

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Jéssica Anversa Venturini

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE RAÍZES NA
ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARENOSO**

Santa Maria, RS
2019

Jéssica Anversa Venturini

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE RAÍZES NA ERODIBILIDADE DE UM
SOLO ARENOSO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Andréa Valli Nummer

Santa Maria, RS
2019

Venturini, Jéssica Anversa
Avaliação do efeito da adição de raízes na erodibilidade
de um solo arenoso / Jéssica Anversa Venturini.- 2019.
158 p.; 30 cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro
Coorientadora: Andrea Valli Nummer
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2019

1. Erodibilidade 2. Erosão 3. Caracterização
Geotécnica 4. Ensaios geotécnicos 5. Raízes I. Pinheiro,
Rinaldo José Barbosa II. Nummer, Andrea Valli III. Título.

Jéssica Anversa Venturini

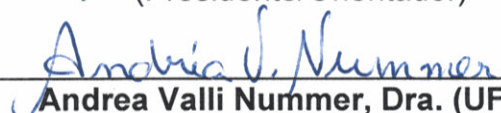
AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE RAÍZES NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARENOSO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

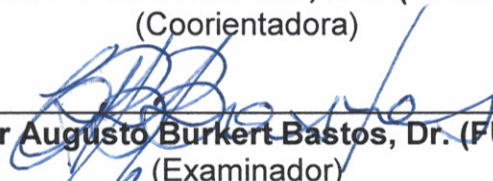
Aprovado em 08 de março de 2019:




Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Andrea Valli Nummer, Dra. (UFSM)
(Coorientadora)



Cezar Augusto Burkert Bastos, Dr. (FURG)
(Examinador)



Charles Rodrigo Belmonte Maffra, Dr.
(Examinador)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos e reconhecimento:

Ao meu orientador Rinaldo Pinheiro, que desde a graduação me acompanha na área da pesquisa, depositando confiança no meu trabalho, compartilhando ensinamentos, sanando as várias dúvidas que surgiram durante este caminho e oferecendo conselhos nos momentos de incerteza. Serei sempre grata pelo professor e pessoa que és e por todo apoio que me deste durante este período.

À minha coorientadora Andrea Nummer, que benção ter em minha vida acadêmica uma pessoa com tanta garra, fibra e ao mesmo tempo tanta doçura ao dividir seus conhecimentos. Essa caminhada ficou mais leve com sua ajuda e com seus conselhos.

Ao professor Cezar e ao Charles que se disponibilizaram fazer parte da banca de avaliação da dissertação, pelo tempo cedido durante a correção e presença física, contribuindo para o aperfeiçoamento da mesma.

Aos membros do grupo GEOMA: Ana Helena Back, Elisa Porto, Juliana Scapin, Luciéle Knierim, Thaís Aquino, Juliane Pinto, Gabriela Salamoni, Ildomar Tavares, Letícia Soldera, Leila Fernandes e Danieli Klein, por todos os momentos e auxílio compartilhados. Também a Tiane Jaskulski que fez parte do grupo e junto comigo realizou uma série de ensaios pertinentes para esta pesquisa.

Aos amigos que fiz no grupo GEPPASV: Silvio Schuster, Évelyn Possebon, Valdir Barboza, Chaveli Brondani e Fernando Zucchi, pelas conversas e ombro amigo.

Ao professor Fabrício Sutili, juntamente com seu grupo de pesquisa, pela disponibilidade do laboratório de Engenharia Florestal para crescimento das gramíneas. Aos laboratoristas da Geografia, Rômulo e Ronaldo que dividiram horas de companhia e ajuda nos ensaios. Aos laboratoristas do LMCC, João e Alisson, pela assistência dentro do laboratório sempre que solicitada.

À Universidade Federal de Santa Maria, pelo suporte de materiais, viagens, estrutura física e disponibilização de equipamentos, à todos docentes e servidores, em especial a Luciane. Também a CAPES pela concessão da bolsa de estudo durante um período do Mestrado.

Aos meus pais Loacir e Marlova e meu irmão Natan, pelos princípios ensinados ao longo da minha vida, por todo amor, compreensão e amparo financeiro. Sempre apoiando e incentivando seguir meus sonhos. Vocês são o suporte para enfrentar qualquer obstáculo que a vida venha a oferecer. Não há palavras pra agradecer por tudo e por tanto.

Ao meu namorado Tiago Zambonato, por todo amor, companheirismo, paciência e aceitação quando os dias não eram bons. Sempre com uma palavra de conforto e estímulo para concluir esta caminhada. Obrigada por dividir tantos momentos felizes e principalmente os difíceis. A vida ficou mais feliz quando você chegou.

E a todos que cruzaram meu caminho e de uma maneira ou outra contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE RAÍZES NA ERODIBILIDADE DE UM SOLO ARENOSO

AUTORA: Jéssica Anversa Venturini
ORIENTADOR: Rinaldo José Barbosa Pinheiro
COORIENTADORA: Andrea Valli Nummer

A prática de introduzir o uso de vegetação em obras de engenharia, há séculos, é utilizada para proteger e reforçar o solo e reduzir os processos erosivos. No entanto, grande parte dos estudos dedica-se a investigar a eficiência da vegetação acima do solo, poucos avaliam o impacto que as raízes apresentam no controle das taxas de erosão. A presença das fibras naturais (raízes) tende a aumentar a rugosidade superficial e a permeabilidade do solo, havendo aumento da infiltração da água, diminuição do escoamento superficial e do seu potencial erosivo. A combinação deste componente às obras civis denomina-se Engenharia Natural. Nesse sentido, a presente pesquisa tem como objetivo principal avaliar o efeito da presença de raízes na erodibilidade de um solo arenoso de origem aluvionar, localizado no distrito de Vale Vêneto, município de São João do Polêsine no estado do Rio Grande do Sul. Para atingir os objetivos propostos foram realizados ensaios de avaliação direta (Inderbitzen) e indireta da erodibilidade (cone de laboratório, desagregação, infiltrabilidade e perda de massa por imersão), com amostras indeformadas, remoldadas sem raízes e remoldadas com raízes em três taxas distintas (0,5%; 1,0% e 1,5%), oriundas da gramínea esmeralda (*Zoysia japonica* Steud). Foram também realizados ensaios de caracterização química, física e mineralógica do material em estudo. Os resultados obtidos por meio dos ensaios de cone de laboratório demonstraram que à medida que houve aumento do número de raízes nos corpos de prova, os valores de penetração nas amostras saturadas subiram. Já na condição de umidade natural, os corpos de prova se tornaram mais resistentes, diminuindo os valores de penetração. O ensaio de desagregação demonstrou grande susceptibilidade à erosão para as amostras remoldadas independente da taxa de raízes. Nos ensaios que compreendem a metodologia MCT, houve diminuição dos valores de perda de massa enquanto crescia a taxa de raízes. Para os valores de coeficiente de sorção a quantidade de raízes não foi fator de influência nas condições de umidade natural e pré-umedecida. A avaliação direta, feita através dos ensaios de Inderbitzen, confirmou que geralmente a perda de solo é tanto maior quanto maior for a inclinação da rampa e a vazão de ensaio. Ao comparar as amostras remoldadas sem raízes com as amostras remoldadas com 1,5% de raízes na condição de umidade natural, a taxa de erodibilidade apresentou um decréscimo de 38,99%. Na condição de umidade seca ao ar esse número chegou a 79,84%, sendo ainda mais expressivo na condição de umidade pré-úmida onde a taxa de erodibilidade atingiu uma queda de 90,44%.

Palavras-Chave: Erodibilidade. Ensaio Direto. Ensaio Indireto. Raízes.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFECT OF ROOTS ADDITION ON THE ERODIBILITY OF A SANDY SOIL

AUTHOR: Jéssica Anversa Venturini
ADVISOR: Rinaldo José Barbosa Pinheiro
CO-ADVISOR: Andrea Valli Nummer

The practice of introducing the use of vegetation in engineering works, for centuries, is used to strengthen the soil, protect and reduce erosion processes. However, a large part of the studies is devoted to investigating the efficiency of above-ground vegetation, few evaluate the impact of roots on erosion rates control. The presence of natural fibers (roots) tends to increase the surface roughness and soil permeability, increasing water infiltration and decreasing surface outflow and erosive potential. The combination of this component with engineering works is called Soil Bioengineering. In this sense, the present research has as main objective to evaluate the effect of the presence of roots in the erodibility of a sandy soil of alluvial origin, located in the district of Vale Vêneto, city of São João do Polêsine in the state of Rio Grande do Sul. In order to reach the proposed objectives, direct (Inderbitzen) and indirect erodible evaluation tests (laboratory cone, disintegration, infiltrability and loss of mass by immersion) were carried out with undisturbed, remolded without roots and remolded with roots at three different rates (0,5%, 1,0% and 1,5%) samples. The roots were originated from the emerald grass (*Zoysia japonica* Steud). Tests of chemical, physical and mineralogical characterization of the material under study were also carried out. The results obtained through laboratory cone tests showed that as the number of roots in the test specimens increased, the penetration values in the saturated samples increased. In the condition of natural moisture, the specimens became more resistant, reducing the values of penetration. The disintegration test showed a high susceptibility to erosion for remolded samples regardless of root rate. In the tests that comprised the MCT methodology, there was a decrease in mass loss values while the root rate increased. For the values of sorption coefficient the amount of roots was not an influence factor in the conditions of natural and pre-moistened humidity. The direct evaluation, performed through the Inderbitzen tests, confirmed that soil loss is generally proportional to ramp inclination and test flow rate. When comparing the remolded samples without roots with the samples remolded with 1,5% of roots in the condition of natural humidity, the erodibility rate presented a decrease of 38,99%. In the condition of dry air humidity this number reached 79,84%, being even more expressive in the condition of pre-moistened humidity where the erodibility rate reached a fall of 90,44%.

Keywords: Erodibility. Direct Tests. Indirect Tests. Roots.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação entre perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas.....	31
Figura 2.2 – Evolução da erosão do solo, com e sem cobertura vegetal e com cobertura vegetal seca, mas presença de raízes (90 minutos de precipitação em cada ensaio).....	32
Figura 2.3 – Equipamento proposto para o ensaio de cone de laboratório	34
Figura 2.4 – Esquema das condições de submersão para o método de imersão parcial da amostra.....	36
Figura 2.5 – Critério de erodibilidade pela metodologia MCT	39
Figura 2.6 – Ensaio de infiltrabilidade	41
Figura 2.7 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT.....	42
Figura 2.8 – Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS	44
Figura 3.1 - Metodologia da pesquisa	48
Figura 3.2 – Localização da área de coleta das amostras	49
Figura 3.3 - Procedimento de coleta das amostras: (a) terreno original; (b) limpeza superficial e realização da bancada de trabalho; (c) amostra indeformada – anel de PVC marrom; (d) amostras indeformadas – anel de PVC branco; (e) acondicionamento das amostras indeformadas e (f) amostra deformada seca ao ar	51
Figura 3.4 – Etapas do ensaio: (a) equipamento de compactação mini-MCV e (b) amostra em posição horizontal durante o ensaio de perda de massa por imersão...54	54
Figura 3.5 - Ábaco de classificação MCT	55
Figura 3.6 – Etapas do ensaio: (a) pastilhas moldadas em anéis de inox, submetidas à secagem e (b) determinação da resistência à penetração com uso do penetrômetro.....	56
Figura 3.7 - Carta de Classificação Expedita MCT do Método das Pastilhas	56
Figura 3.8 - Fluxograma das etapas da caracterização do solo	57
Figura 3.9 – (a) moldagem das amostras em pequenas caixas; (b) solução distribuída sobre a amostra; (c) lâminas delgadas prontas	59
Figura 3.10 – Etapas do ensaio (a) penetrômetro de cone e (b) amostra após as penetrações.....	60
Figura 3.11 - Condições aplicadas no ensaio de cone de laboratório	61
Figura 3.12 – Esquemas de submersão: (a) nível d'água na base da amostra, (b) nível d'água a 1/3 da amostra, (c) nível d'água a 2/3 da amostra e (d) amostra totalmente submersa.....	62
Figura 3.13 - Condições aplicadas no ensaio de desagregação	63
Figura 3.14 – Esquema do ensaio de infiltrabilidade.....	65
Figura 3.15 – Curva típica e elementos para estimativa do coeficiente de sorção (s), no ensaio de infiltrabilidade da Metodologia MCT.....	66
Figura 3.16 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado.....	67
Figura 3.17 – Condições aplicadas no ensaio de infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificado	68

Figura 3.18 – Etapas do ensaio: (a) ensaio em andamento com inclinação de 45° e vazão de 3l/min; (b) conjunto de peneiras utilizado no peneiramento do material erodido; (c) amostra ao término do ensaio; (d) solo seco erodido, retido no conjunto de peneiras.....	70
Figura 3.19 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra <i>versus</i> tempo para o ensaio de Inderbitzen	71
Figura 3.20 – Ajuste da reta de onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τ_h crit.....	72
Figura 3.21 - Condições previstas para o ensaio de Inderbitzen	72
Figura 3.22 – (a) gramínea esmeralda; (b) taxa de 0,5% de raízes, correspondente a 200 raízes por corpo de prova; (c) equipamento que auxiliou na compactação das amostras; (d) taxa de 1,0% de raízes, correspondente a 400 raízes por corpo de prova e (e) taxa de 1,5% de raízes, correspondente a 600 raízes por corpo de prova	75
Figura 4.1 - Curvas granulométricas médias com e sem defloculante	81
Figura 4.2 – Curva de Compactação	83
Figura 4.3 - Ábaco da Classificação MCT.....	84
Figura 4.4 - Ábaco do Método Expedito das Pastilhas	85
Figura 4.5 - Lâmina petrográfica indeformada: (a) luz polarizada, aumento 5x e (b) luz polarizada, aumento 10x.....	88
Figura 4.6 - Lâmina petrográfica remoldada: (a) luz polarizada, aumento 5x e (b) luz polarizada, aumento 10x.....	88
Figura 4.7 - Valores de penetração do cone de laboratório obtidos para as amostras estudadas nas condições de umidade natural e pré-umedecida. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro	90
Figura 4.8 - Resultados dos DP (%) obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nas amostras estudadas	92
Figura 4.9 - Resultados dos DPA (%) obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nas amostras estudadas	92
Figura 4.10 - Comportamento inicial e final das amostras quando submetidas à inundação	95
Figura 4.11 - (a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras indeformadas.....	101
Figura 4.12 - (a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas sem raízes.....	101
Figura 4.13 - (a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas com 0,5% de raízes (50 raízes)	101
Figura 4.14 - (a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas com 1,0% de raízes (100 raízes)	102
Figura 4.15 - (a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas com 1,5% de raízes (150 raízes)	102

Figura 4.16 - Aplicação do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para as amostras estudadas.....	103
Figura 4.17 – Variação da perda de massa por imersão para as três condições de umidade das amostras. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro	104
Figura 4.18 - Variação do coeficiente de sorção para as três condições de umidade das amostras. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.....	105
Figura 4.19 - Relação π/s em função da umidade das amostras.....	106
Figura 4.20 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras indeformadas	108
Figura 4.21 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas sem raízes.....	109
Figura 4.22 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas com 0,5% de raízes	110
Figura 4.23 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas com 1,0% de raízes	111
Figura 4.24 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas com 1,5% de raízes	112
Figura 4.25 – Formação de “teia” de proteção pelas raízes: (a) ensaio com R400 em condição natural, 26° e 3 l/min e (b) ensaio com R600 em condição seca ao ar, 45° e 3 l/min.....	114
Figura 4.26 - Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras, (a) Indeformadas, (b) Remoldadas sem Raízes, (c) Remoldadas com 0,5% de raízes, (d) Remoldadas com 1,0% de raízes e (e) Remoldadas com 1,5% de raízes, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida	115
Figura 4.27 - Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação da erosão pelos fatores ativos.....	22
Tabela 2.2 – Classificação relativa da erodibilidade.....	28
Tabela 3.1 – Número mínimo de amostras indeformadas coletadas no perfil.....	52
Tabela 3.2 – Valores de velocidade de escoamento (v), altura da lâmina d'água (h) e tensão cisalhante hidráulica (τh) para combinações de vazão (Q) e inclinação de rampa (i).....	72
Tabela 4.1 - Resultado dos ensaios de peso específico real dos grãos e limites de Atterberg.....	79
Tabela 4.2 - Resumo dos ensaios de granulometria e classificação do solo	80
Tabela 4.3 - Propriedades índices do solo	82
Tabela 4.4 - Resultados Compactação Mini - Proctor	82
Tabela 4.5 - Índices para a Classificação MCT	83
Tabela 4.6 - Valores obtidos por meio da curva de perda de massa por imersão (Mini-MCV = $10.\log B$)	84
Tabela 4.7 - Resultado dos parâmetros obtidos nos ensaios do Método Expedito das Pastilhas.....	85
Tabela 4.8 - Resumo dos resultados da análise química.....	86
Tabela 4.9 - Valores de penetração e parâmetros de variação de penetração obtidos nos ensaios de cone de laboratório para as amostras estudadas.....	90
Tabela 4.10 - Resultado dos ensaios de desagregação	93
Tabela 4.11 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (π) para diferentes condições de umidade das amostras indeformadas - critério de erodibilidade da metodologia MCT.....	98
Tabela 4.12 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (π) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas sem raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT	98
Tabela 4.13 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (π) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas com 0,5% de raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT	98
Tabela 4.14 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (π) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas com 1,0% de raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT	98
Tabela 4.15 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (π) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas com 1,5% de raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT	99
Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10^{-3} g/cm ² /min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros τ_{hcrit} (Pa) e K (10^{-2} g/cm ² /min/Pa)	113

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral.....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	UTILIZAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS NA ENGENHARIA NATURAL.....	17
2.2	EROSÃO: SUAS FASES E AGENTES EROSIVOS.....	19
2.3	ERODIBILIDADE DOS SOLOS.....	26
2.3.1	Influência das raízes das plantas na erodibilidade do solo	29
2.4	MÉTODOS PARA ANÁLISE DO POTENCIAL ERODÍVEL DO SOLO.....	32
2.4.1	Ensaio de cone de laboratório.....	33
2.4.2	Ensaio de desagregação.....	35
2.4.3	Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT	38
2.4.4	Ensaio de Inderbitzen.....	42
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1	ETAPA DE GABINETE	48
3.2	ETAPA DE CAMPO.....	49
3.3	ETAPA DE LABORATÓRIO	52
3.3.1	Ensaio de caracterização física e química	52
3.3.2	Caracterização geotécnica baseada na Metodologia MCT	53
3.3.3	Caracterização geotécnica baseada no método expedito das pastilhas	55
3.3.4	Seções delgadas de solo	57
3.3.5	Ensaio para avaliação indireta da erodibilidade	59
3.3.6	Ensaio para avaliação direta da erodibilidade - ensaio de Inderbitzen	69
3.3.7	Reconstrução das amostras.....	73
3.3.8	Análise estatística	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA.....	79
4.2	CLASSIFICAÇÃO MCT E MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS	82
4.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	86
4.4	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA – AMOSTRA INDEFORMADA X AMOSTRA REMOLDADA	87

4.5	AVALIAÇÃO INDIRETA DA ERODIBILIDADE.....	89
4.5.1	Critérios de erodibilidade baseados no ensaio de cone de laboratório	89
4.5.2	Avaliação do potencial de desagregação do solo	93
4.5.3	Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT	97
4.6	AVALIAÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE – ENSAIO DE INDERBITZEN	106
5	CONCLUSÃO	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
	ANEXO A – ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO.....	137
	ANEXO B – TABELA RESUMO DO ENSAIO DE CONE DE LABORATÓRIO PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	139
	ANEXO C – ANÁLISE ESTATÍSTICA I	141
	ANEXO D – TABELA RESUMO DO ENSAIO DE INFILTRABILIDADE PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	145
	ANEXO E – ANÁLISE ESTATÍSTICA II.....	147
	ANEXO F – TABELA RESUMO DO ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO MODIFICADO PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA	153
	ANEXO G – ANÁLISE ESTATÍSTICA III	155

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo por meio de processos erosivos afeta regiões rurais e urbanas, sendo manifestada em áreas de vegetação natural, gerando um preocupante problema ambiental. A apropriação e uso do solo, quando realizadas de maneira desordenada, reproduz uma série de consequências desagradáveis, nas quais podemos destacar o assoreamento de cursos d'água e de reservatórios, poluição de corpos d'água, redução do volume de água disponível para abastecimento urbano, erosão de taludes e encostas e ocorrência de desastres urbanos, tais como os movimentos de massa em geral.

Uma das formas mais agressivas de degradação dos solos está relacionada à erosão, sendo esta responsável por consideráveis danos econômicos. De acordo com Araújo et al. (2005), é difícil determinar as perdas econômicas totais, em escala mundial, provocadas pelos agentes erosivos mesmo estas sendo de alta significância. No Brasil, estes danos tendem a ser ainda maiores já que, estamos localizados em área de clima tropical onde os altos índices de precipitação e elevadas taxas de intemperismo químico tendem a acelerar os processos erosivos.

Dentre os agentes erosivos que causam o fenômeno da erosão, o de origem hídrica, destaca-se por apresentar maior complexidade, uma vez que engloba um grande número de variáveis e mecanismos, que envolvem fatores climáticos (chuva e temperatura), topográficos (declividade e comprimento de rampa), relativos à cobertura vegetal e ao próprio solo, condição esta que é analisada sob o conceito específico de erodibilidade. Com base neste conceito, a erodibilidade dos solos tem sido estudada sob diversas abordagens, quase sempre centrada em campanhas de ensaios de rotina em laboratório.

De acordo com Barbosa (2008), há duas principais formas de minimizar os efeitos que resultam do processo de erosão: deve-se minimizar o impacto das gotas da chuva na superfície do solo, e diminuir as velocidades e os caudais do escoamento superficial. Como alternativas para diminuir ou remediar essas ações, técnicas vegetativas e práticas de conservação do solo podem ser empregadas. Em perspectiva surge a Engenharia Natural de solos, com um conjunto de ações que se baseiam na utilização de materiais vivos com as usuais práticas da engenharia.

Plantas podem desempenhar papéis cruciais na preservação do solo, especialmente suas raízes, tornando-se dominantes quando a biomassa acima do mesmo desaparece. Nesta área, vários estudos são realizados para avaliar a influência das fibras naturais como reforço para os solos. No entanto, estudos no sentido de se levantar informações a respeito do comportamento mecânico do solo, principalmente da avaliação da erodibilidade quando submetidos a essas técnicas ainda são incipientes no Brasil, fazendo-se necessário a realização de pesquisas relacionadas a essa temática.

Nesse sentido, o presente trabalho busca contribuir com informações que melhorem o entendimento do comportamento do solo frente à suscetibilidade a erosão quando técnicas de Engenharia Natural (emprego de fibras naturais – raízes) são empregadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência das raízes da gramínea esmeralda (*Zoysia japonica* Steud) na erodibilidade de um solo arenoso de origem aluvionar, através de métodos diretos e indiretos de avaliação da erodibilidade de solos e rochas.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Obter as características físicas, químicas e mineralógicas do solo;
- b) Avaliar o efeito da estrutura na erodibilidade do solo (análise de lâminas delgadas de solo com amostras indeformadas e remoldadas em laboratório),
- c) Análise da influência da estrutura (comparação entre amostras indeformadas e reconstruídas em laboratório);
- d) Avaliar o efeito de três diferentes taxas de raízes na erodibilidade do solo;

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta o tema, bem como os objetivos e a organização da dissertação. No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura abrangendo os principais temas em estudo: conceito, fases e agentes erosivos que acarretam a erosão; erodibilidade dos solos e a influência que as raízes têm sobre essa propriedade, além dos métodos que avaliam o potencial erodível do solo.

No capítulo 3 é descrita a metodologia aplicada nesta pesquisa, envolvendo a etapa de gabinete, de campo e de laboratório mostrando todas as fases desenvolvidas. Já no capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos referentes à influência das raízes na erodibilidade do solo. O Capítulo 5 é composto pelas conclusões do estudo realizado, que evidenciam os principais aspectos dos resultados obtidos e são apresentadas algumas sugestões para a continuidade da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa expõe os temas relacionados à erosão e o uso da engenharia natural como um dos meios para contenção deste fenômeno. A revisão está composta pelos seguintes subcapítulos: (a) utilização de fibras vegetais na Engenharia Natural; (b) erosão: suas fases e agentes erosivos; (c) erodibilidade dos solos; (d) influência das raízes das plantas na erodibilidade do solo e (e) ensaios para análise do potencial erodível do solo.

2.1 UTILIZAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS NA ENGENHARIA NATURAL

A noção de Engenharia Natural (ou Engenharia Biológica) como disciplina técnica existe desde o final da década de 30, quando Arthur Von Kruedner propôs o termo "*Ingenieurbiologie*" para nomear o conjunto de técnicas e métodos de engenharia, baseados não apenas na consideração dos aspectos técnicos, mas também na observância das regras biológicas e na utilização de funções e materiais vivos (FERNANDES e FREITAS, 2011).

Para Gray e Sotir (1996), a Engenharia Natural consta de um conjunto de técnicas sustentáveis que utilizam elementos biologicamente ativos juntamente com elementos inertes como concreto, madeira, polímeros e mantas confeccionadas com fibras vegetais no controle da erosão.

Em uma era de crescimento da consciência ambiental, utilizar fibras naturais (vegetais) é preferível às fibras sintéticas, pois são favoráveis ao meio ambiente e ecologicamente compatíveis já que são degradadas com o solo, enquanto as outras são poliméricas, não biodegradáveis e causam poluição ao solo (LEKHA, 2013).

Para Agopyan (1991), antes de estudar o comportamento das fibras vegetais como reforço em uma matriz, seja ela frágil ou dúctil, se faz necessário o estudo e a análise das propriedades destas fibras. O autor cita como vantagens da utilização de fibras vegetais (obtidas partir de sementes, caules, folhas, frutos e raízes) e minerais (a partir de rochas com estrutura fibrosa) no reforço do solo: a conservação de energia, abundância, baixo custo, não prejudiciais à saúde, previnem a erosão e apresentam baixa densidade. Porém, entre as desvantagens estão a baixa durabilidade quando usadas como reforço em matriz cimentícia, variabilidade de propriedades e fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes.

De acordo com Horrocks e Anand (2000) as fibras vegetais são naturalmente interconectadas por aglutinantes, formando uma infraestrutura de sustentação. São flexíveis, possuem grande resistência à abrasão, podem resistir ao ambiente marinho, ao calor e à luz melhor que a maioria das fibras sintéticas.

A introdução das fibras no solo tende a melhorar e alterar as propriedades mecânicas do conjunto. Essa melhora depende das características da fibra (resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimento, teor e rugosidade) e do solo (grau de cimentação, tamanho, forma e granulometria das partículas, da tensão de confinamento e do modo de carregamento) (TRINDADE, 2016).

No estudo experimental desenvolvido por Bolaños e Casagrande (2014), um solo argiloso foi reforçado com fibras de coco verde em amostras compactadas na densidade máxima e umidade ótima, com teores de fibra nas proporções de 0,5%, 0,75%, 1%, 1,25% e 1,5%, em relação ao peso seco do solo, e com comprimento de 2,0 centímetros. Os resultados indicaram que dentre todos os teores testados, o teor mais alto (1,5%) foi o que apresentou os melhores resultados de resistência ao cisalhamento, com aumento de 4° no ângulo de atrito e aumento de 188% na coesão, em relação a amostra de solo puro, ainda, a inclusão das fibras aumentou discretamente a umidade ótima das misturas.

Trindade (2016) utilizou em sua pesquisa fibras naturais de sisal como material alternativo para utilização no meio geotécnico. As fibras continham comprimentos de 25 e 50 milímetros no teor de 0.5%, em relação à massa de solo seco e foram misturadas em um solo arenoso. Os ensaios de compressão triaxial convencional mostraram que a adição de fibras provocou um aumento na coesão e no ângulo de atrito do material. Já Roiseman e Goldenstein (2017) avaliaram a influência das fibras naturais de curauá no reforço de um solo arenoso, adotando as mesmas dimensões e porcentagem de raízes chegando as mesmas conclusões citadas pro Trindade.

Lino et al. (2015) fizeram uso de geotêxtis fabricados com fibras naturais de junco, taboa e ouricuri no controle de erosão em taludes da margem direita do Rio São Francisco, no nordeste do Estado de Sergipe, município de Amparo de São Francisco. A análise final mostrou que todos os tratamentos com o uso dos geotêxteis apresentaram menores perdas de sedimentos em relação ao solo desprotegido. Tais resultados demonstram que as fibras contribuíram na proteção, contenção e retenção de sedimentos e no controle a erosão.

Existem diversos estudos sobre a adição de fibras naturais como reforço de solos, contudo é possível observar que há uma escassez de estudos que relacionam a adição dessas fibras com a erodibilidade dos solos e outros parâmetros associados à estabilidade. Essa escassez motivou o desenvolvimento da pesquisa realizada por Guimarães et al. (2018), dois tipos de solos residuais maduros, coletados no município de Delfim Moreira – MG foram misturados as fibras de cana de açúcar (comprimento entre 8 e 12 mm) em teores de 0 e 1,5%. Os ensaios para avaliação do potencial erodível foram realizados por meio do equipamento de Inderbitzen adaptado, com rampa de 10,50 de largura e 95 cm de comprimento, inclinações de 15 e 30°, em anéis de PVC com diâmetro interno de 100 mm e altura de 60,7 mm. A análise dos resultados mostrou que, na maioria dos casos, houve uma maior quantidade de material carreado pelo escoamento.

De acordo com os mesmos autores, o aumento do material erodido pode estar associado ao fato de as fibras terem sido adicionadas às amostras minutos antes da realização de cada ensaio, não havendo tempo suficiente para a interação entre as fibras e as partículas de solo. Ao serem mantidas em contato por um período maior de tempo, as fibras e as partículas de solo, tenderiam a passar por alterações químicas e biológicas interagindo de melhor forma, aumentando assim a resistência do solo aos esforços externos.

2.2 EROSÃO: SUAS FASES E AGENTES EROSIVOS

Conceito e classificação

Erosão, termo que provém do latim “erodere” cujo significado é corroer, tem variadas definições encontradas na literatura. De acordo com Bastos (1999), podemos considerar erosão como um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, tais como as geleiras, os rios, os mares, o vento ou a chuva. Para Bertoni e Lombardi Neto (2010), a erosão é definida como sendo o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causado pela ação da água e do vento.

De acordo com Lopes (1980), a erosão integra o processo de desagregação, transporte e posterior depósito de materiais de solo ou rocha por ação de fatores

condicionantes. Para Fendrich et al. (1997), a erosão é a desagregação, transporte, e deposição dos materiais dos horizontes superficiais e profundos do solo, provocando o seu rebaixamento, iniciando seu trabalho superficialmente e aprofundando-se para camadas mais consolidadas de solo.

No Manual de Geotecnia do Departamento de Estradas e Rodagem (DER) de São Paulo, publicado em 1991, o conceito de erosão é expresso como um processo que ocasiona a destruição da estrutura do solo e sua remoção, sobretudo pela ação das águas de escoamento superficial, depositando-o em áreas mais baixas do relevo. Ainda de acordo com este manual, os processos de erosão apresentam normalmente uma peculiaridade, que é a velocidade lenta, porém contínua e progressiva ao longo do tempo. Sendo assim, a erosão dos solos é um processo físico, químico e biológico natural, mas se esta ocorrer de forma acentuada pode ser prejudicial ao meio ambiente.

Segundo Basso (2013), foi na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente realizada em Estocolmo no ano de 1972, o primeiro momento em que o tema erosão, suas causas e consequências, foram abordados pela comunidade internacional. A partir daí a erosão, e por consequência a erodibilidade, vem sendo estudada em diversas áreas do conhecimento, como Agronomia, Geologia, Geografia e Engenharia Civil (Hidráulica e Geotécnica) por autores como Lacerda e Silva (2001), Guerra (2002), Suertegaray (2003), Guerra e Mendonça (2004), Paiva e Beling (2006), entre outros.

No Brasil, com foco na Engenharia Geotécnica, destacam-se as pesquisas realizadas no centro oeste do país por Fragassi (2001), Koetz (2003), Jacintho et al., (2006), Camapum de Carvalho et al., (2006b) e no Rio Grande do Sul por Maciel Filho (1997), Dias et al., (1998), Bastos (1999). Tatto (2007), Basso (2013) e Fernandes, L. (2015).

Guerra e Cunha (1998), afirmam que o ponto de partida de um processo erosivo é o ciclo hidrológico, pois, a ação das gotas de chuva, de forma direta ou por meio de gotejamento, causa a erosão por salpicamento (*splash*) e quando o solo não consegue mais absorver a água, o excesso começa a se mover, provocando erosão através do escoamento superficial (*runoff*).

Para Cruz (2003), a água é o agente erosivo que mais origina processos erosivos no Brasil, contando com clima tropical como elemento agravador. A chuva é

um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos, e atua a partir do impacto das gotas de chuva e o consequente arraste de partículas do solo.

Viana (2000), ao observar uma área de solo suscetível ao processo de erosão, pode constatar que tal situação depende de vários fatores, dentre os quais se destacam os fatores geológicos, morfológicos e hidrogeológicos. A área da vegetação, embora não seja considerada como uma característica intrínseca do substrato passível de alterações relativamente rápida, não deixa de desempenhar um papel importante no grau de susceptibilidade de uma área aos processos de erosão.

De acordo com Mendes (2006), o processo erosivo ocorre em três fases contínuas, que são o desprendimento das partículas dos agregados do solo, o transporte e a deposição das partículas carregadas nas seções inferiores das paisagens ou curso de água. A ação das gotas de chuva e a força cisalhante do escoamento superficial constituem a fase inicial e mais importante da erosão hídrica causando o destacamento e o transporte das partículas de solo. O transporte de partículas também pode ocorrer por fluxos subsuperficiais ou, ainda, por movimentos de massa mais complexos.

Os agentes erosivos podem classificar-se segundo os agentes exógenos responsáveis pela sua deflagração, como a erosão eólica; erosão glacial; erosão costeira, erosão antrópica e erosão hídrica (que se divide em erosão superficial e interna; Para Santos (1997), a erosão interna por sua vez se subdivide em erosão fluvial e pluvial.

Segundo Lima (2003), a erosão interna geralmente surge em consequência do aumento da taxa de infiltração e do gradiente hidráulico, originando a formação de canais do fluxo no interior do maciço de solo. Para Silva (2004), o aumento da infiltração muitas vezes está ligado ao processo erosivo promovido pelas águas pluviais em superfícies que tem início com a erosão laminar, pode prosseguir na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, causando problemas à cobertura pedológica, com deposição dos sedimentos em corpos de água, originando grandes prejuízos ao meio ambiente.

Agentes erosivos

Diversos são os fatores que causam os processos erosivos, tornando-o um sistema complexo, que envolve o conhecimento de diversas variáveis e que dependendo do seu grau de evolução pode ser de difícil entendimento.

Santos (1997) e Prado (2005) referem-se à classificação de Zachar (1982), para denominar os agentes erosivos combinados com a ação da gravidade e citar os principais tipos de erosão. A Tabela 2.1 mostra esta classificação.

Tabela 2.1 – Classificação da erosão pelos fatores ativos

Fator (agente erosivo)	Termo
1 - Água	Erosão hídrica
1.1 - Chuva	Erosão pluvial
1.2 - Rio	Erosão fluvial
1.3 – Lago, reservatório	Erosão lacustrina ou limica
1.4 - Mar	Erosão marinha
2 - Geleira	Erosão glacial
3 - Neve	Erosão nival
4 - Vento	Erosão eólica
5 – Terra, detritos	Erosão soligênica
6 - Organismos	Erosão organogênica
6.1 - Plantas	Erosão fitogênica
6.2 - Animais	Erosão zoogênica
6.3 - Homem	Erosão antropogênica

Fonte: Zachar (1982).

Para Galetti (1985), Bertoni e Lombardi Neto (1985), Guerra e Mendonça (2004) a erosão dos solos tem como origem fatores naturais (clima, relevo, geologia e vegetação) e antrópicos (políticos, econômicos, sociais, tecnológicos e institucionais). A soma destes fatores determina ou não o surgimento de feições erosivas. Desta maneira, essas variáveis são significativas para explicar a erosão, não de forma isolada, pois apesar de cada uma dessas propriedades agirem de uma forma diferente sobre o solo, é a inter-relação entre elas que resultará no complexo processo erosivo.

Salomão e Antunes (1998) apud Sant’Ana (2012) citam como fatores de maior importância no processo erosivo, a precipitação pluviométrica e a temperatura. Para Fendrich et al., (1991) locais de clima úmido, tropical quente e temperado, com

inverno seco e verão chuvoso, são mais propícios a desenvolverem os processos erosivos.

De acordo com Chuquipiondo (2007), a chuva é um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos já que o processo erosivo pode se intensificar em função da intensidade, duração e frequência da chuva. Viana (2000) expõe que a água da chuva, ao chocar com o solo despido de vegetação ou coberto com vegetação incipiente, causa desagregação das partículas do solo. A água da chuva que não consegue infiltrar no solo transporta os sedimentos desagregados se associando ao processo de escoamento superficial que, por sua vez, aumenta a intensidade do processo erosivo no solo. Sant'Ana (2012) cita que em longos períodos sem chuva, a vegetação sofre por falta de umidade, reduzindo a proteção natural do solo, acarretando em elevada perda de solo pelo impacto das gotas de chuva.

Segundo Guerra e Mendonça (2004) fatores como a intensidade, duração, frequência, particularidades das gotas de chuva e a energia cinética da chuva, influenciam diretamente na erosão. Ainda, segundo eles, chuvas de maior intensidade e com alta frequência possuem uma grande energia cinética armazenada durante a sua queda, ocasionando um maior escoamento superficial e conseqüentemente maior susceptibilidade a erosão. A duração é outro fator relevante, pois um intervalo menor entre as precipitações aumenta a umidade do solo, portanto ele perde sua capacidade de infiltração e armazenamento de água, que começa a escoar, e dependendo das características do solo haverá maior ou menor perda de solo.

A topografia é importante no que diz respeito à declividade e comprimento da encosta, sendo um fator determinante na velocidade dos processos erosivos. Isto porque relevos mais acidentados, com declividades mais acentuadas, favorecem a concentração e aumento de velocidade do escoamento superficial, aumentando sua capacidade erosiva. Para Nishiyama (1995), o comprimento de rampa é um dos mais importantes fatores na erosão do solo, pois com o aumento do comprimento da rampa, ocorre um aumento no volume de escoamento superficial, produzindo um aumento na intensidade de erosão, principalmente sob a forma de sulcos.

Galeti (1985) e Bellinazzi Jr (1992) também consideram o comprimento da rampa como um fator muito importante no estudo da erosão, uma vez que o volume e a velocidade da enxurrada aumentam à medida que aumenta o comprimento da

rampa, elevando o desagregamento e arraste de grande quantidade de partículas do solo. Vilar e Prandi (1993) citam ainda que “a erosão varia com a forma da encosta, sendo mais pronunciada em encostas convexas, do que em encostas côncavas”.

Para Gray e Leiser (1989), a influência ou importância do comprimento da rampa tende a aumentar à medida que a declividade se torne mais íngreme. Os mesmos autores exemplificam que “dobrando o comprimento de uma encosta de 30m para 60m o aumento da perda de solo será de apenas 29% se a declividade for de 6%, enquanto o mesmo aumento de comprimento, para uma declividade de 20%, resultará em um aumento de perda de solo de 49%”.

A cobertura vegetal também é um fator fundamental na prevenção dos processos erosivos, pois protege o solo do impacto da gota d’água, atuando como defesa natural de um terreno contra a erosão, uma vez que amortece o impacto das gotas de chuva, diminuindo seu potencial de destacamento e transporte das partículas de solo. Para Ayres (1960), a vegetação é uma proteção natural do solo agindo contra o impacto das gotas de chuva, com aumento da infiltração da água por conta das raízes. Viana (2000) indica que a vegetação, além da proteção, traz como benefício, a dissipação da energia das águas frente ao escoamento subsuperficial, aumentando as possibilidades de infiltração das águas pelos vazios do solo causados pelas raízes da vegetação, o que aumenta a capacidade de retenção de água.

Segundo Archibold et al. (2003) e Herzig et al. (2011) a cobertura vegetal atua de diversas maneiras na prevenção dos processos erosivos, tais como, na proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; na dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo, assim as gotas chegam com menor velocidade e força de impacto ao solo; decomposição das raízes das plantas que, formando canais no solo, aumentam a infiltração da água; melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica e húmus aumentando sua porosidade e a capacidade de retenção de água; e diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície.

