



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

---

Engenharia Civil e Ambiental

**CAMILA JORGE MORETTI DE CAMPOS**

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE PELO MÉTODO INDERBITZEN EM  
SOLO NÃO SATURADO DA REGIÃO DE BAURU-SP**



Bauru  
2014

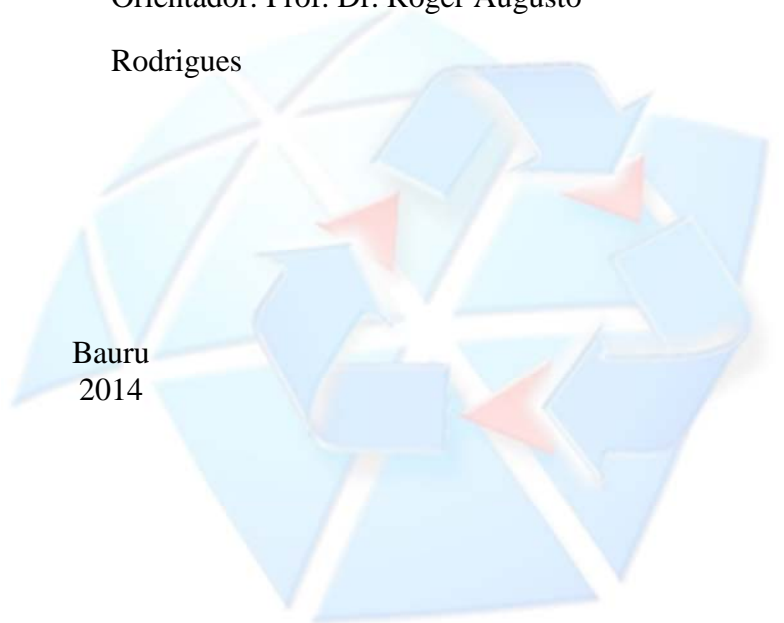
**CAMILA JORGE MORETTI DE CAMPOS**

**AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE PELO MÉTODO INDERBITZEN EM  
SOLO NÃO SATURADO DA REGIÃO DE BAURU-SP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação “Engenharia Civil e Ambiental”, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Roger Augusto  
Rodrigues

Bauru  
2014



Campos, Camila Jorge Moretti de.  
Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen  
em solo não saturado da região de Bauru - SP / Camila  
Jorge Moretti de Campos, 2014  
153 f.

Orientador: Roger Augusto Rodrigues

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Erodibilidade. 2. Solos não saturados. 3.  
Inderbitzen. I. Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CAMILA JORGE MORETTI DE CAMPOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 30 dias do mês de junho do ano de 2014, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CAMILA JORGE MORETTI DE CAMPOS, intitulada "AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE PELO MÉTODO INDERBITZEN EM SOLO NÃO SATURADO DA REGIÃO DE BAURU-SP". Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ROGER AUGUSTO RODRIGUES

Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO

Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço meus pais, Valdir e Angélica, por serem fundamentais na construção deste trabalho, e sempre estarem ao meu lado em todos os momentos, dando apoio, incentivo e força. Por sempre me apoiarem em todas minhas decisões com muito amor, e me mostrarem que o caminho é árduo, mas com paciência e bom humor fica mais fácil de seguir.

Agradeço meus amigos de longa data, que mesmo distantes sempre incentivaram e apoiaram meu trabalho, se envolveram, deram ideias, me socorreram nos momentos de tensão e me acompanharam nos momentos de diversão e conquista, sempre compartilhando cada parte desta trajetória. Mesmo sendo injusto citar nomes aqui, gostaria de deixar registrada minha admiração por vocês: Nara, Espiga, Fronha e Barbara.

Agradeço também ao Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues pela orientação, sempre com muita atenção do início ao fim deste trabalho, por todos os ensinamentos, ideias e conselhos sempre muito sábios que foram fundamentais para meu desenvolvimento em um campo científico tão novo pra mim.

Ao pessoal do laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP/Bauru pela grande ajuda nos trabalhos de campo e na realização de ensaios, em especial ao Gustavo, que sempre foi tão atencioso e prestativo. Aos amigos que fiz no mestrado, Lucas e Luciana, por toda ajuda nos ensaios, pela valiosa troca de idéias e tempo compartilhados juntos.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UNESP e a todos os professores que contribuíram para minha formação, em especial aos professores Heraldo Giacheti e Paulo Lodi pelas importantes contribuições no exame de qualificação.

Ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte desse trabalho, fruto de um esforço coletivo que culminou em uma dissertação de mestrado. Espero que o aprendizado de todos vocês tenha ido além disso, assim como o meu, e que este trabalho ainda renda muitos frutos e que possa fazer alguma diferença na sociedade.

## RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta resultados acerca da avaliação da erodibilidade de um solo não saturado localizado em uma área urbana de Bauru - SP afetada por um processo erosivo. O processo erosivo em questão se desencadeou devido a intervenções antrópicas no local sem devidas precauções para amenização do impacto causado, como o desmatamento, impermeabilização do solo e construção de loteamentos residenciais de alto padrão com projetos inadequados e falta de obras de infra-estrutura de drenagem. A avaliação do fenômeno se deu por meio de levantamento bibliográfico do tema, principalmente do histórico de informações disponíveis acerca do processo erosivo, observações de campo e ensaios de laboratório: caracterização, erodibilidade através do Inderbitzen e cisalhamento direto, além de ensaios para medida e controle de sucção das amostras, afim de se obter a curva de retenção e valores de comparação através deste parâmetro para os ensaios de erodibilidade. Todos os ensaios foram realizados em amostras de dois locais distintos ao longo do processo erosivo. Os solos da região são residuais de Arenito, caracterizados como areias finas a médias argilosiltosas. Os resultados dos ensaios de erodibilidade através do Inderbitzen mostraram grande quantidade de solo carregada pelo escoamento hídrico superficial, sendo maiores taxas ocorridas no solo do Local A. A perda de solo variou em sua quantidade de acordo com a inclinação da rampa. Assim, quanto maior a inclinação da rampa, maior a quantidade de perda de solo, o que demonstra a susceptibilidade deste solo à erosão hídrica em locais com a topografia mais acentuada. Em geral, a maior taxa de erodibilidade ocorreu no tempo de 5 minutos, com uma tendência à estabilização nos tempos seguintes. Essa tendência ocorreu nos diferentes tipos de amostras utilizadas, exceto para a amostra com sucção de 0 kPa, que apresentou o pico de maior perda de solo no tempo de 1 minuto. Isso demonstra a influência da sucção nos primeiros instantes do contato da água com o solo. Os ensaios de cisalhamento direto denotaram que a baixa suscetibilidade à erosão do solo do Local B, constatada nos ensaios de Inderbitzen, pode estar relacionada à um pequeno aumento da resistência ao cisalhamento, evidenciado por um certo valor de intercepto de coesão, diferentemente do solo do Local A que apresentou somente atrito como parâmetro de resistência. Outro fator que pode ter influenciado é a diferença na densidade do solo, já que o solo do Local B se apresentou mais denso. Por fim, as informações obtidas neste trabalho auxiliaram no entendimento da dinâmica erosiva do solo estudado, e têm potencial para apoiar estudos na compreensão de solos com características similares, para contribuir e auxiliar a gestão e manejo de solos arenosos porosos erodíveis.

**Palavras-chave:** erodibilidade, Inderbitzen, solos não saturados

## ABSTRACT

This master's dissertation reports an assessment of the erodibility of unsaturated soil located in an urban area affected by erosion in Bauru, São Paulo. The erosion process in question was triggered by human interference at the site, which was undertaken without proper precautions to reduce the resulting impact, which included deforestation, sealing of the soil, use of inadequate plans to construct high-end residential subdivisions, and lack of drainage infrastructure. The phenomenon was assessed by a survey of the literature—principally historical information related to the erosion process—field observations, and laboratory tests: characterization, erodibility as assessed by the Inderbitzen and direct shear tests, and tests to measure and monitor soil suction of the samples in order to obtain the soil-water retention curve and comparison values through this parameter for the erodibility tests. All tests were performed on samples from two distinct locations throughout the erosion zone. The soils from the region are remnants of sandstone and are characterized as clay-silt soils with fine to medium sand. The Inderbitzen erodibility tests showed a large amount of soil carried away by water flow, with higher rates registered for the soil from Location A. Soil loss varied in quantity according to the slope of the ramp. Consequently, the greater the slope of the ramp, the greater the amount of soil loss, which demonstrates the susceptibility of this soil to erosion resulting from water in places with more pronounced topography. In general, the highest rate of erodibility occurred at 5 min, with a tendency to stabilize thereafter. This tendency occurred in the different types of samples used, except for the sample with soil suction of 0 kPa, which showed the greatest soil loss at 1 min. This demonstrates the influence of soil suction in the first moments of contact with the water flowing in the Inderbitzen test. The direct shear tests showed that the low susceptibility of the soil from site B to erosion, found in the Inderbitzen tests, may be related to a small increase in shear strength, evidenced by a certain amount of cohesion intercept, unlike soil from Location A, which only had friction as a resistance parameter. Another influence may have been the difference in soil density, since Site B soil was denser. Lastly, the information obtained in this study helped in understanding the erosion dynamics of the soils studied and has the potential to support further studies to advance the understanding of soils with similar characteristics in order to contribute to and assist with administering and managing porous and erodible sandy soils.

**Keywords:** erodibility, Inderbitzen, unsaturated soils

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - AÇÃO DA EROÇÃO ANTRÓPICA ACELERADA .....	6
FIGURA 2 - SULCOS CAUSADOS POR EROÇÃO HÍDRICA.....	13
FIGURA 3 - RAVINA.....	14
FIGURA 4 - VOÇOROCA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE BAURU/SP .....	15
FIGURA 5 - EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NA ÁREA URBANA DE BAURU/SP.....	22
FIGURA 6 - ESTIMATIVA DOS SEDIMENTOS CARREADOS PELAS EROÇÕES NO ANO DE 1979, NO MUNICÍPIO DE BAURU/SP .....	22
FIGURA 7 - APARELHO IÑDERBITZEN – CONCEPÇÃO ORIGINAL .....	30
FIGURA 8 - APARELHO DE IÑDERBITZEN DO LMS/UFRGS .....	31
FIGURA 9 - ELEMENTOS DO SOLO NÃO SATURADO .....	33
FIGURA 10 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO NA ÁGUA EM UM PERFIL DE SOLO .....	34
FIGURA 11 - ESQUEMA QUE ILUSTRA A DEFINIÇÃO DE POTENCIAL TOTAL DE ÁGUA NO SOLO .....	35
FIGURA 12 - SISTEMAS QUE ILUSTRAM A DEFINIÇÃO DAS SUCCÇÕES MATRICIAL, OSMÓTICA E TOTAL.....	37
FIGURA 13 - ÁGUA DE UM SOLO SUJEITA À CAPILARIDADE E À ADSORÇÃO .....	37
FIGURA 14 - (A) MOLÉCULAS DE ÁGUA EM EQUILÍBRIO NUM RESERVATÓRIO; (B) EQUILÍBRIO DE SOLICITAÇÕES ATUANTES NA MEMBRANA CONTRÁCTIL.....	38
FIGURA 15 - TENSÃO SUPERFICIAL EM UMA MEMBRANA CONTRÁCTIL TRIDIMENSIONAL.....	39
FIGURA 16 - (A) ESQUEMA DE ASCENSÃO EM UM TUBO CAPILAR; (B) DIAGRAMA DE PRESSÃO NA ÁGUA.....	40
FIGURA 17 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	42
FIGURA 18 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO EFEITO DA ALTURA DE ASCENSÃO E DO RAIO CAPILAR NA CAPILARIDADE.....	43
FIGURA 19 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BAURU/SP.....	46
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DE RENDA NO MUNICÍPIO DE BAURU NO ANO DE 2010.....	48
FIGURA 21 - TIPOS DE HABITAÇÕES E LOCALIZAÇÕES NA CIDADE DE BAURU/SP.....	50
FIGURA 22 - MAPA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO .....	52
FIGURA 23 - MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE BAURU/SP .....	53
FIGURA 24 - MAPA GEOMORFOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE BAURU/SP.....	55
FIGURA 25 - ZONAS DE SUSCEPTIBILIDADE À EROÇÃO NO MUNICÍPIO DE BAURU/SP.....	58



FIGURA 26 - MÉDIA DE CHUVA (BARRAS) ACUMULADA (MM) E NÚMERO DE DIAS SEM CHUVA (NDSC) EM PORCENTAGEM (LINHA), PARA A CIDADE DE BAURU DE 1981-2009 .....	60
FIGURA 27 - MAPA FLORESTAL DE BAURU/SP .....	61
FIGURA 28 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO ÁGUA COMPRIDA NO MUNICÍPIO DE BAURU/SP.....	63
FIGURA 29 - LOCALIZAÇÃO DO PROCESSO EROSIVO .....	64
FIGURA 30 - MAPA DE ALTIMETRIA DA BACIA DO CÓRREGO ÁGUA COMPRIDA.....	66
FIGURA 31 - LOCALIZAÇÃO DOS RESIDENCIAIS E EROSÕES NA REGIÃO ESTUDADA .....	68
FIGURA 32 - -- ILUSTRAÇÃO DA CARTA GEOTÉCNICA COM DESTAQUE PARA AS REGIÕES ESTUDADAS .....	69
FIGURA 33 - OBRAS DE CONTENÇÃO DA EROSÃO – INSTALAÇÃO DE DISSIPADORES DE ENERGIA .....	70
FIGURA 34 - OBRAS DE CONTENÇÃO DA EROSÃO – RETIFICAÇÃO DO LEITO DO CÓRREGO E CANALIZAÇÃO DO ESGOTO.....	71
FIGURA 35 - AFLORAMENTO DE ÁGUA AO LADO DA EROSÃO .....	72
FIGURA 36 - ATERRAMENTO DO AFLORAMENTO DE ÁGUA .....	72
FIGURA 37 - RAMIFICAÇÃO DA EROSÃO PRINCIPAL COBERTA COM ENTULHO E MATERIAL ORGÂNICO .....	73
FIGURA 38 - INCISÕES NO TERRENO AO LADO DAS OBRAS DE CONTENÇÃO DA EROSÃO.....	74
FIGURA 39 - QUEDA DE TALUDE À MARGEM DO CÓRREGO ÁGUA COMPRIDA.....	74
FIGURA 40 - PRESENÇA DE SULCOS À MARGEM DO CÓRREGO ÁGUA COMPRIDA .....	75
FIGURA 41 - SOLO PARCIALMENTE DESNUDO E PRESENÇA DE SULCOS .....	76
FIGURA 42 - PRESENÇA DE SULCOS .....	76
FIGURA 43 - PONTOS DE COLETA DE SOLO.....	78
FIGURA 44 - - DETALHE DOS LOCAIS ESCOLHIDOS PARA COLETA (RETOMADA DE PROCESSOS EROSIVOS COM SURGIMENTO DE SULCOS) .....	79
FIGURA 45 - PERFIL DO SUBSOLO DA REGIÃO ESTUDADA, COM PONTOS DE COLETA DE DADOS AO LONGO DO CÓRREGO ÁGUA COMPRIDA .....	80
FIGURA 46 - RETIRADA DE AMOSTRAS DEFORMADAS .....	81
FIGURA 47 - COLETA DE AMOSTRA INDEFORMADA .....	82
FIGURA 48 - RETIRADA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS PARA ENSAIO DE ERODIBILIDADE .....	83
FIGURA 49 - MATERIAIS UTILIZADOS NO ENSAIO DE CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM PAPEL FILTRO .....	85

FIGURA 50 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DO SOLO.....	86
FIGURA 51 - CORPOS DE PROVA SECANDO AO AR .....	86
FIGURA 52 - CORPOS DE PROVA SENDO EMBALADOS .....	87
FIGURA 53 - CORPOS DE PROVA ARMAZENADOS EM CAIXA TÉRMICA DE ISOPOR.....	87
FIGURA 54 - (A) SATURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE SOLO E (B) SATURAÇÃO DAS PLACAS POROSAS DE ALTO VALOR DE ENTRADA DE AR DA CÂMARA DE PRESSÃO .....	90
FIGURA 55 - CORPOS DE PROVA INSERIDOS NA CÂMARA DE PRESSÃO .....	90
FIGURA 56 - ESQUEMA DA CÂMARA DE PRESSÃO .....	90
FIGURA 57 - ESQUEMA DO APARELHO Inderbitzen CONSTRUÍDO PARA O LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS DA UNESP/BAURU .....	91
FIGURA 58 - ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO EQUIPAMENTO .....	92
FIGURA 59 - ENSAIO DE Inderbitzen EM ANDAMENTO.....	94
FIGURA 60 - DETALHE DO ENSAIO DE Inderbitzen EM ANDAMENTO: SOLO SENDO CARREADO PARA PENEIRA.....	95
FIGURA 61 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DA CÂMARA DE PRESSÃO .....	96
FIGURA 62 - AMOSTRAS SUBMETIDAS À SUCCÃO NA CÂMARA DE PRESSÃO .....	96
FIGURA 63 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA CONJUNTA (NBR 7191/84).....	99
FIGURA 64 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO .....	101
FIGURA 65 - ENSAIO PARA CALIBRAÇÃO DO Inderbitzen.....	102
FIGURA 66 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 0 kPa .....	105
FIGURA 67 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 35 kPa .....	105
FIGURA 68 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 50 kPa .....	106
FIGURA 69 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 200 kPa .....	106
FIGURA 70 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL > 15 MPa .....	107
FIGURA 71 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 0 kPa.....	107
FIGURA 72 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 35 kPa.....	108
FIGURA 73 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 50 kPa.....	108
FIGURA 74 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL = 200 kPa.....	109
FIGURA 75 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): SUCCÃO INICIAL > 15 MPa .....	109

FIGURA 76 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): INCLINAÇÃO 15°.....	111
FIGURA 77 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): INCLINAÇÃO 30°.....	111
FIGURA 78 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): INCLINAÇÃO 45°.....	112
FIGURA 79 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): INCLINAÇÃO 15°.....	112
FIGURA 80 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): INCLINAÇÃO 30°.....	113
FIGURA 81 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL A): INCLINAÇÃO 45°.....	113
FIGURA 82 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): SUCCÃO INICIAL = 0 kPa .....	115
FIGURA 83 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): SUCCÃO INICIAL = 12 kPa .....	115
FIGURA 84 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): SUCCÃO INICIAL > 15 MPa .....	116
FIGURA 85 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): SUCCÃO INICIAL = 0 kPa.....	116
FIGURA 86 - - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): SUCCÃO INICIAL = 12 kPa.....	117
FIGURA 87 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): SUCCÃO INICIAL > 15 MPa .....	117
FIGURA 88 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): INCLINAÇÃO 15°.....	118
FIGURA 89 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): INCLINAÇÃO 30°.....	118
FIGURA 90 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): INCLINAÇÃO 45°.....	119
FIGURA 91 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): INCLINAÇÃO 15°.....	119
FIGURA 92 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): INCLINAÇÃO 30°.....	120
FIGURA 93 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (LOCAL B): INCLINAÇÃO 45°.....	120
FIGURA 94 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (SOLO SOLTO): INCLINAÇÃO 15°.....	121
FIGURA 95 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (SOLO SOLTO): INCLINAÇÃO 15°.....	122
FIGURA 96 - PERDA DE SOLO ACUMULADA AO LONGO DO TEMPO (COMPARATIVA): INCLINAÇÃO 15°.....	122
FIGURA 97 - ERODIBILIDADE AO LONGO DO TEMPO (COMPARATIVA): INCLINAÇÃO 15°.....	123
FIGURA 98 - RESULTADOS DE ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO: SOLOS SATURADOS: LOCAL B.....	125
FIGURA 99 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DE SOLOS SATURADOS (S = 0 kPa): LOCAIS A E B.....	126
FIGURA 100 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS SOLOS SATURADOS E NÃO SATURADOS DO LOCAL A.....	127
FIGURA 101 - VARIAÇÃO DO INTERCEPTO DE COESÃO COM A SUCCÃO NO SOLO DO LOCAL A.....	128

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - AGENTES CAUSADORES DE EROSÃO.....	7
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DA EROSÃO SEGUNDO OS MODELOS DE ESCOAMENTO E OS MECANISMOS DE EROSÃO PLUVIAL.....	10
TABELA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE TIPOS DE URBANIZAÇÃO E VOLUME DE SOLO ERODIDO NO MUNICÍPIO DE BAURU/SP .....	20
TABELA 4 - OCORRÊNCIA DAS CLASSES DE PARTÍCULAS DOS SOLOS NOS PONTOS DE AMOSTRAGEM1 E 2.....	98
TABELA 5 - ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO .....	100
TABELA 6 - PARÂMETROS DE AJUSTE DA EQUAÇÃO DE VAN GENUTCHEN (1980).....	101
TABELA 7 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO APARELHO İNDERBITZEN .....	103
TABELA 8 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS SOLOS DOS LOCAIS A E B .....	126

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 - Erosão.....	5
2.1.1 - Principais Tipos de Erosão.....	7
2.1.2 - Erosão Hídrica.....	8
2.1.3 - Fatores Condicionantes da Erosão.....	15
2.2 - Problemáticas da Erosão Urbana no Município de Bauru.....	19
2.3 - Erodibilidade dos Solos e Métodos de Investigação.....	26
2.3.1- Inderbitzen.....	29
2.4 - Solos Não Saturados.....	32
2.4.1 - Aspectos Básicos.....	32
2.4.2 - Sucção.....	36
2.4.3 - Curva de Retenção de Água no Solo.....	41
3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 - Área de Estudo.....	45
3.1.1 - O Município de Bauru.....	45
3.1.2 - Local do Processo Erosivo.....	62
3.2 - Coleta de Amostras.....	77
3.2.1 - Amostras Deformadas.....	80
3.2.2 - Amostras Indeformadas Para Ensaios de Curva de Retenção, Cisalhamento Direto e Inderbitzen.....	81
3.3 - Ensaios de Caracterização.....	83
3.4 - Ensaios para Determinação das Curvas de Retenção de Água.....	84

3.4.1 - Método do Papel Filtro.....	84
3.4.2 - Método do Funil de Placa Porosa.....	88
3.4.3 - Câmara de Pressão .....	89
3.5 - Ensaio de Inderbitzen .....	91
3.5.1 - Testes para Avaliação do Desempenho do Aparelho Inderbitzen.....	92
3.5.2 - Método de Ensaio de Inderbitzen Utilizada na Pesquisa .....	93
3.5.3 - Controle da sucção através da Câmara de Pressão para ensaios de Inderbitzen ...	95
3.6 – Ensaio de Cisalhamento Direto.....	97
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	98
4.1 - Caracterização e Análises Físicas do Solo .....	98
4.1.1 – Granulometria Conjunta .....	98
4.1.2 – Índices Físicos dos Solos.....	100
4.2 – Curva de Retenção de Água no Solo .....	100
4.3 - Inderbitzen.....	102
4.3.1 - Resultados dos Testes Para Avaliação do Desempenho do Aparelho Inderbitzen .....	102
4.3.2 – Resultados dos Ensaio de Inderbitzen.....	103
4.3.3 – Avaliação do Efeito da Estrutura do Solo na Erodibilidade.....	121
4.4 - Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto .....	124
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE.....	130
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	132

## 1 – INTRODUÇÃO

Os dias atuais apontam para uma reflexão a respeito das sociedades contemporâneas e seus impactos sobre o meio ambiente. Pode-se dizer que o homem sempre se manteve de uma relação de degradação com o meio ambiente, já que é a partir da exploração dos recursos naturais que mantém seu sustento.

No início de sua existência, a relação entre homem e meio pôde ser considerada mais equilibrada, uma vez que o número de habitantes era infinitamente menor e o modo de produção da sociedade baseado na caça e coleta, seguido de agricultura nômade de subsistência, atividades de caráter voltado apenas para o sustento humano, desenvolvido com técnicas rudimentares, e sem intenção de acumulação. Esse comportamento justifica-se pela forma de apropriação da natureza ter se dado por relações de divino ou sagrado, como apontado por Mariano et al (2011).

Com o advento e desenvolvimento da técnica, e com a Revolução Industrial, reforçou-se a ruptura dos dogmas religiosos, excluindo a visão de natureza sagrada, enfatizando-a como algo concreto, cada vez mais um objeto a ser possuído e dominado pelo homem.

Assim, o homem passa a desfrutar de um maior aproveitamento dos recursos, transformando-os e transportando-os para diversos lugares. Contudo, tem-se o surgimento das cidades, aumento da população, e uma mudança no modo de produção. Estes processos demandaram um grande aumento nos bens de consumo, e conseqüentemente, em sua produção, que adquiriu um novo caráter de acumulação capitalista. Conforme Casseti (1991), a utilização espontânea da natureza, onde está implícita a dilapidação de suas riquezas, esboçou-se nas primeiras etapas da história da sociedade e se acentuou na época feudal, porém, alcançou um grau máximo no curso da sociedade capitalista.

O novo modo de produção capitalista determinou uma maior intervenção no meio físico ou natural, causando grandes interferências no meio ambiente, que por sua vez, em muitos casos, não foi capaz de se recuperar sozinho através do fenômeno da resiliência, especialmente em áreas agrícolas e grandes centros de concentração de atividades industriais e comerciais. Dentre algumas problemáticas mais comuns do meio ambiente, pode-se citar: a poluição das águas, o acúmulo de resíduos em locais inapropriados (gerando contaminação de solos e águas) e a degradação do solo.

Atualmente, pode-se afirmar que grande parte do meio natural e dos recursos naturais encontram-se, de alguma forma, sob intervenção antrópica. E a maior parte destes encontra-se fortemente modificados e degradados.

Entre os diversos elementos que compõem o meio físico natural, o solo é um recurso de enorme importância, uma vez que é nele que se desenvolvem as diversas atividades essenciais à manutenção da vida humana como a agricultura, pecuária, construção civil, entre outras. Este recurso vive em harmonia com o seu redor, pois depende dos demais fatores presentes no meio natural para sua constituição e manutenção e vice versa, então uma vez modificado algum fator à sua volta, pode ser prejudicado, como afirmado por Drew (2002).

Os solos vivem em equilíbrio dinâmico com os fatores que determinam as suas características: o clima, os materiais de origem, a topografia, a biota e o tempo. Qualquer mudança em uma dessas variantes afetará o solo; a reação a determinada mudança ambiental, porém, varia de solo para solo em função da sua sensibilidade a cada tipo de tensão.

O solo é a base da vida no planeta. Além disso, ele faz parte das dinâmicas naturais hidrológicas, como mantenedor de cursos d'água, e superfície permeabilizante para a infiltração das águas e manutenção de lençóis freáticos, aquíferos e reservatórios. Portanto, sua degradação pode causar imensuráveis danos à vida humana na Terra.

Dentre os diversos tipos de degradação dos solos, podemos citar a erosão. “O mais negativo dos efeitos do homem sobre o solo, evidentemente, consiste em criar condições para que se dê a erosão parcial ou total” (DREW, 2002).

A erosão ocorre com a destruição física das estruturas do solo, e seu carregamento é feito, em geral, pela água (erosão hídrica) e ventos (erosão eólica). O solo sofre um processo natural erosivo, causado por agentes naturais hídricos, como a água da chuva, e eólicos (ventos).

Apesar da erosão do solo ser um fenômeno natural, a sua intensificação e aceleração ocorrem devido ao desequilíbrio provocado pela ocupação do homem sobre o espaço, que ocasiona, em muitos casos, mudanças na dinâmica natural da paisagem (LEMOS et al, 1997).

Um tipo de erosão causado basicamente pela atividade antrópica é a erosão hídrica urbana. Segundo Guerra & Mendonça (2004), a erosão urbana no Brasil está relacionada à falta de um planejamento adequado, que leve em conta não só o meio físico, mas também condições socioeconômicas. Por isso mesmo, a erosão urbana é um fenômeno típico dos países em desenvolvimento. Também sobre o crescimento acelerado das cidades nos países mais pobres, Nefussi e Lico (2005), afirmam que:



Desde os anos 50, a formação das cidades brasileiras vem construindo um cenário de contrastes, típico das grandes cidades do Terceiro Mundo. A maneira como se deu a criação da maioria dos municípios acabou atropelando os modelos de organização do território e gestão urbana tradicionalmente utilizados, e mostrou-se inadequada. O resultado tem sido o surgimento de cidades sem infra-estrutura e disponibilidade de serviços urbanos capazes de comportar o crescimento provocado pelo contingente populacional que migrou para as cidades.

Segundo Pedron et al. (2007), o solo configura-se como um dos recursos naturais mais afetados pela urbanização:

O solo é um recurso natural lentamente renovável, resultado da interação de vários fatores e processos de formação, que desempenham funções importantes referentes à manutenção da estabilidade do ambiente urbano. As diferentes atividades urbanas promovem alterações de natureza diversa no perfil de solo, acarretando, muitas vezes, redução da qualidade ambiental e aumento dos custos devido à necessidade de recuperação destas áreas.

Dentre as modificações geradas pela ocupação do espaço urbano, e que são responsáveis por importantes alterações no ciclo hidrológico nessas áreas, destaca-se a impermeabilização do terreno, através das edificações e da pavimentação das vias de circulação, responsáveis pelo aumento do escoamento superficial, que podem desencadear em redes de fluxos lineares, agentes de erosão.

A cidade de Bauru (localizada no interior do Estado de São Paulo) é um exemplo de local que sofre com processos erosivos hídricos urbanos. Os processos erosivos ocorrem na cidade de Bauru desde o início de sua urbanização, fato justificado por sua localização sobre uma região de afloramento de arenitos no Planalto Ocidental Paulista. O regime de chuvas tropicais é propício ao surgimento de erosões, quadro agravado consideravelmente quando somado às ações antrópicas. As causas, basicamente, são relacionadas com a ausência de critérios técnicos, tanto para nortear a expansão urbana, que ocorre de forma expressiva nas últimas décadas, quanto para a aprovação de projetos de loteamentos residenciais e de conjuntos habitacionais, muitas vezes em locais não apropriados (IPT, 1994).

Nesta cidade encontramos áreas de alta susceptibilidade a erosão, que associadas a sistemas de drenagem mal dimensionados são importantes fatores na evolução do fenômeno. Segundo Corghi (2008), as medidas corretivas realizadas não levaram em conta as feições do terreno, e por isso, foram destruídas.

É através das análises das causas, e estudos geológicos e geotécnicos que se obtém o correto diagnóstico dos mecanismos de eclosão e evolução das erosões (Camapum de Carvalho, 2005). O mecanismo de evolução das erosões está associado às características geológico-geotécnicas e estruturais da região.

Entre os diversos fatores que integram o estudo acerca de processos erosivos, destaca-se a análise da erodibilidade do solo, de fundamental importância para reconhecimento do comportamento dos solos, sendo que o enfoque geotécnico caracteriza suas propriedades em relação à sua erodibilidade. Destaca-se também o estudo específico da erodibilidade de solos não saturados, presentes nas regiões tropicais, uma vez que estes solos possuem características específicas que diferem dos estudos tradicionais de erosão (em solos saturados), e necessitam de uma investigação específica e detalhada.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a erodibilidade de um solo não saturado presente em uma região que atuam processos erosivos no município de Bauru/SP, a fim de obter resultados que possam auxiliar na gestão e manejo deste local, assim como de locais com solos de características similares, sempre em busca da conservação deste recurso natural indispensável para o ser humano.

Entendendo a erosão como um fenômeno de caráter global, é necessário um estudo teórico preliminar acerca das inter-relações que a norteiam, incluindo o histórico da área e análise de estudos preliminares, para posteriormente realizar-se a parte experimental, onde se desenvolveu o enfoque do trabalho, em busca de subsídios para o entendimento da erodibilidade do solo local, como importante fator determinante do processo erosivo.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho foi realizada por meio de leituras para o embasamento teórico acerca dos temas de características, degradação e erosão dos solos. Buscou-se apoio interdisciplinar, com leituras provenientes de áreas como: Geografia, Engenharia Ambiental, Agronomia e Geotecnia.

### 2.1 - Erosão

O processo erosivo é constituído de diversas etapas que consistem em desagregação, transporte e deposição de sedimentos em sopés de encostas ou em cursos hídricos. Uma das primeiras definições do termo “erosão” pode ser encontrada no trabalho de Ellison (1947), realizado em sete partes, onde erosão é definida como um processo de desagregação e transporte de materiais do solo por agentes erosivos, caracterizado por dois eventos sequenciais principais: no primeiro as partículas do solo se tornam soltas (desagregadas) de sua estrutura, e com isso, disponíveis para o transporte. No segundo evento (transporte), os materiais desagregados (partículas) do solo são transportados.

Já para os autores Vilar (1987) e Vilar e Prandi (1993), a erosão consiste em diversos processos pelos quais, os materiais da superfície terrestre são desagregados, dissolvidos ou desgastados e carreados de um ponto a outro por agentes erosivos, como: geleiras, rios, mares, vento ou chuva.

Segundo Salomão & Iwasa (1995), erosão é o nome dado ao processo de desagregação e transporte de partículas solo, rochas ou fragmentos causados pela ação da chuva, do vento, de organismos (animais e plantas) ou do gelo, que atua na expansão do material no qual se infiltra a água depois de congelada.

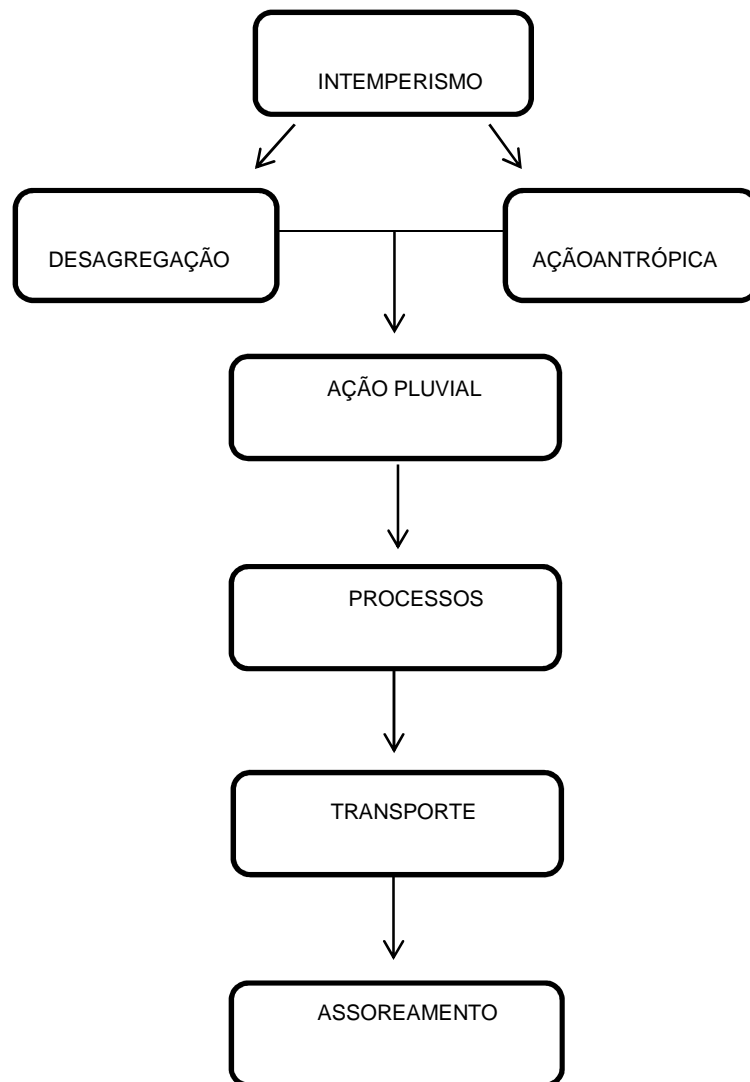
A erosão, o transporte e a deposição são processos que não podem ser separados. Eles são interdependentes dentro de relações constantemente mutáveis do fluxo e da carga existentes. A capacidade de erosão de um fluxo depende mais das partículas por ele transportados do que da vazão de água. A ação corrosiva tende a eliminar a rugosidade da superfície. O fluxo aumenta para jusante assim como sua carga. Com a diminuição do fluxo, ocorre a deposição (ALMEIDA FILHO, 2000).

A erosão trata-se de um fenômeno de origem natural, porém a intervenção humana e os diversos tipos de uso e ocupação do solo faz com que se desencadeiem agravantes a seus fatores causadores. Junior & Fornasari Filho (1998) destacam essa divisão entre fenômeno natural (denominada erosão geológica ou natural) e antrópico (denominado erosão acelerada).

Erosão geológica ou normal ocorre na superfície terrestre sob condições naturais. Erosão acelerada é decorrente do aumento da taxa de erosão sobre a erosão geológica ou normal, resultado do desequilíbrio ambiental devido às atividades humanas (MAGALHÃES, 2001).

A erosão de origem natural ocorre de maneira independente da ação do homem no meio: ação da chuva, tipo de cobertura vegetal, relevo, tipo de solo e substrato rochoso são o que determinam a intensidade do processo. Já a erosão de origem antrópica age de forma a acelerar os processos erosivos, e advém de intervenções humanas como: desmatamento, urbanização e consequente impermeabilização do solo, retificação de leitos de cursos d'água, entre outros. Porém, a erosão de origem antrópica é a maior responsável pelo desenvolvimento de feições erosivas (Figura 1).

**Figura 1 - Ação da erosão antrópica acelerada**



Fonte: Almeida Filho (2000)

### 2.1.1 - Principais Tipos de Erosão

A erosão é um fenômeno que pode ser encontrado por todo o mundo, porém sob cada tipo de ambiente pode surgir de várias maneiras. Ela é classificada de acordo com o agente atuante, sendo que Lal (1990) classifica os diversos tipos de erosão de acordo com cada agente causador do processo erosivo, como observado na Tabela 1 a seguir:

**Tabela 1 - Agentes causadores de erosão**

Tipo de Agente			Tipo de Erosão	
Vento			Eólica	
Fluidos	Água	Chuva		Por impacto das gotas
		Escoamento	Superficial	Sulcos Ravinas Boçorocas Canais Fluviais
			Subsuperficial	Em condutos subterrâneos
		Oceano		Costeira
	Gelo		Glacial	
Gravidade	Movimento de Massa		Avalanche Escorregamento Solifluxão Rastejo	

Fonte: Lal (1990)

De acordo com a Tabela 1, existem 3 principais tipos de agentes erosivos: ventos, fluidos e gravidade, que são responsáveis pelos diferentes tipos de erosão, respectivamente: erosão eólica, erosão hídrica e movimento de massa.

A erosão eólica consiste na remoção e transporte de partículas da rocha ou do solo pela ação mecânica do vento. De acordo com Bertoni & Lombardi Neto (1999), esse tipo de processo erosivo ocorre em geral em regiões planas e de pouca chuva, com ventos fortes e vegetação escassa, que se intensifica com a retirada da vegetação, já que o solo fica exposto.

No Brasil, ocorre principalmente em regiões do Nordeste e no Rio Grande do Sul. Ainda segundo os mesmos autores, os danos que a erosão eólica pode causar são: empobrecimento do solo, morte de plantas, obstrução de estradas e rodovias, e problemas de saúde nas pessoas devido à inalação da poeira.

A erosão hídrica compreende três origens: marinha, fluvial e pluvial. A erosão marinha dá-se pelo impacto das águas dos oceanos nas rochas e encostas. A erosão fluvial também ocorre através do impacto das águas, só que dos rios em suas margens, retirando o solo.

A erosão hídrica pluvial constitui-se a ocorrência predominante no Brasil, por ser um país em que a maior parte do território está sob influência do clima tropical, em que a pluviosidade é intensa principalmente nos meses de verão.

O processo erosivo causado pela água das chuvas tem abrangência em quase toda a superfície terrestre, em especial nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são bem mais elevados do que em outras regiões do planeta. Além disso, em muitas dessas áreas, as chuvas concentram-se em certas estações do ano, o que agrava ainda mais a erosão. O processo tende a se acelerar, à medida que mais terras são desmatadas para a exploração de madeira e/ou para a produção agrícola, uma vez que os solos ficam desprotegidos da cobertura vegetal e, conseqüentemente, as chuvas incidem diretamente sobre a superfície do terreno” (GUERRA, 2007).

### **2.1.2 - Erosão Hídrica**

A erosão hídrica é o tipo de processo erosivo predominante no Brasil. Esta se dá a partir do escoamento pluvial e tem como principal agente deflagrador o impacto das gotas de chuva em terreno descoberto, e o resultante desprendimento das partículas do solo. Neste tipo de erosão, a água é o fator responsável por sua gênese e evolução.

O processo erosivo hídrico é dividido em três fases básicas: desagregação, transporte e deposição. A desagregação consiste na separação inicial das partículas de solo da massa que os contém pela ação de impacto das gotas da chuva (splash) e/ou pela ação da enxurrada.

O transporte das partículas de solo desagregadas se dá pelo salpicamento provocado pelo impacto das gotas de chuva e/ou pela ação da enxurrada, podendo os dois processos serem simultâneos (VOLK, 2002).

Em terrenos inclinados, a maior parte do transporte das partículas de solo se dá pela enxurrada. “A deposição ou sedimentação do material que foi desagregado e transportado ocorre quando a carga de sedimentos na enxurrada é maior do que a capacidade de transporte da mesma” (FOSTER & MEYER, 1977).

O escoamento superficial é o maior responsável pelas alterações de caráter erosivo. A parcela de água que escoar na superfície é classificada como laminar ou linear, dependendo do tipo de como se processa o escoamento superficial (Infanti Junior & Fornasari Filho, 1998).

A erosão laminar é causada pelo escoamento laminar das águas das chuvas, resultando na remoção progressiva e uniforme dos horizontes superficiais do solo (DAEE/IPT, 1990). Geralmente ocorre em locais com pouca ou nenhuma vegetação. Já a erosão linear é causada pela concentração das linhas de fluxo difuso das águas de escoamento superficial, que comanda o desprendimento e o transporte das partículas do solo causando pequenas incisões na superfície do terreno em forma de sulcos, que se aprofundam formando ravinas, e posteriormente, voçorocas.

