

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE
ERODIBILIDADE DE SOLOS NAS MARGENS DE
CURSOS DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO TRECHO
DE VAZÃO REDUZIDA CAPIM BRANCO I
ARAGUARI MINAS GERAIS

Indira Gandi Villalobos Chuquipiondo

Belo Horizonte

2007

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE
ERODIBILIDADE DE SOLOS NAS MARGENS DE
CURSOS DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO TRECHO
DE VAZÃO REDUZIDA CAPIM BRANCO I
ARAGUARI MINAS GERAIS**

Indira Gandi Villalobos Chuquipiondo

Indira Gandhi Villalobos Chuquiopondo

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE
ERODIBILIDADE DE SOLOS NAS MARGENS DE
CURSOS DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO TRECHO
DE VAZÃO REDUZIDA CAPIM BRANCO I
ARAGUARI MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Avaliação de Impactos e Riscos Ambientais

Orientador: Professor Lúcio Flávio Souza Villar

Co-Orientador: Professora Judy Norka Rodo de Mantilla

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2007

Página com as assinaturas dos membros da banca examinadora, fornecida pelo Colegiado do Programa

Senhor Jesus, ensina-nos a caminhar sobre os conflitos da vida. Que sua Palavra seja nossa coragem e força. Que seu exemplo seja nosso melhor caminho. Amém. (Jo 6,19-20)

A os meus pais Segundo e Clara,
A meu querido esposo e filhos Juan Pablo,
Ana Ruby. Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por guiar os meus caminhos, a força e pela ajuda constante. Obrigada meu DEUS!

Ao Prof. Dr. Lúcio Flávio de Souza Villar e à Profa. Dra. Judy Norka de Mantilla, meu orientador e co-orientadora pela atenção, orientação, compreensão e apoio no desenvolvimento desta pesquisa. A eles agradeço profundamente por toda a sua colaboração.

À Profa. Dra. Mônica Maria Diniz Leão e ao Prof. Dr. Gilberto Caldeira Bandeira de Melo, pela colaboração de ter a oportunidade de fazer o curso de Mestrado nesta prestigiosa Universidade.

À Fundação de Pesquisas FUNDEP pelo apoio econômico para a culminação da pesquisa

Aos meus colegas de trabalho: Andréa, Fábio e Tatiana, pelo apoio para a culminação deste trabalho.

Aos professores, colegas e funcionários do DESA – DETG, pelo seu apoio, colaboração e incentivo.

Em fim, a todos, mim muito obrigada por tudo.

RESUMO

O presente trabalho é uma proposta de avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade através de diferentes métodos dentro dos quais temos ensaios de avaliação da erodibilidade em forma indireta e ensaios de avaliação da erodibilidade em forma direta. Além da estimativa da perda de solo através da Equação Universal de Perda do solo (EUPS) e a Equação Universal de Perda do solo Modificado (MUSLE). O trabalho experimental foi desenvolvido na margem direita do trecho de vazão reduzida Capim Branco I (TVR-CBI); Araguari no Estado de Minas Gerais; Brasil.

Na comparação da estimativa de perda de solo calculada em base na concentração média diária da sub-bacia incremental com os resultados obtidos através dos modelos matemáticos EUPS, MUSLE, verificou-se que existe uma diferença muito considerável já que a perda de solo estimada através de EUPS foi 13 vezes maior e o resultado da MUSLE foi de 6 vezes. Acredita-se que se deva pelo fato que na estimativa da perda de solo através dos modelos matemáticos ante a dificuldade para obter dados de intensidade pluviométrica da área em estudo utilizamos na estimativa dos parâmetros R e R_w valores propostos na literatura.

Dentro da caracterização física e mecânica do solo em estudo, a granulometria mostrou que o solo é uma areia fina (P2) e areia média a fina (P3), ambas com finos (33% e 20%). Por um lado, a areia não é uniforme, o que reduz sua erodibilidade, por outro os finos são pouco plásticos e não estruturados, o que aumenta a susceptibilidade a processos de erosão. Agora os demais ensaios confirmaram a característica arenosa e não estruturada do solo. Vários ensaios dentre de eles o ensaio MCT mostraram que a erodibilidade deste solo esta diretamente relacionada ao seu grau de saturação inicial. Quanto maior a saturação inicial maior a susceptibilidade. Parece que sempre permanece uma grande quantidade de ar, mesmo depois da entrada de água. Os ensaios de avaliação da erodibilidade em forma direta mostram uma baixa erodibilidade, este fato deve estar associado à presença de matéria orgânica na amostra e à forma de execução do ensaio Inderbitzen, já que neste trabalho o ensaio Inderbitzen foi utilizado para simular o efeito do escoamento laminar, não se analisou o impacto das gotas de chuva, que segundo a literatura, tem um efeito ainda maior em solos desprotegidos.

Finalmente estimou-se o assoreamento no fundo da calha do rio Araguari produzida pela erodibilidade da área do estudo.

ABSTRACT

The present work is a proposal of evaluation of the estimate of the erodibilidade potential through different methods inside of which we have rehearsals of evaluation of the erodibilidade of indirect form and rehearsals of evaluation of the erodibilidade in direct form. Haul of the estimate of the soil loss through the Universal Equation of Loss of the soil (EUPS) and the Universal Equation of Loss of the Modified soil (MUSLE). The experimental work was developed in the right margin of the passage of flow reduced of the hydroletric power plant Capim Branco I (TVR-CBI); Araguari in the State of Minas Gerais; Brazil.

In the comparison of the estimate of soil loss made calculations in base in the concentration measured daily rate of the sub-basin incremental with the results obtained through the mathematical models EUPS, MUSLE, it was verified that one exists differentiates very considerable since the soil loss esteemed through EUPS was 13 times larger and the result of MUSLE was of 6 times. It is believed that is due for the fact that in the estimate of the soil loss through the mathematical models in the face of the difficulty to obtain data of intensity pluviométrica of the area in study used in the estimate of the parameters R and R_w values proposed in the literature.

Inside of the physical and mechanical characterization of the soil, the granulometria study showed that the soil is a fine sand (P2) and sand average the fine (P3), both with fine (33% and 20%). On one side, the sand is not uniform, what reduces its erodibilidade, for other the fine ones are little plastic and it is not structured, what increases the susceptibilidade to erosion processes. Now the other rehearsals confirmed the sandy characteristic and no structured of the soil. Several rehearsals and MCT showed that the erodibilidade of this soil this directly related to his/her degree of initial saturation. All that, larger saturation initial, larger the susceptibilidade. It seems that always permanence grand quantity of air stays, even after the entrance of water. The rehearsals of evaluation of the erodibilidade in direct form showed a low erodibilidade. This fact should be associated witnesses of organic matter in the sample and to the form of execution of the rehearsal Inderbitzen, since in this work the rehearsal Inderbitzen was used to simulate the effect of the drainage to laminate if it didn't endorse the impact of the rain drops that has an effect according to the literature still larger in unprotected soils. Finally, the assoreamento in the bottom of the gutter of the river Araguari, produced by the erodibilidade of the area of the study, was considered.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo Geral	3
1.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Justificativa.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Intemperismo	5
2.2	Aspectos Geológicos e Geotécnicos dos solos.....	5
2.3	Erosão	7
2.4	Classificação dos processos erosivos e seus mecanismos	9
2.4.1	Erosão Hídrica	10
2.4.2	Fatores que influenciam a erosão Hídrica	10
2.4.2.1	Chuva.....	10
2.4.2.2	Cobertura vegetal.....	11
2.4.2.3	Solo.....	12
2.4.2.4	Uso e manejo do solo	13
2.4.2.5	Topografia	13
2.4.3	Erosão superficial	13
2.4.4	Erosão linear	13
2.4.4.1	Erosão por sulcos e ravinas	14
2.4.4.2	Erosão por voçorocas.....	15
2.5	Erodibilidade do solo.....	16
2.5.1	Índices de riscos de erodibilidade.....	17
2.5.2	Ensaio de avaliação da erodibilidade em forma direta e indireta	22
2.5.2.1	Execução de ensaios de avaliação direta da erodibilidade	22
2.5.2.2	Execução de ensaios para avaliação da erodibilidade de forma indireta.....	27
2.5.3	Modelos de previsão de erosão.....	39
2.5.3.1	Equação universal da perda de solo (EUPS)	40
2.5.3.2	Equação da perda de solo modificada (MUSLE).....	47
2.5.4	Modelos para a estimativa da erodibilidade para latossolos brasileiros.....	48
2.6	Assoreamento de cursos de água.....	51
2.7	Disponibilidade Hídrica e Demanda no Brasil.....	52
3	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	54
3.1	Reconhecimento da área e meio físico do TVR-CBI	55
3.2	Aspectos Geológicos - Geotécnicos da Região	58
3.3	Condições Climáticas e Meteorológicas.....	59
3.3.1	Precipitação	60
3.3.2	Temperatura.....	61
3.3.3	Ventos.....	62
3.4	Caracterização Pedológica.....	62
3.5	Tipos de Vegetação	63
3.6	Hidrologia.....	66
3.7	Geomorfologia.....	68
4	METODOLOGIA.....	69
4.1	Ensaio de laboratório para avaliação da erodibilidade de forma indireta.....	69
4.1.1	Ensaio de caracterização Geotécnica	69
4.1.2	Ensaio de caracterização Física, Química, Mineralógica.	70
4.1.2.1	Determinação da permeabilidade in-situ por meio do Permeômetro de Guelph..	70
	70

4.1.2.2	Curvas características de retenção de água (sucção) e determinação das curvas de secagem.....	72
4.1.2.3	Ensaio de Porosidade por instrução de mercúrio.....	73
4.1.2.4	Ensaio de difração por raios X e microscopia eletrônica de varredura das amostras.....	74
4.1.2.5	Ensaio para quantificar a quantidade de matéria orgânica.....	74
4.1.2.6	Ensaio de classificação do tipo MCT.....	75
4.1.3	Ensaio de Caracterização Geomêcnica.....	76
4.1.3.1	Ensaio de compressão edométrico convencional.....	76
4.1.3.2	Ensaio de cisalhamento direto.....	77
4.1.3.3	Ensaio de compressão simples.....	78
4.1.3.4	Ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro.....	79
4.1.3.5	Ensaio de Compactação.....	80
	Ensaio de cisalhamento direto.....	81
	Ensaio de compressão simples.....	81
	Ensaio de Compactação.....	81
4.2	Ensaos de laboratório para avaliação da erodibilidade em forma direta.....	81
4.2.1	Ensaio Inderbitzen.....	81
4.2.2	Ensaio de desagregação.....	83
4.3	Modelos matemáticos para a estimativa da perda de solo.....	85
4.3.1	Equação Universal de perda de solo EUPS.....	85
4.3.2	Equação Universal de perda de solo modificada MUSLE.....	85
4.3.3	Estimativa do volume de assoreamento e a disponibilidade hídrica.....	86
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	87
5.1	Resultados dos ensaios utilizados para a avaliação da erodibilidade em forma indireta.....	87
5.1.1	Ensaos de caracterização Geotécnica.....	87
5.1.1.1	Análise granulométrica.....	87
5.1.1.2	Limites de Atterberg.....	90
5.1.1.3	Massa específica dos grãos.....	91
5.1.2	Ensaio de compactação.....	92
5.1.3	Ensaio de compressão edométrica.....	93
5.1.4	Ensaio de permeabilidade in-situ por meio do Permeômetro de Guelph.....	96
5.1.5	Ensaio de compressão simples.....	97
5.1.6	Ensaio de compressão diametral o ensaio brasileiro.....	99
5.1.7	Ensaio de cisalhamento direto.....	100
5.1.8	Execução de ensaios de difração por raios x e microscopia eletrônica de varredura das amostras.....	110
5.1.9	Resultados da quantidade de matéria orgânica presente na amostra.....	118
5.1.10	Ensaio de Classificação do tipo MCT.....	118
5.1.11	Curvas de retenção de água.....	121
5.1.12	Ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio.....	124
5.1.13	Curvas de Secagem.....	128
5.2	Ensaos de avaliação da erodibilidade em forma Direta.....	137
5.2.1	Ensaio de desagregação.....	137
5.2.2	Ensaio do tipo Inderbitzen.....	139
5.3	Cálculo da disponibilidade hídrica na área de drenagem na Sub-Bacia incremental.....	148
5.4	Avaliação da erodibilidade pelos Modelos Matemáticos EUPS e MUSLE.....	150
5.4.1	Perda de solo através do modelo matemático EUPS (Equação Universal de perda de solos).....	150

5.4.2	Cálculo da perda de solo através do Modelo Matemático MUSLE (Equação de Perda de solos Modificada)	156
5.5	Transporte de sedimentos no curso de água (rio Araguari).....	158
5.6	Índice de Vulnerabilidade à Erosão.....	165
6	CONCLUSÕES	169
7	<i>RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</i>	172
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
9	ANEXOS	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação da erosão pelos fatores ativos (ZACHAR, 1982).....	9
Tabela 2.2 – Classificação das voçorocas pelo seu tamanho (BATISTA,2003).....	15
Tabela 2.3 – Caracterização do coeficiente de risco de erosão (PROFREST 2005).....	18
Tabela 2.4 – Classes de erodibilidade dos solos (SALOMÃO, 1999).....	20
Tabela 2.5 – Classes de solos e de declividade hierarquizadas segundo o índice de susceptibilidade (MORATO, 1997)	20
Tabela 2.6 – Variação da Erodibilidade da Chuva	41
Tabela 2.7 – Valores de erodibilidade para algumas das localidades brasileiras (SILVA, 1997)	44
Tabela 2.8 – Modelos avaliados por SILVA ET AL (1999)	49
Tabela 2.9 – Descrição, códigos, valores mínimos, médios e máximos das variáveis dos solos estudados incluídos em modelos para estimativa da erodibilidade em latossolos brasileiros de acordo com SILVA ET AL. (1999)	50
Tabela 2.10 – pontos definidos no TVR-CBI para coleta de amostras	55
Tabela 4.11 – Número de ensaios executados na caracterização Geotécnica	70
Tabela 4.12 – Número de ensaios executados na caracterização Física.....	74
Tabela 4.13 – Número de ensaios executados na caracterização Geomecânica	81
Tabela 4.14 – Número de ensaios executados na avaliação da erodibilidade em forma direta	84
Tabela 5.15 – Parâmetros da curva granulométrica com defloculante e sem defloculante.....	88
Tabela 5.16 – Parâmetros obtidos através da granulometria	89
Tabela 5.17 - Valores do limite de Atterberg obtidos	90
Tabela 5.18 - Valores de massa específica dos grãos.....	91
Tabela 5.19 – Massa Específica dos sólidos de diferentes minerais (PESSOA, 2004).....	92
Tabela 5.20 – Valores de umidade ótima e Peso específico aparente seco para todas as amostras	93
Tabela 5.21 – Valores obtidos para tensão de pré-adensamento para a amostra P2	94
Tabela 5.22 – Valores do colapso estrutural.....	95
Tabela 5.23 – Valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos pelo ensaio do tipo Guelph	96
Tabela 5.24 – Valores obtidos do ensaio Inderbitzen versus Compressão Simples.....	98
Tabela 5.25 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura	106
Tabela 5.26 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura	106
Tabela 5.27 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura	107
Tabela 5.28 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura	108
Tabela 5.29 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura	109
Tabela 5.30 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura	109
Tabela 5.31 – Resultada de análises mineralógicas.....	110
Tabela 5.32 – Teor de matéria orgânica presente nas amostras	118
Tabela 5.33 – Parâmetros obtidos no ensaio mini-MCV e perda de massa por imersão	118
Tabela 5.34 – Parâmetros obtidos no ensaio de perda de massa por imersão	120
Tabela 5.35 – Parâmetros mais importantes relacionados à curvas características.....	123
Tabela 5.36 – Resultados da Porosimetria.....	125
Tabela 5.37 – Resultados dos índices físicos	128
Tabela 5.38 – Resultados dos ensaios Inderbitzen	139
Tabela 5.39 – Resultados dos ensaios Inderbitzen	140
Tabela 5.40 – Resultados dos ensaios Inderbitzen	141
Tabela 5.41 – Resultados da tensão cisalhante hidráulica (th) e perda de solo (Inderbitzen)	147
Tabelas 5.42 – Componentes do solo (WISCHMEIER & SMITH, 1978).....	151

