

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

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E ROCHAS  
SEDIMENTARES DE UMA VOÇOROCA NA CIDADE DESÃO  
FRANCISCO DE ASSIS - RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Luciana Basso**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DE UMA  
VOÇOROCA NA CIDADE DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

**por**

**Luciana Basso**

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. Rinaldo José Barbosa Pinheiro**

**Co-orientador: Prof<sup>a</sup>. Andréa Valli Nummer**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2013**

**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

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DE  
UMA VOÇOROCA NA CIDADE DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

elaborada por  
**Luciana Basso**

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)

**Cezar Augusto Burket Bastos, Dr.**(FURG)

**Carlos Leite Maciel Filho, Dr.**(UFSM)

Santa Maria, 12 de abril de 2013.

*Ao Francisco, meu pequeno anjo, dedico.*

*"Ó Mestre, fazei que eu procure mais: consolar que ser consolado; compreender, que ser compreendido; amar, que ser amado." (São Francisco de Assis)*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria, instituição que viabilizou a realização deste curso de Pós Graduação.

Ao meu orientador e amigo, Rinaldo J. Pinheiro, pela orientação, confiança, amizade e dedicação, em todo o período de realização deste trabalho, sem sua compreensão e paciência, não seria possível a conclusão deste curso.

À querida professora Andréa Valli Nummer, pela co-orientação e apoio dedicado.

Aos bolsistas Janaína, Larissa e Dionísio, pelo inestimável auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

Aos meus pais, Avelino e Maria de Lourdes, pelo exemplo de vida.

Ao meu marido, Marcelo, por me incentivar, apoiar e estar ao meu lado, sempre.

Ao meu filho Pedro, por existir e ser a razão de eu buscar o melhor em mim e em todas as coisas.

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

Muito obrigada.

## RESUMO

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

### **ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E ROCHAS SEDIMENTARES DE UMA VOÇOROCA NA CIDADE DE SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

AUTORA: LUCIANA BASSO

ORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 12 de abril de 2013.

A pesquisa, da qual resulta esta dissertação de mestrado, foi desenvolvida em uma voçoroca localizada as margens da RS 377, no município de São Francisco de Assis, RS. O objetivo principal foi o estudo da erodibilidade dos solos superficiais (horizontes A, B e C) e do substrato rochoso (camadas 2C e 1A) de um perfil típico da área da voçoroca. A metodologia aplicada consistiu no levantamento bibliográfico; investigação de campo, ensaios de caracterização, ensaios químicos, ensaios de resistência ao cisalhamento direto, ensaios para avaliação indireta (ensaios de desagregação, infiltrabilidade e perda por imersão) e direta (Inderbitzen) da erodibilidade e comparação com a proposta de Bastos (1999) para a estimativa da erodibilidade de solos não saturados na região de Porto Alegre. Os resultados obtidos na avaliação indireta da erodibilidade – através da estimativa do fator erodibilidade ( $K_{USLE}$ ), da avaliação do potencial de desagregação dos solos e dos critérios baseados na metodologia MCT foram os seguintes: para os solos dos horizontes A, B e C e camadas 2C e 1A, situou-se entre 0,10 e 0,21, verificando que não se consegue separar estes materiais quanto à erodibilidade. A metodologia MCT apresentou uma boa relação e correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos/rochas nos locais estudados, comprovando sua aplicabilidade a estes materiais. A avaliação direta, feita através dos ensaios de Inderbitzen, os quais tem por objetivo quantificar a erodibilidade dos solos e rochas estudados, através da taxa de erodibilidade,  $K$  e a tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{hcrit}$ ), confirmou que 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 de arenito (camadas 2C e 1A) verificou-se certa tendência de valores mais elevados de erodibilidade na condição seca ao ar. Também se verificou valores mais elevados de erodibilidade do horizonte C e camadas de arenito em relação ao horizonte A. No horizonte B os valores situaram-se em um patamar intermediário. O horizonte A apresentou um valor de  $K = 0,0095 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ , bem inferior ao horizonte B ( $K = 0,17 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ). Os valores de  $K$  para o horizonte C e camadas de arenito situaram-se entre 0,33 e 0,42  $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ . Não se conseguiu determinar as tensões hidráulicas críticas para o horizonte A, mas para o horizonte B estas se situaram entre 1 e 1,3 Pa. Para o horizonte C e os arenitos estes valores situaram-se entre 0,5 e 1Pa. O horizonte C e os arenitos das Camadas 2C e 1A foram os materiais mais potencialmente erodíveis. Devido a fração fina ser pequena, pouca matéria orgânica e baixa plasticidade, estes horizontes/camadas são mais erodíveis que os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011). 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; voçoroca; caracterização geotécnica

## **ABSTRACT**

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

### **STUDY OF SEDIMENTARY SOIL AND ROCK ERODIBILITY OF A GULLY IN THE CITY OF SÃO FRANCISCO DE ASSIS – RS**

AUTHOR: LUCIANA

ADVISOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Date and Place of the Defense: Santa Maria, 12th of April 2013.

The study of which this Master's Thesis results was developed in a gully along State Highway RS 377, in the city of São Francisco de Assis, RS. The main objective of this study was the erodibility of the superficial soils (horizons A, B and C) and of the rock substrate (layers 1A and 2C) of atypical profile from the gully area. The methodology used consisted in review of literature, field investigation, characterization testings, chemical testings, direct shear resistance testings, testings for indirect valuation (degradation and infiltration testings and loss by immersion) and indirect valuation (Inderbitzen) of erodibility and the comparison with the proposal from Bastos (1999) of an estimate of erodibility of unsaturated soils in Porto Alegre region. The results obtained from the erodibility indirect testing – through the erodibility factor estimate ( $K_{USLE}$ ), from soil disaggregation potential valuation and from criterion based on MCT methodology were as follows: for horizons A, B and C and layers 2C and 1A, the values were between 0,10 and 0,21, and it was verified that these materials cannot be separated regarding erodibility. The MCT methodology presented good relation and correspondence between the testing results and the soils/rocks behavior on the studied location, proving its applicability to these materials. The direct valuation, achieved through the Inderbitzen testings, whose main purpose is to quantify the erodibility of the studied soils and rocks, through the erodibility rate,  $K$  and the hydraulic critical shearing stress ( $\tau_{crit}$ ), confirmed that the loss of soil is as higher as higher is the ramp and the testing flow. According to this assessment, for sandstones samples (layers 2C and 1A), it was verified some tendency for higher values of erodibility in air-dried condition. It was also verified higher erodibility values from the horizon C and sandstone layers compared to the layer A. Regarding to the horizon B, the values were situated in an intermediate level. The horizon A presented a value for  $K=0,0095$  g/cm<sup>2</sup>/min/Pa, lower than the result from horizon B ( $K=0,17$  g/cm<sup>2</sup>/min/Pa). The values of  $K$  for the horizon C and the layers of sandstone were between 0,33 and 0,42 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa. It was not possible to determine the critical hydraulic stress for the horizon A, but for the horizon B these values were between 1 and 1,3 Pa. For the horizon C and the sandstones, these values were between 0,5 and 1 Pa. The horizon C and the sandstones from the layers 2C and 1A were the more potentially erodible materials. Due to the little amount of fine portion, the little organic matter and the low plasticity, these horizons/layers are more erodible than the soils studied by Bastos (1999) e Fernandes (2011). The criterion that presented a better correlation with the geotechnic purpose from Bastos (1999) were the erodibility coefficient obtained through the Inderbitzen testing and the erodibility criteria from the MCT methodology.

Keywords: Erosion. Gully. Geotechnical characterization.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Classificação de voçorocas (Adaptado de FRENDRICH et al., 1991).....	24
Tabela 2.2 -	Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento (BASTOS, 1999).....	31
Tabela 2.3 -	Classificação da estrutura (WISCHMEIER E SMITH, 1978).....	33
Tabela 2.4 -	Classificação do coeficiente de permeabilidade (HANN et al., 1994).....	33
Tabela 2.5 -	Classificação do fator K de erodibilidade (CARVALHO, <i>apud</i> CAVALCANTE e ARAÚJO, 2005).....	33
Tabela 2.6 -	Classificação relativa da erodibilidade. (Tatto (2007) adaptado de Bastos (1999)).....	35
Tabela 3.1 -	Número de amostras indeformadas coletadas e seus respectivos ensaios.....	49
Tabela 3.2 -	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).....	62
Tabela 4.1 -	Principais características da Unidade 1 estabelecidas no perfil estratigráfico (Adaptado de TATTO, 2007).....	73
Tabela 4.2 -	Principais características da Unidade 2 estabelecidas no perfil estratigráfico (Adaptado de TATTO, 2007).....	74
Tabela 5.1 -	Resultados dos ensaios de massa específica real dos grãos e limites de consistência.....	78
Tabela 5.2 -	Resumo dos ensaios de granulometria e classificação dos solos.....	78
Tabela 5.3 -	Parâmetros obtidos das curvas granulométricas.....	79
Tabela 5.4 -	Propriedades índices do solo.....	81
Tabela 5.5 -	Resultado da análise química.....	82
Tabela 5.6 -	Resultados dos ensaios de cisalhamento direto na umidade natural, inundado e seco ao ar.....	92
Tabela 5.7 -	Estimativa do parâmetro $K_{USLE}$ segundo proposta de Wischmeier e Smith (1978).....	95
Tabela 5.8 -	Resultado dos ensaios de desagregação.....	96
Tabela 5.9 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão ( $\pi_i$ ) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte A – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.....	98
Tabela 5.10 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão ( $\pi_i$ ) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte B – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.....	99
Tabela 5.11 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão ( $\pi_i$ ) para diferentes condições de umidade do horizonte C – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.....	99
Tabela 5.12 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão ( $\pi_i$ ) para diferentes condições de umidade da camada 2C – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.....	99
Tabela 5.13 -	Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão ( $\pi_i$ ) para diferentes condições de umidade da camada 1A – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.....	100
Tabela 5.14 -	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 $\tau_{crít}$ (Pa) e K ( $10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> /min/Pa).....	108



Tabela 5.15 - Fator de erodibilidade da USLE, parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta de erodibilidade para os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011) e neste trabalho.....	114
Tabela 5.16 - 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) e neste trabalho.....	115
Tabela 5.17 - Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as classes de erodibilidade.....	116
Tabela 5.18 - Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas 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.....	126

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Erosão por salpicamento ou splash (IPT, 1999).....	19
Figura 2.2 -	Mecanismo do processo erosivo em um terreno com sulcos segundo Vilar e Prandi (1993). (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a).....	20
Figura 2.3 -	Sulcos, ravinhas e voçorocas no Loteamento Algarve (BASTOS, 1999)....	22
Figura 2.4 -	Evolução de uma voçoroca (a) sob efeito da erosão interna e (b) sob efeito do escorregamento das bordas. Fonte: Bigarella e Mazuchowski (1985 <i>apud</i> Bigarella, 2003).....	22
Figura 2.5 -	Esboço das feições erosivas associadas a escorregamentos na Serra do Mar (DOMINGUES, 2001).....	25
Figura 2.6 -	Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995).....	40
Figura 2.7 -	Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. (adaptado de Nogami et al. (1987)).....	41
Figura 2.8 -	Ensaio de erodibilidade específica da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade (NOGAMI E VILLIBOR, 1979).....	42
Figura 2.9 -	Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS. (BASTOS,1999).....	45
Figura 3.1 -	Vista geral da voçoroca (TATTO, 2007).....	48
Figura 3.2 -	Coleta de amostras indeformadas do horizonte B pedológico e do arenito (TATTO, 2007).....	48
Figura 3.3 -	Anéis utilizados para a coleta de amostras indeformadas (TATTO, 2007).....	49
Figura 3.4 -	Etapas de execução do ensaio in situ (FERNANDES, 2011).....	50
Figura 3.5 -	Retirada da amostra do anel para o ensaio de desagregação (TATTO, 2007).....	53
Figura 3.6 -	À esquerda esquema das condições de submersão, representando as etapas do ensaio de desagregação. À direita, amostra pronta para o ensaio (TATTO, 2007).....	53
Figura 3.7 -	Esquema do ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT. (Tatto, 2007).....	55
Figura 3.8 -	Ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT.....	55
Figura 3.9 -	Curva típica do deslocamento do menisco versus tempo para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. (adaptado de Bastos (1999))....	56
Figura 3.10 -	Redução da altura da amostra no ensaio de perda de massa por imersão modificado.....	57
Figura 3.11 -	Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT. (TATTO, 2007).....	58
Figura 3.12 -	Equipamento de Inderbitzen (TATTO, 2007).....	59
Figura 3.13 -	Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra <i>versus</i> tempo para o ensaio Inderbitzen. Fonte: adaptado de Bastos (1999)....	61
Figura 3.14 -	(a) Preparo das amostras indeformadas para o ensaio de Inderbitzen; (b) Material erodido sendo coletado; (c) Material coletado passando pelo conjunto de peneiras; (d) Amostra ao término do ensaio. (adaptado de Tatto (2007)).....	62
Figura 3.15 -	Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, $\tau_h$ crit. (BASTOS, 1999).....	63
Figura 4.1 -	Formação de depósito de areia nas proximidades da RS 377, entre os	64

	municípios de Manuel Viana e São Francisco de Assis.....	
Figura 4.2 -	Localização da área de estudo: a) localização da voçoroca no estado do RS (Landsat 3-4-5; 22/05/2005 – adaptada), b) imagem da voçoroca (Google Earth 2-3-4, 05/01/2006 E:1:170.000), c) microbacia de drenagem tendo destaque a incisão erosiva estabelecida (E:1:200.000). (TATTO, 2007).....	65
Figura 4.3 -	Imagem do Google Earth 2-3-4 (05/01/2006 E:1:170.000).....	67
Figura 4.4 -	Área de estudo onde se encontram diversas formas de erosão, ao fundo vê-se a utilização na época da área: criação de gado.....	68
Figura 4.5 -	(a) e (b) Detalhe do levantamento geológico-geotécnico do interior da voçoroca.....	69
Figura 4.6 -	Imagem do entorno da voçoroca apresentado afloramentos rochosos e o início da silvicultura.....	70
Figura 4.7 -	Área de deposição dos sedimentos ao longo do canal principal da voçoroca (TATTO, 2007).....	70
Figura 4.8 -	Seção geológica em detalhe da voçoroca em estudo (Adaptado de TATTO, 2007).....	72
Figura 5.1 -	(a) Seção transversal com as camadas e locais de amostragem (adaptado de TATTO, 2007); (b) Vista geral da voçoroca apresentando em detalhe a Unidade 2 (camada 2C) e Unidade 1 (camada 1A).....	75
Figura 5.2 -	Vista parcial da Voçoroca Fazenda Taquari (TATTO, 2007).....	76
Figura 5.3 -	(a) horizontes A e B do latossolo; (b) arenito – camada 2C (TATTO, 2007).....	76
Figura 5.4 -	(a) horizonte C; (b) arenitos – camada 1A (TATTO, 2007).....	77
Figura 5.5 -	Curvas granulométricas obtidas com defloculante.....	80
Figura 5.6 -	Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade1, camada menos resistente (Luz Natural, aumento 125X10).....	84
Figura 5.7 -	Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade1, camada mais resistente (Luz Natural, aumento 125X10).....	84
Figura 5.8 -	Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade2, granulação grosseira (Luz Natural, Aumento 125X 35).....	85
Figura 5.9 -	Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade2, granulação fina (Luz Natural, Aumento 125X 35).....	85
Figura 5.10 -	Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do Horizonte A.....	87
Figura 5.11 -	Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do Horizonte B.....	88
Figura 5.12 -	Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do Horizonte C.....	89
Figura 5.13 -	Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras da Camada 2C.....	90
Figura 5.14 -	Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras da Camada 1A.....	91
Figura 5.15 -	Envoltórias de ruptura ao cisalhamento para os ensaios realizados na umidade natural, inundada e seca ao ar.....	93
Figura 5.16 -	Comportamento inicial das amostras quando submetidas à inundaç�o (TATTO, 2007).....	97
Figura 5.17 -	(a) volume de �gua infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltra�o (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte A.....	100
Figura 5.18 -	(a) volume de �gua infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltra�o (cm/s) pelo tempo (s) para as	101

	amostras da horizonte B.....	
Figura 5.19 -	(a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte C.....	101
Figura 5.20 -	(a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da camada 2C.....	102
Figura 5.21 -	(a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da camada 1A.....	102
Figura 5.22 -	Aplicação do critério de erodibilidade pela Metodologia MCT para os materiais estudados.....	103
Figura 5.23 -	Variação da perda por imersão com a condição de umidade das amostras.....	104
Figura 5.24 -	Variação da sorção com a condição de umidade das amostras.....	105
Figura 5.25 -	Relação $\pi/s$ em função da umidade das amostras (os resultados da relação $\pi/s$ na condição pré-umedecida estão reduzidos em 100 vezes).....	105
Figura 5.26 -	Curvas típicas obtidas no ensaio de Inderbitzen para amostras do Horizonte B pré-umedecidas para as vazões de 3 L/min (a) e 6 L/min (b).....	107
Figura 5.27 -	Perda de solo obtida para vazão de 3 L/min, na condição de umidade natural, para os horizontes/camadas estudados.....	107
Figura 5.28 -	Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras dos horizonte A, B e C nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida...	109
Figura 5.29 -	Resultados dos ensaios Inderbitzen para as camadas de arenito 2C e 1A nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida.....	110
Figura 5.30 -	Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen.....	111
Figura 5.31 -	Resultados dos ensaios Inderbitzen obtidos independentes da condição de umidade inicial das amostras.....	111
Figura 5.32 -	Relação entre a % passante na peneira # 200, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	117
Figura 5.33 -	Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	117
Figura 5.34 -	Dados de Bastos (1999) frente ao critério de erodibilidade inferido para os horizontes/camadas estudados com base na % passante peneira #200 e IP.....	118
Figura 5.35 -	Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	119
Figura 5.36 -	Relação entre a Razão de Dispersão (RD), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	120
Figura 5.37 -	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.....	121
Figura 5.38 -	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.....	121

Figura 5.39 -	Relação entre a coesão não saturada na umidade natural ( $c$ ) e o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ).....	122
Figura 5.40 -	Relação entre a coesão na condição inundada ( $c'$ ) e o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ).....	123
Figura 5.41 -	Relação entre a variação de coesão ( $\Delta c$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	124
Figura 5.42 -	Relação entre a variação do potencial de colapso ( $I_c$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	125

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>2.1 O fenômeno de erosão dos solos</b> .....	17
<b>2.2 Classificação dos processos erosivos</b> .....	20
<b>2.3 Fatores que condicionam os processos erosivos</b> .....	26
<b>2.4 Erodibilidade dos solos</b> .....	30
2.4.1 Índice e modelos de erosão.....	31
2.4.2 O enfoque geotécnico – aplicação dos conceitos de Mecânica dos Solos.....	35
<b>2.5 Ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade</b> .....	36
2.5.1 Ensaios de caracterização física.....	36
2.5.2 Ensaio de desagregação.....	37
2.5.3 Critérios de erodibilidade tendo como base a metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).....	39
2.5.4 Ensaio de Inderbitzen.....	42
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	46
<b>3.1 Etapa de gabinete</b> .....	46
<b>3.2 Investigação de campo</b> .....	47
<b>3.3 Ensaios de laboratório</b> .....	50
3.3.1 Ensaio de caracterização e químicos.....	51
3.3.2 Ensaios de resistência ao cisalhamento direto.....	51
3.3.3 Ensaios para avaliação indireta da erodibilidade.....	52
3.3.3.1 Ensaio de desagregação.....	52
3.3.3.2 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT.....	54
3.3.4 Ensaio para avaliação direta da erodibilidade - Ensaio de Inderbitzen.....	58
<b>4 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	64
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	75
<b>5.1 Ensaios de caracterização física</b> .....	77
<b>5.2 Caracterização química</b> .....	82
<b>5.3 Caracterização mineralógica</b> .....	83
<b>5.4 Ensaios de cisalhamento direto</b> .....	86
<b>5.5 Avaliação indireta da erodibilidade</b> .....	94
5.5.1 Estimativa do fator erodibilidade da Equação Universal de Perda de Solo ( $K_{USLE}$ ).....	94
5.5.2 Avaliação do potencial de desagregação dos solos.....	95
<b>5.5.3 Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT</b> .....	97
<b>5.6 Avaliação Direta da Erodibilidade</b> .....	106
<b>5.7 Erodibilidade dos horizontes/camadas estudados</b> .....	112
5.7.1 Avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos .....	113
5.7.2 Parâmetros de erodibilidade e parâmetros físicos envolvidos da avaliação indireta da erodibilidade.....	113
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	127
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	131

## **1 INTRODUÇÃO**

A erosão do solo tem sido considerada como um dos problemas mais significativos nas discussões de desenvolvimento regional, uma vez que está diretamente relacionada aos processos erosivos.

Segundo Fernandes (2011), as consequências que os processos erosivos, tanto no meio rural quanto no meio urbano, têm provocado, nos últimos anos, uma intensa investigação e debate sobre os parâmetros e mecanismos responsáveis pela erosão e possíveis medidas a serem adotadas para a prevenção e controle das áreas afetadas.

Os processos erosivos fazem parte da evolução natural do meio físico e da alteração do relevo (SILVA, 2003). Estes processos compreendem um conjunto de fenômenos naturais que envolvem a formação de materiais provenientes da decomposição e desagregação dos solos e das rochas. Portanto, é um processo de dinâmica superficial governada por agentes como clima, ação da água e vento, natureza do material, relevo e ação antrópica, responsável pela modelagem da superfície da Terra.

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 e controle da erosão.

O entendimento do mecanismo de desencadeamento e evolução dos processos erosivos envolve o conhecimento de muitas variáveis, são complexos e apresentam uma inter-relação de fatores que interveem no fenômeno. Estes fatores podem ser agrupados em quatro tipos: fatores climáticos, fatores topográficos, fator vegetação e fator solo (BASTOS, 1999).

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

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo da erodibilidade dos solos superficiais e do substrato rochoso de uma voçoroca localizada próxima à RS 377 no município de São Francisco de Assis/RS, região oeste do Rio Grande do Sul. Esta voçoroca foi escolhida por apresentar um processo avançado de erosão e possuir diversos tipos de feições erosivas em seu interior.

Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica dos solos e rochas existentes no local e determinação da erodibilidade por métodos indiretos e diretos. Para complementar

este estudo, foi realizada uma comparação com as propostas e critérios de erodibilidade apresentados por Bastos (1999) e com os resultados encontrados por Fernandes (2011).

Este trabalho é estruturado em 6 capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura abordando os temas relacionados com os fenômenos de erosão dos solos; as fases/mecanismos dos processos erosivos; os fatores que condicionam os processos erosivos; erodibilidade dos solos; e ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade mais comumente utilizados no meio geotécnico.

O Capítulo 3 aborda a metodologia aplicada no desenvolvimento desta dissertação, que consistiu em um estudo 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 com ensaios geotécnicos da voçoroca, sendo estudados cinco horizontes/camadas de solo e rocha. Nestes materiais foram coletadas amostras deformadas e indeformadas e posterior realização dos ensaios geotécnicos. Na investigação de laboratório foram realizados os ensaios de caracterização física, química e mineralógica, ensaios de resistência ao cisalhamento, avaliações indireta e direta da erodibilidade dos horizontes e camadas estudados.

No Capítulo 4 é apresentada a área de estudo, com a caracterização regional da microbacia onde está inserida a voçoroca, objeto desse estudo.

O Capítulo 5 apresenta a análise dos resultados, através da descrição geológica da área da voçoroca; dos resultados da caracterização geotécnica e de avaliação da erodibilidade nos horizontes e camadas estudados. As conclusões e sugestões para os próximos trabalhos são apresentadas no Capítulo 6.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os seguintes temas: (a) o fenômeno de erosão dos solos; (b) fases/mecanismos dos processos erosivos; (c) fatores que condicionam os processos erosivos; (d) erodibilidade dos solos; e (e) ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade mais comumente utilizados no meio geotécnico.

### **2.1 O fenômeno de erosão dos solos**

A erosão, termo que provém do latim "erode-erodere", tem o significado de corroer, o qual tem várias definições na literatura. De uma forma geral, erosão é um termo que representa um conjunto de ações, incluindo o desprendimento (desagregação), o arraste (transporte) e a deposição das partículas de solo causada por agentes erosivos, tais como o gelo, o vento, a gravidade e a água. A erosão em que o agente erosivo é a água, é chamada de erosão hídrica (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1985; GALETI, 1985; JACINTHO et al., 2006).

Foi na Conferência 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 abordado pela comunidade internacional. Desde então, a erosão, juntamente com a erodibilidade, vem sendo estudada em diversas áreas de conhecimento, como Agronomia, Geologia, Geografia e Engenharia Civil (Hidráulica e Geotecnia) 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 RS, os trabalhos de Maciel Filho (1997), Dias et al. (1998) e Bastos (1999) e na região centro-oeste as pesquisas realizadas por Fragassi (2001), Koetz (2003), Jacintho et al (2006), Camapum de Carvalho et al. (2006b) e inúmeros outros trabalhos publicados em periódicos e anais de congressos, fóruns, simpósios, conferências e livros.

Inúmeros são os critérios utilizados para a classificação dos processos erosivos, tais como, a natureza, agente e grau de intensidade. Quanto à natureza ou a escala de tempo em que as erosões ocorrem, a maioria dos autores classificam as erosões em dois grandes grupos: (a) erosão natural ou geológica e (b) erosão acelerada ou antrópica.

A erosão, quando constitui um processo natural, é considerada um agente geológico que provoca a modificação das paisagens terrestres, é um mecanismo lento e medido pelo tempo geológico. A interferência humana altera esse processo natural, geralmente, acelera sua ação e aumenta sua intensidade. Quando a ação antrópica é caracterizada como deflagradora e intensificadora dos processos de erosão hídrica é usado o termo erosão hídrica acelerada (BASTOS, 1999).

No meio geotécnico, assim como neste trabalho, a erosão hídrica é a mais estudada por causar grandes danos, tanto nas zonas rurais quanto nas zonas urbanas.

A erosão hídrica tem a chuva como agente erosivo, ocasionando a desagregação das partículas de solo na superfície provocado pela energia de impacto das gotas da chuva e pela força cisalhante do escoamento superficial pelo fluxo concentrado (BASTOS, 1999; AMORIM et al., 2001; NUNES e CASSOL, 2008).

A desagregação das partículas do solo tem sua origem no chamado efeito *splash* ou salpicamento, que é o efeito do impacto da gota da chuva sobre o solo, mostrado na Figura 2.1. Cooke e Doornkamp (1990) *apud* BIGARELLA, 2003 afirmam que este processo pode ser responsável por até 90% da erosão de um solo em algumas circunstâncias. O processo de desagregação ocorre da seguinte maneira: 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.

Para Guerra e Mendonça (2004), o impacto da gota resulta na compactação do solo pela formação de crostas (*crusts*) que irão dificultar e impedir a infiltração da água da chuva. Na área periférica à 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 (*ponds*) nas irregularidades (microtopografia) existentes no topo do solo. Quando essas poças se rompem, inicia-se então, o escoamento superficial, inicialmente difuso, onde não há concentração de fluxo em canais, provocando a erosão em lençol (*sheetflow*).

De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2006a) o destacamento das partículas cessa quando o solo passa a resistir aos esforços de arrancamento e o fluido satura a sua capacidade de transporte de sedimento. O escoamento superficial passa a se dar quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração do solo.

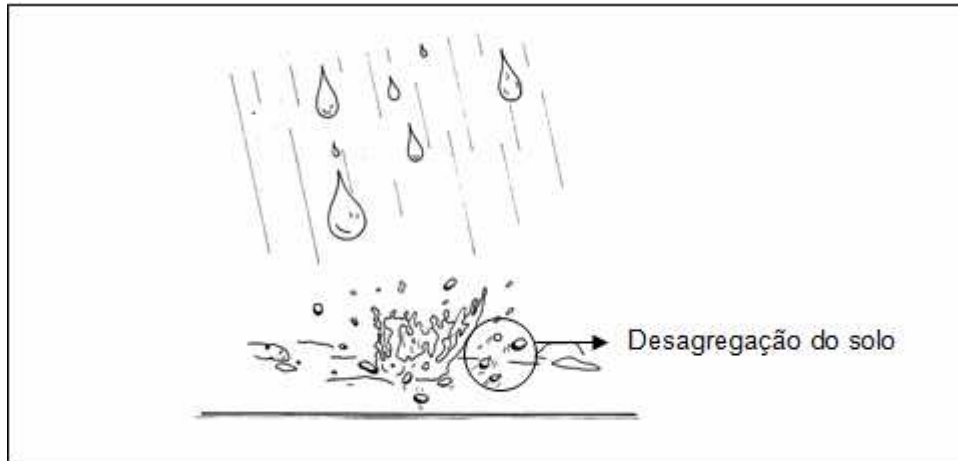


Figura 2.1 - Erosão por salpicamento ou splash (IPT, 1991)

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 ou laminar que está relacionada com a distribuição do destacamento das partículas que ocorre de maneira uniforme e suave por toda a sua extensão. É considerada um dos tipos de erosões mais perigosas, pois muitas vezes é difícil de ser observada (FENDRICH et al., 1991).

Camapum de Carvalho et al. (2006a), afirmam que a erosão superficial por escoamento laminar pode ou não propiciar o aparecimento de sulcos, e quando gerados, poderão evoluir para ravinas e voçorocas. Vilar e Prandi (1993 apud CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a) discutem o mecanismo do processo erosivo laminar (entre sulcos ou intersulcos) e linear (em sulcos) e representam um esquema conforme apresentado na Figura 2.2.

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).

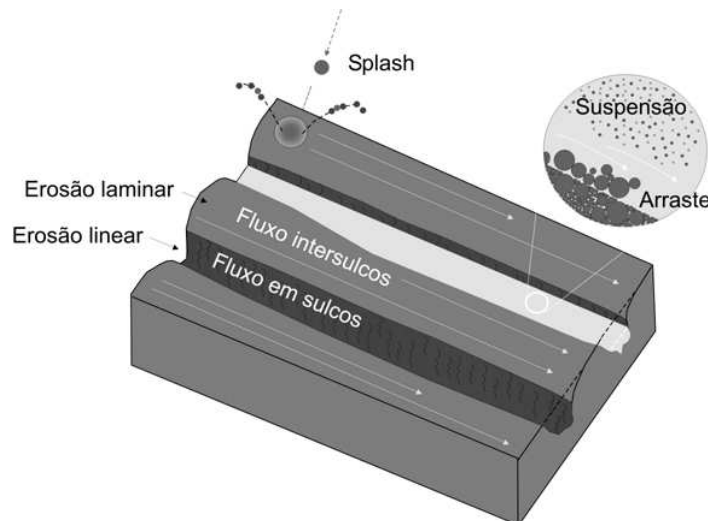


Figura 2.2 – Mecanismo do processo erosivo em um terreno com sulcos segundo Vilar e Prandi (1993). (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a)

Segundo Cantalice et al. (2005), a erosão em sulcos caracteriza-se pelo escoamento superficial concentrado de uma lâmina d'água, com tensão de cisalhamento suficiente para desagregar o solo. A erosão em sulcos é a primeira etapa de desenvolvimento de uma erosão dita linear e desenvolve-se rapidamente durante uma chuva intensa, devido ao escoamento superficial que se torna concentrado (BIGARELLA, 2003; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a).

## 2.2 Classificação dos processos erosivos

Trabalhos como do IPT (1991), Bertoni e Lombardi Neto (1999), Maciel Filho (1997) e Infanti Junior e Fornasari Filho (1998), entre outros, classificam as erosões quanto ao grau de intensidade em: (a) superficial ou laminar; (b) sulcos e ravinas; e (c) voçorocas.

Os conceitos de sulcos e ravinas diferem com relação às dimensões da incisão, com a geometria da feição erosiva, com o afloramento do lençol freático na incisão ou com o tipo de fluxo do escoamento. Mesmo não havendo um consenso entre conceitos, as classificações mais utilizadas internacionalmente são aquelas relacionadas às dimensões das incisões erosivas. Heede (1970 *apud* OLIVEIRA, 1999) consideram ravinas, as incisões de até 50 cm de largura e profundidade.

Bigarella (2003) adota a seguinte terminologia de acordo com a profundidade: ranhura (até 5 cm), sulco (5 a 30 cm); vala (30 a 100 cm) e ravina (maior 100 cm). Este autor afirma que, com o aumento do tamanho dos sulcos, estes se transformam em valas de erosão (*gully*) e em ravinas de dimensões maiores. Na literatura, o termo *gully* também é designado para ravinas e até mesmo para voçorocas, não tendo uma definição precisa.

Camapum de Carvalho (2006) considera que 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 a instabilidade dos taludes.

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, muitas vezes provocadas pela ação antrópica, combinada com a ação do fluxo subsuperficial e subterrâneo.

Para Guerra (2003) voçoroca é uma incisão com uma largura maior que 30 cm e profundidade maior que 60 cm. Essa classificação é seguida por vários autores, entre eles Camapum de Carvalho (2006a).

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 adotado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1991) é o mesmo adotado neste trabalho.

A Figura 2.3 apresenta sulcos, ravinas e voçorocas que ocorrem em uma extensa área, em solos saprolíticos, no loteamento Algarve na região de Porto Alegre (BASTOS, 1999).

Conforme descrevem Bigarella e Mazuchowski (1985 apud BIGARELLA, 2003) a evolução de uma voçoroca está ligada à erosão interna junto ao nível freático, causando escavações em forma de concha, tubulares, progredindo em túnel, com subsequente escorregamento do terreno (Figura 2.4a).

Para estes autores, ocorre uma série de desmoronamentos das cabeceiras, onde o fluxo superficial se estabelece, ocorrendo liquefação do solo ruptura abaixo, sendo responsáveis pela velocidade considerável da erosão nas voçorocas (Figura 2.4b).



Figura 2.3 – Sulcos, ravinas e voçorocas no Loteamento Algarve (BASTOS, 1999)

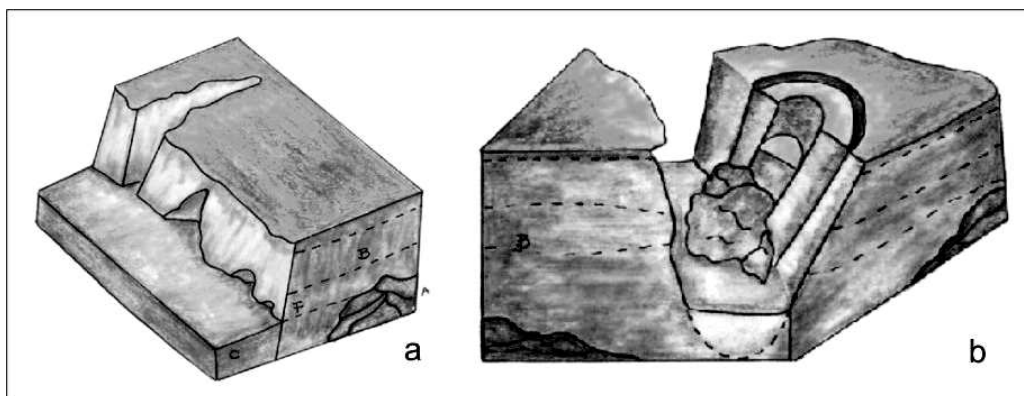


Figura 2.4 – Evolução de uma voçoroca (a) sob efeito da erosão interna e (b) sob efeito do escorregamento das bordas. Fonte: Bigarella e Mazuchowski (1985 *apud* Bigarella, 2003)

Cientificamente, os autores atribuem inúmeros estágios de desenvolvimento ao processo erosivo por voçorocamento. Divergem em relação ao número de estágios, mas são unânimes na descrição dos processos envolvidos propriamente ditos.

Os autores Gorshkov e Yakushova (1970 apud MACIEL FILHO, 1997), Fendrich (1982 apud FENDRICH et al., 1991) e Bigarella (2003), de maneira geral, destacam quatro estágios de desenvolvimento de uma voçoroca:

- (a) no primeiro estágio ocorre a formação de sulcos com o escoamento superficial concentrado;
- (b) no segundo estágio há um aprofundamento e alargamento da voçoroca com o surgimento da cabeceira da feição devido à erosão regressiva;
- (c) no terceiro estágio ocorre o encontro do nível base de erosão com a formação do fundo plano. Geralmente há o surgimento de fontes que colocam em evidência a contribuição da água subterrânea para o processo erosivo;
- (d) na quarta e última etapa a voçoroca começa a se estabilizar, com o abrandamento dos taludes e a implantação da vegetação oriunda dos escorregamentos.

Estas etapas de desenvolvimento ocorrem simultaneamente dentro da mesma voçoroca, sendo que os primeiros estágios se estabelecem a montante da incisão, enquanto que as etapas finais a jusante.

Entre os diferentes autores, os critérios mais utilizados com relação à classificação das voçorocas, são a dimensão e formato da seção transversal do canal formado, a área de abrangência, a forma e a localização (rural ou urbana).

Autores como Fendrich et al. (1991) classificam as voçorocas de acordo com o formato da seção transversal, sendo o formato em U ou em V. A voçoroca com formato em "U" é encontrada normalmente em regiões onde o solo e subsolo são mais facilmente erodíveis, não significando necessariamente um perfil mais estabilizado. A partir deste nível não há mais aprofundamento, apenas alargamento. Neste caso, as paredes são quase verticais e a ampliação lateral é realizada por erosão superficial ou por descalçamento da base da parede devido à ação da água subterrânea. A voçoroca com formato em "V" está relacionada a solos mais resistentes à erosão, onde o escoamento superficial concentrado atua preponderantemente à ação da água subterrânea. Este formato é mais comum no início do processo erosivo, muito embora seja frequente encontrar ambos os formatos numa mesma voçoroca, independentemente de sua idade ou estabilização.

Tanto as ravinas, quanto as voçorocas, podem assumir formas lineares, anfiteatro e encaixada. Lineares quando estão associadas às características geológico-geotécnicas e estruturais da região, apresentando inicialmente a forma de "V" e podendo evoluir para a

forma “U” ou trapezoidal. Quando a feição assume forma mais concentrada é chamada de anfiteatro e, encaixada quando a feição atinge camadas de solo menos resistente, ficando confinada pelas mais resistentes (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a).