Outro fator que condiciona a suscetibilidade do material ao processo erosivo é a litologia. As características litológicas do substrato rochoso controlam a erosão por estar diretamente relacionada ao tipo de solo e ao relevo. De acordo Lal (1990), o processo erosivo tende a ser maior em solos não coesivos, como é o caso daqueles compostos basicamente por siltes, areias finas ou argilas dispersivas. Segundo

Bacellar (2000), solos com tais características são frequentemente relacionados a áreas de rochas ígneas ou metamórficas de composição ácida, rochas sedimentares ou metassedimentares de granulação arenosa fina ou siltosa ou de presença de argilas dispersivas.

A natureza do solo determina a sua susceptibilidade à erosão, ou seja, a propriedade do solo denominada de erodibilidade. A erodibilidade do solo, de acordo com Silva et al. (2000) deve ser estudada considerando-se que representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas, ou seja, sua predisposição a erosão. Portanto, a erodibilidade pode ser definida como a maior ou menor facilidade com que as suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo.

A erodibilidade é uma propriedade complexa em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes e, portanto, pode ser entendida como um dos principais fatores condicionantes de processos erosivos. Desta forma, a execução de ensaios que avaliam a erodibilidade pode fornecer importantes subsídios para a caracterização dos mecanismos atuantes nos processos erosivos.

A estrutura do solo é a forma como se arranjam suas partículas. De acordo com Reinert e Reichert (2006), um solo bem estruturado apresenta: poros adequados para a entrada de ar e água no solo; porosidade adequada para que a água se movimente através dele, sendo disponibilizada para as culturas, assim como permita uma boa drenagem do solo; porosidade adequada para o crescimento das culturas após a germinação das sementes, permitindo que as raízes explorem um maior volume de solo em busca de ar, água e nutrientes e; resistência à erosão pela alta agregação.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1999), a quantidade de matéria orgânica é de grande importância no controle da erosão, pois ela está ligada à estabilidade dos agregados, porque ajuda a agregar as frações de silte, areia e argila. E ainda, a matéria orgânica tem a capacidade de reter de duas a três vezes o seu peso em água, aumentando a infiltração e diminuindo a erosão. Segundo Silva (2003), o conteúdo de matéria orgânica no solo é de grande importância no controle da erosão. Nos solos argilosos, modifica-lhes a estrutura, melhorando as condições de arejamento e de retenção de água. Nos solos arenosos, a aglutinação das

partículas, firmando a estrutura e diminuindo o tamanho dos poros, aumenta a capacidade de retenção de água.

Assim, como os fatores naturais contribuem na aceleração dos processos erosivos, o conjunto de fatores antrópicos também interfere nessa aceleração. De acordo com Couto (2015), as atividades antrópicas podem resultar em um aumento do processo erosivo, seja pelo aumento da erosividade da água ou pela exposição do solo, aumentando a sua vulnerabilidade e, conseqüentemente, sua erodibilidade. Estas atividades influenciam a ação erosiva por meio do desmatamento, queimadas, impermeabilização com a pavimentação de vias, ocupação do solo sem implantação de infraestrutura adequada e do lançamento de resíduos, causando danos à fauna, modificações na topografia, alterações hidrológicas e destruição de ecossistemas.

De acordo com Panachuki et al., (2006), Nunes e Cassol (2008) e outros, em áreas rurais, os solos são mais vulneráveis a erosão quando: é retirada a cobertura vegetal; a agricultura é praticada de forma incorreta; o solo sofre compactação pelo pisoteio do gado e excessivo movimento de máquinas e implementos agrícolas e abertura de estradas vicinais sem os devidos cuidados com a rede de drenagem. No entanto em áreas urbanas, a aceleração da erosão se dá pela intervenção humana, principalmente relacionada às práticas de impermeabilização do solo; canalizações com tubulação inadequada; obras de engenharia como: a exposição de taludes de corte em rodovias e barragens não protegidos; a exploração de áreas para a retirada de materiais de empréstimo; a execução de loteamentos sem os devidos cuidados com a drenagem e obras de retificação de rios e canais.

Muitos processos erosivos, portanto, têm origem em infraestruturas precárias ou inadequadas, escolha de áreas desfavoráveis à ocupação, como as áreas de altas declividades, alta susceptibilidade natural à erosão, fundos de vale ou terrenos comprometidos por processos erosivos anteriores. Dessa forma tem-se que a predisposição natural de algumas áreas para serem erodidas acaba sendo estimulada, dando início à dinâmica de processos lineares.

2.3 ERODIBILIDADE DOS SOLOS

A erodibilidade é um dos fatores de maior relevância no entendimento do fenômeno erosivo. Pode-se dizer que a erosão não é a mesma em todos os solos, pois suas propriedades físicas (estrutura, permeabilidade, textura, etc.), químicas e

biológicas variam conforme seus processos de formação. O termo erodibilidade pode ser definido como sendo a maior ou menor facilidade com que as partículas de um solo tendem a ser destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, tal como a água ou o vento (COUTO, 2015).

Segundo Bastos (1999) e Panachuki et al. (2006), a erodibilidade é uma propriedade regida pelos atributos intrínsecos dos solos, os quais podem variar de um solo para o outro, ou em um mesmo solo. Silva et al. (2000) destaca a importância de estudar a erosão hídrica levando em consideração a erodibilidade do solo, já que, representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas, ou seja, a predisposição a erosão.

Para 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, de um lado as forças atuantes dos agentes erosivos e do outro, as forças resistentes (coesão e atrito) do material.

Conforme Bertoni e Lombardi Neto (1990), a suscetibilidade à erosão de um solo pela ação da água é estabelecida através de características intrínsecas, que afetam a velocidade de infiltração da água no solo, permeabilidade e capacidade de absorção e de características de resistência à dispersão, salpicamento, abrasão e as forças de transporte da enxurrada.

Na literatura técnica, os estudos sobre erodibilidade vêm de diferentes áreas do conhecimento, como Agronomia, Geografia e menos frequente na Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica. No meio geotécnico, as pesquisas no estudo da erodibilidade e dos fatores que condicionam a resistência à erosão ainda são muito escassas, se comparadas com a importância dos problemas geotécnicos gerados (BASTOS et al., 2000).

As primeiras pesquisas voltadas ao tema erodibilidade, com repercussão mundial, foram desenvolvidas por agrônomos norte-americanos, Middleton (1930) e Boyoucos (1935), que procuraram determiná-la por meio de ensaios básicos de laboratório. A partir daí alguns autores dispuseram-se 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.

De acordo com Wang et al. (2013), a erodibilidade deveria levar em consideração os diferentes agentes erosivos atuantes, bem como as condições climáticas e de superfície às quais o solo 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. Como por exemplo, no início de uma precipitação, o solo possui pouca quantidade de água e a medida que o evento chuvoso evolui, a saturação favorece o escoamento superficial, com variações da permeabilidade “in situ”.

Para Bryan (2000), um complicador para a avaliação da erodibilidade é a grande variabilidade de processos e mecanismos para um mesmo agente erosivo. Uma das maneiras de analisar a erodibilidade dos solos é considerar a influência qualitativa das principais características (granulometria, estrutura, permeabilidade, infiltrabilidade e coesão) dos solos à ação erosiva. Para a obtenção de resultados com maior precisão, devem ser realizados ensaios que reproduzem no laboratório ou no campo o processo erosivo.

Bastos (1999), ao estudar solos tropicais e subtropicais, não saturados, de quatro perfis representativos dos processos erosivos na região metropolitana de Porto Alegre, levou em conta a magnitude e a frequência destes processos, caracterizando a erodibilidade em três níveis principais e dois níveis intermediários como demonstra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação relativa da erodibilidade

Erodibilidade relativa	Observação
Baixa	Solos lateríticos, que quando preservado, mostra resistência ao ravinamento deflagrador das voçorocas.
Média	Solos arenosos finos, que apresentam certa resistência à erosão, devido à cimentação herdada do arenito. Susceptíveis ao processo de ravinamento e a erosão interna.
Alta	Solos friáveis com ravinamento e voçorocas em alto grau de desenvolvimento.
Média a Baixa	Solos que perderam parte da cimentação de origem e que são compensados pelo enriquecimento em argila.
Média a Alta	Solos saprolíticos arenosos de origem granítica, sujeitos a ravinamentos e voçorocamentos.

Fonte: Tatto (2007), adaptado de Bastos (1999).

Devido a erodibilidade constituir uma característica intrínseca ao solo, uma série de metodologias vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de correlacionar algumas das propriedades físicas e químicas dos solos com os processos erosivos, mediante a proposição e índices ou experimentos específicos para avaliação do potencial erosivo dos solos estudados. No item 2.4 são expostas algumas metodologias usualmente utilizadas no meio geotécnico para a estimativa da suscetibilidade à erosão dos solos. Em áreas como a Agronomia e Engenharia Ecológica, outros experimentos são usados para avaliar a erodibilidade como simuladores de chuva, experimentos de fluxo concentrado, micro erosão, dispositivos submersos a jato e medições com base em canais transversais e (efêmeros).

2.3.1 Influência das raízes das plantas na erodibilidade do solo

Raízes de plantas vivas são responsáveis por modificar propriedades mecânicas e hidrológicas da estrutura do solo (estabilidade dos agregados, coesão, taxa de infiltração, umidade e matéria orgânica) (VANNOPEN et al., 2015). Essa transformação resulta de iterações complexas da matriz solo-raiz (EVINER e CHAPIN, 2003; GREGORY, 2006).

Para Pohl et al. (2009), as raízes podem intervir na estrutura do solo, liberando substâncias orgânicas e inorgânicas, contendo polissacarídeos, moléculas grandes e proteínas que atuam como cola (agentes de ligação eficazes). Conforme Fattet et al. (2011) e Bardgett et al. (2014), elas podem promover a cimentação das partículas do solo, aumentando as forças coesivas e a presença de carbono orgânico.

De acordo com Coppin e Richards (2007), as raízes agregam as partículas de solo resultando em: contenção dos movimentos de massa, redução da erodibilidade e aumento da resistência ao cisalhamento através de uma matriz de fibras vivas que criam um efeito de malha através das raízes superficiais que contêm os estratos de solo. Entre os principais efeitos positivos das raízes está o fato de agregarem partículas de solo, aumentando a coesão e a resistência; assim como a taxa de infiltração de água e a porosidade e ainda funcionam como canais de sucção. Dentre os principais efeitos negativos destacam-se por poderem danificar estruturas

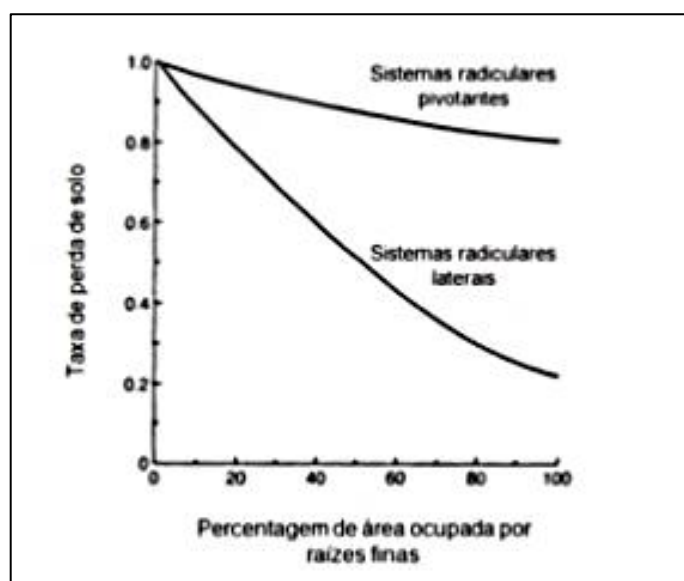
cimentadas; raízes secas podem concentrar fluxo de água pluvial; raízes finas e superficiais de bambu impedem a infiltração e desagregam partículas de solo (PEREIRA, 1999).

A presença de uma rede de raízes superficiais entrelaçadas faz com que a vegetação tenha efeito de manta ou esteira superficial, acarretando em boa ancoragem e significativo grau de resistência planar aos agentes erosivos (SOUZA, 2015). Essa resistência se dá por meio da eficácia das raízes que é diretamente influenciada por uma série de características do solo e da raiz (arquitetura radicular, densidade e comprimento da raiz, textura, umidade e densidade do solo (DE BAETS et al., 2007a; BURYLO et al., 2012).

Para o controle da erosão gerada pelo efeito das raízes, é importante uma seleção e conhecimento técnico das espécies de plantas mais apropriadas para este tipo de ação (PEREIRA 1999, DE BAETS et al., 2007b, BURYLO et al., 2014). Souza (2015) indica uso de plantas com sistemas radiculares laterais e não raízes profundas pivotantes para o controle de erosão superficial, uma vez que não se pretende estabilizar o solo em profundidade. A autora salienta a necessidade de sistemas radiculares densos e laterais, compostos por maior percentagem de raízes finas (até 5,0 mm de diâmetro), que potencializam a infiltração da água superficial e a drenagem subsuperficial, ajudem a estruturar as camadas superficiais do solo bem como redistribuam superficialmente forças mecânicas para zonas sujeitas a menos esforços.

Autores como Morgan e Rickson (1995), Coppin e Richards (2007), Ali e Osman (2008) e Souza (2015), comentam sobre o efeito que raízes com diâmetro de 1 a 12mm geram sobre o solo. Essas raízes confinam fisicamente as partículas do material, impedindo seu movimento por efeitos da gravidade, precipitação, vento e escoamento superficial. Para a redução da erosão superficial e da perda de solo, plantas com sistemas radiculares laterais bem desenvolvidos e com maior percentagem de raízes finas são mais efetivas que plantas com sistemas radiculares laterais estruturados verticalmente com raízes pivotantes (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Relação entre perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas

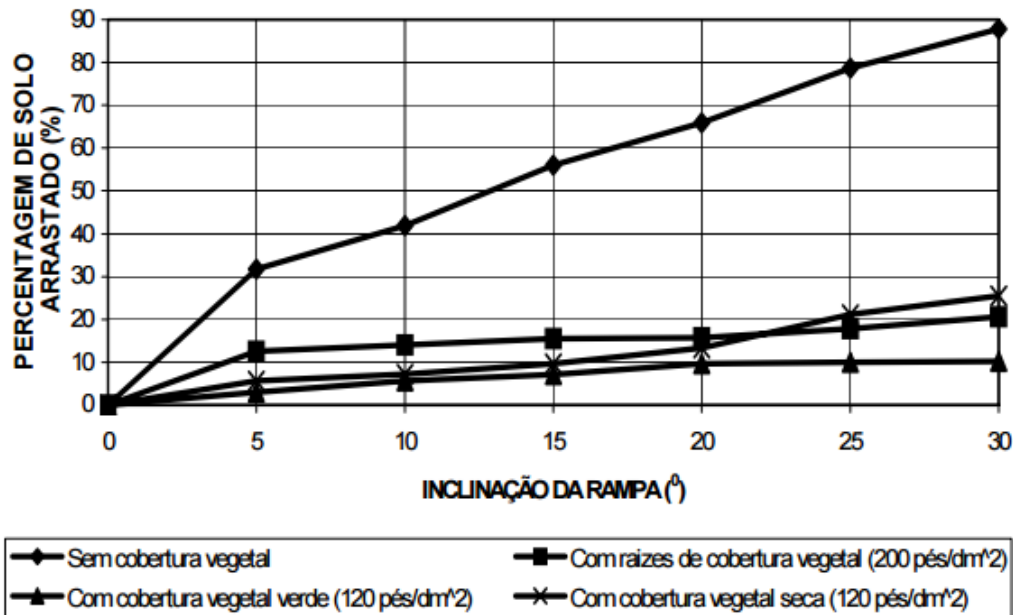


Fonte: Dissmeyer e Foster (1985) apud Morgan e Rickson (1995).

Chuquipiondo (2007) avaliou a estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água na região de Minas Gerais, por meio de ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade. Foram coletadas amostras indeformadas sem presença de raízes e algumas amostras que possuíam quantidade significativa de raízes. Através do ensaio de Inderbitzen, o autor pode verificar que amostras com a presença de raízes tiveram menor taxa de perda de solo. Situação justificada pelo fato de que as raízes ajudam a agrupar os grãos impedindo a fácil desagregação.

Falcão et al. (2012), ao avaliar a influência da cobertura vegetal na resistência ao escorregamento de taludes, realizaram diversos ensaios laboratoriais em um erodímetro, baseado no ensaio proposto por Inderbitzen. Foram utilizadas amostras com e sem cobertura vegetal e amostras com vestígios muito ténues de relva, mas com a presença de raízes, a fim de averiguar até que ponto apenas as raízes da cobertura vegetal contribuem para a resistência do solo à erosão. Ao final do ensaio os autores concluíram que mesmo para situações em que, devido a condições climáticas extremamente adversas, apenas restem as raízes da cobertura vegetal do talude, a resistência do solo à erosão é bastante superior (cerca de 4 vezes) à do mesmo tipo de solo, sem quaisquer vestígios de matéria vegetal (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Evolução da erosão do solo, com e sem cobertura vegetal e com cobertura vegetal seca, mas presença de raízes (90 minutos de precipitação em cada ensaio).



Fonte: Falcão et al. (2012).

Ye et al. (2017) ao estudar o efeito de raízes do capim-brava (*Paspalum notatum* Flugge - herbácea perene de sistema radicular massivo e estruturado) na resistência à erosão de dois solos derivados de granito e xisto na China subtropical, efetuaram ensaios de canal hidráulico com 3,8 metros de comprimento e 20 centímetros de largura, com 48 amostras permeadas por raízes e 12 amostras de solo nu para os dois tipos de solo. Puderam constatar que a taxa relativa de desprendimento do solo diminuiu significativamente com o aumento da densidade de semeadura. Para as amostras com menor densidade de semeadura (5-10 g m⁻²) as raízes reduziram as taxas de descolamento de solo em cerca de 70%. O efeito de raízes de capim-braquiária na resistência à erosão foi maior no solo de granito do que no xisto e as raízes finas foram mais eficientes que as raízes grossas no aumento da resistência à erosão.

2.4 MÉTODOS PARA ANÁLISE DO POTENCIAL ERODÍVEL DO SOLO

A análise do potencial erodível dos solos e rochas pode ser estabelecida, quantificada e avaliada através de métodos diretos e indiretos de avaliação da

erodibilidade, com uso de amostras indeformadas. Na bibliografia são encontrados vários ensaios nas áreas de estudo da Agronomia, Engenharia e Geografia que sozinhos ou combinados podem determinar a erodibilidade de solos e rochas.

Na engenharia, os primeiros estudos relacionados ao tema erodibilidade foram introduzidos nos anos 60 pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e pelo Laboratório de Engenharia de Angola (LEA), a fim de obter critérios de erodibilidade para solos tropicais encontrados em cortes de estradas (BASTOS, 1999).

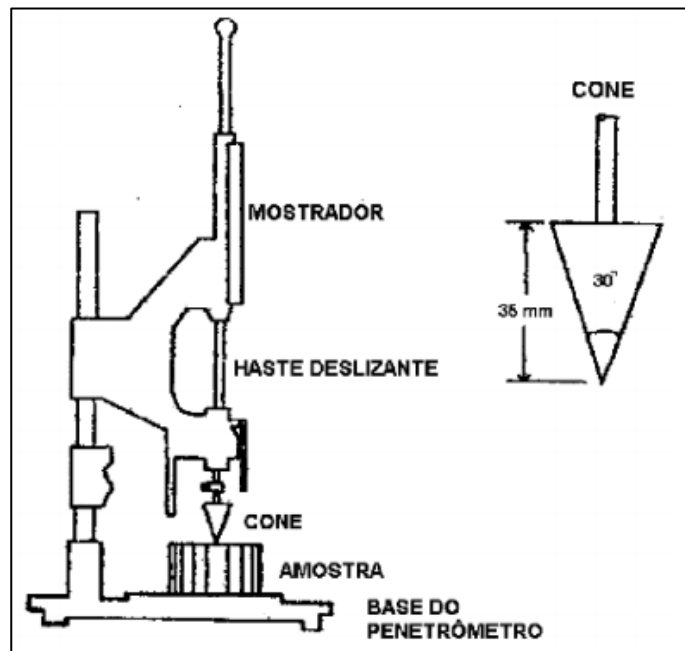
A avaliação indireta da erodibilidade é definida por meio do ensaio de cone de laboratório sugerido por Alcântara (1997), ensaio de desagregação e os ensaios baseados no critério de erodibilidade MCT: infiltrabilidade e perda de massa por imersão (NOGAMI e VILLIBOR, 1979). A avaliação direta é feita através do ensaio de Inderbitzen. Para Jacintho et. al., (2006), o ensaio de desagregação quando utilizado junto do ensaio de Inderbitzen, avalia diretamente a erodibilidade.

2.4.1 Ensaio de cone de laboratório

O ensaio de cone de laboratório tem o objetivo de determinar a erodibilidade dos solos, através da penetração de um cone em amostras indeformadas. Destaca-se pela fácil e rápida execução dos testes, além de comprovar que a condição de penetração na situação saturada reflete a perda de resistência exibida pelo solo em contato com a água. Alcântara (1997) afirma que a diferença de penetração em amostras saturadas e não saturadas apresenta boa correlação com a erodibilidade.

Alcântara (1997) utilizou o equipamento (Figura 2.3) para analisar amostras indeformadas de solos, nas condições natural e saturada (obtida por capilaridade pelo período de uma hora), de 73 mm de diâmetro e 40 mm de altura das cidades de São Carlos/SP e Salvador/BA, frente à penetração de um cone com ângulo de abertura de 30° e altura de 35 mm. Comparou o comportamento de solos *in situ* com resultados de ensaios de estabilidade de agregados por peneiramento em água, de ensaios de compressão simples e de um ensaio de penetração de cone de laboratório proposto para este fim. Os parâmetros obtidos nestes ensaios permitiram separar solos com comportamento diferenciado frente à erosão.

Figura 2.3 – Equipamento proposto para o ensaio de cone de laboratório



Fonte: Alcântara (1997).

Para Alcântara (1997), as amostras erodíveis diferem das não erodíveis segundo dois critérios: se $DP > 4,50 P_{nat}$, o solo apresenta alta erodibilidade, porém, se $DP < 4,50 P_{nat}$, o solo apresenta baixa a nenhuma erodibilidade. Ainda segundo o autor, os valores de DP combinados com o coeficiente de sorção (s) permitem a maior distinção dos solos quanto à erodibilidade pelos seguintes critérios: se $DP > 46,4 s + 25$, os solos apresentam erodibilidade alta; se $DP < 46,4 s + 25$ os solos apresentam baixa ou nenhuma erodibilidade.

Segundo Bastos (1999) a resistência oferecida à penetração do cone de laboratório está fortemente relacionada à coesão superficial dos solos. Ainda segundo o autor, a variação desta penetração com o umedecimento representa a perda desta coesão com a variação da sucção matricial e com o processo de desagregação do solo com a água.

A eficiência deste ensaio na avaliação da consolidação de solos não saturados, relacionada diretamente à erodibilidade foi destacada por Nearing e West (1988). Burgos et al. (1999) também puderam constatar que o método foi capaz de identificar os solos de comportamentos distintos quanto à susceptibilidade a erodibilidade, revelando-se um procedimento eficaz, promissor, com razoável margem de acerto, em um estudo preliminar da erodibilidade de alguns solos da

região metropolitana da cidade de Salvador – BA, utilizando o ensaio de cone de laboratório com 12 amostras indeformadas de 50 mm de diâmetro e altura.

Moraes et al. (2004) concluíram que existe uma tendência de os solos mais erodíveis serem mais expansíveis e menos resistentes à penetração saturada, ao adotar este ensaio para a análise de erodibilidade de saprófitos de gnaiss da região sul do complexo de rochas do embasamento cristalino, no interior do Quadrilátero Ferrífero, no centro sul do estado de Minas Gerais.

Moraes (2015), ao avaliar o uso do ensaio de cone de laboratório para estimativa da erodibilidade, de solos e rochas da região de Santa Maria/RS, comparando os resultados obtidos com os estudos de Bastos (1999), em solos da região metropolitana de Porto Alegre/RS, observou que o ensaio do cone de laboratório sofre influência principalmente das características físicas dos solos, sendo a principal delas a granulometria que atua na coesão dos solos e no embricamento dos grãos, facilitando ou não a penetração da ponta do cone. O mesmo autor salienta que a avaliação da erodibilidade por meio deste método apresentou resultados satisfatórios para os solos da região, consistente com a realidade.

Fernandes, L. (2015), avaliou a erodibilidade dos solos superficiais dos horizontes A, B e C que compõem um perfil de solo típico do Campo de Instrução de Santa Maria, RS. O ensaio de cone de laboratório foi utilizado como método indireto para a avaliação da erodibilidade, porém, os resultados do ensaio não foram satisfatórios com os resultados observados em campo.

2.4.2 Ensaio de desagregação

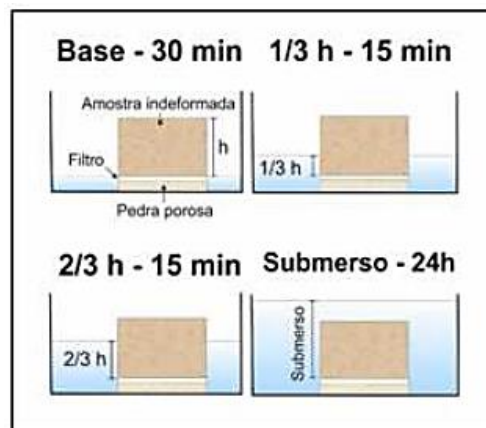
O ensaio de desagregação, também denominado de *slaking test*, originou-se do chamado *crumb test*, utilizado para reconhecimento de solos dispersivos, através da análise visual e descrição qualitativa dos fenômenos observados, quando uma amostra de solo está sujeita a um meio de imersão gradual de água. Moriwaki e Mitchell (1977) definem a desagregação como sendo o processo de ruína de uma amostra de solo não confinada, exposta ao ar e na sequência imersa em água.

Este ensaio tem como objetivo verificar a estabilidade de uma amostra indeformada de solo, quando a mesma é imersa em água, independente da dispersão do material. É considerado um método de avaliação indireta da

estabilidade, não normatizado, onde os resultados são puramente qualitativos obtidos por meio de análise visual. Em se tratando de resultados qualitativos são observadas as seguintes dinâmicas na amostra: abatimento (*slumping*); fraturamento no topo; rupturas nas bordas; velocidade de desagregação; grau de dispersão das partículas de solo; velocidade de ascensão capilar e inchamento.

Em relação à metodologia, o ensaio de desagregação pode ser executado através de duas técnicas distintas, denominadas de Imersão Parcial e Imersão Total. A primeira consiste em colocar a amostra sobre uma pedra porosa com o nível de água mantido na altura da base durante 30 minutos. A seguir, a altura de água é aumentada sucessivamente para $1/3$ e $2/3$ até que a amostra fique totalmente imersa, em períodos de tempo de 15 minutos para cada fase (Figura 2.4). O ensaio é concluído após 24 horas de imersão total da amostra (SANTOS, 1997). A segunda técnica consiste em colocar a amostra sobre a pedra porosa com o nível de água mantido na altura da base por 30 minutos e depois de este tempo o nível de água é aumentado de forma imediata até que a amostra fique totalmente imersa em água por mais 24 horas (CAMAPUM DE CARVALHO, 2006).

Figura 2.4 – Esquema das condições de submersão para o método de imersão parcial da amostra



Fonte: Tatto (2007).

No Brasil, conforme Ferreira (1981) apud BASTOS et al. (2000), o ensaio vem sendo utilizado para fins geotécnicos desde 1958. A pioneira foi a engenheira Anna Margarida Fonseca, que utilizou o ensaio de desagregação ao estudar propriedades dos solos para fins de fundações durante a construção de Brasília. De acordo com Bastos (1999), o ensaio analisa a capacidade de um solo não saturado e não

confinado em sofrer colapso de sua macroestrutura quando exposto ao ar e em seguida imerso em água. Para Lima (2003), é evidente a relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade.

Santos (1997) destaca que o ensaio de desagregação é um parâmetro preliminar na avaliação qualitativa da erodibilidade por ser um ensaio de execução simples e gerar resultados satisfatórios, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de erosão. Fonseca (1981) sugere o uso da velocidade de desagregação como índice classificatório para a erodibilidade de solos superficiais em taludes.

Camapum de Carvalho et al (2006) apontam que o ensaio de desagregação apresenta um nível qualitativo convincente na previsão do comportamento dos solos com relação à erosão e seus mecanismos. Porém, segundo os mesmos autores, apesar de ser um ensaio simples, requer a padronização do seu uso, principalmente no que se refere à forma do corpo de prova, à qualidade do fluido de saturação e às condições de imersão, que podem ser parcial e total. Lemos (2002), informa que o ensaio tem sido mais usado para avaliação qualitativa e investigação preliminar, indicando riscos e a necessidade de outros métodos de ensaios.

Para Bastos (1999), solos classificados como altamente erodíveis são aqueles que desagregam totalmente em água, porém não se verifica uma relação direta entre o potencial de desagregação e os níveis intermediários e baixos de erodibilidade, visto que somente solos de alta erodibilidade irão desagregar completamente durante o ensaio. A desagregação em água está associada a fenômenos de dispersão e de desaeração de solos não saturados.

Santos (1997), realizou um estudo utilizando amostras indeformadas moldadas em forma cúbica com 6 cm de lado, que foram submetidas à imersão total e a imersão parcial de água para observar a existência de alguma correspondência entre os ensaios de desagregação e os ensaios de Inderbitzen. Este mesmo autor aconselha o uso de recipientes distintos para ensaio de amostras diferentes, já que, os elementos e compostos químicos desprendidos de uma amostra podem interferir na estabilidade das outras.

Welter e Bastos (2003) utilizaram apenas a condição de imersão parcial como descrito por Santos (1997), para executar o ensaio com amostras de solo de 5 cm de diâmetro e altura, que foram compactadas no equipamento miniatura da metodologia MCT na condição de umidade ótima de compactação e previamente secas ao ar.

Santos (1997), ao analisar o processo evolutivo das erosões no município de Goiânia, concluiu que a desagregação verificada nas amostras de solo deu-se pelo processo de abatimento causado pela hidratação e desaeração geradas na fase de inundação das amostras, sendo que o processo de saturação das amostras anula a sucção matricial e gera poro pressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo.

Basso (2013) estudou a erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis/RS. Ao realizar o ensaio de desagregação utilizando amostras indeformadas de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, constatou que as condições de umidade natural e seca ao ar não foram um fator de influência no teste já que, independente da condição de umidade, solos do horizonte A e B mostraram-se mais resistentes frente à umidade, enquanto que o horizonte C e as camadas de arenito da base desagregaram completamente.

2.4.3 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT

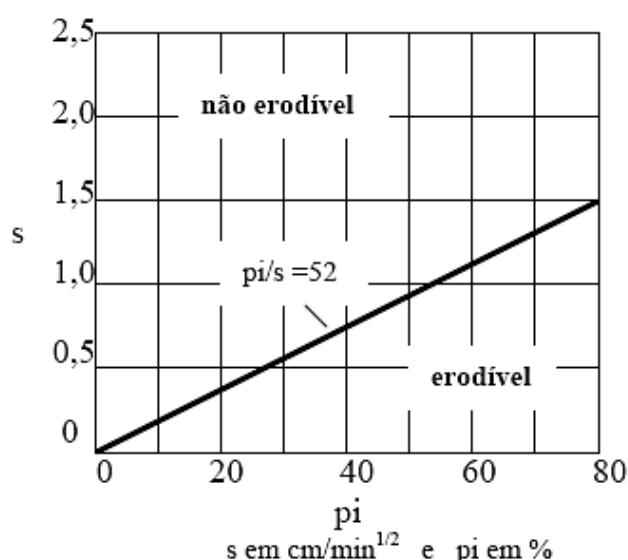
A metodologia MCT (miniatura, compactado, tropical) foi desenvolvida especificamente para o estudo de solos tropicais, baseada nas propriedades mecânicas e hídricas de corpos de prova compactados de dimensões reduzidas, substituindo métodos de estudo de solo desenvolvido em países de clima frio e temperado. Entre as principais aplicações da metodologia, está a classificação MCT de solos tropicais.

Complementarmente à sua proposição como sistema de classificação de solos tropicais, Nogami e Villibor (1979) adaptaram alguns ensaios da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade dos solos, atribuindo critérios de erodibilidade e cobrindo lacunas deixadas pelas classificações geotécnicas tradicionais, e pela isolada associação de Pedologia e Geologia na previsão do comportamento dos solos tropicais frente à erosão.

O critério de erodibilidade, apresentado por Nogami e Villibor (1979), é fundamentalmente empírico e baseia-se no comportamento de um grande número de cortes frente à erosão. Segundo os autores, a infiltrabilidade e a erodibilidade específica são as duas propriedades que permitem prever o comportamento dos solos tropicais frente à erosão hídrica.

Com base na proposição de dois novos procedimentos experimentais: o ensaio de infiltrabilidade (determinado com base no coeficiente de sorção (s)) e a perda de massa por imersão modificada (π) determinada por meio de um método modificado, chamado de erodibilidade específica, é possível classificar os solos em relação ao grau de erodibilidade, sendo considerados solos erodíveis quando esta relação (π/s) for superior ao valor 52 (Figura 2.5). Baseando-se em um número maior de ensaios, Nogami e Villibor (1995) estabeleceram o mesmo critério de classificação. Pejon (1992 apud VILAR e PRANDI, 1993) salienta que a relação entre π e s deve ser superior ao valor 40, para que os solos sejam classificados como erodíveis.

Figura 2.5 – Critério de erodibilidade pela metodologia MCT



Fonte: Bastos et al. (2000).

Adotando este critério para grande parte de solos estudados em seus trabalhos, Higashi (2006) constatou que há uma tendência de aumento progressivo da velocidade de ascensão capilar e a perda de massa por imersão para as amostras secas ao ar. O autor submeteu as amostras ao ensaio na umidade natural e secas ao ar por 24, 48 e 72 horas, onde pode verificar que à medida que o tempo de secagem aumentava, ocorria um acréscimo dos valores do coeficiente de sorção e perda de massa.

A utilização do critério de erodibilidade MCT por meio da aplicação e/ou demonstração do método pode ser observada em Nogami e Villibor (1988),

Cozzolino e Nogami (1993) e Villibor e Nogami (2009), Alcântara (1997), Bastos et al. (2002), Higashi et al. (2004), Higashi & Spricigo (2003), Meirelles e Dias (2004) e Higashi (2006).

Os critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT foram confirmados por Bastos (1999), no estudo da erodibilidade de solos residuais não saturados na região metropolitana de Porto Alegre/RS, por Basso (2013) ao estudar a erodibilidade de horizontes de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis/RS e por Fernandes (2015) ao avaliar a erodibilidade de um perfil de solo típico da área do Campo de Instrução de Santa Maria /RS.

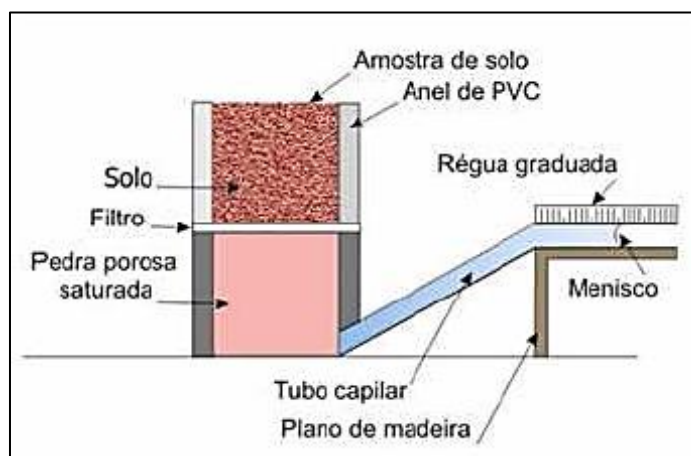
Ensaio de infiltrabilidade

Bastos et al. (2000) apresentam a definição de infiltrabilidade como uma propriedade hidráulica de solos não saturados, a qual traduz a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. Restrepo (2010) afirma que este é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no interior do maciço.

Segundo Bastos (1999), em regiões de climas tropicais e subtropicais úmidos, ainda que a pluviosidade seja elevada, devido à forte evapotranspiração e à boa drenagem na maioria dos solos residuais, a infiltrabilidade é mais representativa que a permeabilidade saturada como a propriedade que regula a quantidade de escoamento superficial.

De acordo com Nogami e Villibor (1979, 1988), o ensaio de infiltrabilidade baseia-se na determinação da quantidade de água que infiltra em corpos de prova de 5 cm de diâmetro, através da sua base, em função da raiz quadrada do tempo. Este ensaio procura retratar uma condição natural da infiltração de água no solo através da ascensão capilar (Figura 2.6). Autores como Menezes e Pejon (2010) titulam o coeficiente de sorção (s) de índice de absorção de água.

Figura 2.6 – Ensaio de infiltrabilidade



Fonte: Tatto (2007).

Este ensaio foi utilizado por Tatto (2007), Ávila (2009) e Fernandes (2011) tendo como base os estudos de Bastos (1999), para a caracterização da erodibilidade de uma voçoroca no oeste do Rio Grande do Sul e na região central do referido estado.

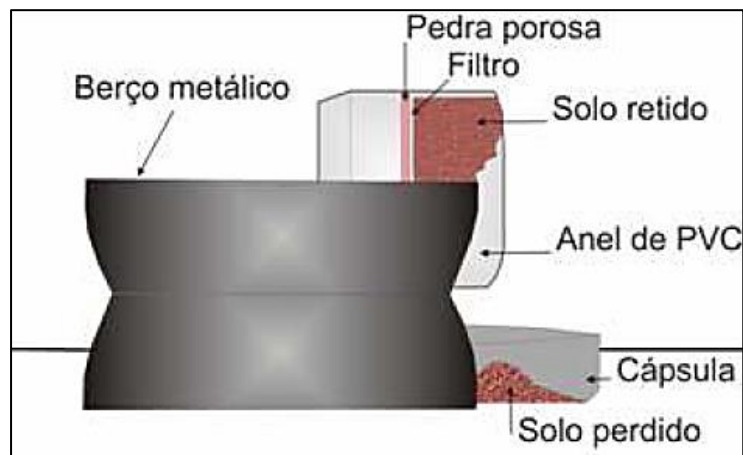
Ensaio de perda de massa por imersão modificado

O ensaio de perda de massa por imersão modificado, também intitulado ensaio de erodibilidade específica, recebeu o termo modificado por apresentar mudanças na preparação de amostras do ensaio. No ensaio de perda de massa por imersão que visa a classificação MCT, as amostras são extraídas parcialmente de seus moldes, de modo que fiquem com 10 mm de saliência. Este processo é diferente para o ensaio de perda de massa por imersão modificado, onde a face da amostra coincide com o fim do molde.

O objetivo deste ensaio baseia-se na determinação do potencial do solo em desagregar partículas quando submetido à inundação. São utilizadas amostras indeformadas de solo, contidas em anéis que deverão ser inundadas. A relação entre o peso do solo seco desagregado e o peso do solo seco total da amostra, fornece o valor de perda de massa por imersão π (%).

Assim como em Bastos (1999), Fernandes J. (2011), Basso (2013) e Fernandes L. (2015) utilizaram o ensaio de erodibilidade específica com a amostra rente ao molde, sem borda livre (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT



Fonte: Fernandes (2013).

Nas pesquisas realizadas por Bastos (1999), Tatto (2007), Ávila (2009), Fernandes J. (2011), Basso (2013) e Fernandes L. (2015), foram utilizadas amostras indeformadas de solo, confinadas em anéis de PVC com 5 cm de diâmetro e altura, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecidas. Em umas das faces do anel é colocado um papel filtro e uma pedra porosa, a outra face fica livre para sofrer a ação da água. Passada 20 horas de inundação, é realizada a coleta do material erodido e do retido para que após seco seja determinada a porcentagem da amostra que foi erodida. A perda de massa por imersão (π), representa para tais autores, o grau de desagregação do solo sob a ação estática da água.

2.4.4 Ensaio de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen, também chamado de erosômetro, é baseado em métodos empíricos e empregado no meio geotécnico por ser considerado de fácil execução, baixo custo e apresentar resultados satisfatórios mesmo não sendo normatizado.

Vários pesquisadores utilizaram e aprovaram o ensaio de Inderbitzen para estudar e avaliar a erosão: Rego (1978), Fácio (1991), Lima (1999), Bastos (1999), Motta (2001), Freire (2001), Mendes (2006) e Camapum de Carvalho et al., (2006a). Para Bastos et al. (2000), entre os ensaios em canais hidráulicos com uso de amostras indeformadas, o ensaio de Inderbitzen se mostra o mais indicado devido simplicidade de operação e do equipamento. Contudo, deve haver melhorias na

quantificação do material erodido e no controle e medição das tensões hidráulicas aplicadas.

A metodologia de ensaio busca reproduzir como o solo se comporta frente a um fluxo d'água superficial, permitindo determinar a influência de fatores como a densidade e a umidade do solo, a declividade da rampa, a vazão e a duração do fluxo (GRANDO, 2011). Segundo Inderbitzen (1961), apesar de permitir analisar diferentes resultados, o ensaio não simula o fenômeno da desagregação de partículas provocado pelo impacto da água em uma precipitação.