Tabela 5.43 – Classes de permeabilidade (WISCHMEIER & SMITH, 1978)	152
Tabela 5.44 – Classes de estrutura (WISCHMEIER & SMITH, 1978)	152
Tabela 5.45 – Parâmetros utilizados na equação de WISCHMEIER & SMITH (1978).....	153
Tabela 5.46 – Comparação dos resultados do fator K através da equação e o nomograma de WISCHMEIER & SMITH (1978).....	153
Tabela 5.47 – Variáveis e fator LS para cada ponto do trecho.....	155
Tabela 5.48 – Valores do fator C de acordo com SILVA, V.C. (2004)	155
Tabela 5.49 – Valores do fator P de acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (1999)	156
Tabela 5.50 – Resultados do Modelo Matemático EUPS	156
Tabela 5.51 – Fatores do MUSLE e cálculo da perda de solos	158
Tabela 5.52 – Secções- bati métricas : PAULO (2007)	159
Tabela 5.53 – Resultados da descarga sólida (PAULO2007)	160
Tabela 5.54 – Comparação de resultados de perda de solo	160
Tabela 5.55 – Resultado do volume de sedimento anual	161
Tabela 5.56 – Unidade de análise para o fator declividade (VIANA, 2000)	166
Tabela 5.57 – Unidade de análise para o fator exposição do terreno (VIANA, 2000).....	166
Tabela 5.58 – Unidade de análise para o fator padrão de ocupação.....	166
Tabela 5.59 – Análise de fatores e suas respectivas pontuações para cada voçoroca	167
Tabela 5.60 – Análise de fatores e suas respectivas pontuações para cada voçoroca	168
Tabela 5.61 – Análise de fatores e suas respectivas pontuações para cada voçoroca	168
Tabela A1- Parâmetros das amostras com defloculante	185
Tabela A2- Parâmetros das amostras sem defloculante	185
Tabela A2- Ensaio de adensamento para amostra P2 indeformada.....	191
Tabela A3: Dados do corpo de prova (P2 – indeformado).....	191
Tabela A4- Ensaio de adensamento para amostra P2 deformada.....	192
Tabela A5- Dados do corpo de prova (P2 – deformado).....	192

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Precipitação média anual, em mm/ano; modificado, SILVA (2004) apud MIRANDA, 2005.	11
Figura 2.2 – Formação de sulcos e ravinas e voçorocas: (LIMA, 2003).....	14
Figura 2.3 – Equipamento Inderbitzen (1988): LIMA, (2003).....	22
Figura 2.4 – Ensaio de Inderbitzen modificado: UNISUL (Universidade do sul de Santa Catalina)	24
Figura 2.5 – Efeito da estrutura do solo na curva de retenção Fonte: BARROS (2005).....	29
Figura 2.6 – Curvas características típicas de diferentes tipos de solos. (VILLAR, 2002).....	30
Figura 2.7 – Curva ilustrativa de condutividade hidráulica não saturada (BARROS, 2005)....	32
Figura 2.8 – Ábaco de erodibilidade de solos tropicais VERTAMATTI et al (1998)	33
Figura 2.9 – Etapas do processo de contração (VILLAR 2002)	34
Figura 2.10 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão (LAFAYETTE ET AL 2005).....	39
Figura 2.11 – Nomograma de WISCHMEIER & SMITH (1978) Modificado DOMINGOS (2006)	45
Figura 3.12 – Localização da área de estudo PAULO (2007).....	54
Figura 3.13 – Construção de Capim Branco I	55
Figura 3.14 – Imagem de satélite do TVR-CBI (Adaptado de Google Earth & www cemig com	56
Figura 3.15 – Coleta de amostra indeformada do P2 do trecho	56
Figura 3.16 – Coleta de amostras deformadas no P3 do TVR-CBI	57
Figura 3.17 – (a) amostra P3 e (b) amostra P2	57
Figura 3.18 – Presença de afloramento rochoso.....	59
Figura 3.19 – Precipitações ao longo dos meses. CEMIG (1986).....	60
Figura 3.20 – Precipitações reportadas ano 2006 Estação de Uberaba. (WWW. Agritempo.gov.br)	61
Figura 3.21 – Temperatura reportada ano 2006. (WWW. Agritempo.gov.br).....	61
Figura 3.22 – Tipo de solo das paredes das voçorocas em estudo	63
Figura 3.23 – Mata ciliar nas	64
Figura 3.24 – Vegetação do cerrado	65
Figura 3.25 – Vegetação em regeneração perto do rio Araguari: (Relatório uso do solo CCB,	65
Figura 3.26 – Áreas de pastagem nas proximidades do rio Araguari.....	66
Figura 3.27 – Áreas com culturas anuais localizadas na localidade próximas a Capim Branco: (Relatório uso do solo CCB, 2006)	66
Figura 3.28 – Mapa hipsométrico da bacia do rio Araguari: ROSA et al 2004	68
Figura 4.29 – Permeâmetro Guelph.....	71
Figura 4.30 – Execução do furo utilizando o trado manual para a instalação do Guelph	72
Figura 4.31 – Equipamento para ensaio Mini – MCV	75
Figura 4.32 – Prensa de adensamento tipo “Bishop	77
Figura 4.33 – Critério de definição dos pontos de ruptura (CAMPOS & CARRILLO, 1995) 78	
Os critérios de ruptura a 2mm e 12mm consistem em estimar as tensões cisalhante que provocam a ruptura do solo quando o deslocamento horizontal atinge 2 e 12mm 78	
Figura 4.34 – Ensaio de compressão simples	79
Figura 4.35 – Saturação do corpo de prova	79
Figura 4.36 – Ensaio de tração	80
Figura 4.37 – Aparelho Inderbitzen usado nos ensaios : FRAGASSI (2001)	82

Figura 4.38 – Ensaio realizado para determinar o material da rampa do aparelho Inderbitzen	82
Figura 5.39 – Curvas granulométricas das amostras P2 com defloculante e sem defloculante	87
Figura 5.40 – Curva granulométrica das amostras P3 com defloculante e sem defloculante ..	88
Figura 5.41 – Resultado do ensaio de compressão edométrica da amostra P1	94
Figura 5.42 – Gráfica do coeficiente de permeabilidade versus índice de vazios	96
Figura 5.43 – Relação linear entre resistência e teor de umidade volumétrica	97
Figura 5.44 – Relação entre resistência e teor de umidade	97
Figura 5.45 – Relação entre resistência SU e taxa de erosão	98
Figura 5.46 – Curva tensão versus deformação obtida pelo ensaio de tração	99
Figura 5.47 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição Pré- adensada.....	102
Figura 5.48 - Curvas de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição pré-adensada.....	102
Figura 5.49 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada	103
Figura 5.50 - Curvas de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada	103
Figura 5.51 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição Pré - adensada.....	104
Figura 5.52 – Curva de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição Pré-adensada.....	104
Figura 5.53 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada	105
Figura 5.54 – Curva de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada	105
Figura 5.55 – Envoltórias de resistência obtidas pelo critério de ruptura proposto SOARES (2005)	107
Figura 5.56 – Envoltórias de resistência obtidas pelo critério de ruptura (2mm)	108
Figura 5.57 – Envoltórias de resistência obtidas pelo critério de ruptura (12 mm)	109
Figura 5.58 (a) – Difratoograma das amostras P2	111
Figura 5.58 (b) – Difratoograma das amostras P3	111
Figura 5.59 – Resultados dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.....	117
Figura 5.60 – Comportamento da amostra P2 durante o ensaio de perda por imersão	119
Figura 5.61 – Aspecto final da amostra P2 após o ensaio de perda por imersão	119
Figura 5.62 – Ábaco de Classificação	120
Figura 5.63 – Teor de umidade volumétrico em função da sucção mátrica.....	121
Figura 5.64 – Teor de umidade gravimétrico em função da sucção mátrica.....	121
Figura 5.65 – Grau de saturação em função da sucção mátrica	122
Figura 5.66 – Curva de condutividade Hidráulica não saturada ajustada pela equação de VAN GENUTCHEN (1980)	123
Figura 5.67 – Ábaco de erodibilidade de solos tropicais.....	124
Figura 5.68 – Diâmetro de poros versus volume acumulado	125
Figura 5.69 – Resultados do ensaio de porosimetria	127
Figura 5.70 – Curva característica de Contração.....	129
Figura 5.71 – Curva que relaciona os teores de umidade volumétricos versus gravimétricos	131
Figura 5.72 – Curva de secagem: relação entre o teor de umidade gravimétrico, índices de vazios e a porosidade versus grau de saturação.....	134
Figura 5.73 – Curva de secagem: relação entre o teor de umidade volumétrico e a porosidade	135

Figura 5.74 – Curva de secagem: relação entre a densidade total versus teor de umidade gravimétrico.....	136
Figura 5.75 – Curva de secagem: relação entre a densidade total versus índice de vazios....	137
Figura 5.76 – Métodos de Imersão Parcial e Imersão total da amostra P2.....	138
Figura 5.77 – Classificação final do Ensaio de Desagregação para a amostra P2	138
Figura 5.78 – Ensaio realizado com 25° e 10 ° 2,3 l/min, 1,2 l/min	140
Figura 5.79 – Ensaio realizado com 25° e 2,3 l/min, 1,2 l/min	141
Figura 5.80 – Ensaio realizado com 10° e Q = 2,3 l/min, 1,2 l/min	142
Figura 5.81 – Deposição de material aluvial e ausência de raízes	142
Figura 5.82 – Deposição de material coluvionar com presença de raízes.....	143
Figura 5.83 – Ensaio realizado com e sem cobertura vegetal W% 20 e Q = 2,3 l/min.....	144
Figura 5.84 – Ensaio realizado com diferentes graus de saturação.....	145
Figura 5.85 – Tensão cisalhante hidráulica – Resultados dos ensaios Inderbitzen	147
Figura 5.86 – Área de drenagem PAULO (2007)	148
Figura 5.87 – Mapa de erosividade anual (MJ.mm/ha.h.ano) de acordo com SILVA (2004).....	151
Figura 5.88 – Resultados do fator K através do monograma proposto por WISCHMEIR & SMITH (1978) para o ponto P2 e P3.....	154
Figura 5.89 – Secção 30 HEC-RAS	162
Figura 5.90 – Simulação do assoreamento para um ano, dois anos e quatorze anos.	164
Figura A1- Curva de compactação para a amostra P2.....	186
Figura A2: Curva de compactação para a amostra P3.....	186
Figura A3- Curva mini-mcv para a amostra P2.....	188
Figura A4- Família de curva de compactação para a amostra P2	188
Figura A5- Curva mini-mcv para a amostra P3.....	189
Figura A6- Família de curva de compactação para a amostra P3	189
Figura A7- Ensaio de permeabilidade Guelph para ponto P2 (2ª determinação).....	194
Figura A8: Ensaio de permeabilidade Guelph para ponto P3 (1ª determinação).....	194
Figura A9: Ensaio de permeabilidade Guelph para ponto P3 (2ª determinação).....	195

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABG	Associação Brasileira de Geologia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Atividade Coloidal
a_r	Parâmetro de ajuste
AF	Teor de areia fina ou %
AG	Teor de areia grossa ou%
AHE	Aproveitamento Hidroelétrico Energético
Al	Alumínio
ANA	Agencia Nacional de águas
C	Coesão
C	Fator uso e manejo de solo
C	Argila
CCBE	Consórcio Capim Branco Energia
Ca	Cálcio
Ca	Coesão aparente
CEMIG	Centro de Energia de Minas Gerais
C_c	Coefficiente de curvatura
C_c	Índice de Fournier
c^1	Inclinação da curva
CTC	Capacidade de troca de cátions
CO ₂	Anidrido Carbônico
C_u	Coefficiente de Uniformidade
D	Grau de declive
DAEE	Departamento de Águas e Esgoto Estatal
DMP	Diâmetro médio ponderado dos agregados do solo

DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodoviário
d	Declive médio das encostas
d^1	Inclinação do ramo seco
d	Declividade do escoamento
e	índices de vazios
e_1	Índice de vazios antes da saturação
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FG	Fator geológico
FM	Fator morfológico
FC	Fator climático
FPO	Fator padrão de ocupação
EUPS	Equação Universal de perdas de solo
EIA	Estúdio de impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
<i>e</i>	Grau de risco de erosão
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação
Fé	Ferro
G	Cascalho
GPS	Sistema de posição da terra
GUI	Interface de usuário gráfico
H	Altura da lâmina de fluxo
IP	Índice de plasticidade
IVE	Índice de vulnerabilidade à erosão
IPT	Ideologia e Política de Tratamento
K	Potássio
K	Fator de erodibilidade
K_{fs}	Condutividade hidráulica

Ks	Coeficiente de condutibilidade hidráulica saturada
K(ψ)	Coeficiente de condutividade hidráulica não saturada
L	Fator de comprimento do declive
LL	Limite de Líquidos
LP	Limite de Plasticidade
Li	Lítio
Mg	Magnésio
M	Silte
n	Coeficiente de rugosidade de Manning
n	Porosidade
Na	Sódio
NA	Não laterítico
O	Orgânica
O ₂	Oxigênio
OM	Matéria orgânica
P	Fator de prática conservacionista
P	Mal graduado
PCA	Plano de Controle Ambiental
Pi	Perda de massa por imersão
Pm	Perímetro molhado
P	Densidade total
ρ_d	Densidade seca
Qm	Vazão média de longo período
Qs	Umidade volumétrica saturada
Qr	Umidade volumétrica residual
Qs	Volume de escoamento superficialmente
Q95	Vazão com permanência de 95%

R	Fator chuva
R_1	Leitura obtida com a primeira carga aplicada
R_2	Leitura obtida como a segunda carga aplicada
Rh	Raio hidráulico
Rw	Fator de escoamento
S	Areia
S	Fator grau de declive
S	Grau de saturação
SBS	Sociedade brasileira de Silvicultura
SCS	Soil Conservation Service
Si	Silicato
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
Su	Resistência ao cisalhamento não drenado de solos argilosos
TVR-CBI	Trecho de vazão reduzida Capim Branco I
UFMG	Universidade Federal Minas Gerais
UFSCAR	Universidade federal de San Carlos
USDA	Departamento Agricultura Estados de Estados Unido
USLE	Equação Universal de perda de solo
X_i	Fatores individuais utilizados nos índices de regos de erosão
W	Teor de umidade gravimétrico
W	Bem graduado
W_i	Peso atribuído ao respectivo fator de índices de risco de erosão
Y	Produção de sedimento
Ψ	Sucção matricial
Ψ_a	Sucção matricial que corresponde à entrada de ar
Ψ_r	Sucção matricial que corresponde à umidade volumétrica
θ	Umidade volumétrica

θ_s	Umidade volumétrica de saturação
θ_r	Umidade volumétrica residual
α	Parâmetro de ajuste da curva
λ	Parâmetro de ajuste depende do tipo de solo.
Φ_m	Fluxo potencial matricio
Δe	Varição de índices de vazios pela saturação
Φ	Ângulo de atrito interno
τ_h	Tensão cisalhante hidráulica
γ	Peso específico do fluido

1 INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas tem aumentado a preocupação com os processos de perda de solo, principalmente nas áreas de cultivo. Esta perda de solo é gerada por parâmetros sejam hidrológicos, topográficos, estruturais mineralógicos e de cobertura vegetal, além de ser causada também pela influência humana através do mau uso do solo (MARIN, 2005). Segundo BERTONI & NETO (1999), em torno de 15% dos solos do planeta são atingidos por vários tipos de degradação, a maioria originadas principalmente pela erosão hídrica, também GONZALES (2004) indica que a perda de solo na bacia do Mediterrâneo supera 15 t/ha sendo que a erosão provocada pelo fluxo de água superficial é a principal responsável. BERTONI & NETO (1999) indicam que a erosão hídrica é o tipo de erosão responsável por 56% da degradação dos solos do mundo. A água é o principal agente erosivo que no Brasil gera perdas de solo de 1,8 e 3,0 milhões de hectares segundo dados da SBS (2004). (sociedade Brasileira de Silvicultura)

Conforme comentam GARCIA et al (2002) a erosão hídrica é a mais significativa forma de erosão. A quantificação de perda de solo que é causada pela chuva, é feita pelo escoamento superficial produzido pelo excedente das águas da chuva que transportam os sedimentos, nutrientes e agroquímicos para os cursos de água.

SILVA et al (2000) Indicam que, basicamente, existem três maneiras diferentes de se determinar a erodibilidade do solo. A primeira consiste em a determinação do fator K (erodibilidade) em condições de campo, sob chuva natural. Entretanto, este método é oneroso e muito demorado. O segundo método é similar ao primeiro, porém baseia-se na quantificação do fator K em razão das perdas de solo e do fator de erosividade, sob condições de chuva simulada. Estes dois métodos são considerados padrões que representam a estimativa da erodibilidade do solo pela Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) citado por (WISCHMEIER & SMITH, 1978) apud conforme SILVA (2000). O terceiro método baseia-se em regressões múltiplas que contenham variáveis independentes que possam ter atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos do solo ou relações destes, correlacionados com o fator K obtido pelos métodos padrões.

Na década de 60 foram desenvolvidas técnicas matemáticas para calcular a perda de solo, surgindo até os modelos matemáticos que utilizam equações empíricas e simples. O modelo

matemático empírico mais utilizado é a Equação Universal de Perda de Solos (USLE), de WISCHMEIR (1971) e sua versão modificada, Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE) WISCHMEIR e SMITH (1978), conforme já utilizaram os pesquisadores WILLIAMS (1975) e PINTO (1996). Conforme citado por MARÍN (2005), outros modelos mais sensíveis vêm sendo utilizados, destacando-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que avalia a qualidade e produtividade de água, produção de sedimentos e cargas poluentes em bacias hidrográficas, de acordo com o uso e ocupação do solo, KING et al., (1996).

