

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

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E
ROCHAS DE UMA VOÇOROCA EM SÃO
VALENTIM, RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Jozélia Assunção Fernandes

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E ROCHAS
DE UMA VOÇOROVA EM SÃO VALENTIM, RS**

por

Jozélia Assunção Fernandes

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

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil

2011

F363e Fernandes, Jozélia Assunção
 Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim,
RS / por Jozélia Assunção Fernandes. – 2011.
 127 p. ; il. ; 30 cm

 Orientador: Rinaldo José Barbosa Pinheiro
 Coorientador: Andréa Valli Nummer
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2011

 1. Engenharia civil 2. Erosão 3. Voçoroca 4. Caracterização geotécnica
I. Pinheiro, Rinaldo José Barbosa II. Nummer, Andréa Valli II. Título.

 CDU 551.435.162(816.5)

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

©2011

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

**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 DE UMA
VOÇOROCA EM SÃO VALENTIM, RS**

elaborada por
Jozélia Assunção Fernandes

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Andréa Valli Nummer, Dr^a. (UFSM)
(Co-Orientadora)

Cezar Augusto Burkert Bastos, Dr. (FURG)

Gregório Luis Silva Araújo, Dr. (UNB)

Santa Maria, 12 de agosto de 2011.

*Aos meus pais, João e Eva, e aos
meus irmãos, João Rogério, Rozélia,
Lucélia e Maristela, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais João e Eva pelo apoio, incentivo, os quais fizeram o possível e o impossível para que eu nunca perdesse a confiança, aos quais eu devo tudo. Exemplos a serem seguidos.

Aos meus irmãos, João Rogério, Rozélia, Lucélia e Maristela, que sempre estiveram presentes, me auxiliando e incentivando, compreendendo as minhas angústias, companheiros de todas as horas, que sempre me estimularam a continuar, me dando carinho, atenção e apoio.

Ao meu namorado, Maurício, companheiro, amigo. Sempre recordarei da expressão e palavras de apoio, carinho, incentivo, durante essa caminhada, entendendo meus momentos de ausência, medo e ansiedade.

Aos alunos de iniciação científica, do grupo de pesquisa GEOMA/UFSM, Frederico, Keli, Gabriela e Letícia os quais me auxiliaram na realização dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Rinaldo e a Prof. Dr^a Andrea, pelos exemplos que me levaram a descobrir caminhos para avançar na compreensão, compartilhando momentos de reflexão e discussão, contando sempre com suas experiências profissionais e pessoais, durante esse período.

À Universidade Federal de Santa Maria, Instituição que viabilizou a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

À CAPES, pela bolsa concedida durante a realização do mestrado.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nem tão longe que eu não possa ver, nem tão
perto que eu possa tocar, nem tão longe que eu
não possa crer que um dia chego lá...
Nem tão perto que eu possa acreditar que o dia já
chegou...”

Engenheiros do Hawaii

RESUMO

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

ESTUDO DA ERODIBILIDADE DE SOLOS E ROCHAS DE UMA VOÇOROCA EM SÃO VALENTIM, RS

AUTORA: JOZÉLIA ASSUNÇÃO FERNANDES
ORIENTADOR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 12 de agosto de 2011.

A pesquisa, da qual resulta esta dissertação de mestrado, se desenvolveu em uma voçoroca, conhecida como “Buraco Fundo” localizada no município de Santa Maria/RS. O objetivo principal foi o estudo da erodibilidade dos solos superficiais (horizonte A/B) e do substrato rochoso (rocha alterada, siltito e arenito) de um perfil típico da área da voçoroca. A metodologia aplicada neste estudo consistiu no levantamento bibliográfico, investigação de campo, ensaios de caracterização e de avaliação indireta (ensaios de desagregação, infiltrabilidade e perda por imersão) e direta (Inderbitzen), e comparação com a proposta de Bastos (1999) para 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 de erodibilidade (K_{USLE}), da avaliação do potencial de desagregação dos solos e dos critérios baseados na metodologia MCT são os seguintes: para o solo do horizonte A/B bem como o de rocha alterada o fator K_{USLE} situou-se entre 0,20 e 0,30, sendo estes classificados como de média erodibilidade; para as camadas de siltito e de arenito este parâmetro situou-se entre 0,30 e 0,54, caracterizando-as como materiais de média a alta erodibilidade. Os ensaios de desagregação mostraram a menor resistência do arenito frente à inundação, devido à sua baixa cimentação. Os resultados dos ensaios baseados na Metodologia MCT destacam a maior susceptibilidade à erosão da camada de arenito em relação aos outros materiais. Na avaliação direta da erodibilidade, através do ensaio de Inderbitzen, o arenito apresentou-se mais erodível ($K=0,045$), principalmente nas amostras secas ao ar. Conforme a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999), o parâmetro K na umidade natural, ambas as camadas foram classificadas como de média a baixa erodibilidade. O resultado do coeficiente de erodibilidade K_{USLE} apresentou-se coerente com abordagem proposta pelo autor ($K_{USLE} > 0,20$), sendo o arenito a camada mais erodível. Com a análise da $P_{p,200}$, verificou-se que o arenito é a camada mais erodível das estudadas. Quanto ao índice de plasticidade (IP), razão de dispersão (RD) e através da análise do parâmetro Δc , a tendência proposta por Bastos não foi verificada no trabalho. Os parâmetros apresentados na proposta de Bastos (1999), que tiveram melhor desempenho foram a $P_{p,200}$, o fator K_{USLE} 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 SOIL AND ROCK ERODIBILITY IN A GULLY IN SÃO VALENTIM, RS

AUTHOR: JOZÉLIA ASSUNÇÃO FERNANDES

CHAIR: RINALDO JOSÉ BARBOSA PINHEIRO

Date and place of the defence: Santa Maria, August 12th, 2011.

The research of which this Master's Thesis results was carried out in a gully known as Buraco Fundo (Deep Hole), located in the municipality of Santa Maria, in Rio Grande do Sul. The main objective was the study of the erodibility of surface soils (horizon A/B) and rocky substrate (altered rock, siltstone and sandstone) of a typical profile of the gully area. The methodology used in this study consisted in review of the literature, field investigation, tests of characterization, indirect assessment (tests of disaggregation, infiltration and loss by immersion) and direct assessment (Inderbitzen); as well as comparison with the proposal of Bastos (1999) for estimating the erodibility of unsaturated soils in the region of Porto Alegre. The results obtained out of the indirect assessment of erodibility – by means of estimating the erodibility factor (K_{USLE}), of assessing the potential of soil disaggregation, and of criteria based on MTC methodology are: for the soils of the horizon A/B and of the altered rock the factor K_{USLE} has been situated between 0,20 and 0,30, being them classified as medium erodibility rate; for the layers of siltstone and sandstone that parameter has been set between 0,30 and 0,54, allowing to characterize them as materials of medium to high rate of erodibility. The tests of disaggregation showed the weaker resistance of sandstone under flooding, owing to its low cementation. The test results based on the MCT methodology have highlighted the greater susceptibility to erosion of the sandstone layer in relation to other materials. In the direct assessment of erodibility, through Inderbitzen testing, the sandstone has been found to be more erosive ($K = 0.045$), mainly in air-dried samples. According to Bastos' (1999) proposal of geotechnical approach, e.g. the parameter K in natural moisture, both layers have been classified as medium to low erodibility. The result of the coefficient of erodibility K_{USLE} has been presented as consistent with the approach proposed by the author ($K_{USLE} > 0.20$), showing that the sandstone constituted the most erosive layer. Besides, through the analysis of $P_{p,200}$, it has been found that among the layers studied the sandstone is the most erosive one. As regards the plasticity index (PI), the ratio of dispersion (RD), and through the analysis of parameter Δc , the tendency proposed by Bastos has not been found in this work. The parameters proposed by Bastos (1999), which presented the best performance have been $P_{p,200}$, the factor K_{USLE} , and the erodibility criteria of MTC methodology.

Keywords: erosion; gully; geotechnical characterization

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Erosão por salpicamento ou splash (IPT, 1999)	18
Figura 2.2 – Mecanismo do processo erosivo em um terreno com sulcos segundo Vilar e Prandi (1993).	20
Figura 2.3 – Sulcos, ravinas 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 (BIGARELLA e MAZUCHOWSKI 1985 apud 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 (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 – Equipamento do ensaio de penetração de cone (ALCÂNTARA e VILAR, 1998 apud SILVA e RIBEIRO, 2001).....	43
Figura 2.10 – Relação entre DP e penetração natural (ALCÂNTARA e VILAR, 1998 apud SILVA e RIBEIRO, 2001).....	44
Figura 2.11 – Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS (BASTOS, 1999)	47
Figura 3.1 – Camada de arenito na base da voçoroca	51
Figura 3.2 – Coleta das amostras.....	51
Figura 3.3 – Etapas de execução do ensaio.....	52
Figura 3.4 – Retirada da amostra do anel para o ensaio de desagregação	55
Figura 3.5 – À esquerda esquema das condições de submersão, representando as etapas do ensaio de desagregação. À direita, amostra pronta para o ensaio.	56
Figura 3.6 – Esquema do ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT (TATTO, 2007)	58

Figura 3.7 –	Ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT	58
Figura 3.8 –	Curva típica do deslocamento do menisco versus tempo para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT (BASTOS, 1999)	59
Figura 3.9 –	Redução da altura da amostra no ensaio de perda de massa por imersão modificado.	60
Figura 3.10 –	Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT (TATTO, 2007)	61
Figura 3.11 –	Equipamento de Inderbitzen (TATTO, 2007)	63
Figura 3.12 –	Preparo das amostras indeformadas para o ensaio de Inderbitzen.....	64
Figura 3.13 –	Amostra sendo erodida sob ação do fluxo na rampa.	64
Figura 3.14 –	Material coletado passando pelo conjunto de peneiras.....	64
Figura 3.15 –	Amostra ao término do ensaio.	65
Figura 3.16 –	Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra versus tempo para o ensaio Inderbitzen (BASTOS, 1999)	65
Figura 3.17 –	Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τ_h crit (BASTOS, 1999)	67
Figura 4.1 –	Localização geográfica da microbacia do Arroio Sarandi. A imagem de satélite pertence ao software Google Earth (versão 5.0/2009). O mapa de localização foi elaborado a partir do software Spring (4.0) (ÁVILA, 2009)	70
Figura 4.2 –	Localização da Voçoroca do Buraco Fundo na microbacia do Arroio Sarandi. Imagem Google Earth (versão 5.0/2009). (ÁVILA, 2009)	71
Figura 4.3 –	Relevo de coxilhas suaves e alongadas no primeiro plano. Em segundo plano uma vertente com declive mais acentuado (ÁVILA, 2009).....	71
Figura 4.4 –	Pecuária extensiva na área de entorno da voçoroca (ÁVILA, 2009).....	72
Figura 4.5 –	Dolina presente na área de estudo (ÁVILA, 2009).....	73
Figura 4.6 –	Representação de dolinas e uvalas (BIGARELLA, 2003).....	74
Figura 4.7 –	Alinhamentos das direções de falhas na voçoroca do Buraco Fundo	75
Figura 4.8 –	Falhas na voçoroca de São Valentim	75
Figura 5.1 –	Perfil II das camadas estudadas da Voçoroca de São Valentim.	77

Figura 5.2 –	Curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante.	80
Figura 5.3 –	Curvas tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para as amostras do Horizonte A/B.	84
Figura 5.4 –	Curvas tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para as amostras da Rocha Alterada.	85
Figura 5.5 –	Curvas tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para as amostras do Arenito.	86
Figura 5.6 –	Envoltórias de ruptura ao cisalhamento para os ensaios realizados na umidade natural, inundada e seca ao ar.	88
Figura 5.7 –	Ensaio de desagregação para o Horizonte A/B, Rocha Alterada e Arenito, respectivamente. (a) fase inicial do ensaio com água na base das amostras. (b) as amostras ao final do ensaio, após 24 de imersão.	93
Figura 5.8 –	(a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do Horizonte A/B.	96
Figura 5.9 –	(a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da Rocha Alterada.	96
Figura 5.10 –	(a) volume de água infiltrada (cm ³ /cm ²) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do Arenito.	96
Figura 5.11 –	Aplicação do critério de erodibilidade pela Metodologia MCT para os materiais estudados.	97
Figura 5.12 –	Curvas típicas obtidas no ensaio de Inderbitzen.	99
Figura 5.13 –	Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras do horizonte A/B, rocha alterada e arenito nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida.	102
Figura 5.14 –	Valores do coeficiente de erodibilidade (K) obtidos nos ensaios de Inderbitzen para os horizontes/camadas estudados.	103
Figura 5.15 –	Relação entre a % passante na peneira # 200, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).	107
Figura 5.16 –	Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).	108

Figura 5.17 – Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	109
Figura 5.18 – Relação entre a razão de dispersão (RD), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	110
Figura 5.19 – Relação entre p_i/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.....	111
Figura 5.20 – Relação entre p_i/s (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras secas ao ar.	111
Figura 5.21 – Relação entre a coesão não saturada na umidade natural (c) e o coeficiente de erodibilidade (K).....	112
Figura 5.22 – Relação entre a coesão na condição inundada (c') e o coeficiente de erodibilidade (K).....	113
Figura 5.23 – Relação entre a variação de coesão (c), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	114
Figura 5.24 – Relação entre a variação do potencial de colapso (I_c), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação de voçorocas (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.....	33
Tabela 2.6 – Classificação relativa da erodibilidade (TATTO, 2007).....	35
Tabela 3.1 – Total de amostras coletadas para os diferentes ensaios de erodibilidade	52
Tabela 3.2 – Valores de velocidade de escoamento (v), altura da lâmina d'água (h) e tensão cisalhante hidráulica (τ_h) para combinações de vazão (Q) e inclinação de rampa (i).....	66
Tabela 3.3 – Critérios propostos por Bastos (1999), nos ensaios de caracterização, metodologia MCT e cisalhamento direto)	68
Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de massa específica real dos grãos e limites de consistência (Perfil II).....	79
Tabela 5.2 – Resumo dos ensaios de granulometria e classificação dos solos.....	79
Tabela 5.3 – Propriedades índices do solo.....	81
Tabela 5.4 – Análise química simplificada.....	82
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto na umidade natural, inundado e seco ao ar.....	87
Tabela 5.6 – Estimativa do parâmetro KUSLE segundo proposta de Wischmeier e Smith (1978)	90
Tabela 5.7 – Comportamento das amostras no ensaio de desagregação	91
Tabela 5.8 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do Horizonte A/B – critério de erodibilidade da Metodologia MCT	95
Tabela 5.9 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras da Rocha Alterada – critério de erodibilidade da Metodologia MCT	95

Tabela 5.10 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do Arenito – critério de erodibilidade da Metodologia MCT.....	95
Tabela 5.11 – Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10-3 g/cm ² /min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros $\tau_{crít}$ (Pa) e K (10-2 g/cm ² /min/Pa).....	100
Tabela 5.12 – Fator de erodibilidade da USLE, parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta de erodibilidade para os solos estudados por Bastos (1999) e neste trabalho.....	105
Tabela 5.13 – Valores da taxa de erodibilidade medidos nos ensaios de Inderbitzen e parâmetros geomecânicos referentes à resistência ao cisalhamento e à colapsividade para os solos estudados por Bastos (1999) e neste trabalho.	106
Tabela 5.14 – Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as classes de erodibilidade	106
Tabela 5.15 – Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas, de acordo com a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999).....	116

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 O fenômeno de erosão dos solos	17
2.2 Classificação dos processos erosivos	20
2.3 Fatores que condicionam os processos erosivos.....	26
2.4 Erodibilidade dos solos.....	30
2.4.1 Índices e Modelos de erosão.....	31
2.4.2 O enfoque Geotécnico – Aplicação dos conceitos de Mecânica dos Solos.....	34
2.5 Ensaios geotécnicos para avaliação da erodibilidade.....	35
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 Critérios de erodibilidade baseado em ensaios de cone de laboratório	42
2.5.5 Ensaio de Inderbitzen	45
3 METODOLOGIA	49
3.1 Etapa de gabinete	49
3.2 Investigação de campo	49
3.3 Ensaios de laboratório.....	53
3.3.1 Ensaios de caracterização e químicos.....	53
3.3.2 Ensaios de resistência ao cisalhamento direto.....	54
3.3.3 Ensaios para avaliação indireta da erodibilidade.....	54
3.3.3.1 Ensaio de desagregação	54
3.3.3.2 Ensaios pelo critério de erodibilidade MCT.....	57
3.3.4 Ensaio para avaliação direta da erodibilidade - Ensaio de Inderbitzen	62
3.4 Abordagem geotécnica para previsão da erodibilidade de solos residuais não saturados proposta por Bastos (1999).....	67
4 ÁREA DE ESTUDO	69
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
5.1 Ensaios de Caracterização e determinação dos índices físicos.....	78
5.2 Caracterização química e mineralógica	82
5.3 Resistência ao cisalhamento.....	83
5.4 Avaliação Indireta da Erodibilidade	89
5.4.1 Estimativa do fator erodibilidade da Equação Universal de perda de solo (K_{USLE})....	89
5.4.2 Avaliação do potencial de desagregação dos solos	90
5.4.3 Critérios de erodibilidade baseados na Metodologia MCT	94
5.5 Avaliação Direta da Erodibilidade.....	98
5.6 Erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas	104
5.6.1 Avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos	104
5.6.2 Parâmetros de erodibilidade e parâmetros físicos envolvidos da avaliação indireta da erodibilidade	104
5.6.2.1 Análise dos parâmetros físicos e geomecânicos.....	106
6 CONCLUSÕES	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

1 INTRODUÇÃO

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. Quando o agente erosivo é água recebe o nome de erosão hídrica, e ainda quanto este processo é acelerado por ações antrópicas denomina-se erosão hídrica acelerada.

As conseqüências que os processos erosivos têm causado, 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. Segundo Agenda 21 Brasileira (2000), na área rural do Brasil, devido ao uso e ocupação do solo, principalmente associada às práticas agrícolas, estima-se uma perda de 5,9 bilhões de dólares (1,4% do PIB do país) devido a erosão e degradação do solo.

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/ou controle da erosão.

O entendimento do mecanismo de desencadeamento e evolução dos processos erosivos não é simples, envolve o conhecimento de muitas variáveis e exige uma visão sistêmica do fenômeno.

Vários autores destacam a importância da ação da gota (erosão por impacto) e do escoamento superficial (erosão laminar e em sulcos) na deflagração dos processos de erosão hídrica. Os mecanismos envolvidos nestes processos 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 na área rural da comunidade de Alto das Palmeiras, no Distrito de São Valentin, município de Santa Maria/RS. Esta área degradada recebeu a denominação de “Buraco Fundo” pelos moradores da região.

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 realizado uma comparação com as propostas e critérios de erodibilidade apresentados por Bastos (1999).

A estruturação deste trabalho consta de 5 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 um levantamento geotécnico de detalhe da voçoroca onde foram estudados três 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 e os ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade.

A área de estudo foi detalhada no Capítulo 4, com a caracterização regional da microbacia do arroio Sarandi, onde está inserida a voçoroca do Buraco Fundo, objeto desse estudo.

O Capítulo 5 aborda a apresentação e análise dos resultados, através da descrição geológica da área da voçoroca; dos resultados da caracterização geotécnica e de avaliação da erodibilidade das camadas estudadas. As conclusões 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

O termo erosão provém do latim “erode-erodere” cujo significado é corroer e 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. Em particular, a erosão onde 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, realizada em Estocolmo em 1972, o primeiro momento em que o tema erosão, suas causas e conseqüências 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 et al. (2001), Guerra (2002), Surtegaray (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) e Bastos (1999) e na região centro-oeste do Brasil as pesquisas realizadas por Fragassi (2001a), Koetz (2003), Jacintho (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, 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 Figura 2.1 mostra que a desagregação das partículas do solo tem sua origem no chamado efeito *splash* ou salpicamento, ou seja, é o efeito do impacto da gota da chuva sobre o solo. Cooke e Doornkamp (1990 *apud* BIGARELLA, 2003) afirmam que este processo pode ser responsável até por 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.

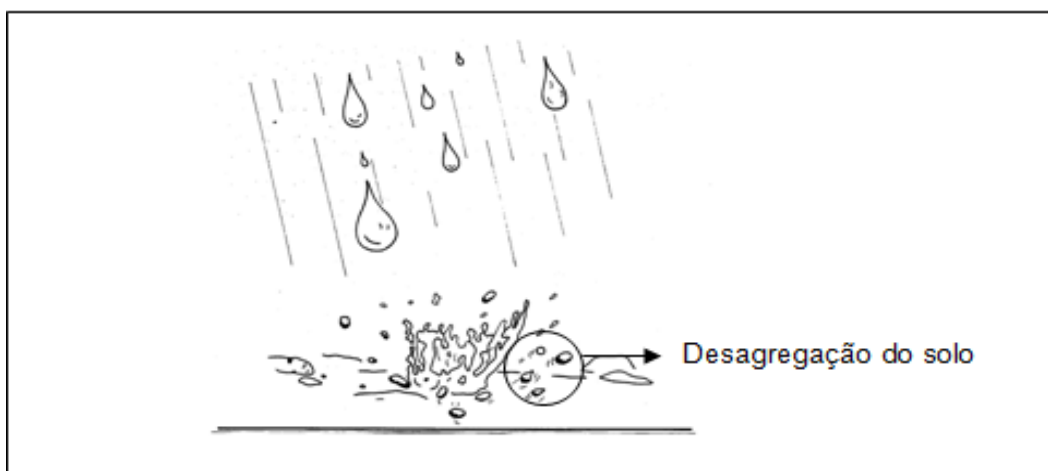


Figura 2.1 - Erosão por salpicamento ou splash. Fonte: IPT (1999)

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.

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 (FRENDRICH et al., 1991).

Alguns autores como Camapum de Carvalho et al. (2006a), afirmam que a erosão superficial por escoamento laminar pode ou não propiciar o aparecimento de sulcos, mas quando gerados, poderão evoluir para ravinas e voçorocas. Vilar e Prandi (1993 *apud* CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2006) 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 a intensidade com que ela ocorre 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, micro topografia, rugosividade e declividade). Portanto, em resumo a erosão entre sulcos pode ser vista como uma combinação de dois diferentes processos: desagregação da massa do solo pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo em entre sulcos; e transporte do solo desagregado pelo escoamento em entre sulcos (FREITAS et al., 2008).

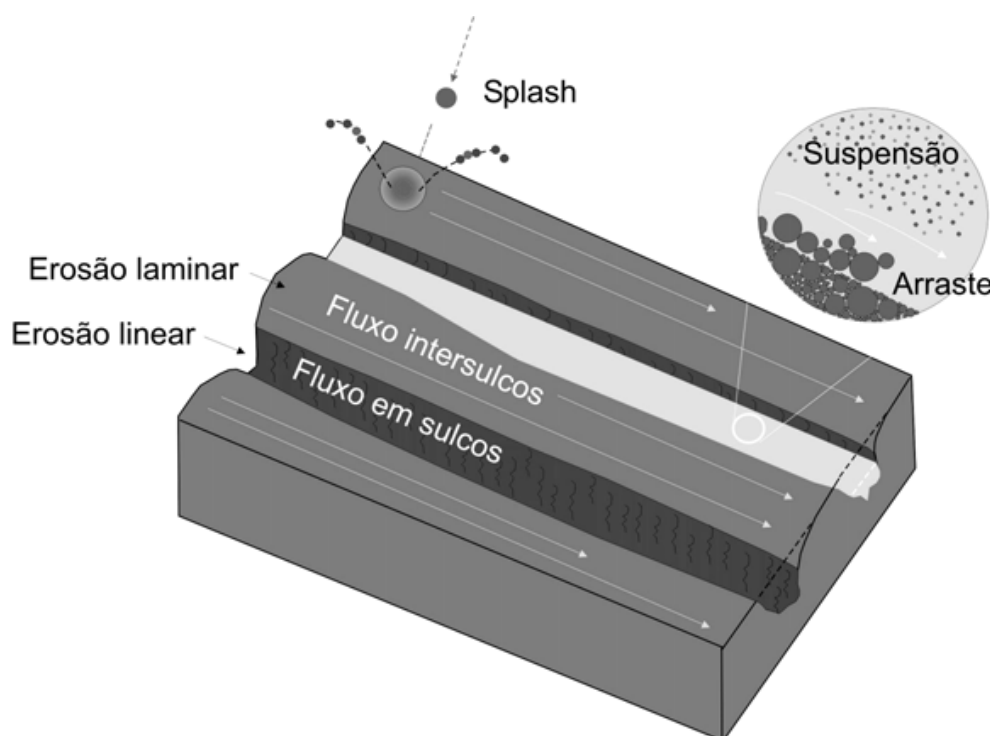


Figura 2.2 – Mecanismo do processo erosivo em um terreno com sulcos segundo Vilar e Prandi (1993). Fonte: Tatto (2007), adaptado de Camapum de Carvalho et al. (2006a)

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., 2006).

2.2 Classificação dos processos erosivos

Trabalhos como do IPT (1991), Bertoni e Lombardi Neto (1999), Maciel Filho (1997) e Infanti Jr (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 as 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. Conforme Heede (1970 *apud* OLIVEIRA, 1999), sendo consideradas 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, provocada 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 (2006).

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

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

De acordo com 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 a liquefação do solo ruptura abaixo, sendo responsáveis pela velocidade considerável da erosão nas voçorocas (Figura 2.4b).

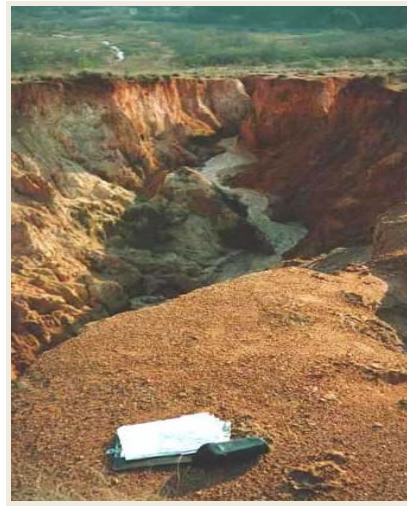


Figura 2.3 – Sulcos, ravinas e voçorocas no Loteamento Algarve: Fonte: Bastos (1999)

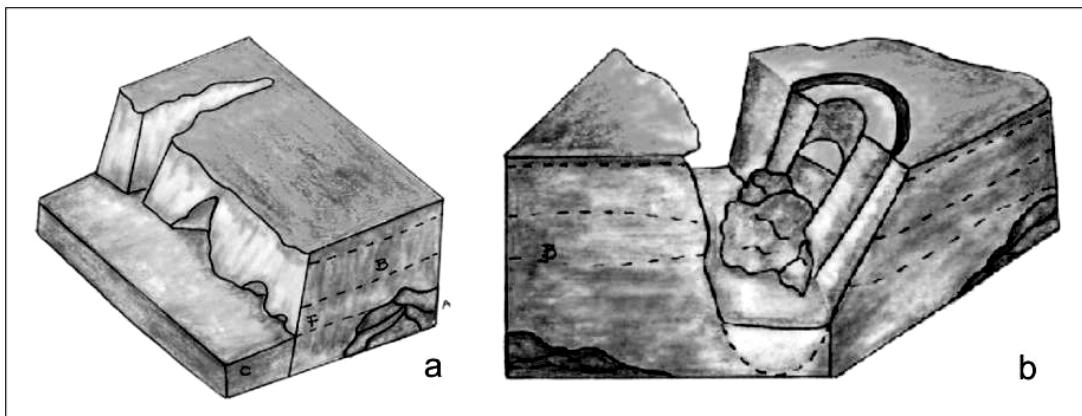


Figura 2.4 – Evolução de uma voçoroca (a) sob efeito da erosão interna e (b) sob efeito do escorregamento das bordas. Fonte: Bigarella e Mazuchowski (1985 *apud* BIGARELLA, 2003)

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

De uma maneira geral, autores como Gorshkov e Yakushova (1970 *apud* MACIEL FILHO, 1997), Fendrich (1982 *apud* FENDRICH et al., 1991) e Bigarella (2003) 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 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.

