

ANA MARIA STEPHAN

**ANÁLISE DE PROCESSOS EROSIVOS SUPERFICIAIS POR MEIO DE  
ENSAIOS DE INDERBITZEN**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S827a  
2010

Stephan, Ana Maria, 1968-

Análise de processos erosivos superficiais por meio de  
ensaio de Inderbitzen / Ana Maria Stephan. – Viçosa, MG,  
2010.

xxv, 165f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Roberto Francisco de Azevedo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 142-146.

1. Erosão - Testes. 2. Inderbitzen, Aparelho de.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.151363

ANA MARIA STEPHAN

**ANÁLISE DE PROCESSOS EROSIVOS SUPERFICIAIS POR MEIO DE  
ENSAIOS DE INDERBITZEN**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

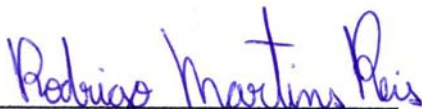
APROVADA: 26 de fevereiro de 2010.



Wander Rodrigues da Silva  
Coorientador



Prof. Eduardo Antonio Gomes Marques  
Coorientador



Prof. Rodrigo Martins Reis



Prof. Isabel C. D. D. Azevedo



Prof. Roberto Francisco de Azevedo  
Orientador

***Dedico este trabalho ao meu maior exemplo de vida, grande amor da minha vida: MARIA JOSÉ DUQUE STEPHAN (SAUDADES), que sempre me estimulou a dar este grande passo, com muita sabedoria, oração, discernimento, bom senso e dedicação, encorajando-me nas horas difíceis e me aplaudindo nos momentos de glória.***

***Obrigada por ser minha mãe. Te amo muito!***

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, essência da minha vida, tantas vezes desacreditei... Obrigado pela força nos momentos difíceis, em que eu achava que jamais ia conseguir. Muitas vezes, não entendia de onde vinha esta força que me fazia prosseguir. Esta força só poderia vir de Ti!

Ao meu filho(a) que está por vir... propósito do meu viver, que já compartilha comigo este trabalho!

Ao professor Roberto Francisco de Azevedo, na qualidade de amigo e orientador, pelo carinho, caráter, sabedoria, pelo tempo que generosamente me dedicou, transmitindo-me os melhores e mais úteis ensinamentos, com paciência, lucidez e confiança. Gostaria de ter o dom de um poeta ou compositor para descrever, através de um lindo poema ou uma linda canção, todo o meu carinho e admiração. Sou inteiramente grata por essa orientação, que vai além da tese, bem como pelo imenso apoio nos momentos de dificuldade e de dor.

Ao coorientador Dr. Wander Rodrigues da Silva, pelas ricas orientações na montagem dos equipamentos desenvolvidos neste trabalho, assim como pela sua amizade, que muito me ajudou a superar as situações-limite de prazo, estimulando-me a seguir em frente.

Ao professor Rodrigo Martins Reis, coorientador, que com muita dedicação, conhecimento e estímulo contribuiu para este trabalho.

Aos conselheiros Professores Eduardo Antônio Gomes Marques e Izabel Christina d'Almeida Duarte Azevedo, pelos ensinamentos, incentivo, apoio e amizade demonstrados ao longo desses anos.

Ao meu pai o mais profundo agradecimento, por seu amor, crença e compreensão – infundiu a confiança necessária para realizar os meus sonhos.

Ao meu amor Carlos Eduardo Lawall, que sempre acreditou que eu conseguiria chegar, pelo apoio incondicional, pela disposição em ajudar-me sempre.

Aos meus irmãos José Carlos Stephan e Maria Regina Stephan, pelo amor incondicional.

Ao Leandro, meu filho-sobrinho por estar conosco e fazer parte da minha vida.

Aos meus sobrinhos Lairton Costa Andrade Filho, Luisa Costa Andrade Stephan e Flávia Batista Stephan, que trazem tanta luz e gosto para minha vida, um amor especial.

À memória de Ana Galloneti Duque, minha avó e aos meus avós Geraldo Mariano Duque e Lindalva Augusta Stephan, pelo grande exemplo de vida.

À minha cunhada Romilda, por fazer parte de nossa família com tanta alegria e me dando sobrinhos maravilhosos.

Ao meu cunhado e médico Dr. Lairton Costa Andrade, que com os seus conhecimentos, apoio e dedicação ajudou-me a superar momentos tão difíceis.

Ao Fernando Fusaro, pelo apoio durante parte inicial de minha vida acadêmica na UFV.

À Daniela Lawall Vale, pela grande contribuição e paciência neste trabalho.

Às amigas Márcia Lawall, Marli Faria do Amaral Silva, Roseli Inácio Pianta e Marlene Inácio, sempre tão dedicadas e preocupadas comigo e com a tese. Com certeza, amigas, sem essa cumplicidade e carinho teria sido mais difícil. Meu muitíssimo obrigado pelas múltiplas e inestimáveis contribuições.

À CM063 Esquadrias de Alumínio Ltda, pela contribuição na confecção do equipamento e doação de materiais.

Às também companheiras dessa aventura singular no Instituto de Estudos Tecnológicos e Sequências da UNIPAC, Carmem Juste, Antônia, Mariane, Marileide, Tatiana, Delma, Hermínio, Mota, Aline, Shirlei, Sandrinha, Profa. Luciana Braga e Prof Humberto Chiaini de Oliveira Neto, pelo afeto, pela disposição e pela responsabilidade com que se prestaram a dividir o peso das decisões nas competentes substituições de minha chefia. Sou-lhes igualmente grata, bem como pelos incentivos nos momentos difíceis.

Aos demais professores do Instituto de Estudos Tecnológicos, pelo carinho, pela amizade, respeito e dedicação.

Às secretárias do DEC Cristina Beatriz Schemes Costa e Maria Cristina de Figueiredo, pelo carinho, ajuda e dedicação.

Ao funcionário Paulo Capelão, pela grande contribuição, dedicação e carinho com os ensaios de laboratório.

Aos demais funcionários do LEC Paulo P3, Jorge, Júlio, José Mário (*in memoriam*), Dedé e André.

Ao Walmir Pianta, pelo apoio na confecção das rampas, pela amizade e disposição.

Aos professores Cezar Augusto Burkert Bastos, Claudia Francisca Escobar de Paiva, Claudio Fernando Mahler, Marco Antonio da Silva Ramidan, Mario Guilherme Garcia Nacinovic e Stélio Maia Menezes, por terem respondido todos os meus e-mails, enviando-me informações que contribuíram muito para o enriquecimento desta pesquisa.

À Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), juntamente com os professores da Faculdade de Engenharia Civil, pela compreensão e apoio. Aos funcionários, por tanta alegria e disposição em contribuírem sempre comigo.

Ao professor Bonifácio Andrada, reitor da Universidade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC), e profa. Floripes de Souza Veiga, Pró-Reitora de Ensino e Assuntos Acadêmicos, pelos ensinamentos e pela confiança em meu trabalho e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos srs. Gilberto Carvalho Esteves e Danilo Carvalho Esteves, pela compreensão nos meus momentos de ausência.

À Universidade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC), pelos ensinamentos, carinho e amizade durante esses longos anos de trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de participar do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Geotecnia.

Há muito mais a quem agradecer. A todos aqueles que, embora não nomeados, me apoiaram em distintos momentos e, por suas presenças afetivas e inesquecíveis, o meu reconhecido e carinhoso muito obrigado!

## **BIOGRAFIA**

ANA MARIA STEPHAN, filha de Ilter Geraldo Stephan e Maria José Duque Stephan, nasceu no dia 8 de julho de 1968, na cidade de Juiz de Fora-MG.

Em julho de 1994, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora-MG.

Em setembro de 1998, obteve o título de Mestre em Engenharia Geotécnica pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Desde 1999 é professora do Instituto de Estudos Tecnológicos e Sequenciais de Juiz de Fora, da Universidade Presidente Antonio Carlos (UNIPAC), da qual também, desde 2006, exerce o cargo de Diretora. Além disso, desde 2008 é Professora Substituta do Departamento de Transportes e Geotecnia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Em março de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo-se à defesa de tese em 26 de fevereiro de 2010.

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 2.1</b> Valores do parâmetro erosividade (R) para algumas localidades brasileiras.....	22
<b>Tabela 4.1</b> Limites de consistência, análise granulométrica e classificação dos solos segundo a Carta de Plasticidade.....	103
<b>Tabela 4.2</b> Índices Físicos dos solos estudados.....	105
<b>Tabela 4.3</b> Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.....	106
<b>Tabela 4.4</b> Parâmetros médios de resistência obtidos nos ensaios triaxiais $CID_{Nat}$ e CIU.....	107
<b>Tabela 4.5</b> Resultado dos ensaios de permeabilidade dos solos estudados .....	107
<b>Tabela 4.6</b> Estimativa do parâmetro $K_{EUPS}$ para os solos estudados segundo o nomograma de Wischmeier et al. (1971).....	108
<b>Tabela 4.7</b> Comportamento dos solos com base nos índices de plasticidade e curvas granulométricas .....	109
<b>Tabela 4.8</b> Comportamento dos solos com base nos índices físicos, resistência ao cisalhamento dos solos, permeabilidade e nomograma de Wischmeier et al. (1971) .....	110

<b>Tabela 4.9</b>	Perda de solo total acumulada (g) x tempo de ensaio (min) e perda de solo total acumulada por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min).....	133
<b>Tabela 4.10</b>	Perda de solo total acumulada por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo de ensaio (horas)....	134
<b>Tabela 4.11</b>	Alturas da lâmina de fluxo (h) e tensões cisalhantes hidráulicas do fluxo ( $\tau_h$ ).....	134
<b>Tabela 4.12</b>	Perdas de solo ( $10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ); tensão cisalhante hidráulica crítica (Pa) e fator de erodibilidade ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ) .....	135
<b>Tabela A.1</b>	Tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CID <sub>Nat.</sub> .....	157
<b>Tabela A.2</b>	Tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CIU, para $\sigma' = 25 \text{ kPa}$ e $\sigma' = 50 \text{ kPa}$ .....	165
<b>Tabela A.3</b>	Tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CIU, para $\sigma' = 100 \text{ kPa}$ e $\sigma' = 200 \text{ kPa}$ .....	165

## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 2.1</b> Caso típico de erosão eólica originada pela ação conjunta do intemperismo físico provocado pela cristalização de sais e pela ação do vento. Praia de Castelhanos, cidade de Anchieta - ES (2009). .....	7
<b>Figura 2.2</b> Estruturas do gnaiss realçadas pela erosão marinha. Praia do Arpoador - Rio de Janeiro.....	8
<b>Figura 2.3</b> Situações de transporte de fragmentos de solo por salpicamento.....	9
<b>Figura 2.4</b> Erosão laminar. Guarapari - ES (2008).....	10
<b>Figura 2.5</b> Erosão em ravinas. Morro do Alemão, Juiz de Fora-MG (2005).....	11
<b>Figura 2.6</b> Erosão em “piping”.....	12
<b>Figura 2.7</b> Voçoroca no bairro Nova Lima - Campo Grande - MS.	14
<b>Figura 2.8</b> Voçoroca – Araguaia - GO.....	14
<b>Figura 2.9</b> Representação simplificada do ciclo hidrológico e seus elementos. ....	16
<b>Figura 2.10</b> Bacia de contribuição.....	17
<b>Figura 2.11</b> Corte transversal de uma bacia hidrográfica.....	17

<b>Figura 2.12</b>	Nomograma de Wischmeier et al. (1971) para determinação do fator erodibilidade do solo ( $K_{EUPS}$ ). Para conversão dos valores de K do nomograma do Sistema Inglês para o Sistema Internacional de Unidade (SI), basta dividir o valor de K do nomograma por 7,59. PRUSKI (2009). .....	24
<b>Figura 2.13</b>	Permeâmetro de carga constante.....	35
<b>Figura 2.14</b>	Permeâmetro de carga variável.....	36
<b>Figura 2.15</b>	Equipamento de Inderbitzen em sua concepção original. ....	38
<b>Figura 2.16</b>	Etapas da execução do ensaio de Inderbitzen proposto por Bastos (1999).....	39
<b>Figura 2.17</b>	Representação gráfica da equação de Du Boys para definição de K e $\tau_{crit}$ a partir dos resultados do ensaio de Inderbitzen proposto por Bastos (1999).....	42
<b>Figura 2.18</b>	Aparelho de Inderbitzen desenvolvido por Fragassi (2001). ....	43
<b>Figura 2.19</b>	Equipamento de Inderbitzen. Ensaio em andamento, proposto por Ramidan (2003). ....	46
<b>Figura 2.20</b>	Equipamento de Inderbitzen – detalhe da amostra.....	47
<b>Figura 2.21</b>	Equipamento de Inderbitzen proposto por Paiva (2004). ....	48
<b>Figura 2.22</b>	Equipamento de Inderbitzen proposto por Mendes (2006). ....	51
<b>Figura 3.1</b>	Mapa de localização das regiões administrativas da cidade de Juiz de Fora-MG.....	55
<b>Figura 3.2</b>	Imagem aérea da cidade de Juiz de Fora-MG, apontando as áreas escolhidas para este estudo.....	56
<b>Figura 3.3</b>	Imagem aérea “Morro do Alemão”, Bairro Jardim Caiçaras e São Pedro.....	59
<b>Figura 3.4</b>	Vista panorâmica do “Morro do Alemão” (1987). Áreas diretamente afetadas. ....	60
<b>Figura 3.5</b>	Detalhe de uma porção do platô tomada pelo desgaste superficial do solo. “Morro do Alemão” (2004). ....	60

<b>Figura 3.6</b>	Desgaste superficial do solo. “Morro do Alemão” (2005). .....	61
<b>Figura 3.7</b>	Detalhe entre o platô e a encosta. “Morro do Alemão” (2005). .....	61
<b>Figura 3.8</b>	Platô em processo de recuperação (2008). Eliminação das erosões. “Morro do Alemão”.....	62
<b>Figura 3.9</b>	Mostra de uma porção pronta da área destinada ao condomínio. “Morro do Alemão” (2008). .....	62
<b>Figura 3.10</b>	Aspectos erosivos em grandes proporções. Bairro Jardim Caiçaras (2008).....	64
<b>Figura 3.11</b>	Imagem aérea da via de acesso interligando os bairros Vitorino Braga e Linhares e bairros confrontantes. ....	65
<b>Figura 3.12</b>	Processos erosivos existentes nas encostas, junto à via de acesso. Bairro Bom Jardim (2008). ....	66
<b>Figura 3.13</b>	Extração das amostras no Complexo do “Morro do Alemão”.....	67
<b>Figura 3.14</b>	Extração das amostras no Bairro Jardim Caiçaras. ....	68
<b>Figura 3.15</b>	Extração das amostras no Bairro Bom Jardim.....	68
<b>Figura 3.16</b>	Amostras acondicionadas para transporte.....	69
<b>Figura 3.17</b>	Ensaio de compressão triaxial. ....	71
<b>Figura 3.18</b>	Ensaio de permeabilidade.....	72
<b>Figura 3.19</b>	Detalhe do sistema móvel que permite a variação da inclinação das rampas. ....	73
<b>Figura 3.20</b>	Rampas com orifícios quadrados, com lados iguais a 100,0 e 150,0 mm. ....	74
<b>Figura 3.21</b>	Rampa com orifício circular de diâmetro igual a 150,0 mm. ....	75
<b>Figura 3.22</b>	Fixação dos perfis, reduzindo a base da rampa. ....	76
<b>Figura 3.23</b>	Colocação do tubo perfurado para escoamento do fluxo d’água.....	77
<b>Figura 3.24</b>	Detalhe do sistema para articulação da rampa.....	77
<b>Figura 3.25</b>	Reservatório de água e entrada do fluxo d’água na rampa, através do rotâmetro.....	78

<b>Figura 3.26</b>	Detalhe do reservatório e rotâmetro. ....	79
<b>Figura 3.27</b>	Ajuste da declividade da rampa. ....	80
<b>Figura 3.28</b>	Calibração da vazão. ....	81
<b>Figura 3.29</b>	Regularização do rotâmetro. ....	81
<b>Figura 3.30</b>	Amostrador da rampa circular - 144,0 mm de diâmetro. ....	82
<b>Figura 3.31</b>	Amostrador quadrado - 142 mm de lado. ....	83
<b>Figura 3.32</b>	Amostrador quadrado - 93,0 mm de lado. ....	84
<b>Figura 3.34</b>	Inserção do anel amostrador. Moldagem do corpo de prova para rampa de orifício circular (corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura). ....	86
<b>Figura 3.35</b>	Fixação do anel amostrador com o corpo de prova e a base do amostrador. ....	87
<b>Figura 3.36</b>	União do anel amostrador, base do amostrador e anel superior do amostrador. ....	87
<b>Figura 3.37</b>	Moldagem do corpo de prova para a rampa de orifício quadrado (corpo de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura). ....	88
<b>Figura 3.38</b>	Corpo de prova fixado no amostrador. ....	89
<b>Figura 3.39</b>	Corpo de prova fixado no amostrador. Rampa de orifício quadrado, corpo de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura. ....	90
<b>Figura 3.40</b>	Pesagem dos corpos de prova fixados no conjunto amostrador. ....	91
<b>Figura 3.41</b>	Vista superior e lateral do conjunto amostrador fixado na rampa hidráulica (corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura). ....	92
<b>Figura 3.42</b>	Vista superior e lateral do conjunto amostrador fixado na rampa hidráulica (corpo de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura). ....	93
<b>Figura 3.43</b>	Vista superior e lateral do conjunto amostrador fixado na rampa hidráulica (corpo de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura). ....	94
<b>Figura 3.44</b>	Proteção do corpo de prova e calibração da vazão. ....	95
<b>Figura 3.45</b>	Coleta de sedimentos. ....	96

<b>Figura 3.46</b>	Material carregado em repouso (primeira fase de sedimentação). .....	97
<b>Figura 3.47</b>	Transferência do material sedimentado para as cápsulas menores.....	97
<b>Figura 3.48</b>	Cápsulas menores para serem levadas à estufa (segunda fase de sedimentação).....	98
<b>Figura 3.49</b>	Cápsulas contendo material carregado seco.....	99
<b>Figura 3.50</b>	Destorroamento do solo seco, para ser peneirado. ....	99
<b>Figura 3.51</b>	ransferência de solo seco para o conjunto de peneiras. ....	100
<b>Figura 3.52</b>	Pesagem do material retido em cada peneira.....	101
<b>Figura 4.1</b>	Corpo de prova após realização do ensaio. Rampa de orifício circular com 144 mm de diâmetro. ....	112
<b>Figura 4.2</b>	Corpo de prova após realização do ensaio. Rampa de orifício quadrado com 142,0 mm de lado.....	112
<b>Figura 4.3</b>	Corpo de prova após realização do ensaio. Rampa de orifício quadrado com 93,0 mm de lado.....	113
<b>Figura 4.4</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x o tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – “Morro do Alemão”. .....	113
<b>Figura 4.5</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.....	114
<b>Figura 4.6</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Bom Jardim.....	114
<b>Figura 4.7</b>	Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício circular com diâmetro igual a 144,0 mm.....	115
<b>Figura 4.8</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – “Morro do Alemão”. .....	116

<b>Figura 4.9</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras. ....	116
<b>Figura 4.10</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Bom Jardim. ....	117
<b>Figura 4.11</b>	Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm. ....	117
<b>Figura 4.12</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro “Morro do Alemão”.....	118
<b>Figura 4.13</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras. ....	118
<b>Figura 4.14</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Bom Jardim. ....	119
<b>Figura 4.15</b>	Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm. ....	120
<b>Figura 4.16</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $g/cm^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm - “Morro do Alemão”.....	121
<b>Figura 4.17</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $g/cm^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras. ....	121

<b>Figura 4.18</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Bom Jardim.....	122
<b>Figura 4.19</b>	Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min) nas três áreas. Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm.	123
<b>Figura 4.20</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – “Morro do Alemão” .....	124
<b>Figura 4.21</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.....	124
<b>Figura 4.22</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Bom Jardim.....	125
<b>Figura 4.23</b>	Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm.....	126
<b>Figura 4.24</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – “Morro do Alemão” .....	127
<b>Figura 4.25</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.....	127

<b>Figura 4.26</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Bom Jardim.....	128
<b>Figura 4.27</b>	Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm.....	129
<b>Figura 4.28</b>	Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – “Morro do Alemão”. .....	130
<b>Figura 4.29</b>	Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Jardim Caiçaras. ....	130
<b>Figura 4.30</b>	Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Bom Jardim.....	131
<b>Figura 4.31</b>	Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – “Morro do Alemão”. .....	132
<b>Figura 4.32</b>	Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Jardim Caiçaras.....	132
<b>Figura 4.33</b>	Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Bom Jardim.....	133
<b>Figura 4.34</b>	Definição da tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{\text{hcrit}}$ ) e fator de erodibilidade (K) dos solos.....	135
<b>Figura A.1</b>	Curva granulométrica – “Morro do Alemão”.....	150
<b>Figura A.2</b>	Curva granulométrica – Bairro Jardim Caiçaras. ....	150
<b>Figura A.3</b>	Curva granulométrica – Bairro Bom Jardim.....	151
<b>Figura A.4</b>	Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra natural. “Morro do Alemão”. .....	151

<b>Figura A.5</b>	Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra natural. Bairro Jardim Caiçaras.....	152
<b>Figura A.6</b>	Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra natural. Bairro Bom Jardim. ....	152
<b>Figura A.7</b>	Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra inundada. “Morro do Alemão”. ....	153
<b>Figura A.8</b>	Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra inundada. Bairro Jardim Caiçaras.....	153
<b>Figura A.9</b>	Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra inundada. Bairro Bom Jardim.....	154
<b>Figura A.10</b>	Curvas ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) x $\epsilon$ , solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	154
<b>Figura A.11</b>	Curvas ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) x $\epsilon$ , solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	155
<b>Figura A.12</b>	Curvas ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) x $\epsilon$ , solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	155
<b>Figura A.13</b>	Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> .....	156
<b>Figura A.14</b>	Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	156
<b>Figura A.15</b>	Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	157
<b>Figura A.16</b>	Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	158
<b>Figura A.17</b>	Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	158
<b>Figura A.18</b>	Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CID <sub>Nat.</sub> ....	159
<b>Figura A.19</b>	Curvas ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) x $\epsilon$ , solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> ....	159
<b>Figura A.20</b>	Curvas ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) x $\epsilon$ , solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> ....	160
<b>Figura A.21</b>	Curvas ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) x $\epsilon$ , solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> ....	160

<b>Figura A.22</b>	Curvas $\nu \times \varepsilon$ , solo do “Morro do Alemão”. Ensaio. CIU <sub>Sat.</sub> .....	161
<b>Figura A.23</b>	Curvas $\nu \times \varepsilon$ , solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio. CIU <sub>Sat.</sub> .....	161
<b>Figura A.24</b>	Curvas $\nu \times \varepsilon$ , solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio. CIU <sub>Sat.</sub> .....	162
<b>Figura A.25</b>	Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> .....	162
<b>Figura A.26</b>	Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> .....	163
<b>Figura A.27</b>	Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> .....	163
<b>Figura A.28</b>	Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> .....	164
<b>Figura A.29</b>	Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> .....	164
<b>Figura A.30</b>	Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CIU <sub>Sat.</sub> .....	165

## RESUMO

STEPHAN, Ana Maria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen**. Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. Coorientadores: Wander Rodrigues da Silva e Eduardo Antônio Gomes Marques.

O crescimento acelerado e pouco planejado das cidades vem trazendo graves problemas de ordem ambiental nos grandes centros urbanos. Nesta tese estuda-se a perda de solo por erosão hídrica em três locais densamente povoados da cidade de Juiz de Fora-MG, que vêm apresentando importantes feições erosivas. Medir a erosão, não é fácil, pois as chuvas e enchentes variam enormemente, e um único acontecimento extraordinário pode produzir grandes perdas de solo em um pequeno espaço de tempo. Para avaliar de forma indireta a erodibilidade dos solos em estudo, realizou-se um programa de ensaios de laboratório, obtendo-se as suas propriedades geotécnicas (índices de consistência, análise granulométrica, teor de umidade natural, massa específica dos sólidos, permeabilidade e resistência ao cisalhamento). Avaliou-se também a erodibilidade desses solos de forma direta, através de ensaios de Inderbitzen, variando a geometria dos corpos de prova. Para o equipamento Inderbitzen desenvolvido nesta tese, foram confeccionadas três rampas com diferentes orifícios para inserção dos corpos de prova, com o objetivo de verificar o efeito da forma e tamanho da amostra nos resultados de perda de solo. Por esse motivo, durante o programa de ensaios realizado manteve-se

constante a vazão e a declividade das rampas. A partir dos resultados, pode-se concluir que mudanças na forma e no tamanho do orifício da rampa no equipamento Inderbitzen influenciaram na determinação da erodibilidade dos solos. Além disso, os solos das áreas estudadas não apresentaram resistência à erosão laminar, o que justifica as grandes erosões, que, com o decorrer do tempo, vêm aumentando gradativamente.

## ABSTRACT

STEPHAN, Ana Maria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010. **Analysis of surface erosion processes by Inderbitzen test.** Adviser: Roberto Francisco de Azevedo. Co-advisers: Wander Rodrigues da Silva and Eduardo Antônio Gomes Marques.

The rapid and ill planned growth of cities has brought serious environmental problems in large urban centers. This thesis studies the soil loss by water erosion in three densely populated areas in the city of Juiz de Fora, MG, which has been presenting important erosional features. Measuring erosion is not easy, as rains and floods vary enormously, and one single extraordinary event can produce large losses of soil in a short time. To indirectly evaluate the erodibility of soils in the study, a program of laboratory testing was carried out, obtaining their geotechnical properties (consistency indices, particle size analysis, natural humidity content, density of solids, permeability and shear resistance). The erodibility of these soils was also directly evaluated through Inderbitzen tests, varying the geometry of the specimens. For the Inderbitzen equipment developed in this thesis, three ramps were fabricated with different holes for insertion of the specimens, in order to verify the effect of the shape and size of the samples in soil loss results. For this reason, during the testing program conducted, the flow and slope of the ramps was kept constant. From the results, one can conclude that changes in form and size of the hole in the ramp in the Inderbitzen

equipment influenced the determination of erodibility of the soil. Furthermore, the soils of the areas studied showed no resistance to extensive erosion, which explains the large erosions that, over time, have been gradually increasing.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Organização da tese.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Erosão do solo: definições.....	5
2.2. Formas de erosão hídrica.....	9
2.2.1. Erosão por salpicamento (“splash erosion”) .....	9
2.2.2. Erosão laminar (“interrill”) .....	10
2.2.3. Erosão em ravinas ou sulcos (“rill”).....	11
2.2.4. Erosão interna (“piping”) .....	11
2.2.5. Voçorocas.....	13
2.3. O ciclo hidrológico .....	15
2.3.1. Descrição geral.....	15
2.3.2. A bacia hidrográfica .....	16
2.3.3. Fisiografia da bacia hidrográfica .....	18
2.4. Previsão de erosão.....	18
2.4.1. Erosividade da chuva (R).....	20
2.4.2. Erodibilidade do solo (K).....	23
2.4.3. Fator topográfico (LS) .....	25
2.4.4. Fator uso e manejo do solo (C).....	27
2.4.5. Fator práticas conservacionistas (P).....	27

2.5. Estudo da erodibilidade do solo.....	29
2.5.1. Estudos de erodibilidade de solos por meio de correlações com propriedades geotécnicas dos solos .....	29
2.5.2. Estudos de erodibilidade de solos por meio de correlações com a permeabilidade.....	33
2.5.2.1. Métodos diretos para a determinação da permeabilidade dos solos.....	34
2.6. Os Ensaios de Inderbitzen.....	37
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
3.1. Localização da cidade de Juiz de Fora.....	54
3.2. Caracterização do clima, vegetação e geomorfologia da cidade de Juiz de Fora-MG .....	57
3.2.1. Clima.....	57
3.2.2. Vegetação.....	57
3.2.3. Geomorfologia .....	58
3.3. “Morro do Alemão” – Bairro São Pedro - Porção oeste .....	58
3.4. Bairro Jardim Caiçaras – Porção oeste .....	63
3.5. Bairro Bom Jardim - Via de acesso interligando os bairros Vitorino Braga e Linhares - Porção leste .....	65
3.6. Metodologia usada na coleta das amostras e nos ensaios .....	67
3.7. Ensaios de laboratório .....	69
3.8. O aparelho de Inderbitzen .....	72
3.8.1. Montagem do Equipamento de Inderbitzen .....	73
3.8.2. Amostradores.....	82
3.8.3. Preparo dos corpos de prova.....	84
3.8.4. Execução dos Ensaios.....	90
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	102
4.1. Generalidades .....	102
4.2. Avaliação Indireta da erodibilidade .....	102
4.2.1. Critérios baseados na caracterização dos solos.....	102
4.2.2. Critérios baseados nos índices físicos.....	104
4.2.3. Critérios baseados nos ensaios de resistência ao cisalhamento dos solos.....	105
4.2.3.1. Ensaios de cisalhamento direto.....	105
4.2.3.2. Ensaios de compressão triaxial.....	106
4.2.4. Critérios baseados nos ensaios de permeabilidade.....	107
4.2.5. Estimativa do fator erodibilidade da Equação Universal de Perdas de Solos $K_{EUPS}$ .....	108
4.3. Avaliação direta da erodibilidade .....	111
4.3.1. Ensaios de Inderbitzen .....	111
4.3.2. Erodibilidade (K) e tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{crítica}$ ) .....	134
5. CONCLUSÕES.....	137
REFERÊNCIAS .....	142
ANEXO 1 .....	147
ANEXO 2 .....	150

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Generalidades

O processo da erosão é entendido como um ciclo de alteração, desagregação, transporte e sedimentação dos constituintes do solo, subsolo e rocha. Ele acontece devido à atuação de fatores naturais e antrópicos. O primeiro fator resulta da ação da própria natureza sobre a superfície terrestre, modificando lentamente o solo através de seus agentes, como os ventos, a água, as ondas, a gravidade e as mudanças climáticas. O segundo caracteriza-se como um processo rápido e altamente destrutivo causado por desmatamentos, cortes de estradas, ocupação desordenada das encostas, técnicas agrícolas inadequadas, mineração etc., que podem deixar os solos desprotegidos da cobertura vegetal e suscetíveis à incidência direta da chuva sobre a superfície do terreno.

Independentemente do processo erosivo, o importante é entender os processos básicos com que este é gerado, uma vez que sua gravidade depende de fatores como tipo de solo, propriedades físicas, declividades das encostas etc.

Ao longo dos anos esse fenômeno vem trazendo prejuízos, pois, além de causar o assoreamento dos cursos d'água, vem degradando áreas urbanas ou em processo de urbanização.

A erosão está presente nos mais diversos locais, em especial nas regiões de clima tropical ou subtropical úmido, com altos índices pluviométricos, nas quais se inclui grande parte do território brasileiro.

Estima-se que, por ano, no Brasil são perdidos aproximadamente 500 milhões de toneladas de solos através da erosão e que, juntos, Argentina, Bolívia, Brasil, Chile e Paraguai apresentam 200 milhões de hectares de terras degradadas (FAO, 2001).

No município de Juiz de Fora - MG, cidade escolhida para a presente pesquisa, existe uma extensão muito grande de áreas com alto risco de erosão e escorregamentos situadas principalmente a sul, oeste e sudoeste da área urbana, regiões onde se encontra maior densidade populacional, causando danos ambientais, sociais, culturais e financeiros.

A erosão urbana é um dos expressivos passivos ambientais em Juiz de Fora, sendo caracterizada por um tipo de erosão acelerada, pois, além da atuação antrópica, apresenta extrema fragilidade do meio físico.

Foram considerados no desenvolvimento deste trabalho, como principais aspectos das áreas a serem estudadas, localização, condições climáticas, tipos de solo e vegetação e características geotécnicas das áreas afetadas pelos processos de desgaste superficial do solo.

O estudo da erosão recai, então, sobre três encostas localizadas em regiões densamente povoadas da cidade de Juiz de Fora - MG.

A primeira, “Morro do Alemão”, é uma área que foi aberta na década de 1980, para construção de um Estádio Municipal de Futebol, que nunca foi concluído. Situa-se próxima à Universidade Federal de Juiz de Fora e foi tomada por erosões de proporções alarmantes. Recentemente, está parcialmente recuperada para a construção de um condomínio de casas.

A segunda, no bairro Jardim Caiçaras, confrontando com o “Morro do Alemão” e o Bairro São Pedro, apresenta grande parte tomada por grandes erosões, cujo crescimento vem se acelerando nos períodos de chuva.

Finalmente, na terceira, no Bairro Bom Jardim, no entorno de uma nova via de acesso que liga os bairros Vitorino Braga, Três Moinhos, Bom Jardim e Linhares, verifica-se um processo acelerado de fortes erosões.

A erodibilidade dos solos locais, objeto principal deste estudo, é um parâmetro que estima a perda de solo em uma determinada área em função do tempo de escoamento (processo de erosão hídrica pelo fluxo superficial).

As propriedades que contribuem mais significativamente para explicar a variação da perda de solo são: textura, estrutura, densidade, teor de matéria orgânica e grau de saturação dos solos, além da forma, concavidade e convexidade, da encosta e resíduos de cultura nela existentes (WISCHMEIER; MANNERING, 1969).

## **1.2. Objetivos**

O principal objetivo desta tese foi investigar os fatores determinantes para a ocorrência dos processos erosivos em três taludes localizados na cidade de Juiz de Fora-MG.

Para alcançar esse objetivo principal, os objetivos específicos foram:

- amostrar os solos nos taludes a serem estudados;
- avaliar a erodibilidade de forma indireta baseada nas propriedades geotécnicas dos solos (índices físicos, permeabilidade, resistência etc.);
- avaliar a erodibilidade de forma direta por ensaios de Inderbitzen em uma nova versão, variando o orifício existente na rampa hidráulica para fixar os corpos de prova, permitindo experimentar amostras de diferentes formas e tamanho;
- fazer uma correlação entre os parâmetros obtidos nos ensaios convencionais de laboratório e a erodibilidade dos solos; e
- discutir quais ensaios convencionais são mais apropriados para caracterizar o potencial de erosão de um solo.

## **1.3. Organização da tese**

O trabalho foi dividido em cinco capítulos, incluindo este, de introdução.

No Capítulo 2, faz-se uma revisão da literatura sobre erosão e erodibilidade, apresentando alguns critérios para determinação da perda de solo de forma direta e indireta.

As características da cidade em estudo e das áreas específicas envolvidas, os ensaios de laboratório realizados e a descrição dos equipamentos e metodologias utilizados deles são apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4 apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos nos ensaios.

Finalmente, no Capítulo 5, são feitas as principais conclusões deste trabalho e apontadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Erosão do solo: definições**

Segundo Magalhães (2001), a erosão é um processo mecânico que age em superfície e profundidade, em certos tipos de solo e sob determinadas condições físicas, podendo-se tornar críticas pela ação catalisadora do homem.

É um fenômeno que, com intensidades diferentes e em consequências variadas, causa perdas de solo e de seus nutrientes.

Energia cinética e intemperização são causas primárias da erosão em todas as suas formas.

O processo de desgaste do solo ou da rocha ocorre devido à atuação dos fatores naturais e antrópicos. O primeiro resulta da ação da própria natureza sobre a superfície terrestre (em tempo geológico – erosão geológica), modificando lentamente o solo através de seus agentes, como os ventos (erosão eólica), a água (erosão hídrica), as ondas (erosão marinha ou costeira), a erosão glacial, a gravidade, a bioerosão (erosão por organismos vivos: peixes, moluscos, crustáceos, líquens etc.) e as mudanças climáticas.

O agente de erosão dos solos mais importante é a água.

O segundo fator tem como principal agente deflagrador o homem. Caracteriza-se como um processo rápido e altamente destrutivo (erosão acelerada), causado por desmatamentos, cortes de estradas, construção de

barragens, ocupação desordenada das encostas, técnicas agrícolas inadequadas, mineração etc.

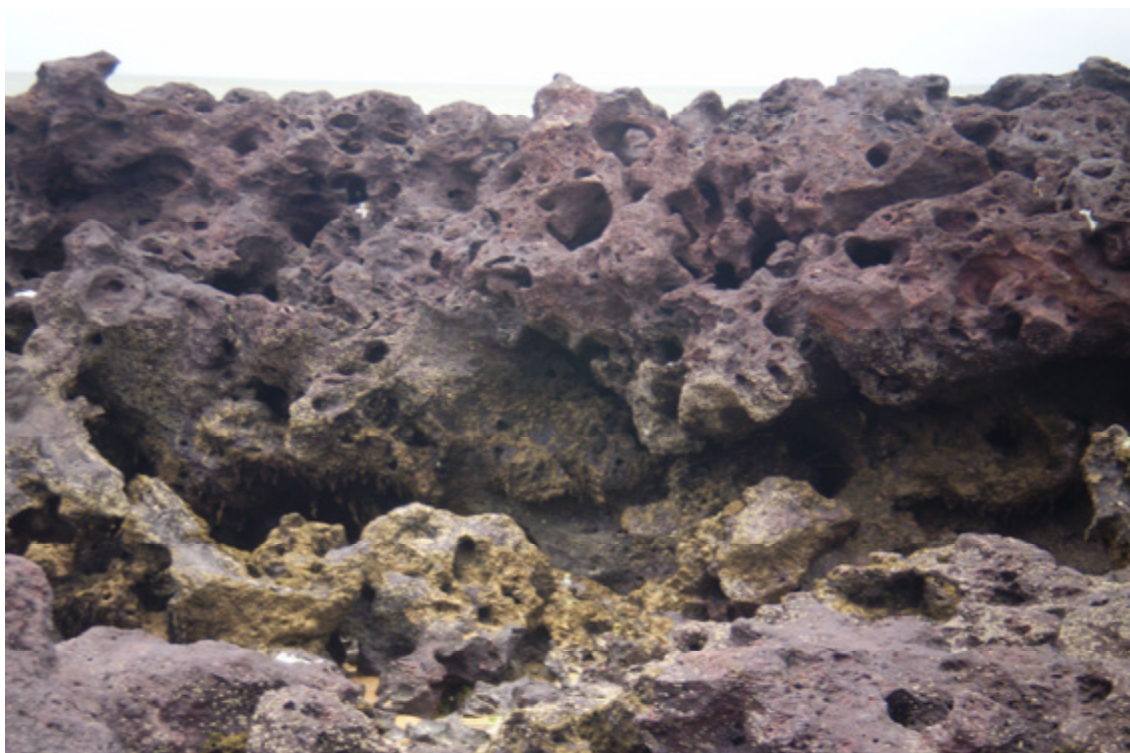
Segundo Pruski (2009), a erosão eólica consiste no transporte de partículas de solo pela ação do vento, apresentando maior importância nas regiões planas com baixa precipitação, alta incidência de ventos e pouca vegetação para proteger o solo. Para ocorrência dessa erosão, é necessário que a velocidade do vento seja alta, a superfície do solo seja pouco ondulada e apresente cobertura vegetal escassa ou inexistente e o solo tenha baixa coesão, pequena umidade e alta propensão à desagregação.

Dependendo da força do vento e do tamanho da partícula, o transporte eólico pode-se dar por arrastamento, “saltação” e suspensão.

Um dos principais danos provocados pela erosão eólica é o enterramento de solos férteis. No Brasil, ocorre com maior incidência no Rio Grande do Sul, na Bahia e no Nordeste.

Em se tratando dessa forma de erosão, a “honey comb” (favo de mel) é um tipo especial de erosão originada pela ação de sais provenientes da brisa marinha e das maresias. A solução salina em contato com a superfície rochosa impregna em suas microfraturas e nos vazios intergranulares e evapora rapidamente, em função da presença do vento e sol. A evaporação gera uma concentração dos sais, dando início ao crescimento de cristais, que desenvolvem pressões sobre as paredes das fraturas e dos poros das rochas, causando seu enfraquecimento e, por fim, a sua ruptura. A Figura 2.1 apresenta um caso típico na praia dos Castelhanos, região do Espírito Santo, com formação de cavidades arredondadas (alvéolos) produzidas pelo movimento circular (redemoinhos) de partículas arenosas transportadas pelo vento.

A erosão hídrica é provocada pela ação da chuva sobre o solo. Do volume total precipitado, parte é interceptada pela vegetação, enquanto o restante atinge a superfície do solo, provocando o seu umedecimento e reduzindo suas forças coesivas. Com a continuidade da ação da chuva, ocorre a desintegração dos agregados em partículas menores. A quantidade de solo desestruturado aumenta com a intensidade da precipitação, a velocidade e o tamanho das gotas.



**Figura 2.1** - Caso típico de erosão eólica originada pela ação conjunta do intemperismo físico provocado pela cristalização de sais e pela ação do vento. Praia de Castelhanos, cidade de Anchieta - ES (2009).

A água da chuva exercerá maior ou menor ação erosiva sobre o solo, dependendo de uma série de fatores, entre os quais podem-se destacar: as condições topográficas ou de relevo (comprimento da encosta, declividade, área do terreno etc.), as características do solo (textura, estrutura, profundidade do solo e subsolo, permeabilidade etc.) e o tipo de cobertura (mata, pastagens, e etc.).

Esse tipo de erosão envolve três fases: desagregação (causada pelo impacto das gotas de chuva e da tensão cisalhante hídrica provocada pela passagem do escoamento superficial), transporte (causado pela ação do escoamento superficial) e deposição das partículas.

Guerra et al. (1999) afirmam que a erosão dos solos pela água é responsável por 56% da degradação dos solos do mundo.

De acordo com Lima (2003), em regiões tropicais, a grande maioria dos solos, em função das suas características físico-químicas originárias do processo de formação, apresenta alta porosidade e grande sensibilidade das

ligações cimentícias em presença de água. Por este motivo são, frequentemente, suscetíveis à erosão hídrica.

As erosões marinhas, originadas pelas ondas, são formadas pela ação conjunta do vento e da água; seus efeitos são notados em ambientes lacustres, litorâneos e margens de rios.

A colisão das águas nas margens provoca o desgaste das rochas e a consequente formação de partículas, que são transportadas em suspensão pela água e depositadas posteriormente no fundo dos rios, lagos, mares etc.

A Figura 2.2 apresenta uma forma de erosão provocada pelas ondas na Praia do Arpoador, Rio de Janeiro.



Fonte: <<http://www.meioambiente.pro.br>>.

**Figura 2.2** - Estruturas do gnaiss realçadas pela erosão marinha. Praia do Arpoador - Rio de Janeiro.

A erosão glacial ocorre através da água, originada pelas precipitações, que penetra nas fissuras das rochas; com o frio muito intenso, essa água tende a congelar. Assim, ao transformar-se em gelo, a água faz pressão sobre as paredes da rocha, quebrando-a. Esse tipo de erosão pode ocorrer ainda em regiões montanhosas, pelo deslizamento de grandes blocos de gelo.

As erosões causadas pela gravidade são os movimentos de massa, como as avalanches, os escorregamentos e os rastejos.

A bioerosão é um processo de formação do solo provocada por organismos vivos, como os líquens, que vão lentamente desgastando a superfície das rochas onde crescem, abrindo caminho para as plantas poderem se fixar. Com o tempo, cria-se uma camada de solo na superfície rochosa, a qual permite a fixação de plantas maiores, que irão forçar as fissuras das rochas que lhe servem de suporte, até as fraturarem completamente.

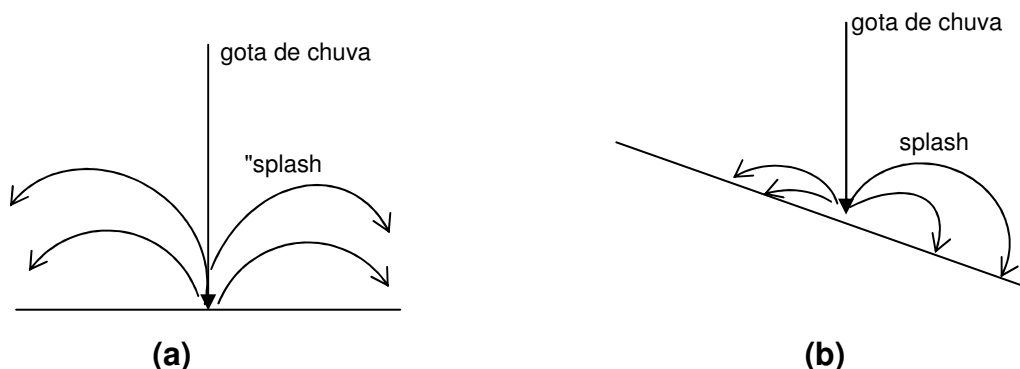
## 2.2. Formas de erosão hídrica

As principais formas de erosão hídrica são: erosão por salpicamento (“splash erosion”), erosão laminar ou superficial (“interrill”), erosão em ravinas ou sulcos (“rill”), voçorocas ou gargantas e erosão interna (“piping”).

### 2.2.1. Erosão por salpicamento (“splash erosion”)

Segundo Ellison (1944), esta forma de erosão corresponde à ação da energia da gota d’água da chuva com a superfície do solo, lançando partículas de solo ao ar (“splash”) para baixo e para cima, em declives com mais de 10%, sem influência do vento. O volume de partículas no sentido do declive é três vezes superior ao volume para cima. A altura desses fragmentos pode chegar a 60 cm ou mais, e eles podem se deslocar por mais de 150 cm.

Conforme pode ser visto na Figura 2.3, estas partículas podem seguir dois caminhos: manter-se livres na superfície do solo e ser transportadas quando da ocorrência de fluxo superficial.