No Brasil, os trabalhos iniciais sobre a aplicação dos modelos matemáticos ou de perdas de solo foram desenvolvidos por BERTONI (1985), como citado por ALVES, et al (2005), que utilizou os dados existentes para as condições do Estado de São Paulo. O autor indica que o modelo USLE exclui os efeitos da interação entre os fatores no processo da erosão.

CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) indicam que atualmente existem ensaios de laboratório que permitem avaliar a erodibilidade de forma direta e indireta. Dentro dos ensaios diretos têm sido utilizados desagregação, Inderbitzen, cilindro rotatório, furo de agulha ou pinhole. A avaliação experimental indireta tem sido feita a partir de ensaios que conduzem à caracterização física, geomecânica, química, mineralógica e estrutural do solo. SANTOS et al (1998) demonstrou que os resultados obtidos pelos ensaios de avaliação de erodibilidade direta tais como Inderbitzen e desagregação, ensaio pinhole apresentam boa correspondência com as observações de campo e, portanto, o autor conclui dizendo que estes ensaios constituem-se uma ferramenta potencial para a previsão do comportamento do solo frente aos esforços erosivos. Os ensaios de avaliação de erodibilidade direta usados nesta pesquisa foram Inderbitzen e desagregação. Os resultados destes ensaios quanto a análise de erosão também apresentaram coerência com as observações de campo.

Os Cambissolos e os Latossolos são os solos predominantes no trecho de vazão reduzida Capim Branco I (TVR-CBI). Estes tipos de solo são considerados pelos autores SALOMÃO (1999) e SILVA (2005) como solos de fácil desagregação.

SILVA (2005) demonstrou que os Lattosolos e Cambissolos são classes de solos cuja taxa de perda de solo pode ser considerada crítica. SANTOS et al (1999) também indicam que os Cambissolos têm como principais limitações à utilização agrícola a alta susceptibilidade à

erosão, baixa capacidade de armazenamento de água, baixa fertilidade natural além de impedimentos à mecanização em virtude do tipo de relevo. RESENDE et al (1999) conceitua que os Cambissolos são aqueles solos que se caracterizam essencialmente pelo horizonte B incipiente com presença de muitos minerais primários facilmente intemperizável. Por tanto a estimativa da perda de solo no TVR-CBI tem que ser estimada na forma mais precisa a fim de poder orientar possíveis medidas mitigadoras já que pelo tipo de solo predominante tem possibilidades de sofrer altas taxas de perda de solo.

1.1 *Objetivo Geral*

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e comparar os resultados de erodibilidade obtidos por diferentes métodos através dos quais foi obtido o potencial de erodibilidade e fazer uma avaliação comparativa da perda de massa pelos modelos matemáticos EUPS e MUSLE. O potencial de erodibilidade foi obtido da margem direita do trecho de vazão reduzida Capim Branco I (TVR-CBI), localizada em Araguari, estado de Minas Gerais.

1.2 *Objetivos específicos*

- Avaliação da erodibilidade através da execução de ensaios que conduzem à caracterização física e geomecânicas do solo em estudo, estes ensaios são: granulometria limites de Atteberg, teor de umidade, curvas características, porosimetria, curvas de secagem, difração de raios x e microscopia eletrônica de varredura, cisalhamento direto, compressão simples, compressão diametral, Mini-MCV, compactação, permeabilidade e compressão edométricos ;
- Determinação da erodibilidade por meio de ensaios do tipo Inderbitzen;
- Determinação da erodibilidade através de ensaios do tipo desagregação do solo;
- Comparação dos resultados fornecidos pelos ensaios anteriormente mencionados, procurando identificar uma correlação entre eles;
- Estimar a perda de solo através de modelo matemático empírico EUPS e MUSLE;
- Comparar os resultados dos modelos matemáticos empíricos e estabelecer condições de eficiência na estimativa da perda de solo;

- Estimar o volume de assoreamento no rio Araguari.

1.3 Justificativa

Atualmente existem varias técnicas para quantificar a perda de solo. Algumas são modelos matemáticos outros são ensaios de avaliação da erodibilidade seja direta ou indireta. O Brasil gera perdas de solo de 1,8 e 3,0 milhões de hectares respectivamente segundo dados da SBS (2004). Este número justifica e mostra que é preciso desenvolver pesquisas que avaliem a eficiência de estes métodos no cálculo da perda do solo com o objetivo de estabelecer alternativas de soluções imediatas de baixo custo para remediação das áreas degradadas.

O solo é o recurso natural mais intensamente intemperizado e freqüentemente utilizado para a produção de alimentos, podendo, por isso, ter sua capacidade produtiva comprometida pela erosão, em decorrência de seu uso e manejo inadequados. Assim, o conhecimento das relações entre os fatores que causam as perdas de solo e os que permitem reduzi-las é de fundamental importância para o planejamento conservacionista da propriedade agrícola MORETI et al (2003).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da erosão do solo aborda várias áreas do conhecimento humano, entre as quais se incluem a geologia, hidrogeologia, geomorfologia, física dos solos, geotecnia, agronomia e engenharia em geral. Por tanto, é necessário estabelecer uma base conceitual para o tratamento e desenvolvimento do tema em questão.

Este capítulo apresenta uma revisão detalhada dos conceitos referentes aos processos erosivos de autores nacionais e internacionais que colaboram com suas pesquisas para o desenvolvimento de métodos para a determinação da estimativa da perda de solo.

2.1 *Intemperismo*

CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) concluem que a grande maioria dos solos tropicais é suscetível aos diferentes tipos de degradação originada pelo intemperismo, devido a seu característico físico - químicas, dentro das quais se destaca principalmente a porosidade e a grande sensibilidade das ligações cimentícias à presença de água. LIMA (2003) assinala que o intemperismo tem dois processos dominantes que são o intemperismo físico, que resulta da degradação da rocha sem mudança mineralógica, e o intemperismo químico que resulta da decomposição dos constituintes minerais primários em secundários. A autora ressaltou também que o clima é o fator de maior importância dentro dos efeitos do intemperismo. BIGARELLA et al (1996) afirmam que o intemperismo é mais rápido nos climas quentes e úmidos. Já nas zonas onde o clima é mais frio o intemperismo fica mais lento. O autor fundamenta esta afirmação em função do contrastes do solo e as formas topográficas resultantes do intemperismo em regiões tropicais, desertos e regiões polares.

2.2 *Aspectos Geológicos e Geotécnicos dos solos*

A princípio, pode-se dizer que a natureza do solo depende das características mineralógico-estruturais da rocha matriz (rocha fonte), tipo de solo, a sua estrutura, a composição físico-química, entre outros, além da intensidade dos processos intempéricos, podendo com isso, ser mais susceptível ou não aos processos erosivos.

GRAND (1970) citou que "não há ainda um índice para erodibilidade simples e universalmente aceito". Sendo assim, os autores apresentaram uma classificação de forma

organizada da erodibilidade, fundamentada na classificação unificada dos solos, que são: mais erodíveis para menos erodíveis, representada da seguinte forma:

ML > SM > SC > MH > OL > CL > CH > GM > GP > GW

O **G** indica cascalhos e **S** areias, sendo areias e cascalhos bem graduados designados por **SW** e **GW**, respectivamente. Os materiais mal graduados são indicados pelas designações **SP** e **GP**, respectivamente. As partículas finas do solo são subdivididas conforme os seus limites de liquidez, quais sejam: se $LL < 50$, cujo símbolo é **L** e, se $LL > 50$, o símbolo é **H**. Quanto às letras **M**, **C** e **O**, são indicadas como representativas de siltes, argilas e solos orgânicos, respectivamente.

O mesmo autor menciona que a erodibilidade é baixa em solos bem graduados e altos em siltes e areias finas e uniformes. Esta tendência diminui, entretanto, com o aumento do teor de argila e matéria orgânica.

VILLAR, PRANDI (1993) definiram a erodibilidade de um solo como sendo a aptidão que este possui de resistir aos esforços provenientes dos processos erosivos, associando a essa resistência às características intrínsecas do solo e os fatores subsidiários, tais como: ciclos de secagem e umedecimento e a composição química da água presente. Essa é uma forma comum de se identificar os processos erosivos de um solo, através de suas características físicas e químicas, acrescidas de outros condicionantes externos.

VARGAS (1987) descreveu como propriedades físicas de maior interesse do ponto de vista geotécnico: a textura do solo expressa por sua distribuição granulométrica; a plasticidade expressa pelos Limites de Atterberg e a sua estrutura expressa pela porosidade, arranjo dos grãos e estrutura reliquiar. Apesar dos índices físicos de um solo serem geralmente suficientes para identificar o solo, a caracterização do seu comportamento geomecânico só é possível quando se considera em conjunto o seu estado natural.

SHERARD ET AL. (1976) descreveram que argilas dispersivas, ricas em sódio, são erodidas quando as partículas entram em suspensão ao contato com a água. O tipo de cátion presente atua de forma diferenciada na plasticidade dos minerais.

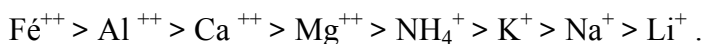
FÁCIO (1991) concluiu que o uso das correlações entre a erodibilidade do solo e suas características físico-químicas e geotécnicas fica comprometido pelo elevado número de

parâmetros que interferem nesse processo, carecendo, portanto, de uma análise sob as condições específicas de cada um destes para a formulação de um modelo universal.

MORGAM (1995) citou que "as partículas menos resistentes a processos erosivos são siltes e areias". Já EVANS (1980) analisou a erodibilidade de um solo em função do teor de argila, concluindo que solos que apresentam fração de argila limitada são mais susceptíveis a processos erosivos.

De acordo com as experiências feitas na Inglaterra, GREENLAND *et al.* (1975) concluíram que os solos com menos de 3,5 % de matéria orgânica são instáveis à erosão. Enquanto PLOEY e POESEM (1985) estimaram que os solos instáveis fossem aqueles que possuem menos de 2% de matéria orgânica. A importância do baixo teor de matéria orgânica na instabilidade é também referida por EVANS (1990) quando afirma que os solos com pouca matéria orgânica podem ser considerados propensos à erosão. (RAMIDAN 2003)

Segundo FRAGASSI (2001), os tipos de cátions existentes em um solo podem influenciar suas características físico-químicas e mineralógicas. Dentre estas influências estão a floculação e a plasticidade. Cita ainda o poder de floculação dos cátions da seguinte maneira:



VARGAS (1977) mostrou a resistência atrativa dos solos argilosos, a qual diminuiu com o aumento da relação de absorção de sódio. Isto está de acordo com o fato de que o sódio absorvido aumenta a camada de água em torno dos grãos e, conseqüentemente, faz decrescer a força atrativa entre as partículas, tornando possível que elas se separem da massa.

2.3 Erosão

De acordo com GUERRA & CUNHA (1998), o ciclo hidrológico é o ponto de partida de um processo erosivo. A ação das gotas de chuva, diretamente ou por meio de gotejamento, causa a erosão por salpicamento (*splash*) e quando o solo não consegue mais absorver a água, o excesso começa a se mover, provocando erosão através do escoamento superficial (*runoff*).

FABRÍCIO (2001) conceitua a erosão de acordo com o Glossário de Termos Técnicos de Geologia e Engenharia da Associação Brasileira de Geologia - ABGE (1985), que indica que a erosão é um conjunto de fatores físicos, químicos ou biológicos, naturais, responsáveis pelo

modelamento do relevo terrestre, na maioria, diretamente ligados ao clima. Também outros autores como SANTOS (1997) e MARÍN (2005) definem erosão como o processo de desgaste da superfície terrestre pela ação da água, do vento, do gelo e de organismos vivos, além do homem. Segundo os mesmos autores, os processos erosivos constituem-se numa forma natural de modelagem do relevo. Com a interferência antrópica, esse processo natural pode ser atenuado no tempo ou ter aumentado sua intensidade. Este processo é denominado erosão acelerada (BATISTA 2003).

CRUZ (2003) indicou que o agente erosivo mais freqüente que origina processos erosivos no Brasil é a água, que conta com clima tropical como fator agravante. A chuva é um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos, e ela atua a partir do impacto das gotas de chuva e o conseqüente arraste de partículas do solo.

VIANA (2000) observou que a susceptibilidade de uma área de solo a processos erosivos depende de vários fatores, dentre os quais se destacam os fatores geológicos, morfológicos e hidrogeológicos. A área da vegetação, embora não seja considerada como uma característica intrínseca do substrato passível de alterações relativamente rápida, não deixa de desempenhar um papel importante no grau de susceptibilidade de uma área aos processos de erosão.

MENDES (2006) descreveu o processo erosivo em três eventos seqüenciais, que são o desprendimento das partículas dos agregados do solo, o transporte e a deposição das partículas carregadas nas seções inferiores das paisagens ou curso de água. O destacamento e o transporte são causados pela ação das gotas de chuvas e da força cisalhante do escoamento superficial, constituindo a fase inicial e mais importante da erosão hídrica. Os mecanismos erosivos podem ocorrer também através do transporte de partículas por fluxos subsuperficiais ou, ainda, por movimentos de massa mais complexos.

CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) indicam que a erosão constitui o início de todos os problemas causadores do assoreamento de corpos de água no meio ambiente, por isso, o conhecimento dos processos erosivos que ocorrem na bacia de contribuição de um reservatório é fundamental para o entendimento dos fenômenos de geração e movimento dos sedimentos na bacia. Além disso, os autores afirmam que, para a caracterização dos fenômenos de erosão, é necessário o conhecimento dos principais atributos da bacia que intervêm na dinâmica dos processos erosivos, tais como tipo de cobertura do solo, geologia,

morfologia, topografia, regimes de precipitação, condições do vento, e as práticas conservacionistas adotadas pelo homem.

2.4 Classificação dos processos erosivos e seus mecanismos

Várias formas de classificação podem ser utilizadas para diferenciar os processos erosivos. SANTOS (1997) e PRADO (2005) referiram-se à classificação de Zachar (1982), a qual propõe uma terminologia para classificar os principais tipos de erosão enfatizando o caráter combinado entre os agentes erosivos e a ação da gravidade. A Tabela 1 mostra esta classificação.

Tabela 2.1 – Classificação da erosão pelos fatores ativos (ZACHAR, 1982)

Fator (agente erosivo)	Termo
1- Água	Erosão hídrica
1.1.-Chuva	Erosão pluvial
1.2.-Rio	Erosão fluvial
1.3.-Lago, reservatório	Erosão lacustrina ou límica
1.4.-Mar	Erosão marinha
2. Geleira	Erosão glacial
3. Neve	Erosão nival
4. Vento	Erosão eólica
5. Terra, detritos	Erosão soligênica
6. Organismos	Erosão organogênica
6.1.-Plantas	Erosão fitogênica
6.2.-Animais	Erosão zoogênica
6.3.-Homem	Erosão antropogênica

Os processos erosivos podem ainda ser classificados de acordo com os agentes exógenos responsáveis pela sua deflagração tais como a erosão eólica; erosão glacial; erosão costeira, erosão antrópica e erosão hídrica (que se divide em erosão superficial e interna; A erosão interna por sua vez se subdivide em erosão fluvial e pluvial). (SANTOS 1997)

A erosão interna geralmente surge em consequência do aumento da taxa de infiltração e do gradiente hidráulico, originando a formação de canais do fluxo no interior do maciço de solo

(LIMA 2003). O aumento da infiltração muitas vezes está ligado ao desmatamento e a remoção da cobertura vegetal.

O processo erosivo promovido pelas águas pluviais em superfícies que tem início com a erosão laminar, pode prosseguir na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, causando problemas à cobertura pedológica. Conseqüentemente, com deposição dos sedimentos em corpos de água, originando grandes prejuízos ao meio ambiente (SILVA 2004). Razão pela qual, neste trabalho, resolvi dar ênfase à erosão hídrica.

2.4.1 Erosão Hídrica

Muitos autores tais como BASTOS ET AL (1998 e 2001) e BETTONI & LOMBARDI NETO, (1990) conceituam a erosão hídrica acelerada como um processo de rápida desagregação e remoção do solo pelas águas das chuvas geralmente desencadeadas por ações antrópicas tais como o desmatamento e o mau uso do solo. Os autores, além disso, também indicam que esse tipo de erosão representa um importante problema geotécnico-ambiental em solos tropicais. A erosão hídrica inicia-se com o impacto das gotas de chuva no solo que golpeiam e desagregam as partículas, que depois são transportadas pelo fluxo superficial.

2.4.2 Fatores que influenciam a erosão Hídrica

A erosão hídrica sofre a ação de diferentes fatores, entre os quais figuram principalmente: a chuva, a cobertura vegetal, a topografia, o uso e manejo do solo, de modo que cada fator tem sua maior ou menor contribuição. O clima é o elemento preponderante. (LIMA 2003)

2.4.2.1 Chuva

A chuva é um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos. A capacidade da chuva em provocar erosão é denominada erosividade, que é função da intensidade, duração e frequência da chuva. Segundo BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), a intensidade é o fator pluviométrico mais importante na erosão. Quanto maior a intensidades, maiores são as perdas por erosão. VIANA (2000) explica que a água da chuva, ao colidir com o solo desnudo ou até mesmo coberto com uma vegetação incipiente, dependendo da sua velocidade e intensidade, causa desagregação das partículas do solo. A água da chuva que não consegue infiltrar no solo e acaba transportando os sedimentos desagregados se associando ao processo de escoamento superficial que, por sua vez, aumenta a intensidade do processo erosivo no solo.

