse*. Dissertação de Mestrado em Ciências – Coordenação de Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 125p.

- Ribeiro, B. T.; Ciro A. de S. Magalhães; J. M. de L.; M. L. N. Silva (2006) *Calibração e Uso de Minissimulador de Chuva para Estudos de Erosão e Poluição do Solo*. Boletim Técnico, Universidade Federal de Lavras. Lavras: UFLA. 77:17 p.
- Sá, C. A. (2001) *Mapeamento de Declividades voltado para o Controle de Processos Erosivos em Sítios Florestais*. Monografia de Especialização. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG.
- Sales, M. M.; Camapum de Carvalho, J.; Mascarenha, M. M. dos A. (2017) *Erosão em borda de reservatório*. Goiânia: Gráfica UFG. xxxiv, 584 p. – (GECON; v. 3).
- Salles, C.; Poesen, J.; Sempere-Torres, D. (2002) *Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity*. Journal of Hydrology, n. 257, p. 256-270.
- Saliba, A. P. M. (2009) *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.
- Saliba, F. P. M. (2007) *Avaliação hidrogeotécnica da fundação da pilha de estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas (Minas Gerais)*. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Santos, A. R. (2009) *Técnica cal-jet: Proteção de solos contra a erosão através de pulverização de calda de cal*, 25 p.
- Santos, R.M.M. (1997) *Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia*. Brasília/DF, 120p. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
- Selby, M. J. (1993) *Hillslope Material and Process*. Oxford University Press. Second Edition. Oxford.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Decker, R S. (1976a) *Identification and nature of dispersive soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102, no. GT4, p. 287-301, April.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S and Steele, E.F. (1976b). *Pinhole test for identifying dispersive soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102, no. GT1, p. 69-85, Jan.

- Silva, G. B. L. (2006) *Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas*. Tese de Doutorado em Tecnologia e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, 180 p.
- Stephan, A. M. (2010) *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.
- Tucci, C. E. M. (2009) *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 677p.
- Uijlenhoet, R.; Stricker J. N. M. (1999) *A Consistent Rainfall Parameterization Based on The Exponential Raindrop Size Distribution*. Journal of Hydrology, n.218, 19/02/1999, p.101-127.
- Van Dijk, A. I. J.M.; Bruijnzeel, L. A.; Rosewell, C. J. (2002) *Rainfall Intensity-Kinetic energy relationships: a critical literature appraisal*. Journal of Hydrology, n.261, 18 de Janeiro de 2002, p.1-23.
- Vargas, M. (1978) *Introdução à Mecânica dos Solos*. Editora McGRAW-HILL do Brasil LTDA.
- Villibor, D.F. e Alves, D.M.L. (2019). *Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: Projeto e Construção: Novas Considerações*. Tribo da Ilha, Florianópolis, SC, 544 p.
- Villibor, D.F., Nogami, J.S., Cincerre, J.R., Serra, P.R.M. & Zuppolini Neto, A. (2009). *Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas*. Arte & Ciência, São Paulo, SP, 2 vols., 196 p.
- Zhang, J-R., Cao, X. (2002) *Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash*. Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Edition 17 (4), 73-77.

