

Daniel Machado Lopes Ventura

**MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO DOS  
SOLOS RESIDUAIS DO BAIRRO RATONES E VARGEM  
PEQUENA**

Florianópolis  
2017



Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**DANIEL MACHADO LOPES VENTURA**

**MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO DOS  
SOLOS RESIDUAIS DO BAIRRO RATONES E VARGEM  
PEQUENA**

**Florianópolis  
2017**

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

Venura, Daniel Machado Lopes Ventura  
Mapeamento da Suscetibilidade à Erosão dos Solos  
Residuais do Bairro Ratoões e Vargem Pequena /  
Daniel Machado Lopes Ventura Venura ; orientador,  
Rafael Augusto dos Reis Higashi, coorientador,  
Camilo Andrade Carreno, 2017.  
110 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.  
Mapeamento Geotécnico. 3. Erosão. 4. Erodibilidade.  
I. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. II. Carreno,  
Camilo Andrade. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental. IV. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À EROÇÃO DOS SOLOS  
RESIDUAIS DO BAIRRO RATONES E VARGEM PEQUENA

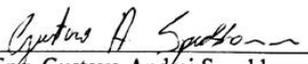
Daniel Machado Lopes Ventura

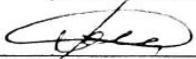
Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos  
para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental–TCC II

BANCA EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Eng. Camilo Andrade Carreño  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Eng. Gustavo Andrei Speckhann  
(Membro da Banca)

  
\_\_\_\_\_  
Eng. Rafael Fabiano Cordeiro  
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, SC  
JUNHO/2017

Este trabalho é dedicado a minha mãe  
Silvana Machado (in memoriam).

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Higashi, pela paciência, amizade e inteligência de iluminar o conhecimento.

Aos meus avós e meu pai, por fazer tudo ficar mais fácil.

Ao mestrando Camilo e a turma da “Zenzala”, pela amizade e ajuda na hora do sufoco.

A minha namorada Patrícia, pela amizade, paciência e amor nos momentos certos.

E a todos os amigos que estavam presentes nos momentos de distração durante essa guerra que foi a graduação.



## RESUMO

O crescimento desordenado das cidades brasileiras resultou na ocupação de áreas não propícias a este fim, como por exemplo, locais sujeitos a erosão e enchentes. Neste sentido, a utilização de um SIG aliado a estudos de geotecnia torna-se uma ferramenta importante para nortear o uso e ocupação do solo. Este trabalho pretende elaborar um mapa de suscetibilidade à erosão dos solos em parte da bacia hidrográfica do rio Ratonas, em Florianópolis. Para o mapeamento geotécnico foi utilizado os critérios de erodibilidade MCT de Nogami e Villibor (1979), critério de erodibilidade por cisalhamento direto de Bastos et al. (2001), densidade real das partículas por Higashi et al. (2012) e classificação MCT de Nogami e Villibor (1994). Para os critérios propostos foram realizadas saídas de campo e diversos ensaios de laboratório em unidades geotécnicas de solos residuais. Os resultados mostram que, a unidade geotécnica Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito, possui média erodibilidade, enquanto que a unidade Cambissolo depósito de encostas possui alta erodibilidade.

**Palavras-chave:** Mapeamento Geotécnico, Erosão, Erodibilidade

## **ABSTRACT**

The disorderly growth of Brazilian cities has resulted in the occupation of areas not propitiated by it, such as places subject to erosion and floods. In this sense, a use of a GIS in conjunction with geotechnical studies becomes an important tool to guide the use and occupation of the soil. This work intends to elaborate a map of susceptibility to soil erosion in part of the watershed of the Ratonés river, in Florianópolis. For the geotechnical mapping, the MCT erodibility criterion of Nogami and Villibor (1979) was used, as well as the direct shear erodibility criteria of Bastos et al. (2001), real particle density by Higashi et al. (2012) and MCT classification of Nogami and Villibor (1994). For the proposed requirements, field trips and several laboratory tests were carried out in geotechnical units of residual soils. The results show that the Red-Yellow Podzolic geotechnical unit of granite substrate has medium erodibility, whereas the Cambissolo unit of slope deposits has high erodibility.

Keywords: Geotechnical Mapping, Erosion, Erodibility

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Erosão causada pelo impacto de uma gota de chuva com o solo (efeito splash). .....	22
Figura 2 - Sulcos. ....	23
Figura 3 - Ravinas. ....	24
Figura 4 - Voçoroca de grandes dimensões com afloramento do lençol freático no município de São Francisco de Assis/RS. ....	25
Figura 5 - Esquemática dos métodos de avaliação de erosão hídrica. ....	28
Figura 6 - Critério de classificação gráfica para a metodologia MCT. .	29
Figura 7 - Equipamento do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. ....	30
Figura 8 - Comportamento típico do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT. ....	31
Figura 9 - Equipamento do ensaio perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT. ....	32
Figura 10 - Resultados de ensaio de erodibilidade baseado no critério de cisalhamento direto. ....	33
Figura 11 - Equipamento de cisalhamento direto. ....	35
Figura 12 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb .....	35
Figura 13 - Relação entre densidade real das partículas e critério de erodibilidade MCT. ....	36
Figura 14 - Esquema do ensaio de classificação MCT. ....	38
Figura 15 - Gráfico para determinação expedita MCT. ....	39
Figura 16 - Esquema do equipamento de Inderbitzen. ....	43
Figura 17 - Ensaio de Inderbitzen modificado. ....	44
Figura 18 - Gráfico de testes de ensaio de Inderbitzen Modificado. ....	45
Figura 19 - Simbologia da metodologia Davison Dias. ....	50
Figura 20 - Exemplo de nomenclatura metodologia Davison Dias. ....	50
Figura 21 - Diagrama da metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras Brasileiras. ....	53
Figura 22 - Cruzamento de mapas pela metodologia Davison Dias. ....	54
Figura 23 - Mapa da Ilha de Santa Catarina e bacia do rio Ratonas. ....	57
Figura 24 - Mapa da bacia do rio Ratonas. ....	59
Figura 25 - Mapa da hidrografia e altitude da bacia do rio Ratonas .....	60
Figura 26 - Mapa geológico da bacia do rio Ratonas. ....	62
Figura 27 - Mapa Geotécnico da bacia do rio Ratonas .....	63
Figura 28 - Área de Estudo do Trabalho .....	65
Figura 29 - Diagrama metodológico. ....	67

Figura 30 - Pontos de coletas. ....	69
Figura 31 - Coleta de amostras no ponto 1. ....	70
Figura 32 - Coleta de amostras no ponto 2. ....	71
Figura 33 - Coleta de amostras no ponto 3. ....	72
Figura 34 - Coleta de amostras no ponto 4. ....	73
Figura 35 - Ensaio de limite de plasticidade. ....	74
Figura 36 - Equipamento do ensaio de cisalhamento direto. ....	76
Figura 37 - Corpo de prova cisalhado. ....	76
Figura 38 - Tensão Cisalhante <i>versus</i> Tensão Normal. ....	77
Figura 39 - Ensaio de Infiltrabilidade sendo realizado. ....	78
Figura 40 - Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado .....	79
Figura 41 - Ensaio de caracterização MCT .....	80
Figura 42 - Critério de erodibilidade geral.....	81
Figura 43 - Diagrama da Etapa 4 .....	82
Figura 44 - Curvas granulométricas.....	84
Figura 45 - Carta de classificação SUCS. ....	86
Figura 46 - Envoltória de ruptura para condição natural. ....	88
Figura 47 - Envoltória de ruptura para condição inundada.....	88
Figura 48 - Critério de erodibilidade por cisalhamento direto de Bastos et al. (2001). ....	89
Figura 49 - Ensaio de Infiltrabilidade com umidade natural.....	90
Figura 50 - Ensaio de Infiltrabilidade com secagem de 48 horas .....	91
Figura 51 - Ensaio de Infiltrabilidade juntos .....	91
Figura 52 - Resultado do Critério de Erodibilidade MCT .....	93
Figura 53 - Gráfico de classificação MCT .....	94
Figura 54 - Mapa de suscetibilidade a erosão .....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de erosão e os seus agentes causadores.....	21
Tabela 2 - Fatores que influenciam na erodibilidade dos solos.....	27
Tabela 3 - Características dos grupos MCT quanto a erosão. ....	42
Tabela 4 - Níveis de cartas geotécnicas no planejamento urbano. ....	46
Tabela 5 - Principais metodologias de mapeamento geotécnico.....	47
Tabela 6 - Simbologia simplificada das classes pedológicas. ....	51
Tabela 7 - Geologia simplificada. ....	51
Tabela 8 - Frações granulométricas.....	83
Tabela 9 - Densidade real das partículas. ....	85
Tabela 10 - Limites de consistência. ....	85
Tabela 11 - Resultados de teor de umidade natural.....	87
Tabela 12 - Valores de variação de coesão para os pontos de estudo. ..	89
Tabela 13 - Resultados de Perda de Massa por Imersão Modificado....	92
Tabela 14 - Características do solo para classificação MCT.....	95
Tabela 15 - Somatório dos critérios de erodibilidade.....	96

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AQPsq Areia Quartzosa Podzoliza de substrato sedimentos quaternários

AQsq Areia Quartzosa de substrato sedimentos quaternários

BH Bacia Hidrográfica

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEMPAS Carta De Extensão Do Menor Percurso Da Agua Superficial

CECCA Centro De Estudos Cultura e Cidadania

CESAD Centro de Coleta, Sistematização, Armazenamento e Fornecimento de Dados

Cde Cambissolo, depósito de encosta

Cg Cambissolo de substrato granito

CP Corpo de Prova

DAEE Departamento de águas e Energia Elétrica

Datum Modelo Matemático Teórico da Representação da Superfície da Terra ao Nível do Mar

EESC Escola de Engenharia de São Carlos

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPAGRI Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão

ESEC Estação Ecológica

GPS Global Positioning System

IAEG Internacional Association Of Engineering Geology.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPUF Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis

IPR Instituto de Pesquisas Rodoviárias

IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LAMGEO Laboratório de Mapeamento Geotécnico  
LNEC Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
MCT Miniatura Compactada Tropical  
NBR Norma Brasileira Regulamentadora  
PUCE Pattern, Unity, Component, Evaluation  
PVg Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito  
PZsq Podzol Hidromórfico +Areias Quartzosas  
Hidromórficas de substrato sedimentos quaternário  
Rg Litólico de substrato granito  
RS Rio Grande do Sul  
RUSLE Revised Universal Soil Loss Equation  
SC Santa Catarina  
SIG Sistemas de Informações Geográficas  
SP São Paulo  
SPT Standard Penetration Test  
SUCS Sistema Unificado de Classificação dos Solos  
TIN Irregular Triangulated Network  
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina  
UFRGS Universidade Federal de Rio Grande do Sul  
UFRJ Universidade Federal de Rio de Janeiro  
USDA Departamento de Agricultura dos Estados Unidos  
USLE Universal Soil Loss Equation  
USP Universidade de São Paulo  
WEPP Water Erosion Prediction Project  
WGS 84 World Geodetic System 1984

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.2 OBJETIVO GERAL .....	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1. EROSÃO.....	20
2.1.1. Fases da erosão hídrica .....	21
2.1.2. Fatores controladores dos processos erosivos.....	25
2.2. ERODIBILIDADE.....	26
2.2.1. Ensaio para estimar a erodibilidade.....	28
2.3. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO .....	45
2.3.1. Metodologias de mapeamento geotécnico .....	47
2.3.2. Aplicação do Mapeamento Geotécnico para elaboração de cartas de suscetibilidade à erosão.....	55
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	57
3.1. ILHA DE SANTA CATARINA .....	57
3.2. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RATONES .....	58
3.3. GEOLOGIA ÁREA DE ESTUDO .....	61
3.4. MAPA GEOTÉCNICO .....	62
3.5. HISTORIA DA BACIA DO RIO RATONES .....	64
3.6. ÁREA DE ESTUDO .....	65
<b>4. MÉTODO</b> .....	66
4.1. TRABALHO DE CAMPO.....	68
4.1.1. Escolha dos pontos de coleta .....	68
4.1.2. Coleta de amostras .....	68
4.2. ENSAIO DE LABORATÓRIO .....	73
4.2.1. Caracterização física dos solos .....	73
4.2.2. Ensaio de cisalhamento direto.....	75

4.2.3.	Ensaio de Infiltrabilidade (Critério de Erodibilidade MCT)	77
4.2.4.	Ensaio de perda de massa por imersão modificado (Critério de Erodibilidade MCT).....	78
4.2.5.	Classificação MCT – Método expedito das pastilhas...	79
4.3.	CRITÉRIO DE ERODIBILIDADE GERAL .....	80
4.4.	ETAPA DE GEOPROCESSAMENTO .....	82
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>83</b>
5.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA .....	83
5.1.1.	Análise granulométrica .....	83
5.1.2.	Densidade real das partículas .....	84
5.1.3.	Limites de consistência .....	85
5.1.4.	Teor de Umidade Natural .....	87
5.2.	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO .....	87
5.3.	CRITÉRIO DE ERODIBILIDADE MCT .....	90
5.3.1.	Infiltrabilidade.....	90
5.3.2.	Perda de massa por imersão modificado .....	92
5.3.3.	Resultado Critério de Erodibilidade MCT .....	93
5.4.	CARACTERIZAÇÃO MCT-MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS .....	93
5.5.	CRUZAMENTO DOS RESULTADOS E GEOPROCESSAMENTO .....	96
5.5.1.	Mapa de suscetibilidade a erosão .....	97
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>99</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES</b> .....	<b>100</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>101</b>
	<b>ANEXO A</b> .....	<b>107</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Florianópolis, assim como todo o Brasil, viveu uma grande transformação urbana nas últimas décadas. Carente de infraestrutura, diferentes tipos de obras rodearam e ainda rodeiam as cidades brasileiras. No caso da capital catarinense, mais do que diferentes obras de infraestrutura, a urbanização, com a chegada de milhares de habitantes na ilha, fez com que o crescimento desordenado tomasse conta da capital. Tais obras são feitas com pouco estudo de viabilidade e de maneira emergencial.

Problemas ambientais surgem quando obras tanto residenciais, comerciais e de infraestrutura são feitas desordenadamente. Casos como cheias em rios, deslizamentos de encostas e perda de biodiversidade são os problemas mais comuns quando são citados problemas ambientais derivados de construções civis.

Derisio (2000) enfatiza a importância do solo na natureza e sua utilização pelo homem, estes usos provocam alterações no meio ambiente como por exemplo, a construção civil incide na urbanização e na ocupação do solo (a exploração do solo resulta na remoção de grandes quantidades de materiais e alteração da topografia).

Segundo Miranda (2005), o principal dano decorrente da utilização do solo é o aumento da suscetibilidade à erosão, uma vez que causa alterações no relevo, riscos as obras civis, e gera assoreamento dos rios. Como consequências destes processos, ocorrem as inundações/alagamentos e as alterações dos cursos de água.

Na era moderna, a espécie humana tem evoluído o seu conhecimento na área de engenharia geotécnica, por meio de numerosas pesquisas para prevenir as consequências dos eventos desastrosos. Estas pesquisas buscam melhorias técnicas, novas formas de mapeamento, para conhecimento total do comportamento mecânico dos solos nas áreas de risco (ANDRADE, 2017).

O mapeamento geotécnico pode ser utilizado como uma ferramenta para representar em apenas um mapa as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento dos diferentes tipos de solos presentes em uma área, possibilitando assim, a sua aplicação em projetos ambientais e de engenharia.

A região costeira do estado de Santa Catarina apresenta um alto risco de ocorrência de desastres naturais, devido às condições regionais

climáticas, pedológicas, geológicas, geomorfológicas e pelo uso da terra (CEPED UFSC, 2009).

Assim, trabalhos que tem como objetivo a análise de suscetibilidade à erosão são de extrema importância para direcionar o uso e ocupação de áreas de risco. Com base nisso, a proposta nesta pesquisa é mapear a erodibilidade de parte da bacia hidrográfica do rio Ratonés na ilha de Santa Catarina, para assim atualizar a sua caracterização geotécnica.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar e mapear a suscetibilidade à erosão dos solos residuais do bairro Ratonés e Vargem Pequena

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Definir os universos geotécnicos presentes na área, identificando os limites que separam os solos sedimentares e residuais.
- ✓ Identificar o potencial erodível de unidades geotécnicas residuais da área com base em ensaios de laboratório (Cisalhamento Direto, Critério de Erodibilidade MCT, Massa Específica, e Classificação MCT).
- ✓ Avaliar a erodibilidade dos solos na área de estudo usando um sistema de peso para cada critério de erodibilidade;
- ✓ Gerar mapa de suscetibilidade à erosão dos solos residuais do bairro Ratonés e Vargem Pequena georreferenciado no software ArcGIS.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguinte revisão visa dar uma base teórica dos temas relevantes para o estudo proposto

### 2.1. EROSÃO

O termo erosão segundo Bastos (1999) provem do latim “*erodere*”, cujo o significado é corroer. Segundo o mesmo, autor pode-se definir erosão como um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, tais como as geleiras, os rios, os mares, o vento ou a chuva.

Para Bertoni e Neto (1999) a erosão é um processo físico, onde ocorre trabalho no sentido de consumo de energia. Essa energia é gasta em todas as fases de erosão: no rompimento dos agregados do solo, no salpicamento das partículas, na turbulência da enxurrada, e no fluxo e transporte das partículas. O mesmo autor também define como um processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo causada pela água e pelo vento

A erosão, como um processo natural, é considerada um agente geológico que provoca modificação das paisagens lentamente, sua formação, segundo Infanti Junior e Fornasari Filho (1998), é comandada por dois conjuntos de fatores, ou condicionantes principais, sendo eles os naturais, que determinam a intensidade dos processos, destacando-se como mais importantes a chuva, a cobertura vegetal, o relevo, os tipos de solos e o substrato geológico; e os antrópicos, como o desmatamento, a mineração e as formas de uso e ocupação do solo (agricultura, obras civis, urbanização etc.).

De uma forma mais sucinta Bastos (1999) propõe que seja definida em duas partes:

i) Erosão geológica (ou natural): processo natural de desnudação e evolução da superfície terrestre, caracterizado pela desagregação e transporte de materiais do solo pelos agentes erosivos, de forma lenta e contínua;

ii) Erosão acelerada (ou antrópica): processo rápido e destrutivo, induzido principalmente pela ação humana, gerando desequilíbrio nas fases de erosão natural e sedimentação.

O processo erosivo quando ocorrido naturalmente não causa danos ao equilíbrio do meio ambiente, no entanto, quando o equilíbrio é quebrado e a ação antrópica iniciada, o mesmo pode causar sérios problemas não só no manejo dos recursos hídricos mas também na agricultura (LOHMANN e SANTOS, 2005).

Para Camapum de Carvalho et al. (2006), a erosão se classifica quando à forma que surgiram, geológica ou acelerada. No entanto o mais comum é se classificar em quatro grandes grupos: erosão hídrica, eólica, glacial e erosão organogênica.

Outro tipo de classificação, segundo os agentes causadores dos processos erosivos, proposto por Lal (1990) se observa na Tabela 1

Tabela 1 - Tipos de erosão e os seus agentes causadores.

Vento	Erosão Eólica			
Fluido	Água	Chuva	Erosão por impacto das gotas	
		Água de escoamento	Escoamento superficial	Erosão em sulcos
				Erosão em ravinas e boçorocas
			Erosão em condutos fluviais	
		Escoamento subsuperficial	Erosão em condutos subterrâneos	
	Oceano	Erosão costeira		
Gelo	Erosão Glacial			
Gravidade	Movimento de massa	Avalanche, Escorregamento, Solifluxão ou Rastejo		

Fonte: Lal (1990); modificado Alcântara, (1997)

### 2.1.1. Fases da erosão hídrica

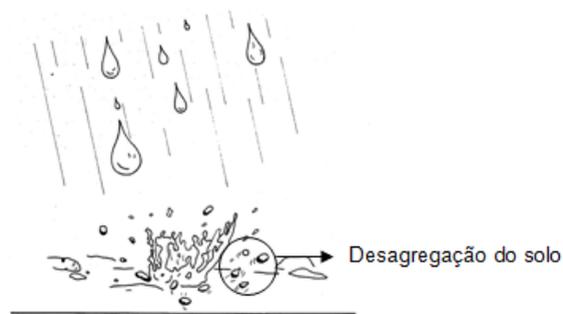
No Brasil, segundo os autores Higashi (2006) e Ide (2009), a água é o principal fator dinâmico no processo erosivo. A atuação da água pode-se perceber de várias formas sendo as principais a ação erosiva da gota de chuva, lençol subterrâneo e escoamento superficial. De acordo com Guerra et al. (2012), a erosão dos solos pela água é responsável por 56% da desertificação dos solos no mundo.

A erosão hídrica tem a chuva como agente erosivo manifestando-se em alguns casos principais: pela impacto da gota e pelo escoamento superficial da água, ambos atuam no desagregamento e no transporte das partículas. O escoamento superficial ocorre quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração do solo, formando um fluxo que no primeiro momento gera erosão laminar e posteriormente erosão em sulcos (BASTOS, 1999).

#### 2.1.1.1. Erosão pelo impacto de gota de chuva

A erosão pelo impacto de gota de chuva constitui o primeiro passo no processo de erosão hídrica. As gotas golpeiam o solo a uma alta velocidade, destacando as partículas e as movimentando a uma curta distância, como ilustra a Figura 1 (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1999). Segundo Guerra et al. (2012), uma das consequências deste tipo de erosão é a perda de capacidade de infiltração, uma vez que as gotas diminuem as partículas de solo e essas entopem os poros existentes no solo.

Figura 1 - Erosão causada pelo impacto de uma gota de chuva com o solo (efeito splash).



Fonte: IPT (1991)

#### 2.1.1.2. Erosão laminar

É uma forma de erosão dificilmente perceptível e por isso uma das mais perigosas. A erosão laminar ocorre quando forças horizontais devido a enurrada atuam sobre as partículas de solo em direção ao fluxo. Essas forças desprendem as partículas, rolando-as ou arrastando-as para fora de

sua posição (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1999). Para Camapum de Carvalho et al. (2006), a erosão laminar caracteriza-se pela remoção uniforme do solo ao longo da vertente, podendo ou não propiciar o aparecimento de sulcos.