No Brasil, a erosão hídrica conta com um fator agravante que é o clima tropical. A Figura 2.1 mostra a distribuição das chuvas no Brasil.

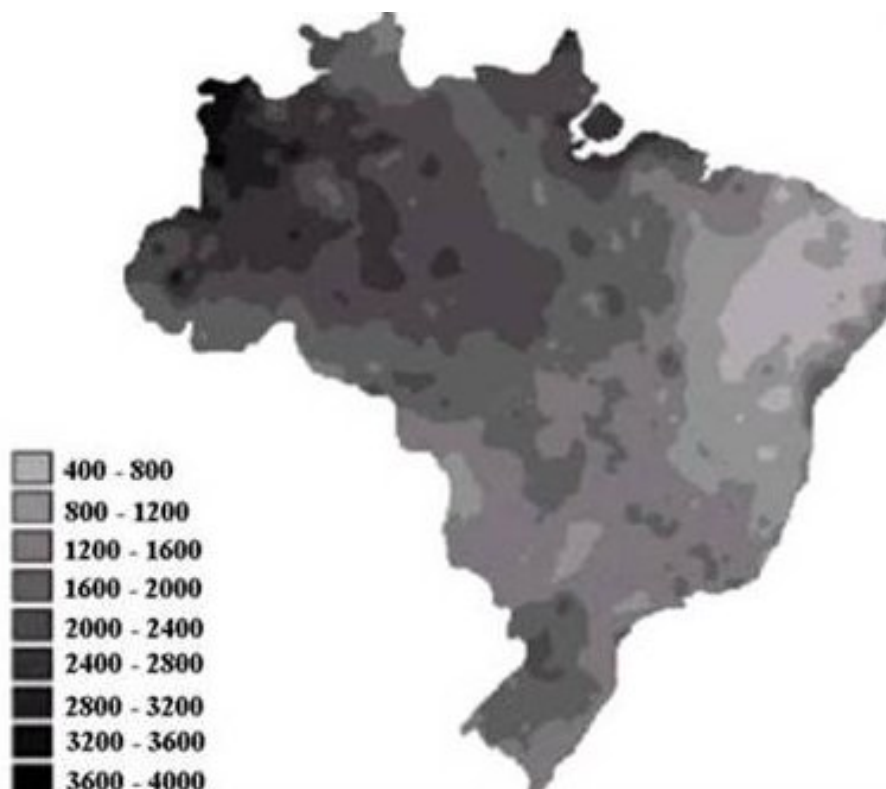


Figura 2 1 – Precipitação média anual, em mm/ano; modificado, SILVA (2004) apud MIRANDA, 2005.

2.4.2.2 Cobertura vegetal

A cobertura vegetal é a defesa natural de um solo contra a erosão. Segundo BERTONE & LOMBARDI NETO (1999), o efeito da vegetação contra a erosão pode ser indicada no seguinte ordem:

- Proteção direta contra o impacto das gotas de chuva;
- Dispersão da água, interceptando-a e evaporando-a antes que atinja o solo.
- Decomposição das raízes das plantas que formando canalículos no solo, aumentam a infiltração da água.
- Melhoramento da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica, aumentando assim sua capacidade de retenção de água.
- Diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo aumento do atrito na superfície.

Quando chove em um terreno coberto com densa vegetação, a gota de chuva se divide em inúmeras gotículas, diminuindo também, sua força de impacto sobre o solo. Em solos descobertos, ela provoca o desprendimento das partículas, as quais são facilmente transportadas pela água. VIANA (2000) indicou que a vegetação, além da proteção, traz como benefício, a dissipação da energia das águas frente ao escoamento subsuperficial, aumentando as possibilidades de infiltração das águas pelos vazios do solo causados pelas raízes da vegetação, o que aumenta a capacidade de retenção de água.

2.4.2.3 Solo

BATISTA (2003) e SALOMÃO (1999) ressaltaram que a erosão não é a mesma em todos os solos. As propriedades físicas, assim como as características químicas, biológicas e mineralógicas do solo exercem diferentes influências na erosão. Suas condições físicas e químicas proporcionam maior ou menor resistência a processos de erosão produzida pela ação das águas. Na caracterização química, são determinados os valores de pH, o teor de matéria orgânica.

CAMAPUM DE CARVALHO (2006) indica que os solos tropicais apresentam um grau de metaestabilidade que varia com a atuação do nível de intemperismo. A avaliação da metaestabilidade pode ser feita através da análise granulométrica com e sem uso de defloculante o também através da microscopia óptica de varredura. Torna-se por tanto necessário fixar critérios de avaliação que definam a metaestabilidade e a estabilidade das micro-agregações existentes nos solos tropicais na avaliação da erodibilidade. GUIMARÃES (2002) estudou os solos do Distrito Federal. Neste trabalho o autor realizou análises granulométricas com uso de defloculante e sem uso de defloculante com o objetivo de observar a influência do aspecto químico no fato de desfazer os pequenos torrões de solo. CAVICHOLO (2005) fez uma pesquisa sobre a perda de solo e nutrientes por erosão hídrica. Nesta pesquisa, ela conseguiu observar como a densidade total dos grãos não influencia na erodibilidade em forma direta, mas sim indiretamente já que seu aumento ou diminuição origina mudança em outras propriedades como a porosidade, capacidade de armazenamento de água, resistência mecânica, aeração que são propriedades que influenciam em forma direta na erodibilidade de um solo.

2.4.2.4 Uso e manejo do solo

Segundo ROSA (2004), a expressão "uso do solo" pode ser entendida como sendo a forma pela qual o espaço está sendo ocupado pelo homem. O levantamento do uso do solo é de grande importância, na medida em que os efeitos do mau uso causam deterioração no ambiente. Os processos de erosão intensos, as inundações, os assoreamentos desenfreados de reservatórios e cursos de água são consequências do mau uso do solo.

2.4.2.5 Topografia

A topografia pode influenciar na velocidade dos processos erosivos. Maiores velocidades de erosão são mais esperadas em relevos acidentados, como morros, do que em relevos suaves. Nas áreas com altas declividades há favorecimento da concentração e maiores velocidades de escoamento das águas, aumentando, assim, sua capacidade erosiva. Segundo BATISTA (2003), a influência da topografia na erosão é analisada pela ponderação de dois fatores: declividade e comprimento da encosta.

2.4.3 Erosão superficial

A erosão superficial surge do escoamento da água que não se infiltra. Quando a chuva começa a se precipitar, o solo apresenta um determinado grau de saturação que sofrerá mudanças ao longo do tempo de duração da chuva. Neste período, os poros do solo se preenchem de água quando isto sucede, a água começa a escoar pela superfície, incrementando assim o efeito do processo erosivo (CAMAPUM DE CARVALHO et al 2006). RAMIDAN (2003) e CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) citam que uma das características mais importantes dos solos desprendidos por esse tipo de erosão é a diminuição permanente da fertilidade e da perda de matéria orgânica, efeito que pode aumentar significativamente de acordo com a posição fisiográfica.

2.4.4 Erosão linear

BATISTA (2003) relatou que a erosão linear é resultado das alterações do escoamento superficial proveniente do processo de urbanização. Este implica na concentração do fluxo das águas pluviais, resultando em incisões na superfície do terreno. A erosão linear origina o desenvolvimento de três tipos de feições erosivas: sulcos, ravinas e voçorocas.

2.4.4.1 Erosão por sulcos e ravinas

Ravinamento é a erosão causada simplesmente pela concentração do escoamento superficial. Consiste essencialmente no desenvolvimento de pequenos canais nos quais o fluxo superficial se concentra e forma sulcos no terreno, tal como é mostrado na Figura 2.2. Essa forma de erosão é mais fácil de ser observada do que a erosão laminar e inicia-se com a aparição de filetes de água na superfície quando estes atingem energia suficiente para desagregar e/ ou remover as partículas do solo. (LIMA 2003). Os termos ravina e voçoroca em inglês são conhecidos como “*gullies*” não havendo distinção entre atuação ou não do lençol freático (LIMA, 2003).

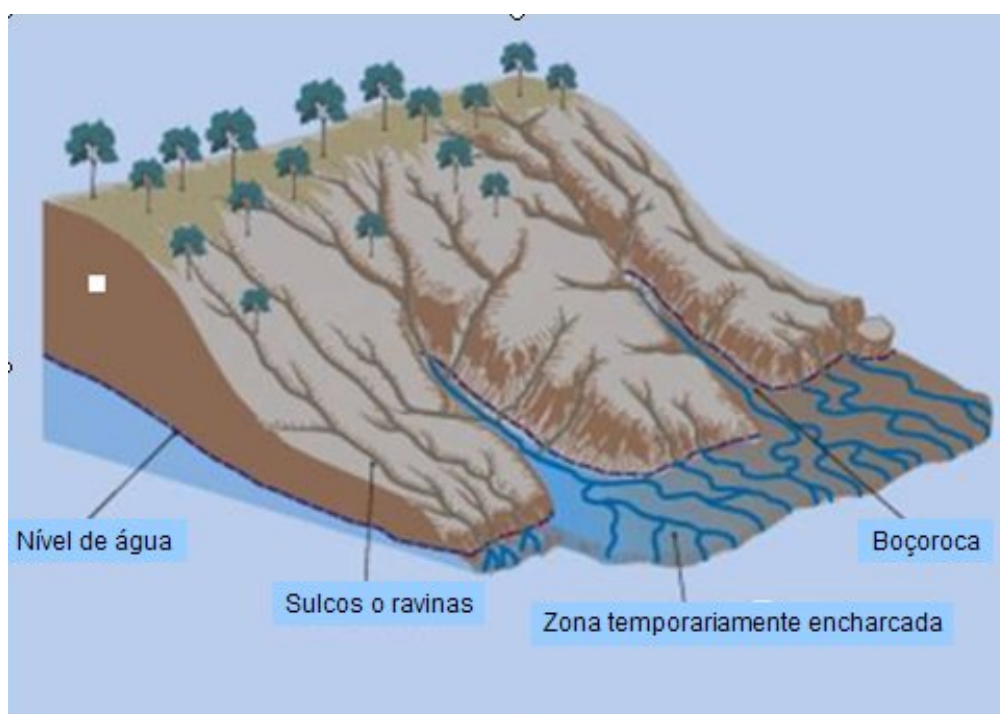


Figura 2.2 – Formação de sulcos e ravinas e voçorocas: (LIMA, 2003)

Na opinião de CAMAPUM DE CARVALHO et al (2001), o termo ravina deveria ser aplicado para os canais com profundidade superior a 10 cm e limitando-se a profundidade máxima de 50 cm. A impregnação das raízes das plantas também alcança uma profundidade de aproximadamente 50 cm, mesmo para solos granulares, pois a presença destas raízes permite estabilizar as camadas superiores até certa profundidade. Neste caso, o processo de ravinamento evolui com o impacto das gotas de chuva e com o aumento da pressão na fase ar que é propiciada pela ação das forças capilares e de sucção.

Esse critério geométrico–geotécnico, apesar de não fixar a profundidade máxima para a ravina, a associa ao modelo evolutivo das erosões. A partir da profundidade limite estabelecida para a ravina, as erosões são consideradas como voçorocas, sobre as quais passam a intervir a estabilização dos taludes associados ou não aos fenômenos de erosão interna e/ou de esqueletização. Destaca-se que esse critério não leva em conta aspectos relativos à forma da erosão.

2.4.4.2 Erosão por voçorocas

A voçoroca é o estágio mais avançado do processo erosivo. Este estágio requer um controle imediato, procurando-se estabilizar ou impedir o prosseguimento de sua ação destruidora e manter uma vigilância periódica até que a recuperação natural ou projetada atinja a estabilização requerida. Na voçoroca atuam, além do escoamento superficial, processos de erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos (DAEE/IPT, 1990). Estas são as condições que favorecem para que as feições que formam as voçorocas sejam de grandes dimensões e a velocidade de avanço elevado. O processo tem sua origem na influência das águas subterrâneas, cuja força de percolação pode dar origem ao processo de erosão interna ou piping, responsável pela formação de vazios no solo, que contribui para a instabilização das feições erosivas. (MENDES 2006)

OLIVEIRA (1999) APUD LIMA (2003) cita que os principais mecanismos atuantes na formação das voçorocas, são: deslocamento de partículas por impacto das gotas de chuva, transporte de partículas de solo pelo fluxo superficial difuso e concentrado, erosão por quedas de águas, solapamento da base de taludes, liquefação de materiais de solo, escorregamentos de taludes e erosão interna. Segundo RAMIDAN (2003), a erosão em voçoroca depende, principalmente, da capacidade do *runoff* e dos fatores controladores desta.

BATISTA (2003) apresentou uma classificação das voçorocas relativa ao seu tamanho e à sua complexidade. A Tabela 2.2 indica a classificação de acordo com o tamanho:

Tabela 2.2 – Classificação das voçorocas pelo seu tamanho (BATISTA,2003)

Classe	Profundidade	Área Drenante
Pequena	< 1m	2 ha
Media	1 a 5 m	2 a 20 ha
Grande	> 5 m	> 20 ha

Pela sua complexidade, as voçorocas podem ser classificadas como (BATISTA 2003)

- **Simples:** composta por perfis geológicos constituintes somente de solos arenosos, diferenciados apenas pela granulométrica.
- **Complexas:** quando, entre as camadas arenosas intercalam-se camadas argilosas.

2.5 Erodibilidade do solo

A erodibilidade pode ser definida como a susceptibilidade do solo à erosão superficial, de modo que as partículas de solo são desprendidas e transportadas pela ação do fluxo hídrico superficial concentrado (BARROS 2005). A erodibilidade também é considerada uma das propriedades do solo de maior complexidade pelo grande número de variáveis intervenientes (LIMA 2003). Estudada por diferentes áreas do conhecimento (Agronomia, Hidráulica, Geomorfologia, Geologia de Engenharia e Engenharia Geotécnica), no meio geotécnico existe grande interesse na sua quantificação e entendimento dos mecanismos envolvidos (BARROS 2005).

FRAGASSI (2001) e MARÍN (2005) afirmaram que a erodibilidade é uma característica do solo que está intimamente associada à desagregação e transporte das partículas. SANTOS (1997) mencionou que a resistência à erosão depende não só de características intrínsecas do solo, mas também de fatores subsidiários, como ciclos de secagem e umedecimento, da composição química e da quantidade de água presente.

BASTOS (2001) indica que a erodibilidade, é entendida como a propriedade do solo que reflete a facilidade com que partículas do solo são destacadas e transformadas. Ele afirma que a análise requer de métodos adequados que a caracterizem para fins de engenharia. O autor ressalta que ainda são insuficientes os esforços no entendimento e na qualificação do potencial da erosão através de propriedades do comportamento estabelecidas pela Mecânica dos Solos.

RAMIDAN (2003) mencionou que a textura é a propriedade física mais importante do solo, devido à sua pouca mudança no tempo. O autor ainda comenta que solos que apresentam 30 a 35% de argila resistem mais ao impacto das gotas de chuva e, conseqüentemente, à erosão. REGO, (1978) e BASTOS et al (2001). Manifestam que as principais propriedades de

erodibilidade do solo são: expansibilidade, a distribuição granulométrica e a plasticidade dos solos

FÁCIO (1991) realizou uma análise dos parâmetros abaixo indicados para obter uma correlação entre a erodibilidade e os característicos físico-químicos e mineralógicos dos solos do Distrito Federal:

- Plasticidade – de um modo geral pode-se dizer que um aumento no índice de plasticidade é acompanhado de um aumento na resistência à erosão;
- Granulometria – além da maior tendência a erodibilidade apresentada pelos solos granulares, há uma correlação entre a erodibilidade e a curva granulométrica, onde solos mal distribuídos (cujo coeficiente de uniformidade é menor que 5), são erodíveis e solos com coeficiente de uniformidade maior que 5 são pouco erodíveis;
- Teor de matéria orgânica – a presença de matéria orgânica, assim como a presença de argila, contribui para a formação de grumos mais estáveis, aumentando assim a resistência à erosão;
- Mineralogia – solos com minerais argilas do tipo montmorillonita possuem resistência à erosão maior que a illita que, por sua vez, possui resistência maior que a caulinita.

Portanto, considerando-se a erodibilidade apenas como um parâmetro do solo, têm sido feitas várias tentativas no sentido de correlacionar algumas propriedades físicas e/ou químicas do solo como um índice indicativo da sua susceptibilidade à erosão (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1993). Nas áreas interravinares, o impacto das gotas de chuva gera energia capaz de desagregar e transportar as partículas de solo (BRAIDA & CASSOL, 1996). Nas áreas ravinares (sulcos), os fluxos hídricos concentrados geram forças de cisalhamento capazes de instabilizar os agregados do solo, transportando através da interface solo-água (FOSTER, 1982).