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

Ensaio de Compactação Mini-MCV																										
Identificação		Amostra referência (sem adição de cal)																								
Número do cilindro		1					2					3					4					5				
Área do cilindro (cm²)		19,56					19,56					19,56					19,56					19,56				
Massa do solo úmido (g)		200					200					200					200					200				
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15										
	Massa do solo úmido + tara (g)	36,56	41,26	42,56	34,3	38,75	35,56	39,73	43,45	41,25	39,83	43,76	41,46	45,14	39,67	42,32										
	Massa do solo seco + tara (g)	35,17	39,26	40,3	32,94	36,68	34,02	37,15	40,38	38,47	36,58	40,45	38,4	41,36	36,85	38,9										
	tara (g)	26,86	27,09	26,5	26,49	26,71	26,46	26,36	27,42	26,7	24,54	27,05	26,5	27,26	26,81	26,36										
	Massa do solo seco (g)	8,31	12,17	13,8	6,45	9,97	7,56	10,79	12,96	11,77	12,04	13,4	11,9	14,1	10,04	12,54										
	Massa de água (g)	1,39	2	2,26	1,36	2,07	1,54	2,58	3,07	2,78	3,25	3,31	3,06	3,78	2,82	3,42										
	Teor de umidade (%)	16,7268	16,43	16,38	21,0853	20,7623	20,37	23,911	23,69	23,62	26,99	24,7015	25,71	26,81	28,0876	27,27										
	Teor de umidade médio (%)	16,51					20,74					23,74					25,80					27,39				
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)										
	0	90,00	-	0,973	96,50	-	0,876	91,32	-	0,903	86,50	-	0,938	85,70	-	0,935										
	1	80,05	9,95	1,094	82,88	13,62	1,020	77,88	13,44	1,059	72,88	13,62	1,113	71,52	14,18	1,120										
	2	72,89	7,16	1,202	70,67	12,21	1,196	65,77	12,11	1,254	61,90	10,98	1,310	59,79	11,73	1,340										
	4	65,82	7,07	1,331	59,99	10,68	1,409	55,15	10,62	1,495	53,50	8,40	1,516	53,04	6,75	1,510										
	6	60,81	5,01	1,440	53,98	6,01	1,566	50,76	4,39	1,625	50,48	3,02	1,607	52,72	0,32	1,519										
	8	56,44	4,37	1,552	51,29	2,69	1,648	50,25	0,51	1,641	50,13	0,35	1,618	52,70	0,02	1,520										
	12	54,91	1,53	1,595	50,88	0,41	1,661	49,66	0,59	1,661	50,11	0,02	1,619	52,64	0,06	1,522										
	16	53,44	1,47	1,639	50,81	0,07	1,663	49,60	0,06	1,663	50,10	0,01	1,619	52,63	0,01	1,522										
	24	52,30	1,14	1,675	50,81	0,00	1,663	49,56	0,04	1,664	50,09	0,01	1,619	52,63	0,00	1,522										
	32	51,70	0,60	1,694	50,81	0,00	1,663	49,52	0,04	1,665	50,08	0,01	1,620													
	48	51,67	0,03	1,695	50,81	0,00	1,663																			
	64																									
	96																									
	128																									
	256																									
	Critério de parada da compactação do corpo de prova, quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor ou igual a 2mm																									
MEAS _{máx} = Massa Específica Aparente Seca máxima do corpo de prova																										
Perda de Massa por Imersão																										
Cápsula	1					2					3					4					5					
Comprimento saliente (cm)	1					1					1					1					1					
Área (cm²)	19,6					19,6					19,6					19,6					19,6					
Volume (cm³)	19,6					19,6					19,6					19,6					19,6					
Massa saliente = M _{sa} = A * MEAS (g)	33,22					32,60					32,64					31,74					29,83					
Massa do solo seco + cápsula (g)	155,82					121,78					109,65					110,28					106,04					
Massa da cápsula (g)	78,04					81,04					75,36					76,79					75,32					
Massa do solo seco = M _s (g)	77,78					40,74					34,29					33,49					30,72					
Pi = M _s * 100 / M _{sa} (%)	234,13%					62,48%					52,53%					105,50%					102,98%					
	Fator forma (F) igual a 1 (um), quando o material na cápsula de alumínio se apresentar desagregado ou em forma de material solto																									
	Fator forma (F) igual a 0,5 (meio), quando o material na cápsula de alumínio se apresentar em forma de uma bolacha (ou disco)																									
	Fator forma (F) igual a 0 (zero), quando o material se não se desprender do corpo-de-prova																									