(a) partículas mantidas livres na superfície do solo; (b) partículas transportadas quando da ocorrência de fluxo superficial.

**Figura 2.3** - Situações de transporte de fragmentos de solo por salpicamento.

Além de ocasionar a liberação de partículas, o impacto das gotas tende também a compactar o solo, ocasionando o selamento de sua superfície e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade de infiltração da água.

### **2.2.2. Erosão laminar (“interrill”)**

Ocorre pela combinação do “splash” com o movimento da água no declive. De acordo com Magalhães (2001), caracteriza-se pelo desgaste e arraste uniforme e suave em toda a extensão da área sujeita ao processo erosivo. A matéria orgânica e as partículas de argila são as primeiras porções do solo a se desprenderem, sendo as partes mais ricas e com maior quantidade de nutrientes para as plantas. Apesar da dificuldade de ser observada, ela pode ser constatada pelo decréscimo de produção das culturas e pelo aparecimento de raízes ou mesmo marcas no caule das plantas, onde o solo tenha sido arrastado (Figura 2.4).



**Figura 2.4** - Erosão laminar. Guarapari - ES (2008).

### **2.2.3. Erosão em ravinas ou sulcos (“rill”)**

Ocorre quando a água superficial atinge pequenas depressões, ganha velocidade e profundidade e começa a transportar sedimentos, formando canais com traçados bem definidos. A cada ano esses canais se aprofundam, e a falta de cobertura vegetal e de drenagem adequada pode fazer com que cheguem a atingir até alguns metros de profundidade (Figura 2.5).



**Figura 2.5** - Erosão em ravinas. Morro do Alemão, Juiz de Fora-MG (2005).

### **2.2.4. Erosão interna (“piping”)**

De acordo com Lima (2003), a erosão interna geralmente surge em consequência do aumento da taxa de infiltração ou do gradiente hidráulico e corresponde à formação de canais de fluxo no interior do maciço de solo (Figura 2.6).

A ruptura hidráulica causada pelas forças de percolação ocorre nos locais de descarga, onde o gradiente atinge o valor crítico e condições de liquefação, arrastando partículas de solo e permitindo a abertura de pequenos orifícios, pelos quais o fluxo passa a se concentrar, criando assim pequenas

cavidades. Essa pequena cavidade concentra ainda mais o fluxo subterrâneo e, por consequência, o incremento no gradiente hidráulico, num processo cíclico de ação e reação (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 1998).



**Fonte:** Augustin e Aranha, 2006 - Revista Brasileira de Geomorfologia; - ano 7, nº 1, 2006.

**Figura 2.6** - Erosão em “piping”.

Lima (2003) acrescenta ainda que a erosão interna pode ocorrer por dois processos: arraste (“dragging”), induzido pela percolação de água, especialmente em materiais granulares; e alargamento de macroporos pela ação das tensões cisalhantes, comuns em materiais coesivos e solos granulares não saturados.

Segundo Fendrich et al. (1997), a erosão em “piping” não se processa apenas nas proximidades do talude, podendo se desenvolver ao longo de centenas de metros de distância da voçoroca, o que enfraquece o solo e estabelece regiões de percolação preferencial, por vezes com afundamento de uma porção do terreno – conhecido também por subsidência. Esses autores salientam ainda que a origem deste fenômeno de afundamento pode ser também atribuída a antigos formigueiros, cujos vazios favorecem a infiltração d'água e a erosão interna.

A erosão depende fundamentalmente das relações entre a capacidade erosiva da chuva (erosividade) por intermédio dos fluxos superficiais e subsuperficiais, da suscetibilidade dos materiais a serem erodidos (erodibilidade) e da vegetação.

Verifica-se, então, uma associação entre chuva, vegetação, topografia, solo e erosão.

Para que se possa dar início à dinâmica da ação erosiva, tem-se como ponto de partida o ciclo hidrológico, conforme definições a seguir (item 2.3).

### **2.2.5. Voçorocas**

A palavra voçoroca tem origem na língua tupi-guarani e significa “terra rasgada”. Esse tipo de erosão pode ser formado rapidamente em função da profundidade, da velocidade e do volume da água. Normalmente, se inicia-se quando ocorre um fluxo subsuperficial em encostas de elevações, conforme pode ser visto nas Figuras 2.7 e 2.8.

A voçoroca é o estágio mais avançado e complexo de erosão acelerada, correspondendo à passagem gradual do processo de ravinamento, até atingir o lençol freático, com o aparecimento de surgências d’água. Diversos processos estão presentes na voçoroca, podendo-se citar os relacionados com o escoamento pluvial (lavagem superficial e formação de sulcos), erosão interna do solo (“piping”), solapamentos e escorregamentos dos solos, além da erosão provocada pela água do escoamento pluvial. No interior da voçoroca há surgências d’água que durante o ano são alimentadas pelo lençol freático (MAGALHÃES, 2001).

Embora vários autores apontem para a existência de estreita correlação entre a formação das voçorocas e a ação dos “piping”, sua comprovação não é fácil, pois nem sempre é possível detectar, na superfície, o início do aparecimento do canal superficial por colapso do túnel. Uma vez ocorrido o colapso, a ação do escoamento superficial tende a se tornar preponderante, encobrendo evidências da presença do duto subsuperficial, anterior à do canal superficial (AUGUSTIN; ARANHA, 2006).



Fonte: <<http://www.campograndenews.com.br>>.

**Figura 2.7** - Voçoroca no bairro Nova Lima - Campo Grande - MS.



Fonte: Jornal da UNICAMP <<http://www.unicamp.br>>.

**Figura 2.8** - Voçoroca – Araguaia - GO.

## **2.3. O ciclo hidrológico**

### **2.3.1. Descrição geral**

A água pode ser encontrada na natureza sob o estado sólido (granizo, geada, geleira e neve), líquido (rios, lagos, lençóis subterrâneos, nuvens e nevoeiro) ou gasoso (umidade do ar, evaporação das superfícies e umidade do solo).

O ciclo hidrológico é ocasionado pela energia solar, que eleva a água das superfícies terrestre e aquática, e da vegetação, para a atmosfera, de onde retorna por meio das precipitações. Por isso, o ciclo hidrológico é considerado fechado em nível global.

Resumidamente, o ciclo hidrológico é composto das seguintes fases: precipitação, infiltração, escoamento superficial e evaporação.

Iniciando pelas precipitações, tem-se que parte dela é retida nas vegetações (intercepção), e a outra parte, que consegue atingir a superfície terrestre, infiltra (infiltração), escoar (escoamento superficial) e se evapora (evaporação/evapotranspiração).

A água de infiltração se movimenta através dos vazios existentes nos solos e nas rochas (poros, fissuras e fraturas), formando ou abastecendo os lençóis subterrâneos (aquíferos). A infiltração provoca umedecimento dos solos, reduzindo suas forças coesivas.

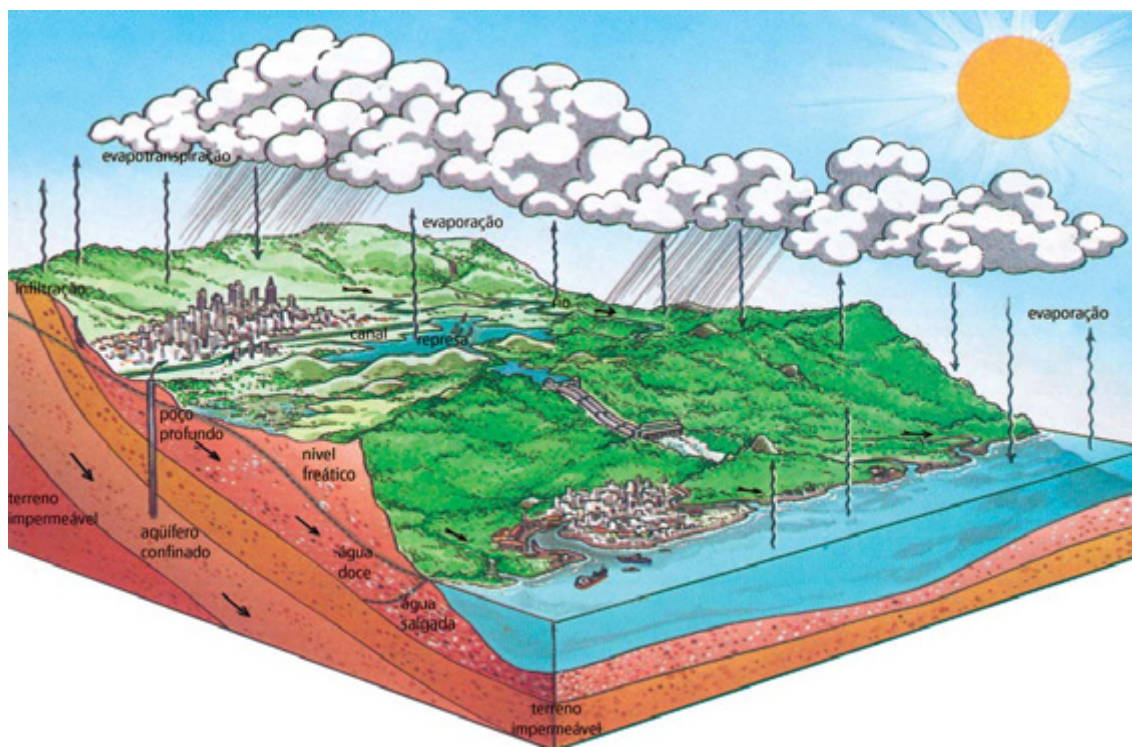
Quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo, a água escoar superficialmente, preenchendo os canais naturais e formando os cursos dos rios, que se dirigem para os mares, lagos e oceanos.

A esse escoamento associa-se uma *tensão cisalhante hídrica*. O desprendimento das partículas do solo pelo escoamento acontece quando essa tensão cisalhante excede a tensão de resistência ao cisalhamento do solo, conforme será visto adiante.

Segundo Bigarella (1985), o escoamento superficial desempenha papel importante no mecanismo erosivo. A intensidade do fenômeno depende da velocidade do escoamento; nas vertentes mais íngremes, a ação da gravidade acentua grandemente o processo.

O escoamento superficial provoca o transporte de nutrientes químicos, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas.

Por fim, a precipitação ocorre quando as partículas de água formadas por condensação (nuvens) atingem o peso capaz de vencer o empuxo do ar, precipitando em forma de chuva. Na Figura 2.9 encontra-se uma representação esquemática do ciclo hidrológico.



Fonte: Revista Águas e Energia Elétrica, ano 5, nº 15, 1989 – DAEE.

**Figura 2.9** - Representação simplificada do ciclo hidrológico e seus elementos.

### **2.3.2. A bacia hidrográfica**

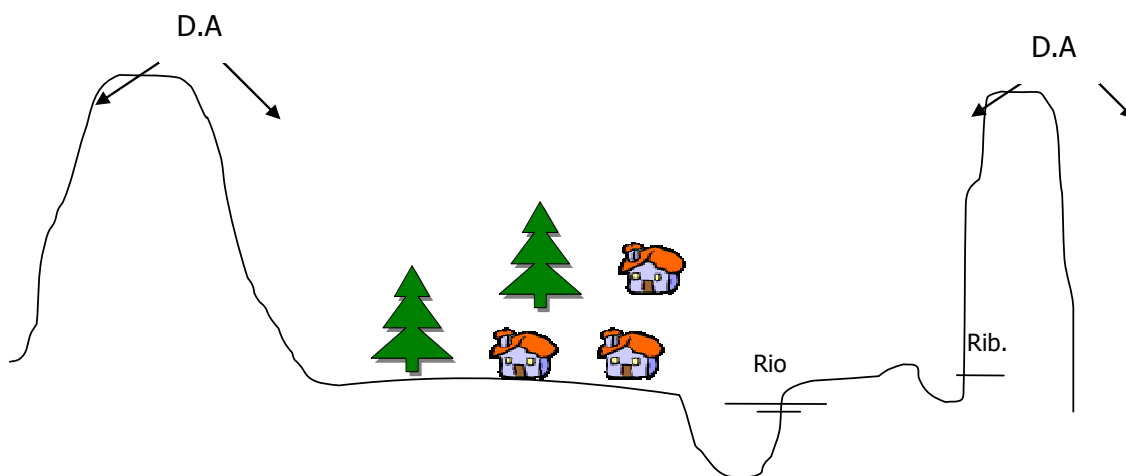
O elemento fundamental de análise do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica (TUCCI, 1997). Trata-se de uma área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída (exutório). Compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies, vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até o ponto de saída (Figura 2.10).

Uma bacia hidrográfica é definida por um divisor de águas, que a separa das bacias adjacentes (Figura 2.11).



Fonte: Revista Águas e Energia Elétrica, nº 15, 1989 - DAEE.

**Figura 2.10** - Bacia de contribuição.



**Figura 2.11** - Corte transversal de uma bacia hidrográfica.

O escoamento superficial causado nas vertentes, no conjunto da bacia hidrográfica, pode ser interpretado como uma "produção" de água para escoamento rápido; portanto, as vertentes seriam vistas como as fontes produtoras. Seguindo com esse enfoque, a água produzida pelas vertentes tem

como destino imediato as redes de drenagem, que se encarregam de transportá-la à seção de saída da bacia (TUCCI, 1997).

As vertentes "produzem" os sedimentos (erosão), e estes são transportados com a água através das redes de drenagem, junto com os sedimentos produzidos nos próprios leitos dos rios, provocando assim o assoreamento destes. Assim, não é possível considerar as vertentes e os rios de forma isolada, uma vez que estão sempre em interação para adaptação da bacia às solicitações da natureza.

### **2.3.3. Fisiografia da bacia hidrográfica**

Os dados físiográficos de uma bacia hidrográfica são basicamente: a área, o comprimento, a declividade e o tipo de vegetação que cobre o solo. Esses dados são normalmente obtidos por meio de plantas topográficas, mapas, aerofotogrametria, imagens de satélite e inspeções locais.

A área de uma bacia hidrográfica é considerada igual ao valor da sua projeção vertical (A). A área é um parâmetro fundamental para se determinar o potencial hídrico de uma bacia, pois seu valor multiplicado pela altura de chuva precipitada (P) determina o volume (V) de água recebido pela bacia.

O comprimento do curso de água principal (talvegue) da bacia é medido em planta ou na totalidade da rede de drenagem.

A declividade, relação entre o desnível do trecho em estudo e o seu comprimento, varia ao longo do perfil longitudinal. A declividade média total é obtida através da diferença de altura entre o ponto mais alto e o mais baixo da bacia, dividida pela distância em planta entre esses dois pontos.

Esses parâmetros são fundamentais para que se determine o tempo de concentração (tempo de contribuição) de uma determinada precipitação sobre uma bacia (formulação empírica) e, conseqüentemente, sua intensidade (velocidade de precipitação) e vazão de contribuição.

## **2.4. Previsão de erosão**

Segundo Ellison (1947), a erosão depende primordialmente das relações existentes entre a capacidade erosiva da chuva (erosividade) e dos

fluxos superficiais e subsuperficiais, da suscetibilidade dos materiais a serem erodidos (erodibilidade) e da vegetação, que contribui no sentido de interceptar e reter a chuva, proteger o solo contra a atuação das gotas de chuva e aumentar a resistência aos escoamentos superficiais.

Acrescentando-se a esses fatores as condições topográficas, verifica-se então uma associação entre precipitação, vegetação, topografia, solo e erosão.

A fim de quantificar as perdas de solo, vários autores desenvolveram equações empíricas para avaliar a perda de solo por erosão, partindo de pequenos experimentos e, em seguida, extrapolando os resultados para bacias hidrográficas inteiras. Entre esses modelos, podem-se citar: Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) – 1976, Equação Universal de Perda do Solo Revisada (EUPSR) – 1991 e Projeto de Predição de Erosão Hídrica (PPEH)-1980.

A EUPS foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), dois cientistas do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Segundo Kuntschik (1996), no Brasil, os trabalhos iniciais com a EUPS foram desenvolvidos por Bertoni et al. (1975), utilizando dados do Estado de São Paulo. Posteriormente, vários pesquisadores vêm tentando avaliar os fatores da EUPS para outras regiões do País.

Essa equação avalia efeitos do clima, propriedades do solo, topografia, nível de colheita-produtividade, administração de resíduo, práticas especiais de conservação e outras variáveis que provocam a erosão do solo.

A EUPS foi desenvolvida para prever valores médios de perdas de solo por arraste em áreas específicas e sob condições de uso do solo e práticas de gerenciamento definidas (KUNTSCHIK, 1996). Também consegue estimar taxas médias de perdas de solo por erosão hídrica laminar e aquela que acontece em pequenos canais, mas a equação não consegue estimar deposição de sedimentos nem perdas de solo por erosão em voçorocas (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Segundo Pruski (2009), a EUPS foi formulada a partir de campos experimentais com base na análise dos dados de escoamento superficial e das perdas de solo, em condições de chuvas naturais e simuladas.

Apesar das restrições a ela e do surgimento de outros modelos de previsão de perdas de solo, a EUPS vem sendo cada vez mais utilizada. (RENARD et al., 1994). Naturalmente, sua utilização é dependente da confiabilidade dos dados usados na determinação dos fatores da equação.

A EUPS é definida pela equação 2.1:

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

em que:

A = perda de solo média anual, em  $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ;

R = fator erosividade da chuva, em  $(\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1})$ ;

K = fator erodibilidade do solo em  $t \text{ h} / (\text{MJ mm})$ ;

LS = fator topográfico, que resulta da combinação dos fatores de comprimento de encosta (L) e declive (S) (adimensional);

C = fator uso e manejo (adimensional); e

P = fator práticas conservacionistas (adimensional).

Os parâmetros R, K, L e S dependem das condições naturais e os parâmetros C e P dependem do uso e ocupação do solo (intervenção antrópica).

#### **2.4.1. Erosividade da chuva (R)**

A erosividade corresponde à capacidade que a chuva tem de causar erosão nos solos, em uma área sem proteção.

De acordo com Pruski (2009), o total da precipitação anual tem pouca importância no processo de erosão hídrica. Outros fatores, como o tamanho e a velocidade de queda das gotas, e a energia cinética, a intensidade, a duração e a frequência da chuva é que efetivamente formam um conjunto de características que provocam a erosão hídrica.

Uma das primeiras propostas para se obter a energia cinética de uma chuva (EC) foi feita por Wischmeier e Smith (1958) e modificada por Foster et al. (1981). Segundo esses autores, a energia cinética associada à chuva que incide sobre uma área é expressa em  $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  e pode ser obtida pelas equações 2.2 e 2.3:

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log i, \text{ para } i < 76 \text{ mm/h} \quad (2.2)$$

ou

$$EC = 0,283, \text{ para } i \geq 76 \text{ mm/h} \quad (2.3)$$

em que  $i$  é a intensidade da chuva,  $\text{mm h}^{-1}$ .

Os mesmos autores propuseram, através da equação 2.4, o índice de erosão  $EI_{30}$ , dado pelo produto da energia cinética e a intensidade pluviométrica:

$$EI_{30} = EC \times i_{30} \quad (2.4)$$

em que:

$EI_{30}$  = índice de erosão em  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ;

$i_{30}$  = intensidade máxima em 30 minutos, em  $\text{mm h}^{-1}$ .

Bertoni e Lombardi Neto (1993), utilizando 22 anos de registros de precipitação de Campinas, SP, propuseram a equação 2.5 para determinação de um valor médio do índice de erosão por meio da relação entre a média mensal e a média anual de precipitação:

$$EI_{30} = 67,355 (r^2 / P)^{0,85} \quad (2.5)$$

em que:

$r$  = média do total mensal de precipitação, em mm; e

$P$  = média do total anual de precipitação, em mm.

Em um certo período de tempo, normalmente alguns anos, a soma dos valores de  $EI_{30}$  de cada chuva, isoladamente, que ocorreu naquele período proporciona uma avaliação numérica da erosividade da chuva (equação 2.6):

$$R = \frac{\sum (EI_{30})_i}{N} \quad (2.6)$$

em que:

$R$  = fator erosividade da chuva, em  $(\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1})$ ;

$N$  = período em anos.

Alguns Estados possuem uma ampla rede de pluviômetros espalhada em seu território, o que facilita o cálculo desse parâmetro.

Albuquerque et al. (1994), Bertoni e Lombardi Neto (1993) e Lopes e Brito (1993), entre outros, estudaram outros índices de erosividade e consideraram o  $EI_{30}$  como o que melhor se ajusta à realidade tropical.

Um estudo feito por Silva (2004) para estimar mensalmente a erosividade das chuvas dividiu o Brasil em oito regiões homogêneas em termos de precipitação. Como exemplo, para a região Sudeste, enquadrada em sua porção norte como região 4 e região 6, esse autor propôs, respectivamente, as equações 2.7 e 2.8 para o cálculo de  $R_x$  (erosividade média da chuva para cada mês):

$$R_x = 42,307 \left( \frac{M_x^2}{P} \right) + 69,763 \quad (2.7)$$

$$R_x = 12,592 \left( \frac{M_x^2}{P} \right)^{0,6030} \quad (2.8)$$

em que:

$M_x$  = precipitações médias mensais; e

P = precipitação média anual.

Para se obter um fator R confiável, estima-se que sejam necessários de 10 a 20 anos de coleta de dados.

A Tabela 2.1 apresenta alguns valores do fator R para algumas localidades do Brasil (SILVA, 1997).

**Tabela 2.1** - Valores do parâmetro erosividade (R) para algumas localidades brasileiras

Local	R (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
Brasília	8319
Goiânia	8353
Mato Grosso	8493 e 7830
São Paulo	7747

### **2.4.2. Erodibilidade do solo (K)**

O fator K representa a susceptibilidade dos solos a serem erodidos sob a ação mecânica da chuva. Pode ser definido como a quantidade de material que é removido por unidade de área; ele determina a resistência do solo à ação erosiva da chuva.

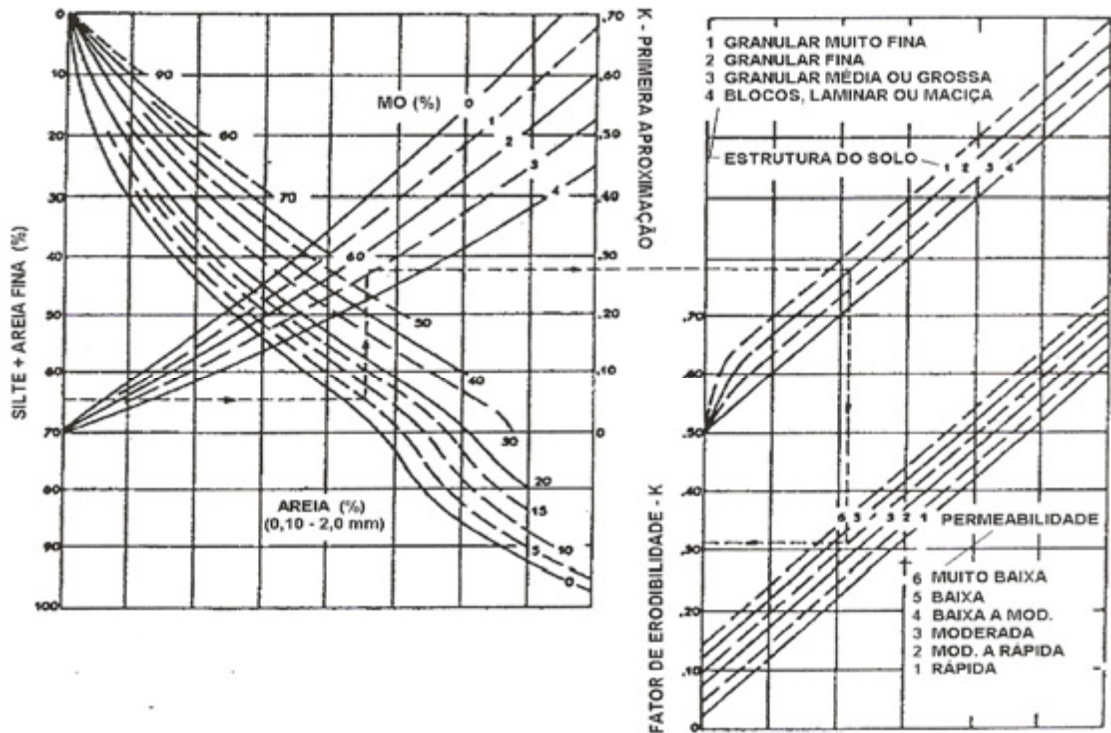
As diferenças relacionadas às propriedades dos solos fazem com que alguns destes sejam mais erodidos que outros, ainda que variáveis como chuvas, declividades, cobertura vegetal e práticas de manejo sejam as mesmas. As propriedades do solo que influenciam a erodibilidade pela água são aquelas que afetam a infiltração, a permeabilidade e a capacidade de armazenamento de água, bem como aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pelo escoamento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Conforme Wischmeier e Smith (1978), em geral, o fator de erodibilidade diminui com o decréscimo da percentagem de partículas do tamanho silte do solo, se este decréscimo não for acompanhado por aumento na quantidade de partículas do tamanho areia. Também o aumento no conteúdo de matéria orgânica diminui o valor de K.

No campo, a erodibilidade do solo tem seu valor quantitativo determinado experimentalmente em parcelas unitárias sendo expressa como a perda de solo (A) por unidade de índice de erosão da chuva ( $EI_{30}$ ).

Experimentos para determinar o valor de K no campo são custosos e demorados, além de ser difícil isolar os efeitos de solo de outros fatores. Em razão disso, tornou-se necessária a estimativa da erodibilidade do solo por outros meios.

De acordo com Pruski (2009), esse fator pode ser determinado experimentalmente no laboratório, em condições específicas de declividade e comprimento de rampa, como, por exemplo, através do equipamento de Inderbitzen, bem como de forma indireta, por meio do Nomograma de Wischmeier et al. (1971), em função da distribuição granulométrica, associada com o teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade (Figura 2.12). Os parâmetros de entrada no nomograma são: teores de silte + areia muito fina (0,002 a 0,1 mm) e percentagem de areia (0,1 a 2,0 mm).



**Figura 2.12** - Nomograma de Wischmeier et al. (1971) para determinação do fator erodibilidade do solo ( $K_{EUPS}$ ). Para conversão dos valores de K do nomograma do Sistema Inglês para o Sistema Internacional de Unidade (SI), basta dividir o valor de K do nomograma por 7,59. PRUSKI (2009).

Estima-se que os solos sejam potencialmente erodíveis quando  $K_{EUPS} > 0,20$ .

A Tabela 2.2 apresenta os valores de erodibilidade, a partir de um estudo realizado por Bertoni e Lombardi Neto (1990), em 66 perfis de solo para dois agrupamentos de solos que ocorrem no Estado de São Paulo.

Observa-se que os solos podzolizados são mais suscetíveis à erosão. Portanto, o fator C (uso e manejo do solo) a ser adotado nos latossólicos deve ser diferente daquele dos podzolizados (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

**Tabela 2.2** - Valores de K dos horizontes superficiais e subsuperficiais para várias unidades de dois agrupamentos de solo do Estado de São Paulo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990)

Grupo de Solo	Fator de erodibilidade em t.h/MJ.mm	
	Superficial	Subsuperficial
<b>COM B TEXTURAL</b>		
Podzolizados com cascalho	0,055	0,027
Podzolizados Lins e Marília, variação Marília	0,049	0,023
Podzólico Vermelho-Amarelo, variação Laras	0,043	0,046
Podzolizados Lins e Marília, variação Lins	0,035	0,023
Podzólico Vermelho-Amarelo, orto	0,034	0,018
Podzólico Vermelho-Amarelo, variação Piracicaba	0,028	0,019
Mediterrâneo Vermelho-Amarelo	0,023	0,021
Terra Roxa estrutural	0,018	0,011
<b>COM B LATOSSÓLICO</b>		
Latossolo Vermelho-Amarelo, orto	0,022	0,009
Latossolo Vermelho-Escuro, fase arenosa	0,017	0,012
Latossolo Vermelho-Amarelo, fase rasa	0,017	0,022
Latossolo Vermelho-Escuro, orto	0,015	0,005
Solos de Campos do Jordão	0,015	0,013
Latossolo Vermelho-Amarelo, fase arenosa	0,013	0,007
Latossolo Vermelho-Amarelo, fase terraço	0,012	0,003
Latossolo Roxo	0,012	0,004
Latossolo Vermelho-Amarelo húmico	0,011	0,004

### 2.4.3. Fator topográfico (LS)

O comprimento e a declividade da encosta ao longo da qual se processa o escoamento superficial alteram a intensidade da erosão hídrica.

O fator topográfico LS tem como fórmula original a proposta de Wischmeier e Smith (1978), expressa na equação 2.9:

$$LS=(L/22,13)^m (65,41 \cdot \text{sen}^2 q + 4,56 \cdot \text{sen} q + 0,065) \quad (2.9)$$

em que:

L = comprimento de encosta, em metros;

q = ângulo de declividade da encosta, em graus;

m = fator de ajuste, que varia em razão da declividade da encosta: 0,2, para declive menor que 1%; 0,3 para declividade entre 1 e 3%; 0,4 para declividade entre 3,5 e 4,5%; e 0,5 para declividade maior que 5%.

Foster et al. (1981) adotaram para o cálculo do fator topográfico a equação 2.10:

$$LS = \sqrt{\frac{L}{100(1,36 + 0,97S + 0,1385S^2)}} \quad (2.10)$$

em que:

L = comprimento do declive, em metros; e

S = grau do declive, em porcentagem.

A Tabela 2.3, através da equação 2.10, apresenta valores do fator topográfico LS para combinações específicas de comprimento de encosta e declividade.

**Tabela 2.3** - Valores do fator topográfico LS

Decl (%)	Comprimento de rampa (metros)													
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	80	100
1	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,16	0,18
2	0,06	0,09	0,12	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,26	0,28	0,29	0,35	0,41
4	0,14	0,22	0,28	0,33	0,38	0,43	0,47	0,51	0,55	0,59	0,63	0,67	0,80	0,92
6	0,23	0,35	0,45	0,54	0,62	0,69	0,77	0,83	0,90	0,96	1,02	1,07	1,29	1,48
8	0,32	0,49	0,63	0,76	0,87	0,98	1,08	1,17	1,26	1,34	1,43	1,51	1,81	2,08
10	0,41	0,64	0,82	0,98	1,13	1,27	1,40	1,52	1,64	1,75	1,86	1,96	2,36	2,71
12	0,51	0,79	1,02	1,22	1,40	1,57	1,73	1,89	2,03	2,17	2,30	2,43	2,92	3,36
14	0,61	0,95	1,22	1,48	1,68	1,89	2,08	2,26	2,43	2,60	2,76	2,92	3,51	4,03
16	0,71	1,11	1,43	1,71	1,97	2,21	2,44	2,65	2,85	3,05	3,23	3,42	4,10	4,72
18	0,82	1,27	1,64	1,97	2,27	2,54	2,80	3,04	3,27	3,50	3,72	3,93	4,71	5,47
20	0,93	1,44	1,86	2,23	2,57	2,88	3,17	3,44	3,71	3,96	4,21	4,45	5,34	6,14

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto, (1990).

Bertoni e Lombardi Neto (1990), trabalhando com condições do Estado de São Paulo, em uma base média de 10 anos, encontraram a equação 2.11, a qual permite calcular o fator topográfico:

$$LS = 0,00984 C^{0.63} D^{1.18} \quad (2.11)$$

em que:

C = comprimento de rampa, em metros; e

D = declividade da encosta, em porcentagem.

#### **2.4.4. Fator uso e manejo do solo (C)**

O fator C é a relação esperada entre as perdas de solo em um terreno cultivado e em um terreno desprotegido. A redução da erosão vai depender do tipo de cultura e manejo adotado, da quantidade de chuvas, da fase do ciclo vegetativo, entre outras variáveis, cujas combinações apresentam diferentes efeitos na perda de solo (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1993).

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990), os efeitos das variáveis uso e manejo não podem ser avaliados independentemente, devido às diversas interações que ocorrem entre elas.

De acordo com Chaves (1994), esse fator representa o grau de proteção média à erosão fornecida pelo uso e manejo do solo.

A determinação desse fator é extremamente complexa, pois várias são as formas de cultura e manejo. Bertoni e Lombardi Neto (1993) propuseram uma tabela para valores de C em diferentes condições de uso e manejo do solo, variando de 0,15 a 0,69.

#### **2.4.5. Fator práticas conservacionistas (P)**

O fator P é a relação entre a intensidade esperada de perdas de solo com determinada prática conservacionista e aquelas quando a cultura está plantada no sentido do declive, isto é, "morro abaixo" (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993).

A Tabela 2.4 apresenta valores do fator P para algumas práticas conservacionistas mais utilizadas no controle da erosão.

Com o transcorrer do tempo, novas pesquisas vêm se aprofundando no conhecimento sobre os processos que influenciam nas perdas de solo por erosão hídrica e, conseqüentemente, na modelagem desse processo. Em

1987, o Serviço de Conservação de Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em conjunto com o Serviço de Pesquisa na Agricultura, começou a revisar a equação da EUPS.

**Tabela 2.4** - Práticas conservacionistas e os valores correspondentes do fator P

<b>Prática Conservacionista</b>	<b>P</b>
Plantio morro abaixo	1.0
Plantio em contorno	0.5
Alternância de capinas com plantio em contorno	0.4
Cordões de vegetação permanente	0.2

**Fonte:** Pruski (2009), citado por Bertoni e Lombardi Neto (1990).

O resultado ficou conhecido como EUPSR, a qual, entre outras modificações, incorpora o conceito de vários valores do fator K ao longo do ano agrícola, uma nova metodologia para calcular o fator C e outra para o fator P (RENARD et al., 1991). Esse modelo também inclui o efeito da água estancada no fator R. Para Renard et al. (1994), a EUPSR tem melhor comportamento que a EUPS em solos que são trabalhados aplicando-se técnicas de preparo conservacionistas, como o plantio direto.

Assim como a EUPS, a EUPSR calcula a média de perda de solo por erosão em áreas com grandes declives.

Com o propósito de desenvolver uma nova tecnologia de predição da erosão, o Serviço de Pesquisa Agrícola (USDA-ARS) em 1985 iniciou o Projeto de Predição de Erosão Hídrica (WEPP), visando à obtenção de um modelo que substituísse a EUPS. Esse novo modelo foi desenvolvido para predizer a taxa de erosão hídrica em três escalas diferentes: a versão que fornece resultados para processos que acontecem nas encostas é chamada de *Hillslope version*; a que fornece dados de erosão em bacias, incluindo a que acontece em arroios e canais, é denominada *Watershed version*; e SIG (sistemas reticulados), KUNTSCHIK (1996).

De acordo com Angulo et al. (1990), os resultados da aplicação dessa metodologia de trabalho no Brasil mostraram que esse modelo pode funcionar aqui, embora ainda seja necessária a sua validação, além de ser necessário desenvolver trabalhos para definir alguns parâmetros dos solos brasileiros e do manejo das culturas.

A maior vantagem deste modelo é a sua utilização em escala universal, inclusive nos países tropicais, como o Brasil. Com alguns cuidados e adaptações, poderá se tornar uma importante ferramenta na predição da erosão e no planejamento de práticas conservacionistas do Brasil.

As variáveis e parâmetros requeridos pelo modelo são, de acordo com Chaves (1992): solo, uso/manejo, clima e relevo.

## **2.5. Estudo da erodibilidade do solo**

Segundo Boardman (1985), a erodibilidade de um solo pode ser caracterizada pelos seguintes fatores: chuva; propriedades físicas e químicas; características das encostas (forma, tamanho e declividade); e natureza da cobertura vegetal, na qual se incluem os efeitos espaciais, que podem impedir ou não os efeitos da energia cinética das chuvas.

Com o tempo, essas propriedades podem ser alteradas e, conseqüentemente, a erodibilidade de um solo pode mudar.

Uma forma comum de se avaliar a erodibilidade é procurar correlacioná-la com propriedades geotécnicas do solo fáceis de serem determinadas, como análise granulométrica, índices físicos, coeficiente de permeabilidade, parâmetros de resistência ao cisalhamento etc., além de ensaios de caracterização química e mineralógica do solo e ensaios para a composição química da água.

Para avaliação direta da erodibilidade em laboratório, alguns equipamentos foram desenvolvidos, entre os quais os ensaios de Inderbitzen, objeto principal deste trabalho, Pinhole Test, Slaking Test, Cilindros Rotatórios, Método de Nogami e Villabor, Dispersão etc.

### ***2.5.1. Estudos de erodibilidade de solos por meio de correlações com propriedades geotécnicas dos solos***

Alguns autores procuram relacionar a erodibilidade de um solo com seus índices de plasticidade: LL, limite de liquidez; LP, limite de plasticidade; e IP, índice de plasticidade.

Assim, Meireles (1967) afirma que solos fortemente erodíveis apresentam baixa plasticidade, representada por  $LL \leq 21\%$  e  $IP \leq 8\%$ .

Estudos realizados por Santos e Castro (1967) consideraram que, quando  $LL < 50\%$  e  $IP$  próximo a  $20\%$ , os solos são classificados como de baixa plasticidade e, portanto, altamente erodíveis.

De acordo com Gray e Sotir (1996), o sistema de classificação americano “Unified Soil Classification System” pode ser usado como medida da erodibilidade dos solos, no sentido mais erodível para menos erodível, na seguinte ordem: ML (silte de baixa plasticidade) > SM (areia siltosa) > SC (areia argilosa) > MH (silte de alta plasticidade) > OL (solo orgânico de plasticidade baixa) > CL (argila de baixa plasticidade) > CH (argila de alta plasticidade) > GM (pedregulhoso siltoso) > SW (areia bem graduada) > GP (pedregulho pobremente graduado) > GW (pedregulho bem graduado).

Bastos (1999) classifica os solos como potencialmente erodíveis quando apresentam  $IP < 10\%$ .

O critério sugerido por Fragassi (2001) e Mendes (2006) segue o proposto pelo DNER (1979), ou seja: solos com limite de plasticidade,  $LP \leq 32\%$  e  $IP \leq 17\%$  apresentam comportamento de bom a regular quanto a resistência à erosão.

Informações da curva granulométrica de um solo também podem ser usadas para determinar o seu potencial de erodibilidade.

Meireles (1967) propôs que:

- solos fortemente erodíveis  $\Rightarrow$  % passante na peneira 200  $\leq 20\%$ ;
- solos passíveis de forte erosão  $\Rightarrow 20\% <$  % passante na peneira 200  $< 40\%$ ;
- solos pouco erodíveis  $\Rightarrow$  % passante na peneira 200  $> 40\%$ .

Já Bastos (1999) classifica os solos como potencialmente erodíveis quando menos que  $55\%$  das suas partículas passam pela peneira 200 (abertura igual a  $0,074$  mm).

Quando a parcela de argila encontrada na curva granulométrica for superior a  $35\%$ , Eltz et al. (2001) classificam os solos como erodíveis.

Fragassi (2001) considera os solos granulares como os mais erodíveis, com partículas do tamanho de areia fina ou silte e pouca quantidade de argila.

Fundamentado em dados da curva granulométrica, Fragassi (2001), na classificação dos solos quanto à erodibilidade, propôs a equação 2.12:

$$E = 0,0002 e^{5,6444X} \quad (2.12)$$

em que:

E = erodibilidade (g/cm<sup>2</sup>); e

X = (% Silte + % Areia Fina) / (% Argila + % Areia Grossa).

Essa relação foi obtida partindo do princípio de que as argilas e as areias grossas são mais resistentes à desagregação do que as areias finas e siltes, correlacionado à erodibilidade com o quociente da porcentagem de solos erodíveis com solos não erodíveis.

De acordo com este mesmo autor, o DNER (1979) sugere que solos com boa a regular resistência à erosão apresentam  $49\% \leq \% \text{ passante na peneira 40 (abertura igual a } 0.425 \text{ mm)} \leq 96\%$ .

Uma proposta para avaliar a erodibilidade dos solos relacionando Índice de Plasticidade (IP) e Coeficiente de Uniformidade (C<sub>u</sub>) é apresentada na Tabela 2.5 (SANTOS, 2001).

**Tabela 2.5** - Critérios adotados por Santos (2001) quanto à relação entre erodibilidade, IP (Índice de Plasticidade) e coeficiente de uniformidade (C<sub>u</sub>)

IP	Erodibilidade	C <sub>u</sub>	Erodibilidade
IP > 15	boa resistência à erosão	C <sub>u</sub> < 5	solos erodíveis
15 > IP > 6	média resistência à erosão	5 < C <sub>u</sub> < 15	solos de média erodibilidade
IP < 6	baixa resistência à erosão	C <sub>u</sub> > 15	solos de baixa erodibilidade

Também, são feitas algumas correlações entre índices físicos e perdas de solo.

A experiência do Serviço de Conservação do Solo (SCS), citada por Bastos (1999), permitiu distinguir duas classes de solos quanto à resistência a erosão: solos facilmente erodíveis com índices de vazios (e) > 0,7 e solos resistentes à erosão com índices de vazios ≤ 0,7.

Fácio (1991) também discutiu a influência da sucção na erodibilidade. Esse autor verificou o crescimento da perda de solo com a redução no grau de saturação (S) através de vários ensaios em amostras com diferentes condições de umidade. Quanto menor o grau de saturação e maior a sucção, maior a capacidade do solo em absorver água. Com umedecimento, reduz-se a coesão aparente e o ar presente nos vazios é comprimido, sendo capaz de gerar poropressão positiva, que, dependendo da estrutura do solo, pode desagregá-lo.

O peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) pode ser considerado, segundo Mendes (2006), um fator controlador dos processos erosivos, pois está relacionado ao maior ou menor grau de compactação dos solos. Assim, quanto maior o  $\gamma_s$ , mais compacto o solo estaria e, conseqüentemente, menos erodível ele seria.

Muitos autores correlacionam a erodibilidade com a resistência ao cisalhamento dos solos.

Bastos (1999), em uma análise simplificada do problema de erosão por fluxo superficial em um talude, concluiu que a oposição ao movimento dos grãos pela ação do fluxo na superfície é feita pela resistência ao cisalhamento entre a camada de grãos superficial e a subjacente. Em função dos pequenos valores de tensão normal encontrados na superfície do talude sujeito à erosão, a parcela coesiva da resistência assume maior importância. Portanto, a erosão depende da coesão do solo na superfície do talude, que pode ser alterada se houver infiltração das águas pluviais. Sugere ainda que os parâmetros de resistência coesão,  $c$ , e ângulo de atrito,  $\phi$ , sejam obtidos por meio de ensaios realizados com amostras nas condições de umidade natural e inundados.

Esse mesmo autor recomenda a realização do ensaio de cisalhamento direto para avaliar os parâmetros de resistência e, conseqüentemente, a erodibilidade do solo. Por outro lado, sugere que o potencial de erodibilidade seja relacionado com a variação da coesão ( $\Delta c$ ) entre envoltórias de resistência obtidas com amostras na umidade natural e amostras inundadas. Identificou que solos que se apresentaram potencialmente erodíveis em ensaios de Inderbitzen mostraram elevadas variações de coesão com a inundação e propôs que se caracterizassem como solos com alta erodibilidade aqueles que apresentassem um fator  $\Delta c$  dado pela equação 2.13:

$$\Delta_c = \frac{(c_{nat} - c_{inu})}{c_{nat}} \quad (2.13)$$

em que:

$\Delta_c$  = variação de coesão;

$c_{nat}$  = coesão na condição natural; e

$c_{inu}$  = coesão inundada.

A análise em termos do parâmetro  $\Delta_c$  permite entender a tendência de crescimento da taxa de erodibilidade com  $\Delta_c$  e identificar os solos com média a alta erodibilidade como aqueles que apresentam elevada variação de coesão com a inundação, igual ou superior a 85%.

Lima (2003) aponta os fatores que contribuem para o aumento da instabilidade dos taludes em voçorocas. Esses fatores atuam, seja aumentando as tensões cisalhantes, seja diminuindo a resistência ao cisalhamento dos solos. Assim:

- Fatores que aumentam as tensões cisalhantes em taludes e paredes de voçorocas: desconfinamento lateral, sobrecarga, solapamento, pressão lateral, pressões de percolação de água dentro do maciço, tensões transitórias relacionadas a vibrações de diversas origens, como sismos, máquinas, tráfegos e vibrações devido a explosivos.
- Fatores que podem diminuir a resistência ao cisalhamento dos solos: composição e textura, reações físico-químicas, redução das tensões de sucção decorrentes do aumento do grau de saturação, alterações da estrutura, fissuramento do solo provocado por ressecamento, lixiviação de compostos solúveis, liquefação de areias finas saturadas, provocada por vibrações e remoção da vegetação.

### **2.5.2. Estudos de erodibilidade de solos por meio de correlações com a permeabilidade**

A permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de água através dele. O conhecimento do valor da permeabilidade é muito importante em algumas obras de engenharia, entre elas: estimativa da vazão que percolará através do maciço e da fundação de barragens de terra;

obras de drenagem; rebaixamento do lençol freático; possibilidade de a água de infiltração produzir erosão, e conseqüentemente, o arraste de material sólido no interior do maciço *piping*.

O coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica  $K$  leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica), e, quando da realização de ensaios, também a temperatura do ensaio.

Quanto maior a temperatura, menor a viscosidade da água e, portanto, mais facilmente ela escoar pelos vazios do solo, com correspondente aumento do coeficiente de permeabilidade;  $K$  é inversamente proporcional à viscosidade da água.