O equipamento original foi desenvolvido por Inderbitzen (1961), no qual a perda de solo pode ser medida em amostras cujo plano de sua superfície coincide com o plano variável da rampa, pela qual flui o escoamento com uma vazão controlada, com duração de duas horas de ensaio. No Brasil o ensaio foi introduzido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias no período entre 1975 e 1978, onde foi proposto como ensaio geotécnico para avaliação da erodibilidade dos solos em pesquisas de estabilidade de taludes. Bastos (1999) apresenta um levantamento detalhado, desde a origem, desenvolvimento e experiências que ocorreram no Brasil com o uso do ensaio Inderbitzen.

A partir de então, outras pesquisas foram desenvolvidas com base no aparelho original. Fácio (1991) e Fácio e Carvalho (1994), propuseram adaptações nas dimensões do aparelho original e a normatização do ensaio. Autores como Bastos (1999), Santos (1997), Freire (2001) e Lemos (2002) realizaram modificações no ensaio original na tentativa de reduzir as inúmeras imperfeições.

Aguiar e Romão (2009) ressaltam sobre a necessidade da realização de novas adaptações para melhorar a forma de representação do fluxo laminar da água na superfície terrestre, a fim de se obter uma representação quantificada mais adequada da erodibilidade. Grandó (2011) afirma que as modificações desenvolvidas no equipamento de Inderbitzen são importantes para a quantificação da erosão em laboratório, pois caracterizam a erosão autêntica que ocorre em campo.

Fonseca e Ferreira (1981) utilizaram inclinações de 44° e 59° de rampa, com vazões entre 59 e 314 ml/s para duração de 2 horas de ensaio. Fácio (1991) projetou uma nova versão do equipamento, onde três ensaios podiam ser realizados ao mesmo tempo, com inclinação de 10°, vazão de 50 ml/s e 20 minutos de duração. Diminuiu a largura da rampa, que passou de 1,00 m para 0,33 m; aumentou o

comprimento da rampa, que passou de 1,00 m para 1,30 m e reduziu do diâmetro das amostras, de 0,152 m para 0,10 m.

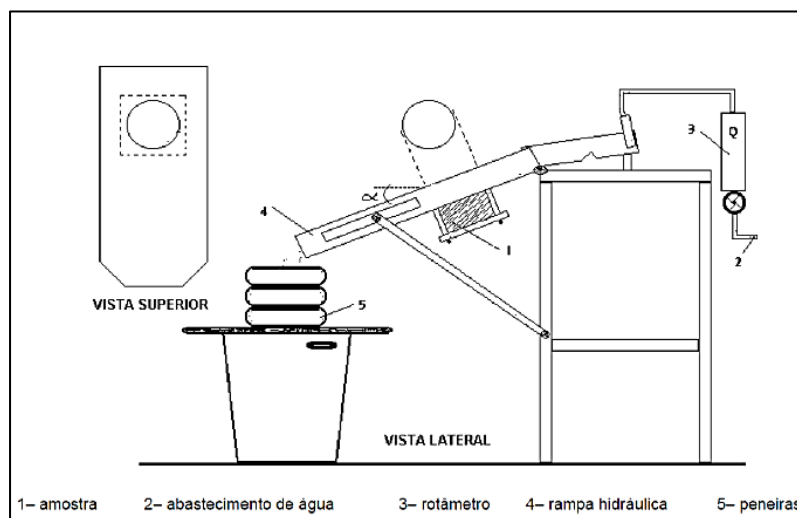
De acordo com Lafayette (2006), alterações no equipamento que facilitam o ensaio, como por exemplo, diminuição do diâmetro da amostra e largura da rampa, podem acarretar perda de precisão. Para Inderbitzen (1961), quanto maior a área de solo exposta (maior diâmetro da amostra), maior o rigor dos resultados dos ensaios.

Santos (1997 apud JACINTHO et al., 2006), ao estudar os processos erosivos em Goiânia, reduziu ainda mais a largura da rampa (passou para 0,10 m) de modo que toda lâmina d'água escoasse sobre a amostra. Adotou vazão de 17,5 ml/s e duração de 30 minutos, pois percebeu que esta condição facilitava a observação do processo erosivo.

Bastos (1999) ao avaliar a erodibilidade de solos residuais não saturados na região de Porto Alegre, construiu um novo equipamento para a realização do ensaio de Inderbitzen. O equipamento é dotado de um orifício central, onde são acopladas amostras de solo confinadas em anéis de PVC, com 9,76 cm de diâmetro e 5 cm de altura (

Figura 2.8). O autor adotou inclinações de 10°, 26°, 45° e 54°, com vazões de 3 l/min e 6 l/min em um tempo de 20 minutos de ensaio, com amostras nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida.

Figura 2.8 – Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS



Fonte: Bastos (1999).

Chamecki (2002), ao realizar o ensaio de Inderbitzen para analisar o comportamento de solos regionais da Formação Guabirotuba, da região de Curitiba (PR), fixou uma única inclinação de rampa (34°) assim como apenas uma vazão (em torno de 70 a 75 ml/s). Motta (2001) adotou vazões entre 25 ml/s e 75 ml/s e inclinações de rampa entre 5° e 40° com 30 minutos de duração de ensaio.

Lafayette (2006), ao estudar o processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti em Cabo de Santo Agostinho/PE, executou o ensaio de Inderbitzen adotando inclinações de rampa de 10° , 18° e 30° , determinadas com base nas observações feitas na área de estudo, e vazões de 70 ml/s, 100 ml/s e 170 ml/s de acordo com a capacidade de escoamento do equipamento e a crosta superficial "in situ".

Durante a realização do ensaio, Fácio (1991) e Mendes (2006) puderam observar que a maior produção de material erodido se dá nos primeiros cinco minutos de ensaio. Ainda, de acordo com o primeiro autor, a produção de sedimentos aumenta com a declividade de rampa.

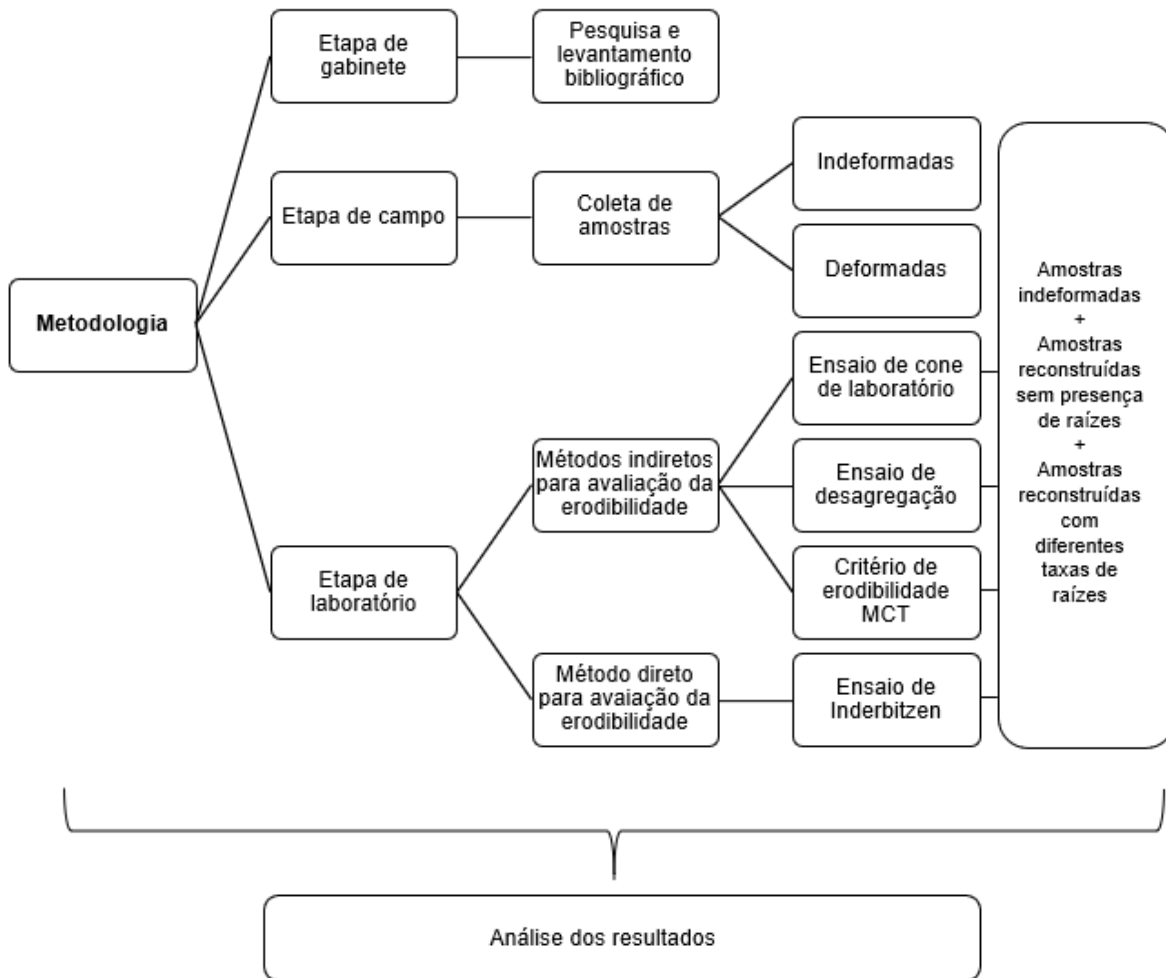
3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa foi composta por três fases, onde foram realizadas as seguintes atividades: (a) etapa de gabinete: fase inicial do trabalho, na qual foi realizado o levantamento bibliográfico disponível e a revisão bibliográfica que compreendeu os assuntos referentes à erosão, o efeito de raízes (fibras naturais) na erodibilidade do solo e os métodos para análise do potencial erodível do mesmo; (b) etapa de campo: foi realizada a visita ao local de estudo, reconhecimento do tipo de solo da área e coleta das amostras deformadas e indeformadas para posterior realização dos ensaios geotécnicos; (c) etapa de laboratório: neste estágio foram realizados os ensaios de caracterização física e química, classificação geotécnica e os demais ensaios para a avaliação direta e indireta da erodibilidade do solo, com amostras indeformadas e reconstruídas com e sem a presença de raízes (Figura 3.1). A escolha das amostras nas três condições acima descritas foi realizada a fim de excluir o efeito da estrutura do solo nos ensaios de avaliação da erodibilidade na presença de raízes quando comparados com os ensaios sem a presença das mesmas, ou seja, os resultados obtidos seriam única e exclusivamente gerados pelo efeito das raízes.

Os ensaios que compreendem a identificação e classificação do solo arenoso foram realizados por esta autora juntamente com Tiane Maria Jaskulski na qual fez uso do mesmo material para sua pesquisa intitulada - Avaliação da Influência de Raízes de *Zoysia japonica* na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Arenoso.

Com a conclusão de todas as etapas, foi elaborada a análise dos resultados obtidos.

Figura 3.1 - Metodologia da pesquisa



3.1 ETAPA DE GABINETE

Nesta etapa foi realizado o levantamento de livros, teses, dissertações, artigos, publicações de congressos, seminários e simpósios com a temática voltada ao estudo da utilização de fibras vegetais na Engenharia Natural, erosão e a erodibilidade de solos com a presença de material vegetativo. Os principais assuntos abordados citam as fases da erosão e os agentes erosivos, relacionando a utilização de fibras naturais (raízes) no controle da erodibilidade e a análise do potencial erodível do solo por meio de métodos diretos e indiretos.

3.2 ETAPA DE CAMPO

A metodologia de campo compreendeu a coleta das amostras de solo e visitas à área de estudo localizada em um terreno na Rua Paulo Bortolazzi, sob as coordenadas: 29°39'08,51"S e 53°31'40,14"W, no distrito de Vale Vêneto, município de São João do Polêsine, estado do Rio Grande do Sul (Figura 3.2). O local já compreendeu outras pesquisas realizadas pelo Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria.

Figura 3.2 – Localização da área de coleta das amostras



Fonte: Google Earth (2018).

Descrição dos aspectos fisiográficos do município no qual se encontra a área de estudo:

De acordo com Baratto e Sartori (1994), através da classificação de Köppen, o município de São João do Polêsine enquadra-se no clima temperado chuvoso e quente do tipo Cfa, onde a temperatura média do mês mais frio está entre -3 °C e 18 °C e a do mês mais moderadamente quente, superior a 10 °C; é úmido todo o ano, com verão quente, em que as temperaturas médias são superiores aos 22 °C.

Segundo Barros Sartori (1980), a média anual das precipitações é de 1600 mm, sendo que no verão e inverno caem em média 400 mm, na primavera 450mm e no outono de 400 a 450 mm. Os meses de maior quantidade de chuva são abril, maio, setembro e outubro.

Baratto e Sartori (1994) citam a presença de várias formações geológicas dado que, o município está localizado na zona de transição entre o Planalto Meridional Brasileiro, constituído de rochas vulcânicas e sedimentares da formação Serra Geral e a Depressão Central ou Periférica, formada por rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Conforme os mesmos autores, a rede hidrográfica pertence à Bacia do Rio Jacuí e à sub-bacia do Vacacaí-Mirim, no qual destaca-se o arroio da Divisa e seus afluentes Ribeirão e Sanga das Pedras.

A vegetação primitiva era constituída pela Floresta Subcaducifólia Sbtropical. Hoje restam pequenas porções nas encostas mais escarpadas, pois foram bastante devastadas ao dar lugar para cultivo da agricultura. Nos locais de relevo mais acidentado, há presença de vegetação secundária, visto que as lavouras foram abandonadas após intenso uso devido dificuldades de manutenção e pedregosidade. Quanto ao relevo, apresenta características geomorfológicas com vales encaixados, serra e planícies aluviais (BARATTO E SARTORI, 1994).

Para a realização da caracterização geotécnica e dos demais ensaios propostos foi necessária a coleta de amostras deformadas e indeformadas, coletadas conforme os procedimentos regidos pela NBR 6457/2016 e estocadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Após a limpeza superficial do perfil e coleta das amostras deformadas (cerca de 20 cm abaixo do nível do terreno), estas foram identificadas e dispostas em sacos plásticos. As amostras indeformadas foram moldadas diretamente em anéis de PVC: (a) anéis de PVC marrom com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura para os ensaios de desagregação, cone de laboratório e Inderbitzen e (b) anéis de PVC branco com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura para os ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificado. Posteriormente foram parafinadas de modo à garantir a manutenção da umidade natural, transportadas em uma caixa com serragem e estocadas em local protegido.

A

Figura 3.3 demonstra os procedimentos adotados durante a coleta e a Tabela 3.1 apresenta a quantidade mínima de amostras indeformadas que foram moldadas no perfil de estudo.

Figura 3.3 - Procedimento de coleta das amostras: (a) terreno original; (b) limpeza superficial e realização da bancada de trabalho; (c) amostra indeformada – anel de PVC marrom; (d) amostras indeformadas – anel de PVC branco; (e) acondicionamento das amostras indeformadas e (f) amostra deformada seca ao ar



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Tabela 3.1 – Número mínimo de amostras indeformadas coletadas no perfil

Dimensões dos anéis (cm) (\varnothing = diâmetro, h = altura)	Ensaio	Número de amostras coletas no perfil
$\varnothing = 10$ cm e h = 5 cm	Cone de Laboratório	3 amostras
	Desagregação	2 amostras
	Inderbitzen	24 amostras
$\varnothing = 5$ cm e h = 5 cm	Infiltrabilidade	9 amostras
	Perda de Massa Por Imersão	9 amostras
	Modificado	

3.3 ETAPA DE LABORATÓRIO

A metodologia de laboratório compreendeu a execução dos ensaios de caracterização e classificação, e ensaios para a avaliação da erodibilidade do solo. Nesta fase são descritos os procedimentos e diretrizes empregadas, preparação e moldagem dos corpos de prova e características dos equipamentos empregados.

3.3.1 Ensaio de caracterização física e química

Os ensaios de caracterização física e química foram executados com amostras deformadas de solo. Para a caracterização física foram realizados os ensaios de peso específico real dos grãos (ABNT NBR 6508/2016) limites de liquidez (ABNT NBR 6459/2016), limites de plasticidade (ABNT NBR 7180/2016) e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, com e sem o uso de defloculante (ABNT NBR 7181/2016).

A caracterização química foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solos (LAS), do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria com a finalidade de obter percentagem de argila, pH, índice SMP, percentagem de matéria orgânica, presença de cátions, saturação por bases e alumínio, capacidade de troca catiônica (CTC efetiva e $CTC_{pH7,0}$), teores de fósforo, potássio, alumínio, cálcio, magnésio, ferro, enxofre, cobre, zinco e boro e determinação da textura. De acordo com Lepsch (2002), a análise química é importante para se conhecer até que ponto

a lixiviação e o empobrecimento químico podem influenciar nos processos erosivos da área degradada pelo ravinamento.

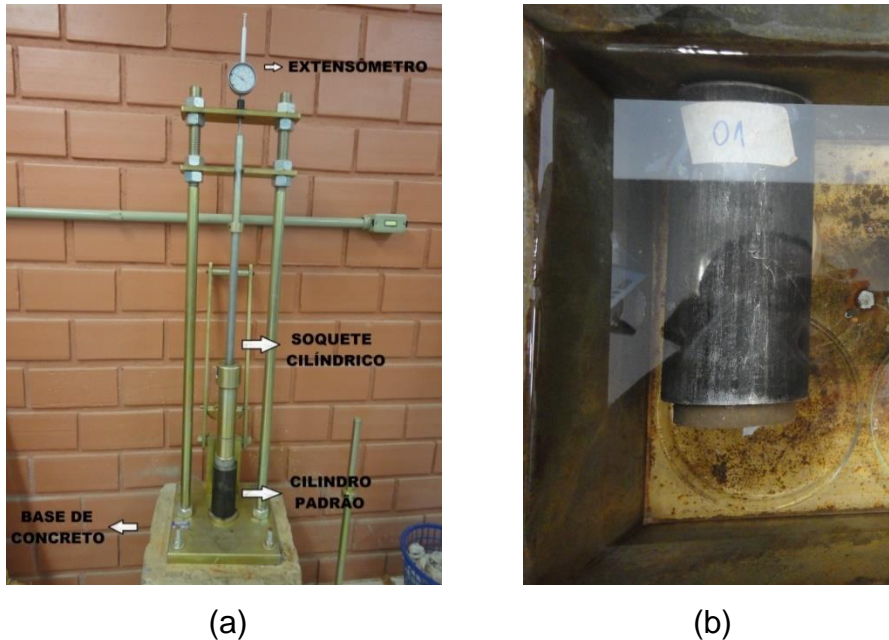
3.3.2 Caracterização geotécnica baseada na Metodologia MCT

Em função das dificuldades e deficiências apresentadas pelas classificações geotécnicas tradicionais (Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S.) e *Transportation Research Board* (T.R.B.)), desenvolvidas para solos de clima frio e temperado, quando aplicadas em projetos de pavimentos com solos tropicais, Nogami e Villibor (1981) desenvolveram a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

A partir desta metodologia surge uma nova classificação (Classificação MCT) que se baseia em propriedades mecânicas e hídricas dos solos e é específica para solos compactados tropicais. Através desta classificação, os solos tropicais são enquadrados em dois grandes grupos: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não laterítico (N) e divididos em 7 subgrupos: areias lateríticas (LA), solos arenosos lateríticos (LA'), solos argilosos lateríticos (LG'), areias não lateríticas (NA), solos arenosos não lateríticos (NA'), solos siltosos não lateríticos (NS') e solos argilosos não lateríticos (NG').

Para a classificação dos solos tropicais através da Metodologia MCT, foram realizados ensaios de compactação Mini-MCV (Moisture Condition Value) e ensaios de Perda de Massa por Imersão (Pi) com corpos de prova de dimensões reduzidas (50mm de diâmetro) e com diferentes teores de umidade (Figura 3.4). Nesse sentido, os ensaios presentes na metodologia apresentam-se como uma avaliação direta para classificação de solos tropicais além de serem de fácil aplicação e reproduzirem as condições reais de camadas de solos tropicais compactados aferindo propriedades geotécnicas que se espelham ao comportamento "in situ".

Figura 3.4 – Etapas do ensaio: (a) equipamento de compactação mini-MCV e (b) amostra em posição horizontal durante o ensaio de perda de massa por imersão



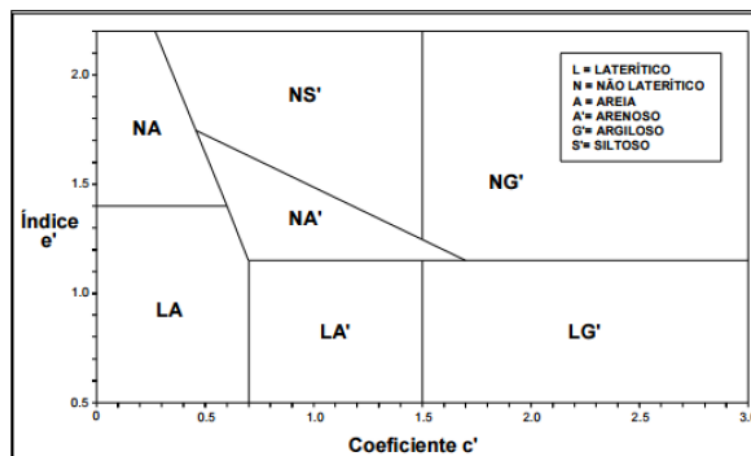
Por meio destes ensaios foram obtidos os índices (c' , d' e P_i). O índice c' é o coeficiente angular da parte mais inclinada e retilínea da curva Mini-MCV (curva de deformabilidade) correspondente a condição Mini-MCV = 10, o coeficiente d' é definido como a inclinação da parte retilínea mais inclinada do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 12 golpes e o valor de " P_i " é obtido por interpolação gráfica, traçando-se a curva de variação das porcentagens P_i x Mini-MCV, procurando-se o valor correspondente a Mini-MCV 10 ou 15, conforme se trate de solo de baixa ou elevada massa específica aparente.

De posse dos coeficientes d' e P_i , calculou-se o valor de e' como mostrado na Equação 3.1:

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (3.1)$$

A determinação do grupo classificatório se deu a partir do ábaco (Figura 3.5) proposto por Nogami e Villibor (1981) em que estão representados no eixo das abcissas os valores de c' e no eixo das ordenadas os valores de e'

Figura 3.5 - Ábaco de classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1981).

Os ensaios de classificação MCT, acima descritos, foram executados com base nas normativas DNER-ME 258/94, DNER-ME 256/94 e DNER-CLA 259/96.

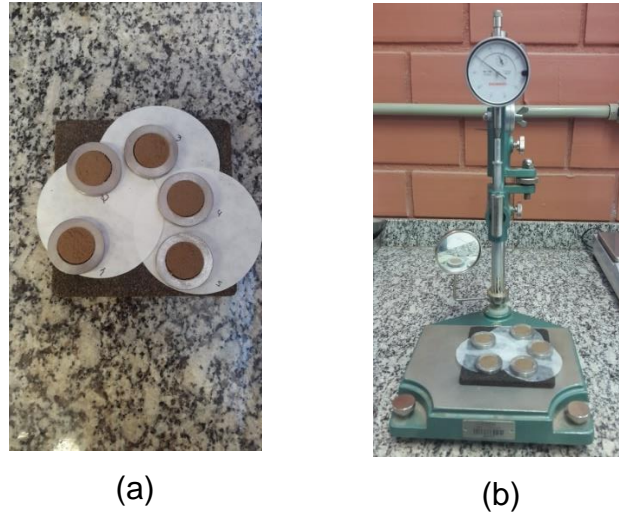
3.3.3 Caracterização geotécnica baseada no método expedito das pastilhas

Em decorrência da necessidade de se obter a classificação de solos tropicais para finalidades viárias de maneira mais rápida e a baixo custo, quando comparada aos ensaios desenvolvidos em 1981, Nogami e Villibor (1994) desenvolveram o método expedito das pastilhas no qual pode-se obter a classificação de um determinado solo em até 2 dias, com volume reduzido de amostra.

Através deste método é possível avaliar as propriedades de deformabilidade (por meio da contração diametral com perda de umidade e pela expansão diametral por reabsorção de água), resistência (por penetração da agulha de um penetrômetro na pastilha de solo) e permeabilidade (em função do período necessário para ascensão capilar d'água e capacidade de reabsorção após secagem).

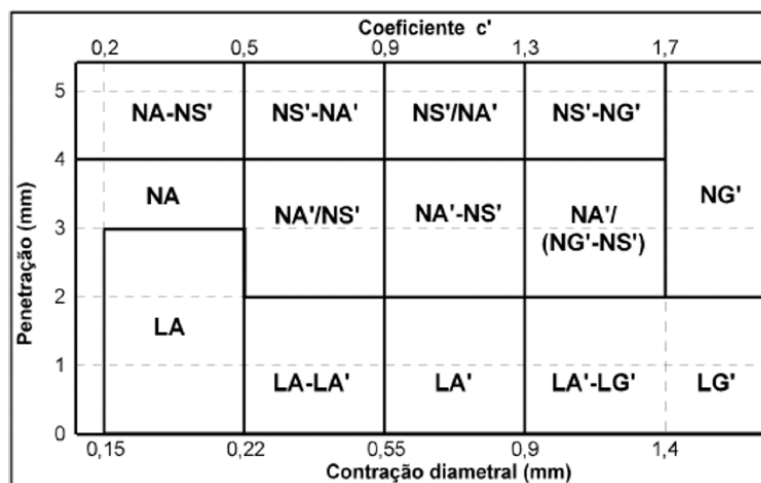
O ensaio baseou-se em determinações efetuadas em pastilhas moldadas em anéis de inox com dimensões de 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura. Essas pastilhas foram submetidas a secagem para medição da contração diametral (C_d). Posteriormente sujeitas a reabsorção de água em condições padronizadas, pode-se observar o surgimento de trincas e expansão. Determinou-se assim, a resistência à penetração (e') com uso de um penetrômetro padrão (Figura 3.6).

Figura 3.6 – Etapas do ensaio: (a) pastilhas moldadas em anéis de inox, submetidas à secagem e (b) determinação da resistência à penetração com uso do penetrômetro



A classificação do solo é realizada com o emprego do ábaco (Figura 3.7). Este ábaco distribui os solos em três grupos distintos: areias e solos arenosos, solos finos de comportamento laterítico e solos de comportamento não laterítico.

Figura 3.7 - Carta de Classificação Expedita MCT do Método das Pastilhas



Fonte: Nogami e Villibor (1994b).

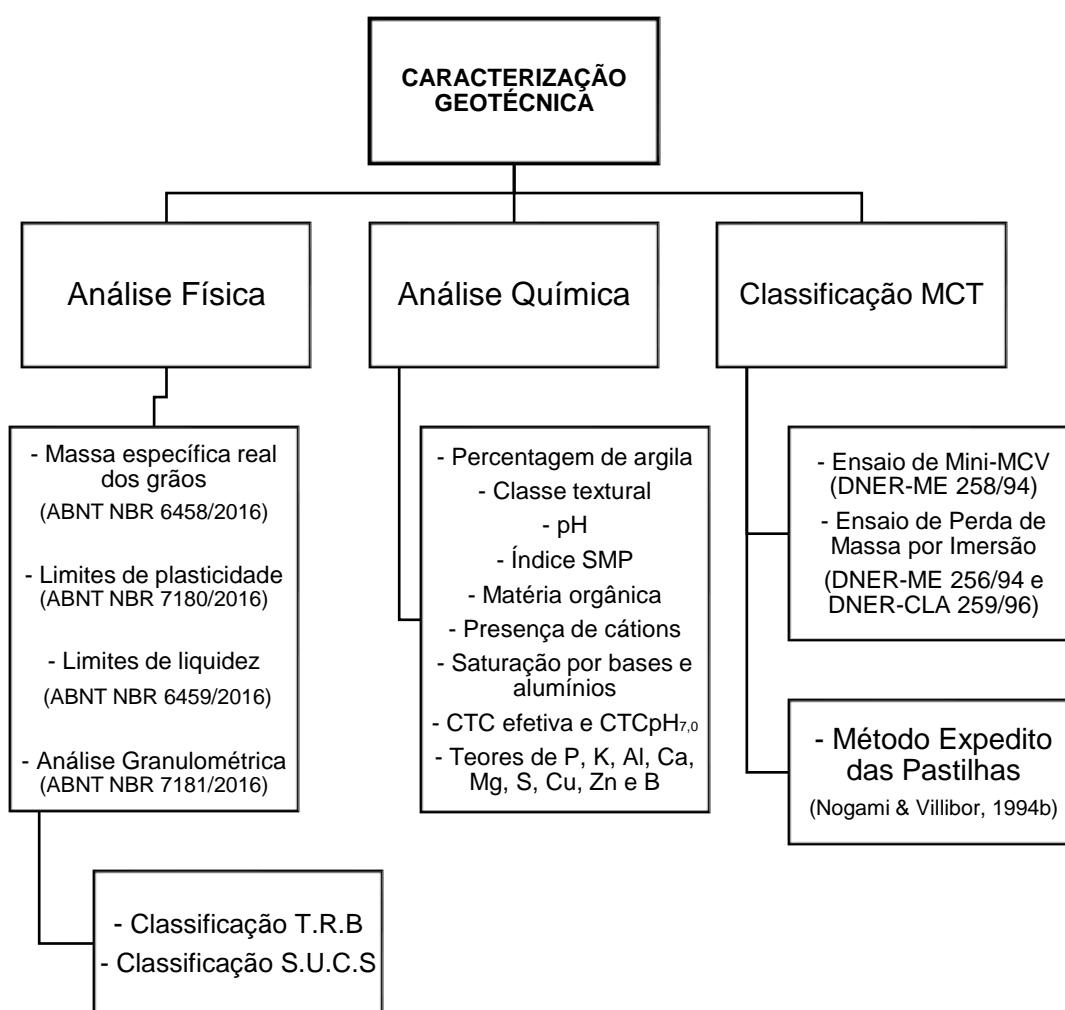
Na parte superior da carta situam-se os valores do coeficiente c' . O cálculo de c' utiliza a Equação 3.2 para valores de contração C_d entre 0,1 e 0,5 mm e, para valores de contração C_d maiores ou iguais a 0,6 mm utiliza a Equação 3.3.

$$c' = (\log_{10} C_d + 1)/0,904 \quad (3.2)$$

$$c' = (\log_{10} C_d + 0,7)/0,5 \quad (3.3)$$

O ensaio foi realizado três vezes, a fim de obter maior precisão nos resultados. A Figura 3.8 mostra as etapas realizadas para caracterização e classificação do solo em estudo.

Figura 3.8 - Fluxograma das etapas da caracterização do solo



3.3.4 Seções delgadas de solo

De acordo com Teixeira et al. (1973), apesar da existência do microscópio eletrônico que permite observar o formato dos grãos da fração argila de um solo e os ensaios de difração dos raios X, que permitem a identificação da estrutura das

mesmas, a confecção de seções delgadas é o único método que pode avaliar o solo em um estado não perturbado.

Para a realização desta etapa, as amostras indeformadas e reconstruídas em laboratório, foram moldadas em caixas de aproximadamente 4,5 cm de comprimento, 2,0 cm de espessura e 1,5 cm de altura, sendo deixadas secar ao ar por um período de sete dias, a fim de eliminar a maior quantidade de umidade possível.

Na etapa seguinte foi realizada a impregnação do material. De acordo com a EMBRAPA (1997), o material de impregnação deve ser apolar, possuir baixa viscosidade e mínima mudança de volume ao endurecer. As condições de impregnação não podem afetar o arranjo interno dos constituintes, nem lhes mudar as propriedades óticas. Este passo consistiu na mistura de uma resina plástica (Araldite) mais um catalisador 40%, na proporção 4:10. Foram também adicionadas gotas de acetona para aumento da fluidez do composto e gotas de corante azul de Ceries para melhor visualização dos poros.

A solução foi distribuída sobre as amostras e estas levadas para uma cuba de dessecação acoplada a uma bomba de vácuo. Fez-se um vácuo equivalente a pressão de 15 polegadas de mercúrio por algumas horas até que a resina cessasse o borbulhamento devido ao desprendimento dos gases presos nos vazios dos corpos de prova, ocupando os mesmos.

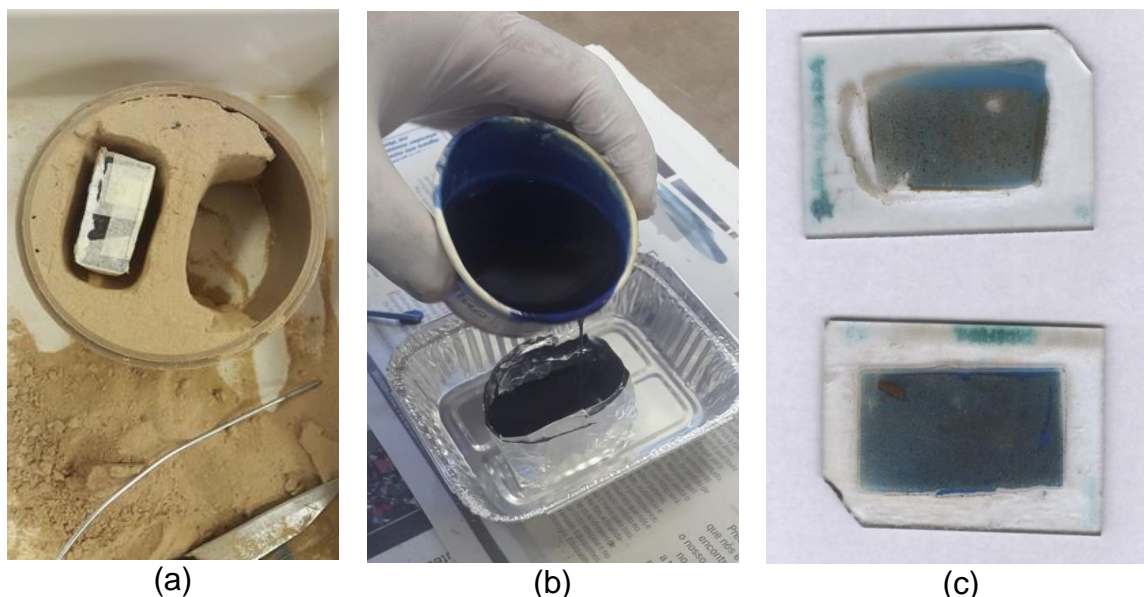
Retirados do dessecador, os frascos foram deixados repousar ao ar livre até a polimerização da resina. Com a quantidade de catalisador usada, a gelatinização se deu em 5 dias e o completo endurecimento dentro de 15 dias. Para finalizar o processo de cura, as amostras foram colocadas em estufa a 70°C por mais alguns dias.

Ao final do processo, as amostras tornaram-se rijas, resistentes e sem perder a estrutura original. As fases acima descritas foram executadas com o auxílio do laboratorista Rômulo Aita.

Na fase de laminação, realizada pelo laboratorista Ronaldo Fontoura no Laboratório de Laminação da UFSM, as amostras foram fatiadas utilizando-se serra com disco de diamante. Em seguida, as fatias foram polidas num disco de rotação com abrasivo até alcançarem uma superfície lisa e plana o suficiente para serem coladas em lâminas de vidro. Finalmente as lâminas foram polidas até apresentarem espessura em torno de 30 µm. A Figura 3.9 mostra a técnica em etapas.

A descrição das lâminas delgadas se deu no Laboratório de Geologia Ambiental da UFSM, com a utilização de um microscópio da marca Opton.

Figura 3.9 – (a) moldagem das amostras em pequenas caixas; (b) solução distribuída sobre a amostra; (c) lâminas delgadas prontas



3.3.5 Ensaios para avaliação indireta da erodibilidade

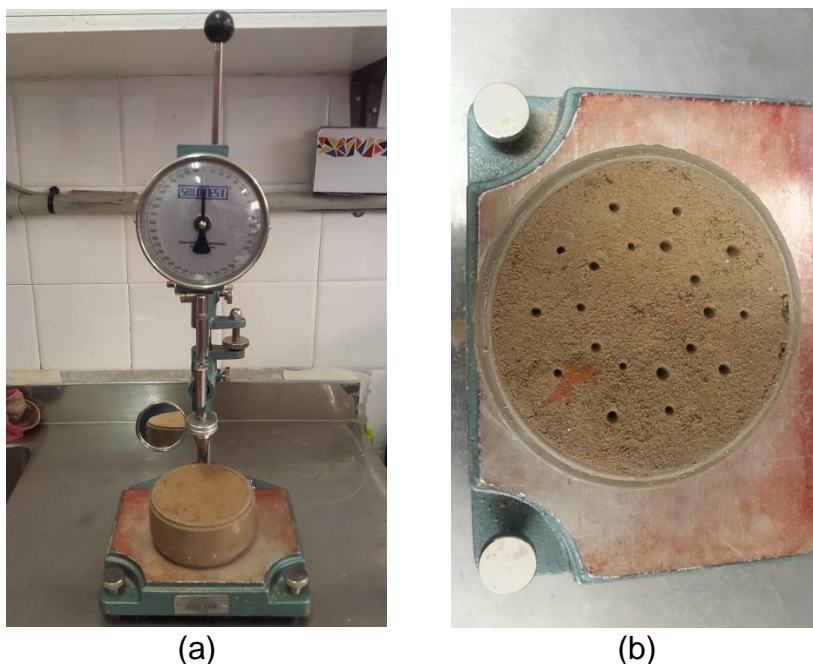
A avaliação indireta da erodibilidade foi realizada através dos ensaios de cone de laboratório, desagregação e ensaios baseados no critério de erodibilidade MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979).

3.3.5.1 Ensaio de cone de laboratório

A metodologia aplicada neste ensaio baseou-se na de Alcântara (1997), que foi adaptada do tradicional ensaio normalizado pela BS 1377:1975 de Head (1980), para determinação do limite de liquidez de solos, tendo como objetivo avaliar a resistência à penetração que uma amostra indeformada de solo oferece a um conjunto de queda.

O equipamento utilizado é um penetrômetro de cone (Figura 3.10). O ensaio baseia-se na queda de um conjunto de penetração de massa 300 g, que cai sobre a amostra a uma altura de 50 mm, sendo que este cone possui uma abertura de 30° e altura de 35 mm.

Figura 3.10 – Etapas do ensaio (a) penetrômetro de cone e (b) amostra após as penetrações



Para a realização da primeira fase da pesquisa foram utilizadas amostras indeformadas, coletadas em anéis de PVC de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Para a segunda fase de ensaios, as amostras foram reconstruídas em laboratório (remoldadas sem raízes), mantendo as características físicas e de umidade de campo. Posteriormente as amostras receberam raízes em três densidades diferentes, com 200, 400 e 600 raízes por CP, denominadas R200, R400 e R600 respectivamente.

Foram empregadas três amostras na condição de umidade natural e na condição pré-umedecida (obtida por aspersão capilar durante uma hora), para cada uma das situações descritas. Em cada uma das amostras realizou-se a medida de penetração alcançada pela ponta do cone em nove pontos diferentes da superfície, totalizando 27 penetrações para cada condição de umidade.

Ao final do ensaio, obteve-se a média das medidas de penetração natural e saturada, atingida pela ponta do cone, nos nove pontos da superfície das três amostras, com exceção daquelas que apresentam valores de dispersão acima de 5% em relação à média. A partir dos valores de penetração médios nas condições de umidade natural (P_{nat}) e saturada (P_{sat}), foram definidos os parâmetros de

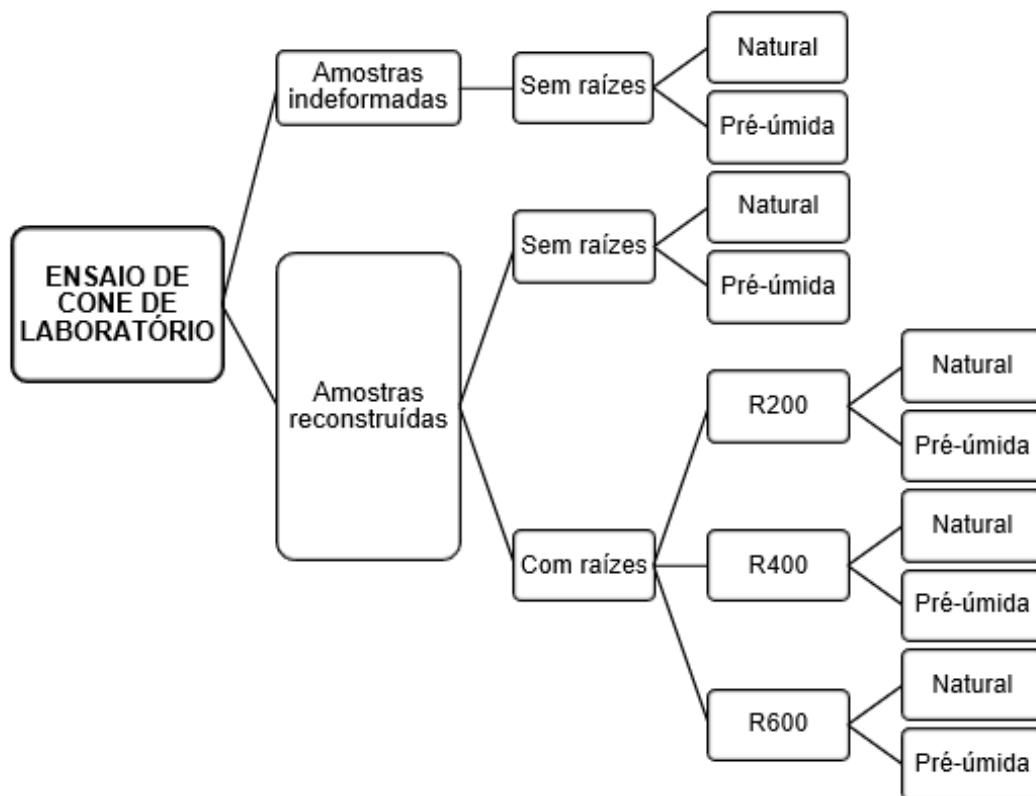
variação da penetração de penetração natural (DP) e pré-umedecida (DPA), relacionados à erodibilidade dos solos por meio das Equações 3.4 e 3.5:

$$DP = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{nat}} \quad (3.4)$$

$$DPA = \frac{P_{nat} - P_{sat}}{P_{sat}} \quad (3.5)$$

A Figura 3.11 apresenta as condições aplicadas no ensaio de cone de laboratório.