Almeida Filho (2000) classificou a erosão hídrica de acordo com os modelos de escoamento e mecanismos de erosão pluvial, de acordo com a Tabela 2.

**Tabela 2 - Classificação da erosão segundo os modelos de escoamento e os mecanismos de erosão pluvial**

<b>Modelos de escoamento</b>	<b>Tipos de erosão e feições correspondentes</b>	<b>Dimensões (ordem de grandeza e porte)</b>	<b>Bordas das feições</b>	<b>Mecanismos de erosão</b>	<b>Potencial de impacto nos recursos hídricos</b>		
Escoamento superficial laminar	Erosão laminar ou em lençol, ou erosão entre sulcos	Perda na espessura de solo (centímetros de solo)	Inexistentes	Desprendimento e transporte de partícula na superfície do solo	Transporte de sedimentos a curtas distâncias, durante eventos de chuvas		
Escoamento superficial concentrado	Erosão linear em sulcos	Erosão de pequeno porte, com largura de 10 a 30 cm, e profundidade de 5 a 15 cm.	Inexistentes		Transporte de sedimentos de maneira eficiente. Carrega sedimentos provenientes da erosão laminar e também são áreas fontes de sedimentos durante eventos de chuvas		
Escoamento superficial concentrado	Erosão linear em ravinas	Erosão de grande porte com largura superior a 1 metro, e profundidade superior a 0,5 m.	Suaves, sem ruptura significativa na superfície do terreno		Movimentos de massa	Transporte intenso de sedimentos durante eventos de chuvas	
Escoamento superficial concentrado e escoamento subsuperficial concentrado	Erosão em boçoroca	Erosão de grande porte com largura superior a 5m, e profundidade superior a 2 m.	Abruptas, com ruptura instável da superfície do terreno			Erosão subterrânea	Transporte contínuo de sedimentos muito intenso devido ao escoamento superficial e subsuperficial (piping). Muito alto potencial de impacto

Fonte: Almeida Filho (2000)



É importante destacar que o mecanismo de desencadeamento do processo erosivo é complexo, uma vez que o fluxo de água laminar (primeiramente responsável pela erosão laminar) pode desencadear em um fluxo linear, causando maior carreamento de sedimentos, e consequentemente, maior degradação do solo.

Este mecanismo é explicado por Guerra (2007), que descreve minuciosamente o início e desenvolvimento do processo erosivo pelas águas da chuva, assim como o desenvolvimento das feições erosivas, através de diversas etapas descritas a seguir:

1. Splash: (ou erosão por salpicamento) se trata do estágio mais inicial do processo erosivo, em que a energia cinética das gotas de chuva, rompe os agregados do solo para posteriormente serem transportados. A facilidade deste rompimento depende da energia cinética da chuva e da resistência do solo, que determinam também a intensidade do processo. Além disso, neste estágio inicial, os agregados que se soltaram preenchem os poros da superfície do solo, o que faz com que ocorra a selagem e formação de crostas, diminuição da porosidade, aumentando o escoamento das águas.
2. Infiltração e formação de poças: Essa etapa do processo ocorre após a ocorrência do splash, em que a água se infiltra no solo, aumentando seu teor de umidade e o saturando até ser armazenado em áreas de pequenas depressões e ocorrer a formação de poças, que poderão dar início ao escoamento superficial.

Morgan apud Guerra (2007) enfatiza que, durante uma tempestade, os espaços existentes entre as partículas do solo preenchem-se de água, e as forças de capilaridade decrescem, de tal forma que as taxas de infiltração decaem, tornando o solo saturado, não conseguindo, a partir de um momento, absorver mais água. Além disso, o decréscimo de absorção de água na superfície se dá também pela formação de crostas, devido à ação do splash. Esses fatores combinados é o que provocarão a formação de poças no topo do solo e o início do escoamento superficial.

3. Início do escoamento superficial: Trata-se basicamente do fato de que, quando a precipitação excede a capacidade de infiltração, ocorre a formação de poças em pequenas depressões, até que não conseguem mais conter essa água, e esta começa a descer as encostas através de um lençol (denominado como *sheetflow*), iniciando-se um fluxo laminar.
4. Escoamento em lençol (*sheetflow*): Resultado do processo anteriormente citado, o autor afirma que o início desse fluxo se dá por escoamento difuso, ou seja, em lençol, causando erosão laminar.

Horton apud Guerra (2007), a força de cisalhamento imposta por esse fluxo ainda não é suficiente para transportar as partículas, mas, à medida que esse fluxo de água aumenta e acelera, encosta abaixo, ocorre o cisalhamento das partículas do solo, e finalmente, a erosão começa a ocorrer a partir de uma distância crítica do topo da encosta (Merrit, 1984; Guerra, 1998). Nesse estágio do processo erosivo, começa a ocorrer uma pequena incisão no solo, em especial onde o fluxo de água começa a se concentrar, podendo dar início à formação de ravinas.

5. Desenvolvimento de fluxo linear (flowline): Trata-se do estágio seguinte ao escoamento em lençol, e é quando começa a haver uma concentração do fluxo de água, e à medida que isso ocorre, a profundidade do fluxo aumenta e a velocidade diminui, devido ao aumento da rugosidade. A concentração de sedimentos no interior desse fluxo causa atrito, que é responsável pelo aumento da erosão nos pequenos canais que começam a se formar.
6. Desenvolvimento de microrravinas (micro-rills): é quando a maior parte da água que escoar está concentrada em canais definidos e ocorre turbulência mais localizada no fundo dos canais, devido aos sedimentos, formando cabeceiras que são responsáveis pelo início do próximo estágio, que evolui para a consolidação das feições de maior porte como ravinas, e posteriormente, voçorocas.

É evidente a complexidade do processo erosivo hídrico, pois está estritamente ligado a fatores ambientais que condicionam sua intensidade e desenvolvimento, assim como é responsável pelas formas mais agressivas de degradação do solo, resultando em feições erosivas de larga escala. Quando há o estabelecimento de ravinas e o escoamento de água persistente no local, o fluxo de água subsuperficial é responsável pelo fenômeno denominado *piping*, que se trata da escavação interna no processo erosivo, podendo atingir o lençol freático, e haver desenvolvimento de taludes instáveis.

- **Tipos de escoamento: laminar e linear**

A erosão hídrica se desenvolve em duas maneiras distintas quanto ao fluxo de água no terreno: laminar e linear.

A erosão laminar também é chamada de erosão em lençol e ocorre superficialmente. Após cada chuva, pode desgastar uma camada muito fina e uniforme de toda a superfície de um solo, como se fosse uma lâmina ou um lençol (RIO GRANDE DO SUL, 1985). Apesar de ser descrita como uma fase do processo que se desencadeia em erosão linear, também atua de maneira independente, pois não resulta obrigatoriamente em fluxo linear.

Para Ferreira (1981), esse desgaste ocorre em camadas de poucos milímetros de cada vez, sendo paralela a superfície do terreno, não sendo notado durante muitos anos. Entretanto, com o tempo, começam a aparecer na superfície do solo, pedras que antes estavam enterradas, raízes de árvores tornam-se descobertas, entre outros. Justamente por precisar tanto tempo para ser notada, porque retira e carrega o solo da superfície, a erosão laminar é talvez a mais grave e prejudicial forma de erosão.

Por se desenvolver de forma lenta e ser de difícil medida, pode chegar a recobrir cerca de dois terços ou mais das encostas, em uma bacia de drenagem, durante um pico de evento chuvoso (Horton, 1945). Alguns autores a consideram como principal responsável pela maior produção de sedimento em uma bacia hidrográfica (Morgan, 1986; Mutchler & Young, 1977 apud Guerra, 1994).

De acordo com Pejon (1992), a erosão hídrica linear é responsável pela formação de diversos tipos de feições erosivas no terreno. É caracterizada pela formação de filetes ou canais que podem se apresentar como sulcos, ravinamentos, ou atingir maiores profundidades, denominados boçorocas, podendo, neste caso, interceptar o nível d'água.

- Sulcos: A erosão por sulcos se dá como um pequeno corte no solo, apresentando uma profundidade menor que 0,5m. Fournier (1960) descreve a erosão em sulcos como sendo o arrastamento de partículas do solo pela água, perpendicularmente às curvas de nível, resultando em pequenas reentrâncias que se desenvolvem sobre a superfície (Figura 2).

**Figura 2 - Sulcos causados por erosão hídrica**



Fonte: Ecoanimação: Cultura Ambiental e Sustentabilidade<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Disponível em: <http://www.ecoanimateca.net.br>

- Ravinas: De acordo com IGCE (1999): apresentam profundidade maior que 0,5 metros (...). Ocorrem quando a água do escoamento superficial escava o solo atingindo seus horizontes inferiores e, em seguida, a rocha. Também ocorrem movimentos de massa devido ao abatimento de seus taludes. Possuem forma retilínea, alongada e estreita. Raramente se ramificam e não chegam a atingir o nível freático. Apresentam perfil transversal em "V" e geralmente ocorrem entre eixos de drenagens, muitas vezes associadas a estradas, trilhas de gado e carreadores (Figura 3).

**Figura 3 - Ravina**



Fonte: Relatório de Inspeção Ambiental Programa de monitoramento de erosões América Latina Logística malha S. A. Seg. II Itiquira – Rondonópolis/MT<sup>2</sup>

- Voçorocas: De acordo com Cerri et al (1997), tratam-se de formas mais complexas e destrutivas do quadro evolutivo da erosão linear. Devem-se à ação combinada das águas do escoamento superficial e subterrâneo, desenvolvendo processos como o "piping" (erosão interna), liquefação de areias, escorregamentos, corridas de areia, etc. O inadequado uso do solo é considerado fator principal e decisivo no surgimento das voçorocas. São formas erosivas de difícil controle.

Ainda segundo os autores citados acima, em geral são ramificadas, de grande profundidade, apresentando paredes irregulares e perfil transversal em "U". Quando se instalam ao longo dos cursos d'água, principalmente nas cabeceiras, são denominadas

<sup>2</sup> Disponível em: <http://dc378.4shared.com/doc/WOUu88K-/preview.html>

voçorocas de drenagem. Também podem se formar pelo aprofundamento de ravinas até o nível freático, sendo denominadas voçorocas de encosta (Figura 4).

**Figura 4 - Voçoroca localizada no município de Bauru/SP**



Fonte: IPT (2012)<sup>3</sup>

A diferença entre as ravinas e as voçorocas está na presença, no caso das voçorocas, do nível freático aflorando no fundo do canal, o que condiciona uma evolução da erosão (lateral e longitudinal) (IGCE, 1999).

### **2.1.3 - Fatores Condicionantes da Erosão**

Os fatores condicionantes ao processo de erosão são divididos em naturais e antrópicos. Estes fatores são definidos como extrínsecos e interdependentes, de acordo com IBGE/SEPLAN - MS (1989) apud Silveira (2002), e definidos como:

-fatores imutáveis a curto intervalo de tempo: relevo, solo e clima.

-fatores mutáveis a curto intervalo de tempo: cobertura vegetal, uso do solo, manejo e práticas conservacionistas e estrutura fundiária.

Dentre os fatores imutáveis a curto intervalo de tempo, podem-se classificar os componentes entre forças ativas e passivas. De acordo com Meyer (1958) apud Bertoni & Lombardi Neto (1999), são consideradas forças ativas as características da chuva, a declividade e comprimento do declive do terreno e a capacidade do solo em absorver água; as

---

<sup>3</sup> Disponível em: [http://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=592](http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=592)

forças passivas seriam a resistência do solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal.

O relevo determina a topografia do terreno, que é um fator condicionante da intensidade e velocidade do processo erosivo. A declividade e o comprimento da rampa influenciam na velocidade com que a água escoar, e conseqüentemente, a quantidade de material em suspensão carregado por ela. Desta forma, terrenos mais acidentados proporcionam maior erosão, devido à maior velocidade do escoamento superficial.

Do grau de declive dependem diretamente o volume e a velocidade das enxurradas que sobre ele escorrem. AYRES (1960) apresenta alguns princípios de hidráulica que, teoricamente, podem explicar as relações entre a velocidade da água e o seu poder erosivo: (a) a velocidade da água varia com a raiz quadrada da distância vertical que ela percorre, e a sua energia cinética, de acordo com o quadrado de sua velocidade; a energia cinética é a capacidade erosiva. Assim, se o declive do terreno aumenta quatro vezes, a velocidade de escoamento da água aumenta duas vezes e a capacidade erosiva quadruplica; (b) a quantidade de material que pode ser arrastado varia com a quinta potência da velocidade de escoamento; (c) o tamanho das partículas arrastadas varia com a sexta potência da velocidade de escoamento. Assim, se duplicarmos a velocidade do escoamento, a quantidade de material que pode ser transportado aumenta 32 vezes, e o tamanho das partículas que podem ser arrastadas aumenta 64 vezes (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

Além disso, o comprimento da rampa também é fator importante, pois quanto maior o comprimento, maior o volume de água e a velocidade de escoamento.

O solo deve ser considerado por suas propriedades físicas (estrutura, textura e densidade), químicas, biológicas e mecânicas (permeabilidade e resistência). As principais características do solo que conferem condições ou resistência a erosão são: granulometria, estrutura, condutividade hidráulica e teor de matéria orgânica.

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1999), as propriedades físicas tem relação com a quantidade de solo erodido.

[...], por exemplo, o solo arenoso, com espaços porosos grandes, durante uma chuva de pouca intensidade pode absorver toda água, não havendo, portanto, nenhum dano; entretanto, como possui baixa proporção de partículas argilosas que atuam como ligação entre partículas grandes, pequena quantidade de enxurrada que escorre na sua superfície pode arrastar grande quantidade de solo. Já no solo argiloso, com espaços porosos bem menores, a penetração de água é reduzida, escorrendo mais na superfície; entretanto, a força de coesão das partículas é maior, o que faz aumentar a resistência à erosão (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

A quantidade de matéria orgânica no solo também influi diretamente nas taxas de erosão, uma vez que, em solos argilosos, modifica a estrutura, conferindo maior arejamento entre as partículas, e conseqüentemente, melhor condição de infiltração e retenção de água; nos solos arenosos, a presença de matéria orgânica contribui para diminuição da porosidade e firma-lhes a estrutura, também melhorando as condições de infiltração.

O clima e suas características de pluviosidade estão diretamente ligados à dinâmica erosiva, podendo constituir a forma mais agressiva de erosão, principalmente se o solo estiver sem cobertura vegetal. A intensidade da chuva é o principal agente deflagrador de erosão em climas tropicais, tanto pela ação da gota de água tanto pela ocorrência de fluxos de escoamento e infiltração. Tais mecanismos ocorrem com o impacto da água da chuva, que provoca desagregação das partículas, remoção e transporte, através do escoamento superficial, e posterior deposição, que gera depósitos de assoreamento.

Dessa forma, dados relacionados a médias mensais ou anuais não servem para mensurar a erosão, uma vez que estes não levam em consideração a intensidade específica dos eventos de chuva. Dois locais podem possuir médias de pluviosidade semelhantes, porém, com eventos totalmente diferentes, como em um local, vários eventos de chuvas brandas e em outro poucos eventos de chuvas intensas.

No que se refere à erosão dos solos, a unidade deve ser a chuva, definida como a quantidade que cai em forma contínua em um período mais longo ou menos longo, individualizada através de suas características de intensidade, duração e frequência (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

Quanto aos fatores mutáveis em curto espaço de tempo, a cobertura vegetal atua como uma barreira de proteção física ao fluxo de água no solo, interceptando-a e armazenando-a até haver evaporação e também diminuindo sua força de impacto no solo. Fendrich (1988) afirma que a vegetação é o fator que mais afeta a erosão do que qualquer outro fator físico individual.

Portanto, o uso do solo e suas práticas de manejo e conservação são determinantes para deflagração de processos erosivos. No Brasil, esta sentença é confirmada através da realidade atual frente ao desmatamento intenso ocorrido nos últimos 500 anos, devido ao processo de colonização baseado na monocultura agrícola, e tem como herança este modelo latifundiário até os dias atuais, além do posterior modelo desenvolvimentista industrial, que foi responsável pelo intenso desenvolvimento urbano no último século, o que gerou diversas problemáticas urbanas, como a impermeabilização do solo e ocupação humana em áreas de vertentes e

fundos de vale. Estes processos anteriormente citados ocorreram de forma desordenada e sem planejamento, não levando em conta as propriedades do solo e o uso de técnicas de manejo para diminuição da degradação.

O uso atual do solo se configura num leque de atividades humanas bastante complexas, tanto no que se refere aos tipos de intervenção humana no quadro natural quanto na intensidade e magnitude das alterações provocadas. Este quadro, que se sobrepõe aos vestígios deixados pelos antigos usos do solo, mostra uma nítida divisão do território paulista entre amplos espaços agrários, de baixa densidade demográfica e áreas urbanas/industriais, que aglutinam mais de 90% da população (ALMEIDA FILHO, 2000).

Vários são os fatores que contribuem na gênese das erosões e, portanto, devem estar associados. Mas ainda é consenso que a ação antrópica é a principal deflagradora da erosão, por meio dos desmatamentos, alterações na paisagem, uso e ocupação desordenados do solo (MENEZES, 2010).

De acordo com Salomão & Iwasa (1995), a formação de voçorocas está relacionada principalmente à junção de fatores naturais, como a susceptibilidade do solo a ser erodido, e de uso e ocupação a que o solo é submetido. Os referidos autores afirmam que as voçorocas se dão quando existe a atuação concomitante das águas superficiais e subsuperficiais, fazendo delas “palco de diversos fenômenos: erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que se conjugam no sentido de dotar essa forma de erosão de elevado poder destrutivo” (GALETI, 1987).

No meio urbano, a denominada *erosão urbana* está ligada diretamente ao uso do solo diferenciado, com intensa ocupação humana e sua necessidade de moradia. Dessa forma, o planejamento urbano, com técnicas específicas para este meio, torna-se fundamental para controle da degradação.

A erosão e o transporte de sedimentos superficiais de uma região urbanizada diferem significativamente dos processos que ocorrem em regiões onde o uso do solo é predominantemente para fins rurais. Nas áreas urbanas, embora possam ocorrer modalidades de erosão semelhantes às áreas rurais, predominam aquelas decorrentes da concentração de fluxo, principalmente em razão de deficiências do sistema de drenagem (RAMOS (1995) apud SILVA et al, 2003).

Salomão & Iwasa (1995) acreditam que as erosões urbanas representam áreas susceptíveis a acidentes, pois são confundidas com áreas de depósitos de lixos e lançamento de esgoto. O poder público, muitas vezes, realiza esta prática para, de forma equivocada,



controlar a sua evolução, com resultados fracassados, já que transforma o quadro erosivo em foco de doenças agravando ainda mais o dano ambiental que estas já possuíam.

## **2.2 - Problemáticas da Erosão Urbana no Município de Bauru**

O desmatamento e uso do solo urbano acarretam diversos tipos de degradação ambiental. A impermeabilização do solo diminui ou quase anula a infiltração da água da chuva no meio urbano, gerando fluxos de escoamento superficiais direcionados que causam processos erosivos. Além disso, ocupações localizadas em áreas irregulares, muitas vezes de uso restrito, contribuem para agravamento destes processos, que podem evoluir para grandes feições como voçorocas, e afetar a dinâmica de circulação e uso do solo urbano.

A região de Bauru/SP é caracterizada por solos arenosos resultantes das formações geológicas do Grupo Bauru e sedimentos cenozoicos, o que conferem um caráter bastante susceptível ao fenômeno erosivo. Somadas às características erodíveis do solo, a grande intervenção antrópica na área urbana da cidade resultou em um grande número de erosões, de diversas proporções. O efeito disso está na degradação ao meio ambiente, danos ao patrimônio e situações de risco a população.

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1994), certas regiões são mais atingidas pelas erosões urbanas devido a litologia, às características do solo e também devido ao regime de chuvas. Estima-se que existam no estado de São Paulo cerca de 3.000 erosões, sendo que cerca de 40 estão localizadas no município de Bauru (IDE, 2009).

O solo da cidade de Bauru encontra-se altamente degradado, com a presença de muitos processos erosivos lineares de médio e grande porte, causando diversos problemas ambientais. Segundo Salomão apud Corghi (2008) as diversas ravinas e voçorocas de grande porte no perímetro urbano são desencadeadas pela concentração do escoamento de águas superficial propiciada pela ocupação urbana.

A gênese destes processos erosivos urbanos coincide com o histórico de expansão urbana do município, processo que se inicia com o desmatamento e impermeabilização dos solos com a pavimentação, o que diminuiu a infiltração, e aumentou o escoamento superficial. Este escoamento, na maioria dos casos, se encontrou com seu traçado incorreto, sem rede de drenagem pluvial, o que direcionou um fluxo superior ao suportado pelas vazões de rios e córregos. Segundo Cavaguti (1995), a ausência de estruturas de dissipação de energia nos pontos de descarga causou este efeito.

Salomão (1994) apud Corghi (2008) ainda afirma que as erosões de grande porte na cidade originam-se logo após o desmatamento, e se localizam nas cabeceiras de drenagem. As

feições erosivas se agravam devido à combinação de águas superficiais que causam alargamento das calhas e exposição de lençol freático.

No caso de Bauru, a ocupação urbana irregular, com a construção de loteamentos sem a devida atenção para as características do solo e principalmente, dos sistemas de drenagem (ausência de galerias de águas pluviais) foram os principais responsáveis pelo desencadeamento desenfreado deste tipo de problema, como afirma Alves apud Corghi (2008).

(...) nesse modelo especulativo a parte mais valorizada é o interflúvio, onde na maioria dos casos não se tem preocupação com galerias de águas pluviais ou bocas de lobo, e destina-se aos lotes particulares. As obras de drenagem concentram-se na porção médio inferior da vertente. A energia das águas aumenta no descer dessas encostas e destrói a rede de drenagem e a pavimentação, geralmente de má qualidade.

Silva, Cruz e Cavaguti (1995) estudaram os efeitos dos tipos de urbanização na formação de voçorocas, comparando três tipos de urbanização (núcleo habitacional, condomínios e áreas nobres) de 9 bairros da cidade de Bauru e solo natural. Foi feita a simulação dos processos erosivos através de equações desenvolvidas por Negev (1967). Dessa forma foram simuladas perdas de solo de acordo com as 4 classes definidas anteriormente, e com a variação da densidade de construção, definidas em três classes (sem construção, 50% construído e 100% construído) obtendo-se a Tabela 3 a seguir:

**Tabela 3 - Comparação entre tipos de urbanização e volume de solo erodido no município de Bauru/SP**

Tipo de Urbanização	Volume Erodido (m <sup>3</sup> /evento)		
	Sem construção	50 % construído	100 % construído
Solo Natural	700	-	-
Núcleo Habitacional	7200	17800	34500
Condomínio	5800	11800	23700
Áreas Nobres	4500	8000	12900

Fonte: Silva et al (1995)

Com a análise da tabela anterior, os autores constatarem que: “houve uma acentuada perda de solo da área simulada ao fundo de vale em todos os tipos de urbanização analisados, notadamente no caso de 100% ocupado. [...] a distribuição de vias e o tipo de construção planejado constituem fatores determinantes na perda de solo, pela ação dos processos erosivos na área considerada” (SILVA, CRUZ e CAVAGUTI, 1995).

Almeida Filho (2000) estudou a ocorrência de processos erosivos na cidade de Bauru relacionando dois principais fatores: uso e ocupação do solo e pluviosidade. O autor realizou um inventário das feições erosivas na cidade por período compreendido entre o ano de 1961 a 1999, com um maior detalhamento entre os anos de 1981 a 1993.

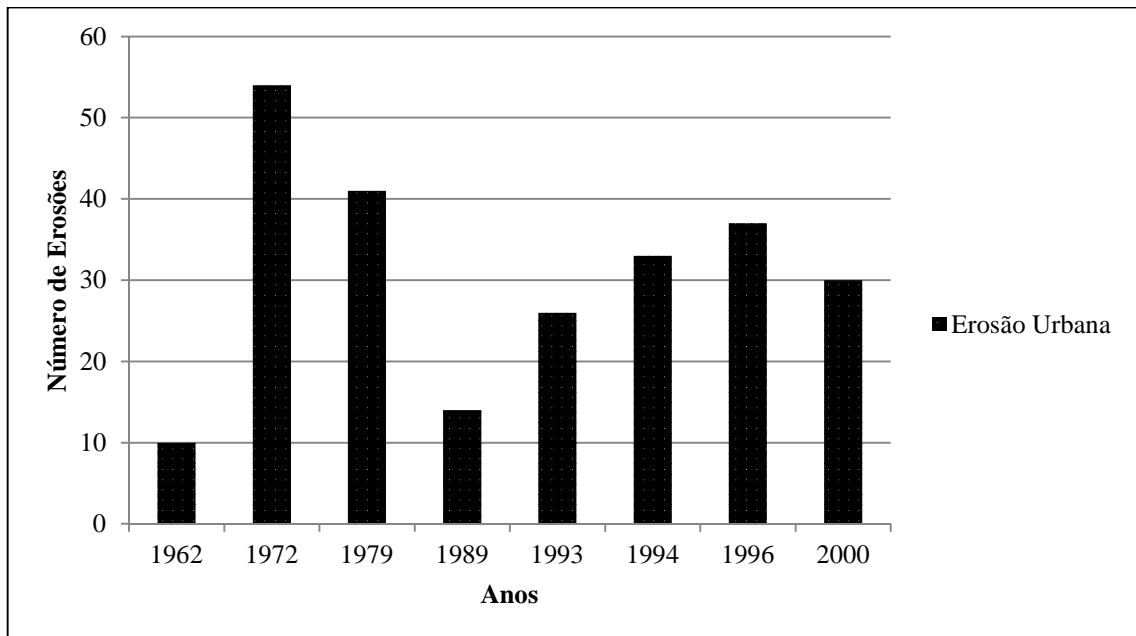
Este inventário foi realizado a partir da análise de fotografias aéreas e de registros da imprensa escrita local, gerando um memorial com todas as feições erosivas do município (no período que se compreendeu a análise), contendo uma descrição fenomenológica, principais impactos e recomendações para controle, além da quantificação de sedimentos carreados.

Para melhor entendimento dos processos, o autor delimitou o município em 4 principais sub-bacias hidrográficas (sendo estas: Ribeirão da água Parada, Rio Batalha, Rio Bauru e Ribeirão do Campo Novo) e determinou categorias fixas de uso do solo para relacioná-las (sendo estas: Mata/Reflorestamento, Pastagens, Atividades Agrícolas, Áreas Urbanas Urbanizadas e Áreas Urbanas em Expansão). As categorias de uso do solo foram classificadas de acordo com seus principais danos ambientais.

Na sub-bacia do rio Bauru, classificada na categoria de uso do solo denominada *áreas urbanas urbanizadas*, que tem como principais intervenções impermeabilização do solo, ocupação das baixadas, concentração das águas pluviais e estrangulamento de sistemas de drenagens, não coincidentemente a maior consequência ambiental é a erosão. Vale destacar que a sub-bacia do rio Bauru é onde se encontra a maior parte da área urbana do município e a microbacia do córrego Água Comprida onde se localiza o processo erosivo estudado neste trabalho.

O trabalho de Almeida Filho (2000) teve como importante produto a quantificação de erosões na cidade de Bauru ao longo dos anos, denotando a evolução dos processos erosivos frente à urbanização (Figura 5).

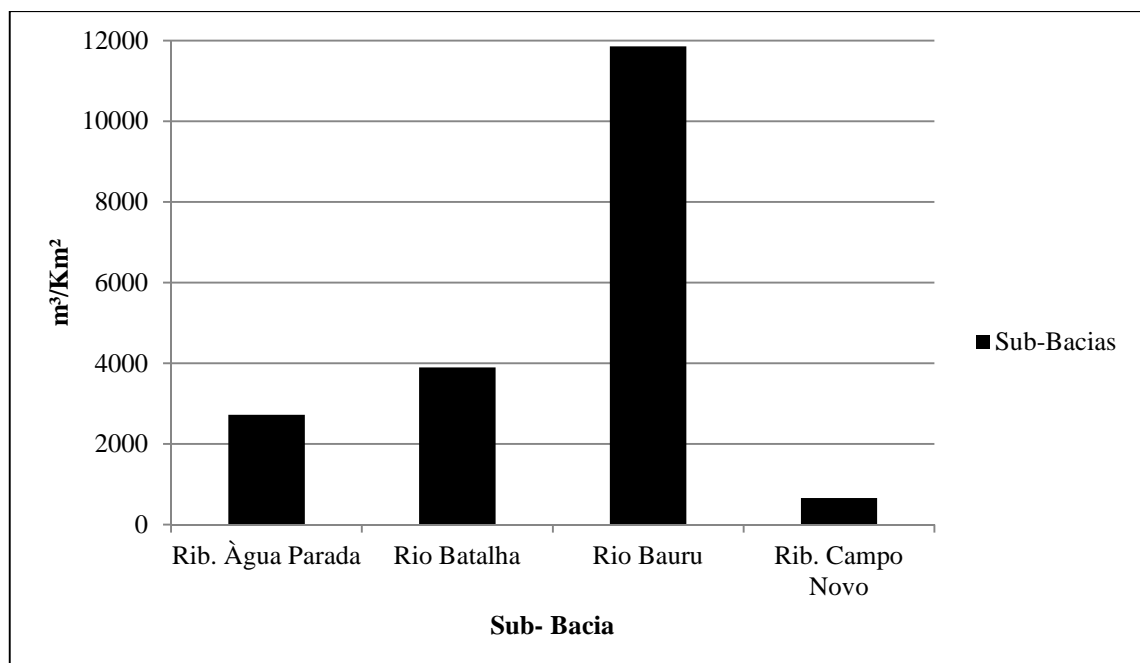
**Figura 5 - Evolução dos processos erosivos na área urbana de Bauru/SP**



Fonte: Almeida Filho (2000) (modificado)

Além disso, gráficos que contêm estimativas de sedimentos carregados por sub-bacia mostram novamente, a problematização da urbanização como aceleradora dos processos erosivos, com destaque para a sub-bacia do Rio Bauru (Figura 6).

**Figura 6 - Estimativa dos sedimentos carregados pelas erosões no ano de 1979, no município de Bauru/SP**



Fonte: Almeida Filho (2000)

Dessa maneira, é importante destacar a constatação de Almeida Filho sobre a problemática do uso do solo, principalmente a urbanização, sem o devido planejamento e medidas de controle e prevenção, deixando claro que outros fatores além das características físicas do solo são determinantes para ocorrência de processos erosivos. Classificou os principais fatores causadores de ocorrências destes processos em dois grupos: natureza dos terrenos e uso e ocupação do solo.

Além do fator que confere intensa erodibilidade ao solo do município, o autor associa a intensa e frequente ocorrência destes fenômenos em Bauru a seis principais fatores relacionados ao uso do solo e planejamento, destacados a seguir:

- Sistema viário com traçado inadequado e agravado pela inexistência do sistema de drenagem e pavimentação das ruas aliadas à suscetibilidade do terreno à erosão;
- Sistema de drenagens das águas pluviais ou servidas implantadas de forma inadequada, principalmente lançada a meia encosta ou nas cabeceiras de drenagem;
- Conjuntos habitacionais em locais de alta suscetibilidade à erosão e o sistema de drenagem lançado nas cabeceiras de drenagem;
- Assentamento de loteamentos onde as obras de infraestrutura não foram projetadas e muito menos instaladas;
- Nos controles dos processos erosivos, nem sempre se tem a preocupação com a ação da água subterrânea;
- Manutenção das obras de drenagem.

Cavaguti (1995) realizou uma análise global das erosões lineares na área urbana de Bauru, e constatou que na época havia mais de 30 voçorocas de médio a grande porte. De acordo com o autor, todas estas erosões foram causadas pela atividade humana, com uso e ocupação do solo feito de maneira inadequada, sem critérios técnicos que levassem em consideração o meio físico. Ele cita as principais atividades humanas geradoras dos processos erosivos: desmatamentos, queimadas, caminhos, vicinais e rodovias sem sistemas de drenagem adequados, conjuntos habitacionais com ruas de traçado incorreto, não pavimentadas e sem rede de drenagem pluvial (ou quando existem, sem estrutura de dissipação de energia nos pontos de descarga, causando concentração do processo erosivo).

As erosões foram caracterizadas fisicamente pelo autor, e constatou-se que algumas erosões lineares atingiram a dimensões máximas de 1.000 metros de comprimento e profundidade de mais de 50 metros. Além disso, foram classificadas por grau de criticidade.

Neste mesmo estudo, são registrados dados alarmantes acerca da degradação ambiental da área urbana de Bauru, sendo que Cavaguti (1995) aponta que as erosões lineares são um dos maiores problemas ambientais, representando na época 16.038 metros lineares de solo rasgado, com área total degradada de 1.880.525 metros quadrados e 1.392.951 metros quadrados de volume de solo escavado.

ALVES (1995) estuda as erosões urbanas de Bauru como consequência da forma de expansão e planejamento dos loteamentos privados e públicos, analisando algumas variáveis de planejamento e concretização físicas dos loteamentos.

Diante disso, aponta quatro principais inter-relações acerca do planejamento urbano e a ocorrência das erosões lineares, sendo estas:

1. Implicações das alterações da legislação de loteamentos no processo de formação e controle das erosões em Bauru.
2. A aprovação em massa de loteamentos populares privados, antes da atual legislação (no caso do estudo, do ano de 1995).
3. A falta de critérios técnicos para a implantação dos loteamentos privados e públicos tendo em vista a topografia e a qualidade do solo de Bauru.
4. A falta de órgão público que interagisse e desse diretrizes de planejamento, implicou em que ao sabor do interesse privado ou de órgãos públicos e empresas de construção civil, os loteamentos fossem aprovados com diversos elementos que favoreciam os empreendedores, mas que penalizavam o poder público quanto às soluções dos problemas de erosões causados pelo modelo adotado, como: a destinação de áreas públicas sempre à jusante dos loteamentos e suas implicações com o fenômeno erosivo; a fuga dos empreendedores em não cuidar ou comprometer-se com os sistemas de canalização de águas pluviais e suas consequências, principalmente nas partes baixas dos loteamentos, onde o fenômeno erosivo normalmente se inicia e onde ocorrem os assoreamentos; e a falta de diretrizes de loteamentos, que conceba a solução dos problemas de erosões individualmente por loteamentos.

Cruz, Silva e Cavaguti (1995) analisaram dois casos de impactos de erosões nos recursos hídricos de Bauru, destacando os problemas que grandes volumes de sedimentos carregados das erosões provocam nos fundos de vale, como o assoreamento das várzeas (tornando inviável seu uso agrícola), alteração dos traçados dos álveos dos rios, obstrução de vãos e pontes e de bueiros ocasionando extravasamento nas enchentes, entre outros.

Um exemplo de impacto negativo analisado pelos autores é o assoreamento do córrego Vargem Limpa, afluente do Rio Bauru. O local sofreu intenso assoreamento devido à ocorrência de três processos erosivos localizados no Parque Bauru, Conjuntos Habitacionais XXV e XXXI e na rodovia SP-225, que entre o período de novembro de 1992 e abril de 1993 transportaram cerca de 322.400 m<sup>3</sup> de sedimentos. Tendo como consequência diversos problemas, citados a seguir: inutilização de grande parte da várzea do córrego para finalidades agrícolas, soterramento de dois lagos do Bauru Country Clube utilizados para lazer, rompimento de uma barragem, alteração significativa do perfil do equilíbrio do córrego Vargem Limpa, obstrução parcial de um bueiro localizado na Avenida Rodrigues Alves, aumento da carga sedimentar no leito do Rio Bauru e soterramento da primeira estação de recalque do Departamento de Água e Esgoto.

Ide (2009) estudou o processo erosivo localizado no córrego Água Comprida e foi responsável por uma das poucas investigações geotécnicas deste tipo de problemática na cidade, visto que a maioria dos estudos sobre erosão na cidade de Bauru foram voltados para análise global, com enfoque nas questões de planejamento urbano, precipitação, carreamento de sedimentos, dimensões das erosões, entre outros.

Em seu trabalho, Ide (2009) caracterizou o solo local, e usou diversas técnicas de investigação acerca de suas propriedades mecânicas, utilizando ensaios de compressão edométrica e cisalhamento direto, e acerca da erodibilidade, utilizando ensaios de Inderbitzen, absorção de água e perda por imersão e penetração de cone.

A partir dos resultados, a autora concluiu o que já fora antes constatado por diversos autores sobre erosões na cidade de Bauru, que a gênese e evolução do processo se deram devido à falta de planejamento na ocupação urbana da cidade, mais especificamente no local, devido à construção de condomínios residenciais de alto padrão sem medidas mitigadoras. Além disso, concluiu que o solo do local, classificado como arenoso, possui características de alta erodibilidade comprovadas por todos os ensaios realizados, ainda que os ensaios de Inderbitzen realizados tenham sido preliminares, e necessitassem de maior número, devido à heterogeneidade das amostras. Apesar disso, estes ensaios demonstraram maiores perdas de solo nos primeiros 10 minutos de ensaio, ocorrendo estabilização após este tempo.

De acordo com Silveira (2004) apud Corghi (2008), no ano de 2005 a cidade possuía mais de 28 áreas com problemas de erosão, as quais já haviam carreado mais de 1.600.000 m<sup>3</sup> de solo para os fundos de vale. Corghi (2008) afirma que, no ano de 2009, o número de erosões na cidade era de aproximadamente 30. Atualmente não existem dados a respeito.

Para Conciani (2008), a erosão consiste em um grande problema urbano, que atua nas encostas de morros, nos canais a céu aberto, nas ruas não pavimentadas e outras áreas menos visíveis como parques e praças, e cita os principais danos econômicos e socioambientais que este tipo de degradação urbana pode causar, como: destruição da infraestrutura urbana (água, luz, esgoto, praças), lagoas de tratamento de afluentes, assoreamento de lagos e canais, e acúmulo de toneladas de solo sobre calçamentos de ruas e avenidas. Além disso, a deposição de resíduos sólidos urbanos ou de construção civil em erosões já consolidadas, como medida paliativa de contenção, causa graves problemas sanitários, como a contaminação do solo e do lençol freático, foco de vetores patogênicos e problemas de instabilidade, uma vez que pode haver recalque do solo nestas áreas sem uma possível previsão, já que o comportamento dos resíduos difere do comportamento usual do solo neste tipo de situação.

Nas regiões urbanas a erosão é um processo particularmente danoso. Qualquer escavação do tipo voçoroca ou ravina, leva consigo muitos equipamentos urbanos tais como postes, tubulações de esgoto, calçamento, muros, casa, etc. Esta perda de infraestrutura conduz a perdas financeiras de grande monta. Além das perdas financeiras deve ser levado em conta, e esta é a mais importante, a redução da qualidade de vida da população. (CONCIANI, 2008)

Outro grave problema associado à instalação de erosões no meio urbano se trata do assoreamento dos rios e córregos, que muitas vezes, são fontes de abastecimento das cidades. Ademais, com o leito assoreado, a seção de galerias de águas pluviais entope e bloqueia o escoamento, provocando enchentes e inundações. De acordo com Santos (2002) apud Conciani (2008), são removidos anualmente, no rio Tiete em São Paulo/SP, mais de 5.000.000 m<sup>3</sup> de sedimentos provenientes de erosões urbanas da Região Metropolitana.

### **2.3 - Erodibilidade dos Solos e Métodos de Investigação**

A erodibilidade dos solos está relacionada a características que conferem susceptibilidade à erosão, ou seja, é um dos parâmetros a ser analisado frente aos processos erosivos. Porém não deve ser de menor importância: uma vez que impostas situações de susceptibilidade à erosão no meio físico, como retirada da cobertura vegetal, falta de manejo do solo e chuvas intensas, são as propriedades de erodibilidade do solo que atribuirão maior ou menor intensidade ao processo.

A erodibilidade é um dos principais fatores condicionantes da erosão dos solos. 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 (BASTOS, 1999).

De acordo com Bertoni & Lombardi Neto, os diferentes tipos de solos podem apresentar susceptibilidade diferenciada à erosão superficial, mesmo para condições semelhantes de topografia, cobertura vegetal e práticas de manejo. Essas diferenças são devidas às propriedades do próprio solo e são denominadas de erodibilidade do solo.

Portanto, a erodibilidade depende do tipo de solo. Os que contêm materiais finos costumam ser menos erodíveis que os grossos, pois a destacabilidade de suas partículas é dificultada pelas forças de coesão, enquanto os solos com materiais mais grossos não possuem uma força de coesão, apenas em alguns casos, uma coesão aparente que não impede a destacabilidade das partículas (Pejon, 1992).

Dessa forma, a análise da erodibilidade é de fundamental importância para definição dos mecanismos responsáveis pela gênese e evolução de processos erosivos, assim como propor medidas preventivas e corretivas. Segundo Bastos (1999), os estudos técnicos sobre erodibilidade provêm de diversas áreas do conhecimento, como Agronomia, Hidráulica de Canais e, menos frequentemente, no meio Geotécnico, pois este encontra dificuldades em práticas devido à pequena magnitude das tensões envolvidas e representação de complexas condições do meio ambiente.

Apesar disso, uma crescente quantidade trabalhos vem surgindo acerca deste tema no meio Geotécnico, através de métodos e ensaios de laboratório. Não existem muitos métodos específicos de análise da erodibilidade. Dentre os mais utilizados no meio geotécnico, tem-se: Caracterização Física, Inderbitzen, Absorção de água e perda por imersão, metodologia MCT e penetração de cone.