### 2.1.1.3. Erosão linear

A erosão linear ocorre quando há escoamento superficial e as linhas de fluxo da água se concentram causando desprendimento e transporte das partículas do solo. Assim por sua vez, pequenas incisões na superfície do terreno em forma de sulcos são formadas. Posteriormente, esses sulcos evoluem formando ravinas e voçorocas (INFANTI JUNIOR e FORNASARI FILHO, 1998)

#### a) Sulcos

Os sulcos (Figura 2), segundo Camapum de Carvalho et al. (2006), são formados por canais iguais ou menores que 10 cm de profundidade e perpendiculares à curva de nível, estes produzidos pela concentração do escoamento superficial.

Figura 2 - Sulcos.



Fonte: <http://brasilescola.uol.com.br/geografia/tipos-erosao.htm>, 2017.

## b) Ravinas

As Ravinas são resultantes do aprofundamento dos sulcos, e se apresentam de forma alongada e seção em “v”, não atingindo o nível d’água (Figura 3). Normalmente, não possuem ramificações e, segundo Camapum de Carvalho et al. (2006), possuem uma profundidade entre 10 e 50 cm.

Figura 3 - Ravinas.



Fonte: O Autor (2017).

## c) Voçorocas

Voçoroca ou Boçoroca, do tupi “*mboso’roka*” (Figura 4), se define como uma ravina de grandes dimensões originada pela grande concentração do fluxo de água superficial, muitas vezes causada por ação antrópica combinada com o fluxo superficial e subterrâneo Bastos (1999). Pode também ser apresentada como o último estágio da evolução da erosão hídrica, sendo caracterizada pelo avanço em profundidade das ravinas até atingirem o lençol freático (IPT, 1991).

Figura 4 - Voçoroca de grandes dimensões com afloramento do lençol freático no município de São Francisco de Assis/RS.



Fonte: Basso (2013).

### 2.1.2. Fatores controladores dos processos erosivos

São vários os fatores que acarretam o desenvolvimento da erosão. Para Bastos (1999), embora possa parecer de simples concepção, o fenômeno da erosão hídrica destaca-se pela complexidade dos mecanismos envolvidos, onde a principal causa da dificuldade no estudo é a multiplicidade e a inter-relação de fatores intervenientes no fenômeno.

Alguns autores como Bertoni e Lombardi Neto (1999), Bastos (1999), e Higashi (2006), apontam que os principais fatores naturais que controlam os processos erosivos são: o clima, o relevo, a cobertura vegetal, e as propriedades do solo.

- Fatores Climáticos: chuva, temperatura, radiação solar e vento. A chuva é, sem dúvida, o mais importante, provoca diretamente a erosão pelo impacto das gotas sobre a superfície e determina o fluxo concentrado das águas de escoamento superficial. Sua ação erosiva, chamada de erosividade, depende da distribuição pluviométrica (chuva acumulada e intensidade de chuva);

- Fatores Topográficos: declividade e o comprimento de rampa. Influem particularmente no escoamento superficial: terrenos com maiores declividades e comprimentos de rampa apresentam maiores velocidades de escoamento superficial e, conseqüentemente, maior capacidade erosiva;
- Fator Vegetação (cobertura vegetal): tem efeitos na interceptação da chuva e no decréscimo da velocidade do escoamento superficial. Mudanças no regime de escoamento superficial e subterrâneo são observados como consequência do desmatamento e alteração nas formas de uso do solo. Por outro lado, as raízes afetam propriedades do solo relacionadas à erodibilidade;
- Fator Solo: reúne o efeito das propriedades do solo que determinam a velocidade de infiltração da água da chuva e que determinam a resistência à erosão pelas gotas e pelo escoamento superficial. No fator solo encontra-se representada a erodibilidade dos solos, o tema principal deste trabalho de pesquisa.

Para Camapum de Carvalho et al. (2006), os fatores moduladores dos processos erosivos são: o clima e o regime de precipitação, o grau e o tipo de intervenção no meio ambiente, o tipo de cobertura do solo, a taxa de impermeabilização/infiltração, o tipo de solo, a geomorfologia, a geologia, a posição do lençol freático, e a qualidade da água.

## 2.2. ERODIBILIDADE

O termo erodibilidade pode ser definido como a vulnerabilidade ou a suscetibilidade de um solo à erosão, que é a recíproca de sua resistência (HUDSON, 1981 apud ALBURQUERQUE et al., 2007). Para Bastos (1999) pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. A Tabela 2 apresenta de uma forma resumida alguns desses fatores.

Tabela 2 - Fatores que influenciam na erodibilidade dos solos.

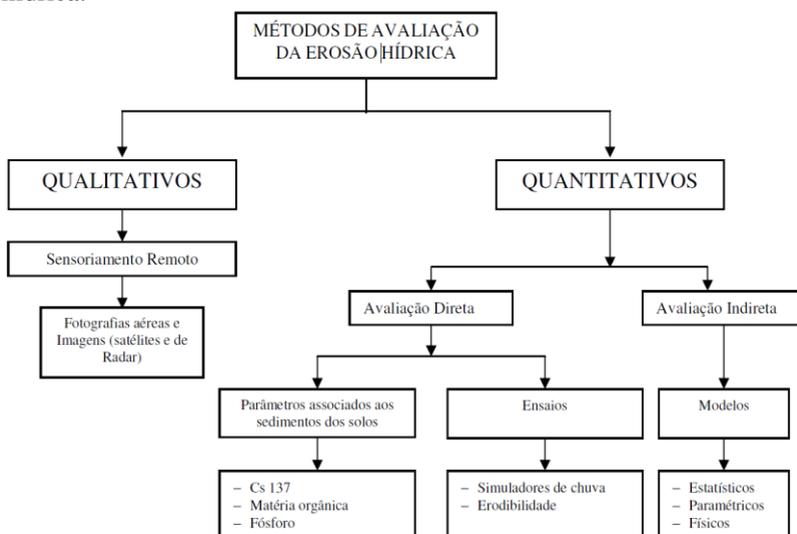
FATORES	INFLUÊNCIA
<b>Físicos:</b> • Textura • Estrutura	• Influi no destacamento e carreamento das partículas do solo; • Determina a facilidade com que o solo é dispersado; • Determina a força limite necessária para o destacamento.
	• Condiciona a formação de agregados que resistem a dispersão, aos efeitos da água de escoamento e ao destacamento;
	• Influi no grau de agregação e distribuição de agregados estáveis;
	• A rugosidade superficial dos agregados influencia a retenção d'água;
	• Condiciona a formação de crosta superficial determinante de alta taxa de escoamento superficial.
<b>Mecânicos:</b> • Resistência ao cisalhamento	• Importante no destacamento de partículas por impacto de gotas ou escoamento superficial; • Influencia o rolamento e deslizamento de grãos;
<b>Hidrológicos:</b> • Retenção d'água • Infiltração e permeabilidade	• A umidade inicial do solo influencia a resistência ao destacamento das partículas;
	• As poropressões geradas no processo influenciam a resistência ao cisalhamento do solo.
	• A taxa de infiltração e a permeabilidade do solo determinam o volume de escoamento superficial.
<b>Químicos, Biológicos, e Mineralógicos:</b> • Matéria orgânica • Argilominerais	• Influencia a textura e as propriedades de retenção e distribuição d'água;
	• Fortalece os agregados e os micro-agregados, aumentando suas resistências à desagregação e à dispersão.
	• Influenciam a estrutura e a resistência do solo;
	• Interação com a matéria orgânica, influenciando a estabilidade de agregados.
<b>Características do Perfil:</b> • Morfologia do perfil • Substrato rochoso	• Influencia o escoamento superficial pelas mudanças nas propriedades hidrológicas dos diferentes horizontes.
	• As características litológicas do substrato rochoso, associadas à intensidade do intemperismo e à natureza da alteração e grau de fraturamento, condicionam a erodibilidade dos solos saprolíticos.

Fonte: adaptado de Lal, 1990 apud Bastos (1999).

### 2.2.1. Ensaios para estimar a erodibilidade

A forma mais comum de se analisar a erodibilidade dos solos tem sido por meio de suas características físicas e químicas e de alguns condicionantes externos. Para conhecer a erodibilidade de um determinado tipo de solo, portanto, é preciso identificar sua granulometria, plasticidade, teor de matéria orgânica, estrutura, permeabilidade e porosidade. Porém, a estimativa do processo erosivo nos solos não é feita única e exclusivamente através de ensaios geotécnicos. De acordo com Almorox et al. (1994) apud Higashi (2006), existe a possibilidade de avaliar este processo através de métodos divididos em qualitativos e quantitativos, como mostra o diagrama da Figura 5

Figura 5 - Esquemática dos métodos de avaliação de erosão hídrica.



Fonte: Almorox et al. (1994) apud Higashi (2006).

Existem na literatura diversos ensaios para estimar a erodibilidade, destacam-se os ensaios de Inderbitzen, Critério de Erodibilidade MCT, e Cisalhamento Direto, como avaliação direta, Classificação MTC, e Densidade Real das Partículas como avaliação indireta deste fenômeno.

**a) Critério de erodibilidade MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1979)**

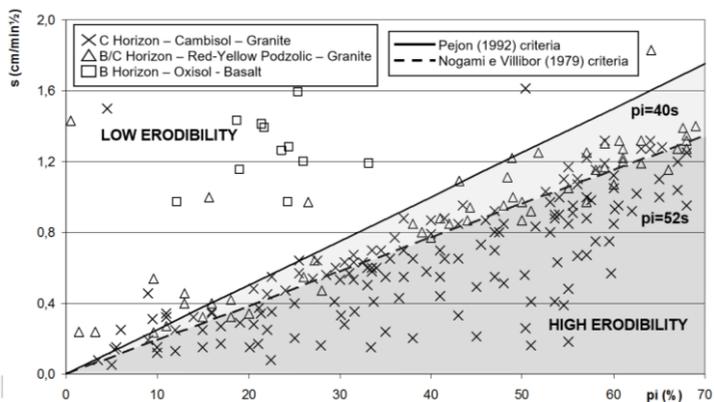
Tendo em vista que maioria dos ensaios que visa a determinação de erodibilidade dos solos serem idealizados para perfis de solos de outros países, Nogami e Villibor (1979) propuseram um critério que realiza uma avaliação quantitativa da erodibilidade dos solos tropicais.

O critério de erodibilidade MCT é fundamentado em dois principais ensaios: Infiltrabilidade, no qual é obtido o coeficiente de sorção ( $s$ ), e o ensaio de perda de massa por imersão (ensaio de erodibilidade específica) que indica o percentual de perda do solo seco em massa em relação ao peso seco total da amostra, gerando o coeficiente ( $pi$ ).

A partir dos resultados destes dois ensaios, Nogami e Villibor (1979) estabelecem que a relação  $pi/s = 52$  é o limite do critério de erodibilidade, onde solos que possuem  $pi/s > 52$  são considerados erodíveis e os solos com  $pi/s < 52$  são considerados de média a baixa erodibilidade. O mesmo critério de classificação foi proposto de maneira gráfica por Nogami e Villibor (1995) (Figura 6), sendo baseado em um número maior de ensaios.

O valor limite do critério de erodibilidade de Nogami e Villibor (1995) foi modificado por Pejon (1992) (apud VILAR e PRANDI, 1993), assumindo o valor de  $pi/s = 40$ .

Figura 6 - Critério de classificação gráfica para a metodologia MCT.



Fonte: Higashi et al. (2012).

### i. Ensaio de infiltrabilidade

Segundo Bastos (1999), nas regiões úmidas de climas tropicais e subtropicais devido à forte evapotranspiração e à boa drenagem da maioria dos solos residuais, a infiltrabilidade é mais representativa do que a permeabilidade saturada.

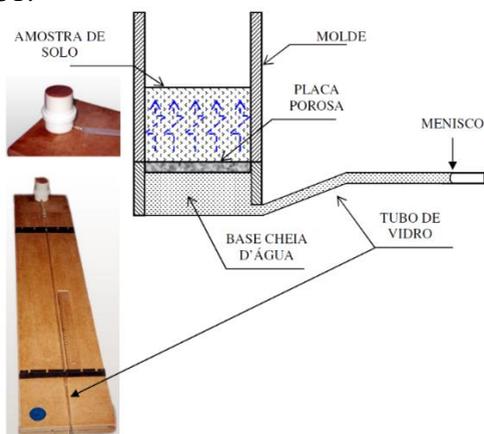
Conforme Nogami e Villibor (1995) o ensaio de infiltrabilidade proposto na metodologia MCT destina-se a quantificar a velocidade de ascensão capilar em amostras de solo indeformadas.

O procedimento do ensaio consiste em coletar uma amostra cilíndrica de determinado tipo de solo, confinando-a lateralmente em um anel biselado de PVC ( $d=5\text{cm}$  e  $h=5\text{cm}$ ), e dispoñdo-a sobre uma pedra porosa de granulação aberta saturada. A umidade da amostra deve ser previamente estabelecida.

A base, contendo a pedra porosa e água, é conectada ao tubo capilar onde através do fenômeno de capilaridade ocorre um fluxo ascendente. Este tubo deve apresentar um diâmetro de 6mm e são dispostos horizontalmente ao mesmo nível da base da amostra, de forma que não seja imposta nenhuma carga hidráulica.

A distância capilar percorrida pelo menisco é medida nos intervalos de tempo (0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 min e assim por diante), até ocorrer a estabilização do movimento. A Figura 7 ilustra o equipamento.

Figura 7 - Equipamento do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.



Fonte: Higashi (2006).

Com as leituras da distância percorrida pelo menisco no tubo capilar ( $L$ ), e o tempo cronometrado ( $t$ ), é plotado um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 8.

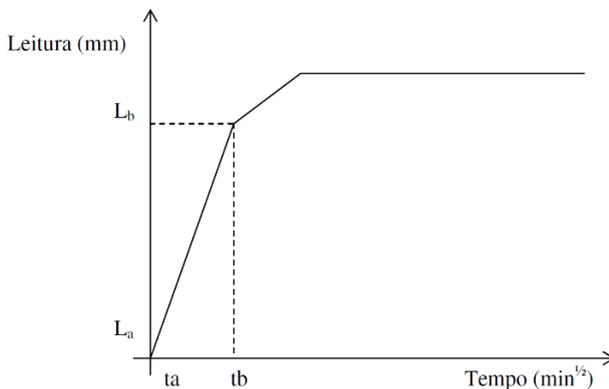
O gradiente do trecho retilíneo inicial representa o coeficiente de sorção  $s$  (em  $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ):

$$s = \frac{(L_b - L_a) \cdot S}{10(tb - ta) \cdot A} \quad [1]$$

Onde:

- $L_b$  e  $L_a$  são as leituras das distâncias no tubo capilar;
- $tb$  e  $ta$  são os tempos referentes às leituras;
- $S$  é a seção do tubo capilar;
- $A$  é a área da seção da amostra.

Figura 8 - Comportamento típico do ensaio de infiltrabilidade da metodologia MCT.



Fonte : Bastos (1999).

- ii. Ensaio de perda de massa por imersão modificado (Erodibilidade Específica)

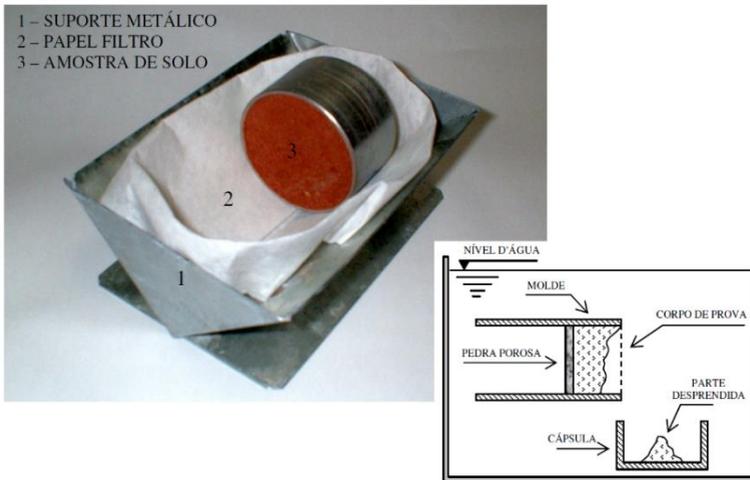
O ensaio de Perda de Massa por Imersão Modificado é muito semelhante ao apresentado na metodologia MCT para a obtenção do parâmetro de classificação dos solos, onde este determina o potencial do solo em desagregar quando imerso em água (HIGASHI, 2006).

O termo modificado é relativo às mudanças que foram introduzidas na preparação das amostras para o ensaio. Normalmente, as amostras são

extraídas parcialmente de seus moldes, de maneira que fiquem para fora do anel 10mm. No ensaio modificado isto não ocorre, a face da amostra coincidente com o fim do anel, como mostra a Figura 9.

Para realizar o ensaio, uma amostra de solo indeformada, em seu estado natural, é coletada em um anel metálico ( $h=2,5\text{cm}$  e  $d=5\text{cm}$ ). Um lado da amostra coincide com o final do anel, enquanto o outro é vedado por uma pedra porosa que não impede a entrada de água. Este corpo de prova, é imerso em água horizontalmente por um período de 20 horas. O material que se desagrega do corpo de prova é recolhido por um papel filtro, que envolve todo o conjunto e pesado no final (HIGASHI, 2006).

Figura 9 - Equipamento do ensaio perda de massa por imersão modificado da metodologia MCT.



Fonte: Higashi (2006).

A erodibilidade específica ( $p_i$ ) é mensurada pelo percentual de perda de solo seco em massa em relação ao peso seco total da amostras.

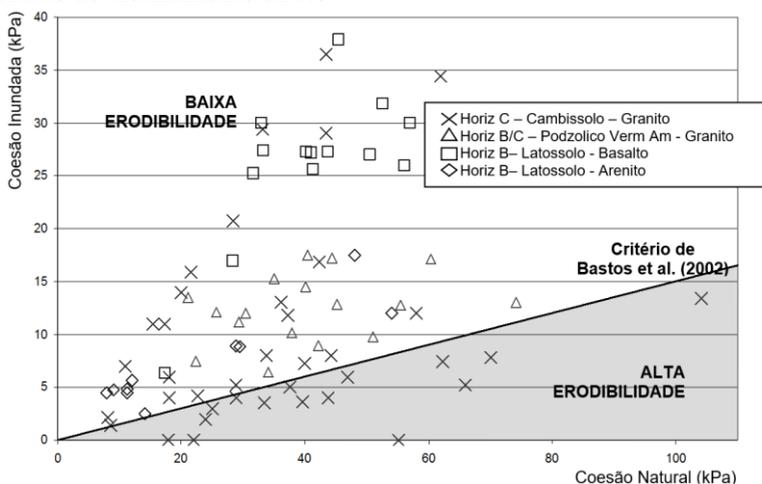
### b) Critério de erodibilidade por ensaio de cisalhamento direto (BASTOS et al., 2001)

Bastos et al. (2001) propuseram uma metodologia para determinar a potencial erodibilidade dos solos tropicais por meio da análise da perda de coesão em amostras de solo submersas em ensaios de cisalhamento direto. O estudo mostra, por meio de comparação com outros métodos,

que os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam a maior perda de coesão com o umedecimento e inundação, logo, são mais vulneráveis ao destacamento de partículas por cisalhamento hidráulico.

De acordo com Bastos et al. (2001), uma mudança na coesão  $\Delta c$  [Eq 2] maior ou igual a 85%, produzida pela perda da sucção, indica que o solo é potencialmente erodível. Higashi et al. (2012) desenvolveu testes em diversos tipos de solos e os classificaram utilizando o critério de Bastos et al. (2001), como se observa na Figura 10.

Figura 10 - Resultados de ensaio de erodibilidade baseado no critério de cisalhamento direto.



Fonte: Higashi et al. (2012).

$$\Delta c = \frac{(c_{nat} - c_{inu})}{c_{nat}} \quad [2]$$

Onde,  $c_{nat}$  é o valor da coesão no teor de umidade natural e  $c_{inu}$  é o valor da coesão para a amostra inundada.

- Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto está baseado nas equações de Mohr-Coulomb que descrevem as propriedades de resistência dos solos. A medida da resistência ao cisalhamento visa a determinação da

envoltória de ruptura, a relação entre as tensões normal e cisalhante no estado de ruptura.

Das (2002) define a resistência ao cisalhamento do solo como a resistência interna por área unitária necessária para resistir à rupturas e deslizamentos ao longo de um plano qualquer no seu interior. Desta forma, representa um parâmetro fundamental para que sejam analisados problemas como, por exemplo, capacidade de carga de fundações e estabilidade de taludes.

Segundo Das (2002), a medida de resistência ao cisalhamento do solo é obtida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, e dada pela equação 3:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad [3]$$

Onde:

$c$  = intercepto coesivo;

$\varphi$  = ângulo de atrito interno;

$\sigma$  = tensão normal ao plano de ruptura;

$\tau_f$  = resistência ao cisalhamento.

Cabe lembrar que somente as pressões efetivas mobilizam a resistência ao cisalhamento, e que em um solo saturado, a tensão normal total é a soma da tensão efetiva ( $\sigma'$ ) e da pressão de água ( $\mu$ ):

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad [4]$$

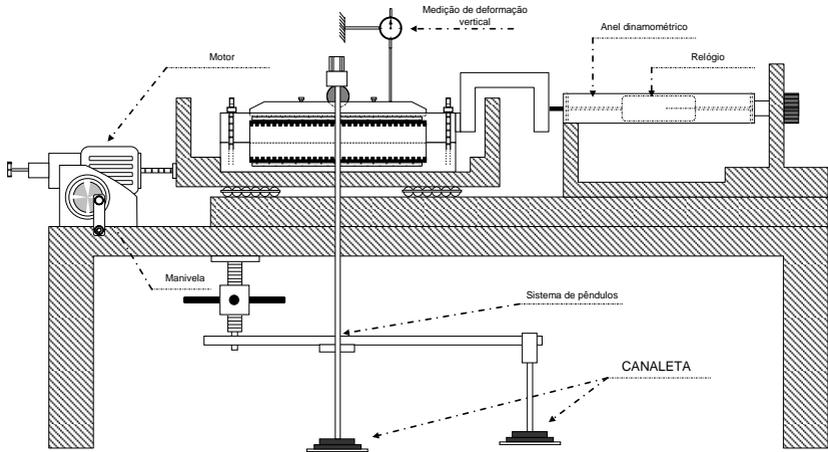
Assim, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb passa a ser:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad [5]$$

Onde  $c'$  é o intercepto coesivo efetivo e  $\varphi'$  o ângulo de atrito efetivo.

