

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

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM PERFIL  
DE SOLO TÍPICO DA ÁREA DO CAMPO DE  
INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA – RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Leila Posser Fernandes**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM PERFIL DE  
SOLO TÍPICO DA ÁREA DO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE  
SANTA MARIA – RS**

**Leila Posser Fernandes**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Posser Fernandes, Leila  
AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO  
TÍPICO DA ÁREA DO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA - RS  
/ Leila Posser Fernandes.-2015.  
150 p.; 30cm

Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro  
Coorientador: Andréa Valli Nummer  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2015

1. Erodibilidade 2. Erosão 3. Caracterização  
Geotécnica 4. Ensaios geotécnicos 5. Campo de Instrução  
de Santa Maria I. Barbosa Pinheiro, Rinaldo José II.  
Valli Nummer, Andréa III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por  
Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica de Teses e Dissertações

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Leila Posser Fernandes. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Riachuelo, 150, Santa Maria, RS, 97050-010

Fone (0xx) 55 9976 4837; Fax (0xx) 55 9989 6909; End. Eletr: leilapfernandes@hotmail.com

---

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA ERODOBILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO  
TÍPICO DA ÁREA DO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA –  
RS**

elaborada por  
**Leila Posser Fernandes**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

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

**Andréa Valli Nummer, Dra. (UFSM)**  
(Co-Orientadora)

**Felipe Gobbi Silveira, Dr. (UNISINOS)**

**José Mario Doleys Soares, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 13 de março de 2015.

*À minha família: meu pai, Luís Carlos; minha mãe, Lisandra e minha irmã  
Lais (in memoriam), dedico esta dissertação.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria, instituição que viabilizou a realização deste curso de Pós-Graduação com qualidade de ensino público e gratuito.

À FAPERGS pela bolsa de estudo concedida durante a realização do mestrado.

Ao Campo de Instrução de Santa Maria por permitir que esta pesquisa fosse realizada em sua área.

Ao meu orientador, Rinaldo José Barbosa Pinheiro, pela orientação, confiança, amizade, dedicação e a troca de conhecimento durante a realização deste trabalho, muito obrigada.

À minha Co-Orientadora, Andréa Valli Nummer, pela orientação, amizade, apoio, saídas a campo e pelo conhecimento transmitido, muito obrigada.

Aos meus pais, Luis Carlos e Lisandra pela confiança, apoio, incentivo e por muitas vezes terem renunciado aos seus próprios sonhos para me deixarem a maior de todas as heranças: a EDUCAÇÃO, meu muito obrigada pelo exemplo de vida.

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM PERFIL DE SOLO TÍPICO DA ÁREA DO CAMPO DE INSTRUÇÃO DE SANTA MARIA – RS**

**AUTORA: LEILA POSSER FERNANDES**

**ORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO**

**Data e Local da Defesa: Santa Maria, 13 de março de 2015.**

A pesquisa que resultou nesta dissertação de mestrado foi desenvolvida em um perfil de solo típico do Campo de Instrução de Santa Maria, RS. O objetivo principal é a avaliação da erodibilidade dos solos superficiais dos horizontes A, B e C que compõem esse perfil de solo. A metodologia aplicada consistiu no levantamento bibliográfico; investigações de campo e na etapa de laboratório. Nesta última foram realizados os ensaios de caracterização física e química, ensaios de resistência ao cisalhamento direto, ensaio do penetrômetro dinâmico de cone, ensaios para avaliação indireta (desagregação, cone de laboratório, infiltrabilidade e perda por imersão) e direta (Inderbitzen) da erodibilidade. Os resultados foram classificados segundo a proposta geotécnica de Bastos (1999) para a estimativa da erodibilidade de solos não saturados na região de Porto Alegre. O perfil de solo está situado próxima a jazida de empréstimo que está sobre um provável terraço fluvial. Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto demonstraram maior susceptibilidade à erosão para o horizonte C. O ensaio do penetrômetro dinâmico de cone confirmou os resultados encontrados por Pittelkow (2013) e Santos (2014) demonstrando maior resistência à penetração para a camada de crosta. Na avaliação indireta da erodibilidade – através da estimativa do fator erodibilidade ( $K_{USLE}$ ) os solos dos horizontes A, B e C, situou-se entre 0,24 e 0,40, verificando que não se consegue separar estes materiais quanto à erodibilidade. O ensaio de desagregação demonstrou maior susceptibilidade à erosão para os horizontes B e C, independente da condição de umidade. Os resultados do ensaio de cone de laboratório não foram satisfatórios com os resultados observados em campo. A metodologia MCT apresentou uma boa relação de correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos nos locais estudados, principalmente para a condição de umidade seca ao ar, comprovando sua aplicabilidade a estes materiais. 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. Segundo esta avaliação, para as amostras dos horizontes B e C verificou-se certa tendência de valores mais elevados de erodibilidade na condição seca ao ar. Também se verificou valores mais baixos de erodibilidade do horizonte A, situando-se de aproximadamente 0 a 13,8 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa, para a condição de umidade natural e seca ao ar, respectivamente. No horizonte B os valores situaram-se em um patamar intermediário, para as amostras na condição de umidade natural. O valor de K para o horizonte C situou-se em 65,8 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa, para a umidade natural. Não se conseguiu determinar as tensões hidráulicas críticas para os horizontes A e B, na condição de umidade natural, mas para as demais condições situaram entre 0,94 e 1,29 Pa para o horizonte A e 0,95 e 1,17 Pa para o horizonte B. Para o horizonte C os valores situaram-se entre 0,90 e 1,19 Pa. Os horizontes B e C foram os materiais mais potencialmente erodíveis. Os critérios que obtiveram melhor correlação com a proposta geotécnica de Bastos (1999) foram o coeficiente de erodibilidade obtido no ensaio Inderbitzen e o critério de erodibilidade da metodologia MCT.

**Palavras-chave:** Erosão. Feições erosivas. Caracterização geotécnica.

## **ABSTRACT**

Master's Thesis  
Programme of Post-Graduation in Civil Engineering  
National University of Santa Maria

### **SOIL ERODIBILITY STUDY ON A ROAD LAND OF THE SANTA MARIA INSTRUCTION COURSE – RS**

**AUTHOR: LEILA POSSER FERNANDES**  
**ADVISER: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO**  
Defense Place and Date: Santa Maria, 13<sup>th</sup> of March, 2015.

The research that resulted in this master thesis was developed on a dirt road Instruction Campo de Santa Maria, RS. The main objective was to study the erodibility of the surface soil horizons A, B and C. The methodology consisted in the literature; field investigations and laboratory stage. In the latter were carried out tests of physical and chemical characterization, direct shear strength tests, cone penetrometer dynamic test, testing for indirect evaluation (breakdown, laboratory cone, infiltration rate and loss by immersion) and direct (Inderbitzen) erodibility. The results were compared with the proposed Bastos (1999) to estimate the soil erodibility unsaturated located in Porto Alegre. A road evaluated this on a probable fluvial terrace. Based on results of direct shear tests showed greater susceptibility to erosion to the horizon C. The test of dynamic cone penetrometer confirmed the results found by Pittelkow (2013) and Santos (2014) showing greater penetration resistance for the crust layer. In indirect evaluation of erodibility - by estimating the erodibility factor (KUSLE) soil horizons A, B and C, was between 0.24 and 0.40, making sure it can not separate these materials on the erodibility. The breakdown test showed increased susceptibility to erosion for the B and C horizons, regardless of the moisture condition. The results of the laboratory test cone was unsatisfactory with the results observed in the field. The MCT methodology presented a good relationship of correspondence between the results of the tests and the behavior of soils in the studied sites, primarily for the air condition to dry moisture, proving their applicability to the materials. Direct evaluation made through the tests Inderbitzen confirmed that the loss of soil generally is greater the larger the slope of the ramp and flow test. According to this assessment to the horizon samples B and C there was a tendency of higher values of erodibility in dry condition the air. It was also found lower values of erodibility of the horizon, standing from about 0 to 13.8 g / cm<sup>2</sup> / min / Pa, for natural moisture condition and dry air, respectively. B horizon values stood at an intermediate level, for samples in natural moisture condition. The values for K for the C horizon stood at 65.8 g / cm<sup>2</sup> / min / Pa for the natural moisture. Did not establish critical hydraulic stresses for the A and B horizons, the natural moisture condition, but for the other conditions ranged between 0.94 and 1.29 Pa for the horizon and 0.95 and 1.17 Pa for the B horizon to horizon C values were between 0.90 and 1.19 Pa. The B and C horizons were the materials most potentially erodible. The criteria had better correlation with geotechnical proposed Bastos (1999) were the erodibility coefficient obtained in Inderbitzen test and the erodibility criteria MCT methodology.

**Key words:** Erosion. Erosional features. Geotechnical characterization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Erosão por salpicamento ou splash (ROCHA, 2014).....	19
Figura 2.2 -	Sulcos, ravinas e voçorocas no Loteamento Algarve (BASTOS, 1999).....	23
Figura 2.3 -	Aplicação das forças durante o ensaio de cisalhamento direto (SANTOS, 2014).....	42
Figura 2.4 -	Envoltória de resistência.....	43
Figura 2.5 -	Esquema do penetrômetro dinâmico de cone (BENEVIDES, 2012).....	44
Figura 2.6 -	Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995).....	49
Figura 2.7 -	Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade (adaptado de Nogami et al., (1987).....	50
Figura 2.8 -	Curva típica do deslocamento do menisco x tempo para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT (adaptado de Bastos (1999)).....	51
Figura 2.9 -	Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificada da metodologia MCT (FERNANDES, 2013).....	52
Figura 2.10 -	Equipamento do ensaio de penetração de cone proposta por Alcântara (1997).....	54
Figura 2.11 -	Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS (BASTOS, 1999).....	55
Figura 3.12 -	Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra versus tempo para o ensaio Inderbitzen (adaptado de Bastos (1999)).....	57
Figura 3.13 -	Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, $\tau_h$ crit (BASTOS, 1999).....	59
Figura 3.1 -	Coleta das amostras indeformadas.....	63
Figura 3.2 -	Execução do ensaio do Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) em campo.....	65
Figura 3.3 -	Execução do ensaio de caracterização física, (a) análise granulométrica e (b) limite de plasticidade e liquidez.....	66
Figura 3.4 -	Preparação da amostra para a realização do ensaio de cisalhamento direto..	68
Figura 3.5 -	Equipamento utilizado para a realização do ensaio de cisalhamento direto..	68
Figura 3.6 -	Etapas do ensaio de desagregação para amostras nas quatro condições de submersão.....	70
Figura 3.7 -	Equipamento utilizado para a realização do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para amostras do horizonte A.....	71
Figura 3.8 -	Execução do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT, com o berço metálico, o corpo de prova e cápsula coletora realizado com a amostra do horizonte A.....	72
Figura 3.9 -	Penetrômetro utilizado para a realização do ensaio de cone com a amostra a ser ensaiada.....	74
Figura 3.10 -	(a) material erodido sendo coletado e (b) detalhe do encaixe da amostra no equipamento, amostra do horizonte B.....	76
Figura 4.1 -	Mapa de Localização da área de estudo (SANT'ANA, 2012)	77
Figura 4.2 -	Delimitação da área de estudo dentro do Campo de Instrução de Santa Maria (PITTELKOW, 2013).....	80
Figura 4.3 -	Perfil do terraço pluvial localizado na área de estudo.....	81
Figura 4.4 -	Estrada de terra situada na área de estudo.....	82
Figura 4.5 -	Presença de crosta devido à compactação pela passagem dos blindados (PITTELKOW, 2013).....	83
Figura 5.1 -	Curva granulométrica com defloculante dos horizontes A, B e C.....	87
Figura 5.2 -	Curva de Tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por	91

	deslocamento para amostras do horizonte A.....	
Figura 5.3 -	Curva de Tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do horizonte B.....	92
Figura 5.4 -	Curva de Tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do horizonte C.....	93
Figura 5.5 -	Envoltórias de ruptura ao cisalhamento para os ensaios realizados na umidade natural, inundada e seca ao ar.....	95
Figura 5.6 -	Curva DCP para o perfil da estrada estudada.....	96
Figura 5.7 -	Curva DCP para a estrada estudada com presença de crosta.....	97
Figura 5.8 -	Curva DCP para a estrada estudada sem a presença de crosta.....	98
Figura 5.9 -	Comportamento inicial e final das amostras quando submetidas à inundação.....	103
Figura 5.10 -	(a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte A.....	106
Figura 5.11 -	(a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte B.....	106
Figura 5.12 -	(a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte C.....	106
Figura 5.13 -	Aplicação do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para os horizontes estudados.....	107
Figura 5.14 -	Variação da perda por imersão para as diferentes condições de umidade das amostras.....	108
Figura 5.15 -	Variação da sorção para as diferentes condições de umidade das amostras..	109
Figura 5.16 -	Relação $\pi/s$ em função da umidade das amostras (os resultados da relação $\pi/s$ na condição pré-umedecida estão reduzidas em 100vezes).....	109
Figura 5.17 -	Valores de penetração do cone de laboratório obtidos para os horizontes estudados em diferentes condições de umidade das amostras.....	111
Figura 5.18 -	Resultados dos DP (%) Obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nos solos dos horizontes estudados.....	112
Figura 5.19 -	Resultados dos DPA (%) Obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nos solos dos horizontes estudados.....	112
Figura 5.20 -	Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras de diferentes condições de umidade do horizonte A para as vazões de 3 l/min e 6 l/min...	114
Figura 5.21 -	Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras de diferentes condições de umidade do horizonte B para as vazões de 3 l/min e 6 l/min...	115
Figura 5.22 -	Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras de diferentes condições de umidade do horizonte C para as vazões de 3 l/min e 6 l/min...	116
Figura 5.23 -	Perda de solo obtida para vazão de 3 l/min, na condição de umidade natural, para os horizontes estudados.....	117
Figura 5.24 -	Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras, (a) horizonte A, (b) horizonte B e (c) horizonte C, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida.....	119
Figura 5.25 -	Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen.....	120
Figura 5.26 -	Relação entre a % passante na peneira #200, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	124
Figura 5.27 -	Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	126

Figura 5.28 –	Relação entre o índice de plasticidade (IP), a % passante na peneira #200 e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	127
Figura 5.29 -	Relação entre os parâmetros de erodibilidade KUSLE, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)	128
Figura 5.30 -	Relação entre a Razão de Dispersão (RD), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	129
Figura 5.31 -	Relação entre $\pi/s$ (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras na condição de umidade natural.....	130
Figura 5.32 -	Relação entre $\pi/s$ (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras secas ao ar.....	131
Figura 5.33 -	Relação entre DP (%) e o coeficiente de sorção (s) obtida no ensaio de cone de laboratório e perda de massa por imersão realizadas com os solos estudados.....	132
Figura 5.34 -	Relação entre DPA (%) e o coeficiente de sorção (s) obtida no ensaio de cone de laboratório e perda de massa por imersão, realizadas com os solos estudados.....	133
Figura 5.35 -	Relação entre a coesão na umidade natural (c), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).	134
Figura 5.36 -	Relação entre a coesão inundada (c'), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	135
Figura 5.37 -	Relação entre a variação de coesão ( $\Delta c$ ), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	136
Figura 5.38 -	Relação entre a variação do potencial de colapso ( $I_c$ ), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento (BASTOS, 1999).....	29
Tabela 2.2 -	Classificação da estrutura (WISCHMEIER SMITH, 1978).....	31
Tabela 2.3 -	Classificação do coeficiente de permeabilidade (HANN et al., 1994).....	31
Tabela 2.4 -	Classificação do fator K de erodibilidade (CARVALHO, apud CAVALCANTE e ARAÚJO, 2005) .....	32
Tabela 2.5 -	Classificação relativa da erodibilidade (TATTO (2007), adaptado de BASTOS (1999)) .....	34
Tabela 2.6 -	Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as classes de erodibilidade.....	34
Tabela 3.1 -	Valores de velocidade de escoamento (v), altura da lâmina d'água (h) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para combinações de vazão (Q) e inclinação de rampa (i). (BASTOS, 1999) .....	34
Tabela 3.2 -	Número de amostras indeformadas coletadas e seus respectivos ensaios.....	64
Tabela 5.1 -	Resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos e limite de consistência. ....	85
Tabela 5.2 -	Resumo dos ensaios de granulometria e classificação dos solos.....	86
Tabela 5.3 -	Determinação dos índices físicos dos horizontes do perfil geotécnico estudado.....	88
Tabela 5.4 -	Resultado da análise química.....	89
Tabela 5.5 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto na umidade natural, inundado e seco ao ar.....	94
Tabela 5.6 -	Valores do índice de penetração (DPI) em função da profundidade de penetração para o perfil da estrada.....	98
Tabela 5.7 -	Valores do índice de penetração (DPI) em função da profundidade de penetração para a estrada com presença de crosta.....	98
Tabela 5.8 -	Valores do índice de penetração (DPI) em função da profundidade de penetração para a estrada sem presença de crosta.....	99
Tabela 5.9 -	Estimativa do coeficiente de erodibilidade – KUSLE	100
Tabela 5.10 -	Resultado dos ensaios de desagregação.....	102
Tabela 5.11 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte A - critério de erodibilidade da metodologia MCT.....	104
Tabela 5.12 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte B - critério de erodibilidade da metodologia MCT.....	104
Tabela 5.13 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte C - critério de erodibilidade da metodologia MCT.....	105
Tabela 5.14 -	Valores de penetração e parâmetros de variação de penetração obtidos em ensaios de cone de laboratório para os horizontes estudados.....	110
Tabela 5.15 -	Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10-3 g/cm <sup>2</sup> /min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros $\tau_{crit}$ (Pa) e K (10-2 g/cm <sup>2</sup> /min/Pa). ....	117

Tabela 5.16 -	Fator de erodibilidade da USLE, parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta da erodibilidade para os solos estudados por Bastos (1999), Fernandes (2011) Basso (2013) e neste trabalho.....	122
Tabela 5.17 -	Valores da taxa de erodibilidade (K) medidos nos ensaios de Inderbitzen e parâmetros geomecânicos referentes à resistência ao cisalhamento (c, c' e $\Delta c$ ) e à colapsidade (Ic) para os solos estudados por Bastos (1999), Fernandes (2011), Basso (2013) e neste trabalho.....	123
Tabela 5.18 -	Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes estudados de acordo com a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999): Classe 1 - Baixa; Classe 2 - Média a baixa, Média e Média a Alta; Classe 3 – Alta e por Alcântara (1997) para critério baseado no cone de laboratório: Classe 1 – Baixa; Classe 2 – Alta.....	138

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 EROSÃO: CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3 ERODIBILIDADE DOS SOLOS, ÍNDICES E MODELOS DE EROSÃO</b> .....	<b>28</b>
2.3.1 Índices e modelos de erosão.....	29
2.3.2 O enfoque geotécnico – aplicação dos conceitos de Mecânica dos Solos.....	33
<b>2.4 EROSÃO EM ESTRADAS DE TERRA</b> .....	<b>35</b>
<b>2.5 ENSAIOS GEOTÉCNICOS PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE</b> .....	<b>39</b>
2.5.1 Ensaios de caracterização física.....	39
2.5.2 Ensaio de cisalhamento direto.....	41
2.5.3 Ensaio do penetrômetro dinâmico de cone – DCP.....	43
2.5.4 Ensaio de desagregação.....	46
2.5.5 Critérios de erodibilidade tendo como base a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).....	48
2.5.6 Ensaio de cone de laboratório.....	53
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>61</b>
<b>3.1 ETAPA DE GABINETE</b> .....	<b>61</b>
<b>3.2 ETAPA DE CAMPO</b> .....	<b>62</b>
<b>3.3 ETAPA DE LABORATÓRIO</b> .....	<b>65</b>
3.3.1 Ensaios de caracterização física e química.....	66
3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto.....	62
3.3.3 Ensaios para a avaliação indireta da erodibilidade.....	63
3.3.3.1 Ensaio de desagregação.....	63
3.3.3.2 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT.....	65
3.3.3.3 Ensaio de cone de laboratório.....	69
3.3.4 Ensaio para avaliação direta da erodibilidade - Ensaio de Inderbitzen.....	74
<b>4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>77</b>
<b>4.1 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>80</b>
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>85</b>
<b>5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS</b> .....	<b>85</b>
<b>5.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA</b> .....	<b>89</b>
<b>5.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO</b> .....	<b>90</b>
<b>5.4 ENSAIO DE PENETRÔMETRO DINÂMICO DE CONE (DCP)</b> .....	<b>96</b>
<b>5.5 AVALIAÇÃO INDIRETA DA ERODIBILIDADE</b> .....	<b>100</b>
5.5.1 Estimativa do fator erodibilidade pela Equação Universal de Perda do Solo ( $K_{USLE}$ ).....	100
5.5.2 Avaliação do potencial de desagregação dos solos.....	101
5.5.3 Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT.....	104
5.5.4 Critérios de erodibilidade baseado no ensaio de cone de laboratório.....	110
<b>5.6 AVALIAÇÃO DIRETA DA ERODIBILIDADE - ENSAIO DE INDERBITZEN</b> .....	<b>113</b>
<b>5.7 ERODIBILIDADE DOS HORIZONTES ESTUDADOS</b> .....	<b>120</b>
5.7.1 Avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos.....	120
5.7.2 Parâmetros de erodibilidade e parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta da erodibilidade.....	121
5.7.2.1 Análise dos parâmetros físicos e geomecânicos.....	123
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>139</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>141</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A erosão é considerada um dos problemas ambientais mais alarmantes enfrentados na atualidade em virtude da ocorrência de grande perda de solo agricultável, assoreamento dos recursos hídricos, deslizamentos de terra e perda de nutrientes do solo. De uma maneira geral define-se erosão como sendo um processo natural de desagregação de partículas de solo ou rocha, seguido do seu transporte e deposição, causada por agentes erosivos, tais como, a água, o vento e o gelo.

As consequências dos processos erosivos, tanto no meio rural como urbano, tem provocado nos últimos anos, uma intensa investigação e debate sobre os parâmetros e mecanismos responsáveis pela erosão, assim como possíveis medidas a serem adotadas para a prevenção e controle das áreas afetadas.

Compreender os processos erosivos e sua evolução é um processo complexo, pois envolve o conhecimento e a concepção de muitas variáveis (fatores) e exige uma visão sistêmica do fenômeno.

Para Bastos (1999), do ponto de vista da Geologia de Engenharia e da Geotecnia, a identificação, avaliação e compreensão dos parâmetros e mecanismos que determinam os processos erosivos, são fundamentais para elaboração de projetos de contenção e controle da erosão.

Para Camapum de Carvalho et al., (2006), o processo erosivo depende tanto de fatores externos como o potencial de erosividade da chuva e o escoamento superficial, quanto de fatores internos relacionados à desagregação e à erodibilidade do solo. Os principais fatores que interferem no processo erosivo podem ser agrupados em climáticos, topográficos, vegetação e solo.

Em relação ao solo, um dos fatores condicionantes da erosão é a erodibilidade, que pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que as partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo.

Devido a sua grande complexidade, muitos estudos são feitos com a finalidade de conhecer e compreender como a erodibilidade prejudica os diferentes tipos de solos.

Em Santa Maria esta situado um dos maiores contingentes militares do país. O Campo de Instrução de Santa Maria (CISM) é uma área do Exército Brasileiro destinada à instrução militar com o uso de blindados e viaturas sobre rodas. Por estar localizado numa área de fragilidade ambiental e por não possuir programas de preservação e conservação do solo, essa

área apresenta inúmeros impactos, como a destruição da cobertura vegetal, compactação do solo, formação de campos de areias, sulca e ravinas, tendo como consequência o assoreamento dos cursos d'água.

Neste contexto, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar a erodibilidade de um perfil de solo típico do Campo de Instrução de Santa Maria – RS.

Entre os objetivos específicos estão: (a) revisar os conceitos referentes a erosão e ao principal fator condicionante desse processo, a erodibilidade; (b) analisar através de ensaios geotécnicos as propriedades e características dos solos; e (c) analisar e comparar os resultados dos ensaios de laboratório e chegar as conclusões pertinentes. Para complementar este estudo, foi realizada a classificação do solo quanto à erodibilidade, conforme as propostas e critérios apresentados por Bastos (1999), a fim de classificar o solo quanto a sua proposta.

A realização deste estudo pode ser utilizada para a previsão da suscetibilidade à erosão dos solos e possibilitar a gestão e planejamento da área do Campo de Instrução de Santa Maria.

Este trabalho é estruturado em 6 capítulos. O primeiro capítulo é a introdução, o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura abordando os temas relacionados com a erosão, seus conceitos e classificação; os fatores que condicionam os processos erosivos; a erodibilidade dos solos; a erosão em estrada de terra; e ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade mais frequentemente utilizados no meio geotécnico.

O Capítulo 3 aborda a metodologia aplicada no desenvolvimento desta dissertação, que consistiu em uma etapa de gabinete, investigação de campo e ensaios de laboratório. No estudo inicial de gabinete foi realizado um levantamento dos materiais disponíveis sobre o tema. Na investigação de campo foram observados os processos erosivos atuantes na área, complementados pelo ensaio de penetrômetro dinâmico de cone, sendo estudados três horizontes de solo. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para posterior realização dos ensaios geotécnicos. Na etapa de laboratório foram realizados os ensaios de caracterização física e química, ensaios de resistência ao cisalhamento, avaliação indireta e direta da erodibilidade dos horizontes estudados.

No Capítulo 4 é apresentada a área que compreende o CISM, assim como sua caracterização. Devido a grande extensão do CISM, a área em estudo foi delimitada para um perfil de solo típico do CISM, que esta situada próximo à uma jazida de material de empréstimo. O Capítulo 5 apresenta a análise dos resultados, através dos resultados da caracterização geotécnica e de avaliação da erodibilidade nos horizontes estudados. As conclusões são apresentadas no Capítulo 6.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo, baseia-se principalmente na temática da erosão, sendo composta pelos seguintes subcapítulos: (a) erosão: conceito e classificação; (b) fatores que condicionam os processos erosivos; (c) erodibilidade dos solos índices e modelos de erosão; (d) erosão em estradas de terra; e (e) ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade.

### **2.1 Erosão: conceito e classificação**

Conforme Basso (2013) foi na Conferencia das Nações Unidas para o Meio Ambiente realizado em Estocolmo em 1972, o primeiro momento em que o tema erosão, suas causas e consequências, foi abordada pela comunidade internacional. Desde então, a erosão, juntamente com 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 âmbito da Engenharia Geotécnica, destacam-se no Brasil os trabalhos de Fragassi (2001), Koetz (2003), Jacintho et al., (2006), Camapum de Carvalho et al., (2006b) realizados na região centro oeste e, no Rio Grande do Sul, os trabalhos de Maciel Filho (1997), Dias et al., (1998), Bastos (1999) e aqueles que vem sendo desenvolvidos por pesquisadores do Grupo Geoma da Universidade Federal de Santa Maria, entre outros.

O Manual de Geotecnia do Departamento de Estradas e Rodagem (DER), publicado em 1991, define erosão como sendo 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 continua 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.

Para Thornes (1980 apud GUERRA E CUNHA, 1996), os mecanismos dos processos erosivos básicos variam no tempo e no espaço, e a erosão ocorre a partir do momento em que as forças que removem e transportam materiais excedem aqueles que tendem a resistir à remoção.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1999), erosão significa um conjunto de ações que incluem o desprendimento, arraste e deposição das partículas de solo ou rochas, causado por agentes como a água, o vento, o gelo ou a gravidade. Particularizando, a erosão onde o agente causador é a água é chamada de erosão hídrica.

Bigarella (2003) enfatiza que a erosão implica na relação de fragmentação das rochas ou na decomposição química das mesmas, bem como na remoção superficial ou subsuperficial dos produtos de intemperismo.

A literatura classifica a erosão quanto a sua natureza sob duas formas: a erosão geológica e a erosão acelerada. A primeira ocorre de forma natural sem intervenção humana, caracterizada pela desagregação e transporte de materiais do solo pelos agentes erosivos, de forma lenta e contínua; já a segunda, também chamada de antrópica, é um processo rápido e destrutivo, induzido principalmente pela ação humana, gerando desequilíbrio nas fases de erosão natural e sedimentação (BASTOS, 1999).

As principais causas, dos processos de erosão acelerada são o desmatamento e posterior uso do solo para atividades agrícolas e pastoris (GUERRA & VITTE, 2004). A construção civil, o crescimento das cidades, a mineração e outras atividades de cunho econômico, também contribuem de forma direta para o surgimento e agravante de situações de erosão acelerada e que quase sempre são irreversíveis.

Em se tratando do agente causador, a erosão pode ser de origens eólica, hídrica e glacial. No meio geotécnico e neste estudo, a erosão hídrica é a mais estudada por causar grandes danos ambientais. A erosão hídrica tem a chuva como agente erosivo, manifestando sua ação em duas frentes: pela ação da gota da chuva no solo e o pelo escoamento superficial. Ambos atuam no desprendimento e transporte das partículas (BASTOS, 1999). A desagregação das partículas do solo tem sua origem no chamado efeito *splash* ou salpicamento, que é o efeito da gota da chuva sobre o solo como mostra a Figura 2.1.

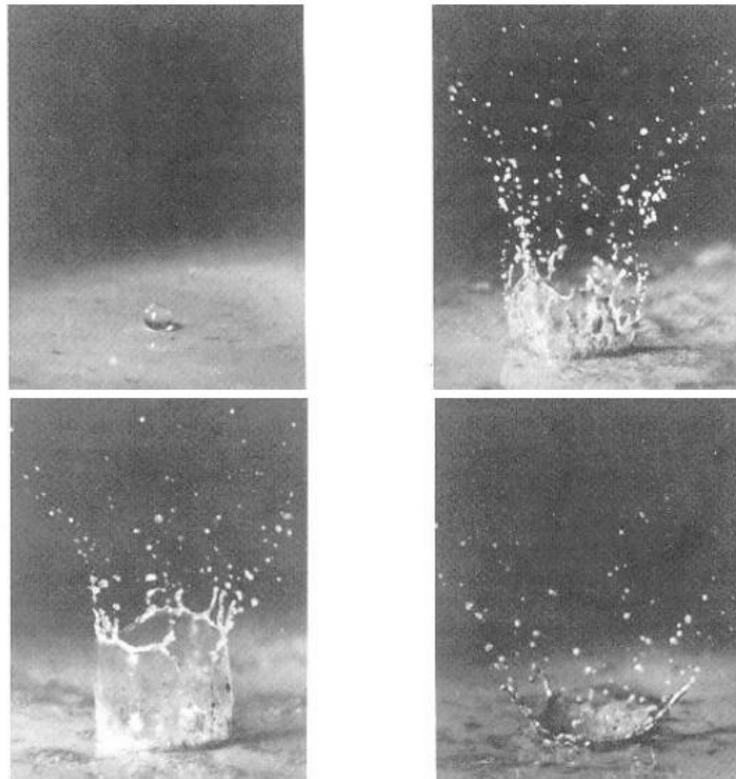


Figura 2.1 - Erosão por salpicamento ou splash (ROCHA, 2014)

O efeito *splash* ocorre quando a energia acumulada em uma gota de chuva que cai sobre um solo desprotegido pela vegetação, é muito grande. O impacto da gota causa o desprendimento e a projeção das partículas menores do solo no ar, formando uma cratera no ponto onde a gota toca o solo. Segundo Guerra e Mendonça (2004), essa cratera irá dificultar a infiltração da água da chuva. Ao entorno da área compactada, ocorre o deslocamento das partículas que são lançadas para o exterior da cratera formada. A partir dessa etapa, começam a se formar as poças nas irregularidades existentes no topo do solo. No momento que as poças se rompem, inicia-se então o escoamento superficial e conseqüentemente o transporte de partículas/sedimentos.

O efeito *splash* tem seus efeitos agravados, pela remoção da cobertura vegetal, que seria a proteção natural dos solos, contra a erosão. Em áreas rurais o efeito *splash* está associado a práticas incorretas de manejo e uso dos solos e em áreas urbanas está geralmente

associado a loteamentos recém-implantados com terrenos sem cobertura vegetal e em ruas não pavimentadas.

O escoamento superficial passa a se dar quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração do solo (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006). Portanto, quando houver excesso de precipitação e o solo não comportar mais a infiltração da água, se nesse caso o solo estiver desprotegido surgem às estrias de erosão e ravinas, iniciando-se o processo de erosão.

Guerra (2002) classifica a erosão quanto ao grau de intensidade em: superficial ou laminar, erosão interna ou piping e linear ou concentrada, que originam os sulcos; ravinas e voçorocas. Ou seja, os processos erosivos provocados pela ação das chuvas, desenvolvem-se primeiramente pelo escoamento superficial laminar, evoluindo para a formação de sulcos que por sua vez transformam-se em ravinas para posteriormente atingirem um estágio mais impactante, chamado de voçoroca (quando atinge o lençol freático).

A erosão superficial compreende as feições erosivas oriundas de escoamento difuso das águas, resultando na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo. Na erosão superficial ocorre a remoção de uma fina camada superficial, percebida pela exposição de raízes das plantas e assoreamento de cursos d'água, além da coloração do solo devido à perda de elementos químicos. Segundo Camapum de Carvalho et al (2006a), a erosão superficial pode ou não propiciar o aparecimento de sulcos, mas quando gerados, poderão evoluir para ravinas ou voçorocas. Por esse motivo, é considerada um dos tipos de erosões mais perigosas, pois muitas vezes é difícil de ser percebida (FRENDRICH et al., 1991).

Casseti (2013) trata o fluxo superficial como um processo lento, pois ocorre de forma quase imperceptível a curto e médio prazo; porém ocasionando grandes perdas de solo. Por não acarretar grandes impactos visuais no terreno, ganha menos atenção em relação aos processos lineares e, ações de recuperação, geralmente são executadas tardiamente.

Esse mesmo autor relata dados de pesquisas realizadas, por ele, na década de 1980, e que apontam áreas agrícolas e de pastagens, como os principais pontos de perda de solo por erosão superficial. Quanto à quantidade de solo que se perde, quanto mais densa a vegetação, menor essa perda.

Conforme o IPT (1991), a erosão superficial, depende de diversos fatores naturais, pertencentes a três grandes grupos: natureza do solo (propriedades físicas e morfológicas); morfologia do terreno (encosta, declive e comprimento de rampa); e o clima (dados pluviométricos).

Destaca-se que a ocorrência do escoamento superficial está diretamente ligada as condições de infiltração no solo; sendo que esta infiltração decresce com a continuidade da chuva. Não se deve desconsiderar que também interferem na infiltração fatores como a intensidade das chuvas, proximidade do lençol freático, grau de compactação e porosidade do solo, além da vegetação, da topografia e do clima. Dentro do quesito topografia, temos que quanto maior a declividade, menores serão as áreas de acúmulo de água e, portanto mais uniforme será o fluxo de escoamento superficial (PITTELKOW, 2013).

Segundo Amorim et al., (2001), o domínio da energia de impacto das gotas da chuva ou do escoamento superficial no desprendimento e transporte de sedimentos, depende se a erosão ocorre em sulcos ou em áreas entre sulcos. A erosão entre sulcos é, às vezes, referida como erosão superficial que esta relacionada com a distribuição do destacamento das partículas que ocorre de maneira uniforme e suave por toda a sua extensão.

Vilar e Prandi (1993 apud CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a) discutem o mecanismo do processo erosivo laminar, onde a erosão entre sulcos é um processo complexo e sua intensidade depende, basicamente, de três fatores: das características da chuva (erosividade, tamanho das gotas, velocidade terminal e energia cinética), das características do solo e das características da superfície (vegetação, microtopografia, rugosidade e declividade). Em resumo, a erosão entre sulcos pode ser vista como a combinação do processo de desagregação da massa do solo, pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo entre sulcos, com o transporte do solo desagregado pelo escoamento entre sulcos (FREITAS et al., 2008).

A erosão interna ou *piping*, conforme Camapum de Carvalho et al (2006), é um fenômeno subterrâneo no qual a percolação da água causa a remoção de partículas do interior do solo, originando cavidades que avançam para o interior do maciço. Para Guerra e Vitte (2004), a formação de dutos pelo escoamento subsuperficial, gera uma perda de sedimentos e aumento do diâmetro desses dutos; o que leva ao colapso do teto desses dutos, originado voçorocamento.

Podemos destacar, com base em Camapum de Carvalho et al., (2006), que, geralmente as erosões internas, ocorrem em decorrência de três situações: a) A força de percolação da água ultrapassa a resistência do solo, e ocorre em locais de descarga, onde solo toma características de liquefação, sendo suas partículas de solo arrastadas e abrindo pequenos orifícios, por onde se concentra o fluxo; b) Quando o gradiente hidráulico ultrapassa o gradiente crítico do solo, causado pelo rebaixamento do nível d'água, com isso formam-se canais que dão origem à erosão subterrânea; c) Quando a fração grossa do solo não filtra a porção fina, que é lavada pela percolação da água; resultando no surgimento de cavidades no interior do maciço.

Conforme Hargerty (1991a apud CAMAPUM DE CARVALHO et al, 2006) locais de terrenos estratificados apresentam condição geológica favorável ao surgimento de *piping*, principalmente devido ao fato do fluxo ser geralmente concentrado em uma determinada camada. Outro fator condicionante, aliado a diferença estrutural de camadas estratificadas é o relevo ondulado. Ainda referente aos processos internos, temos a presença de alcovas de regressão. Ou seja, a concentração de fluxo em subsuperfície, gera canais, pelos quais a água percola erodindo aos poucos as porções internas do maciço, formando-se vazios, que com a ação da água, aumentam de tamanho e conectam-se uns aos outros.

Já a erosão concentrada é consequência do fluxo de água superficial que se torna concentrado e pode ser de três tipos: sulcos, ravinas e voçorocas. Os conceitos de sulcos, ravinas e voçorocas diferem com relação às dimensões da incisão. Segundo Camapum de Carvalho et al., (2006) sulcos são pequenos canais de até 10 cm de profundidade, gerados pela concentração do escoamento superficial; e ravinas são canais com profundidade entre 10 e 50 cm, onde começa a haver instabilidade dos taludes.

Villar e Prandi (1993) definem voçorocas como ravinas de grandes dimensões, geralmente formadas por grandes concentrações de fluxo. Para os mesmos autores, a maior parte das voçorocas está associada a formações arenosas, mas podem ocorrer ainda em solos tendo como rocha original granitos e basaltos.

Segundo Bastos (1999), o termo voçoroca é originado do termo Tupi-Guarani, "*mboso'roka*", que significa romper ou rasgar, pode ser definida, como sendo uma ravina de grandes dimensões originada pela grande concentração do fluxo superficial, provocada pela ação antrópica, combinada com a ação do fluxo subsuperficial e subterrâneo.

As erosões por voçoroca constituem-se no estágio mais avançado da erosão, sendo caracterizadas pelo avanço em profundidade das ravinas até estas atingirem o lençol freático ou o nível de água do terreno. Este conceito utilizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1991) é o mesmo adotado neste trabalho.

A Figura 2.2 apresenta sulcos, ravinas e voçorocas que ocorrem em uma extensa área, em solos saprolíticos, no loteamento Algarve na região de Porto Alegre (BASTOS, 1999).



Figura 2.2 - Sulcos, ravinas e voçorocas no Loteamento Algarve (BASTOS, 1999)

Segundo Bastos (1999) do ponto de vista da Geologia de Engenharia e da Geotecnia, a identificação, avaliação e compreensão dos parâmetros e mecanismos que determinam o processo erosivo são fundamentais para elaboração de projetos de contenção ou controle da erosão. No entanto, o entendimento de todo o mecanismo e evolução dos processos erosivos não é simples, envolve o conhecimento de muitas variáveis além de exigir uma visão sistêmica do fenômeno.

## **2.2 Fatores que condicionam os processos erosivos**

Os processos erosivos são condicionados por diversos fatores, tornando-o um sistema complexo, pois envolve o conhecimento de diversas variáveis, que dependendo do seu grau de evolução pode ser de difícil entendimento.

Para Galeti (1985), Bertoni e Lombardi Neto (1985), Guerra e Mendonça (2004) a erosão dos solos tem como origem diversos fatores, divididos entre naturais (clima, relevo, geologia e vegetação) e antrópicos (políticos, econômicos, sociais, tecnológicos e institucionais). É justamente a soma deste conjunto de fatores que vão determinar o surgimento ou não de feições erosivas. Sendo assim, essas variáveis são significativas para explicar a erosão, mas não devem ser observadas 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.