2.5.1 Índices de riscos de erodibilidade

De acordo com PROFOREST (2005), o grau de risco de erosão é expresso através de um coeficiente (e), tendo como base a erodibilidade do solo (fator k) e o declive médio das encostas (d), de acordo com a equação abaixo:

$$e = K \times d \quad (2.1)$$

Os graus de risco de erosão foram definidos de 1 a 5, de acordo com a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Caracterização do coeficiente de risco de erosão (PROFREST 2005)

GRAU DE RISCO DE EROSÃO	DESCRIÇÃO
1	Terras com risco de erosão nulos ou muito reduzidos, sem necessidade de práticas de defesa ou já acondicionadas e sem limitações de uso.
2	Terras com pequenos riscos de erosão, aptas para agricultura, com necessidade de práticas muito simples de defesa (faixas de culturas alternadas, revestimento do terreno na época mais chuvosa e, alguns casos, lavoura segundo as curvas de nível, etc.).
3	Terras com risco de erosão moderados, sem aptidão para agricultura, mas podendo, em alguns casos, ser agricultada com cuidados especiais de defesa, nomeadamente culturas segundo as curvas de nível, terraceamentos, etc., com aptidão para exploração florestal e/ou silvo-pastorícia.
4	Terras com riscos de erosão elevados, sem aptidão para a agricultura e com aptidão marginal para exploração florestal e/ou silvo-pastorícia.
5	Terras com riscos de erosão muito elevados, sem aptidão para a agricultura, exploração florestal e silvo-pastorícia.

GRAY e LEISER (1989) acreditam que não há um índice simples e universal para erodibilidade simples e universal. Os autores propõem uma classificação da erodibilidade fundamentada na classificação unificada dos solos e que está apresentada abaixo, na ordem do mais erodível para o menos erodível:

ML>SM>SC>MH>OL>CL>CH>GM>GP>GW

Onde:

G – cascalho

S – areia

M – silte

C – argila

O - orgânico

W – bem graduados

P – mal graduados

L – $LL < 50$ (classificação para partículas mais finas)

H – $LL > 50$ (classificação para partículas mais finas)

Os mesmos autores citam ainda que a erodibilidade é baixa em solos bem graduados, e alta em areias finas e siltes uniformes. O teor de argila e a matéria orgânica mantêm uma relação inversa com a erodibilidade. Além disto, quanto maior o teor de umidade e quanto menor o índice de vazios menor a erodibilidade.

WISSMAR et al. (2004) determinaram índices de risco de erosão em bacias hidrográficas de Washington, EUA. Estes índices foram baseados em dados disponibilizados sobre tipo de solos, tipo de cobertura vegetal, uso do solo e clima. Os autores também avaliaram a relação entre o índice de risco de erosão e a quantidade de material sedimentado nos rios. Foram também utilizadas imagens de satélite. Os autores salientaram a importância da definição de um índice de risco de erosão para um melhor gerenciamento de uma bacia hidrográfica. O índice de risco de erosão foi definido pelos autores como:

$$\text{Índice de Risco de Erosão} = \Sigma (W_1X_1 + W_2X_2 + \dots + W_3X_3) \quad (2.2)$$

Onde:

X_i = fatores individuais;

W_i = peso atribuído ao respectivo fator.

Foram utilizadas seis categorias de índices de risco de erosão para a confecção de um mapa de susceptibilidade aos processos erosivos. As categorias variaram de 1 a 6. Quanto mais próximo de seis, maior o risco da ocorrência de um processo erosivo.

SALOMÃO (1999) propôs uma metodologia de confecção e cruzamento de cartas de solo e declividade, estabelecendo índices de erodibilidade para chegar a uma carta de susceptibilidade à erosão laminar. O autor atribuiu índices e classes de acordo com unidades pedológicas, como está apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classes de erodibilidade dos solos (SALOMÃO, 1999)

CLASSE	ERODIBILIDADE	UNIDADES PEDOLÓGICAS
1 Extremamente susceptível	10,0 a 8,1	Cambissolos, solos litólicos; podzólicos abruptos, textura arenosa média; areias quartzosas
2 Susceptível	8,0 a 6,1	Podzólicos não abruptos, textura; média/argilosa e textura média
3 Moderadamente susceptível	6,0 a 4,1	Podzólicos de textura argilosa
4 Pouco susceptível	4,0 a 2,1	Latossolo de textura média; latossolo de textura argilosa; terra roxa estruturada
5 Pouco a não	2,1 a 0	Solos hidromórficos em relevo plano

MORATO (1997) criou uma carta de fragilidade potencial dos solos do litoral sul de São Paulo. Ela foi gerada por meio da combinação das características dos solos e da declividade. Os solos foram classificados hierarquicamente em função de sua vulnerabilidade à erosão, considerando-se atributos como a estrutura, textura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade dos horizontes superficiais e subsuperficiais. Para tanto o autor elaborou uma tabela (Tabela 2.5) e a carta de suscetibilidades potencial foi gerada por meio da aplicação desta tabela. Os índices de fragilidade definidos pelo autor são os seguintes: 1 – muito fraco, 2 – fraca, 3 – média, 4 – forte, 5 – muito forte.

Tabela 2.5 – Classes de solos e de declividade hierarquizadas segundo o índice de susceptibilidade (MORATO, 1997)

CLASSES DE DECLIVIDADE	CLASSES DE SOLOS				
	ATÉ 6%	DE 6 A 12%	DE 12 A 20%	DE 20 A 30%	ACIMA DE 30%
Espodossolos	Muito fraca (1)	Fraca (2)	Média (3)	Forte (4)	Muito forte (5)
Organossolo	Muito fraca (1)	Fraca (2)	Média (3)	Forte (4)	Muito forte (5)

Cambissolos	Forte (4)	Forte (4)	Forte (4)	Forte (4)	Muito forte (5)
-------------	-----------	-----------	-----------	-----------	--------------------

VIANA (2000) criou um índice que tentasse refletir e quantificar espacialmente a problemática da erosão em Belo Horizonte. A autora afirma que a formulação ideal de um índice de vulnerabilidade à erosão deveria levar em conta todos os fatores mensuráveis que intervêm no processo erosivo. Para o caso de Belo Horizonte a autora contou com as seguintes informações para a composição do seu índice de vulnerabilidade à erosão:

- geologia: distribuição espacial dos diversos tipos de solos de alteração, suas espessuras e grau de alteração;
- morfologia: declividade e formas de relevo;
- vegetação: porte atual da vegetação;
- clima: precipitação anual máxima;
- intervenção antrópica

De todos os indicadores apontados para a composição do índice, VIANA (2000) cita que apenas a geologia apresenta fator absolutamente restritivo à ocorrência de erosão. Isto porque neste fator vai ser levado em conta a erodibilidade do material, ou seja, ele indica a predisposição do material à erosão. Os outros fatores podem contribuir ou não para a deflagração do processo erosivo, podendo inclusive não ser atribuído nota (nota 0). Portanto, a equação geral proposta para o cálculo do índice de vulnerabilidade à erosão em Belo Horizonte apresenta o fator geológico como um multiplicador ao somatório dos demais fatores:

$$\boxed{IVE = FG(FM + FV + FC + FPO)/4} \quad (2.3)$$

Onde:

IVE é o índice de vulnerabilidade à erosão;

FG é o fator geológico;

FM é o fator morfológico;

FC é o fator climático;

FPO é o fator padrão de ocupação.

Para cada fator citado na equação acima são distribuídos pontos variando de 0 a 1. Esta pontuação depende do quanto cada fator contribui para o desencadeamento de um processo

erosivo. Quanto mais próximo de 1, maior é o risco de erosão no que depende do fator em análise. O resultado é a formulação de um índice que também varia de 0 a 1. Portanto, para este índice, quanto mais próximo da unidade, maior a tendência da ocorrência de um processo erosivo.

2.5.2 Ensaios de avaliação da erodibilidade em forma direta e indireta

2.5.2.1 Execução de ensaios de avaliação direta da erodibilidade

1. Ensaio Inderbitzen

Preconizado por Inderbitzen em 1961, o ensaio consiste em simular um escoamento superficial sobre um corpo de prova, a uma dada vazão e inclinação do terreno, quantificando em tempos pré-determinados a perda de solo. Portanto o ensaio de Inderbitzen tem como objetivo medir a erosão de uma amostra seja esta compactada ou indeformada, sob diversas condições de declividade, vazão tempo e umidade (CAMAPUM DE CARVALHO et al 2006).

No Brasil, REGO (1978) foi pioneiro na introdução do ensaio. Este autor estudou as erosões superficiais de taludes em solos residuais de gnaisses no estado do Rio de Janeiro. Segundo BASTOS ET AL (1998), o ensaio de Inderbitzen constitui um ensaio simples e promissor na avaliação geotécnica da erodibilidade (K). A figura 2.3 ilustra o aparelho utilizado por BASTOS para a execução do ensaio.

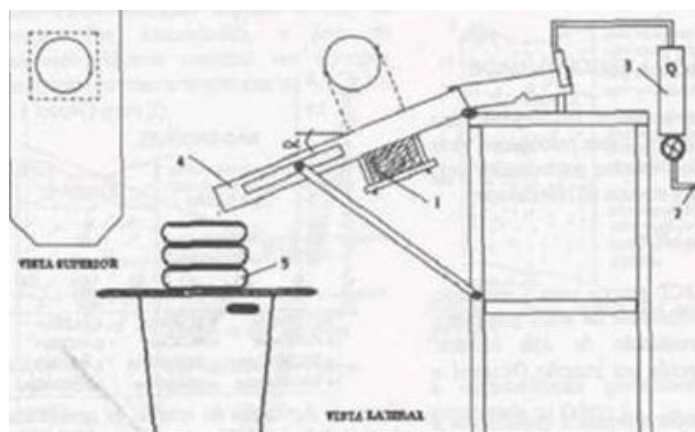


Figura 2.3 – Equipamento Inderbitzen (1988): LIMA, (2003)

FÁCIO (1991) Propõe mudanças no aparelho e a metodologia do ensaio de Inderbitzen. A partir de uma série de ensaios com variações nos valores de vazão, declividade da rampa e no tempo de ensaio e de saturação da amostra, este autor propõe a realização do ensaio sob condições normalizadas a saber:

- Vazão de 50 ml/s;
- Declividade de 10°;
- 15 minutos de embebedimento;
- Duração do ensaio de 20 minutos.

SANTOS (1997) indica que, visando melhorar a qualidade dos resultados obtidos com o aparelho utilizado por FÁCIO (1991), ele realizou algumas mudanças e procedeu o autor a descrever estas mudanças. A rampa sobre a qual incide o fluxo de água teve sua largura reduzida para 100 mm e dessa forma, a vazão também diminuiu para 17,5 ml/s. Com as modificações sugeridas, o tempo de duração do ensaio passou de 20 para 30 minutos, resultando numa melhor caracterização do comportamento entre a curva de perda de solo com o tempo de duração previsto para o ensaio.

MOTTA (2001) também utiliza o ensaio Inderbitzen em uma tentativa de simulação de chuva. O autor instala um chuveiro a uma altura de 38 cm da face da amostra, acoplado ao aparelho Inderbitzen, com declividade de rampa de 10° e escoamento superficial, limitando a quantidade de agentes atuantes e, conseqüentemente, de variáveis. Ao simular o ensaio, somente com precipitação sem escoamento superficial, nos solos das voçorocas de Campo Grande, o referido autor observou que durante vinte minutos de precipitação, o corpo de prova perdeu mais partículas de solo que no ensaio de Inderbitzen clássico, o ensaio foi realizado em 30 minutos. E, conclui que o talude também pode sofrer a influência das gotas de chuva, destacando partículas que ficam, por tanto, mais susceptíveis ao carregamento pelo escoamento superficial, também FREIRE (2001) apresenta um aparelho Inderbitzen que simula além do escoamento superficial o impacto da gota de chuva. O autor denomina este aparelho como Inderbitzen modificado Figura 2.4. O corpo de prova não é confinado, podendo ser constituído por uma amostra indeformada em bloco, ou um cilindro compactado e seccionado longitudinalmente ao meio. O corpo de prova é posicionado sobre uma grade tela inclinada, de maneira que o corpo de prova fique também inclinado e forme uma pequena rampa. Tubos perfurados posicionados acima do corpo de prova criam escoamentos verticais e diretos em diversos pontos do solo, provocando impacto e erosão. O excesso de água que não chega a se infiltrar no corpo de prova provoca a formação de um escoamento superficial sobre o mesmo, complementando a simulação da erosão pluvial. Essas são as diferenças com o antigo ensaio.

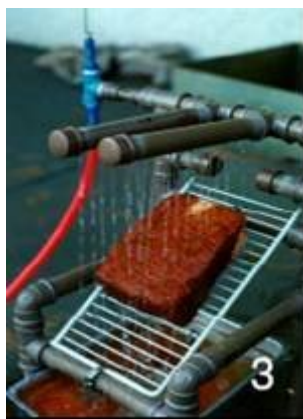


Figura 2.4 – Ensaio de Inderbitzen modificado: UNISUL (Universidade do sul de Santa Catalina)

Para a execução do ensaio foi colocada uma tela metálica apoiada no aparelho Inderbitzen, formando uma rampa com a mesma inclinação do ensaio anterior. A vazão utilizada foi um pouco menor à vazão utilizada nos ensaios Inderbitzen que simulavam somente escoamento, pois a energia erosiva do impacto das gotas é maior que a do escoamento superficial. No restante, o ensaio foi realizado de forma análoga ao Inderbitzen, clássico incluindo os intervalos de tempo para troca de peneiras e a duração total do ensaio. Procurou-se realizar também os cálculos de maneira similar. Porém, a área exposta à erosão, que no ensaio Inderbitzen clássico é igual à área interna do anel que contém a amostra, no Inderbitzen Modificado pode gerar dúvidas. Por esse motivo é conveniente calcular a erosão em porcentagem de peso, através da razão entre o peso de material retido em cada peneira depois de seco e o peso total seco do corpo de prova antes do ensaio, calculado em função de seu peso e umidade. A consideração do solo fino que passa na peneira é idêntica a do ensaio Inderbitzen. antigo Diferenças de resultados referem-se a influência do empastilhamento e da retração.(FREIRE 2001)

FRAGASSI (2001) realizou mudanças de caráter construtivo ao aparelho Inderbitzen utilizado por FACIO (1991) e SANTOS (1997). Ele alterou as dimensões das amostras de 100 mm a 152 mm de diâmetro, esta mudança o autor fez para ter a certeza que o fluxo de água escoasse somente sobre a amostra. Para manter a mesma vazão superficial por área de amostra proposta por SANTOS (1997), a vazão de ensaio foi aumentada de 17,5 ml/s a 25 ml/s sendo que os demais parâmetros são os mesmos que forem utilizados por SANTOS 1997. O autor aclara que “é notório a evolução do aparelho de Inderbitzen desde sua criação, em 1961. Na UnB. Vários trabalhos foram realizados utilizando-se o aparelho Inderbitzen na caracterização

da erodibilidade do solo, como o de FÁCIO (1991) e o de SANTOS (1997). Em tais pesquisas foram propostas mudanças na confecção e na metodologia do ensaio Inderbitzen que proporcionarem um grande ganho na rapidez de ensaio e na economia de água, sem o comprometimento dos resultados”.

Segundo CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) os resultados obtidos através do aparelho proposto por MOTTA (2001), que desenvolveu uma tentativa de simulação do efeito causado pelas gotas da chuva no processo erosivo, são de quatro a sete vezes menores que os resultados obtidos no ensaio Inderbitzen sim simulação de chuva.

Depois de 10 anos que o pesquisador REGO (1978) iniciou o uso do ensaio Inderbitzen no Brasil na avaliação de erodibilidade, o ensaio sofre mudanças na sua execução já seja nas dimensões das amostras, calha do aparelho e inclusão de simulação de chuva através de um chuveiro. Mudanças que favorecerem obter maior eficiência na determinação da erodibilidade. Os ensaios executados nesta pesquisa forem feitos através do aparelho Inderbitzen proposto por FRAGASSI (2001) neste modelo de aparelho se observou que ainda existia a dificuldade de controlar com maior precisão a vazão do ensaio, já que o tamanho do reservatório que alimenta ao ensaio no foi projetado para ensaios que durem, mas de 30 minutos, tendo em consideração que a duração do ensaio depende do tipo de solo. Esta limitação do reservatório ocasionou que durante a execução do ensaio ficassemos enchendo o reservatório para não parar o ensaio. Por esta experiência acredito que o aparelho Inderbitzen proposto por MOTTA (2001) e FREIRE (2001) seja, mas recomendável para execução do ensaio Inderbitzen, já que através da chuva simulada existira um melhor controle do fluxo de escoamento. Além disso este aparelho permitira analisar o impacto das gotas de chuva.

2. Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação vem sendo utilizado no Brasil desde (1958) pela engenheira Anna Margarita da Fonseca quando estudava solos para fins de fundação durante a construção de Brasília (CAMAPUM DE CARVALHO et al 2006)

O ensaio de desagregação tem por objetivo verificar a estabilidade de uma amostra de solo indeformada quando a mesma é imersa em água destilada, independente da dispersão do material. O resultado deste ensaio é puramente qualitativo. A relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade é evidente. LIMA (2003)

O ensaio de desagregação pode ser executado por dois métodos: o Método da Imersão Parcial e método de imersão total. O primeiro método consiste em colocar a amostra sobre uma pedra porosa com o nível de água sendo mantido na altura da base da amostra por um período de 30 minutos. A seguir, a altura de água é aumentada sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total da amostra, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total o ensaio prossegue até o período de 24 horas. (SANTOS 1997). O método de imersão total consiste em colocar a amostra sobre a pedra porosa com o nível de água mantido na altura da base da amostra por um período de 30 minutos, depois de este tempo o nível de água é aumentada de forma imediata até que a amostra fique totalmente imersa em água. O ensaio continua por 24 horas (CAMAPUM DE CARVALHO 2006)

SANTOS (1997) utilizou este ensaio para observar a existência de alguma correspondência entre os ensaios de desagregação e os ensaios de Inderbitzen. Para isso utilizou amostras em forma de cubos com 6 cm de lado que forem colocadas em duas bandejas que continham água. Na primeira bandeja o corpo de prova foi submetido ao Método de Imersão Total, que consiste em colocar a amostra sobre a bandeja com água, de modo que a amostra fique totalmente submersa em água, observando-se suas reações ao processo de submersão durante 24 horas. Já na segunda bandeja, executou-se o Método de Imersão Parcial descrito acima.

Ao término do ensaio, além da verificação da desagregabilidade, pôde ser feita a classificação quanto à reação a inundação, de acordo com os seguintes comportamentos:

- Sem resposta: quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais;
- Abatimento (Slumping): quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado;
- Fraturamento: quando a amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas;
- Dispersão: quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma “nuvem” coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) indicam que o ensaio de degradação oferece um bom índice qualitativo na previsão do comportamento dos solos com relação à erosão e seus mecanismos. Estes ensaios, apesar de serem simples, requerem a padronização do seu uso, principalmente no que concerne à forma do corpo de prova, à qualidade do fluido de saturação e às condições de imersão, que podem ser parcial e total.

2.5.2.2 Execução de ensaios para avaliação da erodibilidade de forma indireta

1) Limites de Atterberg ou de consistência

Os Limites de Atterberg são estados físicos do solo, que se relacionam com as características de compressibilidade, permeabilidade e resistência dos solos, parâmetros geotécnicos utilizados na análise da erodibilidade.

CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) indicam que na análise da erodibilidade dos solos saprolíticos foi observado que nem sempre foi possível estabelecer relação direta entre a plasticidade e o potencial de erosão. Aspectos mineralógicos e texturais como a quantidade de oxi-hidróxidos de ferro influenciam na análise da erodibilidade. O autor assinala ainda que os oxi-hidróxidos apresentam com freqüentemente a presença do mineral quartzo que estaria indicando que o solo não é de fácil intemperização.

2) Granulometria

A caracterização dos solos em termos de textura é realizada através do ensaio de granulometria. Este parâmetro é fundamental, já que os diâmetros das partículas do solo influenciam na sua desagregação e transporte. (SANTOS et al 2002).

FRAGASSI (2001) aponta que a granulometria é a propriedade mais estudada dentre as características físicas do solo com respeito a processos erosivos, VARGAS (1977), FÁCIO (1991), SANTOS (1997) e LIMA (2003) afirmaram que solos mais erodíveis são aqueles que apresentam partículas da ordem de areia fina ou silte e pouca quantidade de argila.

3) Curvas de retenção de água

A curva de retenção de água do solo, também denominada curva característica de sucção matricial ou curva característica, é a expressão gráfica que representa a relação entre a sucção matricial e o teor de umidade ou grau de saturação do solo, este podendo ser expresso em termos de volume ou em peso. (BARROS, 2005). A sucção matricial está influenciada pelos tamanhos dos poros do solo, partindo do princípio de que a porosidade é um fator muito importante nos solos não saturados. A distribuição dos poros é caracterizada pela presença marcante de macro e de micro poros. Em consequência a erodibilidade estará influenciada por

elevados índices de vazios e a presença de macro poros. Características físicas que facilitam a infiltração da água da chuva no solo.

A sucção esta associada à energia potencial da água do solo. É definida como a interação solo-água. A sucção tem sido objeto de estudo desde o início do século XIX, com interesse principal na agricultura. Mas somente na década de 50 e 60 é que se avançou no estudo da influência da sucção no comportamento de deformabilidade e de resistência dos solos não saturados. (GERCOVICH 2001)

Para obtenção da curva de retenção em laboratório são utilizados os procedimentos de secagem e umedecimento

- **secagem** (ou desidratação): consiste em secar gradualmente a amostra previamente saturada, expondo-a a potenciais matriciais crescentes, o que implica ir diminuindo a umidade do solo;
- **umedecimento** (molhamento ou hidratação): consiste em hidratar uma amostra de forma gradual, incrementando-se umidade.

As medidas de sucção, tanto no laboratório como em campo, esbarram em uma série de dificuldades experimentais, e comumente deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio como: translação de eixos, a osmótica, controle da sucção por imposição da umidade relativa, papel filtro e tensiômetros de alta capacidade. (BARROS 2005)

O método de medição de sucção com papel filtro fornece resultados satisfatórios por meio de procedimentos simples e envolvendo custos relativamente baixos (VILLAR, 2002). Este método foi normalizado pela norma americana ASTM D5298-92. A pesar de existir esta norma, acontecem muitas divergências em meio aos pesquisadores no seguimento do procedimento padrão para a realização dos ensaios (BARROS 2005). VILLAR (2002) manifesta que, basicamente, este método segue o principio de que o papel filtro entra em equilíbrio com o solo estando em contato com este. Quando não houver mais fluxo entre ambos, o valor da sucção no papel filtro e no solo será o mesmo, porém as umidades serão diferentes. Portanto, através de uma curva de calibração de sucção do papel filtro, determina-se a sucção no solo. (VILLAR, 2002)

Existem vários fatores que interferem no formato da curva de retenção de água do solo, dentre os quais se destacam: distribuição dos poros, a estrutura e a mineralogia das partículas e a distribuição granulométrica.

3.1) Distribuição dos poros

Com relação aos solos arenosos, devido à maioria dos poros serem relativamente grandes, verifica-se que a uma dada sucção matricial, muitos poros se esvaziam e poucos ainda podem reter água. Porém nos solos argilosos a capacidade de retenção de água é maior, e percebe-se que a cada sucção matricial, apenas algumas parcelas dos poros drenam, de forma que ainda permanece certa quantidade cheia de água. Portanto nos solos argilosos não se verificam variações bruscas na curva de retenção (BARROS 2005)

3.2) Estrutura do solo

A estrutura do solo é outro fator que afeta a forma da curva de retenção. Na figura 2.5 estão representadas duas curvas de retenção de um mesmo solo, a primeira curva ilustra o comportamento do solo em condições naturais e a segunda apresenta o comportamento do solo compactado.



Figura 2.5 – Efeito da estrutura do solo na curva de retenção Fonte: BARROS (2005)

Segundo BARROS (2005), SOARES (2005) e SOTO (2004) pelos trabalhos realizados por KOOREVAAR et al. (1983), CRONEY & COLEMAN (1961) pode-se verificar que, com um mesmo valor de sucção, as argilas apresentam um maior conteúdo de água volumétrico, ou

seja, uma maior capacidade de retenção de água em relação às areias. A Figura 2.6 ilustra várias curvas de retenção para diferentes tipos de solo.

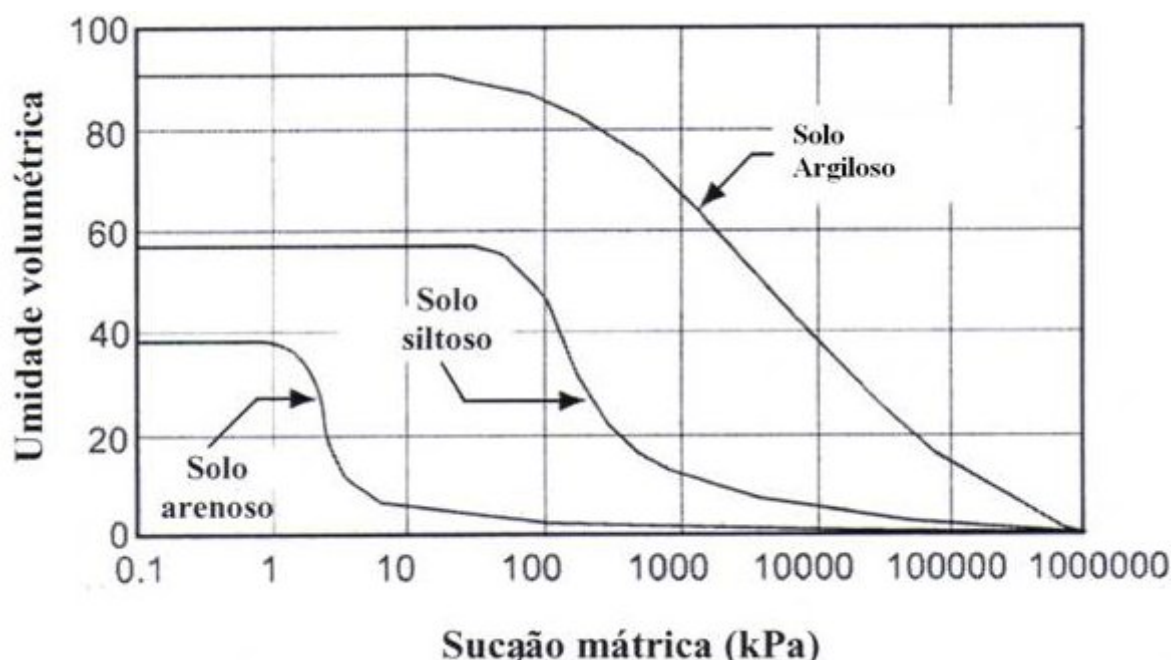


Figura 2.6 – Curvas características típicas de diferentes tipos de solos. (VILLAR, 2002)

BARROS (2005) manifestou que a curva de retenção pode ser representada mediante relações empíricas, a partir dos dados de sucção matricial e umidade volumétrica obtidos em ensaios de laboratório, como por exemplo, o método do papel filtro. Diversas relações empíricas são comumente usadas para estimar a curva de retenção de água. Algumas delas são apresentadas a seguir:

• **VAN GENUTCHEN (1980)**

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (2.4)$$

Sendo $m = 1 - 1/n$

• **FREDLUND, XING e HUANG (1994)**

$$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a_r}\right)^n\right)} \right]^m \quad (2.5)$$

• **BROOKS e COREY (1966) in FREDLUND & RAHARDJO (1993)**

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{\psi_a}{\psi} \right] + \theta_r \quad (2.6)$$

Em que:

ψ - sucção matricial [L];

ψ_a - sucção matricial que corresponde à entrada de ar (*air entry*) [L];

ψ_r - sucção matricial que corresponde à umidade volumétrica residual [L];

θ - umidade volumétrica [L³/L³];

θ_s - umidade volumétrica de saturação [L³/L³];

θ_r - umidade volumétrica residual [L³/L³];

α - parâmetro de ajuste da curva [1/L];

λ - parâmetro de ajuste depende do tipo de solo;

e - 2,71828;

a_r - valor aproximado da sucção matricial de entrada de ar [L];

n, m - parâmetros de ajuste; e

10^6 - valor limite de sucção matricial para qualquer tipo de solo [F/L²].

A curva característica fornecerá parâmetros com os quais se pode construir a curva característica de condutividade hídrica não saturada. Para obtenção desta curva precisa se conhecer a sucção matricial (que pode ser obtida pela técnica do papel filtro).

A partir desta curva característica de condutividade hídrica pode-se observar os valores em ordem de grandeza da condutividade hidráulica não saturada em relação à sucção. Este parâmetro permite conhecer a textura do solo e sua capacidade de retenção de água, propriedades que influenciam na erodibilidade. A Figura 2.7 ilustra uma curva de condutividade hidráulica não saturada de um solo residual composto por areia fina a média argilosa, de uma região próxima da cidade de São Carlos - SP que, segundo CALLE (2000), foi obtida com a utilização do permeâmetro Ghelph e a fórmula desenvolvida por REYNOLDS e ELRICKS (1985). (BARROS 2005)

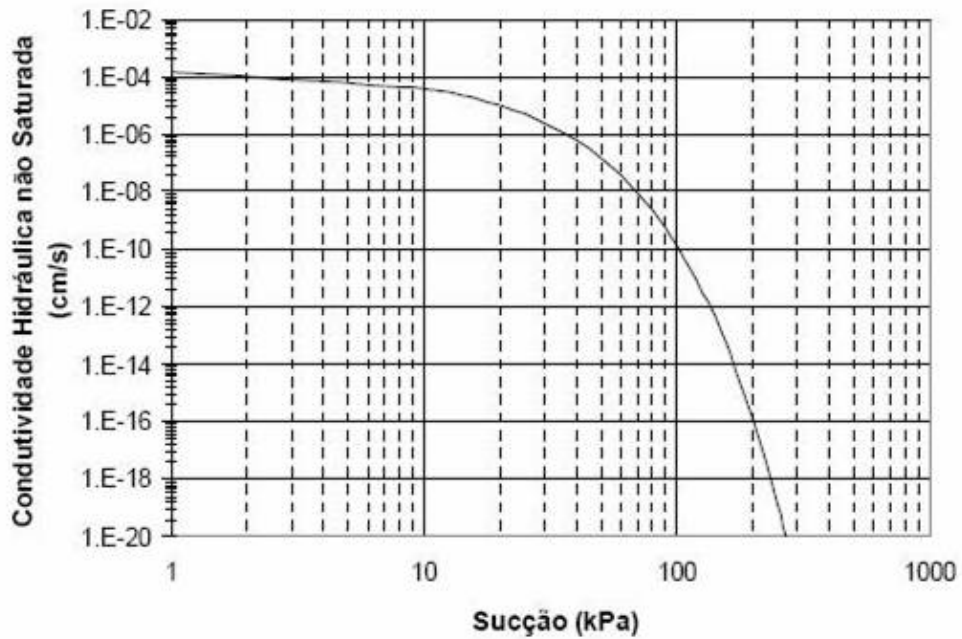


Figura 2.7 – Curva ilustrativa de condutividade hidráulica não saturada (BARROS, 2005)

A primeira proposta para a determinação do coeficiente de condutibilidade hidráulica foi apresentada por CHILDS & COLLIS (1950) apud BARROS (2005). O método consistia na variação do tamanho dos poros partindo do princípio de que a porosidade é um fator importante na análise dos solos saturados e as distribuições dos poros influenciarão no potencial de capilaridade (sucção matricial). Este método ao longo do tempo sofre modificações. Diversos autores têm proposto formulações alternativas para a função condutividade hidráulica. Muitas delas apoiam-se na curva de retenção de água no solo, como a de VAN GENUCHTEN (1980):

$$K(\psi) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} * \left[1 - \left(1 - \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^2 \quad (2.7)$$

Onde:

$k(\psi)$: coeficiente de condutividade hidráulica não saturada [L/T];

k_s : coeficiente de condutividade hidráulica saturada [L/T];

θ_s : umidade volumétrica saturada [L³/L³];

θ_r : umidade volumétrica residual [L³/L³];

n e m : constantes empíricas;

VERTAMATTI et al (1998) apresenta a elaboração de um ábaco de erodibilidade de solos tropicais. Este ábaco está baseado no tratamento de cerca de 40 solos diferentes coletados em estradas de São Paulo. Nestes solos, foram feitos ensaios de sucção e ensaios da metodologia MCT-M. Os ensaios de sucção foram executados via secagem, com um equipamento de sucção do tipo Panela de Richards obtendo as curvas de retenção de umidade (ou de sucção). Destas curvas foi retirado o parâmetro (θ) o qual, segundo o autor, traduz em síntese, a inclinação da curva de sucção no seu trecho mais crítico que para sua análise ficava de zero a 10 Kpa, onde ocorreu elevada extração de água para pequenas variações de tensão de sucção. Entendendo que a sucção é a quantidade de energia que permite avaliar a sua capacidade de reter água de um solo. A sucção é o parâmetro físico do solo que influencia de forma direta na resistência a processos erosivos.

Para a elaboração do ábaco, VERTAMATTI et al (1998) estabeleceu relações entre o parâmetro (θ) obtido na sucção e o parâmetro e' (inclinação da curva de deformabilidade para mini-mcv igual a 10), que permite obter o caráter pedogenético dos solos. O autor conclui dizendo que o ábaco construído por ele poderá ser utilizado de modo a prever erodibilidade antes de obras civis serem construídas. A Figura 8 ilustra o ábaco de erodibilidade de solos tropicais elaborado por VERTAMATTI et al (1998).