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

Ensaio de Compactação Mini-MCV																
Identificação		Amostra com adição 1% de cal														
Número do cilindro		1			2			3			4			5		
Área do cilindro (cm²)		19,56			19,56			19,56			19,56			19,56		
Massa do solo úmido (g)		200			200			200			200			200		
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Massa do solo úmido + tara (g)	43,80	37,77	39,11	41,03	41,33	42,22	45,34	45,05	42,26	81,25	82,27	70,75	78,33	79,61	80,99
	Massa do solo seco + tara (g)	41,09	36,08	37,15	38,69	38,83	39,73	41,53	41,67	39,48	74,08	76,69	65,16	70,74	72,26	73,51
	tara (g)	26,88	27,05	26,49	26,70	26,33	27,44	24,54	27,08	27,27	44,28	53,07	42,06	41,81	43,73	44,13
	Massa do solo seco (g)	14,21	9,03	10,66	11,99	12,50	12,29	16,99	14,59	12,21	29,80	23,62	23,10	28,93	28,53	29,38
	Massa de água (g)	2,71	1,69	1,96	2,34	2,50	2,49	3,81	3,38	2,78	7,17	5,58	5,59	7,59	7,35	7,48
	Teor de umidade (%)	19,07	18,72	18,39	19,52	20,00	20,26	22,42	23,17	22,77	24,06	23,62	24,20	26,24	25,76	25,46
	Teor de umidade médio (%)	18,72			19,93			22,79			23,96			25,82		
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)
	0	89,66	-	0,959	85,70	-	0,993	85,79	-	0,969	84,34	-	0,976	85,70	-	0,946
	1	79,17	10,49	1,086	75,98	9,72	1,120	75,95	9,84	1,094	72,84	11,50	1,130	72,30	13,40	1,122
	2	71,01	8,16	1,210	68,25	7,73	1,247	66,56	9,39	1,249	62,35	10,49	1,320	62,51	9,79	1,297
	4	64,02	6,99	1,343	60,87	7,38	1,398	58,95	7,61	1,410	55,50	6,85	1,483	55,57	6,94	1,459
	6	59,16	4,86	1,453	56,05	4,82	1,518	55,15	3,80	1,507	53,00	2,50	1,553	54,43	1,14	1,490
	8	56,01	3,15	1,535	53,18	2,87	1,600	52,90	2,25	1,571	52,84	0,16	1,558	53,38	1,05	1,519
	12	53,51	2,50	1,606	51,50	1,68	1,652	52,26	0,64	1,590	52,79	0,05	1,559	53,38	0,00	1,519
	16	52,15	1,36	1,648	50,98	0,52	1,669	52,09	0,17	1,595	52,79	0,00	1,559	53,31	0,07	1,521
	24	51,14	1,01	1,681	50,88	0,10	1,672	51,85	0,24	1,603	52,79	0,00	1,559	53,31	0,00	1,521
	32	50,44	0,70	1,704	50,86	0,02	1,673	51,26	0,59	1,621						
	48	50,13	0,31	1,714												
	64	49,84	0,29	1,724												
	96															
	128															
	256															
Critério de parada da compactação do corpo de prova, quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor ou igual a 2mm																
MEAS _{máx} = Massa Específica Aparente Seca máxima do corpo de prova																
Perda de Massa por Imersão																
Cápsula		1			2			3			4			5		
Comprimento saliente (cm)		1			1			1			1			1		
Área (cm²)		19,6			19,6			19,6			19,6			19,6		
Volume (cm³)		19,6			19,6			19,6			19,6			19,6		
Massa saliente = M _{sa} = A * MEAS (g)		33,60			32,79			31,78			30,56			29,82		
Massa do solo seco + cápsula (g)		165,58			138,1			113,21			76,75			91,99		
Massa da cápsula (g)		78,06			81,02			75,34			76,75			75,29		
Massa do solo seco = M _s (g)		87,52			57,08			37,87			0			16,7		
Pi = M _s * 100 / M _{sa} (%)		260,44%			87,04%			59,59%			0,00%			56,01%		
	Fator forma (F) igual a 1 (um), quando o matrial na cápsula de alumínio se apresentar desagregado ou em forma de material solto															
	Fator forma (F) igual a 0,5 (meio), quando o matrial na cápsula de alumínio se apresentar em forma de uma bolacha (ou disco)															
	Fator forma (F) igual a 0 (zero), quando o matrial se não se desprender do corpo-de-prova															

APÊNCICE C – Resultados do ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão de amostras com adição 2% de cal

Ensaio de Compactação Mini-MCV																
Identificação		Amostra com adição 2% de cal														
Número do cilindro		1			2			3			4			5		
Área do cilindro (cm²)		19,56			19,56			19,56			19,56			19,56		
Massa do solo úmido (g)		200			200			200			200			200		
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Massa do solo úmido + tara (g)	51,69	45,38	52,89	54,22	56,09	52,73	49,98	52,82	54,35	66,47	86,23	74,37	76,57	78,30	76,35
	Massa do solo seco + tara (g)	48,00	42,68	48,78	49,64	51,31	48,56	45,66	48,45	49,41	62,07	79,82	68,18	69,43	71,43	70,00
	tara (g)	26,88	27,05	26,49	26,71	26,26	27,44	24,55	27,00	27,17	44,28	53,11	42,08	41,84	43,74	44,15
	Massa do solo seco (g)	21,12	15,63	22,29	22,93	25,05	21,12	21,11	21,45	22,24	17,79	26,71	26,10	27,59	27,69	25,85
	Massa de água (g)	3,69	2,70	4,11	4,58	4,78	4,17	4,32	4,37	4,94	4,40	6,41	6,19	7,14	6,87	6,35
	Teor de umidade (%)	17,47	17,27	18,44	19,97	19,08	19,74	20,46	20,37	22,21	24,73	24,00	23,72	25,88	24,81	24,56
	Teor de umidade médio (%)	17,73			19,60			21,02			24,15			25,08		
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)
	0	81,42	-	1,065	82,36	-	1,036	84,19	-	1,002	83,40	-	0,986	85,70	-	0,952
	1	75,13	6,29	1,154	73,17	9,19	1,166	75,23	8,96	1,121	73,21	10,19	1,123	72,30	13,40	1,128
	2	68,59	6,54	1,264	66,47	6,70	1,284	66,53	8,70	1,267	63,21	10,00	1,300	62,51	9,79	1,305
	4	62,75	5,84	1,381	59,52	6,95	1,433	58,68	7,85	1,437	55,02	8,19	1,494	55,57	6,94	1,468
	6	58,67	4,08	1,477	55,01	4,51	1,551	54,16	4,52	1,557	52,70	2,32	1,560	54,43	1,14	1,499
	8	55,94	2,73	1,549	52,28	2,73	1,632	51,71	2,45	1,631	52,44	0,26	1,567	53,38	1,05	1,528
	12	54,00	1,94	1,605	50,49	1,79	1,690	50,76	0,95	1,661	52,42	0,02	1,568	53,38	0,00	1,528
	16	52,71	1,29	1,644	49,65	0,84	1,718	50,57	0,19	1,667	52,42	0,00	1,568	53,31	0,07	1,530
	24	51,76	0,95	1,675	49,14	0,51	1,736	50,57	0,00	1,667	52,42	0,00	1,568	53,31	0,00	1,530
	32	51,17	0,59	1,694	49,05	0,09	1,739	50,57	0,00	1,667						
	48	50,72	0,45	1,709	49,05	0,00	1,739	50,57	0,00	1,667						
	64															
	96															
	128															
256																
Critério de parada da compactação do corpo de prova, quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor ou igual a 2mm																
MEAS _{máx} = Massa Específica Aparente Seca máxima do corpo de prova																
Perda de Massa por Imersão																
Cápsula		1			2			3			4			5		
Comprimento saliente (cm)		1			1			1			1			1		
Área (cm²)		19,6			19,6			19,6			19,6			19,6		
Volume (cm³)		19,6			19,6			19,6			19,6			19,6		
Massa saliente = M _{sa} = A * MEAS (g)		33,49			34,09			32,68			30,73			29,99		
Massa do solo seco + cápsula (g)		121,77			124,37			75,35			76,74			75,25		
Massa da cápsula (g)		78,05			81,03			75,35			76,74			75,25		
Massa do solo seco = M _s (g)		43,72			43,34			0			0			0		
Pi = M _s * 100 / M _{sa} (%)		130,53%			63,56%			0,00%			0,00%			0,00%		
	Fator forma (F) igual a 1 (um), quando o matrial na cápsula de alumínio se apresentar desagregado ou em forma de material solto															
	Fator forma (F) igual a 0,5 (meio), quando o matrial na cápsula de alumínio se apresentar em forma de uma bolacha (ou disco)															
	Fator forma (F) igual a 0 (zero), quando o matrial se não se desprender do corpo-de-prova															