A Tabela 2.1 apresenta uma classificação de voçorocas quanto à profundidade e área da bacia.

Domingues (2001) apresenta a caracterização das feições erosivas em áreas impactadas na Serra do Mar na região de Cubatão (SP), verificando que ocorrem duas categorias de feições erosivas, quanto ao domínio dos aspectos hidromorfológicos: as das bacias de captação e a das vertentes retilíneas, ambas com variações estreitamente ligadas à alterações antrópicas. Neste trabalho, o autor, apontou 14 feições erosivas associadas a escorregamentos na Serra do Mar (Figura 2.5).

Tabela 2.1 – Classificação de voçorocas (Adaptado de FENDRICH et al., 1991)

<b>Classificação</b>	<b>Profundidade do canal</b>	<b>Área da bacia (ha)</b>
Pequenas	< 1m	< 2 ha
Médias	1 a 5m	2 a 20 ha
Profundas / Grandes	> 5m	> 20 ha

Segundo Oliveira (1999) os principais mecanismos responsáveis pela erosão em ravinas e voçorocas são: (a) destacamento das partículas de solo por impacto das gotas de chuva; (b) transporte de partículas do solo pelo escoamento superficial difuso e pelo fluxo concentrado; (c) erosão por queda-d`água (*plunge pool erosion*); (d) solapamento da base dos taludes; (e) liquefação das partículas de solo; (f) movimentos de massa localizados; e (g) arraste das partículas do solo por percolação em meio poroso e através de dutos (*piping*).



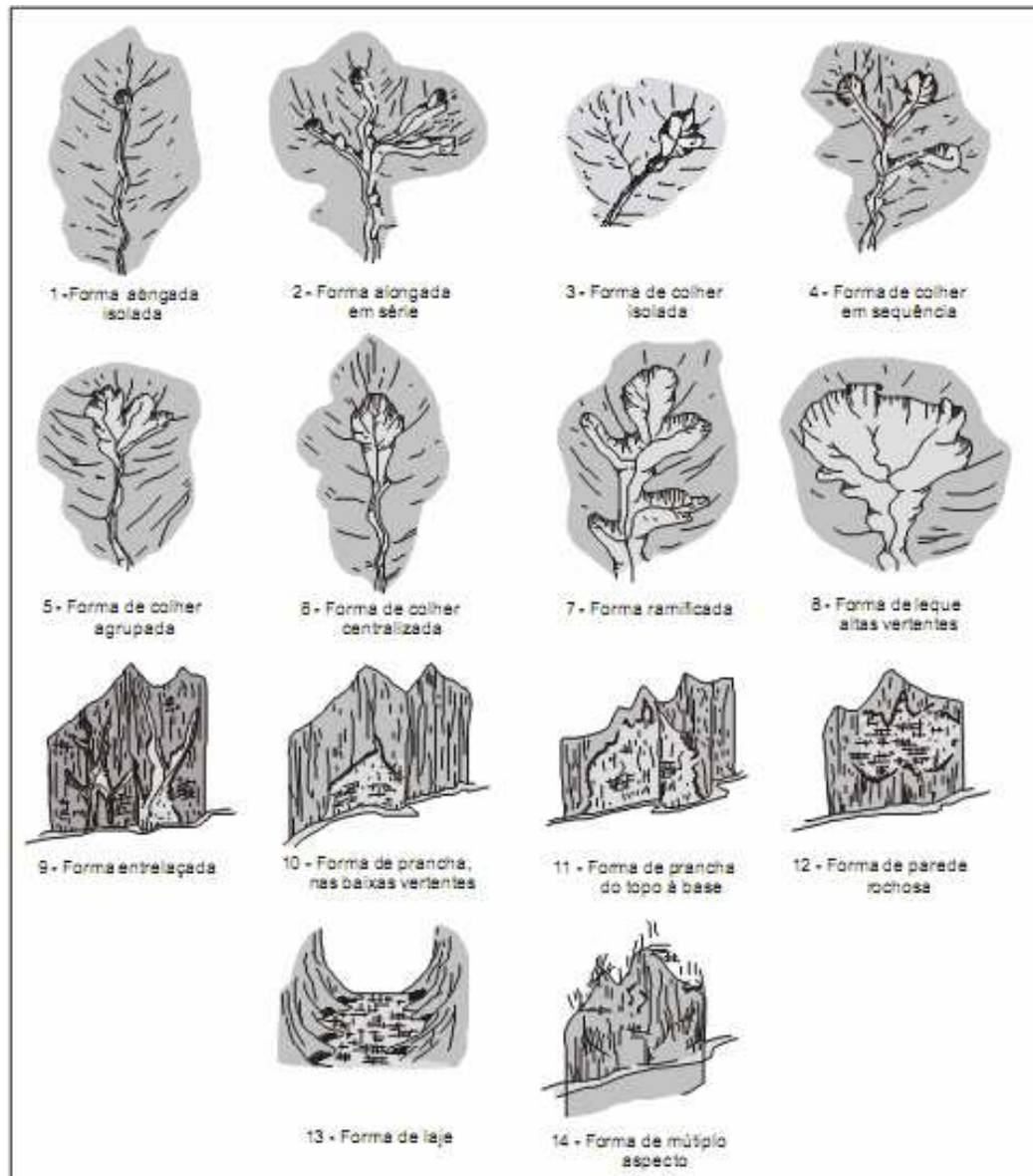


Figura 2.5 – Esboço das feições erosivas associadas a escorregamentos na Serra do Mar (DOMINGUES, 2001)

Para Oliveira (1999) as feições erosivas são encontradas no interior de ravinas e voçorocas, como resultado dos mecanismos responsáveis por estas erosões. São inúmeras as feições erosivas, entre elas podemos citar:

(a) *demoiselles*, também chamadas de erosão em pedestal, são uma forma de erosão com desenvolvimento lento, ocorrendo quando o solo erodível é protegido da ação do salpicamento, seja por seixo ou por uma camada de solo oxidada. Através deste tipo de erosão é possível deduzir, aproximadamente, qual o volume de solo erodido, tendo como base a altura dos pedestais.

(b) *sulcos e ravinas* formados na superfície exposta do talude, no interior das voçorocas, indicam o caminho preferencial do escoamento superficial concentrado.

(c) *alcovas de regressão* são feições erosivas que podem ser observados sob diferentes condições litológicas e climáticas, podendo ser esculpidas tanto pelo escoamento superficial na forma de filetes subverticais quanto pelo afloramento do lençol freático, ou pela combinação desses dois mecanismos.

(d) *filetes subverticais* são encontrados, preferencialmente, em paredes de voçorocas esculpidas em materiais pouco coesivos em contato com materiais de maior coesão. As marmitas ou panelas (*plunging pool*) resultam do efeito da erosão por queda-d'água na base do talude ou em degraus no interior das voçorocas.

(e) *movimentos de massa* constituem diversas feições erosivas no interior das voçorocas, como escorregamentos rotacionais e translacionais, corrida de lama e queda de torrões, sendo responsáveis pelo alargamento e avanço das incisões erosivas.

(f) *erosão interna (piping)* pode estar vinculada à erosão por voçoroca. Segundo Camapum de Carvalho et al. (2006a) erosão subterrânea ou *piping* é o processo de formação de tubos ou canais a partir da face de um talude através do transporte de partículas do solo, podendo evoluir para grandes cavidades no subsolo. A presença de terrenos estratificados é um condicionante geológico geralmente favorável à ocorrência de *piping*, pois concentra o fluxo em uma determinada camada em função da diferença de textura e, aliada ao relevo ondulado, é um fator determinante para a erodibilidade do solo/rocha.

(g) *pináculo*, comumente encontrada no interior dos anfiteatros das voçorocas. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Camapum de Carvalho et al. (2006a) essa forma de erosão deixa altos pináculos nos fundos das ravinas e voçorocas, sendo relacionado com a dificuldade do solo em ser erodido.

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

O processo erosivo possui diversos condicionantes, tornando-o dessa forma, um sistema complexo, que dependendo de seu grau de evolução, pode ser de difícil entendimento. Alguns autores como Galetti (1985), Bertoni e Lombardi Neto (1985), Guerra e Mendonça (2004), apontam os seguintes fatores como condicionantes da erosão: (a) clima; (b) relevo; (c) cobertura vegetal; (d) ação antrópica; (e) natureza do solo.

O clima é um fator importante, controlador do desenvolvimento de processos erosivos, atuando na desagregação da rocha e formação do solo.

Segundo Fendrich et al. (1991), locais de climas úmidos, tropical quente e temperado, com inverno seco e verão chuvoso, são mais propícios de serem afetados pelos processos erosivos.

A precipitação pluviométrica é o fator climático de maior importância no desenvolvimento dos processos erosivos. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), o volume e a velocidade da enxurrada dependem da duração, da frequência e da intensidade da chuva, sendo esta, o fator pluviométrico mais importante na erosão.

De acordo com Guerra e Mendonça (2004) fatores como a intensidade, duração, frequência, particularidades das gotas de chuva (velocidade de queda, diâmetro da gota e efeito *splash*) e a energia cinética da chuva natural, influenciam diretamente na erosão. Segundo eles, chuvas de maior intensidade e com alta frequência possuem uma grande energia cinética armazenada durante a sua queda e um grande poder erosivo.

Conforme Bertoni e Lombardi Neto (1985) uma chuva de 50 mm em período de 30 min poderia ter um peso de quase 560 t em um hectare, tendo, aproximadamente, 3 mm o diâmetro das gotas que cairia com uma velocidade de 8 m/s.

O potencial de desagregação, transporte e deposição das partículas pela ação da água, é chamado de erosividade. Segundo Bastos (1999), a ação erosiva da água-erosividade, depende da distribuição pluviométrica (chuva acumulada e intensidade de chuva).

Em relação ao relevo, fatores como o comprimento da rampa, declividade e o tipo de vertente, entre outros, influenciam no caminho percorrido pela água. Para Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Bastos (1999), na medida em que o comprimento da rampa e a declividade aumentam o caminho e a velocidade do escoamento superficial também aumentam e, conseqüentemente, aumenta seu poder de destacamento e transporte das partículas de solo.

Segundo autores como Galetti (1985), Oliveira e Brito (1998) e IPT (1991), 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. Ayres (1960), também considera a topografia um dos principais condicionantes, pois a declividade do terreno e o comprimento de rampa são determinantes na direção e na velocidade do escoamento.

O comprimento de rampa, segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), não é menos importante que a declividade, pois a medida que o caminho da água vai aumentando, não

somente estas águas vão se avolumando proporcionalmente, mas também, a sua velocidade de escoamento vai aumentando progressivamente.

Dados apresentados por Bertoni (1959 apud BERTONI E LOMBARDI NETO, 1985) mostram que um terreno com 20 m de comprimento e 20% de declividade tem a mesma perda de solo que um terreno com 120 m de comprimento e com apenas 1% de declividade.

A cobertura vegetal tem um papel fundamental, pois atua no sentido de diminuir a velocidade e facilitar a infiltração da água. Para Ayres (1960), a cobertura vegetal é considerada importante, pois diz respeito à permeabilidade/impermeabilidade do solo e das camadas adjacentes. A cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão, pois amortece o impacto das gotas de chuva, diminuindo seu potencial de destacamento e transporte das partículas de solo.

O efeito da vegetação pode ser enumerado da seguinte forma: (a) proteção direta contra o impacto das gotas de chuva; (b) dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo; (c) decomposição das raízes das plantas que, formando canais no solo, aumentam a infiltração da água; (d) melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica e húmus (através da decomposição da vegetação) aumentando sua porosidade e a capacidade de retenção de água; e (e) diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície. Portanto, a cobertura vegetal tem influência direta sobre o escoamento superficial e infiltração da água no solo. A mudança do escoamento superficial e subterrâneo, como consequência do desmatamento, é a principal causa dos processos erosivos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; INFANTI Jr e FORNASARI FILHO, 1998).

As formas de uso e manejo do solo representam o fator decisivo na aceleração dos processos erosivos. De acordo com Galeti (1985), Fendrich et al. (1991), Panachuki et al. (2006), Nunes e Cassol (2008) e outros, em áreas rurais os solos são mais vulneráveis a erosão hídrica quando:

(a) é retirada a cobertura vegetal, a agricultura é praticada de forma incorreta (preparo e o plantio realizados em regiões de relevo acidentado, queima dos restos das culturas, etc.);

(b) o solo sofre compactação pelo pisoteio do gado e excessivo movimento de máquinas e implementos agrícolas;

(c) ocorrem aberturas de valas perpendiculares às curvas de nível;

(d) abrem estradas vicinais sem os devidos cuidados com a rede de drenagem.

Em áreas urbanas, a aceleração da erosão se dá pela intervenção humana, principalmente relacionada às obras de engenharia como:

- (a) a exposição de taludes de corte em rodovias e barragens não protegidos;
- (b) a exploração de áreas para a retirada de materiais de empréstimo;
- (c) a execução de loteamentos sem os devidos cuidados com a drenagem;
- (d) obras de retificação de rios e canais, entre outros.

A natureza do solo/rocha determina a susceptibilidade dos terrenos à erosão (propriedade chamada de erodibilidade). Autores como Fendrich et al. (1991) são específicos na descrição das características do solo condicionantes do processo erosivo como sua textura, estrutura, estratificação, permeabilidade, teor de umidade e composição. A textura (características granulométricas), ou seja, o tamanho das partículas do solo influi na capacidade de infiltração e absorção d'água, interferindo na energia das enxurradas e na coesão dos solos.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1985), solos de caráter arenoso são mais vulneráveis ao processo erosivo, mesmo sendo normalmente porosos, permitindo rápida infiltração das águas e retardando o escoamento superficial. Para estes autores, os solos com uma pequena quantidade de partículas tamanho argila possuem baixa coesão, tendo uma menor resistência à erosão, sendo esta verificada mesmo em pequenas enxurradas. Consideram importante, no controle a erosão, a quantidade de matéria orgânica (MO) no solo, pois retém de duas a três vezes o seu peso em água, aumentando assim a infiltração, resultando numa diminuição nas perdas de erosão.

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 e/ou grau de saturação no começo da chuva; sucção e o grau de agregação do solo. Solos arenosos, com grandes espaços porosos, pode-se esperar 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. As partículas finas do solo, quando estão bem agregadas, possuem espaços porosos maiores, proporcionando, maior velocidade de infiltração (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985; BIGARELLA, 2003; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006a)

O arranjo das partículas no solo influencia a capacidade de infiltração, absorção da água da chuva e arraste de partículas. Segundo Salomão e Iwasa (1995 apud INFANTI JR e FORNASARI FILHO, 1998), dependendo da estruturação das partículas, os solos argilosos podem se apresentar altamente porosos e até mais permeáveis que solos arenosos.

A espessura do solo e o contato com o substrato rochoso interferem na rapidez de saturação do solo e no início do escoamento superficial. Solos rasos permitem rápida saturação dos horizontes superficiais, contribuindo para a formação das enxurradas. Estes

solos se apresentarem uma camada argilosa subjacente a ele, estão mais vulneráveis à erosão (solos com horizonte B textural – Argissolos). Entretanto, os solos profundos apresentam maior capacidade de infiltração das águas pluviais (FENDRICH et al., 1991; AZEVEDO, 2004).

Segundo Suguio (2003) a erosão é influenciada também pela litologia e estruturas das rochas como a presença de estratificações, foliações, xistosidade e gnaissificação, como também por fatores tectônicos, tais como: falhas, dobras e juntas. O domínio geológico e pedológico de ocorrência de voçorocas no Brasil é muito variável, sendo encontradas estas feições em várias regiões (NOGAMI e VILLIBOR, 1995; BASTOS, 1999).

## **2.4 Erodibilidade dos solos**

De acordo com Silva et al. (2000) a erosão hídrica deve ser estudada considerando-se 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 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, sendo uma propriedade complexa em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. Esta propriedade tem despertado um grande interesse na pesquisa da erosão, por ser governado pelos atributos intrínsecos do solo, os quais podem variar de um solo para o outro, ou para o 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 2.2 apresenta o enfoque dado por estas áreas de conhecimento.

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

Tabela 2.2 - 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.

#### 2.4.1 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).

Os 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:

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

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/há.MJ.mm),

L é o fator comprimento de rampa (adimensional),

C é o fator de cobertura vegetal (adimensional),

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

S é o fator grau de declividade (adimensional).

A determinação dos valores de perda de solo provocados pela erosão laminar, está 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/camadas 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 (Tabela 2.3),

$P_1$  = parâmetro que descreve a permeabilidade (Tabela 2.4).



Tabela 2.3 – Classificação da estrutura (WISCHMEIER E SMITH, 1978)

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

Tabela 2.4 – 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 foi classificado de acordo com Carvalho (1994, apud Cavalcante e Araújo, 2005) de acordo com a Tabela 2.5. 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 ( $g=9,8m/s^2$ ).

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 2.5 – Classificação do fator K de erodibilidade (CARVALHO, apud CAVALCANTE e ARAÚJO, 2005)

Fator K de erodibilidade (t/ha/(t.m/ha.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 as parcelas de solo são submetidas a ciclos de chuvas naturais ou simuladas. 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 (2006), Freitas et al. (2008) e Silva et al (2009). Nestes trabalhos busca-se determinar a perda de solo (desagregação) e tensão cisalhante hidráulica crítica.

O modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), 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 e 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.

Cantalice et al. (2005) considera que 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 do solo 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).

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.

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

Segundo Vilar e Prandi (1993), no âmbito da Mecânica dos Solos, tem sido pequeno 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 (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 - 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.

## 2.5 Ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade

A avaliação da erodibilidade de um solo pode ser analisada por métodos diretos e indiretos. Alguns ensaios como os realizados para a caracterização física, considerados ensaios de avaliação indireta da erodibilidade são os seguintes: ensaio de desagregação, perda de massa por imersão e infiltrabilidade da metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1979) e o ensaio de cone de laboratório. Para Jacintho et al. (2006), o ensaio de desagregação, juntamente com o ensaio chamado Inderbitzen, são formas diretas de avaliação da erodibilidade.

Bastos (1999) apresentou uma nova proposta metodológica com uma abordagem geotécnica para avaliação da erodibilidade de solos residuais. Tal proposta possui como base o estudo da erodibilidade, em perfis de solos residuais não saturados, realizado pelo autor em sua Tese de Doutorado. A 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 a 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 primordiais na análise, não só da erodibilidade, como também em qualquer outro tipo de propriedade do solo. Sua inter-relação com a erodibilidade não é considerada simples e direta para alguns autores, como Jacintho et al.(2006). Para estes autores, 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, conferem uma maior estabilidade e resistência ao solo, tornando-o menos erodível, mesmo apresentando uma baixa plasticidade (CARDOSO, 2002 apud JACINTHO et al., 2006).

Segundo Jacintho et al.(2006), a porosidade e a distribuição dos poros são consideradas as propriedades físicas mais relevantes na inter-relação com a erodibilidade, pois os fenômenos de sucção, coesão e permeabilidade são afetados devido à concentração de macroporos interconectados.

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 plasticidade, 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 dos solos tende a ser inversamente proporcional ao grau de saturação sem mostrar, no entanto, qualquer tendência com os demais parâmetros geotécnicos estudados isoladamente.

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.

### 2.5.2 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 destilada, sendo considerada como uma avaliação indireta, visual e qualitativa da estabilidade, não sendo normatizado.

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 apresentar bons resultados, auxiliando no direcionamento de outros ensaios de erosão.

Em se tratando da descrição qualitativa da amostra são observadas as seguintes dinâmicas na amostra: (a) abatimento (*slumping*); (b) fraturamento no topo; (c) rupturas nas bordas; (d) velocidade de desagregação; (e) grau de dispersão das partículas de solo; (f) velocidade de ascensão capilar; e (g) 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 arestas submetidas a imersão total durante 24 horas. 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 (Wótima) 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 visto que o processo de saturação 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.

### 2.5.3 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 desenvolvidos em países de climas frios e temperados.

Alguns ensaios desta metodologia serviram como base para que Nogami e Villibor (1979) atribuíssem critérios de erodibilidade, desta forma, direcionando pesquisas no campo da erodibilidade dos solos, 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.

Esta avaliação é fundamentada em dois parâmetros: o coeficiente de sorção ( $s$ ) obtido no ensaio de infiltrabilidade, e o coeficiente ( $\pi$ ) obtido pelo ensaio de perda de massa por imersão modificado (ensaio de erodibilidade específica), ensaio similar àquele estabelecido para a classificação MCT.

Através da divisão do parâmetro  $\pi$  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) (Figura 2.6), sendo baseado em um número maior de ensaios. Para Pejon (1992 *apud* VILAR e PRANDI, 1993) a relação entre  $\pi$  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.

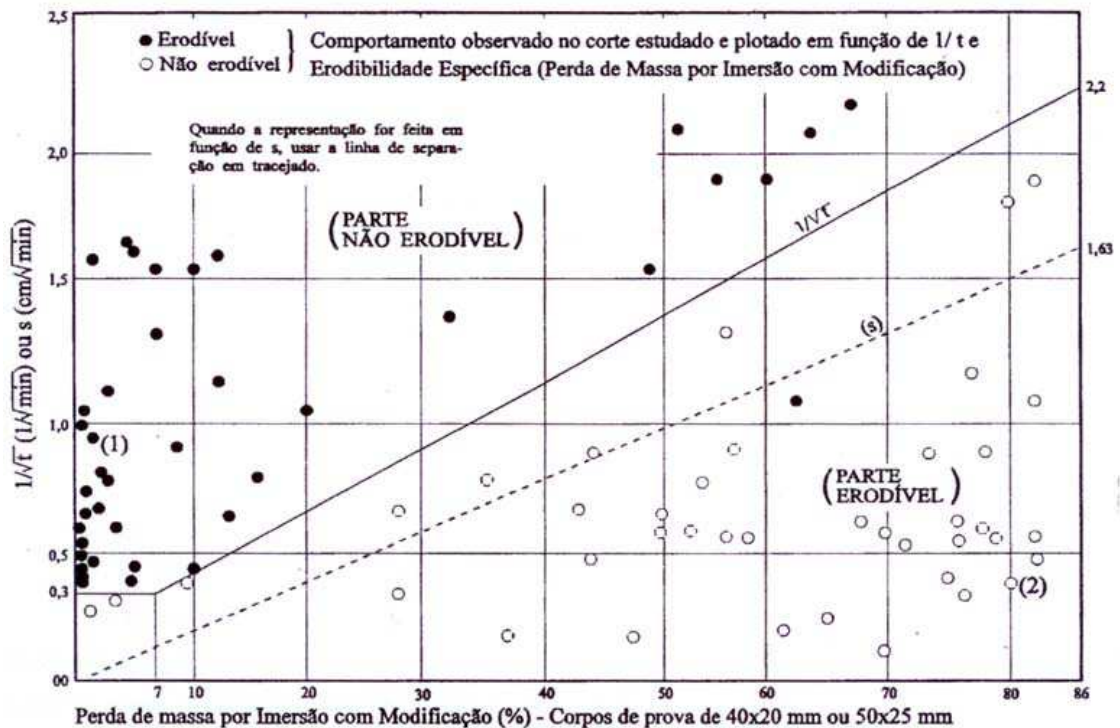


Figura 2.6 – Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995)

### **Ensaio de infiltrabilidade**

Conforme Nogami e Villibor (1979 e 1988) o ensaio de infiltrabilidade consiste na medição da quantidade de água que infiltra em corpos de prova de 5 cm de diâmetro, pela sua base, em função da raiz quadrada do tempo.

Para Bastos et al. (2000) a infiltrabilidade é uma propriedade hidráulica dos solos não saturados o qual representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. Uma descrição do objetivo deste ensaio e sua aplicação em pavimentos econômicos pode ser encontrada em Villibor e Nogami (2009).

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 a um tubo capilar, nos tempos que seguem uma relação quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36 min) até o deslocamento do menisco cessar. São plotados os deslocamentos do menisco (cm) pelo tempo, em uma relação quadrática ( $\text{min}^{1/2}$ ), onde se observe uma tendência retilínea dos pontos, onde será retirado o coeficiente de sorção ( $s$ ) (Figura 2.7).



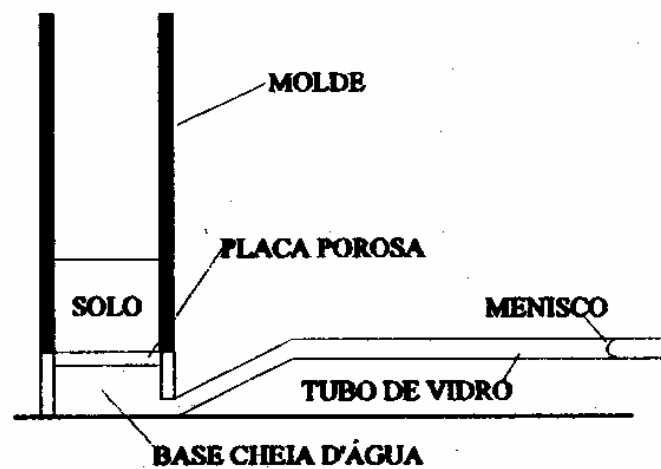


Figura 2.7 – Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. (adaptado de Nogami et al. (1987))

Tatto (2007) e Ávila (2009), 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 modificado***

Este ensaio, também chamado de ensaio de erodibilidade específica, consiste, segundo Nogami e Villibor (1979), em submergir em água, durante 20 h, amostras compactadas de solo confinadas em molde.

Recolhe-se o solo desprendido do molde e determina-se a sua massa seca. 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 2.8 apresenta o esquema do ensaio de erodibilidade específica, que neste estudo, assim como em Bastos (1999), Tatto (2007) e Ávila (2009) foi realizado com a amostra rente ao molde, sem a borda livre.

Bastos (1999), Tatto (2007) e Ávila (2009) 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), imersas em água por 20 horas. A perda de massa por imersão ( $p_i$ ), representa para tais autores, o grau de desagregação do solo sob a ação estática da água.

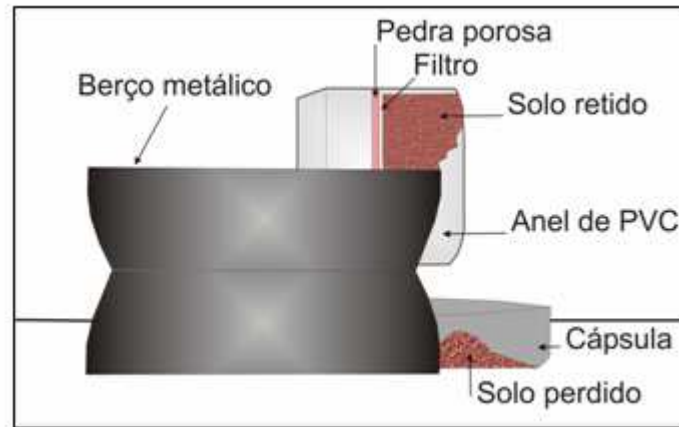


Figura 2.8 Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT

#### 2.5.4 Ensaio de Inderbitzen

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

De acordo com 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. 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.

Com o aprofundamento teórico em relação aos estudos voltados para obtenção dos índices de erodibilidade do solo conseguido via dados ensaio Inderbitzen, 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 do ensaio Inderbitzen (AGUIAR e ROMÃO, 2009).

Autores como Fácio (1991), Bastos (1999) e Santos (1997, apud JACINTHO et al.,2006), 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.

Este mesmo autor criou duas bacias de uniformização da água e a fixação rosqueável dos corpos de prova em lugar do encaixe, sendo que normalizou o ensaio para os solos estudados em uma rampa de 10°, 20 minutos de ensaio, uma vazão de 50 ml/s e a necessidade de embebedimento da amostra por 15 minutos.

Santos (1997 apud JACINTHO et al.,2006) utilizando as mesmas condições padronizadas por Fácio, 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 2.9). As amostras foram ensaiadas nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida. A rampa permitiu 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.

Fragassi (2001a) ao estudar os solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa, Minas Gerais, aumentou para o diâmetro da amostra utilizado por Santos, 15,2 cm.

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°.

Ao avaliar a erodibilidade dos solos de Santo Antônio do Leite, Minas Gerais, Santos (2002) fixou a inclinação de 10°, uma vazão de 1,5 l/min (primeiros 30 minutos de ensaio) em um tempo total de 45 minutos. Nos primeiro 30 minutos, o material erodido era recolhido nos tempos 5, 10, 15 e 30 minutos, posteriormente, a vazão era modificada para 6 l/min e 9 l/min, respectivamente, sendo feita a coleta do material em intervalos de 5 minutos.

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°.

Outros autores propuseram mudanças ainda mais significativas ao aparelho Inderbitzen na tentativa de simular o efeito da precipitação sobre as amostras de solo. Motta (2001 apud JACINTHO et al.,2006) ao estudar a erodibilidade de solos das voçorocas de Campo Grande, acoplou um sistema de simulação de chuva ao aparelho de Inderbitzen a uma altura de 0,38 m da face da amostra. Este mesmo autor atribuiu 10° como declividade constante da rampa, sem que a amostra sofra a ação do escoamento superficial. Concluiu que durante 20 minutos de precipitação, o corpo de prova perdeu mais partículas de solo em relação ao ensaio de Inderbitzen realizado em 30 minutos.

Freire (2001) expôs as amostras de solo sobre efeito dos fenômenos de desagregação seguido do escoamento superficial, resultando no novo ensaio "GES" – Grau de Erodibilidade do Solo. O equipamento consiste em duas linhas de chuveiramento obtidas através de tubos perfurados, dispostos a uma altura de 0,20 m, sendo sua pressão controlada por manômetros. Concluiu que tal equipamento simula o fenômeno de selamento do solo, com a diminuição do índice de vazios e permeabilidade (K), observando a diminuição de material carregado a partir da primeira hora de ensaio.

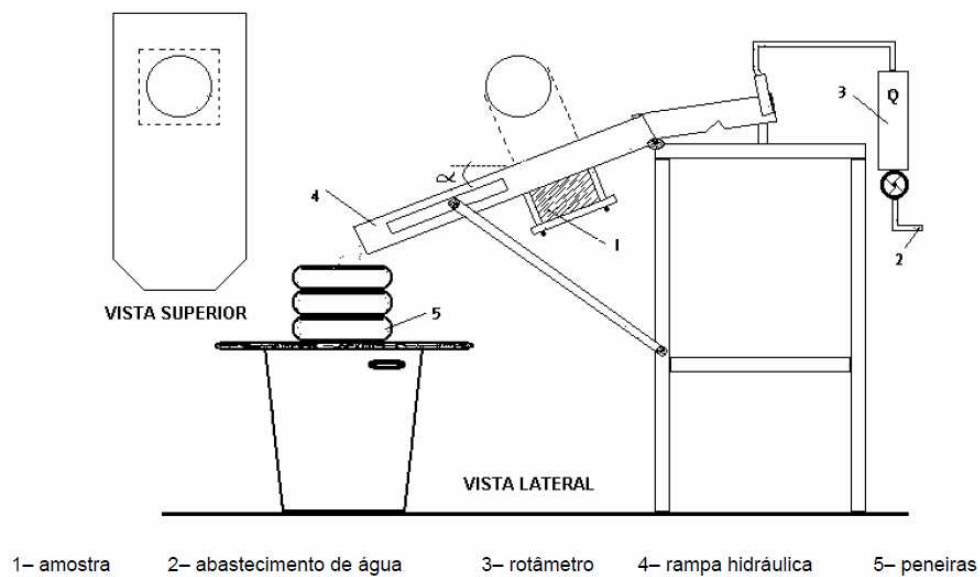


Figura 2.9- Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS. (BASTOS,1999)

Neste Capítulo 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 à realidade de seus estudos. Neste trabalho, segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, entende-se por voçoroca uma incisão erosiva de grandes proporções, cuja característica principal é o afloramento do lençol freático no seu interior.

Esta revisão bibliográfica forneceu o embasamento teórico para esta pesquisa, possibilitando conhecer as fases ou mecanismos do processo erosivo; relacionar os principais fatores que o condicionam; discutir a dinâmica envolvida na erodibilidade do solo; e elencar alguns ensaios geotécnicos para a avaliação direta e indireta da erodibilidade de materiais que compõem a voçoroca de São Francisco de Assis.

Verifica-se a importância e eficácia dos ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade do solo/rocha. Além disso, através deles é possível identificar vários parâmetros que influenciam nos processos erosivos como umidade, declividade, intensidade do escoamento superficial, propriedades físicas do solo/rocha, entre outros.

Portanto, buscou-se abordar os principais temas relacionados à erosão, cuja introdução de ensaios de laboratório comprova (ou não) a influência dos inúmeros fatores teoricamente envolvidos neste processo. Nos capítulos seguintes são apresentados, em detalhes, os ensaios utilizados e os resultados deles obtidos.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia aplicada neste estudo é constituída por três etapas de trabalho, em que foram desenvolvidas as seguintes atividades: (a) etapa de gabinete: a qual configura a base da pesquisa, onde foi realizado o levantamento dos materiais disponíveis (mapas, fotografias aéreas, imagens de satélite, teses, dissertações, artigos sobre erosão); (b) investigação de campo: quando foram realizadas as observações relacionadas aos processos erosivos, realizado um estudo geológico - geotécnico de detalhe da voçoroca, onde foram escolhidas cinco camadas para coleta de amostras deformadas e indeformadas para posterior realização dos ensaios geotécnicos; (c) ensaios laboratório: nesta etapa foram realizados os ensaios de caracterização, ensaios químicos, ensaios de resistência ao cisalhamento direto e ensaios para avaliação indireta e direta da erodibilidade; (d) análise dos resultados segundo a abordagem geotécnica para previsão da erodibilidade proposta por Bastos (1999).

Este estudo é parte de um trabalho realizado por dois grupos de pesquisa, do GEOMA e LAGEOLAN da UFSM, formados por alunos de graduação e mestrado, orientados por Rinaldo José Pinheiro, engenheiro civil e professor do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e pela professora do Departamento de Geociências, a geóloga Andrea Valli Nummer. Esta metodologia serviu de base para este e os demais trabalhos de conclusão de curso e dissertação de mestrado de TATTO (2007), ÁVILA (2009), FERNANDES (2011), STORGATTO (2012) e SANT'ANA (2012).

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

O levantamento bibliográfico teve como base uma revisão, em livros, publicações em congressos e simpósios, teses e dissertações de temas relacionados com a geologia geral da área, processos erosivos (envolvendo seus conceitos, dinâmica, classificações, mecanismos, feições e os fatores de influência, com ênfase ao processo de voçorocamento, objeto de pesquisa deste trabalho) e ensaios de laboratório para a caracterização geotécnica e avaliação da erodibilidade mais comumente usados no meio geotécnico.

### 3.2 Investigação de campo

O reconhecimento regional da área de estudo (região oeste do Rio Grande do Sul, municípios de São Francisco de Assis, Manoel Viana e Nova Esperança do Sul) teve como objetivo conhecer as litologias, aspectos de relevo, solos e processos erosivos que ocorrem nesta região. Para auxiliar neste trabalho de campo, foram utilizados mapas topográficos em escala 1:50.000, fotografias aéreas, GPS e bússola.

Após esta etapa de campo, foi escolhida, para estudo de detalhe, uma voçoroca de grandes proporções, localizada às margens da RS 377, no município de São Francisco de Assis – RS.

Na área da voçoroca foi realizado o mapeamento geológico de detalhe (Escala 1:100) onde foi elaborado o perfil estratigráfico descrevendo e delimitando a espessura das diferentes camadas de rocha e de solos. Além disto, foram descritas as principais feições erosivas presentes no interior da voçoroca.

Com base na análise geológica, foram escolhidas cinco camadas para a análise geotécnica. As primeiras camadas escolhidas foram os horizontes A, B e C pedológicos, localizados 20 cm, a 70 cm e a 150 cm de profundidade, respectivamente, e as outras camadas foram de arenito fino a médio (camadas 2C e 1A do perfil estratigráfico), tendo a camada 2C, 6,0 m de espessura e localizando-se a, aproximadamente, 8,0 m de profundidade e Camada 1A, com 0,83 m de espessura, de cor avermelhada a esbranquiçada, localizada na base da voçoroca, a 18 m de profundidade (Figura 3.1).

Além destas, foram coletadas amostras deformadas para caracterização granulométrica das camadas de rochas constituintes do perfil estratigráfico. A análise granulométrica por peneiramento e sedimentação por densitometria foi realizada com base na norma ABNT NBR 7181/84 (Solo – Análise granulométrica), sendo classificada através da escala Wentworth.

A preparação de amostras deformadas e indeformadas (Figuras 3.2 e 3.3) para a realização dos ensaios de caracterização e erodibilidade respectivamente, foi realizada de acordo com a norma ABNT 6457/86 (Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização).