O fator clima influi de forma direta na formação pedológica, devido sua contribuição no intemperismo, por meio do processo de desagregação de rochas. Conforme Salomão e Antunes (1998 apud Sant'Ana, 2012) os aspectos climáticos mais importantes no desenvolvimento pedogenético são representados pela 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.

Um fator climático de maior importância no desenvolvimento dos processos erosivos é a precipitação pluviométrica. 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. Mas em longos períodos sem chuva, a vegetação sofre por falta de umidade, reduzindo a proteção natural do solo. Assim, a perda de solo pelo impacto das gotas de chuva é elevada (SANT'ANA, 2012)

Outro fator de saliência que tem influência direta na erosão é o relevo, a declividade do terreno e extensão do declive. 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.

Para Oliveira e Brito (1998), IPT (1991) e Bertoni e Lombardi Neto (1985) a erosão é diretamente proporcional à declividade e ao comprimento de rampa que influenciam na velocidade da água, sendo menor nos terrenos mais planos e maiores nos terrenos com maiores comprimentos de rampa. Ainda, segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), mantendo-se fixos os demais fatores intervenientes na erosão, ao se duplicar o comprimento de rampa a perda de solo triplica. Dados apresentados por Bertoni (1959 apud BASSO, 2013) mostram que um terreno com 20m de comprimento e 20% de declividade tem a mesma perda de solo que um terreno de 120m de comprimento e com apenas 1% de declividade.

A forma das encostas ou vertentes é outro fator importante, pois é determinante na direção e na velocidade do escoamento. Para Rodrigues (1982), o desenvolvimento das voçorocas ocorre principalmente em encostas convexas coletoras e, secundariamente, em encostas convexas dispersoras, portanto, são menos propensas à erosão por voçorocas as encostas côncavas dispersoras e coletoras.

Neste contexto, Pittelkow (2013) estabelece que fatores como comprimento de rampa, declive e tipo de vertente, por influenciarem no trajeto a ser percorrido pelas águas da chuva, tendem a aumentar ou diminuir a velocidade de escoamento superficial, e, portanto a quantidade de material transportado pela erosão. Deste modo, os processos erosivos e as características do relevo apresentam uma relação de proporcionalidade.

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 contra o impacto das gotas de chuva, contribuindo para a maior infiltração da água da chuva, devido as suas raízes. Também têm relação direta com a quantidade de matéria orgânica no solo, devido ao aumento na porosidade do mesmo. Da mesma forma relaciona-se a presença de cobertura vegetal, na diminuição da velocidade da água do escoamento superficial e das águas de enxurradas.

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.

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.

Os fatores mais importantes que regem a infiltração de água no solo são o tamanho e a disposição dos espaços porosos; a umidade do solo no começo da chuva e/ou grau de saturação; sucção e o grau de agregação do solo. Solos arenosos, com grandes espaços porosos, apresentam maior velocidade de infiltração quando comparados com os solos argilosos. O material coloidal do solo tende a expandir quando saturado, reduzindo o tamanho, o espaço poroso, e conseqüentemente, a infiltração (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1985; BIGARELLA, 2003)

Além disso, o tamanho das partículas influi na capacidade de infiltração da água da chuva, interferindo no potencial de escoamento superficial e na quantidade de solo arrastado pela erosão, pois solos de textura arenosa são normalmente mais porosos, permitindo rápida infiltração. Entretanto, como possuem baixa proporção de partículas argilosas, que atuam como uma ligação entre as partículas maiores apresenta maior facilidade para a remoção das partículas de solo (PRADO, 1991). Assim, Bertoni e Lombardi Neto (1985) apontam os solos arenosos como os mais vulneráveis à erosão, visto que partículas com menor quantidade de partículas no tamanho argila, tendem a ter baixa coesão, tendo pouca resistência à processos erosivos, mesmo em pequenas precipitações e escoamentos superficiais.

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.

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 (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999). 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.

As características do solo que interferem na quantidade e velocidade da água infiltrada, bem como na estabilidade dos agregados, predominam como fatores determinantes de sua erodibilidade. Assim, as principais propriedades do solo que influenciam sua susceptibilidade à erosão são: textura, estrutura e teor de matéria orgânica.

Assim, como os fatores naturais contribuem na aceleração dos processos erosivos, o conjunto de fatores antrópicos também interfere nessa aceleração. Os principais fatores antrópicos responsáveis pela erosão acelerada são: desmatamento, abertura de estradas, construção de barragens, preparação de áreas para a agricultura, atividades minerais, agropastoris e expansão urbana desordenada.

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 impermeabilidade 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.

As estradas de terra não pavimentadas tanto no meio rural quanto no urbano, tendem a sofrer com processos erosivos das mais diversas magnitudes e que economicamente caracterizam-se como um grande problema para a gestão pública. Esses processos erosivos estão em geral atrelados à rede de drenagem inexistente, e a presença de valetas sem canalizações, nas bordas das pistas, entre outros.

Autores como Oliveira e Britto (1998), Robles et al.,(2010) e De Meyer et al., (2011) salientam a importância das pesquisas de perdas de solo em estradas não pavimentadas pois estas apresentam papel fundamental para a economia de um país e constituem a principal forma de transporte de alimentos do produtor aos centros consumidores. Para Griebler et al., (2005) um dos principais problemas que afetam a trafegabilidade das estradas não-pavimentadas é a sua degradação devido aos processos erosivos, afetando também as áreas marginais e provocando prejuízos aos mais variados setores da economia e da sociedade. O mesmo autor destaca que para a construção das estradas são necessárias a eliminação da cobertura vegetal e a compactação do solo o que reduz a infiltração de água e conseqüentemente aumenta o escoamento superficial. A grande vazão, proveniente das estradas, pode provocar o aparecimento de sulcos e voçorocas e conseqüentemente danos aos recursos hídricos por assoreamento.

### **2.3 Erodibilidade dos solos, índices e modelos de erosão**

A erosão hídrica deve ser estudada considerando a erodibilidade do solo, 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 (SILVA et al., 2000). Assim, estudos sobre a erodibilidade tem despertado um grande interesse nas pesquisas relacionadas à erosão, pois é uma propriedade que é governada pelos atributos intrínsecos dos solos, os quais podem variar de um solos para o outro, ou em um mesmo solo (BASTOS, 1999; PANACHUKI et al., 2006)

Bastos (1999) apresenta uma revisão sobre o tema erosão, mostrando como as grandes áreas de conhecimento, tais como, Agronomia, Hidráulica, Geologia e Engenharia trabalham com a erosão do solo e processos associados. A tabela 2.1 apresenta o enfoque dado por estas áreas de conhecimento.

Tabela 2.1 - Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento (BASTOS, 1999)

Área de conhecimento		Enfoque
Agronomia	Física dos Solos	Estudo de características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam a erodibilidade dos solos dos horizontes superficiais e estudos de modelos de previsão da perda do solo.
	Manejo e Conservação dos Solos	Estudo do impacto de técnicas de cultivo e manejo no processo erosivo.
Hidráulica	Hidráulica de Canais	Estudo da erosão localizada dos solos pelo fluxo de água em estruturas hidráulicas;
Geologia	Geologia de Engenharia	Estudos voltados para o diagnóstico ambiental da erosão, nas condicionantes geológicas e geomorfológicas à erosão regional e relato de obras para o controle da erosão.
Engenharia	Engenharia Geotécnica	Abordagem limitada para o problema da erosão. Poucos trabalhos na modelagem dos mecanismos de erosão e em critérios de avaliação da erodibilidade dos solos.

Segundo Bastos (2000) devido à interdisciplinaridade das abordagens, é uma tarefa audaciosa impor essa particularização. Conceitos da Agronomia, da Geologia, da Hidráulica da Mecânica dos Solos, tem sido reunidos nos trabalhos mais recentes, em modelos de erosão e na concepção de critérios de avaliação da erodibilidade.

### 2.3.1 Índices e modelos de erosão

Na Engenharia Agrônômica os estudos da Física dos Solos na busca de indexadores para a erodibilidade remontam ao início do século passado. Esses estudos buscam parâmetros para avaliar a erodibilidade baseados em propriedades físicas, químicas e mineralógicas e também no desenvolvimento de modelos de previsão das perdas de solo, com destaque para a definição de parâmetros dos modelos que representam a erodibilidade e a relação destes com outras propriedades dos solos (BASTOS et al., 2000).

Esses modelos de erosão têm por finalidade principal a previsão da perda de solo em terrenos agrícolas. Os primeiros modelos desenvolvidos eram empíricos, baseados nos fatores que influenciam a quantidade de solo removido e transportado. A erodibilidade dos solos constitui um dos fatores envolvidos. No ano de 1960 foi lançado o primeiro modelo de aceitação na previsão da perda de solo por erosão hídrica: a Equação Universal de Perda de Solo (USLE), publicada originalmente por Wischmeier e Smith (1960 apud BASTOS, 1999) e na sua versão definitiva no ano de 1978. Sua representação é a seguinte:

$$A = R . K . L . S . C . P \quad (2.1)$$

Onde:

A é a taxa de erosão;

R é o fator de erosividade da chuva (MJ.mm/hab.h.ano);

K é o fator erodibilidade do solo (t.ha.h/ha.MJ.mm);

L é o fator comprimento de rampa (adimensional);

C é o fator de cobertura vegetal (adimensional);

S é o fator grau de declividade (adimensional);

P é o fator de práticas de cultivo e manejo (adimensional).

A determinação dos valores de perda de solo provocados pela erosão laminar, esta representada em t/ha, e é realizada a partir de cálculos dos índices de cada componente da equação.

Cavalcante e Araújo (2005) apresentam os fatores de erodibilidade K da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) para os horizontes estudados, estimados através da proposta de Wischmeier e Smith (1978), a partir de resultados dos parâmetros geotécnicos obtidos, através da seguinte formulação:

$$K_{USLE} = \frac{0,137}{100} [2,1 \times 10^{-4} \cdot (12 - MO) \cdot ((Sil + Af) \cdot (100 - Arg))^{1,14} + 3,25 \cdot (S_1 - 2) + 2,5 \cdot (P_1 - 3)] \quad (2.2)$$

Onde:

$K_{USLE}$  = erodibilidade do solo (ton.ha.h/ha.MJ.mm);

MO = percentual de matéria orgânica;

Sil+Af = percentual de silte + areia fina;

Arg = percentual de argila;

$S_1$  = parâmetro que descreve a estrutura do solo conforme Tabela 2.2;

$P_1$  = parâmetro que descreve a permeabilidade segundo Tabela 2.3.

Tabela 2.2 – Classificação da estrutura (WISCHMEIER SMITH, 1978)

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

Tabela 2.3 - Classificação do coeficiente de permeabilidade (HANN et al., 1994)

Textura	Permeabilidade (cm/s)	Classificação
Argila siltosa, argila	$< 2,8 \times 10^{-5}$	6 – Muito Baixa
Argila siltosa, argila arenosa	$2,8 \times 10^{-5}$ a $5,6 \times 10^{-5}$	5 – Baixa
Argila arenosa	$5,6 \times 10^{-5}$ a $1,4 \times 10^{-4}$	4 – Baixa a Moderada
Silte	$1,4 \times 10^{-4}$ a $5,6 \times 10^{-4}$	3 – Moderada
Areia argilosa	$5,6 \times 10^{-4}$ a $1,7 \times 10^{-3}$	2 – Alta
Areia	$> 1,7 \times 10^{-3}$	1 – Muito Alta

O fator  $K_{USLE}$  de erodibilidade é classificado de acordo com Carvalho (1994, apud Cavalcante e Araújo, 2005) de acordo com a Tabela 2.4. Para a conversão de unidades do

sistema internacional (ton.ha.h/ha.MJ.mm) para o sistema métrico (t/ha/(t.m/ha.mm/hora)) multiplicou-se os valores obtidos pela aceleração da gravidade ( $g=9,8\text{m/s}^2$ ).

Segundo estes autores, a erosão depende mais da declividade do terreno, características da chuva, cobertura e manejo, do que das propriedades do solo em si. A erodibilidade, no entanto, depende muito mais da natureza do solo, o que justificaria o porquê de alguns solos erodirem mais facilmente do que outros, mesmo quando o declive, a chuva, a cobertura e o manejo são os mesmos.

Tabela 2.4 - Classificação do fator K de erodibilidade (CARVALHO, apud CAVALCANTE e ARAÚJO, 2005)

Fator K de erodibilidade (t/ha/(t.m/há.mm/hora))	Classificação
< 0,15	Baixa
0,15 a 0,30	Média
> 0,30	Alta

As pesquisas agronômicas apresentam maior interesse na erosão superficial, ou seja, nas erosões entressulcos e em sulcos limitadas ao horizonte superficial. Os dados experimentais obtidos se devem principalmente a experimentos de campo, onde parcelas de solo são submetidas à ciclo de chuva natural ou simulada. Trabalhos relativos à utilização de parcelas experimentais em várias condições de uso e manejo são apresentados por Reichert et al., (2001), Panachuki et al., (2006), Nunes e Cassol (2008), Freitas et al., (2008) e Silva et al. (2009). Todos esses trabalhos buscaram determinar a perda de solo (desagregação) e tensão cisalhante hidráulica crítica.

O modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) de Flanagan e Nearing (1995 apud BASTOS, 1999) segue uma nova tendência de abordagem, onde a erosão é dividida em erosão entressulcos, resultante do destacamento, transporte de partículas de solo pelas gotas de chuva e fluxo superficial e erosão em sulcos, resultante da ação da energia cisalhante do fluxo no leito dos sulcos.

Segundo Cantalice et al. (2005) a erodibilidade do solo em sulcos é determinada a partir da relação entre as taxas de desagregação em sulcos e tensão cisalhante do fluxo, dada pela seguinte expressão:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (2.3)$$

Onde:

$D_r$  = taxa de desagregação em sulcos ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ );

$K_r$  = erodibilidade dos solos em sulcos ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ );

$\tau$  = tensão cisalhante do fluxo ( $\text{N}/\text{m}^2$  ou Pa);

$\tau_c$  = tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\text{N}/\text{m}^2$  ou Pa).

Ainda segundo Cantalice et al. (2005) a erodibilidade em sulcos consiste no coeficiente angular da reta que relaciona as taxas de desagregação ( $D_r$ ) com a tensão cisalhante do fluxo ( $\tau$ ). A tensão crítica de cisalhamento do solo ( $\tau_c$ ) corresponde ao valor do intercepto da tensão cisalhante ( $\tau$ ) quando a taxa de desagregação é nula ( $D_r = 0$ ). Segundo Bastos (1999) de uma maneira geral, a erosão entressulcos de forma isolada, é importante em casos limitados, entretanto, condiciona a carga de sedimento no fluxo dos sulcos e, portanto, interfere na erosão.

### 2.3.2 O enfoque geotécnico – aplicação dos conceitos de Mecânica dos Solos

Segundo Vilar e Prandi (1993), no âmbito da Mecânica dos Solos, têm sido pouco o esforço de procurar estabelecer os fatores que condicionam a resistência à erosão. Em geral, sua medida é de pequena magnitude se comparados com a resistência do solo a outros esforços, além de ser necessário representar complexas condições ambientais.

Bastos (1999) quantifica a erodibilidade de solos tropicais e subtropicais, não saturados, a partir de quatro perfis representativos dos processos erosivos na região metropolitana de Porto Alegre, levando em conta a magnitude e a frequência dos processos erosivos, em três níveis principais e dois níveis intermediários como demonstra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Classificação relativa da erodibilidade (TATTO (2007), adaptado de BASTOS (1999))

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.

Bastos (1999) apresenta um levantamento de vários métodos que buscam estimar a erodibilidade através propriedades mecânicas, físicas e químicas do solo de mais fácil determinação. Estas relações não são universais, pois foram desenvolvidas em trabalhos locais e quanto extrapoladas para outras áreas não apresentam as relações sugeridas pelos seus autores.

A Tabela 2.6 resume os valores limites que este autor adotou para separar as classes de erodibilidade dos solos em baixa, média a baixa, e média, média a alta e alta. Para complementar foi colocado a proposta de Carvalho (1994) em função do fator de erodibilidade da USLE.

Tabela 2.6 - Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as classes de erodibilidade

Erodibilidade	K ( $10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)	RD (%)	% P <sub>p200</sub>	IP (%)	K <sub>USLE</sub>	pi/s	Δc
Baixa	< 0,1		>55	>10	< 15		
Média a baixa, média e média a alta	< 0,1 e <10	< 60	> 35 e <55	> 5 e < 10	>15 e < 30	< 52	< 85
Alta	> 10	> 60	< 35	< 5	> 0,30	> 52	> 85

Segundo Bastos (1999) o teor de finos, caracterizado pela % passante na peneira nº 200 ( $P_{p,200}$ ) foi a propriedade física que melhor se relaciona estatisticamente com o coeficiente de erodibilidade (K) e melhor identifica a erodibilidade dos solos estudados.

Ainda segundo o mesmo autor, a relação entre a erodibilidade e a resistência ao cisalhamento dos solos (coesão na condição de umidade natural e coesão na condição inundada) não permitem a distinção das classes de erodibilidade propostas. Assim, a redução da coesão superficial com o umedecimento dos solos foi evidenciada diretamente em ensaios de cisalhamento direto convencional e indiretamente nos ensaios de cone de laboratório e desagregação em água (BASTOS, 1999).

## **2.4 Erosão em estradas de terra**

As estradas de terra também são conhecidas como, estradas vicinais de terra, ou ainda, estradas não pavimentadas. São responsáveis pela interligação entre propriedades rurais e povoados vizinhos, servindo, também, de acesso às vias principais ou à sede dos municípios.

Essas estradas contribuem para o desenvolvimento social uma vez que constituem vias de acesso ao atendimento das necessidades de saúde, trabalho e educação de parte da população. Além das estradas vicinais, existem ainda aquelas destinadas à movimentação interna na propriedade, as quais têm a função de permitir o trânsito de moradores, máquinas e equipamentos ou o deslocamento de produtos agrícolas até as estradas vicinais. Assim, estradas são de fundamental importância econômica e social para as comunidades rurais, pois representam grande parte da malha rodoviária brasileira. Através destas vias são estabelecidas as ligações entre as comunidades produtoras e as grandes rodovias pavimentadas, por onde circula as mercadorias até o seu destino final (NUNES, 2013).

No entanto, essas estradas causam um grande impacto ambiental pela área que ocupam, pela necessidade de material para aterro que exigem, pela erosão que causam e pela modificação da topografia (MACIEL FILHO E NUMMER, 2011). A degradação dessas estradas é considerada um problema ambiental visto que a dinâmica dessa degradação afeta áreas mais amplas do que a área da estrada em si.

O principal processo que causa a degradação das estradas não pavimentadas afetando a sua trafegabilidade é a erosão que pode ter consequências também nas áreas marginais provocando prejuízos aos mais variados setores da economia e da sociedade.

Um dado que impressiona é que mais de 90% das estradas do Brasil são não pavimentadas e a erosão provocada pela água no leito e nas suas margens é um dos principais fatores para a sua degradação. As estradas de terra são responsáveis por perda anuais de solo em mais de 100 milhões de toneladas. Estima-se que 70% deste solo chegam aos mananciais em forma de sedimentos transportados pelas enxurradas (PRUSKI et al., 2006). Para Anjos Filho (1998), citando o caso do estado de São Paulo, as estradas de terra são responsáveis por aproximadamente metade das perdas de solo em virtude da erosão. Para Griebeler et al., (2005) a maior parte dos sedimentos nas estradas de terra apresentam granulometria inferior à 2mm, contribuindo de forma negativa, pois, ao atingirem cursos d'água, estabelecem as condições para o assoreamento.

Conforme Maciel Filho & Nummer (2011), a questão principal do desenvolvimento de processos erosivos em estradas de terra, deve-se ao fato de a maioria desse tipo de acesso ser construído sem projeto de engenharia, na maioria das vezes atendendo de forma precária as necessidades do local. Geralmente essas estradas são oriundas do aproveitamento de trilhas e caminhos existentes, condicionadas a um traçado geométrico carregado de fortes rampas e curvas acentuadas, sem qualquer planejamento na hora da construção, levando em consideração apenas as facilidades do terreno (CARVALHO, 1992). O mesmo autor ressalta que estas vias apresentam larguras variadas, decorrentes das necessidades e fluxos de tráfego à elas condicionadas. Assim, o tipo de tráfego contribui, de forma direta, nos tipos de problemas relacionados a essas vias, tanto no aspecto do conforto para quem circula por elas, quanto no ponto de vista ambiental.

Para Nunes (2013) as estradas de terra são geralmente revestidas por solo local, com mistura de material granular, decorrente das práticas de manutenção e conservação. Este mesmo autor destaca que as condições físicas em que se encontram as estradas de terra, dependem de inúmeros fatores específicos a cada região, como: clima, solo e topografia. Além da ação antrópica exercida na estrada, como: tráfego, forma e frequência da manutenção. Portanto, esses fatores seriam os condicionantes para o surgimento ou não de problemas ambientais, que por sua vez possam vir a ser responsáveis pela interrupção de determinadas vias.

Outro fator que se deve levar em consideração é o leito das estradas. O leito deve apresentar características adequadas para suportar a carga a que será submetido sem que ocorra deformação capaz de modificar a estrutura original. Deve também ser adequadamente drenado para que a umidade não altere suas características de resistência e a erosão não comprometa sua utilização. Para isso, deve ser abaulado, de modo a permitir a rápida remoção da água da chuva, bem como evitar que a água escoe longitudinalmente sobre a estrada, se avolumando e adquirindo energia suficiente para erodi-la. O abaulamento deve ser projetado levando-se em conta, além da drenagem, a comodidade dos usuários. Recomenda-se que o abaulamento seja de 2 a 8 % para estradas de terra, dependendo da precipitação e do tipo de superfície. Uma superfície dura e lisa, com drenagem facilitada, requer um abaulamento menor que uma superfície rugosa e menos rígida, na qual o escoamento mostra-se mais lento. O tipo de veículo que transita na estrada, também, é importante para determinação do abaulamento (PRUSKI et al., 2006).

A proximidade das vias em relação à rede de drenagem com relevo acidentado, agravada pela ausência do planejamento de dispositivos de drenagem superficial e contenção dos processos de erosão de taludes na construção dessas vias, potencializa a ação da força hidráulica das enxurradas como elemento de remoção e transporte de material em direção aos cursos d'água (CATELANI et al., 2004). Para DEMARCHI et al., (2003) a drenagem da estrada deve ser realizada por meio do abaulamento transversal do seu leito e da condução apropriada das águas retiradas, através de segmentos de terraços embutidos e daquelas que vêm de áreas externas, o que normalmente é feito por meio de canais de drenagem. O conhecimento da capacidade resistiva do solo ao escoamento superficial e das características deste escoamento, bem como a adoção de práticas mecânicas de contenção, são fundamentais para o correto dimensionamento do sistema de drenagem e do estabelecimento de medidas para o controle da erosão.

Mariotani (1987) afirma ser comum às estradas de terra o surgimento de pontos com ondulações, atoleiros, erosões e acúmulos de sedimentos. Isso ocorre em decorrência de falhas da drenagem, e má dimensão do uso em relação à capacidade de suporte que as camadas que recobrem a estrada, possuem. O autor cita a presença de atoleiros em locais onde há grande presença de siltes, e/ou afloramento de água subterrânea.

Para Griebeler *et al* (2005) outro fato que intensifica a presença de processos erosivos é a passagem de veículos que não permite a presença de vegetação rasteira nos lugares onde

formam os trilhos por onde passam os rodados. Nesses pontos ocorre uma sobrecarga que pode dar origem aos sulcos ao longo da estrada. Devido à falta de uma camada que proteja a superfície das estradas, a evolução de feições erosivas ocorre de forma mais intensa, e os sedimentos oriundos dos ciclos erosivos, tende a depositar-se em regiões mais baixas, originando bacias de sedimentação.

Para Maciel Filho e Nummer (2011), as presenças de sulcos devido à compactação pelo trânsito, ondulações e atoleiros, devem-se pela falta de suporte do subleito da estrada. A capacidade de suporte de um solo está diretamente ligada à resistência aos processos superficiais e à degradação decorrente da circulação de veículos. Outro problema é a erosão em aterros que ocorre quando o material utilizado é muito erodível, apresentando um alto grau de erodibilidade. Também podemos listar surgimento de processos erosivos em estradas, associado à falta de manutenção de bueiros, que resulta na erosão interna.

Além dos problemas citados acima, Griebler et al., (2005) reforçam que as estradas construídas em cortes profundos provocam a exposição de horizontes menos estáveis. Para os autores, a exposição do horizonte C tem causado muitos danos às estradas, uma vez que se trata de horizonte com baixa estabilidade de seus agregados sendo este bastante suscetível à erosão quando submetido ao horizonte superficial. A presença de material de transição entre solo e rocha ou entre diferentes tipos de solo cria uma zona de instabilidade que facilita o processo erosivo.

Segundo Griebeler et al., (2005), os custos para a construção e manutenção das estradas são bastante elevados, razão pela qual sua construção deve ser realizada de maneira a se considerar todos os fatores passíveis de prejudicar a sua estrutura. Para isso é importante que ações para controle de erosão nestas estradas sejam previstas como parte do planejamento conservacionista em uma bacia hidrográfica.

Assim, uma boa estrada de terra deve apresentar as seguintes características: ter largura de rolamento suficiente para acomodar o tráfego da região; apresentar resistência suficiente para suportar as cargas das rodas sem que ocorram deformações excessivas; ter boa capacidade de suporte, a qual depende das características do material da superfície e da resistência do solo, à medida que o teor de umidade varia; apresentar um bom sistema de drenagem para evitar que a ação erosiva da água danifique o subleito e a superfície de rolamento.

## 2.5 Ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade

Os processos erosivos podem ser determinados, caracterizados e mensurados por meio de ensaios diretos e indiretos de avaliação da erodibilidade, de amostras de solos e rochas. Na literatura encontram-se diferentes ensaios geotécnicos que sozinhos ou combinados têm sido utilizados para a avaliação da erodibilidade dos solos e rochas. Esses ensaios contribuem para a elaboração de planos de manejo de áreas com grande fragilidade natural.

A avaliação indireta da erodibilidade é determinada por ensaios de caracterização física, ensaio de cisalhamento direto, ensaio do penetrômetro dinâmico de cone, ensaio de cone de laboratório proposto por Alcântara (1997), ensaio de desagregação, ensaio de perda por imersão e infiltrabilidade da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (NOGAMI E VILLIBOR, 1979). Para a avaliação direta da erodibilidade segundo Jacinto et al., (2006) é utilizado os ensaio de Inderbitzen juntamente com o ensaio de desagregação.

Bastos (2002a) apresentou uma nova proposta metodológica com uma abordagem geotécnica para avaliação da erodibilidade de solos residuais. Tal proposta consiste em uma avaliação indireta e uma avaliação direta da erodibilidade. A avaliação indireta é realizada em campo, com base em diferentes critérios estabelecidos na literatura técnica como a Estimativa do fator erodibilidade  $K_{USLE}$  da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) entre outros. A avaliação direta se dá por meio dos ensaios de Inderbitzen em laboratório, complementada com os ensaios de resistência ao cisalhamento direto com controle de sucção.

Dentre os trabalhos sobre erodibilidade na área da engenharia, vale destacar o pioneirismo dos estudos iniciados na década de 60 pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e pelo Laboratório de Engenharia de Angola, com o objetivo de obter critérios de erodibilidade para solos tropicais encontrados em cortes de estradas (BASTOS, 1999).

### 2.5.1 Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização física são considerados essenciais não só para a avaliação da erodibilidade, como também para a determinação de qualquer outra propriedade do solo

que envolva solos e rochas sedimentares. A sua inter-relação com a erodibilidade não é considerada simples e direta para Jacintho et al., (2006). Para eles, os solos tropicais possuem a característica de serem agregados quando intemperizados, sendo um equívoco a relação direta entre a granulometria do solo e a erodibilidade, por exemplo.

A mesma análise direta não deve ser feita em relação à plasticidade. Sabe-se que solos com maior índice de plasticidade são menos erodíveis (com exceção das argilas dispersivas), porém, no caso dos solos tropicais, a presença de oxi-hidróxido de ferro, confere uma maior estabilidade e resistência ao solo, tornando-o menos erodível, mesmo apresentando uma baixa plasticidade (CARDOSO, 2002).

Porém, Bastos (1999), ao analisar os processos erosivos em quatro perfis na região metropolitana de Porto Alegre, constatou que o decréscimo do teor de finos e a plasticidades aumentaram a erodibilidade dos solos. No entanto, esta relação não foi confirmada pelo estudo de solos tropicais realizados por Fácio (1991). Para este autor, esta não confirmação se deve ao fato da influência de características estruturais e mineralógicas dos solos, demonstrando que essas propriedades não podem ser únicas na avaliação do comportamento geomecânico dos solos.

De acordo com Fácio (1991) a erodibilidade é inversamente proporcional ao grau de saturação, não apresentando tendência com os demais parâmetros geotécnicos estudados isoladamente. Vale ressaltar que, a caracterização química, mineralógica e microestrutural são de grande importância, para a avaliação da erodibilidade, por ser uma propriedade do solo de grande complexidade devido aos inúmeros fatores envolvidos.

Silva et al., (2000) avaliou métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros, foram testados 23 modelos indiretos de estimativa da erodibilidade (fator  $k$ ), os autores concluíram, em sua pesquisa, que nenhum dos 23 métodos testados mostrou-se recomendável para a estimativa da erodibilidade para o conjunto dos latossolos estudados, sendo necessário o desenvolvimento de modelos específicos para este tipo de solo.

Bacellar et al., (2005), utilizaram ensaios granulométricos com e sem uso de defloculante para caracterizar os processos erosivos encontrados na Bacia hidrográfica Maracujá (MG).

Jacyntho et al., (2006), consideram a porosidade e a distribuição dos poros como uma das propriedades físicas mais relevantes na inter-relação com a erodibilidade. Isto porque

segundo os autores, os fenômenos de sucção, coesão e permeabilidade são afetados pela estrutura em que se encontram as partículas do solo. Os autores ainda propõem a desconsideração do peso específico real dos grãos, visto que são muito variáveis nos solos tropicais.

Pejon e Silveira (2007), na investigação de 244 amostras de solos tropicais em São Paulo, verificaram uma excelente correlação entre a erodibilidade e a perda de massa por imersão, o peso específico real e a infiltrabilidade (absorção de água).

De forma geral, deve-se considerar que a influencia das características estruturais e mineralógicas dos solos, possuem variações relacionadas a fatores diversos, o que certamente deve ser considerado na análise dos comportamentos geomecânicos dos solos.

### 2.5.2 Ensaio de cisalhamento direto

Nas diversas áreas do conhecimento, vários autores assumem que existe uma relação entre erodibilidade e resistência ao cisalhamento do solo.

A resistência ao cisalhamento do solo é a máxima tensão cisalhante interna que o solo pode suportar. Seu estudo visa à determinação da envoltória de ruptura, que é a relação entre as tensões normal e cisalhante no estado de ruptura. Segundo Pinto (2000), o ensaio do cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para determinar a resistência ao cisalhamento de um solo, e baseia-se no critério de Coulomb.

Para Bender (1985) a erosão é decididamente encarada como um problema de resistência ao cisalhamento, dada em função da coesão do solo na superfície, alterada durante a infiltração da água da chuva. O autor enfatiza que a coesão é o parâmetro mais adequado para avaliar a estabilidade à erosão de solos saprolíticos. A grande vantagem na definição da resistência à erosão baseada na resistência ao cisalhamento é atribuída ao fato de que é correta do ponto de vista físico e mecânico e é baseada em ensaios de Mecânica dos Solos, consolidados na engenharia geotécnica.

Segundo Bastos (1999) a relação entre a resistência ao cisalhamento e a erodibilidade dos solos é assumida por autores de diferentes áreas do conhecimento. A variação desta propriedade geomecânica dos solos sob a ação do fluxo superficial concentrado, é considerada

um parâmetro fundamental no estabelecimento de uma abordagem geotécnica a erodibilidade dos solos tropicais e subtropicais não saturados. No meio geotécnico consolida-se a opinião de que a erodibilidade e a resistência ao cisalhamento, em particular para solos tropicais, estão intimamente relacionadas (BENDER, 1984).

O ensaio deve ser realizado com no mínimo três corpos de prova e tensões normais diferentes para que se possa obter a envoltória de resistência do solo. A Figura 2.3 apresenta um esquema da caixa bipartida e das forças aplicadas na amostra durante a realização do ensaio.

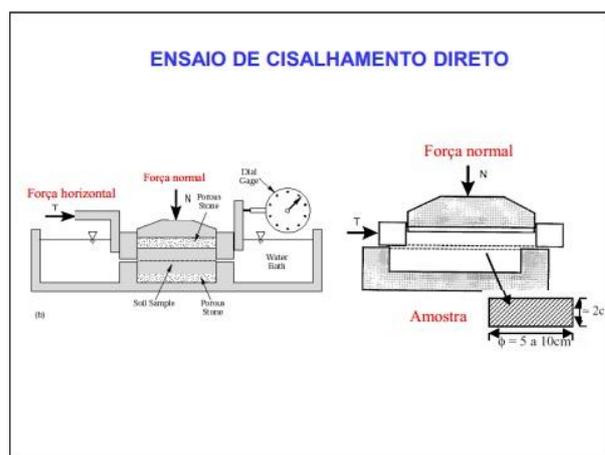


Figura 2.3 - Aplicação das forças durante o ensaio de cisalhamento direto (SANTOS, 2014)

A envoltória de resistência é obtida sabendo-se os valores das tensões de ruptura para cada tensão normal aplicada. A partir desta envoltória determinam-se os valores dos seguintes parâmetros: ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão do solo ( $c$ ), conforme Figura 2.4.

Esses parâmetros definem a resistência do solo ao cisalhamento, ou seja, quanto maior o valor do ângulo de atrito e da coesão, maior a resistência ao cisalhamento do solo em estudo.

O ensaio de cisalhamento direto é considerado um ensaio simples, rápido e prático, principalmente em solos permeáveis. Algumas das desvantagens desse ensaio é a impossibilidade de se conhecer os esforços que atuam em planos diferentes daquele de ruptura, com um único ensaio, além de não permitir a leitura das poropressões.

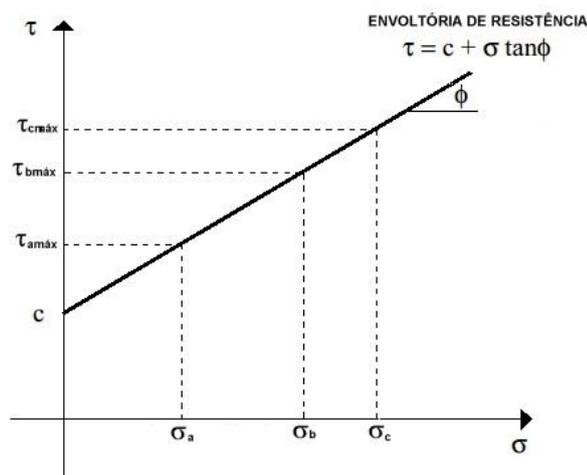


Figura 2.4 - Envoltória de resistência.

### 2.5.3 Ensaio do penetrômetro dinâmico de cone – DCP

O Penetrômetro Dinâmico de Cone (Dynamic Cone Penetration - DCP) é um instrumento que permite realizar ensaios de penetração dinâmica no solo em seu estado natural. Segundo Costa et al., (2010) ensaios de penetração dinâmica para a determinação da resistência do solo constitui uma prática bastante antiga na Engenharia Geotécnica. Ainda segundo os autores, vários tipos de penetrômetros são utilizados na exploração dos subsolos, de modo a atender a diferentes propósitos e necessidades.

No Brasil, este aparelho tem sido estudado, pelo DER-PR (Heyn, 1986), pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP, por Rohn e Nogueira (1990), pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), por Oliveira e Vertamati (1997), no estado da Paraíba por Rodrigues e Lucena (1991) e Santana et. al., (1998) e, em Santa Catarina por Cardoso e Trichês (2000) na BR- 101/SC.

O DCP, pelas suas características peculiares, permite que ensaios penetrométricos sejam realizados em locais de difícil acesso e ainda possibilita a obtenção de diversos pontos ensaiados. Este aparelho consiste de um martelo que cai em queda livre guiado por uma haste, transferindo a energia da queda para outra haste com ponta cônica que penetra no solo. As

características do DCP, principalmente no que se refere à massa do martelo podem variar bastante. O ensaio do Penetrômetro é capaz de medir a capacidade de suporte do solo “in situ” com um baixo custo e fácil operação (PONCE et. al., 1991). O ensaio DCP é realizado no solo em seu estado de umidade natural.

O equipamento frequentemente utilizado e que condiz ao descrito na norma ASTM D-6951 – *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*, possui massa equivalente do martelo igual a 8 kg, altura de queda do martelo igual a 575 mm, hastes com diâmetro de 16 mm e ponta cônica de 60° e 20 mm de diâmetro, conforme Figura 2.5.

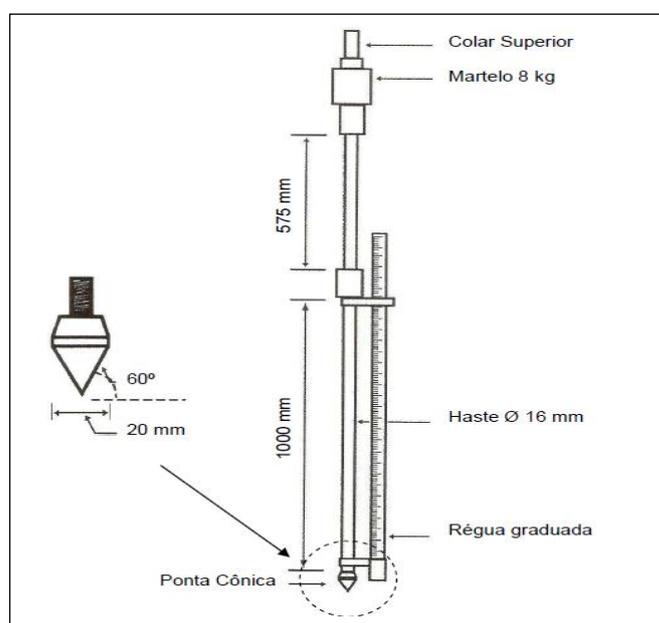


Figura 2.5 - Esquema do penetrômetro dinâmico de cone (BENEVIDES, 2012)

A ASTM D-6951 sugere ainda como opção outro equipamento, onde a massa equivalente do martelo é igual a 4,6 kg, sendo utilizado em solos de menor resistência nos quais o martelo de 8 kg produziria uma penetração excessiva. O equipamento é utilizado para investigar profundidades de até 1,00 m abaixo da superfície, podendo-se utilizar hastes para prolongar essa profundidade (BENEVIDES, 2012).

Quanto ao procedimento de ensaio, trata-se de um procedimento simples, não requer mão de obra especializada, exige relativamente pouco esforço físico do operador dependendo do solo a ser ensaiado e a execução é rápida. No local aonde serão realizados os ensaios marcamos

se os pontos e o ensaio é realizado levantando-se o martelo até o colar superior e liberando-o causando a penetração da lança inferior.

No Brasil não há normas quanto aos procedimentos do ensaio DCP e para isso pode-se usar a norma ASTM D-6951. De acordo com os procedimentos descritos nessa norma, a ocorrência de rochas ou de solos com partículas de maior dimensão faz com que a haste pare de penetrar. Então, o ensaio deve ser interrompido se, depois de cinco golpes, a penetração for inferior a 2 mm, ou caso o equipamento sofra um desvio da vertical superior a 75 mm. Sendo assim, o equipamento deve ser reposicionado para um novo local distante pelo menos 300 mm do local anterior para minimizar erros devido à perturbação do material (BENEVIDES, 2012).

O ensaio é iniciado com um golpe para assentar a ponta cônica (golpe zero). Em seguida são anotados a penetração e o número de golpes. Os resultados obtidos são utilizados para o cálculo do índice de penetração dinâmica, através da Equação 2.1:

$$DPI = \frac{L_n - L_1}{n - 1} \quad 2.4$$

Onde:

$L_n$  = Deslocamento produzido pelo n-ésimo golpe;

$L_1$  = Deslocamento produzido pelo primeiro golpe;

$n$  = n-ésimo golpe.