Com relação à classificação das voçorocas, os critérios mais utilizados, entre os diferentes autores, são: a dimensão e formato da seção transversal do canal formado, 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 (formato em U e 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. 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 freqüente encontrar ambos os formatos numa mesma voçoroca, independentemente de sua idade ou estabilização.

Camapum de Carvalho et al. (2006a) afirmam que tanto as ravinas, quanto as voçorocas, podem assumir forma linear, 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; forma de anfiteatro, quando a feição assume forma mais concentrada, e encaixada quando a feição atinge camadas de solo menos resistente, ficando confinada pelas mais resistentes. A tabela 1 apresenta uma classificação de voçorocas quanto a 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, quanto ao domínio dos aspectos hidromorfológicos, de feições erosivas: 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 FRENDRICH et al., 1991)

Classificação	Profundidade do canal	Área da bacia (ha)
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*).

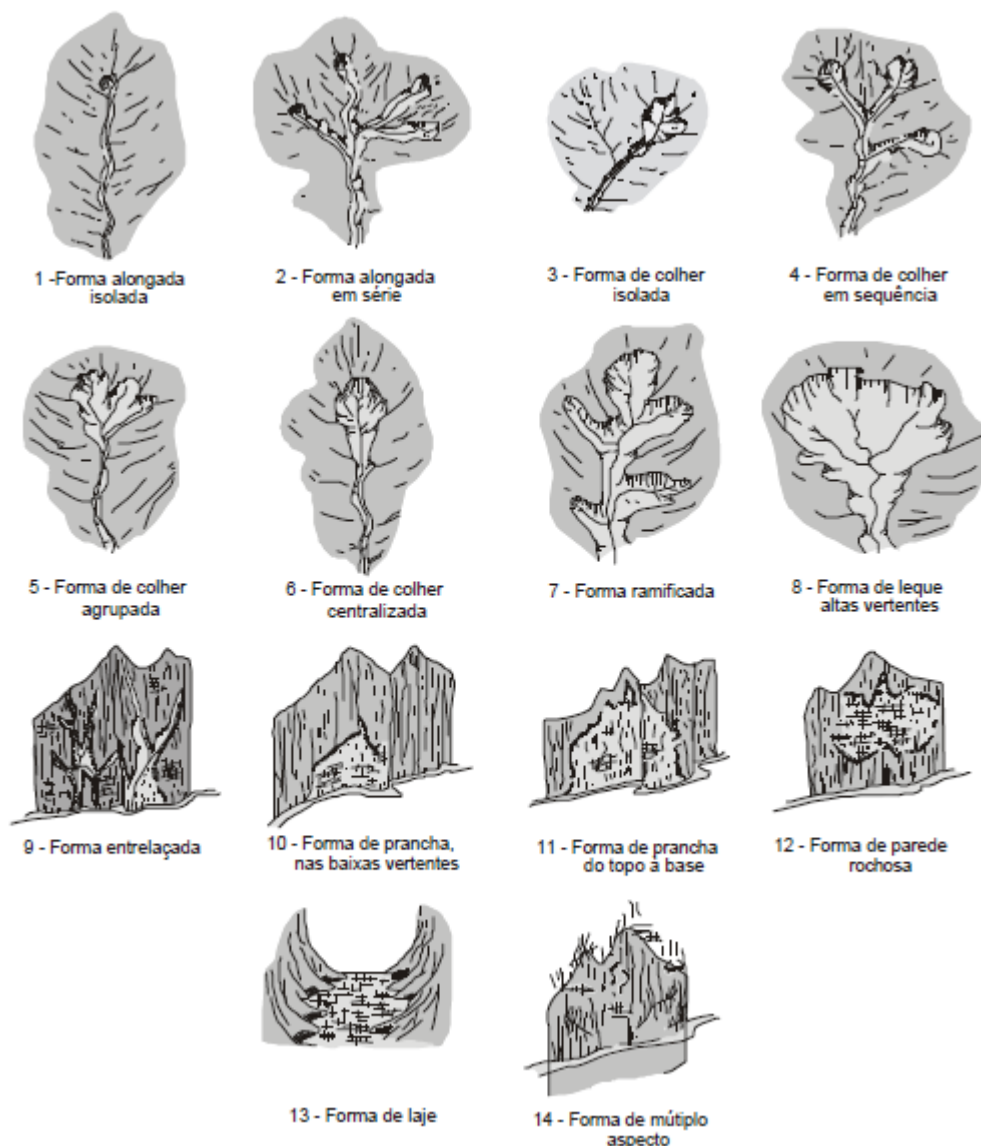


Figura 2.5 – Esboço das feições erosivas associadas a escorregamentos na Serra do Mar.
Fonte: Domingues (2001)

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. Autores como Galetti (1985), Bertoni e Lombardi Neto (1985), Guerra e Mendonça (2004), entre outros, 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 Salomão e Antunes (1998) os aspectos climáticos mais importantes no desenvolvimento pedogenético são representados pela precipitação pluviométrica e a temperatura.

Para 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, frequência e intensidade da chuva, sendo esta, o fator pluviométrico mais importante na erosão.

Para os autores, chuvas de maior intensidade, com longa duração e frequência alta, causam enxurradas mais volumosas, e conseqüentemente, maiores perda de solo.

Para autores como Lopes (1980 *apud* FENDRICH et al., 1991) a energia dos agentes erosivos está relacionada com a intensidade da chuva, onde as chuvas intensas causam muito mais danos ao solo que as chuvas moderadas.

Segundo 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.

De acordo com 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), IPT (1991), Borst e Woodburn (1940 *apud* BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985) e Bertoni e Lombardi Neto (1985) a erosão é diretamente proporcional à declividade e ao comprimento de rampa que

influenciam na velocidade da água, sendo menor nos terrenos mais planos e maiores nos terrenos com maiores comprimentos de rampa. 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.

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, e 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 e 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) se 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; e (d) obras de retificação de rios e canais, entre outros.

A natureza do solo/rocha determina a susceptibilidade dos terrenos à erosão (propriedade do solo 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 sua composição. A textura (características granulométricas), ou seja, a relação ao 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 esta 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 no começo da chuva e/ou grau de saturação; 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 influenciam 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.

Tabela 2.2 - Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento

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.

Fonte: Bastos (1999)

Segundo Bastos (2000), devido a 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.

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;
 K é o fator erodibilidade do solo;
 L é o fator comprimento de rampa;
 C é o fator de cobertura vegetal
 P é o fator de práticas de cultivo e manejo.

Cavalcante e Araújo (2005) apresentam os fatores de erodibilidade K da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) para os horizontes/camadas estudadas, 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

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

Fonte: Wischmeier e Smith (1978)

Tabela 2.4 – Classificação do coeficiente de permeabilidade.

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

Fonte: Hann et al. (1994)

O fator K_{USLE} de erodibilidade foi classificado de acordo com Carvalho (1994, *apud* Cavacante 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

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

Fonte: Carvalho (1994, *apud* Cavacante e Araújo, 2005)

As pesquisas agronômicas apresentam maior interesse na erosão superficial, ou seja, nas erosões entressulcos e em sulcos limitadas ao horizonte superficial. Os dados experimentais obtidos se devem principalmente a experimentos de campo, onde parcelas de solo são submetidas a ciclos de chuva natural ou simulada. Trabalhos relativos a 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 buscam-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 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$),

τ = tensão cisalhante do fluxo (N/m^2 ou Pa)

τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo (N/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 (τ). A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto da tensão cisalhante (τ) 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.

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. Suscetíveis ao processo de ravinamento e a erosão interna.
Alta	Solos friáveis com ravinamento e voçorocas em alto grau de desenvolvimento.
Média a baixa	Solos que perderam parte da cimentação de origem e que são compensados pelo enriquecimento em argila.
Média a alta	Solos saprolíticos arenosos de origem granítica, sujeitos a ravinamentos e voçorocamentos.

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

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 se dar 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 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 Ensaio de caracterização física

Os ensaios de caracterização física são considerados primordiais na análise, não só da erodibilidade, como também em qualquer outra 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. Considera ainda que as análises em termos de peso específico real dos grãos devem ser evitadas pelo fato de serem muito variáveis nos solos tropicais.

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

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

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 seqüência 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 resultar 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 aresta, sendo que as amostras são submetidas a imersão total durante 24 horas, e a imersão parcial. Este mesmo autor recomenda que as diferentes amostras não devem ser colocadas em um mesmo recipiente para serem ensaiadas, pois os elementos e compostos químicos despreendidos 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 (*W*ótima) e previamente secas ao ar, sendo submetidas ao processo de imersão parcial apenas, como descrito por Santos (1997, *apud* JACINTHO et al., 2006).

Santos (1997 *apud* BASTOS et al., 2000) ao ensaiar amostras de solo de voçorocas no município de Goiânia, concluiu que a desagregação verificada nas amostras ocorreu pelo processo de abatimento causado pela hidratação e desaeração geradas na fase de inundação das amostras, sendo que o processo de saturação das amostras anula a sucção matricial e gera poropressão positiva capaz de desestruturar e desagregar o solo.

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

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

2.5.3 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 os critérios de erodibilidade, desta forma, direcionando as 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 perda por imersão (π) obtido pelo ensaio de perda de massa por imersão modificado (ensaio de erodibilidade específica), ensaio este similar àquele estabelecido originalmente pela metodologia MCT.

Através da divisão do parâmetro π 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 π 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.

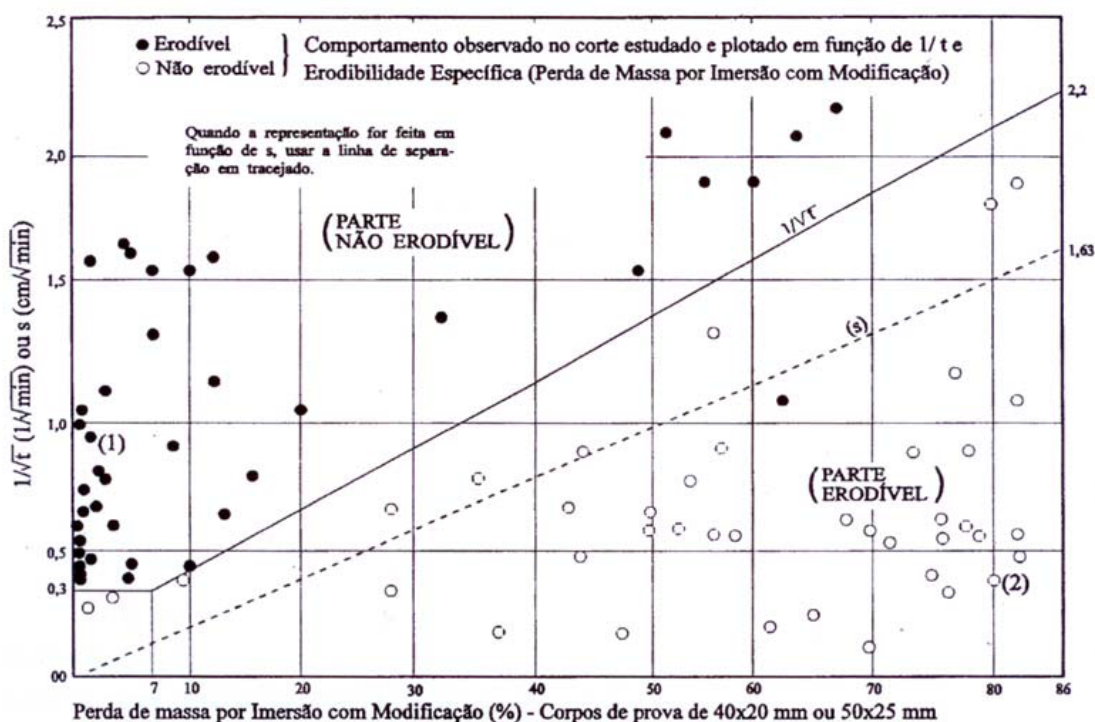


Figura 2.6 – Critério de erodibilidade MCT segundo Nogami e Villibor (1995)

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 a 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 ao 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 observa, inicialmente, uma tendência retilínea dos pontos onde é medido o coeficiente de sorção (s) (Figura 2.7).

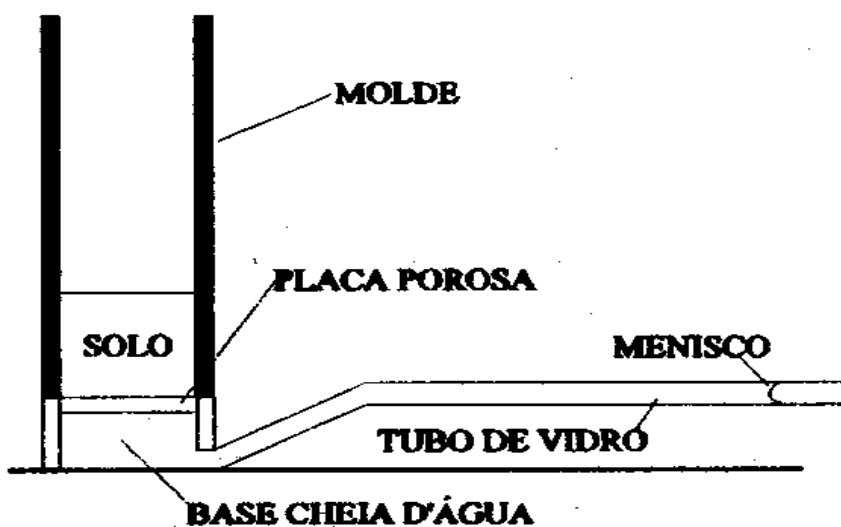


Figura 2.7 – Ensaio de infiltração da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. Fonte: adaptado de Nogami et al. (1987)

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 pelo anel.

Recolhe-se o solo desprendido do anel 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 original do ensaio de erodibilidade específica, neste estudo, assim como em Bastos (1999), Tatto (2007) e Ávila (2009), o ensaio 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 (π), representa para tais autores, o grau de desagregação do solo sob a ação estática da água.

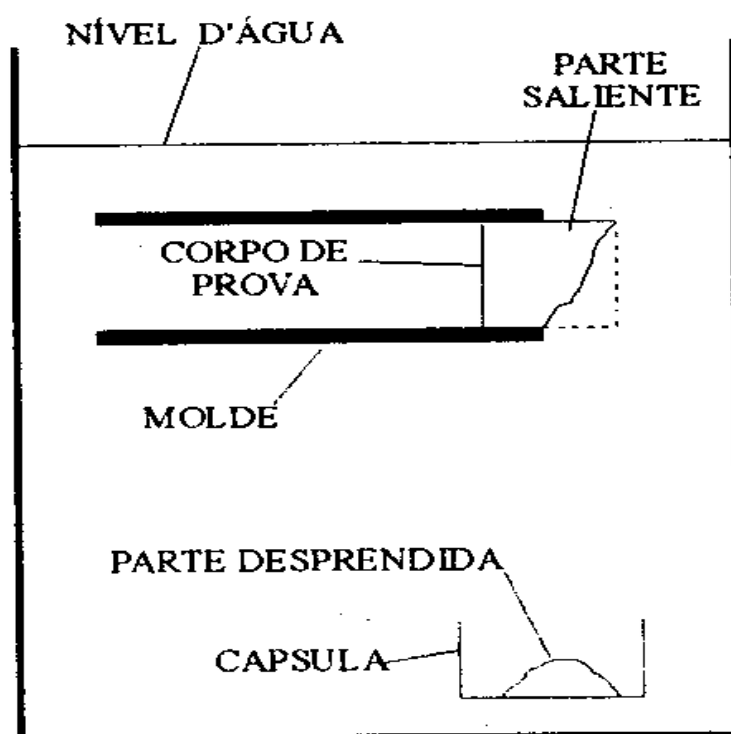


Figura 2.8 – Ensaio de erodibilidade específica da metodologia MCT para a avaliação da erodibilidade. Fonte: Nogami e Villibor (1979)

2.5.4 Critérios de erodibilidade baseado em ensaios de cone de laboratório

Alcântara (1997 apud BASTOS, 1999) propôs a utilização do ensaio de penetração ao cone para determinar a erodibilidade de solos. Segundo este autor, a diferença de penetração em amostras saturadas e não saturadas apresentaria boa correlação com a erodibilidade.

A partir dos valores de penetração nas condições natural (P_{nat}) e saturada (P_{sat}), pode-se definir DP (variação de penetração), conforme a equação a seguir apresentada:

$$DP (\%) = (P_{sat} - P_{nat}) / P_{nat} \quad (2.4)$$

O ensaio de penetração de cone utilizado por Alcântara e Vilar (1998 apud SILVA e RIBEIRO, 2001) estuda o comportamento de amostras indeformadas com altura de 40 mm e diâmetro de 73 mm, perante a penetração de um cone com ângulo de abertura de 30° e altura de 35 mm.

Mede-se em cada teste a altura de penetração alcançada pela sua ponta em 9 (nove) pontos diferentes na superfície de cada amostra. A saturação é obtida por capilaridade pelo período de 1 hora. Os valores de penetração natural e saturada são obtidos através da média dos valores alcançados em três repetições, excluindo-se aqueles que apresentem valores de dispersão em relação à média acima de 5%. A Figura 2.9 mostra o equipamento do ensaio de penetração de cone desenvolvido pelos autores.

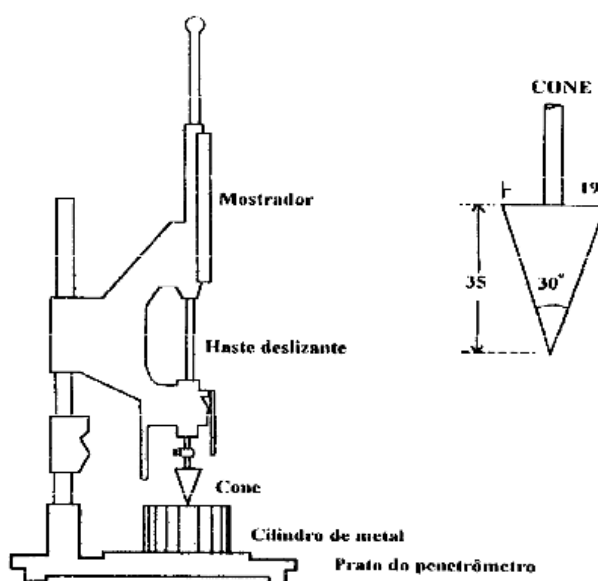


Figura 2.9- Equipamento do ensaio de penetração de cone. Fonte: Alcântara e Vilar (1998, apud SILVA e RIBEIRO 2001)

A Figura 2.10 mostra os resultados expressos em termos de variação de penetração (DP), colocados em função da penetração natural. Nesta Figura observa-se uma tentativa de criar um índice de erodibilidade. Numa primeira aproximação, valores do índice de erodibilidade $E = 4,50 P_{nat} / DP$ menores que a unidade identificam todas as amostras com

alta erodibilidade, à exceção da amostra 11 que apresenta comportamento semelhante ao de amostras com alta erodibilidade.

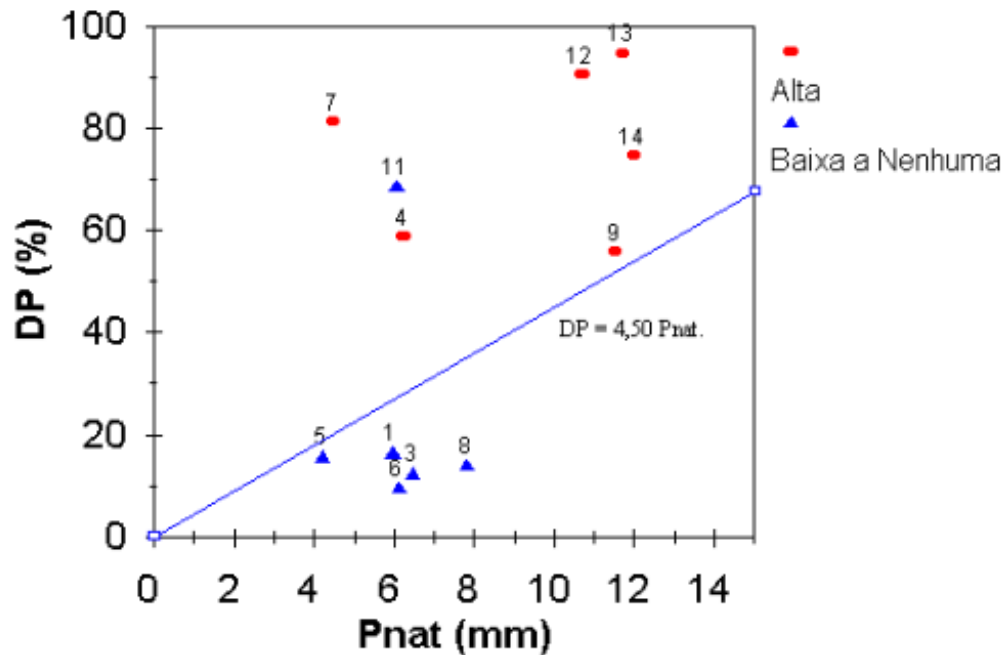


Figura 2.10 - Relação entre DP e penetração natural. Fonte: Alcântara e Vilar (1998, apud SILVA e RIBEIRO 2001)

Os autores concluíram que o ensaio de cone destaca-se pela simplicidade e reprodutibilidade na execução dos testes. A condição de penetração na situação saturada refletem, de certo modo, a perda de resistência exibida pelo solo em contato com água.

Os resultados foram animadores, pois conseguiram separar amostras erodíveis de não erodíveis. Numa primeira aproximação a relação $DP = 4,50 Pnat$ separa amostras com comportamentos diferentes face à erodibilidade.

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

2.5.5 Ensaio de Inderbitzen

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

Diversos 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.

Em relação à metodologia, 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, 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 e uma vazão de 50 ml/s 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 2.11). 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 o diâmetro da amostra, utilizado por Santos, para 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 primeiros 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 (2001), 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° .

Alguns 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.

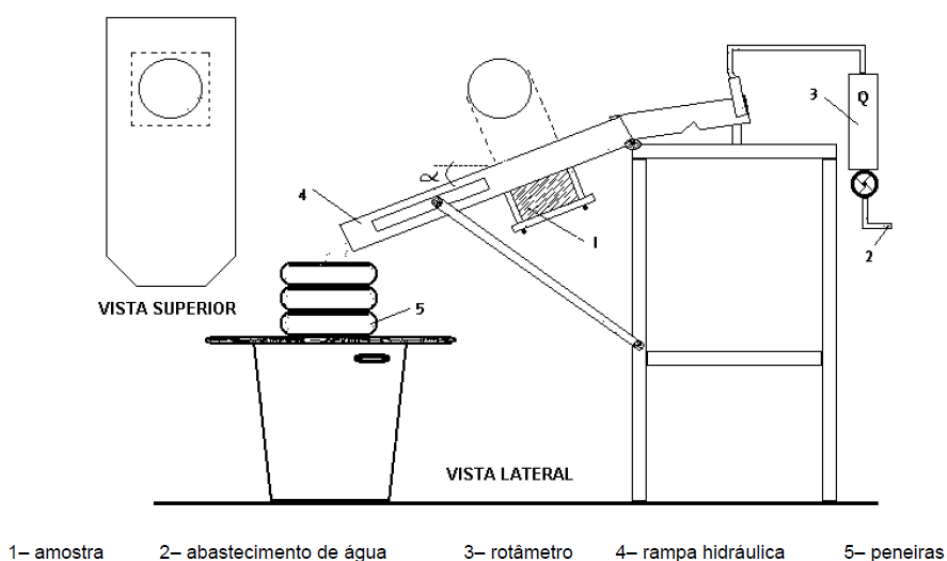


Figura 2.11- Esquema do equipamento de Inderbitzen do LMS/UFRGS. Fonte: Bastos (1999)

Neste Capítulo foi possível verificar a existência de vários conceitos e explicações 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 proporcionou um 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 do Buraco Fundo.

Nota-se a importância e eficácia dos ensaios geotécnicos para a avaliação da erodibilidade do solo/rocha. Além disso, através deles é possível verificar 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 consistiu em quatro etapas de trabalho, onde 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 três camadas para coleta de amostras deformadas e indeformadas e posterior realização dos ensaios geotécnicos; (c) ensaios laboratório: nesta etapa foram realizados os ensaios de caracterização e os ensaios de avaliação direta e indireta da erodibilidade; (d) análise dos resultados segundo a abordagem geotécnica para previsão da erodibilidade proposta por Bastos (1999).

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 central do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Santa Maria e Dilermando de Aguiar) teve como objetivo conhecer aspectos de

relevo, as litologias e solos predominantes, identificando os processos erosivos que ocorrem nesta região.

Ávila (2009) apresentou várias feições de processos erosivos encontrados na região. Portanto, este trabalho ao dar continuidade aos estudos anteriores, se desenvolveu em uma voçoroca conhecida na região como “Buraco Fundo”. Esta voçoroca apresenta feições características associadas a pseudo-dolinas e apresentando um forte controle estrutural.

Foi complementado o levantamento geológico-geotécnico da área da voçoroca do “Buraco Fundo” e seu entorno, avaliando principalmente o comportamento dos solo/rochas no campo em relação à erodibilidade. Deste levantamento, gerou um perfil estratigráfico simplificado na área da cabeceira e do anfiteatro (meia encosta) da voçoroca (Perfil I e II).

Neste trabalho foi escolhido como perfil típico a ser estudado o Perfil II, situado na meia encosta, pois apresenta os solos superficiais e rochas de maneira mais nítida e com fácil acesso. Foram identificados neste perfil o horizonte A/B, rocha alterada, siltito e arenito na base da voçoroca.

Neste perfil foram coletadas amostras deformadas e indeformadas características de cada horizonte/camada de solo e rocha. O horizonte A/B pedológico (argissolo bruno acinzentado) apresenta aproximadamente 1 m de espessura. Este horizonte transiciona para uma camada de alteração, de textura siltosa, bastante espessa denominada de rocha alterada. Uma camada de pequena espessura de um siltito maciço separa esta camada do arenito da base da voçoroca. Este arenito forma uma parede quase vertical com 9,30 m de espessura aproximadamente (Figura 3.1).

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 (LEMOS 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 (Figura 3.2).

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).



Figura 3.1 – Camada de arenito na base da voçoroca

O anéis metálicos quadrados (5x5x2cm) foram utilizados para o ensaios de cisalhamento direto. A Tabela 3.1 apresenta a quantidade de amostras indeformadas moldadas no perfil em estudo.



Figura 3.2 – Coleta das amostras.