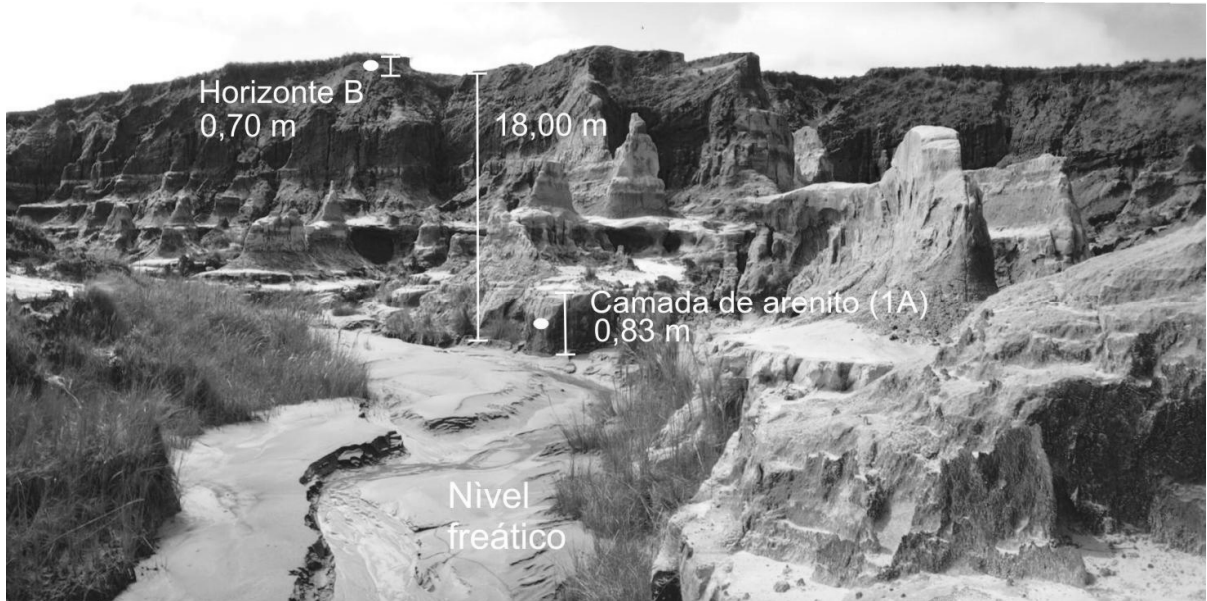


Figura 3.1 – Vista geral da voçoroca (TATTO, 2007)



Figura 3.2 – Coleta de amostras indeformadas do horizonte B pedológico e do arenito (TATTO, 2007)



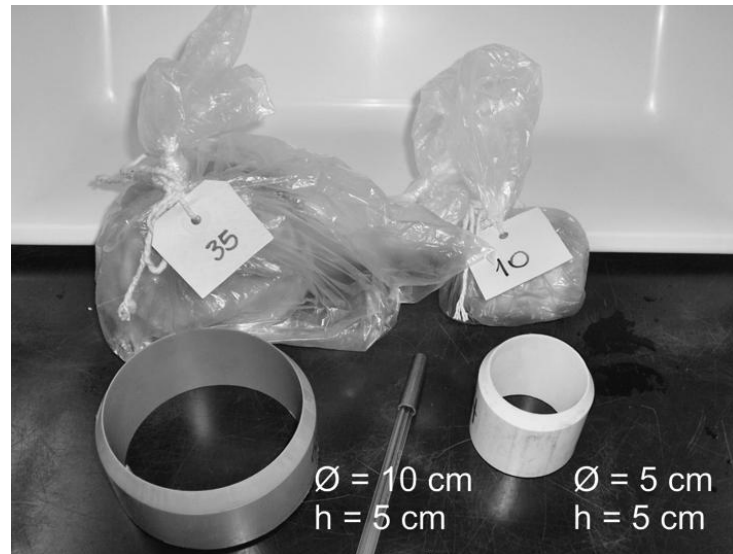


Figura 3.3 – Anéis utilizados para a coleta de amostras indeformadas(TATTO, 2007)

As amostras deformadas representativas de cada horizonte e camada identificada foram retiradas com pá e espátulas, após a limpeza superficial do perfil, e acondicionada em sacos plásticos (LE MOS e SANTOS, 1982). Em pequenas trincheiras abertas nas paredes da voçoroca, as amostras indeformadas, foram moldadas em anéis de PVC e anéis metálicos que são utilizados nos ensaios de avaliação direta e indireta de erodibilidade.

As amostras indeformadas foram coletadas em dois tipos de anéis de PVC: (a) anéis de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizados para os ensaios de Inderbitzen e desagregação e (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 modificado). Os anéis metálicos quadrados (5x5x2cm) foram utilizados para os ensaios de cisalhamento direto.

A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de amostras indeformadas moldadas no perfil em estudo.

Tabela 3.1 – Número de amostras indeformadas coletadas e seus respectivos ensaios

Dimensão dos anéis (cm) ( $\Phi$ = diâmetro, h = altura)	Ensaio	Nº amostras por camada	Nº amostras total
$\Phi = 10, h = 5$	Inderbitzen	24	120
	Desagregação	6	30
$\Phi = 5, h = 5$	Infiltrabilidade	9	45
	Perda de massa por imersão	9	45
5 x 5 x 2	Cisalhamento direto	12	60

Para caracterização da condutividade hidráulica in situ foram realizados ensaios de piezômetros escavados nos horizontes A e B. A metodologia para execução deste ensaio está bem detalhada nos trabalhos de Bortoli (1999) e Pinto (2005). A Figura 3.4 apresenta uma sequência de fotos mostrando todas etapas da execução do ensaio.



Figura 3.4 – Etapas de execução do ensaio in situ (FERNANDES, 2011)

### 3.3 Ensaios de laboratório

Nesta etapa do trabalho foram realizados os ensaios de caracterização, ensaios químicos, ensaios de cisalhamento direto e ensaios para avaliação indireta e direta da erodibilidade.

### 3.3.1 Ensaio de caracterização e químicos

Para a realização dos ensaios de caracterização as amostras foram preparadas conforme os procedimentos da ABNT 6457/86 (Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização). A caracterização dos solos e rochas da voçoroca 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).

Foi realizada pelo Laboratório Central de Análises de Solo, do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria, a análise química das amostras de solo extraídas de um perfil característico da área de estudo. Nesta análise foram realizados para cada amostra, num total de 7 amostras, a determinação da textura, da porcentagem de argila, do pH, da porcentagem de matéria orgânica, da porcentagem 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

Na execução deste ensaio foram seguidos os procedimentos da normativa americana ASTM: D3080-90. O ensaio de cisalhamento direto foi executado numa caixa bipartida que continha a amostra indeformada, a qual era colocada na prensa de cisalhamento aonde a metade superior do corpo de prova deslizava em relação à inferior. O corpo de prova era inicialmente comprimido por uma força normal, esperava-se estabilizar as deformações (variação de altura) e posteriormente aplicava-se uma força cisalhante que impõe um deslocamento horizontal à amostra até a ruptura do corpo de prova. 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, um ensaio utilizando amostras de solo no teor de umidade natural, seco ao ar e no mínimo 12 horas de saturação

em água. Para cada ensaio foram utilizadas quatro tensões, sendo elas de 25, 50, 100 e 200 kPa.

### 3.3.3 Ensaio para avaliação indireta da erodibilidade

A avaliação indireta da erodibilidade foi realizada através dos ensaios de desagregação e 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 circular não confinada, quando submetida à ascensão do nível de água destilada, até estar totalmente submersa, totalizando 25 horas de ensaio. Para a realização deste ensaio foi adotada a metodologia proposta por Santos (1997 apud BASTOS, 1999).

Foram coletadas amostras indeformadas de solo, com anéis cilíndricos biselados de PVC, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Os ensaios foram 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 postas sobre um papel filtro e uma pedra porosa (Figura 3.5), permanecendo sob quatro condições de submersão:

- (a) com o nível d'água na base da amostra – 30 minutos;
- (b) com o nível d'água a 1/3 da amostra – 15 minutos;
- (c) com o nível d'água a 2/3 da amostra – 15 minutos; e
- (d) com a amostra totalmente submersa – 24 horas .

A Figura 3.6 mostra o esquema das condições de submersão, representando as etapas do ensaio de desagregação e a amostra para o ensaio.



Figura 3.5 – Retirada da amostra do anel para o ensaio de desagregação (TATTO, 2007)

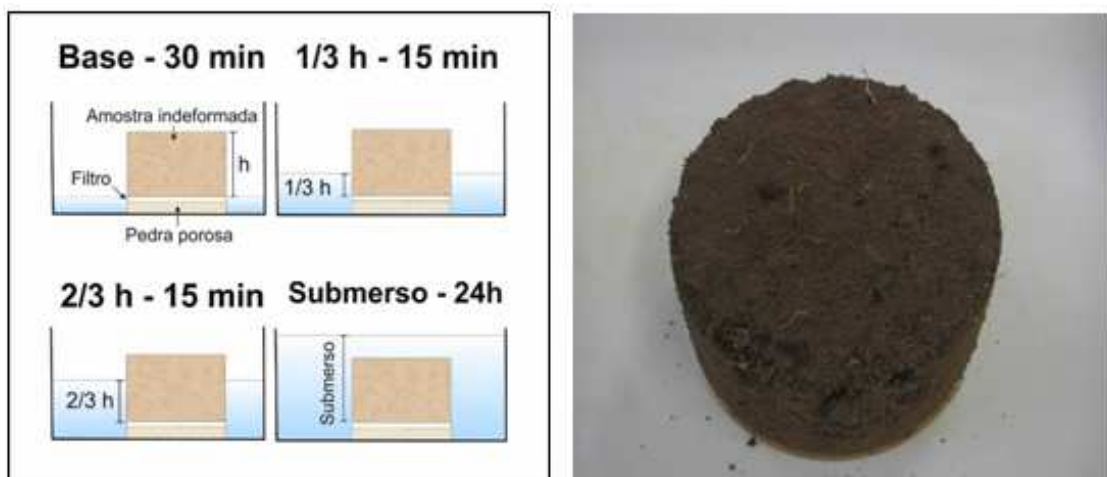


Figura 3.6 – À esquerda esquema das condições de submersão, representando as etapas do ensaio de desagregação. À direita, amostra pronta para o ensaio (TATTO, 2007)

A desagregação (ou *slaking*) pode ser compreendida como sendo o processo de ruína de uma porção de solo (ou rocha) não confinada imersa em água. Os solos erodíveis tendem a desagregar em água. A desagregação em água está associada a fenômenos de dispersão e de desaeração de solos não saturados.

O resultado do ensaio é 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 ou inchamento da amostra, o raio de dispersão das partículas, a velocidade de desagregação das mesmas, a formação de fissuras no topo da amostra e as possíveis rupturas nas suas bordas.

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.

### 3.3.3.2 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT

Através da metodologia MCT foi possível a previsão do comportamento dos solos frente à erosão. Essa metodologia teve origem com Nogami e Villibor (1979), sendo fundamentada em dois parâmetros: o coeficiente de sorção ( $s$ ), obtido no ensaio de infiltrabilidade, e a perda de massa por imersão modificado ( $\pi$ ), obtido no ensaio de erodibilidade específica. Através da divisão do parâmetro " $\pi$ " por " $s$ ", é possível a classificação dos solos em relação ao grau de erodibilidade, sendo considerados por Nogami e Villibor (1979), solos erodíveis quando esta relação for superior ao valor 52.

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

Este ensaio teve como objetivo a quantificação da velocidade de ascensão capilar em amostras de solo. 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 (reensaiando as amostras), estando confinadas em anéis cilíndricos de PVC, com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

O equipamento consiste em um plano de madeira onde é acoplada uma régua graduada e um tubo capilar de vidro (com diâmetro de 6 mm), estando este ligado a um reservatório (pedra porosa de granulação aberta) com o topo livre. O tubo capilar é preenchido por água até que a mesma extravase no topo do reservatório da pedra porosa, sendo colocado, neste lugar, um papel filtro logo após o transbordamento.

A amostra indeformada foi colocada confinada em seu anel de PVC, sobre o filtro e o reservatório (Figuras 3.7 e 3.8).

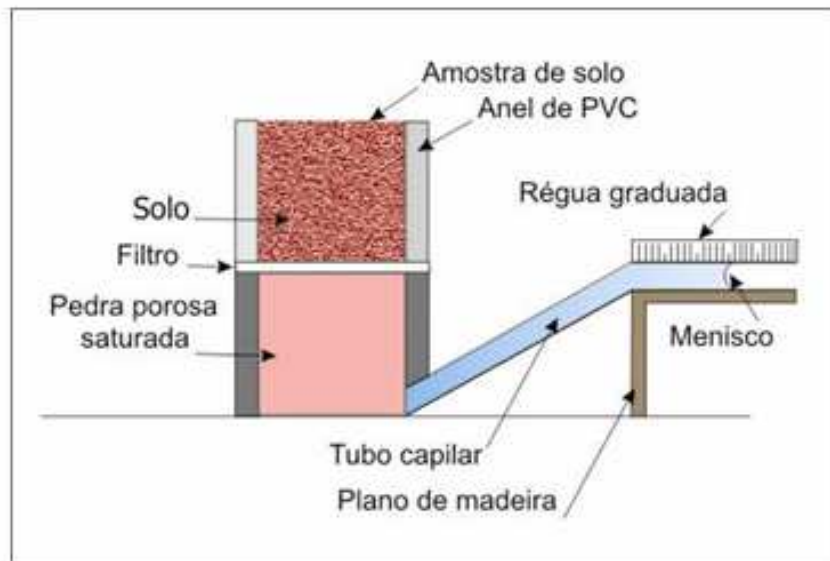


Figura 3.7 – Esquema do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. (TATTO, 2007)



Figura 3.8 – Ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT

Foram realizadas medidas do deslocamento do menisco (cm) dentro do tubo capilar em uma relação de tempo quadrática (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 minutos e assim por diante) até o momento em que o deslocamento cessou, ou seja, até o momento em que a amostra se mostrou totalmente saturada pela ascensão capilar da água.

Com os dados referentes ao deslocamento do menisco (cm) e o tempo ( $\text{min}^{1/2}$ ), foi possível a elaboração de um gráfico (Figura 3.9) de uma curva típica onde seu trecho inicial retilíneo forneceu o coeficiente de sorção "s" ( $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ), determinado através da relação:

$$s = \frac{(L_2 - L_1)S}{10(t_2 - t_1)A} \quad (3.1)$$

Onde:

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  $t_1$

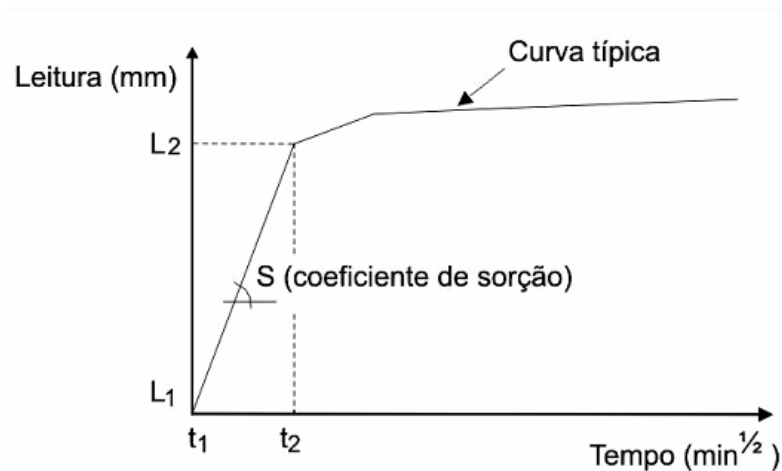


Figura 3.9 – Curva típica do deslocamento do menisco versus tempo para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. (adaptado de Bastos (1999))

### ***Ensaio de perda de massa por imersão modificado ( $\pi_i$ )***

Este ensaio, também chamado de erodibilidade específica, teve como objetivo a avaliação quantitativa do potencial de desagregação de uma amostra indeformada de solo, quando submersa em água.

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 (amostras oriundas do ensaio de infiltrabilidade), estando confinadas em anéis cilíndricos de



PVC (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 (Figura 3.10), sendo colocado um papel filtro e uma pedra porosa na parte interna no anel.



Figura 3.10 – Redução da altura da amostra no ensaio de perda de massa por imersão modificado

O sistema é formado por um berço metálico que suporta a amostra confinada, sendo esta colocada na horizontal sobre o berço com 1 cm de borda livre (Figura 3.11). Logo abaixo desta borda é colocada uma cápsula para recolher o possível material desagregado do anel, durante o período em que este sistema estiver imerso em água (20 horas).

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. O parâmetro "pi" (%) é determinado através da relação:

$$pi = \frac{p_{\text{seco}d}}{P_{\text{seco}t}} \quad (3.2)$$

Onde:

$p_{\text{seco}d}$  = peso de solo seco desagregado,

$p_{\text{seco}t}$  = peso de solo seco total da amostra.

**Erro! A referência de hiperlink não é válida.**

Figura 3.11 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT. (TATTO, 2007)

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

É um ensaio 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 normatizado.

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.

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/rocha indeformada, 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. As amostras estão confinadas em anéis de PVC, biselados na parte inferior, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura.

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 para o ensaio é controlada por um rotâmetro, estando este interligado a canalização. A água e o solo desagregado pelo fluxo são coletados em baldes plásticos de 60 litros 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), 0,074 mm (peneira #200) (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Equipamento de Inderbitzen (TATTO, 2007)

As variáveis de ensaio adotadas nesta pesquisa foram as mesmas utilizadas por Bastos (1999). As inclinações da rampa metálica foram de  $10^\circ$ ,  $26^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $54^\circ$ , 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 (por ascensão capilar, por no mínimo 24 horas). O material erodido foi recolhido por diferentes baldes plásticos nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos.

Os procedimentos de ensaio são descritos a seguir:

(1) as amostras de solo indeformadas tiveram sua parafina retirada, rasadas e, posteriormente pesadas para a caracterização física (Figura 3.13a);

(2) nas amostras do horizonte B, onde existiam raízes, estas foram aparadas com uma tesoura sem que a estrutura do solo fosse destruída;

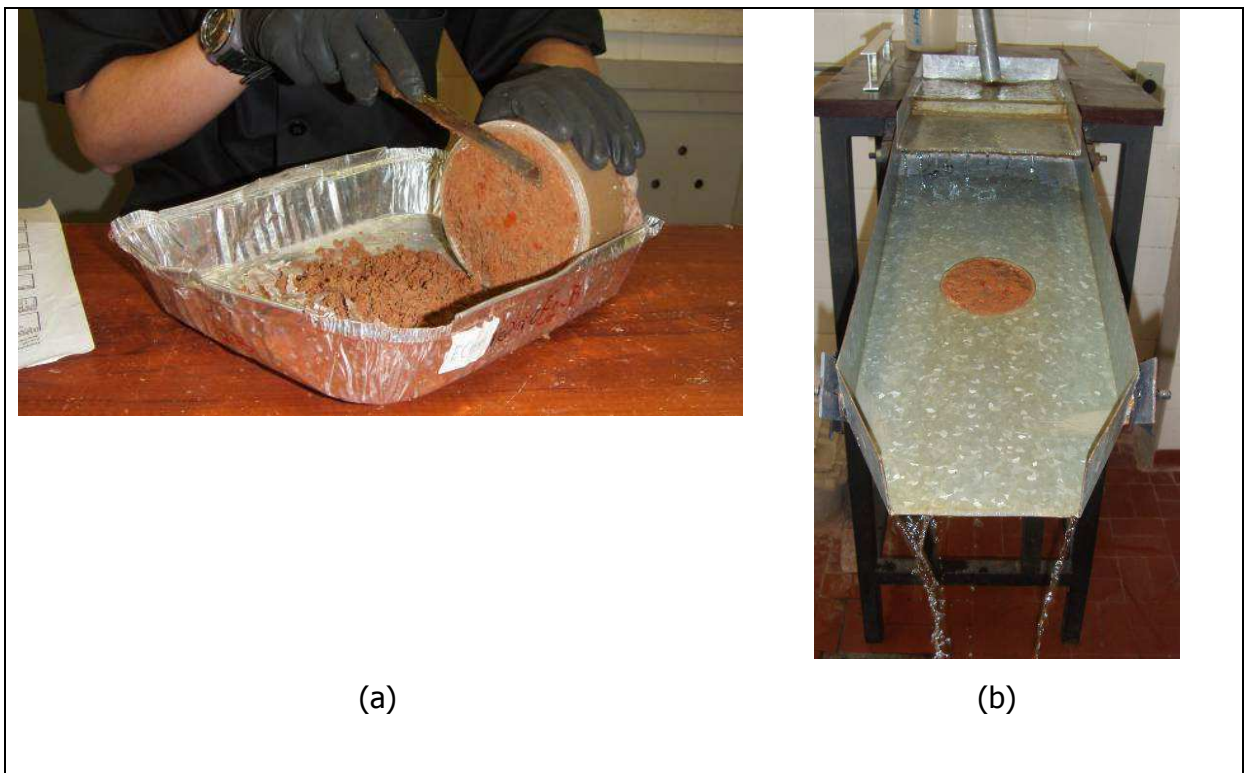
(3) a vazão d'água foi aferida antes mesmo do acoplamento dos anéis, sendo esta responsável pelo umedecimento da rampa, diminuindo a resistência da camada laminar de água durante o ensaio;

(4) o anel com a amostra foi fixado na abertura central da rampa metálica, com a certificação do nivelamento superior do anel com o nível da rampa(Figura 3.13b);

(5) com o início do ensaio, o material erodido foi captado por baldes distintos nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos e posteriormente, passado pelo conjunto de peneiras (Figuras 3.13c);

(6) o solo retido em cada peneira e o remanescente do anel (Figura 3.13d) foram recolhidos, colocados em cápsulas individuais e levados à estufa para a obtenção de seus pesos secos;

(7) o material passante na peneira de malha 0,074 mm (peneira #200) foi homogeneizado por meio de agitação, sendo coletada uma amostra da mistura e levada à estufa. A medida total do solo passante na peneira foi feita de maneira indireta, sendo necessária a relação do peso seco encontrado no volume da amostra retirada, com o volume total do material retido no balde.



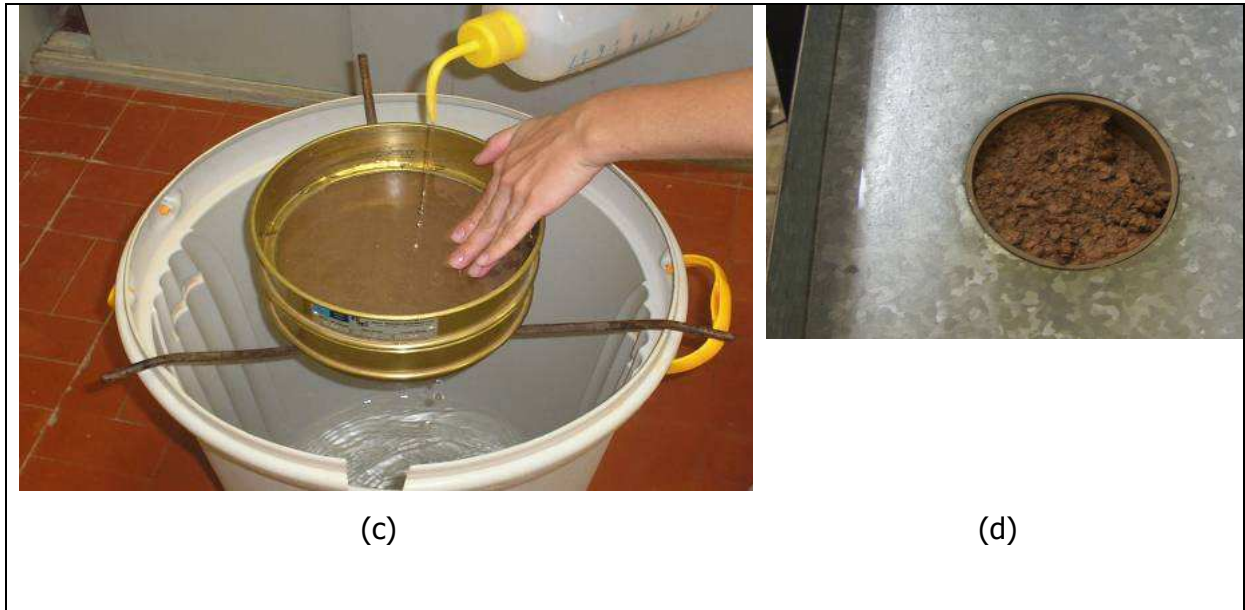


Figura 3.13 – (a) Preparo das amostras indeformadas para o ensaio de Inderbitzen; (b) Material erodido sendo coletado; (c) Material coletado passando pelo conjunto de peneiras; (d) Amostra ao término do ensaio. (adaptado de TATTO (2007))

Os resultados obtidos foram 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) (Figura 3.14).

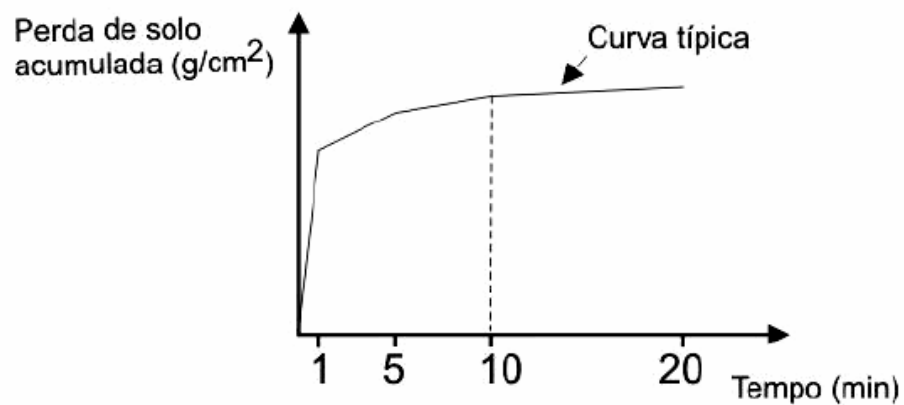


Figura 3.14 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra *versus* tempo para o ensaio Inderbitzen. (adaptado de Bastos (1999))

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

$$\sigma_h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (3.2)$$

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 (medida pela técnica do corante), da vazão e da largura da rampa através da relação:

$$h = \frac{Q}{v \cdot L} \quad (3.3)$$

Onde:

$Q$  = vazão do fluxo (cm<sup>3</sup>/s)

$v$  = velocidade do 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 ( $\sigma_h$ ) para combinações de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ ) são apresentados na Tabela 3.2, conforme Bastos (1999).

Tabela 3.2 – Valores de velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\sigma_h$ ) 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
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
$\sigma_h$ (Pa)	1,136	1,393	1,710	2,018	2,585	2,742	3,297	3,239

O gráfico formado entre os dados da  $\sigma_h$  *versus* perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) resultou 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,  $\sigma_{h \text{ crit}}$  (Pa), representando a mínima tensão hidráulica causada pela lâmina d'água sobre o solo, que resulta na perda de solo inicial (Figura 3.15).

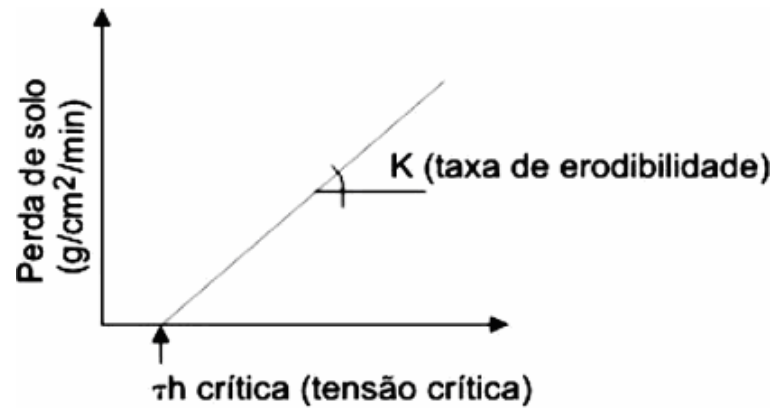


Figura 3.15 – Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade ( $K$ ) e a tensão cisalhante hidráulica crítica,  $\sigma_{h \text{ crit}}$ . (BASTOS, 1999)

## 4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no limite entre os municípios de São Francisco de Assis e Manoel Viana, região oeste do Rio Grande do Sul, onde se encontram diversas formas de erosão (eólica, hídrica) em graus de desenvolvimento variáveis como areais, sulcos, ravinas e voçorocas. A Figura 4.1 apresenta a imagem de um areal em formação nas proximidades da RS 377.



Figura 4.1 – Formação de depósito de areia nas proximidades da RS 377, entre os municípios de Manoel Viana e São Francisco de Assis

Dentre os inúmeros processos erosivos existentes nesta região, foi escolhida para este estudo uma voçoroca localizada na Fazenda Taquari, num trecho central da RS 377, entre as cidades de Manoel Viana, a aproximadamente 22 Km de São Francisco de Assis (Figura 4.2 a e b). Esta voçoroca foi escolhida por representar um processo avançado de erosão, possuir diversos tipos de feições erosivas em seu interior e por se localizar em uma área de fácil acesso, às margens da RS 377.



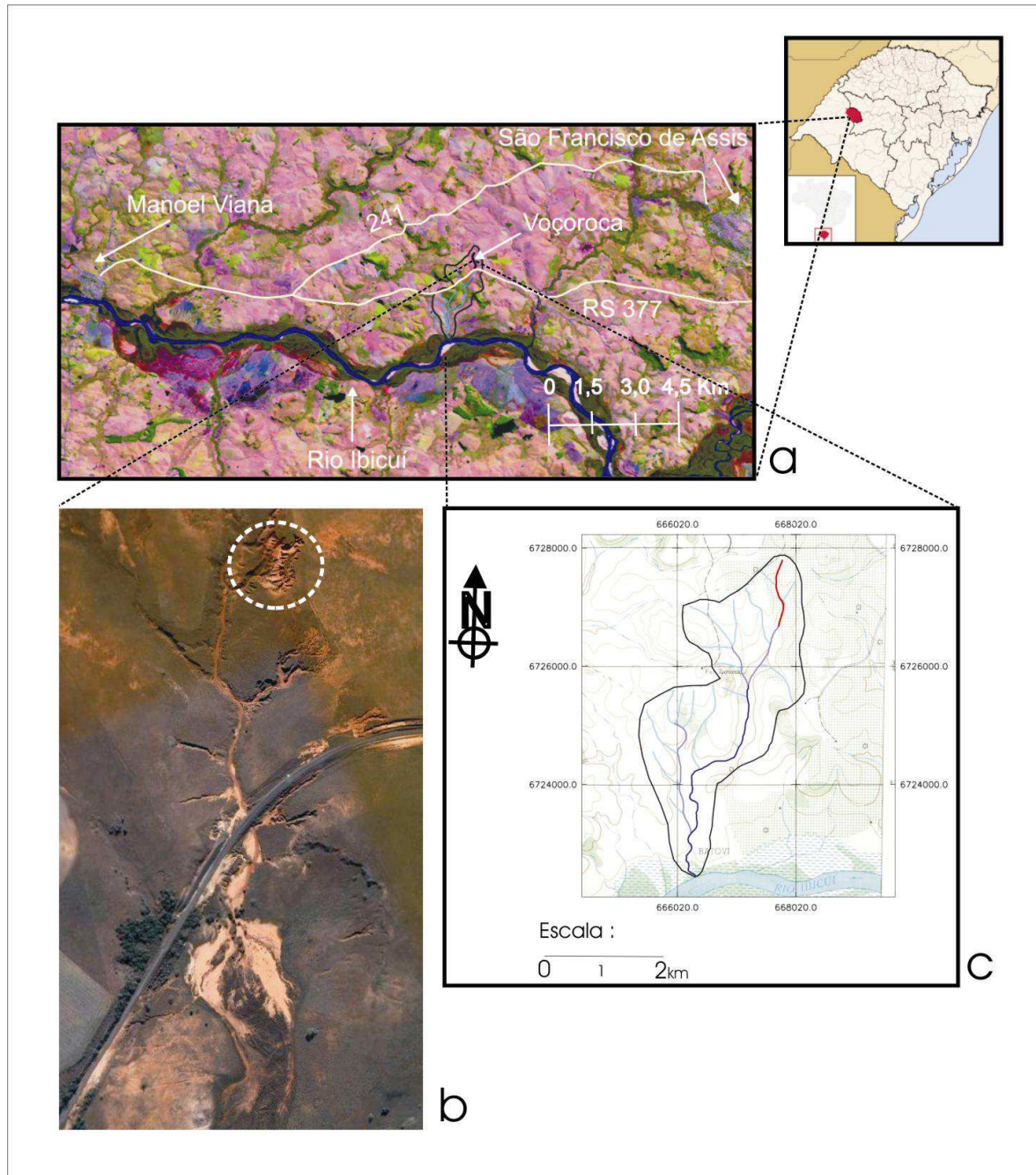


Figura 4.2 – Localização da área de estudo: a) localização da voçoroca no estado do RS (Landsat 3-4-5; 22/05/2005 – adaptada), b) imagem da voçoroca (Google Earth 2-3-4, 05/01/2006 E:1:170.000), c) microbacia de drenagem tendo destaque a incisão erosiva estabelecida (E:1:200.000). (TATTO, 2007)

Segundo Tatto (2007), a voçoroca está localizada em uma microbacia de drenagem com, aproximadamente, 3,5 km de extensão e 2 km de largura, localizada à margem direita do Rio Ibicuí, desaguando diretamente no mesmo, sendo cortada pela RS 377. A microbacia está delimitada pelas coordenadas UTM 55°15'46" e 55°16'33" de longitude e, 29°34'00"s e

29°34'46" de latitude (Figura 4.2 c). A voçoroca possui, aproximadamente, 18 m de profundidade e 1000 m de comprimento, sendo classificada como uma voçoroca profunda e grande, conforme Fendrich et al.(1991). Pode ser classificada também, como voçoroca em forma de anfiteatro, conforme Camapum de Carvalho et al.(2006a), por apresentar fluxo concentrado.

A Figura 4.3 apresenta em maior detalhe a imagem da voçoroca desde a cabeceira da até a região deposição dos sedimentos, passando por um bueiro na RS 377. (Google Earth 2-3-4, 05/01/2006 E:1:170.000). As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam imagens do anfiteatro da voçoroca onde foram realizados os levantamentos geológicos-geotécnicos e coletas de amostras.

O relevo da área de entorno da voçoroca é formado por colinas suaves e alongadas com declividades baixas a médias, entre 2% a 15% (TATTO, 2007). Apresentam também, cerros ou morrotes e afloramentos rochosos (linhas de pedra) que formam relevos residuais, onde a declividade é mais acentuada (Figura 4.6, canto direito superior).

As rochas que compõe a voçoroca pertencem a Formação Guará que é caracterizada por um espesso pacote de arenitos quartzosos esbranquiçados. Esta formação está representada na área por uma sequência litológica relacionada a um sistema de sedimentação fluvial (CORRÊA, 2006). Apresentam uma mineralogia pouco selecionada quartzosa, areno-granulosa de coloração avermelhada, com estratificações em camadas horizontais e por vezes inclinadas. Possuem diferentes resistências, condicionadas pela baixa coesão entre as partículas, devido ao alto conteúdo de quartzo e cimentação de óxido somenteado redor dos grãos, gerando uma rocha friável favorecendo processos de erosão hídrica e eólica (ROBAINA, 2007).

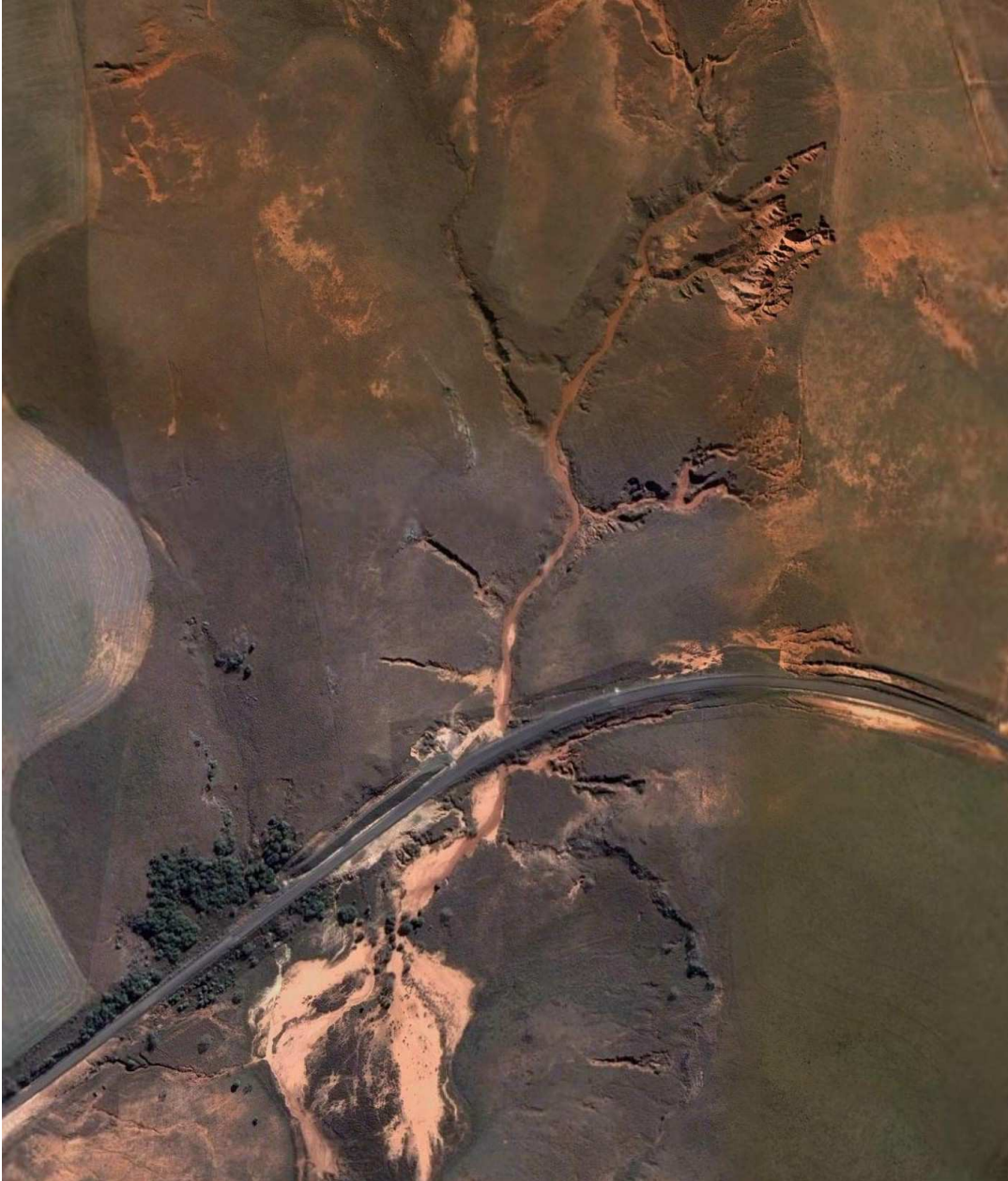


Figura 4.3 – Imagem do Google Earth 2-3-4 (05/01/2006 E:1:170.000)

Em trabalho recente de Robaina et al (2010) foi realizada uma proposta de compartimentação geomorfológica da Bacia do Ibicuí, oeste do Rio Grande do Sul onde se localiza a área da voçoroca da Fazenda Taquari.