No ensaio de cisalhamento direto a amostra de solo é moldada e colocada em uma caixa dividida horizontalmente ao meio como se observa na Figura 11. Normalmente, o ensaio é dividido em duas etapas, a primeira chama-se consolidação, onde o corpo de prova recebe uma carga normal em condições drenadas até atingir a estabilização do volume. A segunda etapa é a de cisalhamento, onde com a movimentação da caixa inferior, o corpo de prova é empurrado a uma velocidade constante até se romper. Nesta segunda etapa mede-se a tensão exercida para se romper o corpo de prova gerando assim o gráfico tensão *versus* deformação.

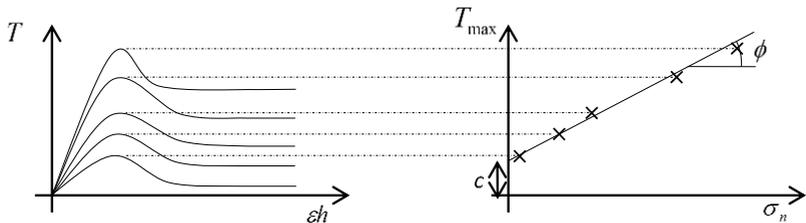
Figura 11 - Equipamento de cisalhamento direto.



Fonte: Rosniecek e Imai (2013).

Repetindo o ensaio nas mesmas condições, porém, mudando a carga normal aplicada na primeira etapa, é possível construir a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb (Figura 12), na qual é possível obter o parâmetro de coesão e ângulo de atrito.

Figura 12 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb



Fonte: Rosniecek e Imai (2013).

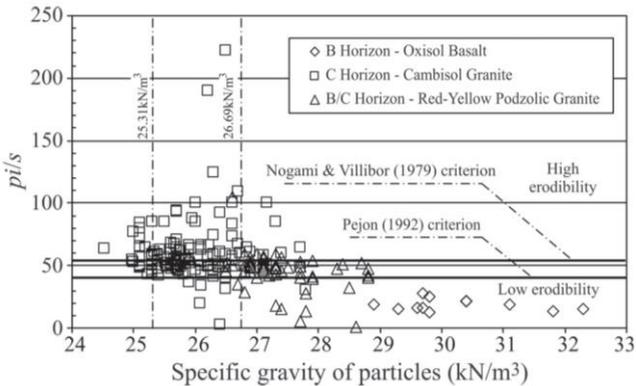
É possível ainda citar a simplicidade, facilidade na moldagem de amostras, e rapidez quando realizado em solos permeáveis, como as principais vantagens do ensaio de cisalhamento direto para a obtenção de estimativas de erodibilidade.

**c) Critério de erodibilidade baseado na densidade real das partículas (HIGASHI et al.,2012)**

Baseado em comparações de resultados dos ensaios de perda de massa por imersão modificado e infiltrabilidade, Higashi et al. (2012) estabeleceu uma relação com a densidade real das partículas ( $\rho_s$ ) para estimar a erodibilidade em solos.

Pejon e Silveira (2007) ressaltam que há uma relação entre os valores de densidade real das partículas contidas no intervalo de 2,51 a 2,7 g/cm<sup>3</sup> com índice de erodibilidade elevado, para Higashi et al. (2012), esse intervalo encontra-se entre 2,53 e 2,67g/cm<sup>3</sup>, como se observa na Figura 13.

Figura 13 - Relação entre densidade real das partículas e critério de erodibilidade MCT.



Fonte: Higashi et al. (2012).

Poucos trabalhos utilizaram esse critério como base para suas pesquisas, no entanto, o presente trabalho visa aumentar a base de dados para melhor entender a relação entre densidade real das partículas e erodibilidade.

**d) Critério de erodibilidade baseado na classificação MCT – método expedito das pastilhas (NOGAMI e COZZOLINO, 1985)**

De acordo com Sant’Ana (2002), a classificação MCT mostra-se muito adequada aos solos dos países tropicais. Porém, a crítica referente

à complexidade dos seus ensaios, a experiência adquirida dos profissionais de laboratório com a metodologia tradicional, os investimentos em novos equipamentos e o próprio custo desses ensaios, fizeram com que os pesquisadores buscassem alternativas simplificadas que, igualmente, atingissem os objetivos desejados. Assim, torna-se mais prático o uso de um método expedito, rápido e de fácil execução, o Método Expedito das Pastilhas.

Inicialmente usado e estudado por Nogami e Cozzolino em 1985, com base na metodologia MCT, este método vem sendo estudado por outros pesquisadores, como Nogami e Villibor (1994 e 1996), Fortes et al. (2002), Godoy e Bernucci (2000), entre outros.

Para a execução do ensaio, deve-se peneirar aproximadamente 80g de material passante na peneira nº 40 (0,42mm) de uma amostra previamente seca ao ar.

Adiciona-se água a este material e espatula-se intensamente até obter consistência uma adequada (aproximadamente 400 vezes segundo Higashi (2006)). Esta consistência é representada pela penetração de 1 mm do mini-penetrômetro em uma esfera previamente produzida pela mão.

Da pasta obtida pela mistura de solo e água, determina-se o seu teor de umidade e retira-se a quantidade de material suficiente para moldar uma esfera de 1 cm de diâmetro, aproximadamente. Esta pasta irá preencher um anel de metálico que repousará previamente na placa de teflon. A energia para a colocação e acomodação do material no interior do anel, deverá ser tal que permita o preenchimento de modo homogêneo de todos os espaços do anel, inclusive a parte inferior, e para que a superfície fique plana.

Preenche-se um mínimo de quatro anéis para cada amostra. Do material restante, confeccionam-se duas esferas de cerca de 20 mm de diâmetro. Todo o material, anéis e esfera deverão ser secos em estufa a 60° C durante um período de 6 horas, no mínimo.

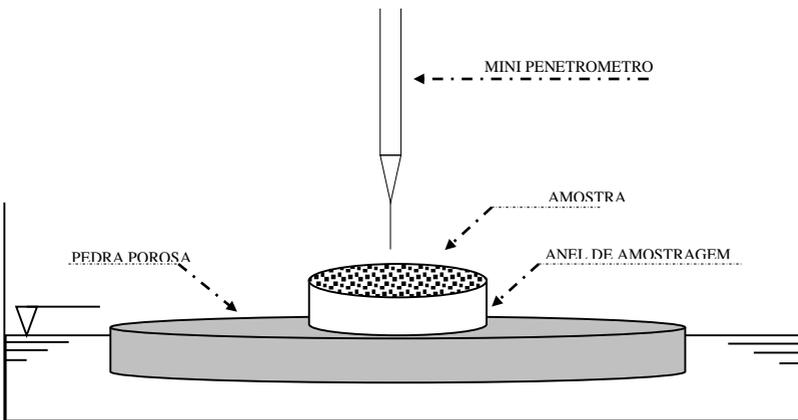
As medidas e observações para a classificação do solo são realizadas após a retirada dos anéis e das esferas da estufa, medindo-se radialmente após equilíbrio térmico, a contração do diâmetro do solo em relação ao diâmetro interno do anel. Isto produzirá um valor médio de contração diametral em milímetros.

Em seguida, os anéis e respectivos materiais são colocados sobre papel filtro em uma pedra porosa saturada até que a carga hidráulica atinja (-) 5 mm. Anota-se o tempo decorrido até que a superfície das amostras fique tomada pela frente de saturação. O material permanece em repouso

sobre a pedra porosa durante, pelo menos, 2 horas, período em que as alterações observadas na superfície das pastilhas como trincamentos, inchamentos e abaulamentos são anotadas.

Após este tempo, mede-se a profundidade alcançada pela penetração do mini-penetrômetro na pastilha do solo (Figura 14), tomando-se o cuidado para que este se mantenha na posição vertical e atue sob peso próprio, após ser cuidadosamente disposto em contato com a superfície do solo.

Figura 14 - Esquema do ensaio de classificação MCT



Fonte: Rosniecek e Imai (2013).

Deve-se observar que o posicionamento do mini-penetrômetro deve ser o mais afastado possível dos bordos do anel, e em caso de mais uma penetração em uma mesma pastilha, deve-se manter distância entre as penetrações convenientes.

Das duas esferas de 20 mm de diâmetro confeccionadas e secas em estufa, a primeira é imersa em água, observando o seu comportamento, que, segundo Godoy (1997) apud Higashi (2006), poderá ser um dos seguintes:

- a esfera se desagrega nos primeiros 10 segundos de imersão e as partículas de solo resultantes podem ser identificadas;
- a esfera se desagrega em partículas em até 2 horas e as partículas de solo podem ser identificadas;
- a esfera se rompe-se em blocos milimétricos;

- a esfera de solo se trinca ou não se altera.

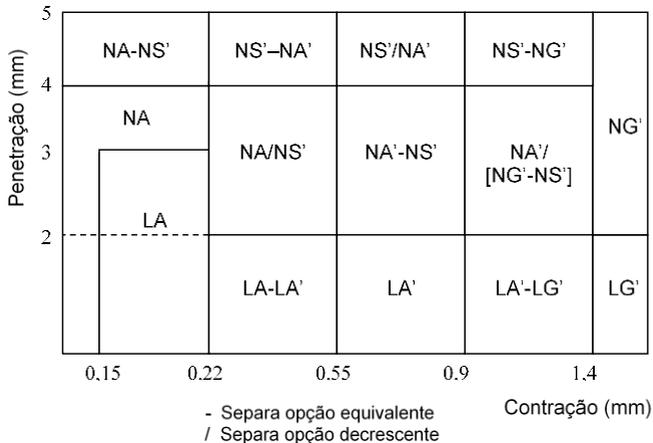
A outra esfera será submetida ao esmagamento com o auxílio do polegar, podendo ocorrer as seguintes situações:

- a esfera é quebrada sob pressão do polegar e indicador;
- a esfera é quebrada sob pressão do dedo polegar em uma superfície plana;
- a esfera não se quebra.

Os dados obtidos de contração da pastilha de solo e penetração do mini-penetrômetro, deverão ser inseridos no gráfico da Figura 15. O símbolo “-“ utilizado em alguns casos separa opções equivalentes quanto ao grupo de solo, e o “/”, separa opções com menor grau de incidência.

Com os dados de contração diametral e penetração deve-se entrar na carta apresentada na Figura 15 e determinar a classe à qual a amostra de enquadra.

Figura 15 - Gráfico para determinação expedita MCT.



Fonte: Nogami e Villibor (1994).

Onde:

LG': argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas;

LA': areias argilosas lateríticas;

LA: areias com pouca argila laterítica;

NG': argilas, argilas siltsosas e argilas arenosas não-lateríticas;

NS': siltes caulíniticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos;

NA': areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas;

NA: areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não-lateríticos.

A descrição sucinta de alguns grupos, de acordo com Nogami e Villibor (1995), é apresentada a seguir.

### I. Grupo NG'

Os solos típicos do grupo NG' compreendem, sobretudo, os saprolíticos argilosos, que derivam de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos, siltitos) ou cristalinas, pobres em quartzo e ricas em anfibólios, piroxênios e feldspatos cálcicos. Classificam-se, nesse grupo, os solos superficiais pedogenéticos não lateríticos, como os vertissolos, que compreendem o massapê da Bahia, bem como muitos solos transportados.

Quando compactados nas condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. Do ponto de vista da resiliência, apresentam, quando compactados, características bilineares em função da tensão desvio, sendo pouco dependentes da pressão de confinamento.

O emprego dos solos desse grupo se prende às restrições consequentes da sua elevada plasticidade, expansibilidades e compressibilidade e contração quando submetidos à secagem.

### II. Grupo NA

Os solos desse grupo são compostos por areias, siltes e misturas de areias e siltes, nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica (sericita principalmente). Praticamente, não possuem finos argilosos coesivos e siltes caulíniticos.

Os tipos genéticos representativos são os solos saprolíticos, que podem estar associados a rochas sedimentares ou metamórficas. Contudo, alguns solos não tropicais de origem pedogenética ou transportada classificaram-se também nesse grupo.

Há a tendência de que as areias e siltes quartzosos não sejam expansivos ou muito pouco expansivos, ao passo que as variedades micáceas podem ser altamente expansivas. Quando compactados, possuem capacidade de suporte de pequena a média e, geralmente, são muito erodíveis.

Os solos desse grupo estão no limite de aplicabilidade da metodologia MCT e, de maneira geral, quando não micáceos, são solos de comportamento estudado na Mecânica dos Solos tradicional.

### III. Grupo LA

Incluem-se nesse grupo sobretudo areias com poucos finos de comportamento laterítico, típicas do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente como areias quartzosas e regossolos.

A porcentagem de finos lateríticos dos solos desse grupo é muito baixa, de maneira que mesmo quando devidamente permeáveis, pouco coesivo e pouco contráteis quando secos, características essas pouco desejáveis para base de pavimentos econômicos nas regiões tropicais, apesar de possuírem elevada capacidade de suporte e módulos de resiliência relativamente elevados.

### IV. Grupo LA'

Os solos desse grupo são tipicamente arenosos e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente no Brasil por latossolos arenosos e solos podzólicos ou podzolizados arenosos (textura média, segundo metodologia adotada nos mapeamentos pedológicos). Esses solos, além da presença dos matizes vermelho e amarelo, que dão cores firmes ao solo (pouco ou não erodíveis), apresentam comportamento de trincamento quando expostos às intempéries.

Quando devidamente compactados adquirem elevada capacidade de suporte, elevado módulo de resiliência, baixa permeabilidade, pequena contração por perda de umidade, razoável coesão e pequena expansibilidade por imersão em água, propriedades essas que podem possibilitar o uso em bases e sub-bases de pavimentos.

Em condições naturais, esses solos possuem baixa massa específica aparente seca, baixa capacidade de suporte e podem ser colapsíveis por imersão em água. Excepcionalmente, foram constatados solos desse grupo e perfis naturais pedologicamente não classificáveis como lateríticos e, nessas condições, sua cor poderá ser de branca a cinzenta.

### V. Grupo LG'

Os integrantes mais frequentes desse grupo têm sido as argilas e as argilas arenosas. Esses solos constituem o horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente por latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas.

Quando apresentam percentagem relativamente elevada de fração areia, podem apresentar propriedades similares às dos solos do grupo LA', possuindo, entretanto, menor capacidade de suporte, menores módulos de resiliência, maior plasticidade, menor massa específica aparente seca e maior umidade ótima para mesma energia de compactação e maior contração por perda de umidade. Por outro lado, são mais resistentes à erosão hidráulica quando compactados apropriadamente.

A colapsibilidade em estado natural, por imersão em água, é uma propriedade frequentemente observada nos solos desse grupo, sobretudo quando apresentam agregados bem desenvolvidos. Nessa condição, apresentam-se altamente permeáveis, apesar de serem granulometricamente argilas e, devido a isso, costumam resultar em taludes de corte poucos sujeitos à erosão pluvial.

Para classificação da erosão Bastos (1999), baseado nas considerações de Nogami e Villibor (1995), estabelece as características dos tipos de solo da classificação MCT quanto a erosão, que podem ser observados na Tabela 3

Tabela 3 - Características dos grupos MCT quanto a erosão.

GRUPO MCT	NA	NA'	NS	NG'	LA	LA'	LG'
Erodibilidade	B,M,E	B,M,E	B,M,E	M,E	B	B	B
Formas de erosão	Desag. E	Desag.M	Sulcos E	Sulcos e Desag. E	Firme	Desag. B	Desag. B

Fonte: Nogami e Villibor (1994) modificado por Bastos (1999).

Abrev.: B = baixo; M = médio; E = elevado; desag. = desagregações  
 \* referem-se à erosão de taludes de corte em solos isotrópicos e homogêneos, inclinados de 45° a 60°, em condições climáticas do estado de São Paulo.

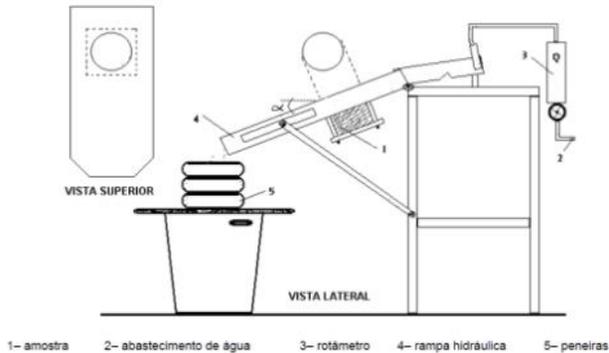
#### e) **Ensaio de Inderbitzen** (INDERBITZEN, 1961)

Proposto por Inderbitzen (1961) o ensaio consiste em um dos mais simples e mais empregados no meio geotécnico para estimativa de erodibilidade dos solos. O método possibilita avaliar a erodibilidade através da determinação da taxa de erosão do solo sob condições variáveis de escoamento, inclinação da superfície e teor de umidade do solo.

O ensaio consiste em submeter uma amostra de solo indeformada nivelada na superfície de uma rampa, à ação da água, controlando o fluxo

até um máximo de 2h de duração. A perda de solo depende do tipo de solo, das condições do ensaio e das características da amostra. A Figura 16 ilustra o ensaio (IDE, 2009).

Figura 16 - Esquema do equipamento de Inderbitzen.



Fonte: Bastos (1999).

Ressalta-se que este tipo de ensaio é mais indicado para canais, onde há um fluxo livre e conseqüente arraste das partículas pelo desprendimento.

#### f) **Ensaio de Inderbitzen modificado** (FREIRE, 2001)

Apresentado por Freire (2001) o ensaio de Inderbitzen modificado possui sua principal diferença na adição do “efeito splash” ao modelo.

Freire (2001) descreve que a fase de remoção de partículas (desagregação), conhecida por “erosão por splash”, ou ainda como “por salpicamento”, ocorre basicamente como um resultado das forças causadas pelo impacto das gotas de chuva. Uma gota quando bate em um solo molhado, remove partículas que estão envolvidas por uma película de água. Além das partículas serem transportadas pelo impacto das gotas de chuva, algumas são deslocadas pelo choque proporcionado por sedimentos que batem uns contra os outros.

O equipamento do ensaio é composto por uma estrutura em um plano inclinado onde neste é posicionada a amostra indeformada de solo. Foram adicionados dois tubos perfurados paralelos de modo a simular a chuva, estes localizam-se em média a 0,20m acima da amostra de solo. O corpo de prova não é confinado, podendo ser constituído por uma amostra

indeformada em bloco, ou por um cilindro compactado e seccionado longitudinalmente ao meio. As amostras são submetidas à “chuva” de fluxo constante por um tempo de 2 horas. Na Figura 17 o procedimento é ilustrado.

A água e os sedimentos são recolhidos em um recipiente abaixo da estrutura do plano inclinado. Depois, são levados até um segundo recipiente onde o processo de sedimentação ocorre. Finalmente, os sedimentos são separados da água para determinar a distribuição do tamanho dos grãos do solo erodido.

Figura 17 - Ensaio de Inderbitzen modificado.

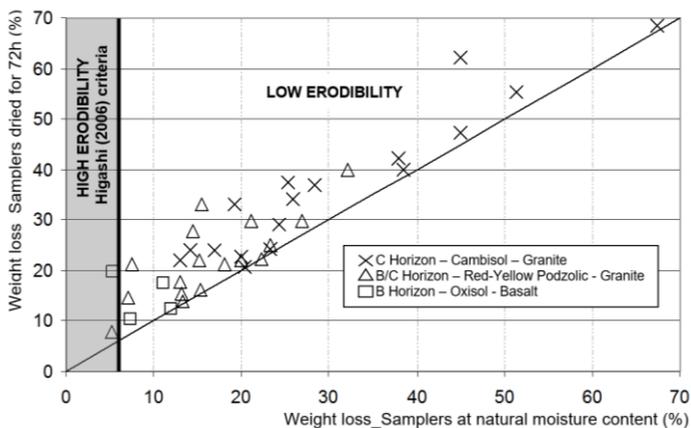


Fonte: Freire (2001).

Por meio de observações em campo e ensaios de laboratório, Higashi (2006) obteve uma percentagem de 6% de perda de massa pela ação da chuva para amostras residuais presentes em algumas regiões costeiras do sul do Brasil, como se observa na Figura 18.

Ainda de acordo com Higashi (2006), esse valor deve ser considerado o limite entre os solos potencialmente erodíveis e não erodíveis. Apesar disto, os estudos que envolvem estes tipos de testes são recentes e não existe um acordo entre os pesquisadores sobre o critério que define os solos potencialmente erodíveis.

Figura 18 - Gráfico de testes de ensaio de Inderbitzen Modificado



Fonte: Higashi et al. (2012)

### 2.3. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

A organização do território nos municípios de grande crescimento populacional é primordial devido as variáveis geográficas e ambientais serem distintas em cada um. O mapeamento geotécnico deve apresentar-se como instrumento de auxílio ao planejamento, sendo que as informações contidas nos mapas e cartas devem ser de fácil entendimento, objetivas e necessárias.

O mapeamento geotécnico pode ser definido como uma metodologia, em que sob forma de um mapa são representadas as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas, o que possibilita a sua aplicação em projetos ambientais e de engenharia (HIGASHI, 2006).

O mapa geotécnico, segundo a UNESCO (1976), é “um tipo de mapa geológico que representa todos os componentes geológicos de significância para o planejamento do solo e para projetos, construções e manutenções quando aplicados a engenharia civil e de minas”.

Para Da Silva et al. (2000), o mapeamento geotécnico consiste no levantamento de informações referentes às características de atributos do meio físico, visando orientar o planejamento, ocupação, manejo e conservação de determinada porção do espaço.

De acordo com Davison Dias (1995), mapas geotécnicos são documentos cartográficos capazes de representar os perfis de solo cujo o

comportamento geotécnico, frente ao uso e ocupação, apresentam um comportamento similar

Segundo Diniz (1998) apud Higashi (2006), a cartografia geotécnica pode ser considerada genericamente como a técnica de integração, síntese e representação de informações temáticas da área de geologia de engenharia voltada para o planejamento e gestão ambiental urbana e territorial. Esta técnica permite a formulação de modelos de previsibilidade do comportamento dos terrenos e o estudo de soluções para problemas decorrentes da intervenção de empreendimentos sobre o meio físico.

Dentre as diversas formas de classificar as cartas geotécnicas, Diniz (1998) apud Higashi (2006) propôs a seguinte divisão (Tabela 4) a partir de trabalhos usualmente desenvolvidos no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas).

Tabela 4 - Níveis de cartas geotécnicas no planejamento urbano.