Figura 3.11 - Condições aplicadas no ensaio de cone de laboratório



3.3.5.2 Ensaio de desagregação

A desagregação (*slaking*) pode ser definida como sendo o processo de colapso de uma porção de solo ou rocha, não confinada e imersa em água. Solos erodíveis propendem a desagregar em água. O ensaio tem como objetivo a análise qualitativa e visual da desagregação ocorrida em uma amostra de solo não

confinada, quando esta está submetida à ascensão do nível de água, até estar totalmente submersa num período de 24 horas de ensaio.

Para a realização deste ensaio, foi adotada a metodologia proposta por Santos (1997). Utilizou-se amostras indeformadas de solo, com anéis de PVC de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura para a primeira fase de execução. Em seguida, as amostras foram reconstruídas em laboratório, mantendo as características físicas e de umidade de campo e posteriormente as amostras receberam raízes em três densidades diferentes, amostras com 200, 400 e 600 raízes por CP, denominadas R200, R400 e R600 respectivamente. Os ensaios foram realizados na condição de umidade natural e seca ao ar (por no mínimo 72 horas).

As amostras foram retiradas cuidadosamente de seus anéis (a fim de não danificar suas estruturas), colocadas sobre papel filtro e pedra porosa, devendo permanecer sob quatro condições de submersão (Figura 3.12): 30 minutos com o nível d'água na base da amostra; 15 minutos com o nível d'água a 1/3 da amostra; 15 minutos com o nível d'água a 2/3 da amostra e 24 horas com a amostra totalmente submersa.

Figura 3.12 – Esquemas de submersão: (a) nível d'água na base da amostra, (b) nível d'água a 1/3 da amostra, (c) nível d'água a 2/3 da amostra e (d) amostra totalmente submersa



(a)



(b)



(c)

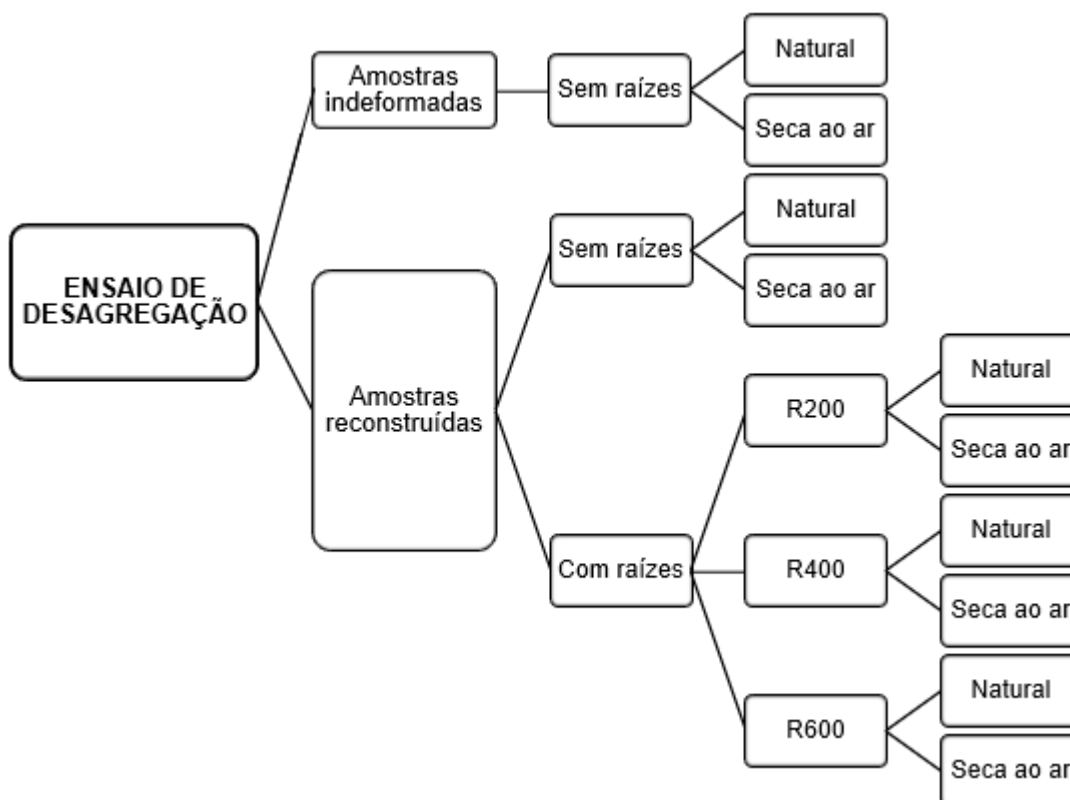


(d)

Como este ensaio tem caráter qualitativo, ao longo de cada etapa foi realizado o registro fotográfico e descrição do comportamento da amostra, levando-se em conta o abatimento e inchamento da amostra; velocidade de ascensão da água até o topo; raio de influência das partículas de solo desagregadas; velocidade de desagregação; formação de fissuras no topo e rupturas nas bordas da amostra.

A Figura 3.13 apresenta o fluxograma das condições de ensaio empregadas.

Figura 3.13 - Condições aplicadas no ensaio de desagregação



3.3.5.3 *Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT*

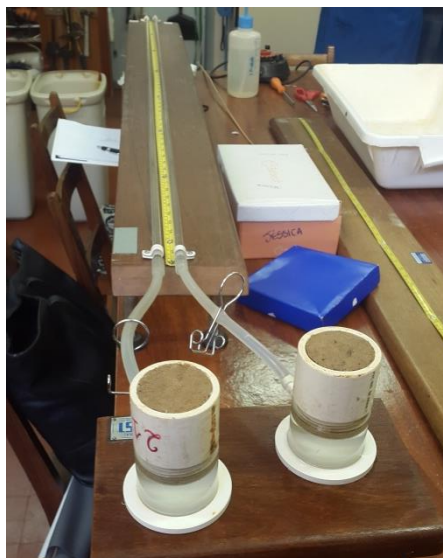
Nogami e Villibor (1979) criaram a metodologia MCT, capaz de prever o comportamento dos solos frente à erosão através de dois ensaios: ensaio de infiltrabilidade, no qual se obtém o coeficiente de sorção (s), e o ensaio de erodibilidade específica, no qual se obtém o coeficiente de perda de massa por imersão modificada (π). Por meio da divisão do parâmetro " π " por " s ", é possível classificar os solos em relação ao grau de erodibilidade, sendo considerados solos erodíveis quando esta relação for superior ao valor 52 (Nogami e Villibor 1979).

Ensaio de Infiltrabilidade (s)

O ensaio de infiltrabilidade tem como objetivo quantificar a velocidade de ascensão capilar de água nas amostras de solo. Para a realização deste ensaio, primeiramente foram utilizadas amostras de solo indeformadas, com anéis de PVC de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Em seguida, as amostras foram reconstruídas em laboratório, mantendo as características físicas e de umidade de campo. Posteriormente as amostras receberam raízes em três densidades diferentes, amostras com 50, 100 e 150 raízes por CP, denominadas R50, R100 e R150 respectivamente. Os ensaios foram realizados nas condições de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecida (por ascensão capilar, por no mínimo 24 horas).

O equipamento (Figura 3.14) utilizado neste ensaio é formado por um plano de madeira, no qual é acoplada uma régua graduada e um tubo capilar de vidro com 6 mm de diâmetro, em posição horizontal. Este tubo capilar está ligado a um reservatório com topo livre, sobre o qual se encontra uma pedra porosa. O tubo capilar deve ser preenchido com água até que a mesma transborde no topo do reservatório, em seguida, é colocado o papel filtro e sobre este a amostra confinada em seu anel de PVC.

Figura 3.14 – Esquema do ensaio de infiltrabilidade



O fluxo de água que ascende pela amostra pode ser determinado por meio da medição do descolamento de água, através de uma régua graduada junto ao tubo capilar, nos tempos que seguem uma relação quadrática (15", 30", 45", 1', 1'15", 1'30", 1'45", 2', 4', 9', 16', 25', 49', 64', 81', 100', 121', 144' e 24 horas) até que ocorra a estabilização do processo.

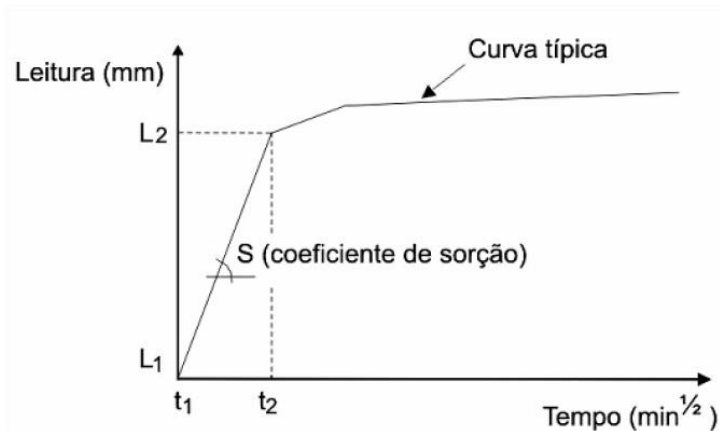
Com os dados referentes às distâncias (cm) percorridas pelo fluxo ao longo do tubo capilar e o tempo cronometrado ($\text{min}^{1/2}$), é possível plotar um gráfico (Figura 3.15). Esta pode apresentar um nítido encurvamento após trecho retilíneo inicial bem desenvolvido, prosseguindo com tendência sensivelmente horizontal, o que significa que a frente de umidade atingiu o topo do corpo de prova (Nogami e Villibor, 1995). O gradiente do trecho retilíneo inicial da curva é chamado de coeficiente de sorção 's' ($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) e pode ser determinado através da relação (3.6):

$$s = \frac{(L_2 - L_1)S}{10(t_2 - t_1)A} \quad (3.6)$$

Onde:

- s = coeficiente de sorção ($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$);
- S = área da seção do tubo capilar (cm^2);
- A = área da seção da amostra (cm^2);
- L₁ = leitura no tempo t₁ (cm);
- L₂ = leitura no tempo t₂ (cm).

Figura 3.15 – Curva típica e elementos para estimativa do coeficiente de sorção (s), no ensaio de infiltrabilidade da Metodologia MCT



Fonte: Adaptado de Bastos (1999).

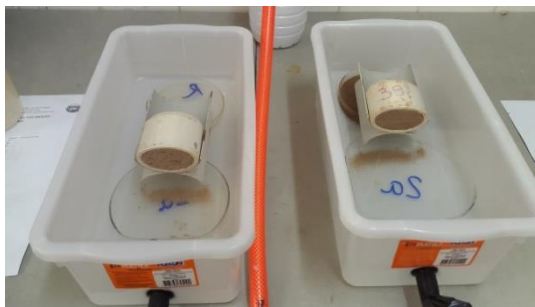
Ensaio de perda de massa por imersão modificado (π)

Este ensaio é também denominado de erodibilidade específica, e tem como objetivo avaliar quantitativamente o potencial de desagregação de uma amostra indeformada de solo, quando submersa em água.

Para a realização deste ensaio, na primeira fase foram utilizadas amostras de solo indeformadas, com anéis de PVC de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, compostos apenas de 2,5 cm de altura de amostra, sendo colocado um papel filtro e uma pedra porosa na parte interna restante do anel. Em seguida, as amostras foram reconstruídas em laboratório (5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura), mantendo as características físicas e de umidade de campo. Posteriormente as amostras receberam raízes em três densidades diferentes, amostras com 50, 100 e 150 raízes por CP, denominadas R50, R100 e R150 respectivamente. Os ensaios foram realizados nas condições de umidade natural, seca ao ar (por ascensão capilar, por no mínimo 72 horas) e pré-umedecida (por no mínimo 24 horas).

O sistema é composto por um berço metálico que sustenta a amostra confinada em posição horizontal (Figura 3.16). Todo conjunto deve permanecer imerso em água. Abaixo do berço é colocada uma cápsula com a finalidade de recolher o possível material desagregado do anel durante o período de realização do ensaio (20 horas).

Figura 3.16 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado



Ao final do ensaio, a água é esgotada de forma cuidadosa do recipiente que contém o sistema berço-amostra. O solo desprendido e o solo remanescente do anel são recolhidos, levados à estufa, e posteriormente pesados para determinação do valor de “ π ”.

Para a determinação do parâmetro “ π ” é utilizada a relação (3.7):

$$\pi = \frac{P_{seco d}}{P_{seco t}} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde:

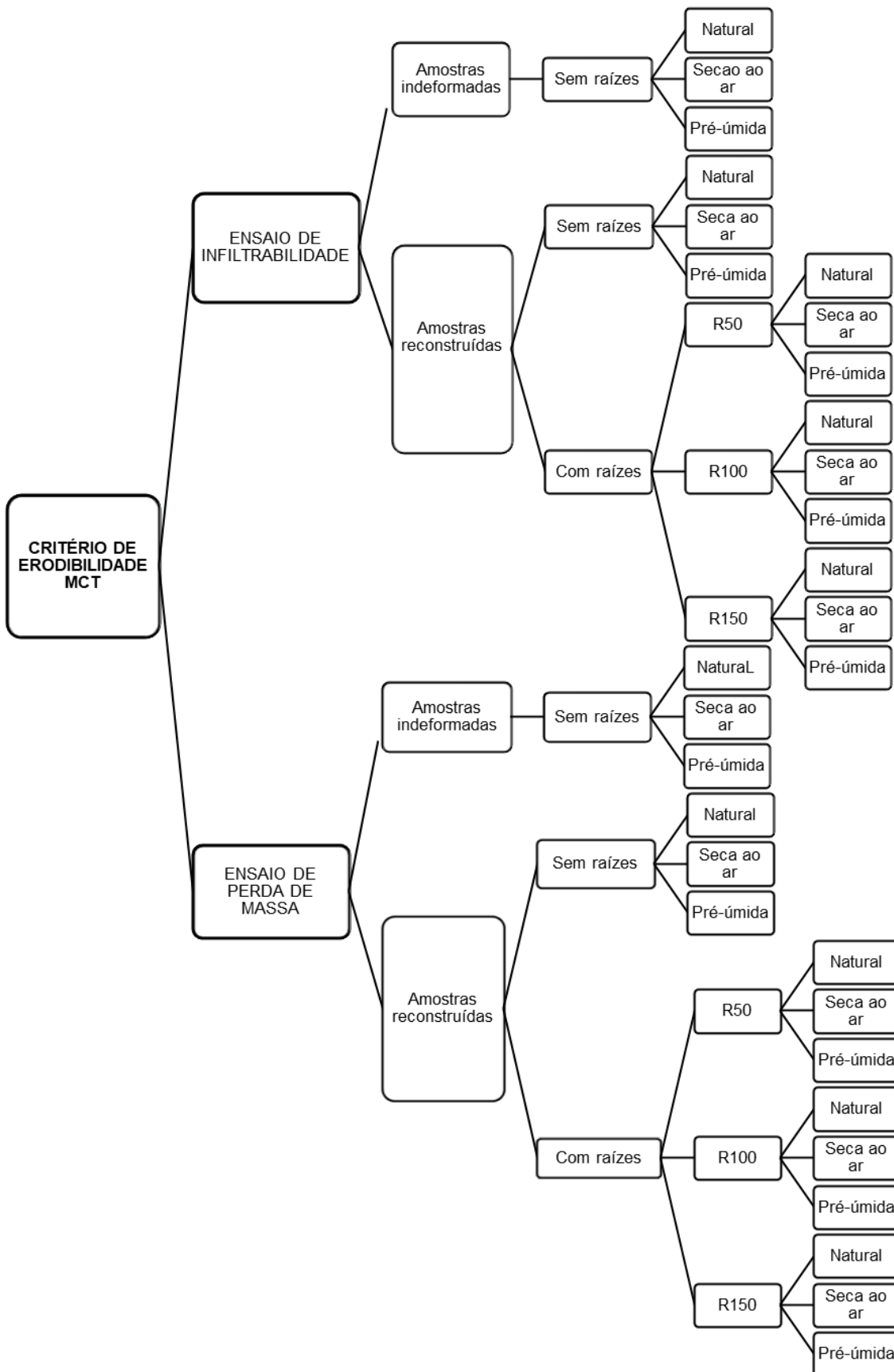
π = perda de massa por imersão (%);

$P_{seco d}$ = peso de solo seco desagregado (g);

$P_{seco t}$ = peso de solo seco total da amostra (g).

A Figura 3.17 apresenta as condições aplicadas nos ensaios baseados no critério de erodibilidade MCT.

Figura 3.17 – Condições aplicadas no ensaio de infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificado



3.3.6 Ensaio para avaliação direta da erodibilidade - ensaio de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen tem como objetivo quantificar a erodibilidade e também avaliar o efeito da umidade inicial de amostras suscetíveis à erosão hídrica por escoamento de água superficial. É de fácil execução dentre os ensaios realizados em canais hidráulicos.

Para a realização deste ensaio, foi empregada a metodologia já adotada em pesquisas desenvolvidas anteriormente por Tatto (2007), Ávila (2009), Fernandes, J. (2011), Sant'Ana (2012), Basso (2013) e Fernandes, L. (2015). O equipamento utilizado foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Solos, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LMS/UFRGS), para o estudo de Bastos (1999) em solos residuais de Porto Alegre. Este equipamento está situado no Laboratório de Laminação, no prédio do curso de Geografia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

O equipamento é constituído por uma estrutura metálica, composta de uma rampa hidráulica articulada com 25 cm de largura e 60 cm de comprimento, podendo inclinar-se de 0° a 54°, sendo suportada por uma barra metálica fixa na estrutura principal. Nesta rampa há uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel contendo a amostra de solo, de modo que, seu nível superior coincida com o nível da rampa, para que o escoamento laminar entre em contato com o topo da amostra. Na parte superior da rampa, uma fôrma metálica está anexada ao conjunto e possui a função de regularização do fluxo d'água fornecido diretamente da rede hidráulica, através da abertura de um registro.

A vazão utilizada no ensaio é controlada por meio de um rotâmetro que está interligado a canalização. A água e o solo desagregado pelo fluxo são coletados em baldes plásticos com capacidade de 60 litros, nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos, e posteriormente, passados por peneiras de malhas 042 mm (peneira #40) e 0,074 mm (peneira #200). Em seguida, o solo retido em cada peneira e o remanescente do anel são recolhidos, colocados em cápsulas individuais e levados à estufa para a obtenção de seus pesos secos. O mesmo ocorre com o material passante na peneira #200, que é homogeneizado por meio de agitação, colocado em um Becker (300ml) e levado à estufa. A Figura 3.18 demonstra as etapas do ensaio.

Figura 3.18 – Etapas do ensaio: (a) ensaio em andamento com inclinação de 45° e vazão de 3l/min; (b) conjunto de peneiras utilizado no peneiramento do material erodido; (c) amostra ao término do ensaio; (d) solo seco erodido, retido no conjunto de peneiras.



(a)



(b)



(c)

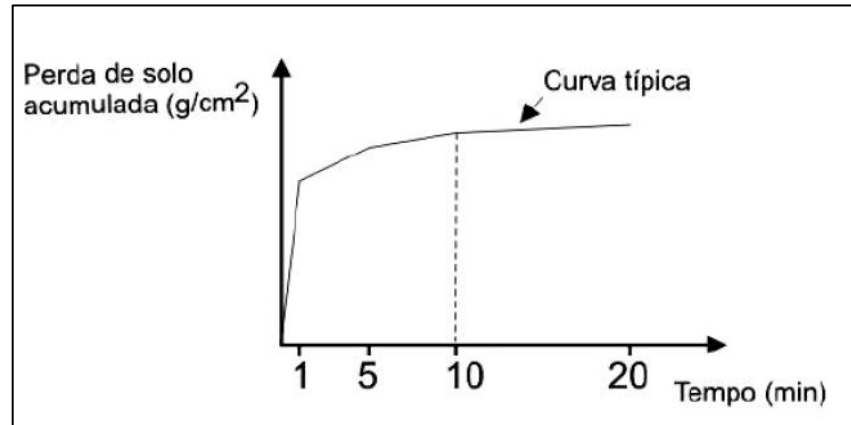


(d)

Foram utilizadas amostras de solo indeformadas, com anéis de PVC de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura para a primeira fase de ensaios. Em seguida, as amostras foram reconstruídas em laboratório, mantendo as características físicas e de umidade de campo. Posteriormente as amostras receberam raízes em três densidades diferentes, amostras com 200, 400 e 600 raízes por CP, denominadas R200, R400 e R600 respectivamente. Os ensaios foram realizados nas condições de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecida (por ascensão capilar, por no mínimo 24 horas). As variáveis de ensaio empregadas nesta pesquisa foram as mesmas adotadas por Bastos (1999), com inclinações de rampa de 10°, 26° e 45° e vazões de 3l/min e 6l/min.

De posse dos resultados, é plotado um gráfico que representa a relação entre a perda de solo acumulado por unidade de área da amostra (g/cm^2) e o tempo total de ensaio (minutos), como a Figura 3.19.

Figura 3.19 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra *versus* tempo para o ensaio de Inderbitzen



Fonte: Adaptado de Bastos (1999).

São plotadas juntamente, a perda de solo ($\text{g/cm}^2/\text{min}$) de cada ensaio com a tensão hidráulica atuante, τh (Pa), sendo esta estimada por Bastos (1999) através da relação (3.8):

$$\tau h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (3.8)$$

Onde:

τh = tensão hidráulica atuante no ensaio (Pa);

γ = peso específico da água (N/cm^3);

h = altura da lâmina d'água de fluxo (cm);

d = declividade da rampa.

A altura da lâmina d'água é estimada a partir dos valores da velocidade de escoamento, da vazão e da largura da rampa através da relação (3.9):

$$h = \frac{Q}{v \cdot L} \quad (3.9)$$

Onde:

h = altura da lâmina d'água (cm);

Q = vazão do fluxo (cm^3/s);

v = velocidade de escoamento (cm/s);

L = largura da rampa (cm).

Os valores da velocidade de escoamento (v), altura da lâmina d'água (h) e tensão cisalhante hidráulica (τh) para combinações de vazão (Q) e inclinação de rampa (i) são apresentados na Tabela 3.2, conforme Bastos (1999).

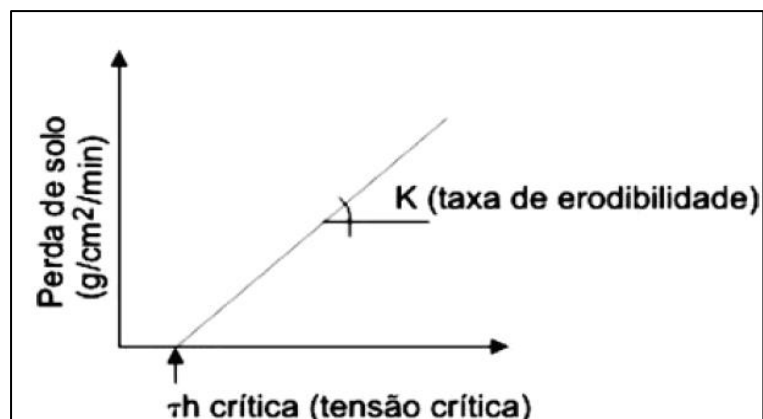
Tabela 3.2 – Valores de velocidade de escoamento (v), altura da lâmina d'água (h) e tensão cisalhante hidráulica (τh) para combinações de vazão (Q) e inclinação de rampa (i)

i	10°		26°		45°		54°	
Q (l/min)	3	6	3	6	3	6	3	6
v (cm/s)	31,03	50,64	57,05	96,65	77,36	145,86	83,50	169,97
h (cm)	0,064	0,079	0,035	0,041	0,026	0,027	0,024	0,024
τh	1,136	1,393	1,710	2,018	2,585	2,742	3,297	3,239

Fonte: Bastos (1999).

Do gráfico composto pelos dados da τh versus perda de solo ($\text{g/cm}^2/\text{min}$), resulta o ajustamento de uma reta. Por meio desta reta são estimados os seguintes parâmetros de erodibilidade: a taxa de erodibilidade, K ($\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), representada pelo gradiente da perda de solo em relação as tensões hidráulicas aplicadas, e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τh crit (Pa), representando a mínima tensão hidráulica causada pela lâmina d'água sobre o solo, que resulta na perda de solo inicial, conforme Figura 3.20.

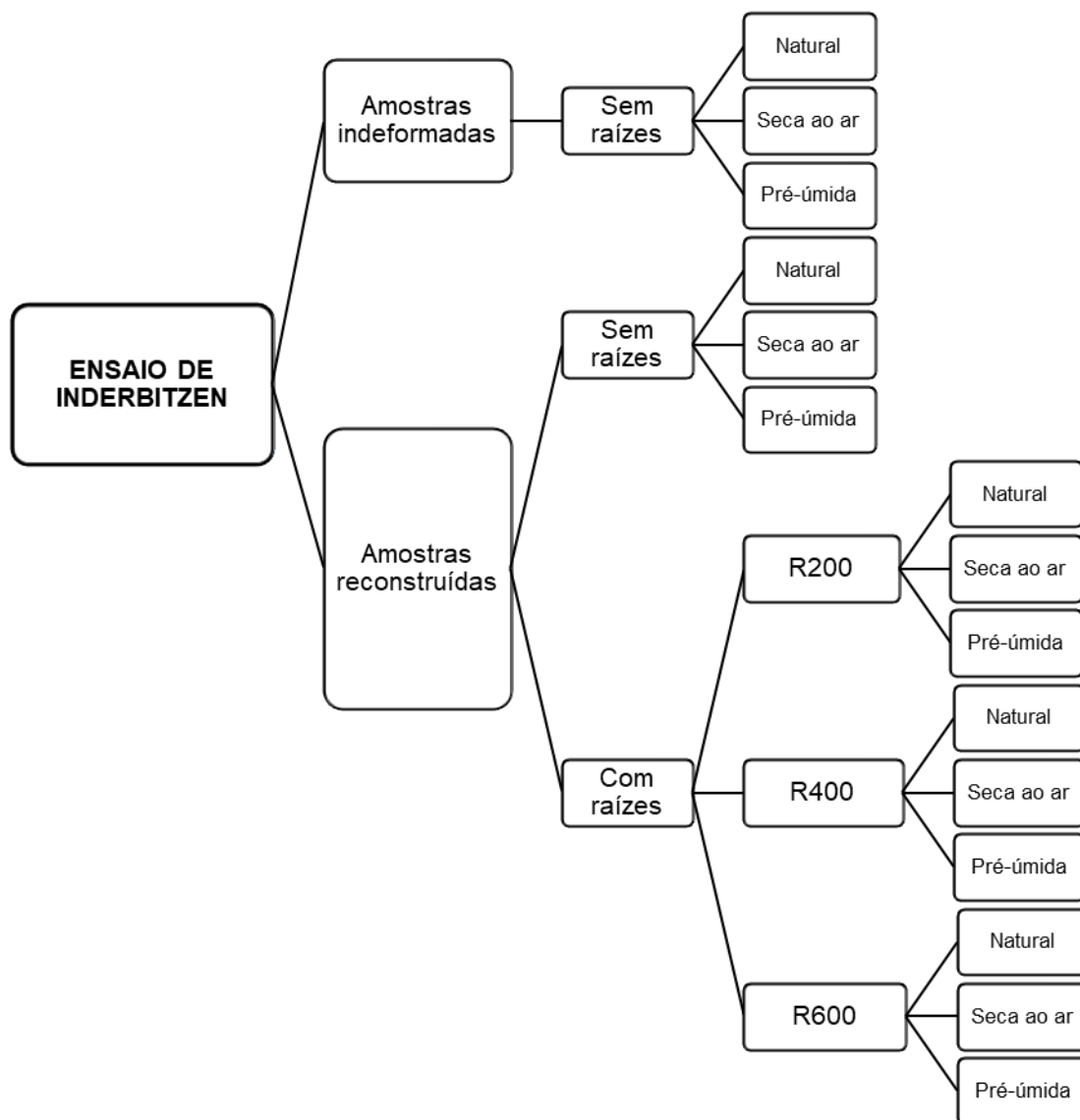
Figura 3.20 – Ajuste da reta de onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τh crit



Fonte: Bastos (1999).

A Figura 3.21 apresenta as condições previstas para o ensaio de Inderbitzen.

Figura 3.21 - Condições previstas para o ensaio de Inderbitzen



3.3.7 Reconstrução das amostras

As amostras indeformadas foram moldadas no talude diretamente em anéis de PVC marrons ($d=10\text{cm}$ e $h=5\text{cm}$) e brancos ($d=5\text{cm}$ e $h=5\text{cm}$) em apenas um dia de coleta, suprimindo a necessidade para realização de todos os ensaios. Essas amostras compreenderam a primeira fase de ensaios. De posse dos dados de umidade, peso específico real dos grãos, peso específico natural, peso específico aparente seco, índice de vazios, saturação e porosidade das mesmas, pode-se passar para a segunda fase de ensaios que compreendia reconstruir em laboratório amostras remoldadas com as mesmas características das amostras indeformadas.

Para tal, foi elaborada uma análise com todas as amostras indeformadas, correspondente a 54 amostras, a fim de obter-se valores médios para as propriedades citadas. Essa média foi utilizada para a confecção dos corpos de prova, aceitando-se um desvio de 2% acima ($1,748\text{g/cm}^3$) ou abaixo ($1,679\text{g/cm}^3$) do valor médio de peso específico natural ($1,713\text{g/cm}^3$).

Para a moldagem das amostras reconstruídas sem raízes, o solo foi preparado com valor igual ou muito próximo da umidade média obtida nas amostras indeformadas ($w = 17,25\%$). Devidamente umedecido e misturado, foi ensacado por um período mínimo de 24 horas para completa homogeneização do material com a água. Cumprido este processo, com o auxílio de uma balança pesou-se a quantidade de solo necessária para obter-se o valor médio de peso específico natural para o volume de cada anel utilizado. Nesta etapa, para as amostras reconstituídas com raízes, as raízes foram adicionadas e misturadas de forma manual e aleatória com o solo.

A compactação dos corpos de prova de PVC brancos foi realizada de forma manual, em uma única camada, com auxílio de um pequeno soquete plástico por ser de fácil execução em função da pequena quantidade de material necessária (cerca de 174g nos ensaios de infiltrabilidade e 87g nos ensaios de perda de massa por imersão modificado) para obter-se o valor médio de peso específico natural. Na compactação dos corpos de prova de PVC marrons, o material foi compactado em uma única camada com o auxílio de uma prensa manual acoplada a um soquete metálico, feito sob medida para estes corpos de prova. Tal escolha resultou da difícil compactação manual (necessidade de mais esforço) em função da grande quantidade de material necessária para atingir o valor de peso específico natural médio (cerca de 630g) por CP.

Para a confecção das amostras com raízes, foram empregadas raízes da gramínea esmeralda (*Zoysia japonica* Steud) com comprimento médio de 2,5 cm, igual à metade da altura dos corpos de prova, e diâmetro médio de 0,5 mm. Foram adotadas três taxas distintas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%), que resultam em quantidades de 50, 100 e 150 raízes nos corpos de prova brancos e 200, 400 e 600 raízes nos corpos de prova marrons. Estes valores foram obtidos através da multiplicação da área da seção transversal do CP (branco = $19,63\text{cm}^2$ e marrom = $78,54\text{cm}^2$) pela densidade de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%), divididos pela área da seção transversal das raízes ($0,00196\text{ cm}^2$).

A Figura 3.22 mostra a gramínea esmeralda com crescimento dentro de laboratório, as três taxas de raízes aplicadas nos ensaio de Inderbitzen e o compactador utilizado para auxiliar a remoldagem das amostras.

Figura 3.22 – (a) gramínea esmeralda; (b) taxa de 0,5% de raízes, correspondente a 200 raízes por corpo de prova; (c) equipamento que auxiliou na compactação das amostras; (d) taxa de 1,0% de raízes, correspondente a 400 raízes por corpo de prova e (e) taxa de 1,5% de raízes, correspondente a 600 raízes por corpo de prova



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Para a preparação de cada corpo de prova remoldado com a presença de raízes, estas foram cortadas, lavadas e contadas para posterior mistura aleatória no solo. A gramínea esmeralda foi escolhida por ser encontrada facilmente em nossa

região, possibilitar a fácil retirada de raízes (leivas mantidas em laboratório) e ser uma espécie muito utilizada para proteção de taludes em obras de engenharia.

3.3.8 Análise estatística

A análise estatística foi realizada por meio de quatro métodos distintos com o objetivo de verificar se as amostras com raízes, nas suas diferentes taxas e condições de umidade interferiam positivamente na erodibilidade do solo, aumentando a infiltrabilidade e diminuindo as perdas de material. Os dados amostrais foram separados em grupos segundo uma característica/fator (estrutura, condição de umidade e número de raízes).

Na comparação de dois grupos de amostras, os testes aplicados denominam-se teste F e teste de Mann-Whitney. O primeiro é um teste paramétrico que analisa as variâncias entre dois conjuntos de dados diferentes e compara-os por meio de teste de hipóteses. Quando os dados não apresentaram uma variação normal ou quando não houve homogeneidade das variâncias, utilizou-se o segundo método, não paramétrico, que testa a igualdade das medianas e é indicado para comparação de dois grupos não pareados verificando se pertencem ou não à mesma população e cujos requisitos para aplicação do teste F não foram cumpridos.

Para comparar três ou mais tratamentos foram utilizados outros dois métodos denominados Análise de Variância (ANOVA) e teste de Kruskal-Wallis. A ANOVA é um método paramétrico que depende da hipótese de que todas as populações em confronto são independentes e normalmente distribuídas, apresentando resultados confiáveis desde que o tamanho dos grupos seja igual ou quase igual. Já o teste de Kruskal-Wallis é usado para testar a hipótese nula de que todas as populações possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos duas das populações possuem funções de distribuição diferentes, não coloca nenhuma restrição sobre a comparação (não paramétrico), sendo utilizado quando os tratamentos não se enquadravam no método anterior.

Quando os métodos que comparam três ou mais categorias mostraram que houve diferença significativa entre os grupos de amostras, aplicou-se o Teste de Tukey para saber quais diferiam entre si. Quando os tamanhos amostrais dos grupos são iguais, o Teste de Tukey é um teste exato, ou seja, para o conjunto de todas as comparações par a par, a taxa de erro do conjunto dos testes é exatamente

α (nível de significância) e o intervalo de confiança é também exatamente $1 - \alpha$. Quando os tamanhos amostrais dos grupos são diferentes, o Teste de Tukey ainda pode ser usado. Apesar de não ser mais um teste exato, é um teste aproximado.

O estudo estatístico foi realizado com o auxílio das ferramentas de análise de dados presentes no Excel e com o software norueguês denominado PAST3 (disponível em <https://folk.uio.no/ohammer/past/>), contando com a ajuda do professor Augusto Maciel da Silva, do Departamento de Estatística da Universidade Federal de Santa Maria.

O detalhamento de todas as análises encontra-se nos Anexos B ao G.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados, propriedades físicas e químicas do solo em estudo através dos ensaios laboratoriais apresentados no Capítulo 3. Inicialmente são apresentadas as análises físicas e químicas e as classificações de acordo com os diferentes métodos (SUCS, TRB e Classificação MCT pela técnica tradicional e pelo Método Expedito das Patilhas). Na sequência apresenta-se a análise das lâminas delgadas com amostras indeformadas e reconstruídas em laboratório. Posteriormente são apresentados os resultados dos ensaios de cone de laboratório, desagregação, perda de massa, infiltrabilidade e Inderbitzen, fazendo um comparativo entre as amostras indeformadas, reconstituídas sem e com adição de raízes nas três condições de taxas de raízes juntamente com uma análise estatística dos resultados encontrados.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA

A caracterização física e determinação dos índices físicos do solo foram realizadas por meio dos ensaios de peso específico real dos grãos, limites de Atterberg e análise granulométrica com e sem uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio). A Tabela 4.1 apresenta os resultados para três repetições de ensaios de peso específico real dos grãos e limites de consistência.

Tabela 4.1 - Resultado dos ensaios de peso específico real dos grãos e limites de Atterberg

Identificação	γ_s (kN/m ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Ensaio 1	26,64	25	16	9
Ensaio 2	26,63	28	17	11
Ensaio 3	26,45	29	16	13
Média	26,57	27	16	11

Obs.: γ_s = Peso específico real dos grãos; LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade.

O peso específico real dos grãos apresentou como resultado médio o valor de 26,57 kN/m³, valor consistente com a mineralogia de solos arenosos. Quanto ao índice de plasticidade, o solo foi classificado como mediamente plástico já que possui IP = 11%.

Os resultados referentes as classes de tamanhos das partículas de solo para cada uma das situações de ensaio (com e sem uso de agente defloculante) e a classificação do mesmo segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o *Transportation Research Board* são apresentados na Tabela 4.2. A divisão adotada para as frações constituintes do solo foi proposta pela NBR 6502/1995 e as classificações foram obtidas por meio dos valores médios dos ensaios.

Tabela 4.2 - Resumo dos ensaios de granulometria e classificação do solo

Identifi- cação		Frações Granulométricas (%)					Classif. Geotécnica		
		Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila	SUCS	TRB
Ensaio 01	C/D	0	0	13	51	22	14		
	S/D	0	0	12	58	30	0		
Ensaio 02	C/D	0	0	12	53	18	17	SC	A-4
	S/D	0	0	11	60	27	2		
Ensaio 03	C/D	0	0	13	56	13	17		
	S/D	0	0	12	63	23	2		
Média	C/D	0	0	13	53	18	16		
	S/D	0	0	12	60	27	1		

Obs.: C/D = com defloculante; S/D = sem defloculante.

Nota-se que o solo não apresenta partículas do tamanho pedregulho e areia grossa. Há areia média e fina como frações predominantes do material, correspondente a 66% com o uso do defloculante e 72% sem utilizá-lo.