Na execução do ensaio devem-se ter alguns cuidados como: verificar se o equipamento está limpo e o bom estado do cone; durante o ensaio manter o equipamento sempre na vertical, para evitar que qualquer contato entre o peso (martelo) e a barra diminua o esforço na penetração do cone no solo; além do operador do peso ter um ritmo regular, deve cuidar, ao elevar o peso, para não bater no limite superior da altura de queda e provocar uma movimentação ascendente do aparelho; é muito importante uma vez extraído o instrumento, verificar se a ponta cônica está em bom estado.

Este ensaio não requer grandes escavações ou perfurações, por isso é caracterizado como um ensaio não destrutivo, sendo assim, é uma forma econômica de investigar o pavimento, além de não interferir no tráfego dos veículos.

Segundo Nogami e Villibor (1995), a faixa de trabalho deste aparelho é bastante ampla: desde solos moles ou pouco consistentes, até camadas de bases de brita graduada ou pedregulho.

Assim, a simplicidade e a mobilidade do DCP permitem realizar uma grande quantidade de ensaios, e, assim, avaliar melhor a homogeneidade das camadas em estudo, além do fato do DCP apresentar baixos custos de aquisição e operação. Por isso, torna-se viável a aplicação do DCP em prefeituras de pequeno porte para controle de obras viárias.

#### 2.5.4 Ensaio de desagregação

Também chamado de *slaking test*, evoluiu do chamado *crumb test*, ensaio preconizado para identificação de solos dispersivos através da imersão gradual de uma amostra de solo em água com a descrição qualitativa dos fenômenos observados.

Para Morowaki e Mitchell (1977 apud BASTOS et al., 2000) a desagregação é o processo de ruína de uma amostra de solo não confinada, exposta ao ar e na sequência imersa em água. O objetivo deste ensaio é a verificação da instabilidade à desagregação de uma amostra de solo cúbica ou cilíndrica, quando submersa em água, sendo considerada como uma avaliação indireta, visual e qualitativa da estabilidade, não sendo normatizado. Portanto, o ensaio de desagregação analisa o potencial de desagregação, ou seja, 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 (BASTOS, 1999).

A aplicação deste ensaio de desagregação para fins geotécnicos foi idealizada pela engenheira Anna Margarida Fonseca, ao estudar propriedades dos solos para fins de fundações durante a construção de Brasília, conforme Ferreira (1981 apud BASTOS et al., 2000). Santos (1997 apud BASTOS et al., 2000) indica o ensaio de desagregação como critério preliminar na avaliação qualitativa da erodibilidade devido ao fato de ser um ensaio

considerado simples e de derivar bons resultados, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de erosão.

O resultado desse ensaio é puramente qualitativo, sendo que a relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade é evidente. Segundo Bastos (1999), os solos considerados altamente erodíveis 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.

Em se tratando da descrição qualitativa da amostra 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 de ensaio, de acordo com Santos (1997, apud JACINTHO et al., 2006) as amostras indeformadas são moldadas em forma de cubos com 6 cm de aresta, sendo que as amostras são submetidas a imersão total durante 24 horas, e a imersão parcial. Este mesmo autor recomenda que as diferentes amostras não devem ser colocadas em um mesmo recipiente para serem ensaiadas, pois os elementos e compostos químicos desprendidos de uma amostra podem interferir na estabilidade das outras.

Welter e Bastos (2003) realizaram o ensaio utilizando amostras compactadas no equipamento miniatura com diâmetro e altura de 5 cm na condição de umidade ótima de compactação e previamente secas ao ar, sendo submetidas ao processo de imersão parcial apenas, como descrito por Santos (1997, apud JACINTHO et al., 2006).

Santos (1997 apud BASTOS et al., 2000) ao ensaiar amostras de solo de voçorocas no município de Goiânia, concluiu que a desagregação verificada nas amostras ocorreu 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 poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo.

Lima (1999, apud JACINTHO et al., 2006) realizou ensaios de desagregação em amostras de solo em erosões da cidade de Manaus, coletadas entre 5,0 e 8,5 m de profundidade, sendo submersas totalmente durante sete dias, não mostrando nenhuma

desagregação, tendo como resultados a associação da estrutura geológica ao processo de evolução da erosão.

#### 2.5.5 Critérios de erodibilidade tendo como base a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)

A metodologia MCT envolve um conjunto de ensaios em solos tropicais e subtropicais, que foi desenvolvido para o uso em rodovias e estradas vicinais, substituindo métodos de estudo de solo desenvolvido em países de clima frio e temperado.

Alguns ensaios desta metodologia serviram como base para que Nogami e Villibor (1979) atribuíssem os critérios de erodibilidade, 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.

A metodologia MCT desenvolveu um conjunto de ensaios mecânicos e hídricos para estudo de solos tropicais aplicados em obras rodoviárias (taludes de corte e aterro). Neste trabalho, especificamente, foram utilizados os ensaios para avaliação da susceptibilidade a erosão hídrica. Trabalhos a cerca deste assunto estão apresentados em Nogami e Villibor (1985), Cozzalino e Nogami (1993) e Villibor e Nogami (2009).

Esta metodologia é fundamentada em dois parâmetros: o coeficiente de sorção ( $s$ ) obtido no ensaio de infiltrabilidade, e o coeficiente perda por imersão ( $\pi_i$ ) obtido pelo ensaio de perda de massa por imersão modificado, ensaio este similar àquele estabelecido originalmente pela metodologia MCT.

Através da divisão do parâmetro  $\pi_i$  por  $s$ , é possível a classificação dos solos em relação ao grau de erodibilidade, sendo considerados solos erodíveis quando esta relação for superior ao valor 52. O mesmo critério de classificação foi proposto de maneira gráfica por Nogami e Villibor (1995), conforme Figura 2.6, sendo baseado em um número maior de ensaios. Para Pejon (1992 apud VILAR e PRANDI, 1993) a relação entre  $\pi_i$  e  $s$  deve ser superior ao valor 40, para que os solos sejam classificados como erodíveis.

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 e por Fernandes (2011) ao estudar a erodibilidade dos horizontes/camadas de uma voçoroca no município de São Francisco de Assis.

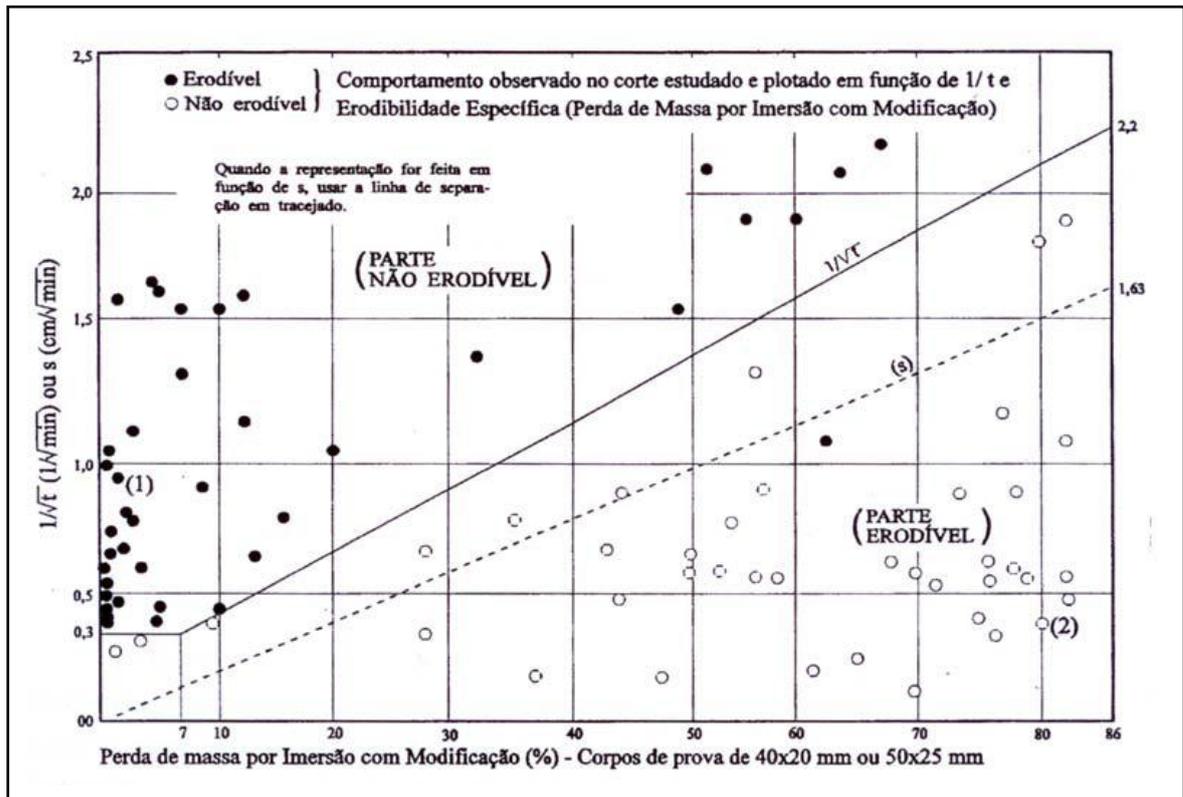


Figura 2.6 – Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995).

### *Ensaio de infiltrabilidade*

O ensaio de infiltrabilidade consiste na medição da quantidade de água que infiltra em corpos de prova de 5cm de diâmetro, pela sua base, em função da raiz quadrada do tempo (NOGAMI e VILLIBOR, 1979 e 1988). Para Bastos et al., (2000), a infiltrabilidade é uma propriedade hidráulica dos solos não saturados a qual representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. Portanto o ensaio de infiltrabilidade busca reproduzir

uma condição natural da infiltração de água no solo através da ascensão capilar. Outros autores denominam o coeficiente de sorção de índice de absorção de água (MENEZES e PEJON, 2010)

O processo de infiltrabilidade está associado ao fluxo de água que ascende pela amostra, sendo possível assim medir o deslocamento da 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, como mostra a Figura 2.7.

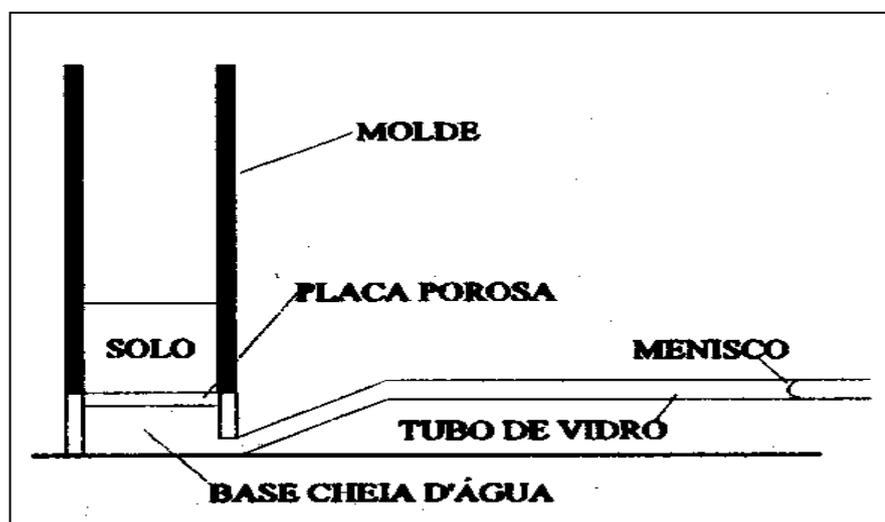


Figura 2.7 – Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade (adaptado de Nogami e Villibor (1979))

Com os dados referentes ao deslocamento do menisco (cm) e o tempo (min  $\frac{1}{2}$ ) é possível a elaboração de um gráfico (Figura 2.8) de uma curva típica onde seu trecho inicial retilíneo forneceu o coeficiente de sorção “s” (cm/min<sup>1/2</sup>), determinado através da relação:

$$s = \frac{(L_2 - L_1)S}{10(t_2 - t_1)A} \quad 2.5$$

Onde:

$s$  = coeficiente de sorção;

$S$  = área da seção do tubo capilar;

$A$  = área da seção da amostra;

$L_2$  = leitura no tempo  $t_2$ ;

$L_1$  = leitura no tempo  $t_1$ .

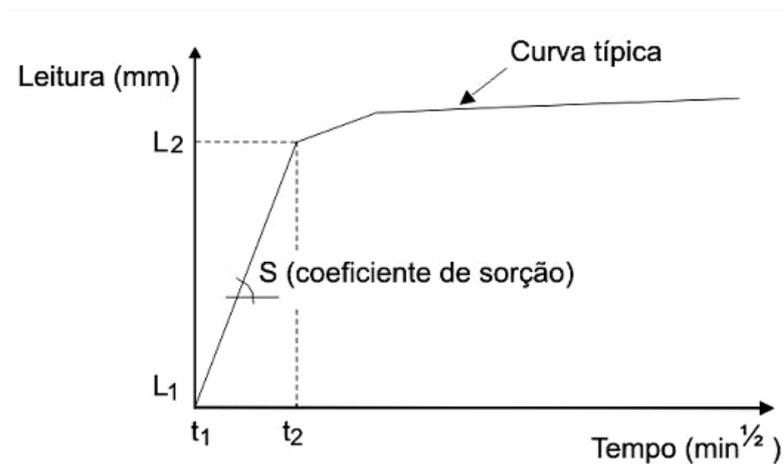


Figura 2.8 - Curva típica do deslocamento do menisco x tempo para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT (adaptado de Bastos (1999))

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

### *Ensaio de perda de massa por imersão modificada*

A determinação da perda de massa por imersão tem por objetivo avaliar o comportamento do solo quando submetido à inundação, também chamado de ensaio de erodibilidade específica.

O ensaio consiste na inundação de amostras indeformadas de solo contidas em anéis metálicos. A perda de massa por imersão  $p_i$  (%) é calculada através da relação entre o peso do solo seco desagregado e o peso do solo seco total da amostra. A Figura 2.9 apresenta o esquema do ensaio de erodibilidade específica, que neste estudo, assim como em Bastos (1999), Tatto (2007), Ávila (2009) e Fernandes (2011) foi realizado com a amostra rente ao molde, sem borda livre.

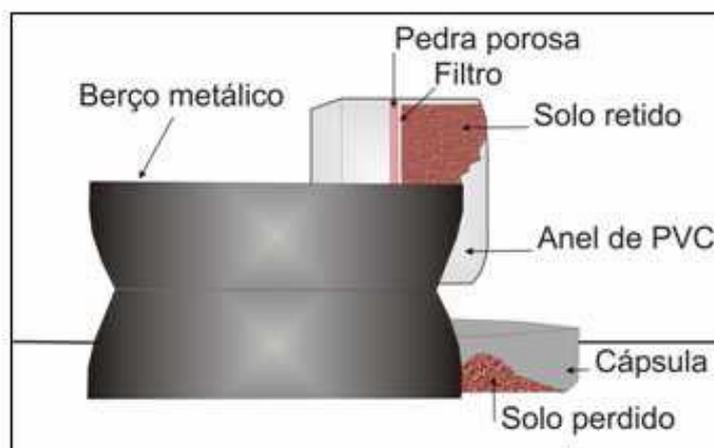


Figura 2.9 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificada da metodologia MCT (FERNANDES, 2013)

Bastos (1999), Tatto (2007), Ávila (2009) e Fernandes (2011) utilizaram amostras de solo indeformadas em anéis de PVC com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, nas condições de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecidas (amostras oriundas do ensaio de infiltrabilidade). Estas amostras são confinadas, em uma das faces é colocado um papel filtro e uma pedra porosa, a outra face fica livre e sofre a ação da água. Após 20 horas de inundação coleta-se o material erodido e retido para que após seco seja determinada a

porcentagem da amostra que foi erodida. A perda de massa por imersão ( $p_i$ ), representa para tais autores, o grau de desagregação do solo sob a ação estática da água.

O parâmetro “ $p_i$ ” (%) é determinado através da relação:

$$p_i = \frac{p_{seco\ d}}{P_{seco\ t}} \quad (2.6)$$

Onde:

$p_{seco\ d}$  = peso do solo seco desagregado;

$P_{seco\ t}$  = peso do solo seco total da amostra.

#### 2.5.6 Ensaio de cone de laboratório

O ensaio de penetração de cone foi proposto por Alcântara (1997) com o objetivo de determinar a erodibilidade dos solos. Segundo o autor, a diferença de penetração em amostras saturadas e não saturadas apresenta boa correlação com a erodibilidade. O ensaio estuda o comportamento de amostras indeformadas com altura de 40 mm e diâmetro de 73 mm, perante a penetração de um cone com ângulo de abertura de 30° e altura de 35 mm, em amostra de solo nas condições natural e saturada. A saturação da amostra é obtida por capilaridade pelo período de uma hora.

O ensaio mede em cada teste a altura de penetração alcançada pela ponta do equipamento (Figura 2.10) em nove pontos diferentes na superfície de cada amostra.

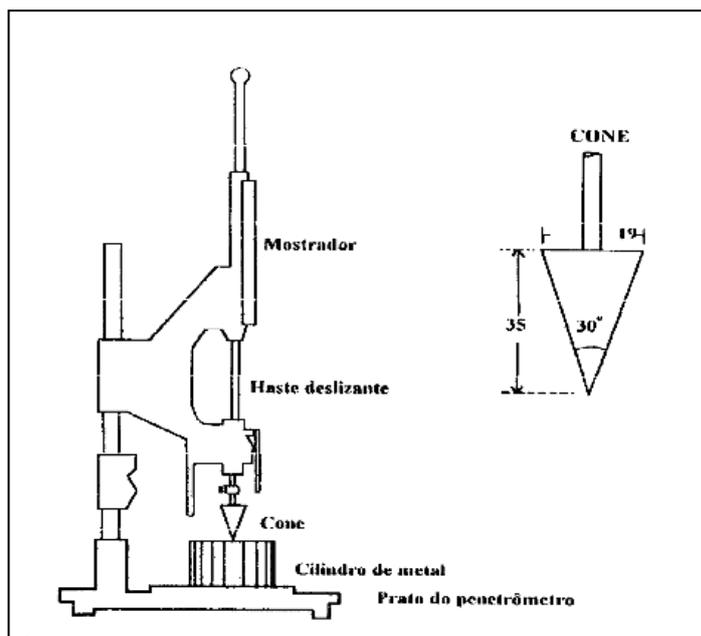


Figura 2.10 – Equipamento do ensaio de penetração de cone proposta por Alcântara (1997)

Os valores de penetração natural e saturada são obtidos através da média dos valores alcançados em três repetições, com exceção daqueles que apresentam valores de dispersão em relação à média acima de 5%. A partir dos valores de penetração médios nas condições de umidade natural ( $P_{nat}$ ) e saturada ( $P_{sat}$ ), são definidos os parâmetros de variação da penetração DP e DPA, relacionados à erodibilidade dos solos:

$$DP = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{nat}} \quad 2.7$$

$$DPA = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{sat}} \quad 2.8$$

Com os valores de DP obtidos no ensaio, Alcântara (1997 apud BASTOS, 1999) difere as amostras erodíveis daquelas não erodíveis segundo o seguinte critério:  $DP > 4,50$   $P_{nat}$  apresenta alta erodibilidade;  $DP < 4,50$   $P_{nat}$  representa 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.

O ensaio de cone destaca-se pela simplicidade e reprodutibilidade na execução dos testes e também prova que a condição de penetração na situação saturada reflete a perda de resistência exibida pelo solo em contato com a água.

O emprego do ensaio de cone de laboratório nos estudos de erosão não é novidade. Nearing e West (1988) já destacam a eficiência do ensaio na avaliação da consolidação de solos não saturados, relacionada diretamente à erodibilidade destes.

Morais et al., (2004) adotaram este ensaio na análise de erodibilidade de saprófitos de gnaisses no centro sul do estado de Minas Gerais e concluíram que existe uma tendência de os solos mais erodíveis serem mais expansíveis e menos resistentes à penetração saturada.

#### 2.5.7 Ensaio de Inderbitzen

Também chamado de erosômetro, é muito utilizado dentro os ensaios em canais hidráulicos no meio geotécnico, sendo aplicado por pesquisadores como Fácio (1991), Bastos (1999), Freire (2001), e Camapum de Carvalho et al., (2006a). É considerado um ensaio de simples execução, baseado em métodos empíricos, não sendo normatizado, mesmo assim, apresentando resultados satisfatórios.

Conforme o ensaio original desenvolvido por Inderbitzen (1961) em sua publicação “*An erosion test for soils*”, 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. Assim, este ensaio tem como objetivo a simulação aproximada do efeito do escoamento superficial sobre o solo, permitindo analisar diferentes resultados conforme a mudança da vazão do fluxo, seu tempo de atuação, declividade da rampa e propriedades do solo, como sua densidade e umidade, porém, não simula o fenômeno da desagregação de partículas provocado pelo impacto da água em uma precipitação.

O uso do ensaio de Inderbitzen foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio geotécnico para avaliação da erodibilidade dos solos na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECON), desenvolvida no período de 1975 a 1978. Depois da experiência do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), o uso do ensaio de Inderbitzen só ressurgiu na década de 90. Um detalhado levantamento sobre a origem, o desenvolvimento e as experiências brasileiras com o emprego do ensaio Inderbitzen foi apresentado por Bastos (1999).

Com o aprofundamento teórico em relação aos estudos voltados para obtenção dos índices de erodibilidade, houve a necessidade de que se fizesse novas adaptações no sentido de melhorar a forma de representação do fluxo laminar da água na superfície terrestre, e com isso possibilitar a representação quantificada mais adequada da erodibilidade do solo através deste ensaio (AGUIAR e ROMÃO, 2009).

Diversos autores como Fácio (1991), Bastos (1999) e Santos (1997, apud JACINTHO et al., 2006), entre outros, realizaram modificações no ensaio original na tentativa de reduzir as inúmeras imperfeições. Fácio (1991), na tentativa de tornar o equipamento mais versátil, projetou e construiu uma nova versão do aparelho possibilitando a realização de três ensaios simultaneamente, mudando parâmetros como a largura da rampa, que passou de 1,00 m para 0,33 m; comprimento da rampa, que passou de 1,00 m para 1,30 m; redução do diâmetro das amostras, de 0,152 m para 0,10 m.

Santos (1997 apud JACINTHO et al., 2006) utilizando as mesmas condições padronizadas por Fácio (1991), estudou processos erosivos em Goiânia, reduzindo a largura da rampa do equipamento que passou para 0,10 m, assegurando que toda a lâmina d'água percolasse sobre a superfície superior da amostra. Aumentando o tempo de ensaio para 30 minutos, concluiu que tais condições propiciam que a erosão ocorra de maneira gradual e significativa, facilitando a observação do processo erosivo.

Bastos (1999) ao realizar o ensaio de Inderbitzen em solos residuais na região de Porto Alegre, construiu um novo equipamento, com uma rampa de 0,25 m de largura e 0,60 m de comprimento, dotada de um orifício central, onde é acoplada amostras de solo confinadas em anéis de PVC, biselados, com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5 cm (Figura 2.11). As amostras foram ensaiadas nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida. A rampa permite inclinações de 10°, 26°, 45° e 54°, uma vazão de 3 l/min e 6 l/min em um tempo de 20 minutos de ensaio.

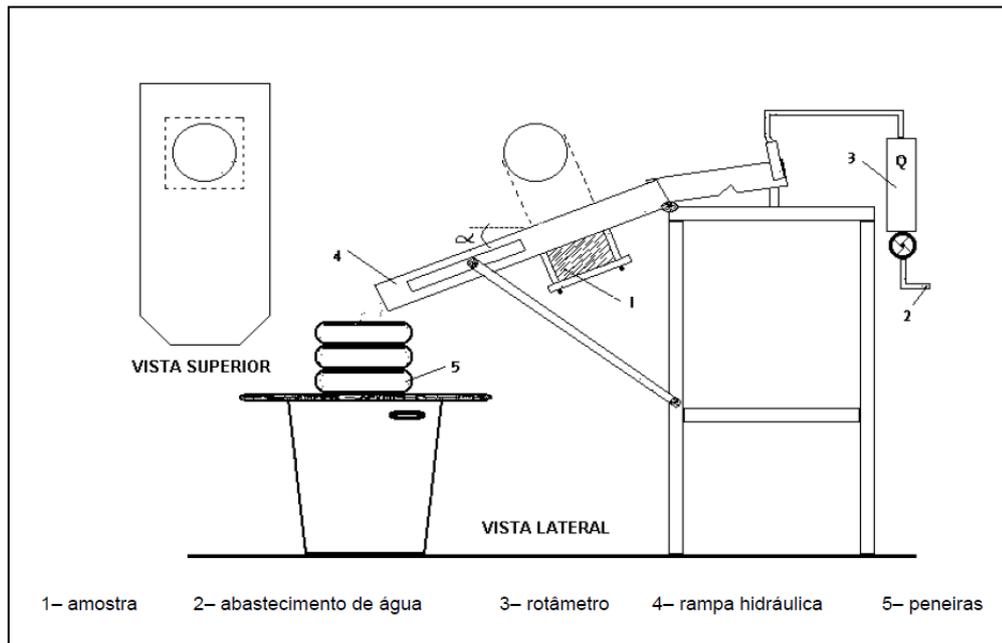


Figura 2.11 - Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS (BASTOS, 1999)

Os resultados obtidos são plotados em um gráfico que representa a relação entre a perda de solo acumulada por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e o tempo total de ensaio (minutos), como a Figura 2.12.

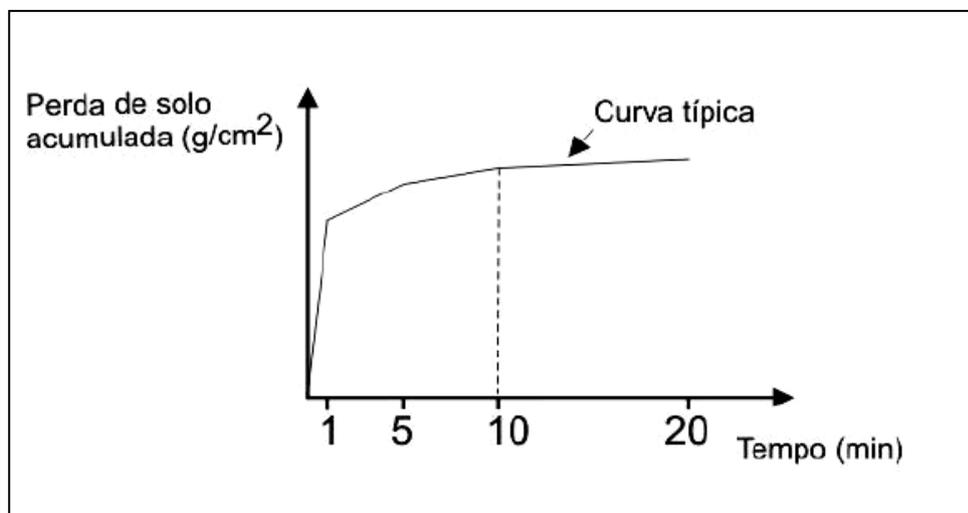


Figura 2.12 - Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra *versus* tempo para o ensaio Inderbitzen (adaptado de Bastos (1999))

Os dados da perda de solo em g/cm<sup>2</sup>/min de cada ensaio foram plotados junto com a tensão hidráulica atuante no ensaio,  $\tau_h$  (Pa), sendo esta estimada por Bastos (1999) através da relação:

$$\tau_h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (2.9)$$

Onde:

$\gamma$  = peso específico da água (N/cm<sup>3</sup>);

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

$d$  = declividade da rampa.

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

$$h = \frac{Q}{v \cdot L} \quad (2.10)$$

Onde:

$Q$  = vazão do fluxo (cm<sup>3</sup>/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 ( $\tau_h$ ) para combinações de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ ) são apresentados na Tabela 2.7, conforme Bastos (1999).

Tabela 2.7 - Valores de velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para combinações de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ ). (BASTOS, 1999)

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
$\tau_h$ (Pa)	1,136	1,393	1,710	2,018	2,585	2,742	3,297	3,239

O gráfico formado entre os dados da  $\tau_h$  *versus* perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) resulta no ajustamento de uma reta onde foram estimados os seguintes parâmetros de erodibilidade: a taxa de erodibilidade,  $K$  ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ), representa pelo gradiente da perda de solo em relação as tensões hidráulicas aplicadas, e a tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\tau_h$  crit (Pa), representando a mínima tensão hidráulica causada pela lâmina d'água sobre o solo, que resulta na perda de solo inicial, conforme Figura 2.13.

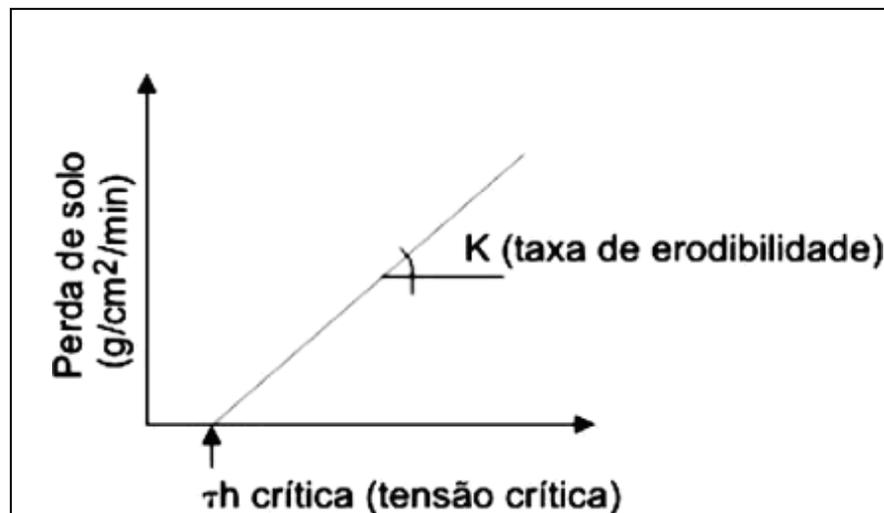


Figura 2.13 - Ajustamento da reta de onde são estimadas a taxa de erodibilidade ( $k$ ) e a tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\tau_h$  crit (BASTOS, 1999)

Motta (2001 apud JACINTHO et al., 2006) adotou como tempo de ensaio 30 minutos com uma largura de rampa igual à proposta por Santos. Utilizou intervalos de vazão entre 25 ml/s e 75 ml/s e intervalos de declividade de rampa entre 5° e 40°.

Fragassi e Marques (2001b), na tentativa de tornar o ensaio mais versátil, com baixo custo e procurando resolver alguns problemas que ocorreram nas versões convencionais, como a concentração do fluxo na rampa de descida d'água, uma maior liberdade nas inclinações de rampa e uma maior economia de água, também modificaram a estrutura do aparelho Inderbitzen. Utilizaram o PVC como principal material do equipamento, sendo considerado, por estes autores, de fácil confecção, possuindo uma superfície lisa e nivelada possibilitando um escoamento laminar sobre a rampa. Foi usada também a massa de modelar, possuindo a função de vedação na porção articulada da rampa, tendo uma inclinação ente 0° e 60°.

Neste capítulo de revisão foi possível verificar a existência de vários conceitos sobre a temática erosão. Apesar de não existir um consenso entre os autores sobre um conceito unificado sobre o tema, fica ao critério de cada pesquisador seguir as idéias de um determinado autor que mais se adapte a realidade de seus estudos.

Esta revisão bibliográfica forneceu o embasamento teórico para esta pesquisa, possibilitando conhecer os conceitos e as classificações dos mecanismos do processo erosivo; relacionar os principais fatores que o condicionam; discutir a dinâmica envolvida na erodibilidade do solo; entender os fatores que interferem nos processos erosivos das estradas de terra; e elencar alguns ensaios geotécnicos para a avaliação direta e indireta da erodibilidade dos materiais que compõem a área em estudo do Campo de Instrução de Santa Maria.

Verificou-se a importância e eficácia dos ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade do solo/rocha com os quais se pode identificar os diferentes parâmetros que influenciam nos processos erosivos como umidade, declividade, intensidade do escoamento superficial, propriedades físicas do solo, entre outros.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia desenvolvida neste estudo se constituiu de três etapas, em que foram desenvolvidas as seguintes atividades: (a) etapa de gabinete: a qual se configurou como a base da pesquisa, onde foi realizado o levantamento dos materiais disponíveis (mapas, teses, dissertações, artigos sobre erosão, entre outros); (b) etapa de campo: quando foram realizadas as observações relacionadas aos processos erosivos, o levantamento geológico-geotécnico da área e as coletas das amostras deformadas e indeformadas para a posterior realização dos ensaios geotécnicos; (c) etapa laboratório: nesta etapa foram realizados os ensaios de caracterização física e ensaios para avaliação direta e indireta da erodibilidade.

Os procedimentos metodológicos desenvolvidos nesta pesquisa têm como base os trabalhos de conclusão de curso de engenharia civil de TATTO (2007), STORGATTO (2012), e das dissertações de mestrado em engenharia civil, ÁVILA (2009), FERNANDES (2011), BASSO (2013) e SANTOS (2013), e de geografia, Sant'Ana (2012) e PITTELKOW (2013).

#### **3.1 Etapa de gabinete**

Esta etapa compreende basicamente no levantamento bibliográfico, em livros, artigos, teses, dissertações e materiais publicados em eventos das áreas de geotecnia, engenharia civil, geografia e geologia referentes à temática para a elaboração do referencial teórico-metodológico. Foram realizadas pesquisas referentes aos processos erosivos, envolvendo seus conceitos, dinâmica, classificação, fatores de influência e sua atuação. Também se buscou assuntos referentes os ensaios de caracterização geotécnica e avaliação da erodibilidade mais comumente usados no meio geotécnico.

### 3.2 Etapa de campo

Na etapa de campo foram realizadas visitas ao Campo de Instrução de Santa Maria – CISM, com a finalidade de conhecer aspectos como relevo, tipo de solo, geologia, vegetação predominante e forma de utilização do campo, identificando os principais processos erosivos que ocorrem nesta região. Para auxiliar nos trabalhos de campo foram utilizados: cardenetas de campo, máquinas fotográficas fotografias aéreas 1:60.000 e GPS topográfico

Após essa etapa de campo, foi escolhida, para estudo mais detalhado, uma estrada de terra com avançados processos erosivos. Após esse processo, definiram-se os três horizontes pedológicos a serem estudados: o horizonte A, o horizonte B e o horizonte C.

Com o GPS Topográfico foram coletadas as coordenadas geográficas da área para a elaboração do perfil topográfico da estrada a ser estudada e localização dos pontos ensaiados com penetrômetro.

#### *- Coleta das amostras*

Nesta mesma etapa foram coletadas amostras deformadas e indeformadas dos horizontes A, B e C da jazida, com a finalidade de realizar os ensaios de caracterização física e erodibilidade de acordo com a norma ABNT NBR 6457/86 (Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização).

Além destas, foram coletadas amostras deformadas de cada horizonte para a determinação da análise granulométrica dos solos, da massa específica, dos limites de Atterberg (liquidez e plasticidade) e da análise química do solo.

As amostras deformadas representativas de cada horizonte foram retiradas com o auxílio de pá e espátulas, após a limpeza superficial do perfil, e dispostas em sacos plásticos (LEMONS E SANTOS, 1982). Em uma pequena bancada da área de amostragem foram moldadas as amostras indeformadas em anéis de PVC e anéis metálicos que são utilizados nos ensaios de avaliação indireta e direta da erodibilidade. A Figura 3.1 mostra como foi realizada a coleta das amostras indeformadas.



Figura 3.1 - Coletas das amostras indeformadas

As análises indeformadas foram coletadas em dois tipos de anéis de PVC: (a) anéis de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizados para o ensaio de Inderbtzen, desagregação e cone de laboratório; (b) anéis de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizados para os ensaios da metodologia MCT (Infiltrabilidade e Perda de massa por Imersão Modificada). No entanto, os anéis metálicos quadrados (5x5x2cm) foram utilizados para os ensaios de cisalhamento direto.

Essas amostras foram parafinadas a fim de manter a sua umidade natural para a realização dos ensaios em laboratório. Dessa forma, o solo permanece da mesma forma como se encontra em campo, diferentemente das amostras indeformadas, que são obtidas com a desagregação do solo.

A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de amostras indeformadas coletadas e seus respectivos ensaios.

Tabela 3.1 - Número de amostras indeformadas coletadas e seus respectivos ensaios.

Dimensão dos anéis (cm) ( $\Phi$ = diâmetro, h = altura)	Ensaio	Nº amostras por horizonte	Nº amostras total
	Inderbtzen	18	54
$\Phi = 10, h=5$	Desagregação	2	6
	Cone de laboratório	3	9
	Perda de massa por imersão	9	27
$\Phi = 5, h = 5$	Infiltrabilidade	9	27
5 x 5 x 2	Cisalhamento direto	15	45

#### ***- Ensaio do Penetrômetro Dinâmico de Cone – DCP***

O penetrômetro dinâmico de cone é um instrumento que permite realizar os ensaios de penetração no solo em seu estado de umidade natural. Este ensaio é realizado de forma simples e ágil, com auxílio apenas de duas pessoas, conforme Figura 3.2.



Figura 3.2 – Execução do ensaio do Penetrômetro Dinâmico de Cone (DCP) em campo (ALVES, 2002)

Durante o desenvolver do ensaio mediu-se, em uma régua, em milímetros, a penetração no solo para cada golpe. A primeira leitura de penetração do DCP era sempre desconsiderada, pois no primeiro golpe, a superfície de contato entre o cone e o solo não é a mesma dos golpes posteriores. O ensaio foi realizado no perfil da estrada e ao meio da estrada, em toda a sua extensão. Em alguns pontos observa-se a presença de crosta, em outros não, já no perfil da estrada predomina uma vegetação de gramíneas. Ao total foram realizados 23 ensaios no decorrer do perfil e da estrada.

Os resultados foram anotados em uma planilha padrão onde se indica, para cada golpe aplicado, a profundidade correspondente alcançada pelo cone de penetração.

Com os dados obtidos foram elaborados um gráfico para os ensaios realizados no perfil, um gráfico para os ensaios realizados na estrada com presença de crosta e outro gráfico com os resultados realizados na estrada sem a presença de crosta. A partir destes gráficos buscou-se diferenciar as distintas camadas/horizontes do local, para posteriormente calcular novamente os valores de DPI para essas camadas.

### 3.3 Etapa de laboratório

Na etapa de laboratório foram realizados os ensaios geotécnicos para a caracterização física, ensaios químicos, ensaios de cisalhamento direto, ensaio do penetrômetro de cone e ensaios para a avaliação indireta (ensaios de desagregação, metodologia MCT e cone de laboratório) e direta (ensaio de Inderbtzen) da erodibilidade das amostras coletadas.

Os ensaios foram conduzidos, adotando-se a mesma metodologia de Tatto (2007), Fernandes (2011), Sant'Ana (2012), Basso (2013) e Pittelkow (2013) baseados no trabalho de Bastos (1999). Os ensaios foram realizados em três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, seca ao ar e pré-umedecidas.

### 3.3.1 Ensaios de caracterização física e química

Para os ensaios de caracterização física foram utilizadas amostras deformadas preparadas conforme os procedimentos da ABNT 6457/86 (Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização). A caracterização dos solos foi realizada através dos ensaios de peso específico real dos grãos (ABNT NBR 6508/84), limites de liquidez (ABNT NBR 6459/84), limites de plasticidade (NBR 7180/84) e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação com e sem o uso de defloculante (ABNT NBR 7181/84). A escala adotada para separação das frações do solo é a recomendada pela ABNT NBR 6502/95 (Terminologia – Rochas e Solos). A Figura 3.3 mostra a execução do ensaio da análise granulométrica.



Figura 3.3 - Execução do ensaio da análise granulométrica

A análise química das amostras de solo deformadas foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solo, do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria. Nesta análise foram realizados para cada amostra dos horizontes estudados, a determinação da textura, da percentagem de argila, do pH, da percentagem de matéria orgânica, da percentagem de saturação em alumínio e bases, da verificação da capacidade de troca catiônica (CTC), da quantidade de alumínio mais hidrogênio e da quantidade de fósforo, potássio, alumínio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, ferro e manganês.