Figura 4.4 – Área de estudo onde se encontram diversas formas de erosão, ao fundo vê-se a utilização na época da área: criação de gado

Segundo Robaina et al (2010), a área se enquadra no Modelado de Patamares residuais em arenitos. Esta área é constituída por formas de relevo do tipo colinas associadas a morrotes isolados de arenitos. As colinas formam um relevo ondulado, com inclinações inferiores a 15%, associadas com vertentes alongadas de topo suavemente ondulado, com altitudes entre 120 e 200 m. Como a inclinação da área não é acentuada, o que interfere na erosão, neste caso, são os longos comprimentos de rampa e a erodibilidade natural dos solos e rochas do local.

As formas residuais ocorrem por relativa maior resistência aos processos erosivos devido à ocorrência de arenitos com camadas cimentadas por óxidos de ferro e por vezes sílica. A resistência que se estabelece a partir de camadas gera morrote de topo plano e vertentes íngremes, regionalmente denominados de cerros (Figura 4.5a). Também é comum a ocorrência de porções resistentes na meia vertente constituindo degrau de rocha exposta. Os solos predominantemente são espessos e arenosos com pouca diferenciação entre os

horizontes. A presença de arenitos com baixa coesão e solos arenosos gera processos acelerados de erosão definidos como areiais e voçorocas.



(a)



(b)

Figura 4.5 – (a) e (b) Detalhe do levantamento geológico-geotécnico do interior da voçoroca

Os processos erosivos que ocorrem na microbacia onde esta localizada a voçoroca estão associados, preferencialmente, ao fluxo superficial que apresenta um forte controle estrutural de direção NW. As formas de uso e ocupação do solo são predominante de silvicultura, pastagens e cultivo com plantio direto.

As partículas de solo/rocha depois de destacadas da voçoroca, pela ação da água superficial ou subsuperficial, são transportadas pelo fluxo de água superficial ao longo do canal principal da voçoroca (Figura 4.7 a, b e c) formando uma grande área deposicional a jusante, próximo à rodovia RS 377.



Figura 4.6 – Imagem do entorno da voçoroca apresentando afloramentos rochosos e o início da silvicultura

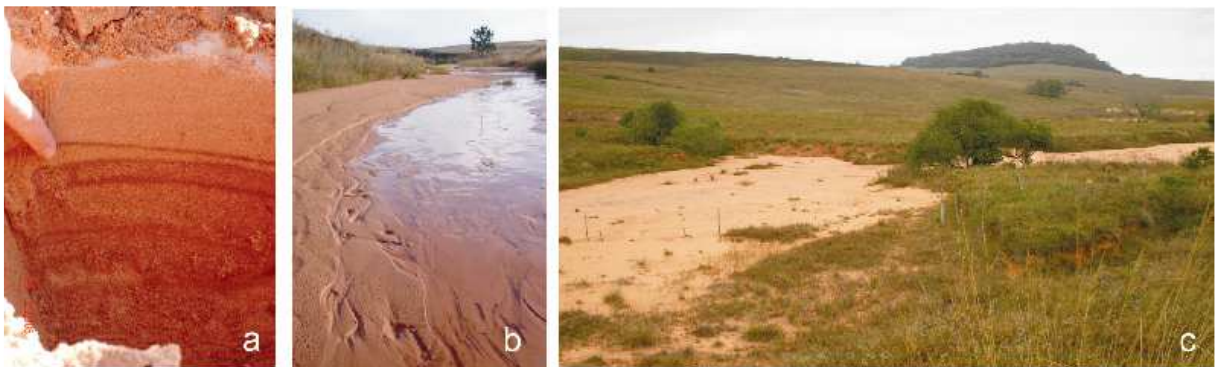


Figura 4.7 - Área de deposição dos sedimentos ao longo do canal principal da voçoroca (TATOO, 2007)

Tatto (2007) apresentou uma descrição e a localização das feições erosivas no interior da voçoroca, e destacou a grande importância destas, pois resultam da atuação dos

mecanismos responsáveis pela evolução dos processos erosivos. Como a observação da ação dos mecanismos, em campo e em tempo real, é relativamente rara, a presença de determinadas feições erosivas pode sugerir a atuação de um ou mais mecanismos de erosão.

No interior da voçoroca foram encontradas as seguintes feições erosivas: (i) painéis; (ii) escamas; (iii) escorregamentos; (iv) corrida de lama; (v) alcovas de regressão; (vi) escoamento de filetes; (vii) dutos ou *piping*; (viii) pináculos; e (ix) pedestal ou *demoiselles*. Maiores detalhes das feições erosivas encontradas na voçoroca podem ser verificadas em Totto (2007).

Em mapeamento geológico de detalhe, realizado no interior da voçoroca, foi possível estabelecer duas unidades litológicas, denominadas de Unidade 1 e Unidade 2, separadas em campo pela diferença de coloração, estrutura, textura e comportamento distinto frente ao processo erosivo (Figura 4.8).

A primeira unidade, denominada de Unidade 1, está localizada na base da voçoroca e mede 6,8m de espessura aproximadamente. Esta unidade foi dividida em 6 (seis) camadas distintas, conforme a granulometria, presença de óxido de ferro e resistência frente ao processo erosivo. Da base para o topo, estas camadas foram denominadas de: 1A, 1B, 1C, 1D e 1F, sendo que as camadas 1C e 1F apresentam subdivisões conforme apresentado na Tabela 4.1.

As rochas desta unidade são compostas por quartzarenitos (até 90% de quartzo) de granulação fina a média, com coloração rosada a esbranquiçada, onde a maioria das camadas apresenta minerais de óxido de ferro disseminados ou como cimento entre os grãos. Nessas camadas predominam estratificações plano paralelas de pequeno porte, com exceção da camada 1A, que apresenta estratificações cruzada planas, de médio porte.

Na Unidade 1, o que se observa em campo é uma alternância de resistência entre as camadas, onde as mais resistentes formam mesas ou degraus no interior da voçoroca. Em uma análise preliminar, pode-se associar a maior resistência dessas rochas à presença de óxido de ferro como material cimentante entre os grãos.

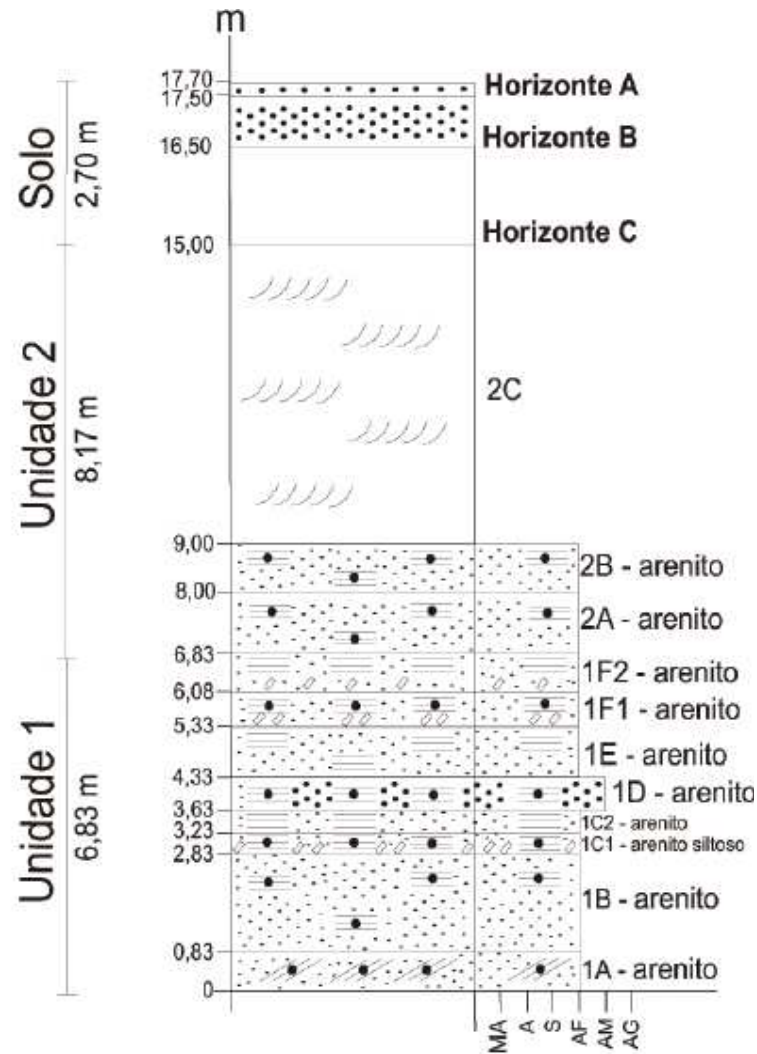


Figura 4.8 – Seção geológica em detalhe da voçoroca em estudo (Adaptado de TATTO, 2007)

A segunda unidade, denominada de Unidade 2, está sobreposta à Unidade 1 e possui 8,2 m de espessura, aproximadamente. As rochas desta unidade são compostas por quartzarenitos de granulação fina, com coloração marrom avermelhado, formando uma parede abrupta no topo da voçoroca. Esta unidade foi dividida em três camadas distintas, conforme o tipo de estrutura e a resistência frente ao processo erosivo. Da base para o topo, estas camadas foram denominadas de: 2A, 2B e 2C, sendo que as camadas 2A e 2B apresentam estratificação plano paralela e a camada 2C, apresenta estratificação cruzada acanalada de médio a grande porte (Tabela 4.2).



Tabela 4.1 – Principais características da Unidade 1 estabelecidas no perfil estratigráfico (Adaptado de TATTO, 2007)

<b>Camadas</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Descrição</b>	<b>Feições erosivas</b>
1F 2	0,75	- arenito fino , - presença de intraclastos, - estratificação acanalada e laminação paralela;	- corrida de lama, - esc. em filetes, - panelas, - pináculo;
1F 1	0,75	- arenito fino, - presença de matéria orgânica e óxido de ferro e intraclastos, - estratificação plana;	- pináculo;
1E	1,00	- arenito fino, - presença de matéria orgânica e camadas centimétricas de argila -estratificação plano paralela;	- pedestais, - escama, - pináculo;
1D	0,70	- arenito médio, - presença de óxido de ferro, - estratificação horizontal;	
1C2	0,40	- arenito fino, - presença de óxido de ferro e camadas centimétricas de argila, - estratificação plana;	- alcovas;
1C1	0,40	- arenito siltoso; - presença de matéria orgânica e óxido de ferro e camadas centimétricas de argila e intraclastos, - camada com mais presença de finos	
1B	2,00	- arenito fino, - presença de óxido de ferro, - estratificação plana;	
1A	0,83	- arenito fino, - presença de óxido de ferro, - estratificação cruzada plana de médio porte com direção 250°, 25°.	

Tabela 4.2 – Principais características da Unidade 2 estabelecidas no perfil estratigráfico (Adaptado de TATTO,2007)

<b>Nome</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Descrição</b>	<b>Feições erosivas</b>
2C	6,00	- estratificações cruzadas planas de grande porte e laminação plano-paralela;	- dutos;
2B	1,00	- arenito fino, - laminação plano-paralela;	- alcovas;
2A	1,17	- arenito fino, - grânulos de óxido de ferro, - estratificação plana e laminação plano-paralela;	- pináculo;

Em campo, as camadas 2A, 1D e 1B são as mais resistentes à erosão, formando patamares no interior da voçoroca. Tatto (2007) associou a maior resistência à presença de óxidos de ferro e de uma porcentagem de fração fina. As camadas 1F, 1E e 1C, apesar de apresentarem maior quantidade de finos, são menos resistentes à erosão, pois o material fino está relacionado à intercalação ocasional de camadas centimétricas de pelitos ou à presença de intraclastos de silte e argila.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados: (a) o perfil geológico-geotécnico com a localização dos horizontes e camadas estudadas nesta pesquisa, (b) ensaios de caracterização, (c) caracterização química e mineralógica, (d) ensaios de resistência ao cisalhamento, (e) avaliação indireta e direta da erodibilidade.

A Figura 5.1 apresenta o perfil geológico-geotécnico com as denominações adotadas para identificação e classificação dos solos e rochas da boçoroca da Fazenda Taquari no município de São Francisco de Assis (TATTO, 2007; TATTO et al, 2007).

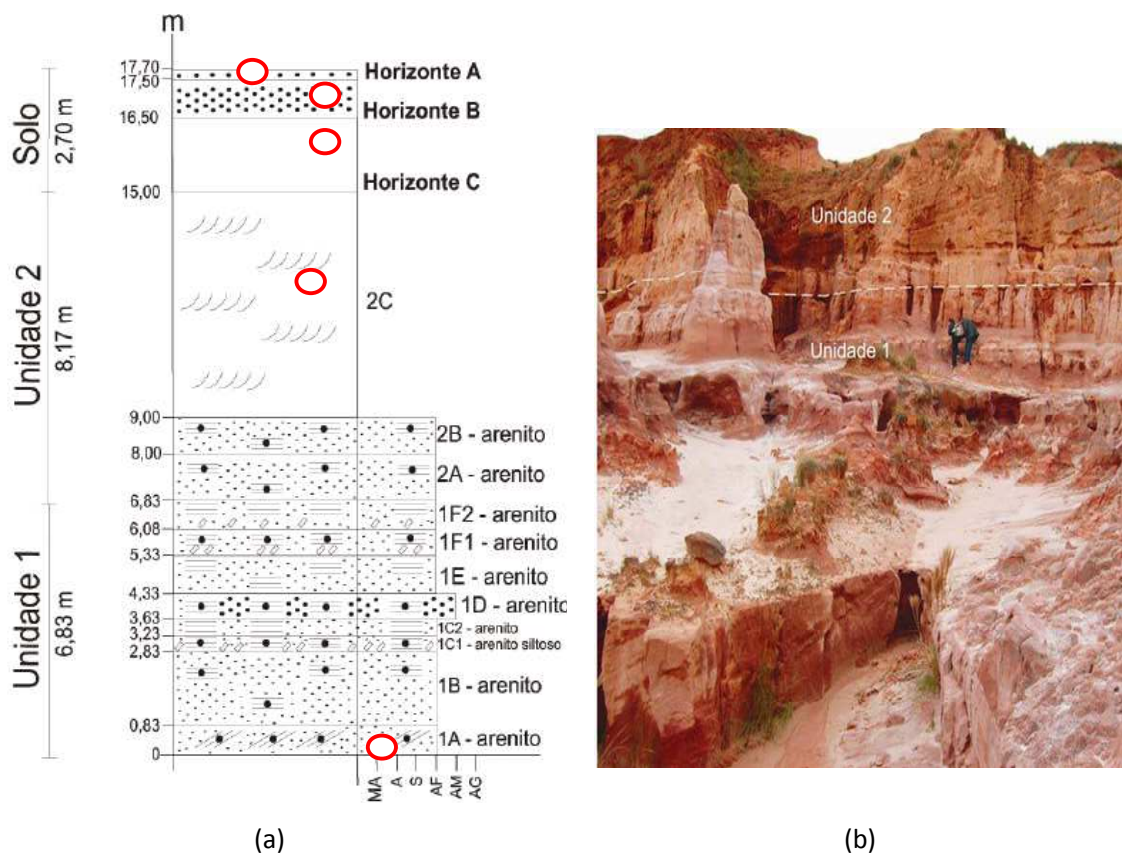


Figura 5.1 – (a) Seção transversal com as camadas e locais de amostragem (adaptado de TATTO, 2007); (b) Vista geral da voçoroca apresentando em detalhe a Unidade 2 (camada 2C) e Unidade 1 (camada 1A)

O solo superficial foi identificado como um latossolo arenoso com um substrato constituído de rochas sedimentares arenosas da Formação Guará. A Figura 5.2

apresenta um vista parcial da voçoroca indicando o solo superficial e a camada de base (arenito 1A). Detalhes dos horizontes e camadas analisadas são apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4.

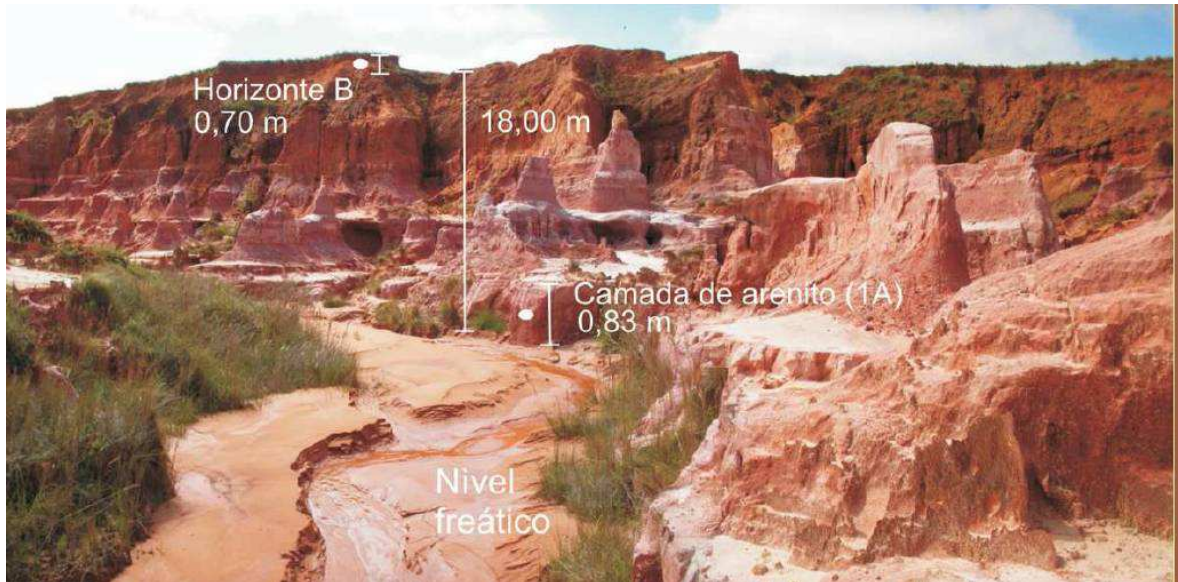
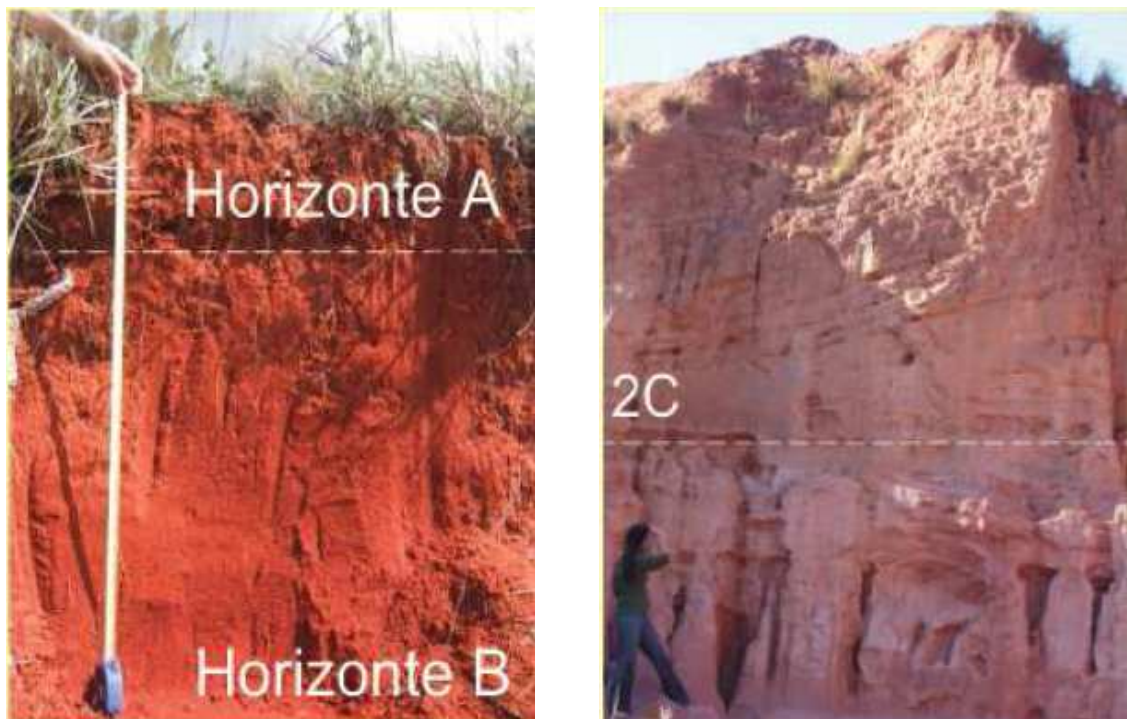


Figura 5.2 - Vista parcial da voçoroca Fazenda Taquari (TATTO, 2007)



(a)

(b)

Figura 5.3 - (a) horizontes A e B do latossolo; (b) arenito – camada 2C. (TATTO, 2007)

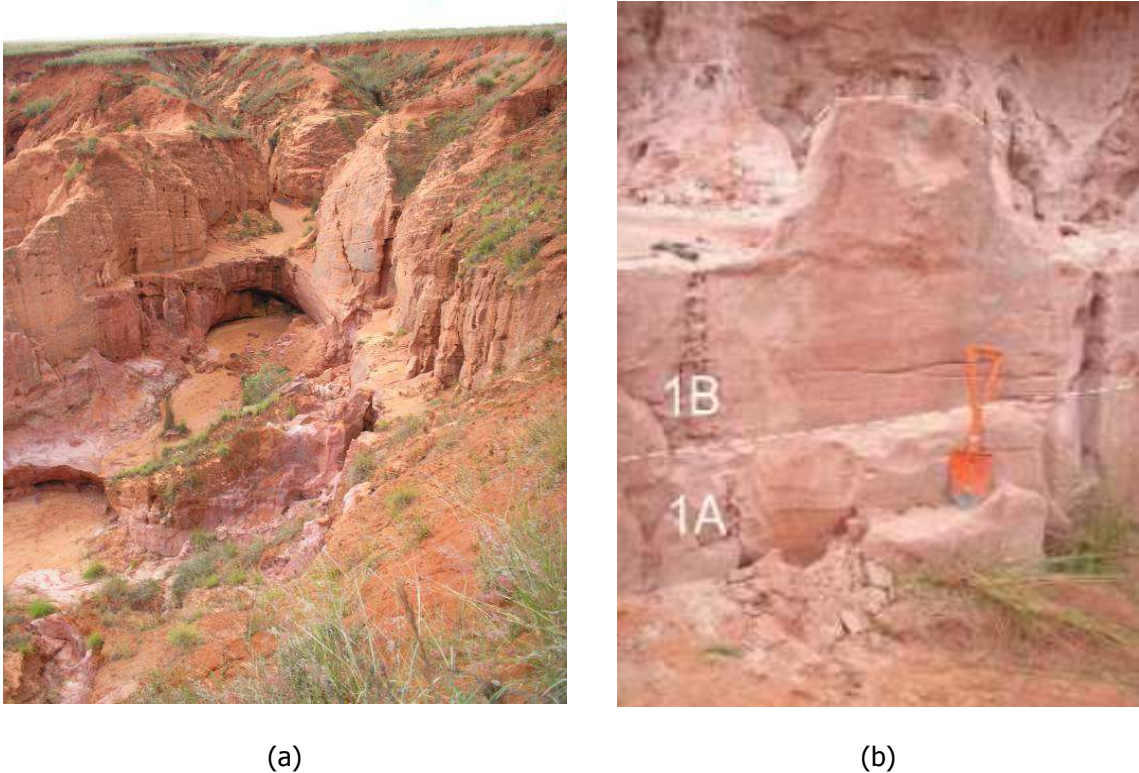


Figura 5.4 - (a) horizonte C; (b) arenitos – camada 1A (TATTO, 2007)

### 5.1 Ensaios de Caracterização Física

Com as amostras coletadas no perfil descrito anteriormente, foram realizados ensaios de caracterização e determinação dos índices físicos nas amostras indeformadas para os ensaios de cisalhamento direto, desagregação, infiltrabilidade, perda por imersão e Inderbtizen.

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

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios para determinação do peso específico real dos grãos e dos limites de consistência. O peso específico apresentou valores entre 26,3 e 26,8 kN/m<sup>3</sup>, consistentes com a mineralogia destas camadas. Os horizontes pedológicos (horizontes A, B e C), as camadas de arenito e os sedimentos do canal apresentaram-se não plásticos (NP).

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

Identificação	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	wl (%)	wp (%)	IP (%)
Horizonte A	0 – 0,20	26,54	NP	NP	NP
Horizonte B	0,20 – 1,20	26,52	NP	NP	NP
Horizonte C	1,20 – 2,70	26,80	NP	NP	NP
Camada 2C	8,0	26,82	NP	NP	NP
Camada 1A	18,0	26,40	NP	NP	NP
Sedimento 1	-	26,36	NP	NP	NP
Sedimento 2	-	26,35	NP	NP	NP

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

Os resultados dos ensaios granulométricos com e sem o uso de defloculante (hexametáfosfato de sódio) estão apresentados na Tabela 5.2. A divisão adotada para as frações constituintes do solo foi proposta pela ABNT NBR 6502. A Figura 5.5 apresenta as curvas granulométricas com o uso de defloculantes.

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

Identificação		Frações granulométricas (%)						Classificação Geotécnica	
		Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila	HRB	SUCS
Horizonte A	C/D	0	2	47	36	2	13	A2-4	SM
	C/D	0	2	48	40	2	8		
	S/D	0	2	47	41	10	0		
	S/D	0	2	44	56	0	0		
Horizonte B	C/D	0	3	49	36	6	6	A2-4	SM
	S/D	0	2	51	44	3	0		
Horizonte C	C/D	0	2	73	20	1	4	A2-4	SP
	S/D	-	-	-	-	-	-		
Camada 2C	C/D	0	0	56	41	1	2	A2-4	SP
	S/D	0	0	60	37	3	0		
Camada 1A	C/D	0	1	39	58	2	0	A2-4	SP
	S/D	0	1	39	58	2	0		
Sedimento 1	C/D	0	6	63	27	1	3	A2-4	SP
	S/D	0	4	65	31	0	0		
Sedimento 2	C/D	0	2	48	44	3	3	A2-4	SP
	S/D	0	2	48	50	0	0		

Obs.: HRB = Highway Research Board; SUCS = Sistema Unificado de Classificação dos Solos (índice de grupo)

C/D = com defloculante

S/D = sem defloculante

Verifica-se em todo perfil estudado que não ocorrem partículas do tamanho pedregulho e, a fração areia grossa não é superior a 3% nos horizontes de solos e camadas de arenito. As frações predominantes são areia média e fina (83 a 97%). Os valores inferiores a 90% para a fração areia fina foram encontrados nos horizontes A e B, e no horizonte C e camadas arenosas estes valores foram superiores a 90%. A fração argila é muito baixa, refletindo na falta de plasticidade para estes horizontes/camadas. Nos ensaios realizados sem defloculante a fração argila se anula.

A Tabela 5.3 apresenta índices das curvas granulométricas, que auxiliam na caracterização dos solos. Nas camadas arenosas e nas amostras do sedimento a porcentagem passante na peneira #200 é inferior a 10% e, em geral, estes materiais são mal graduados.

Adotando-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos, os horizontes A e B são classificados como areias siltosas (SM), e o restante dos horizontes/camadas são classificados como areias mal graduadas (SP).

O grau de flocculação para todos os materiais foi de 100%, ou seja, além da fração argila nestes horizontes/camadas ser muito pequena, quando não se utiliza defloculante a argila natural é nula. A Razão de Dispersão (RD) de acordo com a NBR 13602 (1996) não pode ser aplicada pelo baixo teor de finos. Segundo esta norma, a determinação deste parâmetro somente pode ser realizada para teores de argila ( $d < 0,005\text{mm}$ ) superiores a 12%.

Tabela 5.3 – Parâmetros obtidos das curvas granulométricas

	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>60</sub>	Pp <sub>,10</sub>	Pp <sub>,40</sub>	Pp <sub>,200</sub>	Cu	Cc
Horizonte A	0,055	0,130	0,250	100,0	83	12,6	4,5	1,3
Horizonte B	0,038	0,130	0,270	100,0	80	13,7	7,1	1,6
Horizonte C	0,075	0,240	0,360	100,0	70	10,2	4,8	2,1
Camada 2C	0,160	0,180	0,220	100,0	90	5,8	1,4	0,9
Camada 1A	0,090	0,160	0,200	100,0	95	5,3	2,2	1,4
Sedimento 1	0,120	0,200	0,330	99,95	72	2,5	2,8	1,0
Sedimento 2	0,075	0,140	0,24	100,0	83	9,0	3,2	1,1

Obs.: D10, D30 e D60 = diâmetro das partículas com porcentagem passante de 10%, 30% e 60%, respectivamente

Pp<sub>,10</sub>; Pp<sub>,40</sub> e Pp<sub>,200</sub> = % porcentagem de partículas com diâmetro inferior as peneiras no. 10, 40 e 200

Cu = coeficiente de uniformidade

Cc = coeficiente de curvatura

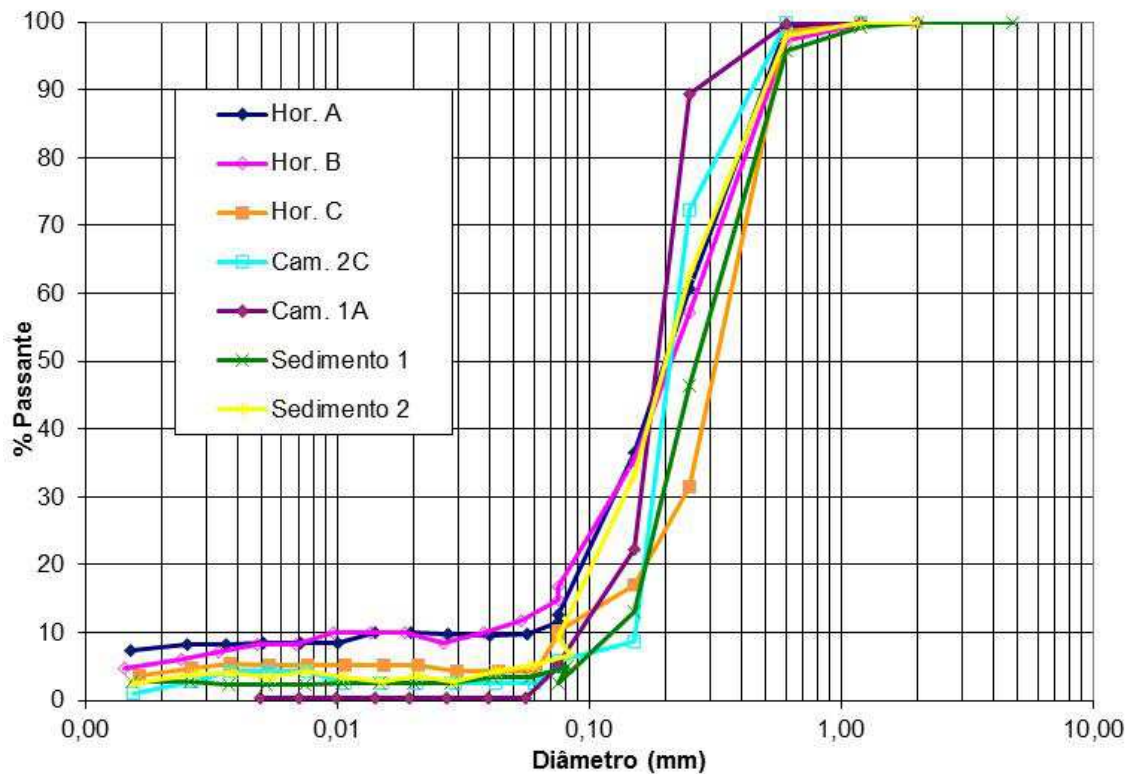


Figura 5.5 – Curvas granulométricas obtidas com defloculante

A Tabela 5.4 apresenta os índices físicos obtidos nas amostras indeformadas que foram utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto, desagregação, perda por imersão, infiltrabilidade e Inderbtizen. Verificou-se que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para os valores de umidade, grau de saturação e índice de vazios. Na comparação entre os horizontes A e B, verifica-se o menor teor de umidade e grau de saturação do horizonte A, provavelmente por ser mais superficial e estar mais sujeito às variações climáticas. Possui o menor índice de vazios e peso específico aparente seco mais elevado, devido principalmente ao uso do solo, inicialmente com o cultivo de soja e depois com criação de gado.

Tabela 5.4 – Propriedades índices do solo



	Valores	w(%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	n(%)	S(%)
	<b>Média</b>	<b>3,42</b>	<b>15,91</b>	<b>15,38</b>	<b>0,73</b>	<b>42,05</b>	<b>12,54</b>
Hor. A	Valor Máximo	5,01	17,27	16,71	1,01	52,32	17,28
	Valor Mínimo	1,60	12,87	12,65	0,59	37,04	3,84
	Desvio Padrão	0,76	0,84	0,77	0,09	2,89	3,14
	Coef. Variação	22,3	5,3	5,0	13,1	6,9	25,0
	<b>Média</b>	<b>6,56</b>	<b>14,97</b>	<b>14,06</b>	<b>0,90</b>	<b>47,00</b>	<b>19,26</b>
Hor.B	Valor Máximo	16,75	16,78	15,32	1,51	60,23	52,75
	Valor Mínimo	3,08	11,53	10,55	0,73	42,25	10,00
	Desvio Padrão	3,08	1,25	1,25	0,19	4,70	8,57
	Coef. Variação	46,9	8,3	8,9	21,2	10,0	47,8
	<b>Média</b>	<b>3,72</b>	<b>16,23</b>	<b>15,65</b>	<b>0,72</b>	<b>41,61</b>	<b>13,96</b>
Hor. C	Valor Máximo	8,81	17,49	16,66	0,99	49,65	27,21
	Valor Mínimo	1,05	13,88	13,49	0,61	37,85	4,00
	Desvio Padrão	1,57	0,72	0,70	0,08	2,61	5,67
	Coef. Variação	42,2	4,5	4,5	11,4	6,3	40,6
	<b>Média</b>	<b>6,79</b>	<b>17,53</b>	<b>16,41</b>	<b>0,64</b>	<b>38,80</b>	<b>29,07</b>
Cam. 2C	Valor Máximo	10,37	19,52	17,77	0,79	43,97	53,85
	Valor Mínimo	3,41	15,78	15,03	0,51	33,74	12,36
	Desvio Padrão	1,73	0,90	0,78	0,08	2,90	8,48
	Coef. Variação	25,5	5,1	4,7	12,2	7,5	29,2
	<b>Média</b>	<b>4,24</b>	<b>17,60</b>	<b>16,90</b>	<b>0,58</b>	<b>35,99</b>	<b>19,50</b>
Cam. 1A	Valor Máximo	10,50	19,34	18,86	1,35	57,46	42,59
	Valor Mínimo	1,09	12,05	11,23	0,40	28,57	5,77
	Desvio Padrão	2,13	1,33	1,38	0,16	5,23	8,75
	Coef. Variação	50,1	7,6	8,2	28,2	14,5	44,9

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

De acordo com o IAEG (1979), o horizonte A apresenta uma porosidade média (0,55 < e < 0,8) e quanto ao grau de saturação naturalmente seco (0% < S < 25%). O horizonte B apresenta-se uma alta porosidade (0,8 < e < 2,0). O solo do horizonte C e as camadas arenosas apresentam porosidade média, com tendência de diminuição do índice de vazios com a profundidade. Em relação aos valores de umidade e grau de saturação, estes materiais são considerados solos não saturados.

## 5.2 Caracterização química

Segundo Lepsch (2002) a caracterização química é importante para conhecer até que ponto a lixiviação e o empobrecimento químico podem ter influenciado nos processos erosivos da área degradada pelo ravinamento. A caracterização química, apresentada na Tabela 5.5, foi realizada nos horizontes/camadas do perfil em estudo pelo Laboratório do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM.

Tabela 5.5 – Resultado da análise química

Horizontes/ Camadas	Cátions básicos			Acidez potencial		CTC (%)	Saturação		MO	pH
	Ca	K	Mg	Al	H+Al		V	Al		
						(%)		(%)		
						cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>				
Hor. A	0	0,01	0,1	1,0	2,5	2,6	4	91	0,5	4,5
Hor. B	0	0,02	0,1	1,0	3,1	3,2	4	91	0,5	4,6
Hor. C	0	0,01	0,1	1,0	1,2	1,4	8	93	0,1	4,8
Cam 2C	0	0,01	0,1	0	0,8	0,9	12	0	0,1	5,3
Cam 1A	0	0,01	0,1	0,5	1,1	0,6	9	83	0,1	5,0
Sed 1	0,3	0,01	0,2	0	0,9	1,4	36	0	0,1	5,3
Sed 2	0,2	0,01	0,1	0	0,8	1,1	28	0	0,1	5,8

A saturação por bases (%V) para todo o perfil é baixa, sendo que para os horizontes pedológicos (Horizontes A, B e C) este valor é inferior a 10%. Portanto, o solo é classificado como distrófico, sendo pouco ou muito pouco fértil e sem reservas de nutrientes para os vegetais. O valor de saturação de base é mais elevado nos sedimentos erodidos que se encontram no canal de drenagem. A saturação por alumínio (%Al) para os horizontes superficiais é superior a 90%, caracterizando uma quantidade de alumínio a níveis tóxicos para plantas, tratando de um solo álico (Al≥50%). A capacidade de troca catiônica em todo o perfil é inferior a 3,2 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, portanto apresentando alta porcentagem de areia e/ou pouca matéria orgânica, com um pH na faixa entre 4,5 e 5,8 (ácido).

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 matéria orgânica, obtidos a partir do carbono orgânico foram baixos (MO < 3,5%), sendo classificados como erodíveis.

### 5.3 Caracterização mineralógica

Nummer et al. (2008) e Schneider et al. (2008) realizaram um estudo que teve como objetivo, avaliar a relação entre a petrografia e a erodibilidade das rochas que compõem a base da voçoroca em estudo (Figura 5.1). A avaliação petrográfica destas rochas mostra que as camadas menos resistentes apresentam-se melhor classificadas, com grãos arredondados a sub-arredondados e esfericidade predominantemente alta, com índice de vazios em torno de 33% do volume modal. Os contatos entre os grãos são lineares e pontuais. São comuns os contatos flutuantes representando a erosão ou dissolução do cimento primário entre os grãos (Figura 5.6). Estas rochas apresentam fraca cimentação de óxido de ferro e pouco ou nenhum argilomineral ou fração argila.