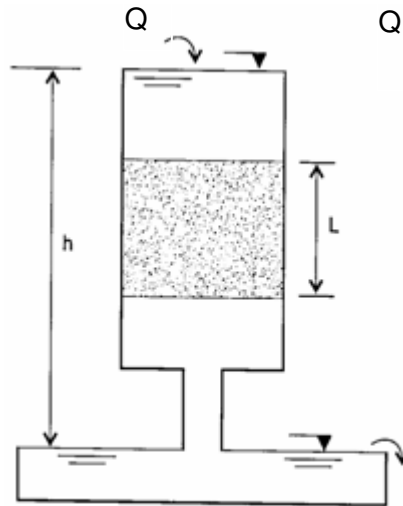
A condutividade hidráulica pode ser determinada diretamente, por meio de ensaios de campo e laboratório, ou indiretamente, utilizando-se correlações empíricas. Pode ser obtida utilizando-se de amostras deformadas ou indeformadas.

Segundo Mendes (2006), a estrutura dos solos argilosos influencia na resistência à erosão porque as propriedades físicas e químicas desses solos fazem com que os agregados permaneçam estáveis em presença de água e de matéria orgânica humificada. Quanto maior a estabilidade dos agregados, maior a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, menor o escoamento superficial e o arraste de partículas individuais pela água.

#### *2.5.2.1. Métodos diretos para a determinação da permeabilidade dos solos*

##### 1. Permeâmetro de Carga Constante

É utilizado para medir a permeabilidade dos solos granulares com razoável quantidade de areia e/ou pedregulho. Compõe-se de dois reservatórios, onde os níveis de água são mantidos constantes, como mostra a Figura 2.13. Mantendo-se a carga  $h$ , durante um certo tempo, a água percolada é recolhida e o seu volume medido. Conhecendo a vazão e as dimensões do corpo de prova (comprimento  $L$  e a área da seção transversal  $A$ ), calcula-se o valor da permeabilidade,  $K$ , através da equação 2.14 de Darcy.



Fonte: Pinto (2006).

**Figura 2.13** - Permeâmetro de carga constante.

A NBr 13292/95 prescreve o método para determinação do coeficiente de permeabilidade a carga constante, com a água percolando através do solo em regime de escoamento laminar. A aplicação desse método é restrita a solos granulares, contendo no máximo 10%, em massa, de material que passa na peneira 200.

$$K = \frac{Q}{i A} \quad (2.14)$$

em que:

K = permeabilidade;

Q = vazão= volume/tempo;

i = gradiente hidráulico (h/l); e

A = área da amostra.

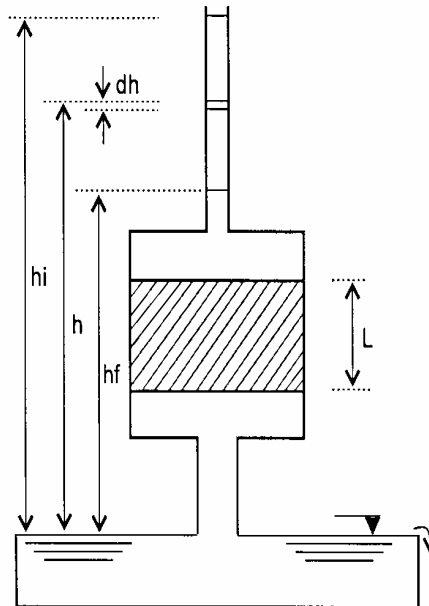
## 2. Permeâmetro de carga variável

É utilizado para medir a permeabilidade dos solos que apresentam coeficiente de permeabilidade muito baixo (solos argilosos e siltosos).

Em se tratando de solos finos, o ensaio com carga constante torna-se inviável, pois há pouca percolação de água pela amostra, dificultando a determinação do coeficiente de permeabilidade. Para esses solos é mais vantajosa a utilização de permeômetros com carga variável.

A NBr 14545/2000 prescreve a metodologia para determinação do coeficiente de permeabilidade a carga variável, com a água percolando através do solo em regime de escoamento laminar.

Como pode ser visto na Figura 2.14, medem-se os valores  $h$  obtidos para variados valores de tempo decorrido desde o início do ensaio e os valores da temperatura em cada medida. O coeficiente de permeabilidade do solos é então calculado, fazendo-se uso da lei da Darcy e levando-se em conta que a vazão de água passando pelo solo é igual à vazão da água que passa pela bureta (equação 2.15).



Fonte: Pinto (2006).

**Figura 2.14** - Permeômetro de carga variável.

$$K = 2,3 \frac{a L}{A \Delta t} \log \frac{h_i}{h_f} \quad (2.15)$$

em que:

$a$  = área interna do tubo de carga ( $\text{cm}^2$ );

$L$  = altura do corpo de prova (cm);

$A$  = seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ );

$\Delta t$  = intervalo de tempo para o nível d'água passar de  $h_0$  para  $h_1$  (min);

$h_i$  = distância inicial do nível d'água para o reservatório inferior (cm); e

$h_f$  = distância para o tempo  $t$ , do nível d'água para o reservatório inferior (cm).

Pinto (2006) considera (Tabela 2.6) alguns valores típicos da variação do coeficiente de permeabilidade.

**Tabela 2.6** - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade (PINTO, 2006)

Tipo de solo	Valores típicos de k
Argilas	$< 10^{-9}$ m/s
Siltos	$10^{-9}$ a $10^{-6}$ m/s
Areias argilosas	$10^{-7}$ m/s
Areias Finas	$10^{-5}$ m/s
Areias Médias	$10^{-4}$ m/s
Areias Grossas	$10^{-3}$ m/s

## 2.6. Os Ensaios de Inderbitzen

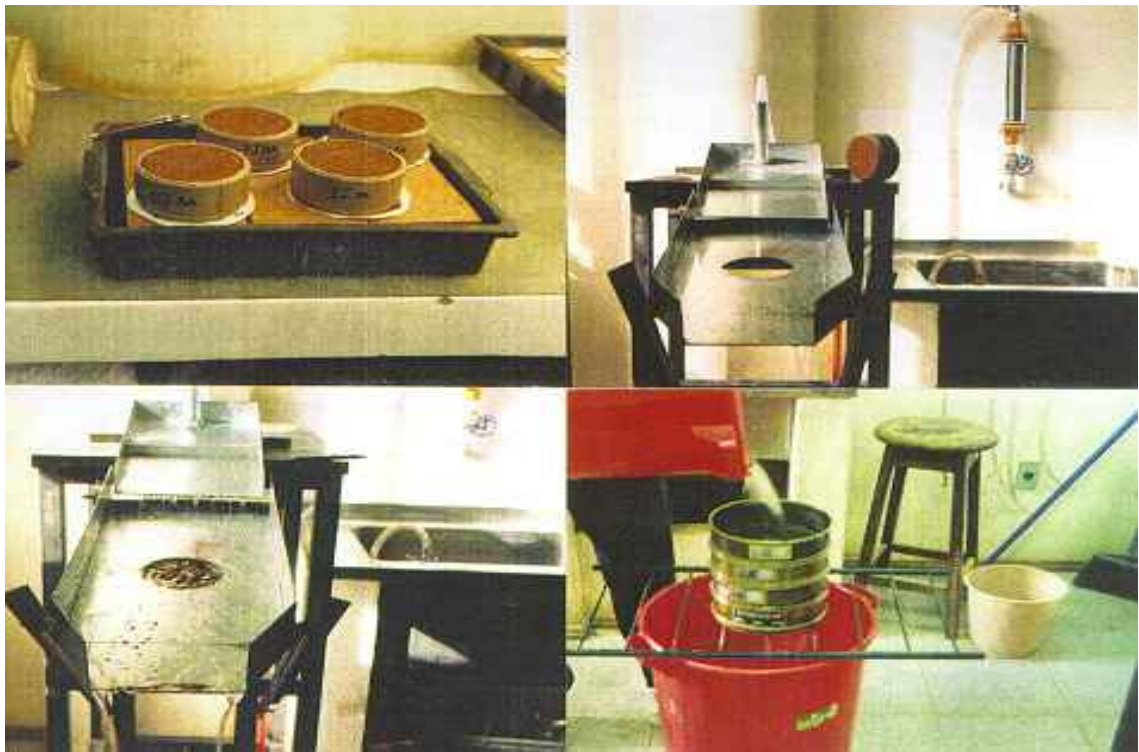
Inderbitzen, em 1961, idealizou um equipamento com a finalidade de monitorar o volume de perdas de solos em decorrência dos processos erosivos provocados pela água. A Figura 2.15 ilustra o modelo original do equipamento, que consiste em uma rampa hidráulica com inclinação conhecida, onde se coloca um orifício no qual se insere a amostra de solo, simulando condições de escoamento superficial com vazão controlada. O aparelho para realização do ensaio de Inderbitzen é simples de ser construído e de baixo custo. O ensaio é fácil, rápido e tem sido promissor na avaliação da erodibilidade dos solos. Ele não leva em consideração o efeito *splash* (desagregação de partículas provocada pelo impacto das gotas de chuva). Em razão disso, o teor de sedimentos obtido com o ensaio é menor do que o real. Essa diferença é mais significativa para solos desprotegidos de cobertura vegetal.

Com o objetivo de aprimorar a qualidade dos resultados obtidos no aparelho de Inderbitzen, algumas modificações vêm sendo propostas: Bastos (1999), Fragassi (2001), Santos (2001), Ramidan (2003), Paiva (2004), Menezes et al. (2006) e Mendes (2006). Esses novos equipamentos serão apresentados a seguir.



uma variação na sua inclinação de  $0^{\circ}$  a  $54^{\circ}$ , na qual se fez um orifício central, onde foi instalada a amostra de solo indeformada, com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5,00 cm, confinada em anel de PVC biselado.

A Figura 2.16 apresenta as amostras preparadas, a rampa pronta para receber a amostra, o ensaio e o peneiramento.



**Figura 2.16** - Etapas da execução do ensaio de Inderbitzen proposto por Bastos (1999).

No trabalho, as variáveis adotadas foram: vazão de 50,0 e 100,0 ml/s ou 3,0 e 6,0 l/min; condições prévias de umidade das amostras, secas ao ar (mínimo de 72 horas), natural e pré-umedecidas (por ascensão capilar, mínimo de 24 horas); e declividades de  $10^{\circ}$ ,  $26^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  e  $54^{\circ}$ . O tempo de ensaio foi de 20 minutos, com medições em 1, 5, 10 e 20 minutos.

Essas declividades foram adotadas, segundo o autor, buscando simular os taludes envolvidos na pesquisa e as vazões em função da capacidade de escoamento da rampa e da sensibilidade dos valores de perda de solos medidos.

O material carregado foi recolhido em balde e submetido ao peneiramento úmido, em um conjunto de peneiras (# 4, 10, 40 e 200), e em seguida levado à estufa para quantificar o peso seco retido em cada peneira. O material passante na # 200 foi medido por critérios de medidas indiretas. No final do ensaio, as amostras eram retiradas do anel e secas em estufa para obtenção do peso seco.

Os resultados foram mostrados em gráficos, nos quais se apresentou a variação com o tempo do peso seco acumulado de solo erodido por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

De acordo com Graf (1984, citado por BASTOS, 1999), considerando a Hidráulica de Canais, o destacamento das partículas nos sulcos deve ser levado em consideração quando as tensões cisalhantes hidráulicas do fluxo excedem a tensão cisalhante crítica do solo e pode ser estimado pela equação 2.16, de Du Boys, desenvolvida em 1876, a qual considera que os sedimentos se movem em camadas, cada uma com uma determinada espessura, devido à força de tração resultante da tensão cisalhante hidráulica aplicada em cada uma delas.

$$\tau_h = 10000 \gamma \cdot h \cdot \tan \alpha \quad (2.16)$$

em que:

$\tau_h$  = tensão cisalhante hidráulica (Pa);

$\gamma$  = peso específico da água ( $0,01 \text{ N}/\text{cm}^3$ );

$h$  = altura da lâmina de fluxo (cm); e

$\alpha$  = ângulo de inclinação do escoamento (graus).

A altura da lâmina de fluxo é obtida através da vazão, velocidade do fluxo e largura da rampa hidráulica, conforme equação 2.17:

$$h = \frac{Q}{v \cdot L} \quad (2.17)$$

em que:

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

$v$  = velocidade do fluxo (cm/s);

$Q$  = vazão ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ); e

$L$  = largura da rampa hidráulica (cm).

A velocidade do fluxo é obtida pela equação 2.18 – fórmula de Chezy com coeficiente de Manning:

$$v = R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (2.18)$$

em que:

$$R_h \text{ (cm)} = \text{Raio Hidráulico} = \frac{\text{Área Molhada}}{\text{Perímetro Molhado}} ;$$

$I$  = declividade (adimensional – cm/cm); e

$\eta$  = coeficiente de rugosidade (adimensional) – tabelado em função do material utilizado, conforme Tabela 2.7.

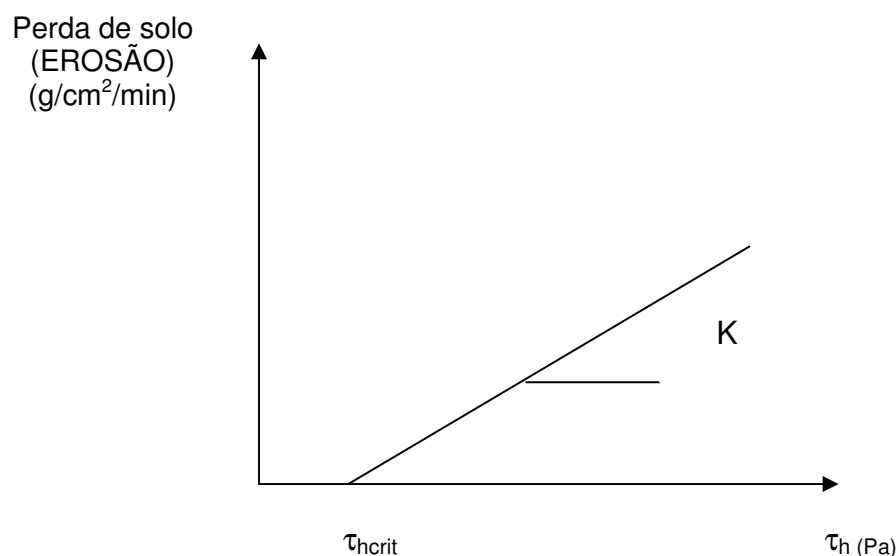
**Tabela 2.7** - Coeficientes de rugosidade

Material	Coeficiente ( $\eta$ )
Plástico, fibrocimento, alumínio, aço inoxidável, aço galvanizado, cobre, latão	0,011
Ferro fundido, concreto alisado, alvenaria revestida	0,012
Cerâmica e concreto não alisado	0,013
Alvenaria de tijolos não revestida	0,015

Fonte: Tomaz (2005).

Utilizando a equação proposta Du Boys, calcula-se a tensão cisalhante hidráulica do ensaio ( $\tau_h$ ) e, com a perda de solo por unidade de área e de tempo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ), faz-se o gráfico da Figura 2.17 e ajusta-se uma reta, com a qual é possível estimar os parâmetros de erodibilidade: tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{\text{hcrit}}$ ), que corresponde ao valor máximo da  $\tau_h$  para erosão nula, e taxa de erodibilidade  $K$ , que representa o gradiente de perda de solo em relação às tensões hidráulicas aplicadas.

Nearing et al. (1988), assim como Bastos (1999), afirmam que a relação entre a capacidade de destacamento e as tensões cisalhantes não é sempre linear. Entretanto, a hipótese de linearidade na faixa de tensões de interesse é aceita nos modelos de erosão e geralmente considera precisa segundo experimentos de erosão em solos.



**Figura 2.17** - Representação gráfica da equação de Du Boys para definição de K e  $\tau_{hcrit}$  a partir dos resultados do ensaio de Inderbitzen proposto por Bastos (1999).

A Tabela 2.8 apresenta critérios de erodibilidade, com base nas taxas de erodibilidade, para ensaios próximos às condições expostas pelo autor em amostras na umidade natural.

**Tabela 2.8** - Critérios de erodibilidade

Valores de K	Nível de erodibilidade
$K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$	baixa erodibilidade
$0,001 < K < 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$	mediana erodibilidade
$K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min/Pa}$	alta erodibilidade

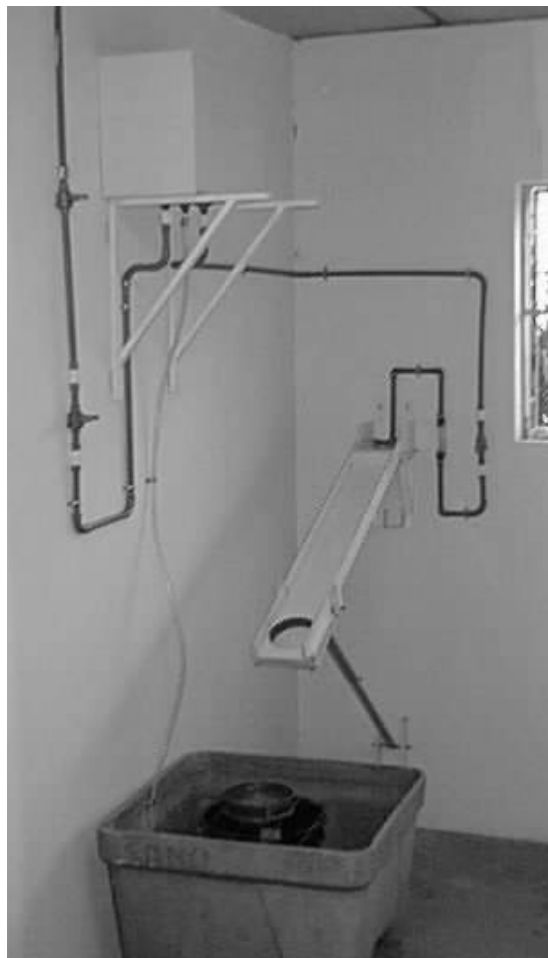
Fonte: Bastos (1999).

Os resultados apontados por Bastos (1999) em termos de perda de solo por unidade de área e de tempo x tensão cisalhante hidráulica do ensaio ( $\tau_h$ ) confirmam o comportamento erodível verificado *in situ* dos solos saprolíticos independentemente da condição de umidade. Os solos lateríticos indicaram baixa erodibilidade na condição de umidade natural e pré-umedecidos; à medida que os corpos de prova eram levados a baixos valores de umidade, a taxa de erodibilidade aumentava.

Fragassi (2001) estudou o grau de erodibilidade dos solos da Serra de São Geraldo, localizada no km 30 da BR-120, entre as cidades de São Geraldo e Viçosa (Minas Gerais), e de um talude de solo gnáissico situado dentro do campus universitário da Universidade Federal de Viçosa, cidade de Viçosa-MG. Esse autor desenvolveu, no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), uma nova versão de um aparelho de Inderbitzen com o propósito de estudar o potencial de erosão dos dois solos.

O material usado na fabricação do equipamento foi o PVC. A rampa hidráulica foi construída com base de 15,0 cm e comprimento de 120,0 cm, articulada de modo que sua inclinação variasse de 0º a 60º.

Conforme Figura 2.18, na rampa foi feito um orifício central, onde é inserida uma amostra de solo indeformada, com diâmetro de 15,20 cm e altura de 4,00 cm, em anel metálico biselado.



**Figura 2.18** - Aparelho de Inderbitzen desenvolvido por Fragassi (2001).

Para uniformizar as condições de umidade, todos os ensaios foram realizados com as amostras próximo à saturação. Foram adotados: vazão de 25,0 ml/s (1,5 l/min); tempo de saturação de 15 min; tempo de ensaio de 30 min (com medições em 5, 10, 15 e 30 min); e declividade de 10°.

O material carregado foi recolhido na peneira 200, inserida dentro de um reservatório de água de 500 ml, e em seguida levado à estufa e, posteriormente, pesado nos tempos adotados.

Pelo fato de o material passante na # 200 ser representativo, os resultados foram plotados sob a forma de perda de solo ponderada pela fração maior que 0,074 mm, provenientes das curvas granulométricas.

Os resultados foram apresentados por meio de gráficos, que expressam o tempo de ensaio (min) x perda de solo seco acumulado por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Fragassi (2001) propôs os critérios de erodibilidade apresentados na Tabela 2.9, fazendo uso da proposta do DNER (1979) para vazão igual a 25 ml/s (1,5 l/min).

**Tabela 2.9** - Critérios de erodibilidade propostos por Fragassi (2001)

<b>Velocidade de erosão</b>	<b>Classificação</b>
0,0 a 0,8 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{hora}$	resistente à erosão
0,8 a 25,0 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{hora}$	comportamento regular a mau frente à erosão
acima de 25,0 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{hora}$	mau comportamento frente à erosão

Esse autor, analisando os resultados, observou que para os solos da Serra de São Geraldo ocorreu variação considerável, decorrente da anisotropia presente nas amostras, ou ainda problemas relacionados à geometria do corpo de prova. Mesmo havendo dispersão nos resultados, verificou que os solos residuais jovens foram mais suscetíveis à erosão; dentre eles, o residual jovem do campus da UFV era o mais erodível. Os residuais maduros tiveram valores bem próximos de erodibilidade, podendo ser considerados iguais.

Santos (2001) estudou a erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto - Minas Gerais, em relação aos processos erosivos que ocorrem em grande número na região, procurando quantificá-los por meio de correlação com as propriedades físicas dos solos. As

amostras foram coletadas em pontos na alta, média e baixa vertente, de uma das áreas experimentais do Grupo de Pesquisa “Geodinâmica Superficial” do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto - MG.

Além dos ensaios de caracterização, foi realizado o ensaio de Inderbitzen com o mesmo equipamento desenvolvido por Fragassi (2001), no Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

As amostras indeformadas foram saturadas e, inicialmente a vazão adotada foi de 25,0 ml/s (1,5 l/min), com tempo de ensaio de 30 min (com medições em 5, 10, 15 e 30 min) e declividade de 10°.

Santos (2001) adotou a seguinte metodologia: após os 30 minutos iniciais, alterou-se a vazão para 50,0 ml/s (3,0 l/min), sendo posteriormente modificada para 100,0 ml/s (6,0 l/min) e 150,0 ml/s (9,0 l/min), respectivamente, em intervalos de 5 em 5 minutos; a coleta do material transportado foi feita nesses mesmos intervalos, até o término do ensaio em 45 minutos.

O material coletado foi passado na peneira de malha # 200, armazenado em cápsulas de alumínio e secado em estufa. Após secagem, todo o material de solo erodido foi pesado em balança.

Os resultados obtidos foram tratados e apresentados em forma gráfica, sendo expressos em tempo de ensaio (min) x perda de solo acumulada por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ); tempo de ensaio (min) x velocidade de erosão em função do tempo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{h}$ ); e vazão (l/min) x erodibilidade ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

A partir dos resultados encontrados, verificou-se que o solo da média vertente apresentou maior suscetibilidade à erosão e que, com o passar do tempo, a velocidade de erosão apresentou variação mais acentuada. Quanto à relação entre vazão e erodibilidade, observou-se aumento de erodibilidade à medida que a vazão se elevava. Nesse caso, o solo de baixa vertente mostrou-se mais erodível; o de alta encosta menos erodível; e o da meia encosta situou-se entre os dois anteriores. O solo de baixa vertente é mais erodível porque apresenta alto teor de matéria orgânica em relação ao de média e alta vertente.

Ramidan (2003) teve como objetivo principal em seu trabalho quantificar o grau de erodibilidade de uma área de empréstimo de aproximadamente 70 hectares, localizada a jusante da ombreira direita da UHE de Itumbiara – GO. Para isso, construiu um equipamento Inderbitzen, baseado no proposto por Santos (2001) em chapa metálica, alterando apenas a medida

da base da rampa de 33,0 cm para 10,0 cm e comprimento igual a 130,0 cm (Figura 2.19).

As amostras de solo indeformada foram moldadas em um cilindro de fibra com diâmetro de 10,00 cm e altura de 10,00 cm para solos lateríticos e de 15,00 cm para os demais solos (Figura 2.20).



**Figura 2.19** - Equipamento de Inderbitzen. Ensaio em andamento, proposto por Ramadan (2003).

A vazão adotada foi de 50,0 ml/s (3,0 l/min); o tempo de saturação, 15,0 min; tempo de ensaio, 30 min (com medições em 1, 5, 10, 20 e 30 min); e a declividade, 10°.

O material carregado pelo fluxo foi coletado através de um conjunto de peneiras (# 50, 100 e 200), apoiadas sobre um reservatório, de acordo com o tempo especificado anteriormente. Em seguida, o conjunto foi lavado e o solo recolhido em béquer, para serem secos em uma estufa e depois pesados, a fim de quantificar o peso seco retido; repetiu essa operação a cada troca de peneiras.



Fonte: Ramidan (2003).

**Figura 2.20** - Equipamento de Inderbitzen – detalhe da amostra.

Os resultados foram plotados através do tempo de ensaio (segundos) x peso seco acumulado de solo erodido por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Dos solos analisados por Ramidan (2003), o laterítico foi o que apresentou o menor valor de perda de solo – resultado condizente com os padrões de classificação para esses solos, que mostram maior resistência a processos erosivos.

Paiva (2004) avaliou a erodibilidade dos solos pertencentes à bacia do rio Una em Taubaté-SP, em uma área de aproximadamente  $442,85 \text{ km}^2$ , onde as perdas de solo são um dos principais impactos ambientais. Para essa pesquisa, montou o equipamento de Inderbitzen no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Infraestrutura da Aeronáutica (ITA), com base nas propostas do DNER (1979).

Como pode ser visto na Figura 2.21, o equipamento é composto de rampa hidráulica em chapa de aço revestida com PVC (base = 33,0 cm e comprimento = 130,0 cm), articulada, permitindo uma variação na sua inclinação. Nessa rampa foi feito um orifício central circular, onde se inseriu uma amostra de solo indeformada, com diâmetro de 15,00 cm e altura de

4,50 cm, confinada em anel de PVC biselado. As vazões adotadas foram de 50,0 e 125,0 ml/s (3,0 e 7,5 l/min), que correspondem, respectivamente, às chuvas intensas em períodos de 120 e 30 minutos, para um tempo de recorrência (T) de 10 anos.



Fonte: Paiva (2004).

**Figura 2.21** - Equipamento de Inderbitzen proposto por Paiva (2004).

As amostras ensaiadas encontravam-se nas condições extremas de umidade: seca ao ar (até constância de peso), natural e pré-umedecida (por ascensão capilar, até que fosse notada água em sua superfície).

O tempo de ensaio adotado foi variado, chegando até 120 min (com medições em intervalos variados, dependendo da amostra), com declividades de 20° e 60° (simulando condições dos cortes do talude).

O material carregado foi recolhido em um recipiente, através de um conjunto de peneiras, e em seguida levado à estufa para quantificar o peso seco retido em cada peneira.

Paiva (2004) apresentou os resultados em gráficos entre tensão cisalhante hidráulica (Pa) x perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) e adotou o critério de erodibilidade proposto pelo DNER (1979), conforme Tabela 2.7.

As amostras com maiores porcentagens de areia e fração de argila reduzida apresentaram-se mais erodíveis sob as distintas condições de fluxo e declividade. Solos saprolíticos confirmaram elevados valores de perda de solo, e os solos lateríticos apresentaram significativa taxa de erodibilidade nos ensaios realizados com amostras secas ao ar; nas condições de umidade natural e saturada, a erodibilidade se reduziu drasticamente.

Menezes et al. (2006) estudaram, no Laboratório de Engenharia Civil da UFLA (Universidade Federal de Lavras), o parâmetro erodibilidade, por meio de ensaios de laboratório (caracterização geotécnica e ensaios específicos de erodibilidade), em diferentes perfis de solos encontrados nas encostas da cidade de Lavras-MG, que vêm sofrendo graves problemas com a erosão.

Com a finalidade de realizar ensaios de Inderbitzen, Menezes et al. (2006) construíram um equipamento de acordo com o projeto fornecido por Fragassi (2001), ou seja, rampa hidráulica em PVC, base de 15,2 cm e comprimento 120,0 cm, articulada, com um orifício central, para inserção da amostra de solo, indeformada, com diâmetro de 15,0 cm e altura de 4,0 cm, confinada em anel metálico biselado (Figura 2.18).

As amostras utilizadas no ensaio foram indeformadas e na condição natural.

A partir de uma vazão escolhida, 50,0 ml/s (3,0 l/min), alterou-se a declividade de  $10^\circ$  para  $80^\circ$  e o tempo de ensaio para 120 min (com medições em 5, 10, 30, 60 e 120 min). As coletas dos sedimentos foram feitas nesses intervalos, sendo eles submetidos ao peneiramento e levados à estufa para quantificação do peso seco retido em cada peneira.

Os resultados foram plotados através do tempo de ensaio (min) x perda em peso de solo seco acumulado erodido, com relação à área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Menezes et al. (2006) destacaram os ensaios de Inderbitzen como uma importante ferramenta para auxiliar a compreensão do processo de erosão nos solos. Nos resultados obtidos, verificou-se que a maior quantidade de perda de solo ocorreu nos cinco minutos iniciais, concluindo que esse fato foi

influenciado pela alta inclinação (80°) da rampa do equipamento de Inderbitzen, uma vez que na sua construção procurou-se representar a inclinação real das encostas analisadas em campo.

De acordo com Mendes (2006), a perda de solo e a erodibilidade K retratam o potencial de erosão dos solos; a fim de avaliar esses fatores em laboratório, esse autor escolheu o ensaio de Inderbitzen.

Seu estudo foi realizado em uma microbacia pertencente ao município de Bom Jardim - RJ, área rural, com o objetivo de estudar as perdas de solo por erosão superficial, em encostas sob uso do sistema agroflorestal de pousio. Nessa região encontram-se as principais áreas remanescentes de Mata Atlântica do Estado, com solos pouco espessos e ocorrência de chuvas tropicais torrenciais.

Foram retiradas amostras indeformadas da encosta onde se localizavam as parcelas experimentais, sendo: amostra da parcela sob cultivo de banana (15 anos); amostra da parcela em pousio florestal (3 anos - 2001/2004); amostra na parcela sob cultivo rotacionado; e amostra da área testemunha (Mata Nativa).

O ensaio foi conduzido no laboratório do Instituto de Geociências da UFRJ, utilizando o equipamento modificado por Vilela (2003), que compreende uma rampa hidráulica de madeira coberta por fórmica, revestida em PVC (base = 50,0 cm e comprimento = 100,0 cm), de inclinação variável. Nesta foi feito um orifício central, onde é inserida a amostra de solo indeformada com 15,0 cm de diâmetro e 10,0 cm altura, confinada em anel de PVC biselado.

No ensaio, a declividade da rampa e o grau de compactação seguiram as condições de campo, e a duração e intensidade do escoamento superficial devem levar em conta a intensidade e o tempo de concentração das chuvas da região.

Para efeito de comparação com a declividade original na encosta estudada, a declividade da rampa no ensaio foi ajustada para um ângulo de 37° (equivalente a  $\pm 60\%$  de declividade da encosta).

A Figura 2.22 apresenta o recipiente onde é armazenada a água utilizada no ensaio, a inclinação do equipamento e a disposição da amostra na rampa.



**Fonte:** Mendes (2006).

**Figura 2.22** - Equipamento de Inderbitzen proposto por Mendes (2006).

Para esse trabalho, as variáveis adotadas foram: vazão de 50,0 ml/s (3,0 l/min), amostra em condição natural e tempo de ensaio de 60 min (com medições em 5, 10, 15, 30, 45 e 60 min).

O material carregado pelo fluco foi coletado através das peneiras (números 10 e 200) – apoiadas em um suporte e abaixo delas um balde –, de acordo com o tempo especificado anteriormente. Em seguida, o material retido nelas era levado à estufa e posteriormente.

Os resultados foram apresentados em gráficos, nos quais se plotou a variação do peso seco acumulado de solo erodido (g) com o tempo (min).

Mendes (2006) categorizou os solos por ele estudados através das propostas de Bastos (1999), citadas na Tabela 2.7.

Segundo Mendes (2006), as taxas de erosão encontradas na amostra da parcela sob cultivo de banana foram baixas em relação às amostras da parcela em pousio florestal. Observou-se que as maiores perdas de solo ocorreram nos intervalos de 5 e 10 minutos. Apesar de as taxas de solo removido serem menores nesta amostra, observou-se que o comportamento da erosão ao longo do tempo neste ensaio foi similar ao encontrado na amostra da parcela sob pousio.

Durante o ensaio de erodibilidade, os resultados de perdas de solo apresentaram-se relativamente elevados.

Em comparação com a amostra da parcela sob pousio recente, as taxas de perdas de solo da área sob mata nativa foram superiores em aproximadamente 25%.

Esse autor observou também que houve certa correspondência entre a presença da fração silte e a ocorrência da erosão nas amostras estudadas, ou seja, aquelas com maiores frações de silte mostraram-se mais erodíveis.

A Tabela 2.10 apresenta um resumo dos trabalhos citados anteriormente para os ensaios de Inderbitzen.

**Tabela 2.10** - Quadro-resumo de alguns trabalhos utilizando os ensaios de Inderbitzen

REFERÊNCIA	LOCAL DE RETIRADA DAS AMOSTRAS	RAMPA Material/Dimensões	DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	CONDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	VARIÁVEIS ADOTADAS Vazão/ Declividade da rampa	TEMPO TOTAL DE ENSAIO
BASTOS (1999)	Região Metropolitana de Porto Alegre – Rio Grande do Sul	Chapa metálica base =25,0 cm comprimento = 60,0 cm	$\phi = 9,76$ cm altura = 5,00 cm	secas ao ar, natural e pré-umedecidas	50,0 e 100,0 ml/s (3,0 e 6,0 l/min) 10°, 26°, 45° e 54°	20 minutos
FRAGASSI (2001)	Serra de São Geraldo-MG e campus da UFV, Viçosa-MG.	PVC base =15,0 cm comprimento = 120,0 cm	$\phi = 15,20$ cm altura = 4,00 cm	próximo à saturação	25,0 ml/s (1,5 l/min) 10°	30 minutos
SANTOS (2001)	Santo Antônio do Leite Ouro Preto-MG	PVC base =15,0 cm comprimento = 120,0 cm	$\phi = 15,20$ cm altura = 4,00 cm	amostras saturadas	25,0 ml/s (1,5 l/min) 30 min iniciais 50,0 ml/s (3,0 l/min), 100,0 ml/s (6,0 l/min) e 150,0 ml/s (9,0 l/min), (intervalos de 5 em 5 minutos) 10°	45 minutos
RAMIDAN (2003)	Área de empréstimo da UHE de Itumbiara – GO	chapa metálica base =33,0 cm comprimento = 130,0 cm	$\phi = 10,00$ cm altura = 10,00 cm (para solos lateríticos) $\phi = 10,00$ cm altura = 15,00 cm (demais solos)	umidade natural	50,0 ml/s (3,0 l/min) 10°	30 minutos
PAIVA (2004)	Bacia do rio Una em Taubaté-SP	chapa de aço revestida com PVC base =33,0 cm comprimento = 130,0 cm	$\phi = 15,00$ cm altura = 4,50 cm	secas ao ar, natural e pré-umedecidas	50,0 e 125,0 ml/s (3,0 e 7,5 l/min) 20° e 60°	120 minutos
MENEZES et al. (2006)	Encostas da cidade de Lavras-MG	PVC base =15,2 cm comprimento = 120,0 cm	$\phi = 15,00$ cm altura = 4,00 cm	umidade natural	25,0 ml/s (1,5 l/min) 10° e 80°	120 minutos
MENDES (2006)	Bom Jardim-RJ	madeira coberta por fórmica, revestida em PVC base =50,0 cm comprimento = 100,0 cm	$\phi = 15,00$ cm altura = 10,00 cm	umidade natural	50,0 ml/s (3,0 l/min) 37°	60 minutos

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Localização da cidade de Juiz de Fora**

Segundo o Anuário Estatístico de 2009, o município de Juiz de Fora faz parte da porção sudeste do Estado de Minas Gerais, Mesorregião Geográfica da Zona da Mata Mineira (latitude: 21°41'20" sul e longitude: 43°20'40" oeste), ocupando uma área de 725,975 km<sup>2</sup>. Trata-se do quarto maior município do Estado de Minas Gerais e, segundo dados do IBGE (2008), da 35ª maior cidade do Brasil.

Os municípios limítrofes ao de Juiz de Fora são: ao norte - Ewbanck da Câmara e Santos Dumont; ao sul - Matias Barbosa e Belmiro Braga; a leste - Chácara e Bicas; a oeste - Lima Duarte e Pedro Teixeira; a nordeste - Piau e Coronel Pacheco; a sudeste - Pequeri e Santana do Deserto; a sudoeste, Santa Bárbara do Monte Verde; e a noroeste, Bias Fortes e Santos Dumont.

Hidrologicamente, o município é cortado, em toda sua extensão, pelo rio Paraibuna, que pertence à Bacia do Paraíba do Sul, em uma faixa de 32,0 km e desnível de 4,0 m/km no sentido noroeste-sul-sudoeste; o declive no trecho urbano é bastante moderado, da ordem de 1,0 m/km. Seus principais afluentes são os rios do Peixe, Preto e Cágado. O perímetro urbano do município de Juiz de Fora é drenado por 156 sub-bacias de diversas dimensões.

A população média residente em Juiz de Fora até 2007 era de 520.612 habitantes, sendo 97% urbana e 3% rural (Anuário Estatístico, 2009).

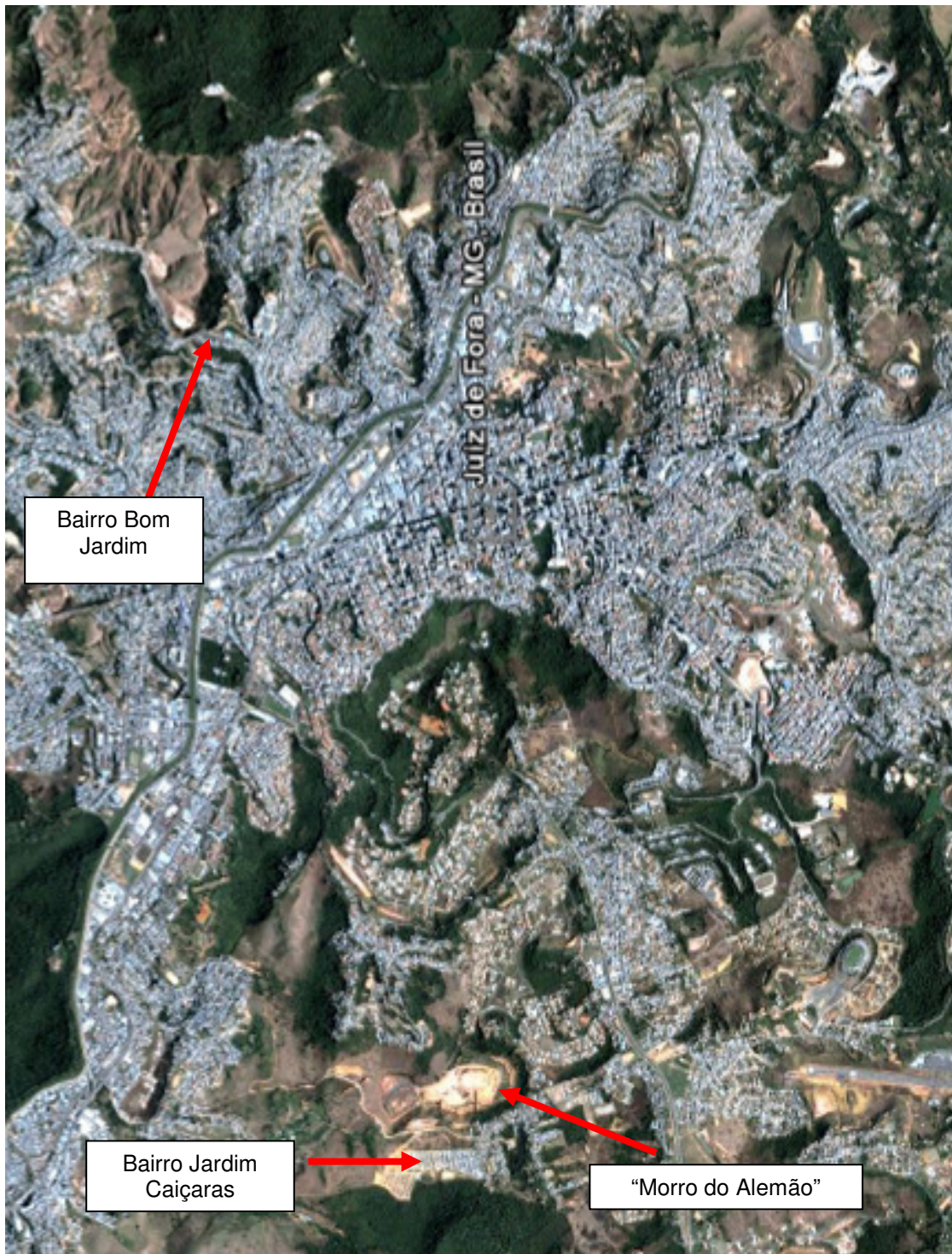
Conforme mostra a Figura 3.1, a cidade divide-se em regiões administrativas; as áreas escolhidas para este estudo estão localizadas nas porções oeste (“Morro do Alemão” e Bairro Jardim Caiçaras) e leste (Bairro Bom Jardim), por apresentarem processos de desgaste superficial do solo.



Fonte: <http://www.pjf.mg.gov.br> (2008).

**Figura 3.1** - Mapa de localização das regiões administrativas da cidade de Juiz de Fora-MG.

A Figura 3.2 apresenta uma imagem aérea da cidade de Juiz de Fora-MG, apontando as áreas em estudo.



Fonte: Google Earth, 2010.

**Figura 3.2** - Imagem aérea da cidade de Juiz de Fora-MG, apontando as áreas escolhidas para este estudo.

## **3.2. Caracterização do clima, vegetação e geomorfologia da cidade de Juiz de Fora-MG**

### **3.2.1. Clima**

O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa (mesotérmico, verão chuvoso e quente), possuindo duas estações bem distintas: uma que vai de outubro a abril, com temperaturas mais elevadas e maiores precipitações pluviométricas, e outra de maio a setembro, mais fria e com menor presença de chuvas.

Esse clima pode também ser definido, genericamente, como Tropical de Altitude, por corresponder a um tipo tropical influenciado pelos fatores altimétricos, que contribuem para a amenização das suas temperaturas.

Os índices pluviométricos anuais, obtidos pela Estação Climatológica Principal da UFJF/ 5° DISME, nas últimas décadas, acusaram médias próximas a 1536,0 mm e maiores índices mensais no mês de janeiro, com cerca de 298,0 mm, ao passo que a média térmica anual oscila em torno de 18,9 °C. O mês mais quente (fevereiro) possui média próxima a 21,7 °C, e o mês mais frio (julho), 16,1 °C.

No período de 1972 a 2008, em um dia, a máxima precipitação ocorrida foi de 147,4 mm, no ano de 2001; a máxima temperatura registrada em 2007 registrada foi 35 °C e a mínima, 3,1 °C em 1985.

### **3.2.2. Vegetação**

Pelo fato de no passado ter apresentado densa cobertura florestal, o município de Juiz de Fora ficou incorporado à Zona da Mata mineira.

Segundo Staico (1977), a área da bacia do rio Paraibuna compõe-se de cinco formações florísticas distintas: mata tropical (com árvores altas e madeiras de lei), cerradão (mata rala e fraca, desenvolvida em solos arenosos), campos cerrados (gramíneas, muito usadas como pasto), campos limpos e secos (além das gramíneas de campo cerrado, crescem gramíneas finas e rasteiras, portanto, também utilizado como pasto) e campos úmidos e brejos (campos de inundação, que acompanham todos os cursos d'água).

De acordo com o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU) de Juiz de Fora - MG, a vegetação original (Floresta Estacional Semidecidual, condicionada pela dupla estacionalidade climática), expansão da Mata Atlântica, é praticamente inexistente.

Em razão da ocupação humana e do uso da terra, os desmatamentos ocasionaram a substituição das florestas por pastagens e capoeiras (mata de baixa altura), que constituem hoje a paisagem dominante da área, em torno de 70%.

### **3.2.3. Geomorfologia**

Juiz de Fora apresenta altitude máxima e mínima aproximada de 1104,0 m e 467,0 m, respectivamente, de relevo bastante diversificado, com colinas côncavo-convexas e vales, com altitudes médias compreendidas entre 700 e 900 metros, característico do Vale do Paraíba do Sul e dos contrafortes da Serra da Mantiqueira (Anuário Estatístico de 2009).

Dentro do perímetro urbano são encontrados dois grandes compartimentos geomorfológicos que se individualizam, principalmente em função dos aspectos geológicos: ao norte, os terrenos ocupados pelo “Gnaiss Piedade”, e ao sul, pelas rochas antigas do “Complexo Juiz de Fora”.

No domínio do “Gnaiss Piedade” predominam os migmatitos, que exibem relevo altamente dissecado, com topos alongados e estreitos, além de rios com vales mais abertos e largos.

O “Complexo Juiz de Fora” é formado por rochas mais antigas, originado sob condições extremamente rigorosas de pressão e temperatura, fruto de fortes deformações e recristalizações. São áreas que possuem relevo mais acidentado, sobretudo nas faixas de distribuição dos Charnockitos e Kinsigitos. Constituem relevos elevados topograficamente, com aspecto serrano e amplitudes topográficas que chegam a ultrapassar 200 m.

### **3.3. “Morro do Alemão” – Bairro São Pedro - Porção oeste**

O “Morro do Alemão” faz parte do Bairro São Pedro, posicionado geograficamente a uma latitude de 21°45'38,97” ao sul e longitude de 43°23'09,98” a oeste na cidade de Juiz de Fora-MG.