Tabela 3.1 - Total de amostras coletadas para os diferentes ensaios de erodibilidade

Dimensão dos anéis (cm)	Ensaio	Nº. amostras por camada	Nº. amostras total
10 x 2	Desagregação	2	6
5 x 5	Infiltrabilidade	9	18
5 x 5	Perda por imersão	9	18
10 x 2	Inderbitzen	24	72
5 x 5 x 2	Cisalhamento direto	12	36

Para caracterização da condutividade hidráulica in situ foram realizados ensaios de piezômetros escavados no horizonte A/B, rocha alterada e arenito. A metodologia para execução deste ensaio está bem detalhada nos trabalhos de Bortoli (1999) e Pinto (2005). A Figura 3.3 apresenta uma sequência de fotos mostrando todas as etapas de execução do ensaio (furo a trado, descida do tubo de PVC, execução do filtro granular, selamento de bentonita, avaliação da permeabilidade).



Figura 3.3- Etapas de execução do ensaio.

3.3 Ensaio de laboratório

Nesta etapa do trabalho foram realizados os ensaios de caracterização, ensaios químicos, ensaios de resistência ao 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 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), limite de liquidez (ABNT NBR 6459/84), limite 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 foi 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 física e química das amostras de solo extraídas de um perfil característico da área de estudo. Nesta análise, foram realizados para cada amostra, num total de 8 amostras, a determinação da textura, da percentagem de argila, do pH, do índice SMP, da percentagem de matéria orgânica, da percentagem de saturação em alumínio e bases, da verificação da capacidade de troca catiônica (CTC), da quantidade de alumínio mais hidrogênio e da quantidade de fósforo, potássio, alumínio, cálcio, magnésio, cobre, zinco, ferro e manganês.

3.3.2 Ensaio de resistência ao 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 foi colocada na prensa de cisalhamento onde a metade superior do corpo de prova deslizava em relação à inferior. O corpo de prova foi inicialmente submetido a 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 normais, 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 de PVC, biselados, 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 3.4), 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 3.5 mostra o esquema das condições de submersão, representando as etapas do ensaio de desagregação e a amostra pronta para o ensaio.



Figura 3.4 – Retirada da amostra do anel para o ensaio de desagregação

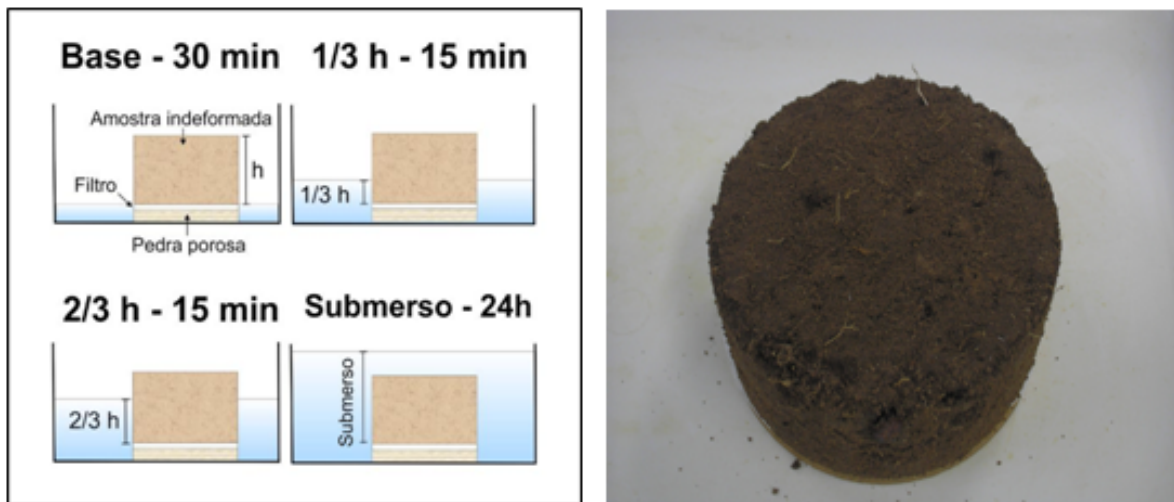


Figura 3.5 – À esquerda esquema das condições de submersão, representando as etapas do ensaio de desagregação. À direita, amostra pronta para o ensaio. Fonte: Tatto (2007)

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 (π), obtido no ensaio de erodibilidade específica. Através da divisão do parâmetro “ π ” 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 3.6 e 3.7).

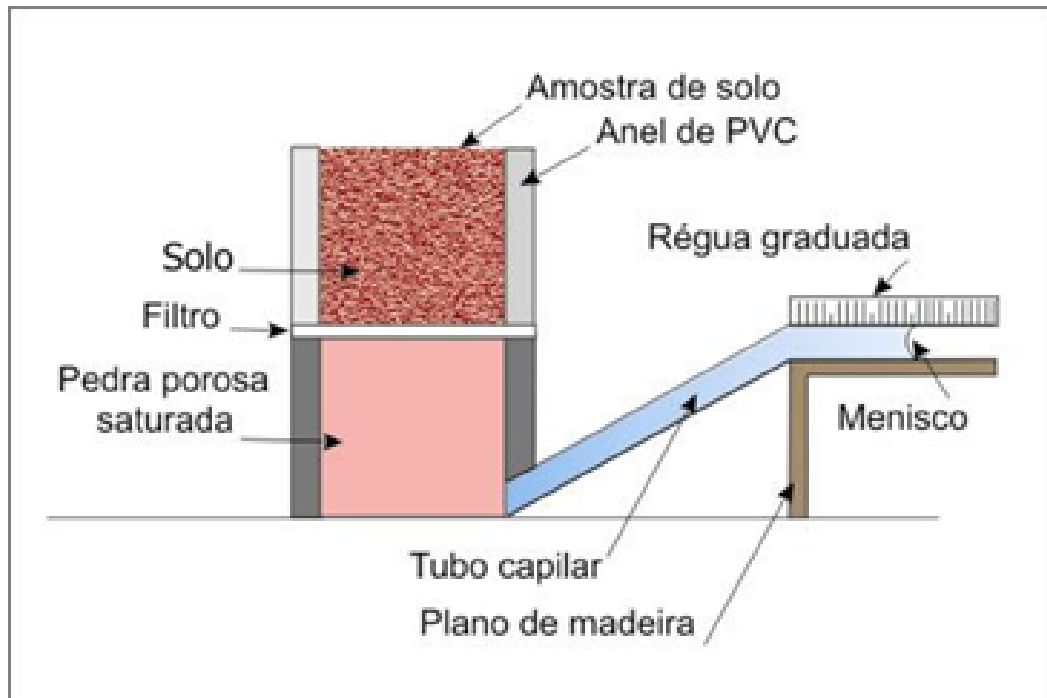


Figura 3.6 – Esquema do ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT. Fonte: Tatto (2007)

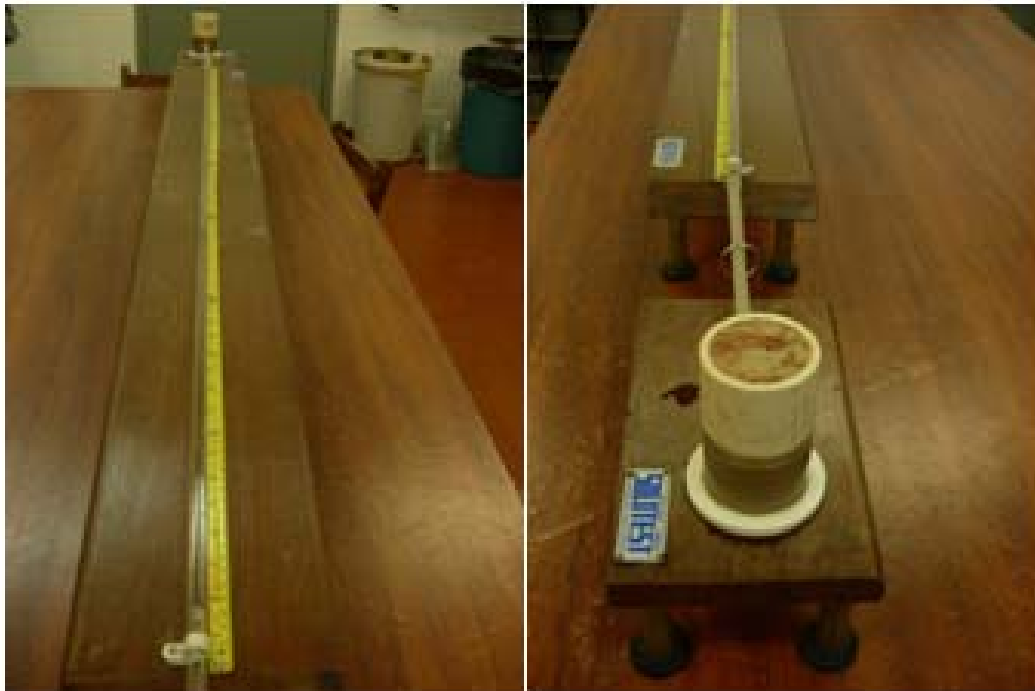


Figura 3.7 – Ensaio de Infiltrabilidade da metodologia MCT

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 3.8) com o traçado 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

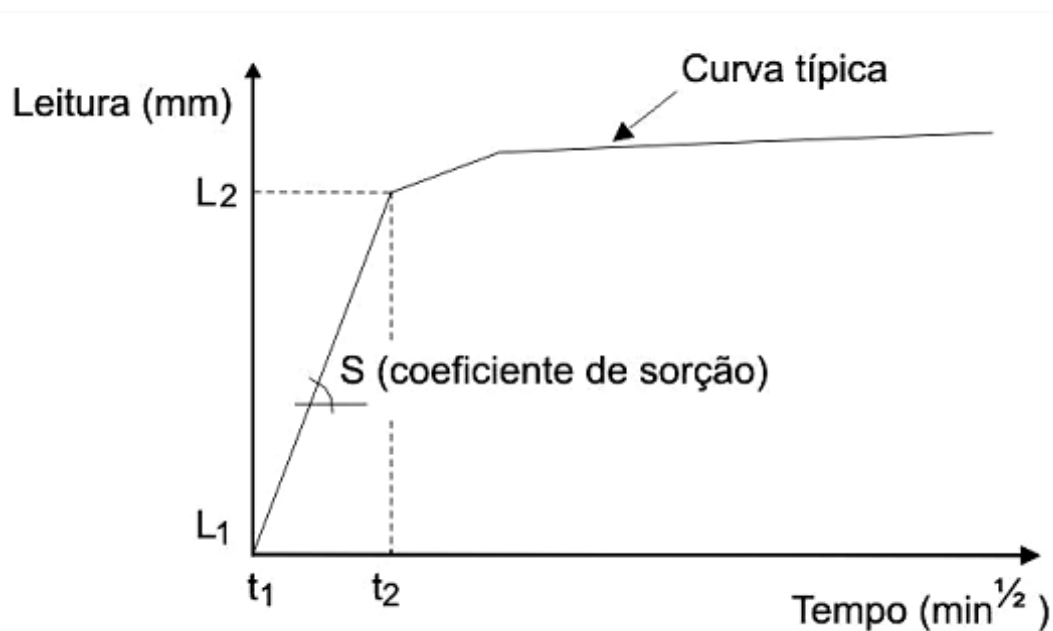


Figura 3.8 – Curva típica do deslocamento do menisco versus tempo para o ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. Fonte: adaptado de Bastos (1999)

- Ensaio de perda de massa por imersão modificado (pi)

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 3.9), sendo colocado um papel filtro e uma pedra porosa na parte interna no anel.



Figura 3.9 – Redução da altura da amostra no ensaio de perda de massa por imersão modificado. Fonte: Tatto (2007)

O sistema é formado por um berço metálico que suporta a amostra confinada, sendo esta colocada na horizontal sobre o berço (Figura 3.10). Logo abaixo da amostra, 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:

$$pi = \frac{p_{secod}}{P_{secot}} \quad (3.2)$$

Onde:

p_{secod} = peso de solo seco desagregado

P_{secot} = peso de solo seco total da amostra.

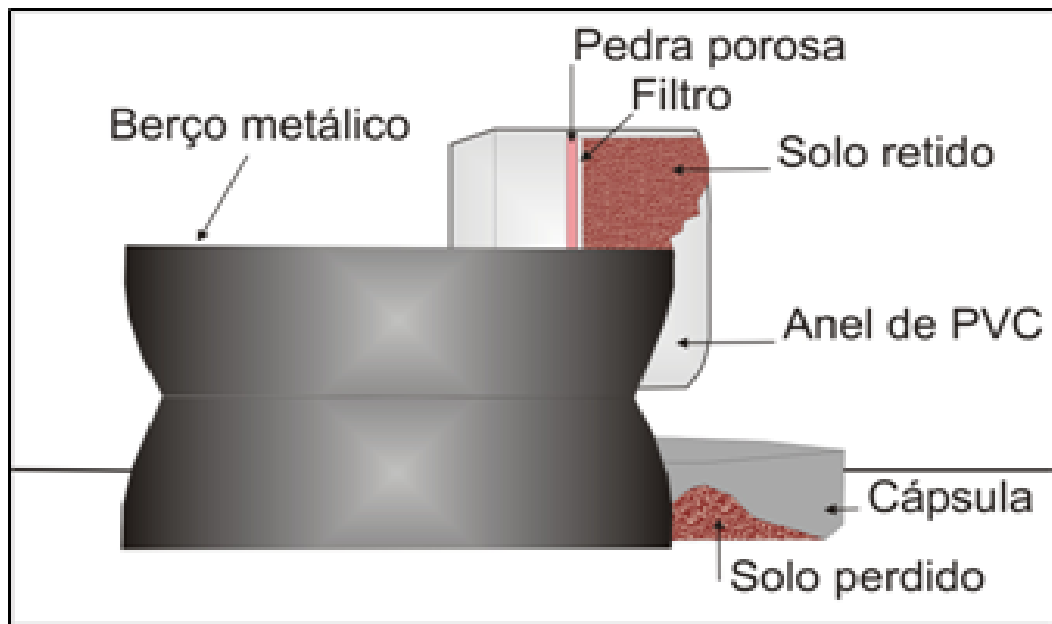


Figura 3.10 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT.
Fonte: Tatto (2007)

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 normalizado.

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

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 3.11).

As variáveis de ensaio adotadas nesta pesquisa foram as mesmas utilizadas por Bastos (1999). As inclinações da rampa metálica foram de 10°, 26°, 45° e 54°, 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.



Figura 3.11 – Equipamento de Inderbitzen. Fonte: Tatto (2007)

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 3.12).
- (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.

(5) Com o início do ensaio (Figura 3.13), o material erodido foi captado por baldes distintos nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos e posteriormente, passado pelo conjunto de peneiras (Figura 3.14).

(6) O solo retido em cada peneira e o remanescente do anel (Figura 3.15) 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 3.12 – Preparo das amostras indeformadas



Figura 3.14 – Material coletado passando pelo conjunto de peneiras



Figura 3.13 – Amostra sendo erodida sob ação do fluxo na rampa.



Figura 3.15 – Amostra ao término do ensaio

Os resultados obtidos foram plotados em um gráfico que representa a relação entre a perda de solo acumulada por unidade de área da amostra (g/cm^2) e o tempo total de ensaio (minutos) (Figura 3.16).

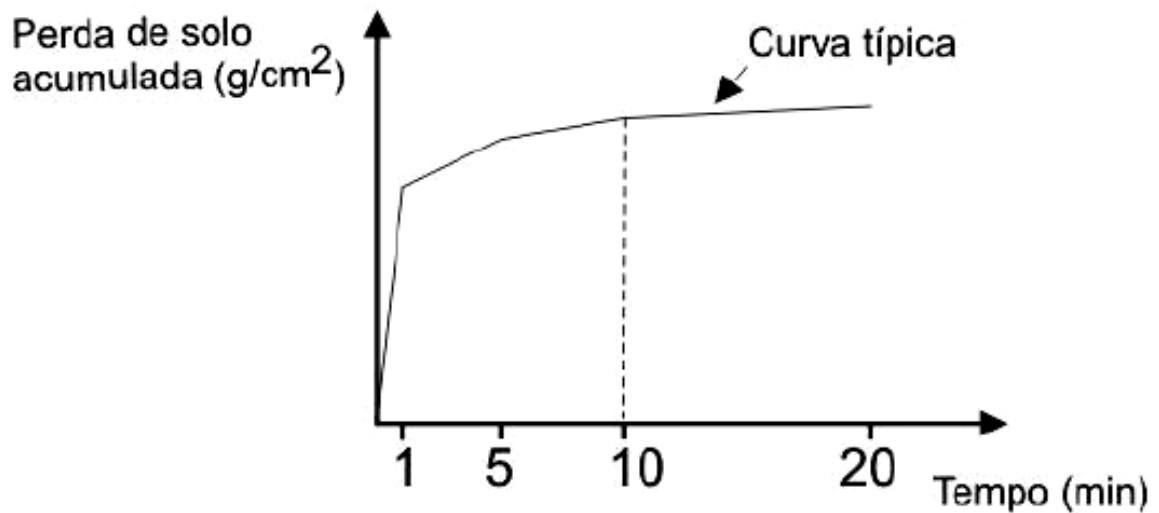


Figura 3.16 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra *versus* tempo para o ensaio Inderbitzen.
Fonte: adaptado de Bastos (1999)

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

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

Onde:

γ = peso específico da água (N/cm³)
 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 (cm³/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 (τh) para combinações de vazão (Q) e inclinação de rampa (i) são apresentados na Tabela 3.2, conforme Bastos (1999).

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

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

Fonte: Bastos (1999)

O gráfico formado entre os dados da τh *versus* perda de solo (g/cm²/min) resultou no ajustamento de uma reta onde foram estimados os seguintes parâmetros de erodibilidade: a taxa de erodibilidade, K (g/cm²/min/Pa), representa pelo gradiente da perda de solo em relação as tensões hidráulicas aplicadas, e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τh crit (Pa), representando a

mínima tensão hidráulica causada pela lâmina d'água sobre o solo, que resulta na perda de solo inicial (Figura 3.17).

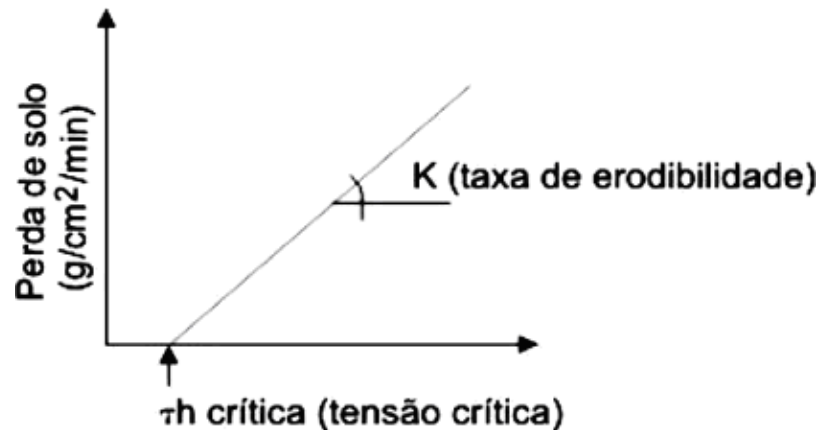


Figura 3.17 – Ajustamento da reta onde são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τ_h crit. Fonte: Bastos (1999)

3.4 Abordagem geotécnica para previsão da erodibilidade de solos residuais não saturados proposta por Bastos (1999)

Nesta etapa do trabalho, foram realizadas as análises dos resultados segundo a abordagem geotécnica para previsão da erodibilidade proposta por Bastos (1999) em sua Tese de Doutorado, verificando se os resultados deste trabalho se enquadram nesta proposta, através dos parâmetros físicos e geomecânicos frente à erodibilidade relativa. Cada um dos parâmetros propostos nos critérios de erodibilidade foram individualmente relacionados à erodibilidade observada em campo e àquela medida em laboratório pelos ensaios de Inderbitzen.

A proposta consiste: (a) levantamento de dados preliminares; (b) investigação in situ do comportamento dos solos frente a erosão através da descrição dos processos erosivos nas camadas/horizontes dos solos em estudo; (c) avaliação direta e indireta da erodibilidade.

Na avaliação direta da erodibilidade, através dos ensaios de Inderbitzen, o critério pela taxa de erodibilidade K é:

$$- K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa} - \text{solos de baixa erodibilidade}$$

- $0,001 < K < 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ – solos de mediana erodibilidade
- $K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ – solos de alta erodibilidade

Na avaliação indireta da erodibilidade, através dos ensaios de desagregação o critério é:

- solos que desagregam em água são potencialmente erodíveis.

Na realização de ensaios de caracterização – granulometria com e sem defloculante e limites de Atterberg, ensaios da metodologia MCT e de ensaios cisalhamento direto, o critério utilizado neste trabalho, proposto por Bastos (1999), está exposto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Critérios propostos por Bastos (1999), nos ensaios de caracterização, metodologia MCT e cisalhamento direto

Critérios propostos	Solo potencialmente erodíveis
% Pp,200	< 55 %
IP	< 10 %
RD	> 50 %
KUSLE	> 0,20
pi/s	> 52
Δc	> 85 %

% Pp,200= Porcentagem passante na peneira 200

IP= Índice de Plasticidade

RD= Razão de Dispersão

KUSLE= Coeficiente de erodibilidade da equação Universal de Perda de solo

Pi/s= Relação entre a perda de massa por imersão e o coeficiente de sorção

Δc = Variação da coesão

4 ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo será apresentada a caracterização regional da microbacia do Arroio Sarandi, onde está inserida a voçoroca do Buraco Fundo, objeto desse estudo. A voçoroca está localizada na comunidade de Alto das Palmeiras/Santa Maria que recebeu a denominação de “Buraco Fundo” pelos moradores da região.

Essa feição erosiva encontra-se entre as coordenadas $29^{\circ} 45' 57''$ e $29^{\circ} 46' 02''$ de latitude sul; $54^{\circ} 00' 35''$ e $54^{\circ} 00' 27''$ de longitude oeste, na margem direita do arroio Sarandi (Figura 4.1). Apresenta aproximadamente 300 m de extensão, 180 m de largura e 10 m de profundidade junto à sua cabeceira. Segundo os moradores da região o processo erosivo, nos últimos 30 anos avançou aproximadamente 40 m em direção a sua cabeceira. A Figura 4.2 mostra a localização da Voçoroca do Buraco Fundo na microbacia do Arroio Sarandi.

A região onde está inserida a voçoroca faz parte da província geomorfológica denominada Depressão Periférica com formas de relevo predominante de coxilhas suaves e alongadas (Figura 4.3), aparecendo tanto em conjunto como isoladamente. Segundo (Werlang, 2004), a Depressão Periférica Sul-Riograndense possui como característica geral a presença de formas de topos convexos, convexos-côncavos, côncavos-convexos ou planos. Em determinadas áreas aparecem colinas e encostas, onde podem ocorrer processos erosivos de ordem natural ou acelerada.

Essa região apresenta um clima Subtropical, onde as temperaturas médias anuais são em torno de 22°C , ocorrendo grandes oscilações térmicas ao longo do ano, pela presença de estações. Os índices pluviométricos variam entre 1500 mm e 1900 mm. Conforme Köppen, esse de tipo de clima é classificado como mesotérmico brando (Cfa).

A geologia corresponde à Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas, segundo Maciel Filho (1997), que é composta de arenitos que variam desde finos até conglomeráticos, moderadamente selecionados, organizados em sets com estratificações cruzadas acanaladas e planares de pequeno a médio porte. De forma subordinada ocorrem siltitos e pelitos, avermelhados, dispostos em camadas lenticulares com uma restrita extensão lateral (SCHERER, 1998 *apud* HOLZ e DEROS, 2000).

Em relação a vegetação, vê-se mata ciliar na margem da maioria dos cursos de água e planícies aluviais, herbáceas e arbustos que cobrem quase que totalmente os campos e coxilhas da região.