Produto	Escalas de Mapeamento	Processos Geodinâmicos passíveis de identificação
Cartas de Suscetibilidade	1:25.000 ou maiores	Movimentos gravitacionais de massa, inundações/enchentes, corridas, erosões, assoreamento, processos costeiros, sismos induzidos.
Carta de Aptidão à Urbanização	1:10.000, 1:5.000 ou maiores	Movimentos gravitacionais de massa translacionais, inundações/enchentes/alagamentos, corridas, erosões lineares de grande porte (ravinas), assoreamento, subsidências e colapsos, queda e rolamento de blocos rochosos, processos costeiros.
Cartas de Riscos Geológicos	1:2.000 ou maiores	Movimentos gravitacionais de massa – translacionais, rotacionais, em cunha, inundações/enchentes/alagamentos, corridas de lama e detritos, rastejos, erosões lineares (sulcos, ravinas e voçorocas), solapamentos de margem, assoreamento, subsidências e colapsos, expansão de terrenos, queda e rolamento de blocos rochosos, processos costeiros.

Fonte: Sobreira e Souza (2012).

### 2.3.1. Metodologias de mapeamento geotécnico

O mapeamento geotécnico vem sendo praticado em diversos países, cada país com sua realidade geográfica diferente aplica uma diferente metodologia, e ou faz adaptações de alguma metodologia já existente e efetivamente comprovada (HIGASHI, 2006).

As metodologias pioneiras foram organizadas por Kopezinski (2000) e a Tabela 5 apresenta este levantamento.

Tabela 5 - Principais metodologias de mapeamento geotécnico.

METODOLOGIA	ESCALA	FINALIDADE	UTILIZAÇÃO
IAEG (Internacional)	<1:100.000 >1:10.000	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Francesa	Regional Local <1:100.000 >1:2.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
PUCE (Austrália)	Qualquer <1:2.500.000 >1:2.500	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Britânica (inglesa)	>1:10.000 <1:2.500	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional
Russa	<1:100.000.000 >500.000	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Hinojosa e Leon	<1:1.000.000 >500.000	Específica	Planejamento e projeto de estradas
ZERMOS	>1:50.000	Específica	Movimento de massa (planejamento)
Espanhola	>1:200.000 <1:2.000	Específica Regional	Planejamento regional e territorial
USA (Kiefer)	Regional e local	Específica Regional	Planejamento urbano e regional
Canadá	Regional e local	Específica Multifinalidade	Planejamento urbano e regional

Fonte: Kopezinski (2000).

A consolidação dos estudos de mapeamento geotécnico no Brasil se dá por volta da década de 1980, com as metodologias desenvolvidas pelo IPT e a escola de engenharia de São Carlos – SP (BASTOS, 1999).

Entre as técnicas desenvolvidas para o mapeamento geotécnico no Brasil, destacam-se as propostas por Zuquette (1987), Davison Dias (1995) e Higashi (2006).

### **a) Metodologia de mapeamento geotécnico proposta por Zuquette (1987)**

Em 1987, Zuquette desenvolveu sua metodologia de mapeamento geotécnico baseado em características do relevo (*landforms*). A partir dessas características e informações já existentes, é possível gerar mapas básicos fundamentais (mapas topográficos, geológicos, de águas, etc.), mapas básicos opcionais (pedológicos, geofísicos, geomorfológicos, climáticos e de ocupação atual ou prevista), mapas auxiliares (documentação ou de dados) e cartas derivadas ou interpretativas (erodibilidade, fundações, obras viárias, etc.) (HIGASHI, 2006).

A Metodologia Zuquette indica que unidades de solos devem ser criadas em tamanhos cada vez menores até apresentarem uniformidade em função das características do relevo. Posteriormente, tais unidades são associadas a materiais não consolidados e à litologia existente, tendo como resultado um mapa da feição do relevo e outro das condições geotécnicas. A integração destes dois mapas permitem trabalhos satisfatórios para fins de planejamento urbano (HIGASHI, 2006).

Segundo Higashi (2006), o procedimento metodológico se inicia pelo levantamento e análise de dados preexistentes, reconhecimento dos atributos e identificação de unidades homogêneas. Os mapas resultantes devem estar entre as escalas 1:50.000 e 1:10.000 e podem possuir três formas distintas:

- Mapa de Condições Geotécnicas Gerais, o qual retrata todos os atributos, sem dar ênfase, limitação ou potenciais da área;
- Mapa de Zoneamento Geotécnico Geral, que zoneia áreas similares sem considerar finalidades específicas;
- Carta de Aptidão, que possui informações inerentes a uma única finalidade, como fundações, estradas, entre outros.

### **b) Metodologia proposta por Davison Dias (1995)**

O Brasil apresenta mais que 80% do seu território coberto por solos tropicais e subtropicais com comportamento particular, diferindo em muitos aspectos, dos tradicionais solos estudados nas referências bibliográficas de geotécnica. Vários tipos de rochas são encontrados no Brasil, e através da ação dos processos geológicos e pedogenéticos são formados os perfis de solos.

De acordo com Davison Dias (1995), diversas pesquisas nos anos anteriores desenvolvidas pelo próprio autor e por outros, permitiram o desenvolvimento de uma Metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas para solos tropicais denominada Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas.

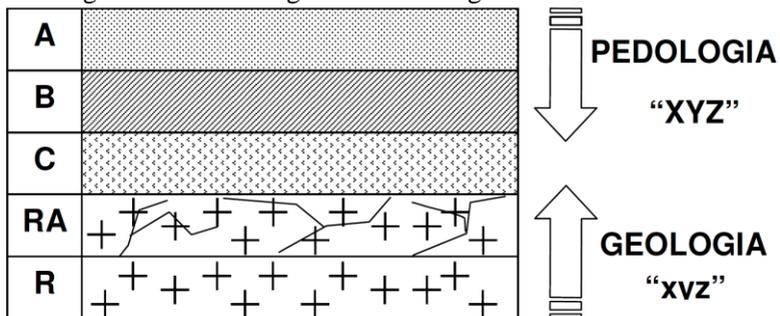
A metodologia proposta por Davison Dias (1995) surgiu a partir da necessidade de caracterizar grandes áreas de solos tropicais, onde não se tem a possibilidade de realizar um grande volume de ensaios geotécnicos. Tal metodologia sugere o cruzamento dos mapas litológico, oriundo de um mapa geológico, e pedológico para a definição preliminar das unidades geotécnicas com semelhante comportamento do solo relacionando-o com a sua gênese.

De acordo com Davison Dias (1995), para cada unidade geotécnica, a geologia permite inferir as características do horizonte de alteração da rocha (horizonte saprolítico) e a pedologia permite inferir características dos horizontes superficiais dos seus perfis típicos. A topografia auxilia ainda na definição dos limites entre as unidades, possibilitando a modelagem de sequencias topográficas com base nas curvas de nível, levando-se em conta que de acordo com a declividade existem variações nos tipos de solos, utilizando indiretamente as feições de relevo (*landforms*) de Zuquette (1987) para a caracterização do solo (HIGASHI, 2006).

O cruzamento dos mapas pedológico, geológico características de feições de relevo origina o mapa geotécnico, o qual possui nomenclatura semelhante ao mapa pedológico. Ressalta-se, porém, a importância de não confundir um com o outro: enquanto o mapa pedológico tem suas aplicações mais voltadas para a agricultura, o mapa geotécnico é voltado às obras de engenharia civil, pois define parâmetros de comportamentos mecânicos e hidráulicos do solo (HIGASHI, 2006).

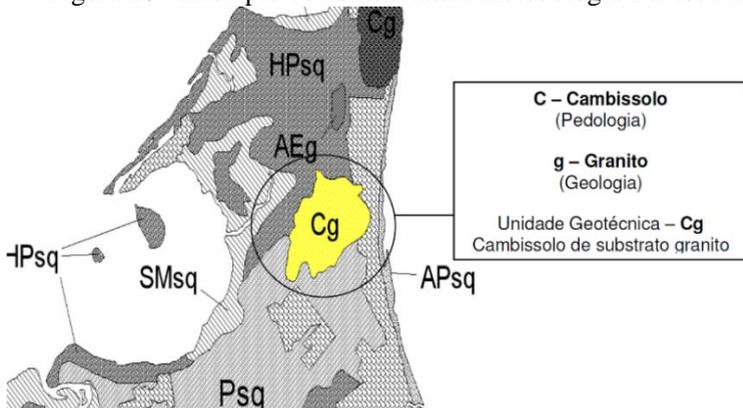
As unidades geotécnicas possuem nomenclatura na forma “ABCxyz”, onde as letras maiúsculas classificam o horizonte superficial (pedológico), e as minúsculas caracterizam a geologia (DAVISON DIAS, 1995). As Figuras 19 e 20 exemplificam a metodologia, e as Tabelas 6 e 7 listam as simbologias aplicadas.

Figura 19 - Simbologia da metodologia Davison Dias.



Davison Dias et al. (1987), apud Higashi (2006).

Figura 20 - Exemplo de nomenclatura metodologia Davison Dias.



Fonte: Higashi e Figueiredo (2003), apud Higashi (2006).

Tabela 6 - Simbologia simplificada das classes pedológicas.

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
A	Aluviais	P	Podzóis Indiscriminados
AQ	Areias Quartzosa	PB	Podzólico Bruno-Acinzentado
B	Brunizém	PE	Podzólico Vermelho-Escuro
BV	Brunizém Vértico	PL	Planossolo
C	Cambissolo	PLV	Planossolo Vértico
CB	Cambissolo Bruno	PLP	Planossolo Plíntico
GH	Glei	PT	Plintossolo
HO	Solo Orgânico	PV	Podzólico Vermelho-Amarelo
LA	Latossolo Amarelo	R	Litólico
LB	Latossolo Bruno	TR	Terra Roxa Estruturada
LBC	Latossolo Bruno Câmbico	TB	Terra Bruna-Estruturada
LBR	Latossolo Bruno-Roxo	TBR	Terra Bruna-Roxa
LE	Latossolo Vermelho-Escuro	TBV	Terra Bruna Podzólica
LR	Latossolo Roxo	V	Vertissolo
LV	Latossolo Vermelho-Amarelo		

Fonte: Davison Dias (2001), apud Higashi (2006).

Tabela 7 - Geologia simplificada.

Sigla	Classificação	Sigla	Classificação
a	Arenito	g	Granito
ag	Argilito	gl	Granulito
an	Andesito	gn	Gnaisse
ar	Ardósia	gd	Granitóide
b	Basalto	ma	Mármore
br	Brecha	p	Pelito
c	Conglomerado	q	Quartzito
ca	Calcáreo	r	Riolito
cm	Complexo metamórfico(*)	si	Sienito
cr	Carvão	s	Siltito
d	Diorito	sq	Sedimentos quaternários
da	Dacito	st	Sedimentos terciários
f	Folhelho	x	Xisto

Davison Dias (2001), apud Higashi (2006).

De forma simplificada a proposta de Davison Dias (1995) sugere as seguintes etapas:

- Primeiro, gera-se um mapa geotécnico preliminar com a estimativa de unidades geotécnicas a partir de dados de investigação do solo, informações geológicas, topográficas, geomorfológicas, fotografias aéreas, imagens de satélites e demais referências importantes da região;

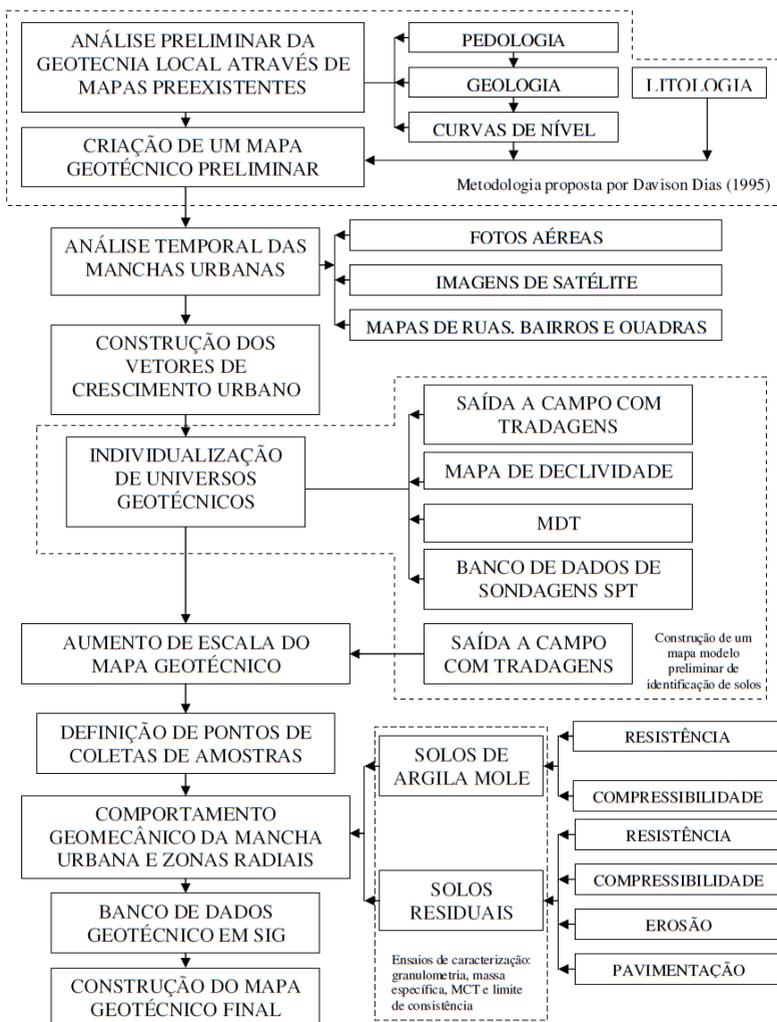
- Em seguida, dá-se início aos trabalhos de campo com análise das espessuras dos horizontes e do grau de desenvolvimento do horizonte B, o qual deverá ser classificado como B latossólico, B textural, B pouco desenvolvido ou sem horizonte B. Ainda nesse horizonte, deve-se analisar a ocorrência de camadas porosas e camadas mais endurecidas;
- Os solos hidromórficos são definidos em função da topografia, enquanto o horizonte C é estimado em função da geologia;
- Finalmente, o mapa preliminar da primeira etapa deverá ser atualizado.

### **c) Metodologia proposta por Higashi (2006)**

A metodologia de Higashi tem embasamento no mapeamento geotécnico de Davison Dias (1995), em conjunto com o uso de um Sistema de Informações Geográficas, gerando mapas de estimativa litológica e pedológica das regiões em análise, orientando assim, através desse mapa a criação de outros mapas temáticos que auxiliem o planejamento urbano na ocupação e uso do solo.

As etapas da metodologia são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 - Diagrama da metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras Brasileiras.

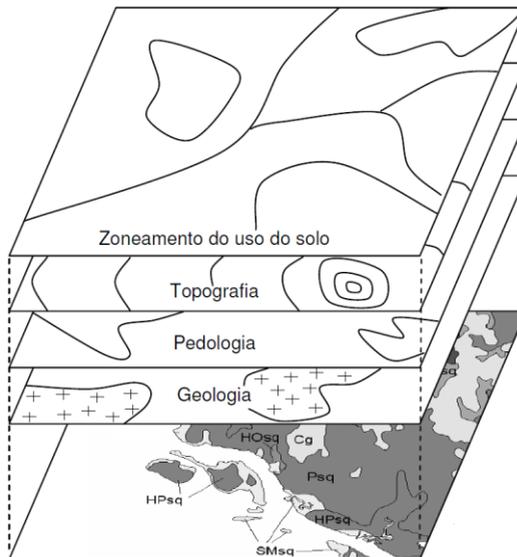


Fonte: Higashi (2006).

O diagrama indica a proposta básica da metodologia, que consiste em um planejamento para expansão de áreas urbanas com a seguinte seqüência lógica de execução:

- Análise Preliminar da Geotécnica local (ensaio em campo, laboratório, vetores de evolução da mancha urbana);
- Criação de um Mapa Geotécnico Preliminar (metodologia Davison Dias, exemplo na Figura 22);
- Realização de Ensaios de caracterização dos polígonos de cada Unidade Geotécnica;
- Análise Temporal da Evolução da Mancha Urbana (definição dos vetores de crescimento urbanos);
- Construção dos Modelos Digitais do Terreno e do Mapa de Declividades (diferenciar os solos que são formados em relevos planos e suave ondulado);
- Banco de dados de sondagens SPT; trabalhos em campo; uso de GPS (diferenciação dos solos das unidades);
- Criação de perfis típicos baseados em sondagens.

Figura 22 - Cruzamento de mapas pela metodologia Davison Dias.



Fonte: Higashi (2006).

O banco de dados geotécnico será criado em ambiente SIG, servindo de suporte para criação do mapa geotécnico final, com uma diversidade de informações relativas à erosão, resistência ao cisalhamento, granulometria, compressibilidade, etc.

Por fim, Higashi (2006) orienta a simplificação da forma de classificação dos mapas, para uso como ferramenta de planejamento urbano. Pode-se, por exemplo, classificar as zonas das unidades em diferentes cores, orientando o risco, ou não, de se ocupar cada uma destas zonas

### 2.3.2. Aplicação do Mapeamento Geotécnico para elaboração de cartas de suscetibilidade à erosão

A crescente urbanização nas cidades brasileiras associada à falta de infraestrutura, além da suscetibilidade natural dos solos, cria uma situação extremamente favorável ao desenvolvimento de processos erosivos de grande porte.

A falta de planejamento no processo de expansão urbana, principalmente em conjuntos habitacionais de alta declividade e cabeceiras de drenagem, é um dos principais fatores responsáveis pelo começo do processo de erosão. Com o tempo, esses processos dão origem a grandes feições erosivas, tornando-se barreiras ao crescimento urbano e exigindo altos custos para sua recuperação.

O assoreamento dos cursos d'água e reservatórios, destruição ou entupimento de rede de galerias, dentro e fora das áreas urbanas, agravam ainda mais os problemas causados pela erosão. Estes processos geram enchentes, concentração de poluentes, e perda de capacidade de armazenamento de água do reservatórios de abastecimento público (SALOMÃO e IWASA, 1995 apud HIGASHI, 2006).

Para Higashi (2006), é possível minimizar, corrigir, e principalmente prevenir e caracterizar efeitos do desenvolvimento de processos erosivos a partir do mapeamento geotécnico.

Autores como Magalhães Filho et al. (2014) e Vieira (2008) elaboraram cartas de suscetibilidade a erosão baseados apenas em cartas de declividade, modelos digitais, pedologia, geologia, e imagens de satélite, não utilizando métodos quantitativos e ensaios de laboratório para a previsão da suscetibilidade a erosão do solo.

Outros estudos obtiveram dados quantitativos, como por exemplo, as pesquisas de Bastos (1999), Higashi (2006), Ide (2009), Grando (2011), Higashi et al. (2012), Basso (2013) entre outros, porém, poucos expressaram seus resultados em mapas.

Higashi (2006) usou, além de outros estudos, os critérios de erodibilidade MCT, Inderbitzen modificado, e cisalhamento direto para determinar a suscetibilidade a erosão na cidade de Tubarão – SC, e assim

elaborar, em sua tese de doutorado, a metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras, apresentado anteriormente neste mesmo capítulo.

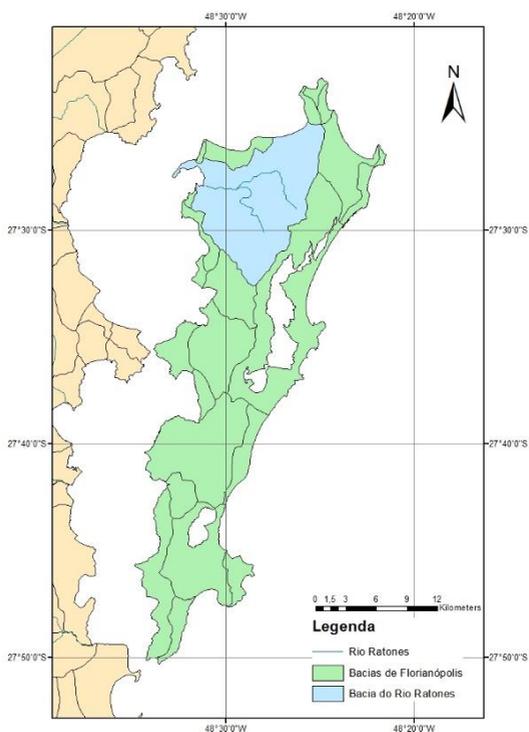
Ide (2009) fez uma investigação geotécnica na cidade de Bauru – SP, com objetivo de caracterizar o solo local e definir os principais fatores responsáveis pela evolução de processos erosivos usando os critérios de Inderbitzen, erodibilidade MCT, e penetração de cone proposto por Alcântara (1997).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. ILHA DE SANTA CATARINA

A Ilha de Santa Catarina está localizada ao centro do litoral do estado brasileiro de Santa Catarina (Figura 23). É a maior ilha do estado, e abriga cerca de 96,5% do território do município de Florianópolis, a capital estadual. Encontra-se situada entre as coordenadas geográficas 27°22' e 27°50' de latitude sul e 48°25' e 48°35' de longitude oeste. A ilha possui uma área aproximada de 425 km<sup>2</sup> e representa uma das três ilhas-capitais de estado presentes no Brasil. Aproximadamente 470.000 habitantes residem na ilha (IBGE, 2010).

Figura 23 - Mapa da Ilha de Santa Catarina e bacia do rio Ratonés.



Fonte: O Autor (2017).