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

Ensaio de Compactação Mini-MCV																
Identificação		Amostra com adição de 3% de cal														
Número do cilindro		1			2			3			4			5		
Área do cilindro (cm²)		19,56			19,56			19,56			19,56			19,56		
Massa do solo úmido (g)		200			200			200			200			200		
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Massa do solo úmido + tara (g)	51,41	60,26	53,4	55,21	51,07	55,25	54,06	48,44	55,46	93,31	116,64	77,27	85,03	82,02	78,58
	Massa do solo seco + tara (g)	47,65	55,24	49,48	50,5	46,95	50,74	48,63	44,72	50,27	83,7	104,54	70,55	76,05	74,15	71,51
	tara (g)	26,83	27,12	26,51	26,68	26,32	27,41	24,55	27,05	27,26	44,31	53,12	42,07	41,83	43,64	44,06
	Massa do solo seco (g)	20,82	28,12	22,97	23,82	20,63	23,33	24,08	17,67	23,01	39,39	51,42	28,48	34,22	30,51	27,45
	Massa de água (g)	3,76	5,02	3,92	4,71	4,12	4,51	5,43	3,72	5,19	9,61	12,11	6,72	8,98	7,87	7,07
	Teor de umidade (%)	18,0596	17,85	17,07	19,7733	19,9709	19,33	22,5498	21,05	22,56	24,40	23,5317	23,60	26,24	25,7948	25,76
	Teor de umidade médio (%)	17,66			19,69			22,05			23,84			25,93		
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)
	0	83,77	-	1,035	85,09	-	1,002	85,62	-	0,976	82,48	-	0,999	83,71	-	0,968
	1	76,19	7,58	1,138	76,61	8,48	1,113	75,79	9,83	1,103	74,14	8,34	1,111	73,14	10,57	1,108
	2	68,79	7,40	1,261	68,35	8,26	1,247	66,81	8,98	1,251	64,56	9,58	1,276	62,87	10,27	1,289
	4	62,57	6,22	1,386	61,34	7,01	1,390	59,31	7,50	1,410	57,17	7,39	1,441	55,49	7,38	1,460
	6	58,27	4,30	1,488	56,71	4,63	1,503	54,71	4,60	1,528	52,98	4,19	1,555	52,82	2,67	1,534
	8	55,61	2,66	1,560	53,97	2,74	1,580	52,16	2,55	1,603	51,92	1,06	1,587	52,66	0,16	1,539
	12	53,66	1,95	1,616	52,15	1,82	1,635	50,97	1,19	1,640	51,80	0,12	1,591	52,65	0,01	1,539
	16	52,39	1,27	1,655	51,14	1,01	1,667	50,61	0,36	1,652	51,80	0,00	1,591	52,65	0,00	1,539
	24	51,49	0,90	1,684	50,43	0,71	1,691	50,61	0,00	1,652	51,80	0,00	1,591	52,65	0,00	1,539
	32	50,95	0,54	1,702	50,08	0,35	1,702	50,61	0,00	1,652	51,80	0,00	1,591	52,65	0,00	1,539
	48	50,47	0,48	1,718	49,89	0,19	1,709	50,61	0,00	1,652						
	64															
	96															
	128															
	256															
Critério de parada da compactação do corpo de prova, quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor ou igual a 2mm																
MEAS _{máx} = Massa Específica Aparente Seca máxima do corpo de prova																
Perda de Massa por Imersão																
Cápsula	1			2			3			4			5			
Comprimento saliente (cm)	1			1			1			1			1			
Área (cm²)	19,6			19,6			19,6			19,6			19,6			
Volume (cm³)	19,6			19,6			19,6			19,6			19,6			
Massa saliente = M _{sa} = A*MEAS (g)	33,68			33,49			32,38			31,18			30,16			
Massa do solo seco + cápsula (g)	114,28			81,03			75,36			76,69			79,5			
Massa da cápsula (g)	78,07			81,03			75,36			76,69			75,29			
Massa do solo seco = M _s (g)	36,21			0			0			0			4,21			
Pi = M _s * 100 / M _{sa} (%)	53,76%			0,00%			0,00%			0,00%			13,96%			
	Fator forma (F) igual a 1 (um), quando o material na cápsula de alumínio se apresentar desagregado ou em forma de material solto															
	Fator forma (F) igual a 0,5 (meio), quando o material na cápsula de alumínio se apresentar em forma de uma bolacha (ou disco)															
	Fator forma (F) igual a 0 (zero), quando o material se não se desprender do corpo-de-prova															