No seu entorno encontram-se áreas de relevância ambiental, sem falar no Campus da UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), que, além das suas funções específicas, representa importante espaço de recreação e lazer para a cidade.

Conforme Figura 3.3, a área está sobre um platô de aproximadamente 200.000 m<sup>2</sup>, entre os bairros São Pedro, Jardim Caiçaras e Borboleta, cujo espaço foi aberto na década de 1980, para construção de um estádio municipal de futebol.

Por questões políticas e econômicas, somente a obra de terraplenagem foi concluída nos anos 80; por causa disso, grande parte da área foi tomada por processos erosivos (Figuras 3.4 a 3.7).



Fonte: Google Earth, 2007.

**Figura 3.3** - Imagem aérea “Morro do Alemão”, Bairro Jardim Caiçaras e São Pedro.



**Figura 3.4** - Vista panorâmica do “Morro do Alemão” (1987). Áreas diretamente afetadas.



**Figura 3.5** - Detalhe de uma porção do platô tomada pelo desgaste superficial do solo. “Morro do Alemão” (2004).



**Figura 3.6** - Desgaste superficial do solo. “Morro do Alemão” (2005).



**Figura 3.7** - Detalhe entre o platô e a encosta. “Morro do Alemão” (2005).

No ano de 2006, a área foi negociada entre a PMJF (Prefeitura Municipal de Juiz de Fora) e uma empresa privada, e o objetivo da parceria consistia em recuperar a área e reutilizá-la. Daí, as obras de recuperação se iniciaram, e o projeto de destino dela seria de um condomínio fechado, composto de casas, uma porção das quais já se encontra pronta, conforme Figuras 3.8 e 3.9.



**Figura 3.8** - Platô em processo de recuperação (2008). Eliminação das erosões. “Morro do Alemão”.



**Figura 3.9** - Mostra de uma porção pronta da área destinada ao condomínio. “Morro do Alemão” (2008).

### **3.4. Bairro Jardim Caiçaras – Porção oeste**

Conforme pôde ser visto na Figura 3.2, este bairro também faz parte da porção oeste da cidade de Juiz de Fora, confrontando com o “Morro do Alemão” e Bairro São Pedro. Posiciona-se geograficamente a uma latitude de 21°45’51,91” ao sul e longitude de 43°23’24.10” a oeste.

Trata-se de um bairro residencial composto por casas tipo “populares”, limitado em sua porção oeste por área de preservação ambiental.

Após as fases de corte e aterro e implantação das moradias, as encostas não receberam qualquer tipo de sistema de drenagem e vegetação; portanto, os solos ficaram desprotegidos, sendo tomados por imensas erosões, cujo crescimento vem se acelerando nos períodos de chuva (Figura 3.10).

O Complexo do “Morro do Alemão” e o Bairro Jardim Caiçaras estão localizados em uma região comumente identificada como Cidade Alta e, conforme classificação geológica apontada anteriormente, incluídos em área de ocorrência do “Gnaiss Piedade”.



(a)



(b)

**Figura 3.10** - Aspectos erosivos em grandes proporções. Bairro Jardim Caiçaras (2008).

### 3.5. Bairro Bom Jardim - Via de acesso interligando os bairros Vitorino Braga e Linhares - Porção leste

Esta área em estudo faz parte do Bairro Bom Jardim, localizado na porção leste da cidade, posicionado geograficamente a uma latitude de  $21^{\circ}44'03,41''$  ao sul e longitude de  $43^{\circ}19'37,39''$  a oeste.

Conforme mostra a Figura 3.11, esse local faz parte de uma nova via de acesso de 2,5 km (rua Diva Garcia) que liga os bairros Vitorino Braga, Três Moinhos, Bom Jardim e Linhares. O traçado dela é paralelo ao Córrego do Yung.

As obras para construção da via tiveram início em junho de 2003 e término em abril de 2006.

Sua formação geológica se classifica como “Complexo Juiz de Fora”.



Fonte: Google Earth, 2009.

**Figura 3.11** - Imagem aérea da via de acesso interligando os bairros Vitorino Braga e Linhares e bairros confrontantes.

Na Figura 3.12 verifica-se um processo acelerado de desgaste do solo que vem se formando nas encostas, ao longo da via.



(a)



(b)

**Figura 3.12** - Processos erosivos existentes nas encostas, junto à via de acesso. Bairro Bom Jardim (2008).

### 3.6. Metodologia usada na coleta das amostras e nos ensaios

Em conformidade com a NBR 9604/86 (Abertura de poços e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas), foram coletadas amostras de solo em pontos de média vertente em talude das três áreas estudadas, conforme Figuras 3.13, 3.14 e 3.15.

Os locais escolhidos seguiram a ideia de analisar a susceptibilidade dos solos à erosão hídrica pelo fluxo superficial, medida através de uma nova versão do aparelho de Inderbitzen.



**Figura 3.13** - Extração das amostras no Complexo do “Morro do Alemão”.



**Figura 3.14** - Extração das amostras no Bairro Jardim Caiçaras.



**Figura 3.15** - Extração das amostras no Bairro Bom Jardim.

Para cada local em estudo, as amostras de solos indeformadas foram coletadas em dois blocos cilíndricos de PVC, com 25,0 cm de diâmetro e altura de 30,0 cm, parafinadas, envolvidas em plástico PVC e transportadas em caixa de isopor (Figura 3.16).



**Figura 3.16** - Amostras acondicionadas para transporte.

### **3.7. Ensaios de laboratório**

O programa de ensaios realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Viçosa consistiu dos seguintes ensaios:

- Ensaios de caracterização - teor de umidade, limites de consistência, peso específico das partículas e análise granulométrica;
- Ensaios de resistência ao cisalhamento – cisalhamento direto e triaxial;
- Ensaios de permeabilidade;
- Ensaios de erosão – Inderbitzen.

As amostras utilizadas nos ensaios de caracterização foram preparadas segundo a NBR 6457/86 – Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Os ensaios de índices de consistência (LL e LP), análise granulométrica, teor de umidade natural e massa específica dos sólidos foram realizados de acordo com as normas, respectivamente, NBR 6459/84, NBR 7180/88, NBR 7181/88, NBR 6457/1986 e NBR 6508/84. Para separar os diferentes grupos de tamanhos das partículas, usou-se a NBR 6502/95.

Para determinação dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb, coesão (c) e ângulo de atrito ( $\phi$ ), foram realizados ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais do tipo CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado com medição de poro-pressão) com amostra na condição natural e inundada (saturada) e ensaios do tipo CID (Consolidado Isotropicamente e Drenado) com amostra na condição natural.

Para o ensaio de cisalhamento direto foram utilizados quatro corpos de prova com diferentes tensões: 25, 50, 100 e 200 kPa. As velocidades adotadas foram de 0,708 mm/min para amostras naturais e 0,0944 mm/min para amostras inundadas até o deslocamento máximo horizontal de 10,19 mm, previamente determinado com base em um tempo estimado para ruptura de duas horas.

Para os ensaios realizados na umidade natural, os corpos de prova foram carregados até que se estabilizassem as deformações verticais e, em seguida, iniciou-se o cisalhamento. Na condição inundada, duas horas após a aplicação do carregamento vertical, os corpos de prova eram inundados com água destilada, permanecendo por vinte e quatro horas até saturação para, em seguida, aplicar o cisalhamento.

A partir dos resultados obtidos, foram traçadas as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal e determinado o ponto de ruptura para cada valor de tensão normal e a envoltória de resistência.

Os ensaios triaxiais de deformação controlada foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (Figura 3.17)

Nos ensaios CIU<sub>sat</sub> os corpos de prova foram saturados contra pressão, em etapas, até que o parâmetro B atingisse um valor igual a 99,2%, considerado como condição de saturação.



**Figura 3.17** - Ensaio de compressão triaxial.

As tensões de confinamento aplicadas aos corpos de prova foram de 25, 50, 100 e 200 kPa. As leituras de pressão neutra foram feitas conectando-se uma célula de pressão a um micromultímetro.

Todos os ensaios foram feitos com velocidade de deformação de 0,15 mm/minuto na fase de cisalhamento do corpo de prova.

O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade (K) foi realizado segundo a NBR 14545/2000 e teve como objetivo fornecer a velocidade com a qual o fluido percola no solo.

As propriedades do solo que interferem no seu processo erosivo são a granulometria; estrutura; permeabilidade e infiltraabilidade; e coesão.

Para este trabalho, os corpos de prova foram talhados das amostras indeformadas em cilindros com diâmetro e altura médios iguais a 9,05 e 12,15 cm, respectivamente (Figura 3.18).

O diâmetro das buretas utilizadas na leitura da altura do nível d'água foi de 2,60 cm.

A temperatura do ensaio foi de 22 °C. O intervalo de tempo para o nível d'água passar da altura inicial para a altura final foi de 60 segundos.



**Figura 3.18** - Ensaio de permeabilidade.

### **3.8. O aparelho de Inderbitzen**

O equipamento desenvolvido no presente trabalho para medir perda de solo por unidade de área baseou-se no aparelho de Inderbitzen (1961).

A nova versão consiste de uma rampa metálica em alumínio, contendo um orifício para fixação dos corpos de prova.

Uma das faces dos corpos de prova é posicionada tangencialmente ao plano da rampa, em sua extremidade inferior, exposta a um fluxo d'água laminar controlado, ocasionando erosão no solo por um tempo determinado.

Conforme Figura 3.19, a rampa é apoiada em uma estrutura metálica provida em sua parte superior de um sistema móvel, permitindo assim a variação do ângulo de inclinação dela; sua parte inferior é fixa, para dar rigidez a essa estrutura.



**Figura 3.19** - Detalhe do sistema móvel que permite a variação da inclinação das rampas.

### ***3.8.1. Montagem do Equipamento de Inderbitzen***

Na tentativa de melhorar os ensaios anteriormente realizados e para se obter uma estimativa mais realística da erodibilidade, criou-se uma nova versão

do equipamento, ainda mais versátil, variando o orifício existente na rampa hidráulica para fixar os corpos de prova; aumentando o comprimento dela e material, garantindo uniformidade do fluxo d'água e rigidez.

As rampas foram fabricadas em alumínio, com 4,0 mm de espessura, 220,0 mm de largura e 170,0 cm de comprimento. Foram confeccionadas três rampas: uma delas com um orifício circular de diâmetro igual a 150,0 mm e as outras duas com orifícios quadrados de lados iguais a 150,0 e 100,0 mm, para fixação dos corpos de prova (Figuras 3.20 e 3.21).



**Figura 3.20** - Rampas com orifícios quadrados, com lados iguais a 100,0 e 150,0 mm.



**Figura 3.21** - Rampa com orifício circular de diâmetro igual a 150,0 mm.

As rampas tiveram suas bases reduzidas, de forma que a parede lateral tangenciasse o orifício para implantação do corpo de prova, através da fixação de perfis de alumínio em toda a sua extensão, para que o fluxo d'água escoasse apenas sobre a amostra (Figura 3.22).

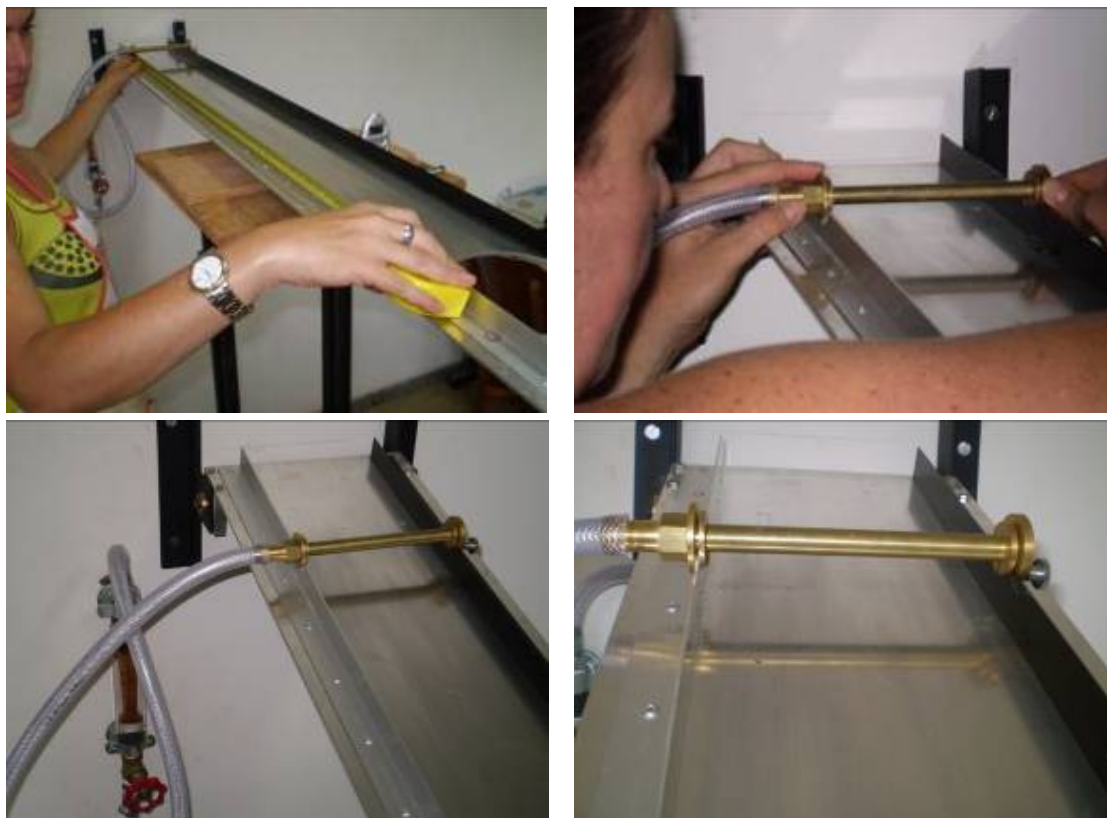
Para a rampa de orifício circular (diâmetro = 150,0 mm) a largura ficou reduzida em 144,0 mm, e para as rampas de orifício quadrado com 150,0 e 100,0 mm de lado, em 142,0 mm e 93,0 mm, respectivamente.



**Figura 3.22** - Fixação dos perfis, reduzindo a base da rampa.

Nas três rampas, esses orifícios ficaram a 120,0 cm do início do escoamento, feito através de um tubo perfurado acoplado nos perfis da rampa (Figura 3.23). Verificou-se a flexibilidade do equipamento em colocar a entrada do fluxo d'água a qualquer distância da amostra.

Para fazer com que a rampa girasse em diversas inclinações, adotou-se um sistema contendo suporte fixo em ferro fundido e um cilindro acoplado a ele (Figura 3.24).



**Figura 3.23** - Colocação do tubo perfurado para escoamento do fluxo d'água.



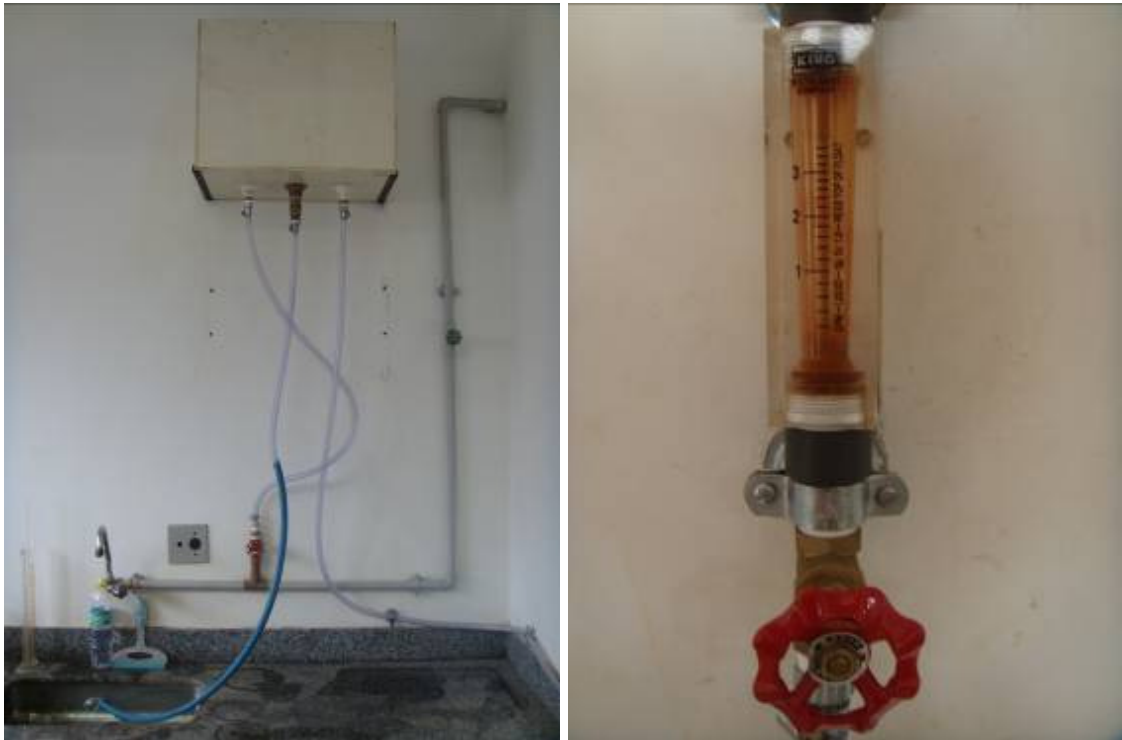
**Figura 3.24** - Detalhe do sistema para articulação da rampa.

Para simular o escoamento superficial, utilizou-se um reservatório com capacidade volumétrica de 40 litros, confeccionado em PVC e revestido com fibra-cimento, colocado a 1,00 m de altura em relação à entrada do fluxo d'água na rampa (Figura 3.25).



**Figura 3.25** - Reservatório de água e entrada do fluxo d'água na rampa, através do rotâmetro.

Para que não houvesse variações do nível d'água e turbulências no reservatório de modo a interferir na vazão do ensaio, este foi projetado com três furos, um constituindo de uma saída de água (ladrão) e os outros dois com registros, um para entrada da água de abastecimento e o outro com saída da água para o tubo perfurado, que, quando ajustado, garante constância de vazão, verificada através de um rotâmetro (Figura 3.26).



**Figura 3.26** - Detalhe do reservatório e rotâmetro.

Antes de iniciar o ensaio, ajustou-se a inclinação da rampa, usando-se um transferidor e um nível de bolha (Figura 3.27). A inclinação adotada para os ensaios foi de  $10^\circ$ .

A vazão foi estabelecida em  $1,0 \text{ l/min}$  ( $16,7 \text{ ml/s}$ ), correspondente a uma leitura no rotâmetro de  $0,25$ .

As Figuras 3.28 e 3.29 apresentam, respectivamente, a calibração da vazão e a ajuste do rotâmetro para garantir a constância do escoamento.



**Figura 3.27** - Ajuste da declividade da rampa.



**Figura 3.28** - Calibração da vazão.



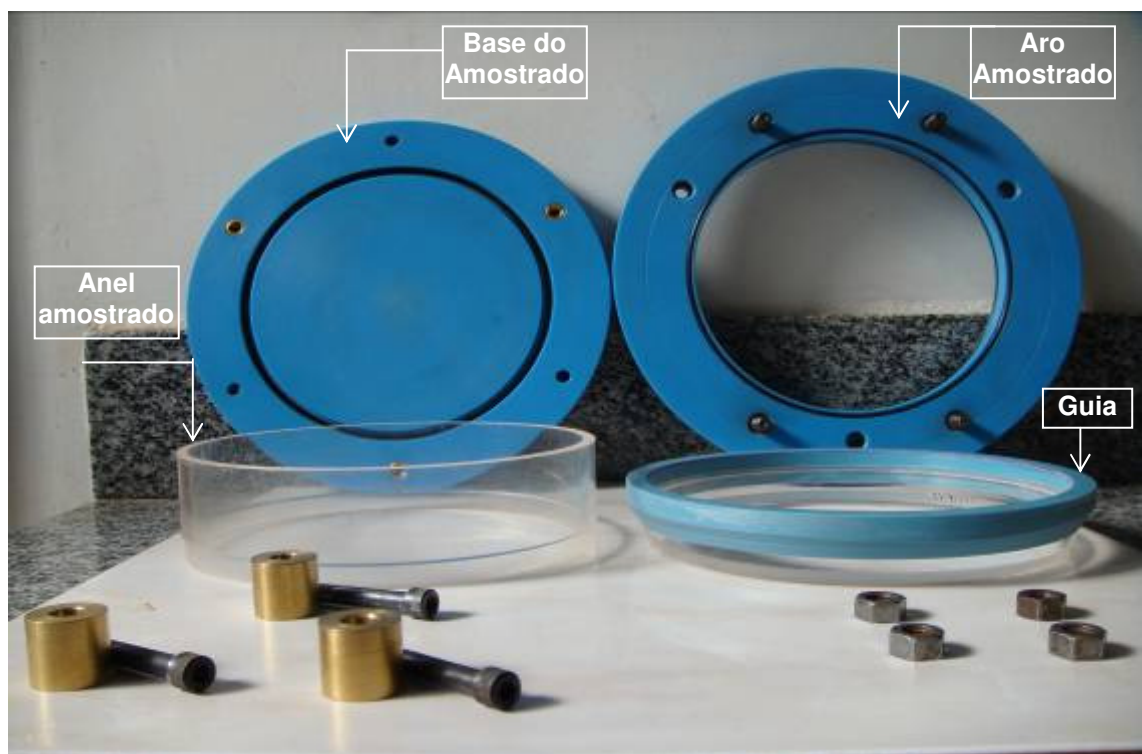
**Figura 3.29** - Regularização do rotâmetro.

### 3.8.2. Amostradores

#### - Equipamento de Inderbitzen com rampa de orifício circular (diâmetro de 144,0 mm)

Para a rampa de orifício circular com 144 mm de diâmetro, utilizou-se como guia para moldar os corpos de prova um anel em acrílico biselado, reforçado com PVC, com diâmetro de 144,0 mm e altura de 30,0 mm.

Para abrigar os corpos de prova durante o ensaio, também foi confeccionado, em acrílico, um anel amostrador com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura, biselado em uma das suas extremidades. A base onde se encaixa a extremidade biselada deste anel foi confeccionada em PVC circular com diâmetro de 207,0 mm, contendo furos para fixação de um aro em PVC, com 227,0 mm de diâmetro e orifício central de 152,0 mm, provido de parafusos para fixar o conjunto na rampa (Figura 3.30).

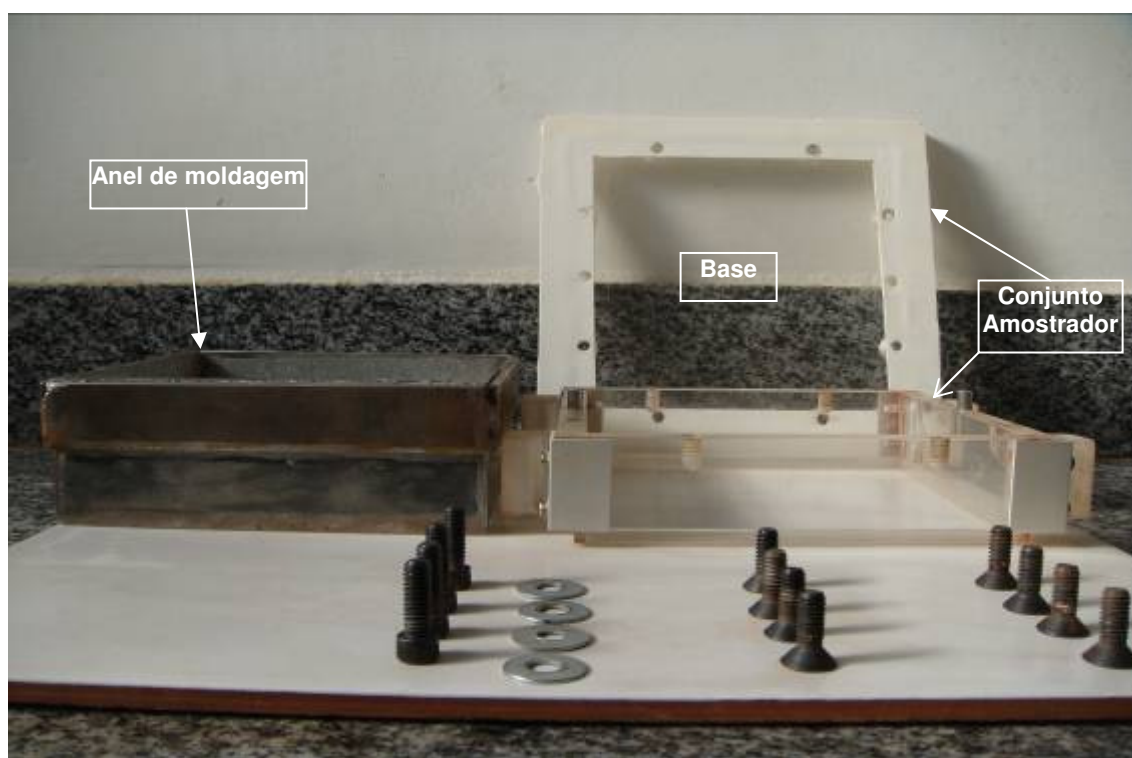


**Figura 3.30** - Amostrador da rampa circular - 144,0 mm de diâmetro.

**- Equipamento de Inderbitzen com rampa de orifício quadrado de 142,0 mm de lado**

Na rampa de orifício quadrado, com lado igual a 142,0 mm, utilizou-se como guia para confecção dos corpos de prova um anel de moldagem quadrado, confeccionado em chapa metálica, com 142,0 mm de lado e 56,0 mm de altura, biselado em uma das extremidades.

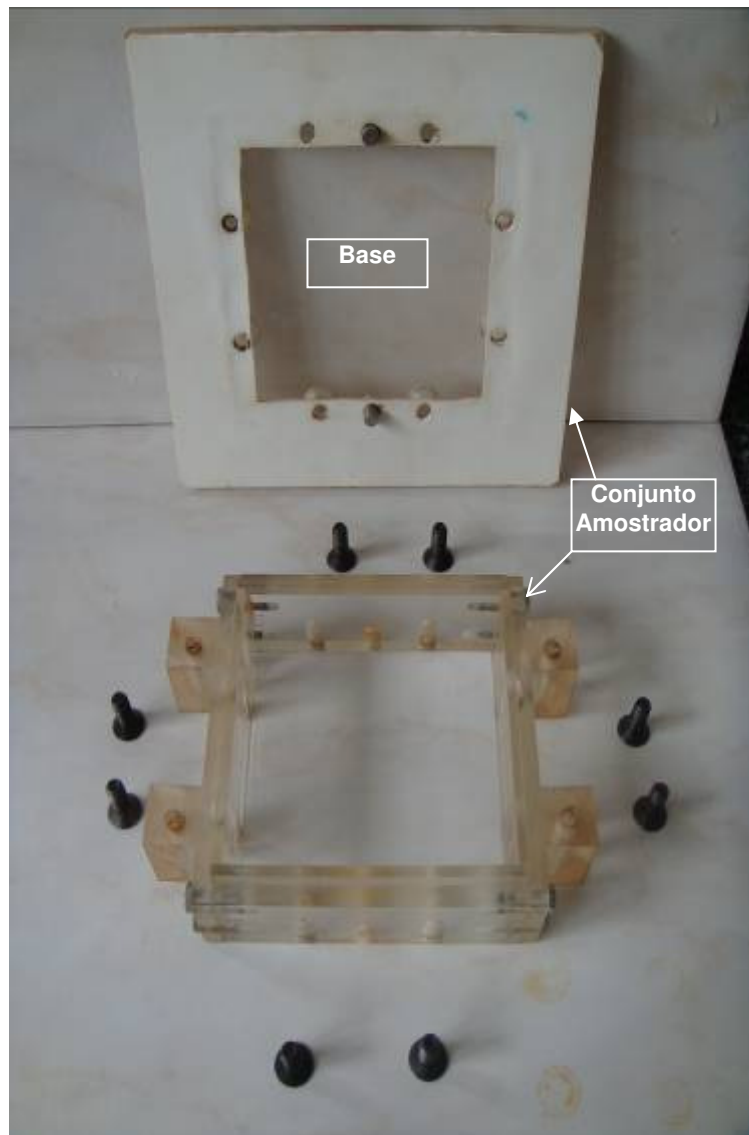
Para instalar os corpos de prova, utilizou-se de uma peça quadrada feita em acrílico, com lado interno igual a 142,0 mm e altura 40,0 mm, presa em uma base de vidro através de parafusos (Figura 3.31).



**Figura 3.31** - Amostrador quadrado - 142 mm de lado.

**- Equipamento de Inderbitzen com rampa de orifício quadrado de 93,0 mm de lado**

No caso da rampa de orifício quadrado de 93,0 mm de lado, a moldagem dos corpos de prova era feita diretamente no próprio amostrador, que consta de uma peça quadrada vazada feita em acrílico, com lado interno igual a 93,0 mm e altura de 42,0 mm. Este se fecha no fundo por uma base de vidro através de parafusos, como pode ser visto na Figura 3.32.



**Figura 3.32** - Amostrador quadrado - 93,0 mm de lado.

### ***3.8.3. Preparo dos corpos de prova***

Todos os corpos de prova foram moldados na condição de umidade natural.

#### **- Equipamento de Inderbitzen com rampa de orifício circular (corpos de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura)**

Na moldagem dos corpos de prova utilizou-se, primeiramente, como guia o anel em acrílico biselado reforçado em PVC (Figura 3.33). Logo após,

este era retirado, encaixando-se o anel amostrador para inserção do corpo de prova, rasando sua extremidade superior (Figura 3.34).



**Figura 3.33** - Anel em acrílico biselado reforçado em PVC, usado como guia.

Em seguida, o corpo de prova era extraído do bloco, rasando sua extremidade inferior, unindo-a em uma base circular de PVC, e esta, no aro amostrador através de parafusos.

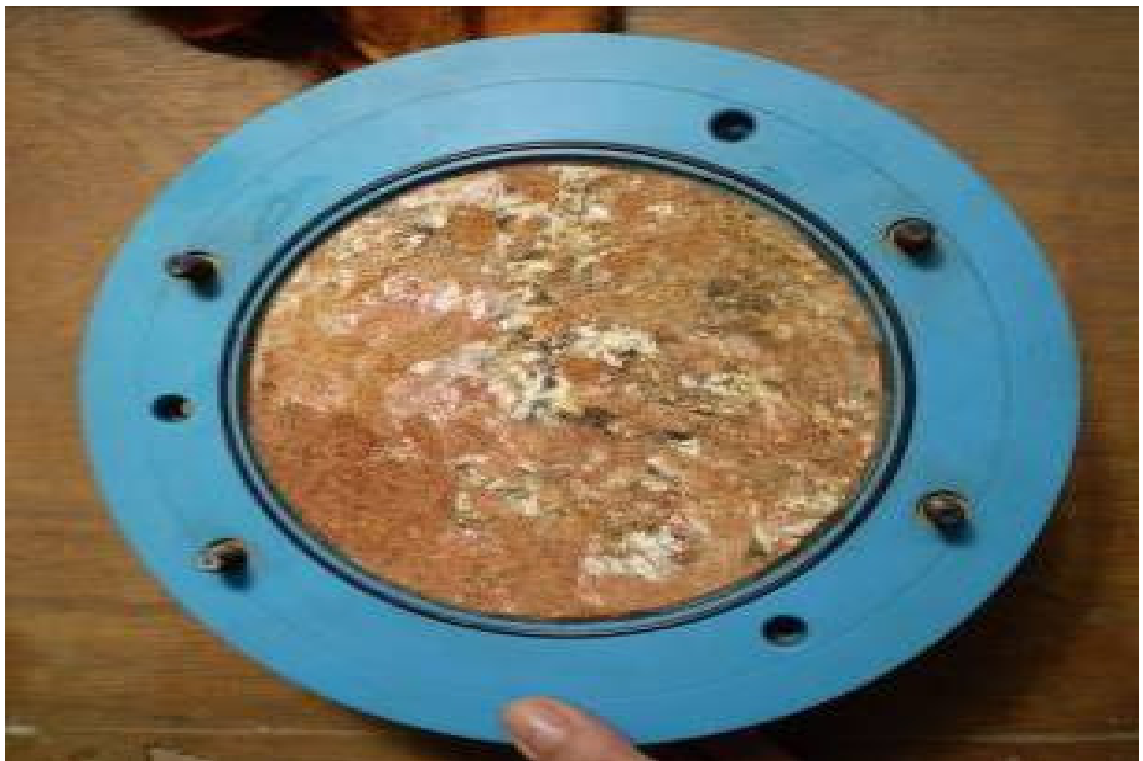
As Figuras 3.35 e 3.36 detalham o conjunto amostrador com corpo de prova.



**Figura 3.34** - Inserção do anel amostrador. Moldagem do corpo de prova para rampa de orifício circular (corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura).



**Figura 3.35** - Fixação do anel amostrador com o corpo de prova e a base do amostrador.



**Figura 3.36** - União do anel amostrador, base do amostrador e anel superior do amostrador.

**- Equipamento de Inderbitzen com rampa de orifício quadrado (corpos de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura)**

De acordo com a Figura 3.37, nesse caso utilizou-se como guia para moldagem dos corpos de prova um anel quadrado em chapa metálica.

Depois de retirada da guia, encaixava-se o corpo do amostrador, rasando-se a sua extremidade superior.

Em seguida, o corpo de prova era retirado do bloco de amostragem, rasando a extremidade inferior e prendendo-a na base de vidro (Figura 3.38).



**Figura 3.37** - Moldagem do corpo de prova para a rampa de orifício quadrado (corpo de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura)



**Figura 3.38** - Corpo de prova fixado no amostrador.

**- Equipamento de Inderbitzen com rampa de orifício quadrado (corpos de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura)**

Nesse caso, para extrair os corpos de prova do bloco de amostragem utilizou-se do próprio anel quadrado em acrílico, que abriga a amostra durante o ensaio. Em seguida, rasavam-se suas extremidades e acoplava-se em uma base de vidro (Figura 3.39).



**Figura 3.39** - Corpo de prova fixado no amostrador. Rampa de orifício quadrado, corpo de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura.

As áreas médias da face dos corpos de prova que são posicionados tangencialmente ao plano da rampa foram:

- rampa circular de  $\phi = 144,0 \text{ mm} = 162,90 \text{ cm}^2$ ;
- rampa quadrada de lado = 142,0 mm = 201,64 cm<sup>2</sup>; e
- rampa quadrada de lado = 93,0 mm = 86,50 cm<sup>2</sup>.

#### **3.8.4. Execução dos Ensaio**

Como pode ser visto na Figura 3.40, após terem sido preparados os corpos de prova, estes eram pesados, obtendo-se o peso da massa do corpo de prova com solo natural mais amostrador.



Corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura.



Corpo de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura.



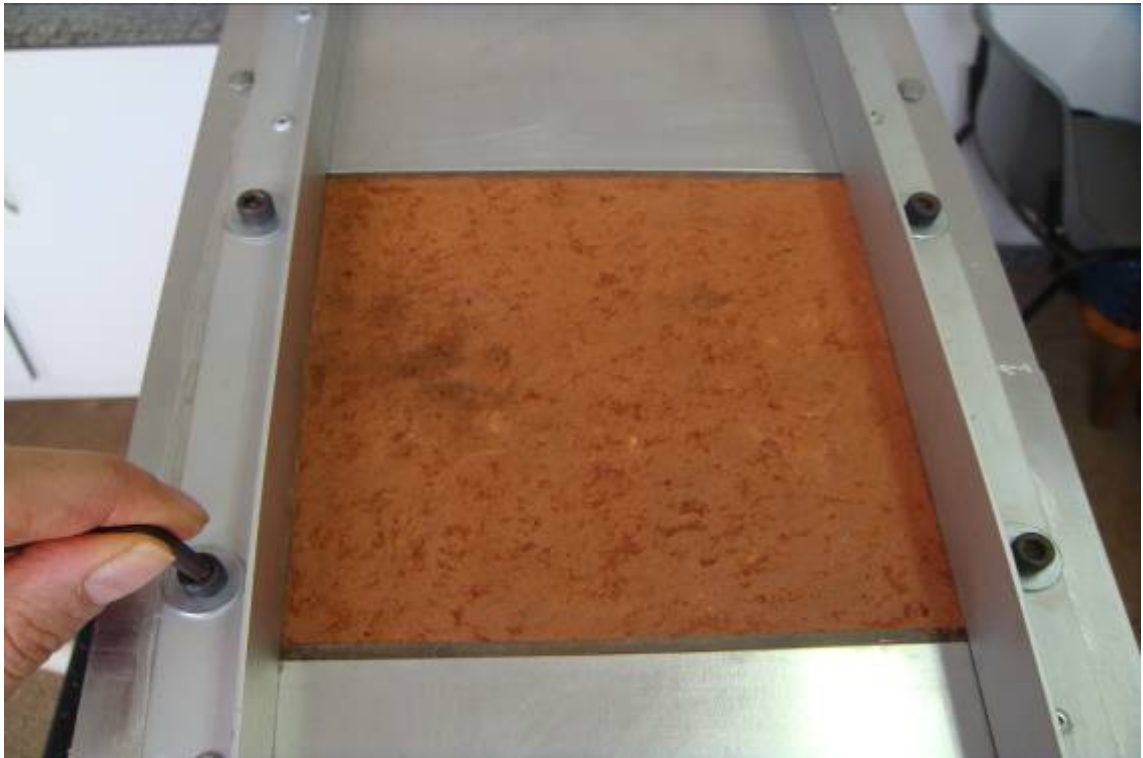
Corpo de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura.

**Figura 3.40** - Pesagem dos corpos de prova fixados no conjunto amostrador.

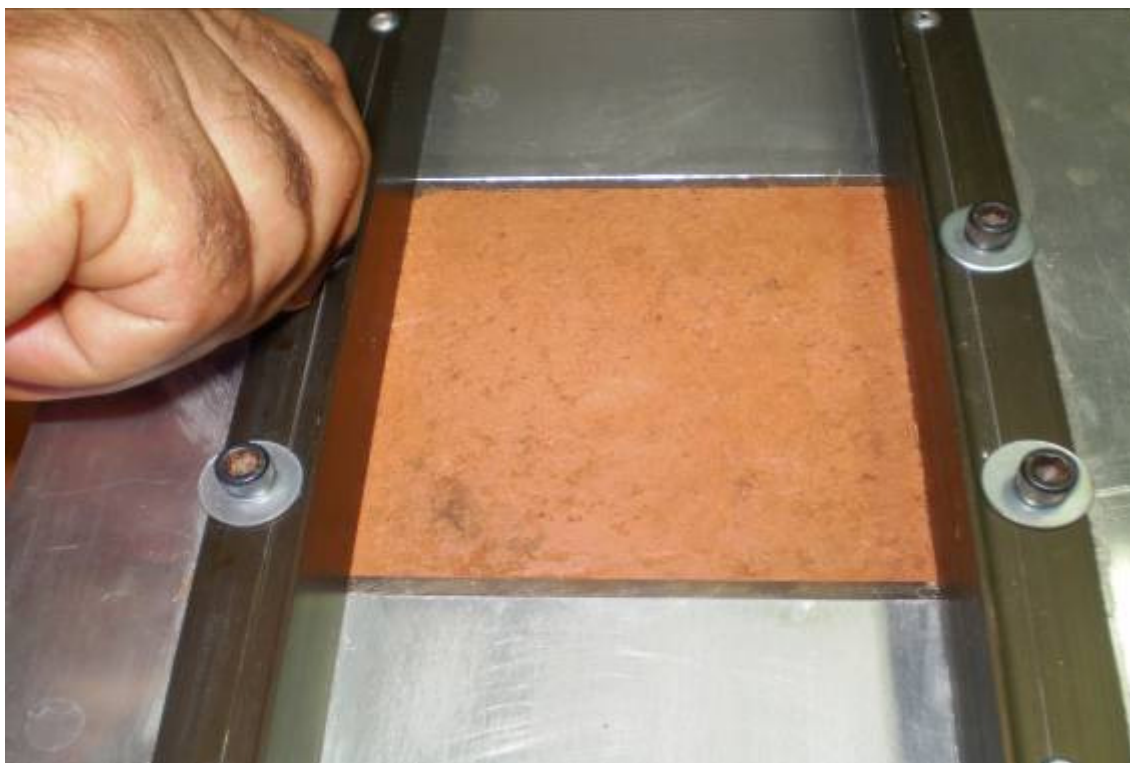
A seguir, o conjunto amostrador era posicionado no orifício da rampa sendo fixado nesta através de quatro parafusos (Figuras 3.41 a 3.43).



**Figura 3.41** - Vista superior e lateral do conjunto amostrador fixado na rampa hidráulica (corpo de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura).



**Figura 3.42** - Vista superior e lateral do conjunto amostrador fixado na rampa hidráulica (corpo de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura).



**Figura 3.43** - Vista superior e lateral do conjunto amostrador fixado na rampa hidráulica (corpo de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura).

De acordo com a Figura 3.44, antes de cada ensaio os corpos de prova eram protegidos com um plástico transparente, deixando-se a água fluir sobre estes na vazão projetada, até que fosse verificada a uniformidade do fluxo d'água.



**Figura 3.44** - Proteção do corpo de prova e calibração da vazão.

Depois de verificadas a uniformidade do fluxo d'água e a constância da vazão, a proteção plástica era retirada e o ensaio iniciado, dando continuidade por um tempo determinado em 30 minutos.

Os sedimentos carregados foram coletados em intervalos de tempo predefinidos (1, 3, 5, 9, 15 e 30 minutos), com o objetivo de obter dados para a plotagem dos gráficos dados em função do tempo (em minutos) x perda solo seco acumulado por área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Para coleta desses sedimentos utilizou-se de béqueres com capacidade volumétrica de 2,0 litros até os cinco primeiros minutos de ensaio e em seguida, baldes plásticos de maior volume (Figura 3.45).



**Figura 3.45** - Coleta de sedimentos.

Conforme a Figura 3.46, esses recipientes eram colocados em repouso para que o material carregado fosse sedimentado (primeira fase de sedimentação).

Em seguida, todo o material depositado no fundo dos recipientes era transferido para pequenas cápsulas, completando-se com lavagem, através do uso de pissetas, garantindo total retirada do material carregado. Essas cápsulas eram deixadas em repouso (segunda fase de sedimentação), retirando-se o excesso da água superficial, e encaminhadas à estufa para secagem durante 24 horas. Posteriormente, o solo obtido era destorroado, pesado e transferido para um conjunto de peneiras (#4, #10, #40, #100 e #200), sendo pesado o material retido em cada uma delas (Figuras 3.47 a 3.52).



**Figura 3.46** - Material carregado em repouso (primeira fase de sedimentação).



**Figura 3.47** - Transferência do material sedimentado para as cápsulas menores.



**Figura 3.48** - Cápsulas menores para serem levadas à estufa (segunda fase de sedimentação).



**Figura 3.49** - Cápsulas contendo material carreado seco.



**Figura 3.50** - Destorroamento do solo seco, para ser peneirado.



**Figura 3.51** - Transferência de solo seco para o conjunto de peneiras.



**Figura 3.52** - Pesagem do material retido em cada peneira.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Generalidades**

Foram realizados vários ensaios de laboratório em amostras deformadas e indeformadas, coletadas em pontos de média vertente dos taludes localizados nas porções oeste (“Morro do Alemão” e Bairro Jardim Caiçaras) e leste (Bairro Bom Jardim) da cidade de Juiz de Fora-MG, por apresentarem acelerado processo de erosão hídrica pelo fluxo superficial, conforme descrito no Capítulo 3.

Além das variáveis como chuva, declividade, cobertura vegetal, práticas de manejo etc., dependendo das propriedades geotécnicas dos solos, alguns são mais erodíveis que outros; portanto, foram realizados no presente trabalho vários ensaios para avaliar a susceptibilidade deles.

### **4.2. Avaliação Indireta da erodibilidade**

#### ***4.2.1. Critérios baseados na caracterização dos solos***

Foram executados os seguintes ensaios de caracterização dos solos estudados:

- teor de umidade;
- limites de consistência dos solos;
- peso específico das partículas; e

- análise granulométrica.

Na Tabela 4.1 encontraram-se os resultados dos ensaios de limites de consistência, das análises granulométricas, bem como a classificação dos solos estudados correspondente ao par de valores IP e LL na Carta de Plasticidade. As curvas de distribuição granulométricas são apresentadas no Anexo 2.

**Tabela 4.1** - Limites de consistência, análise granulométrica e classificação dos solos segundo a Carta de Plasticidade

Procedência da Amostra	Limites de Consistência (%)			Análise granulométrica (%)			Carta de Plasticidade
	LL	LP	IP	Areia	Silte	Argila	
Morro do Alemão	56,13	30,15	25,98	36	40	24	MH
Jardim Caiçaras	61,95	31,34	30,61	25	37	38	CH
Bom Jardim	41,79	21,03	20,76	46	34	20	CL

MH – silte de alta compressibilidade; CH – argila de alta compressibilidade; CL – argila de baixa compressibilidade.

Observa-se que as partículas erodidas nos solos estudados têm diâmetro equivalente menor que 2,00 mm, pois durante o peneiramento nas análises granulométricas verifica-se que 100% do material seco passam na peneira dez (# 10).

A seguir são apresentados alguns estudos de erodibilidade de solos por meio de correlações com algumas das suas propriedades geotécnicas.

Analisando os **índices de plasticidade**, segundo os critérios apontados por Meireles (1967) e Bastos (1999), os solos estudados são classificados como tendo boa resistência à erosão, uma vez que na correlação proposta pelo DNER (1979), citada por Fragassi (2001) e Mendes (2006), o IP superou a média, que é 17%, mas o LP foi inferior a 32%.