A caracterização física se dá através de ensaios que determinam parâmetros como: índices físicos, distribuição granulométrica, limites de consistência, índice de plasticidade, entre outros, os quais influenciam a capacidade de resistibilidade do solo à erosão. Para esta caracterização, podemos citar ensaios como: granulometria conjunta, limites de liquidez, massa específica do solo, teor de umidade e massa específica dos sólidos. Esta caracterização é considerada primordial na análise da erodibilidade, uma vez que, de acordo com Jacintho et al. (2006) apud Avila, Nummer e Pinheiro (2010) sua relação com a erodibilidade não é considerada simples e direta, principalmente em solos tropicais, pelas partículas serem agregadas quando ocorre a intemperização, gerando contradições na análise da relação da

granulometria com a erodibilidade, assim como a presença de oxi-hidróxido de ferro, que atribui maior estabilidade e resistência ao solo.

A metodologia MCT foi desenvolvida no meio geotécnico para o uso em estradas, especificamente para solos tropicais, devido à ausência de uma metodologia deste tipo no país, sendo utilizados anteriormente métodos específicos para solos de climas frios. Esta metodologia utiliza dois parâmetros: o coeficiente de sorção ( $s$ ) obtido em um ensaio de infiltração, e o coeficiente ( $\pi$ ), obtido no ensaio de perda de massa por imersão.

O ensaio de Inderbitzen simula o efeito do escoamento superficial sobre o solo, com variações que podem ser reproduzidas de acordo com situações presentes no campo, ou com escolha de variáveis pertinente ao pesquisador. Essas variações compreendem: inclinação da rampa, vazão do fluxo de escoamento laminar, estado das amostras de solo (umidade, compactação, vegetação, entre outros) e tempo de ensaio.

Bastos (1999) propõe uma metodologia específica para análise global do fenômeno da erosão. Esta análise é composta por três etapas: reunião de dados preliminares sobre o problema e o perfil de solo envolvido, observação do comportamento dos solos em campos frente à erosão e avaliação da erodibilidade dos solos baseada em ensaios de laboratório.

Na primeira etapa, o autor frisa a importância da abordagem preliminar do problema, e sugere o agrupamento de informações como: características geométricas da erosão (profundidade do corte, etc.), caracterização geológica e pedológica dos perfis de solo envolvidos, posição do perfil na geomorfologia local e descrição in situ do perfil do solo local.

Na segunda etapa, devem ser analisadas quaisquer ocorrências de processos atuantes na área, desde feições erosivas anteriores até solapamentos, colapsos, entre outros. Além disso, deve-se levar em conta a posição topográfica e a inserção do perfil no contexto da encosta, assim como a drenagem e vegetação local.

Por último, o autor sugere a avaliação por meio de ensaios de laboratório, que podem ser de avaliação direta por meio do Inderbitzen, ou indireta, por meio de propriedades dos solos.

Dessa forma, pode-se concluir que a investigação geotécnica é fundamental para o estudo da gênese e evolução das erosões, já que o mecanismo de evolução das erosões está associado a características geológico-geotécnicas e estruturais. A seguir será detalhado o método de Inderbitzen, escolhido como método principal de análise neste trabalho, por ser considerado eficaz para reprodução em laboratório das condições de susceptibilidade à erosão no campo, e que apresenta resultados acerca da erodibilidade dos solos.

### 2.3.1- Inderbitzen

Este método foi criado por Inderbitzen em 1961, e é um dos métodos mais utilizados no meio geotécnico para avaliação da erodibilidade dos solos. No Brasil, foi utilizado por pesquisadores como: Bastos (1999), Freire (2001), Fácio (1991) e Camapum de Carvalho (2006).

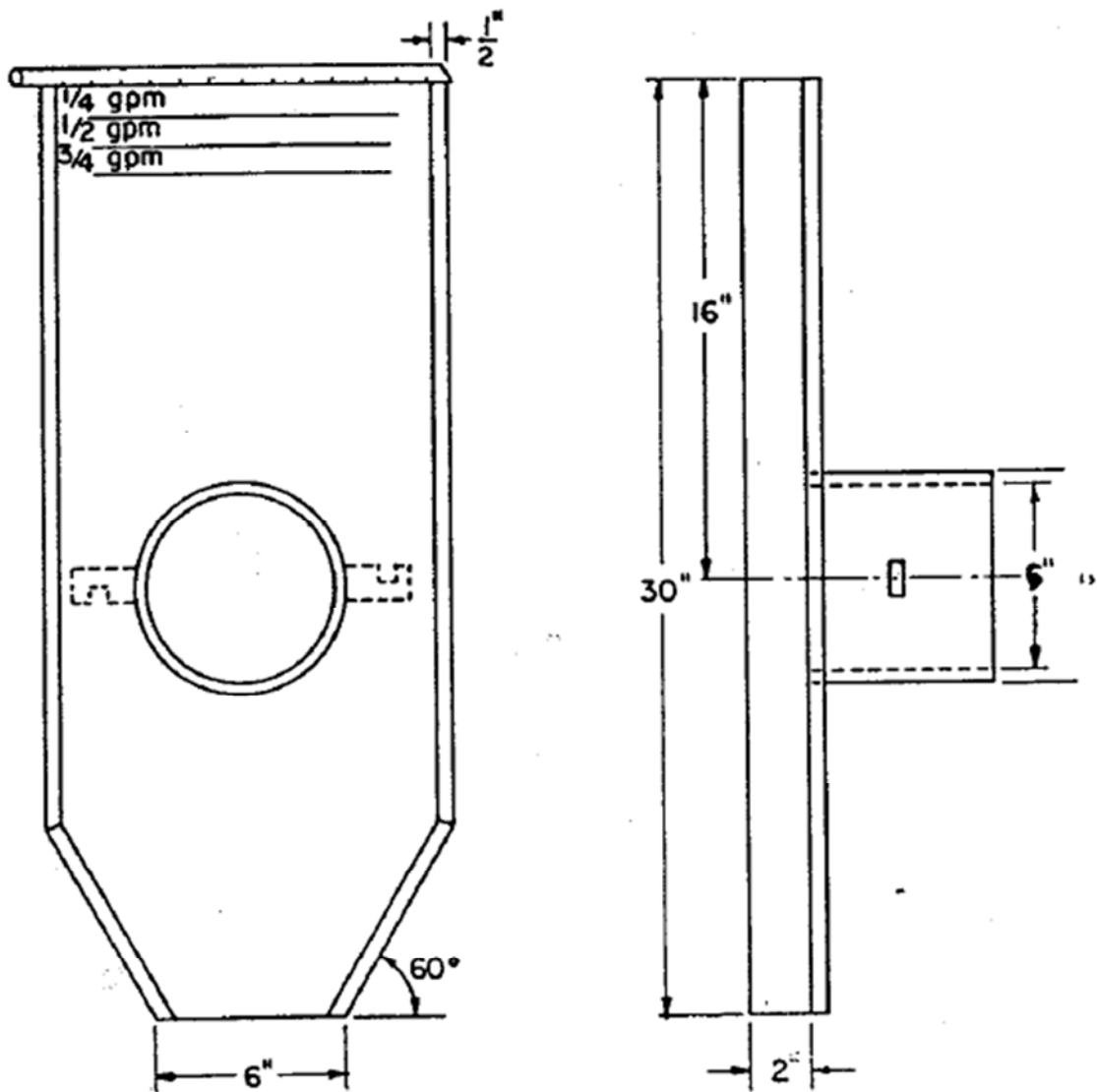
De acordo com Fernandes (2011), este ensaio foi introduzido no Brasil e proposto como ensaio geotécnico na pesquisa “Estabilidade de Taludes” (IPR/COPPE/TRAFECON), desenvolvida no período de 1975 a 1978, e em uma experiência do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Depois disso, o ensaio de Inderbitzen só foi realizado novamente na década de 90.

Trata-se de um método que avalia a medida da erodibilidade através da determinação da taxa de erosão sob condições variáveis de escoamento, inclinação e teor de umidade do solo, e seus resultados são mensurados em quantidade de perda de solo por tempo.

De acordo com o ensaio original desenvolvido por Inderbitzen (1961) em sua publicação “An erosion test for soils”, a perda de solo pode ser medida em amostras cujo plano de sua superfície coincide com o plano variável da rampa, pela qual flui o escoamento com uma vazão controlada. Este ensaio tem como objetivo a simulação aproximada do efeito do escoamento superficial sobre o solo, permitindo analisar diferentes resultados conforme a mudança da vazão do fluxo, seu tempo de atuação, declividade da rampa e propriedades do solo, como sua densidade e umidade (FERNANDES, 2011).

Seu procedimento básico consiste em fixar um anel cilíndrico contendo uma amostra de solo em uma rampa de inclinação variável. O escoamento de água na rampa provoca erosão no solo, que pode ser avaliada através da massa das partículas do solo removidas pela água. (Figura 7)

Figura 7 - Aparelho Inderbitzen – Concepção Original



Fonte: Inderbitzen apud Bastos (1999)

Com a disseminação deste ensaio no país, pesquisadores entenderam como necessária uma adaptação do aparelho para reprodução mais fiel à realidade, e diminuição de certas imperfeições. Dessa forma, alguns trabalhos modificaram o aparelho para melhor aproveitamento de seus resultados.

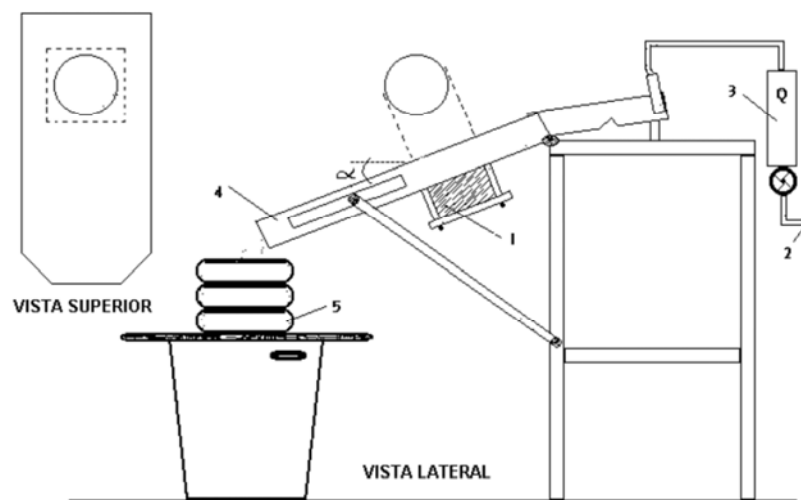
Fácio (1991) procurou estabelecer uma metodologia padrão através de uma série de ensaios variando os valores de vazão, declividade e tempo de duração do ensaio. A partir dos resultados, o autor sugeriu novas dimensões ao aparelho: como a largura da rampa para 0,33 m; comprimento da rampa, que passou de 1,00 m para 1,30 m; redução do diâmetro das

amostras, de 0,152 m para 0,10 m. Além disso, projetou o aparelho para realização de três ensaios ao mesmo tempo, criou duas bacias de uniformização da água, a fixação dos corpos de prova com encaixe na base e sugeriu uma norma em que os corpos de prova fossem fixados em uma rampa de 10°, tempo de ensaio com duração de 20 minutos e vazão de 50 ml/s, com a amostra saturada por 15 minutos.

Santos (1997) apud Ramidan (2003) sugeriu uma modificação na largura da rampa, de modo que esta deveria ter o diâmetro do corpo de prova, assegurando que todo o fluxo de água passe sobre a amostra, e aumentou o tempo do ensaio para 30 minutos.

Bastos (1999) também construiu um novo equipamento, adaptado com novas dimensões (rampa de 0,25 m de largura e 0,60 m de comprimento), com um orifício central onde são acopladas amostras de solo em anéis de PVC com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5 cm . Também adaptou o método, na qual as amostras foram ensaiadas em diferentes condições de umidade (natural, seca ao ar e pré-umedecida) e com inclinações de 10°, 26°, 45° e 54° na rampa a uma vazão de 3 l/min e 6 l/min no tempo de 20 minutos de ensaio.

**Figura 8 - Aparelho de Inderbitzen do LMS/UFRGS**



- 1 - Amostra de solo    2- entrada de água    3- rotâmetro (medidor de vazão)  
4- rampa    5- peneira

Fonte: Bastos (1999)

É importante destacar que esta metodologia não possui normatização, interferindo nos dados obtidos e dificultando comparações entre os diversos estudos. Apesar disso, apresenta resultados satisfatórios na comunidade geotécnica que o utiliza.

No trabalho de Mendes (2006), verifica-se que a saturação progressiva do solo leva a um momento em que a resistência é superada e as partículas são carregadas. No mesmo estudo, verificou que o arraste de partículas mensuradas em intervalos de tempo segue a tendência de estabilização em um determinado instante, com retomada posterior. Segundo ela, isso ocorre porque a saturação é um processo progressivo entre as agregações das partículas, em que a partir de determinado instante, a capacidade de arraste do fluxo de água supera a resistência do solo e ocorre o carreamento.

Bastos (1999) propõe uma classificação de erodibilidade através das taxas de perda de solo por área, obtidas no ensaio. Segundo o autor, solos que apresentam taxa de perda de solo superiores a  $0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}$  são considerados solos mais erodíveis, e os que apresentam taxa de perda de solo inferiores a  $0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}$  podem ser considerados menos erodíveis.

Nos estudos de Fácio (1991) e Mendes (2006), foi constatada maior produção de sedimentos nos primeiros cinco minutos do ensaio. Para o primeiro autor, a produção de sedimentos aumenta com a declividade da rampa.

É notável a contribuição deste ensaio para melhor conhecimento da erodibilidade do solo frente às forças de escoamento hídrico ao longo do tempo. Porém poucos estudos que se utilizaram desta metodologia levaram em conta o caráter não saturado dos solos, que têm como principal característica a sucção, que pode variar com a umidade do solo.

Diante disso, a utilização deste método variando-se a sucção nas amostras, é de grande importância para a determinação da erodibilidade, pois a sucção influencia diretamente na infiltrabilidade e conseqüentemente, na condutividade hidráulica do solo.

## **2.4 - Solos Não Saturados**

### **2.4.1 - Aspectos Básicos**

A mecânica dos solos clássica foi desenvolvida para os solos de países de climas frios e temperados, onde predomina a ocorrência de depósitos sedimentares com nível d'água localizando-se próximo à superfície do terreno. Uma larga porção da população mundial, porém, encontra-se em regiões áridas, semi-áridas e tropicais, onde o nível d'água é profundo.

Nas regiões úmidas e temperadas, o processo de precipitação é mais intenso do que o de evaporação. Já nas regiões áridas e semi-áridas, ocorre maior evaporação do que precipitação, favorecendo a formação de solos com deficiências de umidade. Tais solos, chamados de solos não saturados, podem ter origem diversificada, podendo-se citar como

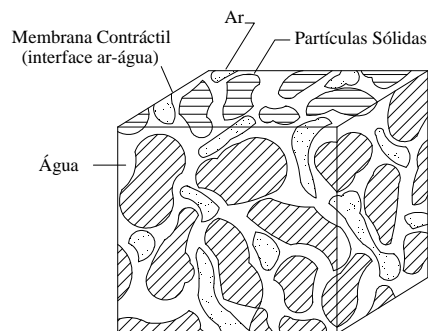
parte desta categoria de solos as argilas plásticas expansivas, os depósitos aluvionares, coluvionares e eólicos, os solos saprolíticos e lateríticos, os solos cimentados e os solos compactados.

Uma série de comparações entre os solos saturados e os solos não saturados pode ser realizada, principalmente do ponto de vista de suas propriedades mecânicas: permeabilidade (condutividade hidráulica), variação de volume (compressibilidade) e resistência ao cisalhamento. A busca de uma representação comparativa adequada destes solos torna-se relevante, pois os comportamentos mecânicos dos solos não saturados são distintos e, muitas vezes, complexos.

Um solo saturado constitui um sistema bifásico, formado por água e partículas minerais, enquanto que um solo não saturado é um sistema trifásico composto por ar, água, e partículas minerais. A presença destes componentes num solo não saturado faz com que ocorram diferentes interfaces e interações. Em decorrência da presença de ar nos vazios do solo, a água intersticial encontra-se sempre sujeita a pressões inferiores à atmosférica. Tais pressões decorrem de fenômenos capilares e de adsorção, responsáveis pela sucção matricial, e de fenômenos osmóticos, devido à presença de solutos na água do solo, responsáveis pela sucção osmótica.

Fredlund & Morgenstern (1977) não consideram o solo não saturado como um sistema trifásico, mas sim como um sistema composto por quatro fases: (1) fase líquida; (2) fase gasosa, (3) fase sólida e, (4) membrana contráctil (*contráctil skin*), esta última devido a um importante papel da interface ar-água. A Figura 9 ilustra um elemento cúbico de solo não saturado com base nestas quatro fases. Em termos práticos, contudo, costuma-se resumir (1) e (4) como uma única fase.

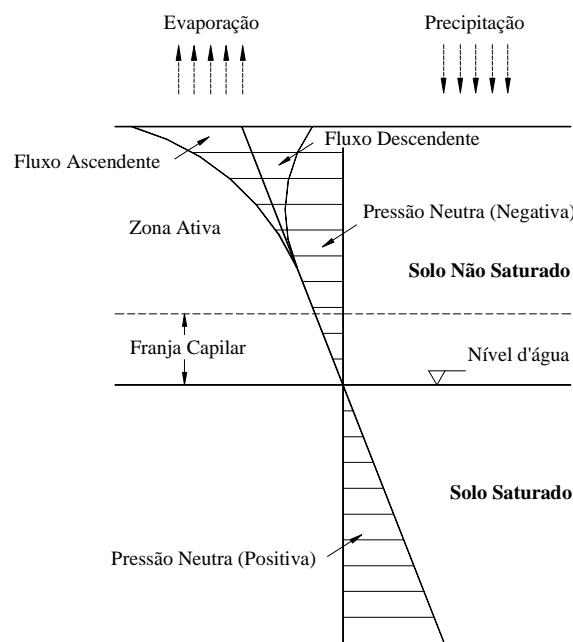
**Figura 9 - Elementos do solo não saturado**



**Fonte:** Fredlund & Rahardjo (1993)

Nas últimas décadas, os problemas geotécnicos associados aos solos não saturados têm chamado à atenção da comunidade geotécnica. Os solos tropicais não saturados, lateríticos e saprolíticos, em geral, têm como principais características a baixa umidade nos horizontes superficiais, a ação de ciclos alternados de umedecimento e secagem e perfis não saturados até grandes profundidades. Em alguns destes solos, as principais características da variação da pressão de água num perfil representativo podem ser observadas na Figura 10.

**Figura 10 - Variação da pressão na água em um perfil de solo**



**Fonte: Rodrigues (2007)**

Na Figura 10, a porção do perfil de solo acima do lençol freático, chamada de zona vadosa, pode ser subdividida em duas regiões: (1) a região imediatamente acima do nível d'água, chamada de franja ou zona capilar, permanece saturada invariavelmente ainda que as pressões neutras sejam negativas; (2) e a região acima da franja capilar, chamada de zona ativa, onde o grau de saturação do solo tenderá a se equilibrar na condição hidrostática quando o fluxo da superfície do terreno for zero. Se houver uma diminuição do teor de umidade (evaporação/evapotranspiração), a pressão na água diminui; se houver um aumento do teor de umidade (infiltração), a pressão aumenta (Rodrigues, 2007).

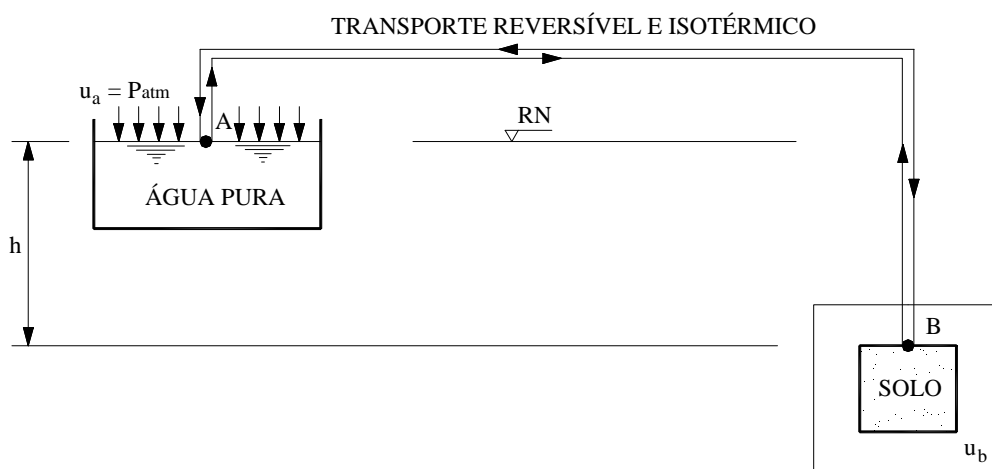
Este comportamento pode ser compreendido pelo estado energético da água existente nos vazios de um solo. A energia potencial e a energia cinética são as duas formas de energia classicamente reconhecidas na Física. Considerando-se a reduzida velocidade de fluxo d'água



que normalmente ocorre nos solos, a energia cinética pode ser desprezada, restando apenas a energia potencial que é decorrente da interação da água com seus campos de força ou potenciais.

O potencial total da água no solo ( $\psi$ ) representa o trabalho útil que deve ser realizado em uma quantidade infinitesimal de água pura, para conduzi-la, reversível e isotermicamente, desde um reservatório sob condições padronizadas (Ponto A) até à água no solo, na cota de interesse (Ponto B) e sujeita à pressão  $u_b$  (Figura 11).

**Figura 11 - Esquema que ilustra a definição de potencial total de água no solo**



**Fonte: Rodrigues (2007)**

O potencial total de água no solo ( $\psi$ ) compõe-se essencialmente pela soma dos potenciais gravitacional ( $\psi_g$ ), matricial ( $\psi_m$ ), osmótico ( $\psi_{os}$ ) e pneumático ( $\psi_{pn}$ ). Portanto, o conceito do estado energético da água no solo envolve parcelas referentes à posição da partícula de água, aos fenômenos osmóticos, capilares e de adsorção e à pressão externa sobre ela exercida.

De particular importância para o estudo do comportamento mecânico e hidráulico dos solos não saturados são os potenciais matriciais e osmóticos, responsáveis pela sucção matricial e osmótica, resultantes das forças capilares e de adsorção e da presença de solutos na água no solo.

### 2.4.2 - Sucção

Segundo Marinho (2005), a sucção pode ser descrita como a energia com que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. Esta avidez por água é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade do solo. A sucção é normalmente expressa como pressão e, portanto, as unidades mais utilizadas são kPa, atm e bar. Utiliza-se também a carga de pressão para representar o estado de pressão da água.

Em outras palavras, a sucção total do solo é definida como a pressão manométrica negativa, em relação à pressão externa de gás sobre a água do solo, que deve ser aplicada a um reservatório de água pura (à mesma cota e temperatura) de sorte a que se mantenha o equilíbrio, através de uma membrana semipermeável (permite o fluxo de água, porém, não o de solutos), entre a água do reservatório e a água do solo (Vilar 2002).

Na Figura 12, a sucção total é medida pela elevação da coluna de mercúrio do reservatório de água pura em contato com o solo através da membrana semipermeável (permeável à água e não ao soluto). A sucção matricial é medida pela elevação da coluna de mercúrio do reservatório de água que contém a mesma solução do solo através de uma membrana permeável à água e ao soluto. Já, a sucção osmótica é medida pela elevação da coluna de mercúrio do reservatório de água pura com o reservatório de água com a mesma solução do solo através de uma membrana permeável à água.

A sucção total ( $s$ ) constitui-se da soma de duas componentes, a sucção matricial e a sucção osmótica, e esta, corresponde ao potencial total ( $\psi$ ), se os potenciais gravitacional e pneumático forem desprezados. Por extensão, a sucção matricial ( $s_m$ ) e a sucção osmótica ( $s_{os}$ ) correspondem ao potencial matricial ( $\psi_m$ ) e ao potencial osmótico ( $\psi_{os}$ ).

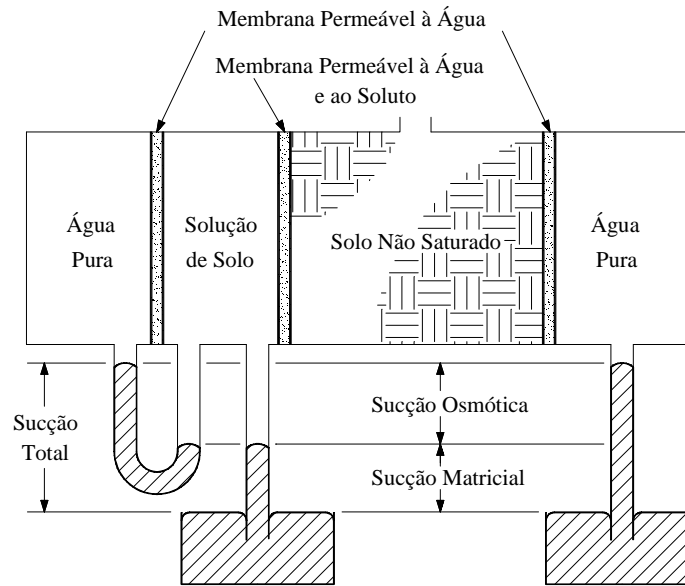
$$s = s_m + s_{os} \quad \text{ou} \quad \psi = \psi_m + \psi_{os} \quad (2.1)$$

Apesar da diferença conceitual, tem-se reservado à pressão de ar menos a pressão de água a representação da sucção matricial, pois esta corresponde quase que integralmente à sucção total:

$$s_m = (u_a - u_w) \quad (2.2)$$

A sucção matricial ( $s_m$ ) tem sido reconhecida como a mais importante fonte de sucção a interferir no comportamento mecânico de solos não saturados. Esta parcela de sucção é equivalente à sucção total quando a água do solo é idêntica à água padrão (água pura ou solução com a mesma composição da água no solo), restando apenas o efeito da matriz do solo, decorrente de forças de capilaridade e de adsorção.

**Figura 12 - Sistemas que ilustram a definição das sucções matricial, osmótica e total**

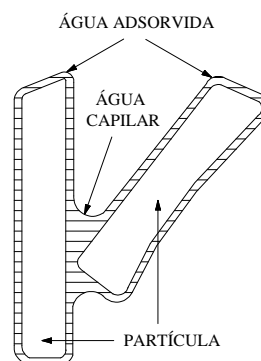


**Fonte:** Hillel (1971)

A capilaridade tem importância maior no domínio das baixas sucções, quando se trata de poros de diâmetro grandes. Já, a adsorção apresenta-se mais relevante no domínio dos altos valores de sucção, quando se trata de poros de menor diâmetro, onde há predominância dos fenômenos de superfície, muito ligados à superfície específica ou a atividade do argilomineral.

A Figura 13 ilustra duas partículas de solo sujeitas aos fenômenos de capilaridade e de adsorção.

**Figura 13 - Água de um solo sujeita à capilaridade e à adsorção**



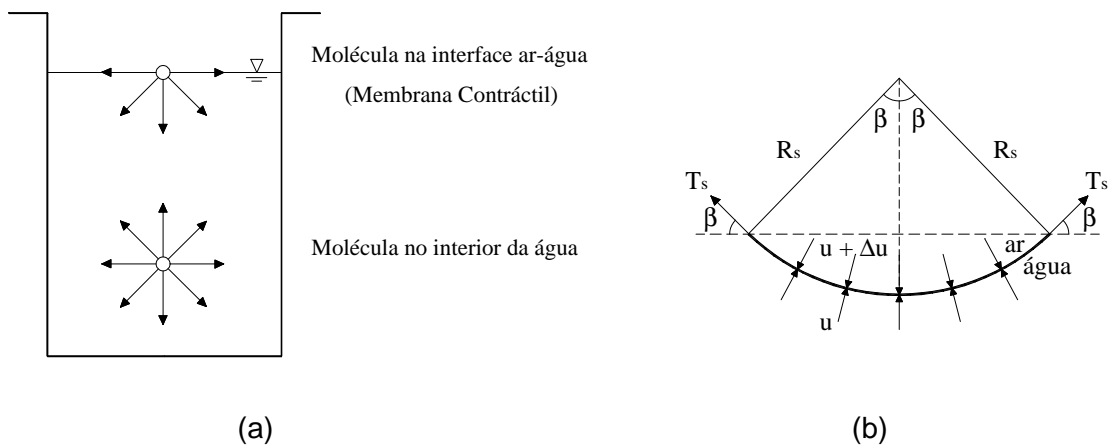
**Fonte:** Rohm(1992)

No tocante à capilaridade, surge na interface ar-água uma membrana contrátil provocado por um diferencial de pressão que é gerado pelas moléculas de água que são

atraídas para o interior da massa líquida com maior intensidade do que para fora, como pode ser visto na Figura 14 (a).

Para que se mantenha o equilíbrio no sistema, a superfície do líquido na interface ar-água é tracionada deixando de ser plana, isto é, a superfície da membrana torna-se côncava, com os centros de curvatura localizados do lado do ar, Figura 14 (b). Nesta interface, o estado de tensão que melhor representa esta situação é dado pela tensão superficial ( $T_s$ ).

**Figura 14 - (a) Moléculas de água em equilíbrio num reservatório; (b) Equilíbrio de solicitações atuantes na membrana contráctil**



Fonte: Fredlund & Rahardjo (1993)

Fazendo-se o equilíbrio das solicitações atuantes na membrana contráctil na direção vertical, tem-se:

$$2 \cdot T_s \cdot \text{sen}\beta = 2 \cdot \Delta u \cdot R_s \cdot \text{sen}\beta \quad (2.3)$$

Em que,

$T_s$  : tensão superficial;

$R_s$  : raio de curvatura da membrana contráctil;

$\Delta u$  : diferencial de pressão que causa a curvatura da membrana contráctil;

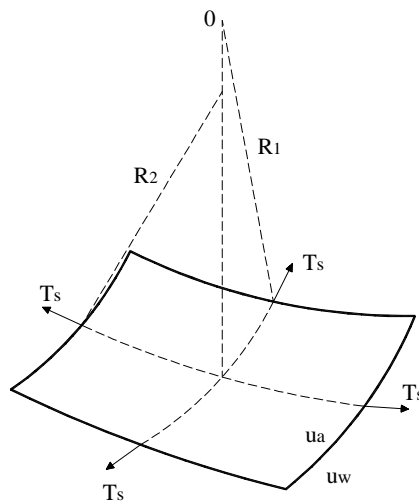
$2 \cdot R_s \cdot \text{sen}\beta$  : comprimento da membrana contráctil projetado num plano horizontal.

Rearranjando a Equação 2.3, obtém-se:

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2-D) \quad \text{ou} \quad \Delta u = T_s \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3-D) \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 (3-D) representa o diferencial de pressão numa membrana contráctil tridimensional, de acordo com Laplace (Fredlund & Rahardjo, 1993; Libardi, 1995), onde  $R_1$  e  $R_2$  são os raios da membrana contráctil em dois planos ortogonais principais (Figura 15).

**Figura 15 - Tensão superficial em uma membrana contráctil tridimensional**



Fonte: Fredlund & Rahardjo(1993)

Supondo os raios  $R_1$  e  $R_2$  iguais em todas as direções, a Equação 2.4 (3-D) torna-se:

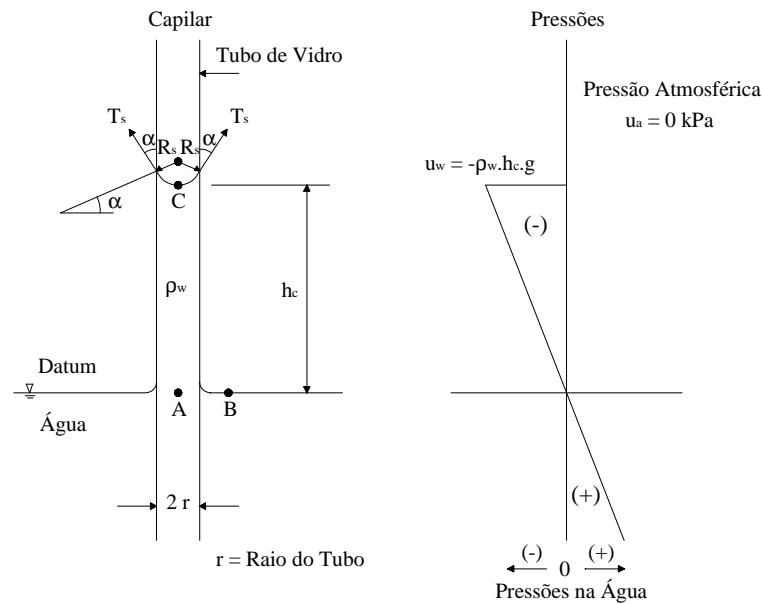
$$\Delta u = \frac{2 \cdot T_s}{R_s} \quad (2.5)$$

Tratando-se de solo não saturado, a membrana contráctil fica sujeita à pressão de ar,  $u_a$ , que é maior que a pressão da água,  $u_w$ . A diferença entre as pressões de ar e de água resulta na sucção matricial, podendo ser escrita da seguinte forma:

$$(u_a - u_w) = \frac{2 \cdot T_s}{R_s} \quad (2.6)$$

A Equação 2.6 pode, ainda, ser expressa em termos de altura de ascensão capilar,  $h_c$ , conforme representado na Figura 16. Nesta figura,  $\alpha$  representa o ângulo de molhamento da água sobre o tubo capilar,  $r$  o raio do tubo,  $R_s$  o raio de curvatura do menisco capilar e  $\rho_w$  a massa específica da água.

Figura 16 - (a) Esquema de ascensão em um tubo capilar; (b) Diagrama de pressão na água



Fonte: Fredlund & Rahardjo (1993)

Fazendo-se o equilíbrio das forças na direção vertical, tem-se:

$$2\pi \cdot r \cdot T_s \cdot \cos\alpha = \pi \cdot r^2 \cdot h_c \cdot \rho_w \cdot g \quad (2.7)$$

Portanto, a Equação 2.7 resulta no cálculo da altura de ascensão capilar ( $h_c$ ):

$$h_c = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos\alpha}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad \text{com} \quad R_s = \frac{r}{\cos\alpha} \quad (2.8a)$$

$$h_c = \frac{2 \cdot T_s}{\rho_w \cdot g \cdot R_s} \quad (2.8b)$$

Se  $\alpha$  é igual a zero (água pura),  $R_s$  torna-se igual a  $r$ .

$$h_c = \frac{2 \cdot T_s}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad (2.8c)$$

Supondo equilíbrio hidrostático, as cargas hidráulicas totais, nos pontos A, B e C, são iguais, ou seja,  $H_A = H_B = H_C$ , porém,  $u_{wA} = u_{wB} = 0$  kPa (pressão atmosférica).

$$H_A = \frac{u_{wA}}{\gamma_w} + z_A \quad H_C = \frac{u_{wC}}{\gamma_w} - z_C \quad (2.9)$$

$$\frac{u_{w_c}}{\gamma_w} = z_A - z_C = -h_C \quad \text{ou} \quad u_{w_c} = -\rho_w \cdot g \cdot h_C \quad (2.10)$$

No lado côncavo da membrana contráctil (menisco) atua pressão atmosférica ( $u_a = p_{atm}$ ). Utilizando-se a Equação 2.6 (Laplace) juntamente com a Equação 2.8(b) obtém-se a seguinte relação:

$$(u_{a_c} - u_{w_c}) = \frac{2 \cdot T_s}{R_s} \quad \text{como,} \quad h_c = \frac{2 \cdot T_s}{\rho_w \cdot g \cdot R_s} \quad (2.11)$$

Como a diferença entre as pressões de ar e de água na interface ar-água (Ponto C) representa a sucção matricial, então, pode-se reescrever a sucção em termos de ascensão capilar:

$$(u_{a_c} - u_{w_c}) = \gamma_w \cdot h_c \quad (2.12)$$

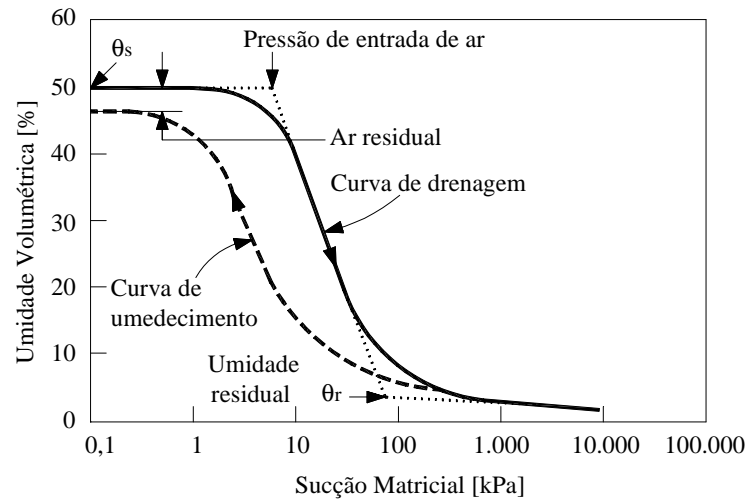
### 2.4.3 - Curva de Retenção de Água no Solo

A curva de retenção de água do solo ou curva característica solo-água (SWRC) é um elemento chave para o estudo dos solos não saturados. Trata-se de uma maneira exclusiva de relacionar a sucção a um índice físico do solo. Normalmente, a umidade gravimétrica ( $w$ ), a umidade volumétrica ( $\theta$ ) ou o grau de saturação ( $S_r$ ) são os índices físicos do solo usados nesta curva.

Na literatura, não existe uma padronização na forma de apresentação dessa curva. A sucção (total ou matricial) aparece tanto no eixo das abscissas quanto no eixo das ordenadas, em escala linear ou logarítmica. O conteúdo de água no solo aparece sempre em escala linear, mas é expresso de diferentes formas, a partir da umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou do grau de saturação do solo.

Os elementos principais desta curva podem ser visualizados na Figura 17. Nesta figura, destacam-se a umidade de saturação ( $\theta_s$ ), a pressão de entrada de ar e a umidade residual ( $\theta_r$ ). A pressão de entrada de ar simboliza a pressão necessária para que se inicie o esvaziamento do maior poro do solo. Até que se atinja este valor de pressão, o solo, mesmo sujeito a uma sucção, permanece saturado. A umidade residual representa uma quantidade de água retida no solo que não varia mesmo com a imposição de sucção ao solo.

**Figura 17 - Curva de retenção de água no solo**



Fonte: Rodrigues (2007)

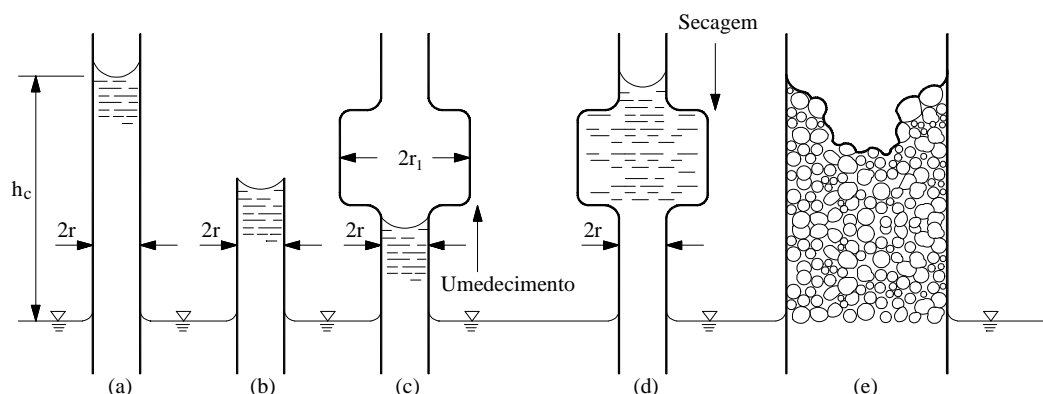
A histerese é um fenômeno que ocorre nas curvas de retenção de água, sobretudo quando estas curvas são determinadas com as trajetórias de drenagem (desidratação ou secagem) e de umedecimento (hidratação ou sorção). Os pontos obtidos pela trajetória de drenagem não são os mesmos dos da trajetória de umedecimento. Trata-se, portanto, de uma mudança dos valores de umidade e sucção ou de um deslocamento de uma trajetória em relação à outra.

Na natureza, os solos estão sujeitos a ciclos de umedecimento e secagem que acontecem ao longo do tempo. Estes ciclos resultam em variações de umidade que geram valores de sucção situados entre as curvas de umedecimento e drenagem, o que torna estas duas trajetórias condições limites.

A histerese, de uma forma geral, tem sido atribuída: (1) às variações de diâmetro dos canalículos (Figura 18); (2) ao aprisionamento de ar; (3) às variações no ângulo de molhamento da água com os sólidos, que é maior no processo de umedecimento e menor na fase de drenagem; (4) às bolhas de ar oclusas; e (5) às estruturas dos solos sujeitas à expansão ou à contração nas fases de umedecimento ou de drenagem.



**Figura 18 - Esquema representativo do efeito da altura de ascensão e do raio capilar na capilaridade**



Fonte: Taylor (1948) *apud* Fredlund & Rahardjo (1993)

Na Figura 18, tem-se um tubo capilar limpo e com água pura, onde seu comprimento excede a altura de ascensão capilar,  $h_c$ . No entanto, a altura de ascensão capilar pode ficar restringida, caso a altura do tubo capilar seja inferior à altura de ascensão. Para que se mantenha o equilíbrio do sistema nessa condição, o decréscimo da altura capilar resulta no acréscimo do raio de curvatura do menisco ( $R_s$ ). Dois tubos capilares apresentam abertura do raio, de  $r$  para  $r_1$ , porém, com alturas de ascensão diferentes. Nestes casos, o processo de secagem dependerá dos pequenos raios dos canais que se conectam aos grandes vazios do solo, enquanto que, o umedecimento dependerá do máximo diâmetro desses grandes vazios.

A estrutura do solo possui arranjos complexos com poros e canais (tubos) irregulares, demonstrando a simplicidade dos modelos de tubos capilares para a descrição da histerese.