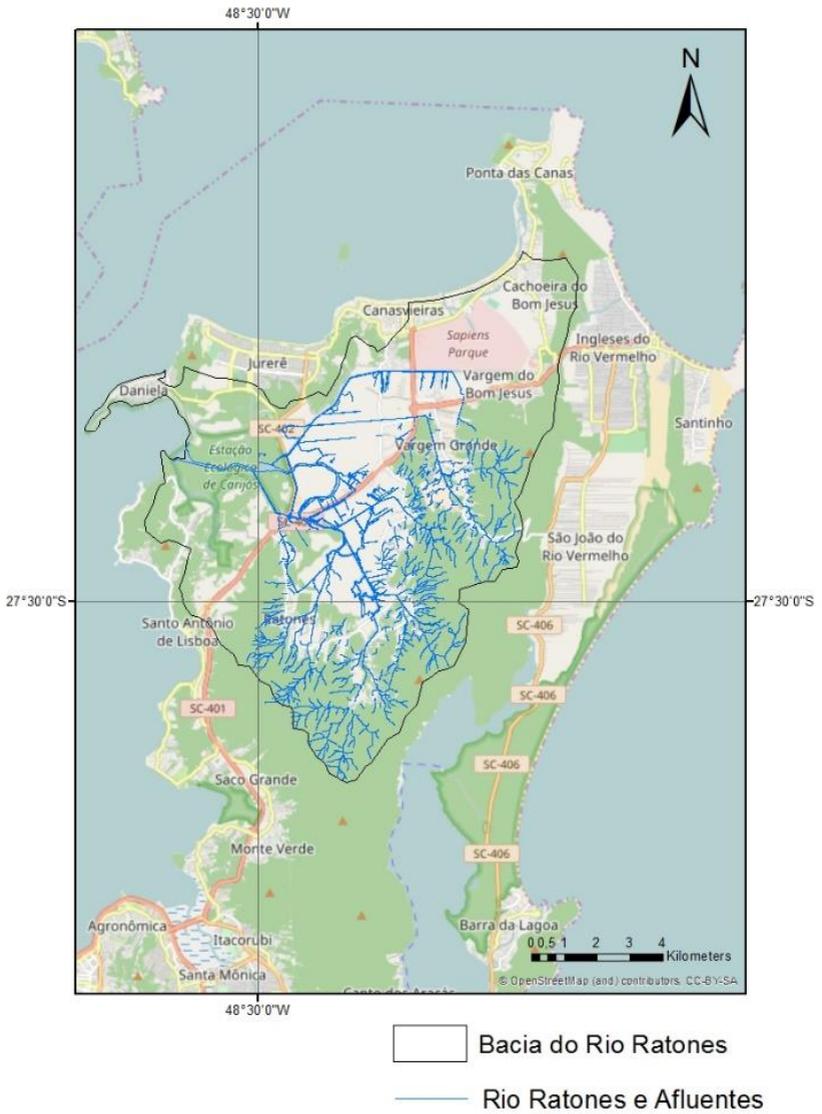
### 3.2. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RATONES

A bacia hidrográfica do rio Ratonés ( $27^{\circ} 26' 04''$  e  $27^{\circ} 32' 35''$  de latitude sul e  $48^{\circ} 25' 04''$  e  $48^{\circ} 31' 49''$  longitude oeste) está localizada à noroeste da Ilha de SC, adjacente à baía norte (Figura 24); é a mais extensa bacia da Ilha de Santa Catarina, ocupa uma área de aproximadamente  $61\text{km}^2$  e é formada entre os morros da Barra do Sambaqui, o Morro do Forte, o Morro de Jurerê-Canasvieiras e os morros da Dorsal Norte da Ilha (Figura 25). A região apresenta o menor número por ano de dias de chuva de Florianópolis (entre 110 e 180 dias) (FUSVERK, 2002).

A área de estudo possui baixa densidade demográfica, e ainda mantém suas características de área rural com o desenvolvimento de atividades primárias tais como agricultura, pecuária, artesanato, turismo ecológico, etc., e mantém suas belezas naturais preservadas.

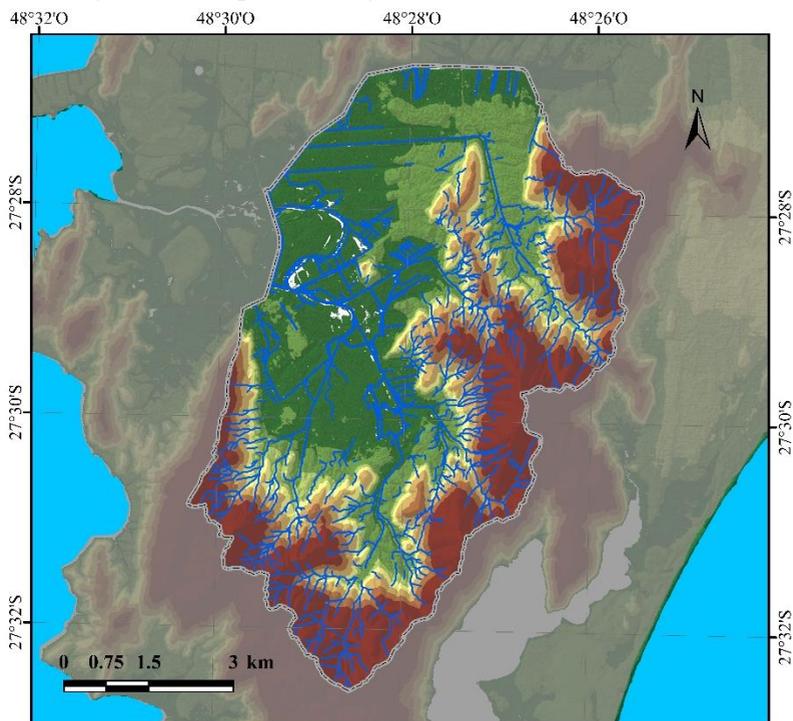
O manguezal do rio Ratonés encontra-se preservado como integrante da Reserva Ecológica dos Carijós. O rio Ratonés, cujas nascentes se encontram nas vertentes das encostas dos morros que circundam o distrito, forma a maior bacia hidrográfica da Ilha de Santa Catarina, tendo como afluentes os rio Papaquara, da Palha, do Cano Branco e Veríssimo e desagua no pontal de Jurerê na divisa entre os Distritos de Santo Antônio de Lisboa e Canasvieiras, em uma baía em frente à Ilha de Ratonés Grande, região anteriormente conhecida como Arraial de Sambaqui (AMORA, 2013).

Figura 24 - Mapa da bacia do rio Ratones.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 25 - Mapa da hidrografia e altitude da bacia do rio Ratoes



Fonte de dados:  
 Limites municipais por IBGE (2015); Mapa relevo sombreado  
 realizados a partir do MDT do SRTM/NASA ajustado por  
 EPAGRI (2005);



**REFERÊNCIAS CARTOGRÁFICAS**

Sistema de Coordenadas Geodésicas  
 Projeção: Universal Transversa  
 de Mercator - UTM  
 Meridiano Central 51° W Fuso 22 S  
 Sistema de referência WGS 1984

**Execução**  
 Eng. Camilo Andrade Carreño

**Orientação**  
 Prof. Dr. Rafael Higashi



Fonte: Andrade (2017).

### 3.3. GEOLOGIA ÁREA DE ESTUDO

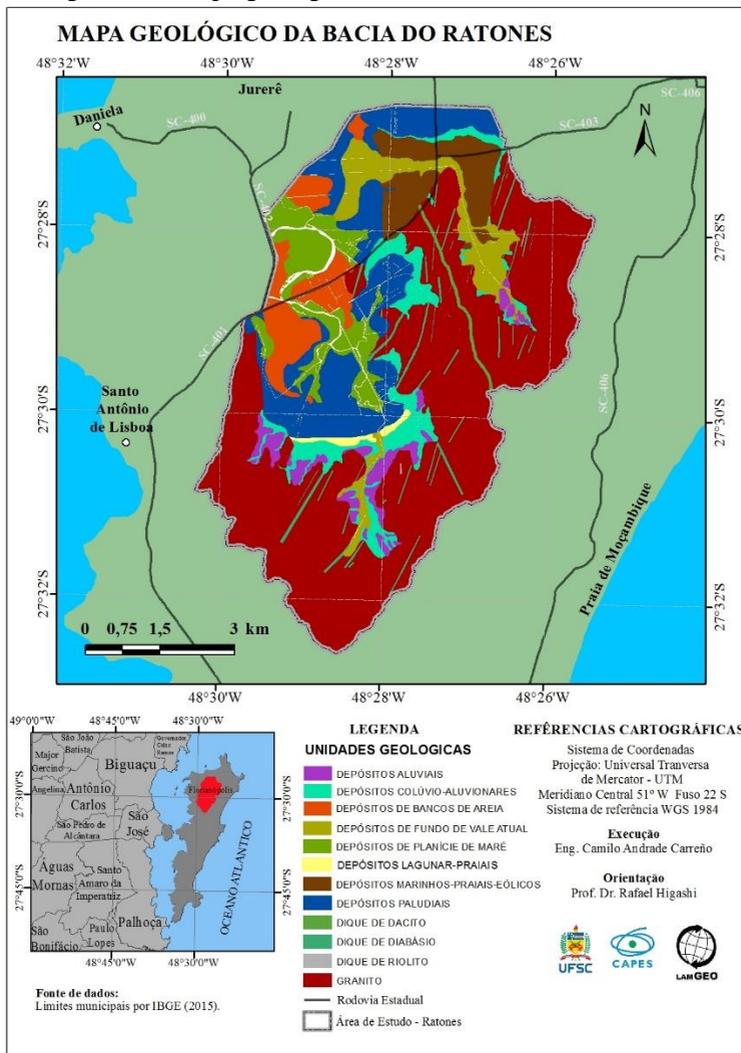
No setor norte da Ilha de Santa Catarina ocorrem dois domínios geológicos principais: o de rochas do embasamento cristalino, com granitos, riolitos, aplitos e cataclasitos de idade neoproterozóica, cortados por diques de rocha básica, de idade cretácea e; o depósitos da planície costeira, da era Cenozóica, de origem e constituição diversa.

O primeiro domínio é constituído, predominantemente, pelo chamado Granito Ilha, preferencialmente homogêneo, com poucas variações texturais, de cor rósea e granulometria média, pertencente à Suíte Intrusiva Pedras Grandes (ZANINI et al., 1997), que compreende a grande porção de terrenos cristalinos do modelado de dissecação. Estes granitos apresentam-se cortados pelo enxame de diques de diabásio, de idade cretácica, pertencentes ao Enxame Florianópolis (MARQUES, 2001 apud PELLERIN et al., 2010). Algumas vezes, são seccionados por veios de aplitos, riolito, e cataclasitos, que são rochas vulcânicas ácidas da Formação Cambirela.

Segundo Pellerin et al. (2010), os diques de diabásio do Enxame Florianópolis são preferencialmente afaníticos, raramente pórfiros, e estendem-se longitudinalmente por centenas de metros e quilômetros, até 3,5 km, possuindo larguras variadas, geralmente com 20 a 40 metros e, em alguns casos com até 65 m. Nas áreas onde ocorrem os diques de diabásio, o relevo apresenta-se deprimido em relação às rochas encaixantes mais resistentes, pois o diabásio é menos resistente intemperismo, do que o granito.

Na Figura 26 pode-se observar o mapa geológico da área de estudo, onde a maior parte está constituída pela formação Granito Ilha, correspondente às partes mais elevadas, enquanto a área de planície é composta por depósitos aluviais, paludiais, lagunares e marinhos.

Figura 26 - Mapa geológico da bacia do rio Ratones



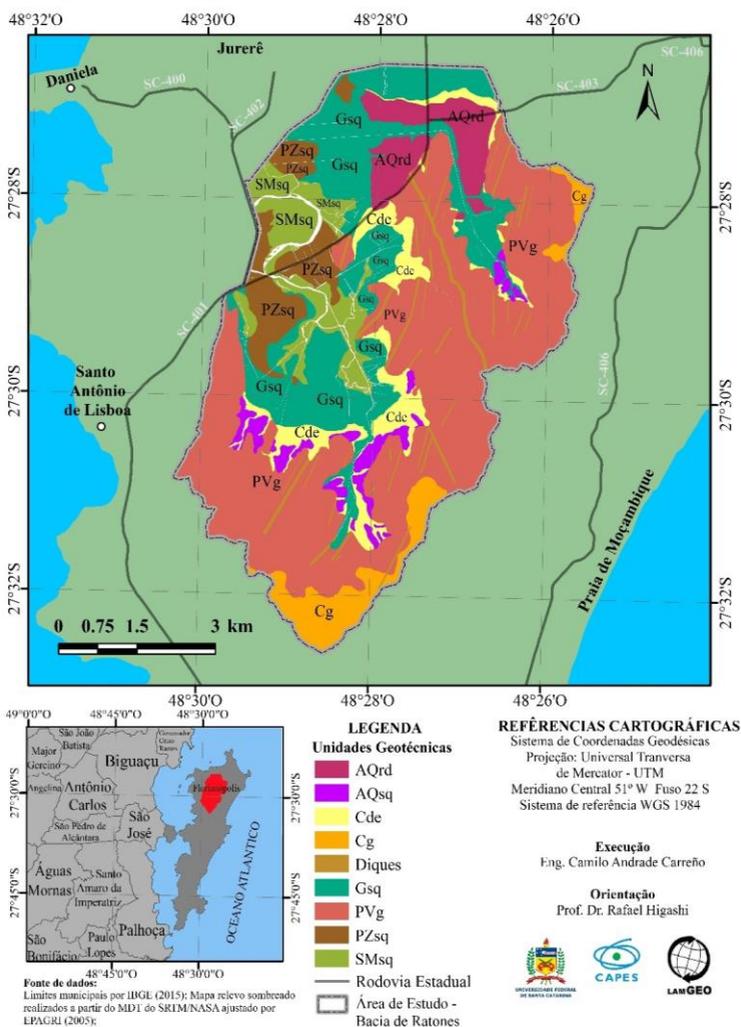
Fonte: Andrade (2017).

### 3.4. MAPA GEOTÉCNICO

A Figura 27 mostra o mapa geotécnico da área de estudo, onde podem ser observadas as unidades geotécnicas que conformam parte da

bacia do Rio Ratoes. Nas elevações encontram-se os solos residuais originados de substrato Granito Ilha. Sua região plana está composta por solos sedimentares eólicos, fluviais e lacustres, enquanto que os solos coluvionares ocorrem em relevo mais ondulado e estão localizados nos pés dos taludes.

Figura 27 - Mapa Geotécnico da bacia do rio Ratoes



Fonte: Andrade (2017).

### 3.5. HISTORIA DA BACIA DO RIO RATONES

A ocupação urbana no norte da ilha iniciou no século XVIII e intensificou-se no século XIX. As atividades econômicas na época eram pesca e agricultura com predominância de mandioca, cana, amendoim, e milho. O traslado nessa época era feito pelo mar, o que fez do hoje bairro Ratonés, que tem seu rio principal desaguando na Baía Norte, e de Santo Antônio de Lisboa pelo seu porto movimentado, centros com uma dinâmica atividade econômica justificada pelo movimento contínuo de pequenas embarcações em viagens de comércio (CECCA, 1997).

A área circundante da bacia do Rio Ratonés, abrange as localidades de Daniela, Forte, Jurerê, Canasvieiras, Vargem Grande, Vargem Pequena, Canto do Lamim, Barra do Sambaqui e parcialmente os bairros de Sambaqui, Santo Antônio de Lisboa e Cachoeira do Bom Jesus. Essa parte da ilha possui ainda grandes áreas de exploração rural e importantes remanescentes da cobertura vegetal nativa, definidas assim pelo plano diretor do município de Florianópolis (SILVA, 2005).

O caráter recente e instável das formações existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Ratonés demanda maior prudência quanto à sua ocupação. A aceleração de processos erosivos, e à precariedade das condições sanitárias esboçam um quadro preocupante para a qualidade ambiental (CECCA, 1997).

O crescimento dos valores da área habitada e urbanizada é produto do adensamento ocorrido devido as migrações para a bacia. Atualmente, a forma de ocupação desordenada na Bacia Hidrográfica do Rio Ratonés e a transição de área rural-urbana resultaram em enchentes. Para adquirir características urbanas essa área passa pelo processo de retirada da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, abertura de vias principais e secundárias sem planejamento, e substituição da drenagem natural por canalização. Estes fatores acabam aumentando a velocidade de escoamento da água gerando erosão e enchentes. Outro problema associado à ocupação é o esgoto. A maioria das residências da bacia o efluente é eliminado através de fossas e sumidouros, estes quando mal utilizados podem contaminar o lençol freático. Não é difícil encontrar fossas conectadas as redes pluviais, desaguando esgoto bruto nos rios e posteriormente nos manguezais e praias.

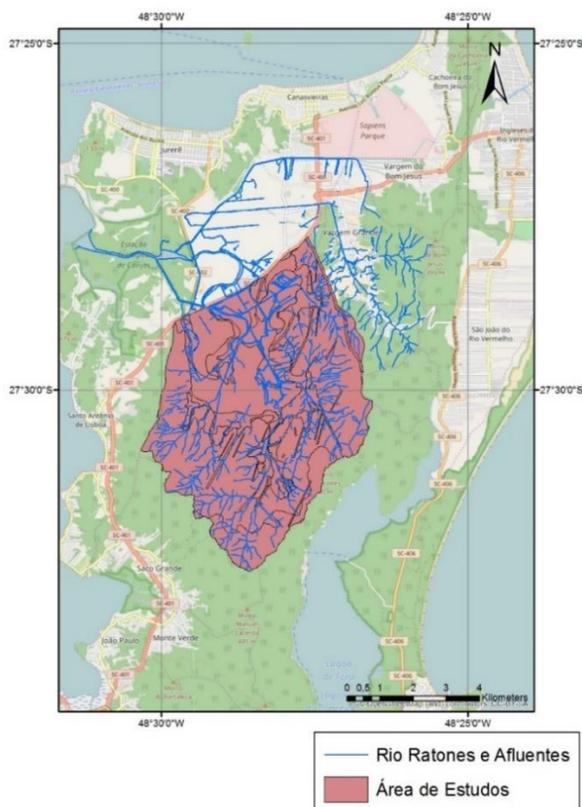
Observa-se que a ocupação desordenada de Ratonés provavelmente resultou, dentre outros fatores, de um Plano Diretor ou uma legislação urbana inadequada à natureza insular da região.

### 3.6. ÁREA DE ESTUDO

Para o presente trabalho a bacia hidrográfica do rio Ratonés não foi compreendida na sua totalidade, apenas os bairros Ratonés e Vargem Pequena foram estudados, bairros estes que incluem a maior parte do rio Ratonés. A área de estudo foi escolhida devido principalmente à crescente urbanização marcada pela construção de vários loteamentos e um possível aeroporto.

A Figura 28 mostra a área de estudo compreendendo somente os bairros Ratonés e Vargem Pequena tendo como limites a SC – 401 e os Morros da Dorsal Norte Ilha.

Figura 28 - Área de Estudo do Trabalho



Fonte: O Autor, 2017

## 4. MÉTODO

O método proposto está constituído de vários passos para a execução do trabalho, os quais são: revisão bibliográfica, organização e interpretação dos dados preexistentes (geológicos, pedológicos, geomorfológicos, hidrológicos), geração dos novos dados, e o mapa de suscetibilidade a erosão, obtido com a utilização de técnicas de geoprocessamento no software Arcgis.

O desenvolvimento deste trabalho ocorreu em quatro etapas principais:

i) **Etapa de gabinete**, onde foi levantada a revisão bibliográfica e as bases cartográficas para o desenvolvimento da pesquisa; Nesta etapa foram determinados os universos geotécnicos presentes na área de estudo a partir do mapa geotécnico da ilha de Santa Catarina definido por SANTOS (1997) e empregado na pesquisa desenvolvida na bacia de Ratonos por Rosniecek e Imai (2013).

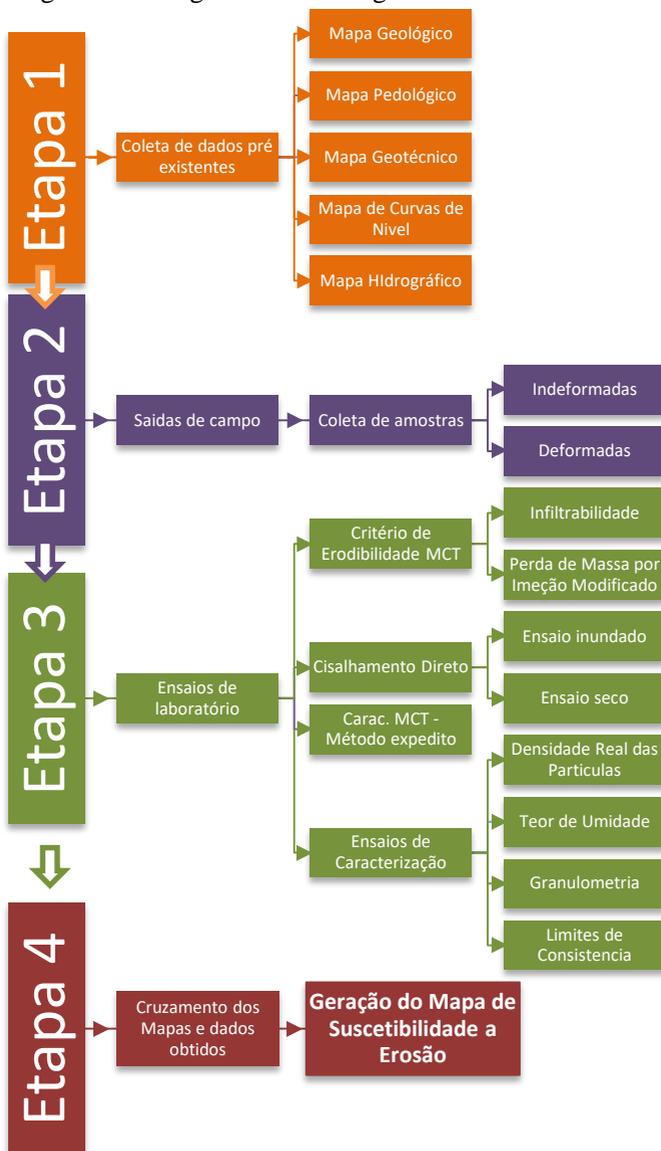
ii) **Etapa de campo**, quando foram realizadas as observações em relação aos processos erosivos, com coleta de amostras de solos para desenvolver os ensaios de laboratório;

iii) **Etapa de laboratório**, onde foram realizados os ensaios de caracterização e os ensaios de avaliação da erodibilidade obtendo os respectivos resultados;

iv) **Etapa de geoprocessamento**, no software de SIG Arcgis, onde foi desenvolvido a carta de suscetibilidade a erosão.

A Figura 29 exemplifica de uma outra forma as quatro etapas do trabalho.

Figura 29 - Diagrama metodológico.



Fonte: O Autor (2017)

## 4.1. TRABALHO DE CAMPO

Os trabalhos de campo objetivaram o reconhecimento do local de estudo, identificando aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos, hidrológicos, e confirmando os dados dos mapas de atributos existentes. Reconhecendo tais atributos, foi possível obter critérios para os pontos de coleta.