APÊNDICE E – Resultados dos ensaio de compactação mini-MCV e perda de massa por imersão de amostras com adição 4% de cal

Ensaio de Compactação Mini-MCV																	
Identificação		Amostra com adição de 4% de cal															
Número do cilindro		1			2			3			4			5			
Área do cilindro (cm²)		19,56			19,56			19,56			19,56			19,56			
Massa do solo úmido (g)		200			200			200			200			200			
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Massa do solo úmido + tara (g)	57,27	56,83	54,37	58,45	58,12	70,37	51,92	65,18	63,16	80	103,92	100,52	92,37	81,94	102,2	
	Massa do solo seco + tara (g)	52,45	52,47	50,32	53,11	52,89	63,61	46,98	58,45	57,01	73,5	94,72	89,52	82,2	74,43	90,45	
	tara (g)	26,88	27,12	26,41	26,69	26,31	27,4	24,54	27,04	27,26	44,27	53,07	42,06	41,82	43,71	44,1	
	Massa do solo seco (g)	25,57	25,35	23,91	26,42	26,58	36,21	22,44	31,41	29,75	29,23	41,65	47,46	40,38	30,72	46,35	
	Massa de água (g)	4,82	4,36	4,05	5,34	5,23	6,76	4,94	6,73	6,15	6,5	9,2	11	10,17	7,51	11,75	
	Teor de umidade (%)	18,85	17,20	16,94	20,21	19,68	18,67	22,0143	21,43	20,67	22,24	22,09	23,18	25,19	24,45	25,35	
	Teor de umidade médio (%)	17,66			19,52			21,37			22,50			24,99			
Número de golpes	n	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	Altura (mm)	Δh (mm)	MEAS (g/cm³)	
	0	81,53	-	1,064	86,03	-	0,992	85,39	-	0,985	84,04	-	0,991	85,07	-	0,960	
	1	74,88	6,65	1,158	76,63	9,40	1,114	75,99	9,40	1,106	75,09	8,95	1,109	74,57	10,50	1,095	
	2	68,21	6,67	1,271	68,30	8,33	1,250	66,82	9,17	1,258	65,83	9,26	1,265	64,05	10,52	1,275	
	4	62,23	5,98	1,394	61,49	6,81	1,388	59,39	7,43	1,416	58,38	7,45	1,427	56,36	7,69	1,448	
	6	58,19	4,04	1,490	56,94	4,55	1,499	54,85	4,54	1,533	53,93	4,45	1,545	52,87	3,49	1,544	
	8	55,55	2,64	1,561	54,13	2,81	1,577	52,46	2,39	1,603	51,93	2,00	1,604	52,26	0,61	1,562	
	12	53,77	1,78	1,613	52,35	1,78	1,631	51,25	1,21	1,640	51,18	0,75	1,628	52,25	0,01	1,562	
	16	52,55	1,22	1,650	51,07	1,28	1,672	50,98	0,27	1,649	51,00	0,18	1,633	52,24	0,01	1,563	
	24	51,64	0,91	1,679	50,42	0,65	1,693	50,73	0,25	1,657	51,00	0,00	1,633	52,24	0,00	1,563	
	32	51,08	0,56	1,698	50,05	0,37	1,706	50,73	0,00	1,657	51,00	0,00	1,633	52,24	0,00	1,563	
	48	50,64	0,44	1,713	49,81	0,24	1,714	50,73	0,00	1,657							
	64																
	96																
	128																
	256																
	Critério de parada da compactação do corpo de prova, quando a diferença entre "n" golpes e "4n" golpes for menor ou igual a 2mm																
	MEAS _{máx} = Massa Específica Aparente Seca máxima do corpo de prova																
Perda de Massa por Imersão																	
Cápsula		1			2			3			4			5			
Comprimento saliente (cm)		1			1			1			1			1			
Área (cm²)		19,6			19,6			19,6			19,6			19,6			
Volume (cm³)		19,6			19,6			19,6			19,6			19,6			
Massa saliente = Msa = A*MEAS (g)		33,57			33,60			32,48			32,01			30,63			
Massa do solo seco + cápsula (g)		117,95			81,06			75,36			76,75			75,32			
Massa da cápsula (g)		78,04			81,06			75,36			76,75			75,32			
Massa do solo seco = Ms (g)		39,91			0			0			0			0			
Pi = Ms * 100 / Msa (%)		118,90%			0,00%			0,00%			0,00%			0,00%			
	Fator forma (F) igual a 1 (um), quando o matrial na cápsula de alumínio se apresentar desagregado ou em forma de material solto																
	Fator forma (F) igual a 0,5 (meio), quando o matrial na cápsula de alumínio se apresentar em forma de uma bolacha (ou disco)																
	Fator forma (F) igual a 0 (zero), quando o matrial se não se desprender do corpo-de-prova																