### 3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento e se baseia diretamente no critério de Mohr-Coulomb.

Para a execução deste ensaio foram seguidos os procedimentos da normativa americana ASTM: D3080-90. O ensaio de cisalhamento direto foi executado numa caixa bipartida que contém a amostra indeformada (5x5x2cm), a qual é colocada na prensa de cisalhamento onde a metade superior do corpo de prova deslizava em relação à inferior. O corpo de prova é inicialmente submetido a uma força normal, espera-se estabilizar as deformações e posteriormente aplicava-se uma força cisalhante que impõe um deslocamento horizontal à amostra até a ruptura do corpo de prova. Na base e no topo do corpo de prova são colocadas pedras porosas para permitirem livre drenagem de água durante o ensaio. O deslocamento vertical durante o ensaio também é registrado, indicando se houve diminuição ou aumento de volume durante o cisalhamento.

A Figura 3.4 mostra a preparação da amostra para a execução do ensaio de cisalhamento direto e a Figura 3.5 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio.



Figura 3.4 - Preparação da amostra para a realização do ensaio de cisalhamento direto



Figura 3.5 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de cisalhamento direto

Para cada tensão normal aplicada, obtém-se um valor de tensão cisalhante de ruptura, permitindo o traçado da envoltória de resistência. Foram realizados três tipos de ensaios, utilizando amostras de solo no teor de umidade natural, seco ao ar e saturada. Para os ensaios foram utilizadas cinco tensões normais, sendo elas de, 25, 50, 100,150 e 200 kPa.

### 3.3.3 Ensaios para avaliação indireta da erodibilidade

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

### 3.3.3.1 Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação ou *slaking test* teve como objetivo a avaliação qualitativa e visual da desagregação de uma amostra de solo, não confinada, quando submetida à ascensão do nível de água destilada, até estar totalmente submersa, totalizando 24 horas de ensaio. Para a realização deste ensaio, é adotada a metodologia proposta por Santos (1997 apud BASTOS, 1999).

Foram coletadas amostras indeformadas de solo, com anéis cilíndricos de PVC, biselados, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Os ensaios são realizados na condição de umidade natural e seca ao ar (por no mínimo 72 horas).

As amostras foram retiradas de seus anéis com a ajuda de um soquete de acrílico e posteriormente foram postas sobre um papel filtro e uma pedra porosa, permanecendo sob quatro condições de submersão: com o nível d'água na base da amostra - 30 minutos; com o nível d'água a 1/3 da amostra - 15 minutos; com o nível d'água a 2/3 da amostra - 15 minutos; e com a amostra totalmente submersa - 24 horas. A Figura 3.6 mostra as etapas da realização do ensaio de desagregação.

Por ser um ensaio qualitativo, em cada etapa é registrado o comportamento da amostra com fotografias e descrição da sua condição. Para isso, leva-se em consideração o abatimento e inchamento da amostra; raio de influência das partículas de solo desagregadas; velocidade de desagregação; formação de fissuras no topo e rupturas nas bordas da amostra.

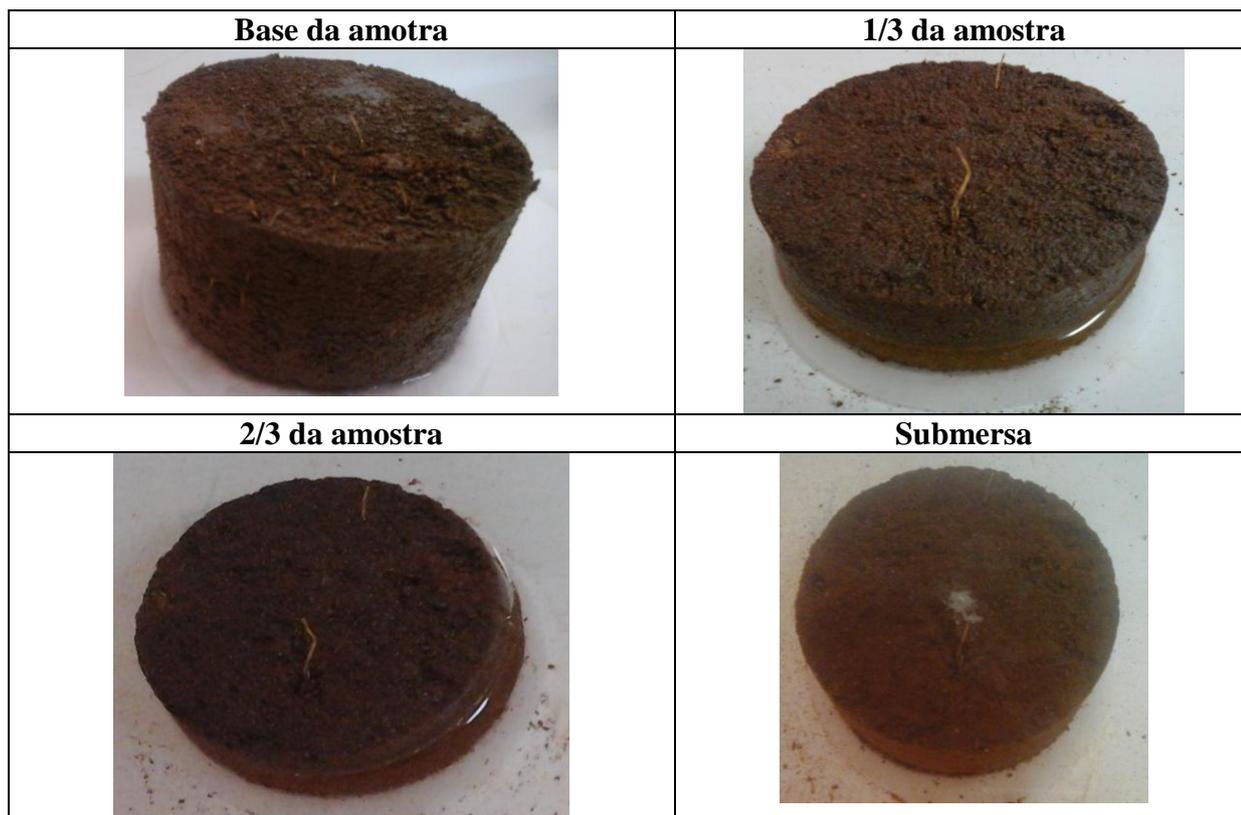


Figura 3.6 - Etapas do ensaio de desagregação para amostras nas quatro condições de submersão.

### 3.3.3.2 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT

Os ensaios pelo critério da metodologia MCT tiveram como principal objetivo classificar e quantificar os solos em relação ao grau de erodibilidade; ou seja, prever o comportamento dos solos frente à erosão, sendo baseada em dois parâmetros: o coeficiente de sorção, obtido no ensaio de infiltrabilidade, e o coeficiente de perda de massa por imersão modificada, obtida no ensaio de erodibilidade específica.

#### *Ensaio de infiltrabilidade (s)*

O ensaio de infiltrabilidade teve como objetivo a quantificação da velocidade de ascensão capilar nas amostras de solo. Para a realização deste ensaio foram utilizadas amostras de solo indeformadas, confinadas em anéis cilíndricos de PVC, com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, nas condições de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecida.

O equipamento consiste em um plano de madeira onde é acoplada uma régua graduada e um tubo capilar de vidro com 6 mm de diâmetro. Este tubo capilar está ligado a um reservatório com topo livre, sobre ao qual se encontra uma pedra porosa. O tubo capilar é preenchido com água até que a mesma transborde no topo do reservatório, após é colocado o papel filtro e sobre o papel filtro a amostra confinada em seu anel de PVC.

Para medir a quantidade e a velocidade de infiltração foram realizadas as leituras dos valores, obedecendo a uma escala de tempo (15", 30", 45", 1', 1'15", 1'30", 1'45", 2', 4', 9', 16', 25', 49', 64', 81', 100', 121', 144' e 24 horas). Com os dados referentes ao deslocamento do menisco e o tempo foi elaborado um gráfico, onde seu trecho inicial retilíneo fornece o coeficiente de sorção "s".

A Figura 3.7 mostra o equipamento utilizado para a realização do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.

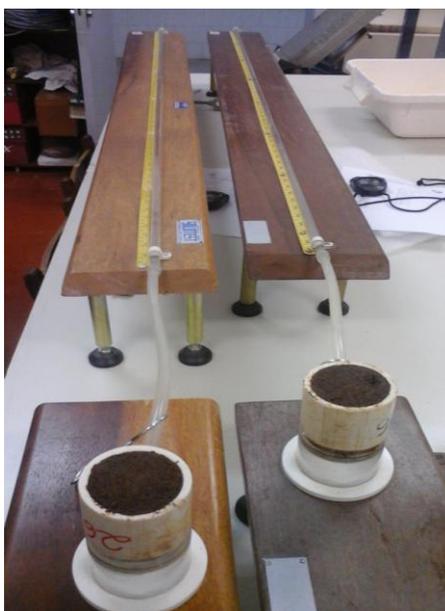


Figura 3.7 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para amostras do horizonte A

### *Ensaio de perda de massa por imersão modificado (pi)*

Também chamado de erodibilidade específica, este ensaio teve como objetivo a avaliação quantitativa do potencial de desagregação de uma amostra indeformada de solo, quando submersa em água (TATTO, 2007).

Para a realização deste ensaio foram utilizadas amostras de solo indeformadas, na condição de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecidas, confinadas em anéis cilíndricos de PVC de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Para a realização do ensaio as amostras tiveram suas alturas reduzidas para 2,5 cm em laboratório, sendo colocado um papel filtro e uma pedra porosa na parte interna no anel.

O sistema é formado por um berço metálico que suporta a amostra confinada, sendo esta colocada na horizontal sobre o berço. Abaixo do berço foi colocada uma cápsula para recolher o possível material desagregado do anel, durante o período de 20 horas em que este sistema esteve imerso em água.

A Figura 3.8 mostra a execução do ensaio com o berço metálico, o corpo de prova e cápsula para a coleta do solo desagregado.



Figura 3.8 - Execução do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT, com o berço metálico, o corpo de prova e cápsula coletora realizado com a amostra do horizonte A

Com o término do ensaio, a água é esgotada, cuidadosamente, 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 a determinação do parâmetro “ $\rho_i$ ”.

### 3.3.3.3 Ensaio de cone de laboratório

O ensaio de cone foi realizado com base na metodologia de Alcântara (1997). Este ensaio foi adaptado do clássico ensaio para determinação do limite de liquidez de argilas remoldadas (normalizado pela BS 1377/1975) e teve por objetivo avaliar a resistência a penetração de um pequeno cone em queda oferecida por uma amostra indeformada de solo. Para este ensaio foi utilizada amostras indeformadas, coletas em anéis de PVC com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, nas condições de umidade natural e pré umedecida sendo esta obtida por aspersão capilar por uma hora. O ensaio consiste na liberação de um cone de 300g, a uma altura de 50 mm do corpo de prova, sendo que este cone possui uma abertura de 30° e altura de 35 mm.

O equipamento utilizado é um penetrômetro de cone como mostra a Figura 3.9. Foram utilizadas três amostras de cada perfil para cada uma das condições de umidade. Em cada uma das amostras mede-se a penetração alcançada pela ponta do cone em nove pontos diferentes da sua superfície, totalizando 27 penetrações para cada condição de umidade.



Figura 3.9 - Penetrômetro utilizado para a realização do ensaio de cone com a amostra a ser ensaiada

Os valores da penetração natural ( $P_{nat}$ ) e pré-umedecida ( $P_{sat}$ ) foram obtidos por meio da média dos valores coletados. Levando em consideração que se exclui os valores que apresentam dispersão em relação à média acima de 5% para os quais é exigido um mínimo de seis medidas válidas.

### 3.3.4 Ensaio para avaliação direta da erodibilidade - Ensaio de Inderbitzen

Este ensaio é de simples execução dentre os realizados em canais hidráulicos no meio geotécnico, apresentando resultados satisfatórios, mesmo sendo um ensaio baseado em métodos empíricos e ainda não normalizado.

Para a realização deste ensaio, foi utilizado um equipamento específico construído no LMS/ UFRGS para o estudo de Bastos (1999) em solos residuais de Porto Alegre, seguindo a metodologia utilizada por este autor.

Os ensaios de Inderbitzen foram realizados com a finalidade de quantificar a erodibilidade e também avaliar o efeito da umidade inicial das amostras a susceptibilidade a erosão hídrica por escoamento de água superficial, seguindo a metodologia já adotada nos trabalhos anteriores desenvolvidos por Tatto (2007), Ávila (2009), Fernandes (2011), Sant'Ana (2012) e Basso (2013).

O equipamento consiste em uma estrutura metálica, composta de uma rampa hidráulica articulada de 25 cm de largura e 60 cm de comprimento, com inclinações variáveis de 0° a 54°, sendo suportada por uma barra metálica fixa na estrutura principal. Esta rampa é dotada de uma abertura circular central de 10 cm de diâmetro, onde é acoplado um anel contendo a amostra de solo indeformada, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, de tal maneira, 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 esta anexada ao sistema 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, estando este interligado a canalização. A água e o solo desagregado pelo fluxo foram coletados e baldes plásticos de 60 litros, nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos, e posteriormente, passados por um conjunto de peneiras de malhas 4,8 mm (peneira #4), 2,0 mm (peneira #10), 0,42 mm (peneira #40) e 0,074 mm (peneira #200). Em seguida, recolhe-se o solo retido em cada peneira e o remanescente do anel, coloca-se em cápsulas individuais e leva-se à estufa para a obtenção de seus pesos secos.

A Figura 3.10 ilustra o equipamento utilizado, com destaque para o encaixe da amostra no equipamento.

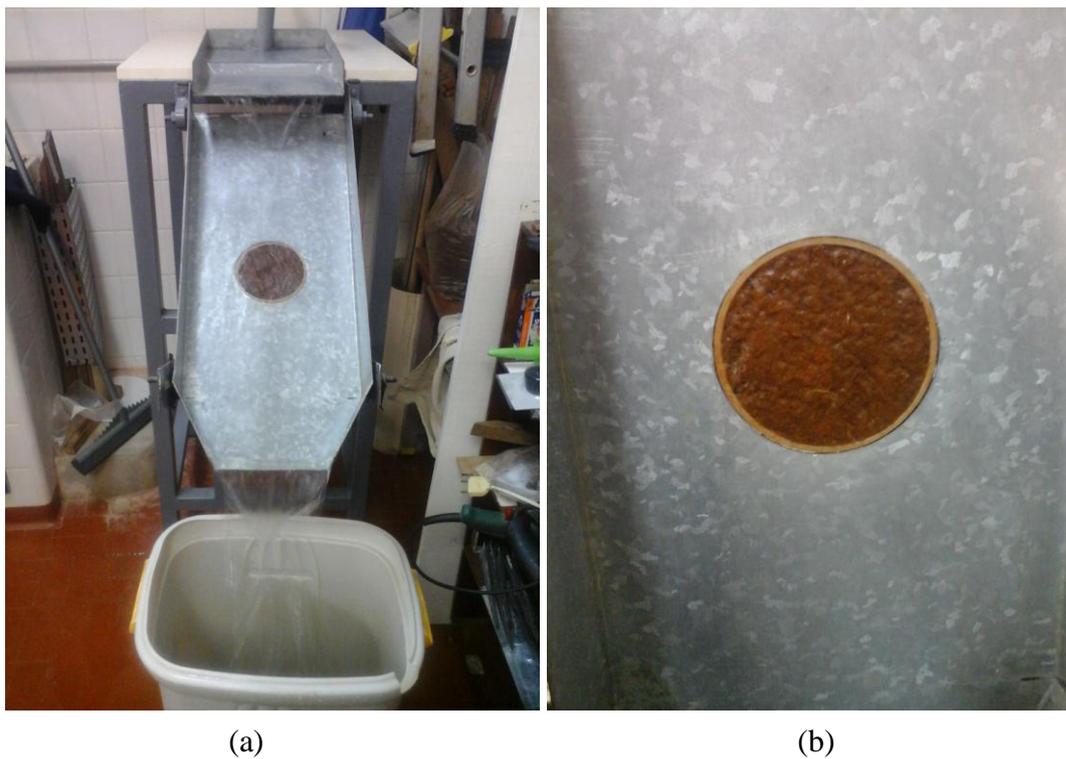


Figura 3.10 - (a) material erodido sendo coletado e (b) detalhe do encaixe da amostra no equipamento, amostra do horizonte B

As variáveis de ensaio adotadas nesta pesquisa são as mesmas utilizadas por Bastos (1999). As inclinações da rampa metálica foram de  $10^\circ$ ,  $26^\circ$  e  $45^\circ$ , com vazões de água de 3 l/min e 6 l/min, em amostras de solo na condição de umidade natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecidas.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada dentro do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM). É uma área militar do Exército Brasileiro situada na região central do Rio Grande do Sul, na porção sudoeste da cidade de Santa Maria. Geograficamente, a área fica localizada entre as coordenadas  $53^{\circ} 48' 12''$ ;  $53^{\circ} 53' 23''$  de longitude oeste e  $29^{\circ} 42' 31''$ ;  $29^{\circ} 47' 39''$  de latitude sul. O acesso ao CISM é pela BR 158 no final da Avenida do Exército, no Bairro Boi Morto, conforme Figura 4.1.

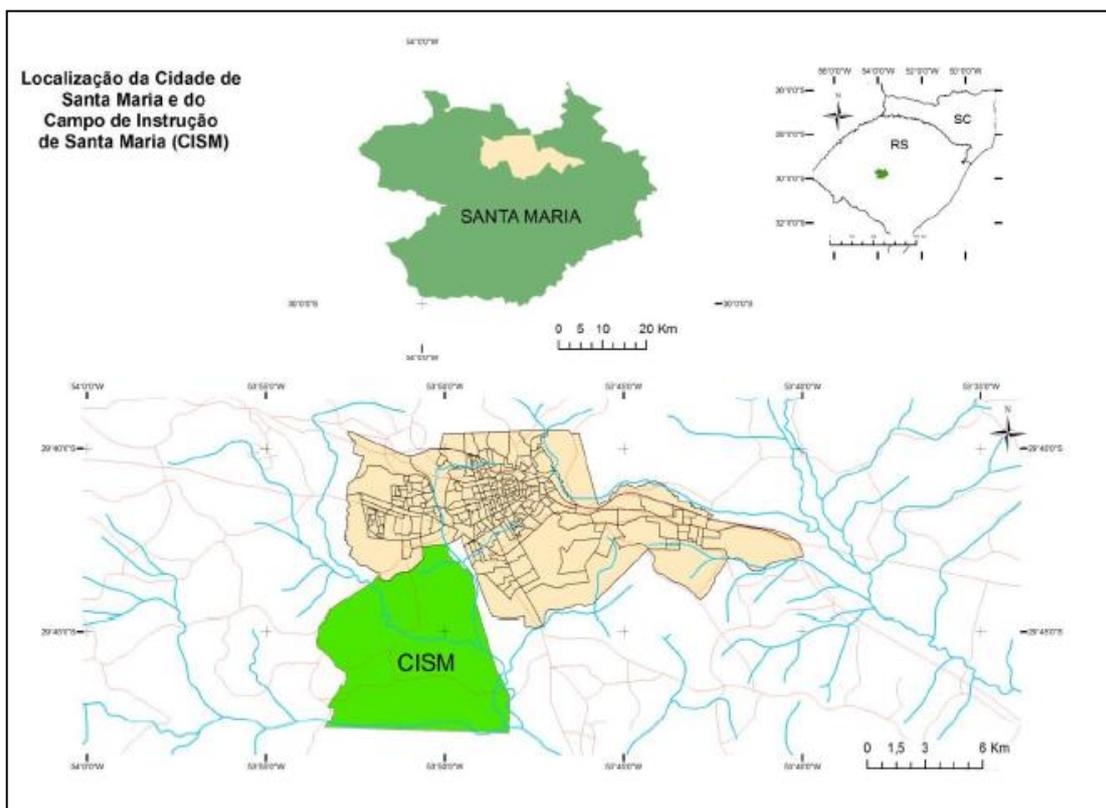


Figura 4.1 - Mapa de localização da área de estudo (SANT'ANA, 2012)

O CISM possui uma área de 5.866,9 hectares, sendo parte desta destinada ao treinamento de militares com blindados e outra parte arrendada para particulares que a utilizam para agricultura e pecuária. Segundo Sant'Ana (2012) o CISM é uma das poucas Organizações Militares (OM) destinada a treinamento de militares com blindados no Brasil.

Por esse motivo, OMs e militares do Brasil inteiro e algumas vezes do exterior vem para o CISM para treinamentos. O mesmo autor enfatiza que as OM's que mais utilizaram o CISM para treinamentos com blindados nos anos de 2011 e 2012 foi o CIBLD (Centro de Instrução de Blindados), seguido do 1º RCC (1º Regimento de Carros de Combate) e 29º BIB (29º Batalhão de Infantaria Blindado). Salientando que tais OMs possuem, dentre sua frota, os blindados mais pesados como M60 (48,7 toneladas), Leopard A1 sabiex (45 toneladas), Leopard 1A1 (42,4 toneladas), Leopard 1A5 (42,4 toneladas).

Atualmente o número de blindados que utilizam o Campo para efetuar os treinamentos são em torno de 140. Além dos blindados, outros carros relativamente pesados percorrem a área do Campo de Instrução como as viaturas (VBTP – viatura blindada para transporte de pessoal, caminhões, jipes, etc.). Dessa maneira, os veículos que percorrem o CISM variam desde viaturas que pesam 3 toneladas (caminhões, jipes) a blindados pesando aproximadamente 48 toneladas (M60). Onde, cada OM tem seus próprios blindados, diferindo entre elas devido ao tipo de treinamento que realizam.

No CISM são realizados treinamentos praticamente o ano inteiro, com exceção, dos meses de Dezembro e Janeiro. Visando atender todas as OMs, o Campo de Instrução foi dividido em áreas de treinamento para que mais de um quartel possa fazer os exercícios ao mesmo tempo. Assim, a maioria dos blindados têm acesso ao CISM pelo CIBLD (Centro de Instrução de Blindados), sendo notável a degradação ambiental nesse local.

Conforme Pittelkow (2013) os aspectos físicos da área, identificam-se duas unidades geológicas distintas. Na base ocorre a Formação Santa Maria, uma transição entre membro Alemoa, predominante, e membro Passo das Tropas. Sobre estas ocorrem os arenitos da Formação Caturrita, em relevos mais elevados, coberta por depósitos de terraços aluviais, ligados aos arroios Taquarichim e Cadena.

Ainda segundo Pittelkow (2013) associado à geologia tem-se a presença de Argissolos, classificados como Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (Unidade São Pedro) e Argissolo Bruno Acinzentado (Unidade Santa Maria). Somando-se toda a área correspondente aos argissolos, temos uma área com proporção semelhante à área correspondente a presença de Planossolos, estes por sua vez, situa-se próximo às várzeas dos arroios Cadena e Taquarichim. Como características importantes, quanto à fragilidade natural de tais solos, temos que os Argissolos Vermelhos a Vermelhos-Amarelos com textura arenosa nos horizontes superficiais há uma rápida infiltração da água, que diminui no horizonte B

textural devido a sua menor permeabilidade, sendo mais acentuado quando há uma mudança textural abrupta. Conseqüentemente a saturação com água nos horizontes superficiais será alcançada tanto mais rapidamente quanto menor for à espessura dos horizontes superficiais, dando início ao escoamento superficial e conseqüentemente a erosão em sulcos, podendo atingir a forma de voçorocas.

Referente aos processos erosivos tem-se o desenvolvimento de sulcos e ravinas, atreladas as condições de fragilidade natural da área ao escoamento superficial. Concentra-se junto às estradas de terra, cujo traçado encontra-se em alguns casos perpendicular às curvas de nível do terreno. Também se observa a ação acelerada da erosão, junto aos cortes laterais das estradas, que não possuem um sistema de drenagem adequado (PITTELKOW, 2013).

Quanto à vegetação, nota-se na área em estudo a presença de mata nativa na porção sul da área, junto ao Arroio Taquarichim e ao Arroio Sarandi, e nas demais áreas a presença de campos nativos e não nativos. Ou seja, composição vegetal da área é um mosaico de fragmentos de matas, florestas e campos nativos (PITTELKOW, 2013)

Para Heldwein et al., (2009) o clima da região de Santa Maria é subtropical úmido com chuvas bem distribuídas, apresentando invernos frios e verões bastante quentes. Considerando a série histórica 1912-2004 da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Santa Maria, elaborada por Buriol et.al., (2009), o regime pluviométrico do município pode ser considerado isoigro, isto é, os valores normais de chuva são bem distribuídos ao longo do ano. As médias mensais de precipitação pluviométrica oscilam de 120,1 a 159 mm, acumulando-se no ano uma média normal de 1712,4 mm. Os totais mensais de precipitação pluviométrica ficam, por vezes, abaixo dos totais de evaporação e evapotranspiração, causando deficiência hídrica, mais pronunciada no verão. Ao contrário, no inverno ocorrem excessos hídricos.

Quanto à declividade pode-se dizer que se trata de área predominantemente plana onde a classe de declividade menor que 2% se encontra nas áreas próximas aos arroios Cadena, Taquarichim e Sarandi; e nos topos planos das colinas. As classes de declividade de até 5% associam-se a base das colinas. Assim, a porção leste, noroeste, sudeste e extremo sul é uma região relativamente plana, para a qual, é conduzido o material oriundo de processo de desagregação dos solos. Sendo assim, nesta faixa, ocorre o processo de assoreamento e sedimentação (PITTELKOW, 2013). Além disso, a mesma autora destaca que os comprimentos de rampa que predominam na porção norte da área são mais longos, em

oposição ao ocorrido nas porções sudoeste, oeste e centro-norte, onde o relevo encontra-se mais recortado, gerando comprimentos de rampa menores.

#### 4.1 Delimitação da área de estudo

Tendo em vista a grande extensão territorial do CISM, foi delimitada como área de estudo e de coleta das amostras, uma jazida de material de empréstimo, situada em uma área de terraço fluvial, por ser uma das áreas mais impactadas, conforme Figura 4.2.

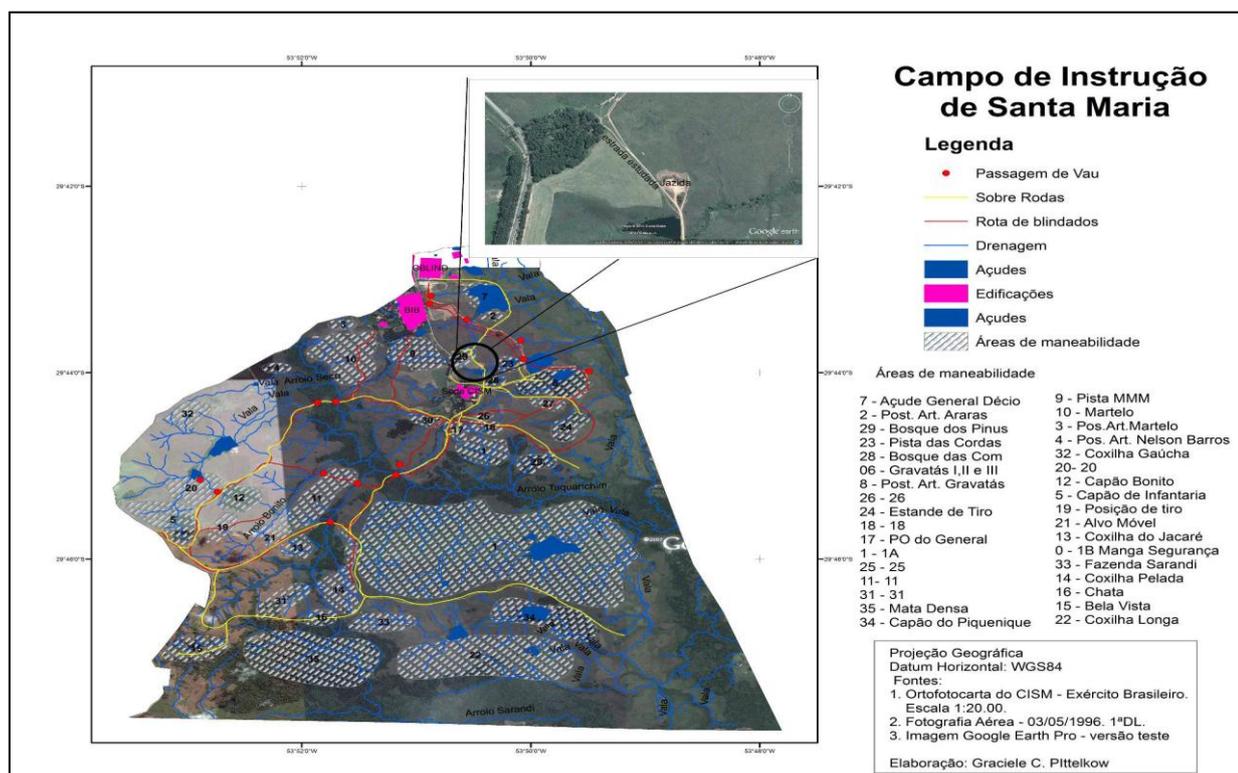


Figura 4.2 – Delimitação da área de estudo dentro do Campo de Instrução de Santa Maria (PITTELKOW, 2013)

Esta área se encontra em acelerado processo erosivo, conforme a Figura 4.3, com presença de sulcos, ravinas, alcovas de regressão e dutos internos. Outro fator da escolha desta área foi à existência de estudos anteriores realizados neste local e que vieram contribuir para esta pesquisa.

A jazida esta localizada no centro da porção norte, da área militar, e devido aos processos de erosão acelerada, atualmente está bloqueada para uso de veículos, independentemente do porte dos mesmos.

A jazida esta sobre uma área de terraço fluvial, depositado sobre arenitos da Formação Caturrita. No terraço se desenvolveu um perfil de Argissolo, o depósito de terraço apresenta aproximadamente 4 metros de espessura na área da jazida, sendo que 1,60 metros do topo correspondem ao argissolo (SANT'ANA, 2011)

O perfil do material localizado na jazida de empréstimo, esta ilustrado na Figura 4.3. A imagem mostra um perfil de solo desenvolvido sobre depósito de planície aluvial com 4 metros de altura. O horizonte A, atinge cerca de 1 metro de profundidade, nesse ponto é caracterizado por uma coloração mais escura, de tom amarronzado. Nesse trecho se apresenta algumas alcovas, além de ser um horizonte vulnerável à desagregação. Logo abaixo, ocorre o horizonte B, argiloso e sem alteração, com até 2 metros de profundidade. A coloração deste horizonte tende para tons de marrom-avermelhado. Em seguida, ocorre o horizonte C ou material de alteração.



Figura 4.3 - Perfil do terraço fluvial localizado na área de estudo

Ao lado da jazida se encontra uma estrada de terra, que conforme os militares que utilizam o Campo de Instrução, os processos erosivos que estão ocorrendo junto à estrada de terra é um problema, pois fazem com que novas rotas se estabeleçam como alternativa para o tráfego de blindados o que origina novas áreas impactadas, conforme mostra a Figura 4.4.



Figura 4.4 - Estrada de terra situada próxima à jazida em estudo.

Pittelkow (2013) estudando esta estrada destacou que a mesma se encontra em uma porção mais elevada do relevo em relação ao seu entorno, entre as cotas altimétricas de 90 a 100 metros, cujo comprimento de rampa pode ser considerado mediano a curto. A estrada está sobre uma área de terraço fluvial depositado sobre arenitos da Formação Caturrita, onde se desenvolveu um perfil de Argissolo. A estrada corta as curvas de nível, o que contribui para o processo erosivo, aumentando a velocidade de água que escoar sobre ela. Essa condição, associada à falta de drenagem e vegetação nas suas laterais, conduzem o fluxo de águas pluviais, para o leito da estrada, que em decorrência da estrutura frágil do material, tende a apresentar sulcos e ravinas. A Figura 4.5 mostra a formação de uma camada de crosta na estrada estudada por Pittelkow (2013), esta crosta se formou devido à compactação do solo pela passagem dos veículos pesados (blindados), nas operações militares.



Figura 4.5 - Presença de crosta devido à compactação pela passagem dos blindados (PITTELKOW, 2013)

Todas as análises realizadas em relação à área de estudo e aos processos erosivos observados necessitam de comprovações quantitativas que devem ter embasamento concreto para as afirmações realizadas, esse embasamento se buscou por meio dos ensaios de laboratório.



## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios de: (a) caracterização física e determinação dos índices físicos, (b) caracterização química, (c) resistência ao cisalhamento direto, (d) cone de campo e (e) avaliação indireta e direta da erodibilidade.

### 5.2 Ensaios de caracterização física e determinação dos índices físicos

Com as amostras coletadas na área em estudo, foram realizados ensaios de caracterização física e determinação dos índices físicos das amostras indeformadas que foram utilizadas nos os ensaios de resistência ao cisalhamento direto, desagregação, infiltrabilidade, perda de massa por imersão e Inderbtizen.

Os ensaios de caracterização física realizados foram: determinação do peso específico real dos grãos, determinação dos limites de consistência e análise granulométrica (ABNT NBR 6459, 7180, 7181 e 6508).

A Tabela 5.1 apresenta os resultados do peso específico real dos grãos e dos limites de consistência. O peso específico apresentou valores entre 25,72 kN/m<sup>3</sup> e 27,46 kN/m<sup>3</sup>, resultados característicos da mineralogia destes solos.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de peso específico real dos grãos e limite de consistência.

Identificação	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	wl (%)	Wp (%)	IP(%)
Horizonte A	25,7	22	11	11
Horizonte B	26,3	23	13	10
Horizonte C	27,5	38	18	20

Obs.:  $\gamma_s$  = peso específico real dos grãos; wl = limite de liquidez; wp = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade.

Os resultados dos ensaios granulométricos com e sem o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio) estão apresentados na Tabela 5.2 e as curvas granulométricas com defloculante estão apresentadas na Figura 5.1. A divisão adotada para as frações constituintes

do solo foi proposta pela ABNT NBR 6502. Nesta tabela está apresentada a classificação destes horizontes pelos sistemas tradicionais de classificação geotécnica (HRB e SUCS).

Tabela 5.2 - Resumo dos ensaios de granulometria e classificação dos solos

Identificação		Fração Granulométrica (%)						Classificação Geotécnica		Classificação Pedológica
		Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila	HRB	SUCS	
		Horizonte A	C/D	0	12	32	24	14	18	
	S/D	0	12	35	39	14	0			
Horizonte B	C/D	0	10	25	27	13	25	A-4	SC	Argissolo
	S/D	0	10	25	44	19	2			
Horizonte C	C/D	0	9	15	33	12	31	A-6	CL	
	S/D	0	11	30	12	42	5			

Obs.: HRB = HighwayResearchBoard; SUCS = Sistema Unificado de Classificação dos Solos; C/D = com defloculante; S/D = sem defloculante; CL = argila inorgânica de baixa compressibilidade.

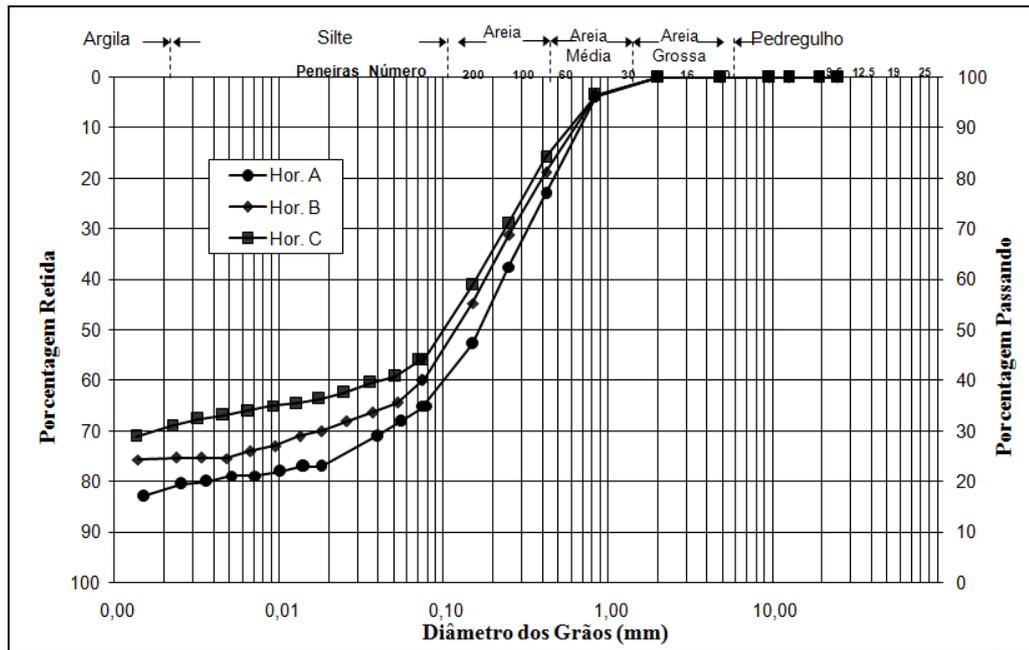


Figura 5.1 - Curva granulométrica dos horizontes A, B e C

Observa-se que este perfil de solo estudado não apresenta partículas do tamanho pedregulho, predomina a fração areia entre 57 e 68%. As percentagens mais elevadas da fração areia ocorrem no horizonte A, e as mais baixas no horizonte C (fração fina de 43%). Pedologicamente este perfil de solo foi classificado como argissolo. O horizonte C se desenvolveu por alteração de um provável terraço fluvial, com uma fração argila de 31% e média plasticidade. Os horizontes A e B apresentam uma baixa plasticidade.

Nos ensaios realizados sem o uso de defloculante observa-se uma redução significativa das percentagens da fração argila se comparado com os resultados dos ensaios que utilizaram defloculante. O menor valor encontrado para a fração argila (argila natural) sem o uso de defloculante foi no horizonte A e maior valor no horizonte C. Texturalmente apesar de alguma diferenciação nas frações, estes horizontes são predominantemente areias argilosas.

Adotando-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos, os horizontes A e B são classificados como areia argilosa (SC) e o horizonte C como argila pouco plástica arenosa (CL). Utilizando a classificação de Highway Research Board estes horizontes se enquadram como solos siltosos e argilas siltosas de baixa compressibilidade.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados dos índices físicos obtidos nos corpos de prova indeformados coletados nos horizontes do perfil estudado (em torno de 50 corpos de prova por horizonte). Observa-se que existem significativas variações no teor de umidade para um

mesmo solo. Algumas destas variações podem estar relacionadas a ganhos de umidade por eventos pluviométricos ocorrentes em data próxima, antecedente à coleta das amostras. Também se constata o menor teor de umidade para os solos dos horizontes subsuperficiais em relação aos demais horizontes.

Verificou-se que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para os valores de umidade, grau de saturação e índice de vazios. Os horizontes A foi que apresentou o menor teor de umidade, provavelmente por ser mais superficial e estar mais sujeito as variações climáticas. Os valores de grau de saturação confirmam o caráter não saturado destes horizontes. O índice de vazios e a porosidade apresentam uma tendência de crescimento com a profundidade, indicando que os horizontes superficiais estariam mais densificados (peso específico mais elevado).

Tabela 5.3–Determinação dos índices físicos dos horizontes do perfil geotécnico estudado

	Valores	w (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	n (%)	S (%)
	<b>Média</b>	<b>12,64</b>	<b>17,66</b>	<b>15,68</b>	<b>0,65</b>	<b>39,10</b>	<b>51,34</b>
Hor. A	Máximo	16,67	21,14	19,10	0,89	47,12	81,17
	Mínimo	3,16	15,73	13,60	0,35	25,76	14,70
	D. Padrão	2,99	1,32	1,21	0,12	4,64	14,56
	C.V.	23,66	7,45	7,68	18,80	11,86	28,35
		<b>Média</b>	<b>15,71</b>	<b>17,04</b>	<b>14,74</b>	<b>0,79</b>	<b>42,99</b>
Hor. B	Máximo	29,12	20,24	17,30	1,12	52,81	86,83
	Mínimo	10,63	15,00	12,40	0,52	34,12	32,87
	D. Padrão	3,11	1,24	1,14	0,14	4,34	11,33
	C.V.	19,78	7,26	7,73	17,66	9,90	21,31
		<b>Média</b>	<b>17,21</b>	<b>16,44</b>	<b>14,00</b>	<b>0,98</b>	<b>48,77</b>
Hor. C	Máximo	25,58	19,24	16,60	1,59	61,40	75,38
	Mínimo	13,82	12,50	10,60	0,65	39,54	27,04
	D. Padrão	1,58	1,69	1,55	0,24	5,47	11,18
	C.V.	9,16	10,29	11,10	24,10	11,21	22,11

Obs.: w = teor de umidade;  $\gamma$  = peso específico natural;  $\gamma_d$  = peso específico aparente seco; e = índice de vazios; n = porosidade; S = grau de saturação.