### 4.1.1. Escolha dos pontos de coleta

A escolha dos pontos de coleta de amostras deformadas e indeformadas (Figura 30) depende da possibilidade de obtenção da amostra na profundidade do horizonte B, priorizando-a em cortes ou taludes expostos, uma vez que a coleta foi realizada manualmente. Também deve-se ter em conta a facilidade de acesso ao local de coleta, devido a logística do transporte das ferramentas, e do material coletado. Por este fator não foi possível a coleta de amostras na unidade geotécnica residual Cambissolo de substrato granito

Tendo em vista os critérios vistos anteriormente, os pontos de coleta foram distribuídos espacialmente, com o auxílio do GPS, pela unidade geotécnica Podzólico Vermelho Amarelo de substrato Granito, com exceção do ponto 4, onde caracteriza-se como Cambissolo depósito de encosta, e também visando micro bacias diferentes. A Figura 30 apresenta os pontos de coleta.

### 4.1.2. Coleta de amostras

Para reunir os parâmetros do solo requeridos no estudo de erodibilidade foram procedidas as coletas das amostras deformadas e indeformadas nos pontos mostrados na Figura 30.

A amostra deformada refere-se ao solo solto, coletado com pá ou trado, enquanto que a amostra indeformada é uma porção do solo no seu estado natural, coletado por moldes ou em blocos.

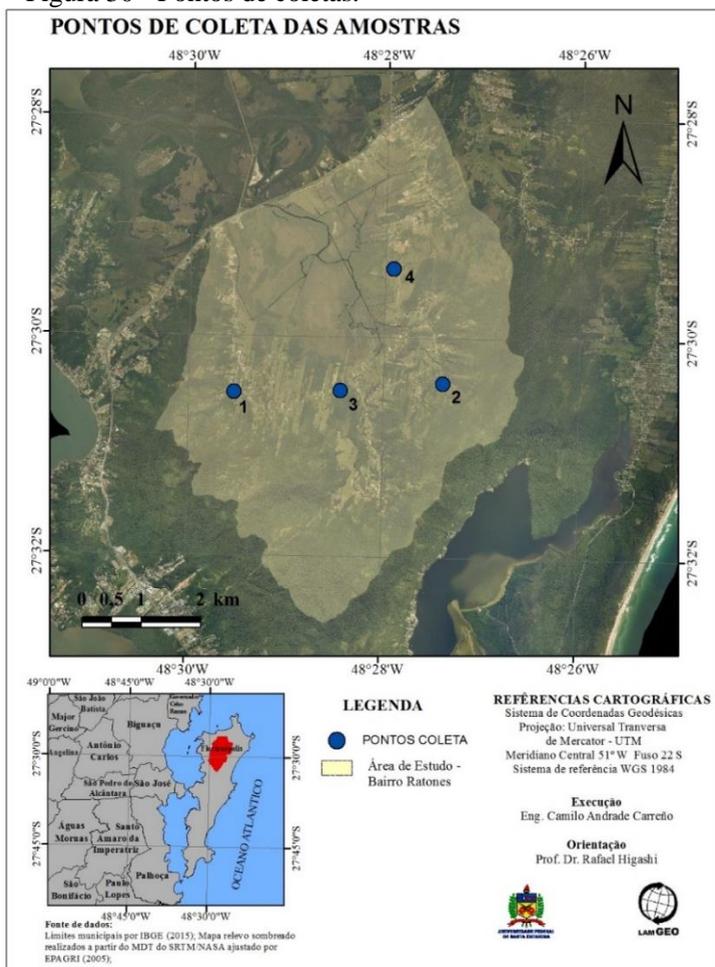
Amostras deformadas foram coletadas visando à execução de ensaios de análise granulométrica, determinação de índices físicos e caracterização MCT. As amostras indeformadas se destinaram à realização dos ensaios para determinação da erodibilidade pelo critério MCT e pelo ensaio de cisalhamento direto.

Todas as amostras indeformadas foram plastificadas com filme plástico e colocadas em um isopor durante a coleta. Após a chegada no

laboratório, as amostras foram colocadas em uma câmara úmida para aguardar o seu uso.

Todas as coletas foram feitas com pelo menos 1 dia de sol anteriormente a data da saída de campo. Vale ressaltar que durante o período de coletas de corpos de prova choveu bastante na região de Florianópolis, e por este fator, o teor de umidade das amostras encontrase com valores normalmente é altos.

Figura 30 - Pontos de coletas.



Fonte: O Autor (2017).

As amostras indeformadas coletadas foram cuidadosamente preparadas, embaladas, acondicionadas, e transportadas para o laboratório a fim de manter inalteradas as características naturais do solo para posteriormente serem realizados os ensaios.

A seguir, observam-se entre as Figuras 31 e 34 as expedições e locais de amostragem, feitas desde setembro de 2016 até março de 2017, porem foram mais concentradas em Marco de 2017.

Figura 31 - Coleta de amostras no ponto 1.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 32 - Coleta de amostras no ponto 2.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 33 - Coleta de amostras no ponto 3.



Fonte: O Autor (2017).

Figura 34 - Coleta de amostras no ponto 4.



Fonte: O Autor (2017).

## 4.2. ENSAIO DE LABORATÓRIO

### 4.2.1. Caracterização física dos solos

Para caracterizar o solo foram realizados os ensaios de caracterização granulométrica, densidade real das partículas de solo,

limite de plasticidade, limite de liquidez e teor de umidade natural. Todos os ensaios seguiram a metodologia sugerida pelas normas ABNT.

- Limites de Atterberg

Para determinação dos limites de Atterberg foram realizados os ensaios de limite de plasticidade (LP, Figura 35) normatizado pela NBR 7180/1984 e limite de liquidez (LL) normatizado pela NBR 6459/1984. A partir dos limites de plasticidade e liquidez foi definido o índice de plasticidade (IP) e realizada a classificação do solo por meio do gráfico de plasticidade de Casagrande. Com o valor do IP e os resultados do ensaio granulométrico foi possível ainda calcular a atividade da argila.

Figura 35 - Ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: O Autor (2017).

- Granulometria

Para a identificação da distribuição das dimensões dos grãos de um solo realiza-se a análise granulométrica conforme a norma da ABNT NBR 7181/1984, que consiste, em geral, de duas fases, peneiramento e sedimentação. Neste caso, foi usado defloculante hexametáfosfato de sódio.

- Densidade real das partículas

A massa específica ou densidade real das partículas foi determinada tendo como base a NBR 6508/84, na qual consiste basicamente em determinar o peso seco de uma amostra por simples pesagem, e em seguida determinar seu volume baseando-se no princípio

de Arquimedes. Para tal foram utilizados ensaios em pares de picnômetros, com volume de 500 ml, onde a média entre os valores foi adotada se a diferença entre os dois ensaios fosse menor que 0,02.

– Teor de umidade natural

O teor de umidade ( $w$ ) é a relação entre o peso da água ( $W_a$ ) e o peso das partículas sólidas ( $W_s$ ) contidos em um certo volume de solo, expresso em percentagem (%). Sua determinação é simples, sendo realizada conforme a NBR 6457/1986.

#### 4.2.2. Ensaio de cisalhamento direto

Com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto foi possível calcular os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito ( $c$ ,  $\phi$ ) para cada uma das unidades geotécnicas residuais da área de estudo.

Foram realizados dois tipos de ensaios de cisalhamento. Sendo usadas amostras com teor de umidade natural (“seco”) e amostras com teor de umidade saturado (ensaio inundado em água). Desta forma pode-se determinar o potencial erodível do solo mediante o método proposto por BASTOS et al. (2002), apresentado anteriormente na revisão bibliográfica.

Para a realização do ensaio é necessário que a amostra de solo seja moldada em um molde metálico com dimensões de 10cm x 10cm x 2cm. Após moldada, a amostra deve ser pesada e determinado o seu teor de umidade e massa específica aparente natural, além dos usuais ensaios de caracterização. Após estes procedimentos, a amostra deve ser posicionada na prensa de cisalhamento direto (Figura 36) e inundada.

A primeira etapa é o processo de consolidação, que se assemelha a um estágio de carregamento do ensaio de adensamento. Desta forma, deve-se aguardar o fim de toda compressão causada pelo carregamento normal, sendo possível proceder ao seguinte estágio após a estabilização do volume. Para este estudo, foram utilizadas tensões normais de consolidação de 32 kPa, 75 kPa e 124 kPa.

Figura 36 - Equipamento do ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: O Autor (2017).

Após a consolidação, deve-se romper o corpo de prova por cisalhamento com a movimentação da caixa inferior (Figura 37). O equipamento não mensura as pressões neutras desenvolvidas ao longo do processo de cisalhamento, então, a velocidade de rompimento do corpo de prova é condicionada ao tipo de solo ensaiado. Neste caso foi utilizada uma velocidade de 0,307 mm/mim.

A caixa de cisalhamento impõe uma superfície de ruptura à amostra, ficando a carga da amostragem e moldagem a confiabilidade dos resultados obtidos.

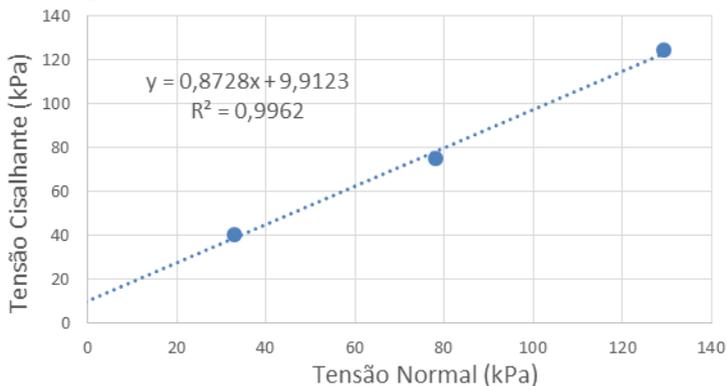
Figura 37 - Corpo de prova cisalhado.



Fonte: O Autor (2017).

Os dados obtidos foram plotados em um gráfico de tensão cisalhante vs tensão normal como observa-se na Figura 38, e com a análise do gráfico é obtido o intercepto coesivo ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Figura 38 - Tensão Cisalhante *versus* Tensão Normal.



Fonte: O Autor (2017).

#### 4.2.3. Ensaio de infiltrabilidade (Critério de Erodibilidade MCT)

O ensaio de infiltrabilidade consistiu na medição da quantidade de água que infiltra em corpos de prova de 5cm de diâmetro, pela sua base, em função do tempo.

O processo de infiltrabilidade consiste no fluxo de água que ascende pela amostra de solo (capilaridade), sendo possível medir o deslocamento da água através de uma régua colocada junto ao tubo capilar, como observa-se na Figura 39.

O deslocamento foi medido nos seguintes tempos (15", 30", 45", 1', 1'15", 1'30", 1'45", 2', 4', 9', 16', 25', 36', 49', 64', 81', 100', 121', 144' e 24 horas), os quais seguem uma relação quadrática. Os dados obtidos são plotados em um gráfico (Figura 8). Com a análise deste gráfico é obtido o coeficiente de sorção ( $s$ ), onde se observa uma tendência linear dos pontos.

Para o presente trabalho, duas amostras por ponto de coleta foram analisadas. Uma amostra com umidade natural coletada em campo e outra com umidade de 48 horas seca ao ar ambiente.

Figura 39 - Ensaio de Infiltrabilidade sendo realizado.



Fonte: O Autor (2017).

#### 4.2.4. Ensaio de perda de massa por imersão modificado (Critério de Erodibilidade MCT)

Neste ensaio o corpo de prova indeformado foi moldado para que o fim da amostra coincidissem propositalmente com o fim do anel, e para que a pedra porosa pudesse ser encaixada no molde metálico como mostra a Figura 40. Logo após, a amostra foi imersa em água por 20h e posteriormente seca em estufa. Com o peso seco da amostra ainda no anel, e com o solo erodido obtém-se o percentual de perda de massa por imersão (parâmetro  $pi$ ).

$$pi = \frac{Pie}{Pta} \cdot 100 \quad [6]$$

Onde:  $pi$  é a perda de massa por imersão [%];  $Pie$  é o peso total do solo desagregado seco [gramas];  $Pta$  é o peso total da amostra [gramas].

Da mesma maneira que o ensaio de infiltrabilidade apresentado anteriormente, duas amostras por ponto foram coletadas: uma com umidade natural e outra seca por 48h ao ar ambiente. Vale ressaltar que em algumas amostras secas por 48 horas o solo contido dentro do anel se retraiu, o que possibilitou uma maior infiltração da água pelas bordas, entre o anel e o solo.

Figura 40 - Esquema do ensaio de perda de massa por imersão modificado



Fonte: O Autor (2017)

#### 4.2.5. Classificação MCT – Método expedito das pastilhas

O ensaio de classificação MCT, foi realizado exatamente como apresentado no capítulo 2.2.1, sendo usado 5 pastilhas para melhor caracterização do solo.

A Figura 41 apresenta os materiais usados no ensaio e as amostras (da esquerda para direita, ponto 4, 3 ,2 ,1) antes e depois da estufa.

Figura 41 - Ensaio de caracterização MCT.



Fonte: O Autor (2017).

#### 4.3. CRITÉRIO DE ERODIBILIDADE GERAL

O presente trabalho utiliza-se de quatro critérios de erodibilidade diferentes para a definição da suscetibilidade a erosão dos solos. Todos os critérios utilizados no presente trabalho foram apresentados anteriormente na seção 2.2.1.

Com o intuito de definir o grau de suscetibilidade a erosão, foi adotado um sistema de “pesos” para cada um dos quatro critérios utilizados. São eles:

- Critério de erodibilidade MCT – Peso = 0,40
- Cisalhamento Direto – Peso = 0,30
- Classificação MCT – Peso = 0,15
- Densidade Real das Partículas – Peso = 0,15

Para cada critério a erodibilidade é classificada como alta ou baixa sendo para esta classificação dados valores de 0 (zero, baixa) e 1 (um, alta). Ressalta-se que este sistema de “peso” é subjetivo, e que o peso adotado por cada método depende da representatividade que este Autor julga ser mais adequada para cada um. A Figura 42 ilustra o modelo proposto.

Figura 42 - Critério de erodibilidade geral

<b>Ponto 4</b>			
<b>Critério</b>	<b>Peso</b>	<b>Alto (1)/ Baixo (0)</b>	<b>Soma</b>
<b>Erodibilidade MCT</b>	0,4	1	0,4
<b>Cisalhamento Direto</b>	0,3	1	0,3
<b>Densidade Real das Partículas</b>	0,15	0	0
<b>Classificação MCT</b>	0,15	0	0
<b>Total</b>	1	2	0,7
		<b>Erodibilidade</b>	<b>0,7</b>

Fonte: O Autor (2017)

Por fim tem-se a somatória dos fatores, a qual gera uma erodibilidade baixa, média ou alta:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq \text{Baixa} > 0,4 \\
 0,4 &\leq \text{Média} > 0,6 \\
 0,6 &\leq \text{Alta} > 1
 \end{aligned}$$

Assim, os “pesos” foram estimados de acordo com a relevância acadêmica de cada métodos, sendo que os mais estudados e utilizados têm por sua vez uma relevância maior. Critério de erodibilidade MCT é o mais importante, pois foi desenvolvido para solos brasileiros e já foi amplamente usado por diversos outros autores. Bastos (1999) avaliou diferentes critérios de erodibilidade em solos residuais e concluiu que dentre outros métodos de avaliação indireta, o critério de erodibilidade MCT foi o que mais apresentou correspondência com a erodibilidade observada em campo.

O Critério de Cisalhamento Direto também foi amplamente usado, como pode-se observar nas pesquisas desenvolvidas por Bastos (1999),

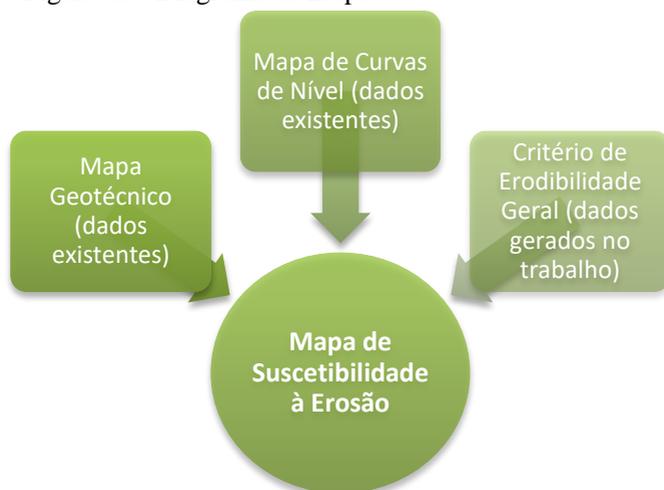
Higashi (2006),Higashi et al. (2012),Fernandes (2015), por esta razão possui o “peso” mais alto.

#### 4.4. ETAPA DE GEOPROCESSAMENTO

A representação espacial dos dados levantados e dos resultados dos ensaios de laboratório foi feito com ajuda do Software de Sistemas de Informação Geográfica ArcGIS.

A caracterização da área de estudo foi elaborada com os mapas temáticos obtidos de pesquisas anteriores no mesmo local. A partir destes mapas, somados aos dados de erodibilidade gerados, foi possível gerar um mapa de suscetibilidade à erosão dos solos residuais dos bairros Ratoles e Vargem pequena, cujo o limite entre uma unidade geotécnica e outra é a junção das unidades geotécnicas dos mapas obtidos anteriormente. Para um melhor entendimento a Figura 43 ilustra o método.

Figura 43 - Diagrama da Etapa 4



Fonte: O Autor, 2017

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de todos os ensaios feitos no presente trabalho e o mapa de suscetibilidade a erosão.

### 5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Neste item são apresentados os ensaio de caracterização que identificam alguns comportamentos do solo. Foram realizados os ensaio de caracterização granulométrica, densidade real das partículas, limites de consistência, e teor de umidade natural. Vale ressaltar que o ensaio de caracterização MCT pelo método expedito das pastilhas também é uma forma de caracterização física dos solos porém, é apresentado após este capítulo pois foi utilizado como critério de erodibilidade.

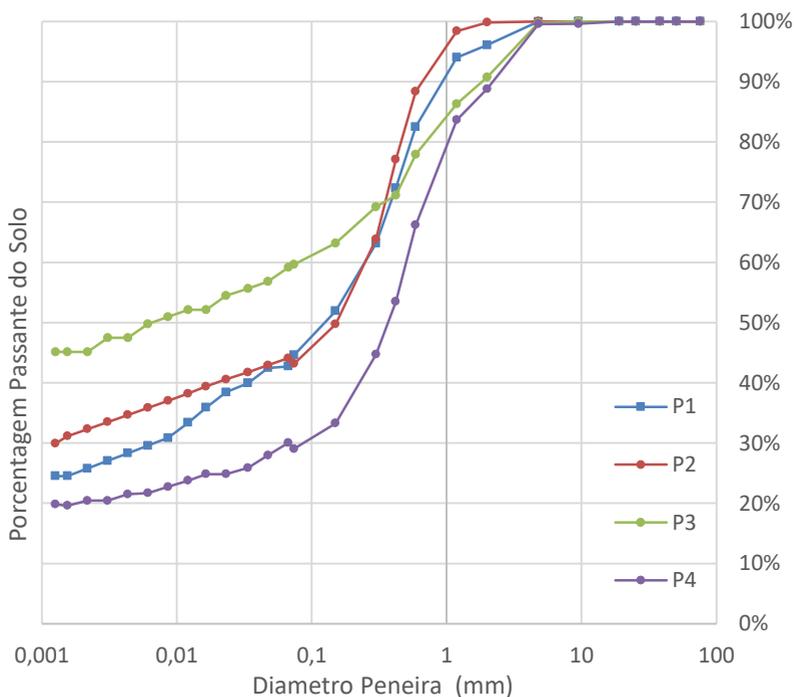
#### 5.1.1. Análise granulométrica

Segundo a norma NBR 7181/1984 foram obtidos as seguintes porcentagens de frações granulométricas, por meio dos ensaios de peneiramento grosso, fino, e sedimentação. A Tabela 8 e a Figura 44 apresentam as distribuições granulométricas dos quatro pontos estudados.

Tabela 8 - Frações granulométricas.

Ponto	Unidade Geotécnica	Granulometria [%]					
		Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
1	PVg	25,79	16,94	9,21	30,58	13,56	3,92
2	PVg	32,32	11,79	5,61	38,66	11,47	0,15
3	PVg	45,12	14,03	4,05	14,73	12,81	9,26
4	Cde	20,45	9,60	3,24	32,91	22,61	11,20

Figura 44 - Curvas granulométricas.



A partir da Figura 44, percebe-se que o ponto 3 apresenta distribuição granulométrica com maior teor de finos, os pontos 1 e 2 se assemelham nas curvas granulométricas, e o ponto 4 é o que apresenta a granulometria com maior quantidade de partículas grandes.

### 5.1.2. Densidade real das partículas

A Tabela 9 apresenta os resultados para densidade real das partículas dos pontos estudados.

Tabela 9 - Densidade real das partículas.

Ponto	Unidade geotécnica	Massa específica
		[g/cm <sup>3</sup> ]
1	PVg	2,11
2	PVg	2,46
3	PVg	2,12
4	Cde	2,34

Segundo estudos realizados anteriormente por Rosniecek e Imai (2013), os valores de densidade real das partículas para o solo Podzólico Vermelho-Amarelo no bairro Ratoles, normalmente, resultam em torno de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, porém, os resultados mostram-se inferiores aos valores apresentados. Tal fato pode ser explicado pela presença de matéria orgânica na amostra, pois as coletas foram realizadas em horizontes superficiais de transição entre A e B.

Para o critério de erodibilidade proposto por Higashi et al. (2012), solos com densidade real das partículas entre 2,53 e 2,67 g/cm<sup>3</sup> possuem alta suscetibilidade a erosão. Seguindo esse critério, nenhum dos 4 pontos coletados foi caracterizado como erodível.