A curva de retenção de água, além de representar a capacidade que o solo tem de armazenar água, pode ser utilizada para analisar a influência da umidade inicial nos processos erosivos. Além disso, tem sido estendida para a previsão e quantificação de diversos parâmetros de grande interesse na solução dos problemas geotécnicos, como a condutividade hidráulica, infiltrabilidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Isto é atrativo à prática, já que ensaios que quantifiquem estas propriedades podem ser muitas vezes onerosos e demoram muito tempo para serem desenvolvidos (SILVA, 2005).

O estudo da sucção nos solos não saturados também é de grande importância para a determinação da erodibilidade, pois as forças de sucção influenciam diretamente na infiltrabilidade e conseqüentemente, a condutividade hidráulica.

“No meio geotécnico, consolida-se a opinião de que a erodibilidade e a resistência ao cisalhamento, em particular para solos tropicais, estão intimamente relacionadas” (BENDER, 1984 e 1985; CONCIANI, 1998).

Muitas vezes esta relação não é expressa diretamente, mas os peculiares fatores que governam a resistência ao cisalhamento dos solos de clima tropical e subtropical não saturados (lateríticos e saprolíticos): cimentação, macroestrutura de origem pedológica ou geológica e sucção, são os mesmos que influem decididamente na erodibilidade desses materiais (BASTOS, 1999).

Em Bender (1985), a erosão é decididamente encarada como um problema de resistência ao cisalhamento, dada em função da coesão do solo na superfície, alterada durante infiltração da água da chuva. O autor enfatiza que a coesão é o parâmetro mais adequado para avaliar a estabilidade à erosão de solos saprolíticos. Esta coesão depende do estado de tensões e do teor de umidade no início da erosão. A grande vantagem na definição da resistência à erosão baseada na resistência ao cisalhamento é atribuída ao fato de que é correta do ponto de vista físico e mecânico e é baseada em ensaios de Mecânica dos Solos, consolidados na engenharia geotécnica (Bender, 1984) (BASTOS, 1999).

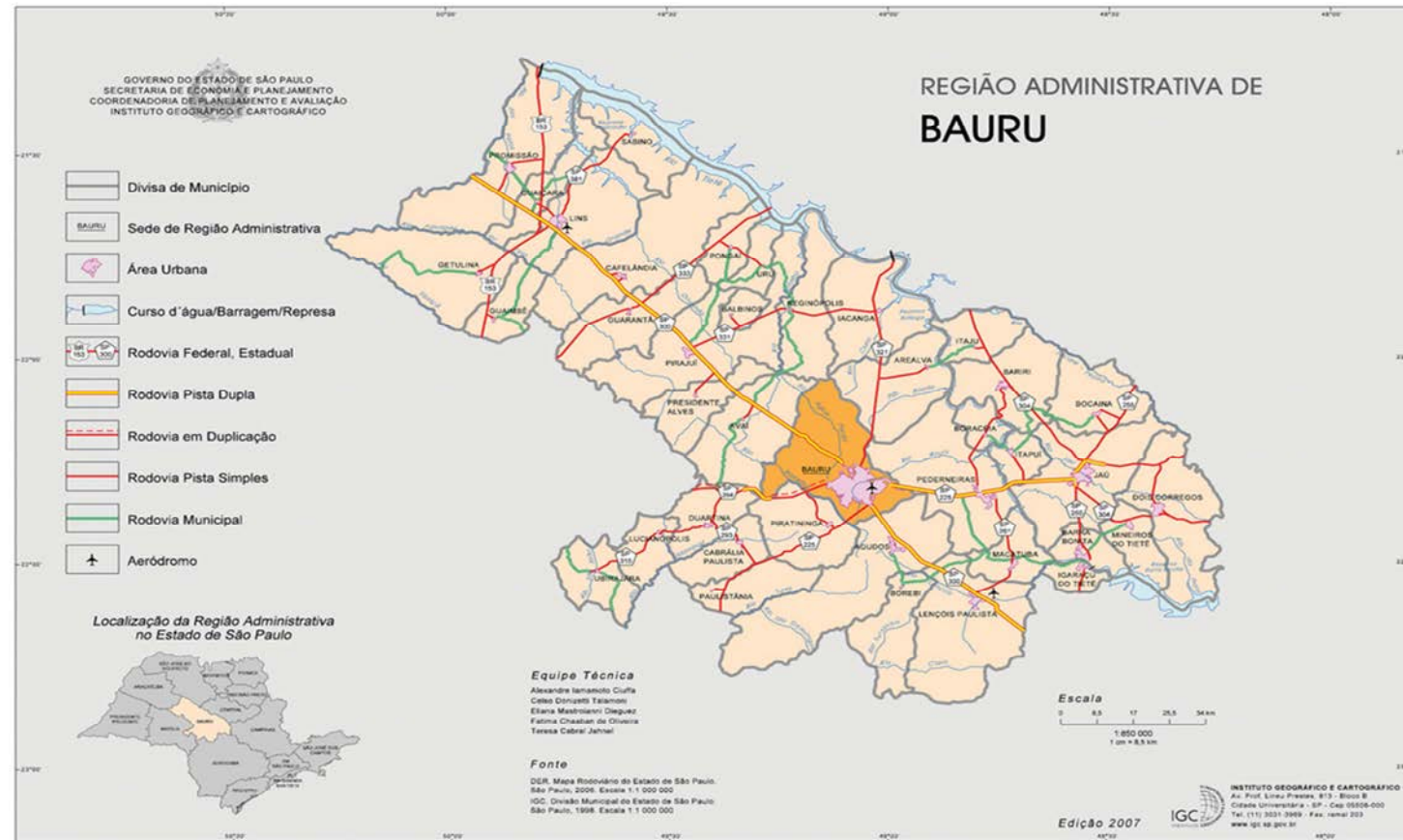
### **3 - MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 - Área de Estudo**

##### **3.1.1 - O Município de Bauru**

A cidade de Bauru está localizada no centro-oeste do estado de São Paulo, mais precisamente a 345 km da capital, com altitude próxima de 526 metros do nível do mar. Possui uma área total de 667,684 Km<sup>2</sup>, e seus municípios limítrofes são: Arealva, Reginópolis, Piratininga, Agudos, Pederneiras e Avaí. As principais vias de acesso a Bauru são a SP-300, que corta a região de leste a oeste e liga o município à rodovia Castelo Branco; a SP-225 que liga Bauru à região de Marília e a SP-333, que faz ligação com as regiões mais centrais, assim como Ribeirão Preto e região (Figura 19).

Figura 19 - Mapa de localização do município de Bauru/SP



Fonte: Dados, Estatísticas, Mapas, Tabelas e Gráficos do Estado de São Paulo<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Disponível em: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1379151&page=3>

### 3.1.1.1 – Aspectos Socioeconômicos

Bauru teve sua origem em meio às frentes de ocupação das terras do interior paulista no fim do século XIX, e sua consolidação como cidade se deu no ano de 1896. Desde seu nascimento, a cidade se destacou no estado devido à sua privilegiada localização central e pela construção de importantes ferrovias que a perpassavam, como a Estrada de Ferro Sorocabana e a Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, se tornando o maior entroncamento ferroviário do estado de São Paulo na época.

Devido a estes fatores de localização e logística, com a necessidade de atender a demandas do fluxo de pessoas e serviços, Bauru passou a desenvolver importantes atividades do setor de comércio e serviços, em detrimento das atividades agropecuárias que não se desenvolveram fortemente, devido também à infertilidade do solo da região. “A complexificação das atividades no meio urbano proporciona a consequente polarização do município em relação aos municípios vizinhos, atraindo novos fluxos de mercadorias e pessoas para a região como um todo” (CONTEL, 2000 apud CAMARGO, 2005).

Dessa forma, a matriz econômica de Bauru é baseada no setor terciário, sendo responsável por 69,05% da participação dos serviços no total do valor adicionado do estado, no ano de 2010 (SEADE, 2013). Destaca-se também a presença de diversas instituições de ensino superior, públicas e privadas.

Segundo dados do SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados) em 2013 Bauru possuía cerca de 350.392 habitantes, com uma densidade demográfica de 524, 79 habitantes por Km<sup>2</sup>, índice bastante alto comparado ao valor médio estadual de 170,43, porém dentro do padrão encontrado em cidades médias do país. Possui também um grau de urbanização relativamente alto (98,05%), comparado com a média estadual de 95,88%, demonstrando a alta concentração da população no perímetro urbano, o que contribui para aumento das problemáticas ambientais urbanas.

Ainda sobre a população da cidade, dados do Censo promovido pelo IBGE (2010) mostram enorme desigualdade social presente no município, com mais de 68% da população vivendo com até 2 salários mínimos e pouco mais de 7% vivendo com mais de 5 salários mínimos (Figura 20).

**Figura 20 - Distribuição de renda no município de Bauru no ano de 2010**

<b>Domicílios particulares permanentes, por classes de rendimento nominal mensal domiciliar per capita – Bauru – IBGE – Censo 2010</b>		
<b>Classes de rendimento nominal mensal domiciliar per capita</b>	<b>Variável</b>	
	<b>Domicílios particulares permanentes (Unidades)</b>	<b>Domicílios particulares permanentes (Percentual)</b>
Total	109.875	100,00
Até ¼ de salário mínimo	2.352	2,14
Mais de ¼ a ½ salário mínimo	10.592	9,64
Mais de ½ a 1 salário mínimo	27.562	25,08
Mais de 1 a 2 salários mínimos	34.286	31,20
Mais de 2 a 3 salários mínimos	13.338	12,14
Mais de 3 a 5 salários mínimos	10.247	9,33
Mais de 5 salários mínimos	8.588	7,82
Sem rendimento	2.840	2,58

Fonte: Plano Municipal de Educação (2012)<sup>5</sup>

Estes dados demonstram que grande parte da população encontra-se susceptível a problemas relacionados a fragilidades alimentares, falta de acesso a serviços, saúde, educação e de habitação e ocupação urbana. A baixa renda da população reflete na ocupação desordenada da cidade, em áreas proibidas e de risco, sendo estas dinâmicas ainda mais potencializadas devido à histórica falta de planejamento e especulação imobiliária presentes no município.

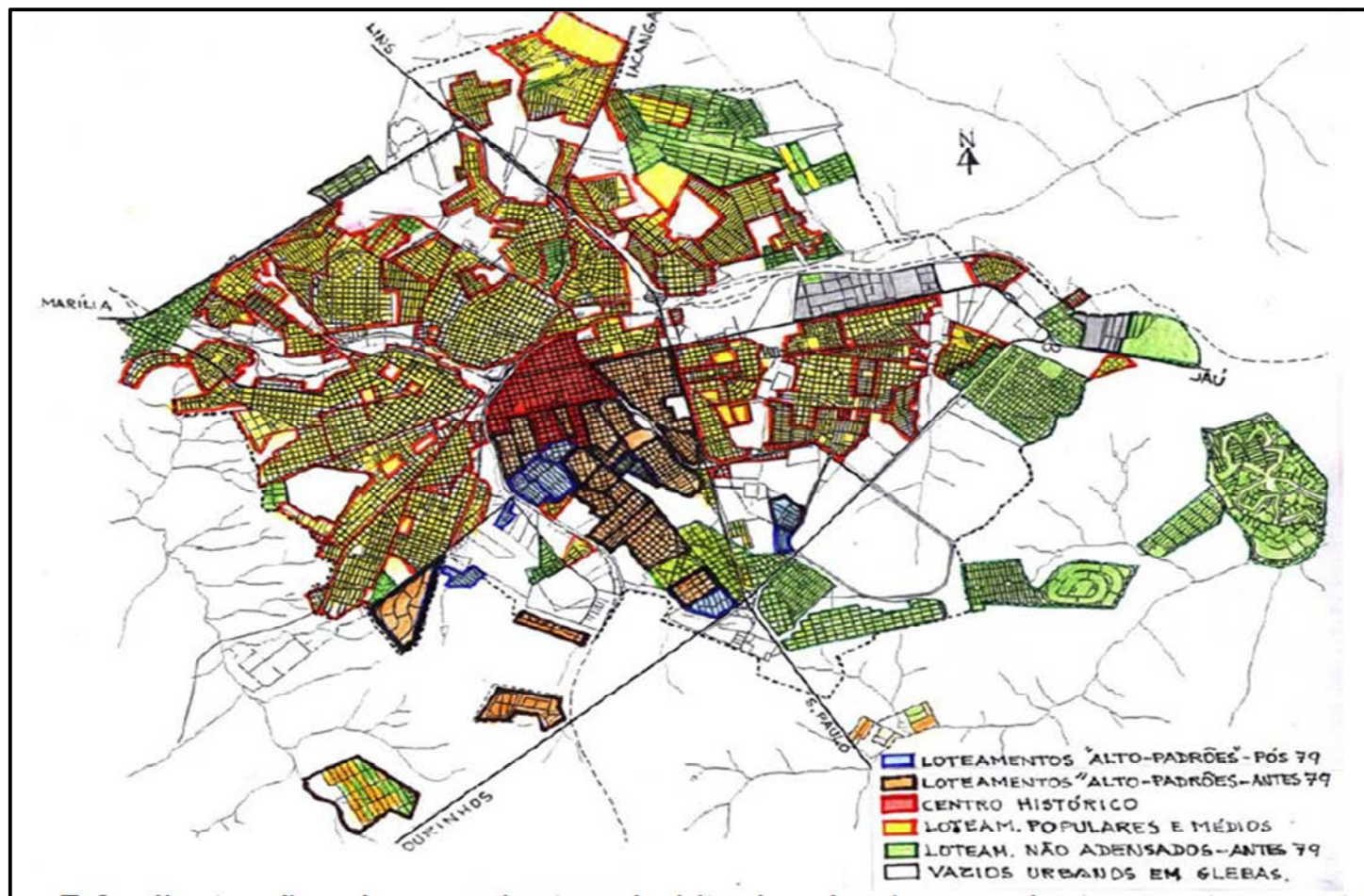
A expansão especulativa descontrolada do perímetro urbano favoreceu a formação de vazios urbanos e de voçorocas, em muito devido ao parcelamento desprovido das devidas preocupações ambientais e de infraestrutura. Parcelamento este, que encontra na conivência do poder público com os agentes imobiliários, o incentivo necessário à presença de agentes imobiliários no próprio quadro de funcionários componentes da Câmara Municipal e do poder executivo. Alguns políticos, prefeitos e vereadores foram os maiores promotores desses tipos de parcelamentos desqualificados

<sup>5</sup> Disponível em: <http://hotsite.bauru.sp.gov.br/pme/arquivos/arquivos/13.pdf>

que “dobravam morros e pulavam córregos”, sem a obrigatoriedade de ocupá-los(ALVES, 2001).

Dessa forma, a ocupação urbana da cidade de Bauru deu-se e ainda se dá de forma desordenada e segregada, com a maior parte de residências oriundas de conjuntos habitacionais populares construídos, algumas vezes, com pouca ou nenhuma infra-estrutura necessária e fora das normas e leis ambientais e de planejamento, e em contraponto, a instalação de residenciais de alto padrão. O processo de segregação espacial pode ser visto na Figura 21 a seguir:

Figura 21 - Tipos de habitações e localizações na cidade de Bauru/SP



Fonte: Alves (2001)

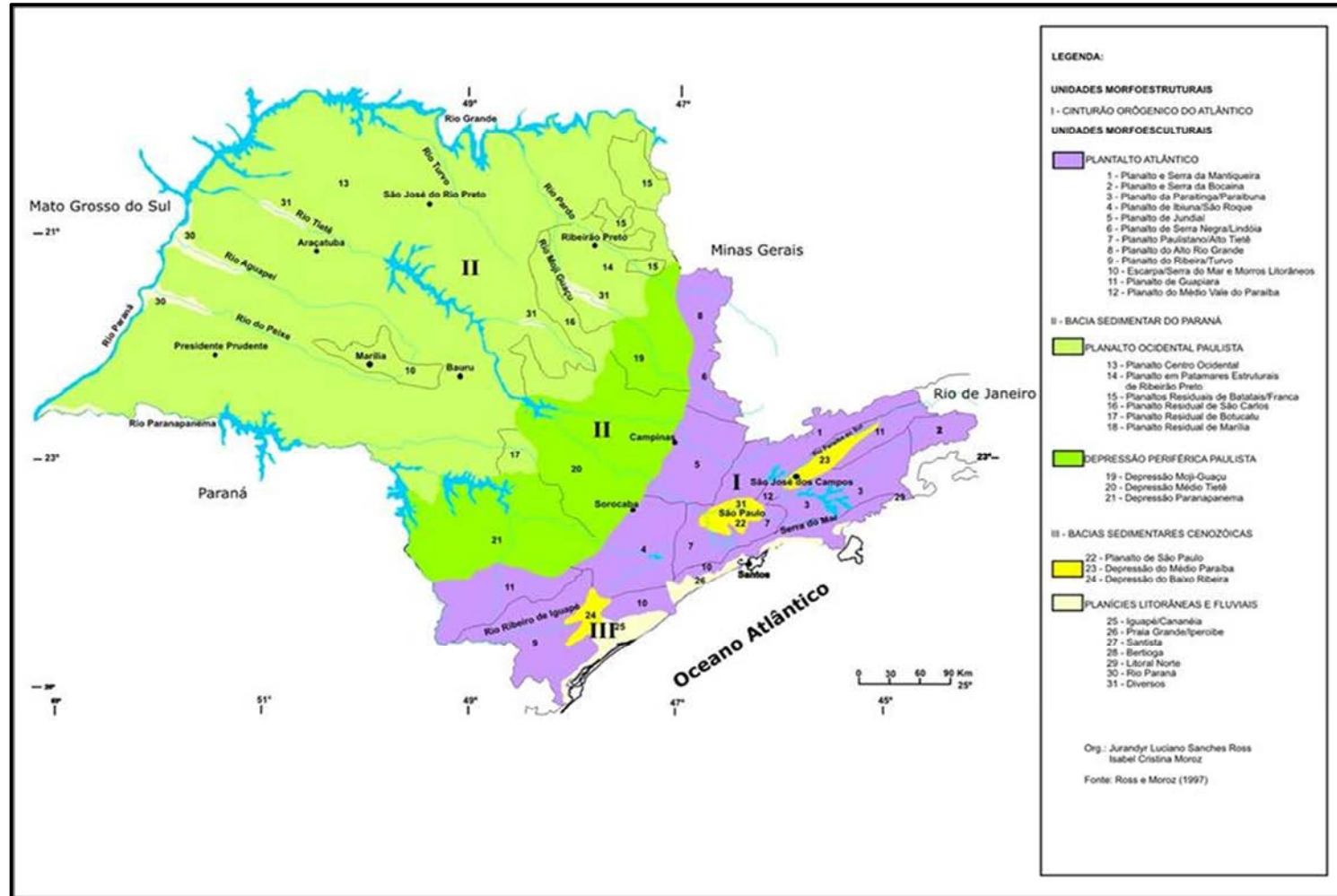


### **3.1.1.2 - Características Geológicas, Geomorfológicas e Pedológicas**

A cidade de Bauru está localizada sobre a Bacia Sedimentar do Paraná, no compartimento geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista e mais precisamente sobre formações geológicas do Grupo Bauru, de acordo com a Figura 22.

A Bacia sedimentar do Paraná abrange uma área de cerca de 1.600.000 Km<sup>2</sup>. representa uma complexa fossa tectônica de forma elipsoidal (...) e acha-se encravada no escudo pré-cambriano em Minas Gerais, Mato Grosso, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e no Uruguai, Paraguai e Argentina. Seu embasamento constitui-se principalmente de rochas cristalinas pré-cambrianas e subordinadamente por rochas copaleozóicas a fossilíferas. Esta enorme bacia rasa encontra-se preenchida por sedimentos na maior parte continentais e alguns marinhos, do Siluriano Superior, Devoniano Inferior, Carbonífero Superior, Permiano, Triássico, Jurássico e Cretáceo e ocorrem também lavas basálticas de idade mesozoica (...) (Ross & Moritz, 1997).

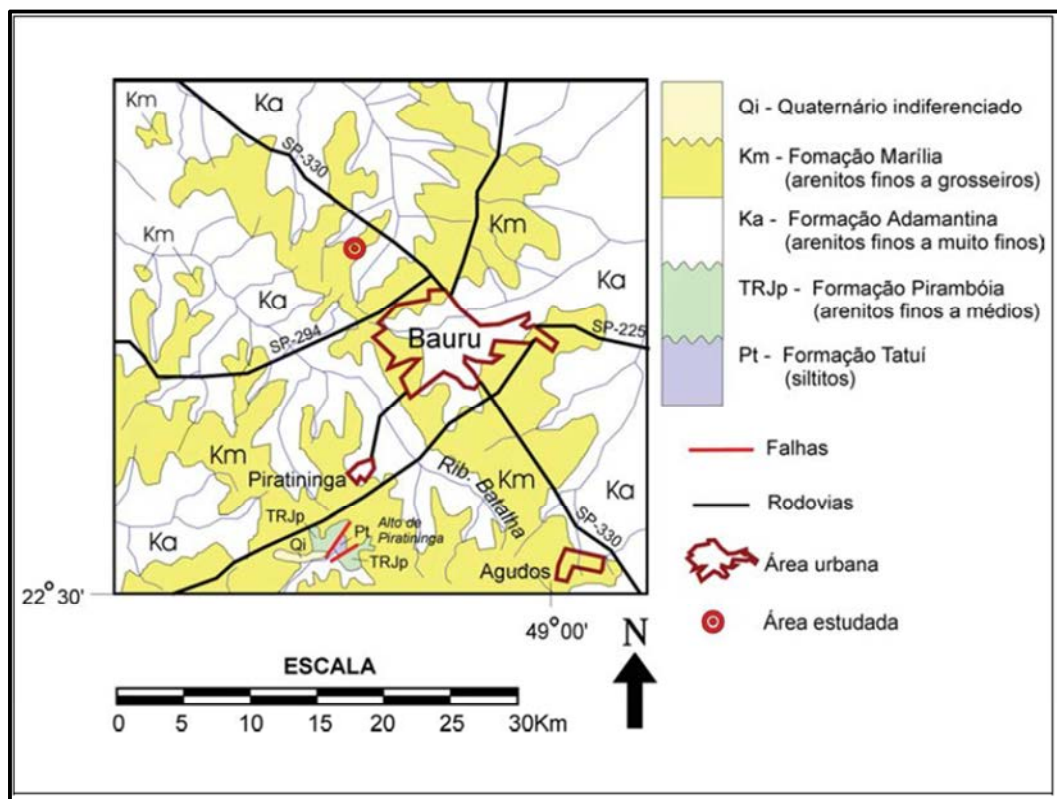
Figura 22 - Mapa de classificação Geomorfológica do Estado de São Paulo



Fonte: Ross e Moritz (1997)

De acordo com o IPT (1981), a subsidência dessa bacia, mesmo com caráter oscilatório, permitiu a acumulação de grande espessura de sedimentos, lavas basálticas e sills de diabásio, que juntamente com uma inclinação homoclinal das camadas paleozóicas e mesozóicas em direção ao interior da bacia, a oeste do Estado de São Paulo, permitiram a formação de um grande grupo geológico, o Grupo Bauru, recobrimdo as lavas basálticas do Planalto Ocidental. Dessa forma, o Grupo Bauru “é constituído por diversas formações predominantemente areníticas, em algumas regiões cimentadas por carbonato de cálcio” (IPT, 1981), sendo mais recorrentes no município de Bauru as rochas das formações Marília nos interflúvios e Adamantina nos vales e porções mais baixas do terreno (Figura 23).

**Figura 23 - Mapa geológico da Região de Bauru/SP**



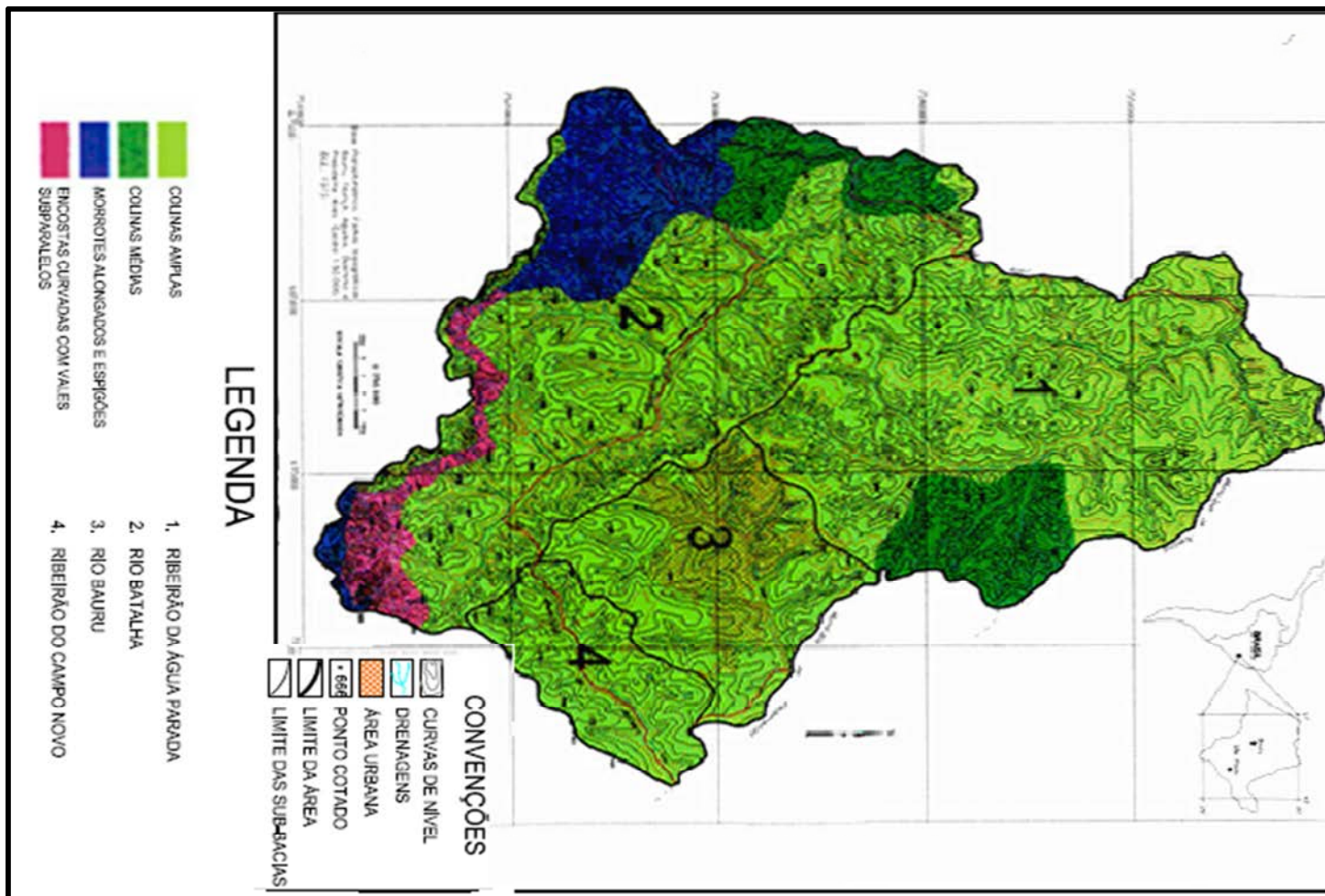
Fonte: Lago et al (2006)

Segundo IPT (1981), a Formação Adamantina (Grupo Bauru) ocorre por vasta extensão do oeste do estado de São Paulo, constituindo os terrenos da maior parte do Planalto Ocidental, só deixando de aparecer nas porções mais rebaixadas dos vales dos principais rios, onde já foi removida pela erosão.

A fisionomia de relevo presente na região de Bauru apresenta, segundo Ross (1997), entalhamento médio dos vales (inferior a 20 m), extensos interflúvios na ordem de 1.750 e

3.750 m e declividades médias das vertentes predominando valores entre 2 e 10%, sendo que esta unidade apresenta um nível de fragilidade potencial baixo, nos setores aplanados dos topos das colinas. Ainda, de acordo com Santos (2008), Bauru se apresenta um domínio de colinas amplas ocupando, generalizadamente, as porções mais elevadas do platô de Bauru e, parcialmente, porções rebaixadas de domínio da Bacia do rio Batalha. Constituindo relevos de transição junto às bordas do platô, nota-se a presença de relevos muito movimentados em forma de escarpas, morrotes alongados, morrotes isolados e colinas médias (Figura 24).

Figura 24 - Mapa Geomorfológico do município de Bauru/SP



Fonte: Ponçano (1981) apud Almeida Filho (2000)

“Entretanto face às características texturais dos solos, os setores de vertentes pouco mais inclinados são extremamente susceptíveis aos processos erosivos, principalmente quando se desenvolvem escoamentos concentrados”(SANTOS, 2008).

Os principais solos que constituem o município de Bauru são, de forma geral, muito bem desenvolvidos e com alteração dos minerais primários, características de solos de locais tropicais (com clima quente e úmido). De acordo com a classificação pedológica, os dois tipos mais ocorrentes são: Latossolos Vermelho Escuro de textura média e Podzólicos Vermelhos de textura arenosa média.

Os Latossolos Vermelho Escuro de textura média correspondem a solos minerais não hidromórficos profundos, com horizonte B latossólico de coloração vermelha (CAMARGO et al., 1987 apud ALMEIDA FILHO, 2000). A característica de textura média advém das rochas areníticas pertencentes à Formação Marília e Adamantina. Localizam-se em áreas de relevo constituídos por colinas amplas ou em topos aplainados de colinas médias.

Têm como principais características serem solos espessos, porosos e bem drenados e bastante homogêneos, facilitado à absorção e circulação das águas pluviais, porém friáveis quando secos.

Os solos Podzólicos Vermelho Amarelo de textura arenosa/média compreendem solos minerais não hidromórficos com horizontes B textural (CAMARGO et al., 1987). São profundos, com a presença de contrastes texturais importantes entre os horizontes A e B, com limites e transições abruptas, sempre associados a relevos de colinas médias e morrotes. Com essas características, tornam-se altamente susceptíveis a erosão laminar e linear. “A estrutura dos solos Podzólicos, em que o horizonte A mais arenoso se sobrepõe a um B argiloso, cria condições de contraste de permeabilidade, de modo que as águas da chuva concentram-se no horizonte superior, criando condições favoráveis de erosão” (ALMEIDA FILHO, 2000).

Também ocorrem em Bauru, porém em escala muito menor, Latossolos Vermelho Escuro de textura argilosa, diretamente associados à presença de rochas da Formação Serra Geral.

Salomão (1994) destacou que os Latossolos Vermelho Escuro textura média, correspondem a aproximadamente 50% da área total do Grupo Bauru no Estado de São Paulo, enquanto os argissolos equivalem a aproximadamente 40%, sendo que os demais se destacam por areias quartzosas, solos rasos do tipo Litólico, Cambissolo e Brunizem e solos genericamente enquadrados entre os hidromórficos, que ocupam somente 10% da área.

### 3.1.1.3 - Susceptibilidade à Erosão

Os Latossolos Vermelho Escuro de textura média podem ser considerados solos mais estáveis:

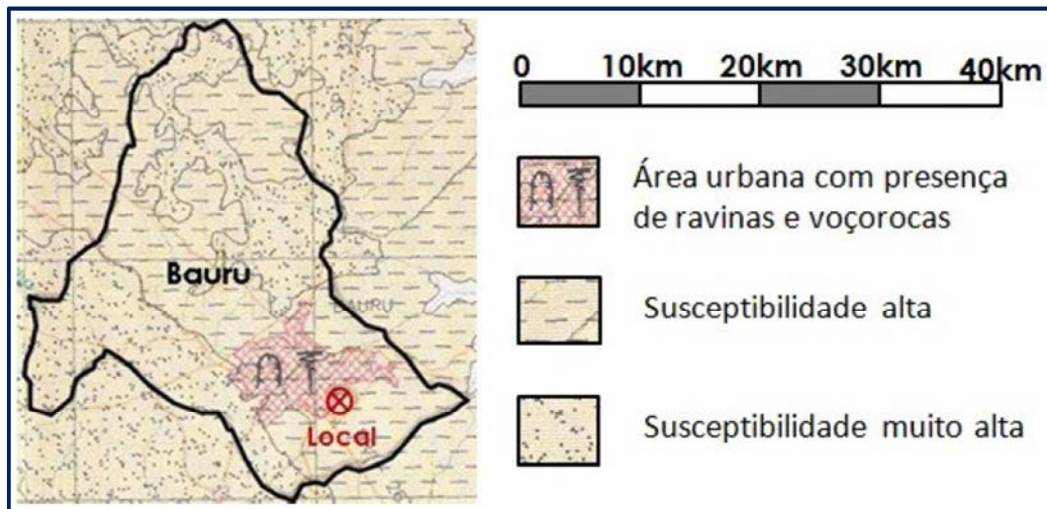
Este tipo de solo caracteriza-se pela estabilidade natural e baixa tendência a problemas geotécnicos, porém desde que não expostos a intensas condições de uso, quando podem desenvolver graves processos de degradação. Os principais problemas advêm do uso inadequado provocado pela concentração de água em grandes volumes, gerando sulcos na superfície do solo, que rapidamente podem evoluir para ravinas, atingir o lençol freático e se tornarem voçorocas de grande porte e de difícil controle. A saturação quando atingida em sua totalidade desestrutura o solo, provocando colapso e abatimento no terreno (QUEIROZ, 1986 apud IDE, 2009).

Por comumente se localizarem em topo plano, a infiltração é mais rápida e as condições são de estabilidade, por isso a média e a alta vertente apresentam-se mais favoráveis a ocupação, o que se confirma pela carta geotécnica fornecida pelo IPT (1991). Este tipo de solo também possui tendência a lixiviação em clima tropical como o de Bauru.

Já os solos podzólicos de textura arenosa/média que, na cidade, localizam-se na baixa e média vertente apresentam maior ocorrência de processos erosivos. Isso ocorre (mesmo que se localizam em locais de topografia menos movimentada, em contraponto com os latossolos) devido ao fato de apresentarem uma camada de maior concentração de argila logo após o horizonte superficial, o que forma uma barreira que impede a infiltração da água, facilitando a formação de um fluxo de água quando há precipitação, e conseqüentemente, carreamento das partículas de solo.

A Carta Geotécnica elaborada pelo IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica) no ano de 1994 foi resultado de estudos geotécnicos que serviram de subsídio para elaboração de classes de susceptibilidade à erosão (Figura 25).

Figura 25 - Zonas de susceptibilidade à erosão no município de Bauru/SP



Fonte: IPT (1994)

De acordo com esta carta, a cidade possui quase toda sua extensão de áreas com alta susceptibilidade a erosão (incluindo todo seu perímetro urbano), e o restante com muito alta susceptibilidade. Isso ocorre principalmente devido a concentração muito alta de fluxo de escoamento superficial.

Áreas com alta susceptibilidade à erosão, segundo o IPT (1994) apud IDE (2009), ocorrem em áreas com remanescentes dos arenitos das formações Marília, Adamantina, Botucatu, Pirambóia, Itararé e das formações Cenozóicas, com relevo predominante de colinas amplas com declividade entre 0% e 10% e predominância de latossolos vermelho amarelados com texturas média e arenosa. Tais definições justificam os aspectos físicos da cidade e suas relações com processos erosivos.

Ainda de acordo com o IPT (1994), nesta classe de susceptibilidade desenvolvem-se sulcos e ravinas **somente a partir do escoamento concentrado das águas pluviais associado ao uso do solo (urbano, viário, etc.)** (grifo nosso). Voçorocas de grande porte formam-se pelo aprofundamento de ravinas e interceptação do nível d'água, alargando-se e ramificando-se através de *piping* e descalçamento dos taludes. Apesar de serem menos frequentes que na classe de muito alta susceptibilidade, atingem dimensões muito maiores, principalmente em profundidade, consequência da espessura dos solos e da localização profunda do nível d'água. Verifica-se também o assoreamento intenso dos cursos e corpos d'água, principalmente os de menor porte.

Devido a estas problemáticas, são indicadas recomendações para uso do solo na classe de alta susceptibilidade, que se não forem adotadas, resultarão em graves processos erosivos:



Adotar desenhos de parcelamento que evitem a concentração demasiada do escoamento superficial em ruas no sentido da pendente da encosta. Instalar sistemas adequados de drenagem das águas superficiais, concomitantemente à abertura das vias ou outras obras que impliquem concentração do escoamento. Além de cuidados especiais relativos à dissipação de energia em todos e qualquer ponto de lançamento das águas superficiais. Recuperar as voçorocas que coloquem em risco moradias e obras de infra-estrutura, aliadas a estudos geológicos-geotécnicos de detalhe nos projetos de recuperação. Coibir o lançamento de lixo nas voçorocas (IPT, 1994 apud IDE, 2009).

### 3.1.1.5 - Clima e Pluviometria

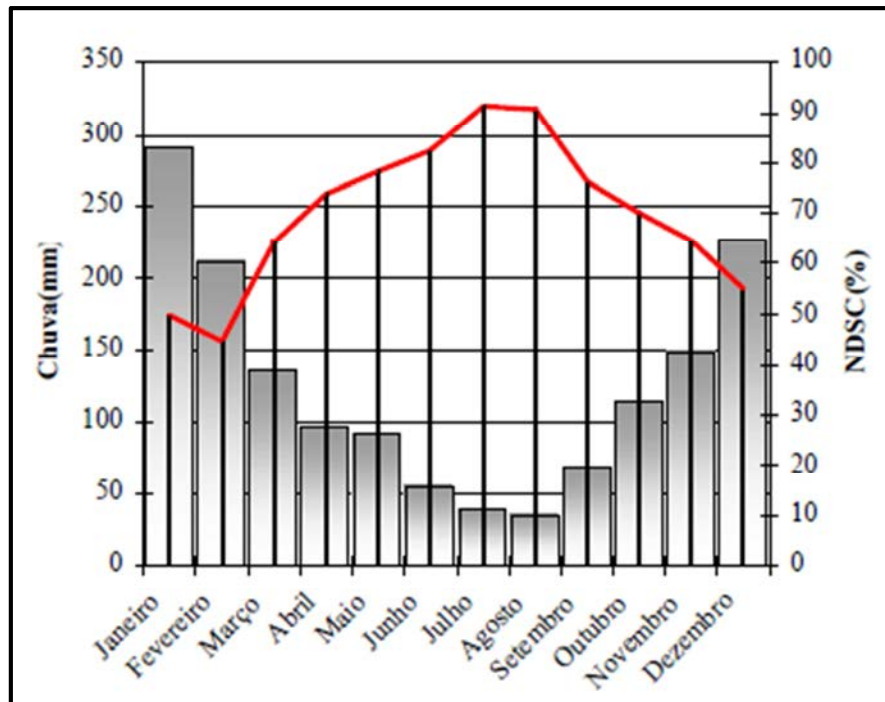
O clima de Bauru, segundo a classificação de Koeppen<sup>6</sup>, é tropical de altitude ou subtropical de inverno seco (Cwa). Este tipo de clima tem como características inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C) (CEPAGRI, 2010). Segundo Almeida Filho (2000) a cidade de Bauru recebe chuvas tipicamente tropicais e convectivas, caracterizadas por temporais violentos, pancadas intensas e de curta duração, características das chuvas que podem deflagrar processos erosivos.

Figueiredo e Paz (2010) demonstram que a estação chuvosa de Bauru está concentrada no período de outubro a março, sendo que o mês mais chuvoso do ano é o de janeiro, e o mais seco o de julho, de acordo com a Figura 26.

---

<sup>6</sup> Classificação climática de Köppen-Geiger trata-se do sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia. É baseada no pressuposto, com origem na fitossociologia e na ecologia, de que a vegetação natural de cada grande região da Terra é essencialmente uma expressão do clima nela prevalecente. Assim, as fronteiras entre regiões climáticas foram seleccionadas para corresponder, tanto quanto possível, às áreas de predominância de cada tipo de vegetação, razão pela qual a distribuição global dos tipos climáticos e a distribuição dos biomas apresenta elevada correlação. Na determinação dos tipos climáticos de Köppen-Geiger são considerados a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação.

**Figura 26 - Média de chuva (barras) acumulada (mm) e Número de Dias Sem Chuva (NDSC) em porcentagem (linha), para a cidade de Bauru de 1981-2009**



Fonte: Figueiredo e Paz (2010)

Ainda de acordo com estes autores, a temperatura média anual de Bauru é de 22,7 ° C e a amplitude térmica de 11,5 ° C.