## 5.2 Ensaio de Caracterização Química

Os ensaios de caracterização química são importantes para conhecer os aspectos químicos dos solos que podem influenciar nos processos erosivos. A caracterização química, apresentada na Tabela 5.4, foi realizada pelo Laboratório de Análise de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM.

Para todo perfil geotécnico, a saturação por bases (%V) é baixa (< 35%), sendo o solo classificado como distrófico, ou seja, pouco ou muito pouco fértil e sem reserva de nutrientes para os vegetais. A saturação por alumínio (%Al), para os horizontes A e C é superior a 50%, caracterizando uma quantidade de alumínio possivelmente tóxico para as plantas, tratando de um solo álico. A capacidade de troca catiônica (CTC) em todo o perfil é inferior a 2,0% apresentando pouca matéria orgânica. Os valores de matéria orgânica, obtidos a partir do carbono orgânico foram baixos (MO < 3,5%), sendo assim, o solo é classificado como erodível. A matéria orgânica é considerada muito importante na estabilidade dos agregados no solo, sendo um dos principais fatores controladores da hidrologia na superfície (LAFAYETE et al., 2005). Os valores de pH encontrados para o perfil apresentam pouca variação, entre 4,7 e 5,0, caracterizando como ácido.

Tabela 5.4 - Resultado da análise química

Horizontes	Cátions Básicos			Acidez Potencial		CTC (%)	Saturação		MO (%)	pH
	Ca	K	Mg ( $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ )	Al	H+Al		V (%)	Al (%)		
Hor. A	1,0	0,113	0,2	1,9	6,2	3,6	17,9	59,4	0,2	4,7
Hor. B	1,6	0,051	0,4	1,5	5,5	4,0	27,4	41,7	1,6	5,1
Hor. C	0,6	0,051	0,5	2,8	10,9	3,2	9,7	70,0	1,0	5,0

Portanto, pedologicamente este perfil de solo é classificado como um argissolo vermelho, distrófico, álico com argila de atividade baixa.

### 5.3 Ensaio de cisalhamento direto

A resistência ao cisalhamento dos solos estudados foi avaliada em laboratório através de ensaios de cisalhamento direto convencionais, nas condições de umidades natural, inundada e seca ao ar.

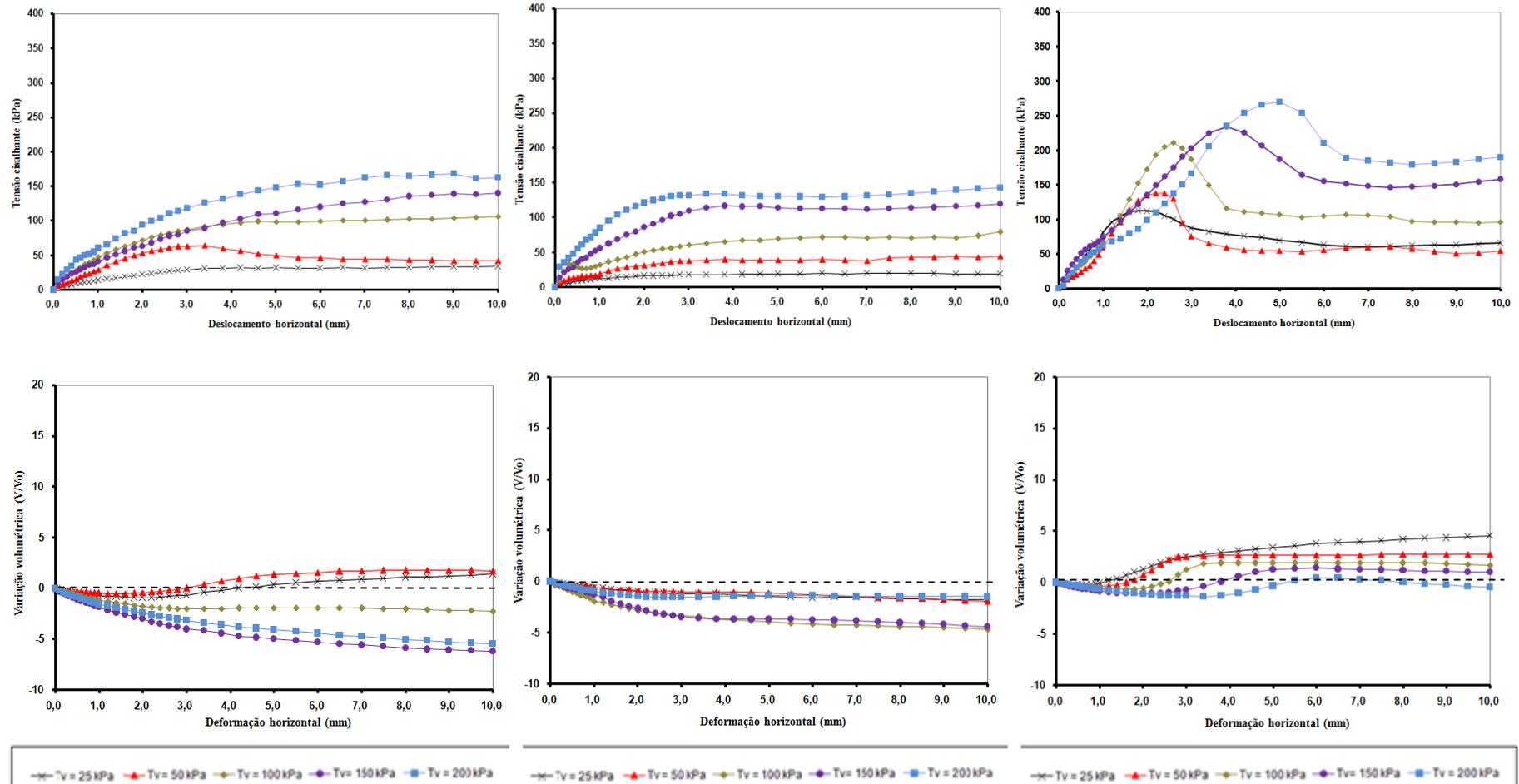
As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam as curvas tensões de cisalhamento por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para os ensaios realizados nas três condições de umidade.

Para os ensaios realizados na condição natural, nas amostras dos horizontes A, B e C as curvas de cisalhamento por deslocamento horizontal não apresentaram picos nítidos. Nesta mesma condição de umidade, a curva de variação volumétrica apresentou uma variação volumétrica inicial de compressão seguida de um aumento de volume para as tensões mais baixas.

Na condição inundada, as curvas de cisalhamento por deslocamento horizontal também não apresentaram picos nítidos, no entanto, proporcionaram variação volumétrica de compressão, com maior variação de volume nos horizontes A e C. Observou-se também que as tensões cisalhantes são reduzidas devido à influência da saturação no processo de ruptura (perda de sucção).

As amostras na condição seca ao ar apresentaram picos nítidos em todas as tensões aplicadas e a variação volumétrica de compressão que decresce e tende ao aumento de volume principalmente para as baixas tensões (25 kPa e 50k Pa). Esses picos são decorrentes do momento de ruptura dos corpos de prova.

Para o horizonte B, na condição seca ao ar, para a tensão de 50 kPa ocorreu uma grande variação volumétrica, possivelmente decorrente da não uniformidade dos materiais que constituíram a amostra.



(a) Natural

(b) Inundado

(c) Seca ao Ar

Figura 5.2 - Curva de Tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do horizonte A

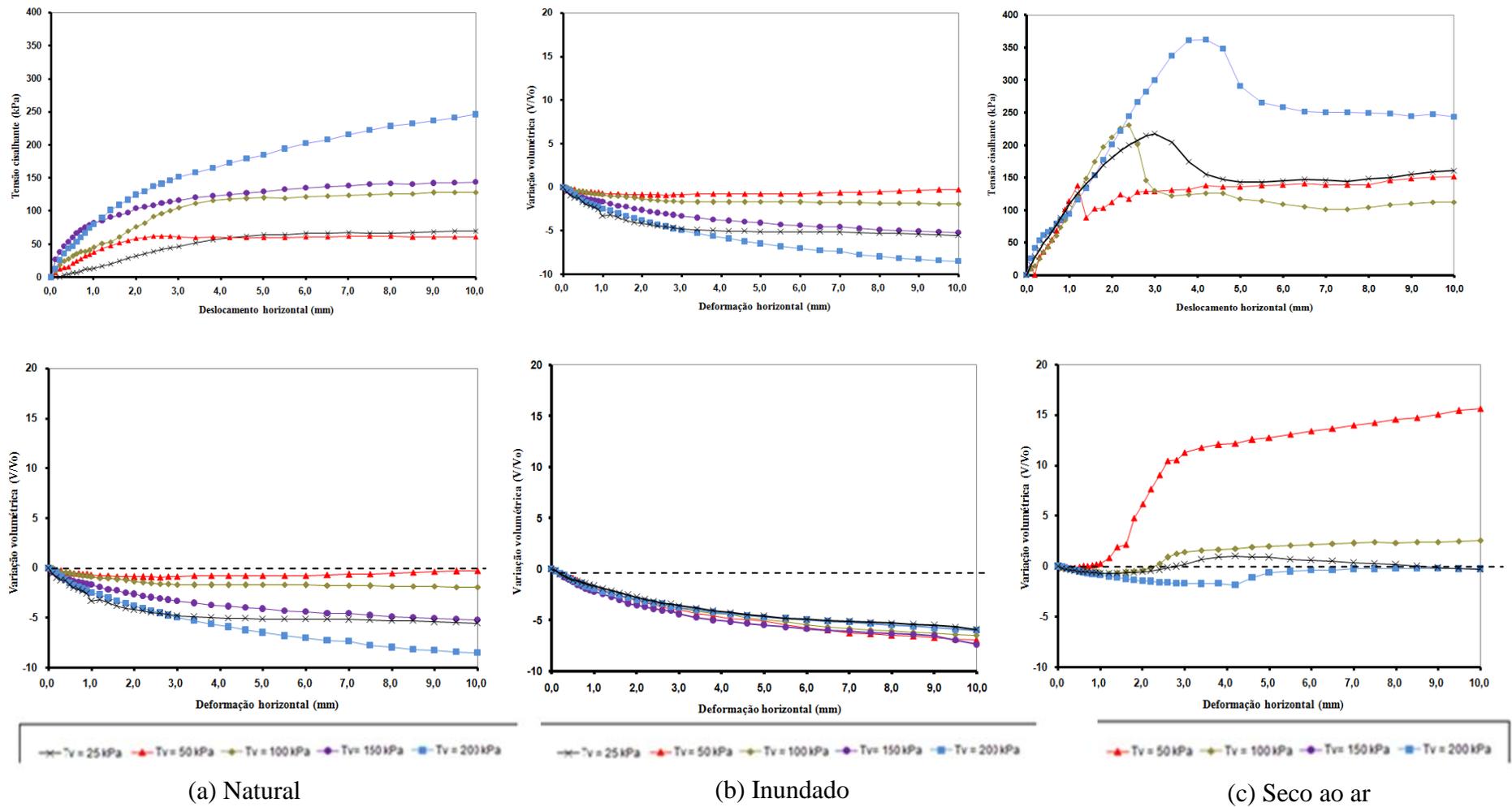


Figura 5.3 - Curva de Tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do horizonte B

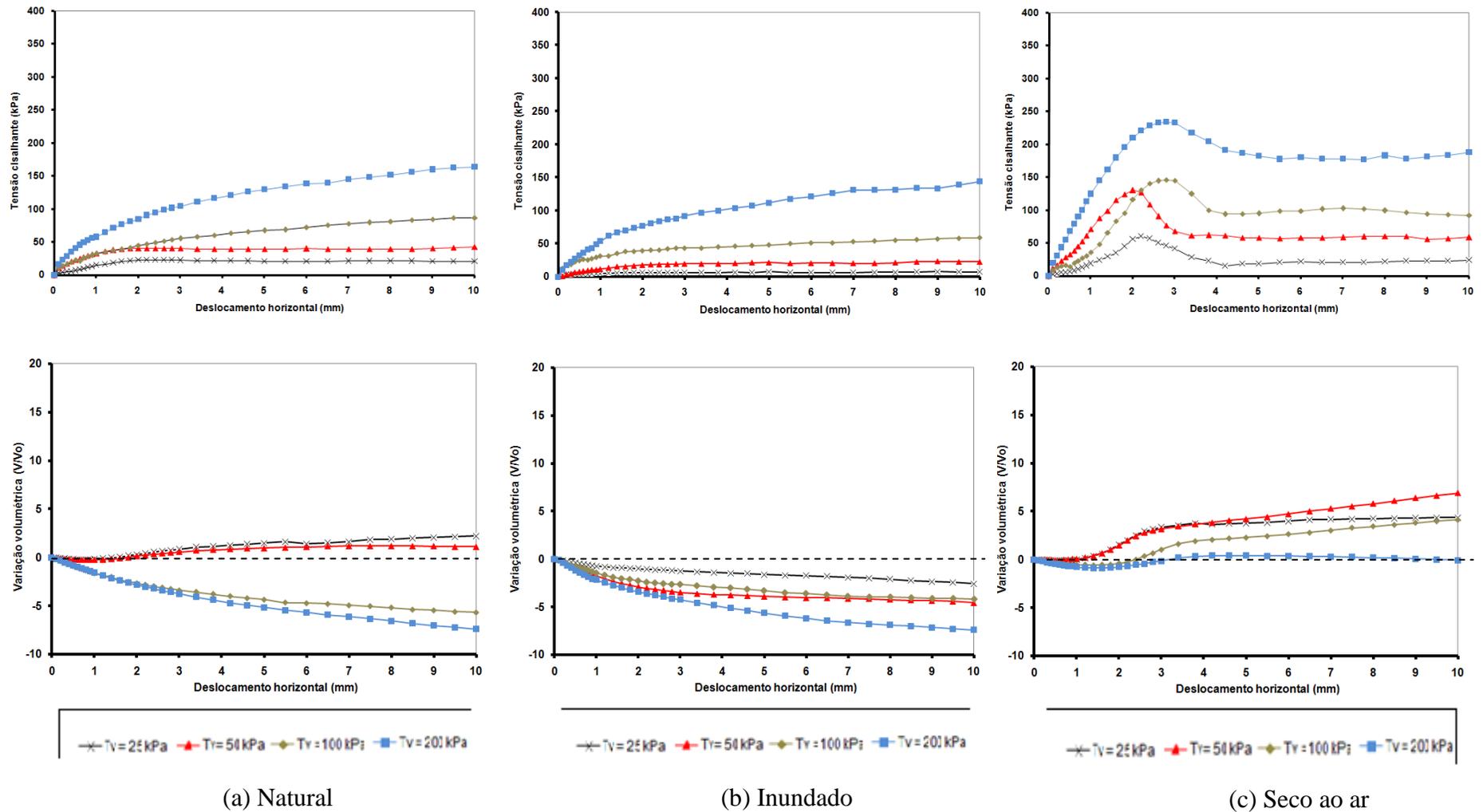


Figura 5.4 - Curva de Tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do horizonte C

A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos ensaios de cisalhamento direto com os valores do intercepto coesivo (coesão), ângulo de atrito interno do solo e índice de colapso (Ic).

Tabela 5.5 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto na umidade natural, inundado e seco ao ar

Horizonte	Tensão vertical (kPa)	Tensão de Cisalhamento			Ic (%)	
		Natural	Inundado	Seca ao ar		
Horizonte A	25	34,2	20,4	112,5	0,09	
	50	64,4	45,1	137,6	0,09	
	100	106,1	79,5	210,6	0,18	
	150	140,0	119,8	234,2	0,96	
	200	167,8	143,1	269,7	2,72	
		<b>c (kPa)</b>	<b>23,4</b>	<b>7,4</b>	<b>97,9</b>	-
	<b>Φ (graus)</b>	<b>36,9</b>	<b>35,2</b>	<b>42,1</b>	-	
Horizonte B	25	70,3	37,5	-	1,31	
	50	62,4	35,9	151,3	2,00	
	100	128,7	75,0	230,6	0,54	
	150	144,1	98,2	217,7	9,18	
	200	245,9	123,4	362,3	6,90	
		<b>c (kPa)</b>	<b>27,1</b>	<b>18,7</b>	<b>85,4</b>	-
	<b>Φ (graus)</b>	<b>44,5</b>	<b>27,7</b>	<b>39,4</b>	-	
Horizonte C	25	22,9	8,0	60,4	3,9	
	50	42,4	22,9	130,2	4,0	
	100	86,2	58,7	146,2	2,6	
	200	164	143,8	234,4	5,1	
		<b>c (kPa)</b>	<b>3,0</b>	<b>0,0</b>	<b>59,5</b>	-
		<b>Φ (graus)</b>	<b>38,9</b>	<b>34,1</b>	<b>41,6</b>	-

Obs.: c = intercepto coesivo; Φ = ângulo de atrito interno do solo.

Na condição inundada, reduziu-se a tensão de cisalhamento máxima para todos os níveis de tensão aplicados nos ensaios, além de reduzir levemente o ângulo de atrito interno. As amostras na condição seca ao ar apresentaram um aumento significativo nas tensões de cisalhamento, resultando em elevados valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito interno.

Analisando os valores dos ângulos de atrito interno e a da coesão do solo, nas três condições de umidade, observa-se que os resultados dos horizontes A e B foram mais satisfatórios por apresentar elevados valores de coesão, implicando na maior resistência ao cisalhamento. No entanto o horizonte C por possuir coesão baixa para as condições natural e seca ao ar, e nula na condição inundada indica uma maior predisposição à erodibilidade.

Em relação ao índice de colapso, destaca-se que se adota o índice de colapso para a menor tensão cisalhante, ou seja, ao menor nível de carregamento, neste caso 25 kPa. Observa-se que o maior índice está associado ao solo do horizonte C. Numes (2013) considera potencialmente colapsíveis solos com  $I_c > 2$ , neste caso, apenas o horizonte C atinge esse patamar. O baixo valor para o  $I_c$  do horizonte A é atribuído à resistente cimentação e ao menor índice de vazios deste solo ( $e < 0,7$ ) (BASTOS, 1999). A Figura 5.5 apresenta as envoltórias de rupturas obtidas nestes ensaios.

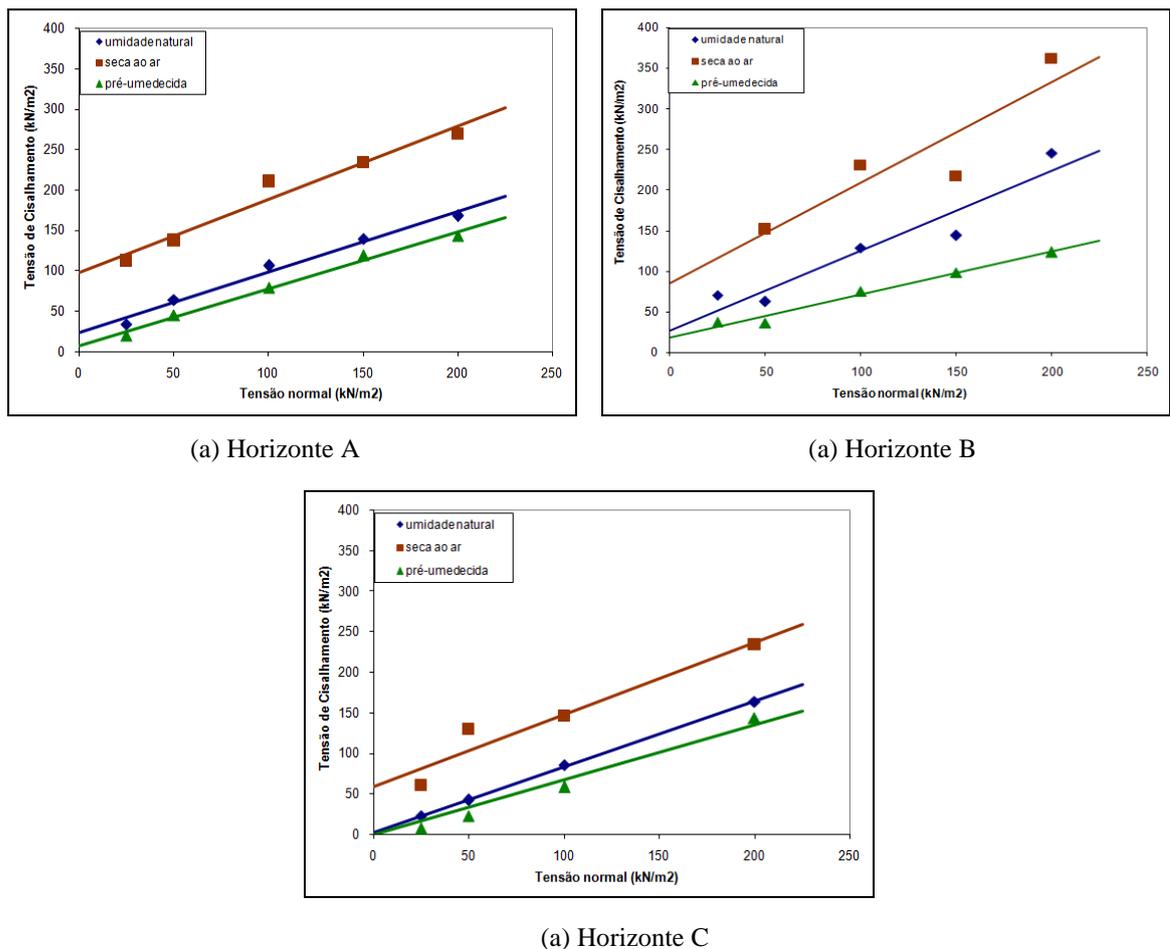


Figura 5.5 - Envoltórias de ruptura ao cisalhamento para os ensaios realizados na umidade natural, inundada e seca ao ar.

#### 5.4 Ensaio de penetrômetro dinâmico de cone (DCP)

Na interpretação dos resultados obtidos em campo, a curva DCP consiste em uma representação do número de golpes acumulado para a penetração do equipamento com a profundidade. As Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 mostram as curva DCP para os ensaios realizados no perfil da estrada e ao longo da mesma, com e sem a presença da crosta.

Na curva DCP as ordenadas indicam as profundidades e, nas abscissas, o número acumulado de golpes para alcançar estas profundidades. A inclinação das retas representa o índice de penetração (DN, em mm/golpe), o qual é obtido através da razão entre a profundidade e o número de golpes necessário para penetrar até a respectiva profundidade. Observa-se que as curvas de cada local dos ensaios apresentam comportamento semelhantes, com exceção do PTP 23 do perfil que apresentou variação se comparada com as outras, essa variação pode ser resultado da inclinação do aparelho durante a realização do ensaio, ou a presença de eventual material mais resistente.

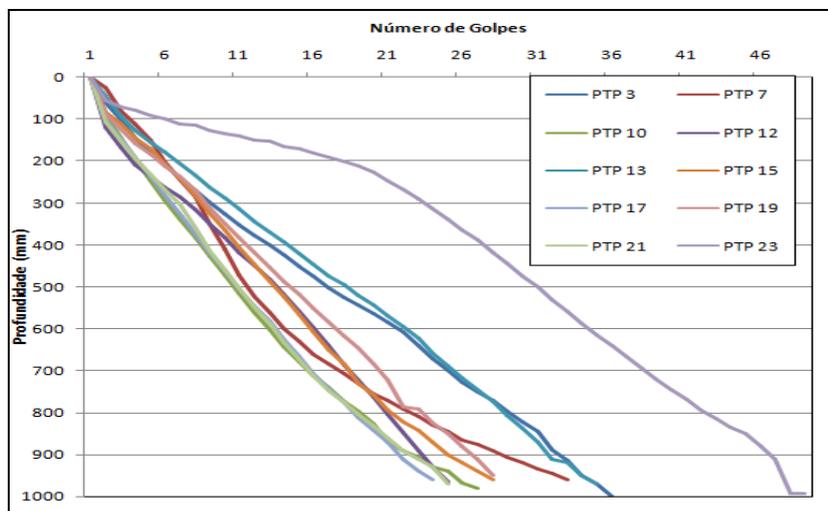


Figura 5.6 - Curva DCP para o perfil da estrada estudada

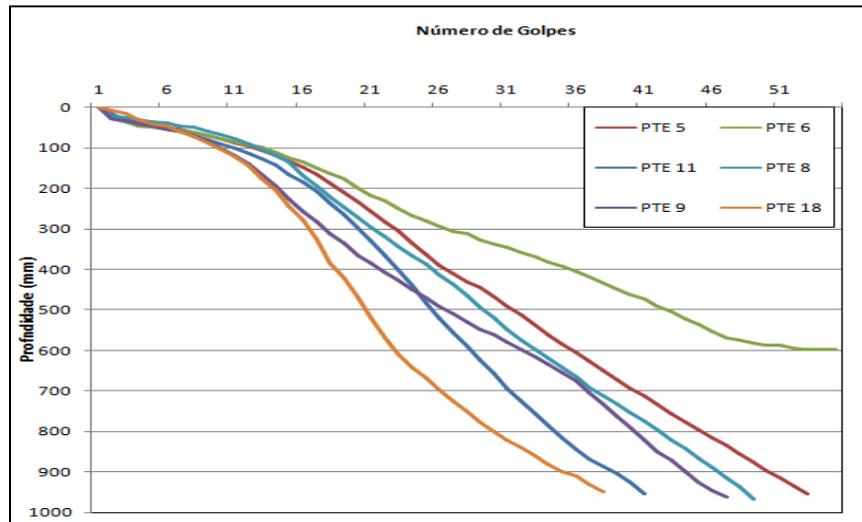


Figura 5.7 - Curva DCP para a estrada estudada com presença de crosta

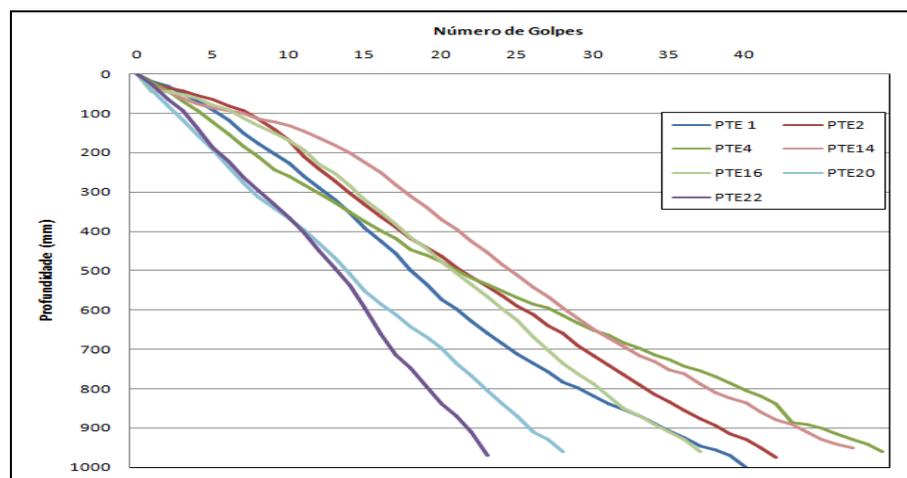


Figura 5.8 - Curva DCP para a estrada estudada sem a presença de crosta

As tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 mostram os valores do índice de penetração (DN) em função da profundidade da penetração para os locais de realização do ensaio.

Para o perfil da estrada conforme as curvas DCP, observa-se que nenhuma delas apresentou inclinação significativa, ou seja, apresentaram homogeneidade de compactação com a profundidade, portanto o material do perfil apresenta apenas uma única camada, provavelmente essa camada corresponde ao horizonte A. Os valores do índice de penetração para o perfil da estrada varia de 20,71 a 41,74 (mm/golpes).

Tabela 5.6 - Valores do índice de penetração (DPI) em função da profundidade de penetração para o perfil da estrada

Local	Horizonte	Ponto	PPenetrada (mm)	DPI (mm/golpes)
Perfil	A	PTP 3	1000	28,57
	A	PTP 7	960	30,00
	A	PTP10	980	37,69
	A	PTP 12	966	40,25
	A	PTP 13	970	28,53
	A	PTP 15	960	35,56
	A	PTP 17	960	41,74
	A	PTP 19	950	35,19
	A	PTP 21	970	40,42
	A	PTP 23	994	20,71

Tabela 5.7 - Valores do índice de penetração (DPI) em função da profundidade de penetração para a estrada com presença de crosta

Local	Ponto	Horizonte	PPenetrada (mm)	DPI (mm/golpes)
Estrada com crosta	PTEC 5	A	148	9,25
		B	807	21,81
	PTEC 6	A	123	8,20
		B	452	14,00
		C	23	2,87
	PTEC 8	A	90	7,5
		B	877	23,70
	PTEC 9	A	100	10,00
		B	605	23,26
		C	258	23,45
	PTEC 11	A	143	10,21
		B	812	30,07
	PTEC 18	A	146	12,16
		B	604	37,75
		C	200	20,00

Tabela 5.8 - Valores do índice de penetração (DPI) em função da profundidade de penetração para a estrada sem presença de crosta

Local	Ponto	Horizonte	PPenetrada (mm)	DPI (mm/golpes)
Estrada sem crosta	PTE 1	A	999	24,38
	PTE 2	A	141	14,10
		B	834	25,27
	PTE 4	A	960	19,20
	PTE 14	A	145	12,08
		B	805	22,36
	PTE 16	A	90	25,95
		B	870	28,06
	PTE 20	A	960	33,10
	PTE 22	A	970	40,42

O mesmo não é observado nos resultados quando o local do ensaio foi a estrada com a presença da crosta. As curvas DCP para estes locais apresentaram variação de inclinação, indicando a presença de camadas diferentes para o mesmo ensaio, neste caso pode-se observar a presença de até três camadas diferentes para um mesmo ponto. Possivelmente essas camadas correspondem aos horizontes A, B e C. Neste caso, o horizonte A apresentou maior resistência a penetração que os horizontes B e C.

Para a estrada sem a presença de crosta, verifica-se no máximo duas camadas diferentes para um mesmo local. Os valores de DPI variam de 12,09 a 40,42 (mm/golpes), evidenciando também que o possível horizonte A apresente maior resistência se comparado com o horizonte B.

Destaca-se que as camadas encontradas, podem ser os horizontes em estudo, no entanto, essa afirmativa pode não ser confirmada, para a melhor confiabilidade será necessário a realização de mais ensaios e mais estudos relacionados a resistência do solo frente a penetração.

Pittelkow (2013) em sua dissertação de mestrado, realizou o ensaio de desagregação para a crosta. Ela observou que a crosta apresentou lenta infiltrabilidade, não saturando completamente e permanecendo intacta durante todo o tempo do ensaio. Ainda segundo a autora esse comportamento esta relacionado ao material arenoso e a alta compactação causada pelos blindados. Assim a autora conclui que a camada abaixo da crosta é mais suscetível a

erosão. Portanto, os resultados encontrados neste trabalho para o DPI estão de acordo com a realidade encontrada em campo e com os ensaios realizados.

## 5.5 Avaliação indireta da erodibilidade

A avaliação indireta da erodibilidade foi realizada com base nos principais métodos descritos na literatura e apresentados na revisão bibliográfica e na metodologia deste trabalho (Capítulos 2 e 3).

Os métodos e critérios empregados para a avaliação indireta da erodibilidade dos horizontes A, B e C do perfil geotécnico típico do Campo de Instrução de Santa Maria (CISM) foram:

- Estimativa do fator erodibilidade (K) pela Equação Universal de Perda do Solo (USLE)
- Avaliação do potencial de desagregação dos solos
- Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT
- Critérios de erodibilidade baseado no ensaio de cone de laboratório

### 5.5.1 Estimativa do fator erodibilidade pela Equação Universal de Perda do Solo ( $K_{USLE}$ )

Os fatores de erodibilidade K da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) para os horizontes estudados foram estimados através da proposta de Wischmeier e Smith (1978), que depende da fração areia fina, silte, porcentagem de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade.

Os valores de matéria orgânica foram determinados no Laboratório de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM (Tabela 5.4). O teor de silte, areia fina e argila foram determinados em ensaios de granulometria (Tabela 5.2). A estrutura foi estimada em função da análise visual em campo. A permeabilidade foi avaliada em função da textura dos horizontes e dos resultados de ensaios de infiltabilidade (item 5.5.3).

A Tabela 5.9 apresenta a estimativa do  $K_{USLE}$  ((t/ha)/(t.m/ha.mm/hora))) para os horizontes analisados.

Tabela 5.9 – Estimativa do coeficiente de erodibilidade -  $K_{USLE}$ 

Horizonte	Areia		MO (%)	Estrutura	Classe de permeabilidade	$K_{usle}$	Classificação
	fina + silte (%)	Argila (%)					
Hor. A	38	18	0,2	3	4	0,40	Alta
Hor. B	40	25	1,6	2	2	0,24	Média
Hor. C	45	31	1,0	3	4	0,37	Alta

Obs.: Estrutura 2 = granular fina; Estrutura 3 = granular média ou grande; Classe de permeabilidade 2 = alta; Classe de permeabilidade 4 = baixa a moderada

Segundo Carvalho (1994) os valores de  $K_{USLE} < 0,15$  identificam os solos de erodibilidade baixa; entre 0,15 e 0,30, os solos apresentam média erodibilidade; e acima de 0,30 seriam solos de alta erodibilidade. Pelos valores encontrados verifica-se que não se consegue classificar corretamente os horizontes deste perfil quanto à erodibilidade. Pois a classificação não corresponde com a realidade encontrada em campo. Fernandes (2011) e Basso (2013) chegaram a esta mesma conclusão para perfis de solo/rocha em São Valentin e São Francisco de Assis.

### 5.5.2 Avaliação do potencial de desagregação dos solos

O ensaio de desagregação permite uma análise qualitativa da erodibilidade dos solos. Para este ensaio utilizou-se amostras indeformadas na umidade natural e seca ao ar por no mínimo 72 horas. O comportamento das amostras é avaliado visualmente, quando da inundação, descrevendo os efeitos do avanço da frente de ascensão capilar.

A Tabela 5.10 apresenta a descrição do comportamento das amostras nas duas condições de umidade e o resultado final do ensaio. Os resultados mostram interessantes aspectos do comportamento dos solos estudados frente ao umedecimento e posterior inundação.

Tabela 5.10 - Resultado dos ensaios de desagregação

Hor.	Condição inicial	Comportamento apresentado durante o ensaio	Comportamento final
Hor. A	Natural	Rápida ascensão capilar com pouca desagregação e pequenas rupturas laterais.	Não desagregou
	Seca ao ar	Rápida ascensão capilar (8min), nenhum inchamento ou abatimento e pequenas rupturas laterais.	Não desagregou
Hor. B	Natural	Rápida ascensão capilar, com inchamento na base, ruptura nas bordas e fissuração no topo. Amostra desagregou completamente.	Totalmente desagregada
	Seca ao ar	Rápida ascensão capilar (3min), com inchamento na base, fissuração e ruptura nas bordas. Amostra desagregou completamente	Totalmente desagregada
Hor. C	Natural	Rápida ascensão capilar (5min), inchamento, fissuras e desagregação na base.	Parcialmente desagregada
	Seca ao ar	Rápida ascensão capilar (2min), desagregação da base, com fissuras e rupturas laterais.	Totalmente desagregada

O horizonte A mostrou-se mais resistente frente a inundação, tanto para umidade natural como quanto seco ao ar. Sua estrutura, não confinada, permaneceu quase que intacta após o término do ensaio (24 horas). O mesmo não foi verificado para os horizontes B e C, este demonstraram alto poder de desagregação, não resistindo a inundação completa. Observa-se que as condições nas quais se encontram as amostras, natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência no teste para as amostras do horizonte B, pois em ambas as condições, as amostras apresentaram uma completa desagregação, formando uma pilha de material desestruturado. A Figura 5.9 apresenta a comparação entre os ensaios realizados nas amostras do horizonte A e B.

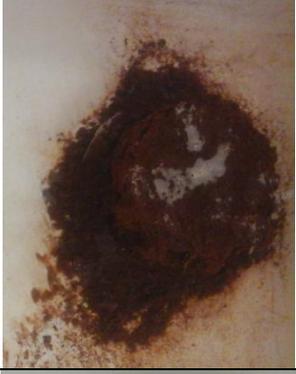
	Comportamento Inicial	Comportamento Final
Horizonte A – Natural		
Horizonte A – Seca ao ar		
Horizonte B - Natural		
Horizonte B – Seca ao ar		

Figura 5.9 - Comportamento inicial e final das amostras quando submetidas à inundação

Deve-se ressaltar que esse ensaio não verifica uma relação com níveis intermediários e baixos de erodibilidade, visto que somente solos de alta erodibilidade irão desagregar completamente durante o ensaio (BASTOS, 1999).

### 5.5.3 Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT

As Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os resultados dos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, através do coeficiente de sorção (s) e da perda por imersão (pi), respectivamente. O coeficiente de sorção ou índice de absorção representa a velocidade de ascensão capilar dos solos, relacionada a capacidade do solo em infiltrar a água da chuva e dificultar a formação do fluxo superficial, enquanto a erodibilidade específica representa o potencial de desagregação do solo pela água (BASTOS, 1999).

Tabela 5.11 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte A - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Hor. A	Natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	Pi (%)	pi/s
1	0,11	0,50	4,55	0,25	0,80	3,20	0,004	1,70	425
2	0,26	0,80	3,08	0,43	0,20	0,47	0,007	2,90	414
3	0,15	6,40	42,67	0,18	0,40	2,22	0,009	1,60	178
Média	<b>0,17</b>	<b>2,57</b>	<b>15,12</b>	<b>0,29</b>	<b>0,47</b>	<b>1,62</b>	<b>0,007</b>	<b>2,07</b>	<b>296</b>

Tabela 5.12 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte B - critério de erodibilidade da metodologia MCT

Hor. B	Natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s
1	0,13	14,97	115,15	0,44	47,39	107,70	0,007	32,84	4691
2	0,26	14,06	54,08	0,36	33,90	94,17	0,005	34,66	6932
3	0,43	31,67	73,65	0,62	64,82	104,55	0,005	18,26	3652
Média	<b>0,28</b>	<b>20,23</b>	<b>73,25</b>	<b>0,47</b>	<b>48,70</b>	<b>103,62</b>	<b>0,006</b>	<b>28,59</b>	<b>4765</b>

Tabela 5.13 - Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte C - critério de erodibilidade da metodologia MCT

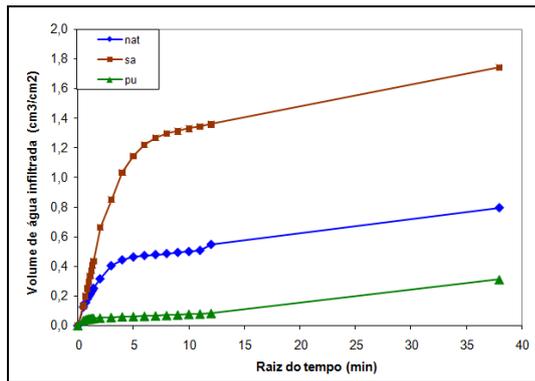
Hor. C	Natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s	s (cm/min <sup>1/2</sup> )	pi (%)	pi/s
1	0,46	1,66	3,61	0,44	78,52	178,45	0,008	6,68	848
2	0,41	3,43	8,37	0,48	53,18	110,79	0,003	0,45	150
3	0,25	0,22	0,88	0,54	85,11	157,61	0,004	79,45	19863
Média	<b>0,37</b>	<b>1,77</b>	<b>4,78</b>	<b>0,49</b>	<b>72,27</b>	<b>147,49</b>	<b>0,005</b>	<b>28,86</b>	<b>5772</b>

Verifica-se que para condição de umidade das amostras secas ao ar o coeficiente de sorção (s) foi mais elevado quando comparado com amostras na umidade natural. A perda por imersão (pi) foi mais elevada para as amostras secas ao ar quando comparadas com a umidade natural, exceto para o horizonte A (valores de pi médios são inferiores a 3%). Para as amostras pré-umedecidas, devido a sorção baixa a relação pi/s foi superior a 52, principalmente para o horizonte B e C, classificando esses solos como erodíveis.