As camadas mais resistentes apresentam 19% de porosidade do volume modal e possuem acamadamento plano paralelo marcado por camadas de granulação mais grossa alternadas com camadas de granulação mais fina, onde as mais finas apresentam maior quantidade de óxido de ferro tanto como agente cimentante entre os grãos como nas formas de nódulos.

Nas camadas de granulação mais fina os grãos mostram baixa esfericidade, são sub-angulares a sub-arredondados e podem ser encontrados argilominerais em pequena quantidade. Nas camadas mais grossas os grãos apresentam-se com média a alta esfericidade, são arredondados a sub-arredondados. Ocorrem contatos pontuais, côncavo-convexos e lineares, com predominância deste último (Figura 5.7).

A Unidade 2 possui 8,17 m de espessura, aproximadamente, sendo composta por quartzarenitos de granulação fina, com coloração marrom avermelhado, formando uma parede abrupta no topo da voçoroca. Esta unidade foi dividida em 3 camadas distintas, conforme o tipo de estrutura e a resistência frente ao processo erosivo (Figura 5.1). Da base para o topo, estas camadas foram denominadas de: 2A, 2B e 2C, sendo que as camadas 2A e 2B apresentam estratificação plano paralela e a camada 2C, apresenta estratificação cruzada acanalada de médio a grande porte.

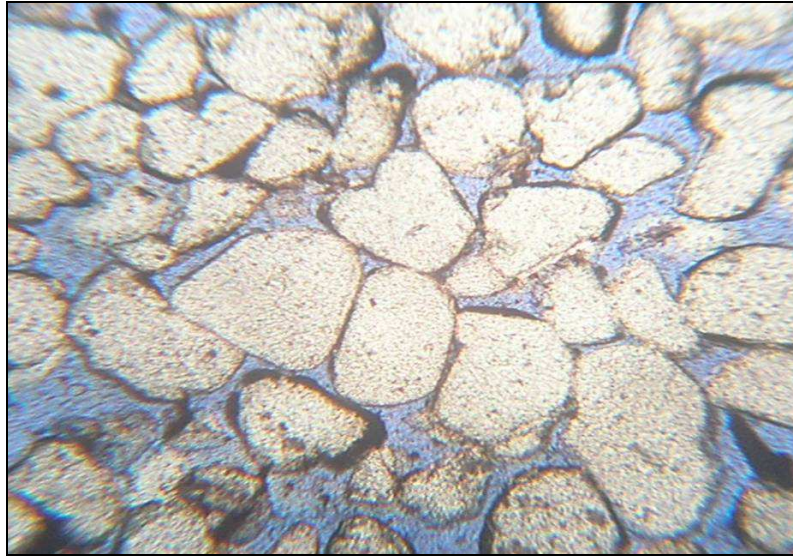


Figura 5.6 - Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade1, camada menos resistente (Luz Natural, aumento 125X10).

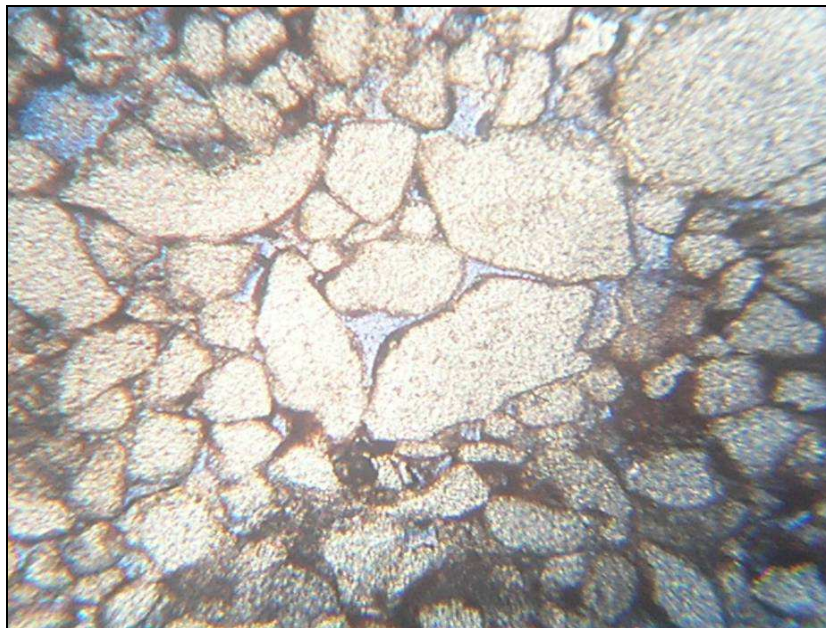


Figura 5.7 - Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade1, camada mais resistente (Luz Natural, aumento 125X10)

A Camada 2C apresenta estratificação plana paralela marcada pela diferença de granulometria, onde as unidades mais grosseiras possuem cimentação fraca, grãos arredondados a sub arredondados, esfericidade média a baixa e contatos pontuais, planares

e flutuantes predominantemente (Figura 5.8). As unidades de granulação mais fina apresentam argilominerais, maior quantidade de cimento entre os grãos, minerais com baixa esfericidade, angulares e subangulares e contatos planares e pontuais (Figura 5.9).

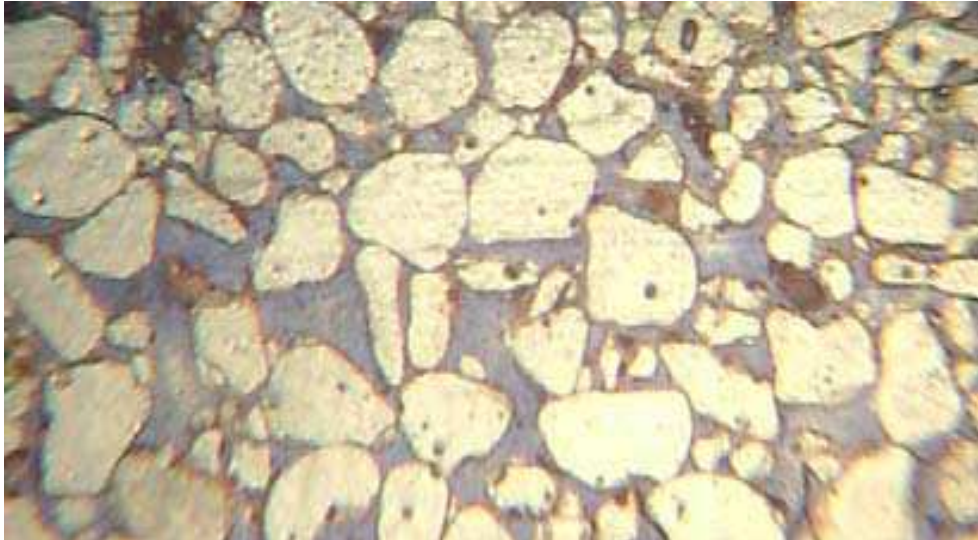


Figura 5.8 - Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade 2, granulação grosseira (Luz Natural, Aumento 125X35)

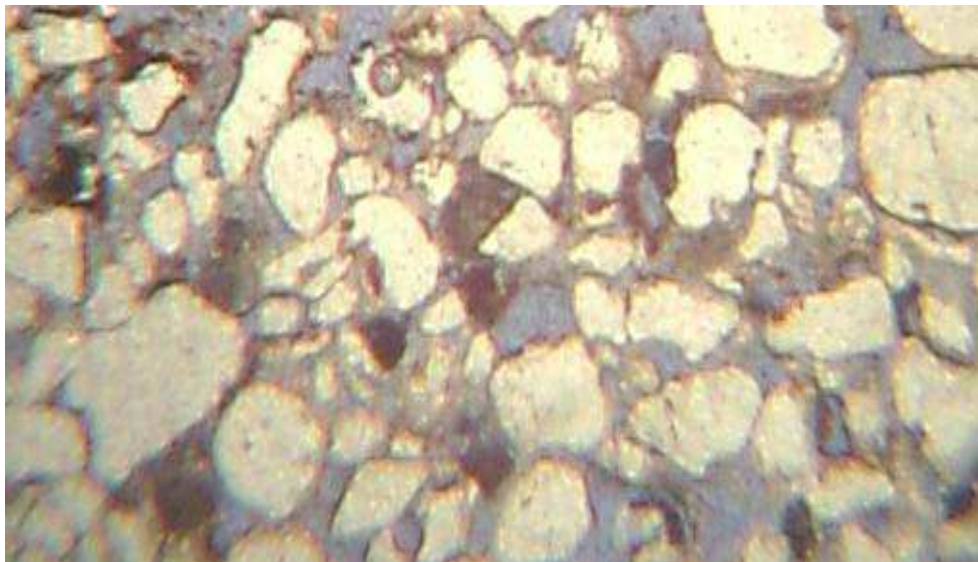


Figura 5.9 - Lâmina Petrográfica, arenitos da Unidade 2, granulação fina (Luz Natural, Aumento 125X35)

#### 5.4 Ensaio de cisalhamento direto

Vários autores em diversas áreas de conhecimento assumem que existe uma relação entre erodibilidade e a resistência ao cisalhamento. Segundo Bastos (1999), a variação desta propriedade dos solos, sob a ação de fluxo superficial concentrado, é considerada um parâmetro fundamental no estabelecimento de uma abordagem geotécnica à erodibilidade dos solos não saturados, em regiões de clima tropical.

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

As Figuras 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para os ensaios realizados nas três condições de umidade.

Para os ensaios realizados com a umidade de campo (natural), secas ao ar e inundadas nas amostras dos horizontes A, B e C, as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento não apresentam um pico nítido, com uma tendência de variação volumétrica inicial de compressão. Somente para as amostras secas ao ar verificou-se um pico nítido e uma tendência de dilatação. Para estes três horizontes quando inundados as tensões cisalhantes são reduzidas devido à influência da saturação no processo de ruptura (perda de sucção). Os valores de variação volumétrica de compressão para os solos destes horizontes foram no máximo de 7%, maiores para as tensões mais elevadas.

Nos ensaios realizados nas camadas 2C e 1A as curvas de tensão de cisalhamento por deslocamento apresentam picos nítidos em todas as tensões aplicadas. Nestas camadas verifica-se a variação volumétrica inicial de compressão que decresce e tende ao aumento de volume, sendo esta variação maior para a tensão de 25 kPa. Nestas camadas de arenito a variação volumétrica de compressão máxima medida foi da ordem de 4% para as tensões mais elevadas.

Nos ensaios realizados nas amostras secas ao ar as curvas tensão cisalhante por deslocamento apresentam picos mais nítidos para todas as tensões normais aplicadas e uma tendência de aumento de volume durante o ensaio.



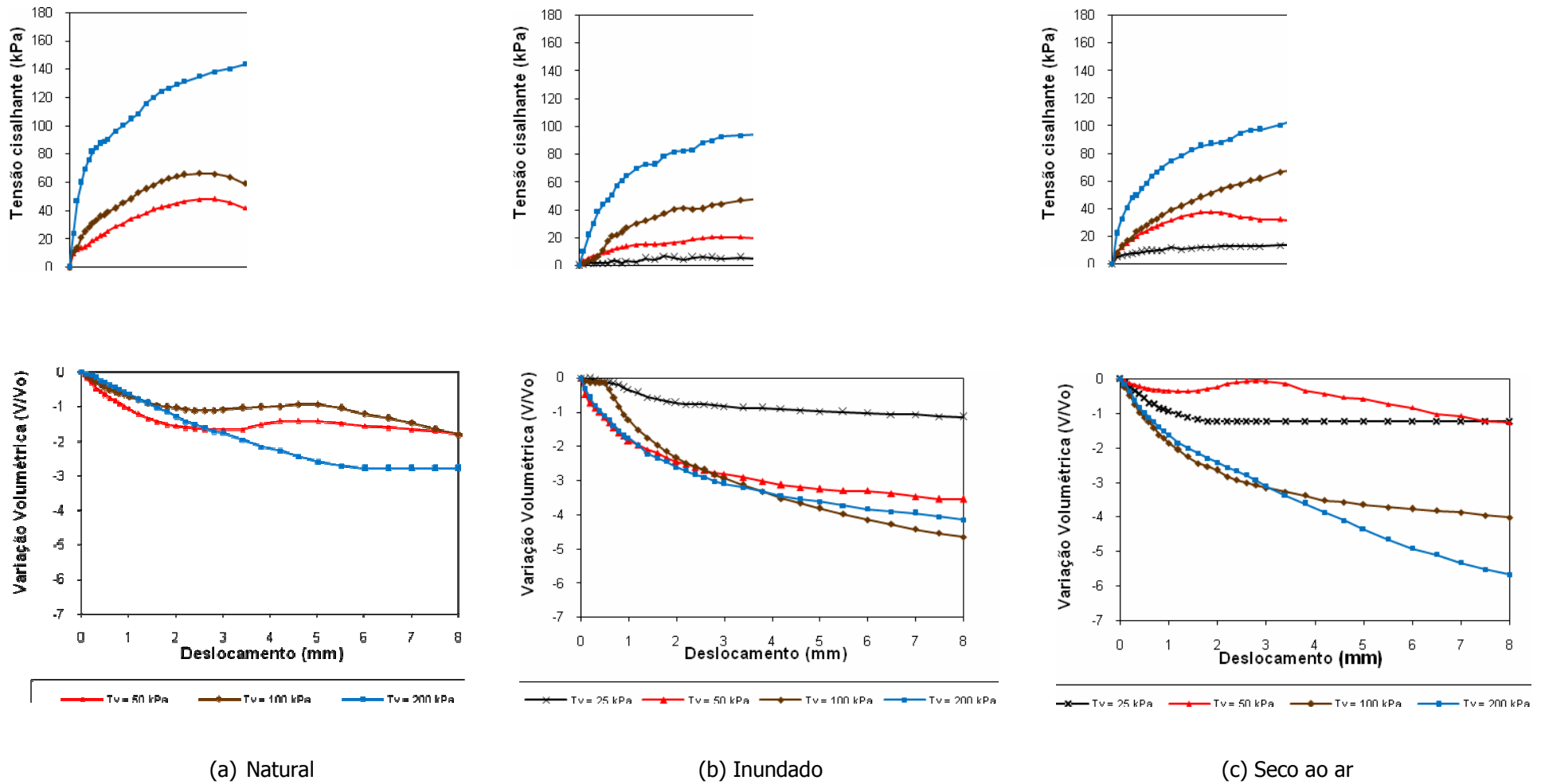


Figura 5.10 – Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do Horizonte A



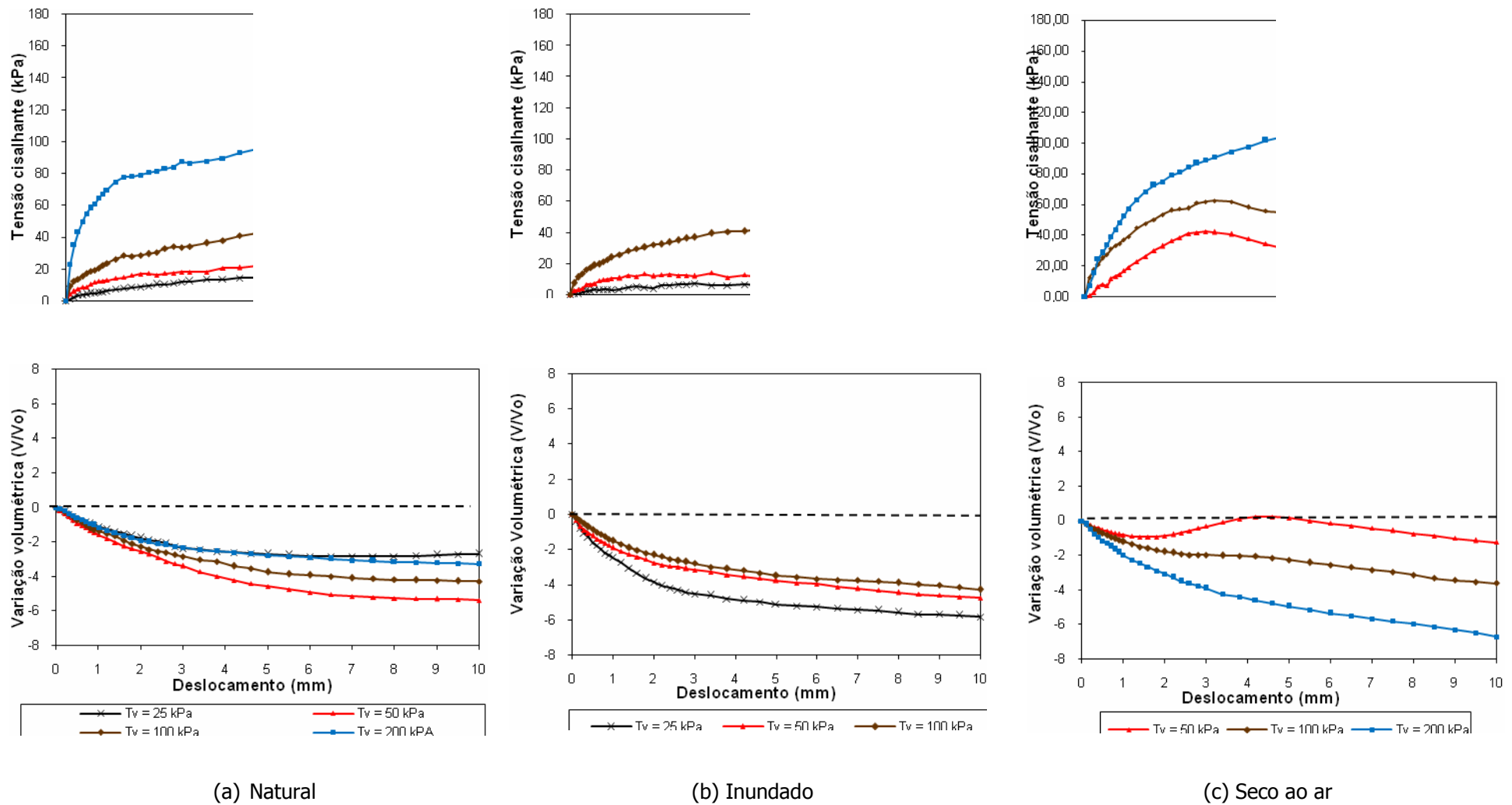


Figura 5.11 – Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do Horizonte B

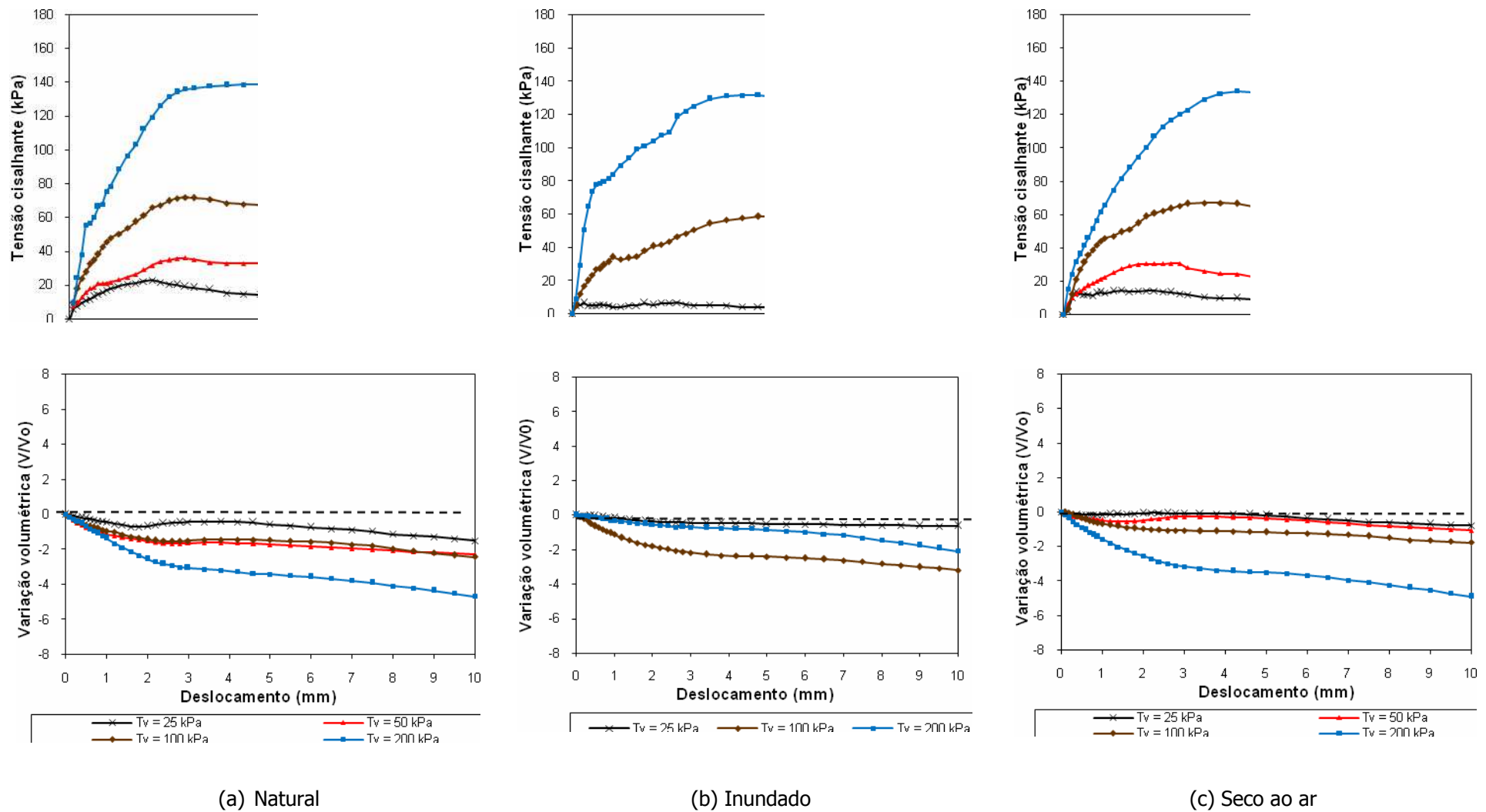


Figura 5.12 – Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras do Horizonte C

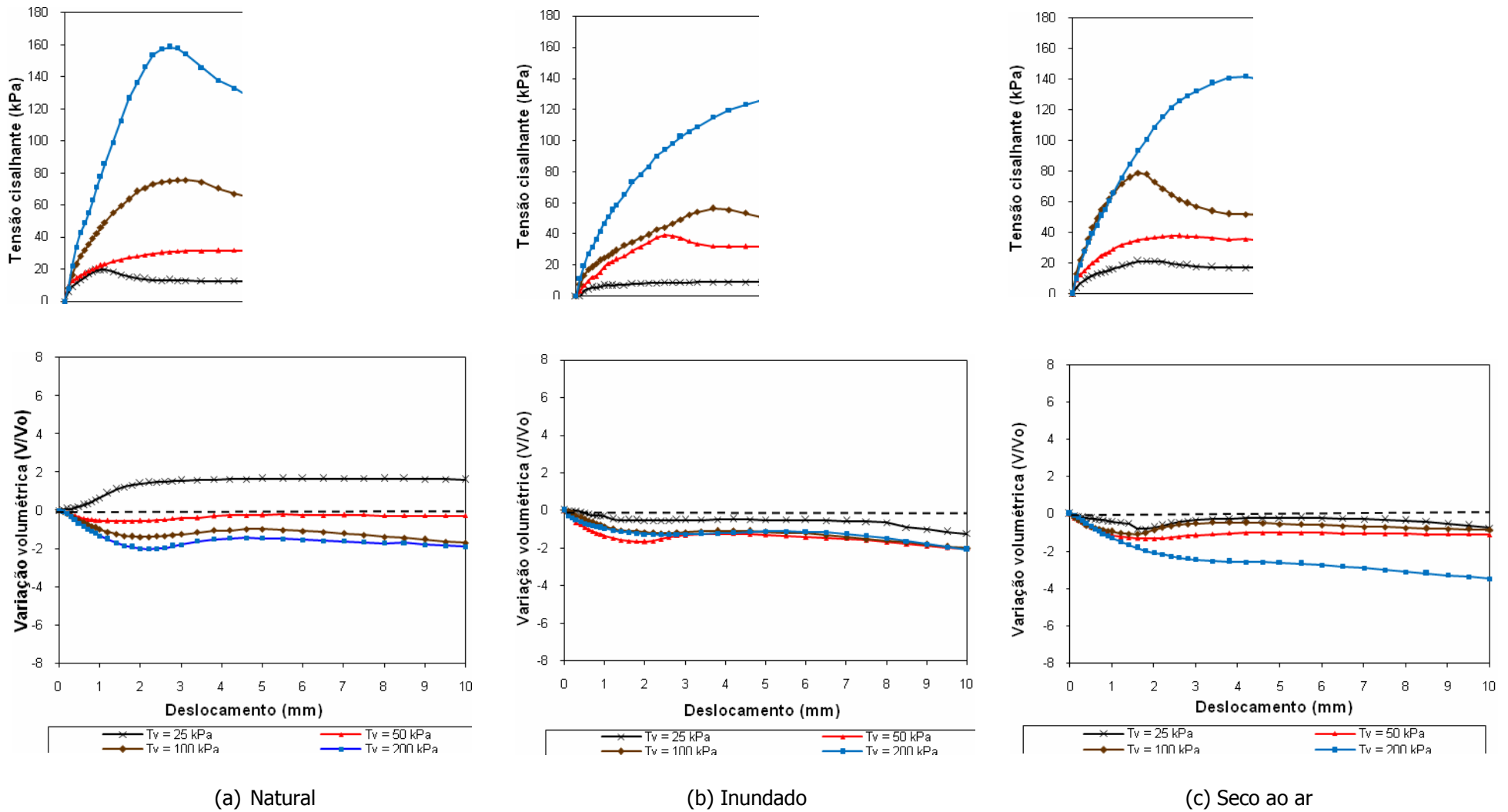


Figura 5.13 – Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras da Camada 2C

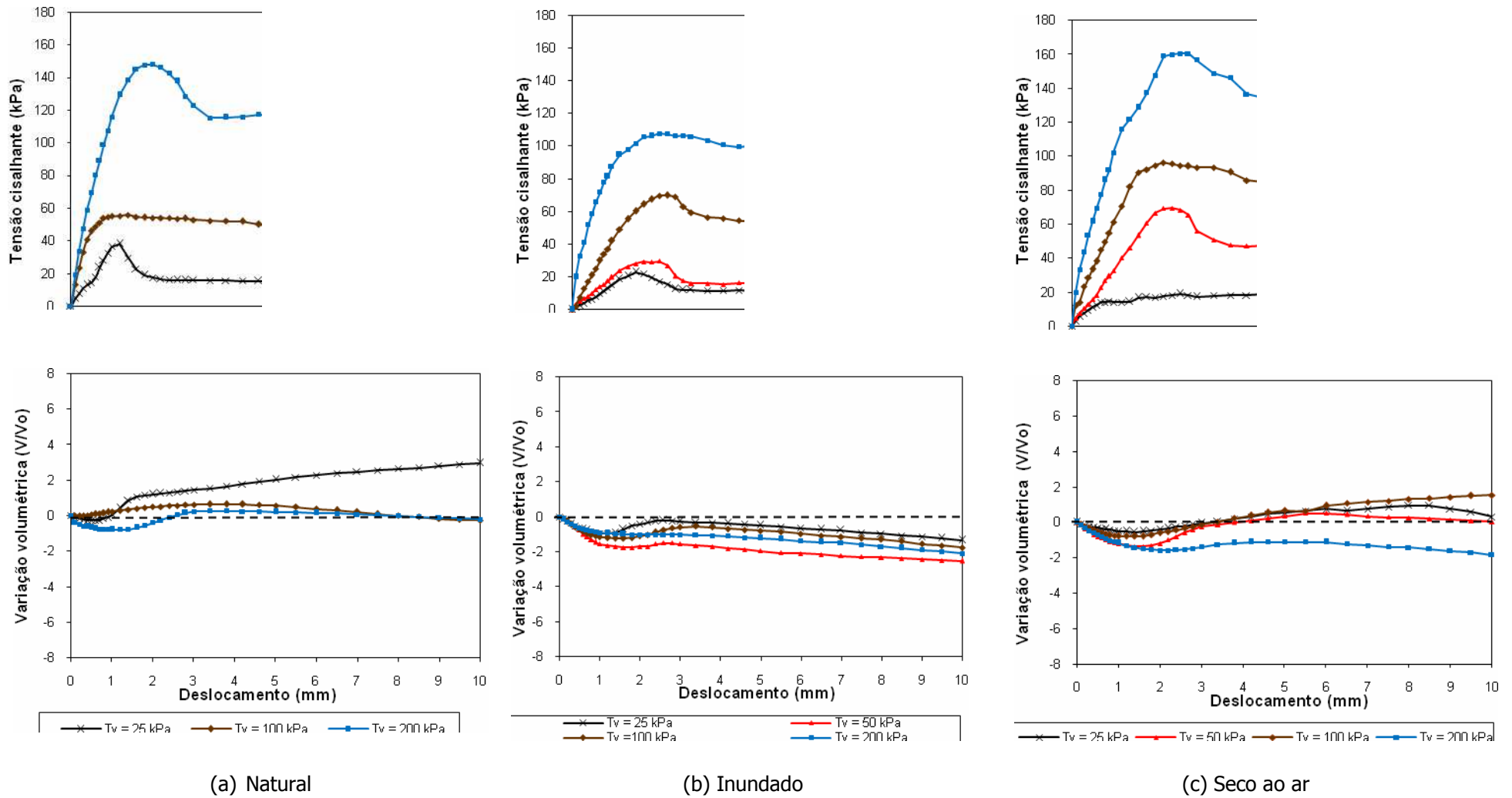


Figura 5.14 – Curvas de tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para amostras da Camada 1A.

A Tabela 5.6 apresenta o resumo dos ensaios de cisalhamento direto com os valores do intercepto coesivo (coesão) e ângulo de atrito interno do solo. A Figura 5.15 apresenta as envoltórias de ruptura obtidas nestes ensaios.

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto na umidade natural, inundado e seco ao ar

Solo/Rocha	Tensão vertical (kPa)	Tensão de Cisalhamento		
		Natural	Inundado	Seco ao ar
Horizonte A	25	8,1	7,9	17,1
	50	48,3	22,2	37,7
	100	66,6	56,7	78,2
	200	156,5	108,6	144,1
	<b><i>c (kPa)</i></b>	<b><i>3,35</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>1,58</i></b>
	<b><i>Φ (graus)</i></b>	<b><i>36,72</i></b>	<b><i>28,38</i></b>	<b><i>35,83</i></b>
Horizonte B	25	18,5	8,2	18,4
	50	26,8	16,3	42,2
	100	63,7	50	62,2
	200	127,7	-	111,3
	<b><i>c (kPa)</i></b>	<b><i>0,83</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>5,88</i></b>
	<b><i>Φ (graus)</i></b>	<b><i>32,18</i></b>	<b><i>24,64</i></b>	<b><i>28,43</i></b>
Horizonte C	25	22,7	6	14,5
	50	35,9	56,6	30,6
	100	71,9	58,8	66,9
	200	138,9	132,2	134,3
	<b><i>c (kPa)</i></b>	<b><i>4,34</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>0</i></b>
	<b><i>Φ (graus)</i></b>	<b><i>33,90</i></b>	<b><i>32,68</i></b>	<b><i>33,71</i></b>
Camada 2C	25	19,5	12,2	21,5
	50	31,7	39,2	38,9
	100	75,6	56,5	79
	200	158,3	132,4	142
	<b><i>c (kPa)</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>5,64</i></b>
	<b><i>Φ (graus)</i></b>	<b><i>37,84</i></b>	<b><i>32,91</i></b>	<b><i>34,61</i></b>
Camada 1A	25	38,1	23	20
	50		29,7	69,5
	100	56	69,9	96,4
	200	148	109,5	160,4
	<b><i>c (kPa)</i></b>	<b><i>10,95</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>17,55</i></b>
	<b><i>Φ (graus)</i></b>	<b><i>32,77</i></b>	<b><i>27,08</i></b>	<b><i>28,43</i></b>

Obs.:  $c$  = intercepto coesivo;  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo.

Em geral, a inundação reduziu a tensão de cisalhamento máxima para todos os níveis de tensão aplicados nos ensaios. Nestes materiais, o aumento da umidade e grau de saturação anulou o intercepto coesivo e reduziu levemente o ângulo de atrito interno. Com a

saturação anula-se o efeito da sucção (parcela de resistência de solos não saturados) e a resistência destes solos arenosos torna-se somente devido ao atrito entre as partículas. Nos ensaios com corpos de prova secos ao ar (no mínimo de 72h) as tensões cisalhantes tiveram resultados parecidos com os ensaios de amostras naturais, apresentando valores mais elevados de coesão e atrito.

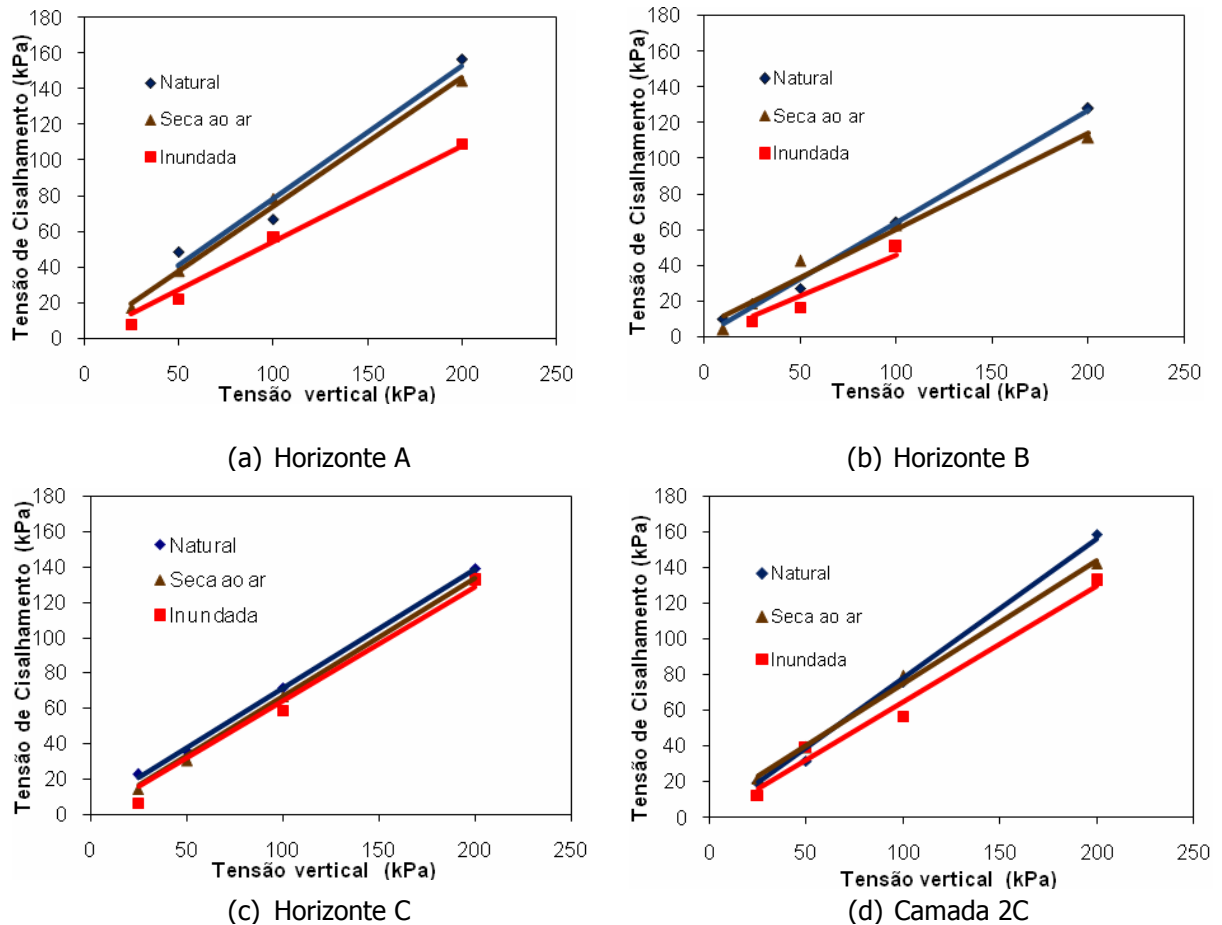


Figura 5.15 – Envoltórias de ruptura ao cisalhamento para os ensaios realizados na umidade natural, inundada e seca ao ar.

## 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 avaliação indireta da erodibilidade dos horizontes/camadas do perfil geotécnico da voçoroca na Fazenda Taquari 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

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

Os fatores de erodibilidade K da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) para os horizontes/camadas estudadas foram estimados através da proposta de Wischmeier e Smith (1978).

Nesta pesquisa, a determinação da porcentagem de matéria orgânica foi realizada no Laboratório de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM. O teor de silte, areia fina e argila foram determinados em ensaios granulométricos (Tabela 5.3 e Figura 5.5) e a estrutura e a permeabilidade foram obtidas na análise visual do perfil em estudo na voçoroca. A estrutura foi avaliada segundo as especificações de Lemos e Santos (1982) e os coeficientes de permeabilidade foram obtidos em ensaios in situ, realizados pelo grupo de estudos orientados pelo prof. Rinaldo Pinheiro e pela prof<sup>a</sup> Andrea Nummer, com a técnica do piezômetro (Horizontes A e B) e estimados no ensaio de infiltrabilidade. A Tabela 5.7 apresenta a estimativa do  $K_{USLE}$  ((t/ha/(t.m/ha.mm/hora))) para os horizontes/camadas do perfil estudado.

Tabela 5.7 – Estimativa do parâmetro  $K_{USLE}$  segundo proposta de Wischmeier e Smith (1978)

Horizonte	Areia fina + silte (%)	Argila (%)	MO (%)	Estrutura	Classe de permeabilidade	$K_{USLE}$	Classificação
Hor. A	14	8	0,5	4	2	0,168	Média
Hor. A	9	14	0,5	4	2	0,117	Baixa
Hor. B	19	6	0,5	4	2	0,219	Média
Hor. C	9	4	0,1	4	2	0,162	Média
Cam 2c	12	0	0,2	4	2	0,196	Média
Cam 1a	6	2	0,1	4	2	0,102	Baixa

Segundo Carvalho (1994) para valores situados de  $K$  entre 0,15 e 0,30, os solos são classificados como de média erodibilidade. Pelos valores encontrados verifica-se que não se consegue separar os materiais deste perfil quanto à erodibilidade, utilizando este parâmetro.