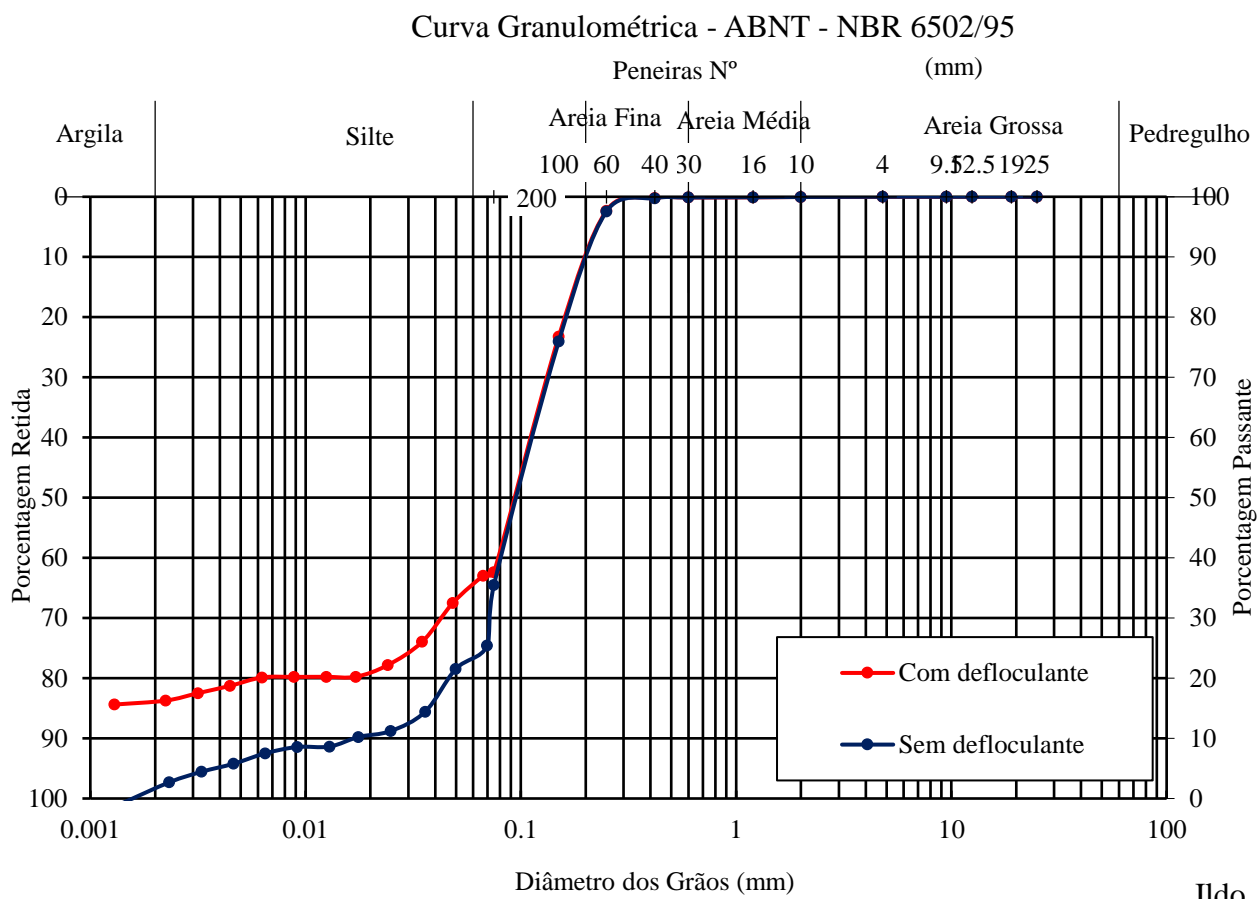
Observa-se que, nos ensaios realizados sem o uso de hexametáfosfato de sódio, o valor médio de argila encontrado foi de 1% enquanto que, nos ensaios com o agente defloculante, a porcentagem média foi de 16%. Tal diferença decorre da formação de grumos (partículas de menor dimensão agrupadas) nos ensaios sem o defloculante.

De posse destes valores, foi calculado o grau de flocculação, correspondente a 93,75%, onde valores próximos de 100% informam agregados de solo mais estáveis. Já, de acordo com a NBR 13602/1996 o grau de dispersão natural do solo foi de 6,25%, caracterizando um solo menos disperso (a determinação deste parâmetro só pode ser realizada para teores de argila ($d < 0,005\text{mm}$) superiores a

12%). A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas do solo com e sem uso de defloculante, obtidas a partir do valor médio.

Conforme a classificação textural, o solo foi classificado como uma areia fina siltosa. Por meio do Sistema Unificado de Solos, o solo possui a classificação SC – areia argilosa e conforme a TRB o solo é descrito como A-4 – solo siltoso com pequena quantidade de material grosso e de argila.

Figura 4.1 - Curvas granulométricas médias com e sem defloculante



A Tabela 4.3 apresenta os índices físicos obtidos nas amostras indeformadas que foram utilizadas nos ensaios de perda de massa, infiltrabilidade, Inderbitzen e cisalhamento direto (JASKULSKI, 2018) e, como parâmetros para moldagem das amostras reconstruídas. Os maiores coeficientes de variação foram obtidos para os valores de grau de saturação, índice de vazios e teores de umidade. De acordo com IAEG (1979), o solo apresenta média porosidade ($35 < n < 45$) e quanto ao grau de saturação é denominado muito úmido ($50\% < S < 80\%$).

Tabela 4.3 - Propriedades índices do solo

Valores	w (%)	Peso específico natural (kN/m ³)	Peso específico aparente seco (kN/m ³)	e	n	S (%)
Média	17,25	17,13	14,65	0,82	0,44	57,34
Valor máximo	23,02	21,87	18,60	1,08	0,52	100,00
Valor mínimo	12,77	15,04	11,10	0,43	0,30	41,80
Desvio Padrão	2,33	0,12	0,12	0,13	0,04	10,73
Coef. de Variação	14	1	1	16	9	19

Obs.: w = teor de umidade; e = índice de vazios; n = porosidade e S = grau de saturação.

4.2 CLASSIFICAÇÃO MCT E MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS

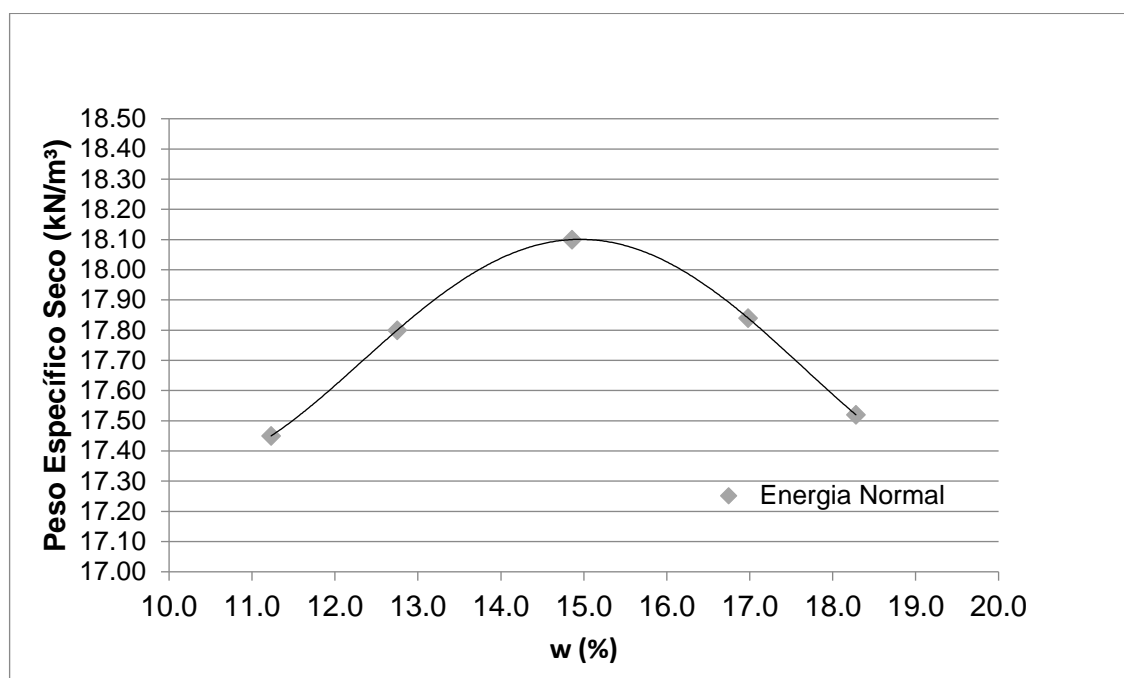
Com a finalidade de melhor identificar e caracterizar os solos tropicais, a Classificação MCT surge como uma nova sistemática de classificação, baseada em ensaios simples (ensaio de compactação Mini-MCV e ensaio de perda de massa por imersão) e de dimensões reduzidas.

A primeira etapa consistiu em realizar o ensaio de compactação Mini-Proctor em amostras de solo com diferentes teores de umidade, com energia de compactação normal (5 golpes em cada lado dos CPs) para obtenção da umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo do material. Foi encontrado um valor máximo da massa específica aparente seca de 18,10 kN/m³ para uma umidade ótima de 14,86%, os demais resultados são demonstrados na Tabela 4.4 e a curva de compactação na Figura 4.2.

Tabela 4.4 - Resultados Compactação Mini - Proctor

	Ramo Seco da Curva			Ramo Úmido da Curva	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Umidade - w (%)	11,23	12,75	14,86	16,98	18,28
Peso Específico Seco Máximo (kN/m³)	17,45	17,80	18,10	17,84	17,52

Figura 4.2 – Curva de Compactação

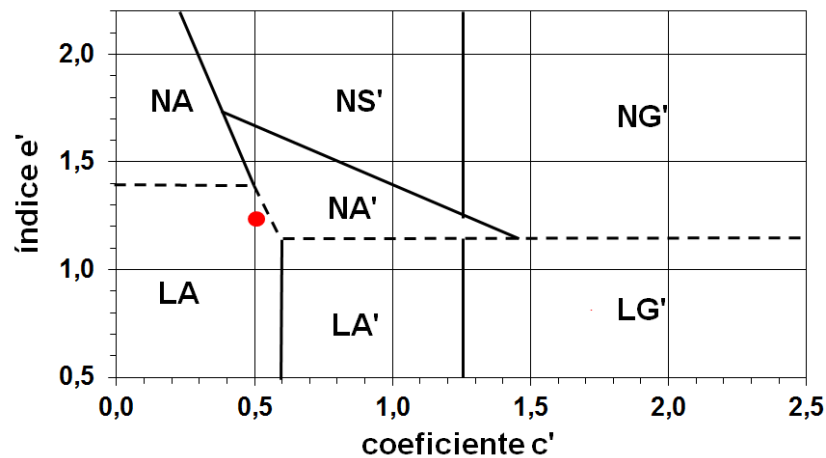


Após a obtenção da umidade ótima do solo, e tendo esta como referência, foram preparadas 5 amostras do material, com teores de umidade variando em torno de 2,0% (valor indicado para areias – 1,5 a 2,0%) de um ponto ao outro, para a realização do ensaio de compactação Mini-MCV e em seguida, o ensaio de perda de massa por imersão. Por meio destes ensaios foram obtidos os índices classificatórios e a classificação MCT do solo, que são apresentados na Tabela 4.5. A Figura 4.3 apresenta o ábaco da classificação MCT com a indicação do solo em estudo.

Tabela 4.5 - Índices para a Classificação MCT

Índices Classificatórios				Classificação MCT
c'	d'	Pi (%)	e'	
0,51	25,00	108,93	1,24	LA

Figura 4.3 - Ábaco da Classificação MCT



Com base nos resultados, o solo apresenta comportamento laterítico do grupo das areias lateríticas (LA), no entanto com valores muito próximos dos limites dos grupos NA' (solo arenoso não laterítico) e LA' (solo arenoso laterítico). Quando o ponto cai sobre uma das proximidades dos limites "L/N" é considerado "L" quando P_i decrescer tendendo a zero, no intervalo Mini-MCV de 10 a 20. Para o caso em estudo, os valores de P_i decresceram de 131,36 a 86,50% tendendo a zero (Tabela 4.6), o que descarta a possibilidade do solo possuir comportamento não laterítico.

Tabela 4.6 - Valores obtidos por meio da curva de perda de massa por imersão (Mini-MCV = $10 \cdot \log B$)

	Por previsão:						
Mini-MCV	15,00	13,80	10,41	7,16	4,31	20,00	10,00
Pi(%)	108,93	114,31%	129,51	255,20	302,89	86,50	131,36

As areias lateríticas possuem como característica a presença de poucos finos, de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente como areias quartzosas e regosolos. Já os solos arenosos lateríticos são tipicamente arenosos, e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e solos podzolizados arenosos (textura média). Estes solos, além de se apresentarem nos matizes vermelho e amarelo, apresentam cortes firmes (pouco ou não erodíveis), nitidamente trincados quando expostos as intempéries.

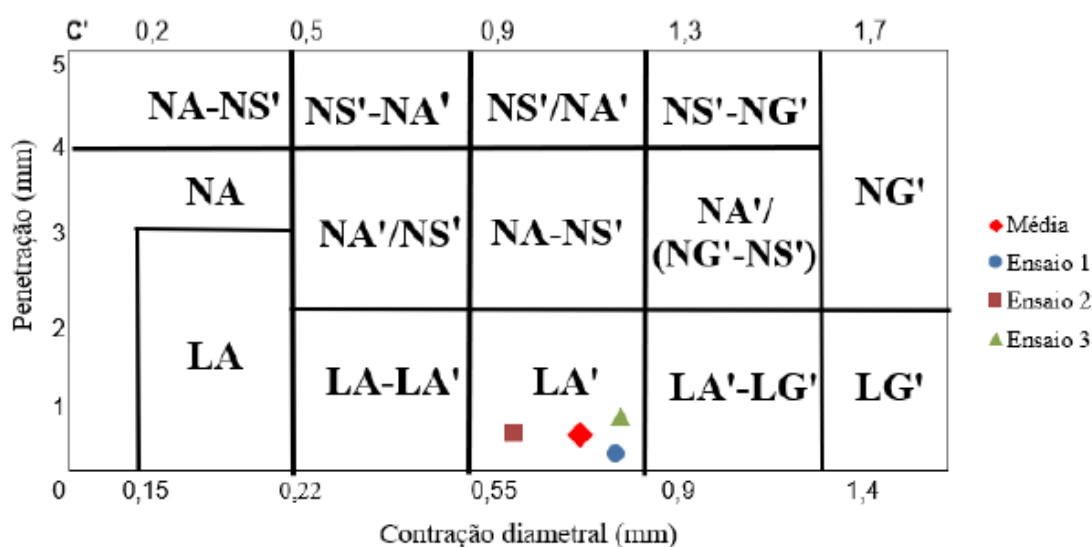
Na classificação do solo por meio do Método Expedito das Pastilhas são realizadas medidas de contração (Cd) e penetração (consistência) das amostras, onde é possível avaliar propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade do solo. A Tabela 4.7 apresenta os valores de contração e penetração resultantes das três repetições do ensaio e a Figura 4.4 ilustra o ábaco de classificação do método das pastilhas. De posse dos índices Cd, c' e Penetração, o solo foi classificado como solo arenoso laterítico (LA').

Com base na Classificação MCT obtida pelo método tradicional e pelo Método das Pastilhas é possível comprovar que apresentaram concordância quanto ao caráter laterítico do solo, sendo o ensaio das pastilhas o procedimento mais simples de determinar o comportamento dos materiais.

Tabela 4.7 - Resultado dos parâmetros obtidos nos ensaios do Método Expedito das Pastilhas

Identificação	Contração (Cd)	c'	Penetração	Classificação
Ensaio 1	0,84	1,25	0,68	LA'
Ensaio 2	0,65	1,01	0,48	
Ensaio 3	0,84	1,24	0,23	
Média	0,78	1,17	0,46	

Figura 4.4 - Ábaco do Método Expedito das Pastilhas



4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A análise química do solo foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solos do Centro de Ciências Rurais (LAS) da UFSM. A caracterização avaliou a presença de elementos químicos, como por exemplo, cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na), a capacidade de troca catiônica (CTC), a saturação por bases e alumínio, quantidade de matéria orgânica (MO) e argila em massa por volume de amostra e ainda o potencial hidrogeniônico (pH) do solo. O resumo dos resultados da análise química é apresentado na Tabela 4.8. O laudo completo da análise química encontra-se no Anexo A.

Tabela 4.8 - Resumo dos resultados da análise química

Cátions básicos				Acidez potencial		CTC efet.	Saturação		(% MO	(% Argila	pH
Ca	Mg	K	Na	Al	H + Al		Al	Bases			
(cmolc/dm ³)						14,2	(%)	(%)	m/v	m/v	4,8
10,9	1,9	0,164	0,00	1,3	3,5		9,2	78,7	0,3	12,0	

O grau de intemperismo do solo é indicado pela quantidade de bases trocáveis de cálcio, magnésio, potássio e sódio (EMBRAPA 2015). O solo em estudo sofreu maior intemperismo, pois as taxas dos elementos citados são nulas a baixas. Teores baixos de potássio também indicam solos mais intemperizados (K < 30 cmolc/dm³).

Quanto a capacidade de troca catiônica efetiva, valores entre 3 cmolc/dm³ e 15 cmolc/dm³ indicam baixo teor de argila ou predominância de argila 1:1, como a caulinita, característica de solos não expansíveis. A saturação por alumínio é inferior a 50%, indicando uma quantidade de alumínio a níveis não tóxicos para plantas, se tratando de um solo não álico. A saturação por bases é superior a 50%, característico de solos eutróficos ou férteis, com reservas de nutrientes (EMBRAPA, 2009).

A porcentagem de matéria orgânica foi considerada baixa (< 2,5%). Solos arenosos que apresentam baixo teor de matéria orgânica e de CTC, têm a propriedade de reter pequenas quantidades de cátions. Nestes solos, as perdas de nutrientes por lixiviação são maiores (GISMONTI, 2012). O percentual de argila encontrado através da análise química foi de 12%, valor semelhante ao encontrado através da análise granulométrica com o uso de defloculante (16%). O valor de pH

obtido foi 4,8 indicando um solo com acidez elevada (EMBRAPA, 2009). Valores de pH situados entre 4 e 5, indicam a presença de alumínio trocável (sua presença no solo pode inibir o crescimento radicular e influenciar na disponibilidade de outros nutrientes e processos como a mineralização da matéria orgânica).

4.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA – AMOSTRA INDEFORMADA X AMOSTRA REMOLDADA

Após a realização dos ensaios de Inderbitzen com amostras indeformadas e remoldadas sem raízes, detectou-se grande perda de material de uma condição para a outra. A fim de entender melhor a influência que a estrutura apresenta no comportamento das amostras, foram produzidas lâminas com o solo nas duas condições (indeformadas e remoldadas com igual densidade e umidade de campo).

A avaliação e interpretação das lâminas foram realizadas com a orientação dos professores do departamento de Geologia da UFSM - Andrea Valli Nummer e Luis Robaina.

A análise da lâmina indeformada de solo (Figura 4.5) mostrou que há predominância de quartzo de várias formas. A presença deste mineral juntamente com outros minerais como o plagioclásio e óxidos, totalizam cerca de 53% do volume modal. Os argilominerais e os vazios compreendem 17 e 30% do volume de amostra, respectivamente. Os vazios são uniformes e espalhados ao longo de toda lâmina. Os grãos apresentam-se nas formas subarredondadas e subangulosas, com arestas definidas. São em geral bem graduados (engenharia) ou mal selecionados (geologia), com contatos longitudinais e côncavos, sendo também comuns contatos flutuantes.

A lâmina remoldada de solo sem raízes (Figura 4.6) apresentou proporções muito semelhantes de minerais e de vazios quando comparada com a lâmina indeformada. Totalizando 52% de minerais (quartzo, plagioclásio e óxido), 18% de argilominerais e 30% de vazios do volume de amostra. Quase todos os espaços vazios foram fechados, restando alguns grandes e isolados ao longo da lâmina. Os grãos apresentam-se quase que exclusivamente do mesmo tamanho, sendo classificados como mal graduados ou bem selecionados. O contato se dá na forma de grãos suturados. Pode-se concluir que ao remoldar a amostra com as condições de campo esta perdeu sua estrutura natural. Foram visualizados grãos de quartzo na

forma triangular, o que não é característico deste mineral, consequência da quebra do grão ao ser compactado. Ao realizar a compactação, a pressão na camada de solo fez com que os grãos fossem comprimidos entre si ocasionando a fragmentação. O processo gerou uma anisotropia das camadas, criando caminhos preferenciais de água, que com o fluxo concentrado arrastam com mais facilidade as partículas de solo.

Figura 4.5 - Lâmina petrográfica indeformada: (a) luz polarizada, aumento 5x e (b) luz polarizada, aumento 10x

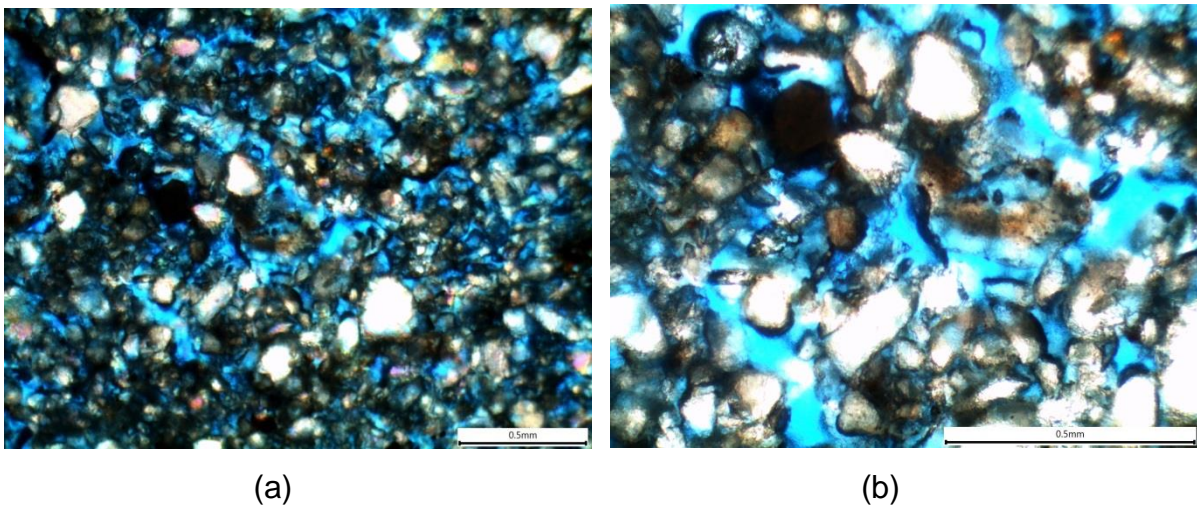
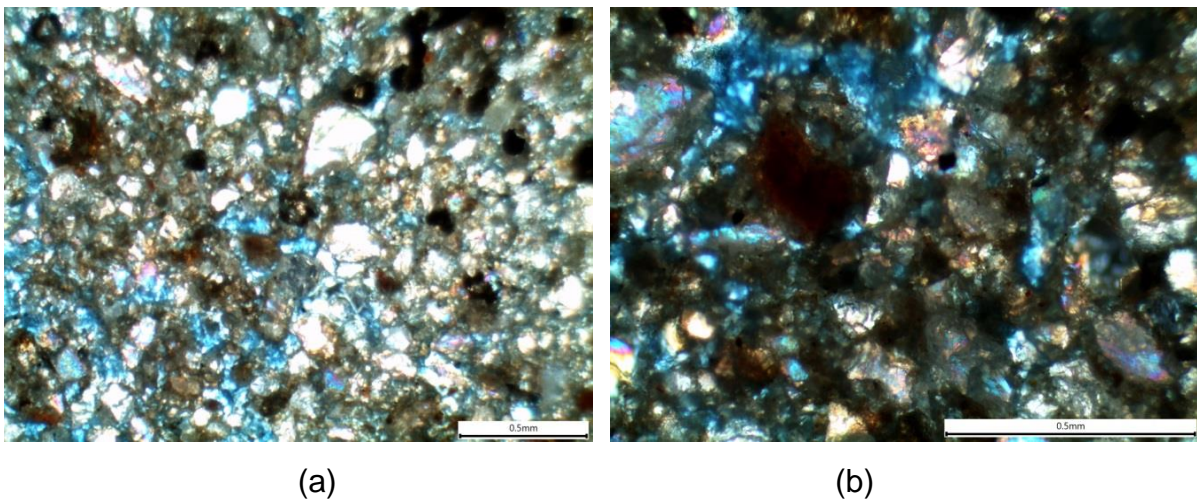


Figura 4.6 - Lâmina petrográfica remoldada: (a) luz polarizada, aumento 5x e (b) luz polarizada, aumento 10x



A alteração na estrutura do solo, ao remoldar as amostras, também foi comprovada na pesquisa realizada por Jaskulski (2018), onde pode avaliar a

influência de raízes de *Zoysia japonica* na resistência ao cisalhamento do mesmo solo arenoso. A autora constatou que as amostras indeformadas e reconstituídas sem raízes obtiveram diferença nos valores de sucção e dos parâmetros de resistência do solo, demonstrando que as amostras não possuíam a mesma estrutura.

4.5 AVALIAÇÃO INDIRETA DA ERODIBILIDADE

A avaliação indireta da erodibilidade foi realizada com base nos principais procedimentos descritos na literatura e apresentadas na revisão bibliográfica e metodologia desta pesquisa (Capítulos 2 e 3).

Os métodos e critérios empregados para avaliação indireta da erodibilidade do solo foram:

- Critérios de erodibilidade baseados no ensaio de cone de laboratório;
- Avaliação do potencial de desagregação do solo;
- Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT.

4.5.1 Critérios de erodibilidade baseados no ensaio de cone de laboratório

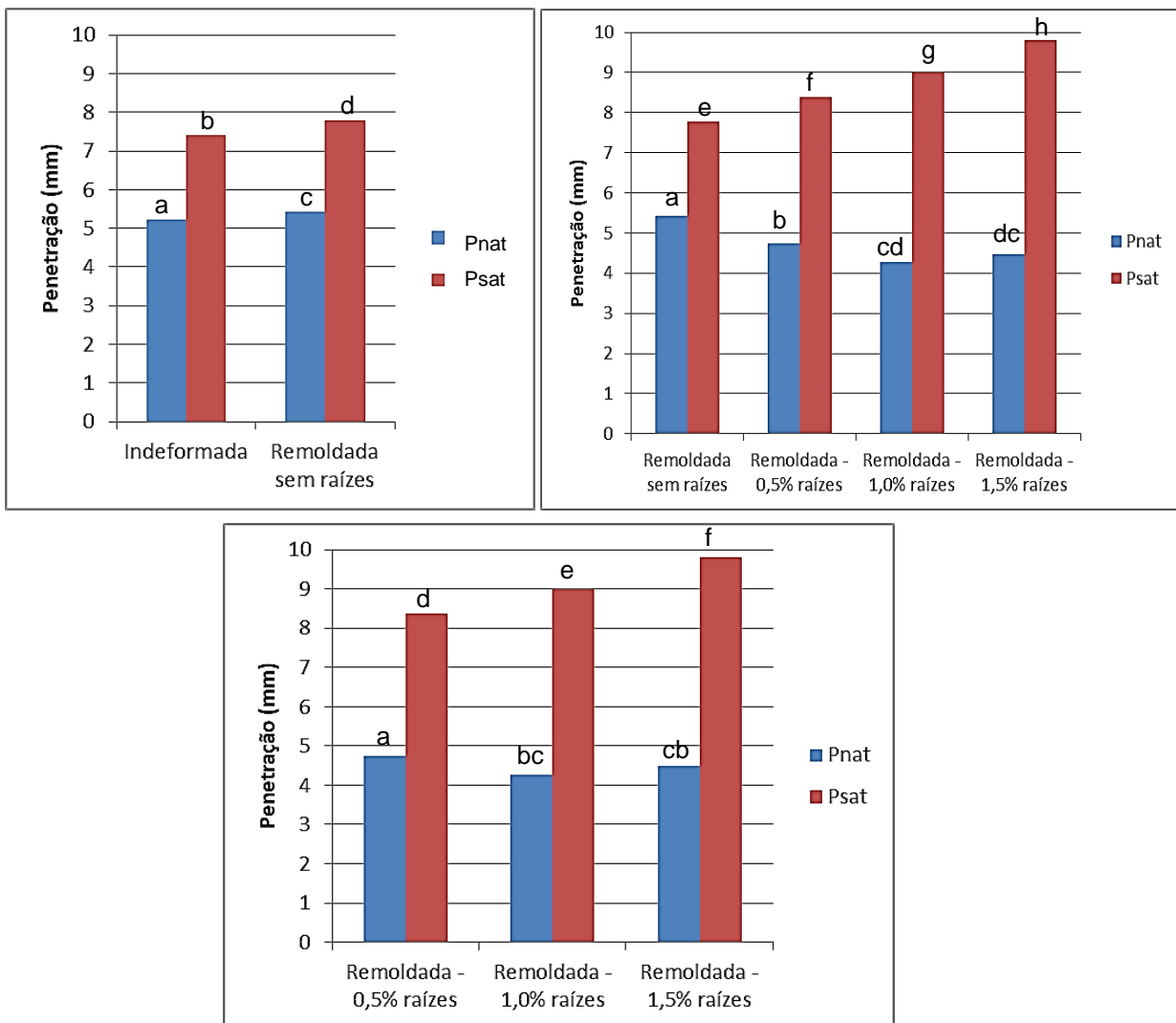
As amostras estudadas foram ensaiadas pelo ensaio de cone de laboratório, com base no estudo realizado por Alcântara (1997) que fez uso deste teste, juntamente com ensaios de resistência à compressão simples e estabilidade de agregados para obter critérios de erodibilidade comparando os resultados obtidos com o comportamento in situ de solos de São Carlos /SP e Salvador/BA.

A metodologia seguiu os procedimentos descritos no Capítulo 3 (item 3.3.5.1). Os dados resultantes são apresentados na Tabela 4.9, expressos em função das profundidades de penetração do cone com amostras em condição de umidade natural (Pnat) e saturada (Psat) que geraram os parâmetros de variação de penetração DP e DPA, definidos por Alcântara (1997). A Figura 4.7 ilustra esses valores.

Tabela 4.9 - Valores de penetração e parâmetros de variação de penetração obtidos nos ensaios de cone de laboratório para as amostras estudadas

Identificação	Valores de Penetração (mm)		Variação de Penetração (%)	
	P nat	P sat	DP	DPA
Indeformada	5,23	7,42	41,95	29,55
Remoldada sem raízes	5,42	7,78	43,54	30,33
Remoldada - 0,5% raízes	4,73	8,38	76,94	43,48
Remoldada - 1,0% raízes	4,27	8,99	110,64	52,53
Remoldada - 1,5% raízes	4,48	9,81	118,87	54,31

Figura 4.7 - Valores de penetração do cone de laboratório obtidos para as amostras estudadas nas condições de umidade natural e pré-umedecida. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro



Pela Figura 4.7 observa-se que há aumento nos valores de penetração nas amostras saturadas. Ao absorver água por ascensão capilar, quanto maior o número de raízes no corpo de prova, maior quantidade de água infiltrava no mesmo. Com este umedecimento houve perda de coesão na amostra e como consequência valores de penetração mais elevados. De acordo com Bastos (1999) a resistência oferecida à penetração do cone de laboratório esta fortemente relacionada à coesão superficial dos solos e a variação desta penetração quando umedecido representa a perda da coesão com a alteração da sucção matricial e com o processo de desagregação do solo pela água.

O contrário aconteceu nas amostras com condição de umidade natural, houve decréscimo nos valores de penetração já que a presença de raízes deixou os corpos de prova mais resistentes quando comparados com as amostras indeformadas e remoldadas sem raízes.

Para todos os tipos de amostras a condição de umidade foi fator de influência na variação dos valores de penetração, explicando 99,14% dessa alteração nas amostras indeformadas, 97,83% nas amostras remoldadas sem raízes, 99,11%, 99,48% e 99,59% nas amostras remoldadas com 0,5%, 1,0% e 1,5% de raízes, respectivamente.

Ao comparar as amostras indeformadas com as amostras remoldadas sem raízes, os valores de penetração mostraram-se significativos de um grupo para o outro apenas na condição de umidade saturada (Apêndice C – Itens 1 e 2).

Na comparação das amostras reconstruídas sem raízes e amostras com diferentes taxas de raízes a análise estatística mostrou que a quantidade de raízes explica 89,90% da variação nos valores de penetração na condição de umidade natural e 94,17% na condição saturada. A análise ainda revela que na condição de umidade natural e saturada, os valores de penetração são significativos nas amostras remoldadas sem raízes em comparação com os valores das amostras nas taxas de 0,5%, 1,0% e 1,5% de raízes (Apêndice C – Itens 3 e 4).

Comparando-se apenas as amostras remoldadas com diferentes densidades de raízes nas duas condições de umidade, o estudo estatístico expressa que os valores de penetração são diferentes nas amostras remoldadas com 1,0% e 1,5% de raízes quando comparadas com amostras de 0,5% de raízes e ainda entre si. Porém não houve significância nos valores de penetração entre as taxas 1,0% e 1,5% na

condição de umidade natural, ou seja, a diferença de quantidade de raízes não influenciou nos resultados (Apêndice C – Itens 5 e 6).

Ao analisar os valores de DP (%) (Figura 4.8) e DPA (%) (Figura 4.9) para todos os grupos de amostras, estas são classificadas como de alta erodibilidade segundo classificação de Alcântara (1997).

Figura 4.8 - Resultados dos DP (%) obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nas amostras estudadas

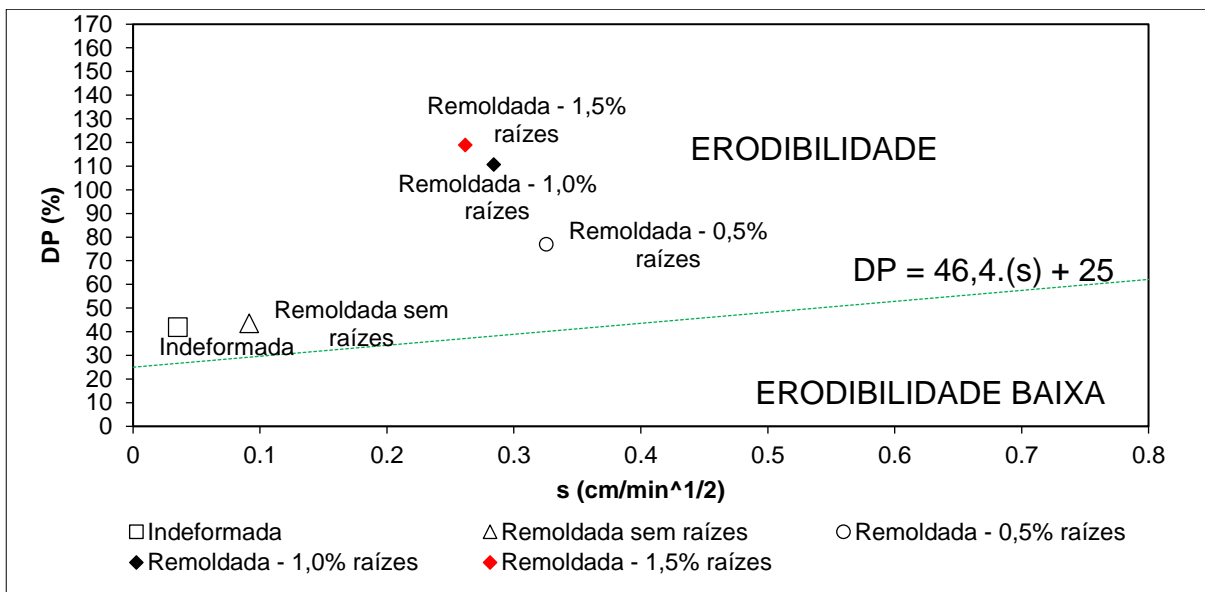
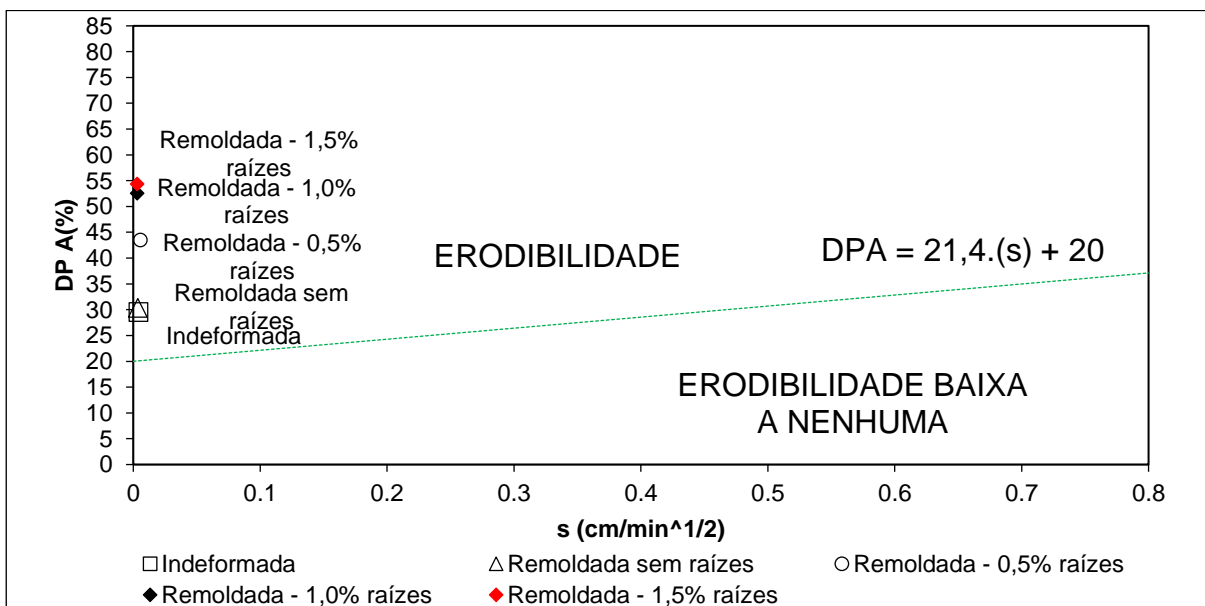


Figura 4.9 - Resultados dos DPA (%) obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nas amostras estudadas



4.5.2 Avaliação do potencial de desagregação do solo

Através do ensaio de desagregação é possível realizar uma análise qualitativa da erodibilidade do solo. Foram utilizadas amostras indeformadas, amostras remoldadas sem raízes e amostras remoldadas com raízes nas densidades de 0,5%, 1,0% e 1,5% (área das raízes por área de corpo-de-prova), totalizando respectivamente 200, 400 e 600 raízes por CP, nas condições de umidade natural e seca ao ar por 72 horas. O comportamento das amostras foi analisado visualmente, descrito e registrado por meio de fotografias enquanto a frente de ascensão capilar avançava.

A Tabela 4.10 apresenta a descrição do comportamento das amostras nas duas condições de umidade e o resultado final do ensaio para cada um dos estados descritos acima.

Tabela 4.10 - Resultado dos ensaios de desagregação

Identificação	Condição inicial	Comportamento apresentado durante o ensaio	Comportamento final
Amostra indeformada	Natural	Inchamento da amostra, desagregação lenta e nas laterais, raio de dispersão das partículas de solo próximo ao CP. Surgimento de rachaduras no topo da amostra.	Parcialmente desagregada
	Seca ao ar	A ascensão capilar chegou ao topo aos 18 min de ensaio, houve inchamento da amostra, desagregação de material nas laterais, dispersão das partículas de solo muito próximas ao CP. Surgimento de rachaduras no topo da amostra.	Parcialmente desagregada
Amostra remoldada sem raízes	Natural	Abatimento (esfarelamento) da base da amostra aos 31 min. Ruptura das bordas laterais e superior. Desagregação total da amostra com raio de dispersão das partículas em torno de 6,0 cm do CP.	Totalmente desagregada
	Seca ao ar	Aos 16 min de ensaio a ascensão de água chegou ao topo da amostra. Houve inchamento do CP e início do abatimento da base aos 43 min de ensaio. Ocorrência de rupturas laterais inferiores com raio de dispersão de até 5,0 cm. Rachaduras no topo da amostra. CP parcialmente destruído.	Parcialmente desagregada
Amostra remoldada - 0,5% de raízes	Natural	Aos 34 min de ensaio começaram surgir as primeiras fissuras no topo da amostra com posterior abatimento das bordas superiores. Ocorrência de ruptura nas bordas inferiores com raio de dispersão das partículas de solo até 5,0 cm. CP totalmente destruído.	Totalmente desagregada

	Seca ao ar	Aos 15 min de ensaio a ascensão de água chegou ao topo da amostra. Nos 32 min iniciou desprendimento de material e inchamento da base com posterior surgimento de trincas. A desagregação do material se deu a medida que aumentava o nível d'água. Ao final, ruptura nas laterais com raio de dispersão das partículas de solo até 5,0 cm. CP parcialmente destruído.	Parcialmente desagregada
Amostra remoldada - 1,0% de raízes	Natural	Aos 36 minutos de ensaio começaram surgir as primeiras trincas no topo da amostra com posterior abatimento das bordas superiores. Ocorrência de rupturas laterais inferiores com raio de dispersão de até 5,0 cm. CP totalmente destruído.	Totalmente desagregada
	Seca ao ar	Aos 14 min de ensaio a ascensão de água chegou ao topo da amostra. Aos 32 min iniciou desprendimento de material da base do CP com posterior surgimento de trincas. Ocorrência de rupturas laterais com raio de dispersão de até 4,5 cm. Amostra parcialmente destruída.	Parcialmente desagregada
Amostra remoldada - 1,5% de raízes	Natural	Aos 44 min de ensaio surgiram as primeiras trincas no topo da amostra com posterior ruptura de borda superior. Ruptura das bordas laterais e desprendimento de material ao longo do tempo de ensaio com raio de dispersão das partículas em torno de 4,5 cm. CP parcialmente destruído.	Parcialmente desagregada
	Seca ao ar	Aos 11 min de ensaio a ascensão de água chegou ao topo da amostra. O desprendimento de material sem deu a medida que o nível d'água era elevado. Nos 58 min começaram surgir rachaduras no topo da amostra com posterior rompimento de borda superior e bordas laterais com raio de dispersão das partículas em torno de 3,5 cm. CP parcialmente destruído.	Parcialmente desagregada

A ascensão capilar de água foi visualizada mais facilmente nas amostras com condição seca ao ar já que, as amostras na condição de umidade natural apresentavam-se bastante úmidas. As demais considerações de ensaio foram de fácil visualização (abatimento e inchamento da amostra, raio de dispersão das partículas, formação de fissuras no topo e ruptura nas bordas).