APÊNCICE F – Resultados do ensaio EFA de amostras sem adição de cal, 24h de cura, w=18,95%

Ensaio EFA (Erosion Functi on Apparatus)													
Identificação		Sem adição de Cal											
Moldado em		19/01/2023		Ensaiado em		20/01/2023							
Número do cilindro		1			2			3			4		
Área do cilindro (cm²)		12,56			12,56			12,56			12,56		
Massa do solo úmido (g)		100			100			100			100		
Unidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Massa do solo úmido + tara (g)	43,58	37,3	41,9	43,58	37,3	41,9	43,58	37,3	41,9	43,58	37,3	41,9
	Massa do solo seco + tara (g)	40,78	35,59	39,4	40,78	35,59	39,4	40,78	35,59	39,4	40,78	35,59	39,4
	tara (g)	24,51	27,18	26,45	24,51	27,18	26,45	24,51	27,18	26,45	24,51	27,18	26,45
	Massa do solo seco (g)	16,27	8,41	12,95	16,27	8,41	12,95	16,27	8,41	12,95	16,27	8,41	12,95
	Massa de água (g)	2,8	1,71	2,5	2,8	1,71	2,5	2,8	1,71	2,5	2,8	1,71	2,5
	Teor de umidade (%)	17,21	20,33	19,31	17,21	20,33	19,31	17,21	20,33	19,31	17,21	20,33	19,31
	Teor de umidade médio (%)	18,95			18,95			18,95			18,95		
Compactação dos corpos de prova		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada	
		1	37		1	37		1	37		1	37	
		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)	
		48	1,394		47,5	1,409		47,5	1,409		47	1,424	
Ensaio EFA		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	
		19,4	2,5		19,4	2,5		19,4	2,5		19,4	2,5	
		Tempo de erosão (mm:ss)		Tempo de erosão		Tempo de erosão		Tempo de erosão					
		00:05:04		00:13:47		00:16:40		00:08:19					
		Altura erodida (mm)		Altura erodida (mm)		Altura erodida (mm)		Altura erodida (mm)					
		47,5		48		47,5		47					
MEAS = Massa específica Aparente Seca (g/cm³)													

Sem Cal; 24 h; w=18,95%; Moldado em 19/01/23; Ensaiado em 20/01/23				
V (m/s)	Altura erodida (mm)	MEAS (g/cm ³)	Tempo de erosão (mm:ss)	Erodibilidade (mm/h)
2,5	47,5	1,394	00:05:04	562,5
2,5	48	1,409	00:13:47	208,9
2,5	47,5	1,409	00:16:40	171,0
2,5	47	1,424	00:08:19	339,1
			Amostra completa	
			Média (mm/h)	320,4
			Desvio Padrão (mm/h)	176,7
			Alfa	0,05
			N	4
			Estatística t	3,18
			IC Média máx	601,6
			IC Média mín	132,9
			Cv	0,6
			Removendo outlier (indicado em amarelo)	
			Média (mm/h)	239,7
			Desvio Padrão (mm/h)	88,2
			Alfa	0,05
			N	3
			Estatística t	4,30
			IC Média máx	429,3
			IC Média mín	50,0
			Cv	0,37
			Decisão: manter 4 pontos	