Nos estudos realizados por Santos e Castro (1967) apenas os solos do Bairro Bom Jardim são apontados como fortemente erodíveis; os demais continuaram a apresentar boa resistência à erosão.

Em função das **curvas granulométricas**, de acordo com a classificação de Meireles (1967) e Bastos (1999), para todas as áreas os solos são considerados como pouco erodíveis, pois o percentual que passa na

peneira 200 é maior que o proposto por eles, ou seja, 40% e 55%, respectivamente.

Obedecendo à classificação proposta por Gray e Sotir (1996) no que diz respeito à medida da erodibilidade, no sentido do solo mais erodível para o menos erodível tem-se: “Morro Alemão” (MH) > Bairro Bom Jardim (CL) > Jardim Caiçaras (CH).

A parcela de argila encontrada para o “Morro do Alemão” e Bairro Bom Jardim foi inferior a 35%, daí não seriam considerados erodíveis, segundo Eltz et al. (2001). Já o percentual encontrado para o Bairro Jardim Caiçaras ultrapassou esse valor e seria caracterizado como erodível.

Como os solos apresentaram pouca quantidade de argila e elevada porcentagem de areia fina e silte, segundo Fragassi (2001), são considerados erodíveis. Em contrapartida, o critério do DNER (1979), apontado por este mesmo autor, classifica esses solos com boa a regular resistência à erosão, pois o percentual de solo passante na peneira 40 foi superior a 49% e inferior a 96%.

Empregando a equação 2.12, proposta por Fragassi (2001), baseada em dados da curva granulométrica, foram obtidos, respectivamente para os solos do “Morro do Alemão” e Bairro Jardim Caiçaras, os seguintes valores de erodibilidade (E): 0,9507 g/cm<sup>2</sup> e 0,0905 g/cm<sup>2</sup>. Conclui-se, que para essa relação, os solos do “Morro do Alemão” apresentaram maiores perdas; para o Bairro Bom Jardim essa relação não se aplica.

Quanto aos critérios adotados por Santos (2001), através da relação entre erodibilidade, IP (índice de plasticidade) e C<sub>u</sub> (coeficiente de uniformidade), os solos em estudo são caracterizados com boa resistência à erosão, pois possuem IP > 15; quanto ao C<sub>u</sub> não se aplica, pois na curva granulométrica não se consegue determinar o diâmetro correspondente à porcentagem que passou de 10%.

#### **4.2.2. Critérios baseados nos índices físicos**

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios obtidos para teor de umidade (w), peso específico aparente natural ( $\gamma_{Nat}$ ), peso específico aparente

seco ( $\gamma_d$ ), peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ), índices de vazios ( $e$ ) e grau de saturação ( $S$ ).

**Tabela 4.2 - Índices Físicos dos solos estudados**

Procedência da Amostra	w (%)	( $\gamma_{Nat}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	( $\gamma_d$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	E	S (%)
Morro do Alemão	18,10	16,00	13,50	27,00	1,00	50,0
Jardim Caiçaras	28,90	16,10	12,40	28,30	1,28	44,0
Bom Jardim	20,70	16,10	13,40	26,85	1,00	50,0

Em razão de os valores obtidos para **índices de vazios** ultrapassarem a 0,7 os solos são classificados como solos facilmente erodíveis (BASTOS, 1999).

De acordo com Fácio (1991), o solo do Bairro Jardim Caiçaras seria o mais erodível, por ser o de menor **grau de saturação (S)**.

Por outro lado, de acordo com Mendes (2006), considerando o **peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ )** como um fator controlador dos processos erosivos, o solo do Bairro Jardim Caiçaras estaria mais compacto e seria o menos erodível. No entanto, observa-se que essa proposta é inadequada porque, apesar de ter o maior  $\gamma_s$ , este solo é o que possui o maior índice de vazios, portanto, não é o mais compacto.

#### **4.2.3. Critérios baseados nos ensaios de resistência ao cisalhamento dos solos**

##### *4.2.3.1. Ensaios de cisalhamento direto*

Para cada solo estudado, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com amostras indeformadas sob duas condições de umidade distintas, natural e inundada, com diferentes pressões de consolidação (25, 50, 100 e 200 kPa). As curvas tensão *versus* deformação e variação volumétrica, bem com as envoltórias de resistência, são apresentadas no Anexo 2.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos parâmetros de resistência, obtidos nesses ensaios na condição natural e na condição de inundação.

**Tabela 4.3** - Parâmetros de resistência obtidos nos ensaios de cisalhamento direto

Procedência da Amostra	Condição Natural			Condição Inundada	
	w (%)	c <sub>nat</sub> (kPa)	φ <sub>nat</sub> (°)	c <sub>inu</sub> (kPa)	φ <sub>inu</sub> (°)
Morro do Alemão	18,50	94,00	41,00	22,00	26,00
Jardim Caiçaras	29,00	68,00	37,00	1,30	35,00
Bom Jardim	20,20	45,00	34,00	2,50	36,00

Segundo Bastos (1999), a análise em termos do parâmetro  $\Delta_c$  permite entender a tendência de crescimento da taxa de erodibilidade com  $\Delta_c$  e identificar os solos com média a alta erodibilidade como aqueles que apresentam elevada variação de coesão com a inundação, igual ou superior a 85%.

Com os parâmetros de resistência mostrados na Tabela 4.3, obteve-se o fator de variação da coesão ( $\Delta c$ ) para as áreas do “Morro do Alemão”, bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim, respectivamente, de 77, 98 e 94%, através da equação 2.13. Aplicando o critério proposto por Bastos (1999), conclui-se que os solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim apresentam alta erodibilidade.

#### **4.2.3.2. Ensaios de compressão triaxial**

Foram realizados ensaios CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado com medição de poro-pressão) com amostra indeformadas na condição natural e saturada por percolação e ensaios do tipo CID (Consolidado Isotropicamente e Drenado) com amostra indeformada na condição natural.

As tensões de confinamento, aplicadas aos corpos de prova, foram de 25, 50, 100 e 200 kPa. As curvas tensão *versus* deformação e variação volumétrica, as envoltórias de resistência, bem como as tabelas contendo os resultados de tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CID<sub>Nat</sub> e CIU, são apresentadas no Anexo 2.

Na Tabela 4.4 encontram-se os parâmetros de ruptura obtidos nos ensaios CID<sub>nat</sub> e CIU.

**Tabela 4.4** - Parâmetros médios de resistência obtidos nos ensaios triaxiais CID<sub>Nat</sub> e CIU

Procedência da Amostra	CID <sub>Nat</sub>		CIU			
	c <sub>nat</sub> (kPa)	φ <sub>nat</sub> (°)	c (kPa)	φ (°)	c' (kPa)	φ' (°)
Morro do Alemão	87,00	26,00	28,00	20,00	21,00	29,00
Jardim Caiçaras	69,00	25,00	28,00	14,00	11,00	33,00
Bom Jardim	8,00	33,00	21,00	11,00	4,00	36,00

A partir dos resultados da Tabela 4.4, aplicando novamente o critério proposto por Bastos (1999), foram obtidos valores para o fator de variação da coesão ( $\Delta_c$ ) de 76, 84 e 50% para as áreas do “Morro do Alemão”, e bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim, respectivamente.

#### 4.2.4. Critérios baseados nos ensaios de permeabilidade

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidades (K) encontrados nos ensaios de permeabilidade com o permeômetro de carga variável.

**Tabela 4.5** - Resultado dos ensaios de permeabilidade dos solos estudados

Procedência da Amostra	K (m/s)
Morro do Alemão	$5,04 \times 10^{-5}$
Jardim Caiçaras	$3,09 \times 10^{-5}$
Bom Jardim	$9,76 \times 10^{-5}$

Segundo a classificação proposta por Pinto (2006), os solos em estudo podem ser considerados de permeabilidade baixa a moderada, típicos das areias finas e siltes (Tabela 2.6). Esse autor ressalta que esses valores representam apenas uma ordem de grandeza, pois o que determina o coeficiente de permeabilidade são os finos do solo e não a predominância do tamanho dos grãos.

De acordo com Mendes (2006), quanto maior a estabilidade dos agregados, maior a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, menor o escoamento superficial e o arraste de partículas individuais pela água. Os solos

deste estudo seriam caracterizados como de pouca resistência à erosão, por apresentarem permeabilidade baixa.

#### 4.2.5. Estimativa do fator erodibilidade da Equação Universal de Perdas de Solos $K_{EUPS}$

Wischmeier e Smith (1978) mencionam que, em geral, o fator de erodibilidade diminui com o decréscimo da percentagem de partículas do tamanho silte do solo se esse decréscimo não for acompanhado por um aumento na quantidade de partículas do tamanho areia. Considerando essa proposta e conforme Tabela 4.1, os solos do “Morro do Alemão” apresentam maior erodibilidade, seguido dos solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim.

Por meio do nomograma de Wischmeier et al. (1971 citado por PRUSKI, 2009), é possível estimar o fator erodibilidade da EUPS ( $K_{EUPS}$ ) em função da distribuição granulométrica, associada com o teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade (Figura 2.12).

Propõe-se que os solos são potencialmente erodíveis quando  $K_{EUPS} > 0,20$ . Na Tabela 4.6 é apresentada a estimativa do parâmetro  $K_{EUPS}$  para os solos estudados.

**Tabela 4.6** - Estimativa do parâmetro  $K_{EUPS}$  para os solos estudados segundo o nomograma de Wischmeier et al. (1971)

Procedência da Amostra	Parâmetros de entrada no nomograma de Wischmeier et al. (1971)					$K_{EUPS}$ Nomograma	$K_{EUPS}$ SI t.h $(MJ.mm)^{-1}$
	Silte + Areia Fina 0,002 a 0,1 mm (%)	Areia 0,1 a 2,0 mm (%)	Teor de matéria orgânica (%)	Tipo de Estrutura	Permeabilidade		
Morro do Alemão	38	34	0	granular fina	Baixa a moderada	0,29	0,038
Jardim Caiçaras	35	22	0	granular fina	Baixa a moderada	0,32	0,042
Bom Jardim	38	38	0	granular fina	Baixa a moderada	0,30	0,040

As Tabelas 4.7 e 4.8 apontam o comportamento dos solos em estudo diante da erosão, por meio de alguns critérios citados para avaliação da erodibilidade de forma indireta.

**Tabela 4.7** - Comportamento dos solos com base nos índices de plasticidade e curvas granulométricas

PROCEDÊNCIA DA AMOSTRA	ÍNDICES DE PLASTICIDADE			CURVAS GRANULOMÉTRICAS						
	MEIRELES (1967) e BASTOS (1999)	FRAGASSI (2001) e MENDES (2006) DNER (1979)	SANTOS e CASTRO (1967)	MEIRELES (1967) e BASTOS (1999)	GRAY e SOTIR (1996)	ELTZ et al. (2001)	FRAGASSI (2001)			SANTOS (2001) IP e C <sub>u</sub>
							% finos	DNER (1979)	C.gra.	
Morro do Alemão	boa resist. erosão	não se aplica	não erodível	pouco erodíveis	mais erodível	não erodível	erodível	boa a reg. resist. erosão	mais erodível.	boa resist. erosão
Jardim Caiçaras	boa resist. erosão	não se aplica	não erodível	pouco erodíveis	menos erodível	erodível	erodível	boa a reg. resist. erosão	menos erodível.	boa resist. erosão
Bom Jardim	boa resist. erosão	não se aplica	erodível	pouco erodíveis	intermediário	não erodível	erodível	boa a reg. resist. erosão	não se aplica	boa resist. erosão

Boa resist. erosão – boa resistência à erosão.

Boa a reg. resist. erosão - – boa a regular resistência à erosão.

C. gra. – curva granulométrica.

IP - índice de Plasticidade.

**Tabela 4.8** - Comportamento dos solos com base nos índices físicos, resistência ao cisalhamento dos solos, permeabilidade e nomograma de Wischmeier et al. (1971)

PROCEDÊNCIA DA AMOSTRA	ÍNDICES FÍSICOS			RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS		PERMEABILIDADE	NOMOGRAMA DE WISCHMEIER ET AL. (1971)
	BASTOS (1999)	FÁCIO (1991)	MENDES (2006)	BASTOS (1999)		MENDES (2006)	PRUSKI (2009)
	Índices de vazios (e)	Grau de saturação (S)	Peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ )	E. Cis. Direto	E. Triaxial		
Morro do Alemão	solos facilmente erodíveis	menos erodível	intermediário	baixa erodibilidade	baixa erodibilidade	pouca resistência à erosão	potencialmente erodíveis
Jardim Caiçaras	solos facilmente erodíveis	mais erodível	menos erodível	alta erodibilidade	alta erodibilidade	pouca resistência à erosão	potencialmente erodíveis
Bom Jardim	solos facilmente erodíveis	menos erodível	mais erodível	alta erodibilidade	baixa erodibilidade	pouca resistência à erosão	potencialmente erodíveis

E. Cis. Direto - Ensaio de Cisalhamento Direto.

E. Triaxial - Ensaio Triaxial.

### **4.3. Avaliação direta da erodibilidade**

#### **4.3.1. Ensaios de Inderbitzen**

Neste trabalho, as variáveis adotadas em todos os ensaios Inderbitzen foram:

- três rampas, uma com orifício circular de 144,0 mm de diâmetro e duas quadradas: uma com orifício de lado igual a 142,0 mm e outra com lado igual a 93,0 mm para fixação dos corpos de prova;
- dimensões dos corpos de prova: rampa de orifício circular com 144 mm de diâmetro (corpos de prova com 144,0 mm de diâmetro e 43,0 mm de altura); rampa de orifício quadrado com 142,0 mm de lado (corpos de prova com 142,0 mm de lado e 40,0 mm de altura); rampa de orifício quadrado com 93,0 mm de lado (corpos de prova com 93,0 mm de lado e 42,0 mm de altura);
- condições dos corpos de prova: umidade natural;
- vazão: 1,0 l/min;
- declividade da rampa: 10°; e
- tempo de ensaio: 30 minutos, com medições em 01, 03, 05, 09, 15 e 30 minutos.

Dada a intensidade média da chuva para um tempo de recorrência de 25 anos e tempo de duração da precipitação de cinco minutos, calculou-se uma vazão bem menor que 1,0 l/min. Como essa vazão não poderia ser usada no equipamento porque o fluxo não se espalharia uniformemente em toda a largura da rampa, usou-se uma vazão maior e uma inclinação menor que a dos taludes no campo.

O material carregado pelo fluxo superficial foi coletado em peneiras com aberturas de 4,760 mm (# 4), 2,000 mm (# 10), 0,425 mm (# 40), 0,149 mm (# 100) e 0,0074 mm (# 200).

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam, como exemplo, a condição de três corpos de prova do Bairro Jardim Caiçaras após realização do ensaio de Inderbitzen nos três tipos de rampas.



**Figura 4.1** - Corpo de prova após realização do ensaio. Rampa de orifício circular com 144 mm de diâmetro.

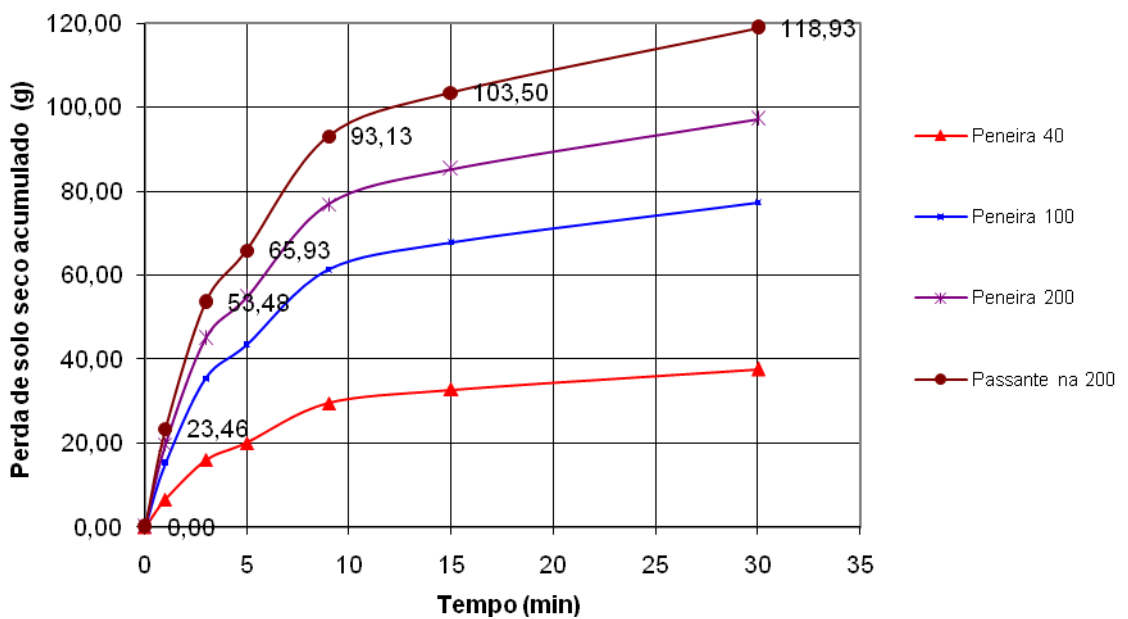


**Figura 4.2** - Corpo de prova após realização do ensaio. Rampa de orifício quadrado com 142,0 mm de lado.

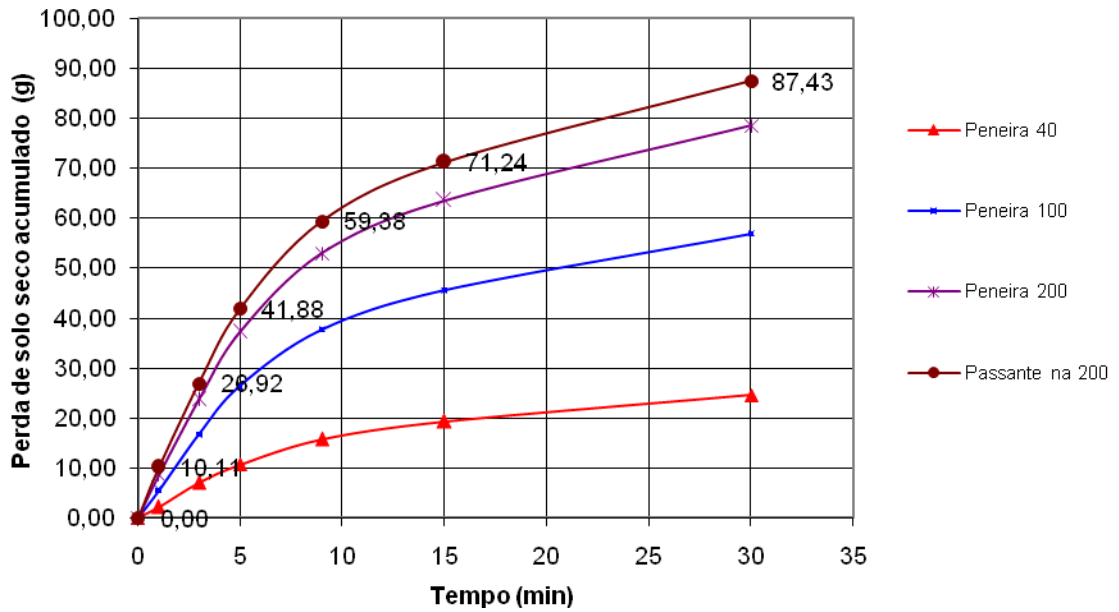


**Figura 4.3** - Corpo de prova após realização do ensaio. Rampa de orifício quadrado com 93,0 mm de lado.

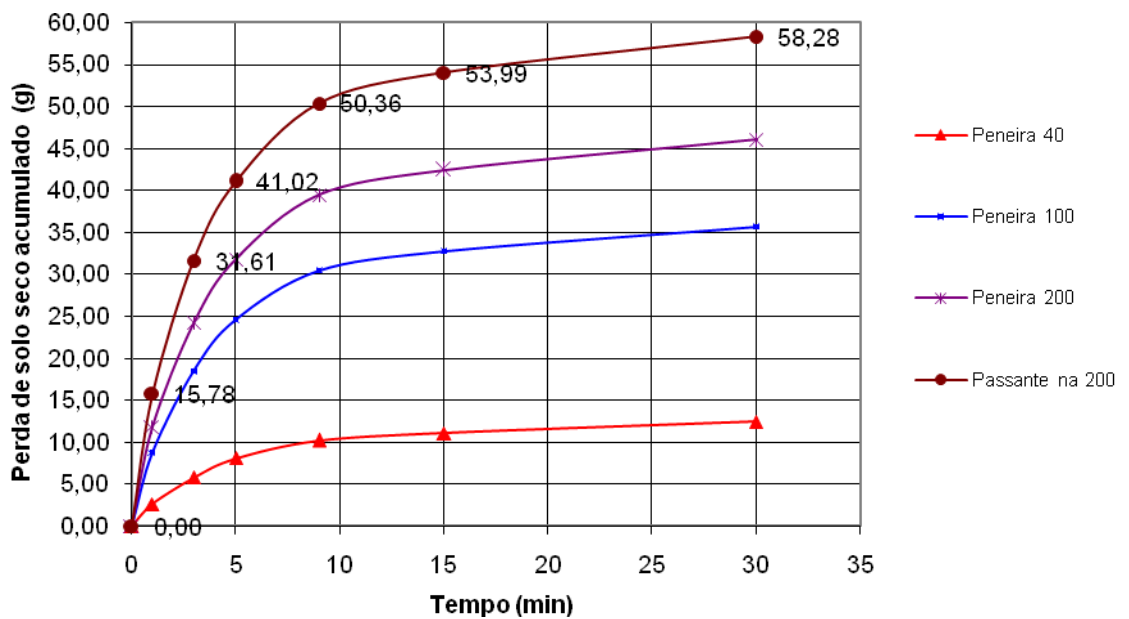
As Figuras de 4.4 a 4.6 mostram a variação da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) com o tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo, utilizando-se da rampa de orifício circular com diâmetro de a 144,0 mm.



**Figura 4.4** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x o tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – “Morro do Alemão”.

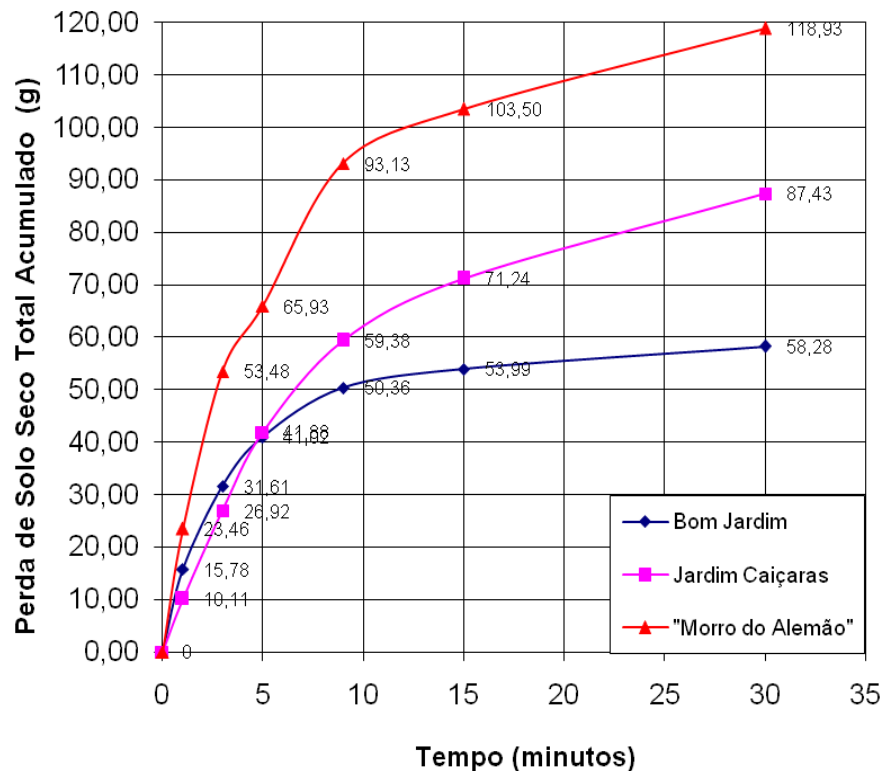


**Figura 4.5** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.



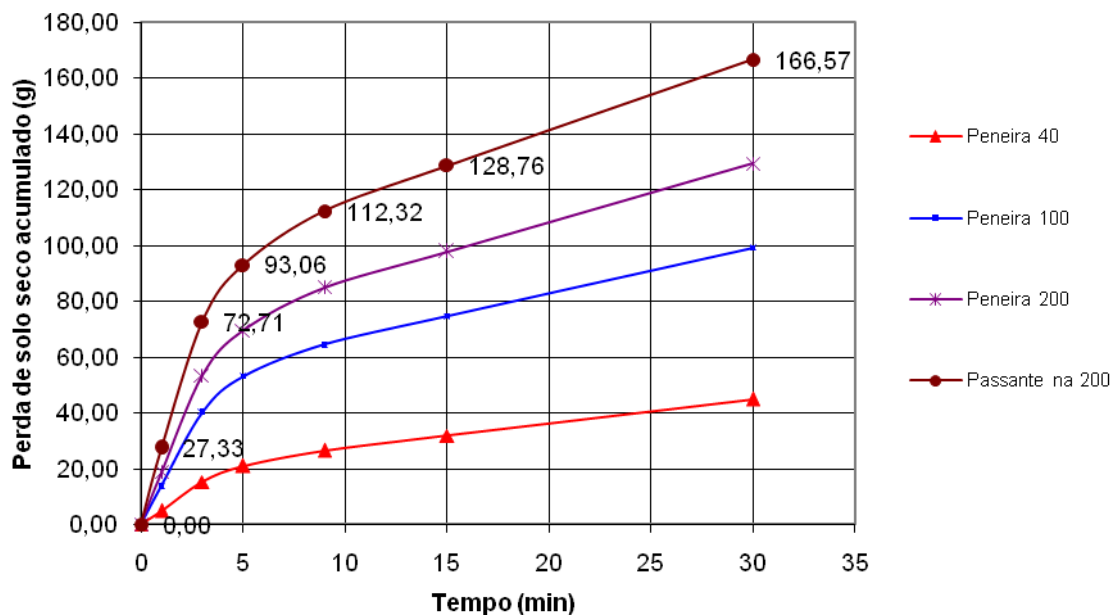
**Figura 4.6** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Bom Jardim.

Na Figura 4.7 apresentam-se as perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) com o tempo de ensaio (min) nas três áreas. Verifica-se que o “Morro Alemão” foi o que apresentou maior perda de solo, seguido dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim.

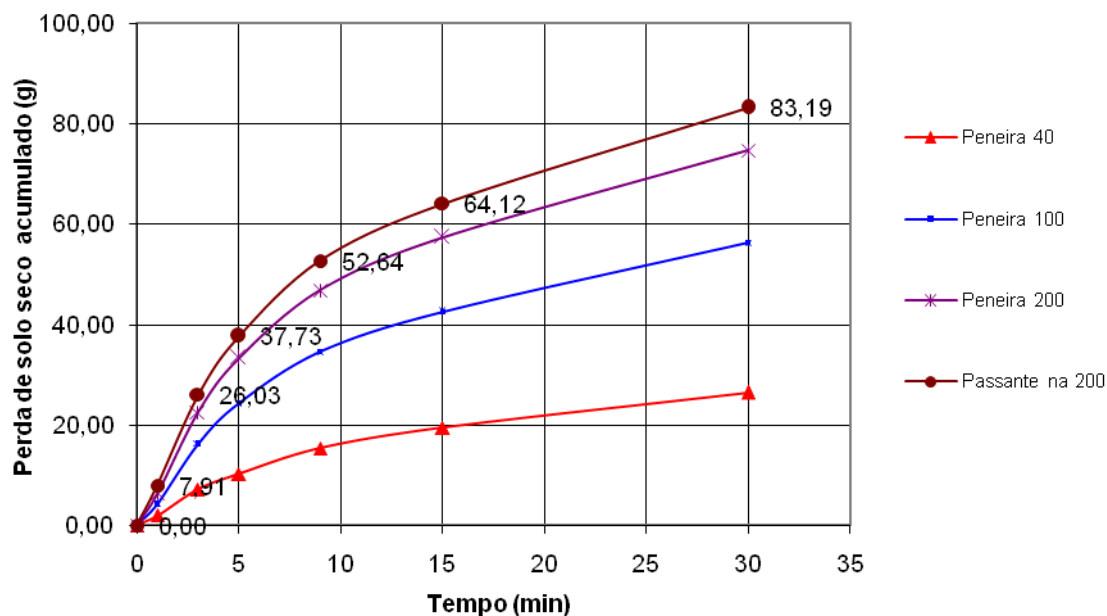


**Figura 4.7** - Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício circular com diâmetro igual a 144,0 mm.

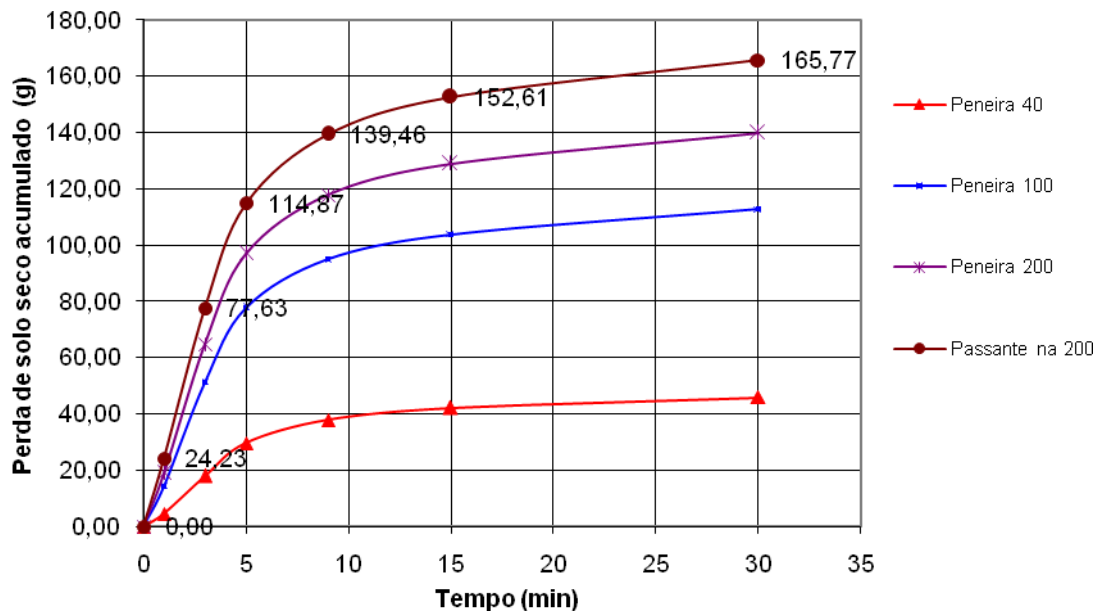
As Figuras 4.8 a 4.10 apontam a variação da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) com o tempo de ensaio (min) nas três áreas, utilizando-se da rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm.



**Figura 4.8** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – “Morro do Alemão”.

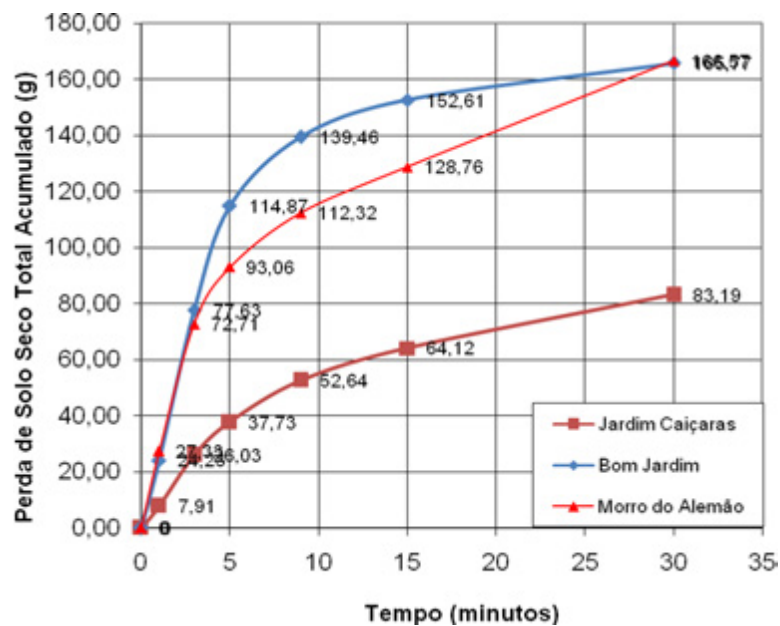


**Figura 4.9** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.



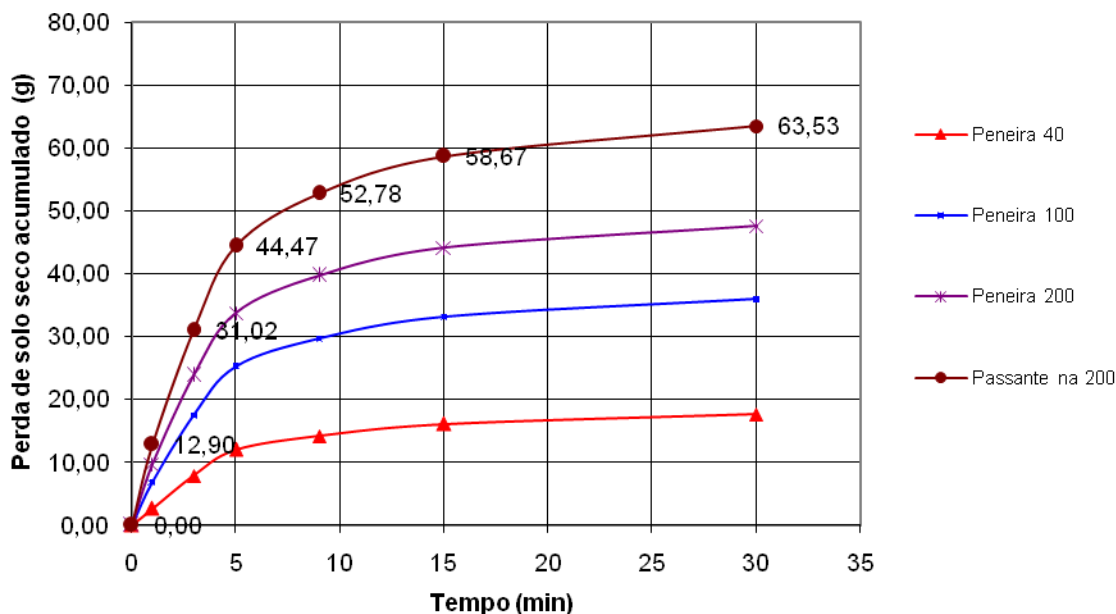
**Figura 4.10** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Bom Jardim.

A Figura 4.11 demonstra as perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) com o tempo de ensaio (min) nas três áreas. Nesse caso, observa-se que os solos do “Morro do Alemão” e Bairro Bom Jardim tiveram valores próximos de perdas de solo, seguidos do Bairro Jardim Caiçaras.

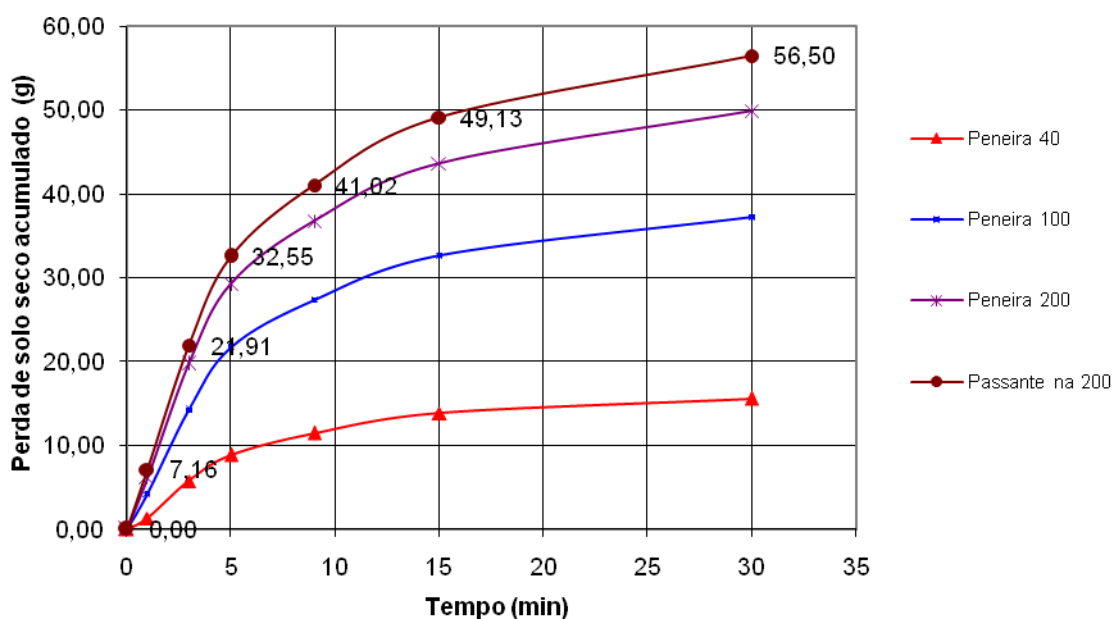


**Figura 4.11** - Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm.

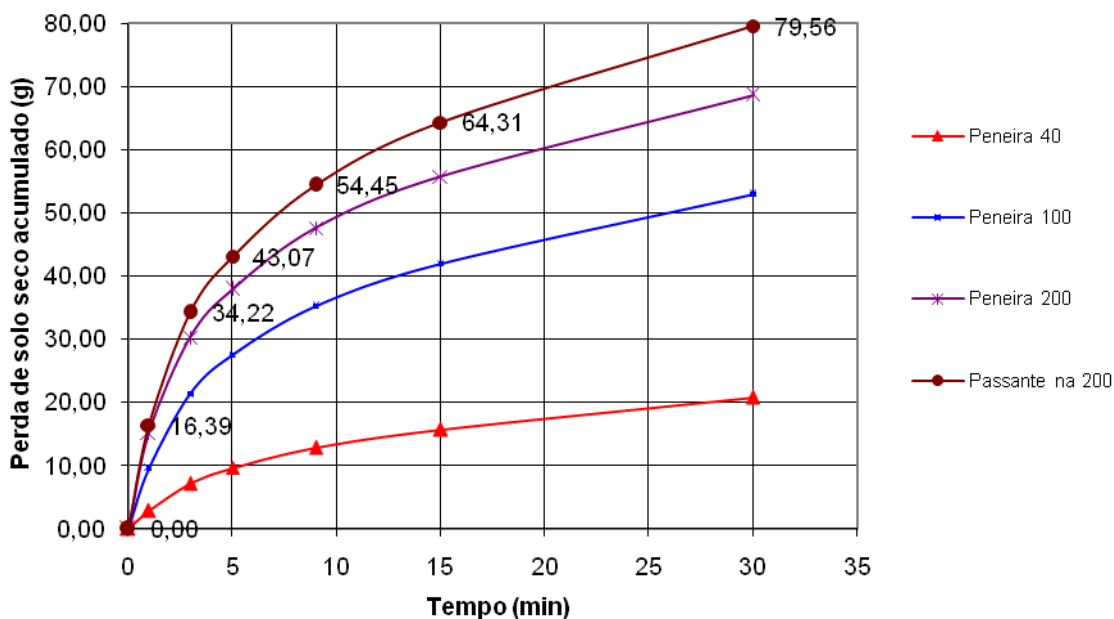
As Figuras de 4.12 a 4.14 expõem a variação da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) com o tempo de ensaio (min) para as três áreas, utilizando-se da rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm.



**Figura 4.12** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro “Morro do Alemão”.



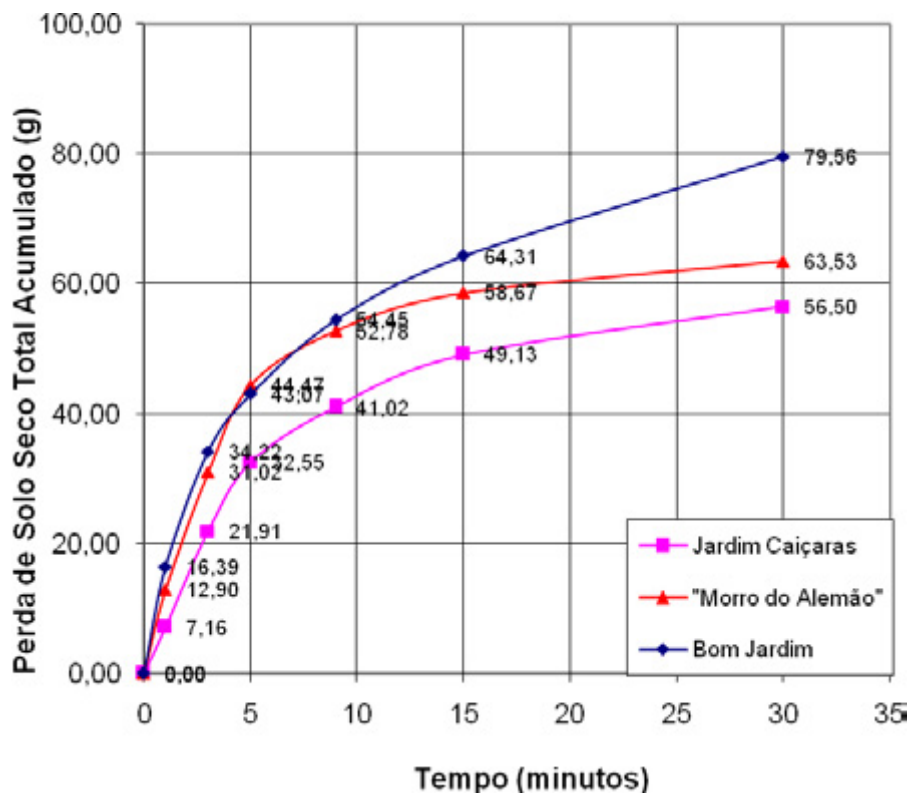
**Figura 4.13** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.



**Figura 4.14** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Bom Jardim.

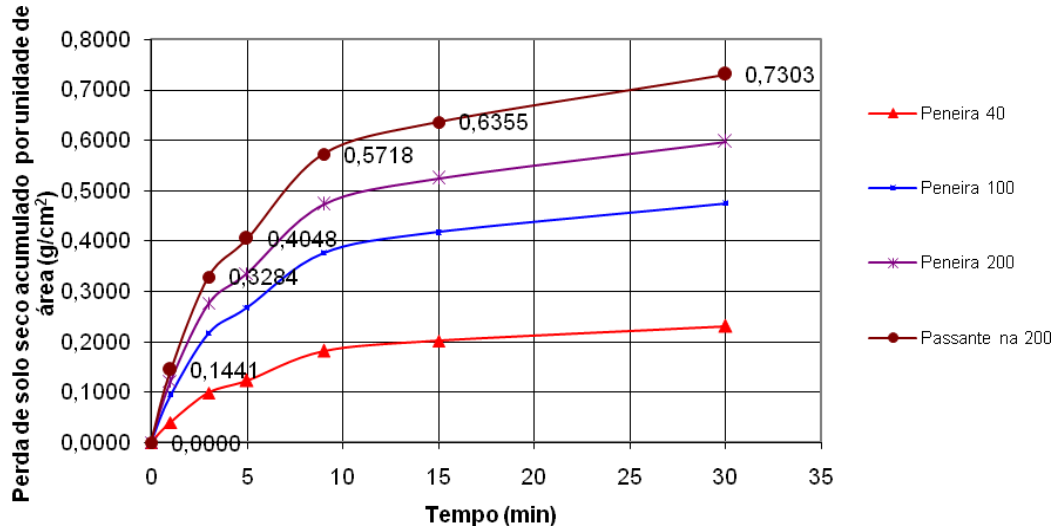
A Figura 4.15 mostra as perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) com o tempo de ensaio (min) nas três áreas em estudo. Observa-se também que, apesar de as perdas de solos apresentarem diferenças menores que nas situações anteriores, os solos do Bairro Bom Jardim e “Morro do Alemão” apresentaram maiores perdas que o Bairro Jardim Caiçaras.

A erodibilidade pode ser caracterizada como a quantidade de material removida pela ação das chuvas por unidade de área. Portanto, as figuras seguintes apresentam as perdas de solo seco acumulado do material erodido dos solos em estudo por unidade de área dos corpos de prova, para os três tipos de rampa.