As amostras indeformadas mostraram-se mais resistentes frente à inundação, tanto para umidade natural quanto seca ao ar, havendo pouca alteração na sua estrutura não confinada, após o término de ensaio. O mesmo não foi verificado para as amostras remoldadas sem e com raízes em três densidades diferentes, demonstrando elevado poder de desagregação sem resistir a inundação completa. Como exposto pela análise mineralógica das lâminas de solo, ficou comprovado que

as amostras remoldadas perderam sua estrutura original, tendo total influência nos resultados frente à erodibilidade.





Observa-se que as condições nas quais se encontram, natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência no teste para estas amostras, pois em ambas as condições, as amostras apresentaram uma quase ou completa desagregação, formando uma pilha de material desestruturado.










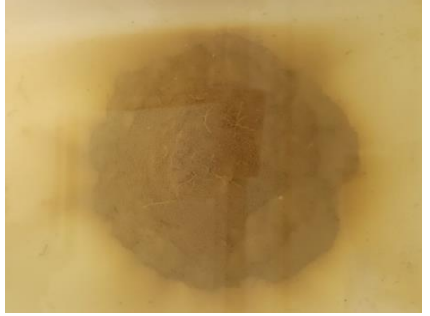
Ao comparar as amostras remoldadas com diferentes densidades de raízes entre si, na condição seca ao ar, observou-se que o raio de dispersão das partículas de solo era menor e que a ascensão capilar se deu de forma mais rápida quanto maior era a quantidade de raízes no corpo de prova. Em ambas as condições de umidade, o aparecimento de fissuras, abatimento e desagregação era mais lento à medida que esse número também aumentava.



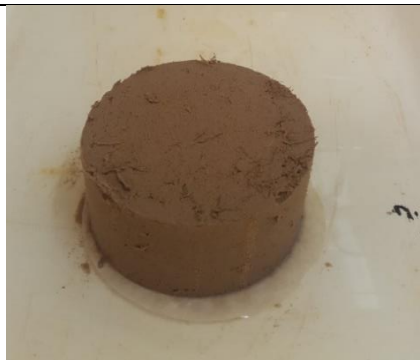



Na comparação entre as amostras de diferentes densidades de raízes com as amostras sem raízes, independente das condições de umidade, verifica-se que apenas a amostra com densidade 1,5% (600 raízes) apresentou leve progresso de comportamento em relação a estas.

A Figura 4.10 apresenta a comparação entre os ensaios realizados nas amostras.

Figura 4.10 - Comportamento inicial e final das amostras quando submetidas à inundação

Identificação	Comportamento inicial	Comportamento final
Amostra indeformada - Natural		
Amostra indeformada - Seca ao ar		

<p>Amostra remoldada sem raízes - Natural</p>		
<p>Amostra remoldada sem raízes – Seca ao ar</p>		
<p>Amostra remoldada (0,5% de raízes) – Natural</p>		
<p>Amostra remoldada (0,5% de raízes) – Seca ao ar</p>		
<p>Amostra remoldada (1,0% de raízes) - Natural</p>		

<p>Amostra remoldada (1,0% de raízes) – Seca ao ar</p>		
<p>Amostra remoldada (1,5% de raízes - Natural</p>		
<p>Amostra remoldada (1,5% de raízes) – Seca ao ar</p>		

De acordo com Bastos (1999), este ensaio não verifica uma relação com níveis intermediários e baixos de erodibilidade já que, apenas solos de alta erodibilidade irão desagregar totalmente durante a execução do ensaio.

4.5.3 Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT

As Tabelas 4.11 a 4.15 apresentam os resultados dos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica por meio dos coeficientes de sorção (s) e perda de massa (π), gerando o quociente π/s .

Tabela 4.11 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras indeformadas - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Amostra Indeformada	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,033	0,458	13,86	0,046	28,05	609,82	0,004	0,57	117,50
2	0,039	1,228	31,48	0,091	25,59	281,17	0,003	0,89	234,62
3	0,033	9,338	282,98	0,091	20,59	226,28	0,003	1,20	362,50
Média	0,035	3,675	104,99	0,076	24,74	325,57	0,004	0,89	222,32

Tabela 4.12 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas sem raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Amostra Remoldada sem raízes	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,110	83,92	762,86	0,245	21,94	89,56	0,002	21,70	9686,54
2	0,059	84,82	1437,61	0,235	43,37	184,56	0,005	9,64	2095,82
3	0,105	78,68	749,33	0,102	27,69	271,47	0,004	15,06	4301,55
Média	0,0913	82,47	902,97	0,194	31,00	159,80	0,003	15,46	4486,85

Tabela 4.13 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas com 0,5% de raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Amostra Remoldada - 0,5% de raízes	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,358	81,07	226,44	0,158	73,02	462,13	0,008	62,53	7815,91
2	0,385	75,67	196,54	0,178	66,27	372,32	0,005	69,08	13816,79
3	0,233	76,92	330,14	0,162	65,72	405,65	0,003	67,45	19836,94
Média	0,325	77,89	239,40	0,166	68,34	411,66	0,005	66,35	12137,61

Tabela 4.14 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas com 1,0% de raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Amostra Remoldada - 1,0% de raízes	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/ min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,336	72,77	216,58	0,058	51,96	892,26	0,002	57,53	25682,02
2	0,325	74,67	229,76	0,028	70,11	2518,45	0,003	51,27	17802,83
3	0,191	59,90	313,64	0,035	63,32	1819,51	0,004	61,52	15739,83
Média	0,284	69,12	243,37	0,040	61,80	1533,77	0,003	56,77	18864,57

Tabela 4.15 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda de massa por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras remoldadas com 1,5% de raízes - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Amostra Remoldada - 1,5% de raízes	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,232	58,95	253,94	0,048	50,16	1050,3	0,003	55,35	21965,89
2	0,271	62,98	232,01	0,051	46,39	907,4	0,003	51,57	19100,46
3	0,281	59,49	211,82	0,048	41,68	861,8	0,003	57,28	17679,06
Média	0,261	60,47	231,27	0,049	46,08	938,8	0,003	54,74	19409,62

Verifica-se que para as amostras indeformadas, na condição de umidade seca ao ar os valores de coeficiente de sorção e perda de massa foram mais elevados quando comparados com a condição pré-úmida. Para este tipo de amostra, a análise estatística mostrou que a condição de umidade é responsável por 85,06% da variação dos valores de coeficiente de sorção e 92,94% da variação dos valores de perda de solo.

Ao comparar as amostras indeformadas com as amostras remoldadas sem raízes, observa-se o aumento acentuado nos valores de perda de massa da primeira para a segunda situação na condição de umidade natural e pré-umedecida. Constatou-se que a estrutura é responsável por 99,25% e 81,34% dos resultados de perda de massa nessas condições. Nos valores de coeficiente de sorção a estrutura não teve influência sobre os resultados (Apêndice E – Itens 1, 2 e 3 e Apêndice G – Itens 1,2 e 3).

Para as amostras remoldadas sem raízes e remoldadas com raízes nas taxas de 0,5%, 1,0% e 1,5%, os valores de perda de massa se mostraram maiores na condição de umidade natural. Os valores de coeficiente de sorção também foram mais elevados nesta condição, exceto para as amostras remoldadas sem raízes, sendo mais alto na condição seca ao ar. O estudo estatístico mostrou que a condição de umidade explica 95,58% da perda de solo no grupo das amostras remoldadas, 75,94% nas amostras com 0,5% de raízes e 83,43% nas amostras com 1,5% de raízes. No grupo de amostras com 1,0% de raízes a condição de umidade não foi um fator de influência para os valores de perda de massa. Para as diferenças nos valores de coeficiente de sorção, nas amostras remoldadas sem raízes e com raízes nas taxas de 0,5%, 1,0% e 1,5% a condição de umidade foi responsável por

79,20%, 91,98%, 91,16% e 98,84% destes valores, respectivamente (Apêndice E – Itens 4,5 e 6 e Apêndice G – Itens 4, 5 e 6).

Ao comparar apenas amostras com raízes, observa-se a diminuição dos valores de perda de solo à medida que houve aumento no número de raízes. Porém esses valores só foram significativos ao comparar amostras com 0,5 e 1,5% para qualquer condição de umidade. A taxa intermediária de 1,0% de raízes não difere dos resultados obtidos nas outras duas taxas. Para os valores de coeficiente de sorção, a quantidade de raízes não foi fator de importância nos resultados alcançados nas condições de umidade natural e pré-umedecida. Nessas condições, as três taxas de raízes apresentaram resultados de mesma ordem de grandeza. Já na condição de umidade seca ao ar, o número de raízes tem 97,56% de influência sobre as respostas, e apenas a taxa de 1,0% de raízes não difere de 1,5%, as outras combinações diferem entre si (Apêndice E – Itens 7, 8 e 9 e Apêndice G – Itens 7, 8 e 9).

Conclui-se que apesar de valores muito próximos de perda de massa ou de coeficiente de sorção para alguns grupos de amostras, a classificação quanto ao comportamento frente à erosão se dá pela relação entre π e s . Todos os cinco grupos, nas três distintas condições de umidade foram classificados como erodíveis já que π/s foi superior a 52. Este parecer também foi descrito por Bastos (1999) e comprovado por Fernandes J. (2011), Basso (2013) e Fernandes L. (2015). Segundo Bastos et al. (2000), a variação da razão entre as grandezas que representam estas propriedades (π/s) é que determinam qualquer mudança na avaliação de erodibilidade pelo critério proposto por Nogami e Villibor (1979).

Da Figura 4.11 a Figura 4.15, apresentam-se as curvas médias do volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo e a velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s). De acordo com Burgos e Vilar (2005) as curvas velocidade de infiltração pelo tempo podem fornecer uma estimativa da permeabilidade saturada dos solos.

Figura 4.11 - (a) volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras indeformadas

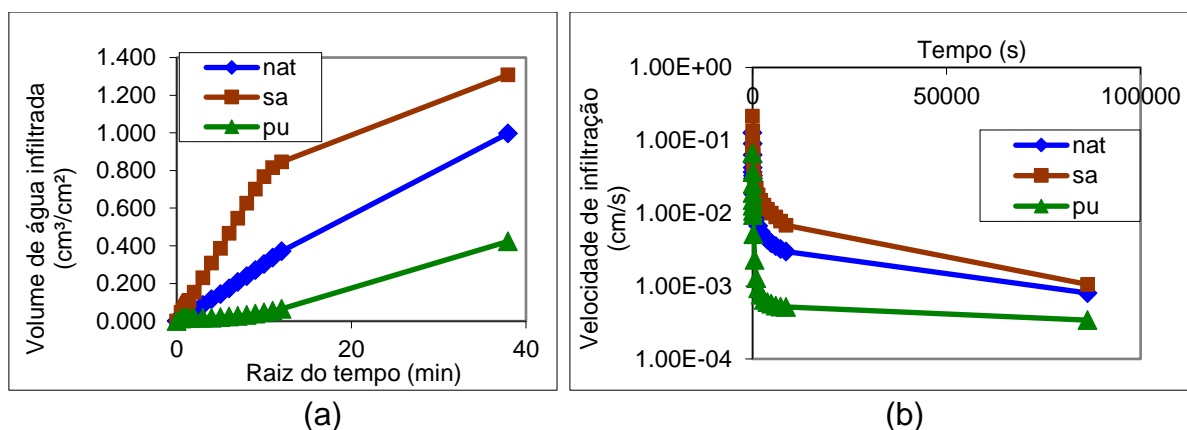


Figura 4.12 - (a) volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas sem raízes

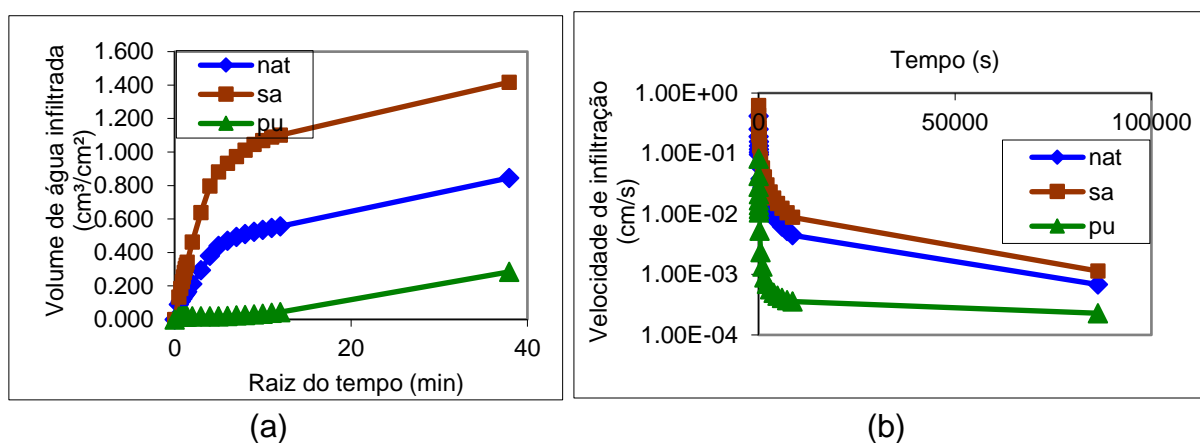


Figura 4.13 - (a) volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas com 0,5% de raízes (50 raízes)

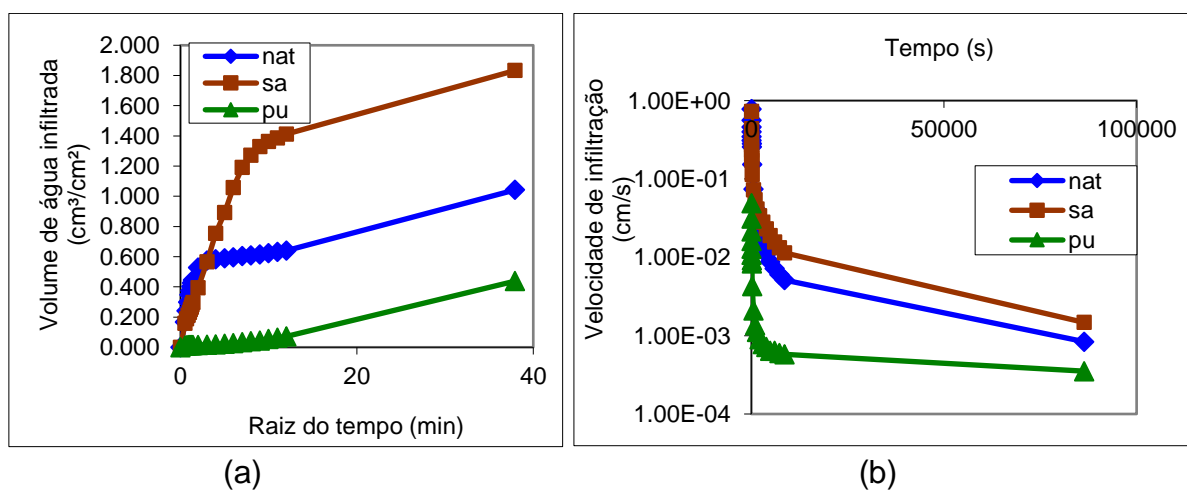
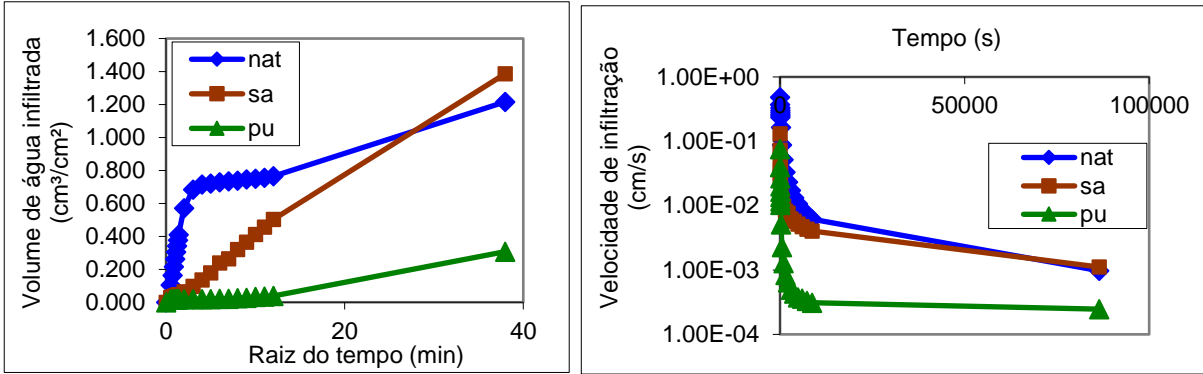
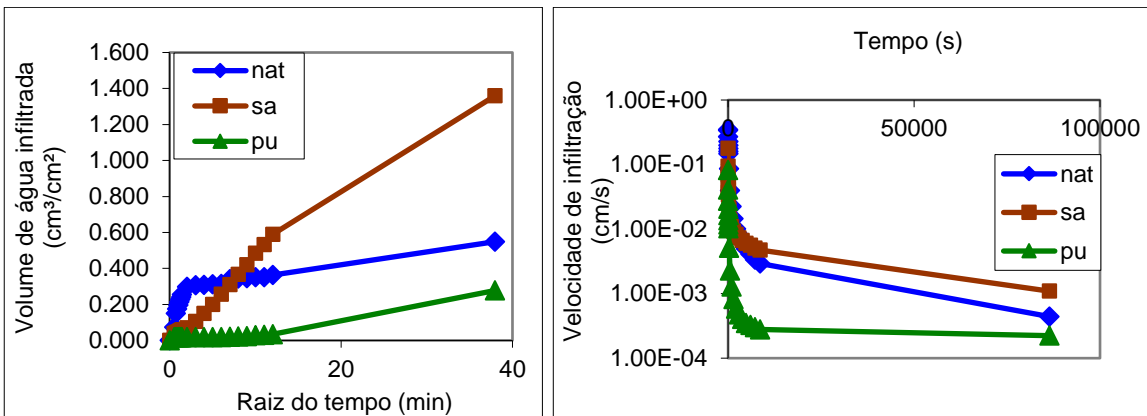


Figura 4.14 - (a) volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas com 1,0% de raízes (100 raízes)



(a) (b)

Figura 4.15 - (a) volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras remoldadas com 1,5% de raízes (150 raízes)



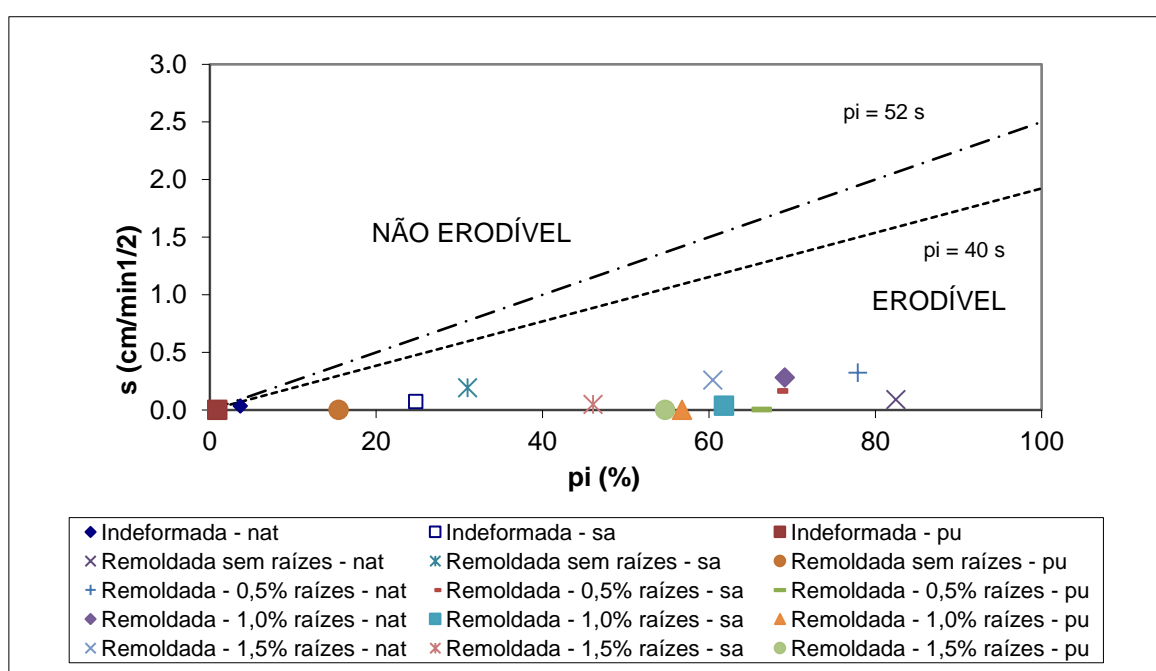
(a) (b)

As amostras pré-umedecidas apresentaram uma diminuição na velocidade de ascensão capilar cerca de três vezes menores que na condição seca ao ar para todas as amostras. Os picos de volume de água infiltrada se deram entre aproximadamente 5 a 10 minutos de ensaio. Na condição de umidade natural, a quantidade de água absorvida pelos corpos de prova foi maior a medida que o número de raízes aumentava. O contrário também foi observado na condição pré-umedecida, em que a dose de água infiltrada foi menor à medida que aumentava a quantidade de raízes. Tal situação decorre do fato da amostra ser submetida a ascensão capilar de água durante 24 horas antes do ensaio, em que esta absorvia maior quantidade de água quanto maior era a parcela de raízes e ao ir para o ensaio

propriamente dito, menor quantidade de água era infiltrada por estar praticamente saturada.

A aplicação do critério de erodibilidade MCT para as amostras ensaiadas está apresentada na Figura 4.16. É visível no ábaco a susceptibilidade a erosão de todas as amostras, com valores bastante distantes das retas limitantes de comportamento $\pi/s = 52$ e $\pi/s = 40$.

Figura 4.16 - Aplicação do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para as amostras estudadas.



A Figura 4.17 e a Figura 4.18 apresentam graficamente a variação da perda de massa por imersão e o do coeficiente de sorção para as três condições de umidade dos grupos de amostras. A Figura 4.19 mostra as relações π/s onde valores extremos foram verificados nas amostras pré-umedecidas com raízes.

Figura 4.17 – Variação da perda de massa por imersão para as três condições de umidade das amostras. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro

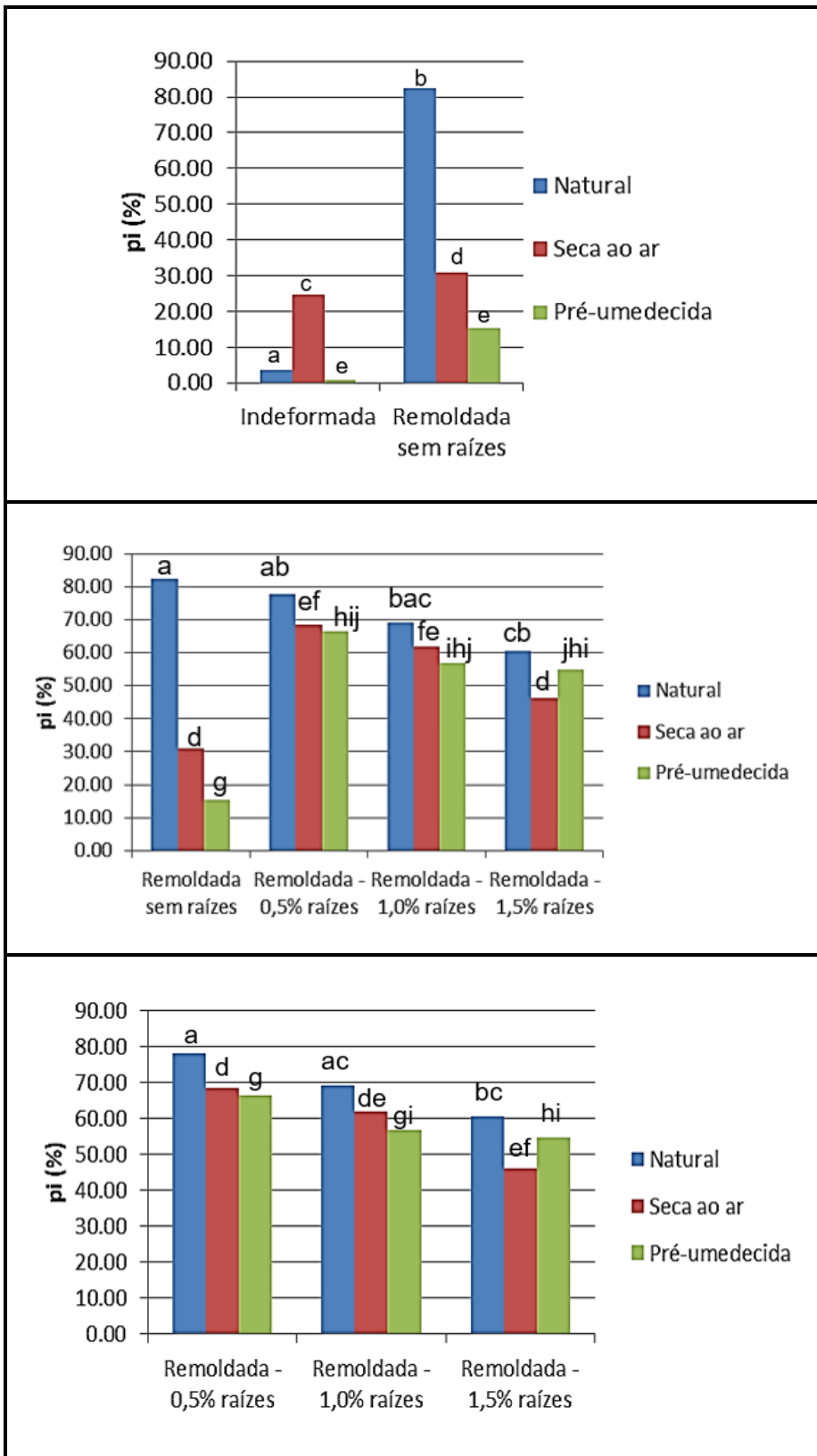


Figura 4.18 - Variação do coeficiente de sorção para as três condições de umidade das amostras. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro

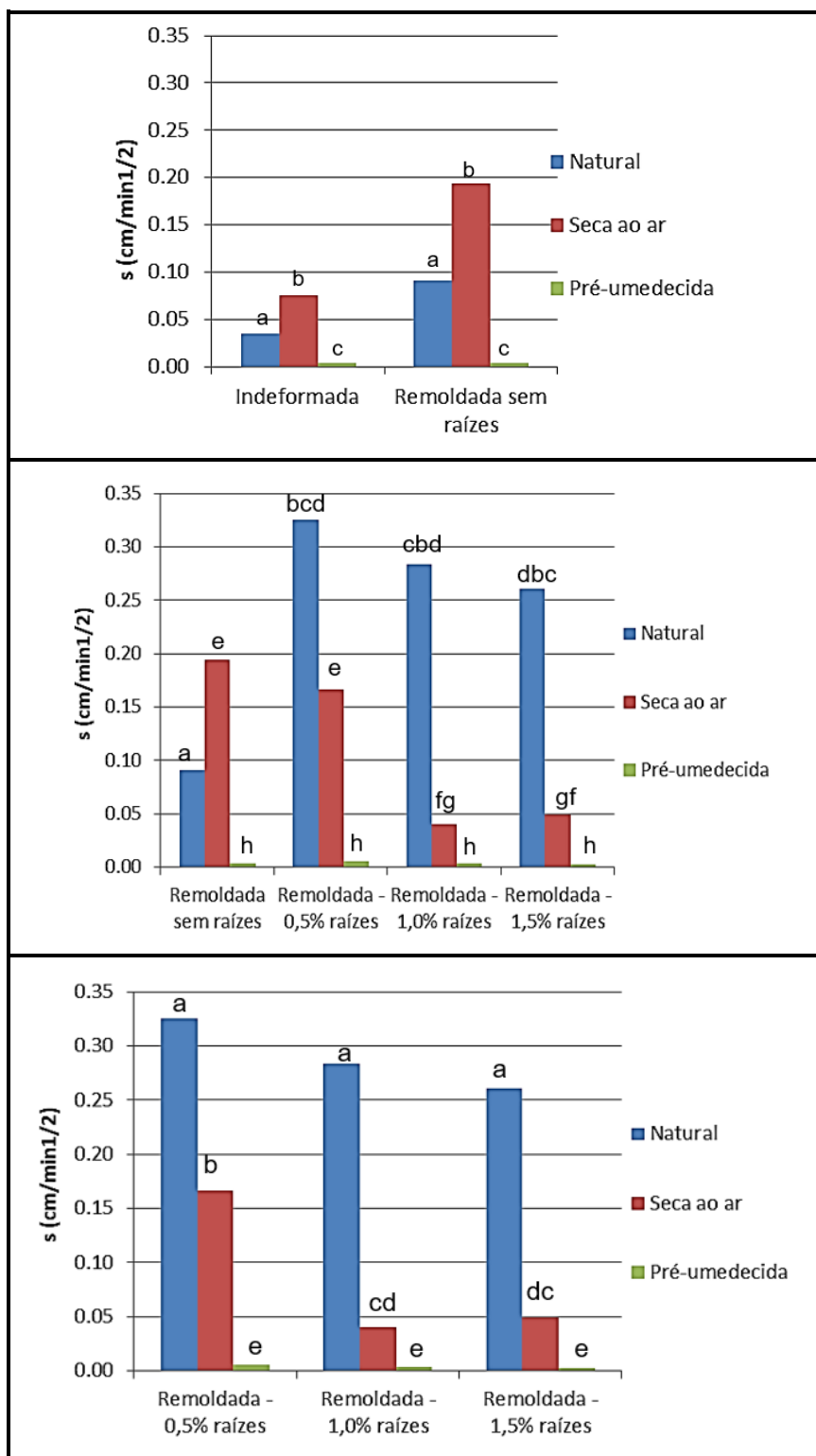
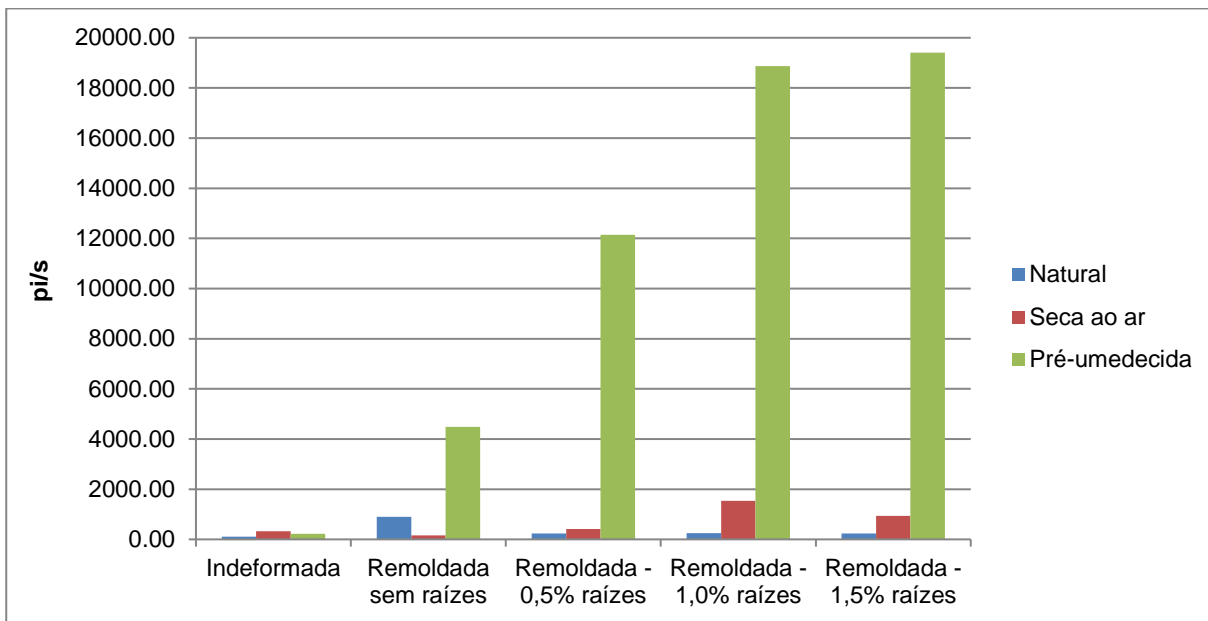


Figura 4.19 - Relação pi/s em função da umidade das amostras



A metodologia MCT demonstrou boa relação e correspondência com os resultados obtidos e observados nos ensaios de desagregação e cone de laboratório, comprovando sua aplicabilidade nesta pesquisa.

4.6 AVALIAÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE – ENSAIO DE INDERBITZEN

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados em termos de perda de solo (desagregação) por unidade de área (g/cm^2) pelo tempo de ensaio (min), conforme apresentado no item 3.3.6. Para cada condição específica de escoamento de água e inclinação de rampa determina-se a tensão hidráulica aplicada no ensaio (τ_h).

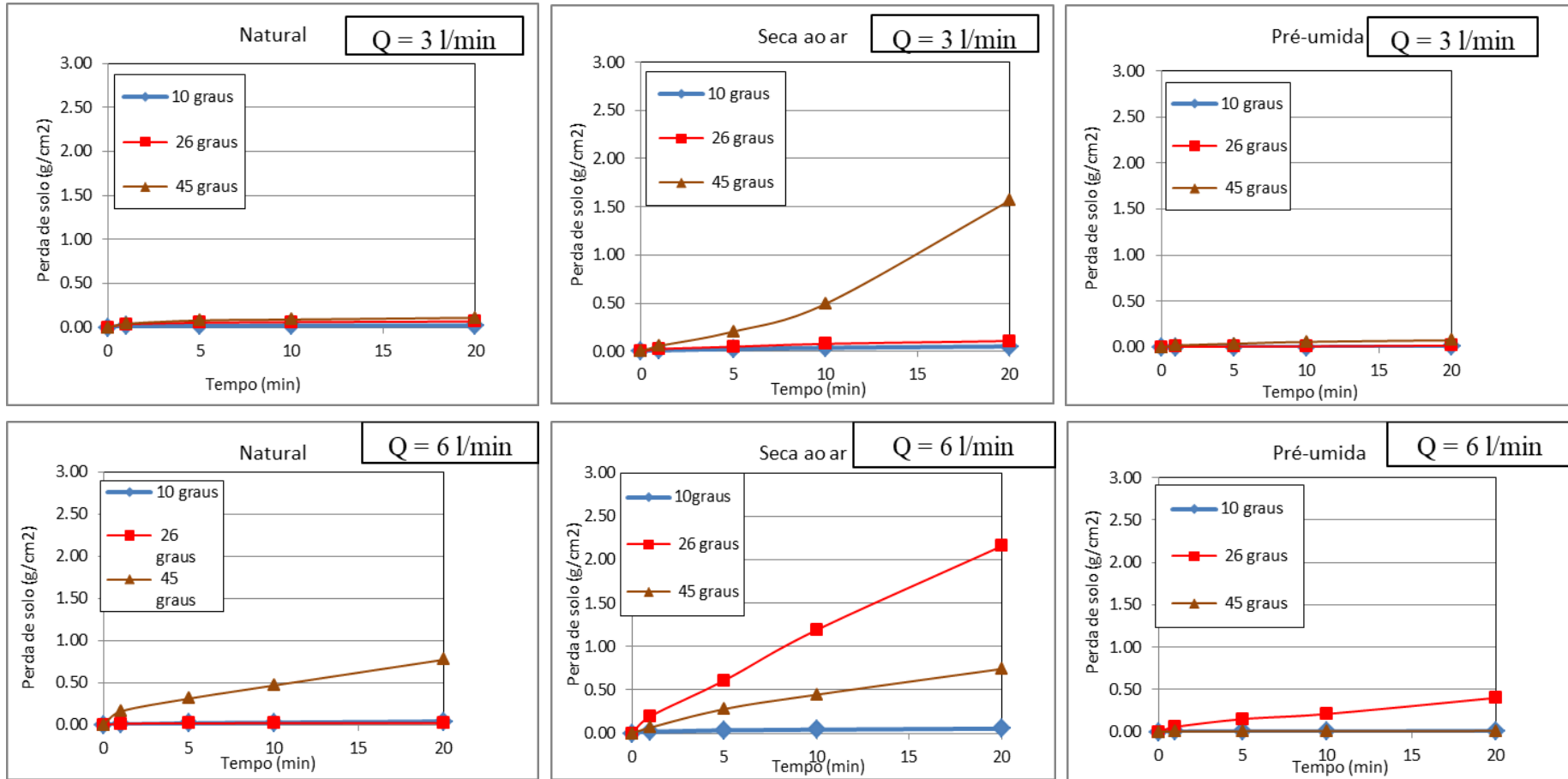
A partir dos resultados de perda de solo por unidade de área da amostra, pelo tempo de ensaio plotados versus tensão hidráulica aplicada, determina-se a tensão cisalhante hidráulica crítica ($\tau_{h_{crit}}$) e a taxa de erodibilidade (K).

Na literatura sobre o tema, uma dúvida em relação à análise dos resultados de ensaios de Inderbitzen é a determinação do tempo adequado para o ensaio. Este tempo é fundamental para o cálculo das taxas de erosão. Foi adotado o tempo de 10 minutos de ensaio conforme cita as observações de Bastos (1999) sobre este tempo padrão:

O tempo para estabilização da erosão na amostra varia muito com o solo ensaiado e com as condições de fluxo do ensaio. Em consequência, os resultados obtidos também diferem muito em função do tempo adotado para o cálculo das taxas de erosão. O uso de um valor mínimo do tempo de ensaio (p.ex. $t = 1\text{min}$) para o cálculo da máxima taxa de erosão tende a superestimar a erodibilidade dos solos, pois neste pequeno intervalo de tempo toma muita importância o efeito dinâmico da primeira “onda de fluxo”, isto é, o impacto da primeira frente de fluxo que percorre o canal hidráulico atingindo a amostra. Por outro lado, com o emprego de um tempo muito longo para cálculo das taxas de erosão, amostras de certos solos muito erodíveis descaracterizam-se durante o ensaio (com abertura de profundos sulcos e buracos) e, portanto, tem os resultados influenciados pela substancial alteração na regularidade de fluxo superficial sobre a amostra. Considerando estes aspectos, foi adotado o valor de $t = 10\text{min}$ como tempo padrão para o cálculo das taxas de erosão, ciente dos parciais efeitos da “onda de fluxo” inicial e da descaracterização das amostras dos solos mais erodíveis. (BASTOS, 1999, p.189).

As Figuras 4.20 a 4.24 apresentam a relação entre a perda de solo por unidade de área da amostra pelo tempo de ensaio para as amostras indeformadas, remoldadas sem raízes, remoldadas com 0,5, 1,0 e 1,5% de raízes, para as condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida, nas vazões de 3 e 6 l/min.