### 5.1.3. Limites de consistência

Os resultados dos limite de consistência são apresentados na Tabela 10

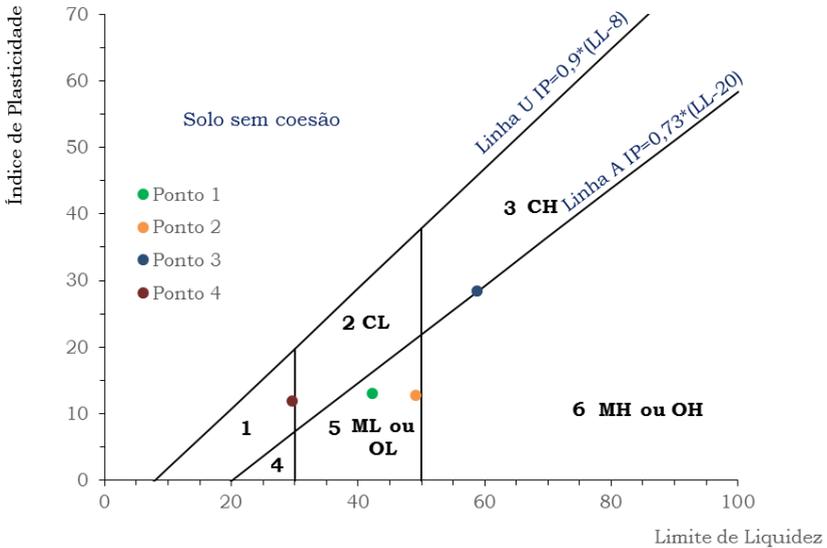
Tabela 10 - Limites de consistência.

Ponto	Unidade geotécnica	Limites de consistência [%]		
		LL	LP	IP
1	PVg	42	29	13
2	PVg	48	36	12
3	PVg	59	30	29
4	Cde	30	18	12

As amostras foram classificadas quanto a plasticidade segundo o critério de Burmister (1949) apud Das (2002) como: pontos 1,2 e 4 sendo de plasticidade média, e o ponto 3 de plasticidade alta.

A Figura 45 apresenta a carta de classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos

Figura 45 - Carta de classificação SUCS.



Onde:

- 1 - Argilas inorgânicas de baixa plasticidade
- 2 - Argilas inorgânicas de média plasticidade
- 3 - Argilas inorgânicas de alta plasticidade
- 4 - Siltes inorgânicos de baixa compressibilidade
- 5 - Siltes inorgânicos de média compressibilidade e siltes orgânicos
- 6 - Siltes inorgânicos de alta compressibilidade e argilas orgânicas

Os pontos 1 e 2 são classificados como siltes inorgânicos de média compressibilidade, o ponto 3 é classificado como argila inorgânica de alta plasticidade e o ponto 4 como silte inorgânico de baixa compressibilidade.

#### 5.1.4. Teor de Umidade Natural

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaio de teor de umidade natural dos solos realizados de acordo com a norma NBR 6457/1986.

Tabela 11 - Resultados de teor de umidade natural.

Ponto	Unidade geotécnica	Teor de umidade natural
		[%]
1	PVg	24,18
2	PVg	23,34
3	PVg	30,34
4	Cde	13,45

Percebe-se que o ponto 3 por ter o maior teor de finos, responsáveis por uma maior retenção de água, apresentou maior umidade, enquanto que o ponto 4 por apresentar maior porcentagem de grãos grosseiros, possui um teor de umidade natural menor. O ponto 1 e 2 apresentaram um comportamento intermediário.

#### 5.2. ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaio de Cisalhamento Direto que classificam o solo pelo critério de erodibilidade de Bastos et al. (2001).

As Figuras 46 e 47 representam as envoltórias de Mohr Coulomb para as condições naturais e inundadas. Para obtenção dessas envoltórias, estão presentes no ANEXO A os resultados das curvas Tensão *versus* Deformação.

Figura 46 - Envoltória de ruptura para condição natural.

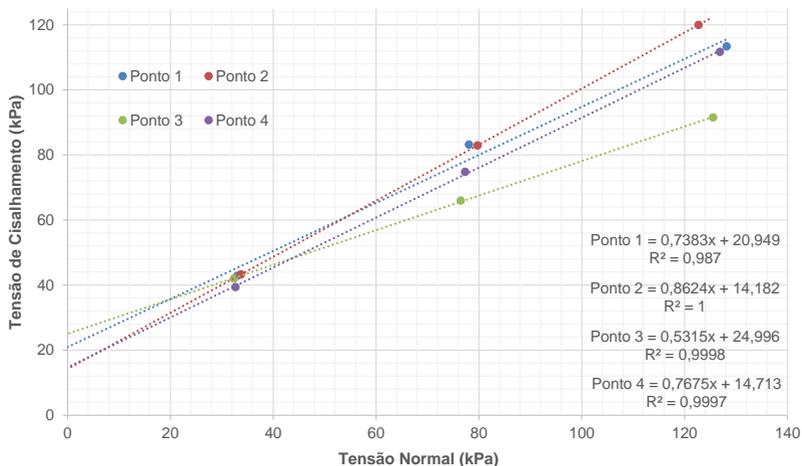
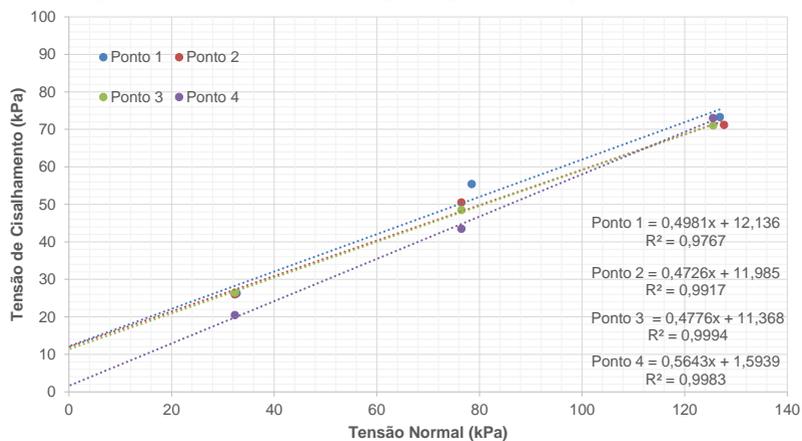


Figura 47 - Envoltória de ruptura para condição inundada.



Com as equações das envoltórias pode-se, pelas formulas  $y = Ax+B$  características de retas, obter os valores das coesões dos solos estudados, onde “B” representa a coesão e “A” o coeficiente angular. A Tabela 12 apresenta o resumo das coesões naturais e inundadas realizadas para os quatro pontos, e classifica pelo critério de Cisalhamento Direto de Bastos et al. (2001) a erodibilidade dos solos.

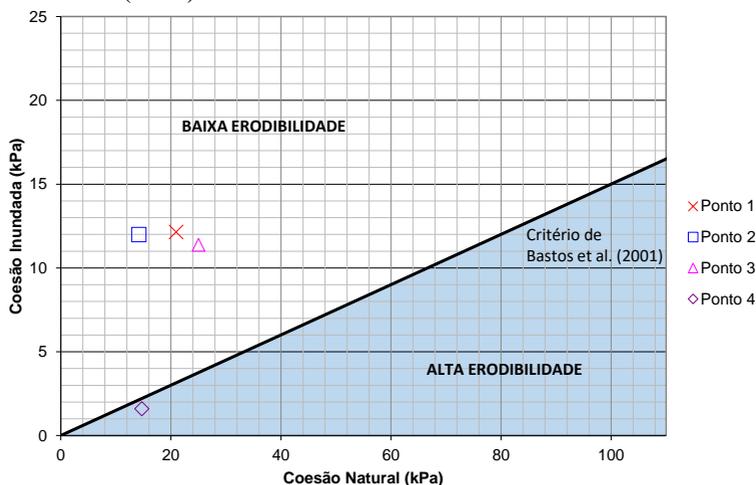
Tabela 12 - Valores de variação de coesão para os pontos de estudo.

Pontos de Estudo	Coesão		$\Delta c$ (%)	Critério de Erodibilidade por Cisalhamento Direto
	Natural	Inundada		
Ponto 1	20,95	12,14	42%	Não Erodível
Ponto 2	14,18	11,98	16%	Não Erodível
Ponto 3	25,00	11,37	55%	Não Erodível
Ponto 4	14,71	1,59	89%	Erodível

Verifica-se que para os solos apresentados pelos pontos de estudos 1, 2, e 3, o decréscimo de valores de coesão não ultrapassou o critério de Bastos et al. (2001) porém, o ponto 4 apresentou uma queda de coesão de 89%, ultrapassando assim o limite proposto e caracterizando-se como erodível.

A Figura 48 exibe de uma outra forma o critério estudado.

Figura 48 - Critério de erodibilidade por cisalhamento direto de Bastos et al. (2001).



### 5.3. CRITÉRIO DE ERODIBILIDADE MCT

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificados presentes no critério de erodibilidade MCT.

#### 5.3.1. Infiltrabilidade

As Figuras 49 e 50 apresentam os ensaios de infiltrabilidade com teor de umidade natural, e teor de umidade após a secagem de 48 horas ao ar, a Figura 51 apresenta todos os ensaios conjuntamente.

Figura 49 - Ensaio de Infiltrabilidade com umidade natural.

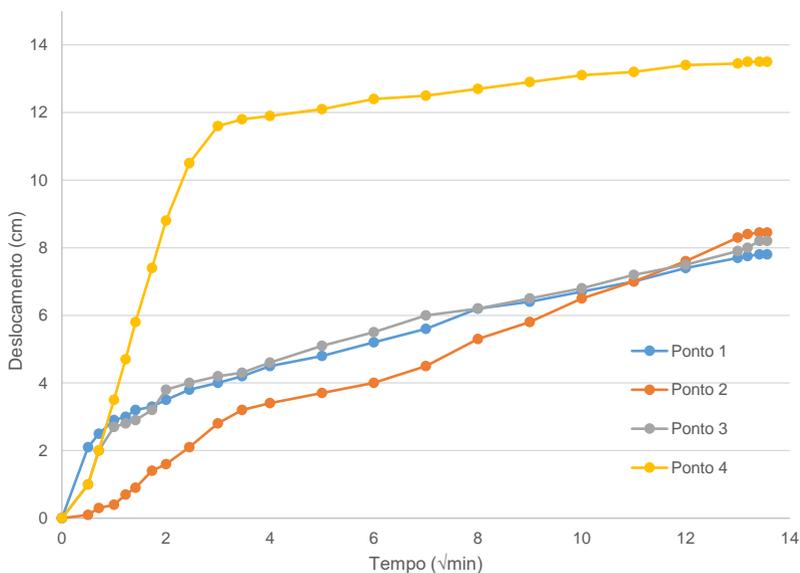


Figura 50 - Ensaio de Infiltrabilidade com secagem de 48 horas.

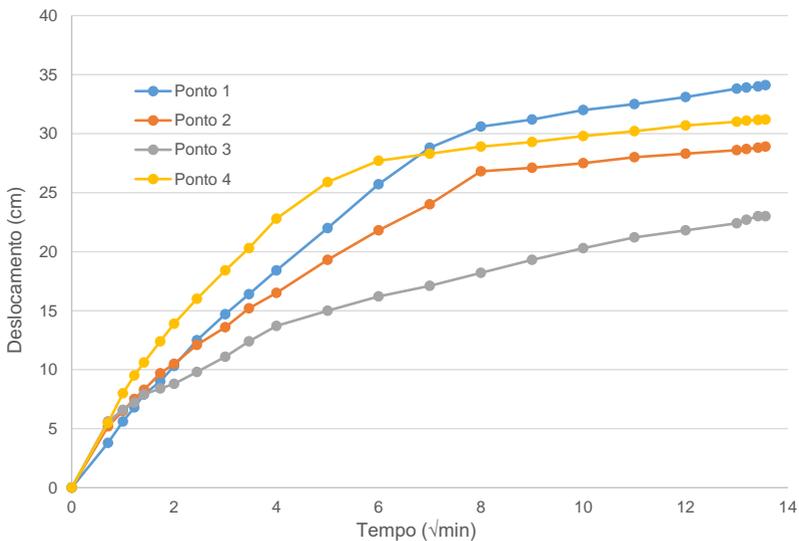
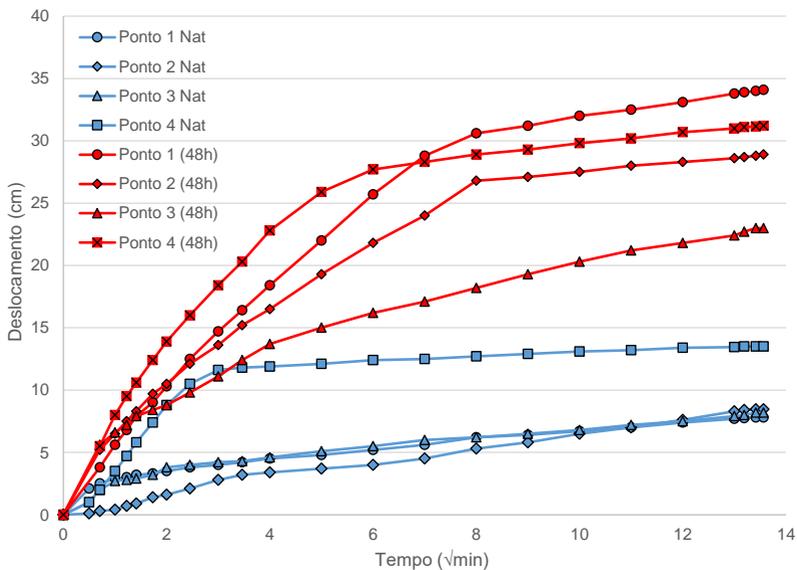


Figura 51 - Ensaio de Infiltrabilidade juntos.



Percebe-se pelos gráficos que após a secagem de 48 horas os solos apresentam uma infiltrabilidade maior. Destaca-se também que o solo do ponto 4, quando ensaiado no teor de umidade natural, possui um comportamento bem diferente dos demais. Este comportamento já era esperado pois este tipo de solo possui um menor teor de umidade natural e também devido ao fato de pertencer a uma unidade geotécnica diferente chamada Cde (Cambissolo depósito de encosta).

### 5.3.2. Perda de massa por imersão modificado

A Tabela 13 apresenta os resultados dos ensaios de perda de massa por imersão modificado realizados para os quatro pontos de estudo com teor de umidade natural, e teor de umidade após a secagem de 48 horas ao ar.

Tabela 13 - Resultados de Perda de Massa por Imersão Modificado

Pontos	Massa Desagregada ( $\rho_i$ )	
	Natural	Após 48h
Ponto 1	1,66	24,91
Ponto 2	5,15	5,97
Ponto 3	1,03	4,51
Ponto 4	7,64	72,75

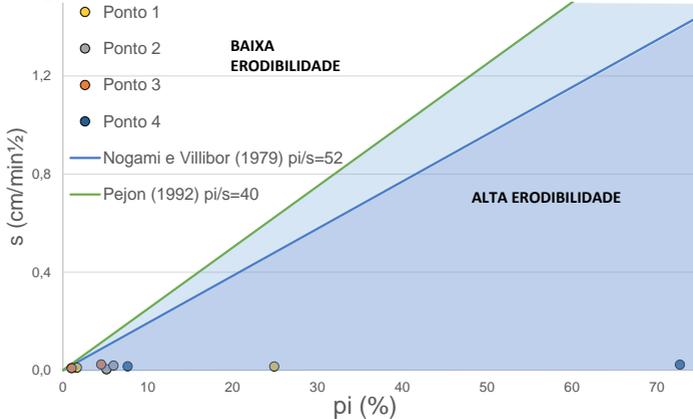
Todos os pontos, para a umidade natural, perderam pouca massa quando imersos em água porém, quando secos por 48 horas, os resultados apresentaram tendência diferente.

O ponto 4 foi o que apresentou a maior perda de massa para 48 horas, 72%, sendo considerado um valor muito maior que os demais. O fato pode ser explicado por sua granulometria diferenciada. A argila é responsável pela ligação cimentícia do solo e está diretamente ligada a coesão. Este solo é o que apresenta o menor teor de argila, portanto em teoria, menos ligação entre as partículas, o que resultaria em maior desagregação do solo.

### 5.3.3. Resultado Critério de Erodibilidade MCT

Os resultados do critério de erodibilidade MCT estão expressos na forma de gráfico pela Figura 52.

Figura 52 - Resultado do Critério de Erodibilidade MCT.



As relações  $pi/s$  são ultrapassadas por todos os solos estudados. Observando o gráfico, percebe-se que o coeficiente de sorção ( $s$ ) é o principal fator que torna os solos erodíveis. Outros estudos, como por exemplo Higashi et al. (2012), mostram solos de uma mesma classificação pedológica com valores mais altos.

### 5.4. CARACTERIZAÇÃO MCT-MÉTODO EXPEDITO DAS PASTILHAS

De acordo com o que aqui foi apresentado no capítulo de método, é expresso na Tabela 14 as características dos solos estudados, e na Figura 53 os resultados do ensaio expedito das pastilhas para caracterização MCT. Todas as contrações e penetrações dos anéis foram anotadas, e as médias foram usadas para classificação.

Figura 53 - Gráfico de classificação MCT.

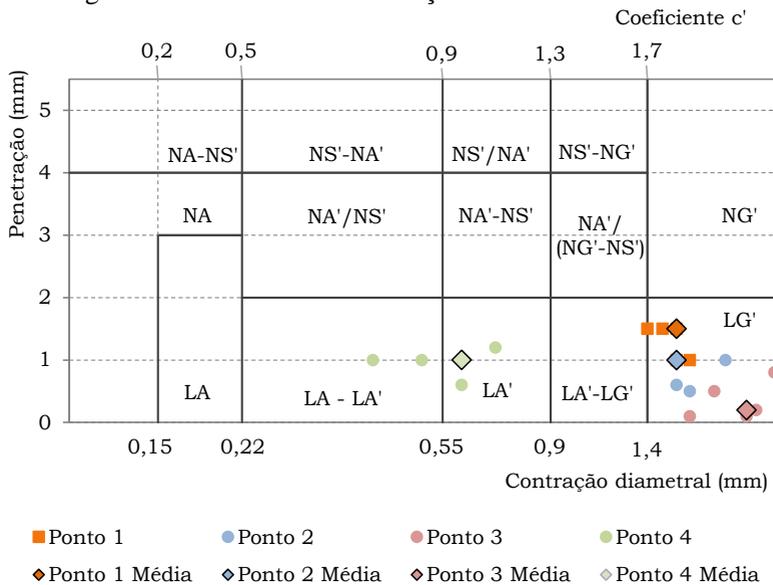


Tabela 14 - Características do solo para classificação MCT

	Início	Fim	Descrição
1			A esfera não se quebra ao ser esmagada. Quando imersa desagregou-se completamente em duas horas com partículas visíveis.
2			Idem solo 1
3			A esfera não se quebra ao ser esmagada. Quando imersa se trincou e quebrou em pedaços milimétricos.
4			A esfera não se quebra ao ser esmagada. Quando imersa desagregou-se rapidamente em partículas visíveis

As esferas mostradas na Tabela 14 mostraram-se condizentes com o apresentado nos ensaios granulométricos. As esferas dos solos 1 e 2 quando imersas em água lentamente e gradualmente desagregaram-se em partículas visíveis mostrando-se assim como solos arenosos mas com porcentagem considerável de argila. A esfera do ponto 3 rachou-se em vários pedaços, assim classifica-se como solo argiloso. No ponto 4 a esfera desagregou-se mais rapidamente em partículas visíveis, o que mostra um solo mais arenoso.

Os solos estudados nos pontos 1, 2 e 3 foram caracterizados como LG', argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas, e pela classificação MCT são descritos como não erodíveis. O solo do ponto 4 é caracterizado como LA', areias argilosas lateríticas, para este tipo de solo a erosão também é descrita como baixa.

## 5.5. CRUZAMENTO DOS RESULTADOS E GEOPROCESSAMENTO

A seguir a Tabela 15 apresenta o cruzamento dos dados obtidos pelos quatro critérios de erodibilidade.

Tabela 15 - Somatório dos critérios de erodibilidade.

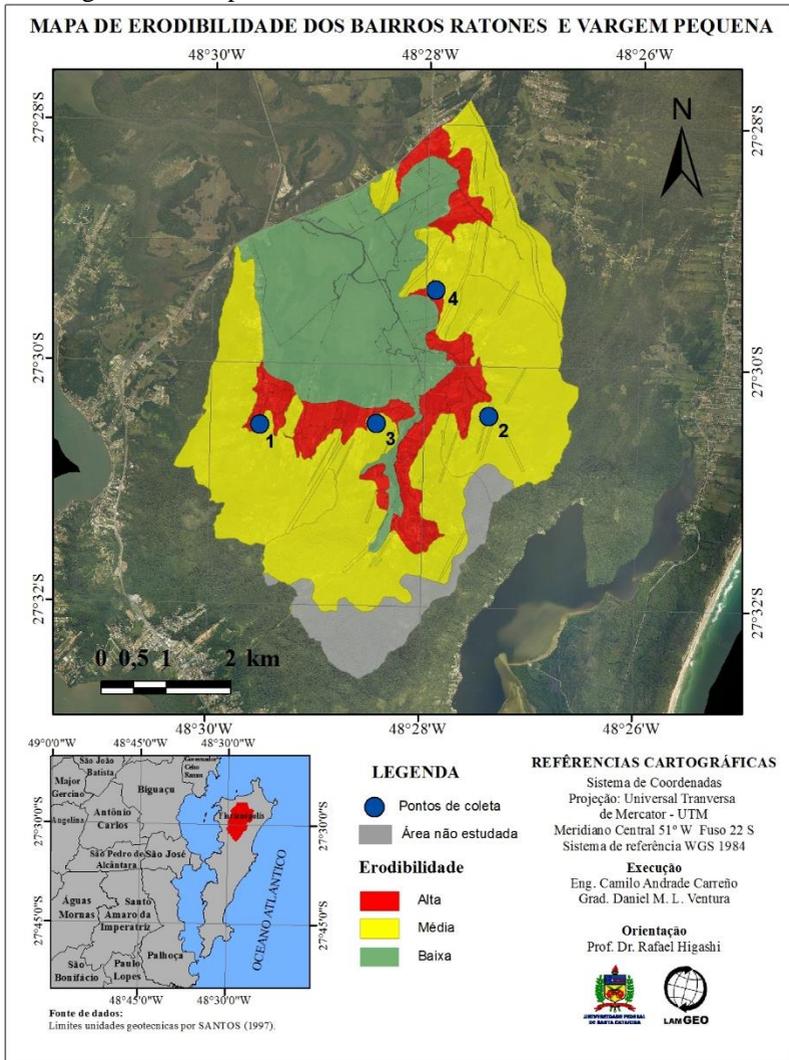
Ponto 1				Ponto 2			
Critério	Peso	Alto (1)/ Baixo (0)	Soma	Critério	Peso	Alto (1)/ Baixo (0)	Soma
Erod. MCT	0,4	1	0,4	Erod. MCT	0,4	1	0,4
Cis. Direto	0,3	0	0	Cis. Direto	0,3	0	0
Den. R. das	0,15	0	0	Den. R. das	0,15	0	0
Clas. MCT	0,15	0	0	Clas. MCT	0,15	0	0
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,4</b>	<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,4</b>
<b>Erodibilidade</b>			<b>0,4</b>	<b>Erodibilidade</b>			<b>0,4</b>
<b>Média</b>				<b>Média</b>			
Ponto 3				Ponto 4			
Critério	Peso	Alto (1)/ Baixo (0)	Soma	Critério	Peso	Alto (1)/ Baixo (0)	Soma
Erod. MCT	0,4	1	0,4	Erod. MCT	0,4	1	0,4
Cis. Direto	0,3	0	0	Cis. Direto	0,3	1	0,3
Den. R. das	0,15	0	0	Den. R. das	0,15	0	0
Clas. MCT	0,15	0	0	Clas. MCT	0,15	0	0
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,4</b>	<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0,7</b>
<b>Erodibilidade</b>			<b>0,4</b>	<b>Erodibilidade</b>			<b>0,7</b>
<b>Média</b>				<b>Alta</b>			

Os resultados da Tabela 15 apresentaram coerência com outros estudos de erosão. Os pontos 1, 2 e 3 obtiveram o mesmo grau de erodibilidade, sendo classificados com erodibilidade média, visto que pertencem a uma mesma classificação geotécnica, Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito, este fato já era esperado. O ponto 4 foi classificado com erodibilidade alta, este solo pertencente a uma unidade geotécnica chamada Cambissolo depósito de encostas, conhecida por seus solos resultarem em erodibilidade elevada.