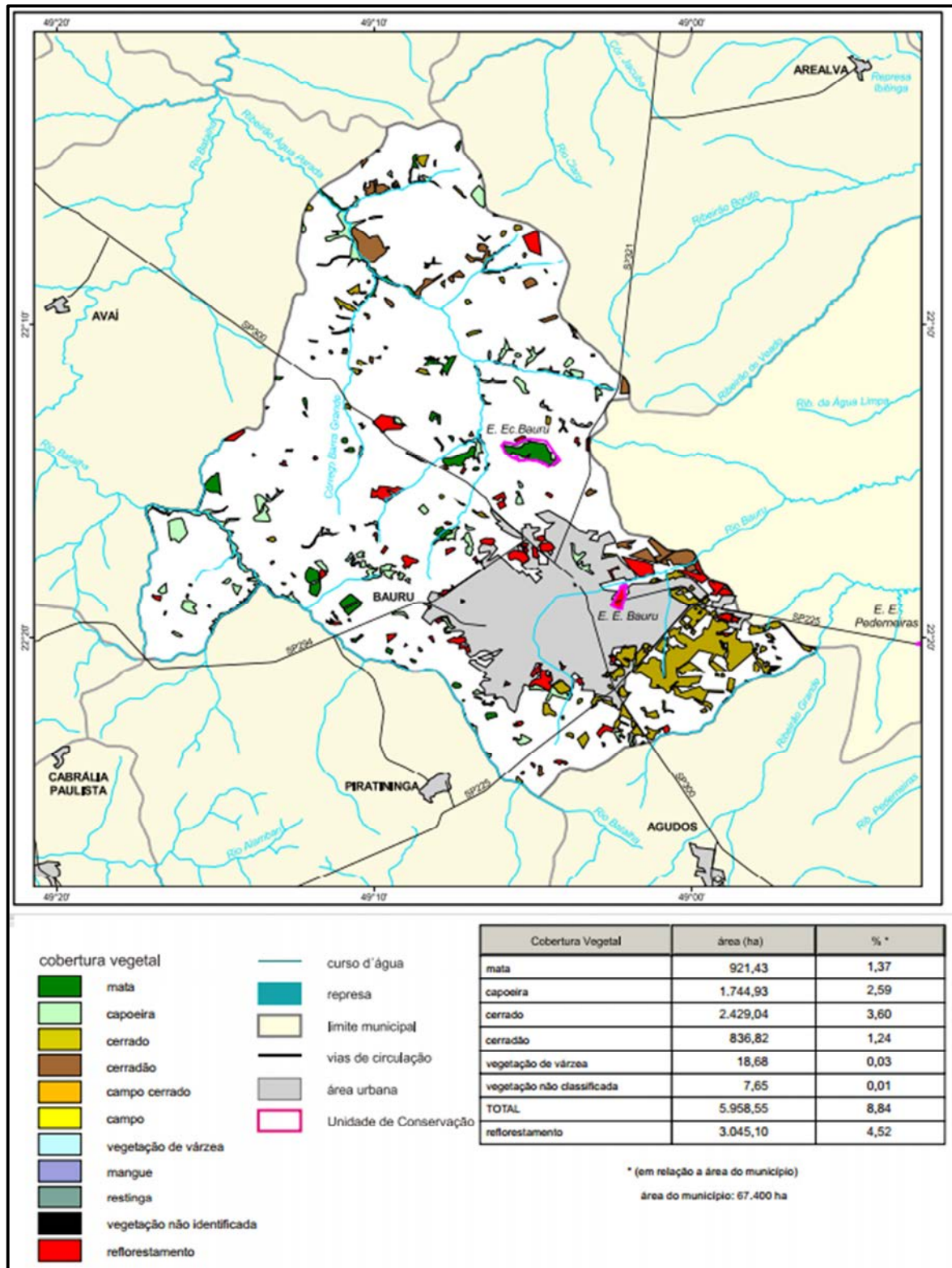
### 3.1.1.6 – Vegetação

Não existem muitas informações acerca da cobertura vegetal original da cidade de Bauru. Porém existem alguns dados acerca da devastação da mesma:

A região administrativa de Bauru foi uma das mais desmatadas do estado de São Paulo entre o início dos anos 70 e o início dos anos 90, reduzindo sua cobertura vegetal em cerca de 51% no período. Dentro dos limites do município, a vegetação de cerrado predomina em extensão, concentrada a leste e sudeste. Florestas semidecíduas, capoeiras, capoeirões e vegetação ripária nas proximidades do Rio Batalha e seus afluentes também ocorrem na área do município (Cavassa e Martins, 1989 apud Zugliani, 2001).

O SIFESP (Sistema de Informações florestais do Estado de São Paulo) no ano de 2001 estudou os diversos municípios do estado, e chegou a um produto com diversos mapas da vegetação remanescente por município. A seguir o mapa de Bauru, com as categorias e quantidades de vegetação remanescente (Figura 27):

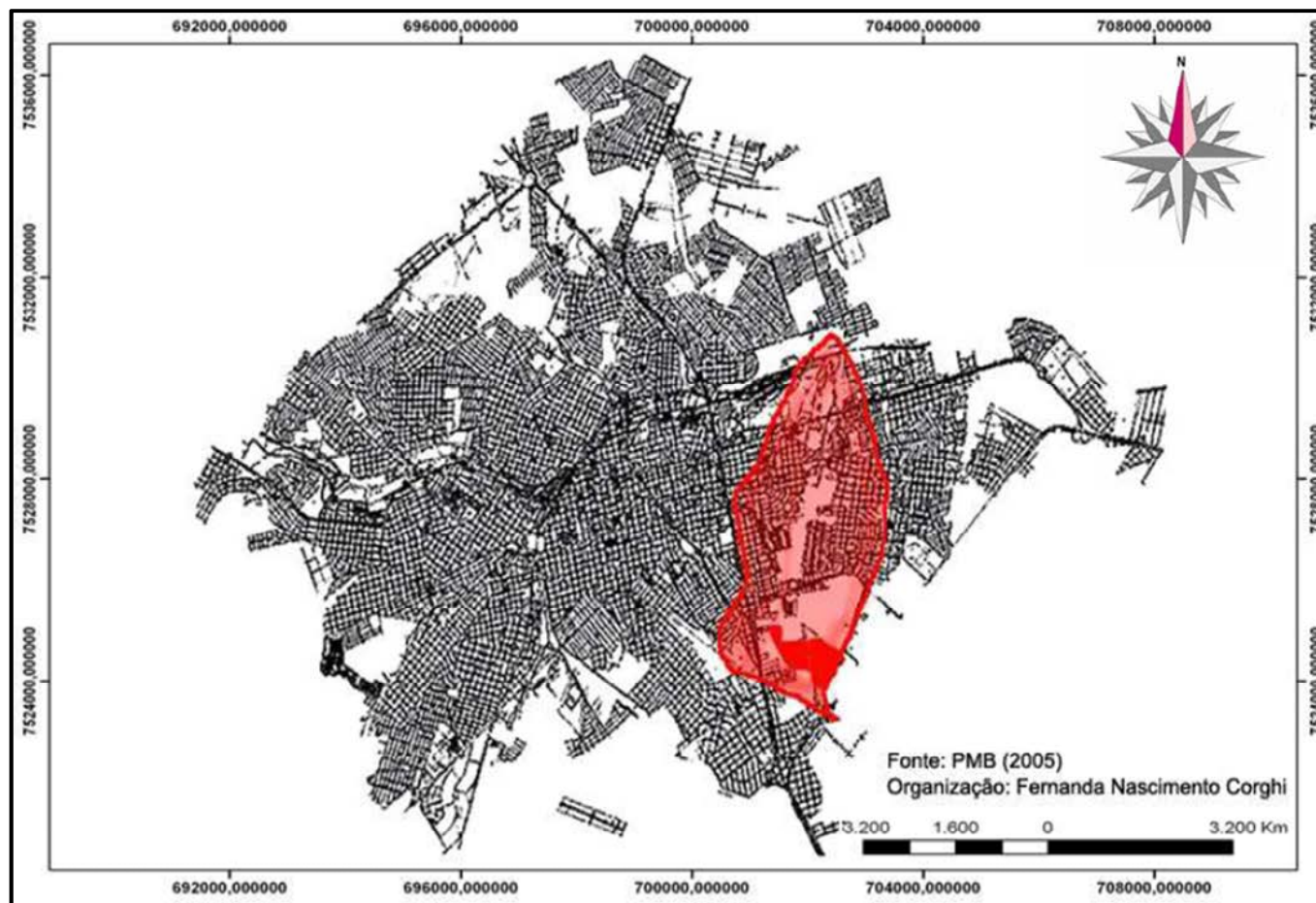
Figura 27 - Mapa florestal de Bauru/SP

Fonte: SIFESP<sup>7</sup><sup>7</sup> Disponível em: <http://www.iflorestal.sp.gov.br/sifesp/estadosaopaulo/bauru.pdf?opcoes=estadosaopaulo%2Fbauru.pdf>

### **3.1.2 - Local do Processo Erosivo**

A área de estudo deste trabalho localiza-se na microbacia hidrográfica do córrego Água Comprida, que por sua vez encontra-se na sub-bacia do rio Bauru (Figura 28). Trata-se de uma microbacia de caráter essencialmente urbano, o que confere susceptibilidade a erosões. Localiza-se, mais especificamente à margem do córrego Água Comprida, e ao meio dos residenciais de alto padrão Tavano, Chácara Odete e Sauípe e da Avenida Antenor de Almeida (Figura 29).

Figura 28 - Mapa de localização da Microbacia Hidrográfica do Córrego Água Comprida no município de Bauru/SP (Sistema UTM)



Fonte: Corghi (200)

Figura 29 - Localização do processo erosivo



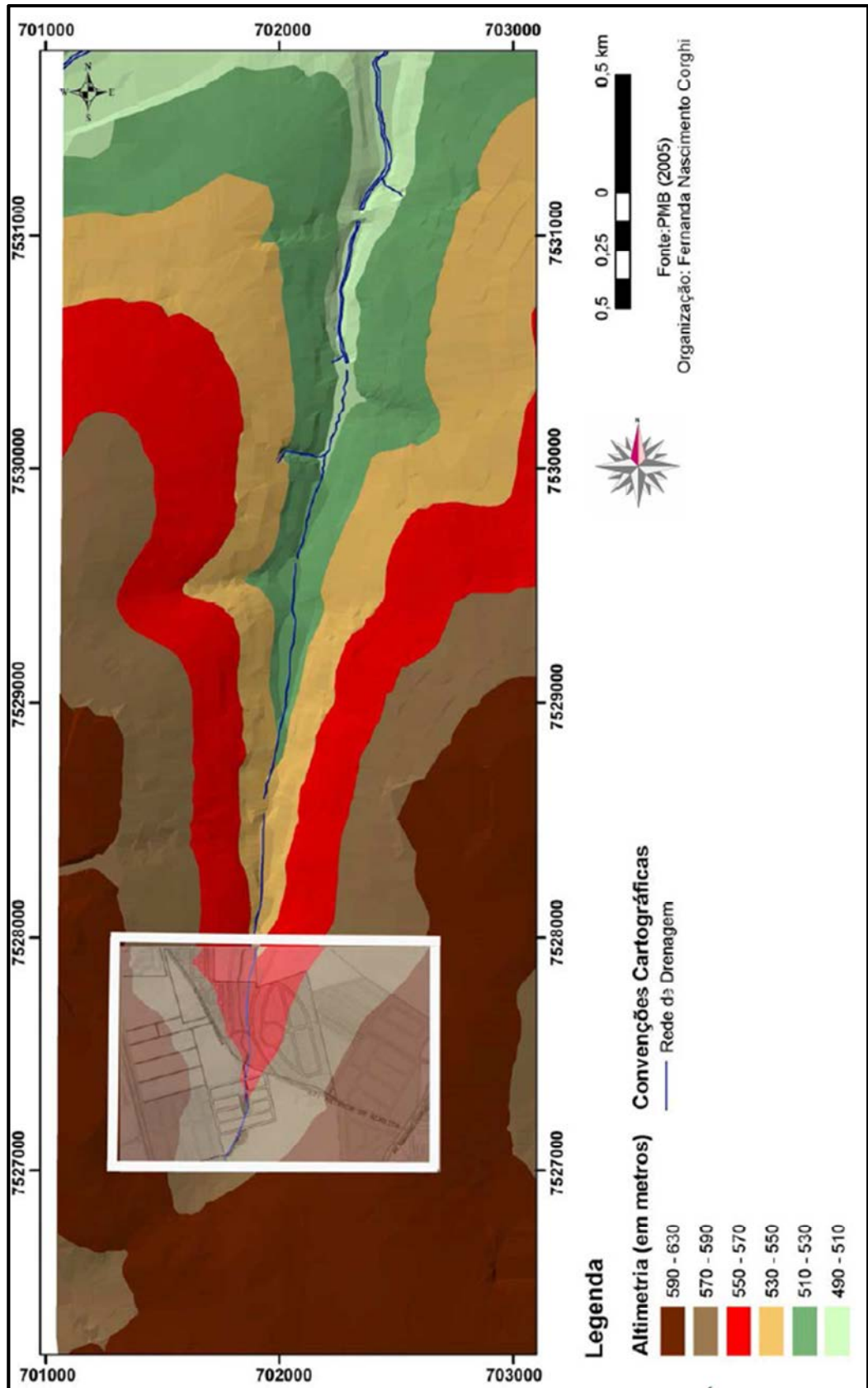
Fonte: Google Earth (2014). (modificado pelo autor)

Para um melhor entendimento do desenvolvimento de processos erosivos no local, além da constatação de susceptibilidade à erosão como característica dos solos bauruenses, devem-se levar em conta dois fatores importantíssimos: as características geomorfológicas da bacia e o processo de ocupação do local.

### **3.1.2.1 - Características Geomorfológicas da Microbacia do Córrego Água Comprida**

Segundo estudos de Kertzman; Diniz (1995) e Salomão (1994 b), as formas de relevo do local são consideradas potencializadoras de erosão, apesar de um baixo desnível altimétrico ao longo do córrego (cerca de 140 metros) (Figura 30). Neste trecho ocorrem rampas inclinadas com declives que favorecem a concentração de fluxo de água em linhas de drenagens preferenciais. Este fato associado aos substratos areníticos do solo e ao clima tropical, com alternância de períodos de chuva e seca, potencializa o surgimento de processos erosivos.

Figura 30 - Mapa de altimetria da bacia do córrego Água Comprida



Fonte: Corghi (2008)



Verifica-se que os processos erosivos são freqüentes no bairro, assim como em toda a jusante do alto curso, próxima aos residenciais, sobretudo causadas pela má dissipação da drenagem superficial. A forma do relevo da bacia hidrográfica do córrego da Água Comprida potencializa os processos erosivos locais, por ser formada por rampas longas e inclinadas. A associação dos substratos areníticos do solo, à reativação de linhas de drenagens naturais, acaba por resultar em sulcos e ravinas nas linhas preferenciais de concentração de água (CORGHI, 2008).

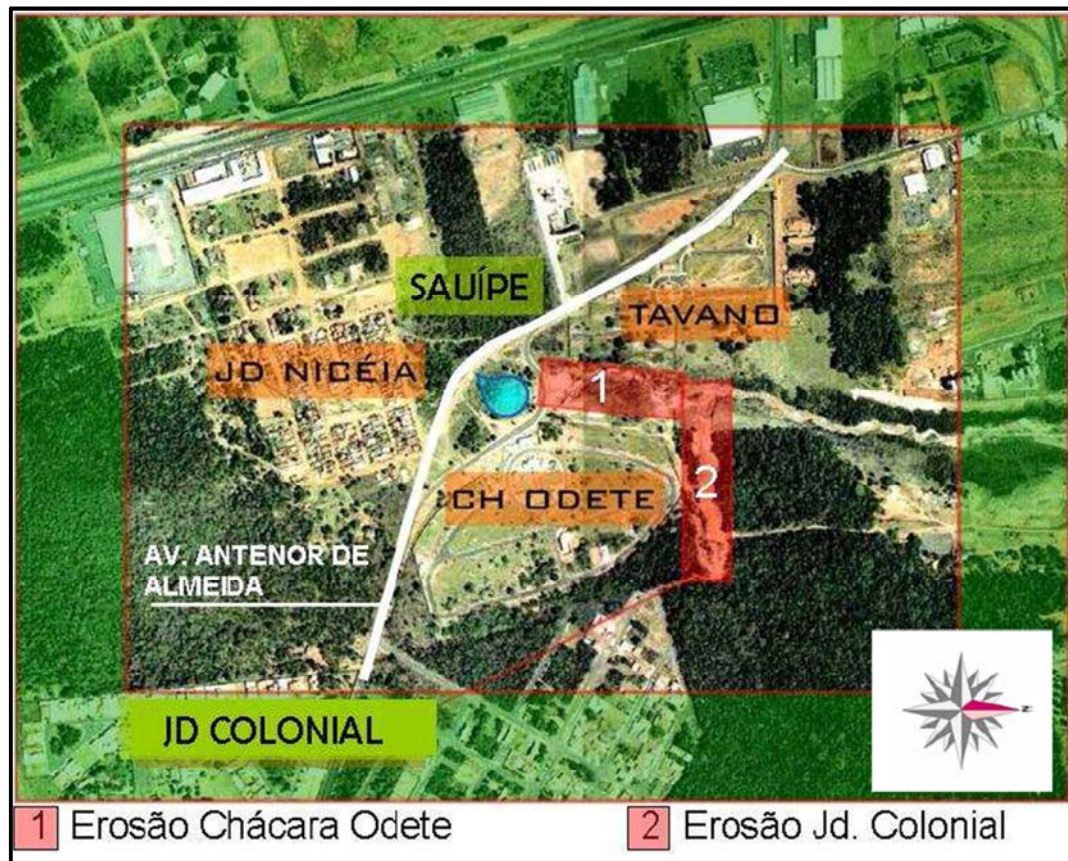
Além disso, de acordo com o índice de concentração de erosão de Almeida Filho (2000), a sub-bacia do Rio Bauru (onde se localiza a microbacia da Água Comprida) é a mais crítica da cidade, apesar da predominância das declividades suaves, pois estas apresentam a maior quantidade de processos erosivos na cidade. Estes que se desenvolvem devido a modificações causadas pela ocupação do solo como impermeabilização, implantação de vias e grande mobilização de serviços de terraplenagem.

### **3.1.2.2 - Gênese e Evolução do Processo Erosivo**

De acordo com Camargo (2005) e Losnak (2004) apud Corghi, (2009), a Bacia do córrego Água Comprida foi inicialmente ocupada na década de 1940 por loteamentos abertos (como o Jardim Cruzeiro do Sul e Jardim Carolina) voltados para a moradia de trabalhadores do Distrito Industrial (processo que perdurou até por volta da década de 60), seguido da construção de conjuntos habitacionais (como o Geisel e Jardim Redentor), visando à moradia dos trabalhadores advindos à cidade na fase de grande desenvolvimento urbano ocorrido no município devido ao incremento das atividades no setor terciário, de comunicação e do setor de transportes em meio à euforia desenvolvimentista canalizada pelas ações do Prefeito Nicolinha. Este processo perdurou até por volta da década de 80, onde houve uma estagnação dos loteamentos populares, com a presença de vazios urbanos como instrumentos de especulação imobiliária, que futuramente seriam vendidos por preços mais altos para a população de maior renda. É importante destacar que em meio a estes processos surgiram ocupações irregulares como o Jardim Nicéia (no ano de 1967), acomodando a parcela da população excluída das políticas de moradia nos âmbitos das esferas governamentais.

Dessa forma, nota-se que a ocupação desta bacia seguiu de jusante à montante, sendo que os vazios urbanos localizaram-se principalmente à montante do córrego até a metade da década de 90, onde se iniciou o processo de parcelamento do solo, com loteamentos voltados para residenciais de alto padrão. A aprovação para construção do Residencial “Chácaras Odete”, posteriormente separados e denominados Residenciais Odete e Tavano, se deu no ano de 2002, e do Residencial Sauipe no ano de 2004 (Figura 31).

Figura 31 - Localização dos Residenciais e Erosões na região estudada



Fonte: Corghi (2008)

Nota-se que estes residenciais localizam-se no fundo de vale do Córrego Água Comprida. Apesar de estarem localizados em uma região classificada como boa para ocupação urbana, de acordo com a Carta Geotécnica do IPT (1991), todas as tubulações e saídas de água destes residenciais localizam-se em áreas com muita restrição para ocupação (Figura 32).

**Figura 32 - – Ilustração da Carta Geotécnica com destaque para as regiões estudadas**



Fonte: Corghi (2008)

De acordo com Corghi (2008), devido ao processo de aceleração da urbanização na cabeceira do córrego Água Comprida, houve um grande aumento de carreamento e deposição de sedimentos em sua nascente, o que acarretou em sua migração.

Somado às características erosivas do solo de Bauru, os processos de ocupação da cabeceira do córrego com a implantação de residenciais de alto padrão sem prévias implantações de infra-estruturas e medidas de controle de erosão, a área foi rapidamente degradada e erodida. No ano de 2002 já havia o início de um pequeno processo erosivo no local:

Os laudos técnicos já registravam a presença de um pequeno processo erosivo no local e as discussões no CONDEMA – órgão ambiental ligado à aprovação dos empreendimentos - foram intensas para determinar uma ocupação com moderação e prazos rigorosos quanto ao reflorestamento e cumprimento da construção de galerias de água pluvial e dissipadores de energia (SÃO PAULO, 2002).

Porém, devido às chuvas ocorridas nos anos de 2003 e 2004, foram carreadas grandes quantidades de solo devido à falta de dissipadores de energia hidráulica nas saídas das galerias,

o que desencadeou em uma voçoroca de enorme dimensão, localizada ao longo do córrego, paralela aos residenciais Odete e Tavano (identificada pelo número 1 na Figura 31).

Como tentativa de contenção dos processos erosivos, foram realizadas algumas medidas paliativas, como um colchão de pedras, porém a força das águas advindas da Avenida Antenor de Almeida provocou queda dos taludes e alteração do leito do córrego (CORGHI, 2008).

De acordo com Corghi (2008), em julho de 2004 foram iniciadas obras de contenção da erosão mais consistentes, como instalação de dissipadores de energia, retificação do leito do córrego, canalização do esgoto e instalação de cachimbos (Figuras 33 e 34).

**Figura 33 - Obras de contenção da erosão – Instalação de dissipadores de energia**



Fonte: Corghi (2008)

**Figura 34 - Obras de contenção da erosão – Retificação do leito do córrego e canalização do esgoto**



Fonte: Corghi (2008)

Além do problema da erosão principal, uma mina de água que emergiu ao lado da erosão também foi drenada e aterrada, para ser posteriormente aterrada junto à voçoroca (Figuras 35 e 36).

Com a erosão ao longo do córrego, ocorreu um afloramento de água lateralmente e nele verificou-se uma erosão linear avançada (...). Como o seu avanço colocava em risco o limite do Residencial Tavano, o local foi aterrado com solo de outras localidades seguindo o nível do terreno imposto pelas construções locais (IDE, 2011).

**Figura 35 - Afloramento de água ao lado da erosão**



Fonte: Ide (2011)

**Figura 36 - Aterramento do afloramento de água**



Fonte: Ide (2011)

Não bastassem as problemáticas já ocorridas, devido à queda de uma tubulação de drenagem, no ano de 2003 surgiu uma ramificação da erosão principal, situada

perpendicularmente à mesma, que posteriormente foi licenciada para a função de bolsão de entulho, visando estabilizar seu crescimento (identificada como número 2 na Figura 31), Porém, a indicação era de que esta servisse prioritariamente para o depósito de resíduos da construção civil, e que estes fossem depositados e compactados no fundo, o que não ocorreu devido à falta de controle e fiscalização, com a deposição de material orgânico sem controle de quantidade e localização pelo tempo de três anos (Figura 37).

**Figura 37 - Ramificação da erosão principal coberta com entulho e material orgânico**



Fonte: Ide (2011)

De acordo com Cavaguti e Hamada (2007), a disposição destes tipos de resíduos em áreas de voçorocas podem causar diversos danos (mais de dez tipos de problemas), sendo que entre estes: “Retomada do processo erosivo em maior intensidade, pois o lixo é de alta permeabilidade e de menor resistência à erosão, boçorocas com lixo têm sido reabertas, ocorrendo a formação de novas boçorocas de dimensões maiores que as originais, com espalhamento do lixo à jusante”.

Esta área, após a cobertura com lixo e resíduos da construção civil foi coberta com solo e atualmente encontra-se sem nenhuma ocupação.

Na erosão principal (identificada como número 1 na Figura 31), após a finalização das obras, no ano de 2008, já se notava o início de pequenas incisões ao redor do local, como visto na Figura 38:

**Figura 38 - Incisões no terreno ao lado das obras de contenção da erosão**



Fonte: Corghi (2008)

Devido à falta de manutenção do local, e pela topografia inclinada do terreno, que favorece a formação de canais de fluxo de escoamento da água da chuva, a área onde ocorreu a principal erosão, encontra-se altamente susceptível à erosão, com a presença de quedas de talude na margem do córrego (Figura 39) e sulcos (Figura 40) que denunciam o reaparecimento de processos erosivos.

**Figura 39 - Queda de talude à margem do córrego Água Comprida**





**Figura 40 - Presença de sulcos à margem do córrego Água Comprida**



A área que compreende o afloramento de água aterrado encontra-se com insurgências de água e conseqüente retomada de processos erosivos à margem desta área, onde o terreno é inclinado e a vegetação varia de escassa a nula. Há presença de desenvolvimento de sulcos nestes taludes remanescentes (à área de aterramento) (Figuras 41 e 42) devido aos canais de dissipação de águas que não foram totalmente corrigidos (principalmente a dissipação das águas dos condomínios ao redor).

**Figura 41 - Solo parcialmente desnudo e presença de sulcos**



**Figura 42 - Presença de sulcos**



Toda a região erodida próxima aos residenciais e ao longo do córrego sofreu intervenções para contenção dos processos erosivos, sendo a principal medida a canalização e retificação do canal principal.

Porém a falta de conhecimento suficiente do local pelos realizadores de obras escolhidos pelo poder público, a falta de planejamento adequado das obras e manutenção das mesmas, faz com que os processos erosivos não cessem, corroborando na volta das grandes voçorocas do local, colocando em risco a vida de pessoas e aumentando a degradação do local. Além disso, o desenvolvimento dos processos erosivos desencadeia em grandes taxas de assoreamento nos leitos dos rios, além da possibilidade de ocorrer formação de bancos arenosos na foz das microbacias comprometendo a dinâmica fluvial do córrego em questão.

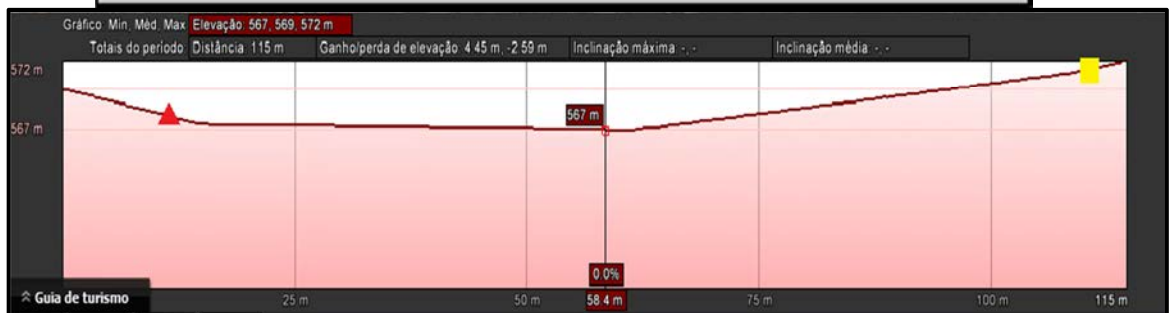
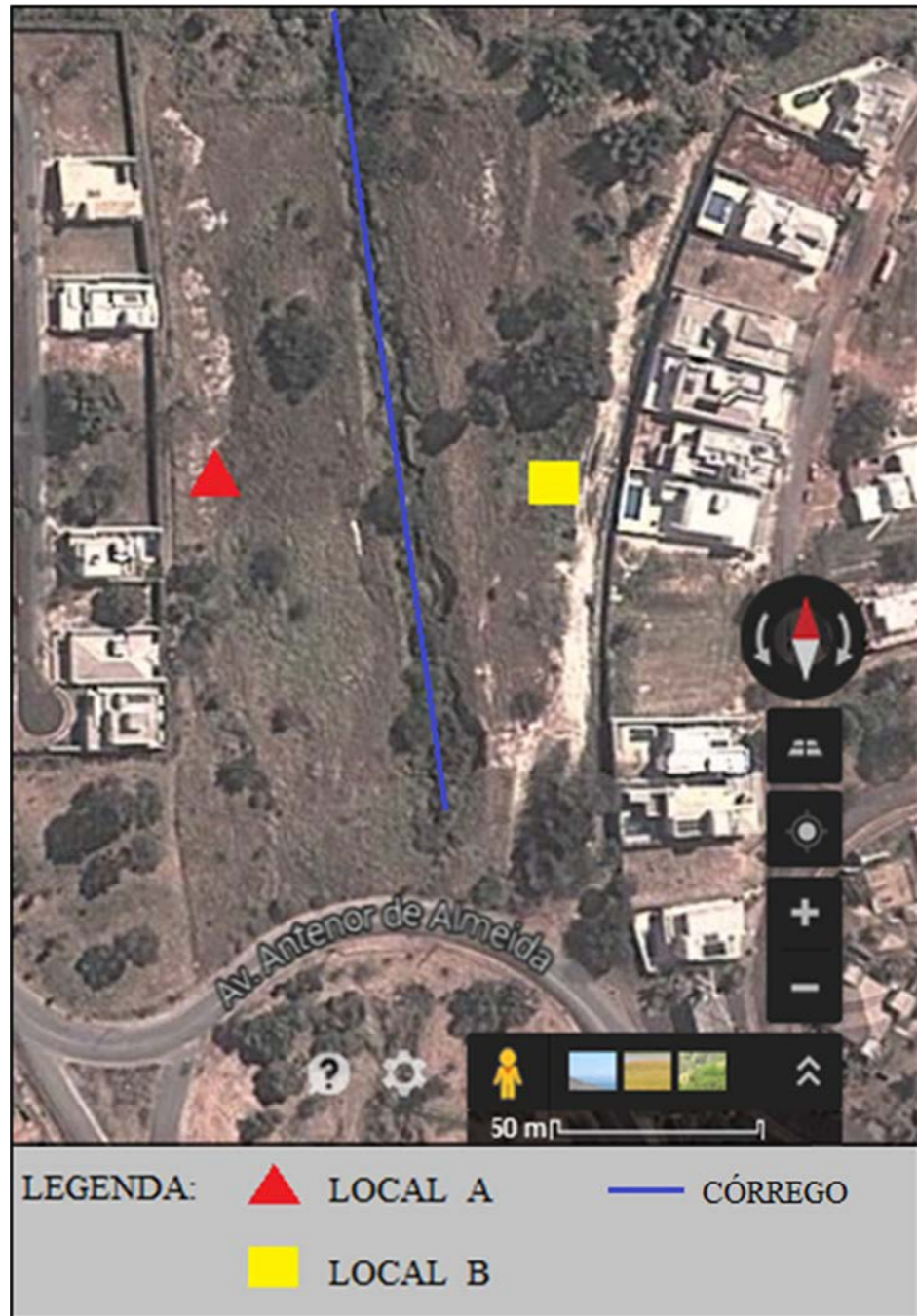
Dessa forma, a escolha dos pontos de coleta de solo para realização dos ensaios de erodibilidade se deu nas áreas com maior presença de indícios de retomada dos processos erosivos mais graves, como sulcos e ravinas, próximas ao remanescente das antigas erosões do local.

### **3.2 - Coleta de Amostras**

No primeiro momento foi realizado o reconhecimento da área, com a escolha dos pontos de coleta baseada em estudos anteriores sobre o processo erosivo em questão. Buscaram-se amostras representativas de locais em que já existissem parâmetros de análise de erodibilidade, e também que houvesse maior susceptibilidade de erosão, como surgimentos de pequenos sulcos ou ravinas devido a fluxos de escoamento superficial de água da chuva (Figura 44).

Foram escolhidos dois locais para retiradas de amostras, de acordo com variações da topografia local e localização na geometria dos taludes. O Local A foi escolhido sobre uma superfície mais inclinada, à margem esquerda do córrego, onde houve maior ocorrência de retomada dos processos, sendo este um local mais degradado e com maior susceptibilidade a ocorrência de erosões. O Local B foi escolhido à margem direita do córrego, sobre uma superfície plana, e sem ocorrência de processos erosivos. O perfil de elevação dos locais pode ser visto na Figura 43, a seguir.

Figura 43 - Pontos de coleta de solo



Fonte: Google Earth (2014) (modificado pelo autor)

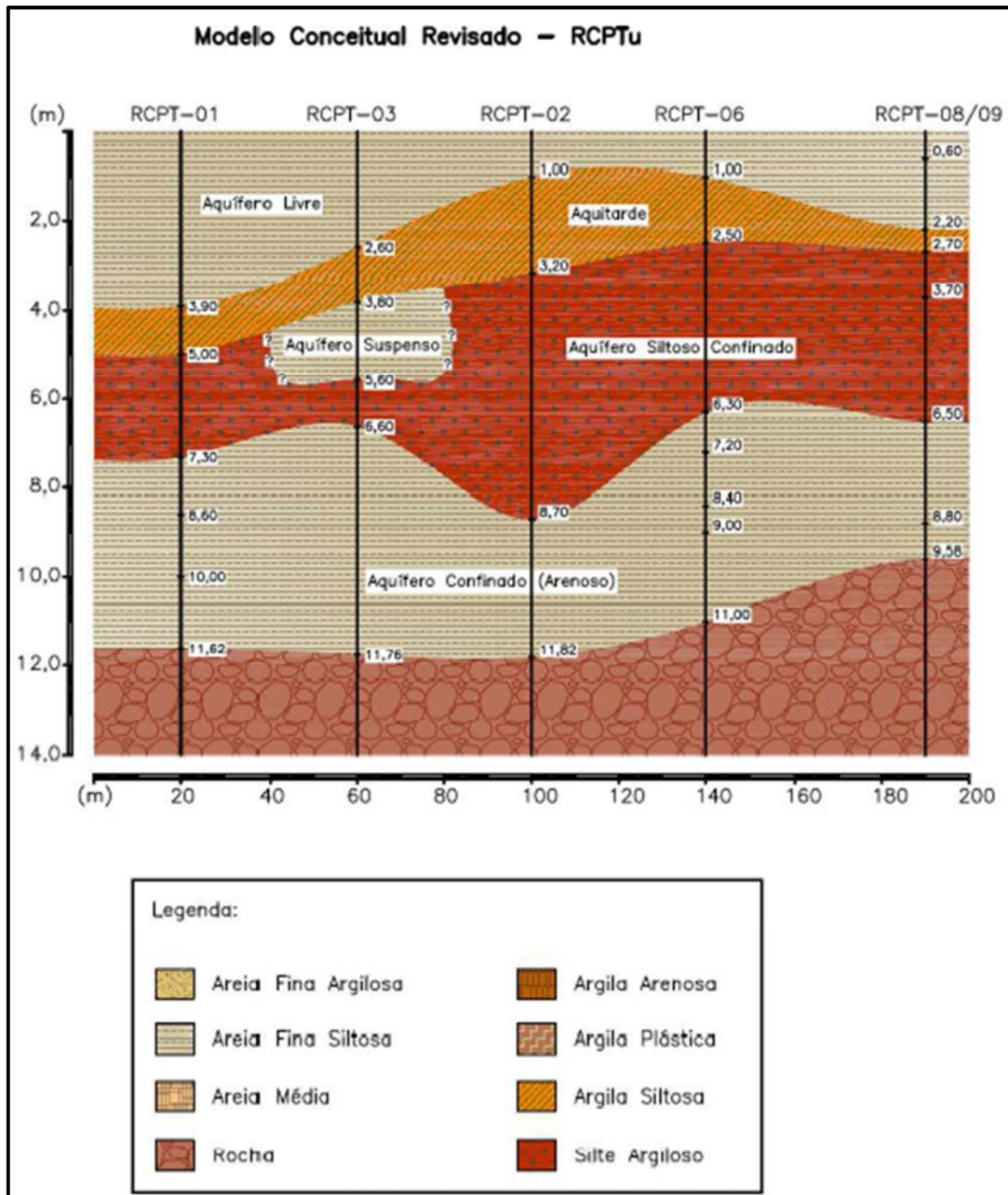
**Figura 44 - - Detalhe dos locais escolhidos para coleta (retomada de processos erosivos com surgimento de sulcos)**



As amostras foram retiradas superficialmente, a uma profundidade de 25 centímetros do topo, buscando-se analisar o comportamento da camada superior de solo frente às forças de escoamento, retirando-se apenas a uma pequena quantidade que incluiu a vegetação, para facilitar a coleta.

O perfil do subsolo da região (Figura 45) ilustra detalhadamente os tipos de solo encontrados na região, assim como a localização dos aquíferos. Como as amostras foram retiradas superficialmente, estas encontram-se na área que corresponde à classificação de Areia Fina Siltosa.

Figura 45 - Perfil do subsolo da região estudada, com pontos de coleta de dados ao longo do Córrego Água Comprida



Fonte: Riyis (2012)

### 3.2.1 - Amostras Deformadas

Foram retiradas amostras deformadas, para a realização de ensaios de caracterização geotécnica, de acordo com os procedimentos padronizados. As amostras foram retiradas e acomodadas de forma que mantivessem suas características de acordo com o local de origem, para não haver interferência nos resultados (Figura 46).

**Figura 46 - Retirada de amostras deformadas**



### **3.2.2 - Amostras Indeformadas Para Ensaio de Curva de Retenção, Cisalhamento Direto e Inderbitzen**

Foram retiradas amostras indeformadas em blocos indeformados (30 x 30 x 30 cm) para a realização dos ensaios para obtenção da curva de retenção e de cisalhamento direto. As amostras indeformadas são fundamentais para representação ideal do solo em campo no laboratório, mantendo-se fielmente as características do solo de: estrutura, textura, composição mineral e umidade.

O processo foi realizado com escavação manual em sub superfície, com retirada de uma fina camada de solo que incluiu a retirada de matéria orgânica, com uso de ferramentas apropriadas, como: enxada, pá, caixa metálica, pincéis, entre outros (Figura 47).

**Figura 47 - Coleta de amostra indeformada**

Para os ensaios de Inderbitzen, foram coletadas amostras dos dois locais escolhidos (Local A e Local B), sendo que estas foram recolhidas superficialmente da primeira camada de solo, com a retirada da vegetação. Os corpos de prova foram moldados em anéis de PVC circulares (10 x 5 cm), de acordo com as medidas de acomodação dos moldes no aparelho Inderbitzen utilizado (Figura 48). A seguir, foram embalados em material de plástico filme PVC, selados com fita adesiva e guardados em caixa térmica, para manter as características originais.



**Figura 48 - Retirada de amostras indeformadas para ensaio de erodibilidade**



### **3.3 - Ensaio de Caracterização**

Os ensaios de caracterização foram fundamentais para conhecimento das principais características do solo. Foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da UNESP (Campus Bauru). Primeiramente, com amostras deformadas, e posteriormente foram realizados os ensaios de erodibilidade e resistência, com amostras indeformadas.

Para identificação e caracterização física do solo, foram realizados ensaios amplamente utilizados na Mecânica dos Solos, sendo: granulometria conjunta, massa específica dos sólidos, umidade e massa específica do solo. A determinação dos demais índices físicos foi feita através de correlações entre os índices.

Os ensaios de Granulometria Conjunta e Massa Específica dos Sólidos foram realizados de acordo com as normas que seguem, respectivamente: NBR 7181/84 e NBR 6508/84.

### **3.4 - Ensaios para Determinação das Curvas de Retenção de Água**

As curvas de retenção de água dos solos deste trabalho foram obtidas a partir de dois métodos de ensaios: Papel Filtro e Funil de Placa Porosa.

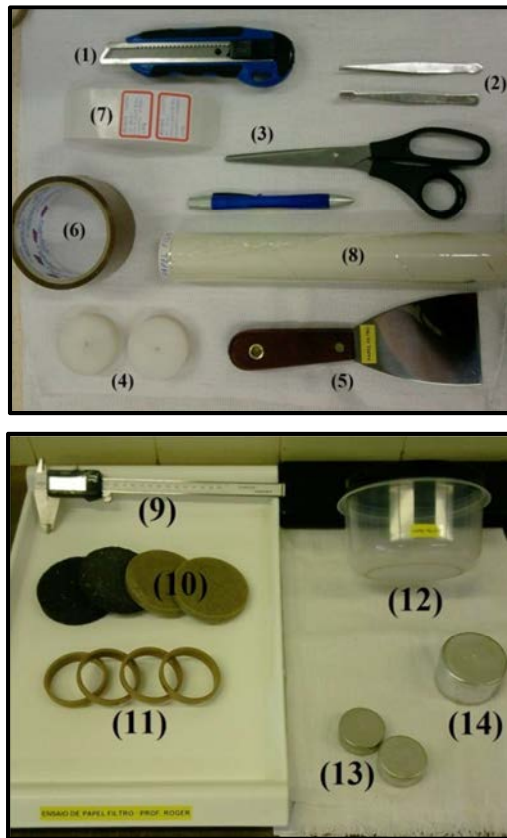
#### **3.4.1 - Método do Papel Filtro**

O ensaio foi realizado de acordo com a metodologia proposta pela ASTM (2003), com a realização de trajetórias de secagem e umedecimento, sendo que a sucção matricial foi calculada através dos dados obtidos de umidade das amostras e do papel filtro, utilizando-se equações como curva de calibração, de acordo com o papel filtro utilizado.

A técnica do papel filtro, tipo Whatman n. 42, consiste em colocar um papel de características de retenção conhecidas num ambiente hermético junto com a amostra de solo. Dado o contato entre o papel que é capaz de reter umidade e o solo, ocorre migração de água até estabelecer-se o equilíbrio de potencial.

A Figura 49 mostra os materiais utilizados no método. (1) estilete; (2) pinça metálica; (3) tesoura para cortar o papel filtro; (4) disco para garantir o contato do papel com o solo; (5) espátula; (6) fita adesiva; (7) etiquetas para a identificação do solo; (8) papel filme; (9) paquímetro para tirar as medidas do anel; (10) pedra porosa; (11) anéis para moldagem do solo; (12) recipiente de plástico; (13) cápsula da pesagem do solo; (14) cápsula para pesagem do papel filtro.

**Figura 49 - Materiais utilizados no ensaio de curva de retenção de água com papel filtro**



Os corpos de prova foram moldados em discos de pvc, a partir do bloco indeformado coletado em campo (Figura 50), e secos ao ar por um período de 48 horas (Figura 51).

**Figura 50 - Moldagem dos corpos de prova para ensaios de determinação da Curva de Retenção do Solo**



**Figura 51 - Corpos de prova secando ao ar**



Para determinação da trajetória de secagem, foram moldados 14 corpos de prova, que foram saturados por capilaridade em água destilada e deaerada por um período de 24 horas, e secados até atingirem a massa ideal determinada pelos parâmetros adotados nas equações. A seguir, foram acoplados ao papel filtro Whatman nº 42, embalados hermeticamente, identificados com etiquetas e armazenados em caixa térmica de isopor até atingirem a data de abertura determinada na planilha de cálculo (Figuras 52 e 53).