Figura 4.20 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras indeformadas

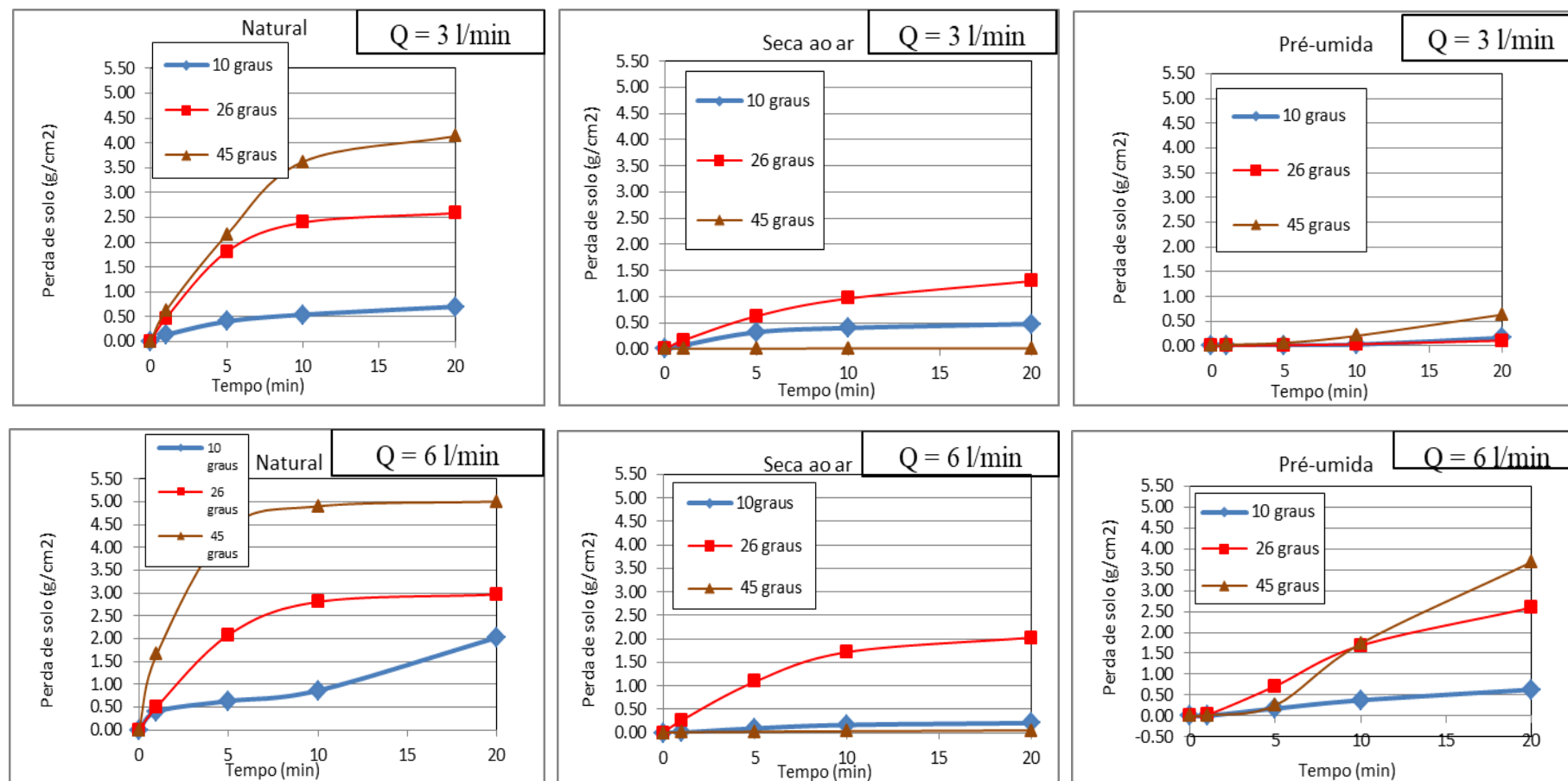


(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

Figura 4.21 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas sem raízes

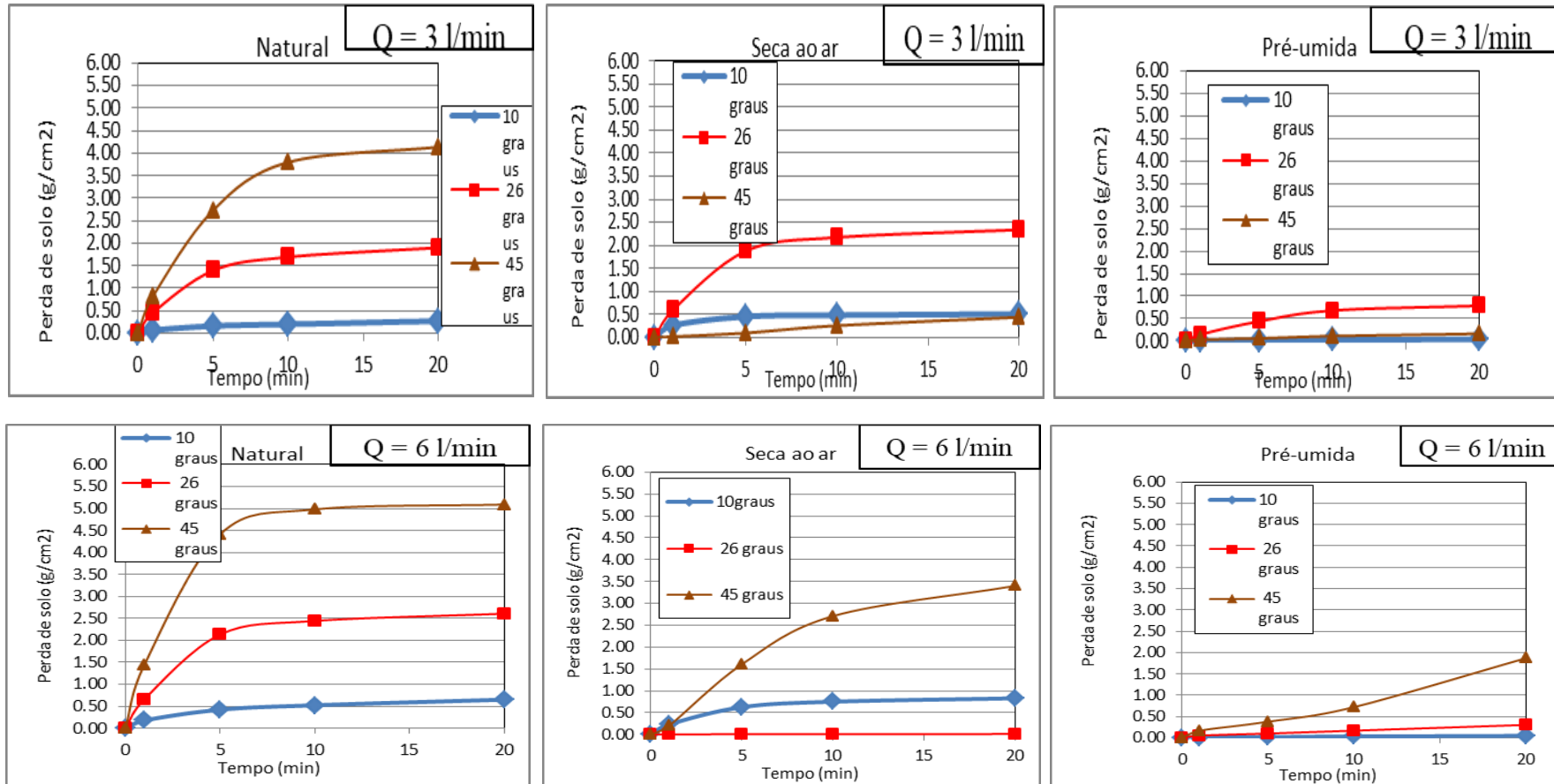


(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

Figura 4.22 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas com 0,5% de raízes

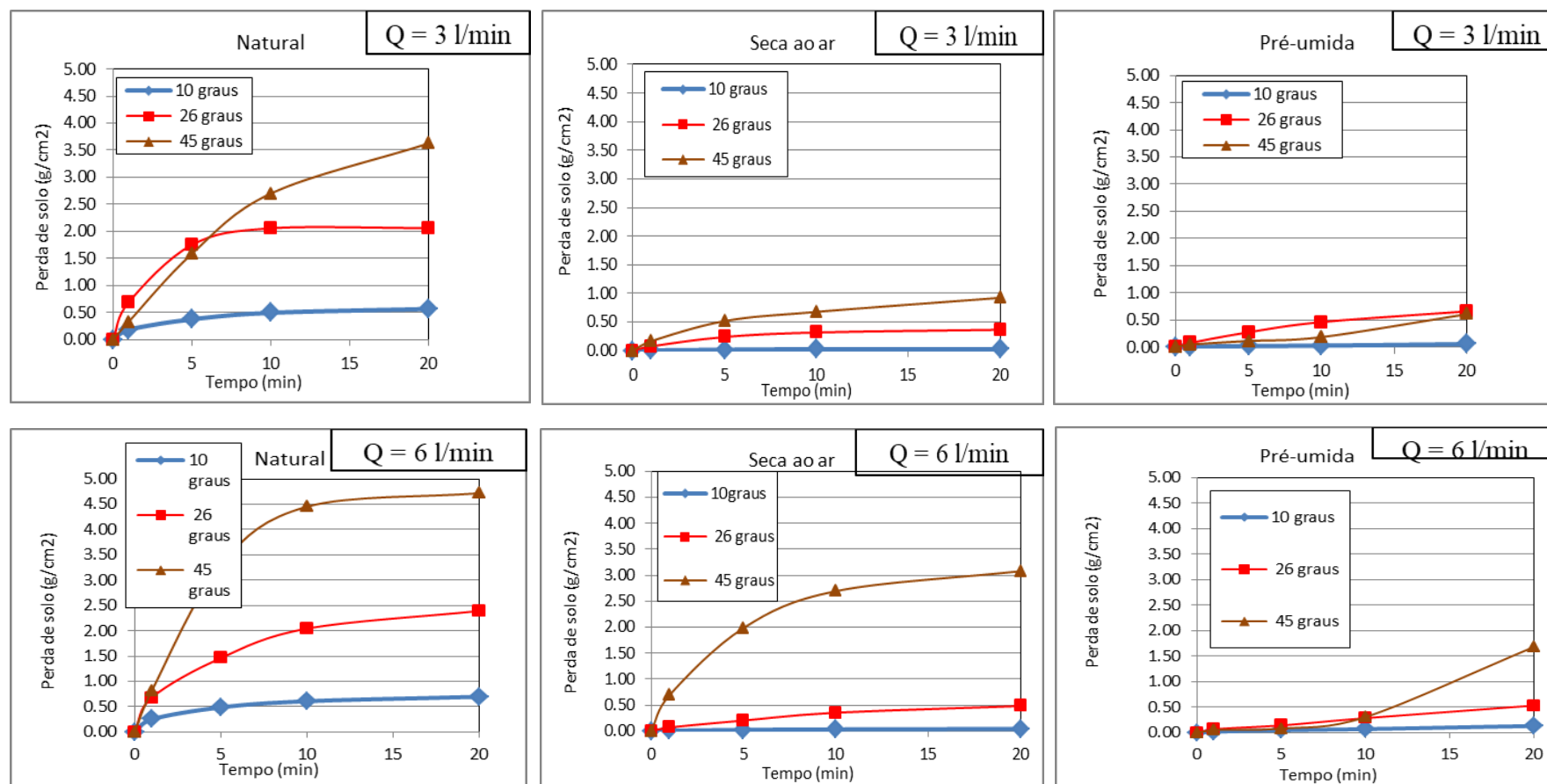


(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

Figura 4.23 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas com 1,0% de raízes

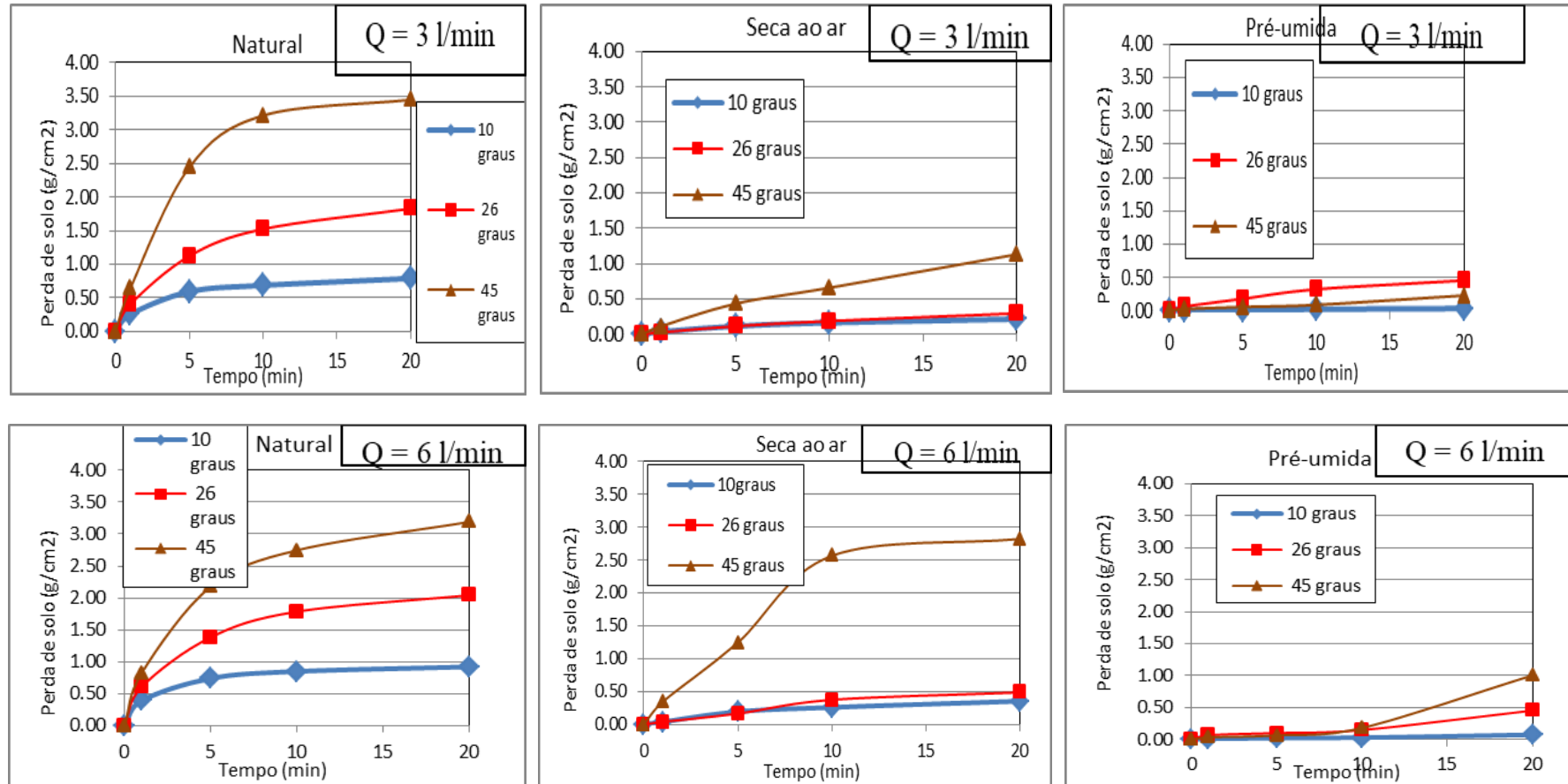


(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

Figura 4.24 - Curva obtida do ensaio de Inderbitzen nas três condições de umidade com as vazões de 3 l/min e 6 l/min para as amostras remoldadas com 1,5% de raízes



(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

A Tabela 4.16 resume os resultados obtidos para cada grupo de amostras nas três condições de umidade.

Tabela 4.16 - Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10^{-3} g/cm²/min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros τ_{hcrit} (Pa) e K (10^{-2} g/cm²/min/Pa)

Identificação	Condição	Q = 3 l/min			Q = 6 l/min			τ_{hcrit} (Pa)	K (10^{-2} g/cm ² /min/Pa)	
		Inclinação	i=10°	i=26°	i=45°	i=10°	i=26°			i=45°
	Tensão Hidr.		1,136	1,710	2,585	1,393	2,018	2,742		
I	nat		0,021	0,061	0,090	0,028	-	-	0,550	4,91
	sa		0,037	0,078	0,493	0,042	-	0,445	1,200	30,85
	pu		0,004	0,010	0,059	0,006	-	-	1,136	3,99
R - sem raízes	nat		0,541	2,396	3,620	0,865	2,806	4,899	0,900	250,33
	sa		0,399	0,963	-	0,165	1,717	-	1,000	163,70
	pu		0,030	-	-	0,377	1,684	1,733	0,950	113,15
R - 0,5% raízes	nat		0,198	1,691	3,797	0,524	2,442	4,981	1,136	287,25
	sa		0,483	2,171	-	0,752	-	2,710	0,700	138,62
	pu		0,030	-	-	0,033	0,169	0,722	1,136	43,01
R - 1,0% raízes	nat		0,494	2,056	2,701	0,608	2,044	4,453	0,980	212,53
	sa		0,025	0,318	0,680	0,032	-	-	1,136	48,04
	pu		0,030	-	-	0,074	0,289	0,312	1,136	18,94
R - 1,5% raízes	nat		0,685	1,524	3,214	0,848	1,785	2,748	0,750	152,73
	sa		0,161	0,185	0,658	0,261	0,376	-	0,850	33,00
	pu		0,027	-	-	0,032	0,151	0,184	1,000	10,82

Obs.: (I): indeformada; (R): Remoldada; (-): valores discrepantes removidos para o ajuste das retas.

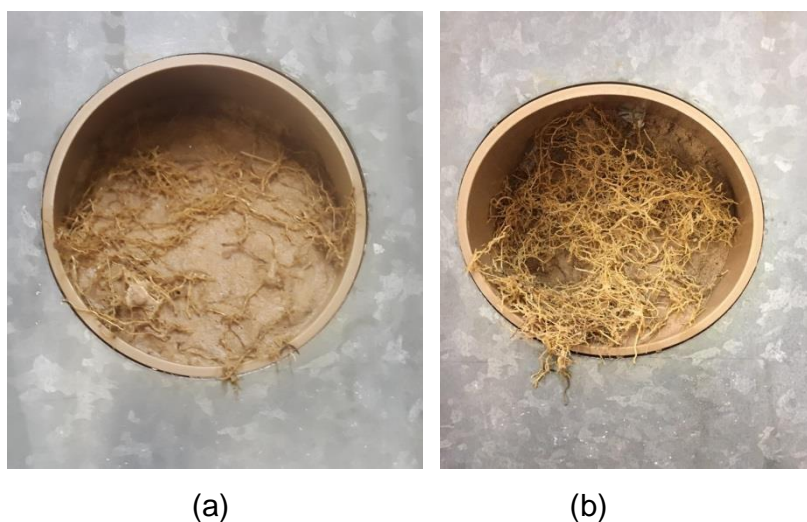
É possível observar que as amostras indeformadas apresentaram os menores valores para os coeficientes de erodibilidade (K) nas três condições de umidade. Notou-se que o material era desprendido quando encontrava zonas mais “fracas” nos corpos de prova. Para as duas vazões de água, nas três inclinações de rampa e nas condições de umidade natural e pré-úmida, ao final do ensaio, as amostras permaneceram quase que iguais ao seu estado inicial.

Ao ensaiar as amostras remoldadas sem raízes, a grande perda de material pelo fluxo concentrado de água foi facilmente visualizada já nos primeiros minutos de ensaio, principalmente na condição de umidade natural, elevando bruscamente os valores de coeficiente de erodibilidade. O solo erodido era caracterizado por grande quantidade de material fino, retido na peneira de número 200. Para as

vazões de 3 e 6 l/min, na maior inclinação de rampa e na condição de umidade natural, restaram apenas alguns gramas de material dentro dos corpos de prova. Como descrito na análise das lâminas delgadas, ao remoldar os corpos de prova com as mesmas características de campo, a estrutura foi totalmente alterada, o que facilitou o arraste das partículas.

Ao introduzir as raízes nas amostras, pode-se verificar que estas formavam uma espécie de “rede” de proteção ao longo da estrutura (Figura 4.25), preservando o solo e amortecendo o impacto do fluxo de água. À medida que aumentava o número de raízes, os resultados mostraram-se mais relevantes quando comparados com as amostras remoldadas sem raízes.

Figura 4.25 – Formação de “teia” de proteção pelas raízes: (a) ensaio com R400 em condição natural, 26° e 3 l/min e (b) ensaio com R600 em condição seca ao ar, 45° e 3 l/min



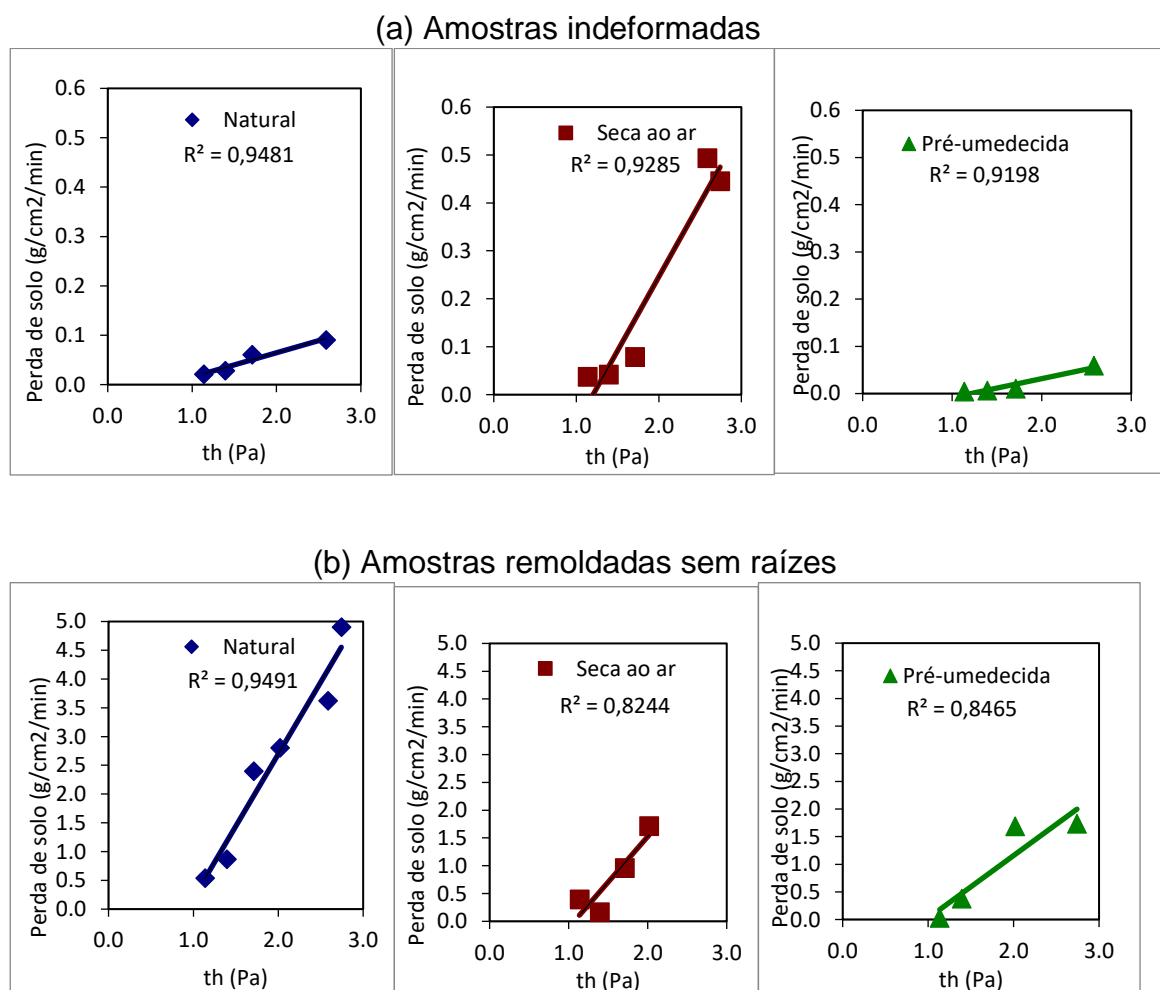
Ao comparar as amostras remoldadas sem raízes com as amostras remoldadas com 1,5% de raízes na condição de umidade natural, a taxa de erodibilidade apresentou um decréscimo de 38,99%. Na condição de umidade seca ao ar esse número chegou a 79,84%, sendo ainda mais expressivo na condição de umidade pré-úmida onde a taxa de erodibilidade atingiu uma queda de 90,44%.

Bastos (1999) sugere que numa primeira aproximação, que os solos mais erodíveis apresentam valores de K na condição natural superiores a um valor limite aproximadamente a 0,1 g/cm²/min/Pa e que os solos mais resistentes à erosão

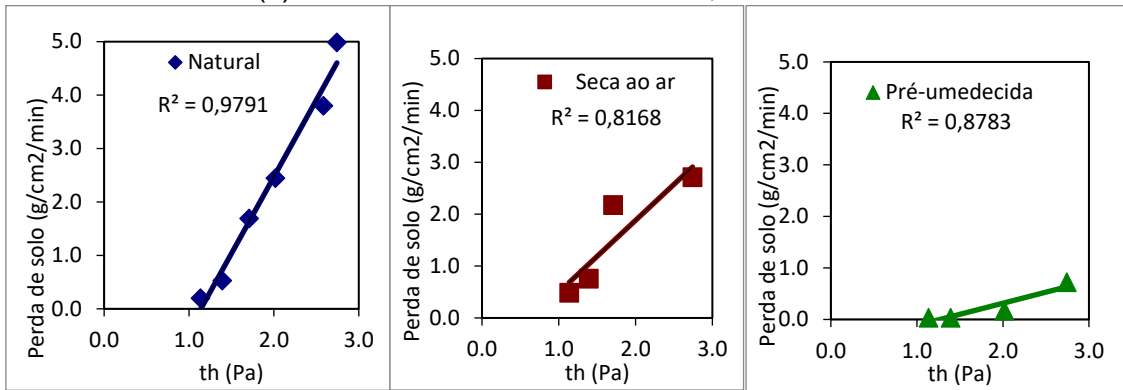
apresentam valores de K inferior a $0,001/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$. Portanto, segundo a sugestão de Bastos (1999) todos os grupos de amostras são classificados como solos erodíveis, apresentando taxas de erodibilidade extremamente elevadas, exceto para o grupo de amostras indeformadas nas condições natural e pré-umedecida.

A Figura 4.26 e a Figura 4.27 apresentam os resultados obtidos no ensaio Inderbitzen para a perda de solo ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$) pela tensão hidráulica para as amostras estudadas.

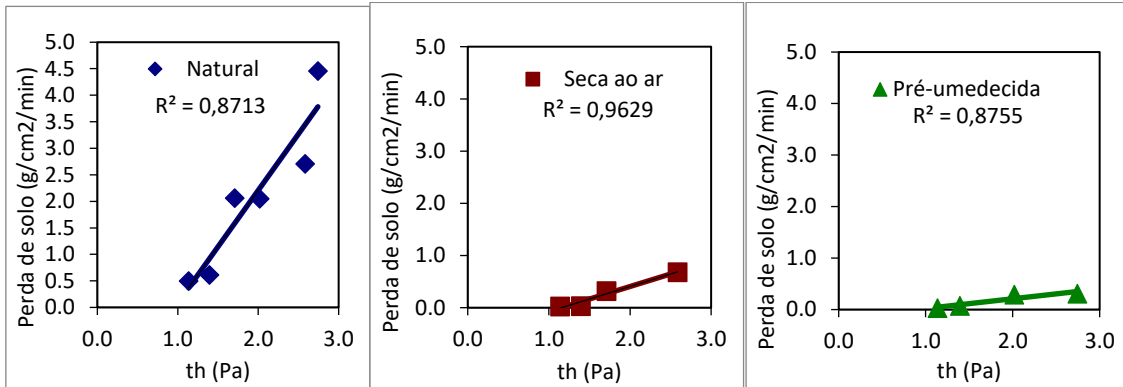
Figura 4.26 - Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras, (a) Indeformadas, (b) Remoldadas sem Raízes, (c) Remoldadas com 0,5% de raízes, (d) Remoldadas com 1,0% de raízes e (e) Remoldadas com 1,5% de raízes, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida



(c) Amostras remoldadas com 0,5% de raízes



(d) Amostras remoldadas com 1,0% de raízes



(e) Amostras remoldadas com 1,5% de raízes

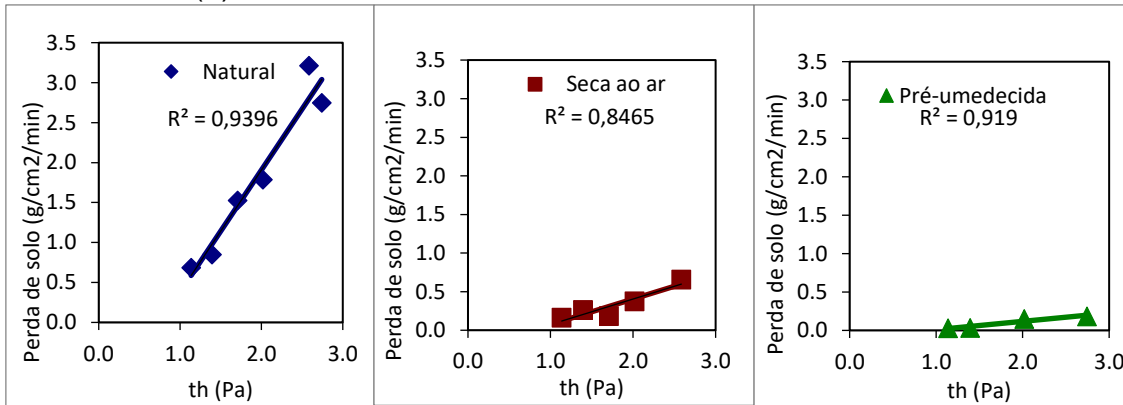
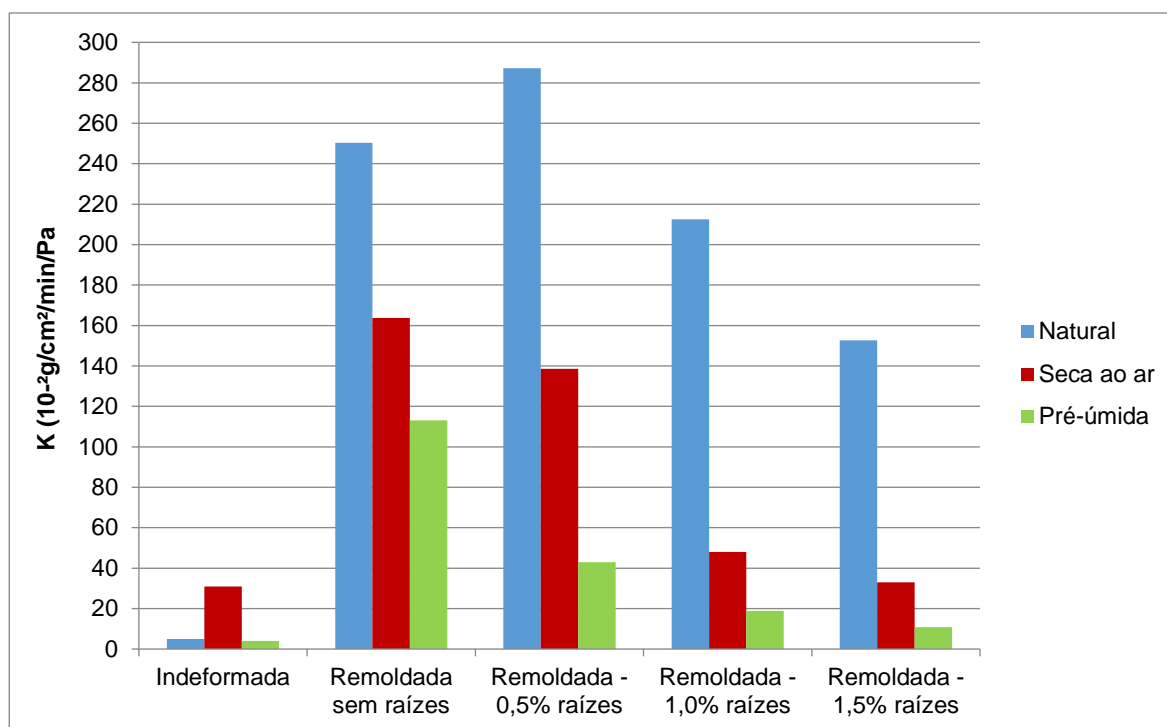


Figura 4.27 - Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen



Os resultados obtidos nos ensaios de Inderbitzen puderam ser comparados com pesquisas que utilizaram erosômetros semelhantes a este, testes em canal hidráulico, simuladores de chuva, experimentos de fluxo concentrado e medições com base em canais transversais e (efêmeros), na maioria deles, aplicados em estudos voltados para a Agronomia. Foram realizados trabalhos realizados em vários países do mundo com amostras na presença de raízes e outras fibras naturais. Percebe-se que a maioria dos estudos mostra haver influência das raízes nos valores de taxa de erosão, comprovados por esta pesquisa.

De Baets et al. (2006) utilizaram canal hidráulico de fluxo concentrado, com 2 metros de comprimento e 9,8 centímetros de largura de rampa para simular o efeito do escoamento superficial em parcelas nuas, parceladas permeadas por grama de baixa densidade e parcelas permeadas com grama de alta densidade (simulando raízes em diferentes densidades). Os resultados indicaram que as taxas relativas de descolamento do solo diminuíram para valores muito baixos (0,05), com aumento da densidade radicular de 0 a 4 kg.m⁻³.

Em 2007, De Baets et al. também fizeram uso de canal hidráulico de fluxo concentrado utilizando amostras nuas (sem presença de raízes), amostra com raízes de grama (representando sistema radicular de ramos finos), amostras com cenoura (representando um único sistema radicular) e amostras com cenouras e ervas daninhas de ramos finos (representando raízes de tufos e de ramos finos). Ficou evidenciado que raízes bem ramificadas reduziram as taxas de erosão em maior extensão quando comparadas com as demais. Porém, com o aumento da raiz de cenoura diâmetro ($5 < D < 15$ mm) o efeito de redução da erosão tornou-se menos pronunciado. Os autores afirmam que o efeito das raízes na redução durante o fluxo concentrado foi muito mais pronunciado do que sugerido em estudos anteriores a este.

Pollen et al. (2010) realizaram ensaios com medição em canal transversal para simular o efeito do escoamento superficial sobre amostras com diferentes densidades de raízes, podendo constatar que maiores densidades de enraizamento medidas nos testes de jatos de campo, causaram uma redução de até 10% no volume do solo erodido em comparação com amostras sem raízes.

Burylo et al. (2012) utilizou canal hidráulico de fluxo concentrado com mudas plantadas em vasos regularmente distribuídas para cada uma das espécies de *Robinia pseudo acacia* (árvore), *Pinus nigra austríaca* (árvore) e *Achnatherum calamagrostis* (gramínea). Os resultados destacaram o papel das pequenas raízes flexíveis nos processos de reforço do solo e sugeriram a importância de uma alta superfície radicular. Os sistemas radiculares diminuíram substancialmente as taxas de erosão de fluxo em densidades muito baixas nos primeiros estágios de desenvolvimento de plantas. Houve diminuições nas taxas de desprendimento de solo nos primeiros 30 segundos dos testes da ordem de 72% (*Pinus nigra*) a 95% (*Robinia pseudo acácia*) na média, com densidades radiculares de apenas 0,03 kgm⁻³.

Li et al. (2015) executaram ensaios com amostras na presença de raízes finas (diâmetro <1 mm e 1–2 mm) e raízes grossas (diâmetro entre 2-5 mm e 5-10 mm). A densidade de raízes finas e as coberturas de gramíneas e arbustivas mostraram-se como os fatores mais importantes no controle de erosões. Já Guimarães et al. (2018), utilizou o equipamento de Inderbitzen adaptado para simular o fluxo

concentrado de água em amostras permeadas por fibras de cana de açúcar (comprimento entre 8 e 12 mm) em teores de 0 e 1,5%. A análise dos resultados mostrou que, na maioria dos casos, houve uma maior quantidade de material carregado pelo escoamento podendo estar associado ao fato de as fibras terem sido adicionadas às amostras minutos antes da realização de cada ensaio, não havendo tempo suficiente para a interação entre as fibras e as partículas de solo.

5 CONCLUSÃO

O local da coleta das amostras foi selecionado em função de ser uma área utilizada na realização de experimentos e pesquisas do Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria. Na região de análise não foram observadas feições erosivas e processos de degradação já que o solo estava protegido por densa camada de gramíneas e arbustos de pequeno porte, além do talude ser ancorado por uma estrutura composta por pedras e concreto.

A escolha por um solo arenoso (geralmente apresenta maior propensão à erosão) tornaria mais evidente e de fácil visualização o efeito que as raízes poderiam oferecer a este tipo de material. Pensando nisso, avaliou-se a erodibilidade de 5 grupos de amostras (indefornadas, remoldadas sem raízes, remoldadas com 0,5%, 1,0% e 1,5% de raízes). Na comparação entre os dois primeiros grupos foi possível avaliar a influência que a estrutura tem sobre os resultados. Em seguida, com a intenção de mensurar o efeito das raízes sem o efeito da estrutura, foram ensaiadas amostras com três diferentes taxas da fibra natural, mantendo constante diâmetro e comprimento das mesmas.

De acordo com a classificação SUCS, o solo foi classificado como areia argilosa (SC) e pela classificação TRB o solo é siltoso com pequena quantidade de material grosso e argila (A-4). Segundo a classificação MCT, através os ensaios de Mini-MCV e Método Expedito das Pastilhas, o solo é arenoso laterítico (LA e LA'). Na classificação textural o solo é uma areia fina siltosa. Por meio da análise química foi possível evidenciar que o solo é eutrófico, não álico, possui acidez elevada e pequena quantidade de matéria orgânica, o que potencializa os efeitos da erosão.

Ao remoldar as amostras em laboratório, os índices físicos do solo (teor de umidade, peso específico natural, peso específico aparente seco, índice de vazios, grau de saturação e densidade) foram representativos das amostras indefornadas. Entretanto, as amostras indefornadas e remoldadas sem raízes não obtiveram igualdade nos valores de resistência à penetração do cone na condição saturada, no comportamento frente à inundação completa de água, perda de massa, coeficiente de erodibilidade e tensão hidráulica crítica. Demonstrando que as amostras não possuem a mesma estrutura, fato também confirmado pela análise das seções delgadas de solo.

Na avaliação indireta da erodibilidade, através dos ensaios de cone de laboratório pode-se verificar que com o aumento de raízes nos corpos de prova, na condição de umidade saturada os valores de penetração se mostraram mais elevados. Na condição de umidade natural as amostras se tornaram mais resistentes, havendo diminuição nos valores de penetração. Independente da condição de umidade, as amostras foram classificadas como de alta erodibilidade segundo classificação de ALCÂNTARA (1997).

Por meio do ensaio de desagregação as amostras remoldadas sem raízes e com raízes demonstraram elevado poder de desagregação sem resistir a inundação completa. Através da metodologia MCT as amostras com a maior taxa de raízes apresentaram valores menores de perda de solo ao serem comparadas com as amostras de menor taxa. Já os valores de coeficientes de sorção, para estas condições, não foram influenciados pelo número de raízes. Independente da condição de umidade as amostras também foram classificadas como erodíveis, pois apresentaram a relação $\pi/s > 52$.

A avaliação direta, feita através dos ensaios de Inderbitzen, classificou as amostras como erodíveis, exceto para as amostras indeformadas nas condições natural e pré-úmida, havendo concordância com os demais métodos de classificação. Apesar dos valores elevados de coeficiente de erodibilidade foi possível verificar que as raízes apresentaram papel fundamental na diminuição da suscetibilidade à erosão. A redução da taxa de erodibilidade mais significativa se mostrou nas amostras com maior densidade de raízes (600 raízes por CP), na condição pré-úmida, com valores da ordem de 90% quando comparados com as amostras remoldadas sem raízes.

Vale ressaltar que neste estudo as raízes desempenharam o papel de fibras pois foram inseridas de forma aleatória nos corpos de prova. Acredita-se que em seu estado natural, possam fornecer ainda mais benefícios no local onde estão inseridas, uma vez que interagem com o solo, alterando as propriedades físicas e químicas do mesmo, agindo como agente cimentante, apresentando uma melhor adesão com sua matriz.

A análise estatística foi de fundamental importância para que fosse possível concluir se as diferenças existentes eram reais ou casuais quando os resultados médios obtidos nos ensaios apresentaram valores muito próximos e ainda, inferir quais grupos diferiam entre si.

Para pesquisas futuras recomenda-se realizar a comparação dos resultados encontrados neste trabalho com amostras indeformadas de solo, com raízes de gramínea esmeralda *in situ* ou ainda a germinação de raízes em corpo de prova. Outra recomendação importante seria em realizar os ensaios de cone de laboratório, desagregação, infiltrabilidade, perda de massa modificado e Inderbitzen com outros diâmetros, comprimentos e taxas de raízes. Ensaios de Inderbitzen com chuveiro acoplado para mensurar o efeito das gotas da chuva também são relevantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento**: o uso das fibras vegetais. 204 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

AGUIAR, V. G.; ROMAO, P. A. **Proposta de mensuração de erodibilidade do solo em laboratório**. In: EREGEO – Simpósio Regional de Geografia. A geografia no centro-oeste brasileiro: passado, presente e futuro – UFG, 2009, Jatai-GO. p. 752-763, 2009.

ALCÂNTARA, M. A. T. **Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos**. 1997, 128p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

ALI, F. H. OSMAN, N. **Shear strength of a soil containing vegetation roots**. *Soils and Foundations – Japanese Geotechnical Society*, v. 48, n.4, p.10, 2008.

ARAÚJO, L. E. et al. **Bacias hidrográficas e Impactos ambientais**. Disponível em: <<http://revista.uepb.edu.br/index.php/qualitas/article/view/399/366>>. Acessado em: 13 abr. 2010.

ARCHIBOLD, O. et al. **Gully retreat in a semi-urban catchment in a Saskatoo, Saskatchewan**. *Applied Geography*. V. 23, p.261 -179. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p. Origem: MB-27.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 6p. Origem: MB-30.

_____. **NBR 6458**: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica (Anexo B). Rio de Janeiro, 2016. 10p. Origem: MB-29.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p. Origem: TB-3.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p. Origem: MB-31.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 13p. Origem: MB-32.

_____. **NBR 6502**: Solos e Rochas, Rio de Janeiro, 1993. 18p.

_____. **NBR 13602**: SOLO - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - ensaio de dispersão SCS, Rio de Janeiro, 1996. 5p.