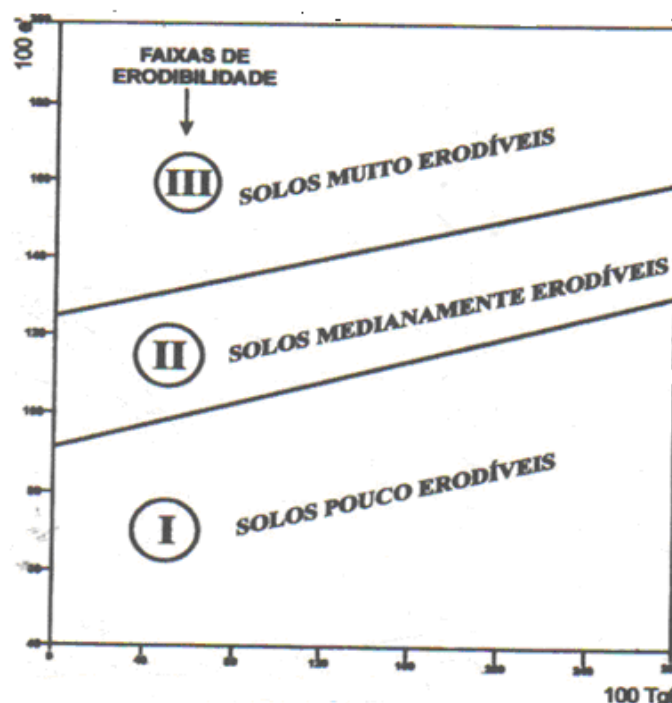


Figura 2.8 – Ábaco de erodibilidade de solos tropicais VERTAMATTI et al (1998)

4. Curvas de secagem

Curvas de secagem é o nome dado às relações entre os índices físicos e o teor de umidade e grau de saturação, Os índices físicos relacionam-se entre os mesmos e também com a resistência á tração através destas relações é descrita os processos de contração a que é submetido o solo durante o processo de ressecamento. Uma das conseqüências diretas de este processo de ressecamento é a formação de trincas no solo (VILLAR 2002)

A figura abaixo ilustra as faixas de contração que sofre o solo no processo de ressecamento. A faixa correspondente à contração normal seria aquela lineal que começa com altos teores de umidade se caracteriza pelo fato que durante a contração o volumem de solo contraído é igual ao volumem de água evaporada. A contração residual corresponde à faixa onde se mostra uma redução do volume de solo implicando um aumento do volume de ar que ira a substituir o fluido evaporado. Agora a faixa correspondente à contração zero é aquela onde o solo não mais varia de volume atingindo sua densidade máxima para esta situação mesmo havendo continuidade de perda de fluido por evaporação (VILLAR 2002).

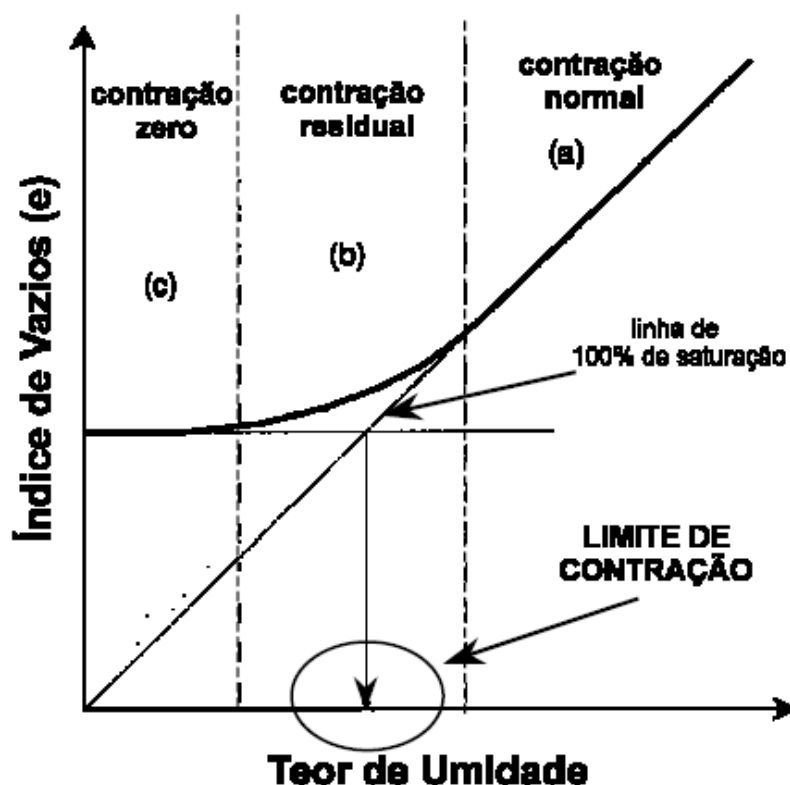


Figura 2.9 – Etapas do processo de contração (VILLAR 2002)

Segundo SILVA et al (2003) indica que o fenômeno do ressecamento é típico de solos finos e consiste na contração do solo devido à perda de água por meio da evaporação na superfície e/ou drenagem (base), sendo o principal responsável pelo mecanismo, a sucção que é gerada enquanto o solo se resseca.

Segundo SILVA et al (2003) as curvas de secagem são muito úteis na análise da erodibilidade já que permitem observar o comportamento dos índices físicos quando o solo é submetido a uma variação de umidade, Para a análise da erodibilidade as curvas de secagem fornecem parâmetros como o ponto de desaturação e teor de umidade de contração que permitem descrever as mudanças do comportamento do solo no processo de secagem. A variação de volume dos solos devido à contração é representada de uma maneira muito útil através da relação índice de vazios e o teor de umidade (VILLAR 2002)

A capacidade do solo de contrair dependeria do tipo de solo composição mineralógica, estrutura do solo e teores de umidade final e inicial, o limite de contração é influenciado pela distribuição granulometria e não tem relação com suas características de plasticidade. (VILLAR 2002).

5. Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Dentre as propriedades físicas mais relevantes para a análise da erodibilidade, destacam-se a porosidade e a distribuição dos poros. A concentração de macroporos interconectados no solo interfere diretamente em parâmetros como sucção, coesão e permeabilidade, todos relevantes para o entendimento dos processos erosivos. (CAMAPUM DE CARVALHO et al 2006)

A técnica de porosimetria por instrução de mercúrio mostrou-se bastante adequada para a avaliação do tamanho, volume e distribuição dos poros. Os gráficos de porosimetria de mercúrio permitem avaliar a tendência dos índices físicos (SOTO 2004)

SOTO (2004) utilizou esta técnica para determinar a distribuição do tamanho de poros no entendimento da importância do espaço poroso na análise da erosão, o parâmetro envolvido na técnica de instrução de mercúrio foi a distribuição volumétrica por tamanho dos poros, parâmetro que quando é correlacionado com os diâmetros dos poros permite obter uma curva que ilustra a distribuição dos diâmetros dos poros. A determinação do volume de poros é calculada através da porosidade interconectada. A quantidade e qualidade dos poros

influenciam na condutibilidade hidráulica do solo, parâmetro que indica a capacidade de retenção de água presente no solo (CAVICHIOLO 2005). A autora assinala que em solos onde a presença de macroporos é maior a movimentação da água no solo será mais condutiva já que dispõe de maior área de transporte. A capacidade de retenção de água e a infiltração são influenciadas pela distribuição e dimensões dos poros e estes parâmetros interferem diretamente na suscetibilidade do solo a processos erosivos.

6. Caracterização Química

LIMA (2003) manifesta que a análise química e mineralógica no meio geotécnico são realizadas para a avaliação da intemperização dos solos. A autora utilizou este tipo de ensaio no trabalho feito com solos do distrito Federal onde verificou a influência das características químicas sobre a erodibilidade. Esses ensaios tem como metodologia a medição do pH (grau de acidez) presente no solo e a utilização da solução KCL (Cloreto de Potássio), além da medição do teor cálcio (Ca), sódio (Na), magnésio (Mg). A autora concluiu indicando que os solos que apresentam um pH ácidos são geralmente caracterizados por apresentar uma desagregação de partículas não em forma alarmante mas que, infelizmente, este condicionante natural do solo é afetado pelo lançamento indevido de drenagens de águas pluviais com pH geralmente superior ao do solo, favorecendo, assim, a sua desagregação e o mais rápido avanço da erosão.

FRAGASSI (2001) fez testes de análises químicas de sódio, potássio e fósforo no solo demonstrando através de estes testes que a absorção de sódio pelo solo influencia na erodibilidade, expansibilidade e teor de matéria orgânica. Segundo o autor a resistência trativa dos solos diminuiu com o aumento da relação de absorção de sódio o que faz que as amostras sejam mais erodíveis

7. Caracterização Mineralógica

LIMA (2003) indica que o conhecimento da composição mineralógica dos solos é importante para a compressão das características físicas. Os métodos de identificação mineralógica dos agregados, mas comuns são: difração de raios-x análise termodiferencial e gravitacional, o microscópio eletrônico e os métodos químicos. O pesquisador LEW et al (1998) através da Microscopia Eletrônica de varredura identificou nos solos residuais de filito na região de Cuiabá a presença de minerais argílicos como Illita e Esmectita que pertence ao grupo da

Montmorilonita que, segundo o autor, é o mineral mais expansivo encontrado no solo. O autor conclui indicando que estes minerais ocasionam que o solo se trinque após o reforço estrutural, característica típica de solos expansivos. O trincamento do solo influencia diretamente na erodibilidade do solo.

8. Ensaio de compressão simples

Este ensaio objetiva a determinação da resistência à compressão não confinada, isto é, o valor da tensão que rompe um corpo de prova de solo cilíndrico submetido a um carregamento axial, sendo a tensão de confinamento nula.

Os ensaios de resistência à compressão simples foram utilizados por ALCÂNTARA et al (1997). O ensaio foi realizado para corpos de prova na condição de umidade natural e de saturação. Esta saturação foi obtida por capilaridade para um período de 3 horas.

Os resultados obtidos pelo autor através da realização de ensaios de resistência à compressão simples, executados em amostras com diferentes umidades, evidenciam que os valores de resistência alcançados quando o corpo de prova ficava saturado é menor do que aqueles obtidos para o ensaio na condição natural. As maiores perdas de resistência ocorrem para amostras de solo de alta erodibilidade.

11 Ensaio de cisalhamento direto

BENDER (1985) apud BASTOS (1999) foi pioneiro ao explicitar a erosão como um problema de resistência ao cisalhamento em função do estado de tensões e do teor de umidade durante a infiltração da água da chuva nos terrenos. BASTOS (1999) manifesta que a realização do ensaio de cisalhamento direto é suficiente para estabelecer parâmetros de resistência que permitam a análise da erodibilidade do solo.

GUIMARÃES (2002) realizou ensaios de cisalhamento direto e triaxiais para o perfil de intemperismo de um solo do Distrito Federal verificando que os valores de coesão são marcadamente distintos ao se comparar. Segundo o autor, esta variação se origina pelas condições do ensaio.

COELHO NETO (1998) manifesta que a erosão ocorre sempre quando a força de cisalhamento provocada pelo escoamento superficial excede a força de resistência dos materiais.

10. Ensaio de compressão Diametral o ensaio Brasileiro

Segundo SOARES, (2005) o ensaio de compressão Diametral foi originalmente desenvolvido na década de 50 para avaliar a resistência à tração do solo não saturado. A resistência à tração de um solo é uma propriedade do material que está influenciada pelas ligações de seus agregados, partículas finas e flóculos e depende da sucção presente em sua estrutura.

Os pesquisadores mexicanos ANGUAS et al (2005) citam que os resultados dos ensaios de laboratório realizados por FAVARETTI demonstram que o resultado de resistência de tração determinada através do ensaio brasileiro é similar à resistência de tração determinado através de outro método denominado ensaio Doble Punzon.

Segundo ANGUAS et al (2005) a resistência à tração obtida através dos ensaios de compressão diametral está diretamente relacionada com a coesão do solo, sendo esta influenciada pelo grau de saturação (ou teor de umidade gravimétrico) e por características químicas mineralógicas e estruturais do material. BASTOS et al (2001) assinala que a coesão é a propriedade do solo que influencia em forma direta na suscetibilidade a processos erosivos.

11 Ensaio de classificação do tipo MCT

Esta metodologia foi proposta por NOGAMI & VILLIBOR (1981) e baseia-se no princípio de que os índices classificatórios tradicionais não podem ser aplicados diretamente aos solos tropicais. A técnica permite avaliar propriedades fundamentais dos solos utilizando corpos de prova de dimensões reduzidas compactadas. A técnica inicialmente foi desenvolvida para estudos rodoviários. Essa metodologia passou a ser utilizada para outros fins, como o ensaio de perda de massa por imersão em água, sendo parte integrante da metodologia (NOGAMI & VILLIBOR, 1995), que em conjunto com o ensaio de compactação do procedimento de mini-MCV (Moisture Condition Valuer), permite distinguir os solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não lateríticos, bem como características de erodibilidade que podem ser comparadas com a das amostras indeformadas, permitindo uma avaliação da estrutura natural no potencial de erosão.

Procedimento do ensaio: o corpo de prova compactado é parcialmente extraído de seu molde, de maneira que fique saliente 10 mm (5 mm para \varnothing 26 mm) e, em seguida, submerso em água, em posição horizontal. Recolhe-se a parte eventualmente despreendida e determina-se a massa seca. A perda de água por imersão é expressa em porcentagem relativamente à massa seca da parte primitivamente saliente do corpo de prova.

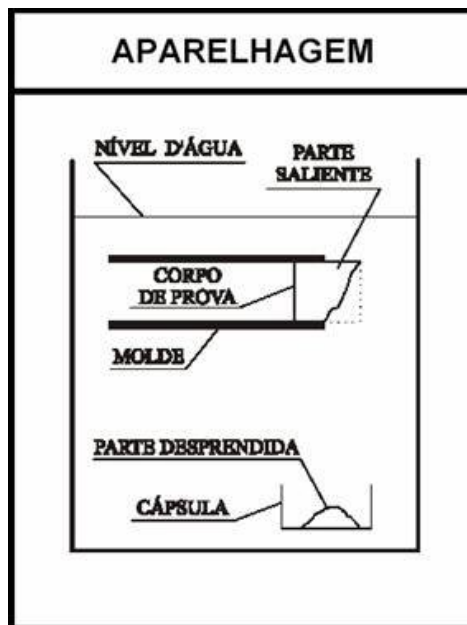


Figura 2.10 – Esquema do ensaio de perda de massa por imersão (LAFAYETTE ET AL 2005)

LAFAYETTE et al (2005) indica que a metodologia MCT é considerada atualmente como promissora na avaliação qualitativa da erodibilidade de solos residuais.

2.5.3 Modelos de previsão de erosão

A modelagem dos processos de erosão consiste em descrever matematicamente a desagregação, transporte e deposição das partículas de solo. LIMA (2003) cita três razões para modelar o processo de erosão dos solos: os modelos podem ser usados para estimar a perda de solo, como também podem ser usados para predizer onde e quando ocorrerá o processo de erosão, também os modelos podem ser usados como ferramentas no entendimento do processo de erosão. Neste trabalho serão avaliados alguns os modelos utilizados para estimar a perda de solo. Tais como Equação universal de perda de solo (EUPS), e a equação de perda de solo modificado.

2.5.3.1 Equação universal da perda de solo (EUPS)

A equação universal de perdas de solo, EUPS, foi desenvolvida originalmente nos Estados Unidos e, portanto, seus fatores apresentam-se em unidades do Sistema Inglês (WISCHMEIER & SMITH). Atualmente essa equação vem obtendo grande aceitação entre os pesquisadores brasileiros e do mundo como um valioso recurso para o planejamento de controle da erosão do solo e sua aplicação já ultrapassou as fronteiras do continente americano, sendo adotada em vários países (SILVA, 2002). Segundo D'AGOSTINI (1999) este modelo matemático está sendo utilizado desde a década de 50 e de 60. E pode ser definida pela relação:

$$E = R.K.LS.C.P \quad (2.8)$$

Onde:

R: fator chuva ou índice de erosão pela chuva (MJ.mm/hab.h.ano);

K: fator de erodibilidade do solo (t.ha.h/ha.MJ.mm);

L: fator comprimento do declive (adimensional);

S: fator grau de declive (adimensional);

C: fator uso e manejo (adimensional);

P: fator de prática conservacionista (adimensional).

A determinação dos valores de perda de solo provocados pela erosão laminar, está representada em t/ha, e é realizada a partir de cálculos dos índices de cada componente da equação.

- FATOR R

Esse fator pode ser calculado de dados de pluviômetros, segundo modelo proposto por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992) que é apresentado na equação abaixo. Além disso, designa o valor da erosão por “embate” ou “pluvial” ocorrida em locais onde o solo está desprotegido. Também conhecido como INDICE DE WISCHMEIER. Segundo WISCHMEIER & SMITH (1978), a perda de terra é diretamente proporcional a um parâmetro da chuva, o EI_{30} , apresentado na pela equação abaixo.

$$EI_{30} = E_c \times I_{30} \quad (2.9)$$

Onde:

E_c : energia cinética;

I_{30} : intensidade máxima da chuva em um intervalo de 30 min.