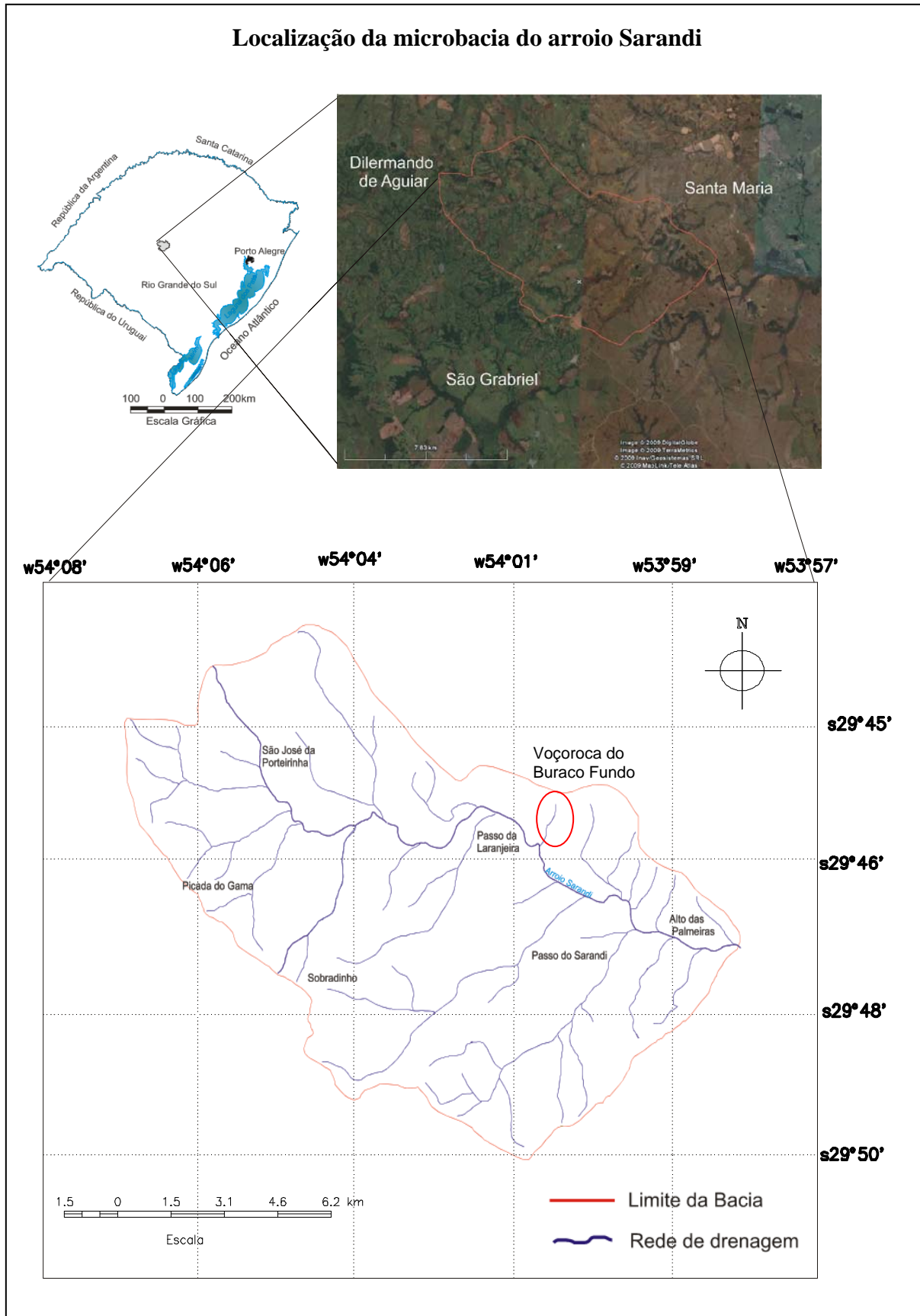


Figura 4.1 - Localização geográfica da microbacia do Arroio Sarandi. A imagem de satélite pertence ao software Google Earth (versão 5.0/2009). O mapa de localização foi elaborado a partir do software Spring (4.0). Fonte: Ávila (2009)

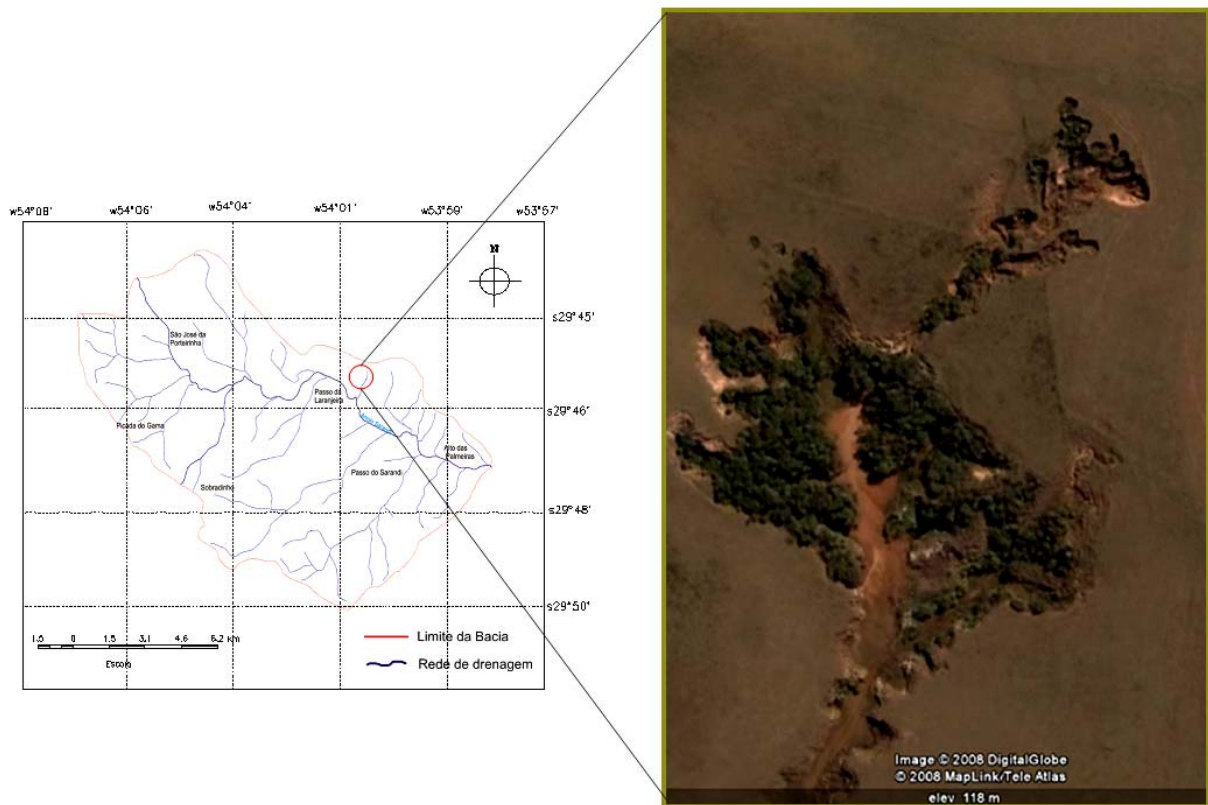


Figura 4.2 – Localização da Voçoroca do Buraco Fundo na microbacia do Arroio Sarandi. Imagem Google Earth (versão 5.0/2009). Fonte: Ávila (2009)



Figura 4.3 - Relevo de coxilhas suaves e alongadas no primeiro plano. Em segundo plano uma vertente com declive mais acentuado. Fonte: Ávila (2009)

Predominam argissolos, caracterizados pela ocorrência de um horizonte A seguido por um horizonte E ou B. O horizonte B, chamado de horizonte B textural (Bt), recebe esse nome devido ao teor de argila tornando a textura desse horizonte mais argilosa do que a do horizonte imediatamente acima.

Em relação ao uso e ocupação da área de entorno da voçoroca predominam a agricultura de subsistência com plantio de milho, mandioca, e cana-de-açúcar além da pecuária de bovinos e ovinos (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Pecuária extensiva na área de entorno da voçoroca. Fonte: Ávila (2009)

Na área de entorno da voçoroca e mesmo associadas a ela ocorrem inúmeras depressões do tipo dolinas e uvalas na meia encosta em superfícies quase horizontalizadas. As dolinas e uvalas são feições típicas de relevos cársticos (rochas calcárias), porém podem ocorrer em rochas não calcárias, como por exemplo, rochas sedimentares e vulcânicas (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Dolina presente na área de estudo. Fonte: Ávila (2009)

Ambientes com presença de dolinas e uvalas são frágeis devido à solubilidade da rocha, apresentando susceptibilidade a processos erosivos, bem como vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos, pois estas auxiliam na alimentação dos aquíferos subterrâneos.

Dolinas são depressões arredondadas ou alongadas. A coalescência de duas ou mais dolinas gera uma uvala. Estas, portanto, cobrem uma área maior e permitem ver as formas arredondadas das dolinas coalescentes (Figura 4.6).

A água acumulada nessas depressões pode evaporar, fluir pelos desaguadouros quando do transbordamento ou infiltrar. A infiltração é lenta e por isso é comum ocorrer o transbordamento em épocas de chuva, fato este que acelera a erosão nestes locais.

A forma circular das dolinas permite, em períodos de chuva intensa, que estas sejam preenchidas por água. Segundo Ávila (2009), uma prática comum na região, é utilizar as dolinas para armazenamento de água para dessedentação de animais construindo um barramento (taipa no linguajar da região) nas suas porções mais baixas. Estes barramentos segundo a autora, não possuem vertedouro o que em períodos de chuva podem romper e acelerar o processo erosivo.

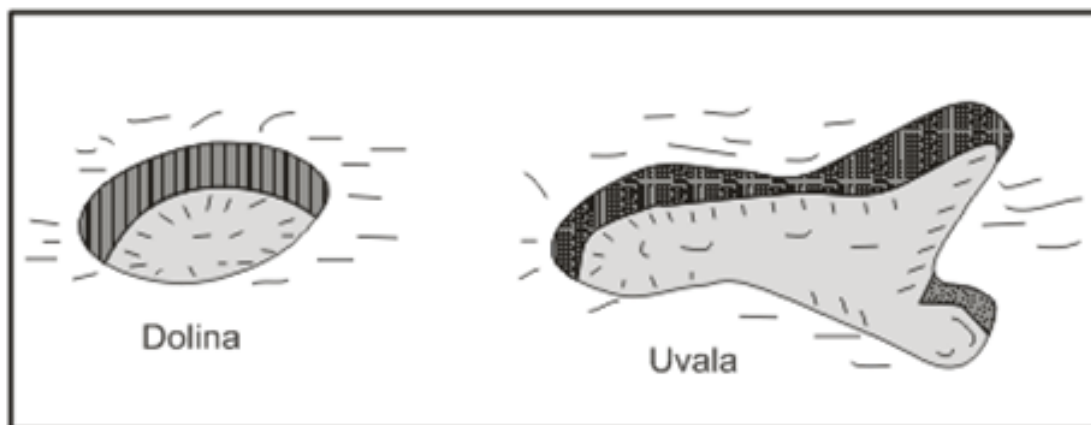


Figura 4.6 – Representação de dolinas e uvalas. Fonte: Bigarella (2003)

A voçoroca do Buraco Fundo está inserida numa área de relevo suave com declividade de aproximadamente 15° , onde a cota de altitude de sua cabeceira é de 142 m (ÁVILA, 2009). Segundo a autora, a forma da vertente onde está a voçoroca é convexo-côncava sendo que sua cabeceira está localizada na parte convexa e sua porção intermediária na parte côncava.

Pode-se observar em campo que na porção convexa, o avanço do processo erosivo se dá por escorregamentos circulares. Já na porção côncava, a evolução se dá pela concentração das linhas de fluxo subterrâneo e superficial, onde ocorrem dolinas e uvalas.

Observando a imagem do Google Earth (Figura 4.7), que contém a área de estudo pode-se ver que a voçoroca se desenvolveu segundo uma direção preferencial relacionada às linhas de falhas com orientação preferencial $N20-30^\circ E$ correspondente às principais atitudes das estruturas geológicas encontradas na região (direções dos principais cursos d'água da região). As ramificações da voçoroca, que representam o avanço do processo erosivo, mostram-se alinhadas segundo $N35-50^\circ W$ preferencialmente e WS (variando em torno de 10°) subordinadamente. A Figura 4.8 mostra as falhas na voçoroca de São Valentim.

Na porção sudoeste da voçoroca ocorrem dolinas alinhadas segundo a direção NW. Essas formas são decorrentes de abatimentos gerados pelo fluxo subterrâneo que erodiu parte da camada de arenito da base, deixando o material superficial sem sustentação o que originou o seu colapso.

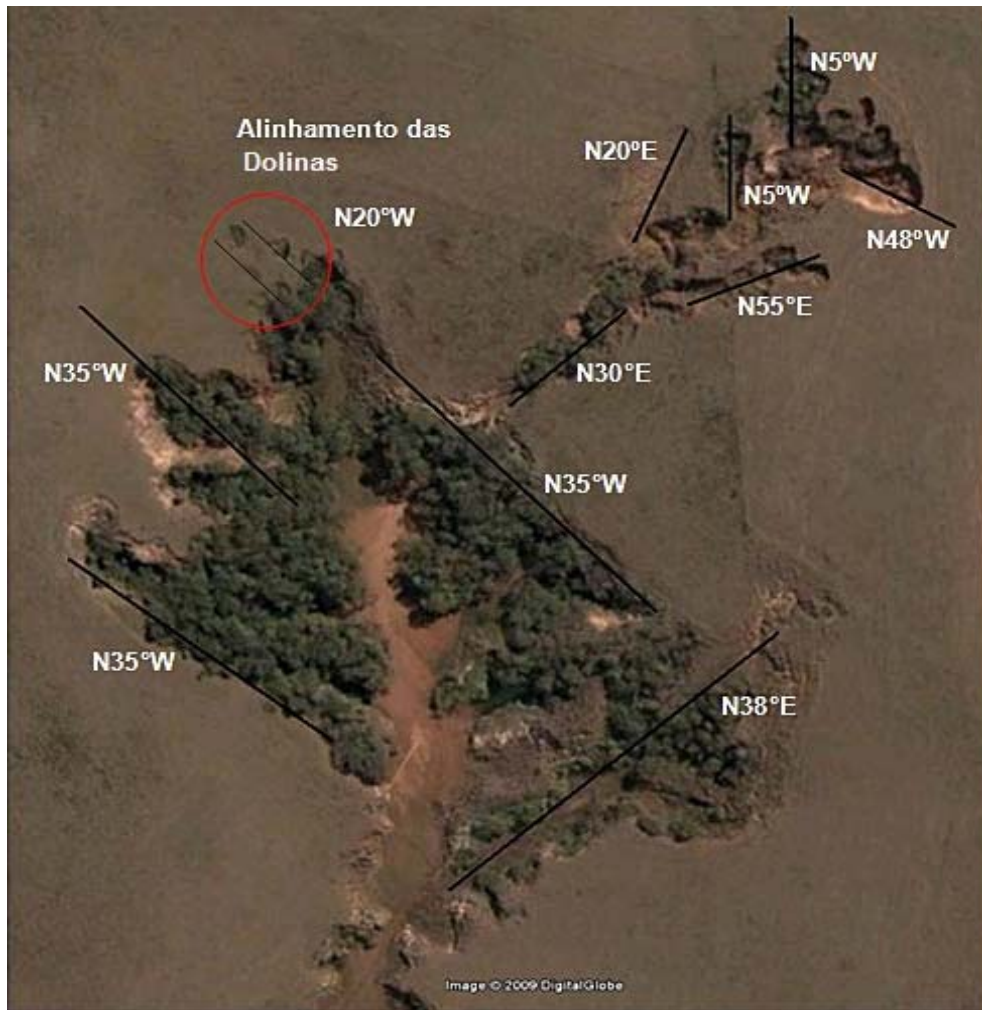


Figura 4.7 – Alinhamentos das direções de falhas na voçoroca do Buraco Fundo. Fonte: Ávila (2009)



Figura 4.8 – Falhas na voçoroca de São Valentim

As dolinas ocorrem em vertente côncava, com inclinação de aproximadamente 5° , onde o fluxo de água tanto superficial quanto subterrâneo se concentram em sua base, deixando o material superficial exposto aos agentes erosivos. É possível verificar a existência de vegetação no interior das formações circulares, devido à presença de água no seu interior.

Conforme Ávila (2009), neste local, porção sudoeste da voçoroca, desenvolveu-se uma ramificação segundo esta mesma direção relacionada à presença de três dolinas que encontram-se muito próximas. Segundo a autora, é possível perceber que a erosão superficial está carregando material terroso que separa essas feições, fazendo com haja a sua união, formando uma ravina e aumentando a incisão erosiva.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas: (a) descrição geológica de detalhe da área da voçoroca; (b) os resultados da caracterização geotécnica e de avaliação da erodibilidade das camadas estudadas (Horizonte AB pedológico, Rocha Alterada e Arenito).

A Figura 5.1 mostra o perfil II das camadas estudadas, os locais de amostragem, bem como a imagem das camadas.

O Horizonte A/B – Solo superficial com horizonte B incipiente, no perfil I estudado por Ávila (2009), o solo foi classificado pedologicamente como Argissolo. O substrato é constituído por rochas sedimentares argilosas e arenosas da Formação Passo das Tropas.

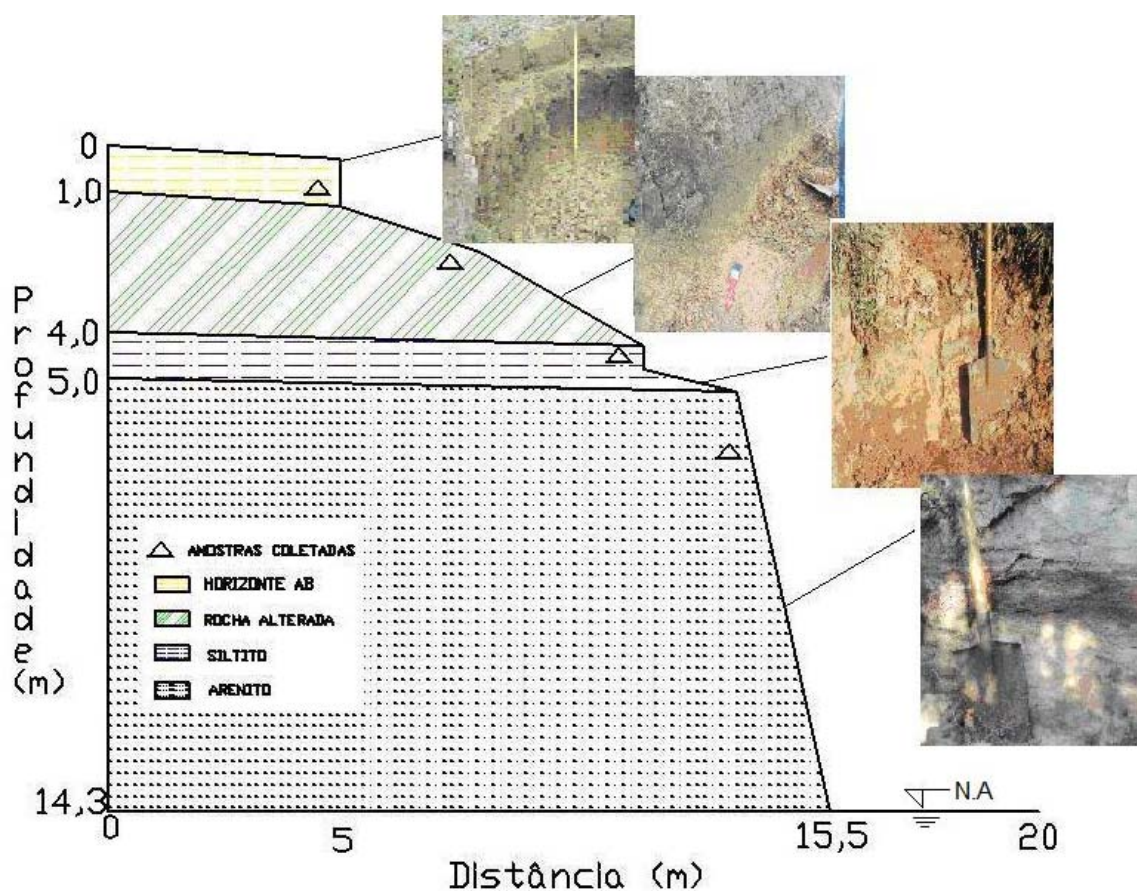


Figura 5.1- Perfil II das camadas estudadas da Voçoroca de São Valentim.

5.1 Ensaios de Caracterização e determinação dos índices físicos

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

Os ensaios de caracterização realizados foram a determinação do peso específico real dos grãos, os limites de consistência e granulometria (ABNT NBR 6459, 7180, 7181, e 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 27,3 kN/m³, consistentes com a mineralogia destas camadas. O horizonte A/B, a camada de siltito e de arenito apresentaram média a baixa plasticidade, com um limite de liquidez inferior a 40% e um índice de plasticidade entre 9 e 19%. A camada de rocha alterada (siltito alterado) apresentou-se mais plástica.

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 a proposta pela ABNT NBR 6502.

O horizonte A/B e o arenito apresentaram a menor porcentagem de finos (silte + argila) e predominam na fração grossa a areia média a fina. Texturalmente, estes horizontes/camadas foram classificados como areias argilo-siltosas. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos o horizonte A/B é um silte elástico (MH) e o arenito foi classificado como uma areia argilosa (SC).

A camada de rocha alterada e o siltito apresentaram uma porcentagem de finos superior a 70% e na fração grossa predomina areia fina. Em relação aos finos, o que difere entre estes materiais é que na rocha alterada predomina a fração argila (51%) em relação a fração silte. No siltito ocorre o inverso. Texturalmente, a rocha alterada foi classificada como uma argila silto-arenosa e o siltito como silte areno-argiloso. Adotando o Sistema Unificado de Classificação de Solos esta classificação inverteu-se, contudo, já é de conhecimento do meio geotécnico as limitações dos sistemas de classificações tradicionais, quando utilizados em solos de regiões tropicais.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de massa específica real dos grãos e limites de consistência (Perfil II)

Identificação	Amostra	γ_s (kN/m ³)	w _l (%)	w _p (%)	IP (%)
Horizonte A/B	AM01	26,36	36	27	9
	AM02	-	37	25	12
Rocha Alterada	AM03	27,74	64	35	29
Siltito	AM04	26,10	38	19	19
Arenito	AM05	26,58	34	19	15

Obs.: γ_s = peso específico real dos grãos; w_L = limite de liquidez; w_P = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade

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/B	C/D	0	30	17	15	18	20	A4	MH
	S/D	0	30	17	23	27	3	-	-
Rocha Alterada	C/D	0	2	2	17	28	51	A7-5	MH
	S/D	0	2	2	17	49	30	-	-
Siltito	C/D	0	1	2	23	48	26	A6	CL
Arenito	C/D	0	0	13	54	16	17	A2-6	SC
	S/D	0	0	12	59	29	0	-	-

Obs.: HRB = Highway Research Board; SUCS = Sistema Unificado de Classificação dos Solos
C/D = com defloculante
S/D = sem defloculante

O parâmetro grau de floculação, como seu nome indica, dá a estimativa da floculação das partículas argilosas coloidais. Quanto maior for seu valor, maior será a possibilidade de floculação das partículas argilosas. Este parâmetro pode ser determinado através da diferença da argila total e a argila natural, relacionando-a geometricamente com a argila total. A argila natural representa a fração argila determinada sem a utilização de algum elemento defloculante (capaz de provocar a individualização das partículas argilosas e siltosas por

dispersão química), apenas por dispersão em água. A argila total é a fração de argila determinada com auxílio de um elemento defloculante. A Tabela 5.2 apresenta as frações argila natural e argila total, obtidas nos ensaios granulométricos.

Ao analisar esta Tabela, pode-se verificar, que o grau de floculação para o horizonte A/B foi de 0,85, para a rocha alterada foi de 0,41 e para o arenito o valor obtido foi 1. No arenito no ensaio sem defloculante, a fração argila obtida foi zero, indicando um alto grau de floculação. Com este parâmetro, pode-se observar que a rocha alterada apresenta a maior fração de argila natural neste perfil.

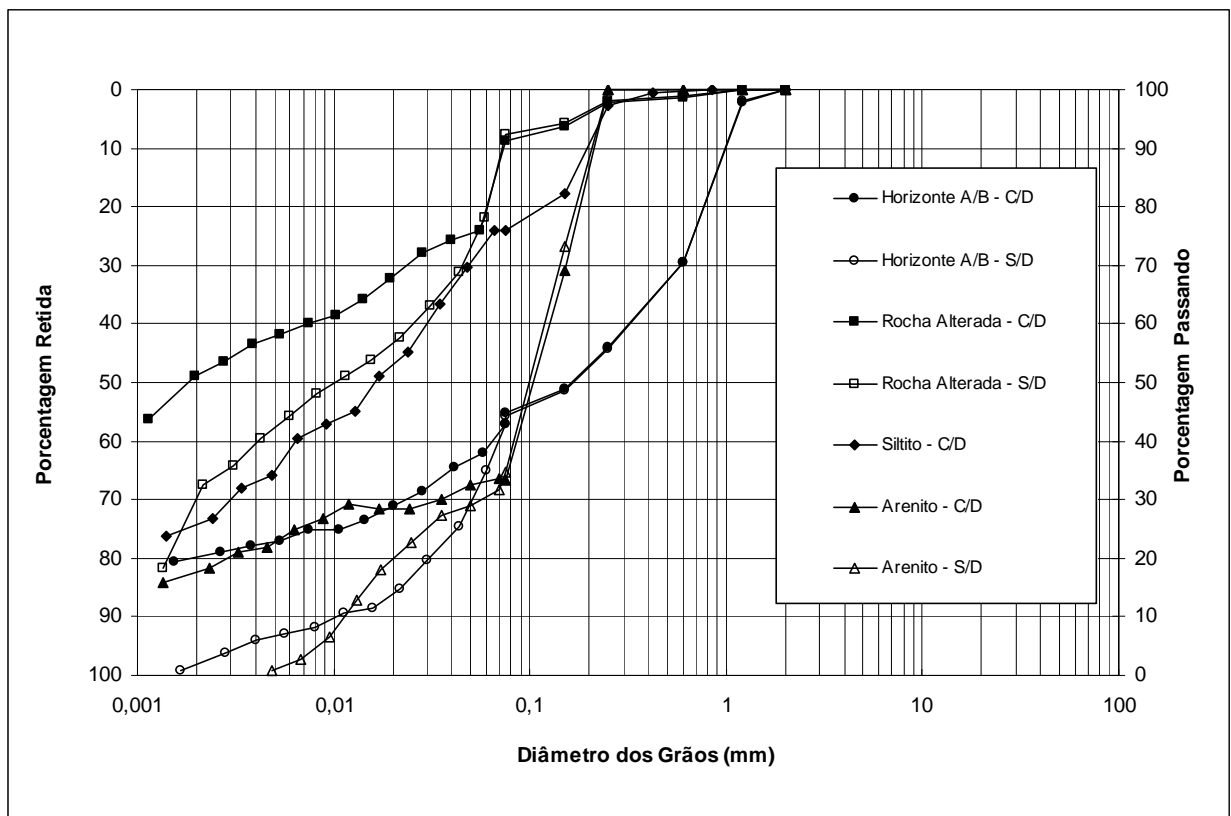


Figura 5.2 – Curvas granulométricas obtidas com e sem defloculante.

A Tabela 5.3 apresenta os índices físicos obtidos nas amostras indeformadas que foram utilizadas nos ensaios de desagregação, perda por imersão, infiltrabilidade, Inderbitzen e cisalhamento direto. Em média para os horizontes/camadas estudadas foram determinados os índices físicos em 42 corpos de prova.

Verificou-se que os maiores coeficientes de variação foram obtidos para os valores de umidade, grau de saturação e índice de vazios.

O horizonte A/B apresentou valores mais elevados do coeficiente de variação, provavelmente, por ser a camada mais superficial e a amostragem foi realizada em diferentes épocas do ano. A rocha alterada apresentou o maior índice de vazios, porosidade e grau de saturação. De acordo com o IAEG (1974), o horizonte A/B apresenta índice de vazios alto ($0,8 < e < 1$) e quanto ao grau de saturação é úmido ($25\% < S < 50\%$). A rocha alterada apresenta índice de vazios muito alto ($e > 1$) e é muito úmida ($50\% < S < 80\%$). Já o arenito apresenta um índice de vazios médio ($0,55 < e < 0,8$) e é muito úmido.

Em relação aos valores de umidade e grau de saturação estes materiais são considerados solos não saturados.

Tabela 5.3 – Propriedades índices do solo.

	Valores	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	n (%)	S (%)
	Média	13,56	15,87	14,00	0,92	46,87	39,92
Hor. A/B	Valor Máximo	37,52	19,36	18,40	1,83	64,72	75,38
	Valor Mínimo	2,89	11,22	9,3	0,44	30,22	9,03
	Desvio Padrão	5,91	1,69	1,69	0,26	6,42	13,70
	Coef. Variação	43,6	10,6	12,1	27,9	13,7	34,3
	Média	26,99	17,09	13,47	1,07	51,46	71,03
Rocha	Valor Máximo	34,00	19,00	15,40	1,64	62,15	98,92
Alterada	Valor Mínimo	21,93	13,98	10,50	0,80	44,48	50,85
	Desvio Padrão	3,06	1,20	1,10	0,17	3,63	11,17
	Coef. Variação	11,3	7,24	7,47	15,5	7,05	15,72
		Média	13,91	17,78	15,61	0,72	41,29
Arenito	Valor Máximo	20,62	19,63	18,20	1,66	62,38	78,41
	Valor Mínimo	2,30	11,58	10,00	0,46	31,51	9,06
	Desvio Padrão	5,16	1,53	1,17	0,17	4,39	21,00
	Coef. Variação	37,1	8,59	7,47	23,2	10,6	39,5

Obs.: w = teor de umidade; γ = peso específico natural; γ_d = peso específico aparente seco; e = índice de vazios, n = porosidade, S = grau de saturação

5.2 Caracterização química e mineralógica

A caracterização química é importante para se conhecer até que ponto a lixiviação e o empobrecimento químico podem ter influenciado nos processos erosivos da área degradada pelo ravinamento (LEPSCH, 2002).

A caracterização química, apresentada na Tabela 5.4, foi realizada nos horizontes/camadas do perfil em estudo pelo Laboratório do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM.

Tabela 5.4 – Análise química simplificada.