**Figura 52 - Corpos de prova sendo embalados**



**Figura 53 - Corpos de prova armazenados em caixa térmica de isopor**



Já no ensaio realizado com trajetória de umedecimento, após a moldagem, os corpos de provas foram secados ao ar. Na sequência, eles foram umedecidos com auxílio de um conta-gotas até alcançar a massa desejada, em balança de alta precisão. Após atingir a massa, cada corpo de prova também foi colocado em contato com pedaços do papel pela base e pelo topo,

embalados hermeticamente, identificados e armazenados em caixa térmica de isopor, até a data de abertura determinada na planilha de cálculo.

O cálculo da sucção foi realizado usando-se as equações de Chandler et al. (1992), onde a equação 3.1 é aplicada para  $w_{papel} \geq 47\%$  e a equação 3.2 para  $w_{papel} < 47\%$ :

$$s = 10^{6,05 - 2,48 \cdot \log w_{papel}} \quad (\text{kPa}) \quad (3.1)$$

$$s = 10^{4,84 - 0,0622 \cdot w_{papel}} \quad (\text{kPa}) \quad (3.2)$$

De acordo com as datas de abertura, os corpos de prova foram abertos e pesados, determinando-se as massas do CP e do papel filtro, sendo que a partir destes dados, foram obtidos os pontos da curva.

### 3.4.2 - Método do Funil de Placa Porosa

Este método foi utilizado para complementar as curvas de retenção obtidas através do método anterior. Dessa forma, foram escolhidos alguns pontos localizados no início da trajetória da curva, para obtenção de um maior detalhamento.

O método do Funil de Placa Porosa consiste em um equipamento com uma placa porosa, conectada hidraulicamente a um tubo flexível acoplado a um reservatório com altura regulável para saída de água.

A sucção desejada para se atingir é determinada pela altura do reservatório (sempre localizado abaixo da amostra), sendo equivalente à altura da coluna de água acima do reservatório negativa em relação à cota do solo, de acordo com a equação 3.3:

$$u_a - u_w = g \cdot (z_A - z_B) \quad (3.3)$$

O procedimento de realização de imposição de sucção neste equipamento consiste em:

- 1- Saturação do sistema com água para evitar-se a formação de bolhas.
- 2- Saturação prévia das amostras de solo.
- 3- Saturação prévia da placa porosa do aparelho.
- 4- Acoplamento do corpo de prova na pedra porosa e fechamento do compartimento.

- 5- Rebaixamento do reservatório de água até a altura de interesse, até que cesse o fluxo de água.
- 6- Após equilíbrio, retirada e pesagem das amostras, determinando-se a umidade e os pontos da curva.

### **3.4.3 - Câmara de Pressão**

A curva de retenção de água no solo também foi obtida utilizando-se a câmara de pressão de Richards. Para isso, foram moldados oito corpos de prova cilíndricos, de amostras indeformadas. Inicialmente, as amostras de solo foram colocadas sobre placas porosas parcialmente submersas em água destilada e deaerada numa bandeja, permanecendo durante 24 horas (Figura 54 a). Após a saturação, as amostras foram retiradas da bandeja e colocadas sobre a placa porosa de alta pressão de entrada de ar (Figura 55), que também foi saturada, em um tanque (Figura 54 b), e a câmara de pressão foi fechada. Em seguida, aplicou-se uma pressão de ar no interior da câmara. Neste instante, conhecendo-se a pressão no ar e a pressão na água, tem-se a sucção.

O ensaio foi conduzido com incrementos sucessivos de pressão de ar no interior da câmara com o intuito de drenar a água contida nos corpos de prova. As pressões aplicadas foram de 25, 50 e por último 100 kPa, assim, a sucção induzida é transmitida ao material, alcançando-se um equilíbrio após a eliminação parcial da água em cada estágio. Foram retirados da câmara de pressão dois corpos de prova após o equilíbrio em cada aplicação de pressão para determinação do seu teor de umidade.

A Figura 56 mostra o sistema de câmaras de pressão com o painel usado para imposição e controle da sucção. Os incrementos de pressão são controlados pelos registros do painel e as câmaras são alimentadas com ar comprimido através das mangueiras conectadas nas laterais de cada câmara.

Figura 54 - (a) Saturação dos corpos de prova de solo e (b) Saturação das placas porosas de alto valor de entrada de ar da câmara de pressão

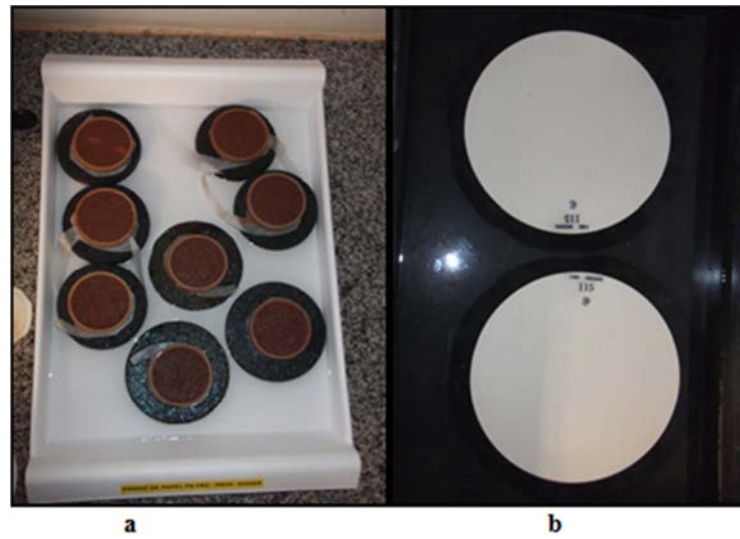


Figura 55 - Corpos de prova inseridos na câmara de pressão



Figura 56 - Esquema da câmara de pressão

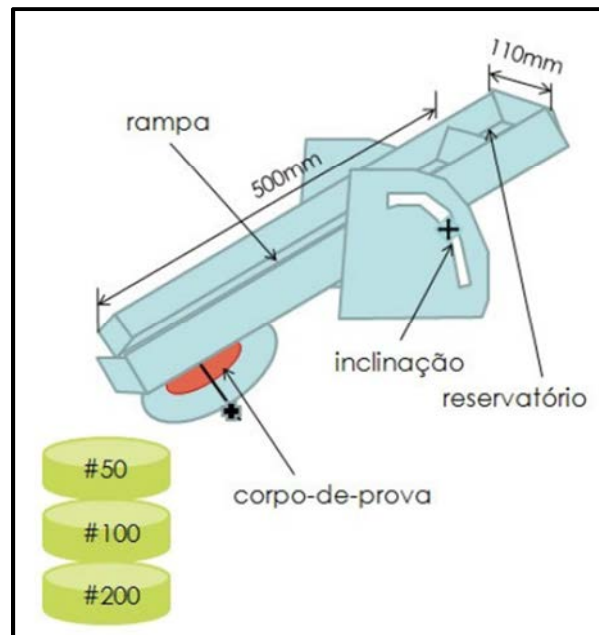




### 3.5 - Ensaio de Inderbitzen

Os ensaios de Inderbitzen foram realizados no aparelho pertencente ao Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP/Bauru (Figura 57). Este aparelho foi construído anteriormente para a pesquisa de Ide (2009) baseado na proposta inicial de Inderbitzen com modificações sugeridas em estudos anteriores, como os de Fácio (1991) e Santos (1997).

**Figura 57 - Esquema do aparelho Inderbitzen construído para o Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP/Bauru**



Fonte: Ide (2008)

O método de ensaio seguiu recomendações de Fácio (1991), que sugeriu mudanças partir de estudos baseados em uma série de ensaios que incluiu variações na vazão, declividade da rampa e duração do ensaio, porém com algumas modificações que serão detalhadas no item 3.5.2.

Este autor sugere uma vazão fixa de 50 ml/s, com uma amostra nas dimensões de 100 mm de diâmetro, que deve ser embebida por 15 minutos a fim de eliminar forças de sucção. A duração do ensaio é de 20 minutos, com a utilização de peneiras com diferentes aberturas (nº 50, 100 e 200), para que se possa quantificar a quantidade e momento de desprendimento das diferentes partículas minerais do solo (areia, silte e argila), com troca destas peneiras e coleta dos solos removidos nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos. Os resultados devem ser expressos em gráficos de perda acumulada de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo (minutos).

### 3.5.1 - Testes para Avaliação do Desempenho do Aparelho Inderbitzen

Uma vez que o aparelho Inderbitzen possui adaptações, e busca reproduzir condições de campo, porém sem nenhuma normatização, ele apresenta algumas falhas quanto aos limites de vazão e inclinação propostos, que proporcionam linhas de fluxo de escoamento que não abarcam toda a superfície da rampa, inviabilizando o ensaio. De forma a aperfeiçoar a utilização do aparelho, foram feitos testes acerca destas variáveis, impondo limites de vazão e inclinação, através de uma série de ensaios, sem a utilização do corpo de prova, para que o ensaio pudesse ser realizado sem a possibilidade de linhas de fluxo (Figura 58).

**Figura 58 - Ensaio para avaliação do desempenho do equipamento**



Já que o padrão de vazão de 50 ml/s sugerido por Fácio (1991) foi o mais utilizado em diversos outros estudos, e foi o padrão que serviu de base para a construção do presente aparelho, as variações de vazão teste nos ensaios seguiram deste valor fixado para mais e para menos, sendo que as vazões testadas foram de: 20, 30, 40, 60, 70, 80 e 90 ml/s. A variação na inclinação da rampa variou de acordo com os limites que o próprio aparelho possui, variando de 10° a 50°, sendo os valores escolhidos: 10°, 20°, 30°, 40° e 50°.

### 3.5.2 - Método de Ensaio de Inderbitzen Utilizada na Pesquisa

O método de ensaio desta pesquisa seguiu os padrões limites impostos pelo próprio aparelho de Inderbitzen, os padrões delimitados nos ensaios de calibração, e os padrões sugeridos por Fácio (1991) e utilizados por Ide (2009) incluindo algumas adaptações.

A escolha da vazão foi baseada nos estudos anteriores, principalmente nos de Fácio (1991) e Ide (2009), que utilizaram o valor de 50 ml/s. Apesar de extrapolar significativamente o volume de vazão ocorrido em uma chuva máxima na cidade de Bauru “Antônio (2007) explica que a chuva máxima ocorrida em Bauru no ano de 1993 corresponde à intensidade de 28 mm em meia hora (IDE, 2009)”, nos testes de calibração, foi o valor que correspondeu ao melhor desempenho do aparelho, além de que, com esse valor foi possível realizar comparações com outros estudos de erodibilidade.

As inclinações foram escolhidas de acordo com as condições de campo, variando-se para mais e para menos, buscando-se representar condições mínimas e máximas de susceptibilidade quanto à declividade do terreno para este tipo de solo, sendo estas: 15°, 30° e 45°.

De forma que este trabalho visou a análise de erodibilidade em solos tropicais (não saturados), as forças de sucção são determinantes para um melhor entendimento de seu comportamento. Dessa forma, diferentemente da proposta anteriormente utilizada por outros autores, as amostras foram ensaiadas em diferentes estados, a fim de se eliminar as forças de sucção, sendo estes: saturadas, com umidade de campo, e com sucções impostas na Câmara de Pressão de Richards nos valores de 50 e 200 Kpa.

A partir destas definições, foram realizados ensaios-testes para a determinação de parâmetros em condições máximas de susceptibilidade, em corpos de prova com solo de amostras indeformadas, ou para melhor definição, *solo solto*.

As demais amostras foram moldadas nos corpos de prova em campo, mantendo seus parâmetros originais de estrutura (Figura 48).

Os ensaios foram realizados no tempo de 30 minutos, segundo a proposta de Santos (2007), que observou em diversos estudos que, apesar da maior perda de solo se dar nos primeiros 5 minutos e se estabilizar no tempo de 10 minutos, em alguns tipos de solo esta estabilidade pode não ocorrer, demandando um maior tempo de ensaio.

Dessa forma, o solo carreado foi recolhido das peneiras no tempo de 1, 5, 10, 20 e 30 minutos em vasilhas e secos na estufa pelo tempo de 24 horas. Após a secagem, o solo foi pesado em balança de alta precisão e quantificado nas planilhas que geraram gráficos (Figuras 59 e 60).

**Figura 59 - Ensaio de Inderbitzen em andamento**



**Figura 60 - Detalhe do ensaio de Inderbitzen em andamento: solo sendo carregado para peneira**

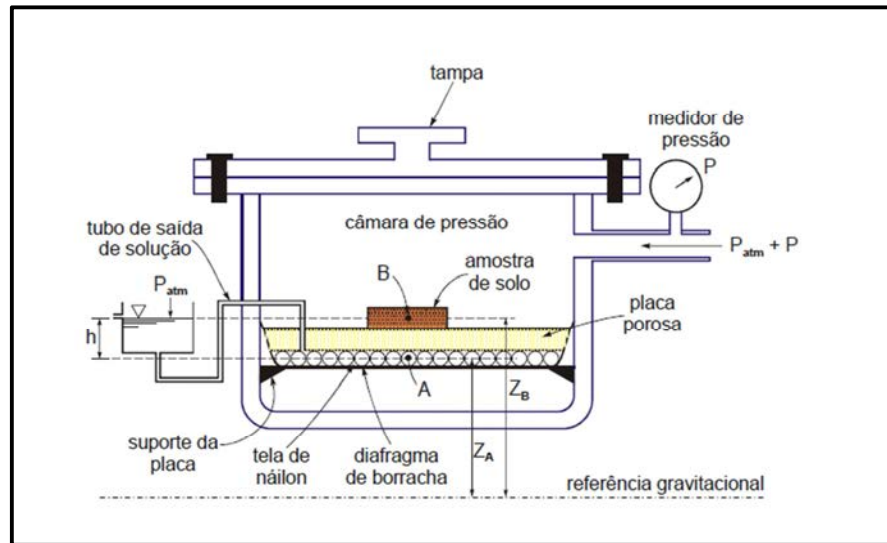


### **3.5.3 - Controle da sucção através da Câmara de Pressão para ensaios de Inderbitzen**

O método de controle da sucção foi realizado para as amostras utilizadas nos ensaios de Inderbitzen, com o intuito de observar o comportamento de erodibilidade dos solos com sucções determinadas de 50 e 200 kPa, que foram escolhidas como valores com variação representativa ao longo da curva de retenção do solo. Este método de controle da sucção é baseado no princípio da translação de eixos, com o uso de pressão de ar para expulsão da água nos poros do solo.

Este método utiliza-se de uma câmara de pressão hermeticamente fechada, contendo em seu interior, uma placa porosa que possuem alto valor de entrada de ar (geralmente de 5 a 15 bar). A estas placas são acoplados canos por onde a água escoar para fora do compartimento, através da imposição de pressão de ar (Figura 61).

**Figura 61 - Esquema do funcionamento da Câmara de Pressão**

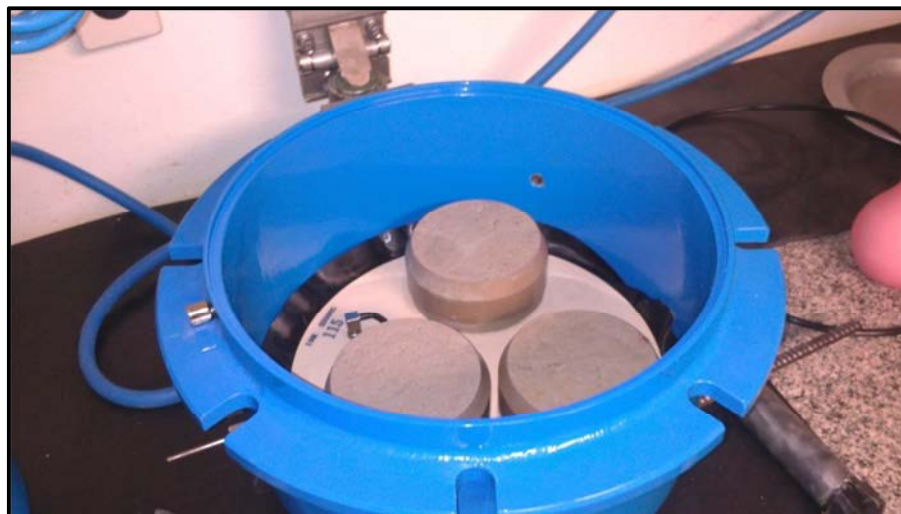


Fonte: Rodrigues (2012)

O método deste ensaio consistiu em posicionar as amostras de solo sobre uma placa porosa (ambas previamente saturadas em água deaerada e destilada por 24 horas), sendo que todo o sistema também foi saturado para impedir descontinuidade da fase líquida. O mecanismo interno foi conectado por um tubo que se ligou a um recipiente no lado externo, para receber a água contida nas amostras.

Foram utilizadas 3 amostras de solo, moldados em corpos de prova circulares de material de PVC, nas medidas indicadas para o uso no aparelho do Inderbitzen, para cada valor de sucção desejado (50 e 200 Kpa), sendo no total 6 amostras (Figura 62).

**Figura 62 - Amostras submetidas à sucção na Câmara de Pressão**



Após acomodação na Câmara de Pressão, esta foi devidamente fechada e imposta a pressão de ar, aguardando o prazo de 15 dias para estabilização das amostras e obtenção da sucção desejada.

A água do sistema fica submetida à pressão atmosférica e por isso a pressão da água ( $u_w$ ) durante o ensaio é igual a zero; a sucção ( $u_a - u_w$ ) induzida então é igual à pressão de ar inicial. Apenas é possível garantir que a sucção do solo é igual à pressão de ar aplicada após o equilíbrio do sistema, quando cessa o fluxo de água das amostras (MENEZES, 2010).

Depois de retiradas da Câmara, as amostras foram submetidas ao ensaio de Inderbitzen.

### 3.6 – Ensaio de Cisalhamento Direto

A resistência dos solos estudados foi medida em laboratório por meio do ensaio de cisalhamento direto. A principal vantagem deste ensaio refere-se ao conhecimento das condições de contorno. Além disso, tem-se estados de tensão e deformação mais uniformes ao longo dos carregamentos.

No tocante aos ensaios realizados, o corpo de prova foi colocado num recipiente formado por dois moldes quadrados iguais e superpostos, onde uma das partes permanece fixa na prensa e a outra é livre para mover-se e aplicar tensões cisalhantes ao solo.

Sobre os corpos de prova foram aplicadas tensões normais de aproximadamente 30, 60, 120 e 240 kPa que permaneceram constantes até o final do ensaio. Essas tensões variaram para cada corpo de prova, com o intuito de poder definir pares de tensões diferentes.

Três leituras foram tomadas durante o ensaio: deslocamento horizontal ( $\delta_h$ ), força cisalhante aplicada ( $F_t$ ) e deslocamento vertical ( $\delta_v$ ), o qual fornece a variação de volume do corpo de prova e a velocidade de ensaio foi de 0,2 mm/min. Dividindo-se a força cisalhante pela área do corpo de prova calculou-se a tensão cisalhante  $\tau$ , em cada instante do ensaio. As deformações volumétricas foram calculadas pela variação de altura do corpo de prova em relação à altura inicial deste.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em condições saturadas para os solos A e B, a fim de comparar a resistência dos solos dos dois locais neste estado extremo de sucção (0 kPa), e em condições não saturadas para o solo do Local A, nos valores de sucções de: 50 e 200 kPa e  $> 15$  Mpa, a fim de analisar a variação da resistência de acordo com a sucção deste Local.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Caracterização e Análises Físicas do Solo

#### 4.1.1 – Granulometria Conjunta

As curvas granulométricas para os dois pontos de coleta estão representadas na Figura 63. A interpretação destas curvas encontra-se na Tabela 4:

**Tabela 4 - Ocorrência das classes de partículas dos solos nos pontos de amostragem 1 e 2**

Classes de partículas	% de grãos	
	Local A	Local B
Areia grossa	0	0
Areia média	48	53
Areia fina	35	29
Silte	5	4
Argila	12	14

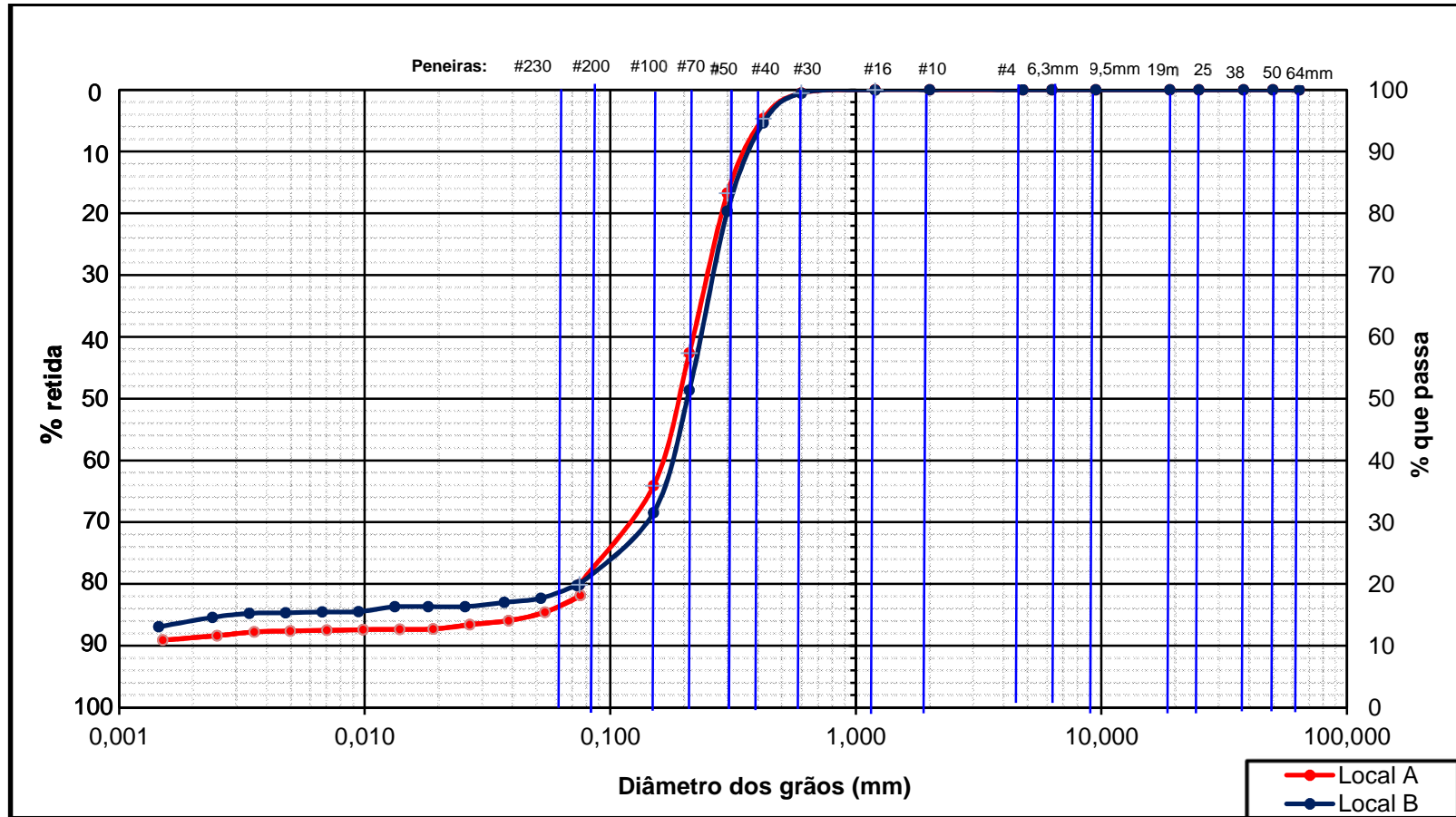
A partir da análise da Figura 63 e Tabela 4, conclui-se que o solo do Local A possui características que vão ao encontro com os solos da região. Trata-se de um solo arenoso, com a presença de aproximadamente 83% de areia em sua composição, sendo que estes valores são divididos quase que igualmente em areia média e fina. Em relação a quantidade de finos, estes se dividem em 5% de silte e 12% de argila.

O solo do Local B possui quase que as mesmas características do anterior, apenas com pequenas variações entre as proporções de areias média e fina (29% para areia fina e 53% para areia média), e para os valores de silte (4%) e argila (14%).

O resultado se mostra satisfatório perante o esperado na região, já que os solos são provenientes de rochas sedimentares como o arenito. Dessa forma, as amostras foram classificadas como areia fina a média argilo siltosa, devido à maior ocorrência de areia em sua composição.



Figura 63 - Análise Granulométrica Conjunta (NBR 7191/84)



ESCALA ABNT NBR 6502/95

argila	silte		areia			pedregulho			
			fina	média	grossa	fino	médio	grosso	
0,002			0,060	0,200	0,600	2,000	6,000	20,00	60,00

#### 4.1.2 – Índices Físicos dos Solos

A Tabela 5 apresenta os resultados dos índices físicos dos solos para os Locais A e B:

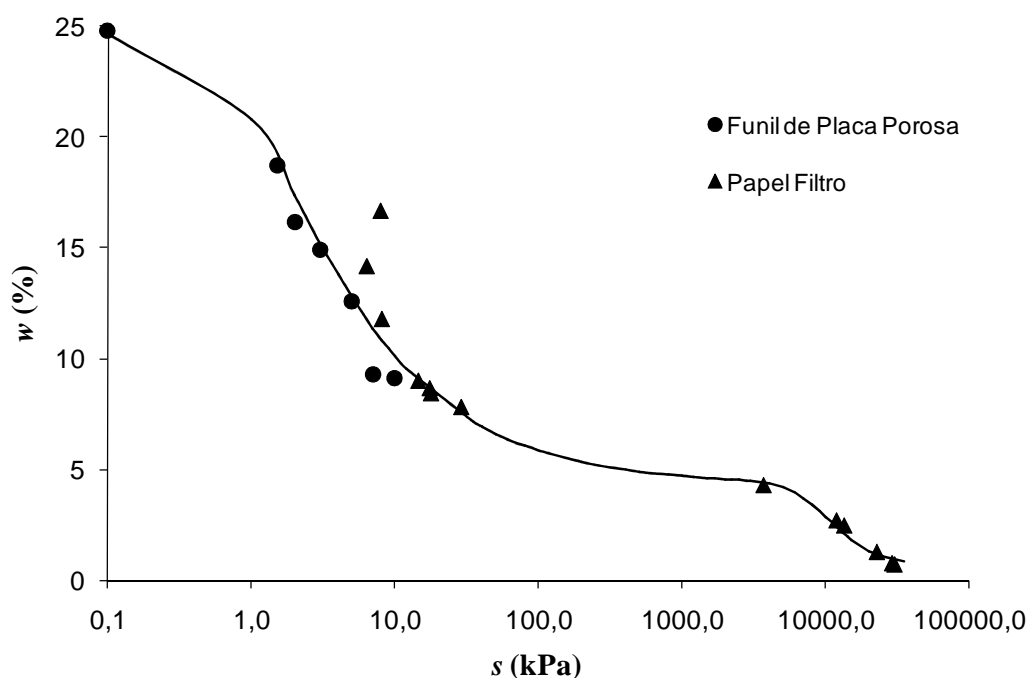
**Tabela 5 - Índices físicos do solo**

Índices Físicos	Símbolo	Unidade	Solo (Local A)	Solo (Local B)
Teor de umidade	$w$	(%)	7,3	9,2
Massa específica dos sólidos	$\rho_s$	(g/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,65
Massa específica do solo	$\rho$	(g/cm <sup>3</sup> )	1,70	1,82
Massa específica seca	$\rho_d$	(g/cm <sup>3</sup> )	1,58	1,66
Índice de Vazios	$e$	-	0,649	0,595
Porosidade	$n$	(%)	39,4	37,3
Grau de Saturação	$S_r$	(%)	29,6	41,1

#### 4.2 – Curva de Retenção de Água no Solo

A Figura 64 apresenta a curva de retenção de água no solo, a partir da média obtida para os solos dos locais A e B, tendo em vista que ambos possuem características similares.

Figura 64 - Curva de Retenção de Água no Solo



A curva de retenção obtida é típica de solo arenoso com baixa capacidade de retenção de água. A curva apresenta zonas de saturação e de sucção residual bem definidas, além de duas entradas de ar que pode estar associada a presença de microporos. Para melhor interpretação das curvas, os resultados obtidos com o método de papel filtro foram ajustados de acordo com a equação de Van Genuchten (1980). A Tabela 6 apresenta os parâmetros de ajuste da equação.

$$w = w_r + (w_s - w_r) \cdot \left\{ \frac{1}{[1 + (\alpha \cdot s)^n]^m} \right\} \quad (4.1)$$

Em que,  $w_r$  e  $w_s$  são umidades residual e de saturação;  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros de forma da curva de retenção; e  $s$  é a sucção.

Tabela 6 - Parâmetros de ajuste da equação de Van Genutchen (1980)

Ajuste	$w_s$ (%)	$w_r$ (%)	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$m$	$n$	$r^2$
Trecho 1	24,8	4,3	0,8732	0,3655	1,5761	0,96
Trecho 2	4,3	0,7	0,0001	0,8523	2,9094	0,95

Dois ajustes foram realizados para cada trajetória de sucção pelo fato do solo apresentar duas pressões de entradas de ar. Em geral, as curvas modeladas se ajustam bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação ( $r^2$ ) acima de 0,95.

### 4.3 - Inderbitzen

#### 4.3.1 - Resultados dos Testes Para Avaliação do Desempenho do Aparelho Inderbitzen

A Figura 65 ilustra o momento da realização dos ensaios testes do equipamento, e a Tabela 7 indica os resultados.

**Figura 65 - Ensaio para calibração do Inderbitzen**



Tabela 7 - Resultados dos ensaios para avaliação do aparelho Inderbitzen

Inclinação (°)	Vazão (ml/s)							
	20	30	40	50	60	70	80	90
10	N	S	S	S	S	S	S	S
20	N	S	S	S	S	S	S	S
30	N	S	S	S	S	S	N	N
40	N	S	S	S	N	N	N	N
50	N	S	S	N	N	N	N	N
LEGENDA:	S – Satisfatório				N – Não satisfatório			

Os critérios utilizados para definir tais limites foram: satisfatório e não satisfatório. Como resultado satisfatório compreende-se que o fluxo de água pela rampa não desenvolveu caminhos preferenciais, ou seja, o fluxo foi laminar, preenchendo toda seção transversal da rampa do aparelho durante todo o tempo determinado para o ensaio, de 30 minutos. Como resultado não satisfatório entende-se o fluxo de água que não seguiu o padrão descrito anteriormente.

É importante destacar a importância destes testes de desempenho, uma vez que se o equipamento desenvolve caminhos preferenciais pela rampa, isto pode influenciar diretamente na realização do experimento, uma vez que, concentrando o fluxo de água pela rampa, o escoamento não atingiria toda a superfície do corpo de prova, influenciando diretamente na obtenção dos resultados, que são mensurados em valores de quantidade de perda de solo por área.

#### 4.3.2 – Resultados dos Ensaio de Inderbitzen

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen foram apresentados em dois tipos de gráficos. O primeiro, representando a perda acumulada de solo *versus* tempo, e o seguinte representando as taxas de erodibilidade *versus* tempo. No primeiro tipo de gráfico, a “perda de solo” é representada pela quantidade de solo (em gramas) que erodiu do corpo de prova, acumulando-se pelo tempo do ensaio. Já no segundo tipo, a erodibilidade é representada pela quantidade de solo (em gramas) que erodiu por centímetro quadrado (da área da seção transversal do corpo de prova), pelo tempo.

Os resultados dos ensaios foram agrupados nos gráficos de acordo com dois tipos de variáveis, para uma melhor interpretação dos resultados. Sendo que, um tipo de gráfico

agrupou os resultados de acordo com a sucção do solo, e o outro tipo de gráfico agrupou os resultados de acordo as diferentes inclinações da rampa escolhidas para os ensaios (15°, 30° e 45°). Os solos saturados e com umidade de campo tiveram as sucções iniciais estimadas com base na curva de retenção de água no solo. Já os solos secos ao ar, a sucção inicial foi estimada com o método de papel filtro, enquanto os corpos de prova com sucção de 50 e 200 kPa tiveram seus valores impostos pela Técnica de Translação de Eixos por meio de Câmara de Pressão.

Local A:

- Sucção = 0 kPa (solo saturado)
- Sucção = 35 kPa (umidade de campo)
- Sucção = 50kPa (câmara de pressão)
- Sucção = 200 kPa (câmara de pressão)
- Sucção > 15 MPa (solo seco ao ar)

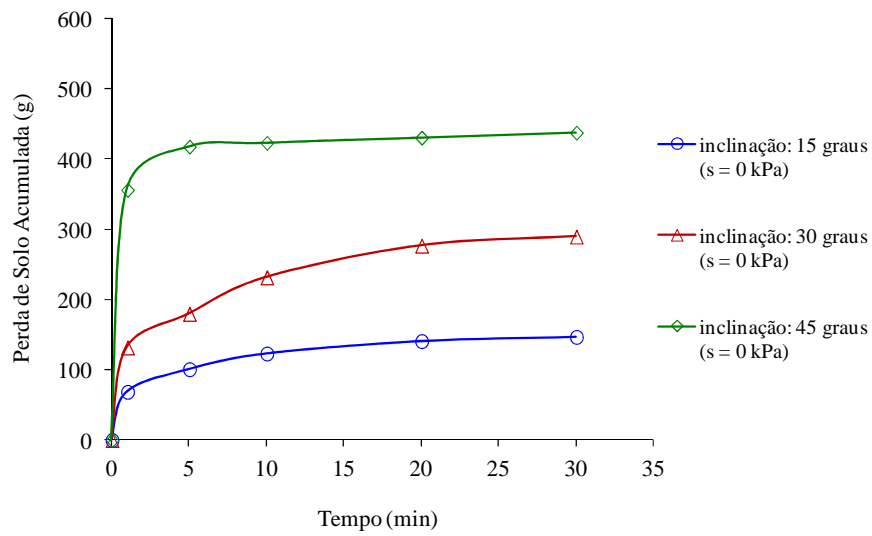
Local B:

- Sucção = 0 kPa (solo saturado)
- Sucção = 12 kPa (umidade de campo)
- Sucção > 15 MPa (seco ao ar)

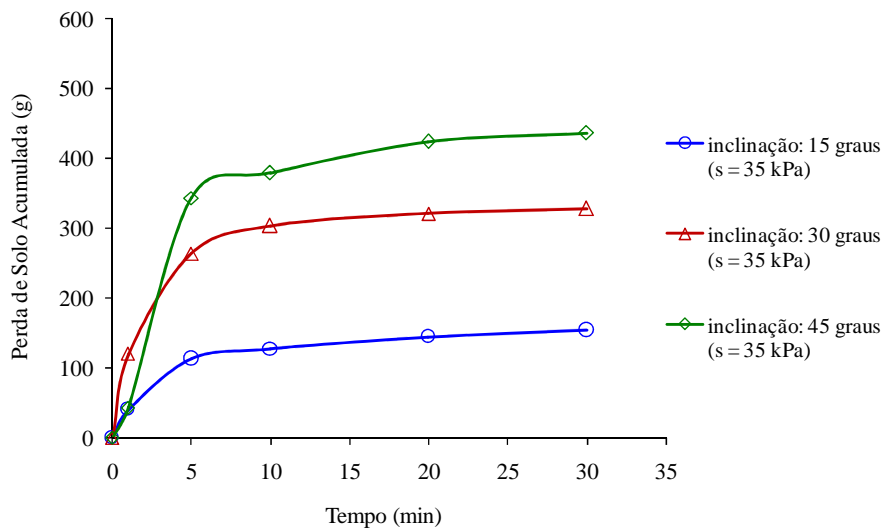
#### **4.3.2.1 – Local A:**

- Agrupados para analisar o efeito da inclinação da rampa do ensaio (15°, 30° e 45°).