AVILA, L. O. **Erosão na microbacia do Arroio Sarandi: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria, RS.** 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

AYRES, Q. C.. **La erosion del suelo y su control.** Barcelona: Omega, 1960.

BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG.** Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 240 p, 2000.

BARBOSA, L. C. **Políticas Públicas de educação ambiental numa sociedade de risco: Tendências e desafios no Brasil.** In: IV Encontro Nacional da Anppas. Brasília – DF – Brasil, ENAP, 2008.

BARDGETT, R. D., MOMMER, L., DE VRIES, F.T. **Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes.** *Trends Ecol. Evol.* 29 (12), pg 692–699, 2014.

BASSO, L. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas sedimentares de uma voçoroca na cidade de São Francisco de Assis - RS.** 2013. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

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

BASTOS, C. A. B. MILITITSKY, J.; GEHLING, W. **A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico-pesquisas e tendências.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, Rio Grande/RS, v. 1, p. 17-26, 2000.

BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W.Y.Y.; MILITITSKY, J. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais tropicais e subtropicais.** In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 8., 2002, Lisboa. **Anais.** Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotécnica, 2002a.

BELLINAZZI JR. R. **Controle da erosão em estradas rurais.** Campinas, SP: CATI, 1992.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 7ª ed. São Paulo. Editora Ícone. 355p, 2010.

BOLAÑOS, R. E. Z; CASAGRANDE, M. D. T. **Estudo Experimental de Solo Reforçado com Fibra de Coco Verde Para Carregamentos Estáticos em Obras Geotécnicas.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em:

https://www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/cobramseg/2014/599981_80_Estudo_Experimental_de_Solo_Reforcado_com_Fibra_de_Coco_Verde_Para_Carregamentos_Estaticos_em_Obras_Geotecnicas_.pdf.

BOYOUCOS, G. J. (1935). **The clay-ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion**. *Journal of American Society Agronomy*, V. 27, p. 738-774.

BRYAN, R. B. (1976). **Considerations of soil erodibility indices and sheetwash**. *Catena*, v. 3. 99 – 111 p.

BRYAN, R. B. (2000). **Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope**. *Geomorphology*, V. 32, p. 385-415.

BURGOS, P. C.; VILAR O. M.; ALCÂNTARA, M. A. T. **Um estudo preliminar da erodibilidade de alguns solos da cidade de Salvador – BA**. 1999.

BURGOS, P.C.; VILAR, O.M. **Sorção e condutividade hidráulica de alguns solos da cidade de Salvador-BA a partir do ensaio de infiltrabilidade do método MCT**. IV COBRAE – Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Salvador, p. 253-261, 2005.

BURYLO, M., HUDEK, C., REY, F. **Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion**. *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 1463–1470.2012.

BURYLO, M., DUTOIT, T., REY, F. **Species traits as practical tools for ecological restoration of marly eroded lands**. *Restor. Ecol.* 22 (5), 633–640. 2014.

BURYLO, M.; REY, F.; MATHYS, N.; DUTOIT, T. **Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion**. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012

CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. **Processos erosivos**. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO. M.T.S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, p. 39-91, 2006a.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M; MELO, M. T.; MELO, S. M. **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília. Editora Finatec, 2006.

CHAMECKI, P. R. 2002. **Metodologias de laboratório para o estudo da erosão hídrica em solos**: aplicação a uma argila da Formação Guabirotuba. Dissertação de Mestrado, ufpr, 260p.

CHUQUIPIONDO, I. G. V. **Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água**: estudo de caso trecho de vazão

reduzida Capim Branco Iaraguari Minas Gerais. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. 216p. 2007.

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. (EDS.). ***Use of Vegetation in Civil Engineering***. 2ª. ed. London, UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), 2007.

COUTO, B. O. C. **Análise de estabilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia. 124 p. 2015.

COZZOLINO, V.M; NOGAMI, J.S. **Classificação geotécnica MCT para solos tropicais**. Solos e Rochas, São Paulo, v.16, n.2, p. 77-91, 1993.

CRUZ, R.S (2003). ***Evaluación de la Erosión Hídrica en la cuenca del Rio Ñirihuau***. Universidad Nacional del Comahue Universidad de Poitiers.

DE BAETS, S., POESEN, J., GYSSELS, G., KNAPEN, A., 2006. ***Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow***. *Geomorphology* 76, 54–67.

DE BAETS, S., POESEN, J., KNAPEN, A., GALINDO, P. ***Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow***. *Earth Surf. Process. Landf.* 32, 1323–1345. 2007a.

DE BAETS, S., POESEN, J., KNAPEN, A., BARBERÁ, G.G., NAVARRO, J.A. ***Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff***. *Plant Soil* 294, 169–183. 2007b.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; KNAPEN, A.; GALINDO, P. ***Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow***. *Earth Surface Processes and Landforms*. DOI: 10.1002/esp.1470. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 256**: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994. 06p.

_____. **DNER-ME 258**: Solos compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994. 14p.

_____. **DNER-CLA 259**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996. 06p.

DIAS, R.D. et al. **Avaliação da erodibilidade de perfis de solos residuais da grande Porto Alegre**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDACOES, 11., 1998, Brasília. Anais... Brasília: 1998. v. 1. p. 557-564.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EVINER, V.T., CHAPIN, F.S. *Functional matrix: a conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes*. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 34, 455–485. 2003.

FACIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. 107 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1991.

FACIO, J.A.; CARVALHO, J.C. **Estudo da Erodibilidade de Solo do Distrito Federal**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10. Anais. Foz do Iguaçu: ABMS, v.4.p.1245-1252. 1994.

FALCÃO, P. N.; REIS, M. S.; OLIVEIRA, J. **Influência da cobertura vegetal na resistência ao escoamento de taludes**. 2012.

FATTET, M., FU, Y., GHESTEM, M., MAB, W., FOULONNEAUD, M., NESPOULOUSD, J., LE BISSONNAISE, Y., STOKES, A. *Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength*. Catena 87 (1), 60–69. 2011.

FENDRICH, R. (1997) **“Drenagem e Controle da Erosão Urbana”**. 4º Ed. Curitiba: Champagnat, 1997. 486 p.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentin, RS**. 2011. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

FERNANDES, J. P. **Engenharia Natural** - Uma engenharia para construir sustentabilidade. Anais do Congresso Iberoamericano e do Caribe sobre Restauração Ecológica. Curitiba – PR, 2009.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria, RS**. 2015. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

FERNANDES, J. P.; FREITAS, A. R. M. **Introdução à engenharia natural**. Vol. II. Edição EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A. 2011.

FONSECA, A. M. M. C. **Técnicas para previsão e contenção da erosão em taludes e encostas**. 1981. In: Simpósio Nacional sobre o controle da erosão, 2. São Paulo/SP. ABGE. V.1, p.217-234.

FONSECA, A. M. M. C. e FERREIRA, C. S. M. **Metodologia para determinação de um índice de erodibilidade de solos**. 1981. Simpósio Brasileiro de Solos em Engenharia, 1, Rio de Janeiro, p. 646-667.

FRAGASSI, P.F.M. **Estudo da erodibilidade dos solos residuais de gnaise da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. 2001. 119f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

FREIRE, E.P. **Ensaio Inderbitzen modificado**: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: simposio nacional de controle da erosao, 7., 2001, Goiânia. Anais... Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001.

GALETI, P.A. **Práticas de controle a erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 278 p.

GRANDO, A. **Monitoramento e Modelagem Hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental**. 2011. 175 p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. **Biotechnical slope protection and erosion control**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1989. 217p.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. **Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization**. New York: John Wiley, 1996.

GUERRA, A. J. T.; MENDONCA, J. K. S. **Erosão dos solos e a questão ambiental**. In: VITTE, A.C.; GUERRA, A.J.T. (Org.). Reflexões sobre a geografia física do Brasil. São Paulo: Bertrand Brasil, 2004.

GUERRA, A. J. T. **Processos erosivos nas encostas**. In: CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. (Org) Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. p. 139-155.

GUIMARÃES, A. G.; RANGEL, A. C. M.; NEVES, P. N. **Estudo da Erodibilidade de Solos Modificados com Fibra de Cana-de-açúcar por meio do Ensaio de Inderbitzen Adaptado**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG. Salvador, Bahia. 2018.

GREGORY, P.J. **Plant roots: growth, activity and interaction with soils**. Blackwell Publishing, Oxford, p. 318. 2006.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing**, Vol. 1, Soil Classification and Compaction Tests. Ed. London, Pentech. 1980.

HERZIG, J. R.; DYMOND, M. **A gully-complex model for assessing gully stabilization strategies**. *Geomorphology*, v.133, 2011, p.23-33.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de Uso e Ocupação dos Solos de Cidades Costeiras Brasileiras Através de SIG com Base no Comportamento Geotécnico e Ambiental**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2006, 486p.

HIGASHI, R.A.R.; DIAS, R.D. **Erodibilidade dos Solos Residuais de Granito do Município de Tubarão**. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis:GEDN/UFSC, 2004. p. 144- 158.

HIGASHI, R.A.R.; LIMA, T. L.; SPRÍCIGO, T. **Análise de Viabilidade da Utilização de Misturas de Solo-cinza Pesada para Pavimentação**. In: 35.^a RAPV - Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, 2004, Anais em meio digital.

HIGASHI, R.A.R.; SPRICCIIGO, T. **Análise Radial dos Solos da Zona Urbana do Município de Ipumirim: Previsão de Expansão Da Malha Viária Urbana**. In: Reunião Anual de Pavimentação Urbana, Aracajú, SE, 2003.

HORROCKS, R.; ANAND, S. **Handbook of Technical Textiles**. 559 pg. 2000.

IAEG COMMISSION "ENGINEERING GEOLOGICAL MAPPING". **Classification of rocks and soil for engineering geology mapping. Part 1: rock and soil materials**. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. Krefeld, v.10, p.364-371, 1979.

INDERBITZEN, A. L. An erosion tests for soils. **Material reseach and standarts**, Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, July.1961.

JACINTHO, E.C. et al. **Solos Tropicais e o Processo Erosivo**. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO. M.T.S. (Org.). *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. p. 93-156.

JASKULSKI, T. M. **Avaliação da influência de raízes de *Zoysia japonica* na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso**. 2018. 119 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, RS.

KOETZ, M. **Métodos para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em estradas não pavimentadas**. 2003. 72f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.

LACERDA, W. A.; SILVA, T.R.M. **Erodibilidade dos solos de uma voçoroca da região de Ouro Preto, Minas Gerais**. In: SIMPOSIO NACIONAL DE CONTROLE

DA EROSAO, 7., 2001, Goiânia. Anais... Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001.

LAFAYETTE, K. P. V. **Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE**. 2006. Tese de doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. 358 p. 2006.

LAL, R. **Erosion measurement and evaluation**. In Soil Erosion in the Tropics: Principles and Measurement. McGraw Hill: New York; 223. 1990.

LEKHA, K.R. **Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilized slopes - A case study**. Centre for Water Resources Development and Management. Kerala, India. 2003.

LEMOS, C. F. **Avaliação da erosão superficial em áreas de cultivo com plantio direto e plantio convencional, utilizando o aparelho de Inderbitzen**. 2002. Dissertação de Mestrado, Curitiba, UFPR, 85p. 2002.

LEPSCH, I. F. **“Formação e Conservação dos Solos”**. São Paulo. Editora: Oficina de Textos. 2002. 178p.

LI, Y., YU, H.Q., ZHOU, N., TIAN, G., POESEN, J., ZHANG, Z.D. **Linking fine root and understory vegetation to channel erosion in forested hillslopes of southwestern China**. Plant Soil 389, 323–334. 2015.

LIMA, M.C., 1999. **Contribuição ao Estudo do Processo Erosivo de Voçorocas na Área Urbana de Manaus**. Dissertação de M.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

LIMA, M.C. (2003). **Degradação Físico-Química e Mineralógica de maciço junto às voçorocas**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal.

LINO, J.B.; HOLANDA, F.S.R.; FONTES, C.S.; MOURA, M.M.; SANTOS, M.H. **Utilização de geotêxteis fabricados com fibras naturais no controle de erosão em taludes de margem de rio**. XXX Congresso brasileiro de ciência do solo. Natal, RN. 2015. Disponível em: <https://eventosolos.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/2261.pdf>.

LOPES, V. L. **“Um Estudo da Erosão e Produção de Sedimentos pelas Chuvas”**. Tese. 70pg. Campina Grande – PB. 1980.

MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à geologia de engenharia**. 2. ed. Santa Maria: UFSM; Brasília: CPRM, 1997. 284 p.

MEDINA, J. C. **Plantas Fibrosas da Flora Mundial**, Instituto Agronômico de Campinas, p. 787-792. 1959.

MEIRELLES, M. C. E.; DIAS, R. D. **Estudo da Erodibilidade de Solos Residuais do Complexo Granito-Gnaissico – Município de Santo Amaro da Imperatriz, SC.** In: 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, SP, 2004, v.1, p.465-470.

MENDES, C. A. R. **Erosão Superficial em Encosta Íngreme sob Cultivo Perene e com Pousio no Município de Bom Jardim.** Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006.

MENDES, A. C. T.; FALCI, S. C.; DEMATTÊ, J. L. I. **Seções delgadas de solos: método de impregnação.** XIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Guarapari, Vitória, ES. Anais da E.S.A. “Luiz de Queiroz”. p. 35 a 48. 1973.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d’água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade.** Geociências, UNESP, São Paulo, v.29, n.2, p. 211-228, 2010.

MIDDLETON, H. E. (1930). **Properties of soils wich influence soil erosion.** U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, nº 178. 16p.

MORAES, D. V. **Avaliação do uso do ensaio de cone de laboratório para estimativa da erodibilidade,** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2015.

MORAES, F.; BACELLAR, L.A.P.; SOBREIRA, F.G. **Analise da erodibilidade de saprolíticos de gnaisse.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p. 1055-1062, 2004.

MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. **Slope stabilization and erosion control – A bioengineering approach.** 1ª ed. London, UK: Chapman e Hall, 1995.

MORIWAKI, Y.; MITCHELL, J.K. **The role of dispersion in the slaking of intact clay.** ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.623, p.172–190, 1977. (Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects, Eds: Sherard, J.L. and Decker, R.S.).

MOTTA, N. O., 2001, **Caracterização Geotécnica dos Processos Erosivos na Cidade de Campo Grande – MS,** Dissertação de M. Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

NEARING, M.A.; WEST, L.T. **Soil strength indices as indicators of consolidation.** Transactions of ASAE, v.31, n.2, p.471-476, 1988

NISHIVAMA, L. **Erosão do solo:** uma visão integrada dos fatores e processos que condicionam o seu desenvolvimento. São Carlos, 95 p. Seminários Gerais de Geotecnia – SGS – 833. EESC/USP. 1995.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais.** Anais do X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz do Iguaçu - PR. v.4, pp. 1293-1300, 1994.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Nova metodologia (MCT) de estudos geotécnicos e suas aplicações em rodovias vicinais.** In: SENAVI. 1.1988, São Paulo. Anais: São Paulo: 1988.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo/SP: Editora Villibor, 1995. Cap.7: Erosão na faixa marginal, p.169–196.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area.** *Bulletin of International Association of Engineering Geology*, Krefeld, n.19, p.196-199, 1979.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** 1981. In Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32 numero especial, p. 2839–2845, 2008.

PAIVA, J.B.D. de.; BELING, F.A. **Estimativa da produção anual de sedimentos para fins de avaliação do assoreamento de reservatórios.** Estudo de caso: Rio das Velhas, Rio Paracatu e Urucuia. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7., 2006, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2006.

PANACHUKI, E. et al. **Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em áreas de integração agrícola-pecuária.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n 2, p. 261-268, 2006.

POHL, M., ALIG, D., KÖRNER, C., RIXEN, C. **Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems.** *Plant Soil* 324 (1–2), 91–102. 2009.

POLLEN-BANKHEAD, N., SIMON, A. **Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: is mechanical root-reinforcement the whole story?** *Geomorphology* 116, 353–362. 2010.

PRADO, H. **Solos do Brasil-gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo de solos.** Piracicaba. 281p. 4a edição. 2005.

REGO, J. J. V. **Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaise.** Dissertação de M. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1978.

RESTREPO, J. M. S. **Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical**. 2010. 114 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. 2010.

ROISEMAN, P. L. e GOLDENSTEIN, J. P. N. **Aplicabilidade de Fibras Naturais de Curauá como Reforço de Solos**. Departamento de Engenharia Civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em <http://www.puc.rio.br/pibic/relatorio_resumo2017/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIVPedro%20Lima%20Roiman;%20Jo%C3%A3o%20Pedro%20Neves%20Goldenstein.pdf>

SANT'ANA, K. D. A. **Diagnostico ambiental do meio físico do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. 2012. 125 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

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

SILVA, A. F. **Mapeamento geotécnico e analise dos processos erosivos na bacia do córrego Tuncum, São Pedro – SP, escala 1:10.000**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2003.

SILVA, M.L.N. et al. **Avaliação de métodos indiretos e determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, n.6, p.1207-1220, 2000.

SILVA, V.C. **Estimativa da erosão atual da bacia do rio Paracatu (MG/GO/DF)**. Pesquisa Agropecuária Tropical, 34 (3). 147 – 159 pp. 2004.

SOUZA, R. S. **Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural**. 2015. Dissertação (Mestrado Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria. 152 p. 2015.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Desertificação: recuperação e desenvolvimento sustentável**. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B (Org.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertland Brasil, 2003. p. 249-290.

TATTO, J. **Análise dos parâmetros geologicos-geotécnicos que condicionam erosão por voçoroca no município de São Francisco de Assis**. 2007, 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

TEIXEIRA, A. C. M.; FALCI, S. C.; DEMATTÊ J, L, I. **Seções Delgadas de Solos: Método de Impregnação**. Volume XXX, 193, pg 35-48. Anais da E. S. A. “Luiz de Queiroz”.

TRINDADE, A.F.N. **Aplicabilidade de Fibras Naturais de Sisal como Reforço de Solos**. Departamento de engenharia civil. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2016 –

disponível em: <http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2016/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIVAmanda%20Fernande%20Noqueira%20Trindade.pdf>

VANNOPPEN, W.; VANMAERCKE, M.; DE BAETS, S., POESEN, J. ***A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates.*** Earth-Sci. p. 666–678. 2015.

VIANA, C. S. **Caracterização dos processos erosivos no município de Belo Horizonte uma contribuição à gestão ambiental e ao planejamento urbano.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2000.

VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. **Erosão dos solos.** In: Cintra, J.C.A.; Albiero, J.H. (Org.). Solos do interior de São Paulo. São Carlos: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; USP, v.1, 1993. p. 177-206.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos:** tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009, 291p.



WANG, B; ZHENG F.; RÖMKENS, M. J. M.; DARBOUX, F. (2013). ***Soil erodibility for water erosion: A perspective and chinese experiences.*** *Geomorphology* 187, 1 – 10p.

WELTER, C.; BASTOS, C.A.B. **Avaliação da erodibilidade de solos da planície costeira sul do RS com base na Metodologia MCT.** In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIACAO CIENTIFICA E TECNOLOGICA EM ENGENHARIA, 18, 2003, Itajaí. Anais... Itajaí: 2003.

YE, C. GUO, Z. ZHAOXIA, L. CAI, C. ***The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China.*** *Soil and Water Conservation Research Centre. Huazhong Agricultural University. Wuhan, China.* 2017.

ZACHAR, D. ***Soil erosion.*** Elsevier Scientific Publishing Company, 548 p. 1982.

ANEXO A – ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

	MEC - Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais - Departamento de Solos Santa Maria/RS Cep:97105-900 Fone: (55) 3220-8153 http://www.ufsm.br/solos	
	Laudo de Análise de Solo	

Informações fornecidas e de responsabilidade do solicitante

Solicitante: Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro	CPF/CNPJ:	
Proprietário: Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro	CPF/CNPJ:	
Município: São João do Polêsine / RS	Endereço:	
Localidade: Vale Vêneto	Entrada: 12/04/17	Emissão: 09/05/17
Matrícula:		

Registro no LAS	Identificação da amostra	Área (ha)	Sistema de cultivo	Prof. (cm)	Georef.
4149	Jéssica e Tiane				

Informações emitidas pelo laboratório e de responsabilidade do técnico

Diagnóstico para acidez do solo e calagem									
Registro no LAS	pH água 1:1	Ca	Mg	Al cmol/dm ³	H+Al	CTC efet.	Saturação (%)		Índice SMP
							Al	Bases	
4149	4,8	10,9	1,9	1,3	3,5	14,2	9,2	78,7	6,2

Diagnóstico para macronutrientes e recomendação de adubação NPK-S

Registro no LAS	% MO m/v	% Argila	Textura	S mg/dm ³	P-Mehlich mg/dm ³	C Total g/kg	K cmol/dm ³	CTC pH7	K mg/dm ³
4149	0,3	12,0	4,0	13,2	16,3	--X--	0,164	16,4	64,0

Diagnóstico para micronutrientes e relações molares

Registro no LAS	Cu	Zn	B	Fe	Mn	Na	Relações Molares		
							Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) ^{1/2}
4149	0,209	11,419	0,2	--X--	--X--	--X--	5,8	77,70	0,046

Os dados analíticos são de exclusividade da amostra
Vinculado a ROLAS-RS/SC



Assinatura digital

88-B1-7E-5D-96-6D-77-64-DD-33-88-8A-DA-EC-2C-5D

Para autenticar acesse <http://silas.ccr.ufsm.br>, em "Autenticar" informe a sequência acima.

Responsável técnico: Gustavo Brunetto - CREA/RS 204807

Pagamento Realizado

* Determinado em analisador elementar-combustão seca

ANEXO B – TABELA RESUMO DO ENSAIO DE CONE DE LABORATÓRIO PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Valores de penetração obtidos pelo Ensaio de Cone de Laboratório para análise estatística. Compreende todos os valores com exceção daqueles que apresentam dispersão acima de 5% em relação à média.

Penetração (mm)	Indeformada		Remoldada sem raízes		Remoldada- 0,5% raízes		Remoldada- 1,0% raízes		Remoldada- 1,5% raízes	
	Penetração - Natural	Penetração - pré-úmida	Penetração - Natural	Penetração - pré-úmida	Penetração - Natural	Penetração - pré-úmida	Penetração - Natural	Penetração - pré-úmida	Penetração - Natural	Penetração - pré-úmida
1	51	73	52	80	45	81	41	87	44	99
2	52	74	55	75	49	87	44	92	47	98
3	53	75	52	80	48	82	43	90	43	101
4	52	72	57	78	47	83	42	89	46	95
5	53	76	54	76	46	84	42	90	45	97
6	53	75	55	79	49	84	44	87	44	99
7	52			77		86		91		96
8	52			77		83		93		100
P média	52,25	74,17	54,17	77,75	47,33	83,75	42,67	89,88	44,83	98,13

ANEXO C – ANÁLISE ESTATÍSTICA I

1 - Ensaio de Cone de Laboratório - Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade natural.

Através do Teste de Mann-Whitney as diferenças significativas são apresentadas se os valores de p (same med) $< 0,05$. Para este caso, não há diferença significativa nos valores de penetração entre os dois grupos de amostras, a mudança na estrutura não foi fator de influência.

Teste Mann-Whitney – Tests for equal medians

A Amostra Indeformada		B Amostra Remoldada	
N:	8	N:	6
Mean rank:	3,2857	Mean rank:	4,2143
Mann-Whitn U :	10		
z :	1,8249	p (same med.):	0,068016
Monte Carlo permutation:		p (same med.):	0,0544
Exact permutation:		p (same med.):	0,054612

2 - Ensaio de Cone de Laboratório - Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade saturada.

Através do Teste F, as diferenças significativas são apresentadas se os valores de p (same var) $> 0,05$. Neste caso, há diferença significativa entre os valores de penetração para as amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade saturada.

Teste F – Tests for equal variances

A Amostra Indeformada		B Amostra Remoldada	
N:	6	N:	8
Variance:	2,1667	Variance:	3,3571
F :	1,5495	p (same var.):	0,65094
Critical F value (p=0.05):	6,8531	p (same var.):	0,5422
Monte Carlo permutation:		p (same var.):	0,53913
Exact permutation:			

3 - Ensaio de Cone de Laboratório - Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade natural

Por meio da Análise de Variância (ANOVA) verificou-se duas hipóteses:

H0 = não existe diferença entre os valores de penetração em função da quantidade de raízes;

H1 = Há pelo menos um grupo com valores de penetração diferentes em função da quantidade de raízes.

Os resultados são significativos se os valores de F forem superiores aos valores de F crítico e os valores de P forem inferiores a 0,05 (95% de confiabilidade).

A análise mostra que a quantidade de raízes explica 89,90% da variação nos valores penetração na condição natural, os outros 10,10% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem dos outros três grupos de amostras e ainda, as amostras com 1,0% de raízes diferem das amostras com 0,5% de raízes. O Teste de Tukey apresenta em escala cinza as amostras que diferem entre si, a 5% de probabilidade de erro.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	448,17	3,00	149,39	59,360	0,000	3,098
Dentro dos grupos	50,33	20,00	2,52			
Total	498,50	23,00				

TESTE DE TUKEY

	Rem. Sem Raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Remo. 1,5% raízes
Rem. Sem Raízes		0,0000019	0,000000003494	0,0000000132
Rem. 0,5% raízes	10,55		0,0002989	0,05757
Rem. 1,0% raízes	17,76	7,206		0,1166
Rem. 1,5% raízes	14,41	3,86	3,345	

4 - Ensaio de Cone de Laboratório - Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade saturada

A análise mostra que a quantidade de raízes explica 94,17% da variação nos valores penetração na condição saturada, os outros 5,83% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem dos outros três grupos de amostras e ainda, as amostras com 1,0% e 1,5% de raízes diferem das amostras com 0,5% de raízes e as amostras com 1,5% de raízes diferem do grupo de amostras com 1,0% de raízes.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1820,750	3,000	606,917	150,720	0,000	2,947
Dentro dos grupos	112,750	28,000	4,027			
Total	1933,500	31,000				

TESTE DE TUKEY

	Rem. Sem Raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Remo. 1,5% raízes
Rem. Sem Raízes		0,00001106	0,000000000007	0
Rem. 0,5% raízes	8,457		0,000007929	0,0000000000001
Rem. 1,0% raízes	17,09	8,633		0,00000003502
Rem. 1,5% raízes	28,72	20,26	11,63	

5 - Ensaio de Cone de Laboratório - Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade natural

A análise mostra que a quantidade de raízes explica 67,51% da variação nos valores penetração na condição natural, os outros 32,49% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas com 0,5% de raízes diferem dos outros dois grupos de amostras, porém estes não diferem entre si (1,0 e 1,5%).

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	65.44	2.00	32.72	15.58	0.00	3.68
Dentro dos grupos	31.50	15.00	2.10			
Total	96.94	17.00				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,0001474	0,02353
Rem. 1,0% raízes	7,888		0,05074
Rem. 1,5% raízes	4,226	3,662	

6 - Ensaio de Cone de Laboratório - Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade saturada

A análise mostra que a quantidade de raízes explica 90,32% da variação nos valores penetração na condição saturada, os outros 9,68% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas com 0,5% de raízes diferem dos outros dois grupos de amostras e as amostras com 1,0% diferem das amostras com 1,5% de raízes.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	832.58	2.00	416.29	97.95	0.00	3.47
Dentro dos grupos	89.25	21.00	4.25			
Total	921.83	23.00				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,00001943	0,00000000001
Rem. 1,0% raízes	8,403		0,0000002388
Rem. 1,5% raízes	19,72	11,32	

ANEXO D – TABELA RESUMO DO ENSAIO DE INFILTRABILIDADE PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Valores de coeficiente de sorção obtidos pelo ensaio de infiltrabilidade para análise estatística.

	Indeformada			Remoldada sem raízes			Remoldada - 0,5% raízes			Remoldada - 1,0% raízes			Remoldada - 1,5% raízes		
	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida
s - 1	0,033	0,046	0,0049	0,110	0,245	0,002	0,358	0,158	0,008	0,336	0,058	0,002	0,232	0,048	0,003
s - 2	0,039	0,091	0,0038	0,059	0,235	0,005	0,385	0,178	0,005	0,325	0,028	0,003	0,271	0,051	0,003
s - 3	0,033	0,091	0,0033	0,105	0,102	0,004	0,233	0,162	0,003	0,191	0,035	0,004	0,281	0,048	0,003
s - médio	0,035	0,076	0,0040	0,0913	0,194	0,003	0,325	0,166	0,005	0,284	0,040	0,003	0,261	0,049	0,003

ANEXO E – ANÁLISE ESTATÍSTICA II

1 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade natural.

De acordo com o Teste de Mann-Whitney não há diferença significativa nos valores de coeficiente de sorção entre os dois grupos de amostras na condição de umidade natural.

Teste Mann-Whitney - Tests for equal medians

Amostra Indeformada		Amostra Remoldada	
N:	3	N:	3
Mean rank:	1	Mean rank:	2,5
Mann-Whitn U :	0		
z :	1,7712	p (same med.):	0,076522
Monte Carlo permutation:		p (same med.):	0,0986
Exact permutation:		p (same med.):	0,1

2 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade seca ao ar.

De acordo com o Teste de Mann-Whitney não há diferença significativa nos valores de coeficiente de sorção entre os dois grupos de amostras na condição de umidade seca ao ar.

Teste Mann-Whitney - Tests for equal medians

Amostra Indeformada		Amostra Remoldada	
N:	3	N:	3
Mean rank:	1	Mean rank:	2,5
Mann-Whitn U :	0		
z :	1,7712	p (same med.):	0,076522
Monte Carlo permutation:		p (same med.):	0,1009
Exact permutation:		p (same med.):	0,1

3 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade pré umedecida.

De acordo com o Teste de Mann-Whitney não há diferença significativa nos valores de coeficiente de sorção entre os dois grupos de amostras na condição de umidade seca ao ar.

Teste Mann-Whitney - Tests for equal medians

Amostra Indeformada		Amostra Remoldada	
N:	3	N:	3
Mean rank:	1,6667	Mean rank:	1,8333
Mann-Whitn U :	4		
z :	0	p (same med.):	0
Monte Carlo permutation:		p (same med.):	1
Exact permutation:		p (same med.):	1

4 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade natural.

A ANOVA mostra que a quantidade de raízes explica 76,61% da variação nos valores de coeficiente de sorção na condição de umidade natural, os outros 23,39% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem dos outros três grupos de amostras.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,095	3,000	0,032	8,736	0,007	4,066
Dentro dos grupos	0,029	8,000	0,004			
Total	0,124	11,000				

TESTE DE TUKEY

	Rem. sem raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. sem raízes		0,006288	0,01875	0,03526
Rem. 0,5% raízes	6,719		0,8347	0,588
Rem. 1,0% raízes	5,532	1,187		0,9657
Rem. 1,5% raízes	4,881	1,838	0,6509	

5 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade seca ao ar.

O teste de Kruskal-Wallis mostra que a quantidade de raízes explica 80,66% da variação nos valores de coeficiente de sorção na condição de umidade seca ao ar, os outros 19,34% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem das amostras com 1,0% e 1,5% assim como as amostras remoldadas com 0,5% de raízes.

Teste Kruskal-Wallis - Test for equal medians

H (chi2):	8,538
Hc (tie corrected):	8,568
p (same):	0,03561
There is a significant difference between sample medians	

TESTE DE TUKEY

	Rem. sem raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. sem raízes		0,8363	0,007736	0,01079
Rem. 0,5% raízes	1,182		0,02333	0,03333
Rem. 1,0% raízes	6,487	5,305		0,9934
Rem. 1,5% raízes	6,121	4,939	0,3658	

6 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade pré-umedecida.

A ANOVA mostra que não há diferença significativa nos valores de coeficiente de sorção de um grupo ao outro na condição de umidade pré-umedecida.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,3E-05	3,0E+00	4,4E-06	2,3E+00	1,5E-01	4,1E+00
Dentro dos grupos	1,5E-05	8,0E+00	1,9E-06			
Total	2,9E-05	1,1E+01				

TESTE DE TUKEY

	Rem. sem raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. sem raízes		0,5805	0,9506	0,9506
Rem. 0,5% raízes	1,857		0,3241	0,3241
Rem. 1,0% raízes	0,7428	2,6		1
Rem. 1,5% raízes	0,7428	2,6	0	

7 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade natural.

A ANOVA mostra que não há diferença significativa entre os grupos de amostras com raízes. A quantidade de raízes não foi fator de influência nos resultados de coeficiente de sorção, na condição de umidade natural.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0.006294049	2	0.003147	0.686059	0.53911	5.143253
Dentro dos grupos	0.027522646	6	0.004587			
Total	0.033816695	8				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,7462	0,5177
Rem. 1,0% raízes	1,057		0,9129
Rem. 1,5% raízes	1,637	0,5796	

8 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade seca ao ar.

A ANOVA mostra que a quantidade de raízes explica 97,56% da variação nos valores de coeficiente de sorção na condição de umidade seca ao ar, os outros 2,44% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas com 0,5% de raízes diferem dos outros dois grupos de amostras.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0.029550232	2	0.014775	120.1982	1.44E-05	5.143253
Dentro dos grupos	0.000737538	6	0.000123			
Total	0.03028777	8				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,00002	0,00003059
Rem. 1,0% raízes	19,83		0,6219
Rem. 1,5% raízes	18,47	1,368	

9 - Ensaio de Infiltrabilidade- Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade pré-umedecida.

A ANOVA mostra que não há diferença significativa nos valores de coeficiente de sorção de um grupo ao outro na condição de umidade pré-umedecida.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1.30783E-05	2	6.54E-06	3.112724	0.118211	5.143253
Dentro dos grupos	1.26047E-05	6	2.1E-06			
Total	2.5683E-05	8				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raíces	Rem. 1,0% raíces	Rem. 1,5% raíces
Rem. 0,5% raíces		0,2394	0,2394
Rem. 1,0% raíces	2,585		1
Rem. 1,5% raíces	2,585	0	

ANEXO F – TABELA RESUMO DO ENSAIO DE PERDA DE MASSA POR IMERSÃO MODIFICADO PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Valores de perda por imersão obtidos pelo ensaio de perda de massa modificado para análise estatística.

	Indeformada			Remoldada sem raízes			Remoldada - 0,5% raízes			Remoldada - 1,0% raízes			Remoldada 1,5% raízes		
	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida	Natural	Seca ao ar	Pré-úmida
Pi - 1	0,458	28,052	0,571	83,915	21,942	21,698	81,065	73,017	62,527	72,772	51,960	57,528	58,947	50,163	55,354
Pi - 2	1,228	25,586	0,892	84,819	43,372	9,641	75,668	66,273	69,084	74,673	70,114	51,272	62,976	46,387	51,571
Pi - 3	9,338	20,591	1,196	78,680	27,689	15,055	76,922	65,715	67,446	59,905	63,319	61,520	59,490	41,676	57,280
Pi - médio	3,675	24,743	0,886	82,471	31,001	15,465	77,885	68,335	66,352	69,117	61,797	56,773	60,471	46,076	54,735

ANEXO G – ANÁLISE ESTATÍSTICA III

1 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade natural.

De acordo com o Teste F há diferença significativa nos valores de perda de massa entre os dois grupos de amostras na condição de umidade natural.

Teste F – Tests for equal variances

Amostra Indeformada		Amostra Remoldada	
N:	3	N:	3
Variance:	24,203	Variance:	10,985
F :	2,2033	p (same var.):	0,62435
Critical F value (p=0.05):	39	p (same var.):	0,0572
Monte Carlo permutation:		p (same var.):	0,05
Exact permutation:			

2 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade seca ao ar.

De acordo com o Teste F há diferença significativa nos valores de perda de massa entre os dois grupos de amostras na condição de umidade seca ao ar.

Teste F – Tests for equal variances

Amostra Indeformada		Amostra Remoldada	
N:	3	N:	3
Variance:	14,45	Variance:	123,04
F :	8,515	p (same var.):	0,21019
Critical F value (p=0.05):	39	p (same var.):	0,6409
Monte Carlo permutation:		p (same var.):	0,6
Exact permutation:			

3 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras indeformadas e remoldadas sem raízes na condição de umidade pré-umedecida.

De acordo com o Teste de Mann-Whitney não há diferença significativa nos valores de perda de massa entre os dois grupos de amostras na condição de umidade pré-umedecida.

Teste Mann-Whitney - Tests for equal medians

Amostra Indeformada		Amostra Remoldada	
N:	3	N:	3
Mean rank:	1	Mean rank:	2,5
Mann-Whitn U :	0		
z :	1,7457	p (same med.):	0,080856
Monte Carlo permutation:		p (same med.):	0,0999
Exact permutation:		p (same med.):	0,1

4 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade natural.

O teste de Kruskal-Wallis mostra que a quantidade de raízes explica 82,86% da variação nos valores perda de massa na condição de umidade natural, os outros 17,13% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem das amostras com 1,0% e 1,5% e as amostras com 0,5% de raízes diferem das amostras com 1,5% de raízes.

Teste Kruskal-Wallis - test for equal medians

H (chi2):	9.564
Hc (tie corrected):	9.564
p (same):	0.02266
There is a significant difference between sample medians	

TESTE DE TUKEY

	Rem. sem raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. sem raízes		0,6461	0,03383	0,001952
Rem. 0,5% raízes	1,691		0,1805	0,008214
Rem. 1,0% raízes	4,924	3,233		0,1886
Rem. 1,5% raízes	8,111	6,42	3,187	

5 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade seca ao ar.

A ANOVA mostra que a quantidade de raízes explica 83,88% da variação nos valores de perda de massa na condição de umidade seca ao ar, os outros 16,12% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem das amostras com 0,5% e 1,0% de raízes e as amostras remoldadas com 1,5% de raízes diferem das amostras com 0,5%.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2516.13516	3	838.71172	13.87622	0.0015506	4.0661806
Dentro dos grupos	483.5388569	8	60.44235711			
Total	2999.674017	11				

TESTE DE TUKEY

	Rem. sem raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. sem raízes		0,001658	0,005549	0,1599
Rem. 0,5% raízes	8,318		0,7378	0,03267
Rem. 1,0% raízes	6,861	1,456		0,1388
Rem. 1,5% raízes	3,358	4,959	3,503	

6 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras sem raízes e amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade pré-umedecida.

A ANOVA mostra que a quantidade de raízes explica 96,47% da variação nos valores de perda de massa na condição de umidade pré-umedecida, os outros 3,53% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas sem raízes diferem dos outros três grupos de amostras.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4551.745426	3	1517.248	72.91776	3.76E-06	4.066181
Dentro dos grupos	166.4613312	8	20.80767			
Total	4718.206757	11				

TESTE DE TUKEY

	Rem. sem raízes	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. sem raízes		0,000003785	0,00001824	0,00002666
Rem. 0,5% raízes	19,32		0,1216	0,05622
Rem. 1,0% raízes	15,69	3,637		0,9447
Rem. 1,5% raízes	14,91	4,411	0,774	

7 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade natural.

O teste de Kruskal-Wallis mostra que a quantidade de raízes explica 74,63% da variação nos valores perda de massa na condição de umidade natural, os outros 25,37% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas com 0,5% de raízes diferem apenas das amostras com 1,5%.

Kruskal-Wallis test for equal medians

H (chi2):	6.489
Hc (tie corrected):	6.489
p (same):	0.03899
There is a significant difference between sample medians	

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,1667	0,01341
Rem. 1,0% raízes	2,992		0,1731
Rem. 1,5% raízes	5,942	2,95	

8 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade seca ao ar.

A ANOVA mostra que a quantidade de raízes explica 76,78% da variação nos valores de perda de massa na condição de umidade seca ao ar, os outros 23,22% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas com 0,5% de raízes diferem apenas das amostras com 1,5% de raízes.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	785.41	2	392.71	9.922743	0.012511	5.143253
Dentro dos grupos	237.46	6	39.58			
Total	1022.87	8				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,4584	0,01162
Rem. 1,0% raízes	1,801		0,05044
Rem. 1,5% raízes	6,13	4,329	

9 - Ensaio de Perda por Imersão Modificado - Comparação entre amostras com as três taxas de raízes (0,5%, 1,0% e 1,5%) na condição de umidade pré-umedecida.

A ANOVA mostra que a quantidade de raízes explica 71,17% da variação nos valores de perda de massa na condição de umidade pré-umedecida, os outros 28,83% estão relacionados a outros fatores. As amostras remoldadas com 0,5% de raízes diferem apenas das amostras com 1,5% de raízes.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	230.87	2	115.433992	7.40565566	0.023964	5.143253
Dentro dos grupos	93.52	6	15.5872751			
Total	324.39	8				

TESTE DE TUKEY

	Rem. 0,5% raízes	Rem. 1,0% raízes	Rem. 1,5% raízes
Rem. 0,5% raízes		0,05632	0,02626
Rem. 1,0% raízes	4,203		0,8083
Rem. 1,5% raízes	5,098	0,895	