APÊNCICE G – Resultados do ensaio EFA de amostras com adição de 2% de cal, 24 h de cura, w=16,88%

Ensaio EFA (Erosion Function Apparatus)													
Identificação		Adição de 2% de cal - 24h											
Moldado em		23/01/2023		Ensaiado em		24/01/2023							
Número do cilindro		1			2			3			4		
Área do cilindro (cm²)		12,56			12,56			12,56			12,56		
Massa do solo úmido (g)		64,21			100			100			100		
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Massa do solo úmido + tara (g)	38,64	50,6	37,78	38,64	50,6	37,78	38,64	50,6	37,78	38,64	50,6	37,78
	Massa do solo seco + tara (g)	36,55	47,26	36,17	36,55	47,26	36,17	36,55	47,26	36,17	36,55	47,26	36,17
	tara (g)	24,55	27,25	26,43	24,55	27,25	26,43	24,55	27,25	26,43	24,55	27,25	26,43
	Massa do solo seco (g)	12	20,01	9,74	12	20,01	9,74	12	20,01	9,74	12	20,01	9,74
	Massa de água (g)	2,09	3,34	1,61	2,09	3,34	1,61	2,09	3,34	1,61	2,09	3,34	1,61
	Teor de umidade (%)	17,42	16,69	16,53	17,42	16,69	16,53	17,42	16,69	16,53	17,42	16,69	16,53
	Teor de umidade médio (%)	16,88			16,88			16,88			16,88		
Compactação dos corpos de prova		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada	
		1	37		1	37		1	37		1	37	
		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)	
		30,5	1,409		47,5	1,434		47,5	1,434		47	1,449	
Ensaio EFA		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	
		19,4	2,5		19,4	2,5		19,4	2,5		19,4	2,5	
		Tempo de erosão (mm:ss)			Tempo de erosão			Tempo de erosão			Tempo de erosão		
		00:06:25			00:09:10			00:06:30			00:26:45		
		Altura erodida (mm)			Altura erodida (mm)			Altura erodida (mm)			Altura erodida (mm)		
		30,5			46,5			46,5			47		
MEAS = Massa específica Aparente Seca (g/cm³)													

2% de cal; 24 h; w=16,88%; Moldado em 23/01/23; Ensaiado em 24/01/23				
V (m/s)	Altura erodida (mm)	MEAS (g/cm ³)	Tempo de erosão (mm:ss)	Erodibilidade (mm/h)
2,5	30,5	1,409	00:06:25	285,2
2,5	46,5	1,434	00:09:10	304,4
2,5	46,5	1,434	00:06:30	429,2
2,5	47	1,449	00:26:45	105,4
			Média (mm/h)	281,1
			Desvio Padrão (mm/h)	133,4
			Alfa	0,05
			N	4
			Estatística t	3,18
			IC Média máx	493,3
			IC Média mín	68,8
			Cv	0,47
			Removendo outlier (indicado em amarelo)	
			Média (mm/h)	339,6
			Desvio Padrão (mm/h)	78,2
			Alfa	0,05
			N	3
			Estatística t	4,30
			IC Média máx	533,9
			IC Média mín	145,3
			Cv	0,23
			Decisão: manter 4 pontos	

3% de cal; 24 h; w= 18,04%; Moldado em 24/01/23; Ensaiado em 25/01/23			
V (m/s)	Altura erodida (mm)	Tempo de erosão (mm:ss)	Erodibilidade (mm/h)
2,5	1	00:15:23	3,9
2,5	1	00:05:49	10,3
2,5	2	00:05:22	22,4
2,5	1	00:05:57	10,1
		00:00:00	
		Média (mm/h)	11,7
		Desvio Padrão (mm/h)	7,7
		Alfa	0,05
		N	4
		Estatística t	3,18
		IC Média máx	24,0
		IC Média mín	- 0,6
		Cv	0,66
		Removendo outlier (indicado em amarelo)	
		Média (mm/h)	14,3
		Desvio Padrão (mm/h)	7,0
		Alfa	0,05
		N	3
		Estatística t	4,30
		IC Média máx	31,7
		IC Média mín	- 3,2
		Cv	0,49
		Decisão: manter 4 pontos	

2% de cal; 24 h; w=17,60%; Moldado em 01/02/23; Ensaiado em 02/02/23			
V (m/s)	Altura erodida (mm)	Tempo de erosão (mm:ss)	Erodibilidade (mm/h)
2,5	1	00:06:07	9,8
2,5	3	00:05:06	35,3
2,5	4	00:05:07	46,9
2,5	3	00:05:07	35,2
		Média (mm/h)	31,8
		Desvio Padrão (mm/h)	15,7
		Alfa	0,05
		N	4
		Estatística t	3,18
		IC Média máx	56,7
		IC Média mín	6,9
		Cv	0,49
		Removendo outlier (indicado em amarelo)	
		Média (mm/h)	39,1
		Desvio Padrão (mm/h)	6,7
		Alfa	0,05
		N	3
		Estatística t	4,30
		IC Média máx	55,9
		IC Média mín	22,4
		Cv	0,17
		Decisão: Manter 4 pontos	