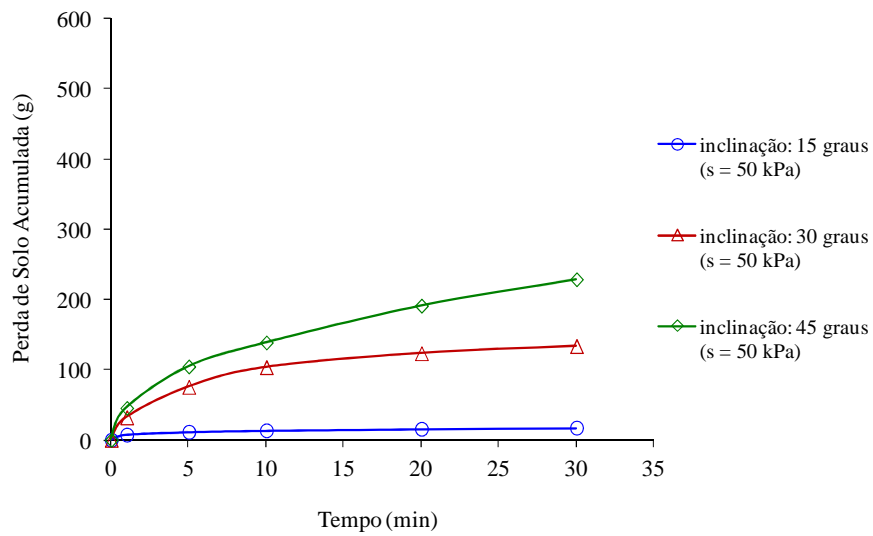
**Figura 66 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 0 kPa**



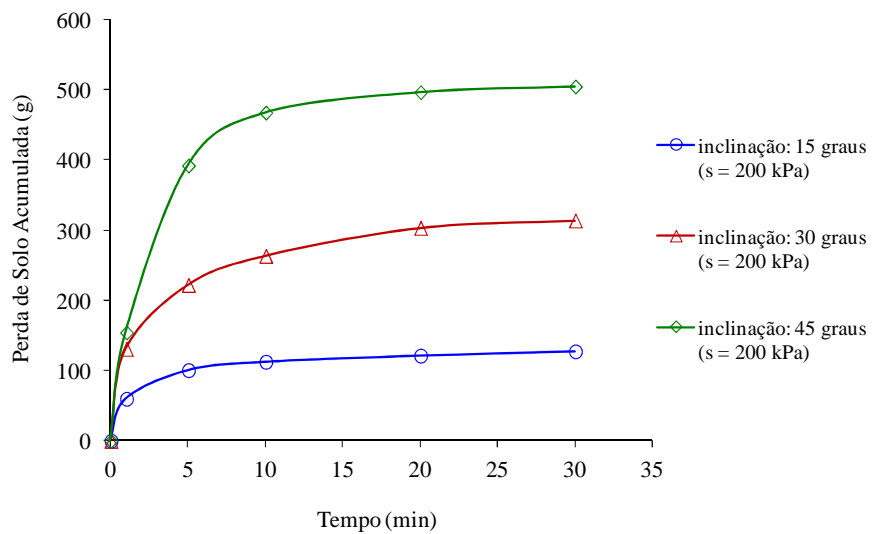
**Figura 67 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 35 kPa**



**Figura 68 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 50 kPa**

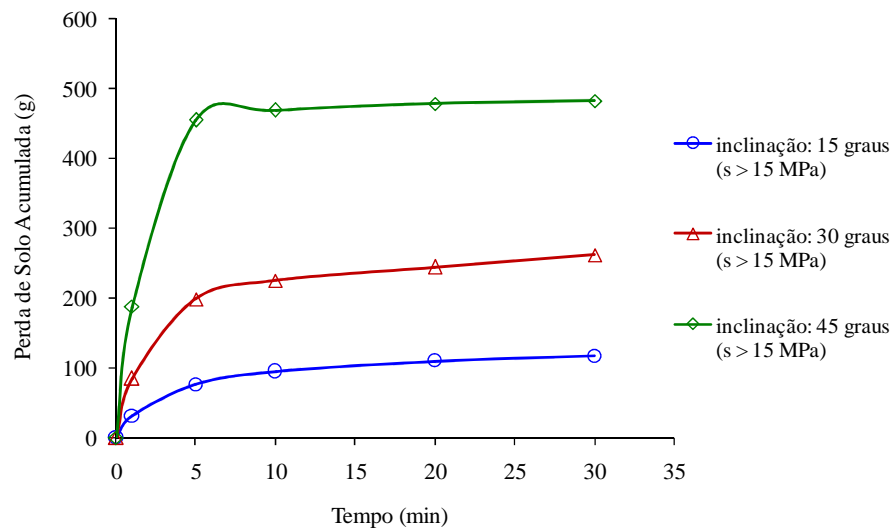


**Figura 69 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 200 kPa**

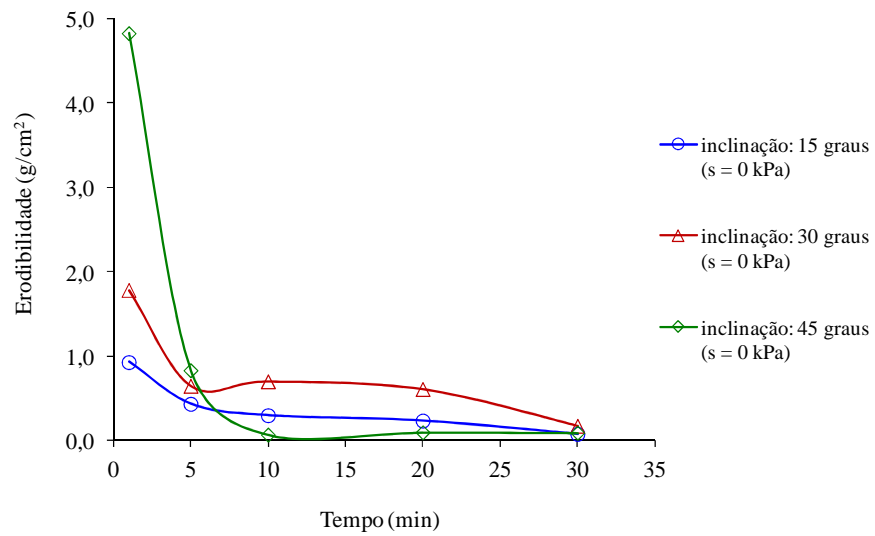




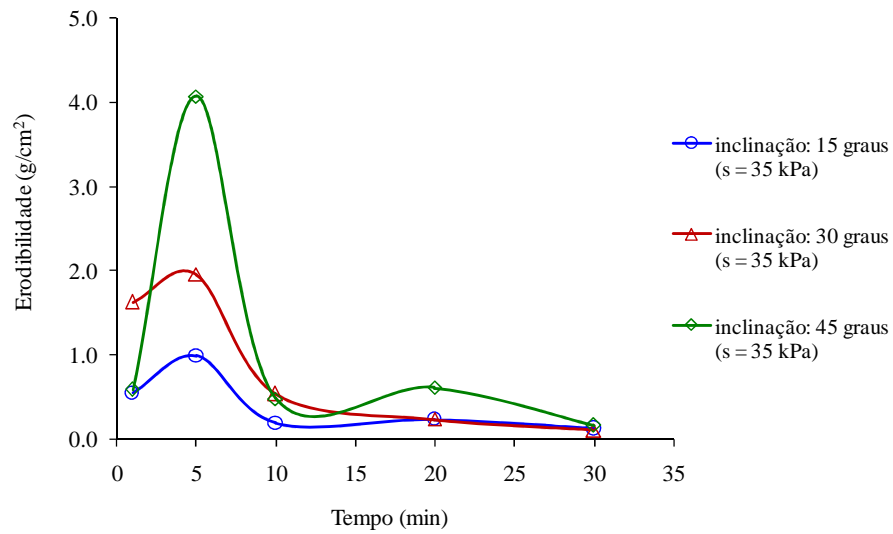
**Figura 70 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): sucção inicial > 15 MPa**



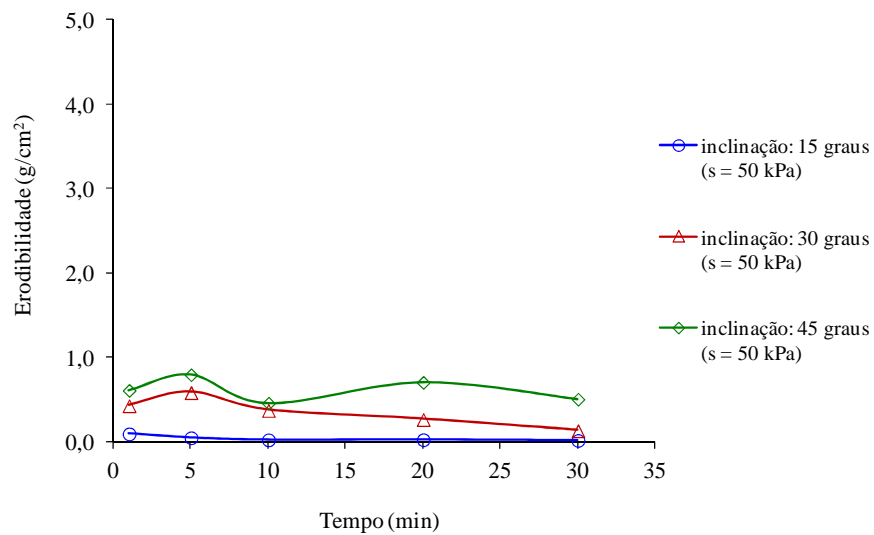
**Figura 71 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 0 kPa**

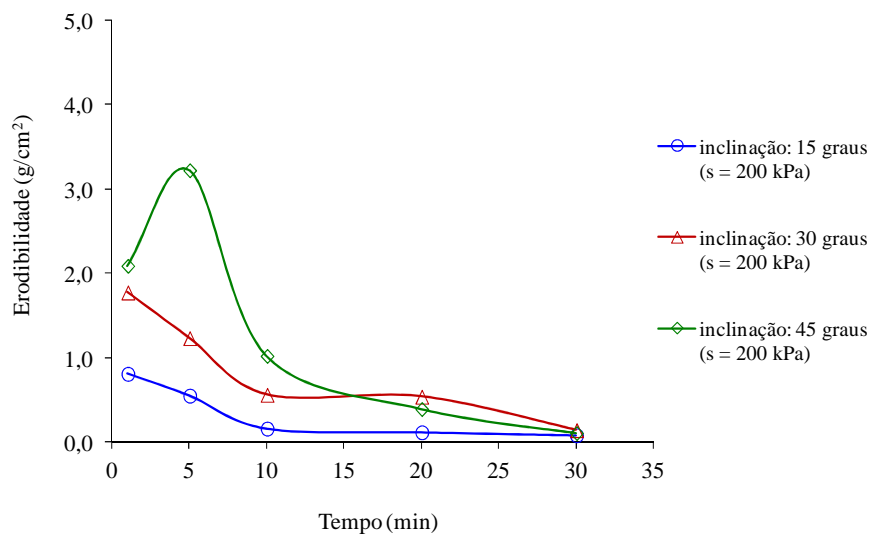
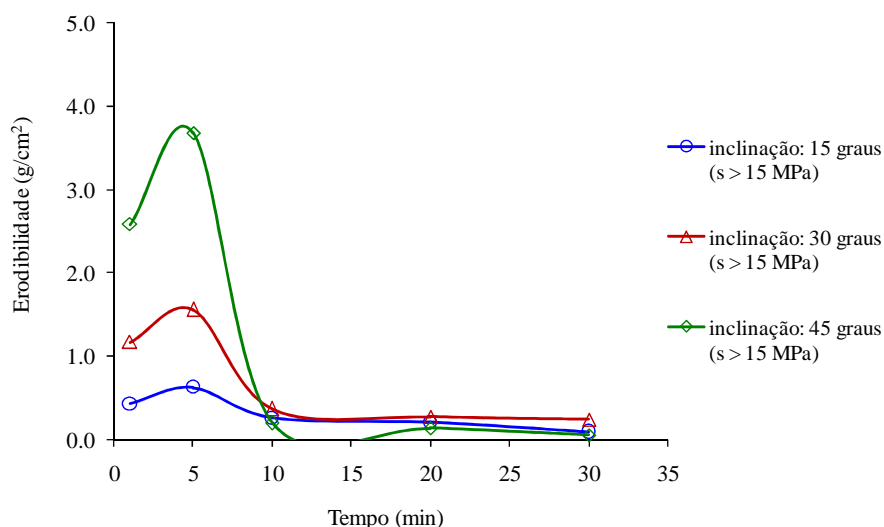


**Figura 72 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 35 kPa**



**Figura 73 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 50 kPa**



**Figura 74 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): sucção inicial = 200 kPa****Figura 75 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): sucção inicial > 15 MPa**

Analisando os gráficos de perda de solo acumulada (Figuras 66 a 70), nota-se a tendência de maior quantidade de carreamento de partículas de acordo com a inclinação da rampa utilizada no ensaio, independentemente da sucção do solo (considerando as cinco sucções utilizadas nas amostras). Sendo assim, os maiores valores de perda de solo, em ordem decrescente, são para a inclinação de 45°, 30° e 15°. Isto indica vulnerabilidade do solo arenoso à erosão em locais de relevo acentuado, como taludes e encostas, como verificado por Fácio (1999).

Os gráficos de erodibilidade (71 a 75) demonstram a quantidade, em gramas por centímetro quadrado de perda de solo por tempo. A partir da análise destes gráficos, nota-se

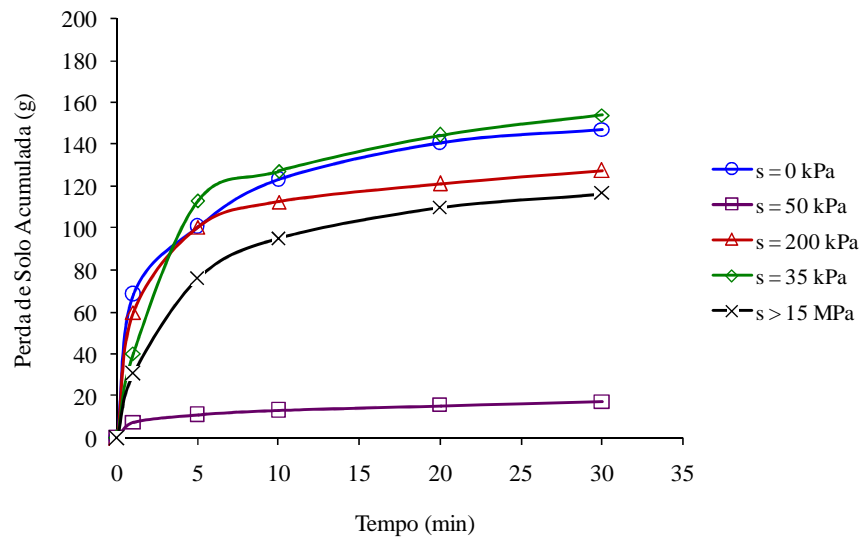
que a maior taxa de erodibilidade ocorre no tempo de 5 minutos, com uma tendência à estabilização até o término do ensaio, seguindo a tendência verificada em estudos anteriores, como o apresentado pelo IPR (1979) apud Fácio (1999).

Esta tendência ocorre nos diferentes tipos de amostras utilizadas, exceto para as amostras com sucção de 0 kPa (Figura 71), que apresentam o pico de maior perda de solo no tempo de 1 minuto, e para as amostras com inclinações de 15° na sucção de 50 kPa e 15° e 30° na sucção de 200 kPa. Para as amostras com sucção de 0 kPa, tais resultados podem demonstrar a influência da sucção nos primeiros instantes de contato do fluxo de água com o solo. Além disso, para este valor de sucção, os resultados de inclinação da rampa no valor de 45°, após o tempo de 5 minutos de ensaio, demonstra uma queda brusca na taxa de erodibilidade (abaixo dos valores obtidos para as rampas menos inclinadas de 15° e 30°), que poderia ser relacionado à posição mais inclinada da rampa, que destaca a influência na perda de partículas de solo pela ação da gravidade em solos saturados.

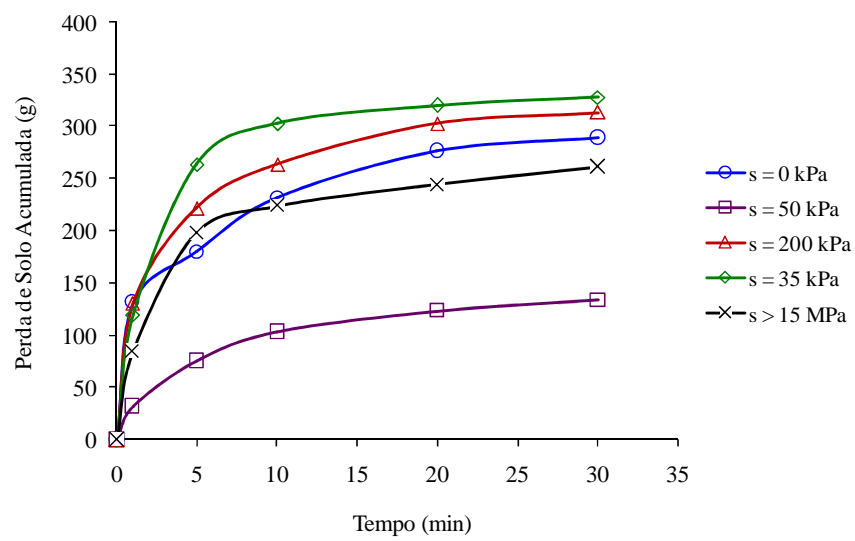
Destaca-se também, nos gráficos de erodibilidade (71 a 75), a tendência de ligeiro aumento das taxas de erodibilidade no tempo de 20 minutos, com posterior e gradativa diminuição até o tempo de 30 minutos.

- Agrupados para analisar o efeito da sucção inicial da amostra (0, 35, 50 e 200 kPa; >15 MPa)

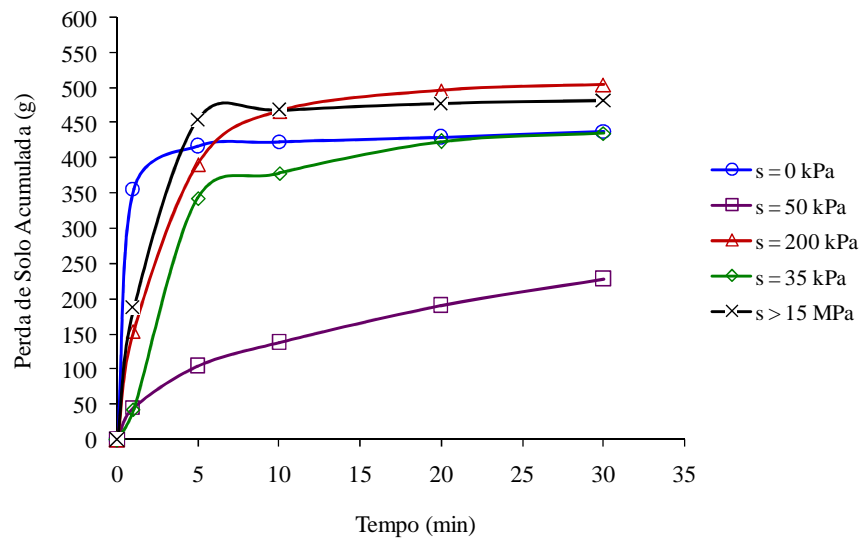
**Figura 76 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): inclinação 15°**



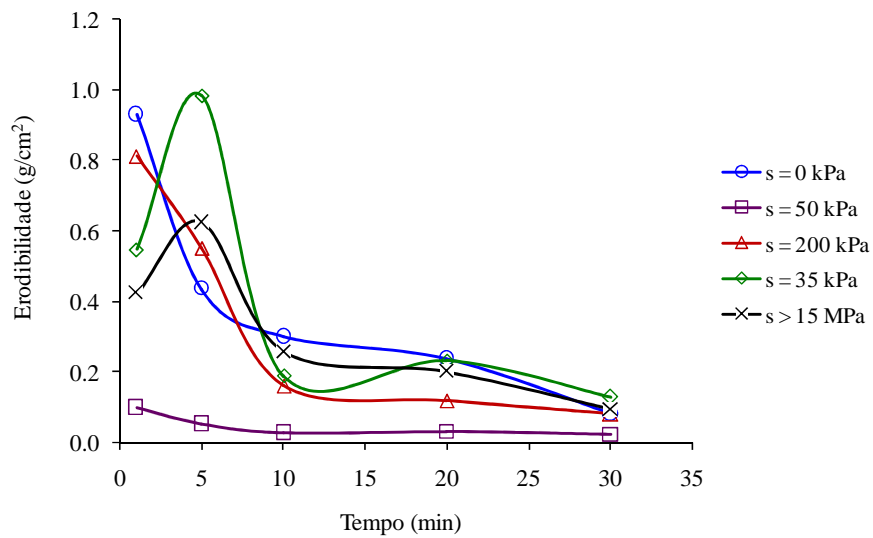
**Figura 77 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): inclinação 30°**

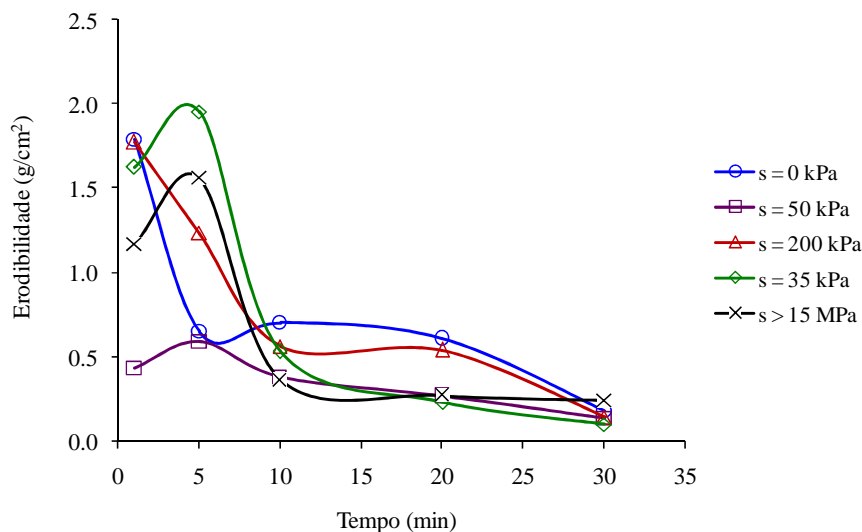
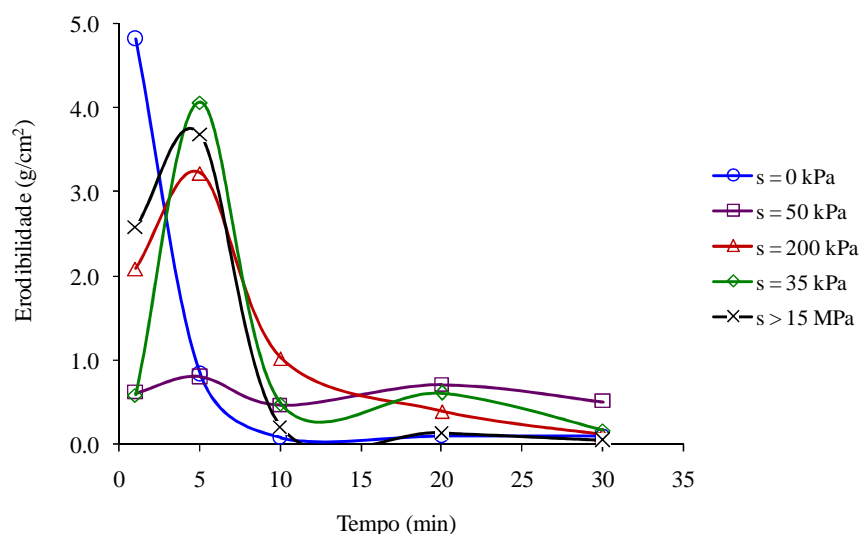


**Figura 78 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local A): inclinação 45°**



**Figura 79 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): inclinação 15°**



**Figura 80 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): inclinação 30°****Figura 81 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local A): inclinação 45°**

De acordo com os gráficos de perda acumulada pelo tempo e erodibilidade nas Figuras 76 a 78, que foram agrupados para análise do efeito de sucção nas amostras, nota-se taxas de erodibilidade muito parecidas nas diferentes sucções. Por exemplo, na Figura 81, no tempo = 5 minutos, a amostra com sucção de 200 kPa apresenta uma taxa de erodibilidade por volta de 3,2 g/cm<sup>2</sup>, e as amostras com sucções de 35 kPa e 15 MPa apresentam ambas por volta de 4 g/cm<sup>2</sup>. Isso ainda ocorre nas taxas para as demais inclinações.

Constata-se que não há um padrão de comportamento bem definido quanto à influência da sucção inicial no solo. No entanto, ao desconsiderar as amostras submetidas às sucções extremas (isto é, saturado,  $s = 0$  kPa, e seco ao ar,  $s > 15$  MPa), condições talvez não alcançadas pelo solo em tempos recentes, e as amostras com umidade de campo (35 kPa), os resultados mostram que quanto maior a sucção inicial do solo, mais erodível o solo é. Fácio (1999) aponta a influência do grau de saturação (que é diretamente ligado à valores de sucção) na erodibilidade dos solos: “A influência da variação do grau de saturação na erodibilidade dos solos se deve à variação da sucção, que de acordo com Tornel (1988), está diretamente relacionada com a tendência do solos em absorver água”. Camapum de Carvalho (1991) também afirma tal influencia na erodibilidade:

O fenômeno da desagregação de uma massa de solo é provavelmente provocado pela compressão do ar existente em seus vazios causada pela água que nela penetra. Portanto uma amostra de solo que não possua água livre, com o mesmo índice de vazios e com graus de saturação diferentes, apresentará erodibilidade também diferentes, tendo em vista que quanto menor for o grau de saturação maior será a sucção, ou seja, a capacidade de absorção de água. Além da diminuição da coesão aparente com o aumento da absorção de água, esta incrementa a compressão do ar existente em seus vazios gerando assim uma pressão desagregadora na referida amostra (Camapum de Carvalho, 1991).

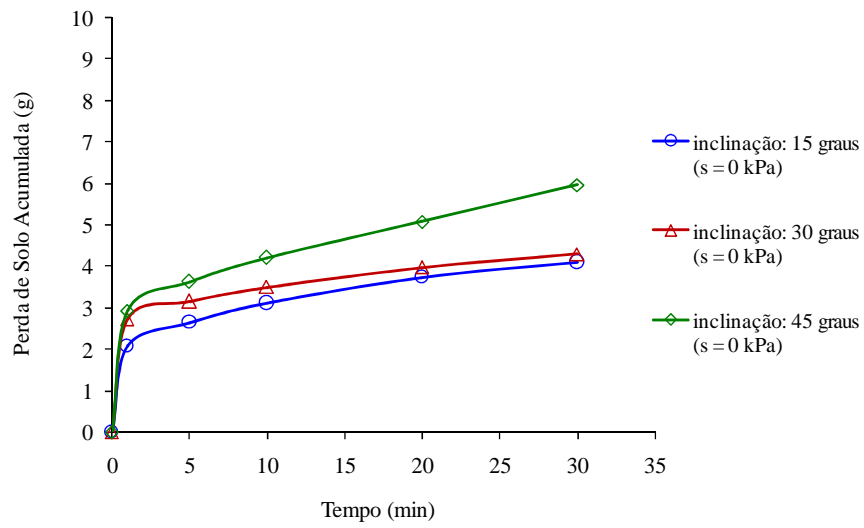
Embora se trate de um solo arenoso de baixa capacidade de retenção de água, talvez ele nunca tenha alcançado condições extremas de sucção (saturado e seco ao ar). Isto, porém, é difícil afirmar, uma vez que não existem dados de monitoramento de sucção na região (não há registro do histórico de sucção). Deste modo os resultados não são conclusivos, sob esta ótica.

#### **4.3.2.2 – Local B**

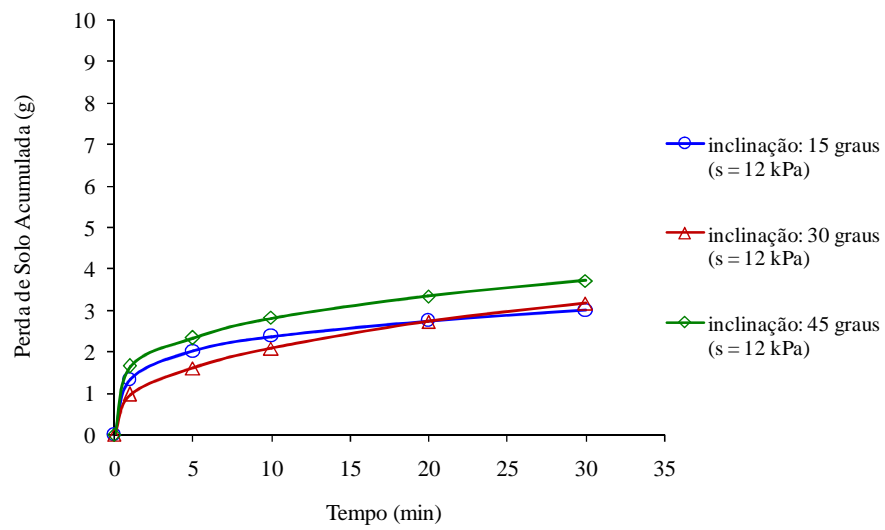
- Agrupados para analisar o efeito da inclinação da rampa do ensaio (15°, 30° e 45°)



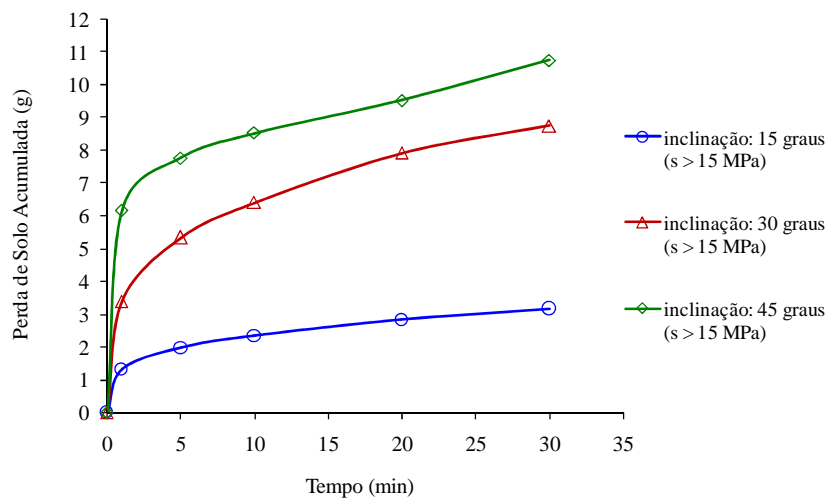
**Figura 82 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local B): sucção inicial = 0 kPa**



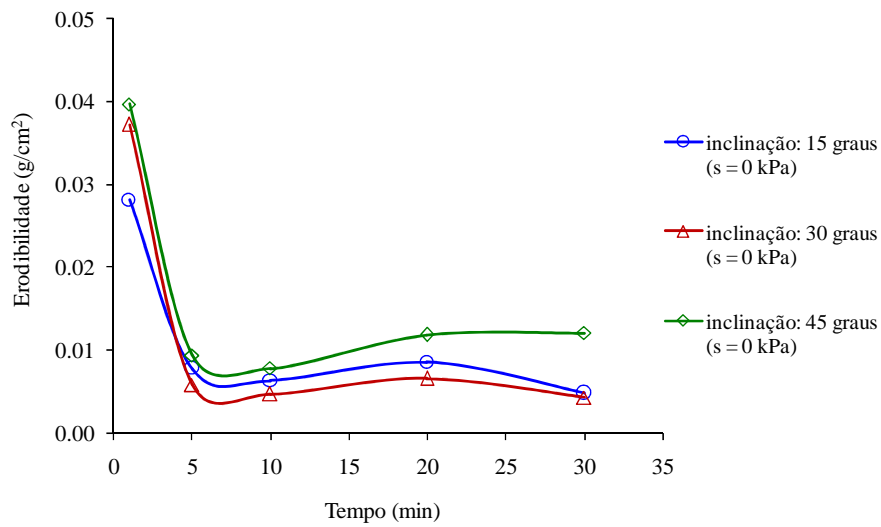
**Figura 83 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local B): sucção inicial = 12 kPa**



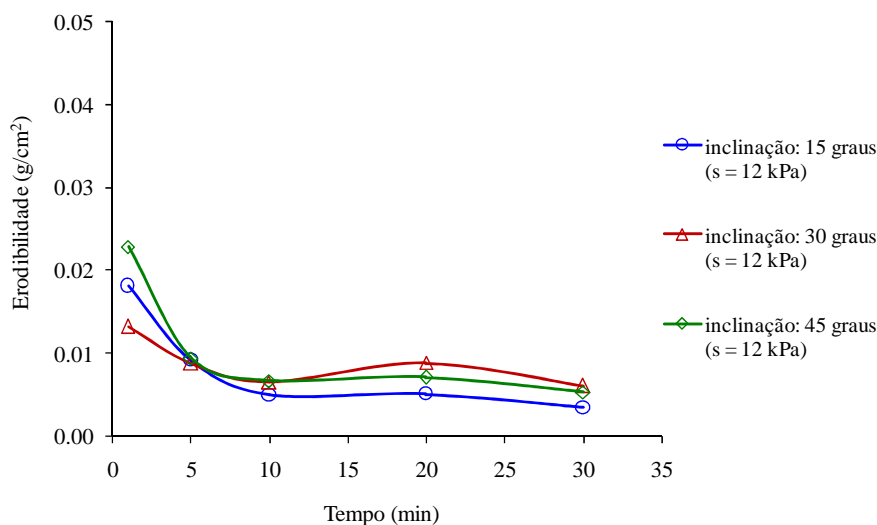
**Figura 84 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local B): sucção inicial > 15 MPa**



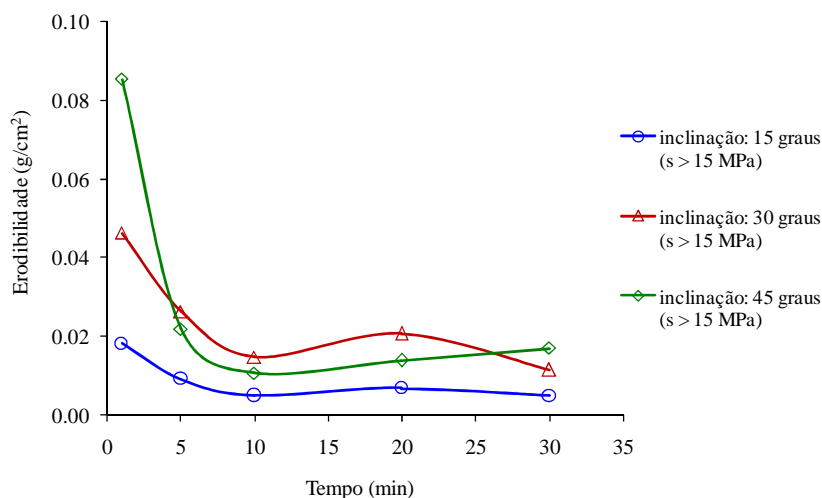
**Figura 85 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local B): sucção inicial = 0 kPa**



**Figura 86 - - Erodibilidade ao longo do tempo (Local B): sucção inicial = 12 kPa**



**Figura 87 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local B): sucção inicial > 15 MPa**



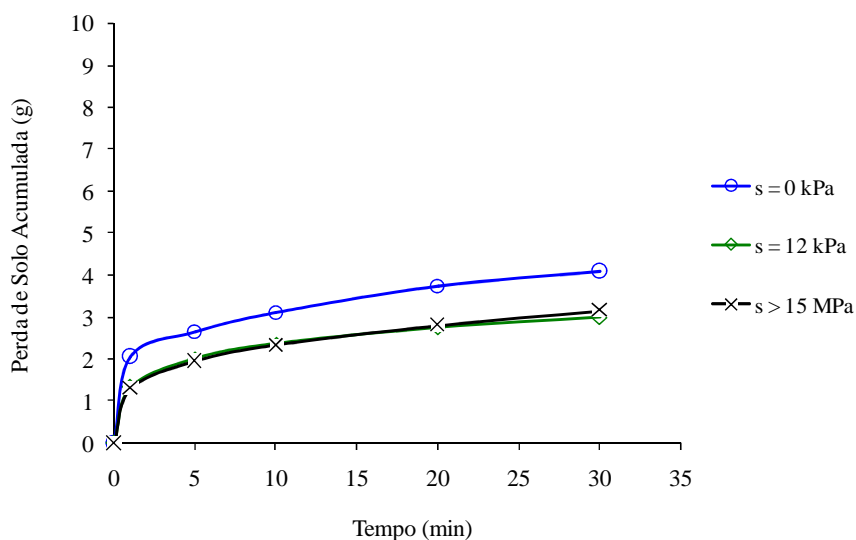
O solo do Local B se mostrou muito menos erodível que o do Local A nas diferentes inclinações e sucções utilizadas para os ensaios, uma vez que suas taxas totais de perda de solo para cada ensaio no Local B não ultrapassaram valores de 12 gramas (Figuras 82 a 84), enquanto que os valores de perda de solos no Local A chegaram a quase 500 gramas (Figuras 66 a 70).

Através da análise dos gráficos das Figuras 82 a 84, constata-se que a perda de solo varia em sua quantidade de acordo com a inclinação da rampa, seguindo a tendência do Local A. Assim, quanto maior a inclinação da rampa, maior a quantidade de perda de solo.

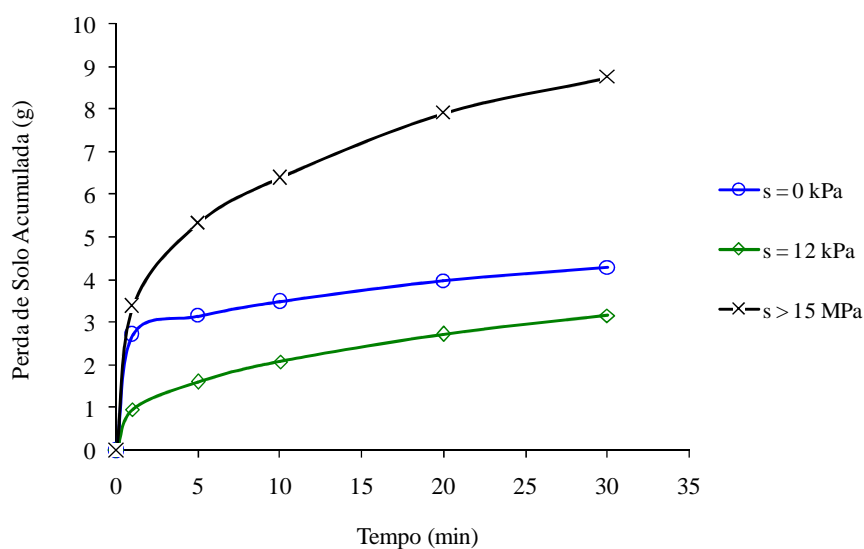
Os gráficos de erodibilidade apresentados nas Figuras 85 a 87 demonstram uma maior taxa de erodibilidade no tempo de 1 minuto de ensaio, independente da condição do ensaio (saturado ou não saturado), com tendência à diminuição ao longo do ensaio, diferentemente dos ensaios realizados no solo do Local A, em que a tendência predominante ocorre no tempo de 5 minutos.

- Agrupados para analisar o efeito da sucção inicial da amostra (0kPa, 12 kPa e > 15 MPa)

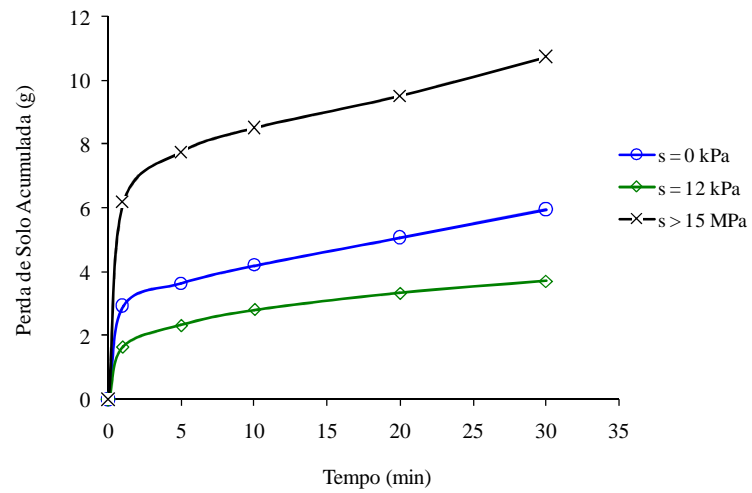
**Figura 88 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local B): inclinação 15°**



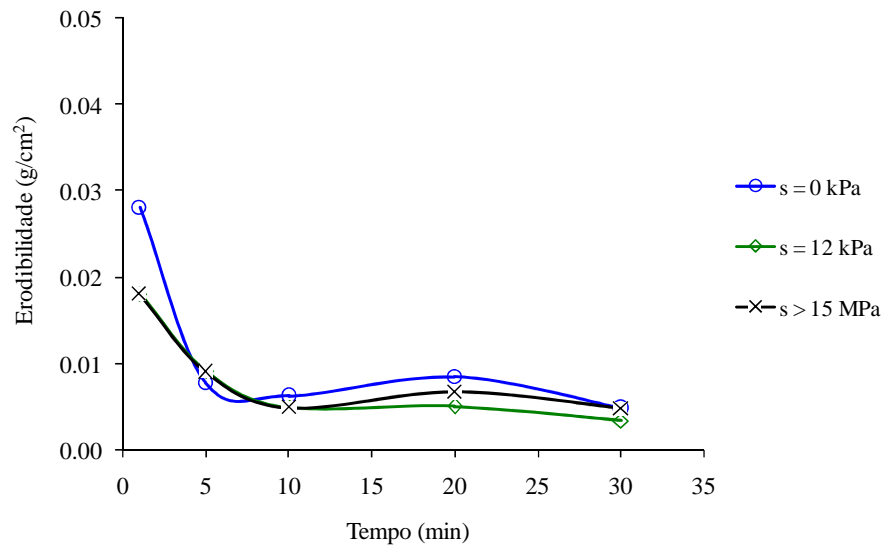
**Figura 89 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local B): inclinação 30°**

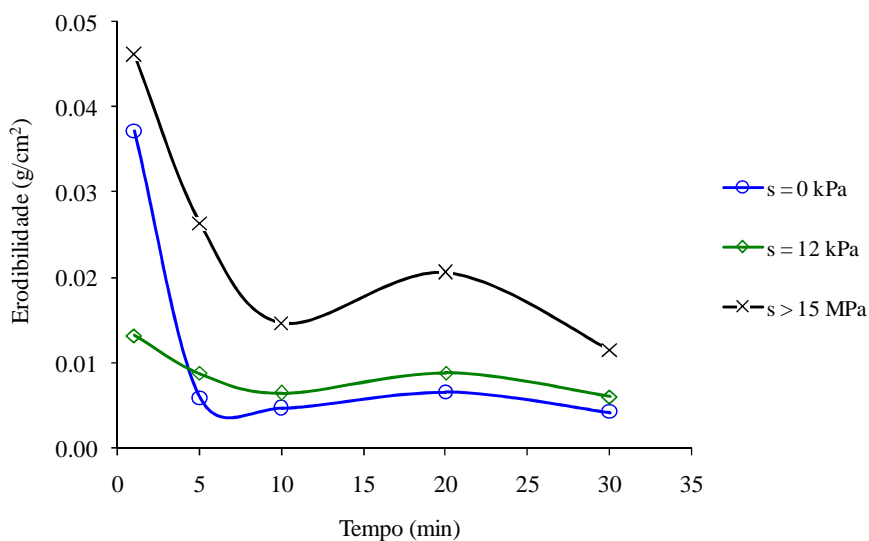
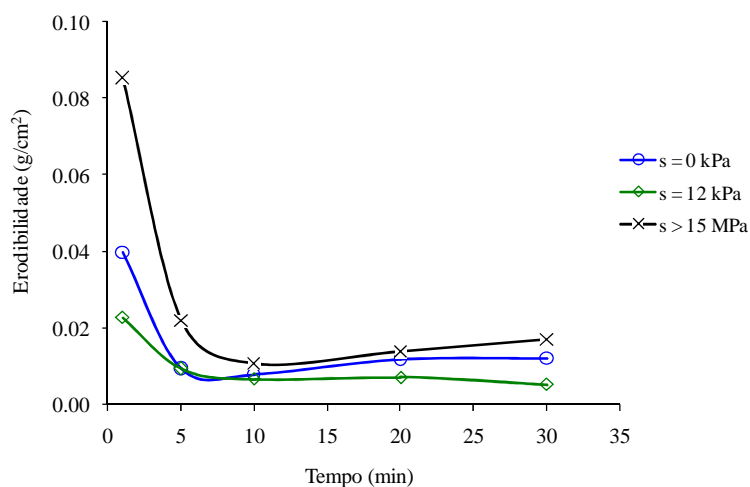


**Figura 90 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Local B): inclinação 45°**



**Figura 91 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local B): inclinação 15°**



**Figura 92 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local B): inclinação 30°****Figura 93 - Erodibilidade ao longo do tempo (Local B): inclinação 45°**

Os gráficos das Figuras 91 a 93 mostram que as maiores taxas de erodibilidade ocorrem em duas condições extremas de sucção: 0 kPa para o solo saturado e maiores que 15 MPa para o solo seco ao ar.

As amostras com sucção maiores que 15 MPa são as que apresentam as maiores taxas de perda de solo, de acordo com tendências verificadas em estudos anteriores, como em Bastos (1999), com exceção das amostras submetidas aos ensaios na inclinação de 15°, em que a maior taxa de erodibilidade ocorre para o solo com sucção de 0 kPa, notando-se que a inclinação da rampa possui influência sobre estas taxas, desta vez para o solo seco (sucção maior que 15 MPa), visto que esta tendência da inclinação da rampa em 45° também conferiu

taxas extremas no Local A, só que para o solo saturado, denotando a influência de condições extremas de sucção e inclinação na erodibilidade do solo.

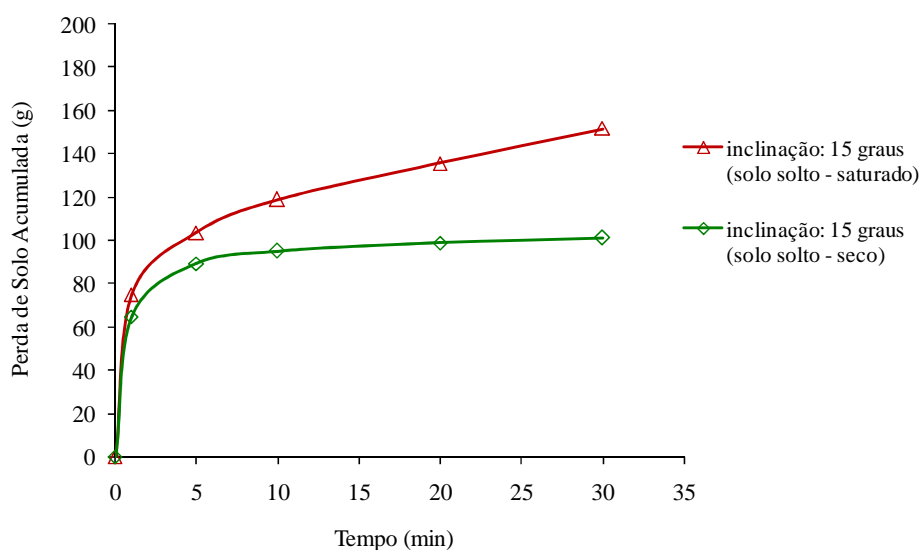
Em linhas gerais, os ensaios de Inderbitzen conduzidos para o Local B apresentaram taxas de erodibilidade e perda de solo acumulada muito abaixo dos resultados obtidos em estudos anteriormente realizados para solos deste tipo, como os apresentados por IDE (2009).