Horizontes/ Camadas	Cátions básicos		Acidez potencial			CTC	Saturação		MO	pH
	Ca	K	Mg	Al	H+Al		V	S		
			cmol _c /dm ³							
Hor. A/B	1,9	0,12	1,2	7,0	27,4	10,2	10,5	68,6	1,7	4,5
Rocha Alterada	2,9	0,42	3,8	18,0	54,5	25,1	11,5	71,7	0,9	4,6
Arenito	4,1	0,15	5,9	0,4	2,0	10,6	83,5	3,8	0,1	4,8

A saturação por bases (V) para o horizonte A/B e rocha alterada é baixa (V<35%) portanto, estes horizontes/camadas são classificadas como distróficos, sendo pouco ou muito pouco férteis e sem reservas de nutrientes para os vegetais.

O valor de saturação de base é mais elevado no arenito que constituem a base da voçoroca. A saturação por alumínio (S) para horizonte A/B e rocha alterada situa-se entre 65 e 75%, caracterizando uma quantidade de alumínio a níveis tóxicos para plantas, tratando de um solo álico (S ≥ 50%). A capacidade de troca catiônica em torno de 10 cmol_c/dm³ caracteriza uma argila de atividade baixa, para o horizonte A/B e o arenito. Para a rocha alterada o valor de CTC é típica de uma argila de atividade média a alta. A faixa do pH situou-se entre 4,5 e 4,8 (ácido).

Segundo Lafayete et al. (2005) a matéria orgânica é considerada muito importante na estabilidade dos agregados no solo, sendo um dos principais fatores controladores da hidrologia na superfície. Os valores de matéria orgânica, obtidos a partir do carbono orgânico foram baixos (MO < 3,5%), sendo o solo classificado como erodível. O horizonte A/B apresenta uma porcentagem mais elevada de matéria orgânica.

5.3 Resistência ao cisalhamento

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.

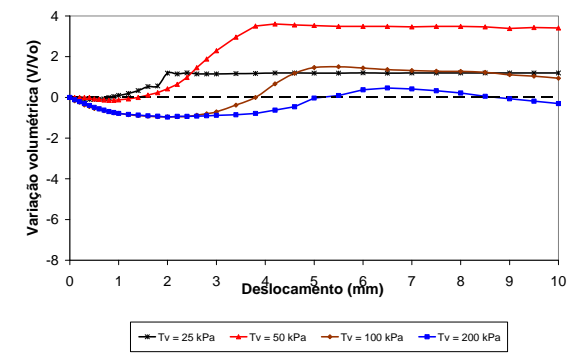
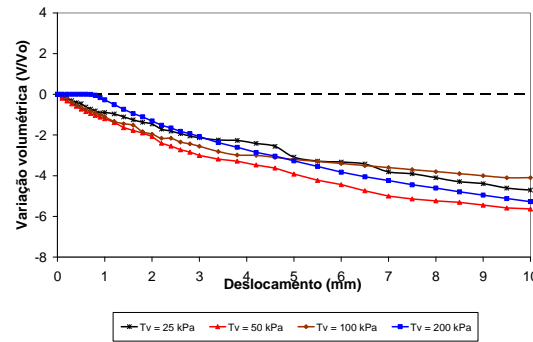
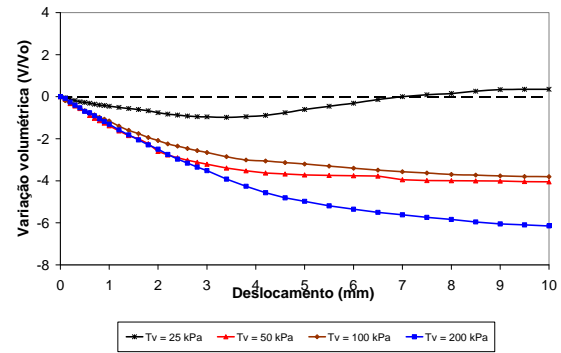
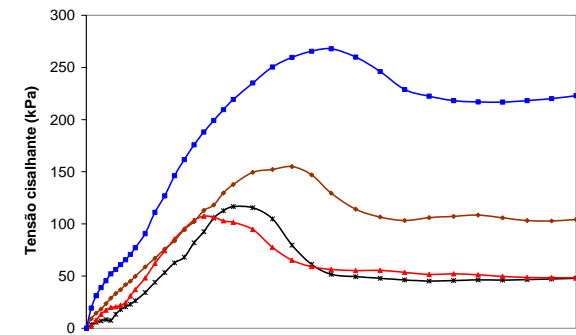
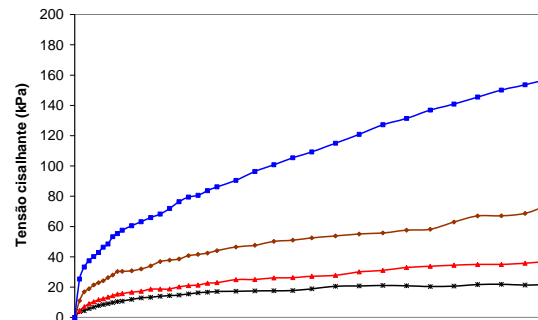
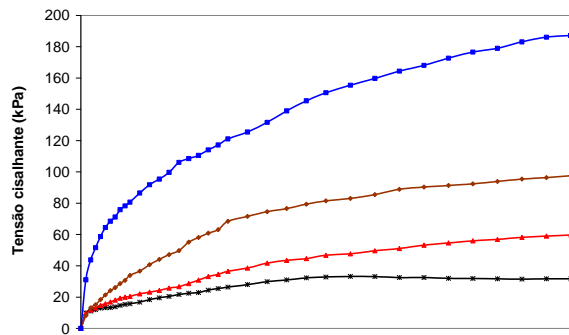
A resistência ao cisalhamento dos solos estudados foi avaliada em laboratório através de ensaios de cisalhamento direto convencionais na condição de umidade natural, inundadas e secas ao ar.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 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) nas amostras do horizonte A/B e da rocha alterada as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento apresentam um leve pico para as tensões inferiores a 50 kPa com uma variação volumétrica inicial de compressão que decresce e tende a um pequeno aumento de volume (dilatância). Para estes dois materiais quando inundados estas tendências não ocorrem, verificando-se a influência da saturação no processo de ruptura. Nas amostras ensaiadas no arenito as curvas de tensão cisalhante apresentaram picos bem nítidos para todos os níveis de tensão.

Nos ensaios realizados nas amostras secas ao ar as curvas tensão cisalhante por deslocamento apresentam picos nítidos para todas as tensões normais aplicadas e uma tendência de aumento de volume durante o ensaio. Na rocha alterada, ocorreu uma retração dos corpos de prova que ocasionou o tipo de curva apresentada na Figura 5.4.

A Tabela 5.5 apresenta o resumo dos ensaios de cisalhamento direto com os valores do intercepto coesivo (coesão) e ângulo de atrito interno do solo. A Figura 5.8 apresenta as envoltórias de ruptura obtidas nestes ensaios.

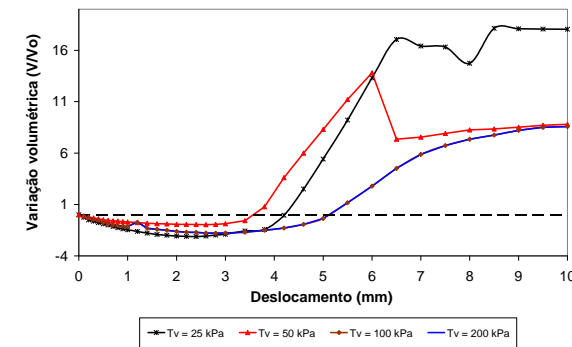
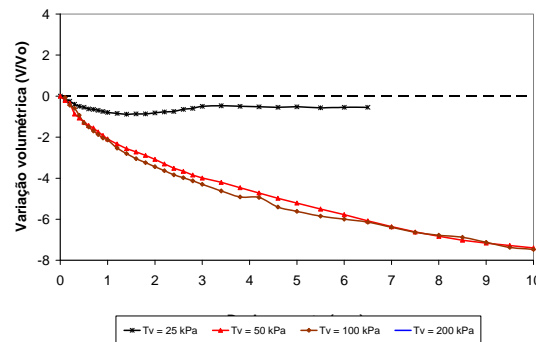
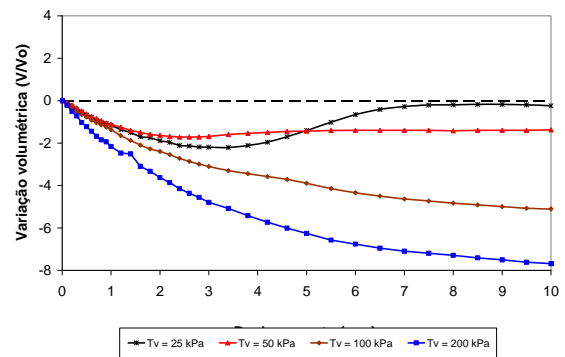
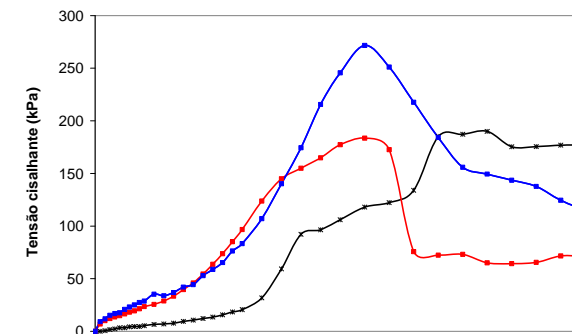
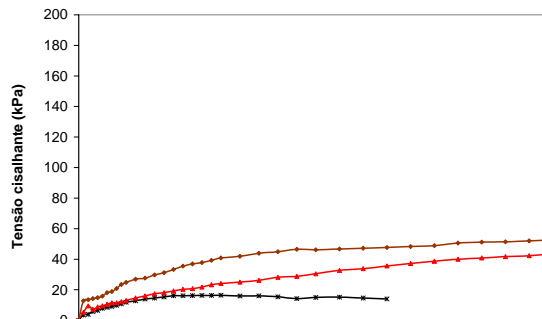
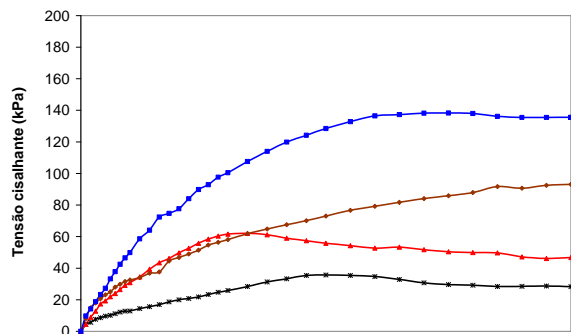


(a) Natural

(b) Inundado

(c) Seco ao ar

Figura 5.3 – Curvas tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para as amostras do Horizonte A/B.

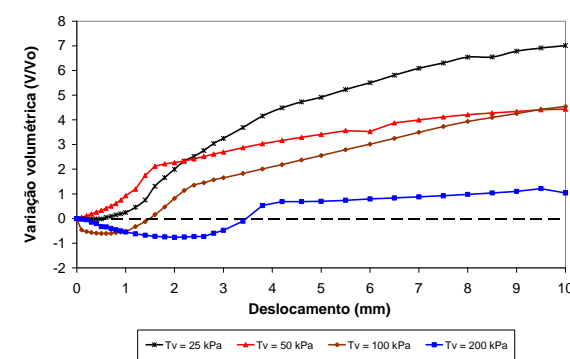
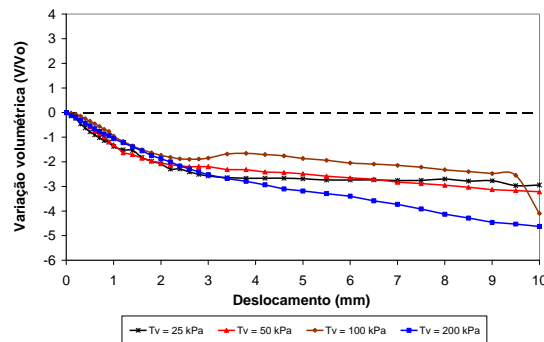
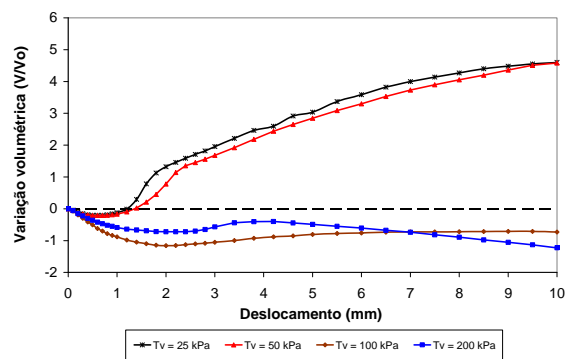
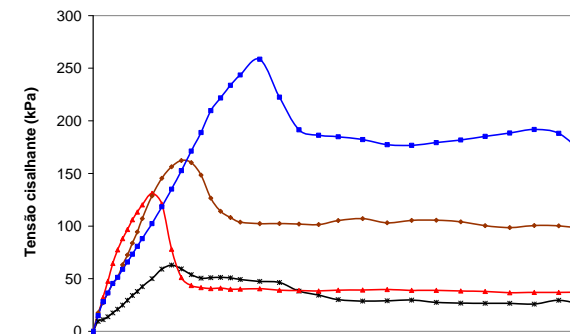
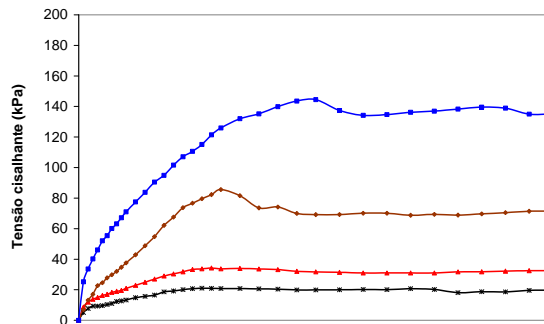
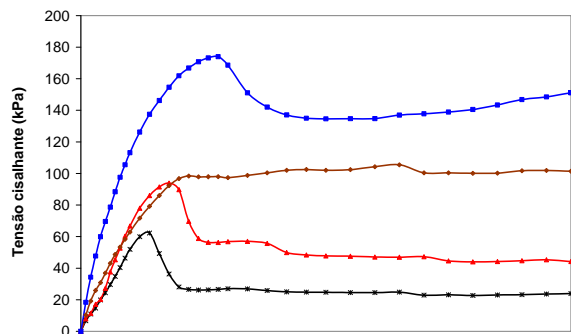


(a) Natural

(b) Inundado

(c) Seco ao ar

Figura 5.4 – Curvas tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para as amostras da Rocha Alterada.



(a) Natural

(b) Inundado

(c) Seco ao ar

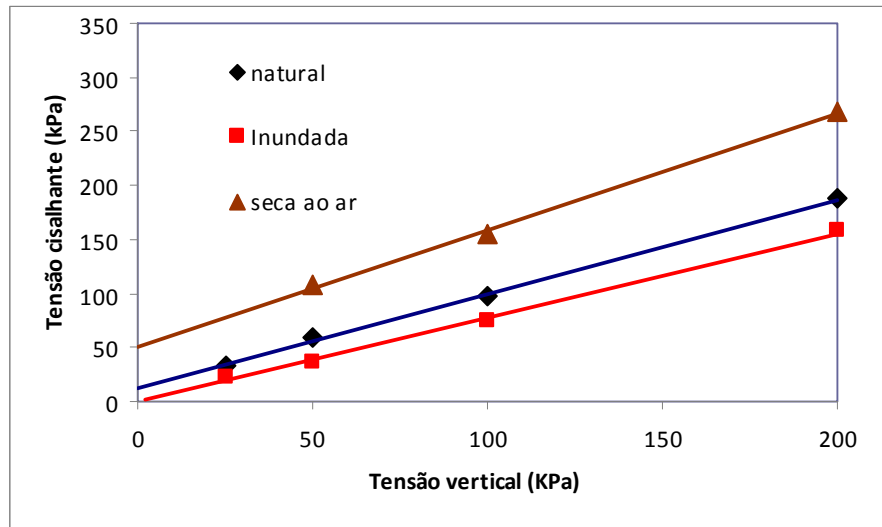
Figura 5.5 – Curvas tensão cisalhante por deslocamento e variação volumétrica por deslocamento para as amostras do Arenito.

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 torna-se somente devido ao atrito entre as partículas. No ensaio com corpos de prova secos ao ar (no mínimo de 72h) as tensões cisalhantes tiveram um aumento significativo, resultando em elevados valores de coesão e atrito.

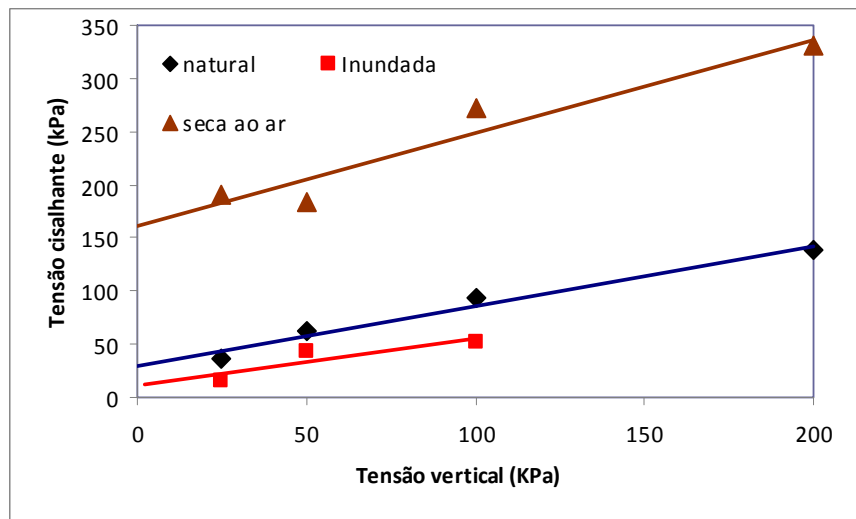
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto na umidade natural, inundado e seco ao ar.

Solo/Rocha	Tensão vertical (kPa)	Tensão de Cisalhamento		
		Natural	Inundado	Seco ao ar
Horizonte A/B	25	33,2	21,9	116,6
	50	59,7	37,1	107,4
	100	97,6	74,4	155,0
	200	187,2	157,6	267,8
	<i>c (KPa)</i>	<i>13,0</i>	<i>0</i>	<i>74,5</i>
	<i>φ</i>	<i>40,9</i>	<i>37,9</i>	<i>42,9</i>
Rocha Alterada	25	35,7	16,4	190,0
	50	62,1	43,6	183,6
	100	93,1	52,7	271,7
	200	138,3	-	330,5
	<i>c (KPa)</i>	<i>29,6</i>	<i>11,9</i>	<i>161,9</i>
	<i>φ</i>	<i>29,3</i>	<i>23,8</i>	<i>41,8</i>
Arenito	25	62,3	21,0	62,9
	50	93,9	34,2	131,1
	100	105,5	85,6	162,3
	200	174	144,5	258,6
	<i>c (KPa)</i>	<i>52,8</i>	<i>3,8</i>	<i>57,6</i>
	<i>φ</i>	<i>30,9</i>	<i>35,7</i>	<i>45,7</i>

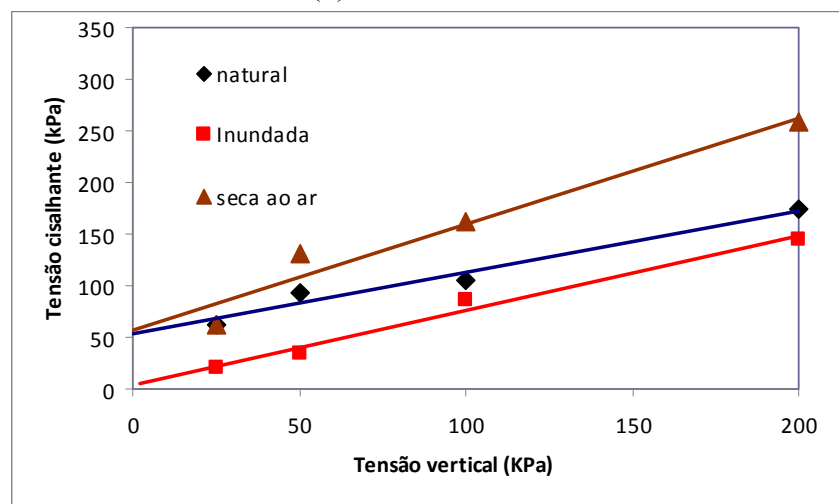
Obs.: *c* = intercepto coesivo; *φ* = ângulo de atrito interno do solo.



(a) Horizonte A/B



(b) Rocha Alterada



(c) Arenito

Figura 5.6 – Envoltórias de ruptura ao cisalhamento para os ensaios realizados na umidade natural, inundada e seca ao ar.

5.4 Avaliação Indireta da Erodibilidade

A avaliação indireta da erodibilidade foi realizada com base em materiais e métodos descritos na literatura e apresentados em parte na revisão de literatura e na metodologia deste trabalho (Capítulos 2 e 3).

Os métodos e critérios empregados neste trabalho para avaliação indireta da erodibilidade dos horizontes/camadas do perfil II da voçoroca Buraco Fundo são:

- Estimativa do fator erodibilidade (K) da Equação Universal de Perda do Solo (USLE);
- Avaliação do potencial de desagregação dos solos;
- Critérios de erodibilidade baseados na Metodologia MCT.

5.4.1 Estimativa do fator erodibilidade da 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 os valores de matéria orgânica foram determinados 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 5.2 e Figura 5.4) e a estrutura e a permeabilidade foram obtidos no perfil em estudo. A estrutura foi avaliada segundo as especificações de Lemos e Santos (1982) e os coeficientes de permeabilidade foram obtidos em ensaios *in situ* com a técnica do piezômetro e estimados no ensaio de infiltrabilidade. A Tabela 5.6 apresenta a estimativa do K_{USLE} ((t/ha/(t.m/ha.mm/hora))) para os horizontes/camadas do perfil estudado.

O solo do horizonte A/B e da rocha alterada, o fator K_{USLE} situou-se entre 0,20 e 0,30, sendo classificado como de média erodibilidade (CARVALHO, 1994). No siltito e no arenito este parâmetro situou-se entre 0,30 e 0,54, caracterizando um material de média a alta erodibilidade.

Tabela 5.6 – 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/B	26	20	1,7	4	2 ^(I)	0,230	média
Rocha alterada	41	51	0,9	4	2 ^(II)	0,236	média
					3 ^(III)	0,270	média
Siltito	52	26	-	4	4 ^(IV)	0,534	alta
Arenito	25	17	0,1	4	3 ^(V)	0,290	média
					4 ^(VI)	0,324	alta

^(I) Classe 2 – permeabilidade alta; Ensaio in situ $k = 1,4 \times 10^{-3}$ cm/s

^(II) Classe 2 – permeabilidade alta - Ensaio in situ $k = 1,08 \times 10^{-3}$ cm/s

^(III) Classe 3 – permeabilidade moderada estimada no ensaio de infiltrabilidade (Figura 5.9b)

^(IV) Classe 4 – permeabilidade baixa a moderada estimada por ensaios em materiais semelhantes na região de Santa Maria

^(V) Classe 3 – permeabilidade moderada estimada no ensaio de infiltrabilidade (Figura 5.10b)

^(VI) Classe 3 a 4 – permeabilidade moderada, baixa a moderada no ensaio in situ $k = 1,48 \times 10^{-4}$ a $9,14 \times 10^{-5}$ cm/s

5.4.2 Avaliação do potencial de desagregação dos solos

O ensaio de desagregação apresenta uma análise qualitativa da erodibilidade do solo, utilizaram-se amostras indeformadas sob as condições de umidade natural e seca ao ar por no mínimo 72 horas.

Na avaliação do comportamento das amostras a inundação ocorreu de maneira visual, analisando o comportamento da amostra frente à ascensão capilar, como: a) o abatimento e inchamento da amostra; b) velocidade de desagregação; c) formação de fissuras no topo e d) rupturas nas bordas da amostra.

A Tabela 5.7 apresenta a descrição do comportamento das amostras nas duas condições de umidade. Os ensaios no horizonte A/B e no arenito foram realizados por Ávila (2009).

A amostra do horizonte A/B, independente da sua condição de umidade, mostrou praticamente intacto ao final do ensaio, mostrando-se muito resistente frente à inundação, conforme Figura 5.7 (a). Este comportamento é devido a presença de matéria orgânica, raízes e óxido de ferro que tendem a estabilizar os agregados.

Apesar da textura arenosa, a presença de matéria orgânica (1,7%), raízes, e óxido de ferro e uma porcentagem significativa de argila (20%) foram decisivas para que as amostras não desagregassem com a inundação completa.

Tabela 5.7 - Comportamento das amostras no ensaio de desagregação

CAMADA	CONDIÇÃO	COMPORTAMENTO
Horiz. Superficial A/B	<i>Umidade natural</i>	Ascensão capilar completa aos 16 minutos do início do ensaio, praticamente não houve desagregação e abatimento; sem inchamento e sem rupturas nas bordas nem fissuração no topo, permanecendo nestas condições até o término do ensaio (24 h).
	<i>Seca ao ar</i>	Rápida ascensão capilar, porém mais lenta em relação à condição de umidade natural, somente após decorrida uma hora do ensaio, a ascensão atingiu o topo da amostra, não havendo desagregação ou abatimento, permanecendo nestas condições até o término do ensaio (24 h).
Rocha Alterada	<i>Umidade natural</i>	Ascensão capilar completa aos 26 minutos do início do ensaio, após 1 hora do início do ensaio, a amostra começou a desagregar. Ao término do ensaio, a amostra não desintegrou completamente, somente nas bordas.
	<i>Seca ao ar</i>	Ascensão capilar completa aos 11 minutos do início do ensaio, houve inchamento da amostra. Aos 46 minutos de ensaio, a amostra desintegrou consideravelmente, porém ao término do ensaio, a amostra não desintegrou completamente, somente as bordas, mas bem mais intenso do que na amostra natural.
Arenito	<i>Umidade natural</i>	Rápida ascensão capilar, desagregação rápida devido à liquefação do material. Formação de rachaduras e fissuras no topo. Não houve inchamento da amostra. Amostra encontrou-se parcialmente desestruturada ao término do ensaio (24 h).
	<i>Seca ao ar</i>	Ascensão capilar pouco mais lenta em relação à amostra em condição natural de umidade. Alta velocidade de desagregação, devido à liquefação do material. Formação de trincas, rupturas nas bordas e fissuras no topo. Nenhum inchamento. Amostra encontrou-se totalmente desestruturada ao término do ensaio (24 h).

Vários autores descrevem a importância da matéria orgânica na formação e estabilização dos agregados, base essencial, juntamente com os poros, na formação da estrutura do solo, enquanto as raízes ajudam a agregar o solo, dando-lhe sustentação mecânica.

Quanto à presença de concreções ferruginosas, estudos verificaram que o teor de óxidos de ferro, refletido na cor dos solos, influencia características e propriedades que governam o balanço da coesão entre agregados e permeabilidade, condicionador do comportamento do solo frente ao processo erosivo (ÁVILA, 2009).