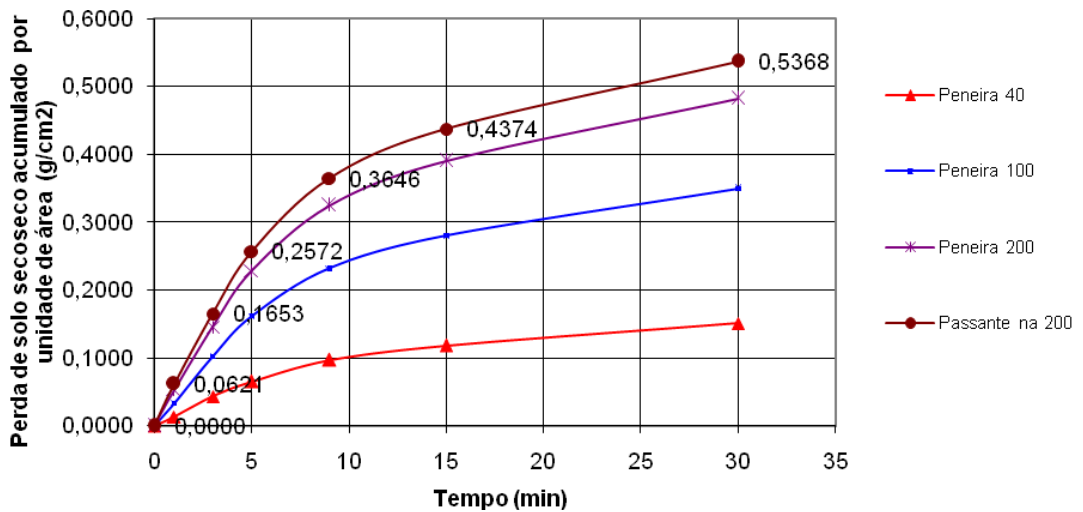


**Figura 4.15** - Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm.

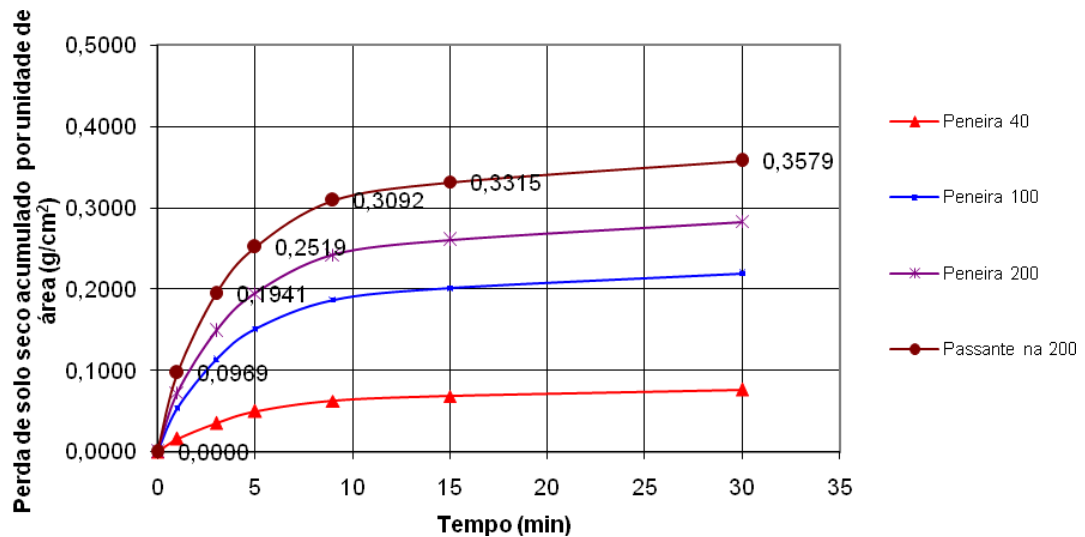
Para ensaios realizados na rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm, a área do corpo de prova foi de 162,86 cm<sup>2</sup>. Os gráficos das Figuras 4.16 a 4.18 apresentam a variação da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova (g/cm<sup>2</sup>) em função do tempo de ensaio (min).



**Figura 4.16** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm - “Morro do Alemão”.

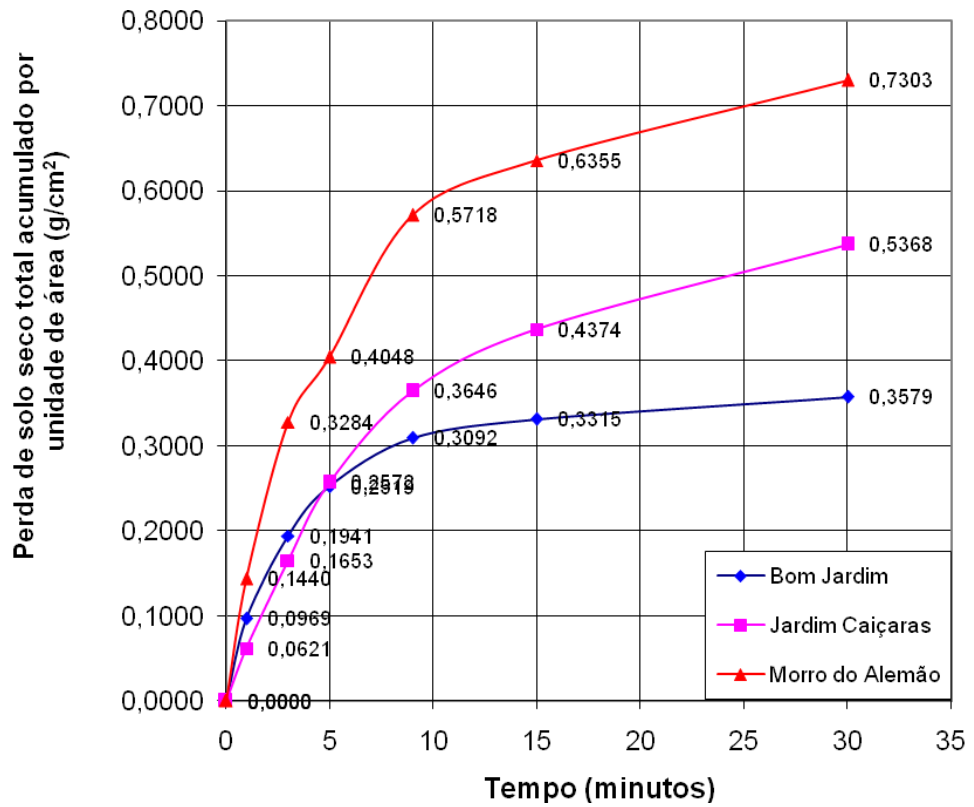


**Figura 4.17** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.



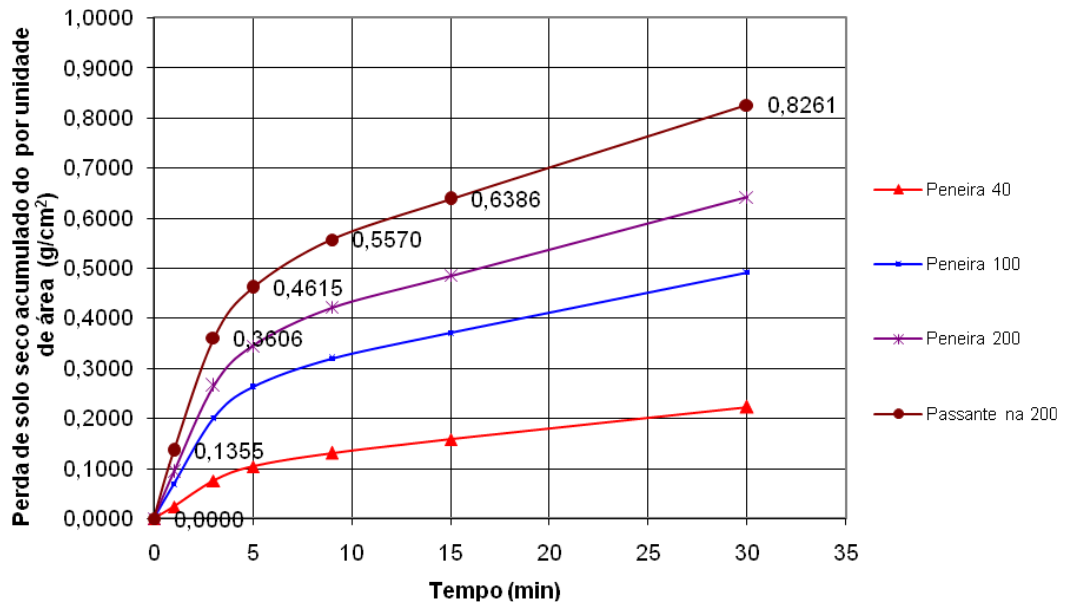
**Figura 4.18** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm – Bairro Bom Jardim.

Na Figura 4.19 apresentam-se as perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) com o tempo de ensaio (min) nas três áreas. Observa-se que o solo do “Morro Alemão” teve maior perda de solo em relação aos demais, ou seja, 36,0% maior que a dos solos do Bairro Jardim Caiçaras e 104,0% que a do Bairro Bom Jardim. Os solos do Bairro Jardim Caiçaras tiveram perdas de 50,0% em relação ao bairro Bom Jardim, o que corrobora os resultados apresentados em relação à perda de solo seco acumulado do material erodido (g) em função do tempo de ensaio (min).

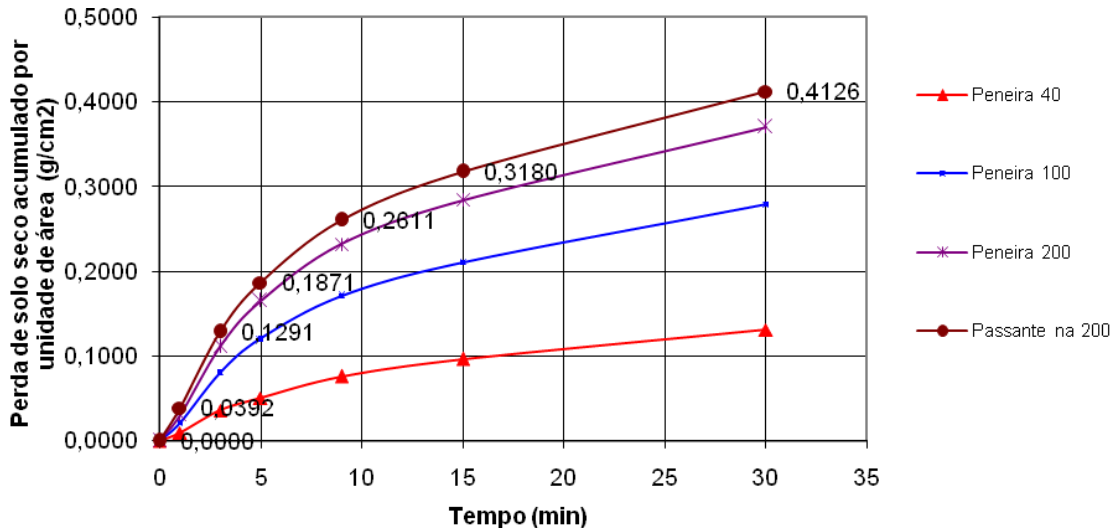


**Figura 4.19** - Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min) nas três áreas. Rampa de orifício circular com diâmetro de 144,0 mm.

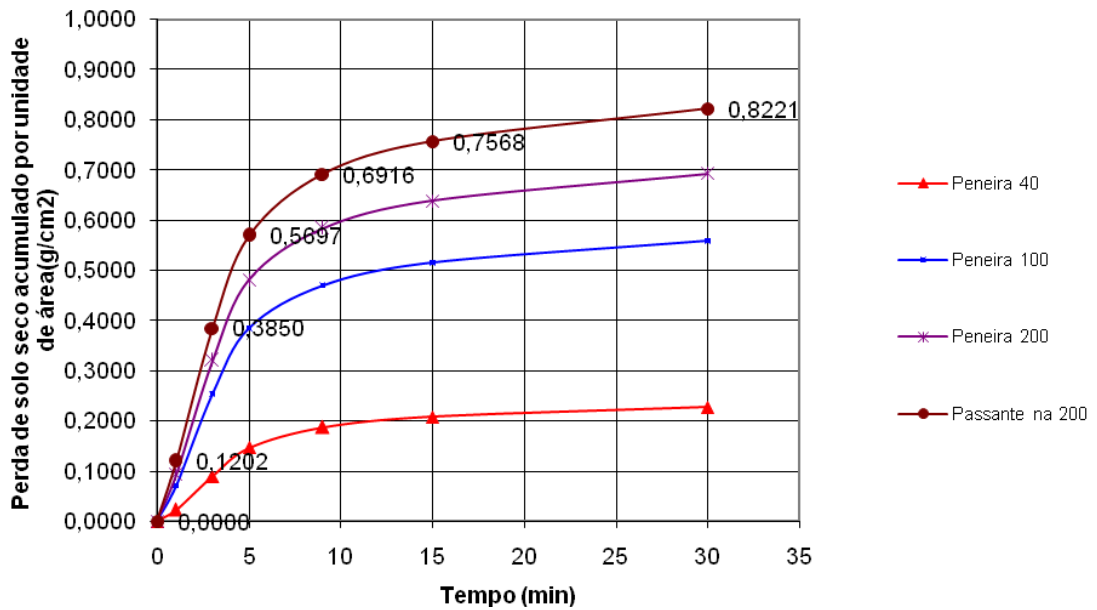
As Figuras 4.20 a 4.22 ilustram gráficos com a perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) em função do tempo de ensaio (min), na rampa de orifício quadrado de lado igual a 142,0 mm, cuja área do corpo de prova equivale a  $201,64 \text{ cm}^2$ .



**Figura 4.20** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g/cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – “Morro do Alemão”.



**Figura 4.21** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g/cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.

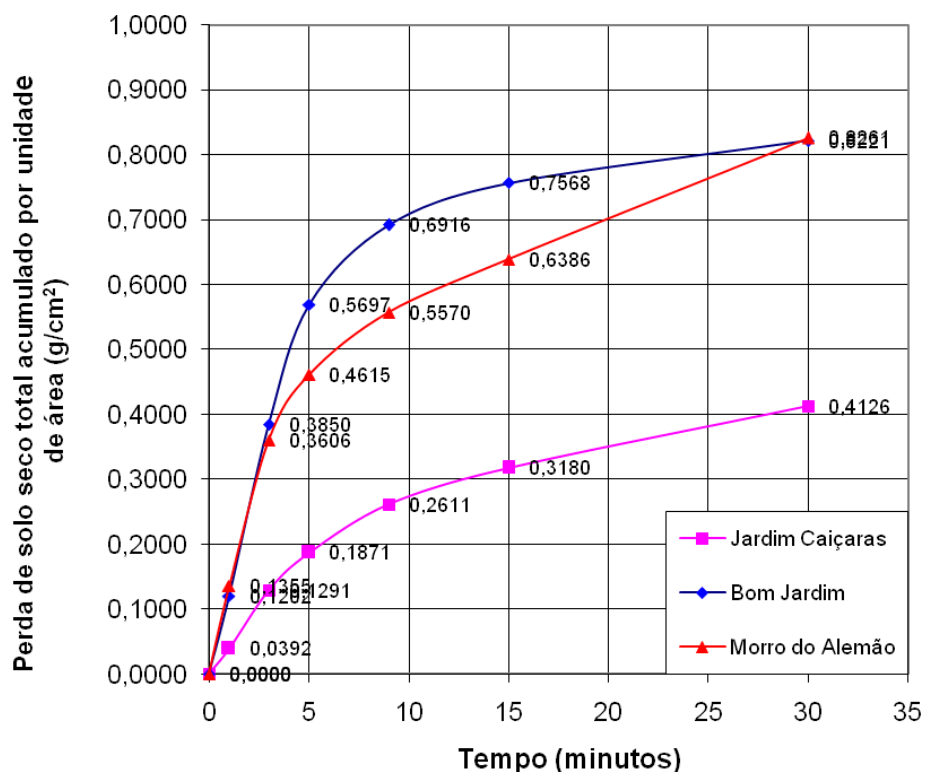


**Figura 4.22** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm – Bairro Bom Jardim.

O gráfico da Figura 4.23 esboça as perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) com o tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo.

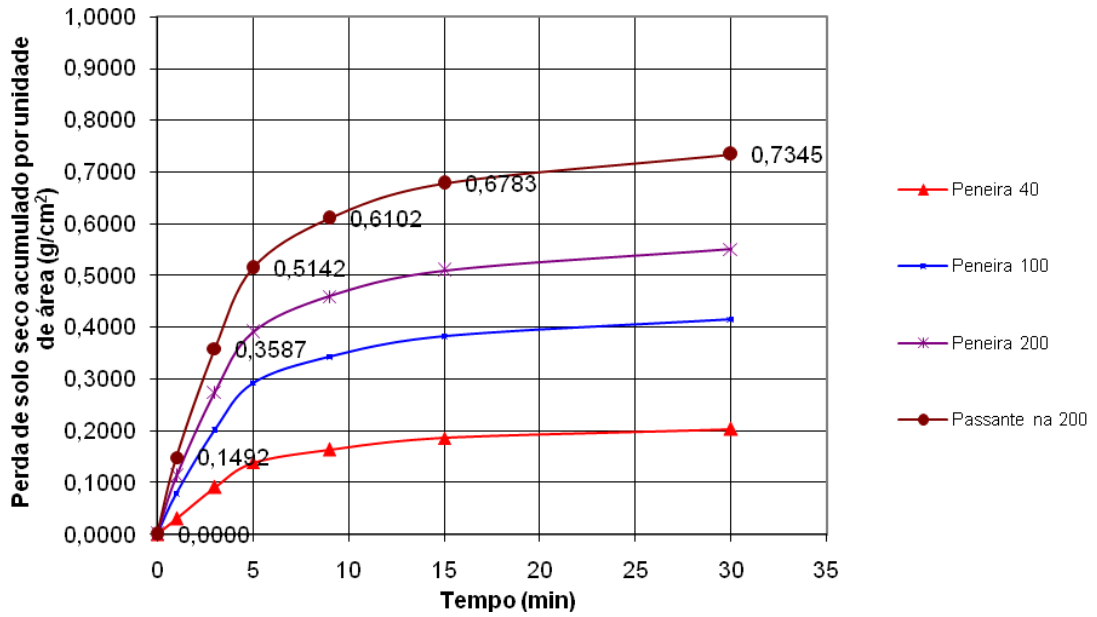
Os solos do “Morro Alemão” e Bairro Bom Jardim tiveram 100,0% a mais de perda que os do Bairro Jardim Caiçaras.

Também pôde-se observar que a área do corpo de prova não alterou os resultados apresentados em relação à perda de solo seco acumulado do material erodido x tempo de ensaio.

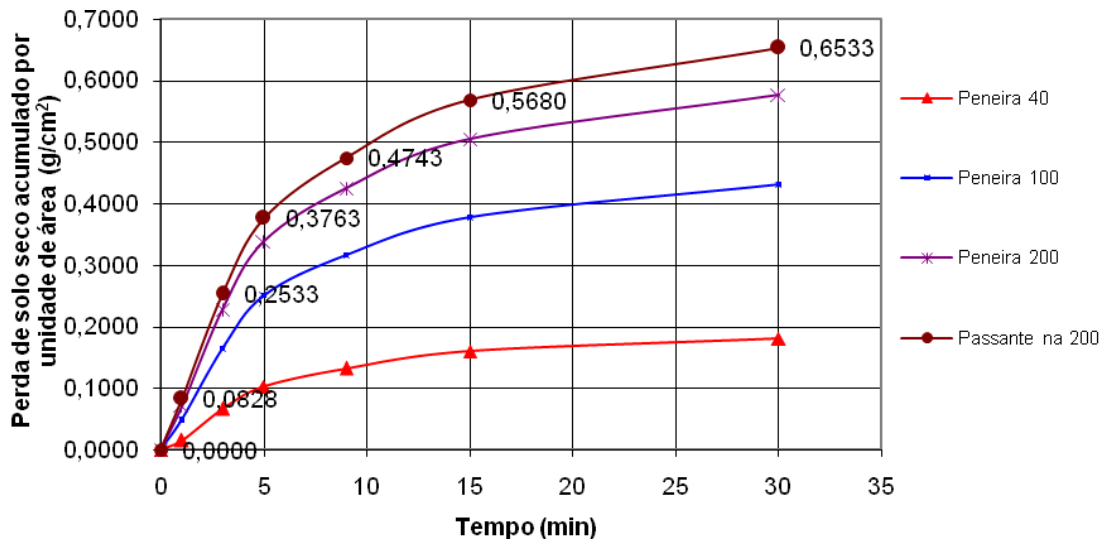


**Figura 4.23** - Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 142,0 mm.

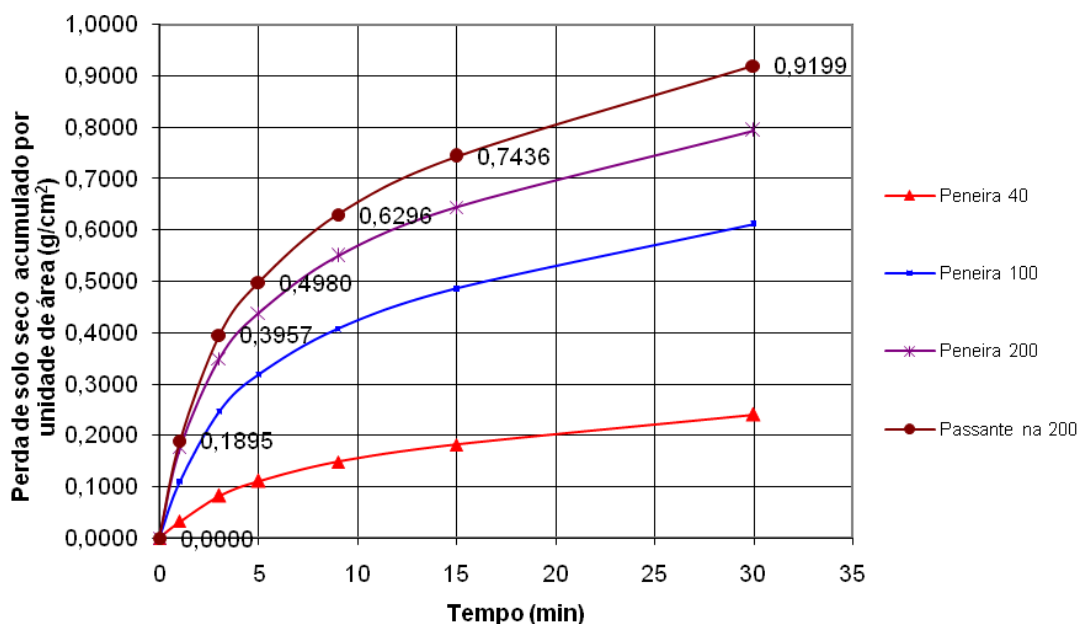
As Figuras 4.24 a 4.26 apresentam os gráficos com a perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) em função do tempo de ensaio (min), na rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm, cuja área do corpo de prova equivale a  $86,49 \text{ cm}^2$ .



**Figura 4.24** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – “Morro do Alemão”.



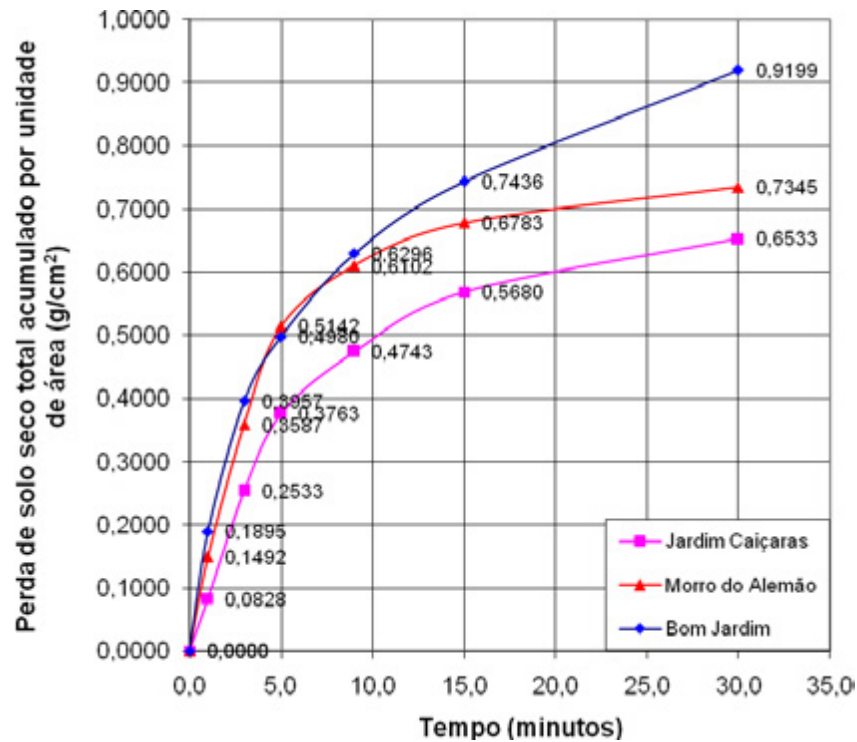
**Figura 4.25** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Jardim Caiçaras.



**Figura 4.26** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min). Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm – Bairro Bom Jardim.

O gráfico da Figura 4.27 ilustra as perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) com o tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. A área do corpo de prova também não alterou os resultados apresentados em relação à perda de solo seco acumulado do material erodido pelo tempo de ensaio.

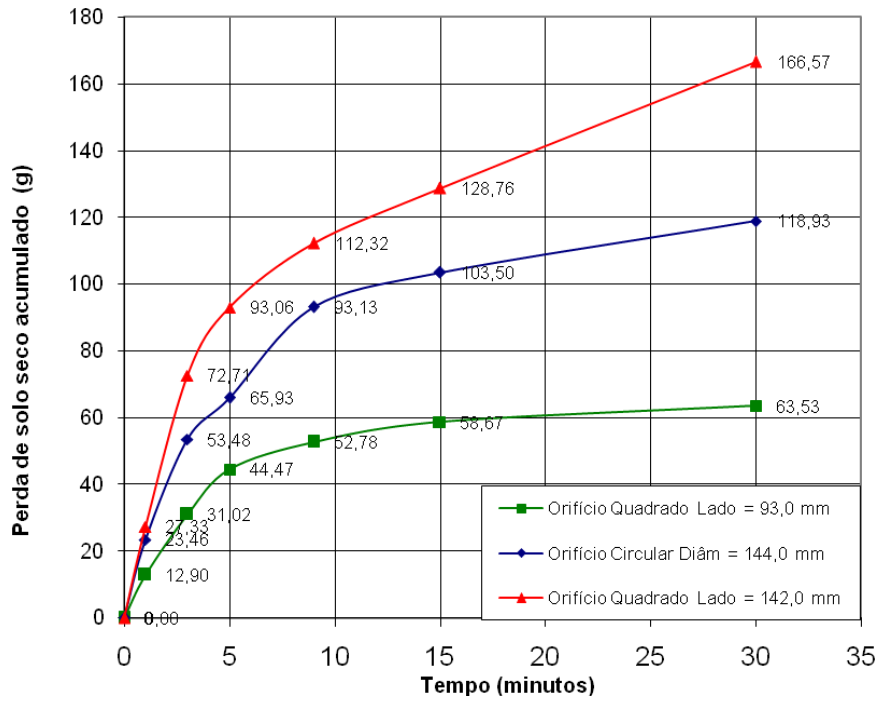
Nesse caso onde houve estreitamento da largura da rampa, os solos do Bairro Bom Jardim apresentaram maior perda, ou seja, 25,0% maior que a os do “Morro do Alemão” e 41,0% do Bairro Jardim Caiçaras. O “Morro do Alemão” teve 12,0% a mais de perda em relação ao bairro Jardim Caiçaras.



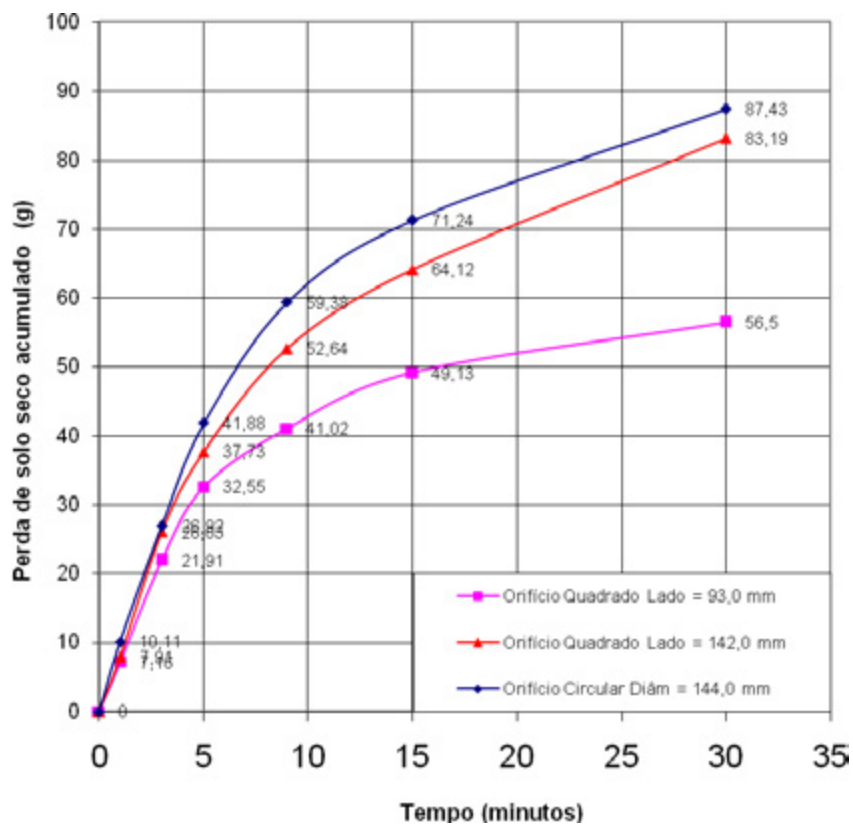
**Figura 4.27** - Resultado das perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min) para as três áreas em estudo. Rampa de orifício quadrado com lado igual a 93,0 mm.

Observa-se, em geral, que as perdas de solo são maiores nos tempos iniciais do ensaio, estabilizando-se após 15 minutos.

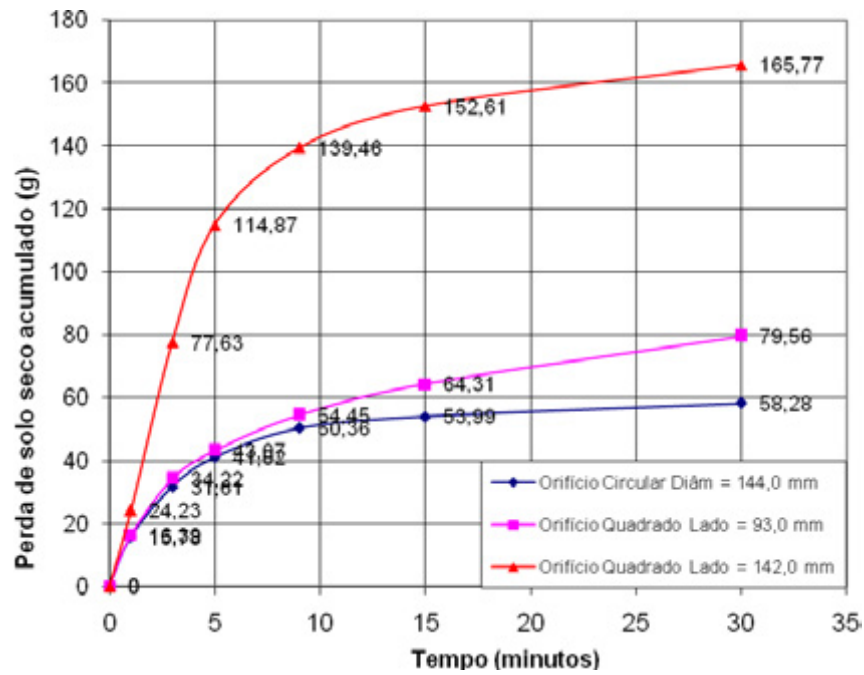
Nas Figuras 4.28 a 4.30 são apresentados gráficos com as perdas de solo seco total acumulado do material erodido (g) pelo tempo de ensaio (min), agrupando os três tipos de rampas utilizados nos ensaios de Inderbitzen para cada área em estudo.



**Figura 4.28** - Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – “Morro do Alemão”.

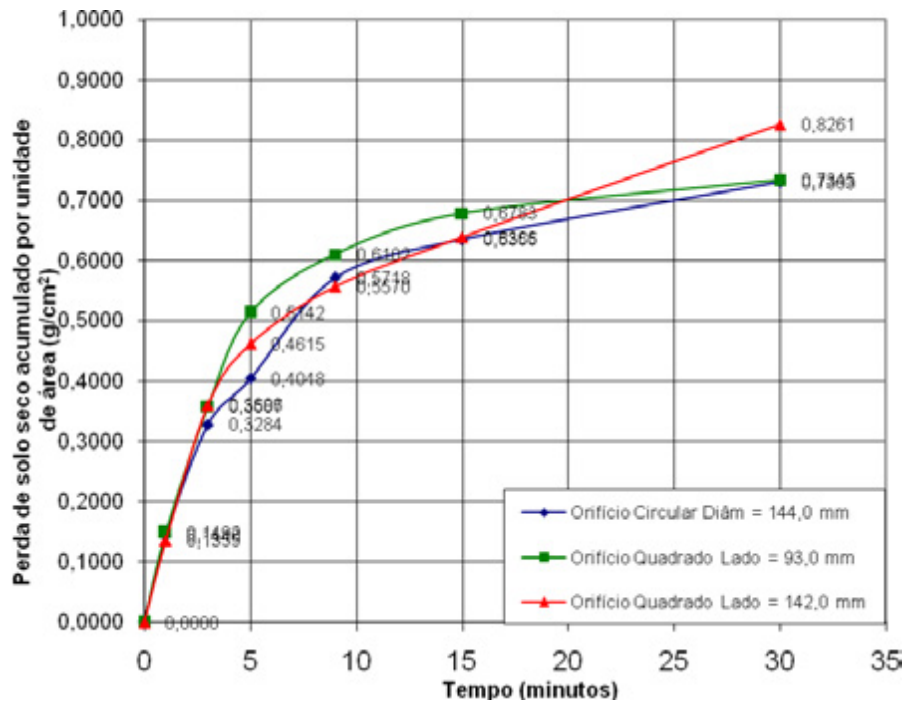


**Figura 4.29** - Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Jardim Caiçaras.

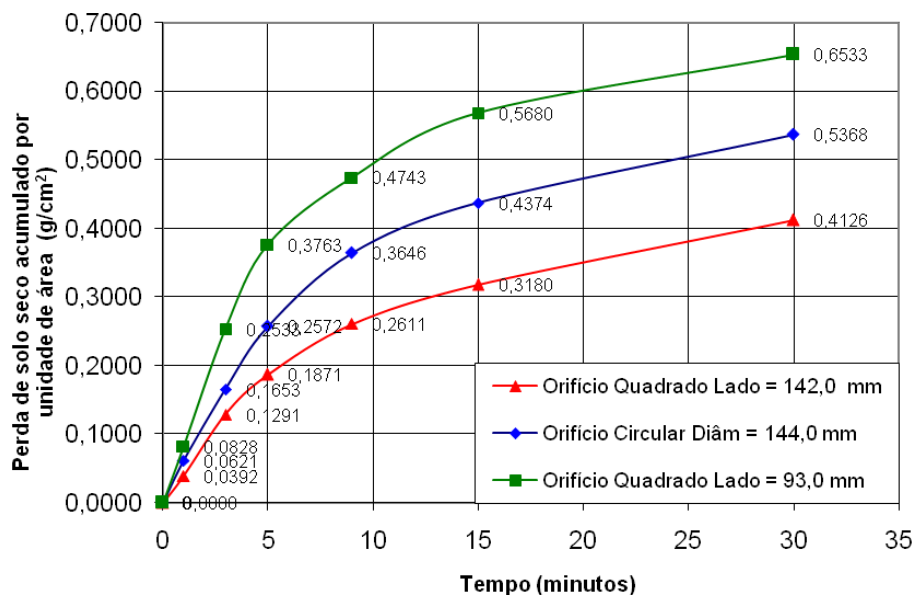


**Figura 4.30** - Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido (g) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Bom Jardim.

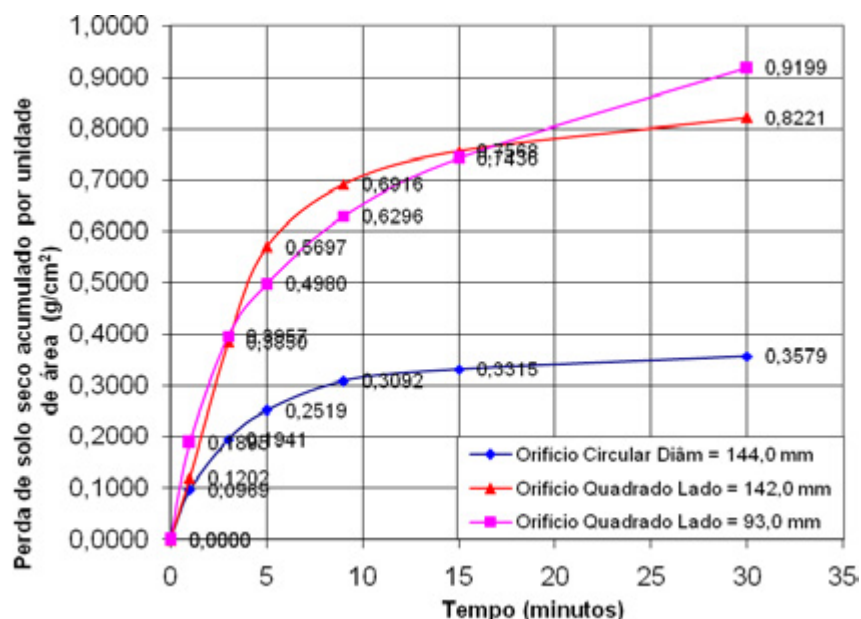
As Figuras 4.31 a 4.33 esboçam as perdas de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área dos corpos de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) pelo tempo de ensaio (min), agrupando os três tipos de rampa usados nos ensaios para cada solo em estudo.



**Figura 4.31** - Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – “Morro do Alemão”.



**Figura 4.32** - Resultado da perda de solo seco total acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Jardim Caiçaras.



**Figura 4.33** - Resultado da perda de solo seco acumulado do material erodido por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), para os três tipos de rampa – Bairro Bom Jardim.

Conforme figuras anteriores, a Tabela 4.9 apresenta os resultados da perda de solo total acumulada (g) x tempo de ensaio (min) e da perda de solo total acumulada por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min), obtidas através dos ensaios de Inderbitzen, para os três solos em estudo e para os três tipos de rampa.

**Tabela 4.9** - Perda de solo total acumulada (g) x tempo de ensaio (min) e perda de solo total acumulada por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) x tempo de ensaio (min)

Procedência da Amostra	Perda de solo total acumulada (g)			Perda de solo total acumulada por unidade de área do corpo de prova ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )		
	Circular 144 mm	Quadrado 142 mm	Quadrado 93 mm	Circular 144 mm	Quadrado 142 mm	Quadrado 93 mm
Morro do Alemão	118,93	166,57	63,53	0,7303	0,8261	0,7345
Jardim Caiçaras	87,43	83,19	56,50	0,5368	0,4126	0,6533
Bom Jardim	58,28	165,77	79,56	0,3579	0,8221	0,9199

Fazendo uma analogia entre os solos estudados e as áreas dos orifícios para inserção dos corpos de prova de cada rampa, observam-se maiores perdas de solo do “Morro do Alemão” na rampa de orifício quadrado com 142,0 mm de lado, seguida, com valores próximos de perdas, das rampas

de orifício quadrado com 93,0 mm de lado e da circular com 144,0 mm de diâmetro.

Os solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim tiveram maiores perdas nas rampas de orifício quadrado com 93,0 mm de lado.

Segundo Fragassi (2001), os solos das três áreas em estudo mostraram comportamento de regular a ruim frente à erosão, porque apresentam velocidade de erosão entre 0,8 e 25,0 g/cm<sup>2</sup>/hora (Tabela 2.9). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10** - Perda de solo total acumulada por unidade de área do corpo de prova (g/cm<sup>2</sup>) por tempo de ensaio (horas)

Tipo de Rampa	Morro do Alemão	Jard Caiçaras	Bom Jardim
	E (g/cm <sup>2</sup> /hora)		
Circular de $\phi = 144,0\text{mm}$	1,4606	1,0736	0,7158
Quadrada 142,0 mm de lado	1,6522	0,8252	1,6442
Quadrada 93,0 mm de lado	1,4690	1,3066	1,8398

#### 4.3.2. Erodibilidade (K) e tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{hcrítica}$ )

A partir das condições específicas de fluxo: vazão (1,0 l/min) e velocidade (obtida pela fórmula de Chezy com coeficiente de Manning) e largura das rampas, foram obtidas as alturas da lâmina de fluxo através da equação 2.17.

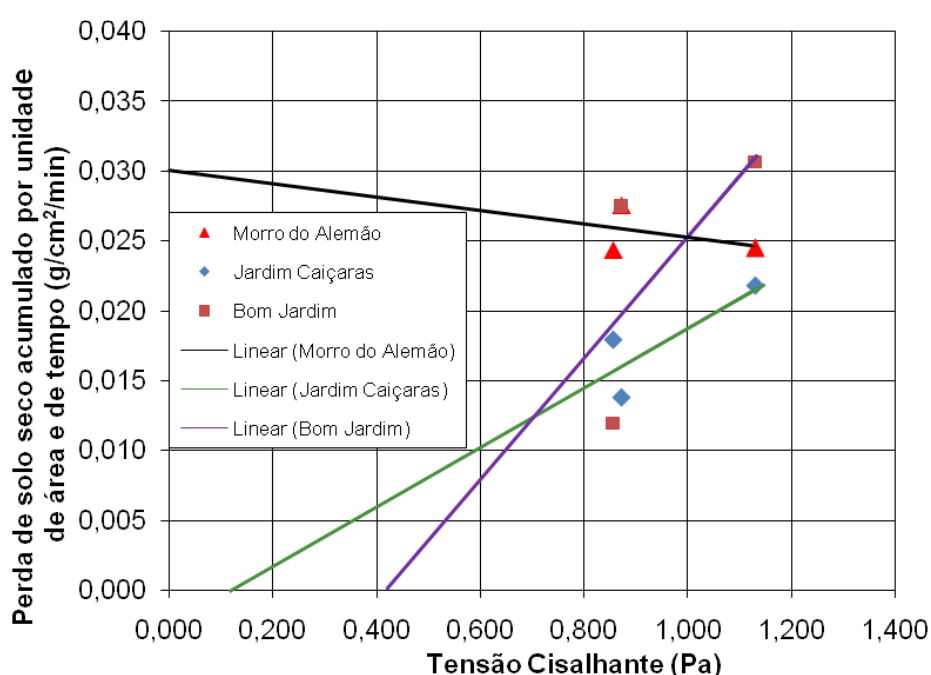
Por meio da equação 2.16, de Du Boys, estimaram-se as tensões cisalhantes hidráulicas do fluxo ( $\tau_h$ ), adotando o peso específico da água igual de 0,01 N/cm<sup>3</sup> e inclinação da rampa de 10° (Tabela 4.11).

**Tabela 4.11** - Alturas da lâmina de fluxo (h) e tensões cisalhantes hidráulicas do fluxo ( $\tau_h$ )

Vazão = 1,0 l/min		Inclinação da rampa = 10°	
Rampas	Circular $\varnothing=144,0\text{mm}$	Quadrada - 142,0 mm de lado	Quadrada - 93,0 mm de lado
Altura da lâmina do fluxo (cm)	0,0486	0,0495	0,0641
$\tau_h$ (Pa)	0,8569	0,8728	1,1303

Aos dados da tensão cisalhante hidráulica dos ensaios ( $\tau_h$ ) pela perda de solo por unidade de área ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) plotou-se um gráfico (Figura 4.34). Em seguida, ajustaram-se as retas, o que possibilitou estimar os parâmetros de erodibilidade: tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{hcrit}$ ), que corresponde ao valor máximo da  $\tau_h$  para erosão nula, e fator de erodibilidade K, que representa o gradiente de perda de solo em relação às tensões hidráulicas aplicadas (BASTOS, 1999).

A Tabela 4.12 apresenta as perdas de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ), a tensão cisalhante hidráulica crítica (Pa) e o fator de erodibilidade ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ).



**Figura 4.34** - Definição da tensão cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{hcrit}$ ) e fator de erodibilidade (K) dos solos.

**Tabela 4.12** - Perdas de solo ( $10^{-3} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ ); tensão cisalhante hidráulica crítica (Pa) e fator de erodibilidade ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ )

Procedência da Amostra	Perda de Solo (em $10^{-3} \text{ g/cm}^2/\text{min}$ )			$\tau_{hcrit}$ (Pa)	K ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ )
	Circular $\varnothing=144,0\text{mm}$	Quadrada - 142,0 mm de lado	Quadrada - 93,0 mm de lado		
Morro Alemão	24,34	27,54	24,48	Indet.	$\approx 0$
Jardim Caiçaras	17,89	13,75	21,78	0,12	0,021
Bom Jardim	11,93	27,40	30,66	0,42	0,043

Em função dos fatores de erodibilidade obtidos, os solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim teriam erodibilidade mediana, e os do “Morro do Alemão” baixa taxa de erodibilidade, conforme critério de Bastos (1999) (Tabela 2.8).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principais objetivos desenvolver uma nova versão do equipamento de Inderbitzen, variando o orifício da rampa hidráulica para fixar os corpos de prova, e, a partir daí, fazer um estudo da perda de solo (erodibilidade) em três áreas específicas da cidade de Juiz de Fora-MG que apresentam um processo acelerado de fortes erosões. Além desses, procurou-se estabelecer uma correlação entre os parâmetros obtidos nos ensaios convencionais de laboratório (propriedades geotécnicas dos solos) com a susceptibilidade dos solos à erosão.

O motivo pelo qual apenas a erosão hídrica pluvial é analisada é o fato de a água ser o agente mais importante da erosão.

As principais conclusões obtidas são as que se seguem.