### 5.5.2 Avaliação do potencial de desagregação dos solos

O ensaio de desagregação permite uma análise qualitativa da erodibilidade dos solos e materiais de alteração. Utilizaram-se amostras indeformadas na umidade natural (nas condições de campo quando da coleta) e seca ao ar por um período de no mínimo 72 horas.

O comportamento das amostras é avaliado visualmente, quando da inundação, descrevendo-se os efeitos do avanço da frente de ascensão capilar, tais como: abatimento, inchamento, velocidade de desagregação, formação de fissuras no tipo e ruptura nas bordas das amostras.

A Tabela 5.8 apresenta a descrição do comportamento das amostras nas duas condições de umidade e o resultado final do ensaio. Estes ensaios inicialmente foram apresentados por Tatto (2007) para as amostras do horizonte B e camada 1A, e complementados por Schneider et al. (2008) e Sangoi et al. (2008). A Figura 5.16 apresenta a comparação entre os ensaios realizados nas amostras do horizonte B e no arenito (camada 1A).



Tabela 5.8 – Resultado dos ensaios de desagregação

Hor.	Condição Inicial	Comportamento apresentado durante o ensaio	Comportamento final
A	Natural	Rápida ascensão capilar com quase nenhuma desagregação, nenhum inchamento, pequenas rupturas laterais. Amostra não desagrega	Intacta
	Seca ao ar	-	Intacta
B	Natural	Rápida ascensão capilar (10min) com muito pouca desagregação, abatimento, nenhum inchamento, ruptura nas bordas e fissuração no topo.	Intacta
	Seca ao ar	Rápida ascensão capilar (5min), ruptura nas bordas, com muito pouca desagregação, abatimento.	Intacta
C	Natural	Rápida ascensão capilar, ruptura nas bordas. Amostra desagrega completamente.	Desagregação total
	Seca ao ar	-	Desagregação total
2C	Natural	Rápida ascensão capilar (5min), com fissuração. Amostra desagrega completamente.	Desagregação total
	Seca ao ar	-	Desagregação total
1A	Natural	Rápida ascensão capilar (5min) com uma alta velocidade de desagregação devido à liquefação do solo. Formação de trinca, ruptura nas bordas e fissuração no topo. Nenhum inchamento. Abatimento de 1,1cm e raio de influência de 4,5cm.	Desagregação total
	Seca ao ar	Ascensão capilar lenta (30min) com uma alta velocidade de desagregação devido à liquefação do solo. Formação de trinca, rupturas nas bordas e fissuração no topo. Nenhum inchamento. Abatimento de 1cm e raio de influência de 5cm.	Desagregação total

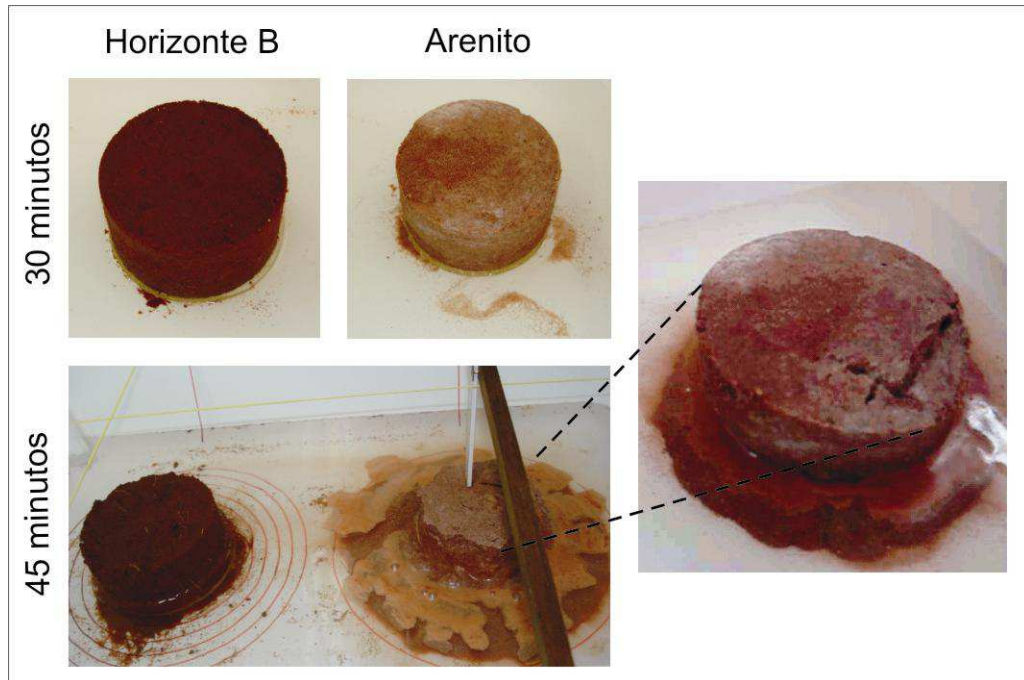


Figura 5.16 – Comportamento inicial das amostras quando submetidas à inundação (TATTO, 2007)

Os solos dos horizontes A e B, independentemente de suas condições de umidade, mostraram-se mais resistentes frente à inundação. Sua estrutura, não confinada, permaneceu quase que intacta após o término do ensaio, devido à presença de grãos de tamanho silte e argila, presença de óxidos de ferro e matéria orgânica. O mesmo comportamento não foi verificado para o horizonte C e nas camadas de arenito da base da feição erosiva. Esta demonstrou um alto poder de desagregação, não resistindo à inundação completa. Constatou-se que as condições nas quais se encontravam as amostras, natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência no teste, pois em ambas as condições, as amostras apresentaram uma completa desagregação, principalmente por abatimento, formando uma pilha de material desestruturado.

### 5.5.3 Critérios de erodibilidade baseados na metodologia MCT

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 à erosão hídrica. Os ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, propostos pelo critério, foram descritos nos itens 3.3.3.2 e 3.3.4. Trabalhos a cerca deste assunto estão apresentados em Nogami e Villibor (1985), Cozzalino e Nogami (1993) e Villibor e Nogami (2009).

As Tabelas 5.9, 5.10, 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. Outros autores denominam o coeficiente de sorção de índice de absorção de água (MENEZES e PEJON, 2010). O coeficiente de sorção ou índice de absorção representa a velocidade de ascensão capilar dos solos, relacionada à 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).

Os ensaios foram conduzidos, adotando-se a mesma metodologia de Tatto (2007) e Fernandes (2011) baseados no trabalho de Bastos (1999). Os ensaios foram realizados com três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, seca ao ar e pré-umedecidas. A proposta de Nogami e Villilbor (1979) adotava um valor para relação  $\pi/s > 52$  para caracterizar os solos erodíveis. Pejon (1992 *apud* Bastos 1999) propõe  $\pi/s > 40$  como valor limite para esta relação. Menezes e Pejon (2010) consideram a mesma relação, porém apresentam de forma diferente ( $E = 52 \cdot s / \pi$ ). Quando o valor de  $E < 1$ , os solos são erodíveis.

Tabela 5.9 – 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	umidade 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	0,590	0,19	0,32	0,554	0,29	0,52	0,055	0,90	16,4
2	0,235	0,20	0,85	0,413	0,60	1,45	0,046	1,94	42,2
3	0,276	0,25	0,91	0,536	0,11	0,21	0,062	1,15	18,5
<b>Média</b>	<b>0,367</b>	<b>0,21</b>	<b>0,69</b>	<b>0,499</b>	<b>0,33</b>	<b>0,73</b>	<b>0,054</b>	<b>1,33</b>	<b>25,7</b>

Tabela 5.10 – 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	umidade 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	0,825	13,1	15,9	0,694	35,1	50,6	0,043	73,2	1702
2	1,053	34,9	33,1	0,986	28,5	28,9	0,062	86,5	1395
3	0,488	19,2	39,3	0,522	49,3	94,4	-	11,7	-
<b>Média</b>	<b>0,789</b>	<b>22,4</b>	<b>29,4</b>	<b>0,734</b>	<b>37,6</b>	<b>58,0</b>	<b>0,053</b>	<b>57,1</b>	<b>1548</b>

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

Hor. C	umidade 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	0,727	78,0	107,3	1,089	70,4	64,6	0,024	74,0	3083
2	1,228	76,1	62,0	1,250	75,2	60,2	0,046	75,3	1637
3	1,012	79,6	78,6	0,994	78,7	79,2	0,056	81,7	1459
<b>Média</b>	<b>0,989</b>	<b>77,9</b>	<b>82,6</b>	<b>1,111</b>	<b>74,8</b>	<b>68,0</b>	<b>0,042</b>	<b>77,0</b>	<b>2060</b>

Tabela 5.12 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade da camada 2C – critério de erodibilidade da metodologia MCT

Camada 2C	umidade 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	1,166	82,1	70,4	0,964	75,6	78,4	0,082	72,4	883
2	1,048	79,7	76,0	0,715	76,7	107,3	0,070	70,1	1001
3	0,693	75,3	108,7	0,341	60,4	177,1	0,011	78,7	7154
<b>Média</b>	<b>0,969</b>	<b>79,0</b>	<b>84,7</b>	<b>0,846</b>	<b>70,9</b>	<b>120,9</b>	<b>0,054</b>	<b>73,7</b>	<b>3013</b>

Tabela 5.13 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade da camada 1A – critério de erodibilidade da metodologia MCT

Camada 1A	umidade 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	0,338	84,6	250,3	0,703	82,4	117,2	0,060	74,9	1248
2	1,354	86,0	63,5	0,713	87,9	123,3	0,030	80,3	2677
3	0,326	84,8	260,1	0,991	77,7	78,4	0,060	23,1	385
<b>Média</b>	<b>0,673</b>	<b>85,1</b>	<b>191,3</b>	<b>0,802</b>	<b>82,6</b>	<b>106,3</b>	<b>0,021</b>	<b>77,6</b>	<b>1437</b>

As Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam as curvas médias (3 amostras) 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. Nas Figuras 5.17 e 5.18 foram colocados os resultados dos ensaios de permeabilidade *in situ* com a técnica do piezômetro, realizados nos horizontes A e B, verificando-se que, os ensaios realizados em amostras pré-umedecidas, os valores são da mesma ordem de grandeza que os valores obtidos com a técnica do piezômetro (FERNANDES, 2011).

A Figura 5.22 apresenta a aplicação destes dois critérios aos materiais estudados.

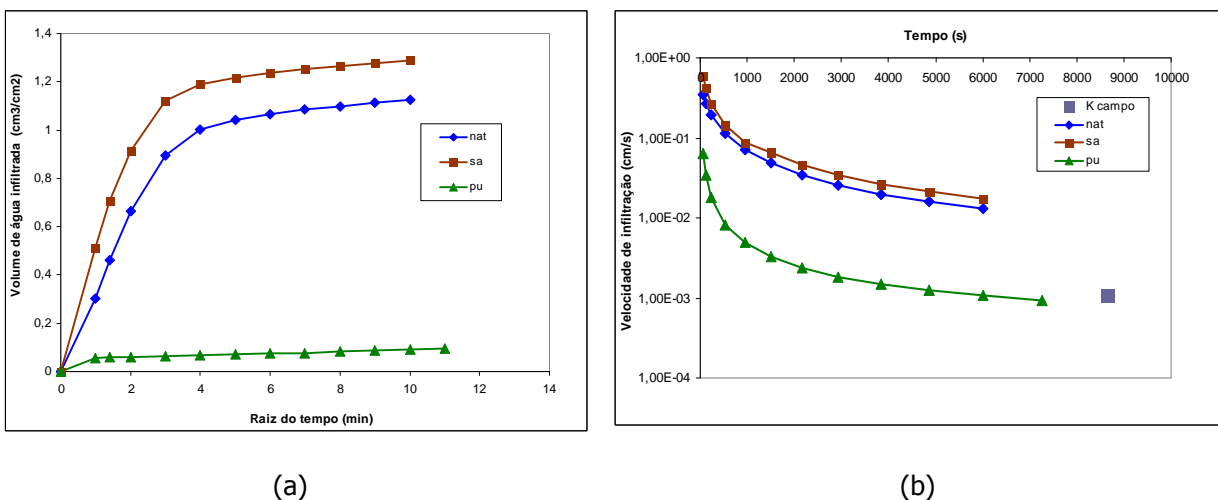
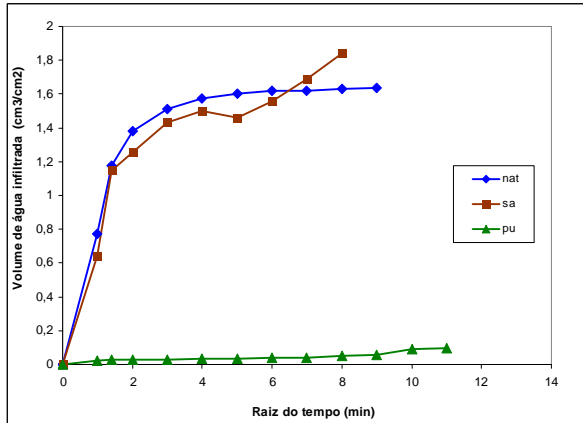
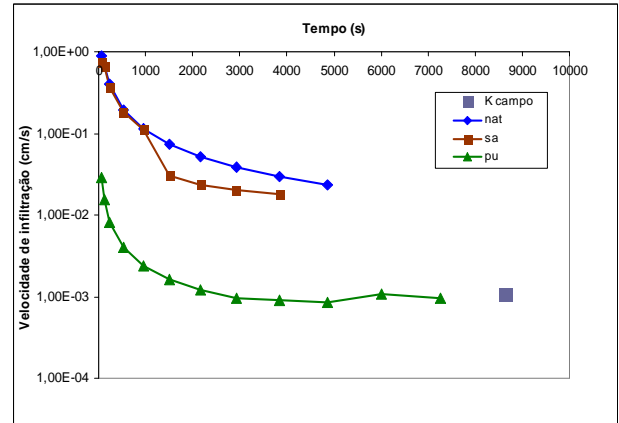


Figura 5.17 – (a) volume de água infiltrada (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte A

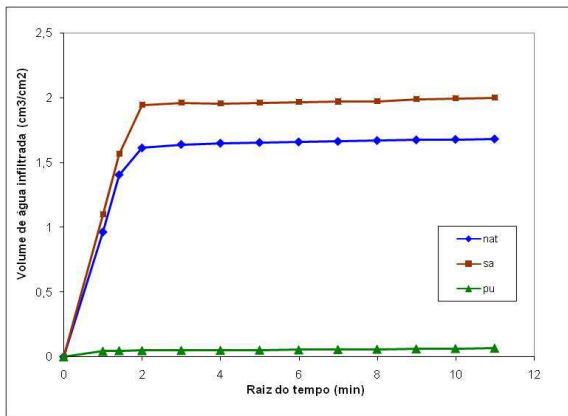


(a)

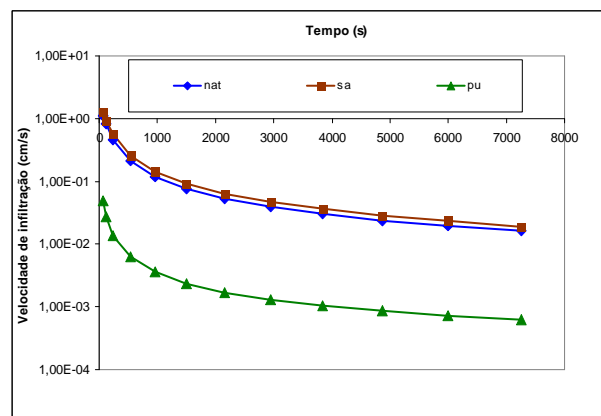


(b)

Figura 5.18 – (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da horizonte B

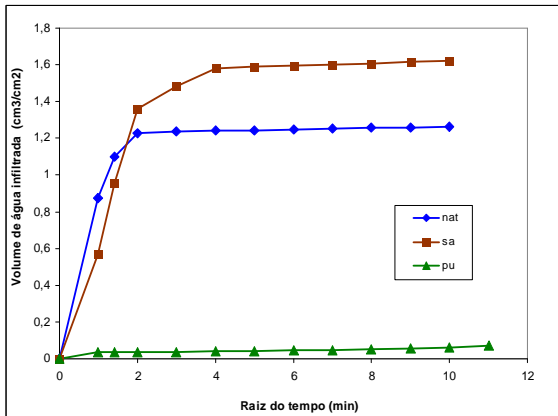


(a)

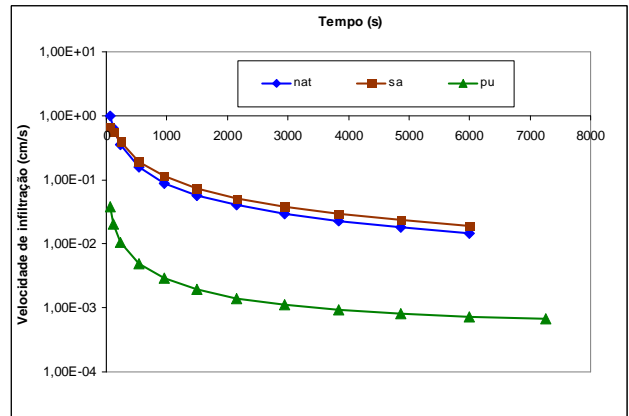


(b)

Figura 5.19 – (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte C

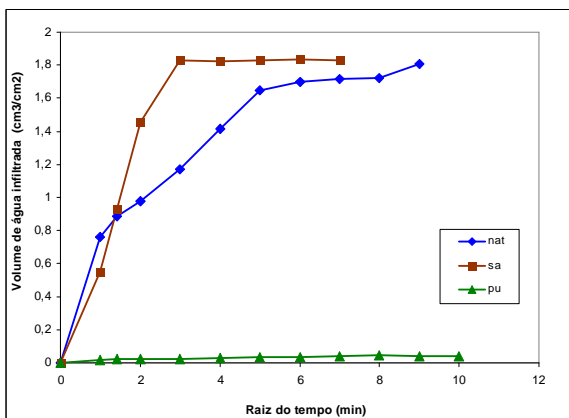


(a)

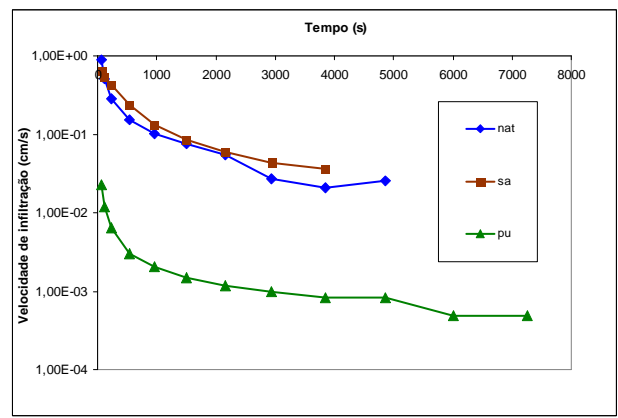


(b)

Figura 5.20 – (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da camada 2C



(a)



(b)

Figura 5.21 – (a) volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da camada 1A

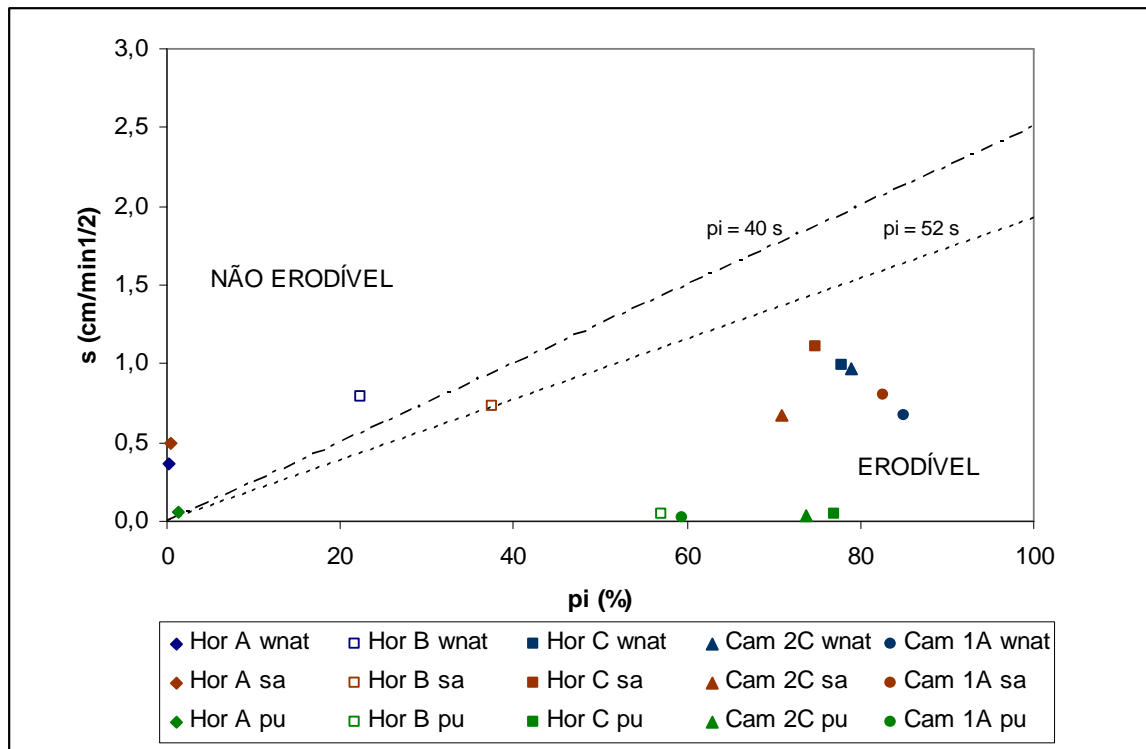


Figura 5.22 – Aplicação do critério de erodibilidade pela metodologia MCT para os materiais estudados

Os resultados apresentados destacam a maior susceptibilidade à erosão do horizonte C e das camadas de arenito (1A e 2C) em relação aos horizontes A e B.

Verifica-se uma certa tendência de aumento da velocidade de ascensão capilar ( $s$ ) e da perda por imersão para as amostras secas ao ar para os solos dos horizontes A e B. Para o horizonte C e camadas de arenito não verificou-se uma diferença significativa entre estes parâmetros. A perda por imersão nas amostras secas ao ar foi sempre mais elevada em relação às amostras na umidade natural e pré-umedecidas para os horizontes A e B. Nas outras camadas os valores de perda por imersão foram elevados, não apresentando esta tendência. As Figuras 5.23 e 5.24 apresentam graficamente a variação da perda por imersão e o do coeficiente de sorção com a condição de umidade das amostras.

Nas amostras pré-umedecidas verificou-se uma tendência de diminuição na velocidade de ascensão capilar e um aumento na perda por imersão. Esta observação também foi descrita por Fernandes (2011) e Bastos (1999). Segundo Bastos (2000), a variação da razão entre as grandezas que representam estas propriedades ( $\pi/s$ ) é que determina qualquer mudança na avaliação de erodibilidade pelo critério proposto por Nogami e Villibor (1979).



O horizonte A para qualquer condição de umidade apresentou-se como não erodível, verificando-se que na condição pré-umedecida a erodibilidade é mais elevada que para as outras condições. Para o horizonte B, somente na umidade natural este horizonte apresentou-se não erodível, para condição seca ao ar e pré-umedecida a relação  $\pi/s$  foi superior a 52, caracterizando um solo erodível (Figura 5.25).

O horizonte C, as camadas de arenito 1A e 2C apresentaram-se erodíveis para qualquer condição de umidade. As relações  $\pi/s$  para condição pré-umedecidas foram extremamente elevadas. O maior destacamento que ocorre nas camadas de arenito está, provavelmente, associado ao baixo grau de cimentação entre as partículas e a perda de resistência devido à sucção.

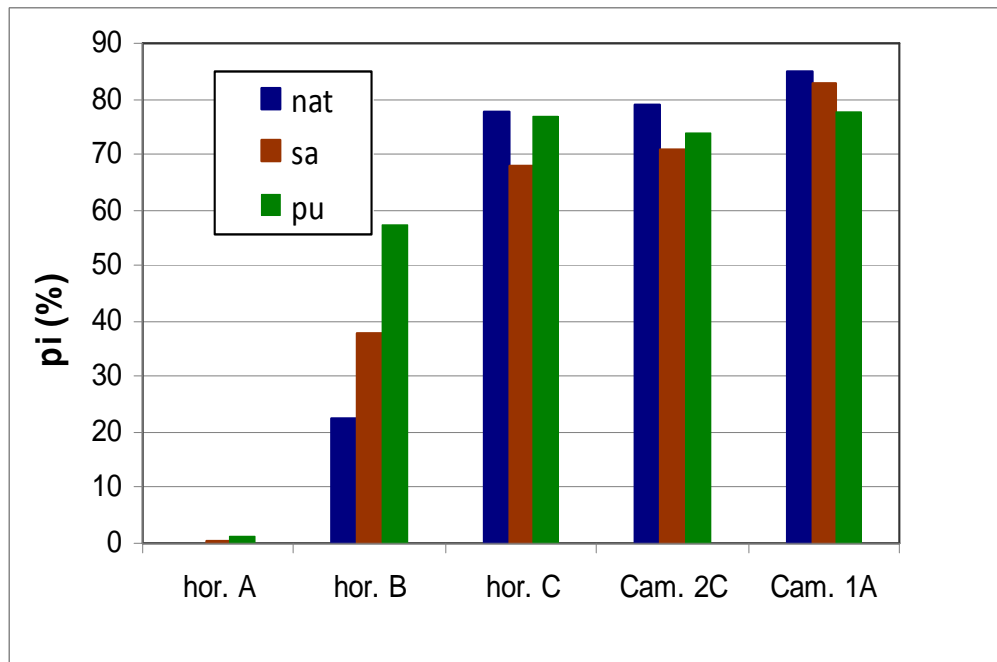


Figura 5.23 – Variação da perda por imersão com a condição de umidade das amostras

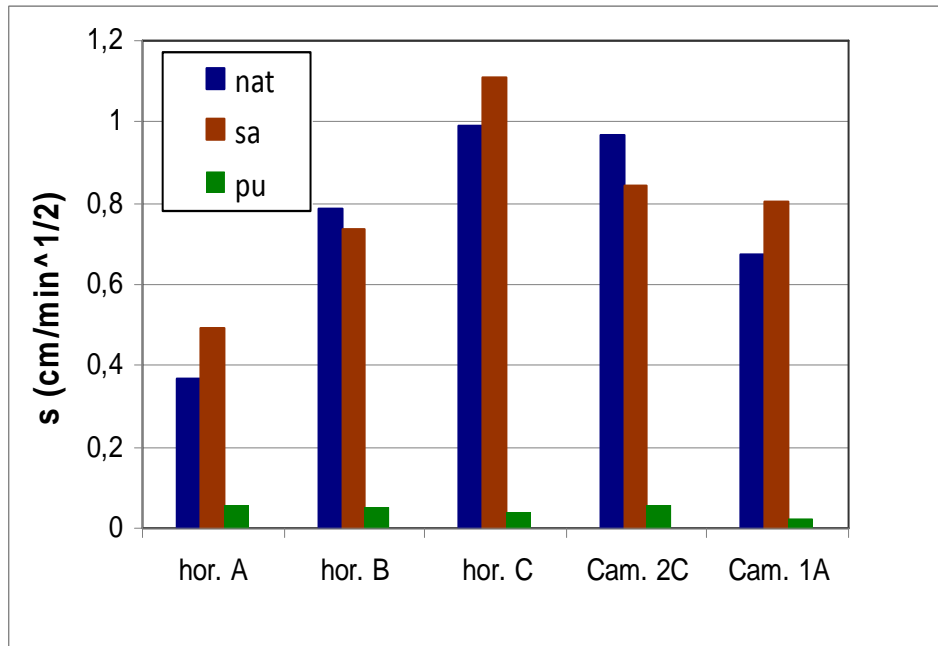


Figura 5.24 – Variação da sorção com a condição de umidade das amostras

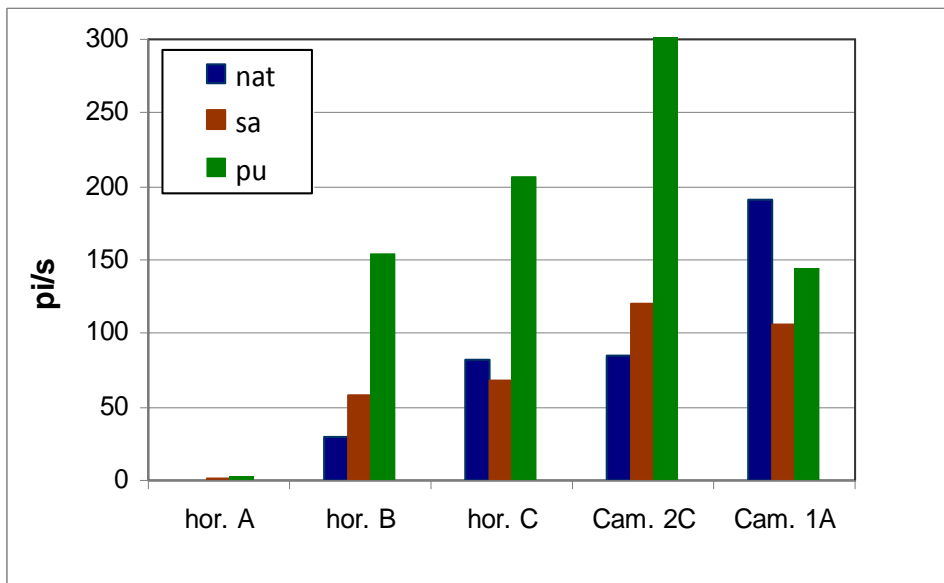


Figura 5.25 – Relação  $\pi/s$  em função da umidade das amostras (os resultados da relação  $\pi/s$  na condição pré-umedecida estão reduzidos em 100 vezes)

A metodologia MCT apresentou uma boa relação e correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos/rochas nos locais estudados, comprovando sua aplicabilidade a estes materiais.

## 5.6. Avaliação direta da erodibilidade

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

Um detalhado levantamento sobre a origem, o desenvolvimento e as experiências brasileiras com o emprego do ensaio Inderbitzen foi apresentado por Bastos (1999). Nesta pesquisa os ensaios foram realizados conforme a especificações apresentadas no item 3.3.4.

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados em termos de perda de solo (desagregação) por unidade de área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) pelo tempo de ensaio (min), conforme apresentado no item 3.3.4 (Figura 3.11). Para cada condição específica de escoamento de água e inclinação de rampa determina-se a tensão hidráulica aplicada no ensaio ( $\tau_h$ ). A Tabela 3.2 (item 3.3.4) apresenta a determinação das tensões hidráulicas aplicadas.

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

Na literatura sobre o tema, uma dúvida em relação a 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 transcreve-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 5.26 apresenta a relação entre a perda de solo por unidade de área da amostra pelo tempo de ensaio para as amostras pré-umedecidas do horizonte B nas vazões de 3 e 6 l/min. Verifica-se o acréscimo da perda de solo com o aumento da inclinação da rampa e da vazão. A Figura 5.27 apresenta as curvas de perda de solo, para uma inclinação de 10° da rampa e vazão 3 l/min, na umidade natural, para as amostras dos horizontes A, B e C e os arenitos (Camada 2C e 1A). Nestas condições o horizonte C e os arenitos apresentaram uma taxa de desagregação mais elevada.

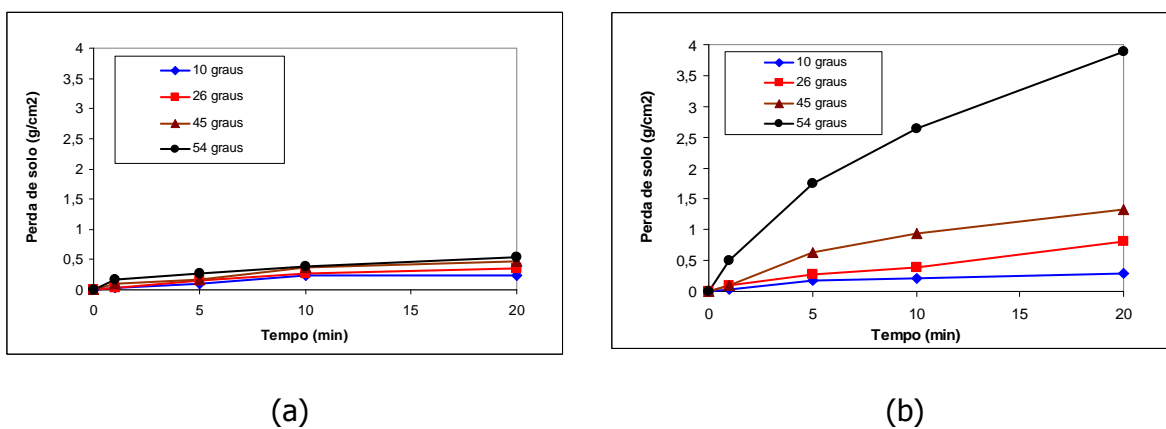


Figura 5.26 – Curvas típicas obtidas no ensaio de Inderbitzen para amostras do Horizonte B pré-umedecidas para as vazões de 3 l/min (a) e 6 l/min (b)

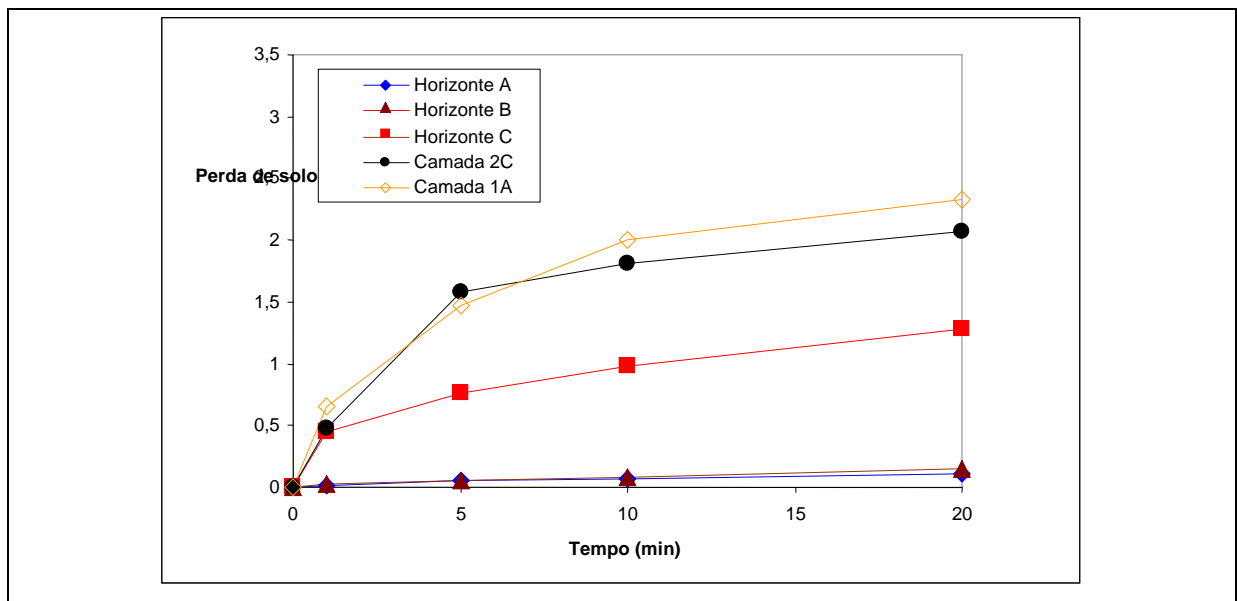


Figura 5.27 – Perda de solo obtida para vazão de 3 l/min, na condição de umidade natural, para os horizontes/camadas estudados

A Tabela 5.14 resume os resultados obtidos para o perfil da voçoroca para as três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, secas ao ar e pré-umedecidas.

Tabela 5.14 – 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  $\tau_{\text{hcrit}}$  (Pa) e K ( $10^{-2}$  g/cm<sup>2</sup>/min/Pa)

SOLO	COND	Q = 3 l/min				Q = 6 l/min				$\tau_{\text{hcrit}}$ (Pa)	K ( $10^{-2}$ g /cm <sup>2</sup> / min/Pa)
		i=10°	i=26°	i=45°	i=54°	i=10°	i=26°	i=45°	i=54°		
$\tau_h$ (Pa)		1,136	1,710	2,585	3,297	1,393	2,018	2,742	3,239		
Hor. A	w nat	6,4	5,5	9,8	23,4	-	14,1	18,6	20,7	indet.	0,78
	seca ar	8,5	7,7	9,0	-	15,8	-	28,7	37,9	indet.	1,13
	pré-umi	5,3	5,6	-	-	21,4	33,4	37,4	33,6	indet.	1,38
Hor. B	w nat	8,3	15,2	-	-	50,9	60,8	487	416,9	1,33	24,3
	seca ar	16,1	138,7	140	-	73,3	-	-	406	1,02	15,5
	pré-umi	22,8	27,1	-	-	20,6	38,3	93,3	264,2	1,29	10,3
Hor. C	w nat	97,5	373,5	-	-	235,9	856,4	761,7	-	0,79	45,8
	seca ar	70,9	325,0	659,0	-	197,6	240,7	610,0	-	0,92	34,6
	pré-umi	136,1	104,2	646,7	-	146,0	177,5	641,9	-	1,08	36,3
Cam 2C	w nat	181,0	420,9	-	-	243,7	669,1	784,6	-	0,67	40,5
	seca ar	154,9	470,0	-	-	415,9	660,0	-	-	0,75	52,4
	pré-umi	159,8	465,4	631,0	-	146,0	177,5	633,9	-	0,73	30,7
Cam 1A	w nat	200,3	312,5	687,4	-	198,9	701,6	859,0	-	0,76	42,3
	seca ar	165,4	468,5	867,8	-	299,8	694,5	846,1	-	0,68	44,5
	pré-umi	172,1	514,2	774,3	-	-	682,8	803,7	-	0,48	37,9

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam os resultados obtidos no ensaio Inderbitzen para a perda de solo (g/cm<sup>2</sup>/min) pela tensão hidráulica para todos os materiais estudados. Os valores de K (inclinação das retas ajustadas) obtidos são de mesma magnitude dos apresentados por Bastos (1999), porém superiores aos valores encontrados por Fernandes (2011). Estes resultados permitem fazer uma avaliação comparativa da susceptibilidade a

erosão dos horizontes/camadas que constituem a voçoroca em estudo. O horizonte C e as camadas de arenito apresentaram maior erodibilidade que os horizontes A e B, em qualquer condição de umidade inicial das amostras.