A rocha alterada demonstrou-se resistente frente à inundação, não tanto quanto o Horizonte A/B, havendo desagregação nas bordas da amostra em ambas as condições de umidade, porém, mais intenso na condição seca ao ar.

Na camada de rocha alterada predomina a fração argila (51%), a qual foi decisiva para que ao término do ensaio (inundação completa), a amostra não desagregasse totalmente. Essa camada durante o processo desagregou mais que no horizonte A/B, mas com menor intensidade que na camada de arenito

Segundo Ávila (2009), no entanto, o mesmo comportamento não é verificado para o arenito. As amostras demonstraram intenso processo de desagregação, onde as partículas foram sendo desprendidas facilmente já nos primeiros estágios do ensaio, tendo sua estrutura totalmente desagregada sob ação da inundação completa, após 24 horas imersão (Figura 5.7b).

Constatou-se que as condições de umidade exerceram certa influência na desagregação do material amostrado. É possível verificar que a amostra sob a condição de umidade natural permaneceu parcialmente estruturada, enquanto que a amostra seca ao ar (durante 72 horas) sofreu desagregação total.

O processo de ruína das amostras de arenito pode estar associado à frente de avanço capilar que expulsa o ar preso nos poros, causando a desestruturação do material, ou seja, a desagregação da amostra pode ser atribuída aos mecanismos de hidratação e desaeração que geram poropressões positivas capazes de desprender individualmente suas partículas. Este processo foi descrito por Camapum de Carvalho et al. (2006b).

Por apresentar baixa cimentação, o arenito não mantém suas partículas agrupadas sob a ação do nível de água ascendente, ocorrendo sua desagregação. Esse comportamento pode ser verificado em campo: o material saturado seja pelas fortes chuvas ou pela ascensão do lençol freático, tende a desagregar-se. Os materiais desagregáveis em água possuem maior facilidade de serem carregados pelo escoamento superficial uma vez que suas partículas estão

individualizadas. Comportamento este muito similar para as camadas arenosas da voçoroca da Fazenda Taquari em São Francisco de Assis estudado por Tatto (2007).

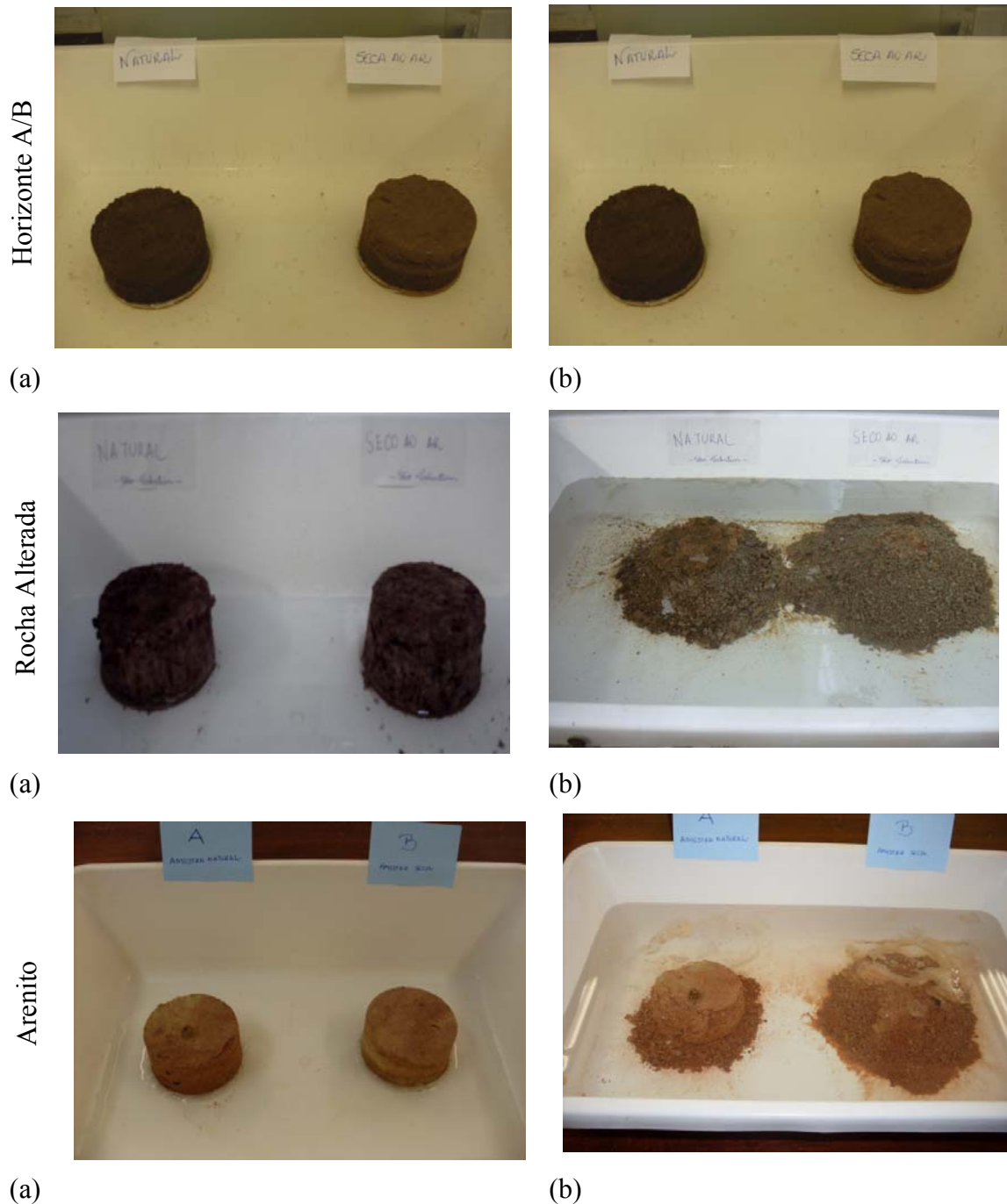


Figura 5.7 - Ensaio de desagregação para o Horizonte A/B, Rocha Alterada e Arenito, respectivamente. (a) fase inicial do ensaio com água na base das amostras. (b) as amostras ao final do ensaio, após 24 de imersão

5.4.3 Critérios de erodibilidade baseados na Metodologia MCT

Os critérios de erodibilidade baseados na Metodologia MCT propostos inicialmente por Nogami e Villibor (1979) são apresentados no item 2.5.3. 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). Especificamente, os ensaios para avaliação da susceptibilidade à erosão hídrica foram utilizados neste trabalho. Os ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica propostos pelo critério são especificados no item 2.5.3. Trabalhos mais recentes a cerca deste assunto estão apresentados em Nogami e Villibor (1985), Cozzolino e Nogami (1993) e Villibor e Nogami (2009).

As Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados dos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, através do coeficiente de sorção (s) e da perda por imersão (π), respectivamente. Outros autores denominam o coeficiente de sorção de índice de absorção de água (MENEZES E PEJON, 2010). Segundo Bastos (1999) 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.

Os ensaios foram conduzidos, adotando a mesma metodologia de Bastos (1999), a três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, seca ao ar e pré-umedecidas. Nogami e Villilbor (1979) consideram solos erodíveis quando a relação π/s é superior a 52; ou quando a relação $E = 52.(s/\pi)$, segundo Menezes e Pejon (2010), for inferior a 1 ($E < 1$). Pejon (1992 apud BASTOS, 1999) propõe 40, como valor limite para esta relação.

As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam as curvas médias (3 amostras) do volume de água infiltrada (cm^3/cm^2) pelo raiz quadrado do tempo e a velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s). Burgos e Vilar (2005) propõem que nas curvas velocidade de infiltração pelo tempo podem fornecer uma estimativa da permeabilidade saturada dos solos. Nestas Figuras foram colocados os resultados dos ensaios de permeabilidade *in situ* com a técnica do piezômetro, 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.

A Figura 5.11 apresenta a aplicação destes dois critérios aos materiais estudados.

Tabela 5.8 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do Horizonte A/B – critério de erodibilidade da Metodologia MCT

Hor. A/B	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,287	0,60	2,1	0,307	8,16	26,6	0,002	1,45	725
2	0,208	0,83	4,0	0,222	0,23	1,04	0,002	0,63	315
3	0,226	0,63	2,8	0,247	0,14	0,57	0,007	0,74	105
Média	0,248	0,69	2,9	0,265	2,84	9,40	0,004	0,94	382

Tabela 5.9 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras da Rocha Alterada – critério de erodibilidade da Metodologia MCT

Rocha alterada	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,096	3,34	34,8	0,483	18,99	39,3	0,002	1,43	715
2	0,300	6,77	22,6	0,393	44,13	112,3	0,004	3,04	760
3	0,101	1,41	14,0	0,485	14,80	30,5	0,003	4,42	1473
Média	0,166	3,84	23,8	0,454	26,0	60,7	0,003	2,96	983

Tabela 5.10 – Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do Arenito – critério de erodibilidade da Metodologia MCT

Arenito	Umidade natural (wnat)			Seca ao ar (sa)			Pré-umedecida (pu)		
	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s	s (cm/min ^{1/2})	pi (%)	pi/s
1	0,049	5,28	108	0,032	54,6	1706	0,0005	4,3	8600
2	0,050	69,1	1382	0,049	67,2	1371	0,0009	66,8	74222
3	0,075	66,5	887	0,039	43,6	1118	0,0009	24,1	26778
Média	0,058	47,0	792	0,040	55,1	1398	0,0008	31,7	36533

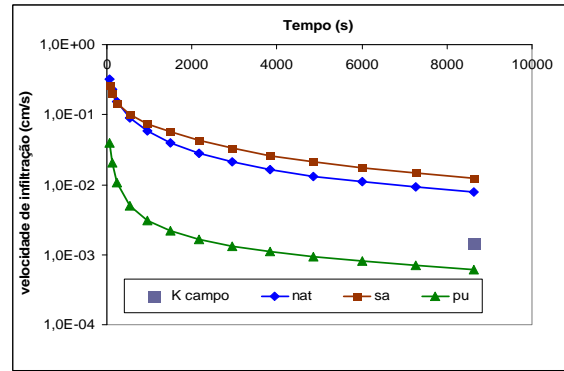
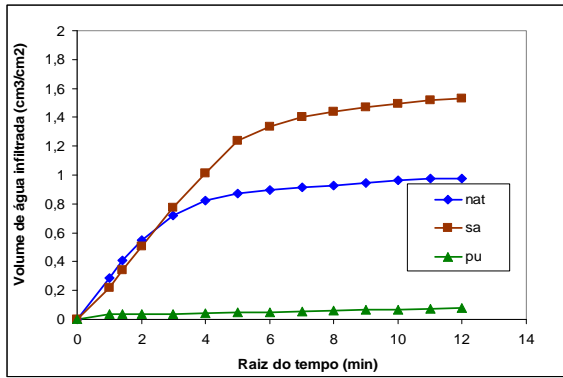


Figura 5.8 – (a) volume de água infiltrada (cm³/cm²) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do Horizonte A/B.

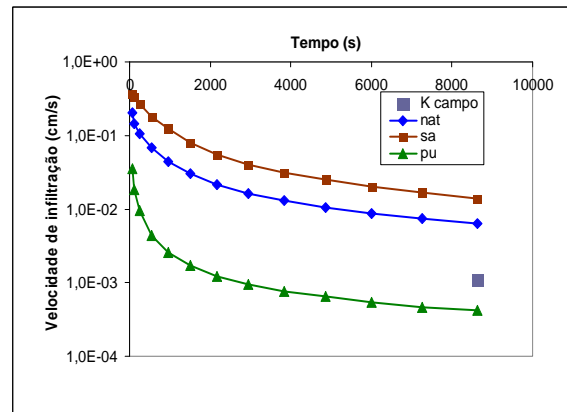
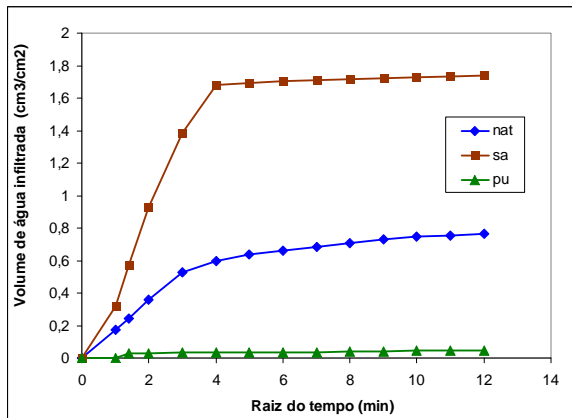


Figura 5.9 – (a) volume de água infiltrada (cm³/cm²) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras da Rocha Alterada.

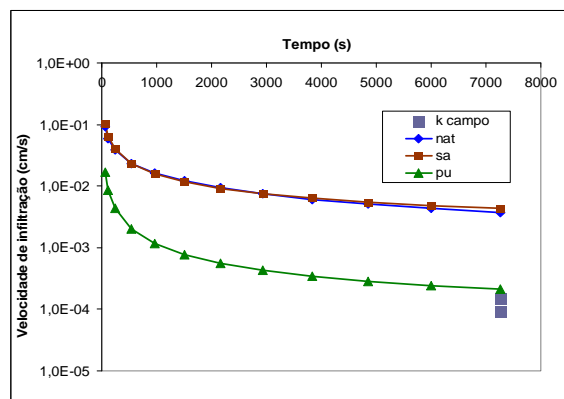
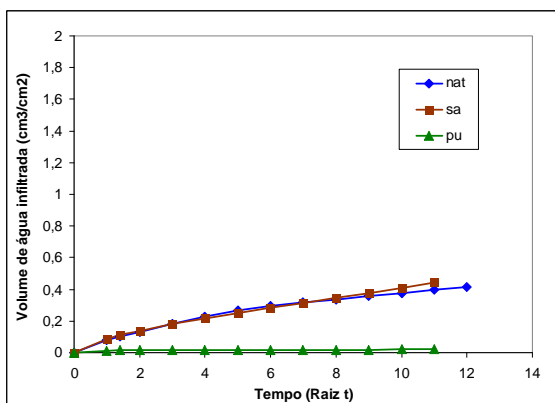


Figura 5.10 – (a) volume de água infiltrada (cm³/cm²) pela raiz quadrado do tempo (min) e (b) velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do Arenito.

Verifica-se a tendência de aumento da velocidade de ascensão capilar (s) e da perda por imersão para as amostras secas ao ar (para o arenito não houve diferença significativa). A perda por imersão nas amostras secas ao ar foi sempre mais elevada em relação às amostras na umidade natural e pré-umedecidas.

Verificou-se uma tendência de um aumento concomitante na velocidade de ascensão capilar e na perda por imersão para amostras secas ao ar. Tendência oposta é observada para amostras pré-umedecidas. Estas observações foram também descritas por Bastos (1999). Segundo o mesmo autor, a variação da razão entre as grandezas que representam estas propriedades (π/s) é que determina qualquer mudança na avaliação de erodibilidade pelo critério proposto por Nogami e Villibor (1979).

Nas amostras do horizonte A/B a relação $\pi/s > 52$ foi verificado somente para condição pré-umedecida, principalmente, devido a baixa sorção.

Na camada rocha alterada a relação $\pi/s > 52$ foi verificada para condição seca ao ar e pré-umedecida e para as amostras de arenito esta relação foi obtida independente da condição de umidade (solo erodível).

Os resultados apresentados destacam a maior susceptibilidade à erosão do arenito em relação a rocha alterada e horizonte superficial do solo (horizonte A/B).

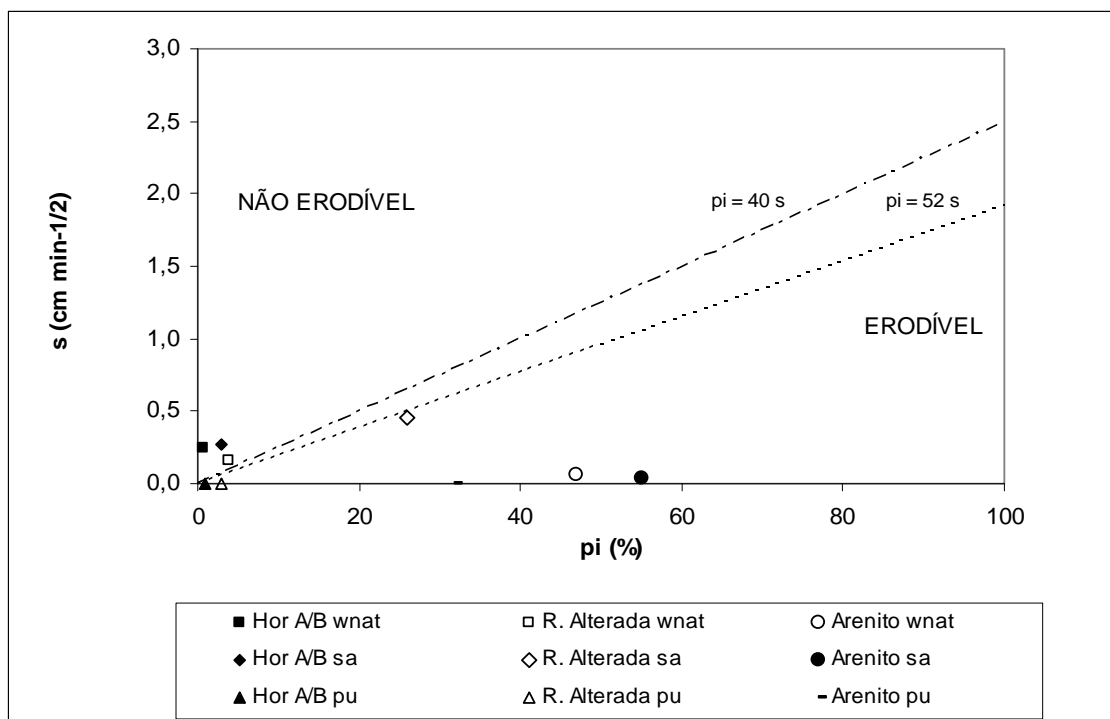


Figura 5.11 – Aplicação do critério de erodibilidade pela Metodologia MCT para os materiais estudados.

5.5 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 nas amostras à susceptibilidade à erosão hídrica por escoamento de água superficial.

Bastos (1999) apresenta detalhado levantamento sobre a origem, o desenvolvimento e as experiências brasileiras com o emprego do ensaio Inderbitzen. Os ensaios foram realizados conforme a especificações apresentadas no item 3.3.3.

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados em termos de perda de solo (desagregação) por unidade de área (g/cm^2) pelo tempo de ensaio (min), conforme apresentado no item 3.3.3 (Figura 3.17). Para cada condição específica de escoamento de água e inclinação de rampa determina-se a tensão hidráulica aplicada no ensaio (τ_h). A Tabela 3.2 (item 3.3.3) apresenta a determinação das tensões hidráulicas aplicadas.

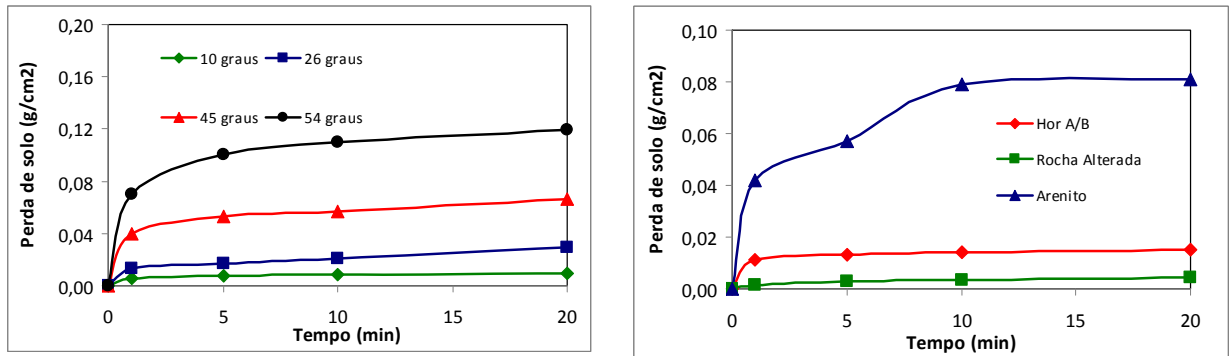
A partir dos resultados de perda de solo por unidade de área da amostra pelo tempo de ensaio plotados *versus* tensão hidráulica aplicada, determina-se a tensão cisalhante hidráulica crítica ($\tau_{\text{crít}}$) e a taxa de erodibilidade (K).

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

O tempo para estabilização da erosão na amostra varia muito como o solo ensaiado e com as condições de fluxo do ensaio. Em conseqüência, 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 5.12 (a) 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 A/B. Verifica-se

o acréscimo da perda de solo com o aumento da inclinação da rampa para uma vazão de 6 l/min. A Figura 5.12 (b) apresenta as curvas de perda de solo, para uma inclinação de 10° da rampa e vazão 6 l/min, na umidade natural, para as amostras do horizonte A/B, rocha alterada e arenito. Nestas condições o arenito apresentou uma taxa de desagregação mais elevada.



(a) Horizonte A/B – vazão de 6 L/min

(b) 10° de inclinação de rampa e vazão de 6 L/min.

Figura 5.12 – Curvas típicas obtidas no ensaio de Inderbitzen

A Tabela 5.11 resume os resultados obtidos para o perfil da voçoroca Buraco Fundo (São Valentim) para as três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, secas ao ar e pré-umedecidas.

O parâmetro K indica a erodibilidade do solo, então, quanto mais elevado for, mais suscetível é o solo/rocha à erosão. Valores baixos para τ_h a indicam que uma tensão menor é suficiente para desencadear o processo de destacamento e transporte das partículas.

As amostras demonstraram um comportamento típico para o ensaio, ou seja, para tensões menores houve perdas menores e, com o aumento da tensão hidráulica imposta pelo equipamento Inderbitzen, a quantidade de partículas desprendidas da amostras também foram maiores.

A Figura 5.13 apresenta os resultados dos ensaios de Inderbitzen para as amostras dos horizontes/camadas estudadas, a Figura 5.14 mostra uma comparação entres os valores da taxa de erodibilidade (K) para os solos estudados. Os valores de K obtidos, apesar de serem de magnitude bem inferior aos apresentados por Bastos (1999) e Basso (2011), permitem fazer uma avaliação comparativa da susceptibilidade a erosão dos horizontes/camadas que

constituem a voçoroca em estudo. O arenito apresentou maior erodibilidade que o horizonte A/B e rocha alterada, principalmente nas amostras secas ao ar.

Tabela 5.11 – Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10^{-3} g/cm²/min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros τ_{herit} (Pa) e K (10^{-2} g/cm²/min/Pa)

SOLO	COND	Q = 3 l/min				Q = 6 l/min				τ_{herit} (Pa)	K (10^{-2} g /cm ² / min/Pa)
		i=10°	i=26°	i=45°	i=54°	i=10°	i=26°	i=45°	i=54°		
τ_h (Pa)		1,136	1,710	2,585	3,297	1,393	2,018	2,742	3,239		
	w nat	-	1,7	-	-	1,4	2,5	2,2	5,3	1,00	0,1
Hor. A/B	sa	1,4	1,9	-	11,6	0,8	4,2	-	8,5	1,25	0,4
	pu	1,2	2,7	-	-	0,8	2,0	5,7	10,9	1,25	0,4
	w nat	0,2	0,4	-	-	0,35	4,1	3,7	-	1,50	0,2
Rocha Alter.	sa	0,6	1,7	18,9	-	1,9	4,4	10,7	-	1,33	0,9
	pu	0,6	0,4	0,9	-	-	0,7	1,4	-		0,07
	w nat	5,3	15,4	-	-	7,9	-	-	-	0,88	1,7
Arenito	sa	17,1	-	41,9	124,6	17,1	-	-	-	1,00	4,5
	pu	2,4	-	-	-	4,3	5,1	-	6,6	Indet.	0,1

Nas amostras ensaiadas do horizonte A/B, na camada de rocha alterada e de arenito foi possível confirmar a relação direta entre a perda de solo, a inclinação da rampa e a vazão de ensaio. É possível observar que a perda de solo é tanto maior quanto maior for a inclinação da rampa utilizada nos ensaios das camadas do perfil sobre as seguintes condições: 10 min de tempo padrão, condição de umidade natural e vazão de 3 l/min.

É possível afirmar também, que as amostras secas perderam uma quantidade maior de solo devido à perda de umidade após 72 horas de exposição ao ar. Com a redução da quantidade de água na amostra, que em certa quantidade lhe confere uma parcela de resistência (fenômeno de sucção), a tensão transmitida pelos contatos entre as partículas (tensão efetiva) propiciou maior desagregação e transporte de material, em comparação com as amostras em condição de umidade natural.

Em todas as condições de umidade e inclinações, o arenito apresentou uma resistência muito menor à ação erosiva da água simulada pelo aparelho. Portanto, constatou-se que o desprendimento das partículas da camada de arenito é superior e ocorre mais rapidamente do

que nas outras camadas estudadas. Pode-se relacionar a isso, a variabilidade da cimentação na camada de arenito.

Para a camada de arenito o coeficiente de erodibilidade K chegou a $0,045 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ numa tensão hidráulica de $3,5 \text{ Pa}$. Para o horizonte A/B esse valor ficou em torno de $0,004 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ e a rocha alterada em torno de $0,009 \text{ g/cm}^2/\text{min}$ para a mesma tensão.

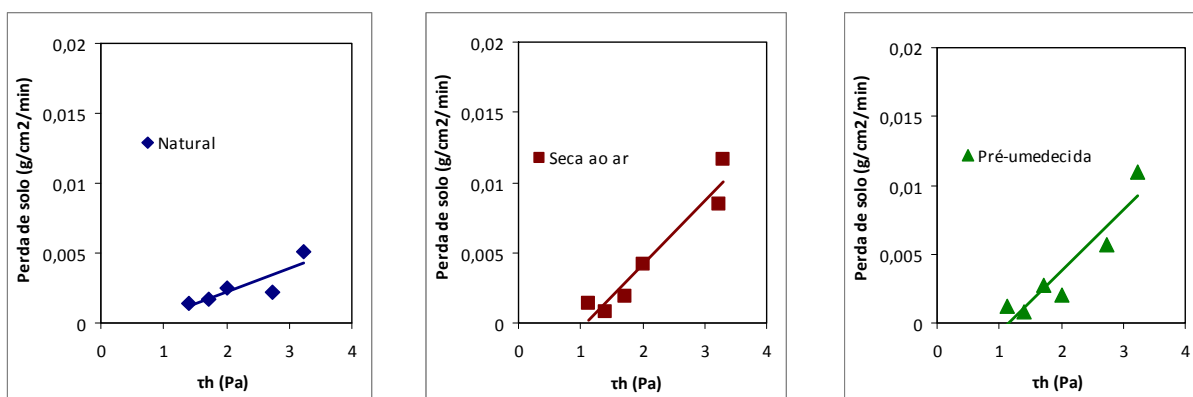
Os valores de K foram, em média, maiores para a camada de arenito do que para as outras camadas. Portanto, neste caso, o arenito é considerado muito mais erodível que o horizonte A/B e a rocha alterada, suas taxas variam de $0,0007$ a $0,009$, bem inferiores quando comparadas com as taxas do arenito que são de $0,001$ a $0,045$.