### ***a) Em relação ao equipamento de Inderbitzen desenvolvido***

O equipamento desenvolvido mostrou-se válido, tendo sido capaz de aplicar vazões maiores que 0,5 l/min e inclinações menores que 90<sup>0</sup>.

As três rampas funcionaram igualmente bem, e a metodologia do ensaio, desde a moldagem dos corpos de prova e a proteção que eles tinham no início do ensaio, até que a vazão fosse adequadamente imposta, foi apropriada.

## **b) Em relação aos solos estudados**

### **b.1) Avaliação da erodibilidade de forma indireta**

Conforme observado na Tabela 4.7, os critérios baseados nos índices de plasticidade apontam apenas os solos do Bairro Bom Jardim como fortemente erodíveis, segundo Santos e Castro (1967); os demais continuaram a apresentar boa resistência à erosão. Com relação à curva granulométrica, as metodologias mencionadas apontam, em sua maioria, todos os solos estudados como poucos erodíveis.

De acordo com a classificação pela carta de plasticidade, proposta por Gray e Sotir (1996), o solo do Jardim Caiçaras (CH) seria menos erodível seguido do Bairro Bom Jardim (CL) e “Morro do Alemão” (MH). Entretanto, enfatiza-se que esse sistema de classificação não é apropriado para solos residuais, como os estudados nesta tese.

A Tabela 4.8 apontou o comportamento dos solos com base nos índices físicos, resistência ao cisalhamento dos solos, permeabilidade e nomograma de Wischmeier et al. (1971), concluindo-se que:

- Os índices físicos indicam os solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim como solos facilmente erodíveis. Para o “Morro do Alemão”, os resultados não foram coerentes.
- No que diz respeito aos ensaios de resistência, obteve-se o fator de variação da coesão  $\Delta_c$ , para ensaios de cisalhamento direto, com valores maiores que 85% para os solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim, que, segundo Bastos (1999), apresentam alta erodibilidade.
- Nos ensaios triaxiais, os fatores de variação da coesão ( $\Delta_c$ ) obtidos foram menores que 85%; de acordo com o proposto, esses solos não seriam de alta erodibilidade. Apenas o solo do Bairro Jardim Caiçaras poderia ser apontado com tendência a alta erodibilidade, por apresentar  $\Delta_c \cong 85\%$ .
- De acordo com Mendes (2006), quanto maior a permeabilidade do solo, maior a estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, menor o arraste de partículas individuais pela água. Para os solos em estudo, considerados de permeabilidade baixa a moderada, típicos das areias finas e siltes, eles seriam caracterizados como de pouca resistência à erosão.

- utilizando-se da metodologia do nomograma de Wischmeier et al. (1971), foram encontrados, para os três solos, valores de  $K_{EUPS}$  superiores a 0,20, sendo assim ambos classificados como potencialmente erodíveis.

De acordo com Pruski (2009), a obtenção desse parâmetro pelo nomograma de Wischmeier et al. (1971) não tem apresentado bons resultados quando em solos tropicais.

Conclui-se que os solos do “Morro do Alemão” apresentaram-se, na maioria dos critérios adotados, como pouco erodíveis, ao contrário do Bairro Jardim Caiçaras. O Bairro Bom Jardim teve aproximadamente 50% dos resultados como mais erodível e 50% menos erodível.

### ***b.2) Avaliação da erodibilidade de forma direta***

Em todos os ensaios Inderbitzen, a maior quantidade de perda de solo ocorria nos 15 minutos iniciais.

Observou-se nesses ensaios que mudanças na forma e no tamanho do orifício da rampa influenciaram nas perdas de solo.

O solo do “Morro do Alemão” foi o que apresentou maior perda, seguido dos bairros Bom Jardim e Jardim Caiçaras.

Quanto à relação entre variação dos orifícios das rampas e perda de solo, conclui-se que:

- Embora a maior área do corpo de prova seja da rampa de orifício quadrado com 142,0 mm de lado, apenas os solos do “Morro do Alemão” apresentaram maiores perdas.
- Apesar de a rampa circular de 144,0 mm de diâmetro ter maior área que a quadrada com 93,0 mm de lado, esta apresentou maiores perdas para os solos estudados.

Era de se esperar que as perdas de solo na rampa de menor largura fossem maiores, uma vez que a tensão de cisalhamento hidráulica nessa rampa é maior, mas apenas os solos dos bairros Jardim Caiçaras e Bom Jardim confirmam essa relação.

A relação entre perdas de solo por unidade de área do corpo de prova e a tensão de cisalhamento hidráulica, conforme proposto por Du Boys e

apresentado por Bastos (1999), permitiu calcular as taxas de erodibilidade e as tensões de cisalhamento críticas.

De acordo com o critério de Fragassi (2001), baseado na velocidade de erosão, os solos das três áreas apresentaram comportamento de regular a ruim frente à erosão.

Em síntese, percebe-se que não há concordância entre todos os critérios de erodibilidade apresentados a partir de ensaios de caracterização e da classificação unificada dos solos e os resultados de erodibilidade obtidos no ensaio Inderbitzen.

Como o ensaio Inderbitzen proporciona uma medida mais direta da taxa de erodibilidade, acredita-se mais nesse ensaio que nas propostas de correlações com parâmetros de caracterização e classificação unificada dos solos. Assim, entende-se que os solos do “Morro do Alemão” sejam mais erodíveis e, nesse sentido, considera-se que:

- A classificação proposta por Gray e Sotir (1996) no que diz respeito à medida da erodibilidade, no sentido do solo mais erodível para menos erodível, é adequada.
- O critério de Fragassi (2001) é favorável, pois esses solos apresentam pouca quantidade de argila e elevadas porcentagens de areia fina e silte.
- A equação 2.12 baseada em dados da curva granulométrica, proposta por este mesmo autor, também se mostrou apropriada.
- A relação entre perdas de solo x índices de vazios ( $e$ ), conforme propõe Bastos (1999), é válida.
- Solos de permeabilidade baixa a moderada, típicos das areias finas e siltes, podem ser caracterizados como de pouca resistência à erosão (MENDES, 2006).

Portanto, para correlacionar a erodibilidade dos solos com suas características físicas e geotécnicas é necessário que se crie um banco de dados a partir de uma maior área amostral, abrangendo uma extensão maior da bacia em estudo, conhecendo-se a classe predominante desses solos para que se formule um modelo-padrão.

Apesar disso, podem-se considerar como representativas as áreas envolvidas, que vêm se degradando através dos tempos.

Portanto, o ensaio de Inderbitzen destaca-se como uma ferramenta importante para compreender esses processos, como pôde ser visto nos resultados obtidos.

***c) Em relação a medidas para controle da erosão***

É importante que os municípios criem um mapeamento das áreas de risco com as mais variadas formas de erosão existentes e implantem um planejamento para que essas áreas não sejam ocupadas de forma desordenada.

Também é essencial que se gerem programas de recuperação para essas áreas, utilizando preferencialmente técnicas que ofereçam a melhor relação custo-benefício, garantindo resultados efetivos.

O uso da tecnologia da bioengenharia, acompanhado da implantação de medidas mitigadoras e corretivas através de sistemas de drenagens, estabilização dos taludes, preparo do solo e recomposição da camada vegetal, entre outras, são essenciais para que o solo venha a se recuperar.

Entende-se que a erosão tende a prejudicar a qualidade de vida do homem, animais e plantas, além de causar problemas culturais, econômicos, sociais e ambientais.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.W., CHAVES, I. B.; VASQUES FILHO, J. Características físicas da chuva correlacionadas com as perdas de solo num regolito eutrófico de Caruaru (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 279-283, 1994.

ALCÂNTARA M. A. T. **Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos. São Carlos/SP**. 1997. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Carlos, São Carlos, 1997.

ANGULO, R. F.; ELLIOT, W. J. DECHEN, S. C. F. Erosion prediction for Brazil with the WEPP model. **St. Joseph, MI, American Society of Agricultural Engineers** - Paper N 908514 - an ASAE Meeting presentation, 1990.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; e ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), nº 1, ano 7, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508, **Norma: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: 1984. 8 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9604, **Norma: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas**. Rio de Janeiro: 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180, **Norma: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: 1988. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181, **Norma: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: 1988. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13292, **Norma: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro: 1995. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545, **Norma: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro: 2000. 12 p.

AZEVEDO A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Águas subterrâneas. Geologia de Engenharia**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). São Paulo: ABGE, 1998. p. 111-130.

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

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, Livroceres, 1990. 392 p.

BERTONI J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 3.ed. São Paulo: Ícone Editora, 1993.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F.; BENATTI JR. R. **Equação de perdas de solo**. Campinas-SP: Instituto Agrônomo, 1975. 25 p.

BIGARELLA, J. J. **Visão integrada da problemática da erosão**. Curitiba: Associação de Defesa e Educação Ambiental e Associação Brasileira de Engenharia, 1985. 329 p.

BOARDMAN, J. Soil erosion, climatic vagary and agricultural change on the hydraulic on the South Downs Around Lewes and Brighton. **Applied Geography**, p. 243-258, 1985.

CHAVES, H. M. L. **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Brasília-DF, Universidade de Brasília-DF, 1992. p. 207-220.

CHAVES, H. M. L. **Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do Rio São Francisco**. Brasília: FAO TCP/BRA/2257,1994. 34 p. (Relatório Final de Consultoria).

ELLISON, W. D. Studies of raindrop impact and erosion. **Agriculture Engineering**, v. 25, p. 131-136, 181-182, 1994.

ELLISON, W. D. **Soil erosion studies**. Part I. Agriculture Engineering, St. Joseph, 1947.

ELTZ, F. L. F.; MEHL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a quatro padrões de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 485-493, 2001.

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

FAO. Conventional ploughing erodes the soil – zero-tillage is an environmentally-friendly alternative. INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSERVATION AGRICULTURE. Madrid, October, 2001. p. 1-5.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIA, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4.ed., Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 1997. 486 p.

FOSTER, G. R.; McCOLL, D. K.; RENARD, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, n. 6, p. 355-359, 1981.

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

GUERRA, A. J. T. et al. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro-RJ: Ed. Bertrand Brasil, 2001.

GRAY D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization - A practical guide for erosion control**. New York: Wiley, 1996. 377 p.

INDERBITZEN, A. L. An erosion test for soils. **Materials Research & Standards**, Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, 1961.

KUNTSCHIK, G. **Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo na Microbacia do Ribeirão das Araras, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1996. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INEP, São José dos Campos/SP, 1996.

LIMA, M. C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas**. 336 f. Dissertação (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

LOPES, P. R. C.; BRITO, L. T. L. Erosividade da chuva no Médio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 129-133, 1993.

MAGALHÃES, R. A. Erosão: definições, tipos e formas de controle. SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 7., 2001, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/ GO, 2001. 11 p.

MEIRELES, J. M. F. Erosão de taludes de estradas. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE ENGENHARIA CIVIL, 2., 1967, Rio de Janeiro/RJ – São Paulo-SP. **Anais...** Rio de Janeiro/RJ – São Paulo-SP, 1967. p. 204-211.

MENDES, C. A. R. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pouso no município de Bom Jardim – RJ.** 2006. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MENEZES, S. M.; CARVALHO, D.; ALBUQUERQUE, P. J. R. Estudo da erodibilidade de solos em encostas no sudeste do Brasil. **Rev. Tecn.**, Fortaleza, v. 27, n. 1, p. 58-63, junho, 2006.

NACINOVIC, M. G. G, **Estudo de erosão pela análise de sucção e escoamento superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis, RJ).** 167 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

PAIVA, C. F. E. **Avaliação da erodibilidade de alguns horizontes residuais pertencentes a Bacia do Rio Una-Taubaté - SP.** 2004. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Rio de Janeiro, 2004.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.

PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.** 2.ed. Viçosa: Ed UFV, 2009. 279 p.

RAMIDAN, M. A. S. **Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara – GO.** 2003. 229 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.

RENARD K. G.; FOSTER, G. R.; YODER, D. C.; Mc.COOL, E.; RUSSELL, D. K. Revised: status, questions, answer, and the future. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 49, n. 3, p. 213-220, 1994.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. P. RUSLE Revised universal soil loss equation.: **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 30-33. 1991.

SANTOS, C. A. **Comportamento hidrológico superficial, subsuperficial e a erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto - Minas Gerais.** 2001. 107 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2001.

SANTOS, M. P.; CASTRO, E. Estudo sobre erosão em taludes de estradas, **2º Jornal Luso Brasileiro Engenharia Civil.** Rio de Janeiro, São Paulo, 1967.

SILVA M. L. N.; FREITAS, P. L.; BLANCANEUX, P.; CURI, N. **Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia**. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia, SP: Anais.... Águas de Lindóia, SP, 1997.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251-259, 2004.

STAICO. J. **A Bacia do Rio Paraibuna em Juiz de Fora**. Juiz de Fora, MG: Universidade Federal de Juiz de Fora, 1977.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis**. 2.ed. São Paulo: Navegar Editora, 2003. 180 p.

TUCCI C. E. M. **Hidrologia** – ciência e aplicação. 2.ed. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade: ABRH, UFRGS, 1997. 943 p.

Universidade Federal de Juiz de Fora, Centro de Pesquisas sociais. Anuário Estatístico de Juiz de Fora - Ano base 2008. Juiz de Fora-MG, 2009.

WISCHMEIER W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 33, n. 1, p. 131-137, jan./feb., 1969.

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

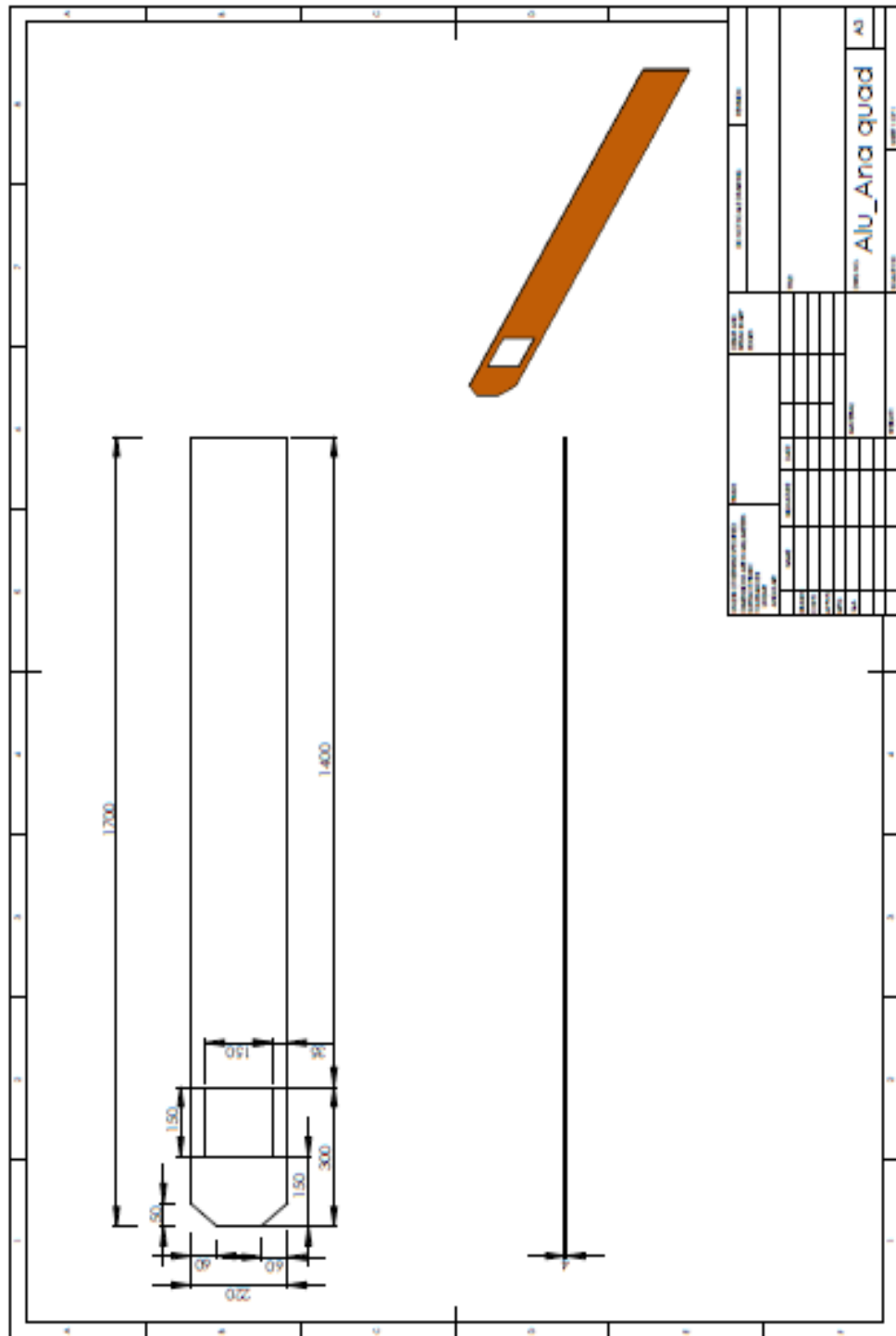
WISCHMEIER W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Trans. Amer. Geophys. Un.**, Washington, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER W. H., JOHNSON, C. B. e CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.5, n.5, p.189-193. 1971.

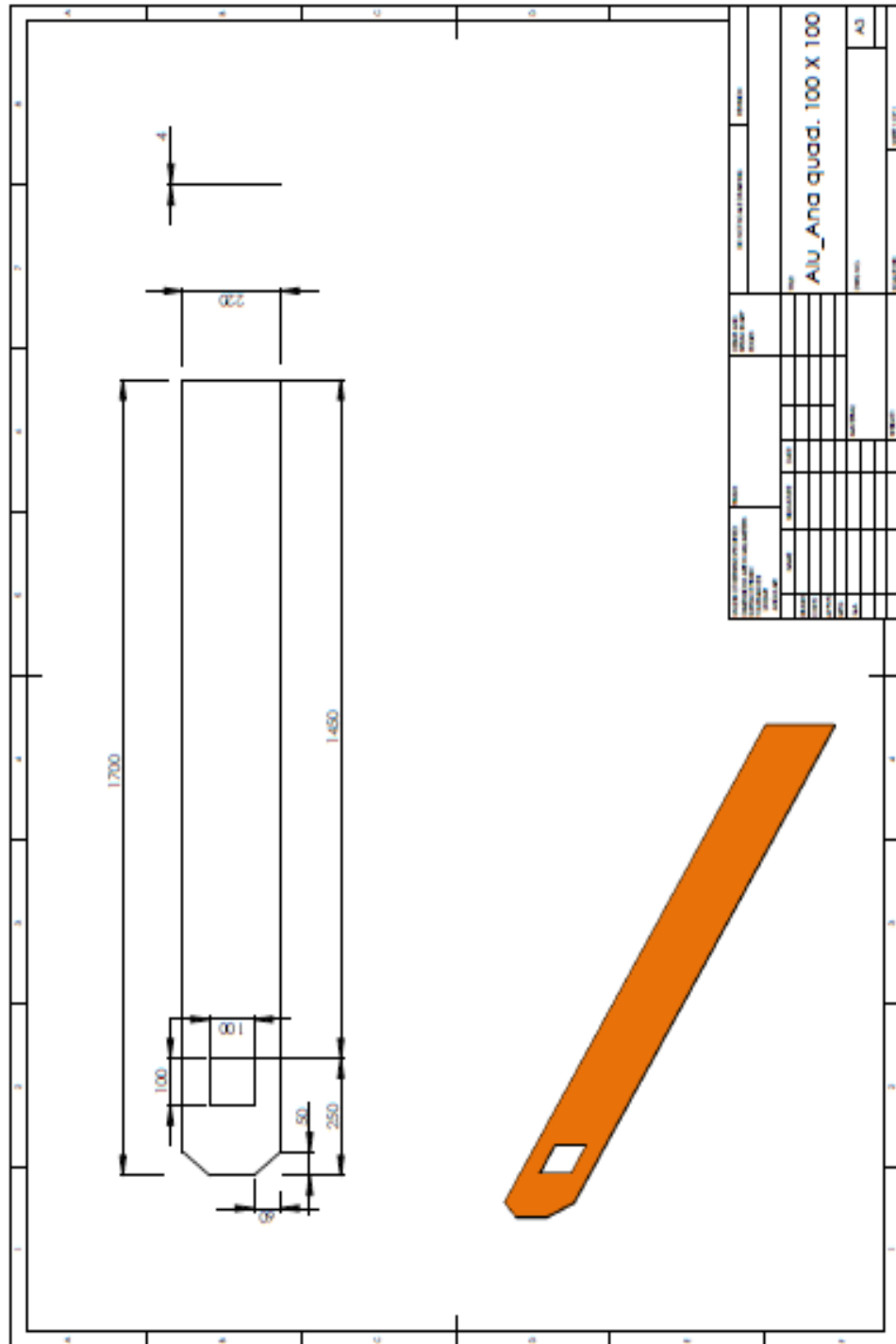
WISCHMEIER, W. H. Cropping-management factor evaluations for a universal soil loss equation. **Soil Sci. Amer. Proc.**, Madison, p. 322-326, 1960.



Rampa Quadrada - Lado = 150,0 mm



Rampa Quadrada - Lado = 100,0 mm



## ANEXO 2

### ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

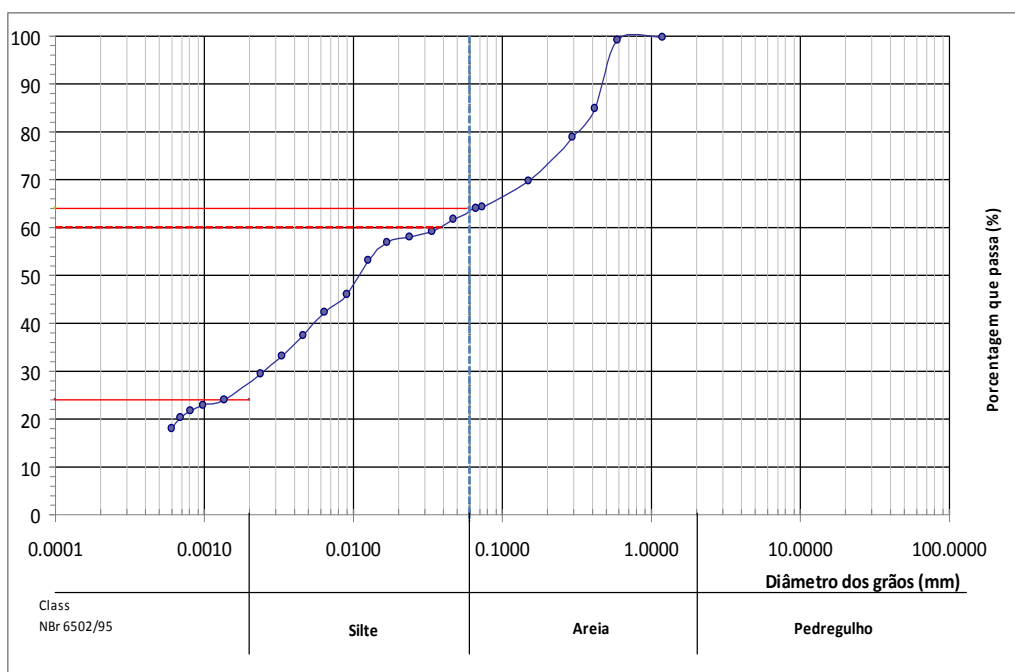


Figura A.1 - Curva granulométrica – “Morro do Alemão”.

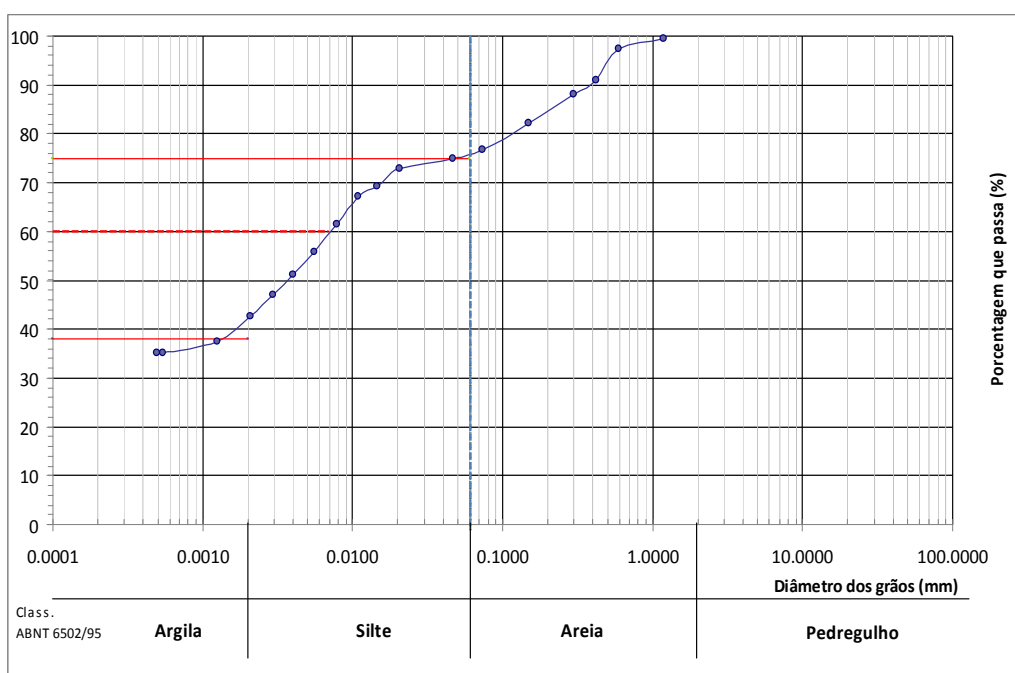


Figura A.2 - Curva granulométrica – Bairro Jardim Caiças.

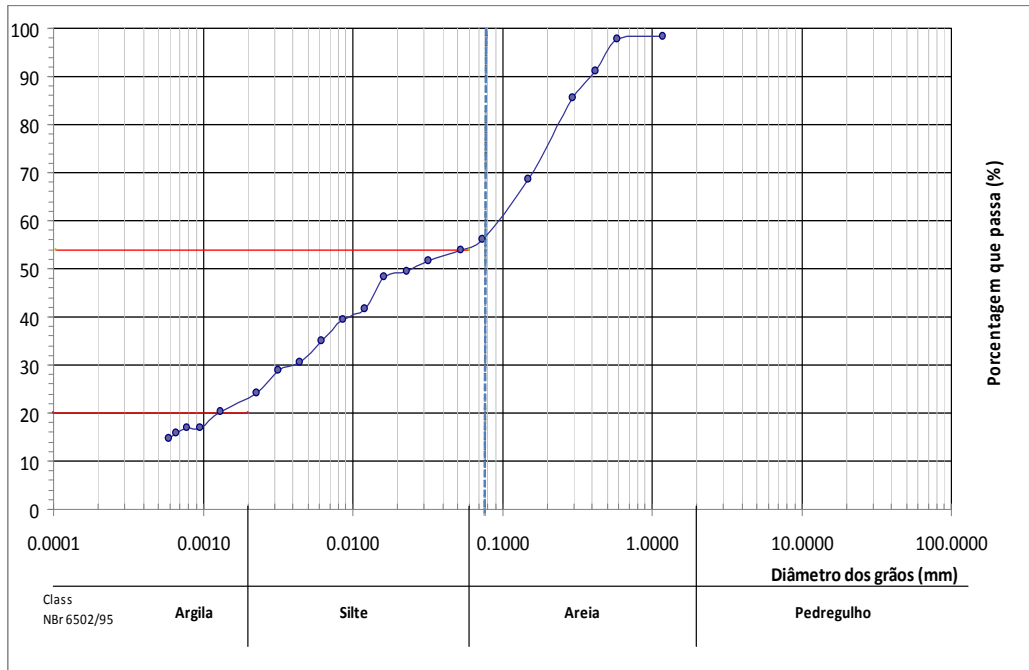


Figura A.3 - Curva granulométrica – Bairro Bom Jardim.

### ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

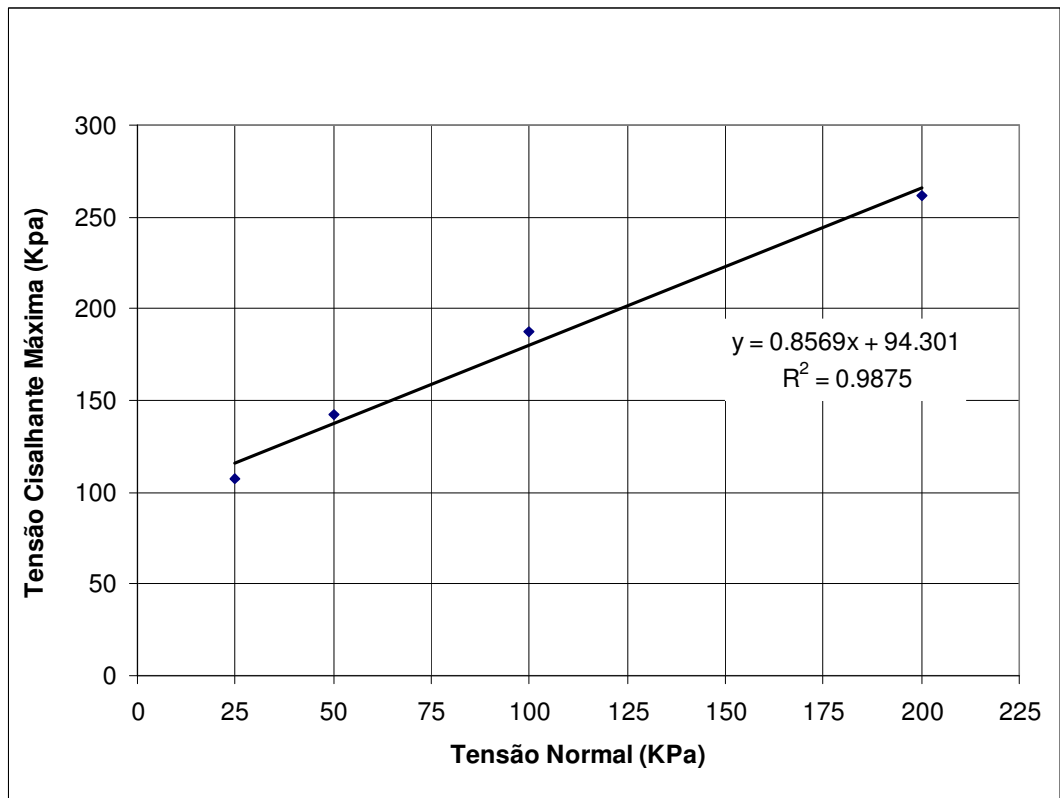
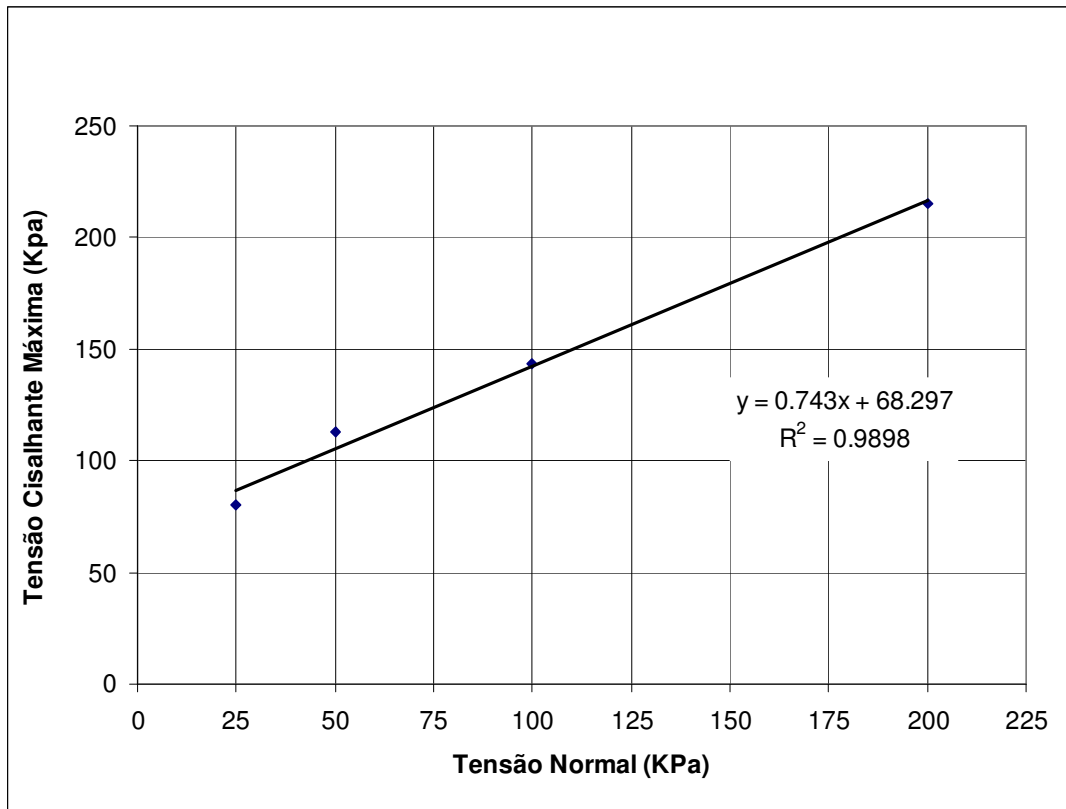
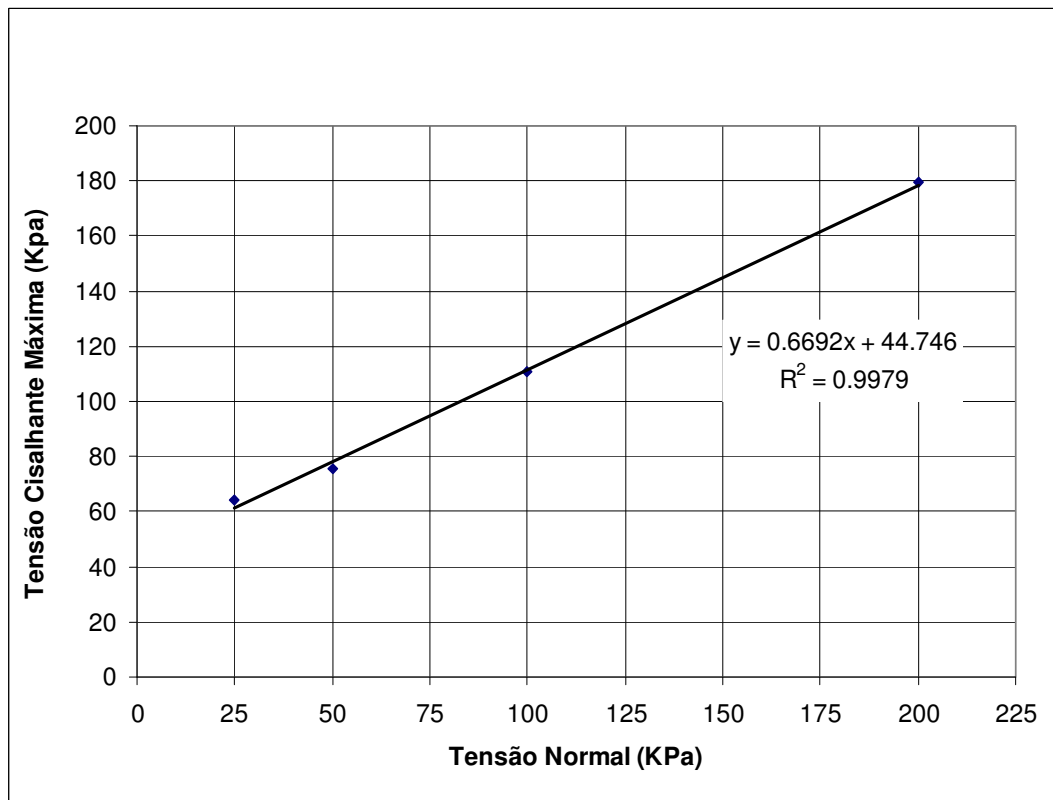


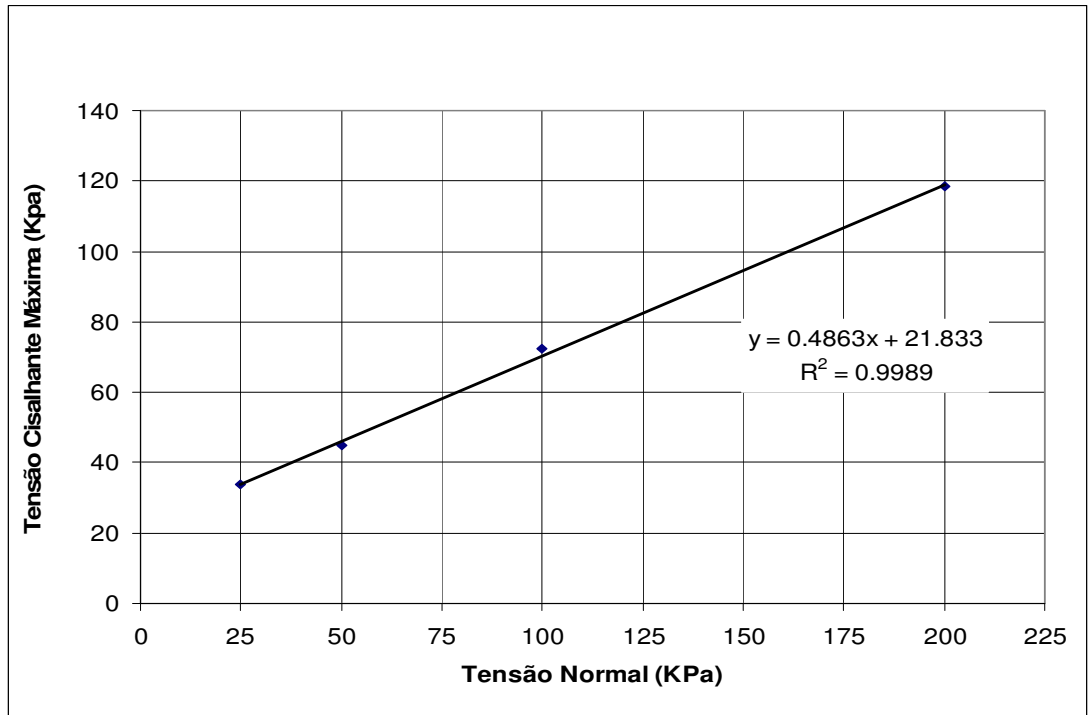
Figura A.4 - Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra natural. “Morro do Alemão”.



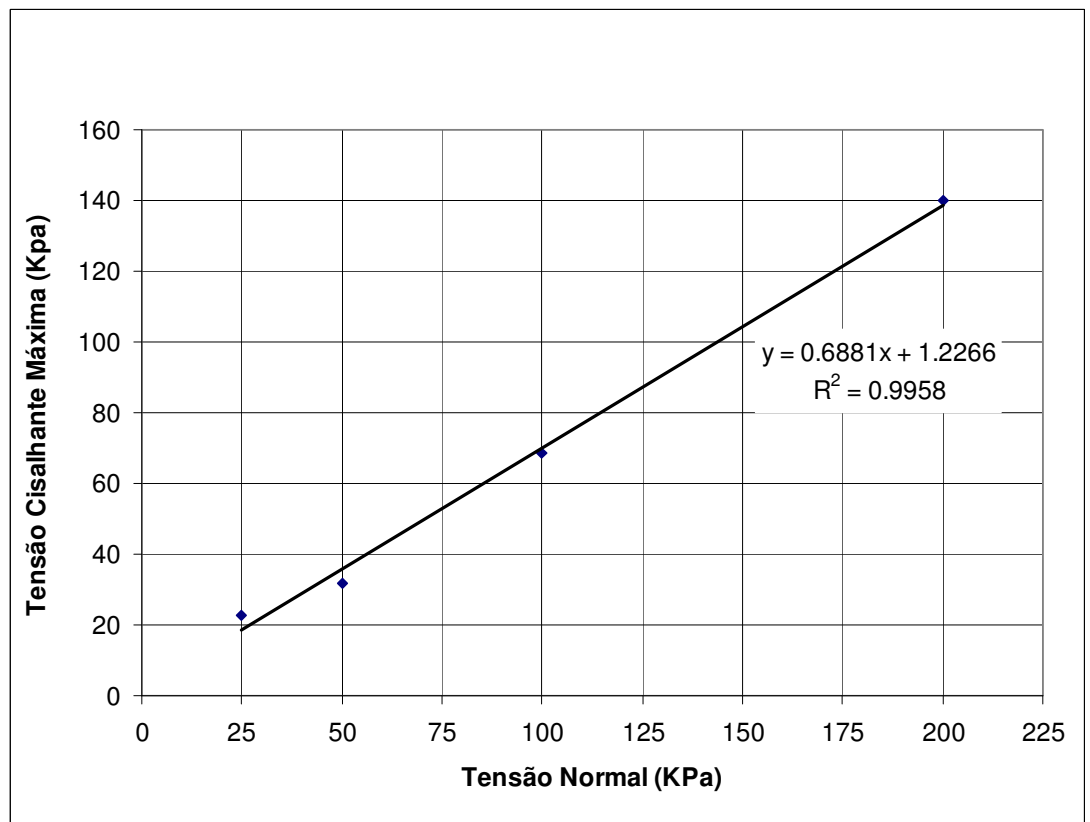
**Figura A.5** - Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra natural. Bairro Jardim Caiçaras.



**Figura A.6** - Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra natural. Bairro Bom Jardim.



**Figura A.7** - Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra inundada. “Morro do Alemão”.



**Figura A.8** - Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra inundada. Bairro Jardim Caiçaras.

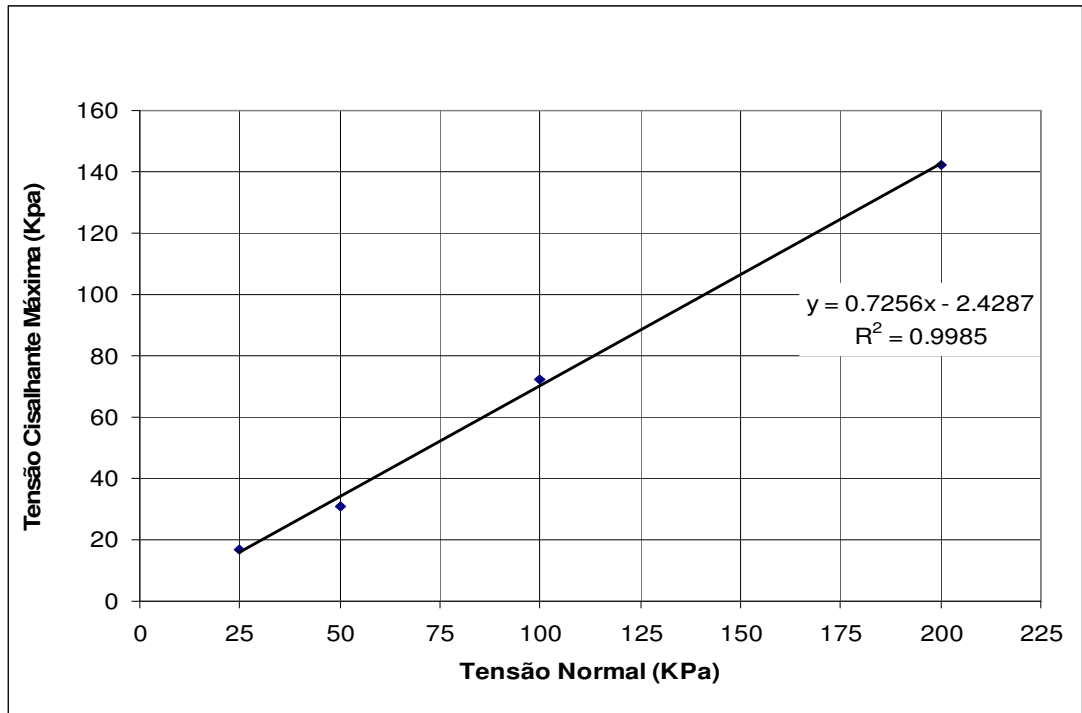


Figura A.9 - Tensão normal ( $\sigma$ ) x tensão cisalhante ( $\tau$ ) – amostra inundada. Bairro Bom Jardim.

## ENSAIOS DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

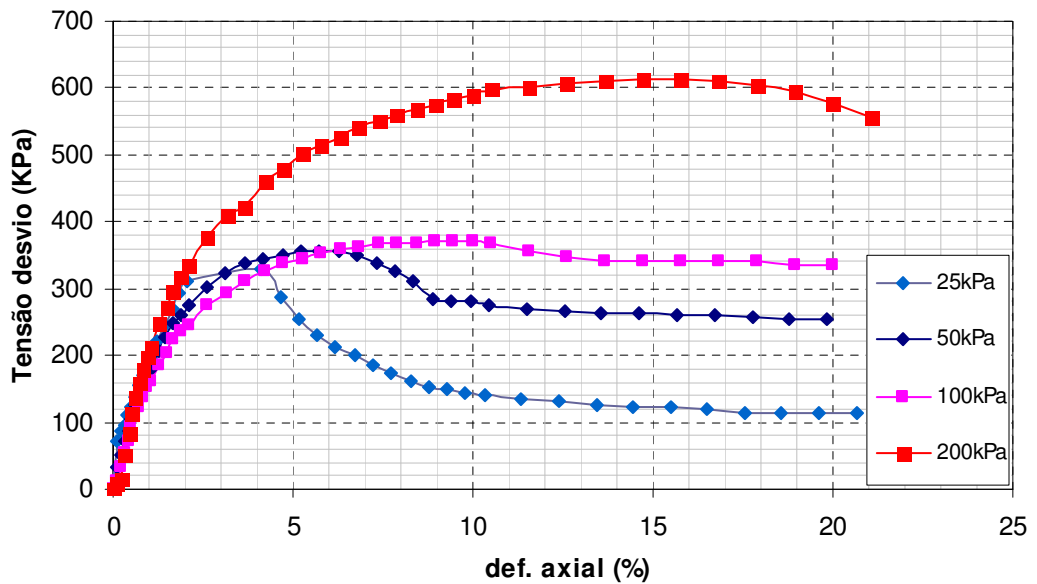


Figura A.10 - Curvas ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) x  $\epsilon$ , solo do "Morro do Alemão". Ensaio CID<sub>Nat</sub>.