APÊNCICE J – Resultados do ensaio EFA de amostras com 2% de cal, 7 dias de cura, w=18,47%

Ensaio EFA (Erosion Function Apparatus)													
Identificação		Adição de 2% de cal - 7 dias											
Moldado em		26/01/2023		Ensaiado em		02/02/2023							
Número do cilindro		1				2		3			4		
Área do cilindro (cm²)		12,56				12,56		12,56			12,56		
Massa do solo úmido (g)		100				100		100			100		
Umidade	Cápsula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Massa do solo úmido + tara (g)	37,83	39,73	40,01	37,83	39,73	40,01	37,83	39,73	40,01	37,83	39,73	40,01
	Massa do solo seco + tara (g)	36,15	37,81	37,89	36,15	37,81	37,89	36,15	37,81	37,89	36,15	37,81	37,89
	tara (g)	26,99	27,4	26,51	26,99	27,4	26,51	26,99	27,4	26,51	26,99	27,4	26,51
	Massa do solo seco (g)	9,16	10,41	11,38	9,16	10,41	11,38	9,16	10,41	11,38	9,16	10,41	11,38
	Massa de água (g)	1,68	1,92	2,12	1,68	1,92	2,12	1,68	1,92	2,12	1,68	1,92	2,12
	Teor de umidade (%)	18,34	18,44	18,63	18,34	18,44	18,63	18,34	18,44	18,63	18,34	18,44	18,63
	Teor de umidade médio (%)	18,47				18,47		18,47			18,47		
Compactação dos corpos de prova		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada		Nº camadas	Nº golpes/camada	
		1	37		1	37		1	37		1	37	
		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)		Altura (mm)	MEAS (g/cm³)	
		46,5	1,445		47	1,430		48	1,400		47	1,430	
Ensaio EFA		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)		Vazão (L/s)	Velocidade (m/s)	
		19,4	2,5		19,4	2,5		19,4	2,5		19,4	2,5	
		Tempo de erosão (mm:ss)			Tempo de erosão			Tempo de erosão			Tempo de erosão		
		00:05:09			00:05:01			00:05:16			00:05:05		
		Altura erodida (mm)			Altura erodida (mm)			Altura erodida (mm)			Altura erodida (mm)		
		11			2,5			4			4,5		
MEAS = Massa específica Aparente Seca (g/cm³)													

2% de cal; 7 dias; w=18,47%; Moldado em 26/01/23; Ensaiado em 02/02/23			
V (m/s)	Altura erodida (mm)	Tempo de erosão (mm:ss)	Erodibilidade (mm/h)
2,5	11	00:05:09	128,2
2,5	2,5	00:05:01	29,9
2,5	4	00:05:16	45,6
2,5	4,5	00:05:05	53,1
		Média (mm/h)	64,2
		Desvio Padrão (mm/h)	43,7
		Alfa	0,05
		N	4
		Estatística t	3,18
		IC Média máx	133,8
		IC Média mín	5,4
		Cv	0,68
		Removendo outlier (indicado em amarelo)	
		Média (mm/h)	42,9
		Desvio Padrão (mm/h)	11,8
		Alfa	0,05
		N	3
		Estatística t	4,30
		IC Média máx	72,3
		IC Média mín	13,4
		Cv	0,28
		Decisão: excluir 1º ponto,	
		a amostra ficou submersa	
		no equipamento por mais	
		de 1h devido a quebra de	
		de uma tubulação	

2% de cal; 14 dias; w=18,13%; Moldado em 26/01/23; Ensaiado em 09/02/23			
V (m/s)	Altura erodida (mm)	Tempo de erosão (mm:ss)	Erodibilidade (mm/h)
2,5	1	00:05:04	11,8
2,5	1	00:05:10	11,6
2,5	1	00:05:00	12,0
2,5	2	00:05:02	23,8
		Média (mm/h)	14,8
		Desvio Padrão (mm/h)	6,0
		Alfa	0,05
		N	4
		Estatística t	3,18
		IC Média máx	24,4
		IC Média mín	5,3
		Cv	0,41
		Removendo outlier (indicado em amarelo)	
		Média (mm/h)	15,8
		Desvio Padrão (mm/h)	7,0
		Alfa	0,05
		N	3
		Estatística t	4,30
		IC Média máx	33,0849292
		IC Média mín	- 1,4
		Cv	0,44
		Decisão: manter 4 pontos	