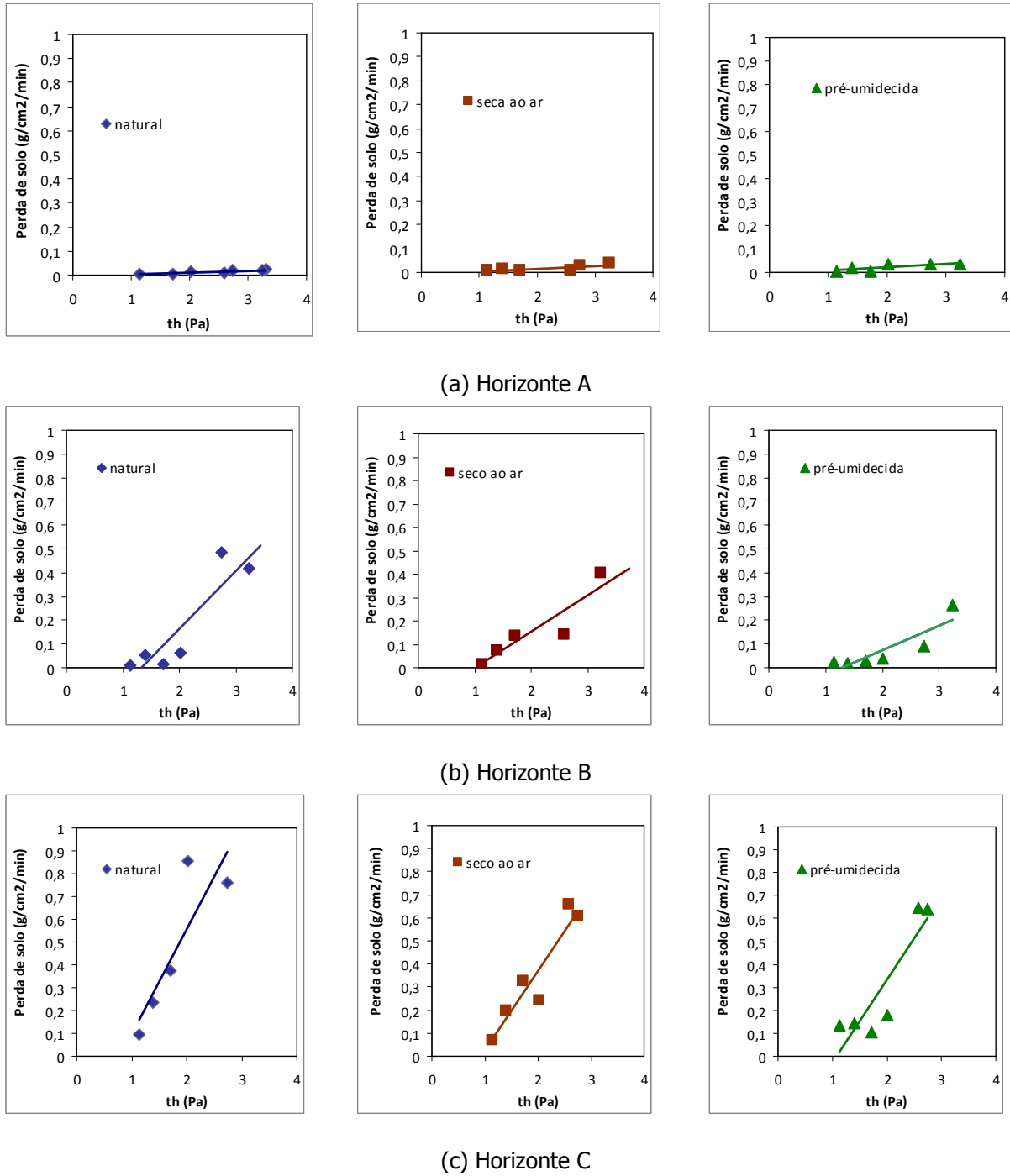
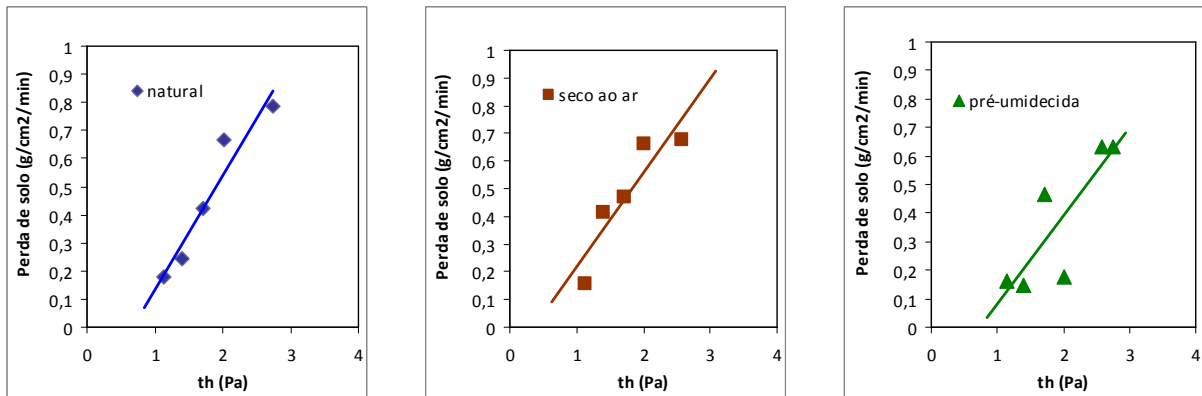
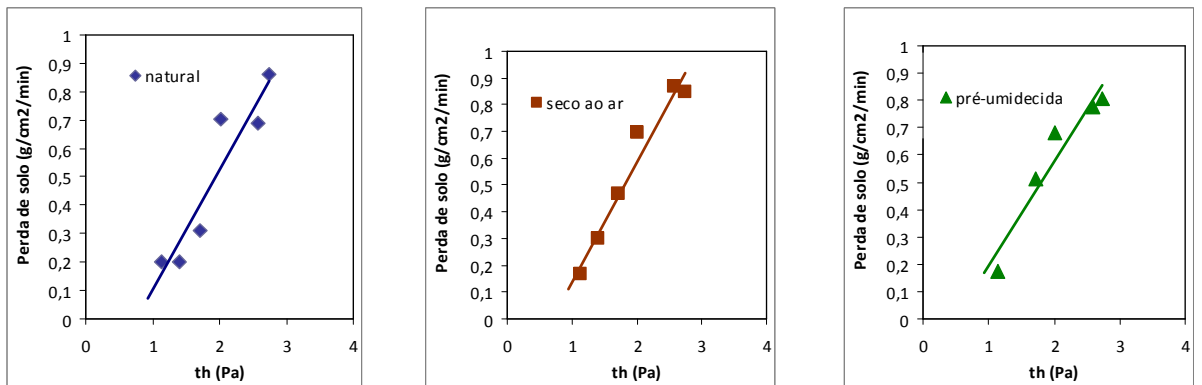


Figura 5.28 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras dos horizontes A, B e C nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida



(a) Camada 2c



(b) Camada 1A

Figura 5.29 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as camadas de arenito 2C e 1A nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida

Na Figura 5.30 são apresentados em forma de gráfico os resultados dos ensaios de Inderbitzen para cada um dos horizontes/camadas estudados em função da condição inicial de umidade. Para as amostras de arenito (camadas 2c e 1A) verifica-se certa tendência de valores mais elevadas de erodibilidade na condição seca ao ar. Verifica-se claramente os valores bem mais elevados de erodibilidade do horizonte C e camadas de arenito em relação ao horizonte A. O horizonte B os valores situaram-se em um patamar intermediário. Os resultados médios de erodibilidade independente da condição de umidade inicial das amostras estão apresentados na Figura 5.31 O horizonte A apresentou um valor de  $K = 0,0095 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ , bem inferior ao horizonte B ( $K = 0,17 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ). Os valores de  $K$  para o horizonte C e camadas de arenito situaram-se entre  $0,33$  e  $0,42 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ .

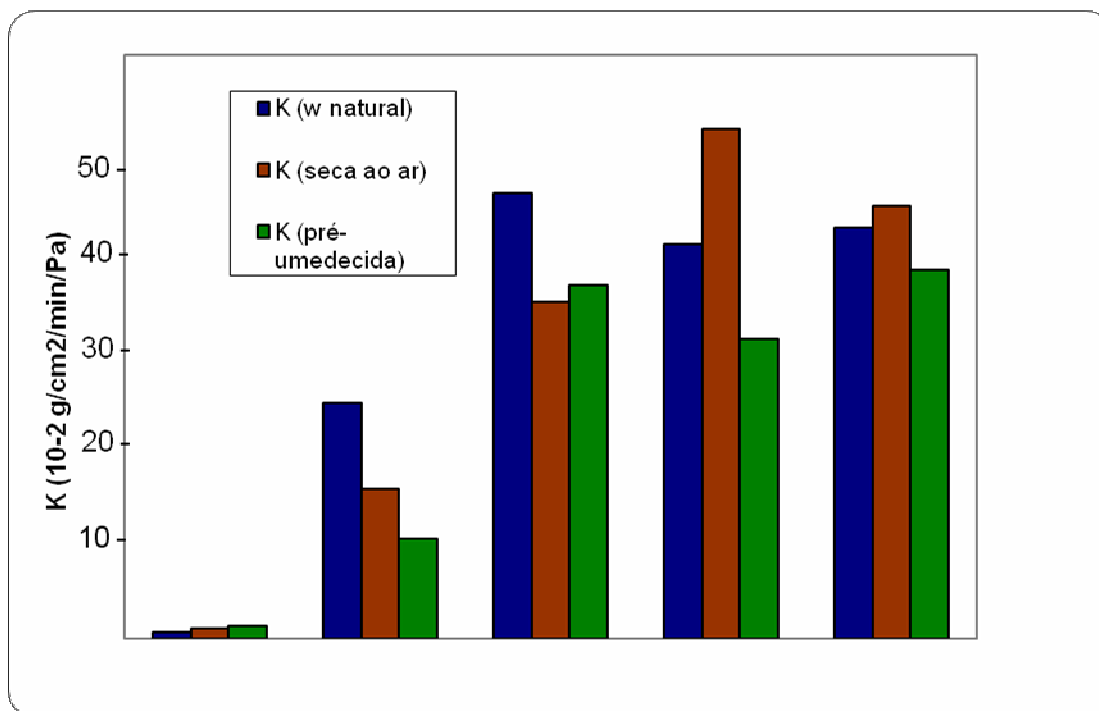


Figura 5.30 – Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen

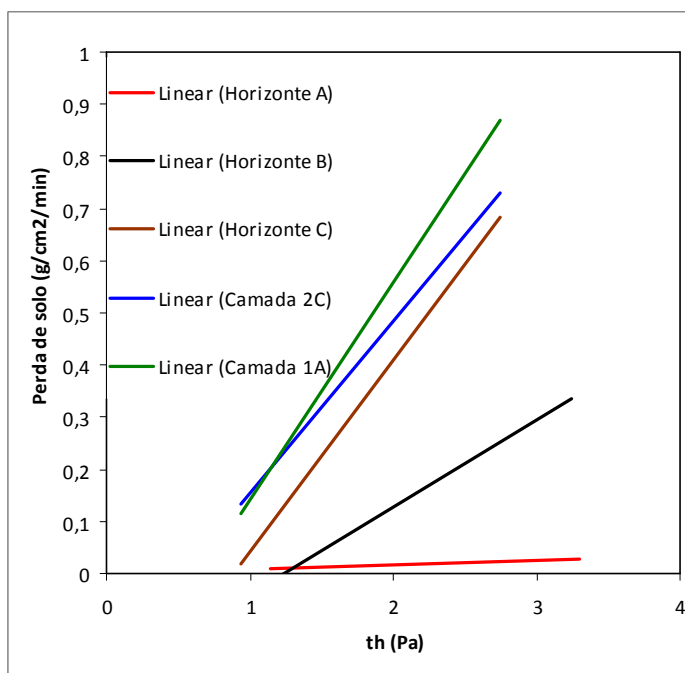


Figura 5.31 – Resultados dos ensaios Inderbitzen obtidos independentes da condição de umidade inicial das amostras.



Não se conseguiu determinar as tensões hidráulicas críticas para o horizonte A, mas para o horizonte B estas se situaram entre 1 e 1,3 Pa, valores semelhantes encontrados por Bastos (1999) para solos dos horizontes B da região metropolitana de Porto Alegre ( $\tau_c$  entre 1 e 1,25Pa) e para os solos do horizonte A/B do Distrito de São Valentin em Santa Maria estudados por Fernandes (2011). Para o horizonte C e os arenitos estes valores situaram-se entre 0,5 e 1Pa, portanto valores inferiores aos solos dos horizontes A e B. Bastos (1999) e Fernandes (2011) verificaram esta tendência, ou seja, os solos saprolíticos e materiais de alteração apresentam uma tensão hidráulica crítica inferior quando comparado com os horizontes pedológicos A e B. Os horizontes superficiais apresentaram valores maiores deste parâmetro indicando uma tendência de maior resistência ao início do processo erosivo por arraste das partículas do solo.

Bastos (1999) discorre sobre a dispersão dos resultados e as simplificações na estimativa das tensões hidráulicas atuantes no ensaio de Inderbitzen. Justifica que estes seriam os motivos para que alguns valores destas tensões fossem indeterminados.

Este mesmo autor discute a determinação de critérios de erodibilidade a partir do ensaio de Inderbitzen, afirmando não existirem referências na literatura sobre o emprego de parâmetros hidráulicos de erodibilidade a partir do ensaio de Inderbitzen. Nos solos estudados em Porto Alegre e região metropolitana verificou-se uma afinidade entre o comportamento de campo e os dados do parâmetro K (coeficiente de erodibilidade). Sugeriu, numa primeira aproximação, que os solos mais erodíveis apresentam valores de K na umidade natural superiores a um valor de 0,1 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa e que os solos mais resistentes a erosão apresentem valores de K inferiores a 0,001 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa (BASTOS, 1999).

Com os resultados desta pesquisa e outras desenvolvidas pelos Grupos de Pesquisa GEOMA e LAGEOLAN da UFSM, busca-se estender esta proposta de classificação para outros perfis de solos não saturados verificando o seu comportamento frente à erosão hídrica por fluxo concentrado (TATTO, 2007; AVILA, 2009; FERNANDES, 2011 e SANT'ANA, 2012).

## **5.7 Erodibilidade dos horizontes/camadas estudados**

A análise da erodibilidade dos horizontes/camadas do perfil típico da voçoroca Fazenda Taquari, no município de São Francisco de Assis, será apresentada de acordo com a proposta de abordagem geotécnica para solos residuais não saturados de Bastos (1999).

### 5.7.1 Avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos

Existem vários métodos de ensaios e critérios de análise na avaliação qualitativa da erodibilidade, contudo Bastos (1999) conclui que não existe um critério de erodibilidade que apresente uma elevada correspondência com a erodibilidade observada em campo. Segundo este autor existem critérios de melhor desempenho, que destacam a ação dos mecanismos de hidratação e desaeração, que está intimamente relacionada a susceptibilidade à erosão dos solos não saturados, quando sujeitos a ação da água.

O critério baseado na razão de dispersão (MIDDLETON, 1930), e o critério de erodibilidade da Metodologia MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979) foram os de melhor desempenho na avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos estudados por Bastos (1999).

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

Para facilitar a comparação são apresentados também os valores obtidos para estes parâmetros para os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011).

Bastos (1999) estudou 8 perfis de solos localizados na Região Metropolitana de Porto Alegre, em sua Tese de Doutorado, sendo eles identificados como: (a) Loteamento Algarve, solos do horizonte B (ALGB) e horizonte C (ALGC), oriundos do intemperismo do Complexo Granito-Gnaíssico; (b) Área de empréstimo na RS239, horizontes B/C e C, identificados por RS239BC e RS239C, respectivamente, solos oriundos do intemperismo do arenito Botucatú; (c) Loteamento Parque do Trabalhador, horizonte B (PTB) e horizonte C (PTC), com solos oriundos do intemperismo do arenito Botucatú; 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 no Distrito de São Valentin em Santa Maria. O perfil era constituído basicamente por 03 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 velho acimentado, identicado como SVRA; e (c) Arenito, camada de base da

voçoroca pertencente a Formação Santa Maria, membro Passo das Tropas, identificado como SVAR.

As Tabelas 5.15 e 5.16 apresentam os valores do fator de erodibilidade da USLE ( $K_{USLE}$ ), 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 rampa (Inderbitzen). Para complementar são apresentados os parâmetros geomecânicos relacionados a resistência ao cisalhamento dos horizontes/camadas dos materiais da voçoroca ( $c$  = coesão na condição natural e  $c'$  = coesão na condição inundada).

Tabela 5.15 – Fator de erodibilidade da USLE, parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta de erodibilidade para os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011) e neste trabalho

Solo	$K_{USLE}$	Parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta da erodibilidade								
		RD (%)	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
<b>Hor. A</b>	<b>0,14</b>	<b>40</b>	<b>-</b>	<b>83</b>	<b>12,6</b>	<b>NP</b>	<b>NP</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>25,7</b>
<b>Hor. B</b>	<b>0,22</b>	<b>25</b>	<b>-</b>	<b>80</b>	<b>13,7</b>	<b>NP</b>	<b>NP</b>	<b>29,4</b>	<b>58</b>	<b>1548</b>
<b>Hor. C</b>	<b>0,16</b>		<b>-</b>	<b>70</b>	<b>10,2</b>	<b>NP</b>	<b>NP</b>	<b>82,6</b>	<b>68</b>	<b>2060</b>
<b>Cam. 2C</b>	<b>0,10</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>90</b>	<b>5,8</b>	<b>NP</b>	<b>NP</b>	<b>84,7</b>	<b>120,9</b>	<b>3013</b>
<b>Cam. 1A</b>	<b>0,20</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>95</b>	<b>5,3</b>	<b>NP</b>	<b>NP</b>	<b>191,3</b>	<b>106,3</b>	<b>1437</b>

\* Bastos (1999)

\*Fernandes (2011)

Pp,40 = % pas #40

Pp,200 = % pas #200

Tabela 5.16 – 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) e neste trabalho.

Solo	Ensaio de Inderbitzen			Resistência ao cisalhamento e colapsividade			
	K ( $10^{-2}$ g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)			c (kPa)	c' (kPa)	$\Delta c$ (%)	I <sub>c</sub> (%)
	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	20,2	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
<b>Hor. A</b>	<b>0,7</b>	<b>1,1</b>	<b>1,3</b>	<b>3,4</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	-
<b>Hor. B</b>	<b>24,2</b>	<b>15,4</b>	<b>10,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	-
<b>Hor. C</b>	<b>45,8</b>	<b>34,6</b>	<b>36,3</b>	<b>4,3</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	-
<b>Cam. 2C</b>	<b>40,5</b>	<b>52,4</b>	<b>30,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	-
<b>Cam. 1A</b>	<b>42,3</b>	<b>44,5</b>	<b>37,9</b>	<b>11,0</b>	<b>10,1</b>	<b>8,2</b>	-

\* Bastos (1999)

♦ Fernandes (2011)

Verifica-se que os valores de K obtidos nos ensaios de Inderbitzen para os solos da RS239C e PTC estudados por Bastos (1999), o solo SVAR estudado por Fernandes (2011) e os solos do horizonte C e arenitos deste trabalho são comparáveis, devido a natureza similar destes materiais (alteração de rochas arenosas das Formações Botucatú, Passo das Tropas e Guará, respectivamente).

### 5.7.2.1 Análise dos parâmetros físicos e geomecânicos

Bastos (1999) ao analisar os parâmetros físicos e geomecânicos frente à erodibilidade observada em campo e à taxa de erodibilidade medida em laboratório, através de análises estatísticas por modelos de regressão linear, conclui que na condição de umidade natural, as variáveis que se mostraram correlacionáveis com a erodibilidade (K) medida nos ensaios 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. A Tabela 5.17 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 foram colocados a proposta de Carvalho (1994) em função do fator de erodibilidade da USLE.

Tabela 5.17 – Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as classes de erodibilidade

<b>Erodibilidade</b>	<b>K (<math>10^{-2}g/cm^2/min/Pa</math>)</b>	<b>RD (%)</b>	<b>% P<sub>p</sub><sub>200</sub></b>	<b>IP (%)</b>	<b>K<sub>USLE</sub></b>	<b><math>\pi/s</math></b>	<b><math>\Delta c</math></b>
Baixa	< 0,1		> 55	> 10			
Média a baixa, média e média a alta	< 0,1 e <10	< 60	>35 e <55	>5 e <10	< 0,20	< 52	< 85
Alta	>10	> 60	< 35	< 5	> 0,20	> 52	> 85

### ***Análise da erodibilidade pela $P_{p,200}$ , plasticidade, $K_{USLE}$ e razão de dispersão***

O teor de finos, caracterizado pela % passante na peneira no. 200 ( $P_{p,200}$ ), segundo Bastos (1999), foi dentre as propriedades físicas dos solos, aquela que melhor se relaciona estatisticamente o coeficiente de erodibilidade (K) e também melhor identifica a erodibilidade dos solos estudados. A Figura 5.32 apresenta a proposta de Bastos (1999) com os resultados obtidos por Fernandes (2011) e deste trabalho. Os resultados estão dentro da tendência de uma relação inversamente proporcional entre a % passante na peneira # 200 e K.

A Figura 5.33 apresenta a tendência de aumento da taxa de erodibilidade com a redução no índice de plasticidade. Bastos (1999) discute sobre a dispersão dos resultados, onde vários pesquisadores confirmam esta tendência e outros comprovam que estas correlações são insatisfatórias. Os horizontes/camadas estudados são predominante arenosos, com fração argila baixa, não apresentaram plasticidade.

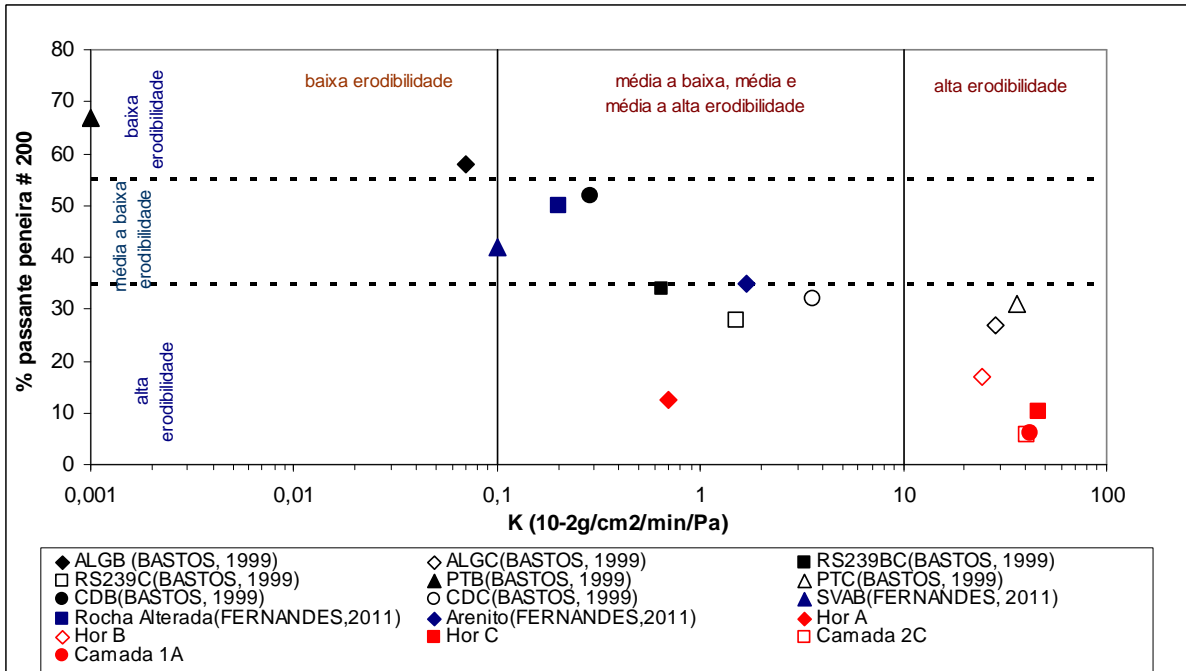


Figura 5.32 – Relação entre a % passante na peneira # 200, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

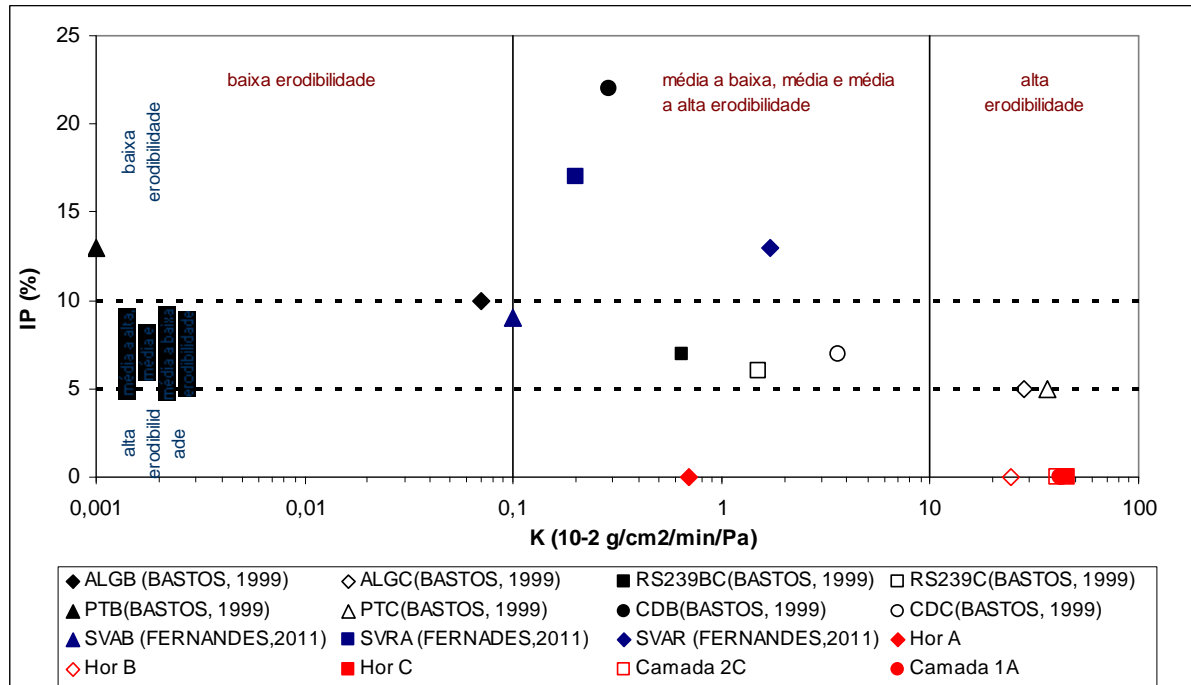


Figura 5.33 – Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

Autores como Fácio (1991), Santos (2002), Alcântara (1997) e Bastos (1999) consideram que as relações entre teor de finos e o índice de plasticidade e a erodibilidade são insatisfatórios envolvendo solos tropicais brasileiros. Bastos (1999) comparou os resultados de Alcântara (1997) de solos de diferentes litologias, avaliada por critérios de campo do referido autor, que não mostra relação com a % passante na peneira # 200 e com o IP e, em consequência, não se enquadra nos critérios propostos (Tabela 5.17). A Figura 5.34 apresenta os dados deste trabalho e os de Fernandes (2011) frente aos critérios de erodibilidade inferidos.

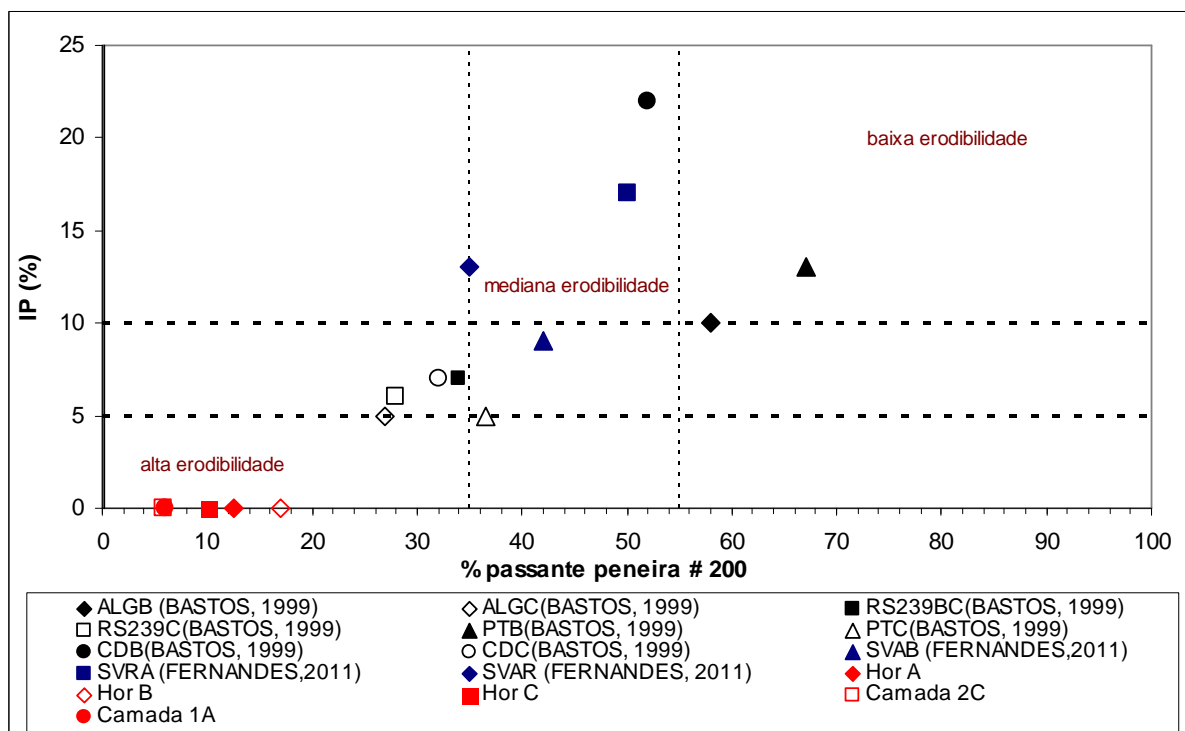


Figura 5.34 – Dados de Bastos (1999), Fernandes (2011) e desta pesquisa frente ao critério de erodibilidade inferido para os horizontes/camadas estudados com base na % passante peneira # 200 e IP

A Figura 5.35 mostra a relação entre os parâmetros de erodibilidade  $K_{USLE}$  e  $K$ . Segundo Bastos (1999) o fator de erodibilidade da USLE igual a 0,20 permite separar os solos de média a baixa erodibilidade daqueles de média, média a alta e alta erodibilidade (Tabela 5.17). Nesta figura também estão representados os valores propostos para este parâmetro por Carvalho (1994). 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 de alta erodibilidade identificam-se por valores de  $K_{USLE}$  superior a 0,30. Segundo esta proposta, os

solos de alta erodibilidade são os solos com elevados teores de silte e areia muito fina (0,05 e 0,10mm), com baixo teor de argila e matéria com orgânica. Na análise dos horizontes/camadas da voçoroca em estudo indicou que o solo do horizonte B seria o mais erodível, e que os solos dos horizontes A e C apresentaram os mesmos valores de erodibilidade. Portanto, parece indicar que este índice não conseguiu separar as classes de erodibilidade para os materiais em estudo.

A Figura 5.36 apresenta a relação entre a razão de dispersão (RD) e a erodibilidade. Segundo Bastos (1999) valores deste parâmetro superiores a 60% identificam os solos com média, média a alta e alta erodibilidade (solos saprolíticos). Os horizontes/camadas em estudo, exceto o horizonte A, apresentaram RD de 100%. Valores que enquadram nos solos de média a alta e alta erodibilidade. Segundo a NBR 13602 (1996) não se deve aplicar em solos com teores de finos inferior a 12%, pois não é preciso para solos arenosos.

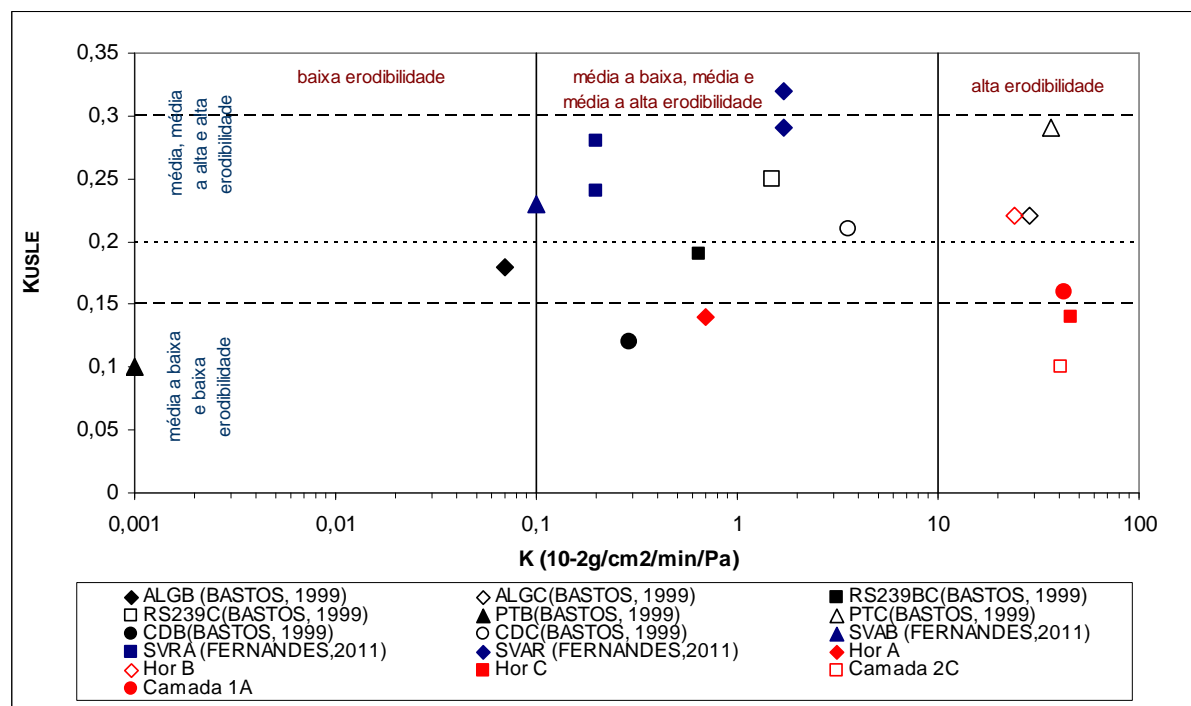


Figura 5.35– Relação entre os parâmetros de erodibilidade  $K_{USLE}$ , o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)



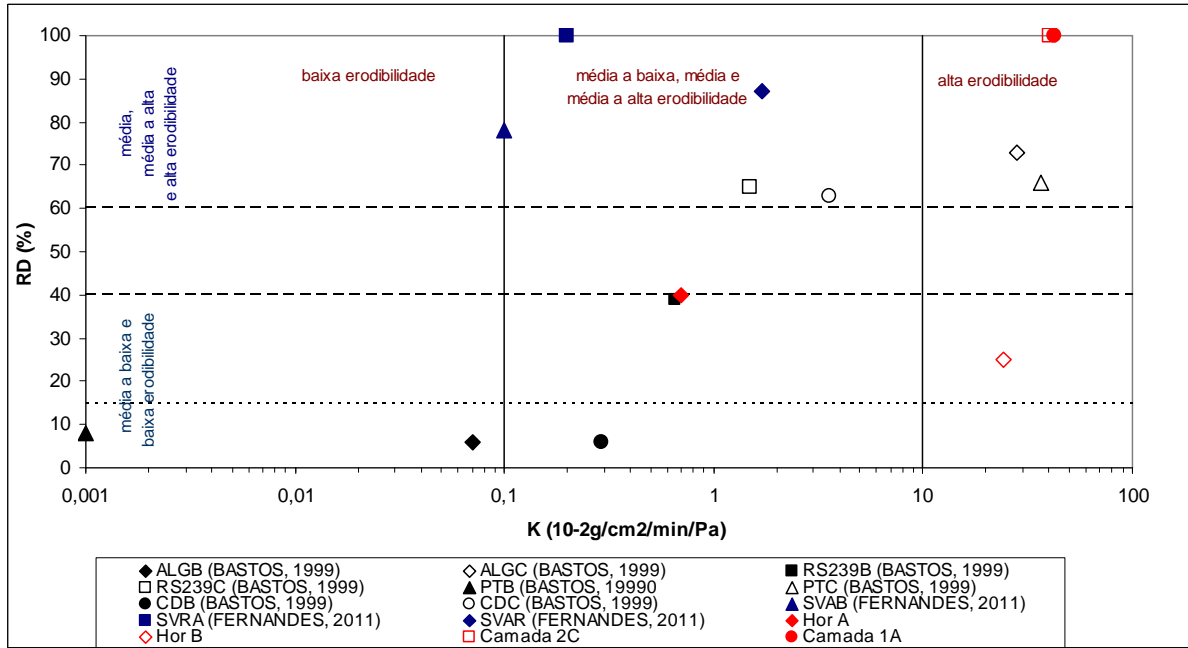


Figura 5.36 – Relação entre a Razão de Dispersão (RD), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

**Análise da erodibilidade pelo critério de erodibilidade MCT**

As Figuras 5.37 e 5.38 mostram a relação entre a razão  $\pi/s$ , obtida nos ensaios de perda por imersão e infiltrabilidade (metodologia MCT), com o coeficiente de erodibilidade (K). Estas figuras apresentam os resultados das amostras na umidade natural e secas ao ar. Os resultados obtidos neste trabalho e no de Fernandes (2011) confirmam a proposta de Bastos (1999). O horizonte A se enquadrou na classe média e média a alta erodibilidade, permitindo a sua separação do solo do horizonte C e arenitos (Camadas 2C e 1A) que se enquadraram em alta erodibilidade ( $\pi/s > 52$  e  $K > 10 \cdot 10^{-2} \text{g/cm}^2/\text{min/Pa}$ ). O solo do horizonte B, que apesar de apresentar uma relação  $\pi/s < 52$  (baixa erodibilidade) apresentou um coeficiente de erodibilidade bem inferior ao horizonte C e arenitos, porém muito superior ao solo do horizonte A. Salienta-se que as amostras do horizonte A apresentavam finíssimas raízes distribuídas em toda sua profundidade.