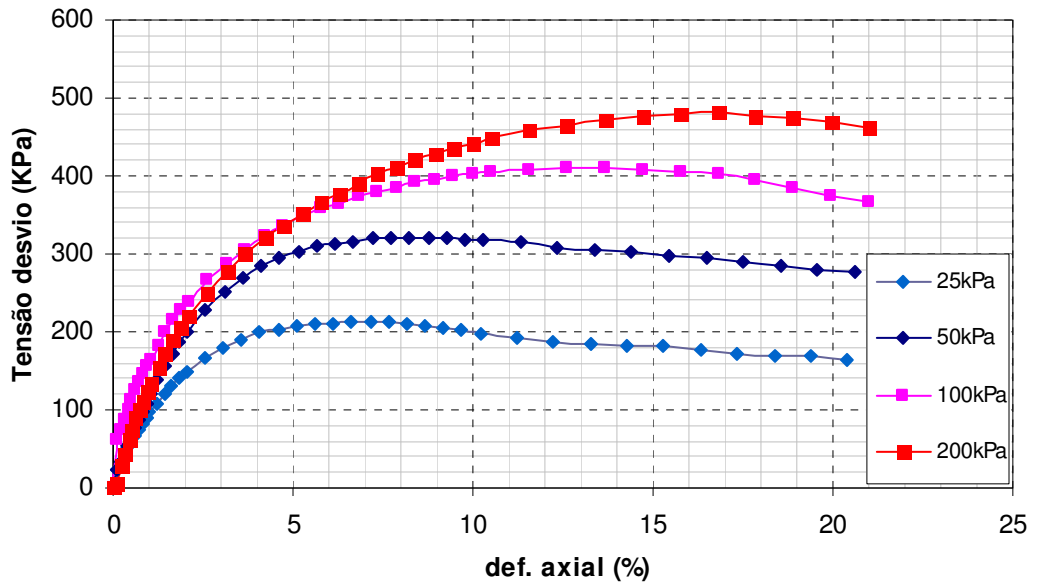


Figura A.11 - Curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon$ , solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CID<sub>Nat.</sub>

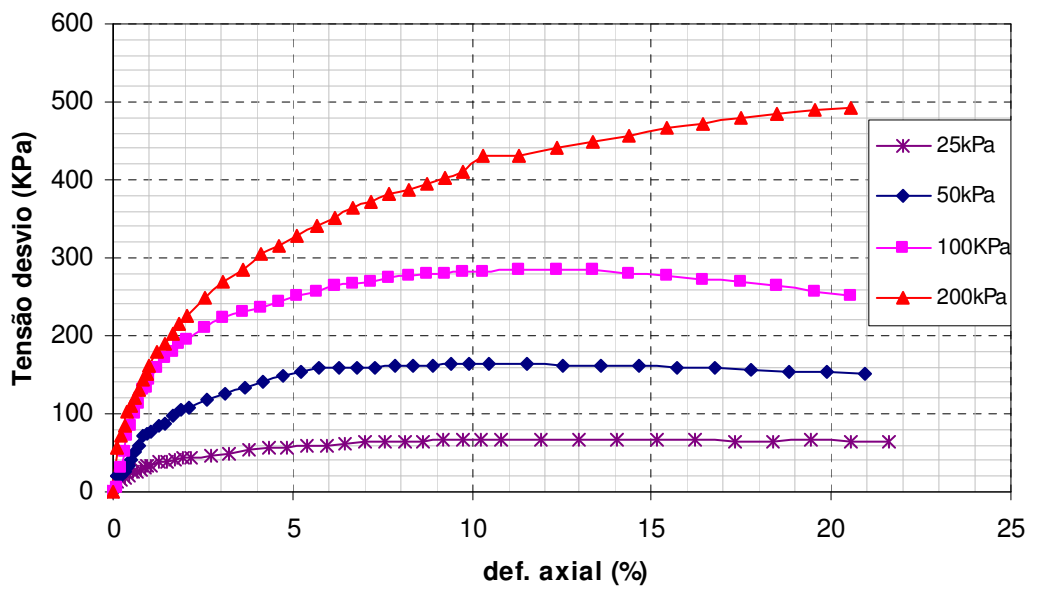
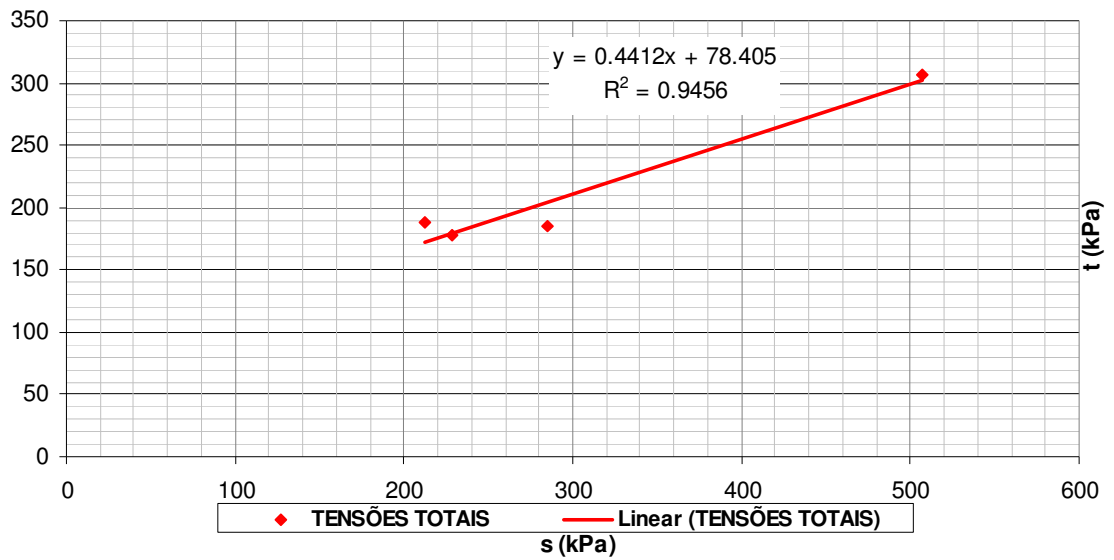
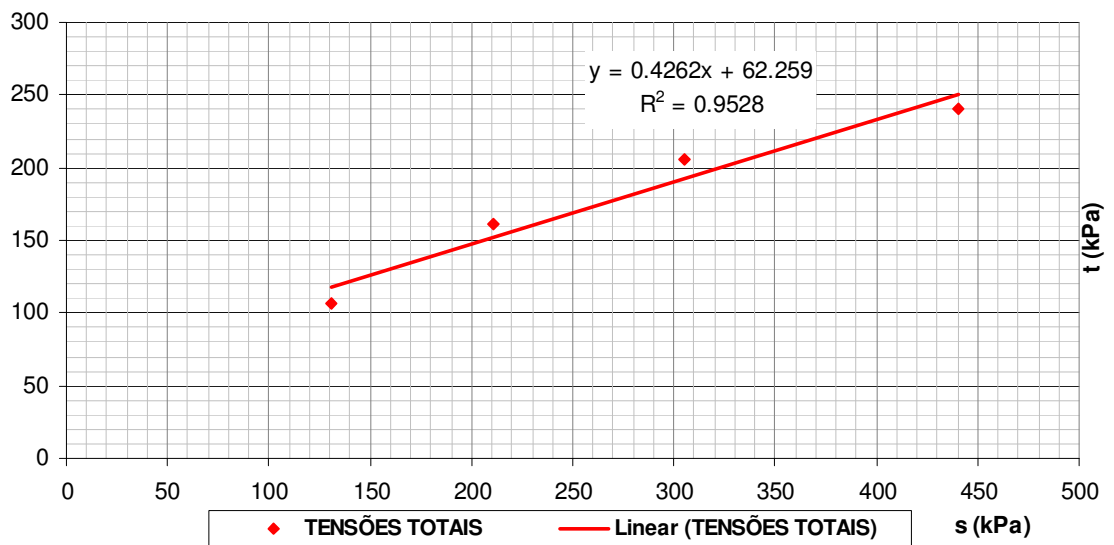


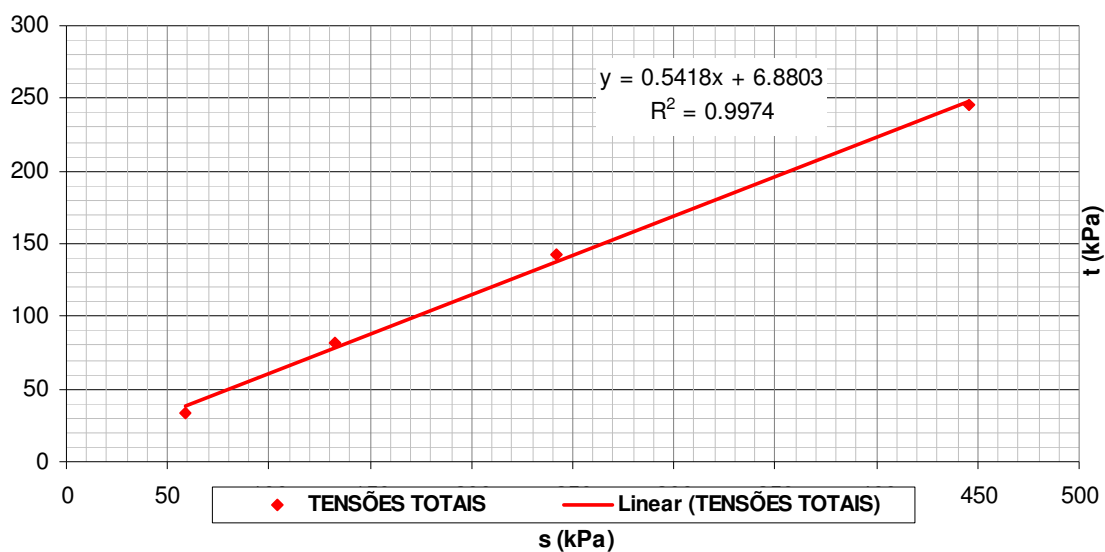
Figura A.12 - Curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon$ , solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CID<sub>Nat.</sub>



**Figura A.13** - Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CID<sub>Nat</sub>.



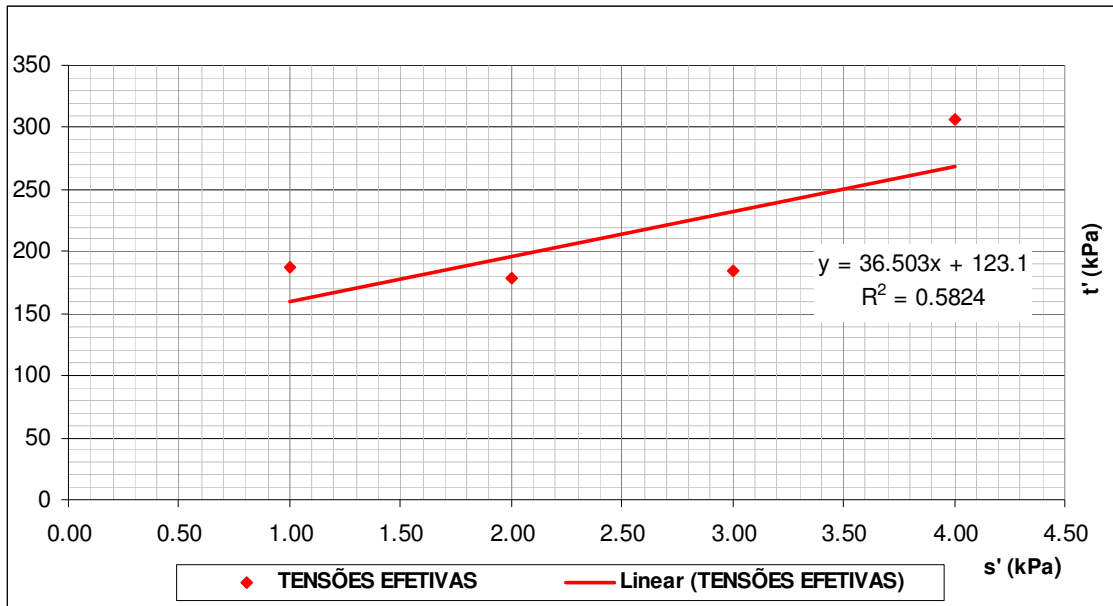
**Figura A.14** - Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CID<sub>Nat</sub>.



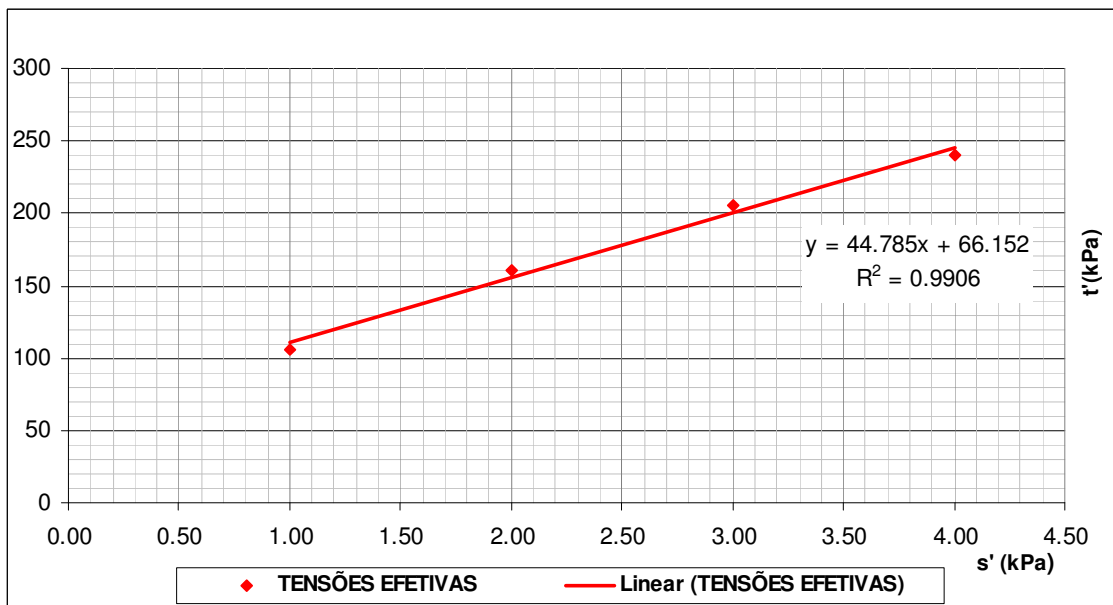
**Figura A.15** - Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CID<sub>Nat</sub>.

**Tabela A.1** -Tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CID<sub>Nat</sub>.

Procedência da Amostra	Tensões							
	$\sigma = 25 \text{ kPa}$		$\sigma = 50 \text{ kPa}$		$\sigma = 100 \text{ kPa}$		$\sigma = 200 \text{ kPa}$	
	s	t	s	t	s	t	s	t
	(kPa)							
Morro do Alemão	189,00	164,00	228,00	178,00	285,00	185,00	507,00	307,00
Jardim Caiçaras	131,00	106,00	211,00	161,00	305,00	205,00	440,00	240,00
Bom Jardim	58,00	33,00	132,00	82,00	242,00	142,00	446,00	246,00



**Figura A.16** - Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CID<sub>Nat</sub>.



**Figura A.17** - Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CID<sub>Nat</sub>.

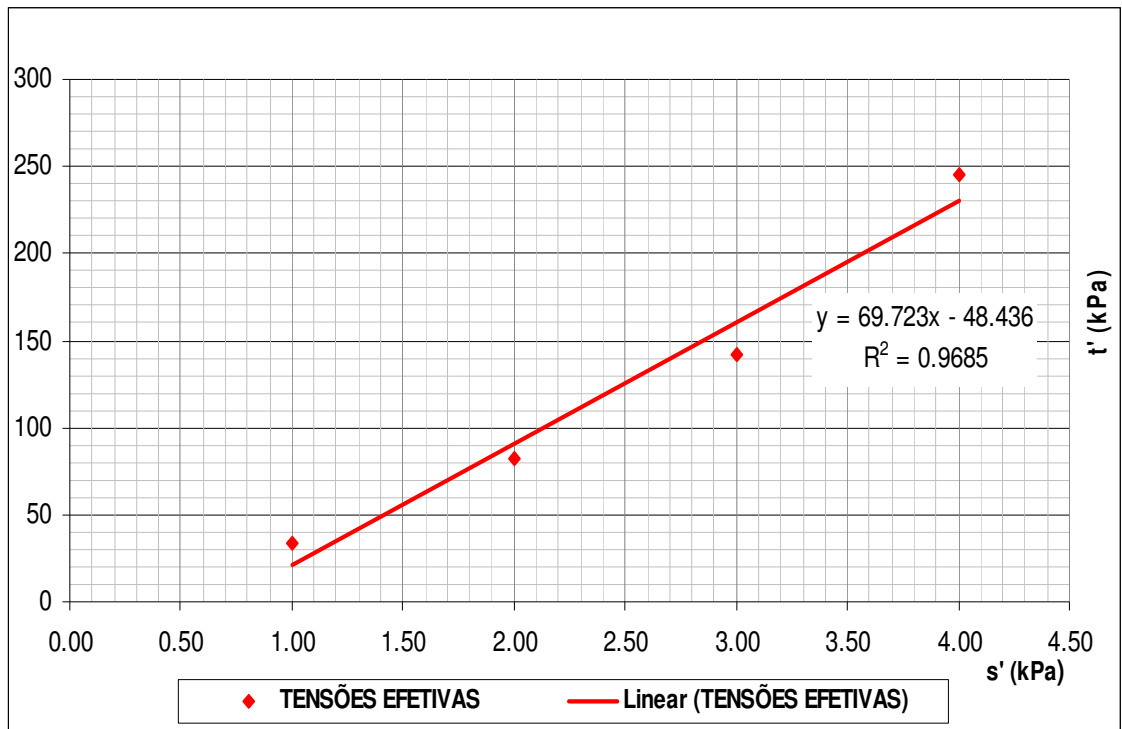


Figura A.18 - Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CID<sub>Nat</sub>.

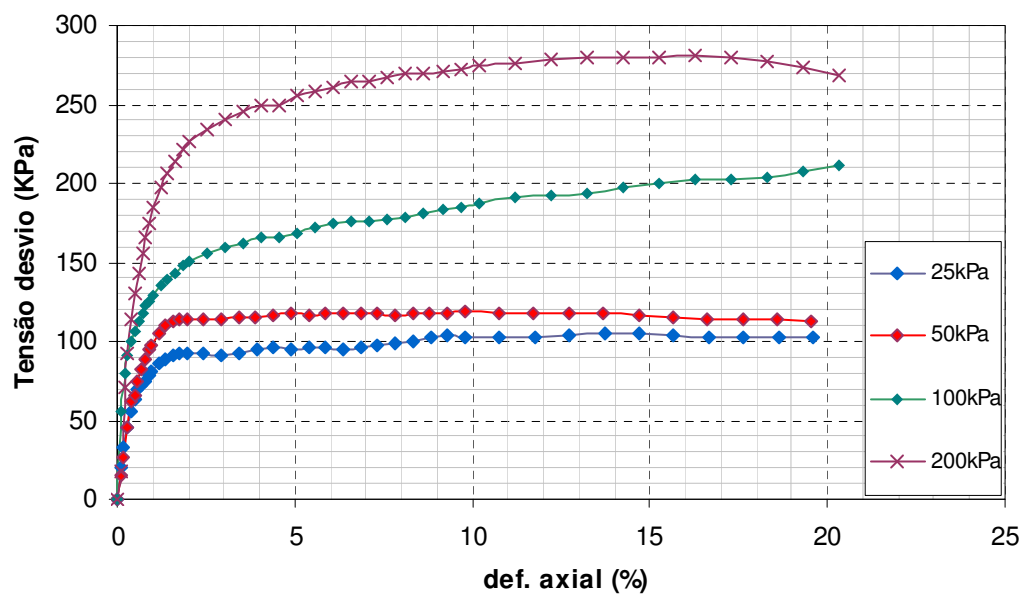


Figura A.19 - Curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \epsilon$ , solo do "Morro do Alemão". Ensaio CIU<sub>Sat</sub>.

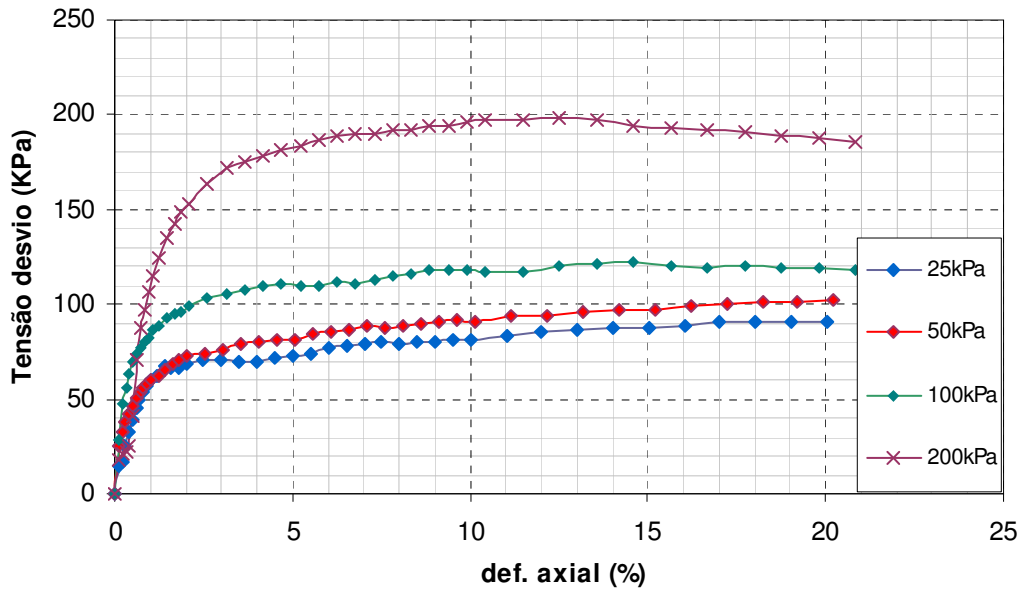


Figura A.20 - Curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon$ , solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CIU Sat.

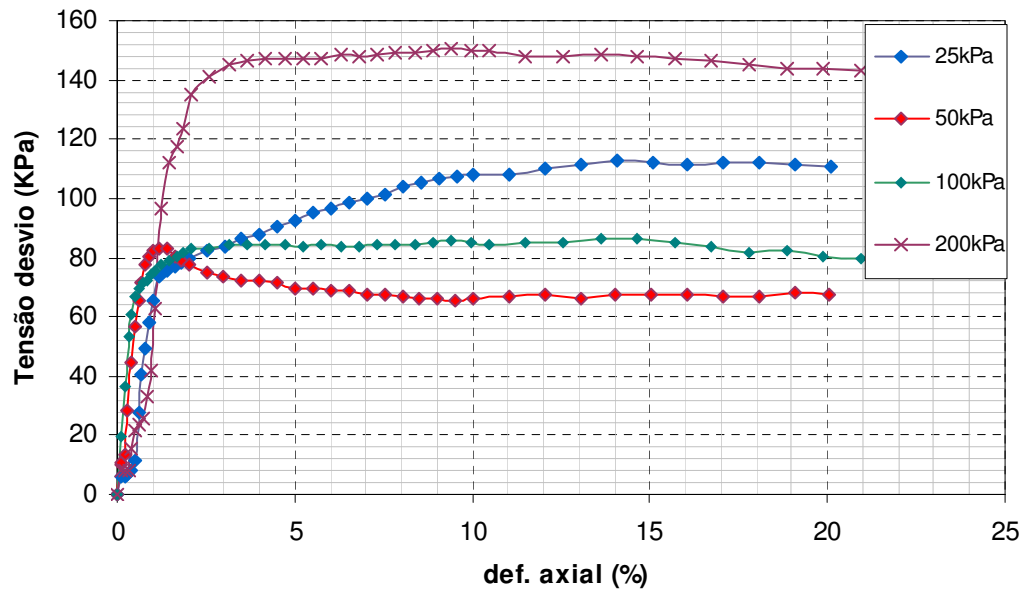


Figura A.21 - Curvas  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \varepsilon$ , solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CIU Sat.

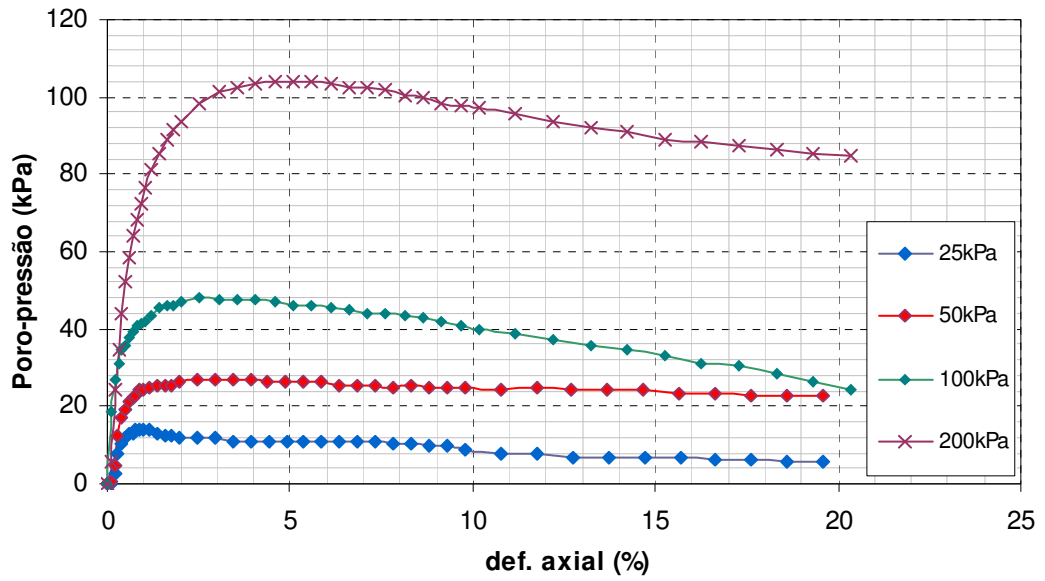


Figura A.22 - Curvas  $\nu \times \varepsilon$ , solo do “Morro do Alemão”. Ensaio. CIU  $\text{Sat}$ .

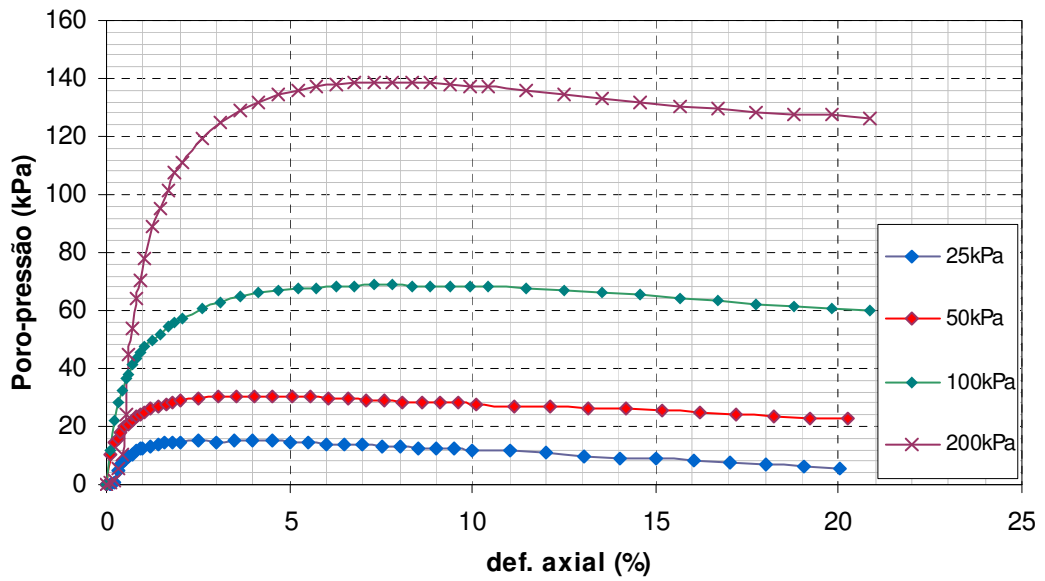


Figura A.23 - Curvas  $\nu \times \varepsilon$ , solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio. CIU  $\text{Sat}$ .

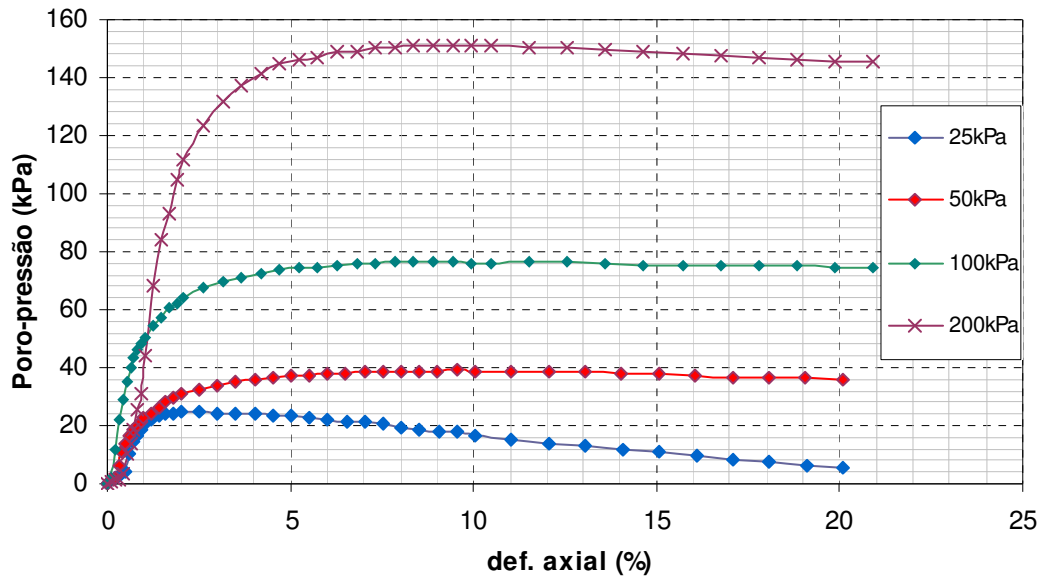


Figura A.24 - Curvas  $\nu \times \varepsilon$ , solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio. CIU<sub>Sat</sub>.

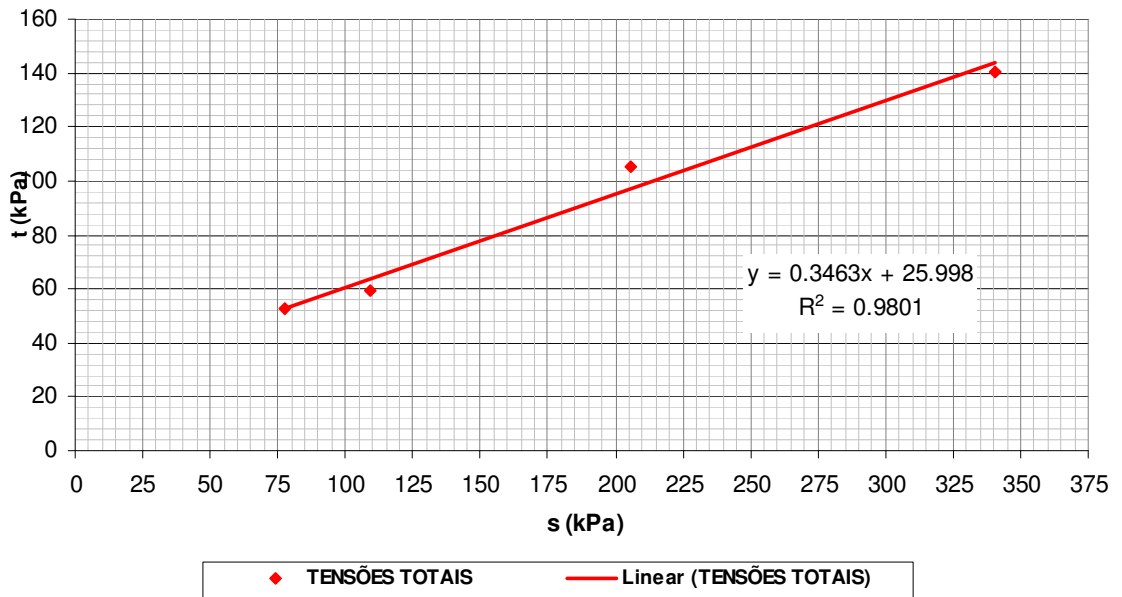
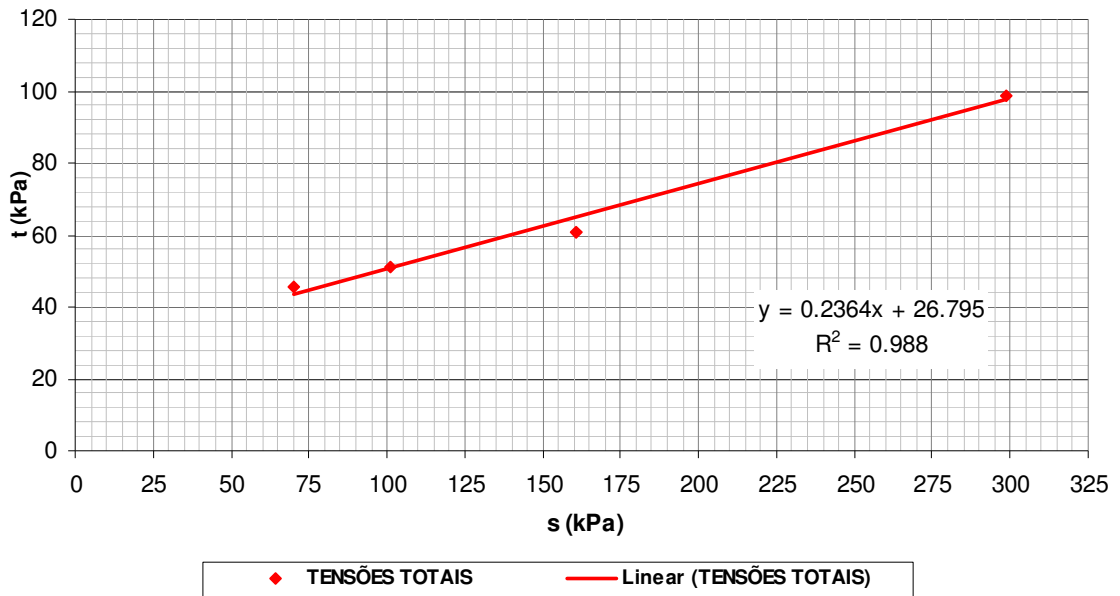
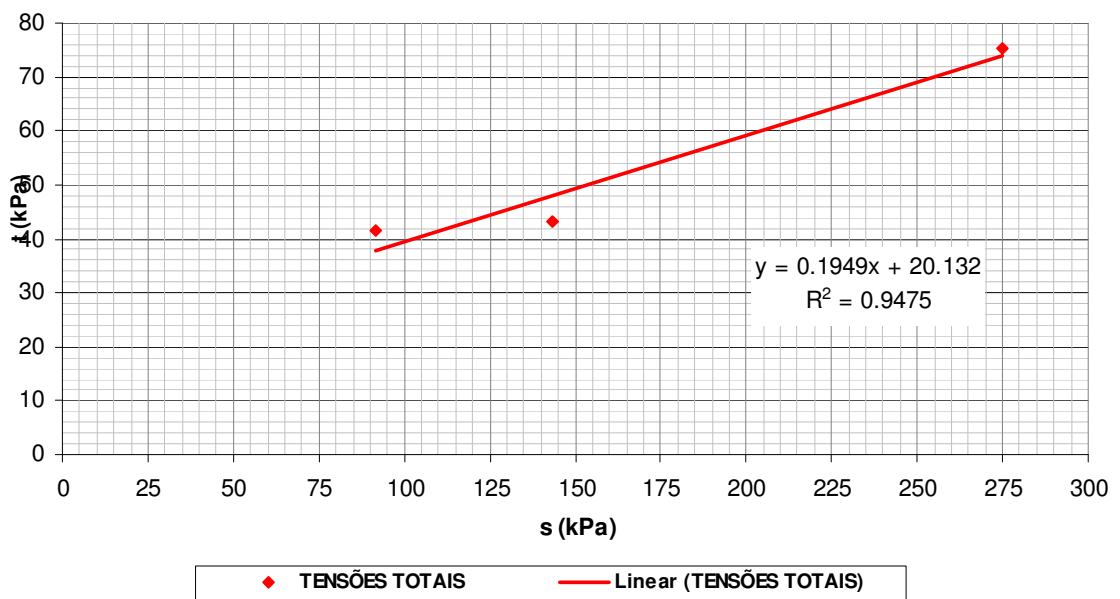


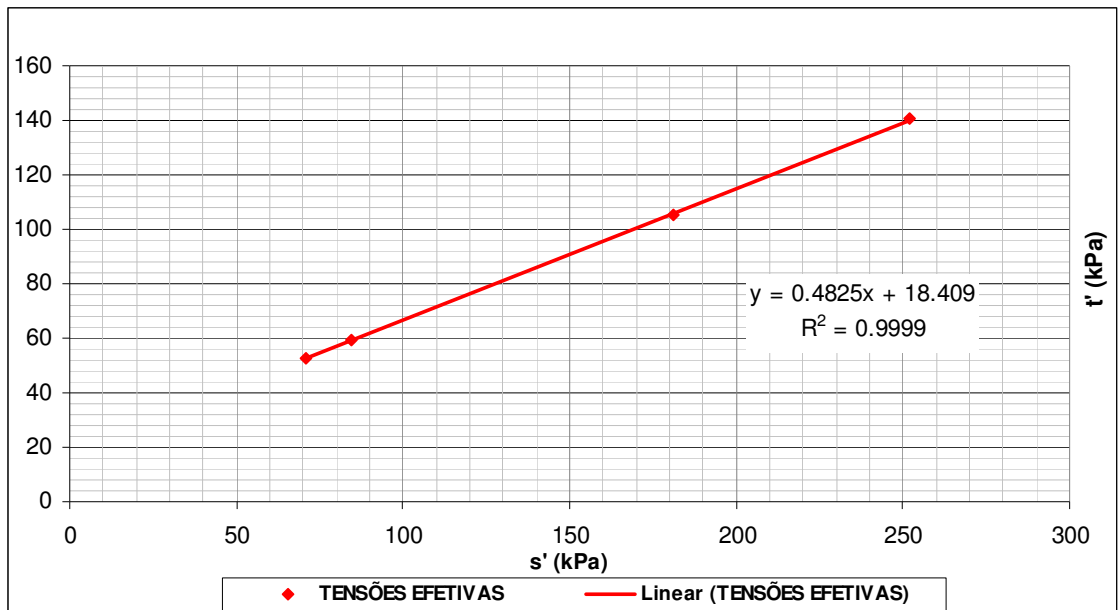
Figura A.25 - Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do "Morro do Alemão". Ensaio CIU<sub>Sat</sub>.



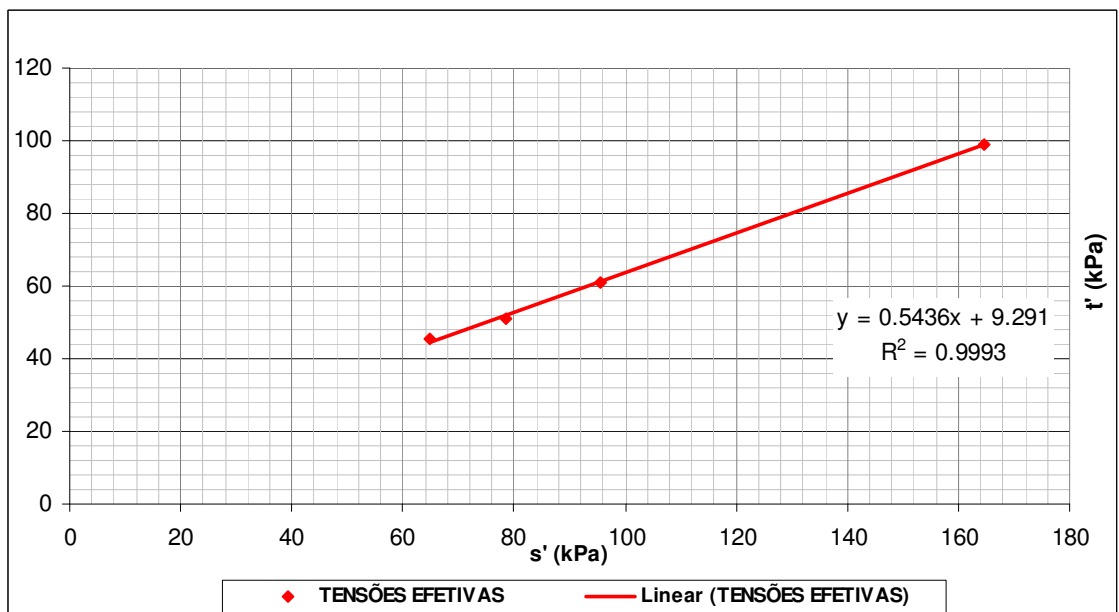
**Figura A.26** - Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio  $CIU_{Sat}$ .



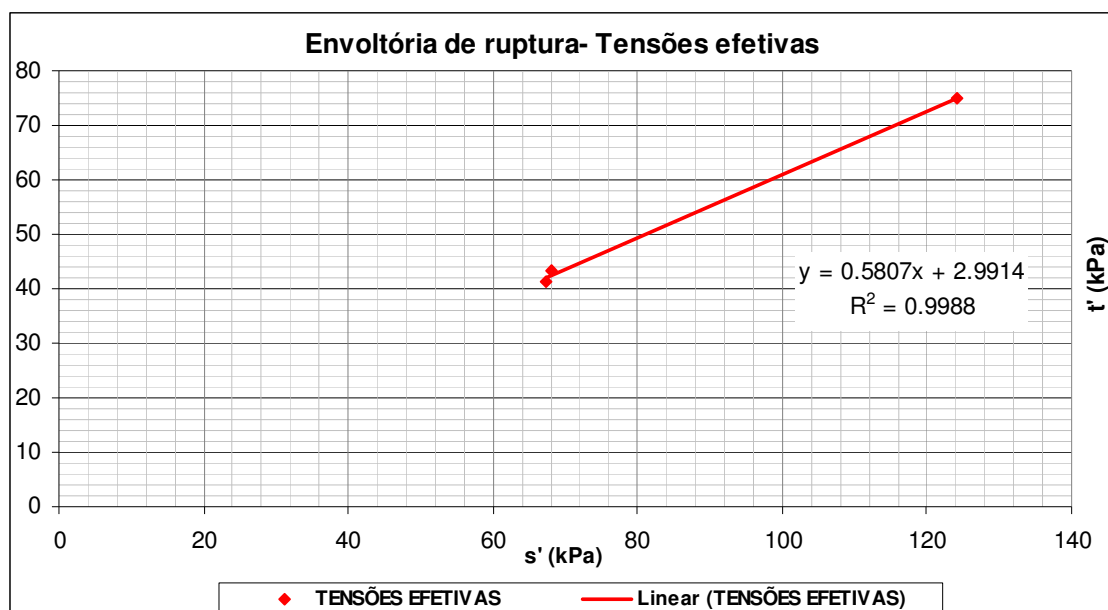
**Figura A.27** - Envoltória de ruptura - tensões totais, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio  $CIU_{Sat}$ .



**Figura A.28** - Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do “Morro do Alemão”. Ensaio CIU<sub>Sat</sub>.



**Figura A.29** - Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Jardim Caiçaras. Ensaio CIU<sub>Sat</sub>.



**Figura A.30** - Envoltória de ruptura - tensões efetivas, solo do Bairro Bom Jardim. Ensaio CIU  $\sigma'_{sat}$ .

**Tabela A.2** - Tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CIU, para  $\sigma' = 25$  kPa e  $\sigma' = 50$  kPa

Procedência da Amostra	Tensões					
	$\sigma' = 25$ kPa			$\sigma' = 50$ kPa		
	s	t	s'	s	t	s'
	(kPa)					
Morro do Alemão	78,00	53,00	71,00	109,00	59,00	84,00
Jardim Caiçaras	70,00	45,00	65,00	101,00	51,00	78,00
Bom Jardim	62,00	37,00	40,00	91,00	41,00	67,00

**Tabela A.3** - Tensões na ruptura obtidas nos ensaios triaxiais CIU, para  $\sigma' = 100$  kPa e  $\sigma' = 200$  kPa

Procedência da Amostra	Tensões					
	$\sigma' = 100$ kPa			$\sigma' = 200$ kPa		
	s	t	s'	s	t	s'
	(kPa)					
Morro do Alemão	205,00	105,00	181,00	340,00	140,00	252,00
Jardim Caiçaras	161,00	61,00	96,00	299,00	99,00	165,00
Bom Jardim	143,00	43,00	68,00	275,00	75,00	125,00