#### 4.3.3 – Avaliação do Efeito da Estrutura do Solo na Erodibilidade

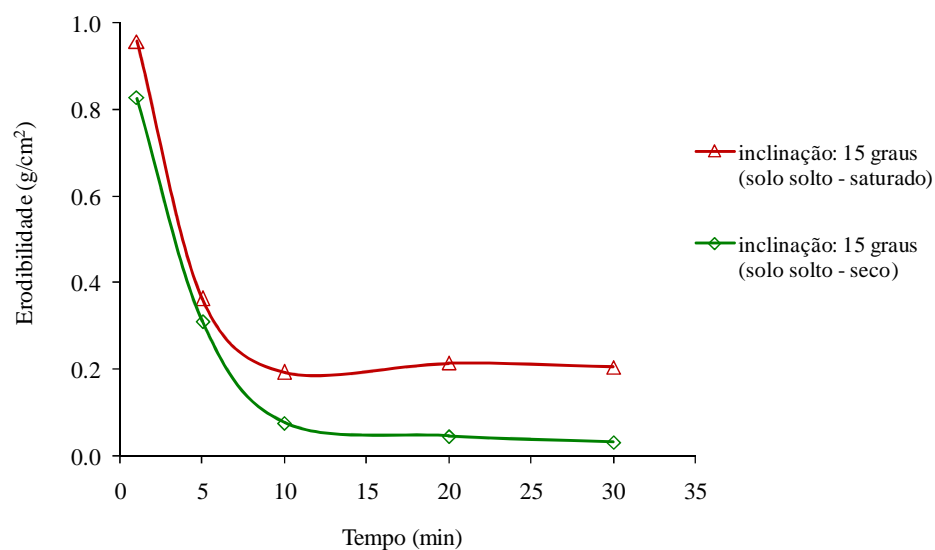
Os ensaios a seguir foram realizados a fim de obter informações para comparação do comportamento entre o solo indeformado coletado no Local A e o solo deformado ou “solto” do mesmo local. Havendo assim, uma condição extrema de erodibilidade do solo sem qualquer estrutura.

Foram realizados dois ensaios na inclinação de 15°: em amostras de solo saturado e seco ao ar. Os gráficos são apresentados a seguir nas Figuras 94 e 95.

**Figura 94 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (Solo Solto): inclinação 15°**

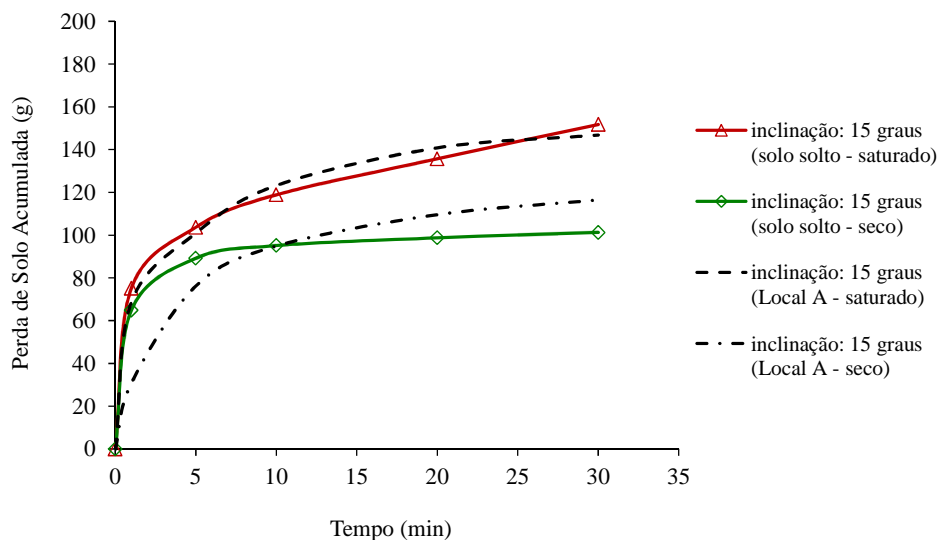


**Figura 95 - Erodibilidade ao longo do tempo (Solo Solto): inclinação 15°**



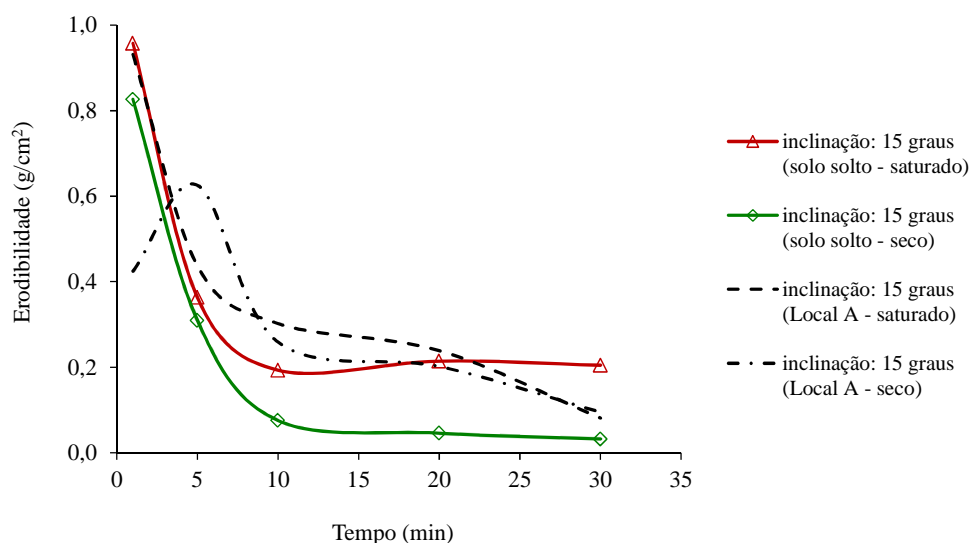
A análise das Figuras 94 e 95 demonstra maiores taxas de erodibilidade e perda de solo para as amostras saturadas sobre as amostras secas ao ar. Ao comparar os resultados desses gráficos com os resultados obtidos com as amostras indeformadas do solo do Local A (Figuras 96 e 97) é possível notar aspectos importantes do comportamento do solo.

**Figura 96 - Perda de solo acumulada ao longo do tempo (comparativa): inclinação 15°**





**Figura 97 - Erodibilidade ao longo do tempo (comparativa): inclinação 15°**



As amostras de solo referentes a estes ensaios foram retiradas do mesmo local. Porém, as amostras de solo identificadas como “Local A” são indeformadas, ou seja, o anel foi cravado no solo, retirando a amostra com sua estrutura de origem, enquanto que as amostras de solo identificadas como “Solo Solto” foram montadas em laboratório, com a deposição de amostras de solo deformado coletadas no local sobre os anéis utilizados no ensaio.

Apesar de serem amostras com estruturas diferentes, ambas seguiram o mesmo padrão de comportamento, com taxas de perda de solo e erodibilidade muito parecidas. Isso denota a condição de alta erodibilidade deste solo em condições naturais, uma vez que sua resistência à erosão é a mesma de um solo sem estrutura alguma, levando-se a considerar que este solo possui uma característica de extrema erodibilidade.

Na Figura 97 nota-se que o gráfico de erodibilidade do solo seco ao ar indeformado é diferente do solo seco ao ar solto. Enquanto o gráfico referente à amostra indeformada tem seu pico de maior erodibilidade no minuto 5, o gráfico referente à amostra deformada tem este pico no minuto 1. Esta diferença pode ser justificada pela sucção presente na amostra indeformada, que mantém as partículas unidas por certo tempo, até ocorrer a infiltração da água no solo. Porém, isto influencia apenas no tempo inicial de desenvolvimento da erosão, pois o resultado em termos de quantidade de material removido como visto anteriormente na figura 96, é o mesmo.

Comparando os resultados das três diferentes categorias de amostragem (Local A, B e Solo Solto), nota-se que as taxas de erodibilidade e perda de solo do Local B diferem-se consideravelmente das demais. Ide (2009) atribuiu este comportamento à localização dos

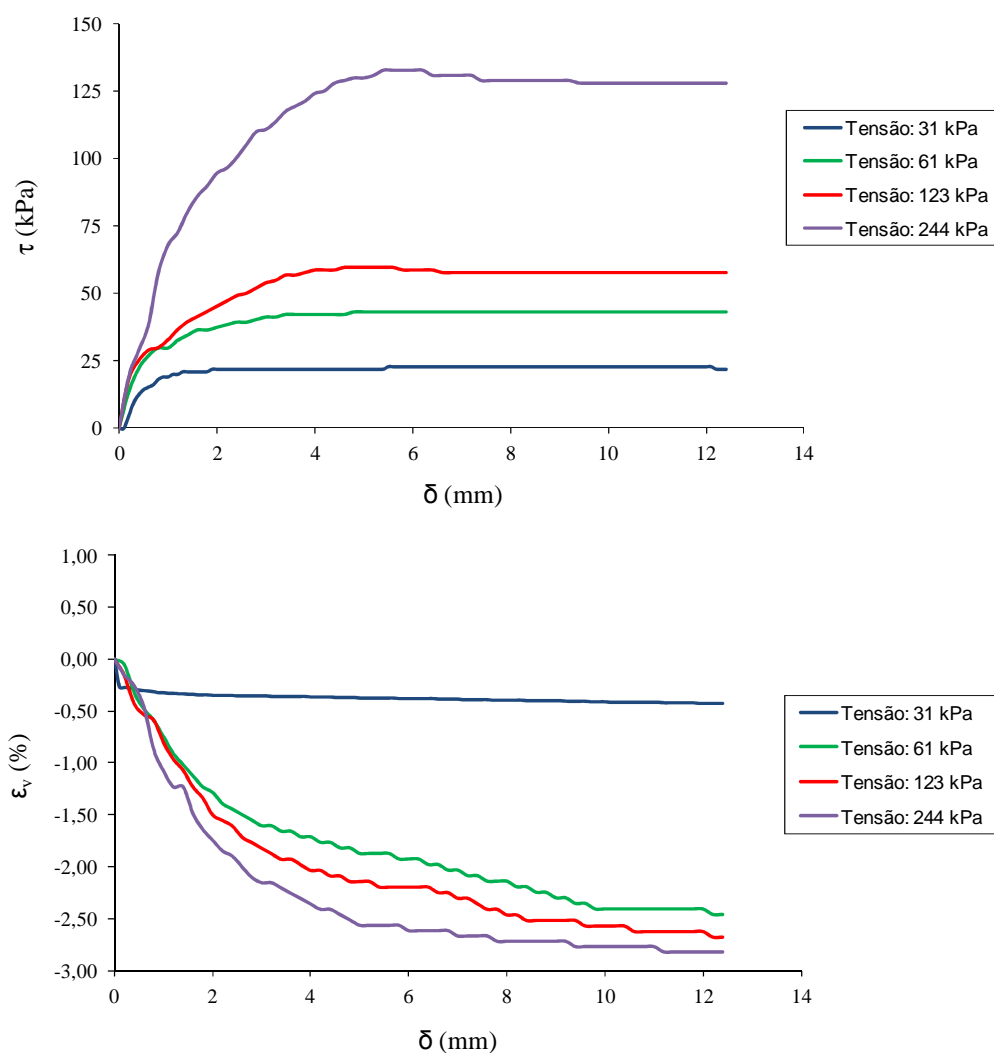
pontos de amostragem na geometria dos taludes. O Local B localiza-se no topo do talude, enquanto o Local A localiza-se sobre a rampa de declive do mesmo. A localização da massa de solo no talude, neste caso, pode sofrer a influência do fenômeno de carreamento de finos pela ação do escoamento subsuperficial da água: “Quanto mais distante do talude, maior é a porcentagem de argila, pois o fluxo de água tende primeiramente a carrear os finos mais próximos à sua borda. O inverso ocorre com a porcentagem de areia, que é maior nas bordas do talude e diminui quanto mais se distancia da borda”.

Essa tendência, no entanto, não foi confirmada através dos dados de granulometria apresentados na Tabela 4, pois a amostra do Local A possui basicamente a mesma composição granulométrica da amostra do Local B.

#### **4.4 - Resultados dos Ensaios de Cisalhamento Direto**

No total foram realizados 20 ensaios de cisalhamento direto. A obtenção de cada envoltória de resistência contou com a preparação de quatro corpos de prova moldados sob condições idênticas, resultando, portanto, na determinação de cinco envoltórias de resistência. Os resultados foram interpretados a partir dos gráficos que envolvem a tensão cisalhante ( $\tau$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta$ ) e a deformação volumétrica específica ( $\epsilon_v$ ) versus deslocamento horizontal ( $\delta$ ). Cada corpo de prova foi solicitado segundo tensões normais de 31, 61, 123 e 244 kPa, medindo-se as deformações produzidas pelas cargas.

Para ilustração, apresenta-se na Figura 98 curvas típicas dos ensaios do solo do Local B em condição saturada.

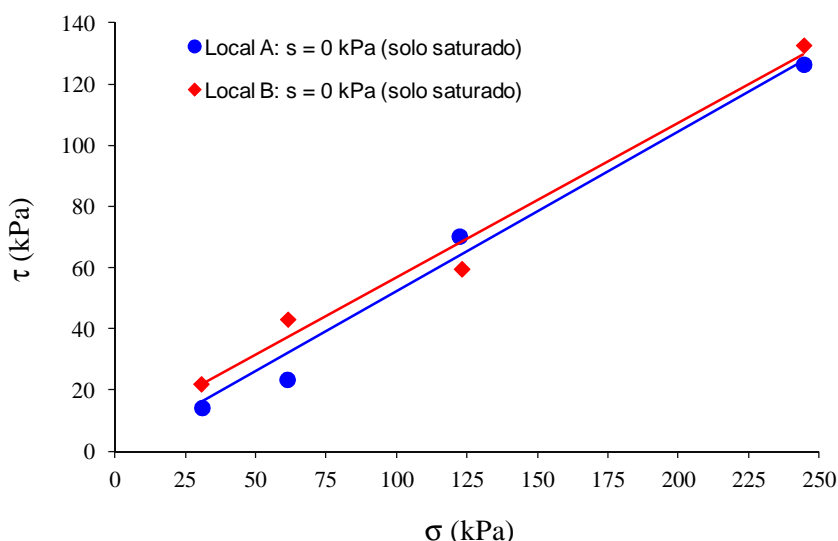
**Figura 98 - Resultados de ensaios de cisalhamento direto: solos saturados: Local B**

Para definição das tensões de ruptura, adotaram-se os pontos de máximo das curvas tensão cisalhante *versus* deslocamento. Deste modo, pares tensões normais e cisalhantes permitiram a definição de pontos no diagrama  $\sigma \times \tau$ . Assim, o ajuste de uma reta aos pontos obtidos permitiu a definição das envoltórias de resistência dos solos estudados.

Os parâmetros de resistência obtidos dessas envoltórias podem ser vistos na Tabela 8. Já na Figura 99 são apresentadas as envoltórias de resistência dos solos dos Locais A e B em condição saturada.

**Tabela 8 - Parâmetros de resistência dos solos dos Locais A e B**

Local	Sucção $s$ (kPa)	Coesão $c$ (kPa)	Ângulo de atrito $\phi$ (°)
A	0	0	27,5
A	50	14,2	33,9
A	200	32,3	30,7
A	> 15000	73,8	37,8
B	0	6,5	26,7

**Figura 99 - Envoltórias de resistência de solos saturados ( $s = 0$  kPa): Locais A e B**

Na Figura 99 é possível observar a diferença entre as envoltórias de resistência dos solos dos Locais A e B em condição saturada. O solo do Local A apresentou intercepto de coesão nulo, enquanto o solo do Local B exibiu um intercepto de coesão de 6,5 kPa. Já os ângulos de atrito são da mesma ordem de grandeza, ou seja, 27,5° e 26,7°, respectivamente, para os solos dos Locais A e B.

A baixa suscetibilidade à erosão do solo do Local B constatada nos ensaios de Inderbitzen pode estar relacionada ao intercepto de coesão deste solo, uma vez que o solo do Local A mostrou alta erodibilidade nos ensaios de Inderbitzen e não apresentou intercepto de coesão em condição saturada nos ensaios de cisalhamento direto.

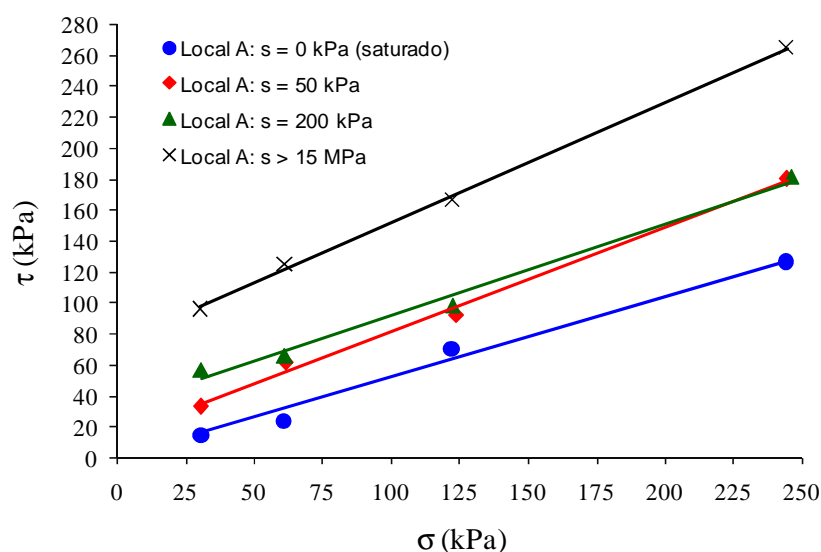
Outro fato que reforça esta constatação é que apesar dos solos possuírem o mesmo teor de finos, o solo do Local A possui maior índice de vazios e, por consequência, menor densidade que o solo do Local B, como pode ser visto na Tabela 5 dos índices físicos.

No entanto, é preciso ter certa cautela, já que os solos, de uma maneira geral, possuem características similares e o ensaio de cisalhamento direto apresenta algumas limitações como o fato do plano de ruptura no ensaio estar determinado a priori, podendo não ser, na realidade, o mais fraco.

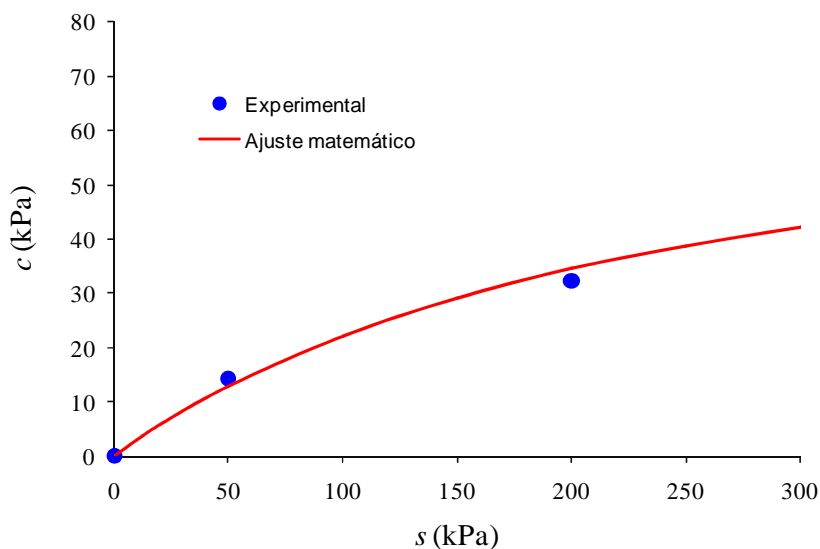
No tocante ao efeito da sucção na resistência dos solos foram realizados ensaios de cisalhamento direto com amostras de solo não saturado do Local A. Para imposição da sucção nas amostras utilizou-se a câmara de pressão de Richards. As sucções escolhidas foram 50 e 200 kPa. Alguns ensaios foram realizados com amostras de solo secas ao ar. Neste caso, a sucção foi determinada pelo método do papel filtro e resultou em um valor acima de 15 MPa.

Deste modo, foram realizados quatro ensaios para a obtenção de cada envoltória, três sucções diferentes, resultando em doze ensaios de cisalhamento direto para o solo do Local A em condição não saturada. Destaca-se que os ensaios foram conduzidos sem nenhuma técnica de controle de sucção. Na Figura 100 são apresentadas as envoltórias obtidas nos diferentes valores de sucção, junto com a envoltória do solo saturado, enquanto na Figura 101 é mostrado o resultado de um ajuste matemático para os pontos experimentais do intercepto de coesão.

**Figura 100 - Envoltórias de resistência dos solos saturados e não saturados do Local A**



**Figura 101 - Variação do intercepto de coesão com a sucção no solo do Local A**



Os resultados apresentados nas Figuras 100 e 101 demonstram que o aumento da sucção provoca um acréscimo da resistência ao cisalhamento do solo. Apesar dos ensaios terem sido realizados com solo tropical arenoso e sem o controle de sucção, os resultados obtidos apresentam a mesma tendência de comportamento dos resultados de Escario & Saez (1986), onde a resistência varia de forma hiperbólica com a sucção. A partir da curva da Figura 101 é possível observar que há um trecho inicial com alta inclinação, ou seja, para uma pequena variação de sucção tem-se uma grande variação no intercepto de coesão do solo.

Em síntese, pesquisas mais recentes, onde foram empregadas técnicas de controle de sucção, como as realizadas por Oliveira (2004), Cardoso Jr. (2006) e Georgetti (2010), mostram resultados semelhantes, que apesar de se tratarem de solos com características semelhantes, e não idênticas aos solos deste estudo, podem representar uma importante fonte de análise e comparação, uma vez que existem pouquíssimos estudos relacionando estes dois parâmetros.

Oliveira (2004) investigou a resistência ao cisalhamento de um solo residual de gnaiss compactado não saturado da cidade de São Paulo. O autor realizou ensaios de compressão triaxial saturados do tipo CU e CD e não saturados do tipo CW e ensaios de compressão simples, utilizando um tensiômetro de alta capacidade (TAC) em amostras preparadas em diferentes condições de moldagem (moldadas no ramo seco, ramo úmido e na umidade

ótima). Dos resultados, verificou-se que o aumento da sucção torna o corpo de prova mais resistente, independente da condição de moldagem.

A mesma tendência de comportamento também foi observada por Cardoso Jr. (2006) após realizar ensaios de resistência ao cisalhamento no aparato de cisalhamento direto para a condição inundada e no aparato de compressão simples com medida direta de sucção, por meio de tensiômetro de alta capacidade (TAC), para a condição não saturada.

Georgetti (2010) estudou a resistência ao cisalhamento de um solo arenoso em amostras compactadas não saturadas, utilizando ensaios de compressão triaxial com teor de umidade constante (CW) através da técnica de translação de eixos de Hilf (1956). Os corpos de prova foram compactados dinamicamente na energia na energia Proctor normal com graus de compactação de 95% e desvio de umidade de -1% e os resultados obtidos pela autora mostram também comportamentos semelhantes aos observados para o solo estudado na presente pesquisa.

Outro aspecto de interesse e que também foi constatado por Georgetti (2010) é referente à envoltória definida a partir dos ensaios com solo seco ao ar que forneceram parâmetros de resistência elevados em relação aos demais, o que possivelmente está associado à natureza laterítica do solo. O solo do Local A seco ao ar apresentou intercepto de coesão de 73,8 kPa e ângulo de atrito de 37,8°, conforme ilustrado na Tabela 8.

## 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Os estudos de erodibilidade diretas deste solo, conduzidos pelo método Inderbitzen (1961) verificaram altas taxas de perda de solo e erodibilidade ao longo do tempo para o solo do Local A, conferindo alto grau de erodibilidade ao mesmo, de acordo com o comportamento constatado em campo. O solo do Local A, considerado mais erodível, apresentou taxas máximas de erodibilidade de até 5 g/cm<sup>2</sup>, que avaliadas em função do tempo chegam a 0,16 g/cm<sup>2</sup>/min, que segundo sugere Bastos (1999) são considerados mais erodíveis, enquanto os menos erodíveis apresentam taxa de perda de solo inferiores a 0,001 g/cm<sup>2</sup>/min.

Em linhas gerais, os ensaios de Inderbitzen conduzidos para o Local B apresentaram taxas de erodibilidade e perda de solo acumulada muito abaixo dos resultados obtidos em estudos anteriormente realizados no local, como os apresentados por IDE (2009). De acordo com esta autora, em seus estudos anteriores foi constatado que a localização do solo na geometria dos taludes confere diferenças em sua granulometria que podem justificar as diferenças nas taxas de erodibilidade, pois solos com presença de maior quantidade de finos podem possuir mais resistência à erosão.

Dessa forma, a localização dos solos faz com que este sofra influência do fenômeno de carreamento de finos pela ação do escoamento subsuperficial da água, o que justificaria que o Local B, localizado mais distante do talude possuía maior quantidade de finos do que o Local A, localizado na rampa de declive. No entanto, nesta pesquisa esta dinâmica não foi constatada, pois existe uma pequena diferença na quantidade de finos entre os dois solos. Porém, constatou-se que a baixa suscetibilidade à erosão do solo do Local B pode estar relacionada ao intercepto de coesão deste solo (6,5 kPa), o que atribui uma certa resistência entre as partículas quando saturado, diferentemente do solo do Local A, que não apresentou intercepto de coesão em condição saturada nos ensaios de cisalhamento direto.

É importante destacar que os solos dos Locais A e B deste trabalho possuem granulometria semelhante, mas o solo do Local A é mais poroso e, por consequência, menos denso que o solo do Local B.

A perda de solo varia em sua quantidade de acordo com a inclinação da rampa. Assim, quanto maior a inclinação da rampa, maior a quantidade de perda de solo.

Para o solo do Local B, as maiores taxas de erodibilidade ocorrem para duas condições extremas de sucção: 0 kPa para o solo saturado e maiores que 15 MPa para o solo seco ao ar. As amostras com sucção maiores que 15 MPa são as que apresentam as maiores taxas, com



exceção das amostras submetidas aos ensaios na inclinação de 15°, em que a maior taxa de erodibilidade ocorre para o solo com sucção de 0 kPa.

Para o Local A, que se mostrou com maior representatividade acerca do processo erosivo em questão, pois apresentou taxas de erodibilidade semelhantes à de estudos anteriores como o de Ide (2009), a maior taxa de erodibilidade ocorreu no tempo de 5 minutos, com uma tendência à estabilização nos tempos seguintes. Essa tendência ocorreu em diferentes tipos de amostras utilizadas, exceto para a amostra com sucção de 0 kPa, que apresenta o pico de maior perda de solo no tempo de 1 minuto. Isso pode demonstrar a influência da sucção nos primeiros instantes de contato do fluxo de água com o solo.

Além disso, para este solo, foi constatado a partir dos ensaios de cisalhamento direto que quanto maior a sucção, maior a resistência ao cisalhamento. Porém este fator não confere resistência à erosão, pois uma vez que o solo é infiltrado pela água as forças de sucção são alteradas, perdendo esta resistência inicial.

De maneira geral, os resultados obtidos a partir do método Inderbitzen neste estudo apresentaram tendências parecidas que se mostraram significativas para avaliação da erodibilidade do solo local, apesar da diferença na quantidade de solo carregado entre as duas amostras. Devido a esta diferença, é importante destacar a necessidade de uma análise mais detalhada acerca da utilização deste método, a fim de verificar sua eficácia em solos arenosos tropicais. Desta forma, sugere-se a como continuidade deste estudo, a realização de mais ensaios de Inderbitzen com condições de contorno e compacidade das amostras variáveis, como:

- diferentes valores de vazão, para verificação da influência da intensidade do escoamento no processo erosivo;
- simulação do efeito de gotejamento;
- amostras de solo compactadas para, a partir desta técnica, verificar uma possível melhoria do comportamento do solo, com a diminuição das taxas de erodibilidade.

Além disso, sugere-se também como continuidade deste estudo, uma análise mais detalhada acerca da relação entre a resistência do solo e a variação de sua sucção, com a realização de ensaios de resistência com sucção controlada, por meio de ensaios de compressão triaxial.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 7181: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR 6508: grãos de solo que passa na peneira 4,8mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ALMEIDA FILHO, G. S. **Diagnóstico de Processos Erosivos Lineares Associados a Eventos pluviosos no Município de Bauru, SP**. Dissertação de Mestrado. Campinas: Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2000.

ALVES, J. X.S. **As erosões urbanas de bauru como forma de consequência da forma de planejamento e expansão dos loteamentos privados e públicos**. Anais do 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Bauru, 1995.

\_\_\_\_\_. Ocorrência de voçorocas e erosões urbanas. 2001. In: **Voçorocas do poder público: na lei, forma e gestão urbana da cidade sem limites**. Tese de doutorado. São Paulo: FAU/USP, 2001.

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

ARAÚJO, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/SP**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: EESC/USP, 2011.

BARALDI, I.M. **Retratos da educação matemática na região de Bauru (SP): uma história em construção**. Tese de Doutorado. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 2003.

BARBOSA, V L. NASCIMENTO JUNIOR, A F. **O plano diretor e as situações ambiental e urbana em Bauru – SP**. Londrina: Geografia, v.17, n.2, 2008.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1999.

BAURU. Secretaria Municipal do Meio Ambiente; Departamento de Água e Esgoto. **Texto básico sobre água em Bauru**, 2007.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4.ed. São Paulo: Ícone, 1999.

BOULTON, G. S. **Processes of glacial erosion on different substrata**. Journal of Glaciology, Londres/Inglaterra, 1979.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRAIDA, J.A. & CASSOL, E.A. **Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco-arenoso**. R. Bras. Ci. Solo, 1996.

BRASIL. Leis, Decretos, etc. Resolução CONAMA nº 001, de 18 de junho de 1986. In.: **Diário Oficial da União**. Distrito Federal, jul. 1986.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Mecanismos de estabilização de taludes e erosões**. In: IV Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas. Salvador/BA, 2005.

CAMARGO, V. M. de. **A paisagem desigual: crise do capital, verticalização e favelização no espaço urbano de Bauru**. Trabalho Final de Graduação. Bauru: FAAC/UNESP, 2005.

CARDOSO JÚNIOR, C. R. **Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006.

CARVALHO, V.S.; TELLA, M. A. Sociedade de consumo e sustentabilidade planetária. **Debates Sócio-Ambientais**. Centro de Estudos da Cultura Contemporânea, SP-Brasil. Ano 11- n.5, 1997.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. São Paulo: Contexto, 1991.

CAVAGUTI, N. **Análise global da erosão linear na área urbana de Bauru – SP**. In: V Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Bauru, 1995.

CEPAGRI (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA) - UNICAMP. **Clima dos municípios paulistas**.

Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/vlima-dos-municipios-paulistas.html>. Acesso em: 10 de junho de 2012

CERRI, L. E. S.; SILVA, J. A. F.; SANTOS, P. H. P. **Erosão do solo: aspectos conceituais**. Revista Brasileira em Geociências. v.2, n.6, 1997.

CHANDLER, R. J.; HARWOOD, A. H.; SKINNER, P. J. **Sample disturbance in London Clay**. Géotechnique, 42(4), 1992.

CORGHI, F. N. **Urbanização e segregação sócio-espacial em Bauru (SP): Um estudo de caso sobre a Bacia Hidrográfica do Córrego Água Comprida**. Dissertação de Mestrado. Campinas: Instituto de Geociências/UNICAMP, 2008.

DREW, David. **Processos interativos homem: meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

EMBLETON, C.; King, C. A. M. **Glacial geomorphology**. Londres/Inglaterra: Edward Arnold, 1975.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA BAURU. Secretaria Municipal do Meio Ambiente; Departamento de Água e Esgoto, 2007.

ELLISON, W.D. Soil erosion studies. **Agronomy Engineering**, Washington v.28, 1947.

ESCARIO, V.; SAEZ, J. **The shear strength of partly saturated soils**. Géotechnique, 36(3): 1986.

FACIO, J, A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado. Brasília: Departamento de Engenharia Civil/UFRGS, 1991.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; e GARCIAS, C.M. **Drenagem e controle de erosão urbana**. 2 edição. Curitiba: Editora universitária Champagnat, 1988.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim/RS**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria/RS: UFSM, 2011.

FERREIRA, P. H. de M. **Princípios de manejo e conservação do solo**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1981.

FOSTER, G.R.; MEYER, L.D. Soil erosion and sedimentation by water – an overview. In: **Proceedings of the National Symposium on soil Erosion and Sedimentation by water**, Illinois. ASAE, St Joseph, 1977.

FOURNIER, F.; **Climat et Erosion**. PUF, Paris, 1960.

FREDLUND, D.G.; MORGENTERN, N.R. Stress state for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE 103, no GT5, May/1977.

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley, New York, 1993.

FREDLUND, D. G.; MORGERSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. **The shear strength of unsaturated soils**. Canadian Geotechnical Journal, v.15, n.3, 1978.

FIGUEIREDO, J. C.; PAZ, R. S. **Nova classificação climática e o aspecto climatológico da cidade de Bauru/São Paulo**. Belém/PA: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010.

GALETI, P. A. **Prática de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1987.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante (CW)**. São Carlos. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Erosão dos solos. In: **Geomorfologia do Brasil**. S.B. da CUNHA.; A. J. T. GUERRA (orgs.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

GUERRA, A. J. T. O início do Processo Erosivo. In: **Erosão e Conservação dos Solos - Conceitos, Temas e Aplicações**. A. J. T. GUERRA.; SILVA, A, S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs.). 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2007.

\_\_\_\_\_. Processos Erosivos nas Encostas. In: **Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos**. S.B. CUNHA.; GUERRA, A. J. T. (orgs.). 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

\_\_\_\_\_. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Bertrand Brasil, 1994.

HILLEL, D. **Soil-water – Physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971.

HORTON, R. E. **Erosional development of streams their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology**. Bulletin of the Geological Society of America, Colorado, v. 56, 1945.

IBGE (Brasil). **IBGE cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>> Acesso em: 15 de maio de 2012.

IDE, D. M. **Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana**. Dissertação de Mestrado. São Carlos/SP: EESC/USP, 2009.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. **Geologia de Engenharia**. Processos de Dinâmica Superficial. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 1998.

IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, escala 1:500.000 (caderno 6), IPT, São Paulo, 1981.

\_\_\_\_\_. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**, escala 1: 1.000.000 (caderno 5), IPT, São Paulo, 1981.

\_\_\_\_\_. **Plano de obras de contenção das erosões urbanas no município de Bauru, SP – 2ª fase: Aplicação da carta geotécnica**. São Paulo: Relatório nº 32207, 1994.

IWASA, O, Y.; FENDRICH, R. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 1998.

LAGO, A, L.; ELIS, V, R.; GIACHETI, H, L. **Aplicação Integrada de Métodos Geofísicos em uma Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos em Bauru – SP**. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 24 (3), 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2006000300005](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2006000300005)>. Acesso em 30 de agosto de 2013.

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

LEMOS, C. F.; SILVEIRA, C. T.; MILANI, J. R.; OKA-FIORI, C.; FIORI, P, P. A. **Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do rio da Bucha (PR)**. In: Geografar. V. 2, 2ª ed. Curitiba: Revista Eletrônica do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFPR, 2007.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 1ª Edição. Piracicaba/SP: Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, 1995.

MAGALHÃES, R. A. **Erosão: definições, tipos e formas de controle**. Goiânia: Anais do VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2001.

MARIANO, Z. F.; SCOPEL, I.; PEIXINHO, D. M.; SPUZA, M. B.; **A relação homem-natureza e os discursos ambientais**. São Paulo/SP: Revista do Departamento de Geografia/USP, V.22, 2011.

MARINHO, F, A, M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, fundamentais e aplicados**. Tese de Livre Docência. São Paulo/SP: Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações – USP, 2005.

MENDES, C. A.R. Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro/RJ: COPPE/UFRJ, 2006.

MENDONÇA, J, K, S. e GUERRA, A. J. T. **Erosão dos Solos e a Questão Ambiental**. IN: Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. GUERRA, A. J. T. e VITTE, C. A (orgs.). Rio de Janeiro/RJ: Ed. Bertrand Brasil, 2004.

MENEZES, M, B, M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudo de erodibilidade**. Dissertação de Mestrado. São Carlos/SP: EESC/USP, 2010.

MONDELLI, G. **Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Tese de doutorado. São Carlos/SP: EESC/USP, 2008.

MORGAN, R. C. P. **Soil erosion and conservation**. New York: Longmann, 1986.

MORTARI, D. **Caracterização geotécnica e análise de processo evolutivo de erosões no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado. Brasília/DF: Departamento de Engenharia Civil/UNB, 1994.

NEFUSSI, N.; LICCO, E. **Solo Urbano e Meio Ambiente**. Disponível em: <http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/meioamb/mamburb/apresent/apresent.htm>. Acesso em: 25 out de 2012.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. Legenda Expandida. Campinas: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999.

OLIVEIRA, O.M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. São Paulo. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

PEDRON, F. A. de; et al. Levantamento e classificação de solos em áreas urbanas: importância, limitações e aplicações, v. 13, n.2, Pelotas/RS: **Revista Brasileira de Agrociência**, 2007.

PEJON, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP, escala 1:100000: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. Tese de Doutorado. EESC/USP. São Carlos, 1992.

PROIN/CAPES e UNESP/IGCE. **Material Didático: arquivos de transparências (CD)**. Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999.

RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro/RJ: Departamento de Engenharia Civil/PUC-Rio, 2003.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura. **Manual de conservação do solo e água: uso adequado e preservação dos recursos naturais renováveis**. 3ª ed. Porto Alegre, 1985.

RIYIS, M. T. **Investigação geoambiental com tomada de decisão em campo utilizando o piezocone de resistividade como ferramenta de alta resolução**. Dissertação de Mestrado. Bauru/SP: FEB/UNESP, 2012.



RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. Tese de Doutorado. Departamento de Geotecnia. São Carlos. EESC/USP. 2007.

\_\_\_\_\_. Fundamentos em Geotecnia. Material Didático. Curso de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. UNESP/Bauru, 2012.

ROHM, S.A. **Resistência ao cisalhamento de um solo arenoso laterizado não saturado da região de São Carlos – SP**. Tese (Doutorado em Geotecnia). São Carlos: EESC/USP, 1992.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo/SP**. Laboratório de Geomorfologia do Departamento de Geografia/USP e Laboratório de Geologia Aplicada/IPT – FAPESP. Mapas e Relatório, 1997.

SALOMÃO, F.X.T.; IWASA, O.Y. **Erosão e ocupação rural e urbana**. São Paulo/SP: 4º Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. ABGE/IPT, 1995.

SALOMÃO, F, X, DE T. **Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural**. Tese de Doutorado. São Paulo: Departamento de Geografia/USP, 1994.

\_\_\_\_\_. **Solos do Arenito Bauru**. In: PEREIRA, V. de P.. et al. (ED) Solos altamente susceptíveis à erosão. Jaboticabal/SP: FCAV – UNESP/SBCS, 1994.

SANTOS, J, A. **Cidade e Natureza: Relações entre a produção do espaço urbano, a degradação ambiental e os movimentos sociais em Bauru – SP**. Tese de Doutorado. Campinas: Instituto de Geociências/UNICAMP, 2008.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. Coordenadoria de Licenciamento Ambiental e Proteção de Recursos Naturais. Protocolo GRAPROHAB nº 5.457. Certificado de aprovação GRAPROHAB. Empreendimento: Loteamento “Residencial Odete”. Bauru: Departamento Estadual de proteção de Recursos Naturais, 2002.

SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados). **Perfil Municipal 2013**. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfilMunEstado.php>>. Acesso em: 22 de agosto de 2013.

SILVA, A, M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: EESC/USP, 2005.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. São Paulo: RiMa, 2003.

SILVA, M.; CRUZ, R.; CAVAGUTI, N. **Efeitos de Tipos de Urbanização na Formação de Voçorocas**. Bauru: Anais do 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 1995.

SILVEIRA, L. L. L. **Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão da Bacia dos rios Araraquara e Cubatão – SP**, Escala 1: 50.000. Dissertação de Mestrado. São Carlos/SP: EESC/USP, 2002.

SUAREZ, F. de C.; RODRIGUEZ, G. A. **Relaciones entre el crecimiento del cafeto y algunos factores climáticos**. Chichiná, Campanã de Defensa y Restauración de Suelos, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Boletín Técnico, 1956.

SUARES DE CASTRO, F. **Conservacións de suelos**. Madrid, Salvat, 1956.

VIEIRA, J. F. **Estudos dos processos erosivos mais extensivos**. São Paulo: USP, 1978.

VILAR, O. M. **Formulação de um modelo matemático para erosão dos solos pela chuva**. Tese de Doutorado. São Carlos/SP: EESC/USP, 1987.

\_\_\_\_\_. **Introdução à mecânica dos solos não saturados**. Notas de aula da disciplina de Resistência ao cisalhamento dos solos. São Carlos: EESC/USP – Departamento de Geotecnia, 2002.

VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. **Erosão dos solos**. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIEIRO, J. H. (Ed.). Solos do interior de São Paulo. São Carlos/SP: Cap. 7. 1993.

VOLK, L. B. S. **Erosão hídrica relacionada às condições físicas da superfície e subsuperfície do solo, induzidas por formas de cultivo e de manejo de resíduos culturais**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre/RS: Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo/UFRGS, 2002.

ZUGLIANI, M. T. T. **Variações na composição e estrutura da comunidade arbórea de um fragmento de floresta semidecidual em Bauru (SP), relacionadas a diferentes históricos de perturbações antrópicas**. Tese de Doutorado. Campinas/SP: Instituto de Biologia/UNICAMP, 2001.