### 5.5.1. Mapa de suscetibilidade a erosão

Com o cruzamento dos dados foi possível elaborar o Mapa de suscetibilidade a erosão do bairro Ratonés e Vargem pequena presente na Figura 54 com a escala de 1:50.000.

Figura 54 - Mapa de suscetibilidade a erosão



Como mostra o mapa da Figura 54, a erodibilidade é caracterizada como média no solo pertencente a unidade geotécnica Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito. No solo pertencente a unidade geotécnica Cambissolo depósito de encosta a erodibilidade foi classificada como alta. Por sua vez, nos solos das unidades geotécnicas sedimentares, apesar de não terem sido investigados, atribuiu-se a classe de erodibilidade baixa tendo em vista a presença de declividades que variam entre 0 e 3% (baixas declividades), o que indica, a presença de solos que já sofreram processo de transporte. A unidade geotécnica Cg (Cambissolo de substrato granito) não foi investigada. Esta unidade está presente no topo da elevação e não foi possível a coleta de amostra pois as vias de acesso são inexistentes, também junta-se o fato de estar longe da parte urbanizada e dificilmente irá sofrer com ação antrópica.

## 6. CONCLUSÕES

Após os capítulos de revisão bibliográfica, metodologia, inúmeros ensaios e resultados, pode-se considerar que todos os objetivos foram alcançados de forma consistente.

Foi possível definir os universos geotécnicos presentes na área de estudo por meio mapas geotécnicos obtidos na literatura, e também pela observação tátil visual dos solos através das saídas de campo.

O potencial erodível dos solos estudados foi definido de acordo com os critérios de erodibilidade estabelecidos, e pelos ensaios realizados. Estes ensaios obtiveram resultados que expressam a tendência normal dos solos classificados da mesma forma que estudos anteriores, tendência essa apresentadas na revisão bibliográfica principalmente em Higashi et al. (2012).

A avaliação da erodibilidade, proposta pelo modelo de pesos com o cruzamento de critérios, coincidiu com o observado em campo. Os solos caracterizados como Podzólico Vermelho-Amarelo foram classificados com média erodibilidade, e os solos caracterizados como Cambissolo depósito de encosta foram classificados com alta erodibilidade. Não foi possível a coleta de amostras na unidade geotécnica Cg (Cambissolo substrato granito) pois as vias de acesso eram inacessíveis, por esta razão também a área da unidade ainda está longe de ações antrópicas.

O mapa de erodibilidade, por sua vez, foi obtido através do cruzamento do mapa geotécnico obtido por estudos anteriores com os novos dados gerados, podendo assim servir de base para futuros estudos na região, principalmente para mapas de aptidão a urbanização.

É importante ressaltar que o assoreamento proveniente da acumulação de elementos sólidos resultantes da erosão do solo pode ser significativa, uma vez que os solos estudados para esta pesquisa caracterizaram se pela erodibilidade média. Este processo resulta na redução da vazão, e conseqüentemente no transbordamento dos cursos de água em eventos climáticos de precipitação intensa. O rio Ratonas já sofre com assoreamento, porém, a área do bairro Ratonas e Vargem Pequena ainda não sofreram grandes urbanizações, portanto ainda há tempo para que estudos de urbanização sejam feitos e aplicados.

Conclui-se portanto, que o mapa de erodibilidade gerado possui caráter preliminar, e que mais pontos de estudos seriam necessários para classificar de fato a erodibilidade dos solos da região.

## 7. SUGESTÕES

Trabalhos futuros podem ser realizados na mesma região sendo complementados pelos seguintes itens:

- Utilizar outras metodologias e critérios de erosão presentes na bibliografia, possibilitando assim mais cruzamentos de dados e melhorando a credibilidade nos resultados obtidos;
- Fazer mais ensaios de caracterização e geotécnicos para enriquecer o banco de dados;
- Coletar mais amostras de solo nas unidades geotécnicas residuais, afim de melhor caracteriza-las em termos de erodibilidade;
- Investigar a erodibilidade dos solo também nas unidades geotécnicas sedimentares;
- Aumentar a escala de trabalho para que sejam possíveis melhores resultados no mapeamento;
- Estudar mais detalhadamente as características geotécnicas nas unidades presentes;
- Realizar mais trabalhos de campo para se poder comprovar as escalas, e assim as delimitações das unidades geotécnicas.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR-6457. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 8, 2016. Rio de Janeiro.

ABNT NBR-6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 10, 2016. Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984) - Norma: Solo - Análise granulométrica: Terminologia (NBR 7181/84)

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: solo – determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: solo – determinação do limite de plasticidade – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. RELAÇÃO ENTRE A ERODIBILIDADE EM ENTRESSULCOS E ESTABILIDADE DOS AGREGADOS(. Revista Brasileira de Ciência do Solo, , n. 5, p. 1085–1098, 2007.

ALCÂNTARA M.A.T. Estudo da erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo. São Carlos. 129f Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 1997.

AMORA – Associação dos Moradores de Ratonés, 2013.

BASSO, L. Estudo Da Erodibilidade De Solos E Rochas Sedimentares De Uma Voçoroca Na Cidade Desão Francisco De Assis - Rs. , 2013.

BASTOS, C. A. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. , 1999.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. Proposta Metodológica Para Avaliação Geotécnica Da Erodibilidade De Solos Residuais Não Saturados. , p. 1–9, 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação dos solos. São Paulo, 1999.

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

CECCA - CENTRO DE ESTUDOS CULTURA E CIDADANIA. Unidades de Conservação e Áreas protegidas da Ilha de Santa Catarina: caracterização e legislação. Ed. Insular, Florianópolis. 1997.

DAS, B. M. Principles of Foundation Engineering. 2002.

DAVISON DIAS, R. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. Revista do Instituto Geológico, v. 16, n. special, p. 51–55, 1995. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0100-929X.19950011>>. .

DERISIO, J.C. Introdução ao controle de poluição ambiental. 2.Ed. São Paulo. Signus Editora. 2000. 164p

FERNANDES, L. P. Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria – RS. , p. 150, 2015.

FORTES, R. M. Método expedito de identificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando-se anéis de PVC rígidos. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica USP, São Paulo, 1990, 228p.

FREIRE, E. . Ensaio Inderbitzen Modificado: Um Novo Modelo Para Avaliação Do Grau De Erodibilidade Do Solo. , p. 8, 2001.

FUSVERK, R. C. Diagnóstico ambiental subsidiário de Gerenciamento Costeiro Integrado Da Bacia Hidrográfica Do Rio

Ratones , Ilha De Santa Catarina ( Sc , Brasil ), 2002. Universidade Federal de Santa Catarina.

GODOY, H.; BERNUCCI, L. B.; NOGAMI, J. S. Diretrizes para a identificação expedita de solos lateríticos para uso em obras viárias. In: 30ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 1996, Anais, ABPV, v.2, p.557-568.

GRANDO, A. Monitoramento e Modelagem Hidrossedimentológica em uma Microbacia Hidrográfica Experimental, 2011. Universidade Federal de Santa Catarina.

GUERRA, A. J.; DA SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Bertrand B ed. Rio de Janeiro, 2012.

HIGASHI, R. A. DOS R. Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento Geotécnico e ambiental, 2006. Universidade Federal de Santa Catarina.

HIGASHI, R. A. DOS R.; MACCARINI, M.; DIAS, R. D. On the Erosive Potential of Some Weathered Soils from Southern Brazil. , v. 34, n. 3, p. 1–7, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. Censo 2010. <http://www.ibge.gov.br/>

IDE, D. M. Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana. , 2009.

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. Geologia da Engenharia. São Paulo, 1998.

IPT. Ocupação de encostas: manual. , 1991. São Paulo.

KOPEZINSKI, I. Mineração x Meio Ambiente: Considerações Legais, Principais Impactos Ambientais e seus Processos Modificadores. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

LAL, R. Soil Erosion in the Tropics: Principles and management. New York: McGraw-Hill, 1990.

LOHMANN, M.; SANTOS, L. J. C. A morfopedologia aplicada à compreensão dos processos erosivos na bacia hidrográfica do arroio Guassupí, São Pedro do Sul - RS. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 2, p. 91–102, 2005.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; AYRES, F. M.; SOBRINHO, T. A. Integrando SIG e USLE para mapeamento da perda de solo em área de proteção ambiental. Revista Agrarian, v. 7, n. 26, p. 552–559, 2014.

MIRANDA, J. G. de. Mapeamento geotécnico e estudo da susceptibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala 1: 100.000. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NOGAMI, J. S.; COZZOLINO, V; M. N. A identificação de solos tropicais: dificuldades e proposta de um método preliminar. In: 20ª Reunião Anual De Pavimentação, Anais, Fortaleza, 1985, ABPv, p.117-134.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, v. 19, n. 1, p. 196–199, 1979.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação Expedida dos Grupos da Classificação MCT para Solos Tropicais. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Anais... . p.1293–1300, 1994.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo, Editora Villibor, 1995, 213p.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Importância e determinação do grau de laterização em geologia de engenharia. In: 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Anais, Rio de Janeiro, ABGE, 1996, v.1, p.345-358.

PEJON, O. L.; Silveira, L.L.L. (2007) Index properties to predict erodibility of tropical soils. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 66, Number 2.

PELLERIN, J. R. G. M.; TOMAZZOLI, E. R.; BAUZYS, F.; et al. Mapeamento Geológico-Geomorfológico Do Setor Norte Da Ilha De Santa Catarina. Revista de Geografia, p. 248–261, 2010.

ROSNIECEK, A.; IMAI, H. N. Mapeamento Geotécnico E Análise De Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Rasos Da Bacia Do Rio Ratonos – Aplicação Do Modelo Shalstab. , p. 155, 2013.

SANTOS, G.T. Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia. Porto Alegre - RS: Tese (doutorado) em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

SANT'ANA, W. C. Estudo de misturas de areia-asfalto a quente Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2002, 155p.

SILVA, R. V. A da. Instrumental para definição de zonas de amortecimento de Unidade de Conservação: o caso da Estação Ecológica de Carijós-IBAMA. Florianópolis/SC. 2005. 140 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal de Santa Catarina.

DA SILVA, E. C.; PEDROSA, L. E.; DIAS, L. M. C.; MORENO, M. I. C. MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DA FOLHA CÓRREGO DAS MOÇAS , NO MUNICÍPIO DE UBERLÂNDIA-MG. , v. 50, n. Figura 2, p. 1–24, 2000.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. DE. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 2, p. 79–97, 2012.

UNESCO. Engineering Geological Map: a Guide to their Preparation. 1976.

VIEIRA, V. F. Estimativa de perdas de solo por erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica. Geografia, v. 17, n. 1, p. 73–81, 2008.

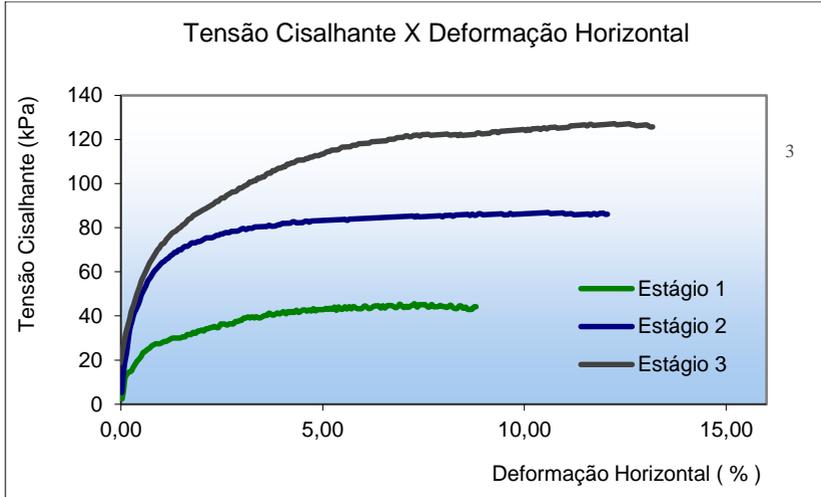
VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. Erosão dos Solos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Solos do Interior de São Paulo. São Carlos/SP: ABMS/EESC-USP, 1993, v.2, p.413-430.

ZANINI, L. F. P.; BRANCO, P. DE M. B.; CAMOZZATO, E.; RAMGRAB, G. E. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Florianópolis. , 1997. Florianópolis.

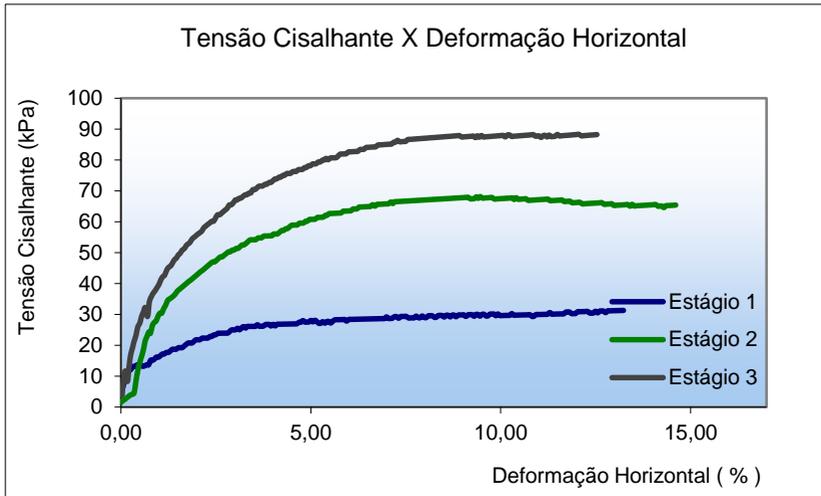
ZUQUETTE, L. V. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras. Tese - Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987, 3v., 657p

## ANEXO A

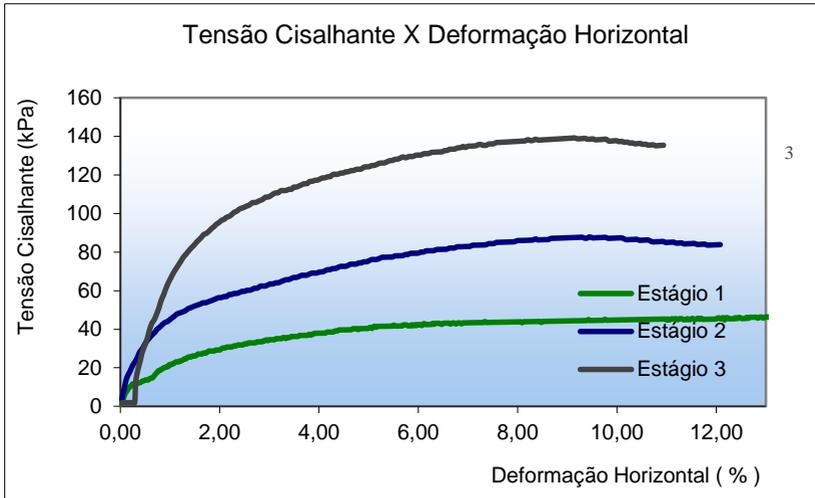
Ensaio de cisalhamento direto ponto 1 em condição natural



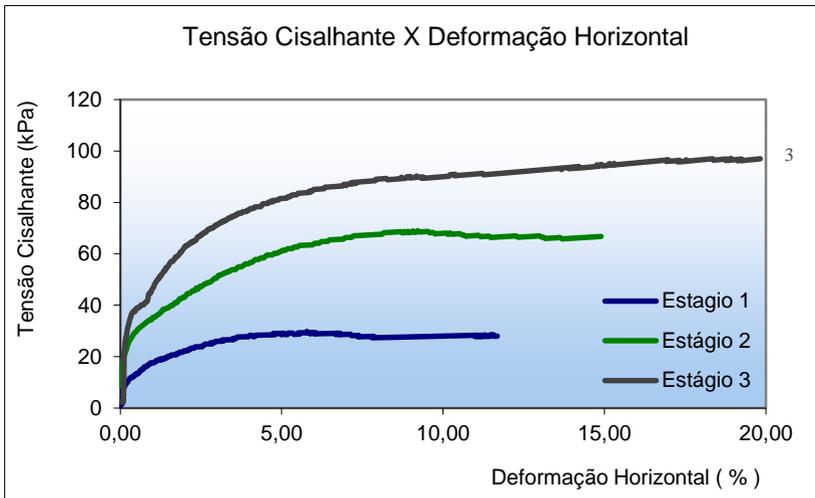
Ensaio de cisalhamento direto ponto 1 em condição inundada



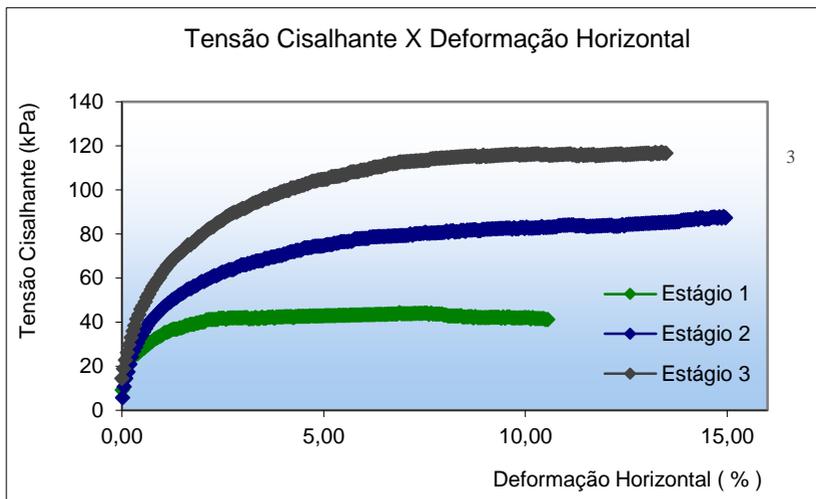
Ensaio de cisalhamento direto ponto 2 em condição natural



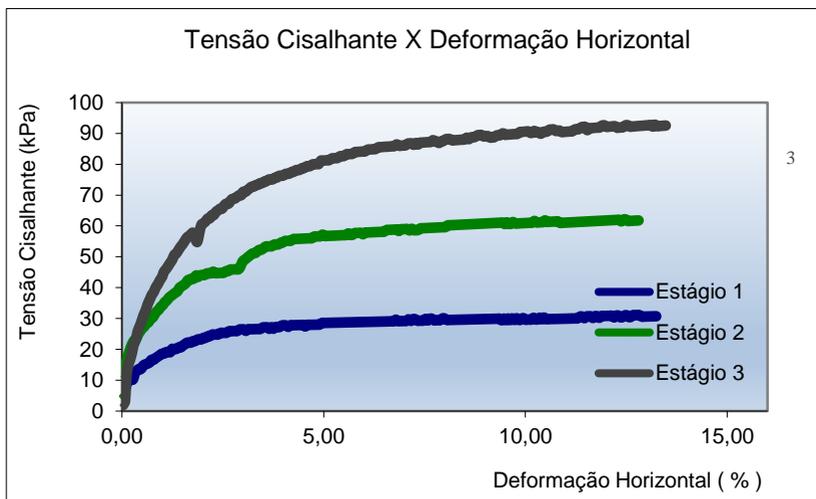
Ensaio de cisalhamento direto ponto 2 em condição inundada



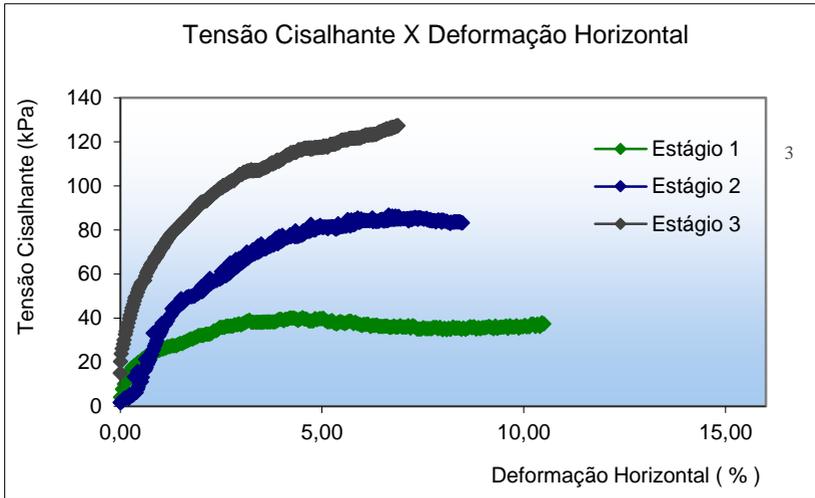
### Ensaio de cisalhamento direto ponto 3 em condição natural



### Ensaio de cisalhamento direto ponto 3 em condição inundada



Ensaio de cisalhamento direto ponto 4 em condição natural



Ensaio de cisalhamento direto ponto 4 em condição inundada