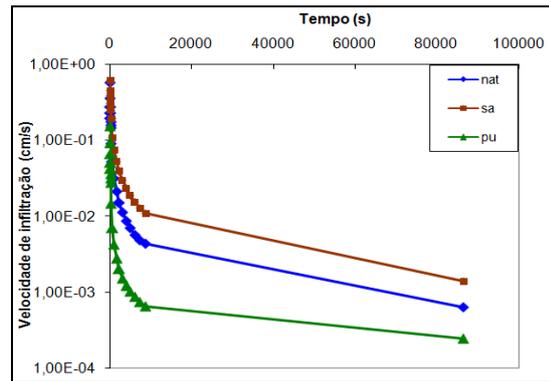
No horizonte B a perda por imersão demonstrou-se elevada para as três condições de umidade inicial. Assim, a relação pi/s foi superior a 52 nas três condições de umidade, caracterizando o solo do horizonte B como erodível independente da condição inicial das amostras.

No horizonte C o coeficiente de sorção foi os maiores quanto comparados com os outros horizontes, no entanto a perda por imersão é elevada na condição seca ao ar e pré-umedecida, representando uma relação pi/s superior a 52 para essas condições de umidade.

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam as curvas médias do volume de água infiltrada (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>) pela raiz quadrado do tempo e a velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s). Burgos e Vilar (2005) propõem que as curvas velocidade de infiltração pelo tempo podem fornecer uma estimativa da permeabilidade saturada dos solos.

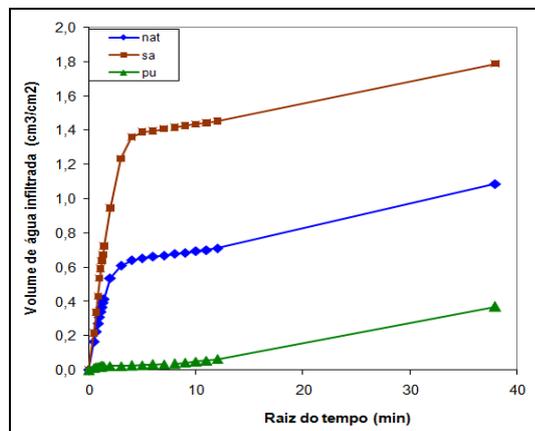


(a)

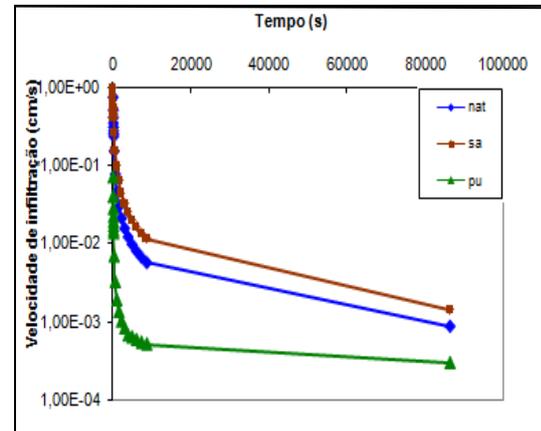


(b)

Figura 5.10 - (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte A

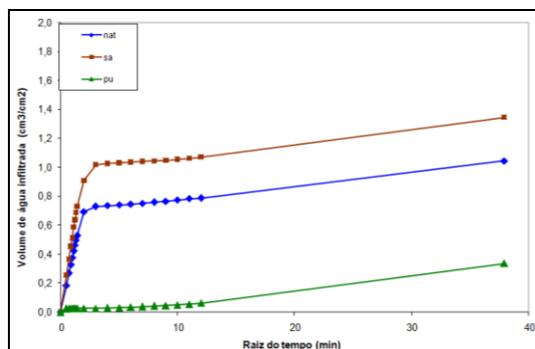


(a)

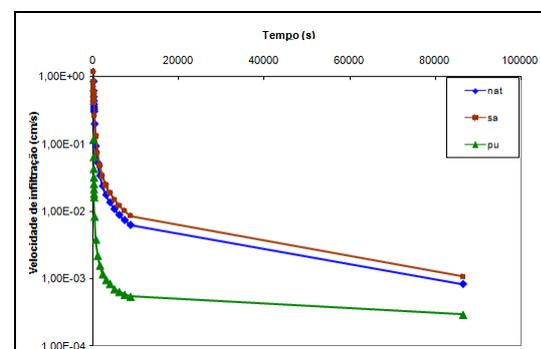


(b)

Figura 5.11 - (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte B



(a)



(b)

Figura 5.12- (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte C.

A Figura 5.13 apresenta a aplicação do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para os horizontes estudados. Os resultados apresentados destacam a maior susceptibilidade a erosão dos horizontes B e C para as amostras secas ao ar e pré-umedecidas.

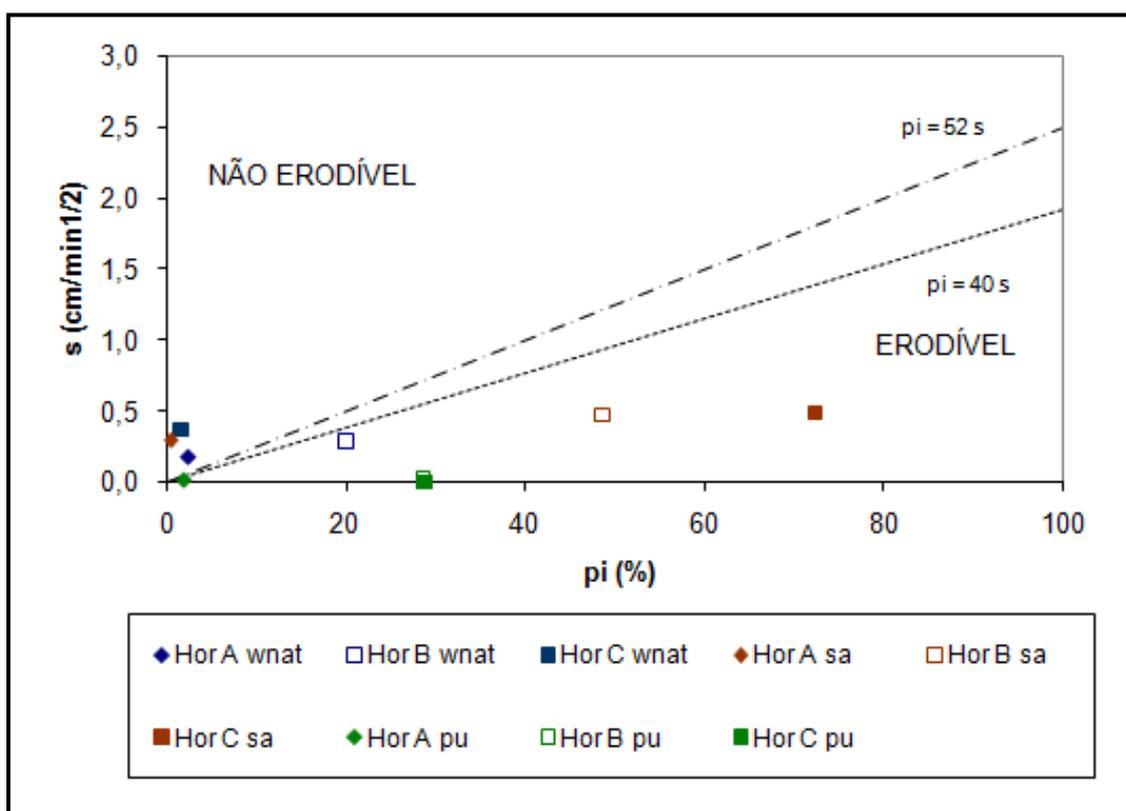


Figura 5.13 - Aplicação do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para os horizontes estudados

As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam graficamente a variação da perda por imersão e o do coeficiente de sorção para as três condições iniciais de umidade das amostras.

Nas amostras pré-umedecidas verificou-se uma tendência de diminuição da velocidade de ascensão capilar e um pequeno aumento na perda por imersão, principalmente para os horizontes B e C. Para o horizonte A, as perdas por imersão foram da mesma ordem de grandeza quanto comparadas com as amostras na umidade natural e seca ao ar. Contudo a classificação de erodível para condição pré-umedecida deve-se pela relação entre pi e s. Esta observação também foi descrita por Bastos (1999) e verificada por Fernandes (2011) e Basso (2013). Segundo Bastos (2000), a variação da razão entre as grandezas que representam estas

propriedades ( $\pi_i/s$ ) é que determina qualquer mudança na avaliação de erodibilidade pelo critério proposto por Nogami e Villibor (1979).

O horizonte B apresentou-se erodível para qualquer condição de umidade. No horizonte C, somente a condição natural apresentou-se como não erodível, as condições seca ao ar e pré-umedecida, a relação  $\pi_i/s$  foram superiores a 52%, caracterizando um solo erodível (Figura 5.16). As relações  $\pi_i/s$  para condição pré-umedecidas foram extremamente elevadas.

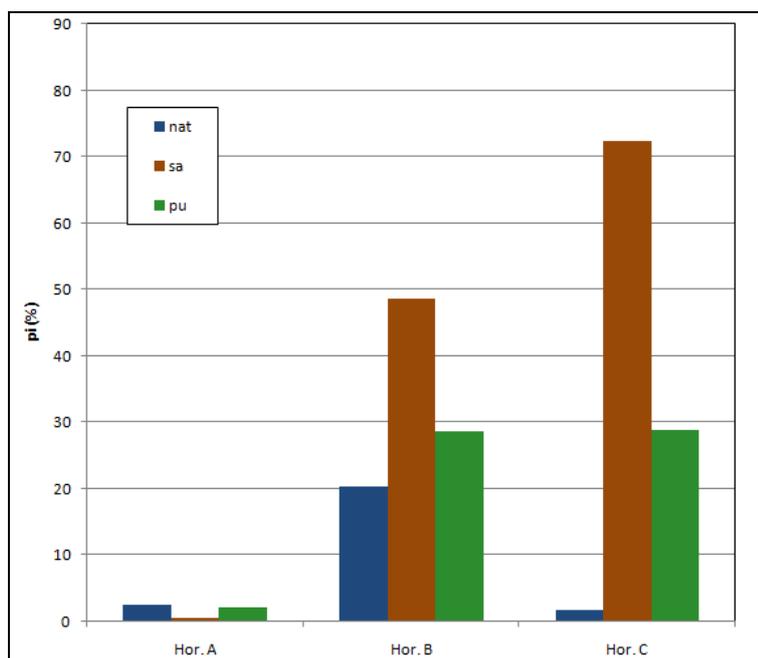


Figura 5.14 - Variação da perda por imersão para as diferentes condições de umidade das amostras

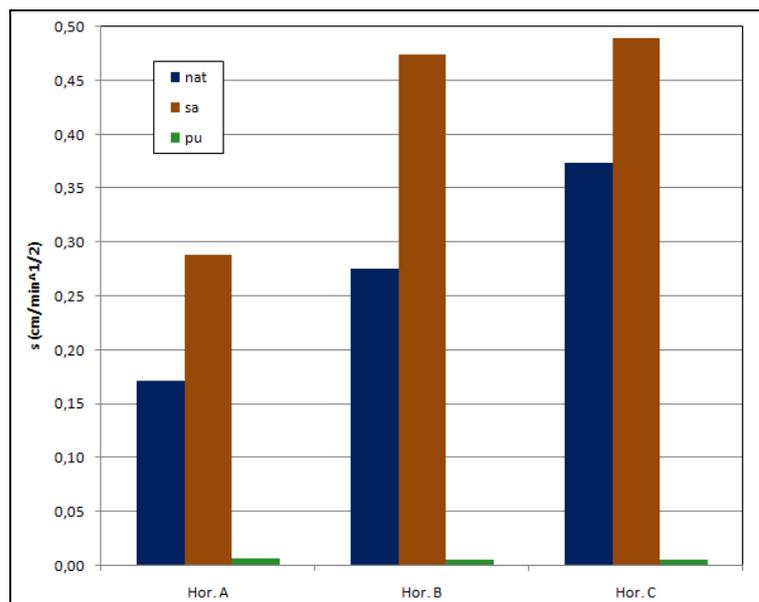


Figura 5.15 - Variação da sorção para as diferentes condições de umidade das amostras

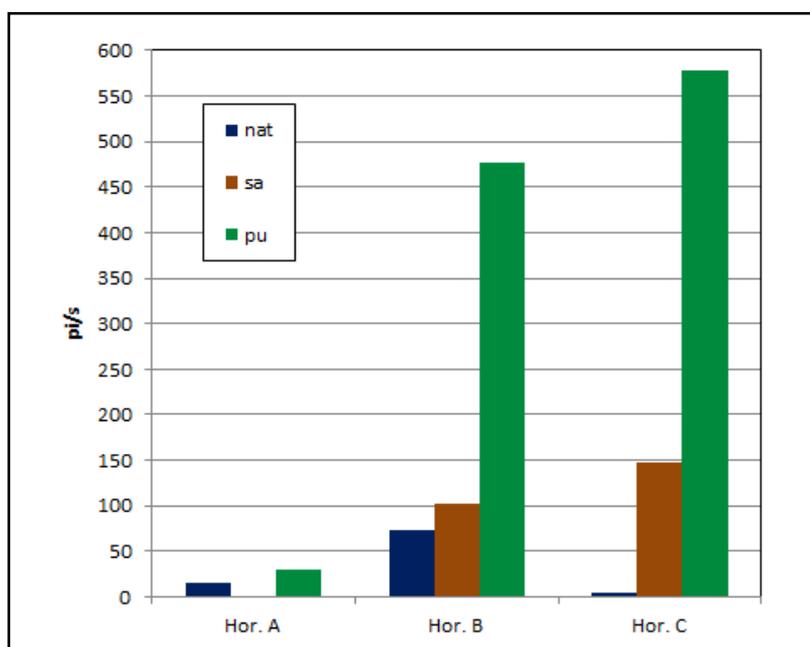


Figura 5.16 - Relação  $\pi/s$  em função da umidade das amostras (os resultados da relação  $\pi/s$  na condição pré-umedecida estão reduzidas em 10 vezes).

A metodologia MCT apresentou uma boa relação e correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos nos locais estudados, observados no ensaio de desagregação, comprovando sua aplicabilidade a estes materiais.

#### 5.5.4 Critérios de erodibilidade baseado no ensaio de cone de laboratório

Alcântara (1997 apud BASTOS, 1999) apresenta os critérios de erodibilidade baseados em ensaios de cone de laboratório, resistência à compressão simples e estabilidade de agregados, estabelecidos na comparação com o comportamento *in situ* de solos de São Carlos /SP e Salvador/BA. Os solos estudados foram testados apenas pelo critério baseado no ensaio de cone de laboratório.

Os ensaios de cone de laboratório foram realizados conforme especificado no Capítulo 3 (item 3.3.3.3). Os resultados encontrados estão expressos em função das profundidades de penetração do cone, medida em amostras na condição de umidade natural (Pnat) e saturada (Psat). Assim, foram obtidos os parâmetros de variação de penetração DP e DPA, definidos por Alcântara (1997).

A Tabela 5.14 apresenta os resultados obtidos, ilustrados na Figura 5.17 em função dos valores de penetração (P em mm).

Tabela 5.14 - Valores de penetração e parâmetros de variação de penetração obtidos em ensaios de cone de laboratório para os horizontes estudados

Horizonte	Valores de Penetração (mm)		Variação de Penetração (%)	
	Pnat	Psat	DP	DPA
Horizonte A	2,93	4,93	68,18	40,54
Horizonte B	2,98	3,98	33,89	25,31
Horizonte C	2,42	4,40	81,65	44,95

Pela Tabela 5.14, observa-se que ocorre aumento nos valores de penetração nas amostras saturadas, para os solos do horizonte A, B e C. Segundo Bastos (1999) a resistência oferecida à penetração do cone de laboratório esta 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. Esta relação entre o aumento na penetração do cone, perda de coesão e desagregação do solo com a inundação é evidente para os solos do horizonte A, B e C.

Neste caso, conforme Figura 5.18 e 5.19, se analisar o DP os horizontes A e C são classificados como de alta erodibilidade e o horizonte B como de baixa a nenhuma erodibilidade. No entanto, se considerar o DPA, os horizontes A, B e C são classificados como de alta erodibilidade, segundo classificação de (ALCÂNTARA, 1997)

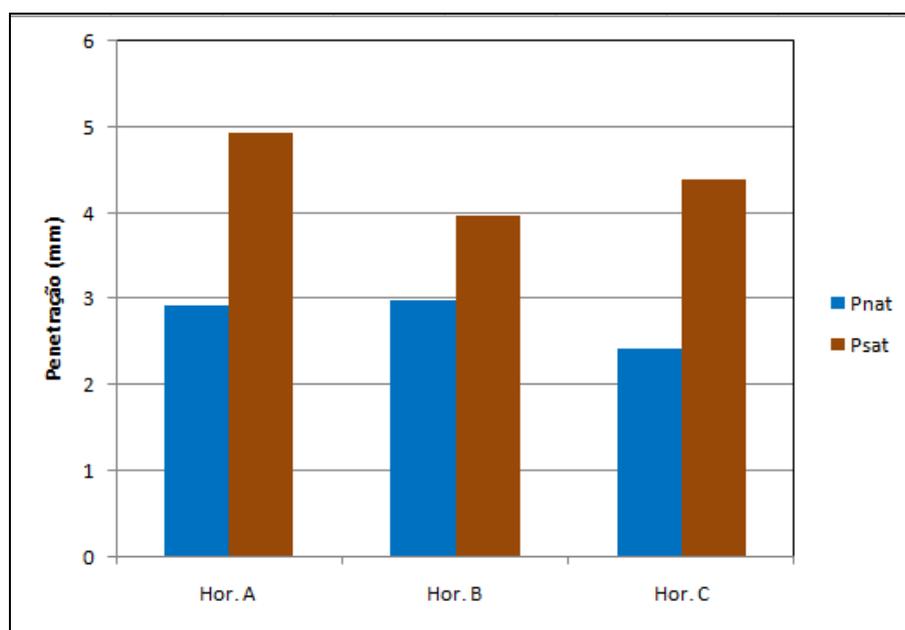


Figura 5.17 - Valores de penetração do cone de laboratório obtidos para os horizontes estudados em diferentes condições de umidade das amostras

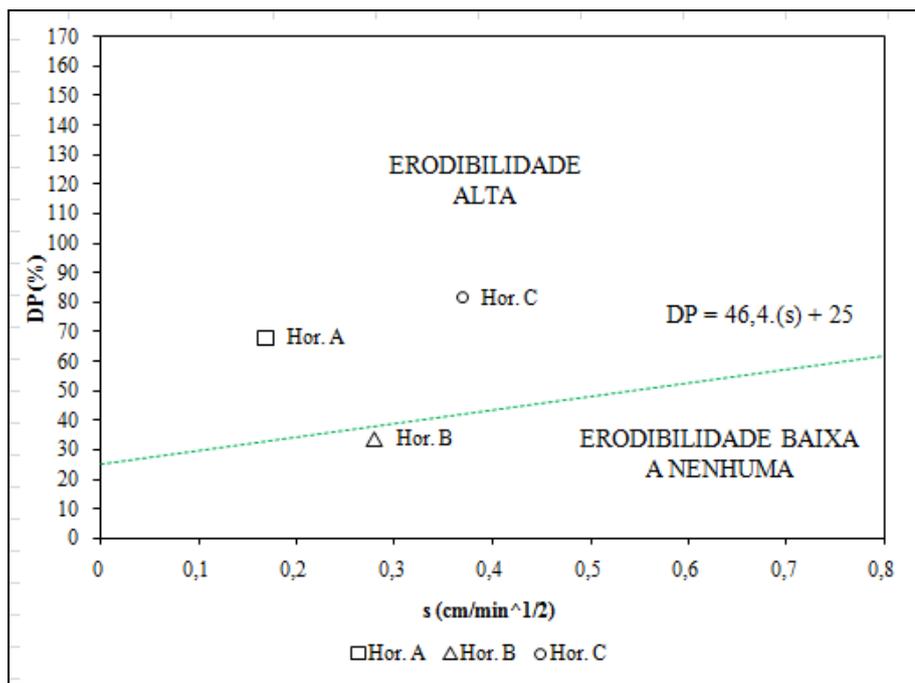


Figura 5.18 - Resultados dos DP (%) obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nos solos dos horizontes estudados

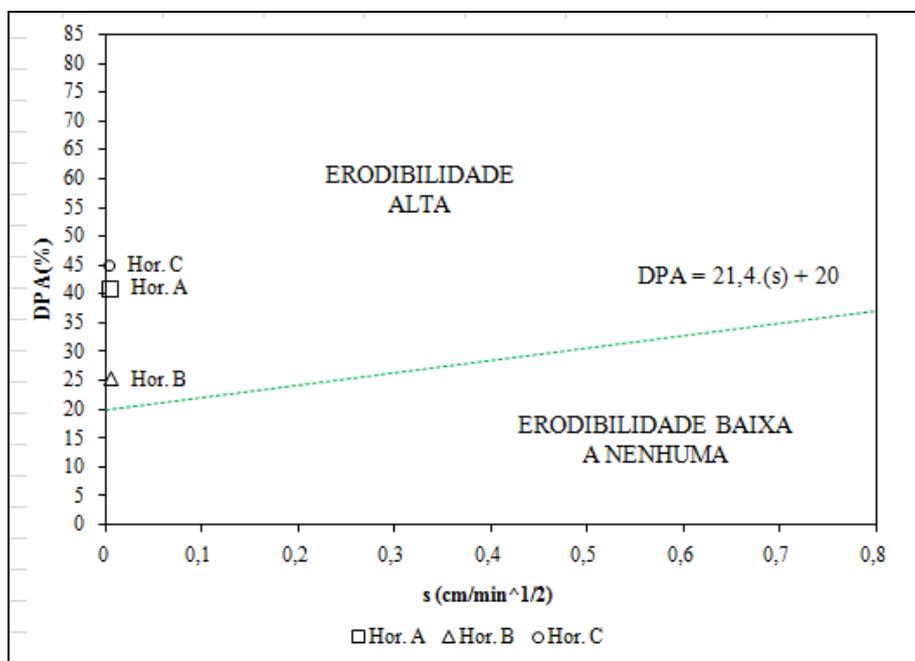


Figura 5.19 - Resultados dos DPA (%) obtidos nos ensaios de cone de laboratório realizados nos solos dos horizontes estudados

## 5.6 Avaliação direta da erodibilidade - ensaio de Inderbitzen

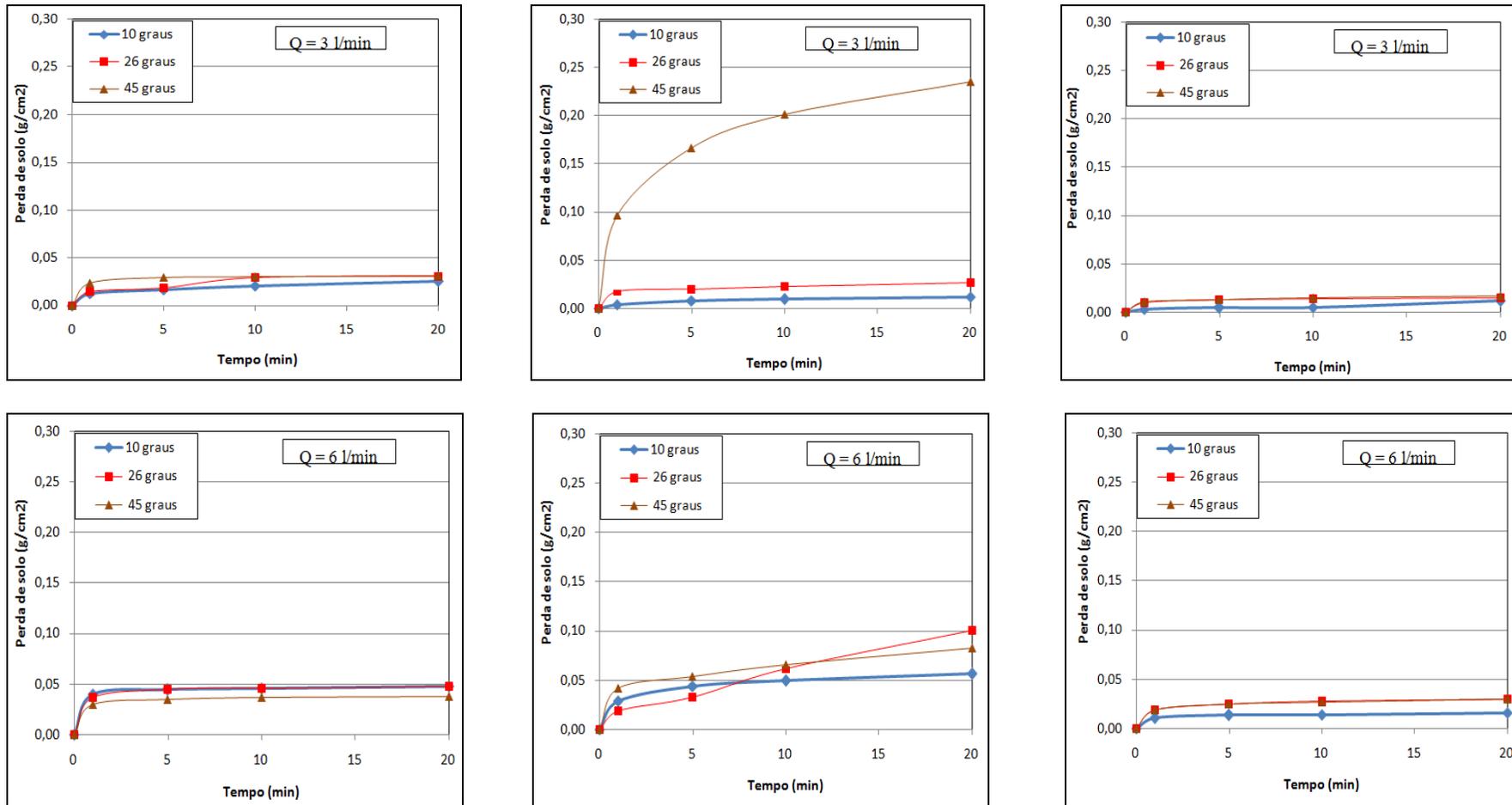
Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados em termos de perda de solo (desagregação) por unidade de área ( $\text{g/cm}^2$ ) pelo tempo de ensaio (min), conforme apresentado no item 3.3.4. Para cada condição específica de escoamento de água e inclinação de rampa determina-se a tensão hidráulica aplicada no ensaio ( $t_h$ ).

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 ( $t_{h_{crit}}$ ) 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. Sobre este tempo padrão cita-se as observações de Bastos (1999):

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).

A Figura 5.20, 5.21 e 5.22 apresentam a relação entre a perda de solo por unidade de área da amostra pelo tempo de ensaio para as amostras do horizonte A, B e C para as condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida, nas vazões de 3 e 6 l/min.



(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

Figura 5.20 - Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras de diferentes condições de umidade do horizonte A para as vazões de 3 l/min e 6 l/min.

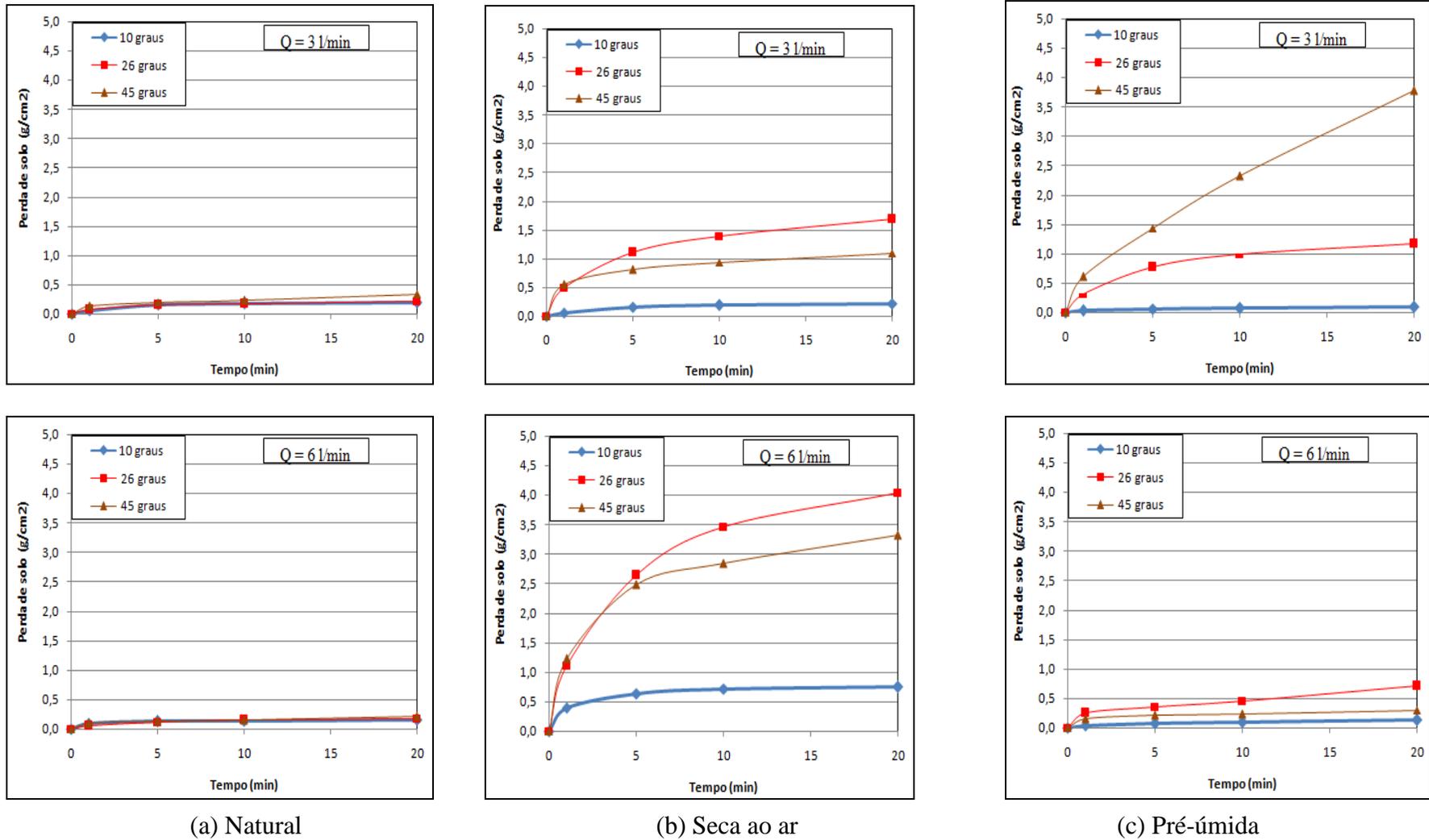
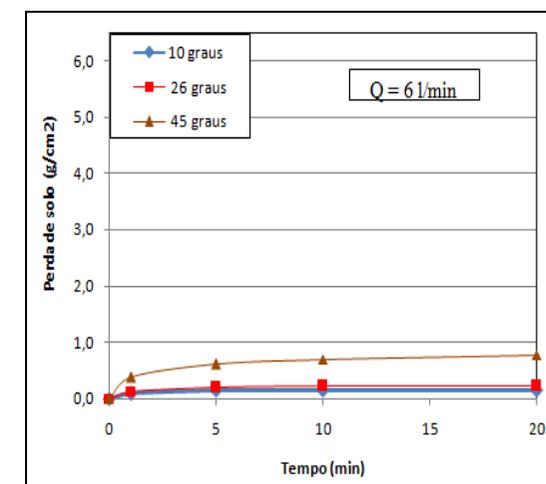
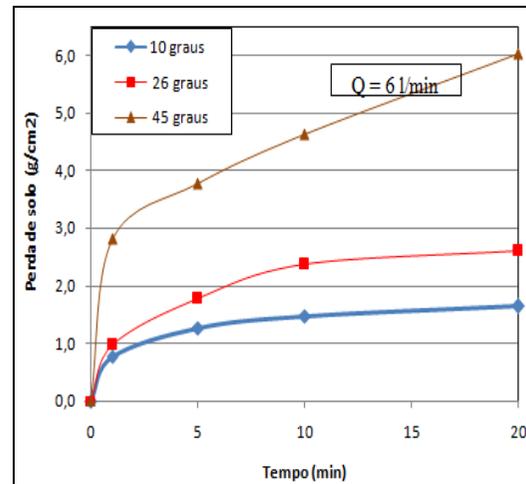
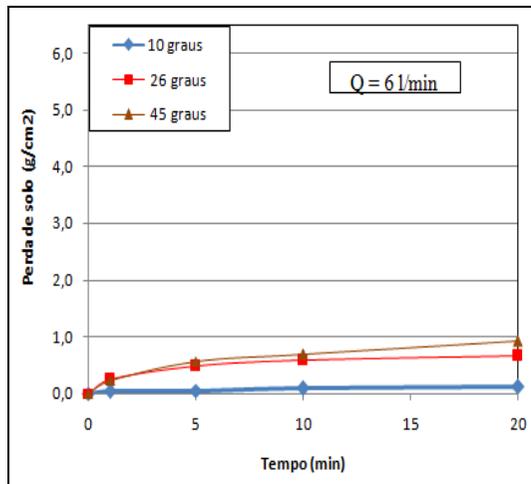
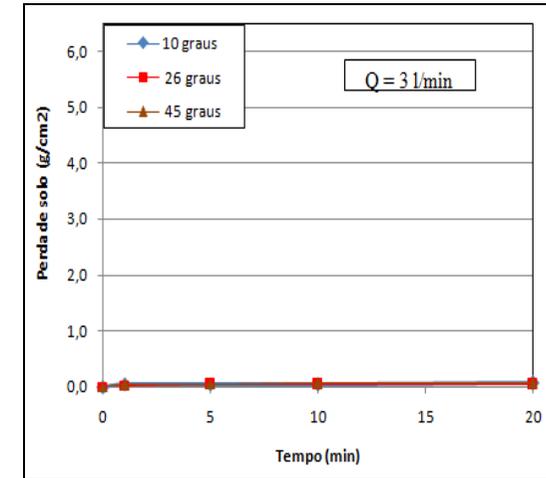
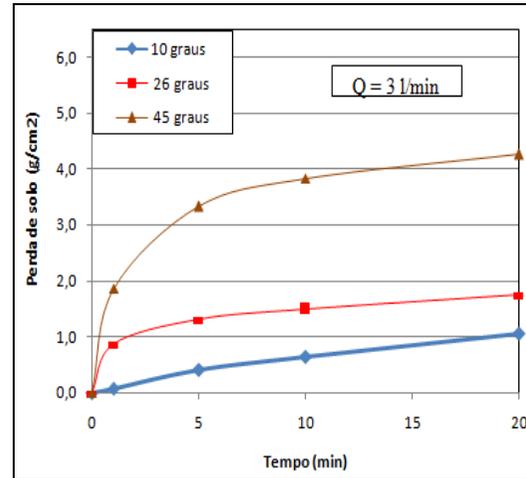
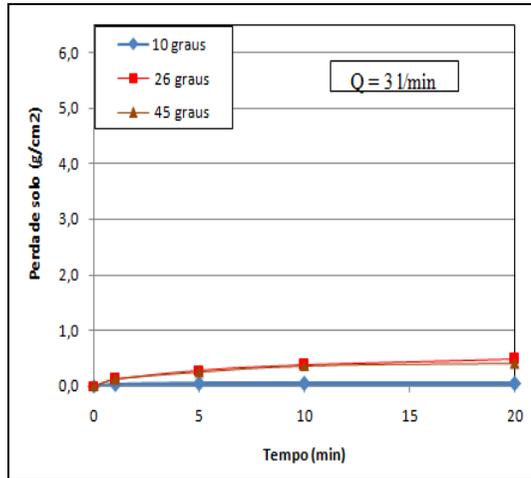


Figura 5.21 - Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras de diferentes condições de umidade do horizonte B para as vazões de 3 l/min e 6 l/min.



(a) Natural

(b) Seca ao ar

(c) Pré-úmida

Figura 5.22 - Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras de diferentes condições de umidade do horizonte C para as vazões de 3 l/min e 6 l/min.

A Figura 5.23 apresenta as curvas de perda de solo, para uma inclinação de  $10^\circ$  da rampa e vazão 3 l/min, na umidade natural, para as amostras dos horizontes A, B e C. Nestas condições o horizonte B apresentou uma taxa de desagregação mais elevada.

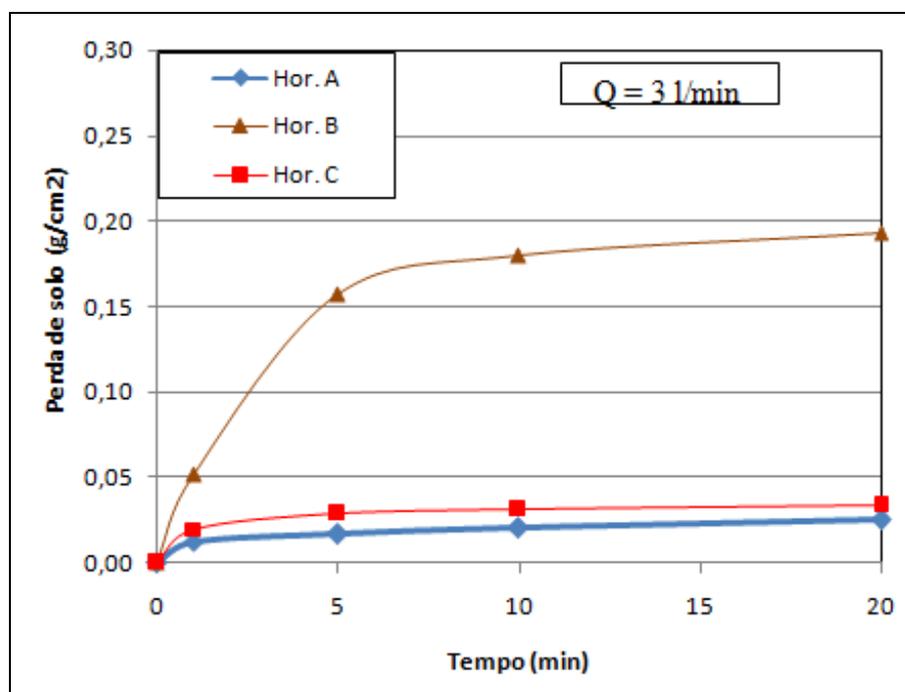


Figura 5.23 - Perda de solo obtida para vazão de 3 l/min, na condição de umidade natural, para os horizontes estudados

A Tabela 5.15 resume os resultados obtidos para os horizontes A, B e C para as três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, secas ao ar e pré-umedecidas.