As tensões hidráulicas críticas para o horizonte A/B e rocha alterada situaram-se entre 1 e $1,5 \text{ Pa}$. Já para o arenito estes valores foram entre $0,8$ e 1 Pa . Os horizontes superficiais e rocha alterada (silo argilosa) apresentaram valores maiores deste parâmetro indicando uma tendência de maior resistência ao início do processo erosivo por arraste das partículas do solo.

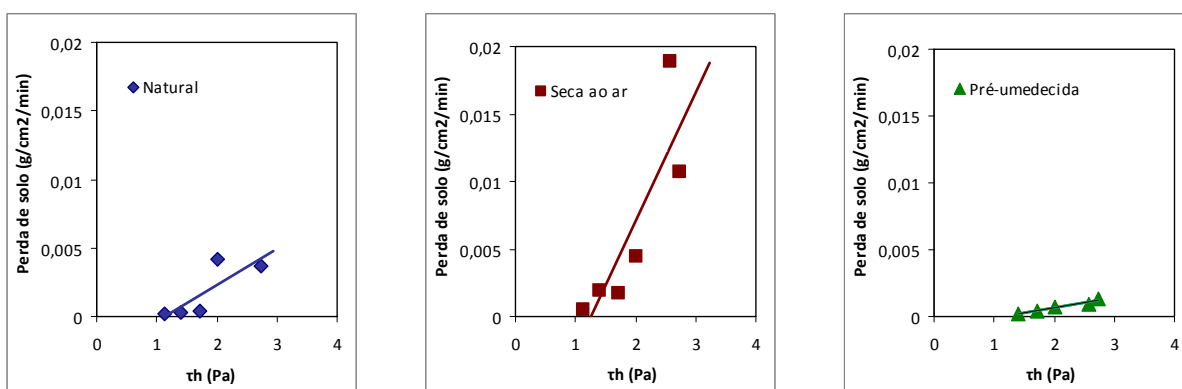
Basso (2011) para os horizontes A e B de um latossolo arenoso no oeste do Rio Grande do Sul obteve valores entre 1 e $1,3 \text{ Pa}$. Para as camadas arenosas estes valores situaram-se entre $0,5$ e 1 Pa . Na análise dos resultados de Bastos (1999) as tensões hidráulicas críticas para o horizonte B dos solos da região metropolitana de Porto Alegre situaram-se entre 1 a $1,25 \text{ Pa}$, portando superiores aos valores dos horizontes subjacentes (horizonte C – solo saprólitico).

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. Na Figura 5.14 são apresentados em forma de gráficos os resultados dos ensaios de Inderbitzen para cada um dos horizontes/camadas estudados.

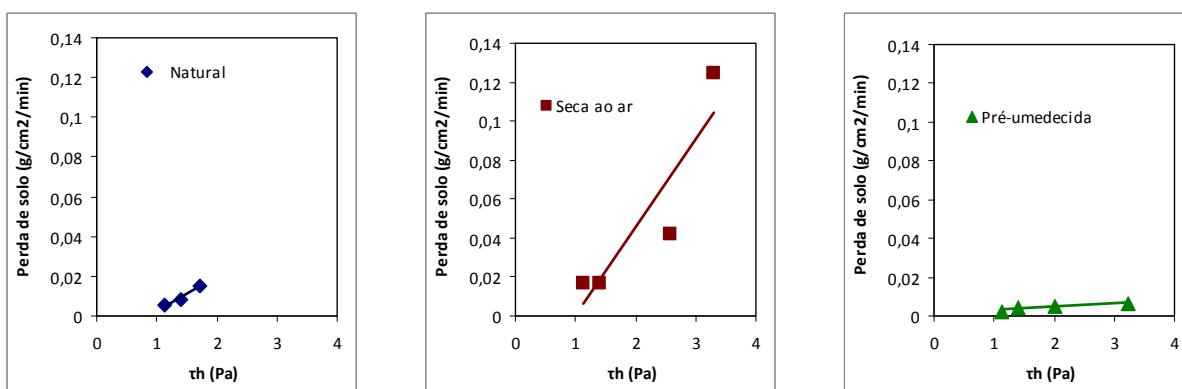
A média da τ_h crítica para todas as amostras nas diferentes vazões e teores de umidade foi de $1,17 \text{ Pa}$ para o horizonte A/B, de $1,41 \text{ Pa}$ para a rocha alterada e $0,94 \text{ Pa}$ para o arenito. O coeficiente de erodibilidade médio para as camadas foi de $0,003 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ para o horizonte A/B, para a rocha alterada foi de $0,0039 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$ e para a camada de arenito esse valor foi de $0,0193 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$.



(a) Horizonte A/B



(b) Rocha alterada



(c) Arenito

Figura 5.13 – Resultados dos ensaios Inderbitzen para as amostras do horizonte A/B, rocha alterada e arenito nas condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida.

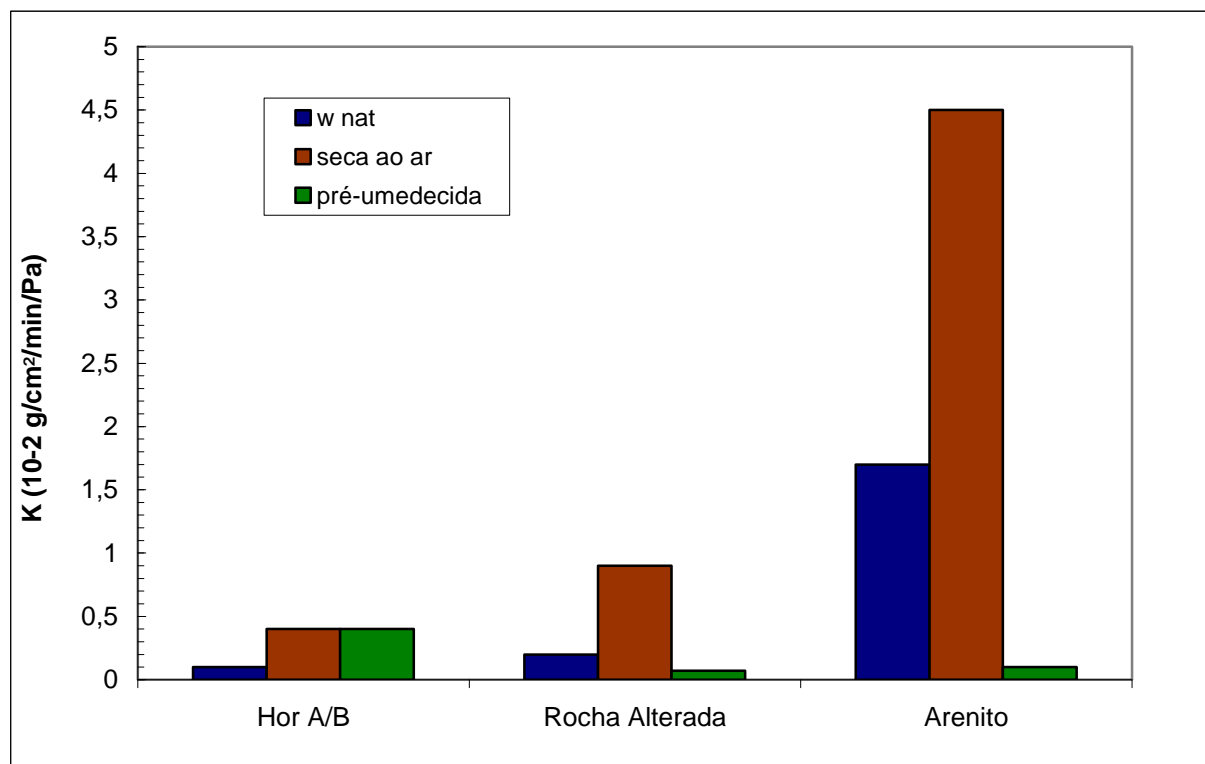


Figura 5.14 – Valores do coeficiente de erodibilidade (K) obtidos nos ensaios de Inderbitzen para os horizontes/camadas estudados.

Bastos (1999) 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. O mesmo autor, nos solos estudados em Porto Alegre e na região metropolitana verificou 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 $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ e que os solos mais resistentes a erosão apresentem valores de K inferiores a $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$.

A continuidade desta pesquisa e outras desenvolvidas pelo Grupo de Pesquisa GEOMA da UFSM tem por objetivo estender esta proposta de classificação para outros perfis de solos não saturados, verificando o comportamento destes solos frente à erosão hídrica por fluxo concentrado (TATTO, 2007; BASSO, 2011; SANT'ANA, 2011).

5.6 Erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas

A análise da erodibilidade dos horizontes/camadas do perfil típico da voçoroca Buraco Fundo no Distrito de São Valentim (Santa Maria) será apresentada de acordo com a proposta de abordagem geotécnica para solos residuais não saturados de Bastos (1999).

5.6.1 Avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos

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

O critério de Middleton (1930), baseado na razão de dispersão, e o critério de erodibilidade da Metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1979) foram aqueles com melhor desempenho na avaliação qualitativa da erodibilidade dos solos estudados por BASTOS (1999).

5.6.2 Parâmetros de erodibilidade e parâmetros físicos envolvidos da avaliação indireta da erodibilidade

Bastos (1999) estudou 8 perfis de solos em sua Tese de doutorado, sendo eles:

- Loteamento Algarve, solos do horizonte B (ALGB) e horizonte C (ALGC), oriundos do intemperismo do Complexo Granito-Gnaíssico;
- Área de empréstimo na RS239, horizontes B/C e C, identificados por RS239BC e RS239C, respectivamente, solos oriundos do intemperismo do Arenito Botucatú;
- Loteamento Parque do Trabalhador, horizonte B (PTB) e horizonte C (PTC), com solos oriundos do intemperismo do Arenito Botucatu e estudou os solos de alteração de

granitos localizados no Morro do Osso / Cidade de Deus, horizonte B (CDB) e horizonte C (CDC).

As Tabelas 5.12 e 5.13 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 entre π/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 (coesão na condição natural e inundada). Para facilitar a comparação são apresentados também os valores obtidos destes parâmetros para os solos estudados por Bastos (1999).

Tabela 5.12 – Fator de erodibilidade da USLE, parâmetros físicos envolvidos na avaliação indireta de erodibilidade para os solos estudados por Bastos (1999) 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 (%)	π/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
Hor. A/B	0,23	78	-	64	40	36	9	2,9	9,4	382
R. Alter.	0,24 – 0,27	100	-	98	80	64	29	23,8	60,7	983
Arenito	0,29 – 0,32	87	-	100	33	34	15	792	1398	36533

Pp,40 = % pas #40

Pp,200 = % pas #200

Verifica-se que os valores de K obtidos no ensaio de Inderbitzen para os solos da RS239C estudados por Bastos (1999), e do Arenito estudado no presente trabalho são comparáveis, devido a natureza geológica similar destes materiais (alteração de rochas arenosas).

Tabela 5.13 – Valores da taxa de erodibilidade medidos nos ensaios de Inderbitzen e parâmetros geomecânicos referentes à resistência ao cisalhamento e à colapsividade para os solos estudados por Bastos (1999) e neste trabalho.

Solo	Ensaio de Inderbitzen			Resistência ao cisalhamento e colapsividade			
	K (10 ⁻² g/cm ² /min/Pa)			c (kPa)	c' (kPa)	Δc (%)	Ic (%)
	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	15,1	4,5	70,9	0,05
PTB	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
Hor. A/B	0,1	0,4	0,4	13,0	0,0	100,0	0,63
R. Alter.	0,2	0,9	0,07	29,6	11,9	59,8	0,21
Arenito	1,7	4,5	0,1	52,8	3,8	92,8	5,45

5.6.2.1 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 % passante na peneira # 200, o fator de erodibilidade da USLE, a razão de dispersão, a razão pi/s e a variação do intercepto coesivo. A Tabela 5.14 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.

Tabela 5.14 – Valores propostos por Bastos (1999) para classificar as classes de erodibilidade

Erodibilidade	K (10 ⁻² /cm ² /min/Pa)	% P _p 200	IP (%)	K _{USLE}	K _{USLE} *	pi/s	RD
Baixa	< 0,1	> 55	> 10	< 0,20	< 0,15	< 52	< 40
Média a baixa	< 0,1 e < 10	> 35 e < 55	> 5 e < 10		> 0,15 e < 0,30		
Média, média a alta e alta	> 10	< 35	< 5	> 0,20	> 0,30	> 52	> 60

*Faixas propostas por Carvalho (1994)

Análise da erodibilidade pela % passante na peneira # 200, plasticidade, K_{USLE} e razão de dispersão.

A % passante na peneira # 200 (teor de finos), 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 5.15 apresenta a proposta de Bastos (1999) com os resultados obtidos neste trabalho. Os resultados estão dentro da tendência de uma relação inversamente proporcional entre a % passante na peneira # 200 e K.

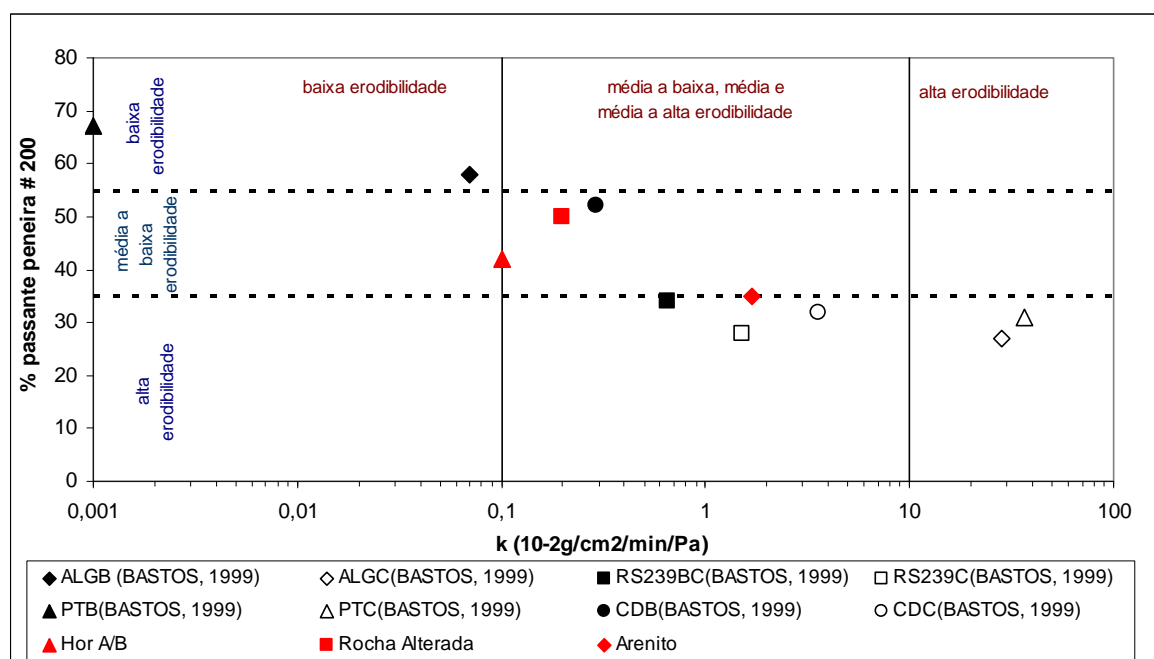


Figura 5.15 – Relação entre a % passante na peneira # 200, o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

Quanto a porcentagem passante na peneira 200, o horizonte A/B e a rocha alterada são consideradas de média a baixa erodibilidade e o arenito de média a alta erodibilidade, pois a $P_{p,200} < 55\%$ para ambas as camadas.

A Figura 5.16 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.

O horizonte A/B classifica-se de média a baixa erodibilidade, a rocha alterada e o arenito são considerados de baixa erodibilidade, sendo que essa tendência não é verificada para os solos estudados nesse trabalho.

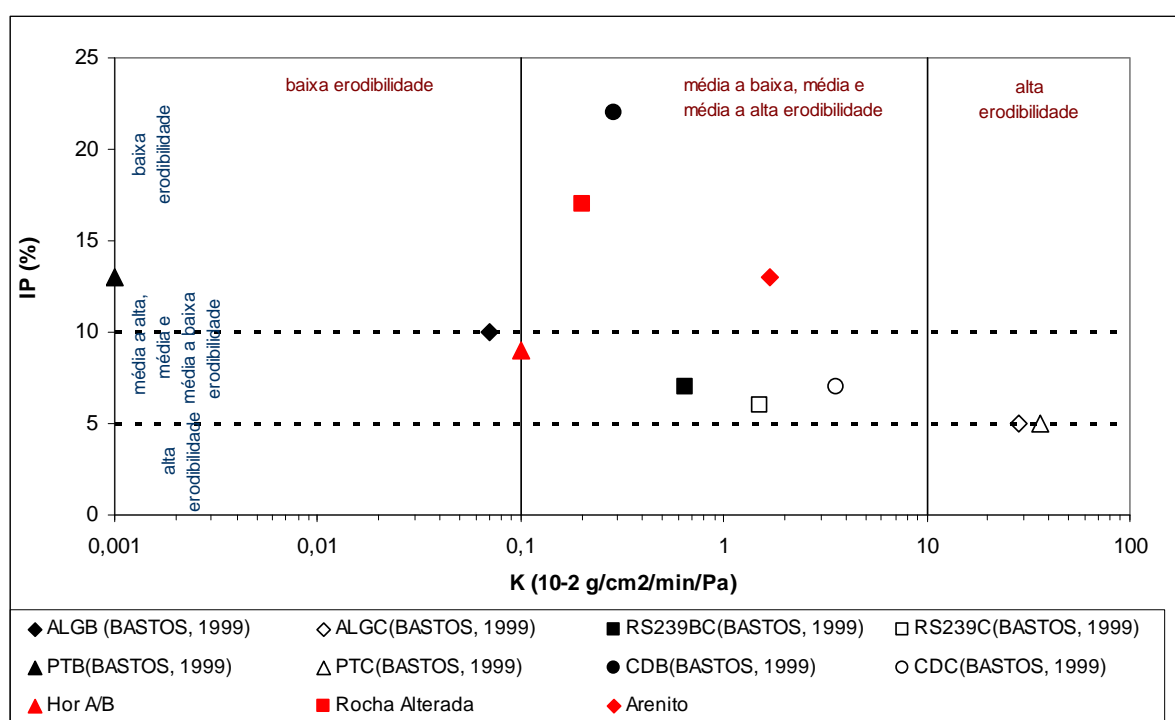


Figura 5.16 – Relação entre o índice de plasticidade (IP), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

A Figura 5.17 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 5.14). 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.

Para o horizonte A/B, a rocha alterada e o arenito, segundo Bastos (1999), são considerados com média, média a alta e alta erodibilidade, respectivamente. O K_{USLE} foi maior que 0,20, verificou-se a tendência proposta por Bastos (1999).

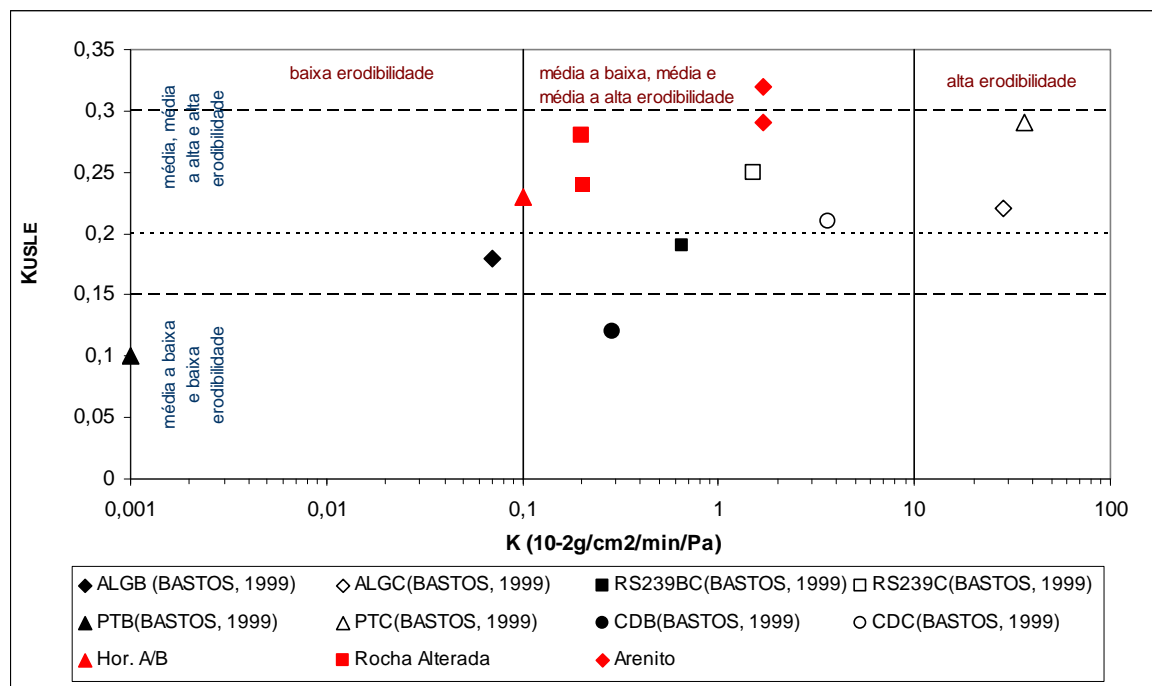


Figura 5.17 – Relação entre o K_{USLE} , o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

A Figura 5.18 apresenta a relação entre a razão de dispersão 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).

Através da análise da razão de dispersão proposta por Bastos (1999), na camada do horizonte A/B, o valor encontrado situou-se em torno de 78%, considerado de média erodibilidade, para a rocha alterada RD foi de 100%, considerado de média a alta erodibilidade e o arenito foi classificado como de média a baixa erodibilidade.

A análise da razão de dispersão (RD) com o parâmetro K, para os solos estudados neste trabalho, conforme a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999), não foi possível correlacionar uma relação direta com o parâmetro de erodibilidade K.

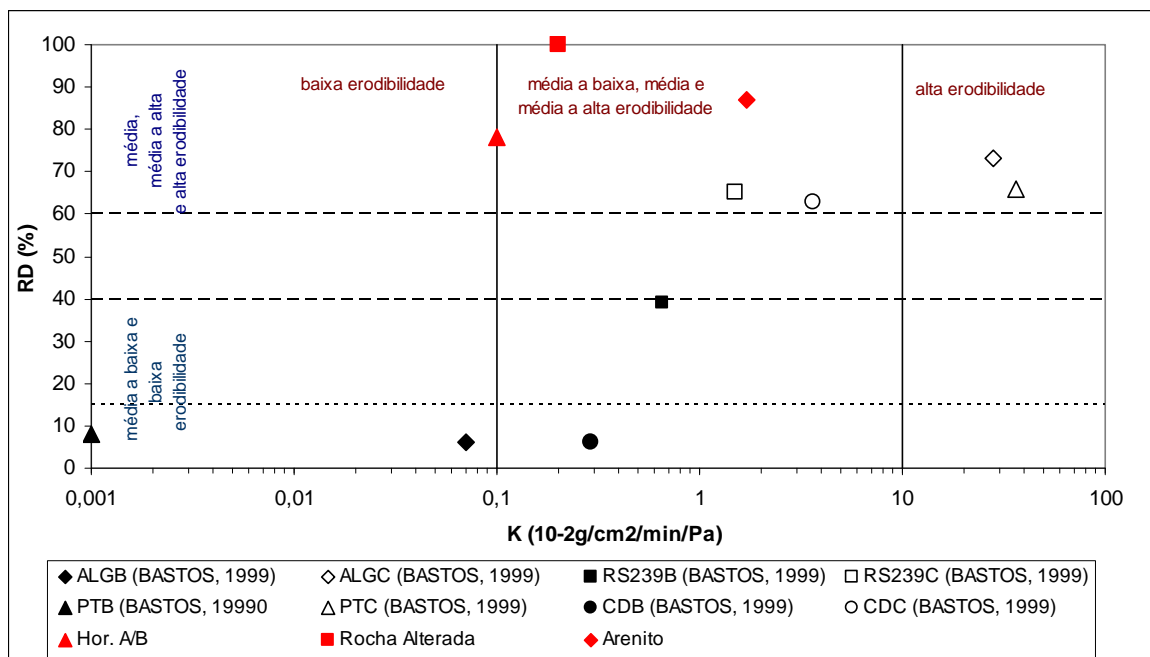


Figura 5.18 – Relação entre a razão de dispersão (RD), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

Análise da erodibilidade pelo critério de erodibilidade MCT

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram a relação entre a razão π/s , obtida nos ensaios de perda por imersão e infiltrabilidade (Metologia 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 confirmam a proposta de Bastos (1999), que permitiu separar os solos estudados, em média a baixa e baixa erodibilidade ($\pi/s < 52$) daqueles de média até alta erodibilidade ($\pi/s > 52$).

O horizonte A/B para condição de umidade natural e seca ao ar apresentou baixa erodibilidade, a rocha alterada na condição seca ao ar, apresentou-se de média a alta erodibilidade, o arenito, por outro lado, apresentou média a alta erodibilidade independente da condição inicial de umidade. Segundo a proposta de Bastos (1999), os resultados apresentam relação significativa com o parâmetro K.

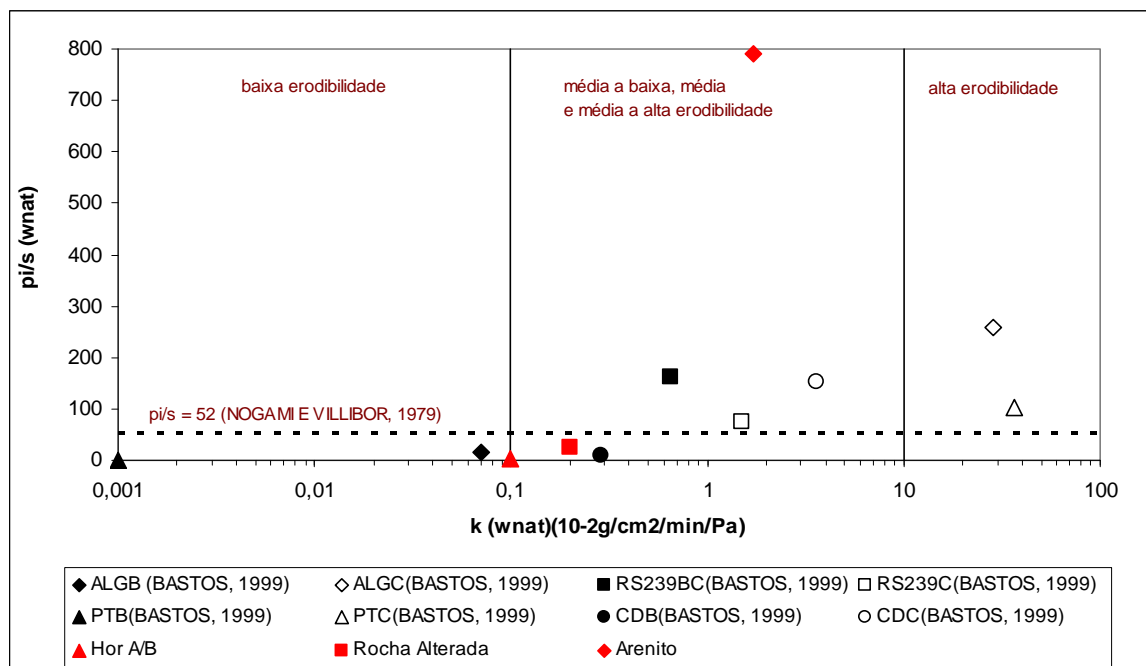


Figura 5.19 – Relação entre π/s (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras na condição de umidade natural.