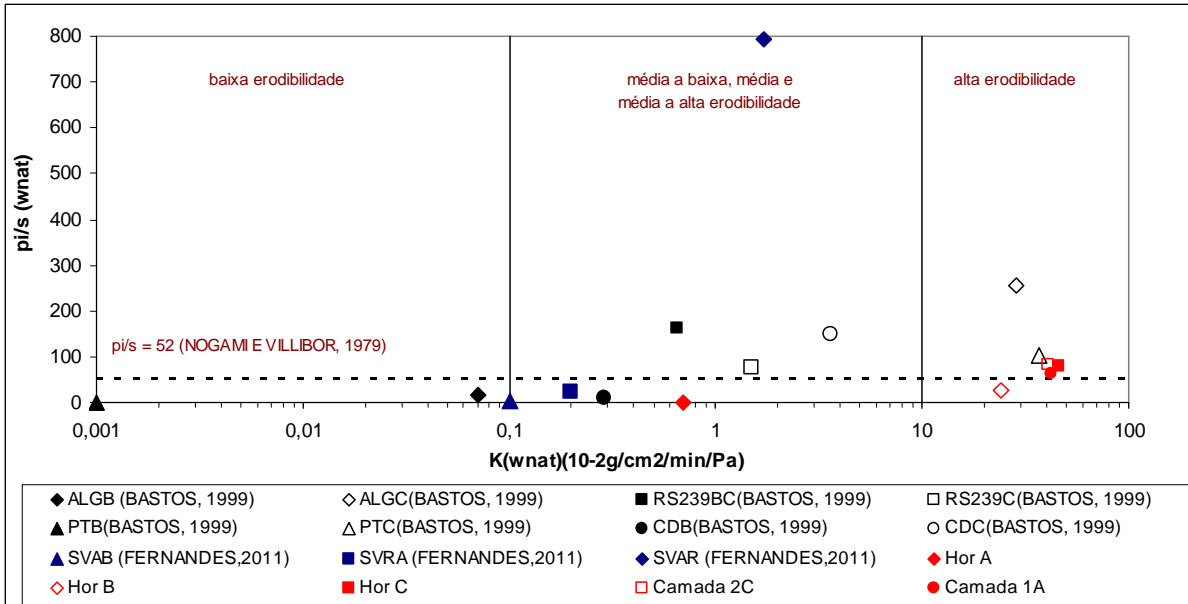


Figura 5.37 – Relação entre  $\pi/s$  (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras na condição de umidade natural

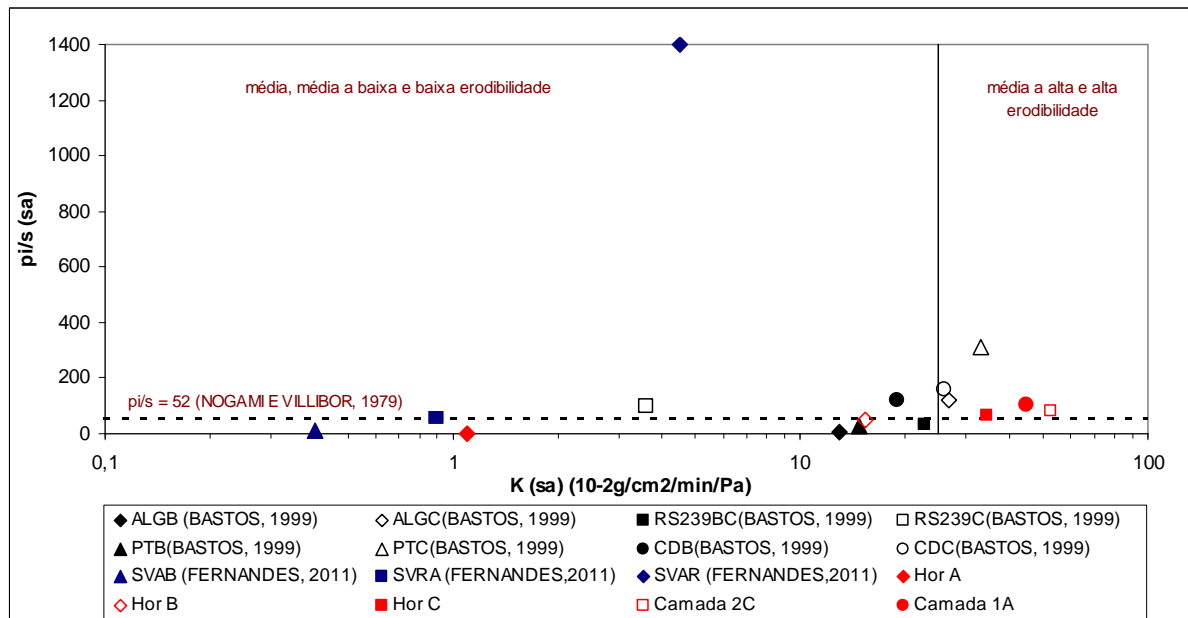


Figura 5.38 – Relação entre  $\pi/s$  (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras secas ao ar

**Análise da erodibilidade pela coesão**

Bastos (1999) nos estudos quanto à relação entre a erodibilidade e a resistência ao cisalhamento dos solos (coesão não saturada na condição de umidade natural e coesão na condição inundada), conclui que com os resultados obtidos não permitiram a distinção das classes de erodibilidade propostas (Figura 5.39 e 5.40). Para os horizontes/camadas analisadas neste trabalho verificou-se que os valores maiores de coesão foram obtidos nos materiais com elevada erodibilidade. Portanto, não se conseguiu separar a classe de erodibilidade por este parâmetro.

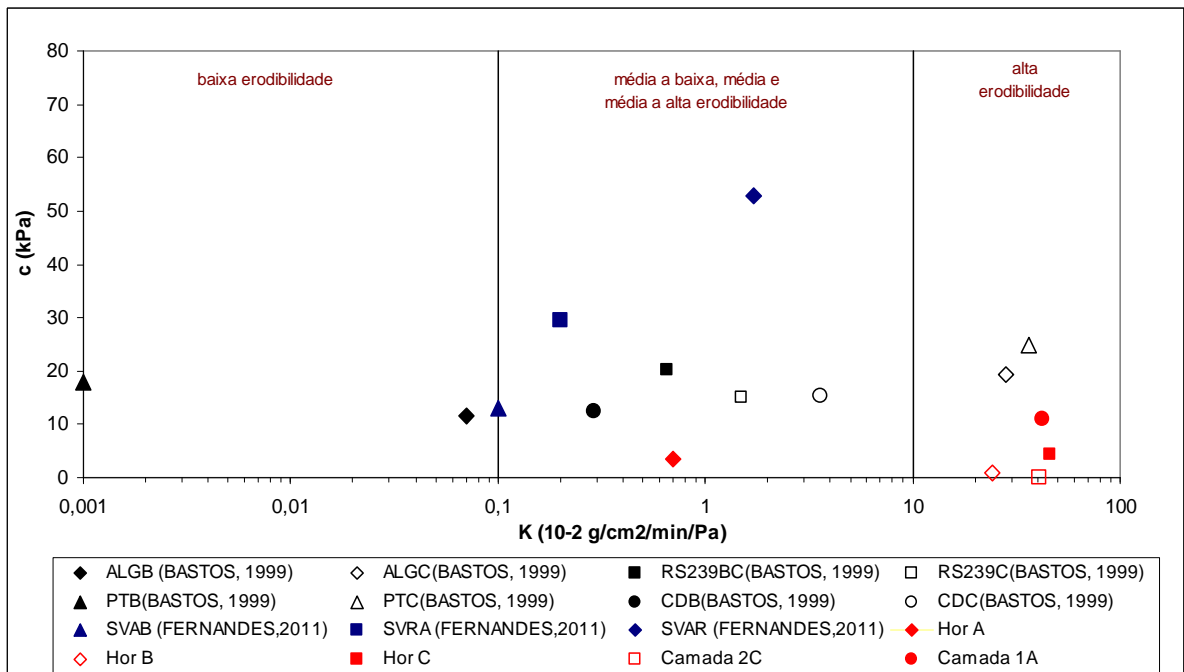


Figura 5.39 – Relação entre a coesão não saturada na umidade natural (c) e o coeficiente de erodibilidade (K)

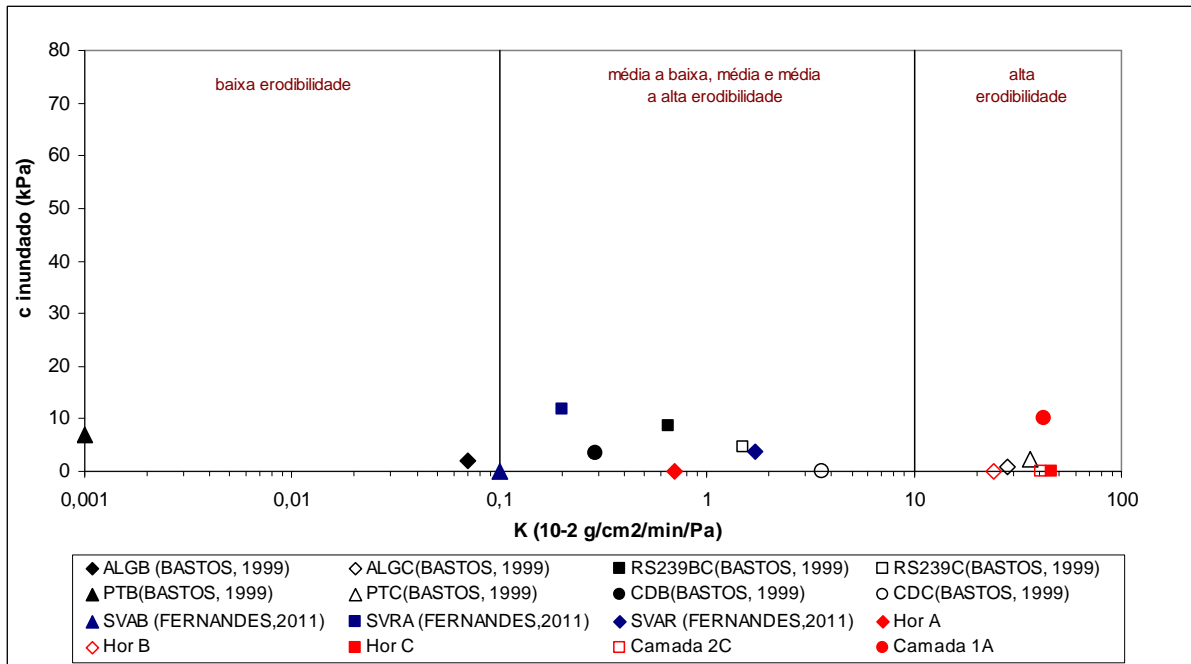


Figura 5.40 – Relação entre a coesão na condição inundada ( $c'$ ) e o coeficiente de erodibilidade ( $K$ )

Na análise em termos do parâmetro variação de coesão, proposto por Bastos (1999), apresentado na Figura 5.41 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/camadas estudados, exceto o arenito da Camada 1A, apresentam  $\Delta c = 100\%$ , apresentando de m dia a alta erodibilidade. O arenito da Camada 1A, a inundação ocasionou uma pequena redução na coesão, caracterizando que esta camada a cimentação é mais relevante que o efeito da perda de sucção por saturação. Contudo, o coeficiente de erodibilidade desta camada é elevado, da mesma magnitude da Camada 2C e horizonte C, evidenciando que a resistência ao cisalhamento e os ensaios de Inderbtizen impoem tensões cisalhantes de maneira diferente.

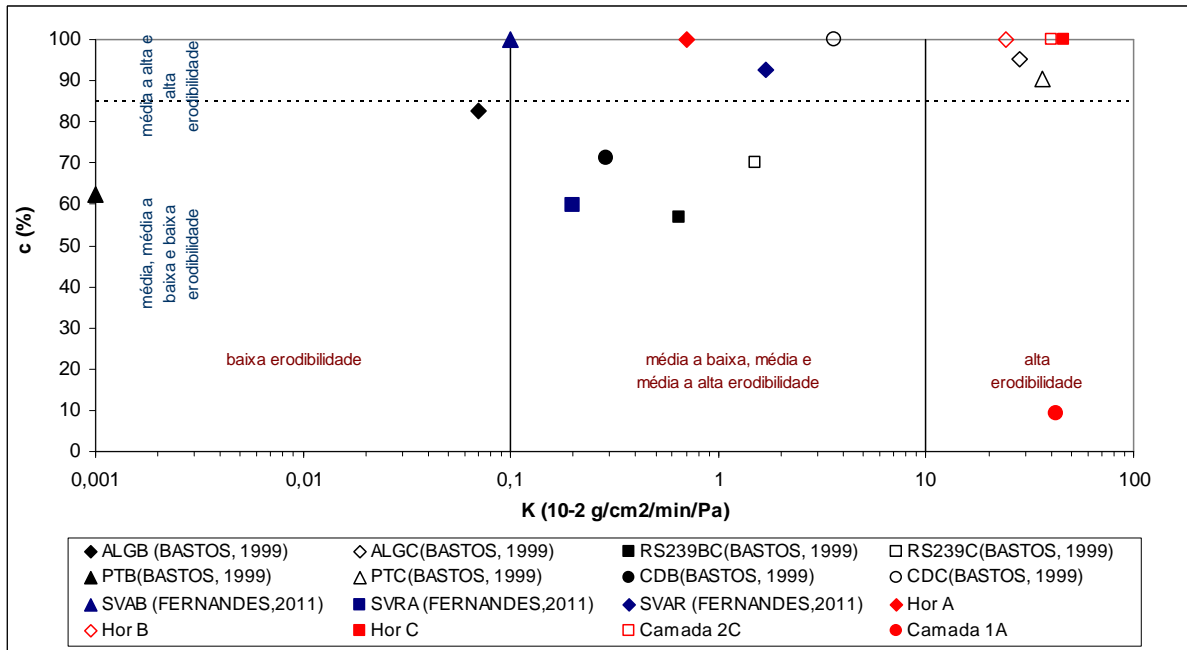


Figura 5.41 – Relação entre a variação de coesão ( $\Delta c$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

Bastos (1999) apresenta uma ampla discussão sobre o papel da coesão na erodibilidade dos solos estudados no seu trabalho de doutorado. Vários autores consideram a erodibilidade uma função da coesão do solo na superfície, que se altera durante um evento pluviométrico. Isto se deve ao efeito da sucção matricial que sofre uma redução considerável com a saturação do solo. O mesmo autor ainda discute os efeitos do fluxo superficial sobre a resistência ao cisalhamento, através do parâmetro  $\Delta c$ .

Os solos e as rochas estudados nesta pesquisa, e outros materiais estudados por Tatto (2007), Fernandes (2011) e Sant'ana (2012) constatam a importância deste parâmetro sobre a erodibilidade dos solos. Destaca a redução da parcela de resistência devido à poropressão negativa (sucção), a ação da água que provoca a perda de cimentação interpartículas e interagregados; e quando da saturação dos solos, a ação desagregadora ocasionada pelas tensões internas originadas devido aos mecanismos de hidratação e desaeração.

A redução da coesão superficial com o umedecimento dos solos foi evidenciada diretamente em ensaios de cisalhamento direto convencional e com controle de sucção. Indiretamente foi evidenciada a perda de coesão nos ensaios de penetração de cone de laboratório e desagregação em água (BASTOS, 1999).

Admite-se que o processo de desagregação em água por hidratação e desaeração do solo não saturado pode estar envolvido no fenômeno erosão e colapso. Contudo, a natureza dos esforços envolvidos não são os mesmos (solicitação normal e cisalhamento hidráulico). Para verificar esta 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 ( $K$ ). A Figura 5.42 apresentam os resultados de Bastos (1999) e Fernandes (1999) concluindo que estes parâmetros não se apresentavam correlacionáveis. Fernandes (2011) verificou que os materiais que apresentaram maior desagregabilidade apresentaram um potencial de colapso maior. Infelizmente nos horizontes/camadas ensaiadas nesta pesquisa não foram medidos os colapsos durante a inundação dos corpos de prova.

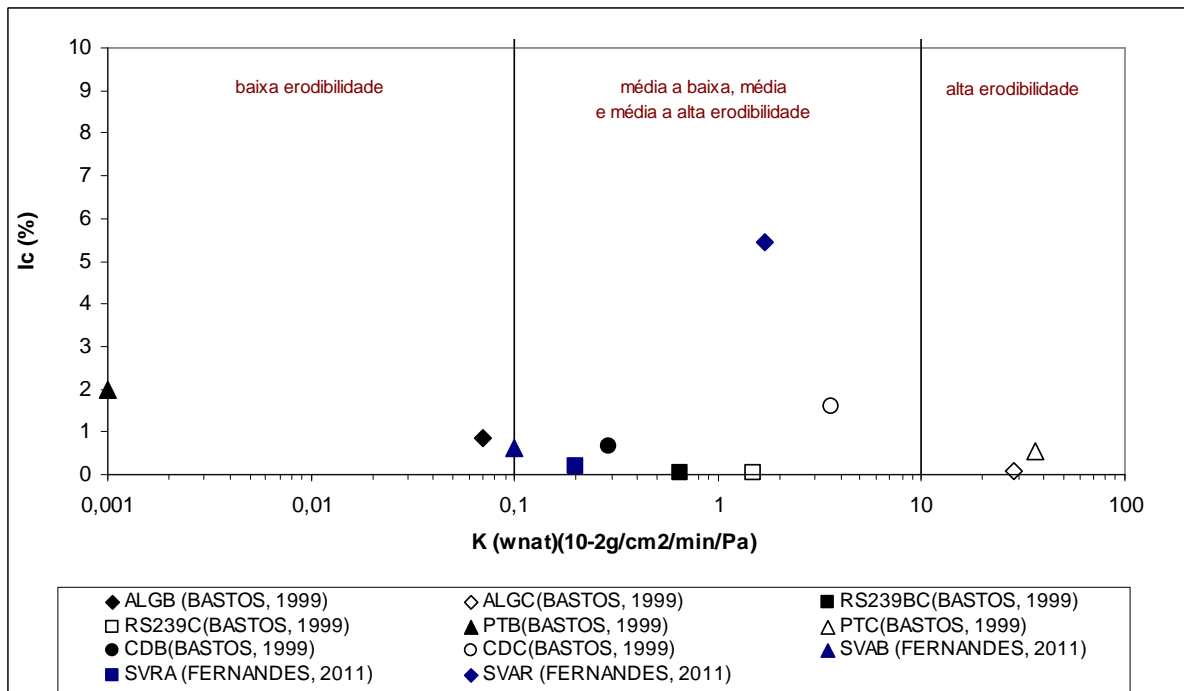


Figura 5.42 – Relação entre a variação do potencial de colapso ( $I_c$ ), o coeficiente de erodibilidade ( $K$ ) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999)

A Tabela 5.18 apresenta o resumo das análises realizadas nos horizontes/camadas do perfil da voçoroca da Fazenda Taquari em relação aos níveis de erodibilidade propostos por Bastos (1999).

Tabela 5.18 – Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas 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

Horizontes Camadas	Parâmetros de erodibilidade						
	K	K <sub>USLE</sub>	RD	% P <sub>p,200</sub>	IP	pi/s	Δc
Hor A	2	1, 2	1, 2	3	3	1, 2	3
Hor B	3	3	1, 2	3	3	1, 2	3
Hor C	3	1, 2	-	3	3	3	3
Cam 2C	3	1, 2	3	3	3	3	3
Cam 1A	3	3	3	3	3	3	1, 2

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

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

RD = Razão de dispersão

% P<sub>p,200</sub> = 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)

Δc = variação do coesão

O horizonte C e os arenitos das Camadas 2C e 1A foram os materiais potencialmente mais erodíveis pelos dados dos ensaios de laboratório, que concordam com o comportamento verificado no campo. Ou seja, os horizontes A e B são mais resistentes, principalmente o horizonte A, pelas inúmeras raízes que fazem que as amostras não desagreguem quanto imersas em água e resistam mais as tensões hidráulicas. Mas, mesmo assim, devido fração fina ser pequena, pouca matéria orgânica e baixa plasticidade estes horizontes superficiais são mais erodíveis que os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011).

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.

## 6 CONCLUSÕES

No perfil em estudo na voçoroca, o solo superficial foi identificado como um latossolo arenoso com um substrato constituído de rochas sedimentares arenosas da Formação Guará.

Em relação à caracterização dos horizontes e camadas estudados verificou-se que os horizontes pedológicos (horizontes A, B e C), as camadas de arenito e os sedimentos do canal apresentaram-se não plásticos (NP). A granulometria predominante é de areia média e fina (83 a 97%). A fração argila é muito baixa. Os horizontes A e B são classificados como areias siltosas (SM), e o restante dos horizontes/camadas é classificado como areia mal graduada (SP).

O horizonte A apresenta porosidade média e grau de saturação naturalmente seco. O horizonte B apresenta alta porosidade. O solo do horizonte C e as camadas arenosas apresentam porosidade média, com tendência de diminuição do índice de vazios com a profundidade. Em relação aos valores de umidade e grau de saturação estes materiais são considerados solos não saturados.

Pela análise química conclui-se que o solo é classificado como distrófico, sendo pouco ou muito pouco fértil e sem reservas de nutrientes para os vegetais. A saturação por alumínio para os horizontes superficiais está em quantidade a níveis tóxicos para plantas, (solo álico) e possuem valores de pH ácidos.

Na classificação mineralógica, estas rochas apresentam fraca cimentação de óxido de ferro e pouco ou nenhum argilomineral ou fração argila. Os valores de matéria orgânica foram baixos, sendo classificados como erodíveis.

Nos ensaios de cisalhamento direto realizados com umidade de campo (natural), secas ao ar e inundadas, as amostras dos horizontes A, B e C, as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento não apresentam um pico nítido, com tendência de variação volumétrica inicial de compressão. Somente para as amostras secas ao ar e para os níveis mais baixos de tensão verificou-se um pico nítido e uma tendência de dilatação.

Nos ensaios realizados nas amostras secas ao ar as curvas tensão cisalhante por deslocamento apresentam picos mais nítidos para todas as tensões normais aplicadas e uma tendência de aumento de volume durante o ensaio. O aumento da umidade e grau de saturação anulou o intercepto coesivo e reduziu levemente o ângulo de atrito interno, reduzindo a tensão de cisalhamento máxima para todos os níveis. Com a saturação, anula-se o efeito da sucção (parcela de resistência de solos não saturados) e a resistência destes solos torna-se somente devido ao atrito entre as partículas.



Na avaliação indireta da erodibilidade dos horizontes/camadas do perfil geotécnico da voçoroca através da estimativa do fator erodibilidade ( $K_{USLE}$ ) pela Equação Universal de Perda do Solo (USLE), avaliação do potencial de desagregação dos solos e critérios de erodibilidade baseados na Metodologia MCT verificou-se que:

- na determinação do coeficiente de erodibilidade ( $K_{USLE}$ ), para os valores de K encontrados, não se consegue separar os materiais deste perfil quanto à erodibilidade;
- nos ensaios de desagregação, as condições natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência no teste. Independente da condição de umidade, os solos dos horizontes A e B mostraram-se mais resistentes frente à umidade, enquanto o horizonte C e as camadas de arenito da base apresentaram uma completa desagregação.
- os resultados apresentados pela metodologia MCT demonstram maior susceptibilidade à erosão no horizonte C e das camadas de arenito (1A e 2C) em relação aos horizontes A e B.

Verificou-se certa tendência de aumento da velocidade de ascensão capilar (s) e da perda por imersão para as amostras secas ao ar para os solos dos horizontes A e B. No horizonte C e nas camadas de arenito não se verificou diferença significativa entre estes parâmetros.

A perda por imersão nas amostras secas ao ar foi sempre mais elevada em relação às amostras na umidade natural e pré-umedecidas para os horizontes A e B. Nas outras camadas os valores de perda por imersão foram elevados, não apresentando esta tendência. Nas amostras pré-umedecidas verificou-se uma tendência de diminuição na velocidade de ascensão capilar e um aumento na perda por imersão

O horizonte A, para qualquer condição de umidade, apresentou-se como não erodível. O horizonte B, somente na umidade natural, apresentou-se não erodível. Já o horizonte C e as camadas de arenito 1A e 2C apresentaram-se erodíveis, para qualquer condição de umidade. As relações  $\pi/s$  para condição pré-umedecidas foram extremamente elevadas. O maior destacamento que ocorre nas camadas de arenito está, provavelmente, associado ao baixo grau de cimentação entre as partículas e a perda de resistência devido à sucção.

A Metodologia MCT apresentou uma boa relação e correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos/rochas nos locais estudados, comprovando sua aplicabilidade a estes materiais.

A avaliação direta, feita através dos ensaios de Inderbitzen, tendo por objetivo quantificar a erodibilidade dos solos e rochas estudadas, através da taxa de erodibilidade, K

e a tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{\text{crít}}$ ), confirmou que a perda de solo é tanto maior quanto maior for à inclinação da rampa e a vazão de ensaio.

Segundo esta avaliação, para as amostras de arenito (camadas 2C e 1A) verificou-se certa tendência de valores mais elevados de erodibilidade na condição seca ao ar. Também verificou-se os valores bem mais elevados de erodibilidade do horizonte C e camadas de arenito em relação ao horizonte A. O horizonte B os valores situaram-se em um patamar intermediário. O horizonte A apresentou um valor de  $K = 0,0095 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ , bem inferior ao horizonte B ( $K = 0,17 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ ). Os valores de  $K$  para o horizonte C e camadas de arenito situaram-se entre  $0,33$  e  $0,42 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ .

Não se conseguiu determinar as tensões hidráulicas críticas para o horizonte A, mas para o horizonte B estas se situaram entre  $1$  e  $1,3 \text{ Pa}$ . Para o horizonte C e os arenitos estes valores situaram-se entre  $0,5$  e  $1 \text{ Pa}$ , portanto valores inferiores aos solos dos horizontes A e B, confirmando a tendência, segundo Bastos (1999) e Fernandes (2011), que os solos saprolíticos e materiais de alteração apresentam uma tensão hidráulica crítica inferior quando comparado com os horizontes pedológicos A e B. Os horizontes superficiais apresentaram valores maiores deste parâmetro indicando tendência de maior resistência ao início do processo erosivo por arraste das partículas do solo.

De acordo com a proposta de Bastos (1999), os resultados encontrados então dentro da tendência de uma relação inversamente proporcional entre % passante na peneira 200 e  $K$ .

Pelos parâmetros de erodibilidade  $K_{\text{USLE}}$ , indica-se que o solo do horizonte B seria o mais erodível, e que os solos dos horizontes A e C, apresentaram os mesmos valores de erodibilidade, concluindo-se que esses índices não conseguiram separar por classes de erodibilidade, os materiais em estudo. Os horizontes/camadas estudados, exceto o horizonte A, apresentaram RD de 100%, que indica solos de média a alta erodibilidade.

A relação entre  $\text{pi/s}$ , obtida nos ensaios de perda por imersão e infiltrabilidade (metodologia MCT), com coeficiente de erodibilidade, nos horizontes/camadas estudados, confirmaram a proposta de Bastos (1999). O horizonte A se enquadrou na classe média e média a alta erodibilidade, permitindo a sua separação do solo do horizonte C e arenitos (Camadas 2C e 1A) que se enquadraram em alta erodibilidade ( $\text{pi/s} > 52$  e  $K > 10^{-2} \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ ). O solo do horizonte B, apesar de apresentar uma relação  $\text{pi/s} < 52$  (baixa erodibilidade) apresentou um coeficiente de erodibilidade bem inferior ao horizonte C e arenitos, porém muito superior ao solo do horizonte A.

Para os horizontes/camadas estudados neste trabalho, verificou-se que os maiores valores de coesão foram obtidos nos materiais com elevada erodibilidade. Portanto, não

conseguindo separar a classe de erodibilidade por este parâmetro, confirmando os estudos de Bastos (1999).

A análise em termos do parâmetro variação de coesão, proposto por Bastos (1999), permitiu inferir uma tendência de crescimento da erodibilidade ( $K$ ), na condição de umidade natural, com o aumento deste parâmetro ( $\Delta c$ ). Segundo Bastos (1999), solos com média a alta e alta erodibilidade apresentam uma elevada variação de coesão com a inundação ( $\Delta c > 85\%$ ). Para os horizontes/camadas estudados, exceto o arenito da Camada 1A, apresentam  $\Delta c = 100\%$ , apresentando de média a alta erodibilidade.

Os solos e as rochas estudados nesta pesquisa, e outros materiais estudados por Tatto (2007), Fernandes (2011) e Sant'ana (2011) constataram a importância do parâmetro coesão sobre a erodibilidade dos solos. Destacando a redução da parcela de resistência devido à poropressão negativa (sucção), a ação da água que provoca a perda de cimentação interpartículas e interagregados; e quando da saturação dos solos, a ação desagregadora ocasionada pelas tensões internas originadas devido aos mecanismos de hidratação e desaeração.

O horizonte C e os arenitos das Camadas 2C e 1A foram os materiais mais potencialmente erodíveis pelos dados dos ensaios de laboratório, que concordam com o comportamento verificado no campo. Ou seja, os horizontes A e B são mais resistentes, principalmente o horizonte A, pelas inúmeras raízes que fazem que as amostras não desagreguem quanto imersas em água e resistam mais as tensões hidráulicas. Mas, mesmo assim, devido fração fina ser pequena, pouca matéria orgânica e baixa plasticidade estes horizontes superficiais são mais erodíveis que os solos estudados por Bastos (1999) e Fernandes (2011).

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.

Recomenda-se a utilização desta proposta para trabalhos futuros, afim de comparações com outros tipos de solos e rochas e obtenção de mais dados e informações para aplicações práticas. A realização destes estudos poderia ser utilizada para previsão de suscetibilidade à erosão e execução de mapeamento de solos possibilitando planejamentos para usos racionais dos solos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, V.G.; ROMÃO, 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, Jataí-GO. **Anais...** Jataí, 2009. 2009. P. 752-763.

AMORIM, R.S.S; SILVA, D.D da; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. 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.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3p. Origem: MB-31.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13602**: Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, 1996.. 5p.

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

ASTM D2487 – 93 Standart Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 1993.

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

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

AZEVEDO, A.C. Funções ambientais do solo. In: AZEVEDO, A.C.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A. (Ed.). **Solos & ambiente: I Fórum.** Santa Maria: Pallotti, 2004. p. 7-22.

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, 1999a.

BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W.Y.Y. 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 Geotecnia, 2002a.v. 1. p. 401-410.

BASTOS, C.A.B.; GEHLING, W.Y.Y.; MILITITSKY, J. Avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais-uma proposta metodológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 12., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2002b. v. 2. p. 1193-1203.

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

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

BORTOLI, C.R. **Estudo numérico-experimental da condutividade hidráulica saturada e não saturada em um solo estruturado.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999, 121 p.

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 – Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, Salvador, p. 253-261, 2005.

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.; CASSOL, E.A.; REICHERT, J.M.; BORGES, A.L.O. 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.

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

CARVALHO et al. Avaliação do potencial erosivo do solo residual de granulito e da Formação Barreiras da cidade de Salvador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2006. CD-ROM.

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

CORRÊA, L.S.L. Processo erosivos avançados em São Francisco de Assis – RS: Estudo de caso.2006.79f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

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.

DIAS, R.D.; BASTOS, C.B.; MILITISKY, J.; GEHLING, W. Avaliação da erodibilidade de perfis de solos residuais da grande Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: 1998. v. 1. p. 557-564.

DOMINGUES, E.N. Caracterização das feições erosivas e relações com o meio hidrobiológico em áreas impactadas da Serra do Mar, na região de Cubatão (SP). **Geociências**. UNESP. São Paulo, 2001.

FÁCIO, 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 gnaise da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. 2001. 119f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001a.

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

FREITAS, F.J.; CANTALICE, J.R.B.; BEZERRA, S.A.; SILVA, M.D.R.O; SANTOS, P.M.; CORREA, R.M. LIMA, P.A.; FIGUEIRA, S.B. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, v.32, p. 1743-1751, 2008.

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

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. Encostas e a questão ambiental. In: CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. (Org.). **A questão ambiental-diferentes abordagens**. Rio de Janeiro: Bertland Brasil, 2003. p. 191-218.

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

HANN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.R. **Design hidrology and sedimentology for small catchments**, Academic Press, 1994.

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

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

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 131-152.

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

JACINTHO, E.C.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; CARDOSO, F.B.F.; SANTOS, R.M.M.; GUIMARÃES, R.C.; LIMA, M.C.G. 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.

KLAMT, E., SCHNEIDER, P. Solos suscetíveis à erosão eólica e hídrica na Região da Campanha do Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**. Santa Maria: Ed. Da UFSM. Nº 11. Vol 1 (jul. 1990) p. 71-80.

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: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001.

LAFAYETTE, K.P.V.; COUTINHO, R.Q.; QUEIROZ, J.R.S. Avaliação da erodibilidade como parâmetro no estudo de sulcos e ravinas numa encosta no Cabo Santo Agostinho – PE. In: Conferência 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.

MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio Grande do Sul: campos sulinos**. Porto Alegre: EST, 2004. 110p. il.

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.

MONTENEGRO, J.O. **Características físicas e fator de erodibilidade de solos da depressão central do Rio Grande do Sul**. 1976. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1976.

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.

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.; SERRA, P.R.M. Metodologia MCT para dosagem de misturas solo-agregado finas lateríticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. 22., 1987, Maceió. **Anais...** Maceió: 1987. p. 583-602.

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.

NUMMER, A. V., PINHEIRO, R. J. B., SANGOI, D. S., TATTO, J. Relação entre petrografia e erodibilidade de rochas de uma voçoroca localizada no oeste do Rio Grande do Sul, Brasil In CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA IV CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA, 2008, Coimbra. **Anais...** Coimbra, 2008, 8p.

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 número 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, M.A.T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos – conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-99.

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 Paracatú e Urucuia. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 7., 2006, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2006. CD-ROM.

PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; VITORINO, A.C.T.; CARVALHO, D.F. de; URCHEI, M.A. 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.

PEDRO, F.G.; LORANDI, R. Potencial natural de erosão na área periurbana de São Carlos–SP. **Revista de Cartografia**, n. 56/01, p. 28-33, 2004.

PINTO, J.S. **Estudo da condutividade hidráulica de solos para disposição de resíduos sólidos na região de Santa Maria**. 2005. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005, 148 p.

REICHERT, J.M.; SCHAFER, M.J.; ELTZ, F.L.P.; NORTON, L.D. Erosão em sulcos e entressulcos em razão do formato de parcela em Argissolo Vermelho-Amarelo Arênico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, p. 965-973, 2001.

ROBAINA, L.E.S.; FERNANDES NETO, S.; PAULA, P.M.; PEREIRA, V.P. Processo erosivo acelerado no RS: voçorocamento no município de Cacequi. **Geografia**. Rio Claro, v. 27(2), p. 109-120, 2002.

ROBAINA, L.E.S.; RIGHI, E. Unidades litológicas: bacias hidrográficas dos arroios Jaguarí Mirim, Inhadiju e Piquiri no oeste do RS. **Ciência e Natura, UFSM**, v.29 (2), p.157-172, 2007.

ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E.W.; VERDUN, R.; NARDIN, D. Compartimentação Geomorfológica da bacia Hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Proposta de Classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, p.11-23, 2010.

SALOMÃO, F.X.T.; ANTUNES, F.S. Solos. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 87-99.

SANGOI D. S., MORAES, C. E. D., BORTOLOTTI, W. R., NUMMER, A. V., PINHEIRO, R. J. B. Quantificação da erodibilidade por métodos indiretos e diretos em solos e rochas sedimentares de uma voçoroca em São Francisco de Assis-RS In: III Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 3., 2008, Búzios. **Anais...** Búzios: COBRAMSEG, 2008. p.388-394.

SANT'ANA, K.D.A. Diagnóstico 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. CD-ROM.

SCHNEIDER, P. A., FACCIN, C., TATTO, J., NUMMER, A. V. PINHEIRO, R. J. B. Correlação entre parâmetros geológicos e resultados de ensaios de desagregação de solos e rochas de uma voçoroca em São Francisco de Assis-RS. In: COBRAMSEG - Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 3., 2008, Búzios. **Anais...** Búzios, 2008, p.213-219.

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.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; AVANZI, J.C.; FERREIRA, M.M. 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, J.R.B.; RIBEIRO, S.L. Estudo de Boçorocas e Métodos Expeditos. In: SEMINÁRIO: CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE SOLOS E ROCHAS ATRAVÉS DE MÉTODOS EXPEDITOS. UNESP. Rio Claro, 2001. Disponível em: <http://sidklein.vilabol.uol.com.br/pos/metexp.htm>. Acesso em: Fev 2011.

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

SILVEIRA, L.L.L. Avaliação dos principais fatores intervenientes na erodibilidade dos solos. 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. CD-ROM.

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.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/UFRGS, 2002. 126 p.

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.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2003. 400 p.

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.

TATTO, J.; SANGOI, D.S.; PASSINI, L.B.; NUMMER, A.V.; PINHEIRO, R.J.B. Análise geológica-geotécnica preliminar da erodibilidade que condiciona a erosão por voçoroca no município de São Francisco de Assis – RS. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 4., 2007, Ijuí. **Anais...** Ijuí: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2007. CD-ROM.

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 INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA, 18, 2003, Itajaí. **Anais...** Itajaí: 2003. v. 1. Não paginado.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide conservation planning**. Washington, DC, USDA, 1978. 58p. (Agricultura Handbook, 537).