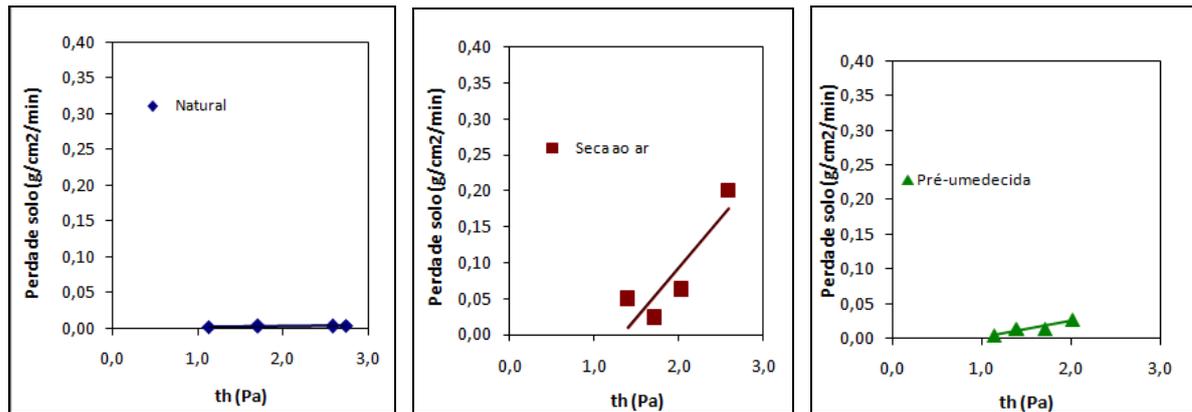
Tabela 5.15 - Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo ( $10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>/min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros  $\tau_{\text{crit}}$  (Pa) e K ( $10^{-2}$  g/cm<sup>2</sup>/min/Pa)

Hor.	Cond	Q = 3 l/min			Q = 6 l/min			$\tau_{\text{crit}}$ (Pa)	K ( $10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)
		i = 10°	i = 26°	i = 45°	i = 10°	i = 26°	i = 45°		
	$\tau_h$ (Pa)	1,136	1,710	2,585	1,393	2,018	2,742		
Hor. A	nat	0,002	0,003	0,003	-	-	0,004	Indet.	≈ 0
	sa	-	0,023	0,201	0,049	0,062	-	1,29	13,8
	pu	0,005	0,014	-	0,014	0,028	-	0,94	2,3
Hor. B	nat	-	0,171	0,227	0,139	-	-	Indet.	7,1
	sa	0,182	1,389	-	1,389	-	2,841	0,95	162,6
	pu	0,065	0,979	2,319	0,100	-	-	1,17	165,1
Hor. C	nat	0,031	0,366	-	0,084	0,582	0,679	1,15	65,8
	sa	0,633	1,480	3,828	1,467	2,359	4,612	0,90	234,3
	pu	0,049	0,036	-	0,148	0,214	0,776	1,19	44,0

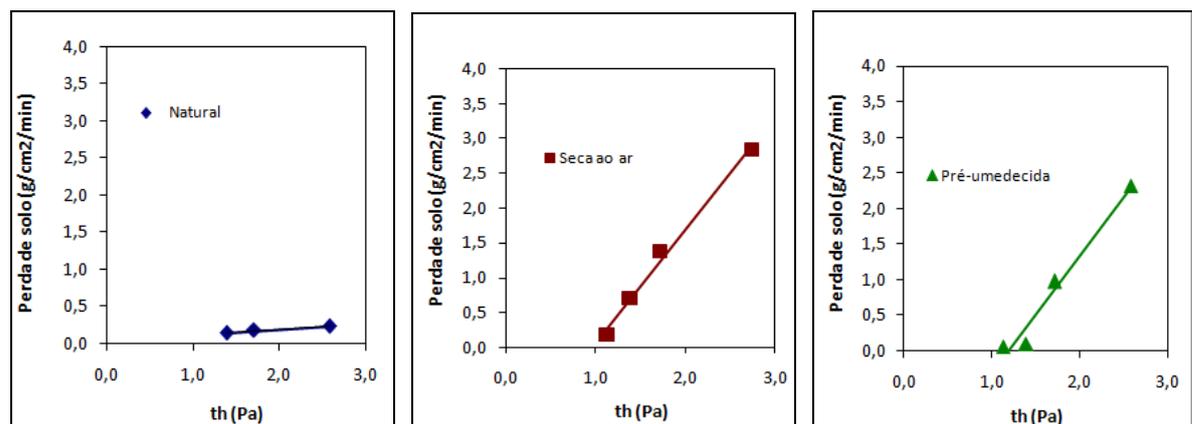
Obs.: - valores discrepantes removidos para o ajuste da reta

Nota-se que o horizonte A apresenta os menores valores para o coeficiente de erodibilidade (K) para as três condições iniciais de umidade. Já o horizonte B apresenta valores mais elevados para o coeficiente de erodibilidade nas condições de umidade da amostra seca ao ar e pré-umedecida. Observam-se valores significativos para os solos do horizonte C, principalmente para a condição de umidade natural e seca ao ar. 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/cm<sup>2</sup>/min/Pa e que os solos mais resistentes a erosão apresentam valores de K inferior a 0,001/cm<sup>2</sup>/min/Pa. Portanto, segundo a sugestão de Bastos (1999) os horizontes B e C estudados são classificados como solos erodíveis, enquanto que o horizonte A como solos não erodíveis.

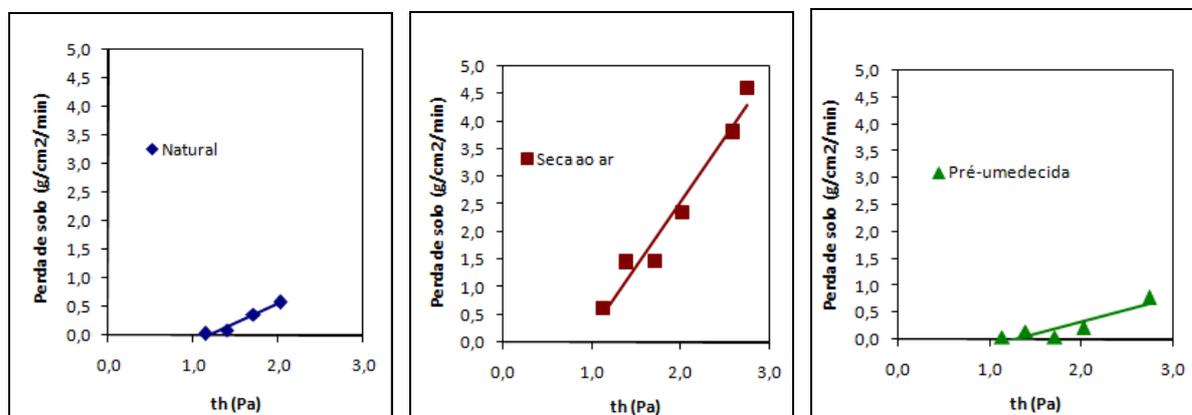
As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam os resultados obtidos no ensaio Inderbitzen para a perda de solo (g/cm<sup>2</sup>/min) pela tensão hidráulica para todos os horizontes estudados.



(a) Horizonte A



(b) Horizonte B



(c) Horizonte C

Figura 5.24 - Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras, (a) horizonte A, (b) horizonte B e (c) horizonte C, nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

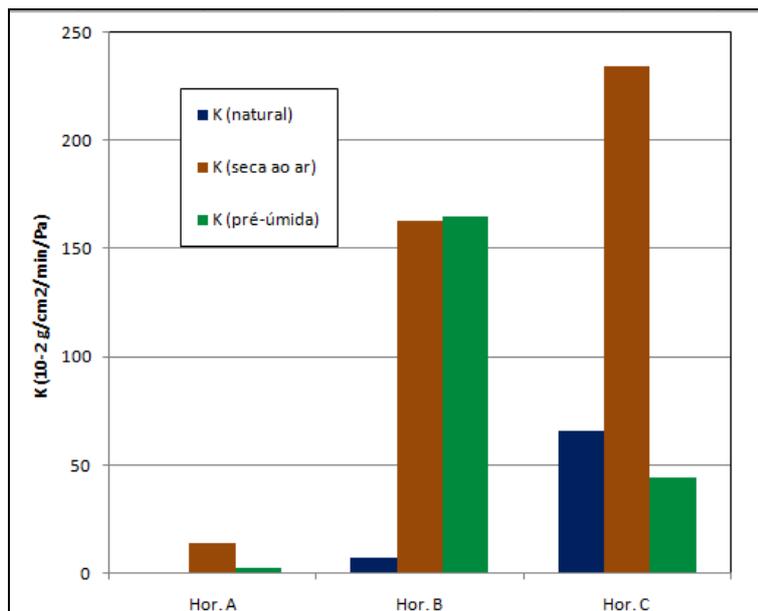


Figura 5.25 - Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen

## 5.7 Erodibilidade dos horizontes estudados

A análise da erodibilidade dos horizontes estudados do Campo de Instrução de Santa Maria, do município de Santa Maria, será apresentada de acordo com a proposta de abordagem geotécnica para solos residuais não saturados de Bastos (1999) e empregada por Fernandes (2011) e Basso (2013).

### 5.7.1 Avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos

Há inúmeros métodos de ensaios, critérios e análise para a avaliação qualitativa da erodibilidade, no entanto, Bastos (1999) destaca que não existe um critério de erodibilidade que apresente uma elevada correspondência com a erodibilidade observada em campo. Ainda segundo este autor existe critérios de melhor desempenho, que destacam a ação dos mecanismos de hidratação e desaeração, que esta intimamente relacionada à susceptibilidade a erosão dos solos não saturados, quando sujeitos a ação da água.

### 5.7.2 Parâmetros de erodibilidade e parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta da erodibilidade

Para melhor compreender o comportamento dos solos frente a esses parâmetros, compararam-se os valores obtidos por Bastos (1999), Fernandes (2011) e Basso (2013) com os resultados encontrados neste estudo.

Bastos (1999) em sua Tese de Doutorado estudou oito perfis de solos localizados na Região Metropolitana de Porto Alegre, sendo eles identificados como: (a) Loteamento Algarve, solos do horizonte B (ALGB) e horizonte C (ALGC), oriundos do intemperismo do Complexo Granito-Gnaissico; (b) Área de empréstimo na RS239, horizontes B/C e C, identificado por RS239BC e RS239C, respectivamente, solos oriundos do intemperismo do arenito Botucatu; (c) Loteamento Parque do Trabalhador, horizonte B (PTB) e horizonte C (PTC), com solos oriundos do intemperismo do arenito Botucatu; e (d) Solos de alteração de granitos localizados no Morro do Osso/Cidade de Deus, horizonte B (CDB) e horizonte C (CDC).

Fernandes (2011) em sua Dissertação de Mestrado estudou um perfil de uma voçoroca localizada no Distrito de São Valentin em Santa Maria. O perfil era constituído basicamente por três horizontes/camadas identificados como: (a) Perfil superficial de solo, em meia encosta, classificado como Horizonte A/B (SVAB); (b) Rocha alterada, classificada como um siltito vermelho acinzentado, identificado como SVRA; e (c) Arenito, camada de base da voçoroca pertencente à Formação Santa Maria, membro Passo das Tropas, identificado como SVAR.

Basso (2013) também em sua Dissertação de Mestrado estudou um perfil de uma voçoroca localizada as margens da RS 377 no município de São Francisco de Assis. O perfil era formado basicamente por cinco horizontes/camadas pertencente a Formação Guará que é caracterizada por um espesso pacote de arenitos quartzosos esbranquiçados, identificadas como: (a) Horizonte A (SFA); (b) Horizonte B (SFB); (c) Horizonte C; (d) Camada 2C (SF2C); e (e) Camada 1A (SF1A).

A Tabela 5.16 apresenta os valores do fator de erodibilidade da  $K_{USLE}$ , os parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta da erodibilidade (razão de dispersão, características granulométricas e de plasticidade, razão  $\pi/s$  e os valores da taxa de erodibilidade obtidos nos ensaios de Inderbitzen).

Tabela 5.16 - Fator de erodibilidade da USLE, parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta da erodibilidade para os solos estudados por Bastos (1999), Fernandes (2011) Basso (2013) e neste trabalho

Solo	K <sub>USLE</sub>	RD (%)	Parâmetros físicos na avaliação indireta da erodibilidade							
			Critério do LNEC					Critério MCT		
			E	Pp, 40	Pp, 200	wl	IP	pi/s		
			(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	Wnat	sa	Pu
*ALGB	0,18	6	10,3	80	58	41	10	15	8	50
*ALGC	0,22	73	8,7	44	27	39	5	257	121	520
*RS239BC	0,19	39	1,1	99	34	23	7	162	32	250
*RS239C	0,25	65	1,1	98	28	20	6	75	100	225
*PTB	0,10	8	3,0	95	67	44	13	1	29	1
*PTC	0,29	66	2,0	78	31	19	5	103	311	142
*CDB	0,12	6	3,9	60	52	53	22	9	123	13
*CDC	0,21	63	6,6	45	32	38	7	151	156	52
♦SVAB	0,23	78	-	64	40	36	9	2,9	9,4	382
♦SVRA	0,24-0,27	100	-	98	80	64	29	23,8	60,7	983
♦SVAR	0,29-0,32	87	-	100	33	34	15	792	1398	36533
•SFA	0,14	40	-	83	12,6	NP	NP	0,7	0,7	25,7
•SFB	0,22	25	-	80	13,7	NP	NP	29,4	58	1548
•SFC	0,16	-	-	70	10,2	NP	NP	82,6	68	2060
•SF2C	0,10	100	-	90	5,8	NP	NP	84,7	120,9	3013
•SF1A	0,20	100	-	95	5,3	NP	NP	191,3	106,3	1437
<b>Hor. A</b>	<b>0,40</b>	<b>44</b>	<b>-</b>	<b>77</b>	<b>37,5</b>	<b>22</b>	<b>11</b>	<b>15,0</b>	<b>1,6</b>	<b>302,1</b>
<b>Hor. B</b>	<b>0,24</b>	<b>56</b>	<b>-</b>	<b>81</b>	<b>46,6</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>73,5</b>	<b>102,7</b>	<b>4764</b>
<b>Hor. C</b>	<b>0,37</b>	<b>83</b>	<b>-</b>	<b>84</b>	<b>52,2</b>	<b>38</b>	<b>21</b>	<b>4,7</b>	<b>147,6</b>	<b>5535</b>

\* Bastos (1999)

♦ Fernandes (2011)

• Basso (2013)

Pp, 40 = % pas #40

Pp, 200 = % pas #200

Para complementar são apresentados na Tabela 5.17 os parâmetros geomecânicos relacionados à resistência ao cisalhamento direto dos horizontes estudados ( $c$  = coesão na condição natural e  $c'$  = coesão na condição inundada).

Tabela 5.17 - Valores da taxa de erodibilidade (K) medidos nos ensaios de Inderbitzen e parâmetros geomecânicos referentes à resistência ao cisalhamento ( $c$ ,  $c'$  e  $\Delta c$ ) e à colapsividade ( $I_c$ ) para os solos estudados por Bastos (1999), Fernandes (2011), Basso (2013) e neste trabalho.

Solo	Ensaio de Inderbitzen			Resistência ao cisalhamento e colapsividade			
	K			c (kPa)	c' (kPa)	$\Delta c$ (%)	Ic (%)
	(10-2g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)						
Wnat	sa	pu					
*ALGB	0,07	12,9	0,03	11,6	2,0	82,8	0,87
*ALGC	28,3	26,7	28,1	19,3	0,9	95,3	0,08
*RS239BC	0,65	22,8	0,04	20,3	8,7	56,9	0,03
*RS239C	1,5	3,6	0,0	15,1	4,5	70,9	0,05
*PTB	0,0	14,8	0,09	18,0	6,8	62,2	0,02
*PTC	36,3	33,0	36,5	24,8	2,4	90,3	0,55
*CDB	0,47	19,0	0,29	12,5	3,6	71,2	0,65
*CDC	6,3	25,9	3,6	15,4	0,0	100,0	1,60
♦SVAB	0,2	0,4	0,4	13,0	0,0	100,0	0,63
♦SVRA	0,2	0,9	0,07	29,6	11,9	59,8	0,21
♦SVAR	1,7	4,5	0,1	52,8	3,8	92,8	5,45
*SFA	0,7	1,1	1,3	3,4	0,0	100,0	-
*SFB	24,2	15,4	10,3	1,4	0,0	100,0	-
*SF C	45,8	34,6	36,3	4,3	0,0	100,0	-
*SF2C	40,5	52,4	30,7	0,0	0,0	100,0	-
*SF1A	42,3	44,5	37,9	11,0	10,1	8,3	-
<b>Hor. A</b>	<b>0,0</b>	<b>13,8</b>	<b>2,3</b>	<b>23,4</b>	<b>7,4</b>	<b>68,4</b>	<b>0,09</b>
<b>Hor. B</b>	<b>7,1</b>	<b>162,6</b>	<b>165,1</b>	<b>27,1</b>	<b>18,4</b>	<b>32,1</b>	<b>1,31</b>
<b>Hor.C</b>	<b>65,8</b>	<b>234,3</b>	<b>44,0</b>	<b>3,0</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	<b>3,90</b>

\* Bastos (1999)

♦ Fernandes (2011)

● Basso (2013)

### 5.7.2.1 Análise dos parâmetros físicos e geomecânicos

Ao analisar os parâmetros físicos e geomecânicos frente à erodibilidade observada em campo e a taxa de erodibilidade medida em laboratório, Bastos (1999) através da análise estatística por modelos de regressão linear, concluiu que na condição de umidade natural, as

variáveis que se mostraram correlacionáveis com a erodibilidade ( $K$ ), medida nos ensaio de Inderbitzen foram: (a)  $P_p, 200$  – passante na peneira #200; (b)  $K_{USLE}$  – fator de erodibilidade da USLE; (c)  $RD$  – razão de dispersão; (d) razão  $\pi/s$ ; e (e)  $\Delta c$  – variação do intercepto coesivo.

### - Análise da erodibilidade pela $P_p, 200$ , plasticidade, $K_{USLE}$ e razão de dispersão

A Figura 5.26 apresenta a proposta de Bastos (1999) para a avaliação da erodibilidade, levando em consideração a porcentagem de material passante na peneira 200 e o coeficiente de erodibilidade, com os resultados obtidos por Fernandes (2011), Basso (2013) e deste trabalho.

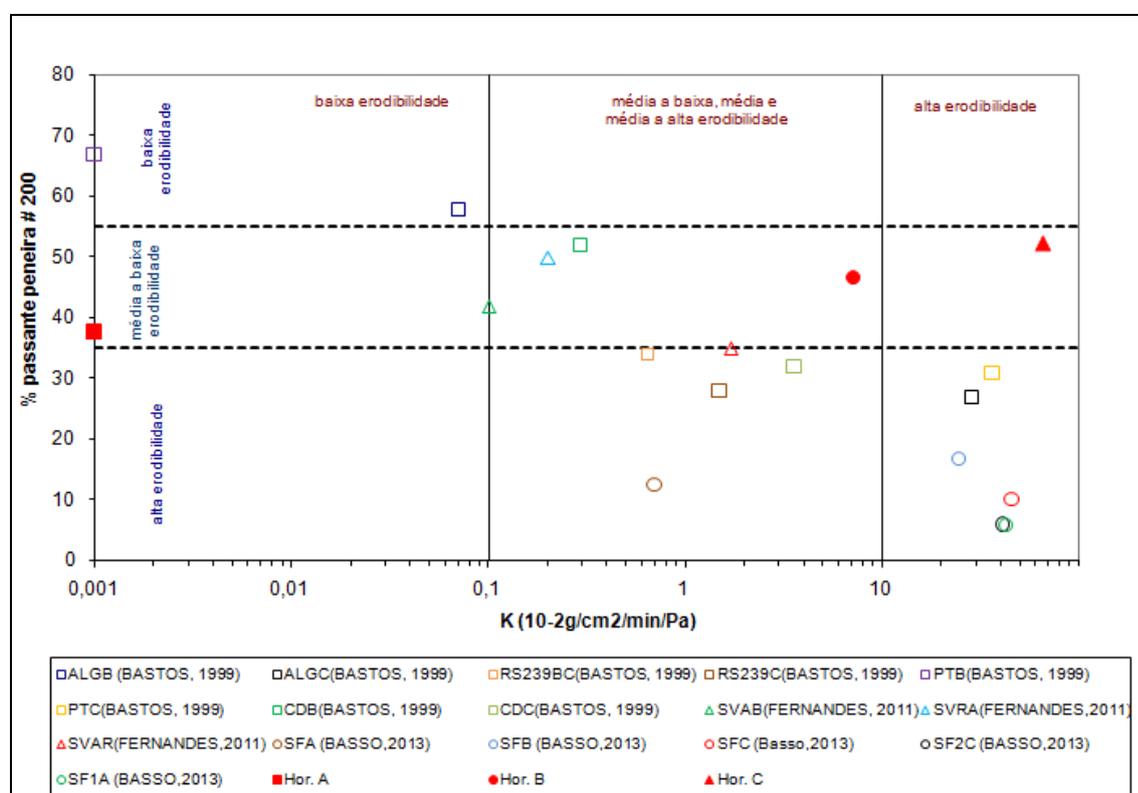


Figura 5.26 - Relação entre a % passante na peneira #200, o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

Observa-se que todos os resultados apresentam uma relação inversamente proporcional entre a % passante na peneira #200 e o coeficiente de erodibilidade (K). Para Bastos (1999) os solos de baixa erodibilidade apresentam teor de finos acima de 55%; os de média a baixa erodibilidade entre 35 e 55%; e os solos com erodibilidade caracterizada como média, média a alta e alta, apresentam teor de finos inferior a 35%. Assim, os solos dos horizontes estudados são caracterizados como sendo de média a baixa erodibilidade. Segundo Bastos (1999) o teor de finos, caracterizado pela % passante na peneira nº 200 ( $P_{p,200}$ ) foi a propriedade física que melhor se relaciona estatisticamente com o coeficiente de erodibilidade (K) e melhor identifica a erodibilidade dos solos estudados.

A Figura 5.27 apresenta a tendência de aumento da taxa de erodibilidade com a redução do índice de plasticidade para os solos estudados por Bastos (1999), Fernandes (2011) e Basso (2013), no entanto, para os resultados encontrados neste trabalho apenas o horizonte B apresentou esta tendência. Bastos (1999) destaca que solos com baixa erodibilidade apresentam valores de  $IP \geq 10\%$  e que os solos de alta erodibilidade apresentam valores de  $IP \leq 5\%$ . Portanto, seguindo essa classificação todos os horizontes estudados neste trabalho apresentam baixa erodibilidade. O mesmo autor discute a dispersão dos resultados, onde diversos pesquisadores confirmam esta tendência e outros comprovam que estas correlações são insatisfatórias, não representando a realidade encontrada em campo.

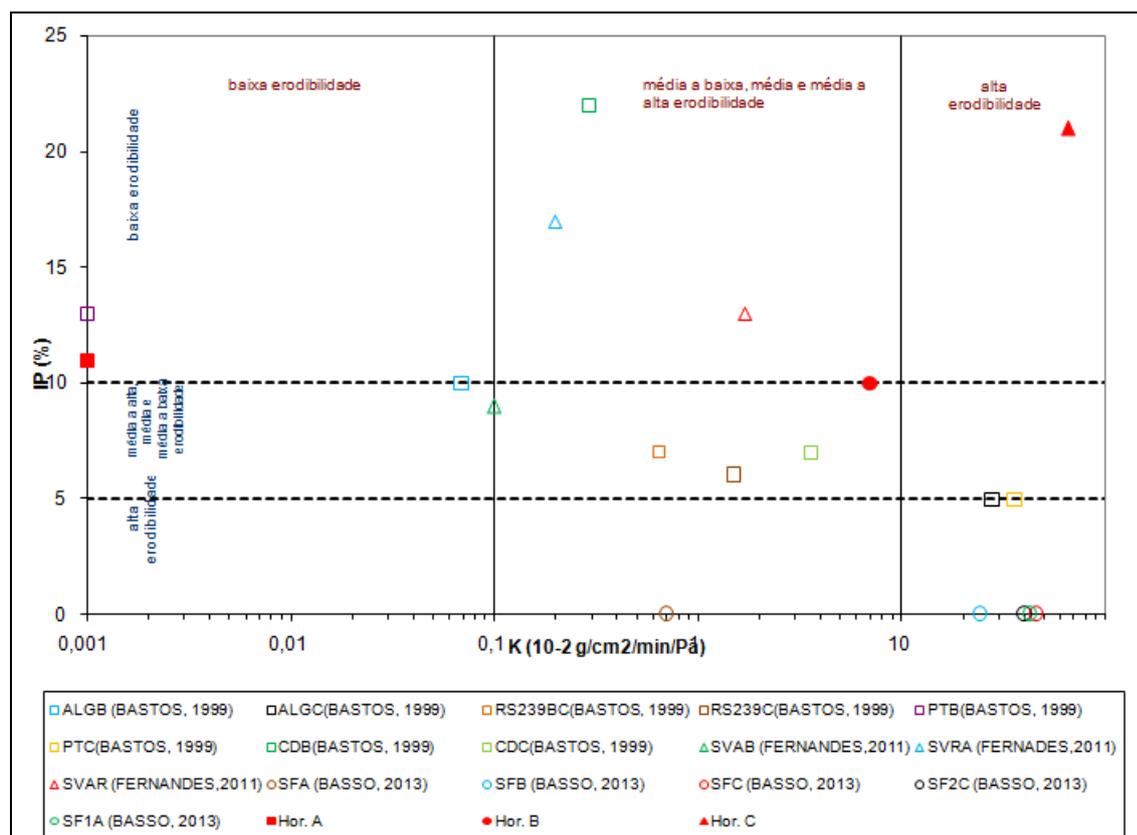


Figura 5.27 - Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

Para Fácio (1991), Santos (2002) e Alcântara (1997) a relação entre o teor de finos, o índice de plasticidade e a erodibilidade são insatisfatórios para solos tropicais brasileiros. A principal razão atribuída é a influência de características estruturais e mineralógicas peculiares aos solos lateríticos e saprolíticos, são essas características que determinam que, o comportamento geomecânico destes solos não pode ser previsto somente pela granulometria e plasticidade.

Para comprovar essa afirmativa, Bastos (1999) comparou os resultados de Alcântara (1997) com solos de diferentes litologias, avaliadas por critérios de campo do referido autor, que não mostra relação com a % passante na peneira #200 com o IP, em consequência, não se enquadra nos critérios propostos na Tabela 5. 18.

A Figura 5.28 apresenta os dados deste trabalho, de Bastos (1999), de Fernandes (2011) e de Basso (2013) frente aos critérios de erodibilidade inferidos. Observa-se que todos os valores referentes aos horizontes estudados apresentam mediana erodibilidade.

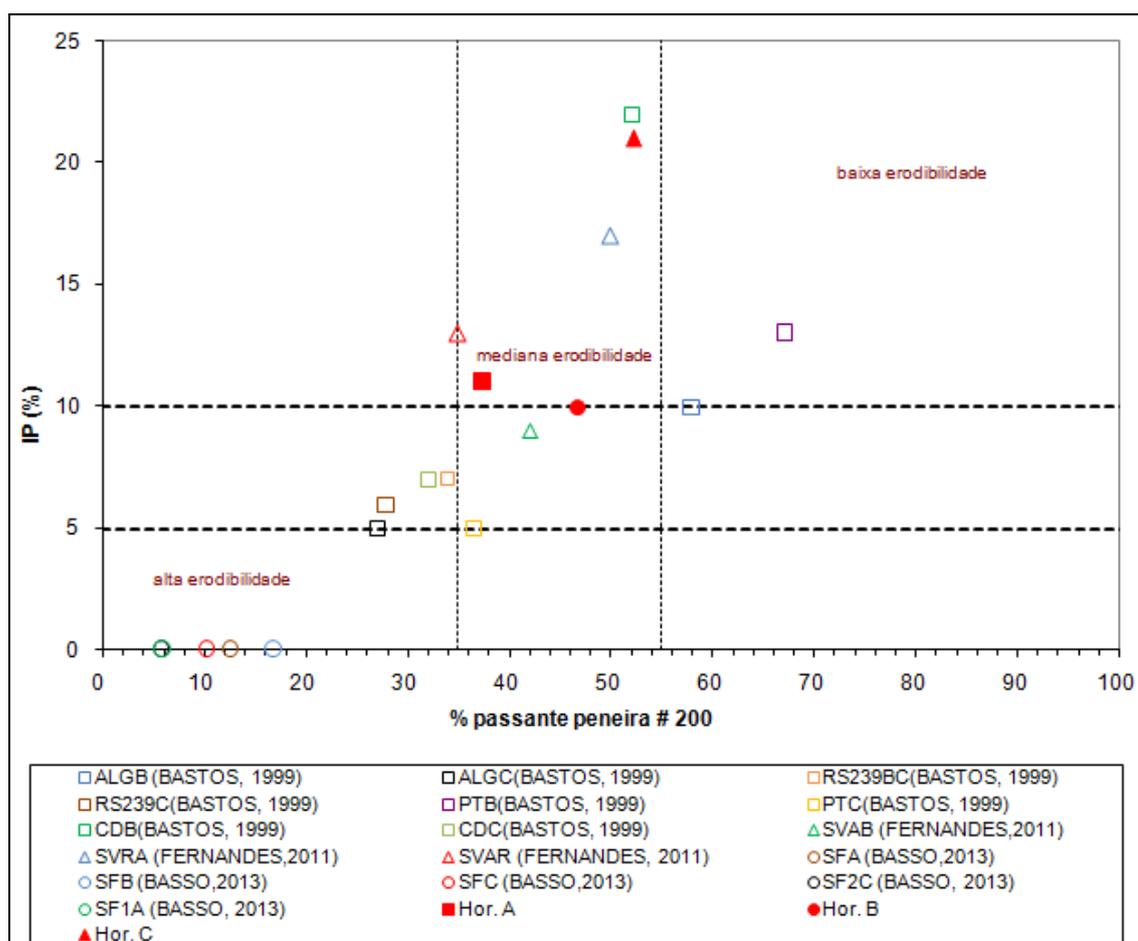


Figura 5.28 – Relação entre o índice de plasticidade (IP), a % passante na peneira #200 e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

A Figura 5.29 mostra a relação entre os parâmetros de erodibilidade  $K_{USLE}$  e  $K$ . Segundo Bastos (1999) o fator da erodibilidade da USLE igual a 0,20 permite separar os solos de média a baixa erodibilidade daqueles de média a alta a alta erodibilidade. Para  $K_{USLE} < 0,15$  caracterizam os solos de baixa erodibilidade; para  $K_{USLE}$  entre 0,15 e 0,30 solos de média erodibilidade; solos com  $K_{USLE}$  superior a 0,30 solos de alta erodibilidade. Segundo essa proposta, solos de alta erodibilidade são os solos com elevados teores de silte e areia muito fina (0,05 e 0,10mm) com baixos teores de argila e matéria orgânica. Analisando os resultados dos horizontes estudados, observa-se que os solos dos horizontes A e C apresentaram maior erodibilidade, enquanto que o solo do horizonte B apresentou média erodibilidade.

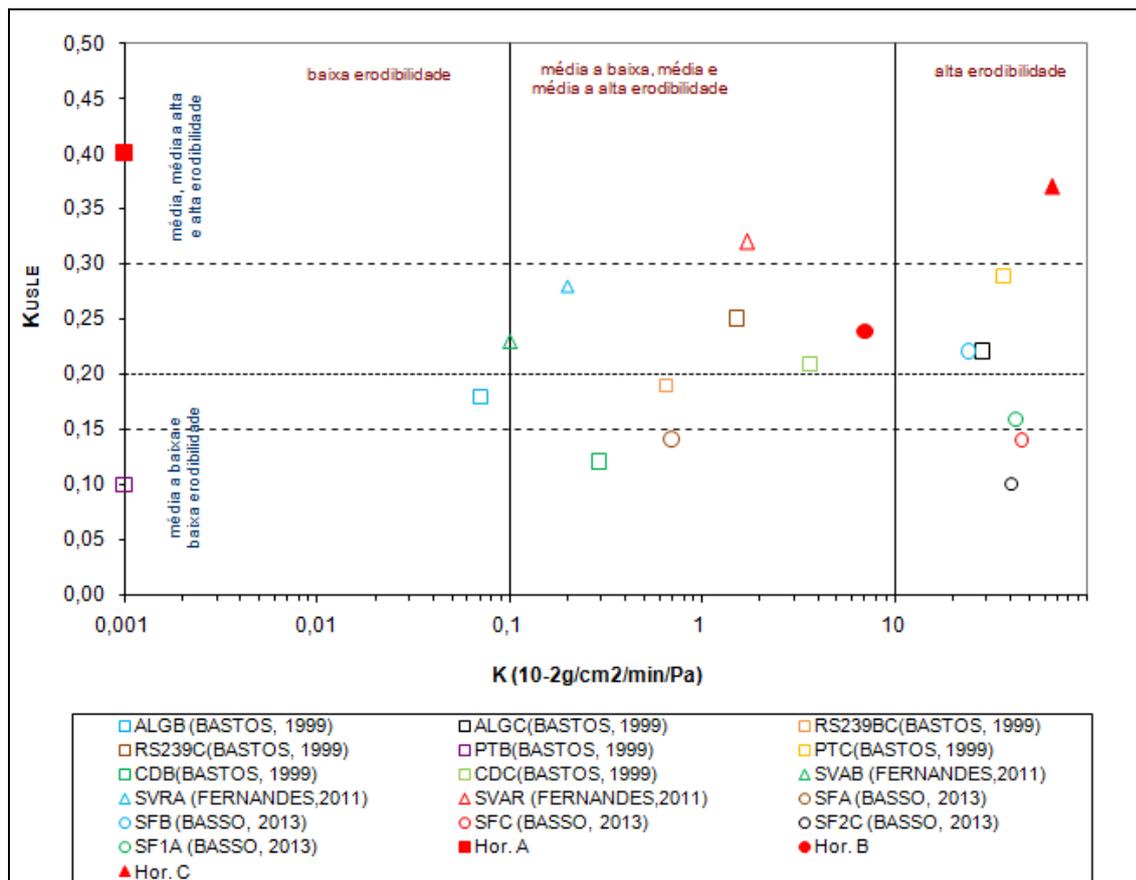


Figura 5.29 - Relação entre os parâmetros de erodibilidade KUSLE, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

A Figura 5.30 apresenta a relação entre a razão de dispersão (RD) e a erodibilidade. Para Bastos (1999) valores deste parâmetro superior a 60% indicam os solos com média, média a alta e alta erodibilidade (solos saprolíticos). Apenas o horizonte C apresentou razão de dispersão maior de 60%, sendo classificado como solo de média a alta erodibilidade. Os horizontes A e B em estudo apresentaram razão de dispersão menor que 60%, enquadrando-se nos solos de média a baixa e baixa erodibilidade.

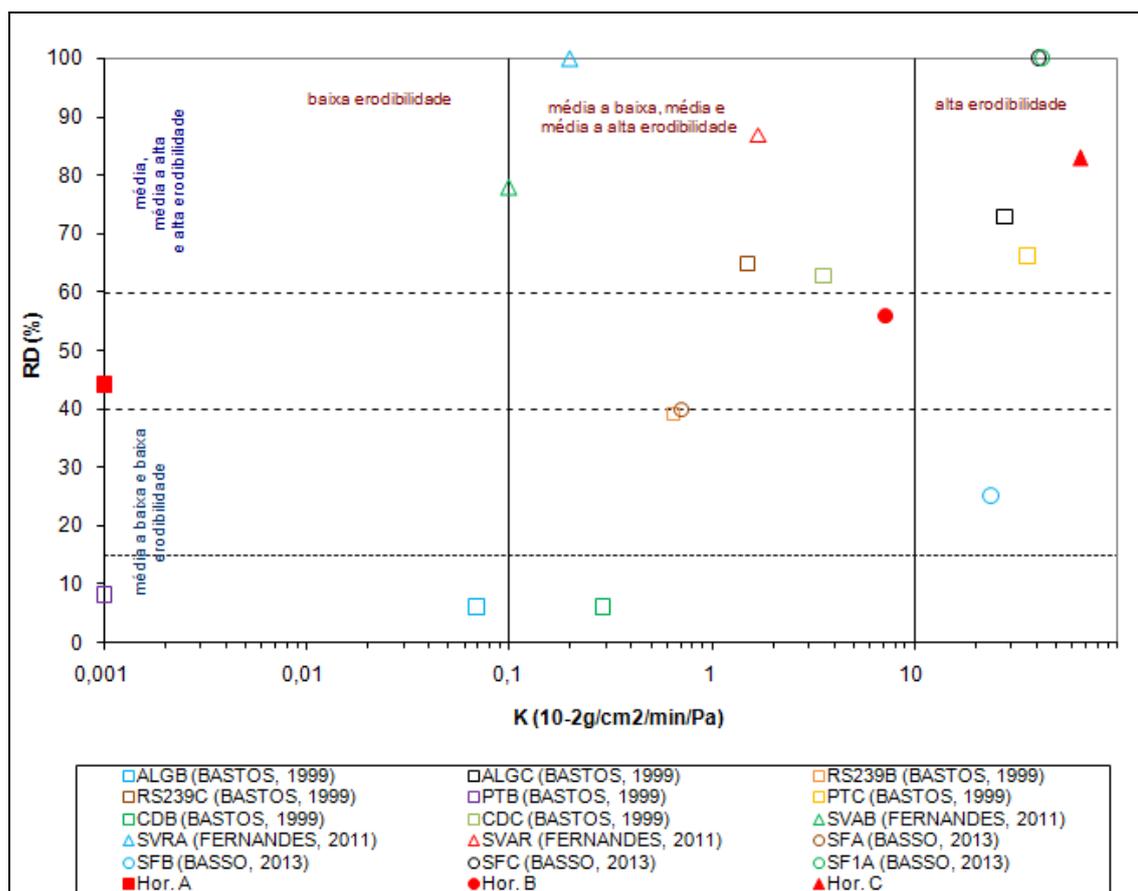


Figura 5.30 - Relação entre a Razão de Dispersão (RD), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

#### - Análise da erodibilidade pelo critério da erodibilidade MCT

As Figuras 5.31 e 5.32 mostram a relação entre a razão  $\pi/s$ , obtidos nos ensaios de perda por imersão e infiltrabilidade (metodologia MCT), com o coeficiente de erodibilidade (K), para as amostras na condição de umidade natural e seca ao ar.

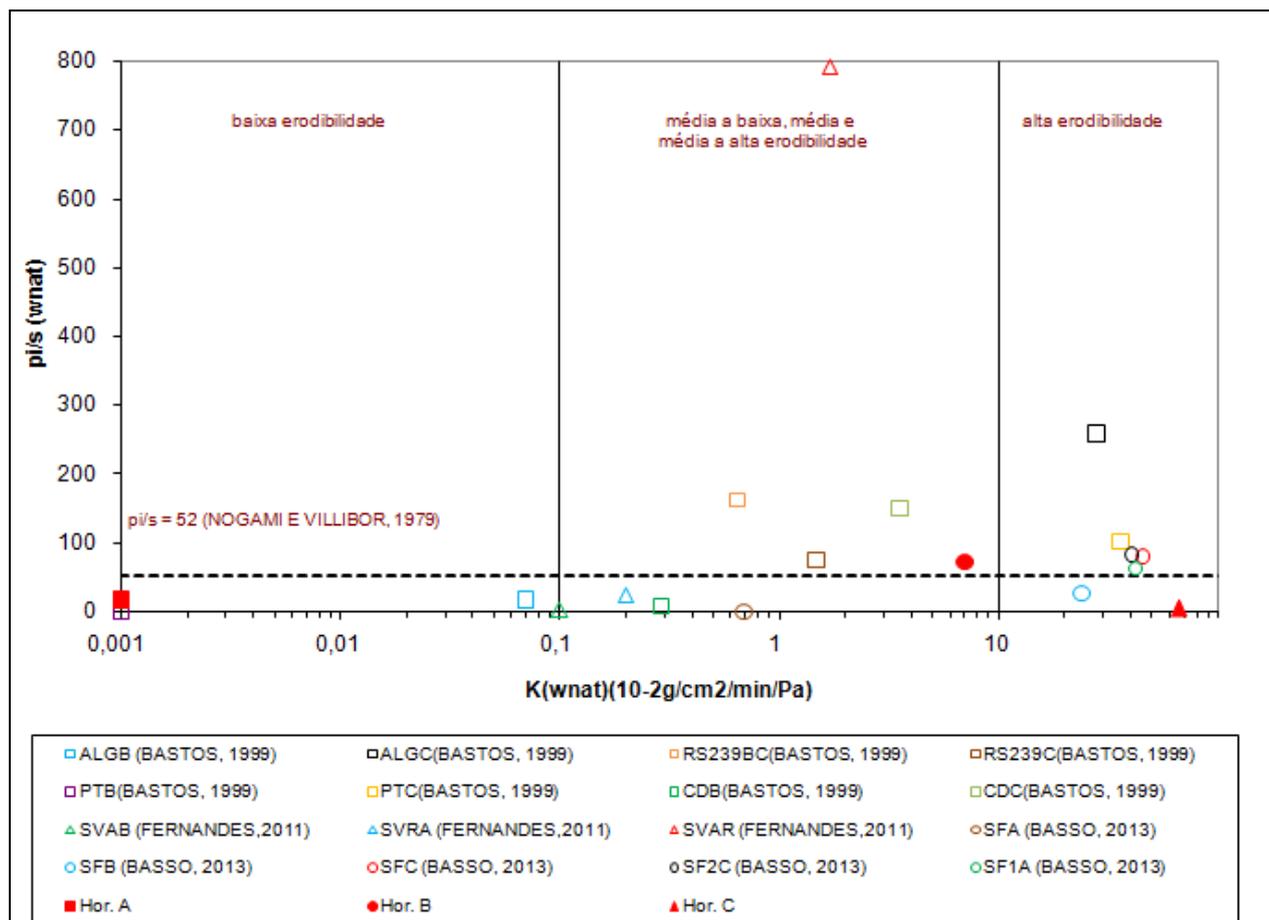


Figura 5.31 - Relação entre  $\pi/s$  (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras na condição de umidade natural

Bastos (1999) destaca que o limite  $\pi/s = 52$ , originalmente proposto por Nogami e Villibor (1979) para distinguir solos erodíveis dos não erodíveis, permite separar, dentre os solos estudados, aqueles de média a baixa e baixa erodibilidade ( $\pi/s < 52$ ) daqueles de média até alta erodibilidade ( $\pi/s > 52$ ), para amostras na umidade natural e seca ao ar.