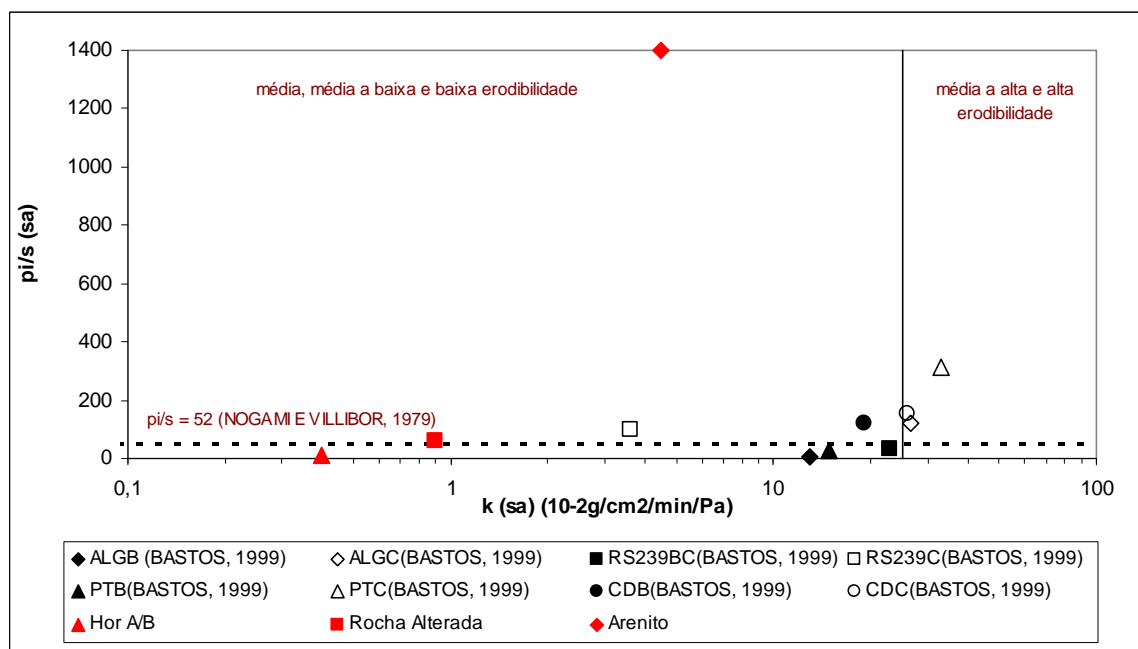


Figura 5.20 – Relação entre π/s (critério da erodibilidade MCT), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999) em amostras secas ao ar.

Análise da erodibilidade pela coesão e potencial de colapso

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 5.21 e 5.22).

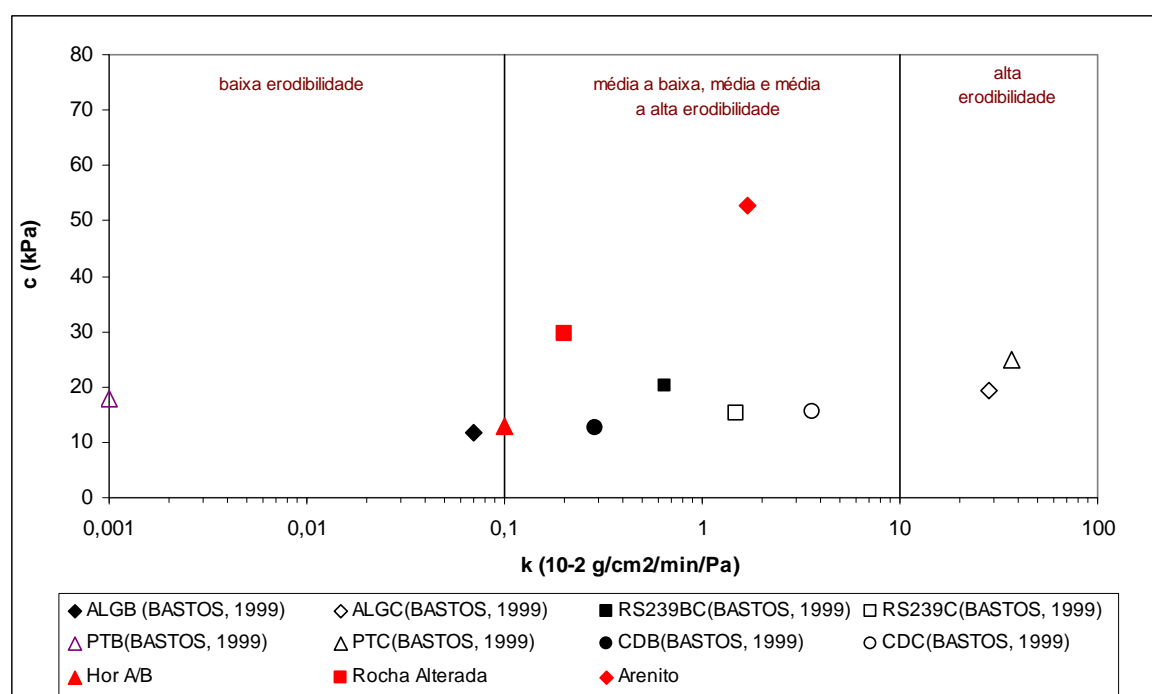


Figura 5.21 – Relação entre a coesão não saturada na umidade natural (c) e o coeficiente de erodibilidade (K)

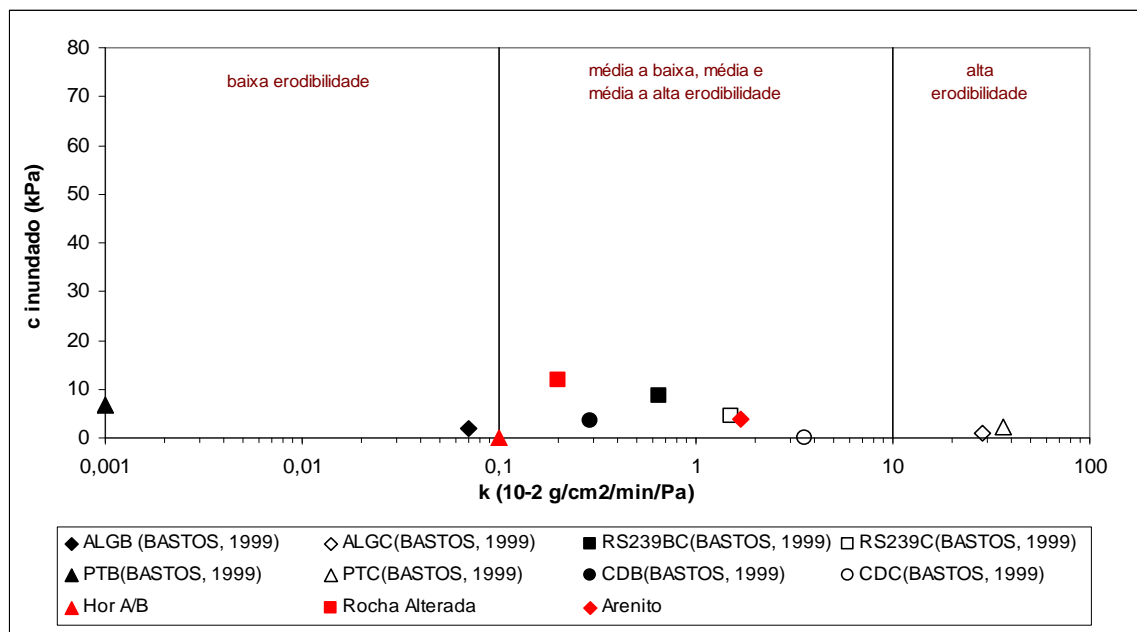


Figura 5.22 – Relação entre a coesão na condição inundada (c') e o coeficiente de erodibilidade (K)

Na análise em termos do parâmetro variação de coesão, proposto por Bastos (1999), apresentado na Figura 5.23 permitiu inferir uma tendência de crescimento da erodibilidade (K), na condição de umidade natural, com o aumento deste parâmetro (Δc). Bastos (1999) identificou solos com média a alta e alta erodibilidade como aqueles que apresentam uma elevada variação de coesão com a inundação ($\Delta c > 85\%$).

A rocha alterada ($\Delta c=100\%$) e o Arenito ($\Delta c=92,8\%$) são considerados potencialmente erodíveis, apresentando de média a alta erodibilidade.

Para os solos estudados, o horizonte A/B não se enquadrou satisfatoriamente nesta proposta.

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 Δc .

Os solos e as rochas estudadas nesta pesquisa, e outros materiais estudados por Tatto (2007), Basso (2011) e Sant'ana (2011) verificaram a importância deste parâmetro 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 quanto da saturação dos solos, a ação desagregadora ocasionada pelas tensões internas originadas devido aos mecanismos de hidratação e desaeração.

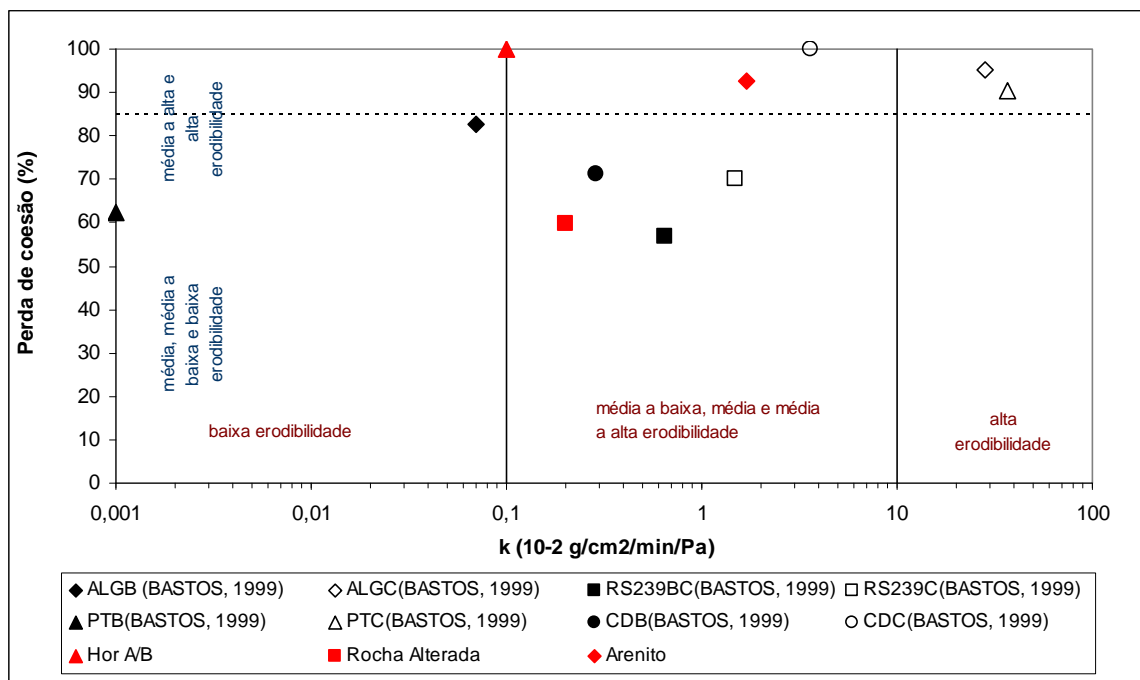


Figura 5.23 – Relação entre a variação de coesão (Δc), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

Bastos (1999) destaca ainda a redução da coesão superficial com o umedecimento dos solos, 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.

A Figura 5.24 apresenta a variação do potencial de colapso (I_c), obtido para um nível de carregamento mínimo no ensaio de cisalhamento direto, com a taxa de erodibilidade (K). Bastos (1999) concluiu que estes parâmetros não se apresentavam correlacionáveis. Embora se assumam que o processo de desagregação em água por hidratação e desaeração do solo não saturado esteja envolvido nos dois fenômenos: colapso e erosão, a natureza dos esforços envolvidos não é o mesmo (solicitação normal e o cisalhamento hidráulico).

Nos materiais em estudo, o horizonte A/B apresentou $I_c = 0,63\%$ e na rocha alterada esse valor foi de $I_c = 0,21\%$, verificou-se que o arenito (camada com maior desagregabilidade) apresentou a variação do potencial de colapso maior ($I_c = 5,45\%$).

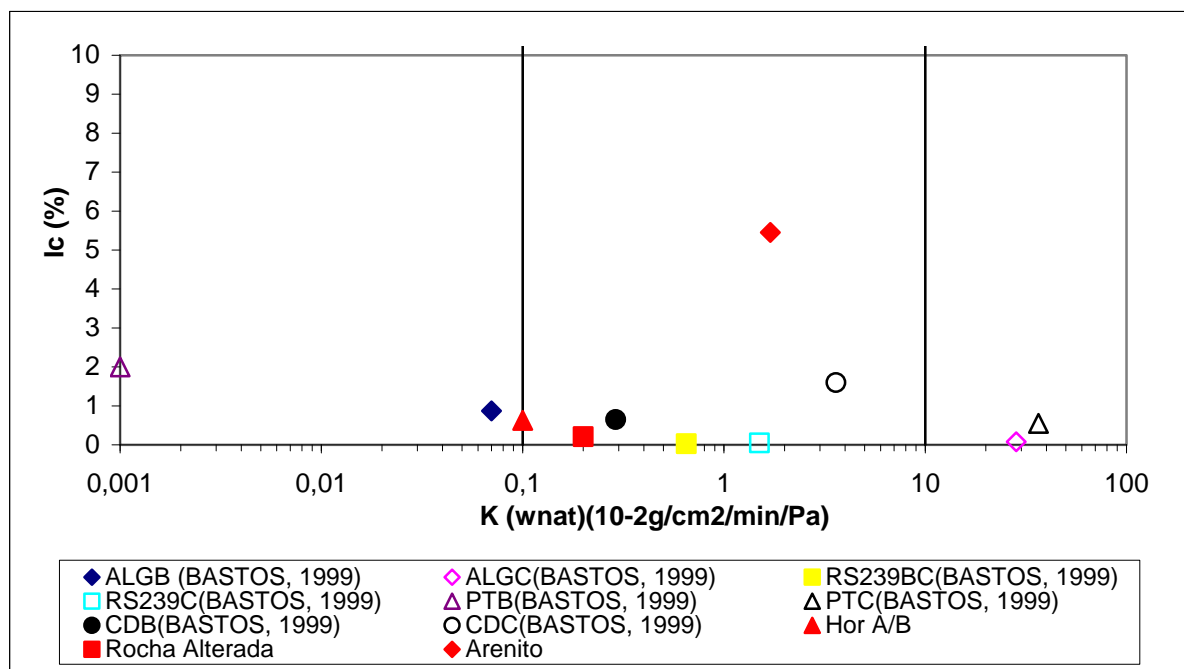


Figura 5.24 – Relação entre a variação do potencial de colapso (I_c), o coeficiente de erodibilidade (K) e as classes de erodibilidade propostas por Bastos (1999).

A Tabela 5.15 apresenta o resumo das análises realizadas nos horizontes/camadas do perfil da voçoroca de São Valentim em relação aos níveis de erodibilidade propostos por Bastos (1999).

O Arenito foi a camada que mais vezes apresentou-se potencialmente erodível, sendo a camada mais erodível do perfil.

Os critérios que obtiveram melhor correlação com a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999) foram a % passante na #200, o fator K_{USLE} e o critério de erodibilidade da Metodologia MCT.

Tabela 5.15 – Resumo da análise da erodibilidade dos horizontes/camadas estudadas de acordo com a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999)

Solo	Parâmetros de erodibilidade						
	K	K _{USLE}	RD	%Pp,200	IP	Pi/s	Δc
Horizonte A/B	Média a baixa	Média	Média	Média a baixa	Média a baixa	Baixa	Média a alta
Rocha Alterada	Média a baixa	Média a alta	Média a alta	Média a baixa	Baixa	Baixa	Média a alta
Arenito	Média a baixa	Alta	Média a baixa	Média a alta	Baixa	Média a alta	Média a alta

K= coeficiente de erodibilidade do ensaio de Inderbitzen

K_{USLE}= Coeficiente de erodibilidade da equação Universal de Perda de solo

RD= Razão de Dispersão

% Pp,200= Porcentagem passante na peneira 200

IP= Índice de Plasticidade

Pi/s= Relação entre a perda de massa por imersão e o coeficiente de sorção

Δc= Variação da coesão

6 CONCLUSÕES

O perfil em estudo na voçoroca é constituído por um solo superficial classificado como argissolo (horizonte A/B) que transita para camadas de alteração e rochas sedimentares (rocha alterada, siltito e arenito).

Em relação a caracterização destes horizontes/camadas verificou-se o seguinte:

- Texturalmente o horizonte A/B e o arenito foram classificados como areias argilo-siltosas. A camada de rocha alterada foi classificada como uma argila silto-arenosa e o siltito como silte areno-argiloso.

- Estes materiais apresentaram uma plasticidade de média a baixa, exceto a camada de rocha alterada que se apresentou mais plástica.

- A rocha alterada apresentou o maior índice de vazios, porosidade e grau de saturação em comparação com as outras camadas constituintes da voçoroca. Em relação aos valores de umidade e grau de saturação estes materiais são considerados solos/rochas não saturados.

- Na análise química o horizonte A/B foi classificado como solos distróficos (pouco fértil) e álico (tóxicos para plantas). A quantidade de matéria orgânica para este horizonte foi superior as outras camadas. Pelo valor da CTC o horizonte A/B e o arenito, apresentam argilas de baixa atividade. Para a rocha alterada a argila é considerada de atividade média a alta.

A resistência ao cisalhamento dos solos estudados foi avaliada em laboratório através de ensaios de cisalhamento direto convencionais na condição de umidade natural, inundadas e secas ao ar.

- Para os ensaios realizados com a umidade natural, nas amostras do horizonte A/B e da rocha alterada as curvas tensão de cisalhamento por deslocamento apresentam um leve pico para as tensões inferiores a 50 kPa com uma variação volumétrica inicial de compressão que decresce e tende a um pequeno aumento de volume (dilatância). Quando inundados estas tendências não ocorrem, verificando-se a influência da saturação no processo de ruptura. Nas amostras ensaiadas no arenito as curvas de tensão cisalhante apresentaram picos bem nítidos para todos os níveis de tensão.

- Nos ensaios realizados nas amostras secas ao ar as curvas tensão cisalhante por deslocamento apresentam picos nítidos para todas as tensões normais aplicadas e uma

tendência de aumento de volume durante o ensaio. Na rocha alterada, ocorreu retração dos corpos de prova.

- A inundação reduziu a tensão de cisalhamento máxima para todos os níveis de tensão aplicados nos ensaios, com isso a saturação anulou o intercepto coesivo e reduziu o ângulo de atrito interno. No ensaio com corpos de prova secos ao ar as tensões cisalhantes tiveram um aumento significativo, resultando em elevados valores de coesão e atrito.

Os métodos e critérios empregados na avaliação indireta da erodibilidade através da estimativa do fator de erodibilidade (K), avaliação do potencial de desagregação dos solos e através dos critérios baseados na Metodologia MCT, demonstraram que:

- Na determinação do coeficiente de erodibilidade (K_{USLE}) verificou-se que o horizonte A/B e a rocha alterada apresentaram erodibilidade média ($0,15 < K_{USLE} < 0,30$). O siltito e o arenito apresentavam erodibilidade de média a alta ($K_{USLE} > 0,30$).

- No ensaio de desagregação através da análise qualitativa da erodibilidade do solo, verificou-se que a camada de rocha alterada desagregou mais que no horizonte A/B, mas com menor intensidade que na camada de arenito. As amostras secas ao ar, em geral, apresentaram maior desagregação.

- Pelo critério de erodibilidade (metodologia MCT) o arenito foi considerado erodível, independente da condição de umidade inicial das amostras. O horizonte A/B foi considerado erodível somente na condição pré - umedecida. Já a rocha alterada foi considerada erodível para condição seca ao ar e pré-umedecida.

A avaliação direta, foi realizada através dos ensaios de Inderbitzen, os quais tem por objetivo quantificar a erodibilidade dos solos e rochas estudadas, através da taxa de erodibilidade, K e a tensão cisalhante hidráulica crítica, τ_{crit} , segundo essa avaliação foi possível verificar que:

- A inclinação da rampa tem papel decisivo nas perdas de solos e rochas, quanto maior a inclinação da rampa, maiores são as perdas de solo das camadas estudadas.

- O arenito apresentou maior erodibilidade ($K = 0,045 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$) que o horizonte A/B ($K = 0,004 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$) e a rocha alterada ($K = 0,009 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$), principalmente nas amostras secas ao ar.

- O horizonte superficial e a rocha alterada apresentaram valores maiores de tensões hidráulicas críticas, com uma média de 1,17 Pa para o horizonte superficial e 1,41 Pa para a rocha alterada, esses valores indicam uma tendência de maior resistência ao início do processo erosivo por arraste das partículas do solo.

Segundo a proposta de abordagem geotécnica para solos residuais não saturados de Bastos (1999), fez-se a análise de parâmetros físicos e geomecânicos relacionados com a erodibilidade K do ensaio de Inderbitzen:

- A camada do horizonte A/B e da rocha alterada e do arenito são classificadas de média a baixa erodibilidade ($0,001 \leq K \leq 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$).

- A porcentagem passante na peneira 200, o horizonte A/B e a rocha alterada são consideradas de média a baixa erodibilidade e o arenito de média a alta erodibilidade, pois a $P_{p,200} < 55 \%$ para ambas as camadas.

- Em relação ao índice de plasticidade, o horizonte A/B classifica-se de média a baixa erodibilidade, a rocha alterada e o arenito são considerados de baixa erodibilidade, sendo que essa tendência não é verificada para os solos estudados nesse trabalho.

- Na análise do K_{USLE} , o horizonte A/B, a rocha alterada e o arenito são considerados com média, média a alta e alta erodibilidade, respectivamente. O K_{USLE} foi maior que 0,20, verificou-se a tendência proposta por Bastos (1999).

- Em relação à razão de dispersão (RD), a camada do horizonte A/B, o valor encontrado situou-se em torno de 78%, considerado de média erodibilidade, para a rocha alterada RD foi de 100%, considerado de média a alta erodibilidade e o arenito classificado com média a baixa erodibilidade. Essa análise de RD com o parâmetro K , para os solos estudados neste trabalho, conforme a proposta de abordagem geotécnica de Bastos (1999) não mostrou uma relação direta com o parâmetro de erodibilidade K .

- A razão π/s obtida no critério de erodibilidade MCT, o horizonte A/B na condição de umidade natural e seca ao ar e a rocha alterada para condição de umidade natural, apresentaram baixa erodibilidade. A rocha alterada na condição seca ao ar e o arenito, independente da condição inicial de umidade, apresentaram média a alta erodibilidade, segundo a proposta de Bastos (1999), os resultados apresentam relação significativa com o parâmetro K .

- Através da análise do parâmetro Δc , percebeu-se que a Rocha Alterada ($\Delta c=100 \%$) e o Arenito ($\Delta c= 92,8 \%$) são considerados potencialmente erodíveis, apresentando de média a alta erodibilidade. O horizonte A/B não se enquadrou satisfatoriamente nesta proposta.

- A camada de arenito foi, entre as estudadas, a que apresentou maior potencial de colapso ($I_c= 5,45\%$).

Pode-se perceber que os critérios apresentados na proposta de Bastos (1999), que tiveram melhor desempenho no presente trabalho foram a % passante na #200, o fator K_{USLE} e o critério de erodibilidade da Metodologia MCT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21 BRASILEIRA. **Bases para discussão**. Novaes W. (coord.). MMA/PNUD 2000. Brasília, 2000. 196p.

AGUIAR, V.G; ROMÃO, P.A. Proposta de Mensuração de Erodibilidade do Solo em Laboratório. In: XI EREGEO - Simpósio Regional de Geografia. A Geografia no Centro-Oeste brasileiro: Passado, Presente e Futuro-UFG...2009, Jataí-GO. **Anais...** Jataí: 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.

ASTM D3080 - 90 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 1990.

ASTM D2487 - 93 Standard 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.

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, .S.D.; PEDRON, F.A. (Ed.). **Solos & ambiente: I Fórum**. Santa Maria: Pallotti, 2004. p. 7-22.

BACELLAR, L. de A.; NETTO, A. L.; LACERDA W. A. Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**. 1369–1385 (2005).

BASSO, L. **Avaliação da erodibilidade de solos e rochas sedimentares: voçoroca Fazenda Taquari, Manuel Viana/RS**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), PPGEC/UFSC, Santa Maria, 2011 (inédito).

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

BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY,J.; GEHLING, W.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.

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

BERTONI, Joaquim; NETO, Francisco Lombardi. **Conservação dos solo**. São Paulo: Ícone, 1999.

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 de 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. ; SALES, M. M. ; MORTARI, D. ; FÁCIO, J. A. ; MOTTA, N. ; FRANCISCO, R. A. 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. (Org.) ; SALES, M. M. (Org.) ; SOUZA, N. M. de (Org.) ; Melo, M.T.S. (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.; Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.597-607,2005.

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

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.

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.

DOMINGUES, Elvira Neves. 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.

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

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

FREIRE, E.P. Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSIÃO, 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 Solo**, v.32, p.1743-1751, 2008.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 3. ed. São Paulo: IBRASA. Curitiba: Ed. Universitária Champagnat, 1991. 442 p.

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.; 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.

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.

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

HOLZ, M.; DE ROS, L.F. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 2000.

IAEG. Commission 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. 19, p. 364-371, 1979.

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

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 de Santo Agostinho – PE. In Conferência Brasileira sobre Estabilidade de encostas 4, **Anais.....**Salvador, BA. P. 387-399, 2005

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.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação de solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002, 178p.
MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 2. ed. Santa Maria: UFSM; Brasília: CPRM, 1997. 284 p.

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.

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

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.; 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. 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. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196

NUNES, M.C.M; CASSOL, E.A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência 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. CDROM.

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 área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n 2, p. 261-268, 2006.

PEJON, O. J.; SILVEIRA, L. L. L. da. Index properties to predict erodibility of tropical soil **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. Vol. 66, n 2, p. 225-236, 2007

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

REICHERT, J.M.; SCHAFER, M.J.; ELTZ, F.L.F.; 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.

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.

SANT'ANA, K.D.A. **Avaliação de susceptibilidade à erosão em áreas utilizadas para treinamentos militares: campo de instrução de Santa Maria (CISM)**. Dissertação de Mestrado (Geografia-Geociências), Santa Maria, 2011 (inédito).

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.

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

SILVA, M.L.N.; CURI, 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.

SILVA, A. M. SILVA M.L.N.; CURI N.; AVANZI, J.C.; FERREIRA M.M. Erosividade da Chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência 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. **Estudo de Boçorocas e Métodos Expeditos Aplicados**. Unesp. Rio Claro: 2001. Disponível em: <http://sidklein.vilabol.uol.com.br/pos/metexp.htm>. Acesso em: Fev 2011.

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.

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.

WERLANG, M. K. **Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio grande do Sul**. 2004, 191f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria.

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