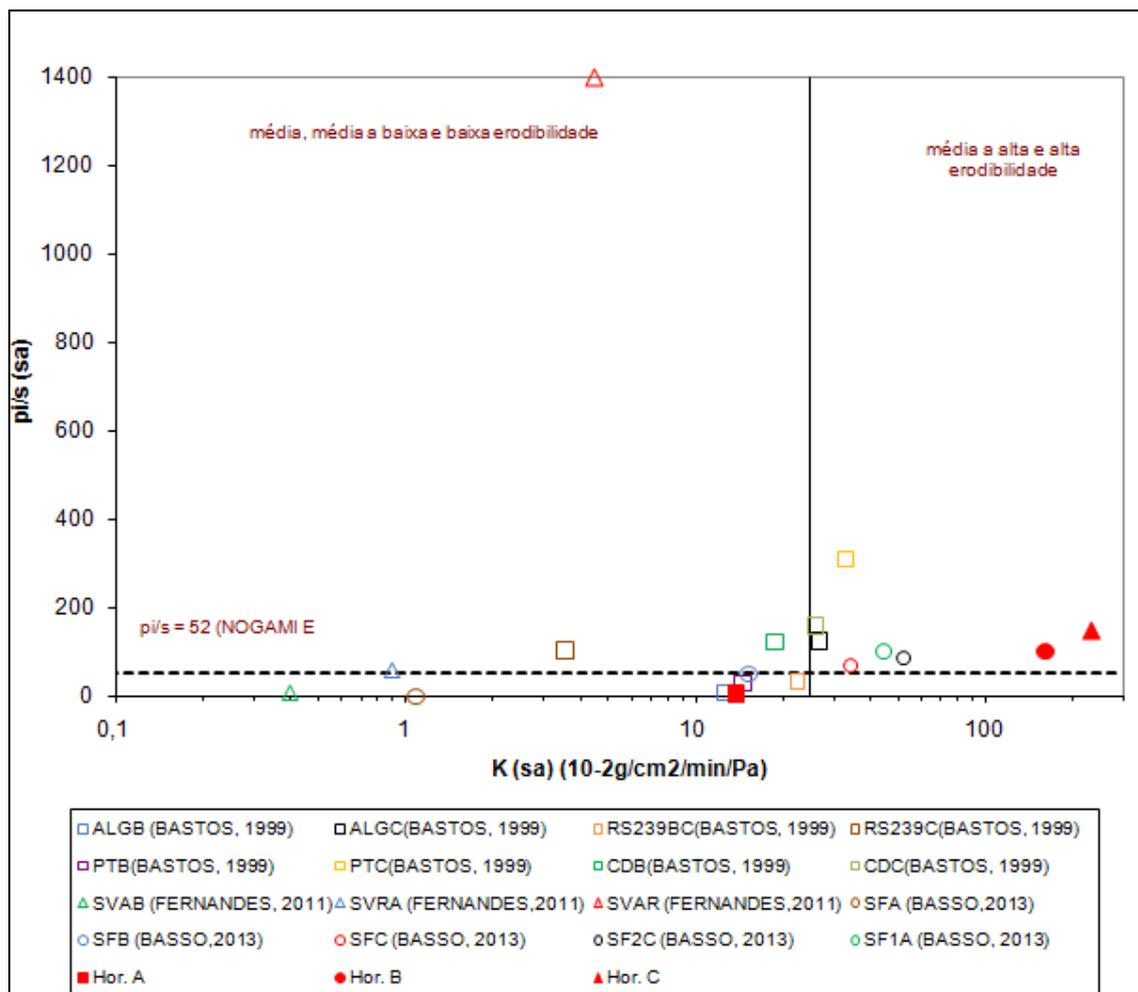


Figura 5.32 - Relação entre  $\pi/s$  (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras secas ao ar

Assim, na condição natural, os horizontes A e C apresentam baixa erodibilidade; o solo do horizonte B apresenta a relação  $\pi/s$  maior que 52%, no entanto o coeficiente de erodibilidade é  $K < 10$  ( $10^{-2}$  g/cm<sup>2</sup>/min/Pa). Por fim, os solos do horizonte C apresentam alta erodibilidade, apesar da relação  $\pi/s$  ser menor que 52%. Para a condição de umidade seca ao ar o solo do horizonte A apresentou baixa erodibilidade, enquanto que os solos do horizonte B e C apresentaram alta erodibilidade.

#### - Análise da erodibilidade pela variação de penetração do cone de laboratório

Para Bastos (1999) dentre as propriedades propostas por Alcântara (1997) para os critérios de erodibilidade, foi à variação de resistência à penetração (DP) que apresentou melhor relação com a taxa de erodibilidade medida em laboratório pelo ensaio de Inderbitzen. As Figuras 5.33 e 5.34 mostram uma tendência de crescimentos do DP com o parâmetro K, para os solos estudados por Basto (1999) e neste trabalho. Bastos (1999) com base nos solos estudados adota um limite para DP entre 50 e 150% distinguindo solos de média a alta e alta erodibilidade dos demais. O mesmo autor toma como limite DP = 100%, para os solos que dobram o valor de penetração do cone com a saturação do solo, são considerados mais erodíveis. Assim, a avaliação da erodibilidade pela penetração do ensaio de cone de laboratório, para os solos estudados, não representa a realidade observada em campo.

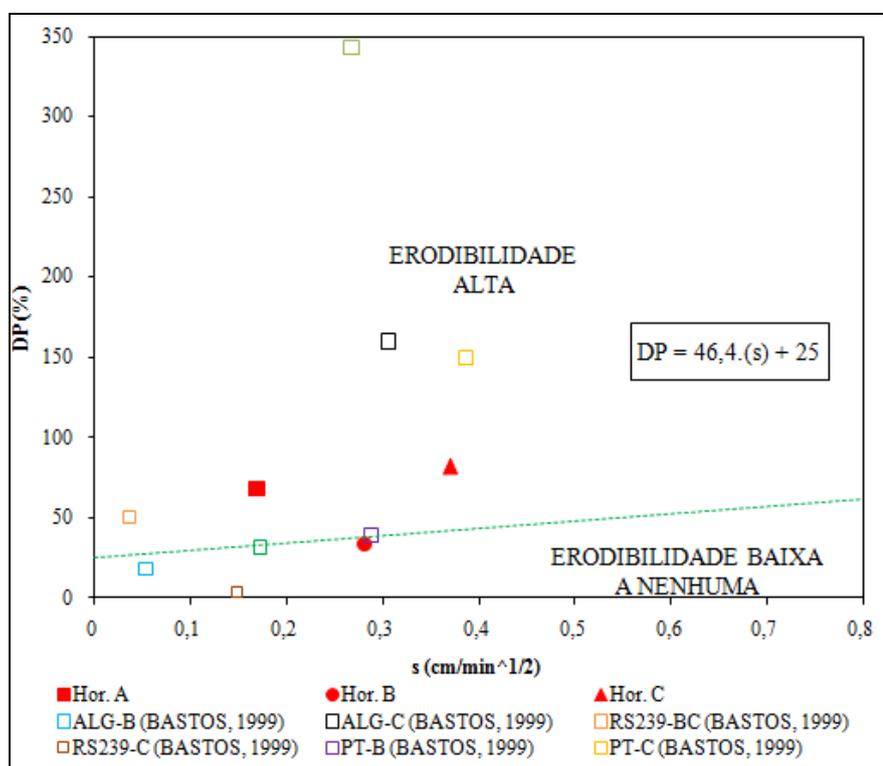


Figura 5.33 - Relação entre DP (%) e o coeficiente de sorção (s) obtida no ensaio de cone de laboratório e perda de massa por imersão realizadas com os solos estudado

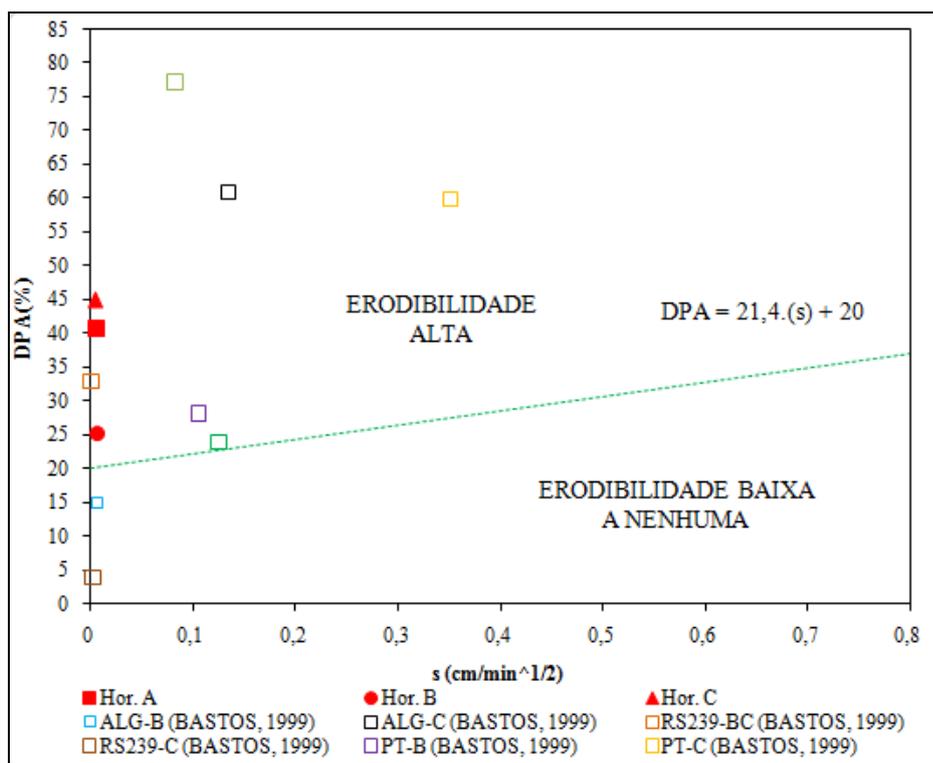


Figura 5.34 - Relação entre DPA (%) e o coeficiente de sorção (s) obtida no ensaio de cone de laboratório e perda de massa por imersão, realizadas com os solos estudados

### -Análise da erodibilidade pela coesão

Ao analisar os resultados obtidos para a análise da erodibilidade pela coesão (Figuras 5.35 e 5.36) observa-se que tanto nas condições de umidade natural e inundada, os valores mais elevados de coesão foram obtidos nos solos que apresentaram maior erodibilidade.

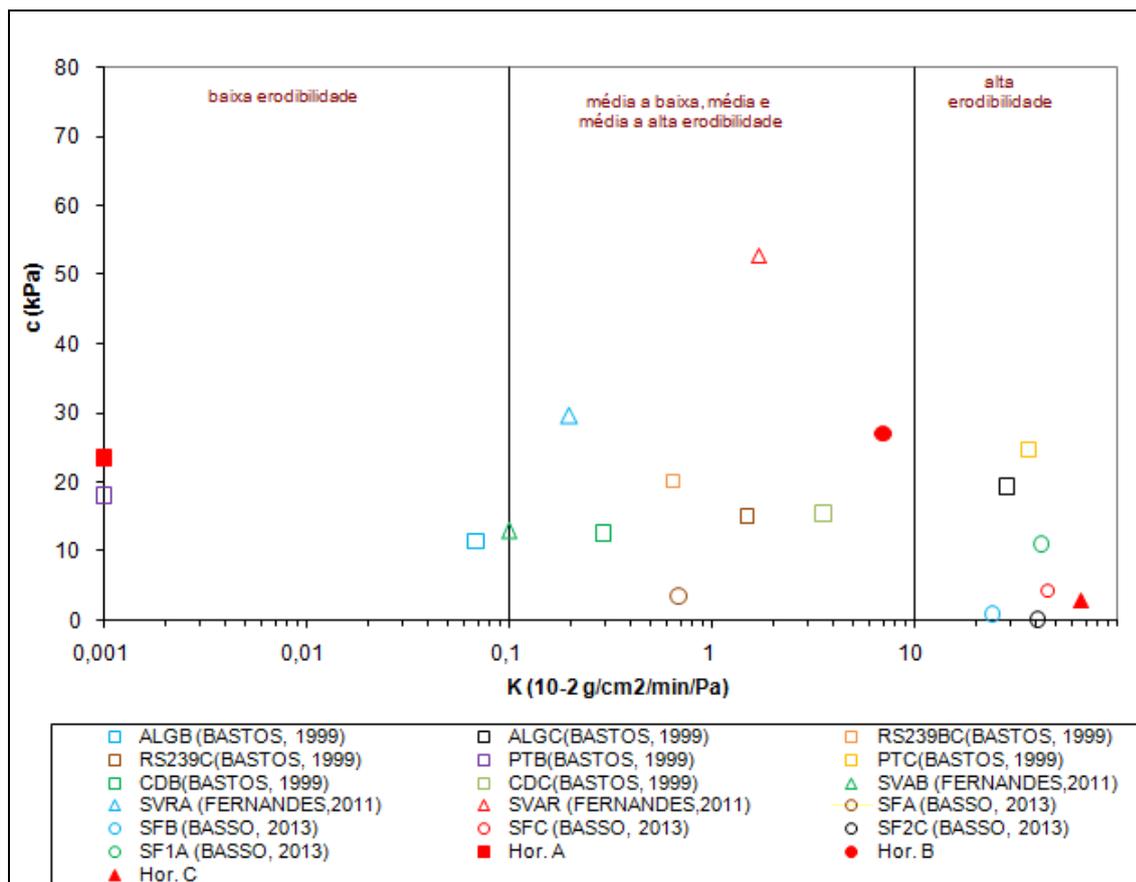


Figura 5.35 - Relação entre a coesão na umidade natural ( $c$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

A variação de coesão proposta por Bastos (1999), apresentado na Figura 5.37, permitiu inferir uma tendência de crescimento da erodibilidade ( $k$ ), na condição de umidade natural, com o aumento deste parâmetro ( $\Delta c$ ). Bastos (1999) identificou solos com média a alta e alta erodibilidade como aqueles que apresentam uma elevada variação de coesão com a inundação ( $\Delta c > 85\%$ ). Para os horizontes estudados, apenas o horizonte C apresentou  $\Delta c > 85\%$ , sendo classificado como de média a alta erodibilidade. O horizonte A e B são classificados como de média a baixa erodibilidade

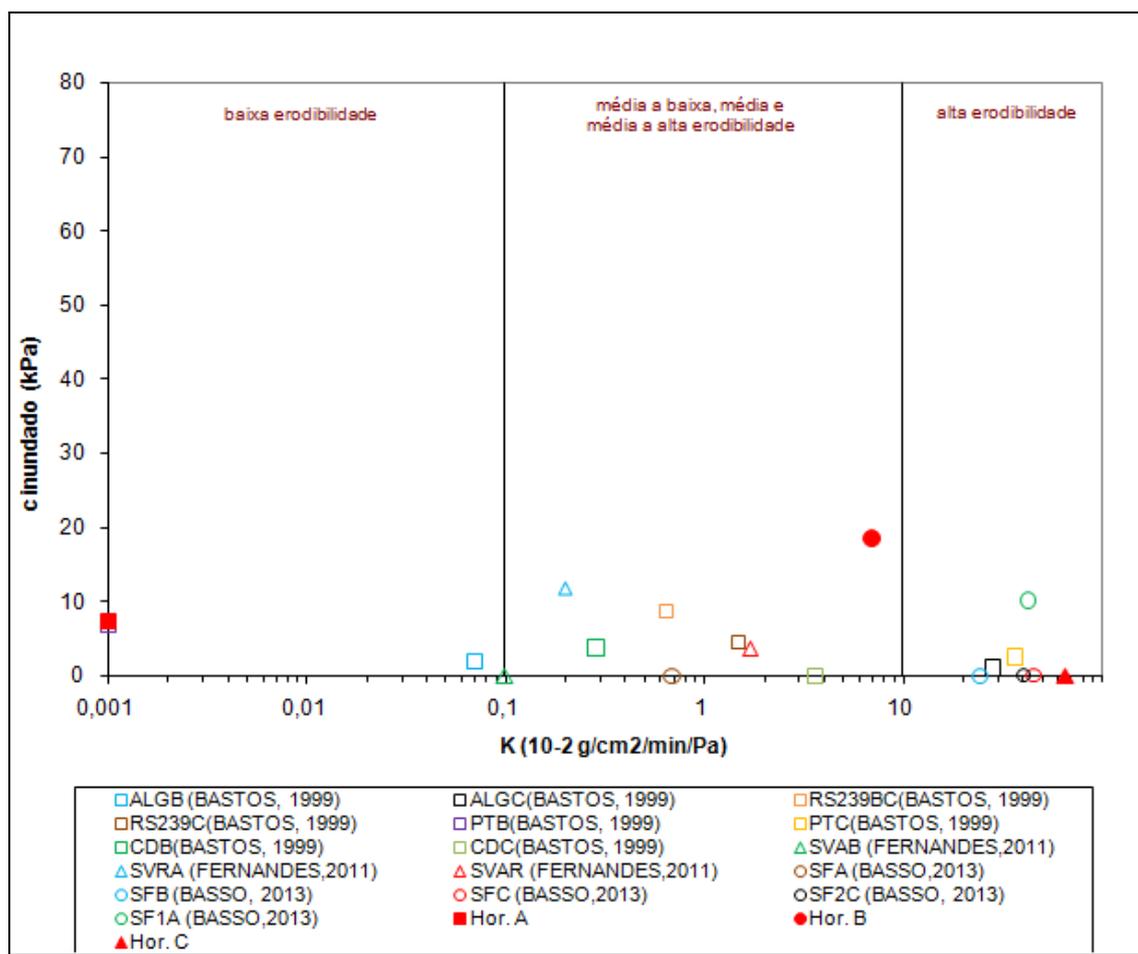


Figura 5.36 - Relação entre a coesão inundada ( $c'$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

Bastos (1999) em sua tese de doutorado apresenta uma enorme discussão a respeito do papel da coesão na erodibilidade dos solos estudados. Alguns autores consideram que a erodibilidade dos solos se altera com eventos pluviométricos, em função da coesão na superfície do solo. Isso ocorre devido ao efeito de sucção matricial que sofre uma redução considerável com a saturação do solo.

Bastos (1999), Tatto (2007), Fernandes (2011), Sant'ana (2012) e Basso (2013) em seus estudos sobre solos e rochas constataram a importância da variação da coesão ( $\Delta c$ ) frente à erodibilidade dos solos. Enfatiza-se a redução da perda de resistência devido à poropressão negativa (sucção), a ação da água que provoca a perda de cimentação interpartículas e interagregados; e quanto à saturação dos solos, a ação desagregadora provocada pelas tensões internas originadas devido aos mecanismos de hidratação e desaeração. Fácio (1991) ao

estudar os solos lateríticos do Distrito Federal, e Conciani (1998) também destacam o papel da perda de coesão com a redução da sucção matricial na erodibilidade dos solos tropicais.

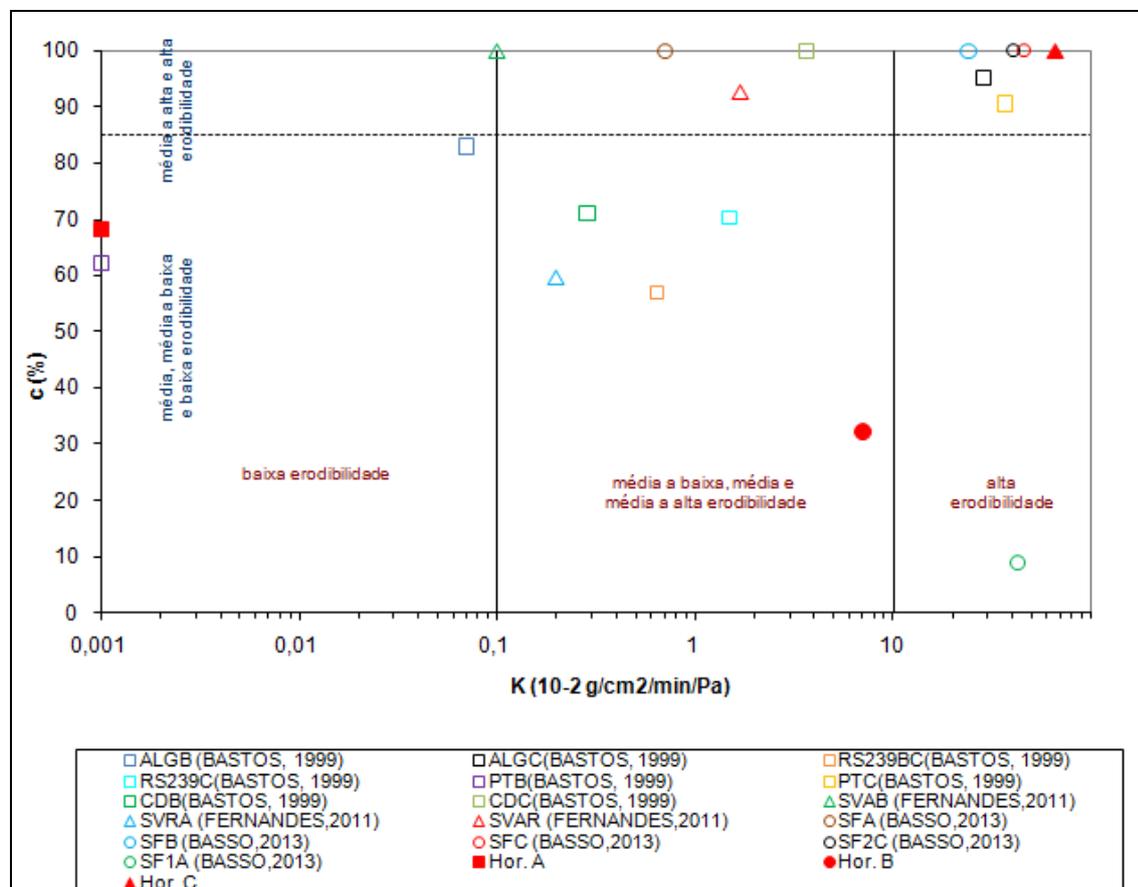


Figura 5.37 - Relação entre a variação de coesão ( $\Delta c$ ), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

A Figura 5.38 apresenta os resultados de Bastos (1999), Fernandes (1999) e deste trabalho, em relação a variação do colapso. Fernandes (2011) verificou que os materiais que apresentam maior desagregabilidade proporcionaram maior potencial de colapso, assim como ocorreu com os resultados deste estudo. Bastos (1999) admite que os processos de desagregação em água por hidratação e desaeração dos solos não saturados podem estar envolvidos com o fenômeno erosão e colapso. Para verificar essa consideração Bastos (1999) apresentou a variação do colapso ( $I_c$ ), obtido para um nível mínimo de carregamento no ensaio de cisalhamento direto, com a taxa de erodibilidade (K).

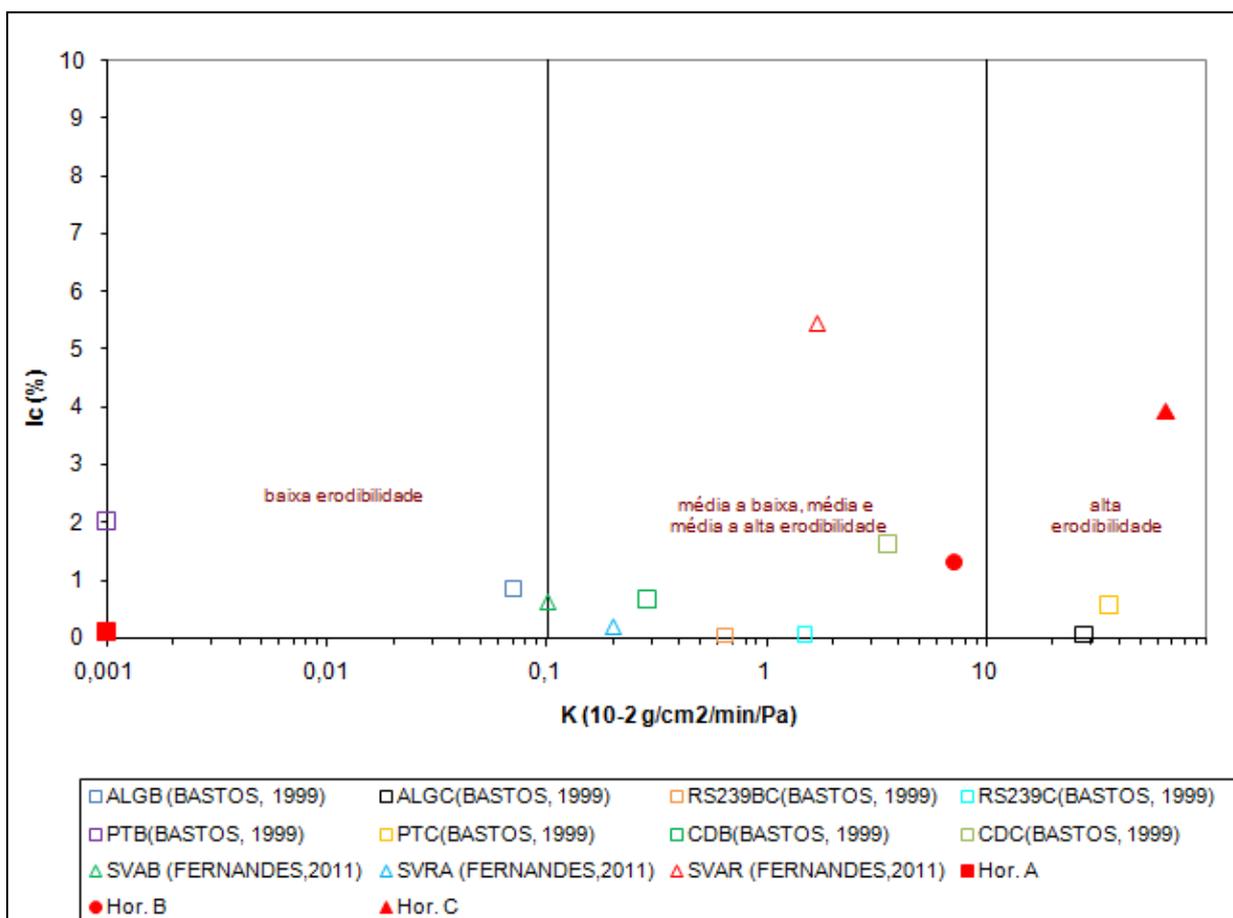


Figura 5.38 - Relação entre a variação do potencial de colapso ( $I_c$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

A Tabela 5.18 apresenta o resumo das análises realizadas nos horizontes em estudo em relação aos níveis de erodibilidade propostos por Bastos (1999).

Tabela 5.18 - Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes estudados de acordo com a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999): Classe 1 - Baixa; Classe 2 - Média a

baixa, Média e Média a Alta; Classe 3 – Alta e por Alcântara (1997) para critério baseado no cone de laboratório: Classe 1 – Baixa; Classe 2 – Alta.

Horizonte	Parâmetros de erodibilidade								Condição de campo
	K	K <sub>USLE</sub>	RD	% Pp,200	IP	pi/s	$\Delta c$	DP	
Hor. A	1	3	1, 2	2	2	1, 2	1, 2	2	Baixa
Hor. B	2	3	1, 2	2	2	3	1, 2	1	Média
Hor. C	3	3	3	2	1	1, 2	3	2	Alta

K = coeficiente de erodibilidade do ensaio de Inderbitzen na condição de umidade natural

K<sub>USLE</sub> = coeficiente de erodibilidade da equação universal de perda do solo

RD = razão de dispersão

% Pp, 200 = porcentagem passante na peneira #200

IP = índice de plasticidade

pi/s = relação entre a perda de massa por imersão e o coeficiente de sorção (NOGAMI e VILLIBOR, (1987)

$\Delta c$  = variação da coesão

DP = resistência a penetração

Os solos dos horizontes B e C foram os potencialmente mais erodíveis pelos dados dos ensaios de laboratório. Ou seja, o horizonte A é mais resistente a erodibilidade, principalmente pelo efeito da sucção que faz com que as amostras não se desagregaram quando imersas em água e resistem mais as tensões hidráulicas. Assim como pela presença da grande quantidade de raiz, que fazem com que as amostras resistam mais a ação da água no solo.

Assim, verifica-se que não ocorre significativa variação da erodibilidade dos solos estudados neste trabalho se comparada com os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011), no entanto para Basso (2013) os solos estudados em sua dissertação apresentaram mais erodíveis devido à fração fina ser pequena, a pouca matéria orgânica e a baixa plasticidade dos materiais.

Os critérios geotécnicos propostos por Bastos (1999) e analisados neste trabalho, que tiveram melhor correlação com as condições observadas em campo, foram o coeficiente de erodibilidade, obtido do ensaio de Inderbitzen e o critério de erodibilidade baseado na metodologia MCT.

## 6 CONCLUSÕES

O Campo de Instrução de Santa Maria, utilizado para treinamentos militares, é uma área com evidente fragilidade ambiental, pois os solos são caracterizados como frágeis e de susceptibilidade aos processos erosivos. Esses fatores associados principalmente ao intenso uso de veículos blindados favorecem a aceleração do processo de degradação dos solos, desencadeando o surgimento de diversas feições erosivas em todo o seu território, mas principalmente nas estradas de terra, por não possuírem um sistema de drenagem adequada.

Pensando nisso, avaliou-se a erodibilidade de um perfil de solo típico do Campo de Instrução de Santa Maria, situado próximo à jazida de empréstimo, existente no CISM.

Na avaliação indireta da erodibilidade dos solos, o coeficiente de erodibilidade ( $K_{USLE}$ ), para os valores de K encontrados, não conseguiram classificar os solos do perfil de maneira confiável, ou seja, os resultados encontrados não correspondem ao observado à campo. O mesmo ocorreu com o critério de erodibilidade baseado no cone de laboratório e com o ensaio de cisalhamento direto, onde os valores dos ângulos de atrito interno e a da coesão do solo se apresentam mais elevados para os horizontes A e B, implicando na maior resistência ao cisalhamento. Também se observa que as tensões cisalhantes são reduzidas devido à influência da saturação no processo de ruptura.

No entanto, no ensaio de desagregação os solos foram classificados conforme a realidade encontrada em campo, o horizonte A mostrou-se mais resistente frente à umidade, enquanto os horizontes B e C apresentaram uma completa desagregação. A Metodologia MCT também apresentou uma boa relação de correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos nos locais estudados, comprovando sua aplicabilidade a estes solos para as condições de umidade seca ao ar e pré-umedecidas.

A avaliação direta, feita através dos ensaios de Inderbitzen, foi o ensaio que melhor correspondeu os resultados determinados em laboratório e os resultados observados em campo. Os solos dos horizontes B e C são classificados como erodíveis, enquanto que o horizonte A como não erodíveis. Os horizontes superficiais apresentaram valores maiores deste parâmetro indicando tendência de maior resistência ao início do processo erosivo por arraste das partículas do solo.

Portanto, os ensaios indiretos e diretos da avaliação da erodibilidade, mostraram satisfatórios para sua avaliação, pois representara a realidade encontrada em campo. Os solos dos horizontes B e C foram os mais potencialmente erodíveis pelos dados dos ensaios de laboratório. Ou seja, o horizonte A é mais resistente, provavelmente por possuir inúmeras raízes que fazem com que as amostras não desagreguem tanto quando imersas em água e resistem mais as tensões hidráulicas.

Os critérios que obtiveram melhor correlação com a proposta geotécnica sugerida por Bastos (1999) foram o coeficiente de erodibilidade obtido no ensaio Inderbtzen e o critério de erodibilidade da metodologia MCT, por classificarem o solo conforme a realidade encontrada em campo.

Recomenda-se a utilização da proposta de avaliação da erodibilidade de Bastos (1999) para trabalhos futuros, em diferentes tipos de solos, a fim de obter maior quantidade de informações e dados para então comparar propor uma nova disposição, abrangendo níveis intermediários de classificação da erodibilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. **Anais...** Jatai, 2009. p. 752-763.

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.

ALVES, A. B. C. **Avaliação da capacidade de suporte e controle tecnológico de execução da camada final de terraplenagem utilizando penetrômetro dinâmico de cone.** 2002. 185p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

AMORIM, R.S.S. et al. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p. 124-130, 2001.

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

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p. Origem: MB-27.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p. Origem: MB-30.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p. Origem: TB-3.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8p. Origem: MB-28.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p. Origem: MB-32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: solo determinação do limite de plasticidade**: NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ASTM D3080 – 90 **Standart Test Method of Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**, 1990.

AYRES, Quincy Claude. **La erosion del suelo y su control**. Barcelon: Omega, 1960.

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.

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. et al. 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.

BASTOS, L. et al. **Manual para elaboração de projetos e relatórios de pesquisa, teses, dissertações e monografias**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

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

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985. 372p.

BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação dos solo**. São Paulo: Ícone, 1999.

BENDER, H. Erosion of line-grained soils: a problem of shear strength in relation to stress path with changing water content. **Mitt. Inst. Grundb. U. bodenmech, ETH Zurich**, n.123, 170p.1984.

BENDER, H. Erosion: Un probleme de resistance au cisaillement en foction du chemin des contraintes pendant l'infiltration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANIS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS. 1985, Brasília/DF. **Proceedings...**, Brasília/DF: ABMS, 1985. V.2, p.15-25.

BENEVIDES, L. D. **Avaliação do uso do DCP em areias para controle da capacidade de carga em fundações diretas e controle de compactação de aterros. 2012.** 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: Ed. da UFSC, v. 3, 2003. p. 877-1436.

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.

BURIOL, G. A. et al. **O clima de Santa Maria.** Ciência e Ambiente, 2009.

CARDOSO, A. C. e TRICHÊS G., Proposição de uma Metodologia para Utilização do Penetômetro Dinâmico de Cone no Controle da Execução da Camada Final de Terraplenagem. **32ª Reunião Anual de Pavimentação**, pág. 661 a 673, Brasília, 2000.

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, 2006a.p. 39-91.

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

CANTALICE, J.R.B. et al. Hidrologia do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argiloso-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.597-607, 2005.

CASSETI, V. 2005. **Geomorfologia.** Disponível: [www.funape.org.br/geomorfologia](http://www.funape.org.br/geomorfologia). Acesso em dezembro de 2013.

CAVALCANTE, S.P.P.; ARAUJO, J.C. Avaliação espacial da perda de solo por erosão da bacia experimental de Aiuaba – Ceara através do uso de SIG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2005, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: p. 401-413, 2005.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática** – CPEM/ELETRONBRAS, 1994.

CARVALHO, L.D.V. **Avaliação da viabilidade da melhoria do projeto geométrico e da conservação das estradas de terra**. 1992. 85f. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1992.

CONCIANI, W. Surgimento de voçorocas em áreas de solo colapsível. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CONTROLE DE EROSÃO, 6., 1998, Presidente Prudente /SP. **Anais...** Presidente Prudente /SP: ABGE, 1998.

COSTA, Y. D. J.. et al. Influência da Energia de Compactação em Resultados de Ensaios com o Cone de Penetração Dinâmica (DCP). **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, XV, Gramado, 2010.

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.

DE MEYER. et al. **Soil erosion rates in tropical villages: a case study from lake Victoria Basin**, Uganda. Catena V. 84 (2011) p. 89-98.

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.

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

FENDRICH, R. et al. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 3. ed. São Paulo: IBRASA. Curitiba: Ed. Universitária Champagnat, 1991. 442 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.

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

FRAGASSI, P.F.M.; MARQUES, E.A.G. Desenvolvimento de uma nova versão do aparelho Inderbitzen. In: SIMPOSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSAO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001b.

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.

FREITAS, F.J. et al. Erosão em entre sulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciencia dos Solos**, v.32, p. 1743-1751, 2008.

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

GRIEBELER, N. P. et al. Modelo para a elaboração do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, n.3, p. 397-405, 2005. GUERRA, A J. T. & CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Beltrand Brasil, 1996. p. 337-376.

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.

GUERRA, A.J.T.; VITTE, A.C. (Org.). **Reflexões sobre a geografia física do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

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**. Sao Paulo: Bertrand Brasil, 2004.

HASS, R. et al. **Modern Pavement Managenet**. Malabar, Krieger Publishing Company, 1994.

HEYN, A., Aplicações do Penetrômetro Dinâmico de Ponta de Cone na Avaliação de Estruturas de Pavimentos. **21ª Reunião de Pavimentação**, Salvador, 1986.

HELDWEIN, A.B; BURIOL, G.A.; STRECK, N.A. **O clima de Santa Maria. Ciência e Ambiente**, v. 1, p. 43-58, 2009.

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

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

IPT. **Manual de ocupação de encostas**. CUNHA, M.A. (Coord). São Paulo: IPT, 1991, n. 1831, 216 p.

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.

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. et al. Avaliação da erodibilidade como parâmetro no estudo de sulcos e ravinas numa encosta no Cabo Santo Agostinho – PE. In: Conferencia Brasileira sobre estabilidade de encostas, 4., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador, 2005. p. 387-399.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2a. Ed. Campinas/SP.: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1982, 45p.

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

MACIEL FILHO, C.L.; NUMMER, A.V. **Introdução à geologia de engenharia**. Santa Maria, RS. Editora UFSM. 2011.

MARIOTONI, M. **Rodovias vicinais: Conceituação e Importância**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica – Universidade de São Paulo- São Paulo, 1987.

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. Properties of soils wich influence soil erosion. **U.S. Department Agricultural Technical Bulletin**, n. 178, 16p, 1930.

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

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

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. 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: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196.

NUNES, T. V. L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neurais artificiais: trecho de Aquiraz – CE**. Dissertação Mestrado. Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

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.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. 587 p

OLIVEIRA, L. E. e VERTAMATI, E., Análise de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Executado Com Solos Transicionais. **I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego - SINBATRA**, vol. 1, pág. 325 a 344, Rio de Janeiro, 1997.

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.

PINTO, C. S. (2000). “**Curso Básico de Mecânica dos Solos**” Oficina de Textos. São Paulo, SP.

PITTELKOW, G. C. **Erosão em estrada de terra no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria

PONCE, H. M. A. et al. Utilizacion del Penetrometro Dinamico de Cono Portatil en la Caracterizacion y Avaluacion de los Suelos en el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles de Caminos de Transito Medio y Bajo. **6º Congresso Ibero-Latino Americano del Asfalto**, 1991.

PRADO, H. **Manejo dos solos**. São Paulo: Nobel, 1991.

RODRIGUES, J. K. G. e LUCENA, F. B., Avaliação Estrutural de um Trecho Pavimentado com Solos Lateríticos no Estado da Paraíba, Através de Ensaio Deflectométricos e Pressiométricos. **25ª Reunião de Pavimentação**, pág. 2531 a 2557, São Paulo, 1991.

REICHERT, J.M. et al. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo Arenito. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 965-973, 2001.

REINERT, D. M.; REICHERT, J.M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria, 2006

ROBLES, C. M. et al. **Factor elated to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia**. *Catena* v. 83 p. 148-157. 2010.

RODRIGUES, J. E. **Estudo de fenômenos acelerados: Boçorocas**. 1982. São Carlos. 162f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1982.

SANTANA, J. M., LUCENA, F.B. e MACÊDO, J. A.G., Avaliação Estrutural de Pavimentos Através de Ensaio Pressiométricos, Ensaio de Placa e CBR In Situ, **XI Congresso de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, vol. 1, pág. 665 a 672, Brasília, 1998.

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, C. A. Ensaio de laboratório no estudo da erodibilidade dos solos de Santo Antônio do Leite, Ouro Preto, Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10. 2002, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002.

SANTOS, T. A. **Análise da erodibilidade através do ensaio de cisalhamento direto**. 2014, 64f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SILVA, A.F. **Mapeamento geotécnico e análise 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, A.M. et al. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.33, p.1811-1820, 2009.

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.

STORGATTO, G.J. Métodos indiretos para análise da erodibilidade. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

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 geológicos-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.

VARGAS, M. **Introdução a Mecânica do Solo**. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

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.

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.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide conservation planning**. Washington, DC, USDA, 1978.58p. (Agricultura Handbook, 537).