O produto da energia cinética e a intensidade máxima da chuva em 30 minutos medem o efeito de como a erosão por impacto, o salpico e a turbulência se combinam com a enxurrada para transportar as partículas de solo desprendidas.

A erosividade da chuva é variável de acordo com a sua intensidade, atribuindo-se valores a R conforme Tabela 6. O fator de erodibilidade das chuvas R pode ser mapeado, utilizando-se o mesmo método aplicado das isoietas, ou seja, em locais, que possuam pluviógrafos pode-se obter o valor de R, assinalando-se os pontos no mapa da região e interpolando-os, dando origem às linhas isoerodentes ou de mesma erosividade. Efetua-se esse mapeamento da erosividade para valores médios anuais, sendo muito usual em países que utilizam a Equação Universal de perdas de Solo (OLIVEIRA 1996).

Tabela 2.6 – Variação da Erodibilidade da Chuva

Valores de R	Grau de Erosividade
$R < 250$	Fraca
$250 < R < 500$	Moderada
$500 < R < 750$	Moderada a forte
$750 < R < 1000$	Forte
$R < 1000$	Muito Forte

- FATOR K

O fator K pode ser determinado diretamente no campo com chuva natural ou simulada em parcelas padrões ou por determinações indiretas, empregando-se métodos empíricos. Quando determinado em parcelas padrões (WISCHMEIER, ET AL, 1959), o valor obtido é considerado como valor real da erodibilidade do solo. As propriedades do solo que influenciam a erodibilidade pela água são aquelas que:

- a) afetam a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água;
- b) resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento.

A erodibilidade do solo é uma característica inerente a ele, sendo definida como a sua susceptibilidade à erosão. Este valor pode ser obtido diretamente através de ensaios de laboratório e campo ou através de métodos indiretos. WISCHMEIER & SMITH (1978) propõem o uso de um nomograma para determinação deste valor Figura 2.11, construído com base na equação abaixo:

$$K = \frac{2,1M^{1,14}10^{-4}(12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)}{100} \quad (2.10)$$

Onde:

K: índice de erodibilidade do solo

a: % de matéria orgânica

b: classe de estrutura do solo

c: classe de permeabilidade do solo

M: parâmetro que representa a textura do solo dado em %

M= (% silte + % areia muito fino)* (100 - % argila)

DRENARDIN (1990) estimou o fator K de 31 solos do Brasil através de parâmetros físicos e químicos. Ele concluiu que as variáveis mais significativas para a estimativa do fator K foram: a permeabilidade, os teores de alumínio, a porcentagem de matéria orgânica e a fração areia.

BERTONI & LOMBARDI NETO (1993) estabeleceram para vários solos o valor de K utilizando a equação de abaixo, bem como de sua tolerância de perda.

$$K = \left[\frac{(\text{ArgilaNatural} / \text{Argila})}{(\text{Argila} / \text{UE}) \times (1/9,81)} \right] \quad (2.11)$$

Onde:

Argila natural = argila dispersa em água (%);

Argila = argila dispersa em soda (%);

UE = umidade equivalente ou equivalente de umidade (%).

DENARDIM (1990) estabeleceu um modelo para determinar o fator K através da equação abaixo indicada que foi modificado por LRVY (1995) que é o seguinte:

$$k = 7,48 \times 10^{-6} \times M + 4,48059 \times 10^{-3} \times Pe - 6,31175 \times 10^{-2} \times DMP + 1,039567 \times 10^{-2} \times R1 \quad (2.12)$$

Onde:

M: novo silte x (novo silte + nova areia) novo silte = silte + areia fina - em % nova areia =
areia grossa – em %

Pe: Permeabilidade (coeficiente de permeabilidade)

1 : muito rápida

2 : rápida

3 : moderada

4 : lenta

5 : muito lenta

6 : imperfeitamente drenado

DMP – diâmetro médio ponderado dos agregados do solo

$$DMP = \left[(0,65 \times AG) + (0,15 \times AF) + (0,0117 \times silte) + (0,00024 \times Arg) \right] / 100 \quad (2.13)$$

Donde:

AG: teor de areia grossa, em %;

AF: teor de areia fina, em %;

Silte: teor de silte, em %,

Arg: teor de argila, em %

R1: NA x MO/100

NA: nova areia (teor de areia grossa em %)

MO: 1,73 x carbono em % Carbono – teor de carbono em %

A erodibilidade dos solos brasileiros é muito variável. Isso é decorrência da variabilidade climática que influi na erosividade das chuvas, bem como da variedade de solos com propriedades diferenciadas que influenciam sua resistência hídrica. Os métodos para o cálculo do fator K devem incluir estas variabilidades dos solos. Abaixo na Tabela 2.7 são apresentados alguns valores do índice de erodibilidade (fator K) obtidos em solos brasileiros. (SILVA, 1997 apud MENDES, 2006).

Tabela 2.7 – Valores de erodibilidade para algumas das localidades brasileiras (SILVA, 1997)

Local	Valor de K t ha h/ha MJ mm	Autores
Paraná (PR)	0,0033 a 0,047	Biscaia et al. (1981)
Minas Gerais (Zona da Mata)	0,0038 a 0,0178	Resck et al. (1981)
Ceará (Ibiapaba)	0,001 a 0,033	Távora et al. (1985)
Paraíba (semi-Árido)	0,004 a 0,066	Silva et al. (1986)
São Paulo – PVAeut	0,0232	Carvalho et al. (1989)
Pernambuco (região Agreste)	0,00047 a 0,0038	Cantalice & Margolis (1993)
Santa Catarina (Lages)	0,016	Bertol (1994)
Goiânia – Lvec	0,009	Silva M. (1997)
Passo Fundo (RS) – Lvec	0,021	Denardin e Wunsche (1981)
Planaltina (DF) – Lvec	0,013	Dedecek et al. (1986)
Jaboticabal (SP) – Lvec	0,009	Martins F. e Pereira (1993)
Paranavaí (PR) – Lvec	0,0084 e 0,0086	Ponta Grossa (PR) – Lvec 0,00858 e 0,0086
Ponta Grossa (PR) – Lvec	0,00858 e 0,0086	Jacobs et al. (1994)
Lavras (MG) - LVec	0,004	Lima (1987; 1991); Silva

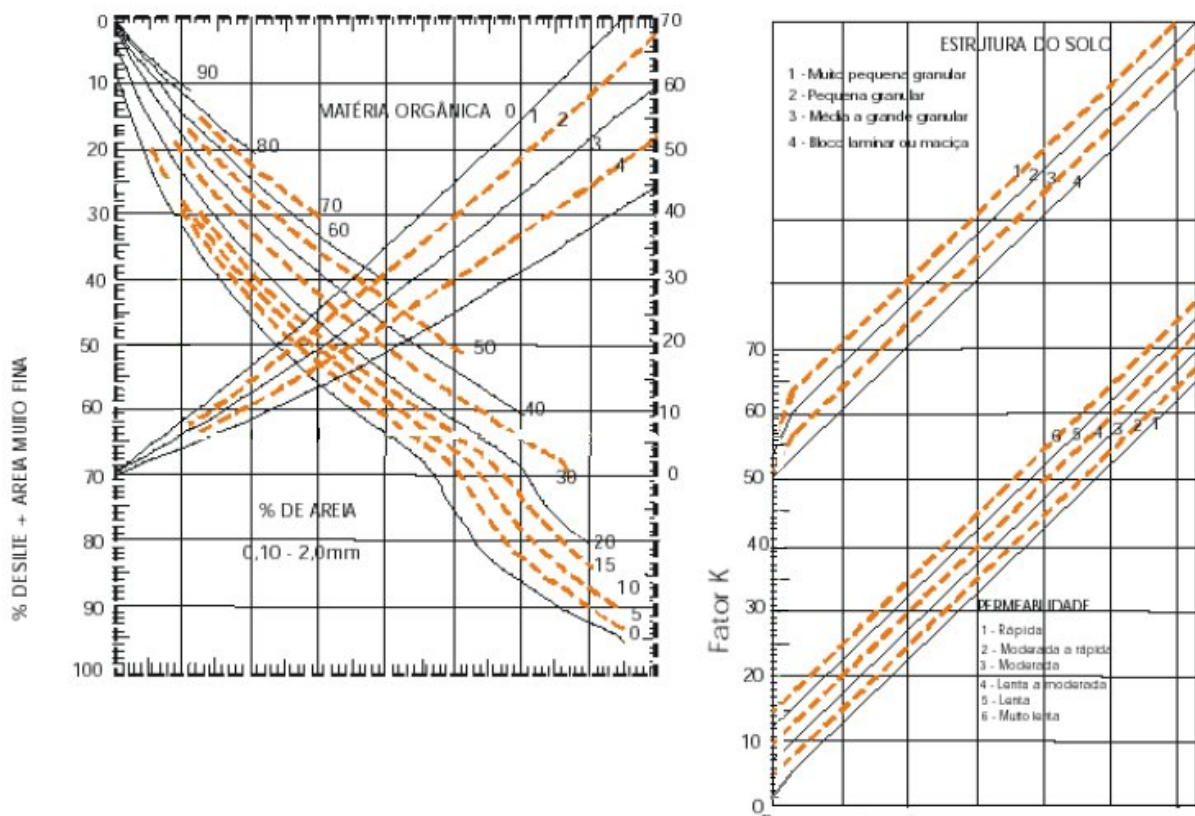


Figura 2.11 – Nomograma de WISCHMEIER & SMITH (1978) Modificado DOMINGOS (2006)

A nível internacional RODRIGUEZ Et al (2002) manifestou que o índice de erodibilidade (K) denominado índice de WISCHMEIER, que é utilizado na equação universal de perda de solo (USLE). Geralmente não funciona quando são aplicados a solos com características ândicas e ando solos, nesse caso o resultado não tem correlação com o observado no campo. Isto se deve ao fato de que os fatores locais que influenciam na erosão são muito variáveis, principalmente o relevo que apresenta declividades muito pronunciadas.

FÉRNANDEZ (1989) indica que a quantificação de perda de solo na Venezuela, em zonas que apresentam bacias hidrográficas em altas altitudes pelo método da equação universal de perda de solo (USLE), tem resultados limitados devido à carência de informação edáfica (idade). Vários métodos de avaliação de potencial de erodibilidade foram utilizados na Venezuela nos últimos anos, sendo considerado como o método mais eficiente o ensaio que é realizado em um cilindro cheio de solo cujo topo é exposto ao impacto das gotas de chuva simulada, o excesso de água que penetra no solo drena através de uma malha metálica que é colocada na extremidade inferior do cilindro. Este método permite medir a quantidade de solo

perdida pelo impacto das gotas de chuva e é conhecido como método das “Copas de Salpicadura” que foi desenvolvido por ELLISON (1947).

- Fato Topográfico L.S

WISCHMEIER & SMITH (1978) afirmam que tanto os comprimentos do declive quanto o gradiente afetam a intensidade de erosão hídrica. Estes dois efeitos são estudados separadamente e são representados por L e S, respectivamente. Entretanto, para aplicação prática, é mais conveniente considerá-los conjuntamente como um fator topográfico (LS).

$$LS = ((L^{1/2})/100)*(1,36 + 0,97 S + 0,1385 S^2) \quad (2.14)$$

Onde:

L: comprimento do declive (m);

S: grau do declive (%).

BERTONI & LOMBARDI NETO (1990) desenvolveram uma equação para o fator topográfico válida para São Paulo. A equação foi criada a partir de experimentos realizados para os principais solos de São Paulo, de onde foi plotada uma curva do fator LS com o comprimento do declive e o grau do declive. A equação de BERTONI & LOMBARDI NETO (1990) está apresentada abaixo.

$$LS = 0,00984 * C^{0,63} * D^{1,18} \quad (2.15)$$

Onde:

C: comprimento da rampa (m);

D: grau de declive (%).

- Fator uso e manejo do solo (C)

O fator C mede o efeito combinado de todas as relações das variáveis de cobertura e manejo que incluem: tipo de vegetação desenvolvida na época do ano e o manejo cultural. O cálculo é feito a partir das relações de perdas de terra e da fração da erosividade para cada estágio das culturas. Existem tabelas já estabelecidas para o fator C de acordo com o uso do solo como, por exemplo, no trabalho de WISCHMEIER & SMITH (1978).

- Fator práticas conservacionistas (P)

As práticas conservacionistas mais comuns são: plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de capinas. O efeito de uma prática como cultivo é muito dependente do declive no que se refere ao controle à erosão. Alguns autores mostram que há uma relação inversa entre o declive e a eficiência no controle da erosão, como por exemplo, em GAMEIRO (2003). Os valores do fator P podem ser encontrados em tabelas elaboradas através de estudos de áreas quanto às práticas conservacionistas como, por exemplo, em WISCHMEIER & SMITH (1978).

A Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS). De acordo com BLOISE et al (2001), a EUPS é bastante divulgada por causa de sua linearidade e da unicidade de seus fatores que abrangem os principais tópicos que influenciam a erosão laminar. Desta forma a equação pode ser usada como guia para o planejamento do uso da terra, estipulando o emprego mais adequado das práticas de conservação. ALVES et al (2005) indica que no Brasil, os trabalhos iniciais sobre a equação de perda de solo forem desenvolvidos por BERTONI (1985). Mas o autor salienta que desde o ano 1975, vários autores vêm tentando avaliar os fatores da equação para todas as regiões de Brasil, no entanto os pesquisadores têm dificuldade em estabelecer através de esta equação interação entre os fatores que participam no processo de erosão, razão pela qual o autor indica que como alternativa de solução para este inconveniente pode ser aplicada à lógica Fuzzy.

2.5.3.2 Equação da perdas de solo modificada (MUSLE)

A necessidade de prever a produção de sedimentos para eventos isolados levarem a WILLIAMS e BERNDT (1977), a executar experimentos em bacias hidrográficas do Texas, Blackands, Hastings e Nebraska, o resultado de estas experiências originou a modificação da equação universal de perda de solos. (OLIVEIRA 1996). Os pesquisadores substituíram o fator de erosividade da chuva (R) pelo fator do escoamento superficial que, conforme a suas análises, é mais influente na perda de solo que o fator (R). A equação do MUSLE fica da seguinte maneira

$$Y = R_w.K.L.S.C.P \quad (2.16)$$

Onde:

Y: Produção de sedimentos t/ha.ano;
 R_w: Fator de escoamento (MJmm/há.h.ano);
 K: Fator de erodibilidade do solo (t, ha.h/(MJ. mm.ha));
 LS: Fator conjunto de comprimento e grau do declive;
 C: Fator de uso e manejo do solo;
 P: Fator de prática conservacionista.

O fator R_w avalia a erosividade do escoamento superficial e é determinado através da seguinte relação:

$$R_w = 89,6(QSqp)^{0,56} \quad (2.17)$$

Onde:

QS: Volume escoamento superficialmente, em m³;
 qp : Vazão de pico do escoamento superficial, em m³/s

O fator R_w, é dependente da vazão de pico e do volume escoado, para o calculo da vazão de pico utilizamos a seguinte equação:

$$qp = \frac{0,208(Ape)}{ta} \quad (2.18)$$

Onde:

qp : Vazão de pico unitária, em m³/s;
 A: Área da micro bacia, em estudo em km² ;
 ta : Tempo de ascensão, em horas

2.5.4 Modelos para a estimativa da erodibilidade para latossolos brasileiros

SILVA et al. (1999) afirmam que os métodos matemáticos existentes para determinação indireta da erodibilidade ou perda de solo têm se mostrado inadequado quando aplicados aos solos tropicais. Esta inadequação tem sido atribuída às diferenças textuais, particularmente quando se trata dos latossolos brasileiros. Estes mesmos autores desenvolveram modelos para a estimativa da erodibilidade para latossolos brasileiros a partir de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos, facilmente determináveis em campo ou laboratório. Foram avaliados 5 modelos que estão apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Modelos avaliados por SILVA ET AL (1999)

MODELO	EQUAÇÃO	VALORES DE R ² OBTIDOS
1	$Y = 4,77 \times 10^{-2} - 9,66 \times 10^{-3} X_{14} + 1,63 \times 10^{-2} X_{16} - 1,12 \times 10^{-2} X_{17} + 1,85 \times 10^{-2} X_{18} - 1,51 \times 10^{-2} X_{19} - 2,46 \times 10^{-4} X_{22} - 3,58 \times 10^{-4} X_{23} + 1,47 \times 10^{-4} X_{24} - 1,43 \times 10^{-4} X_{25} + 3,26 \times 10^{-3} X_{26} - 1,26 \times 10^{-3} X_{27} - 2,29 \times 10^{-4} X_{31} + 1,07 \times 10^{-4} X_{32} + 2,69 \times 10^{-4} X_{34}$	0,98
2	$Y = 0,112 + 2,50 \times 10^{-3} X_{20} - 7,07 \times 10^{-4} X_{21} + 7,96 \times 10^{-5} X_{22} - 1,01 \times 10^{-4} X_{25} + 1,56 \times 10^{-3} X_{26} - 3,34 \times 10^{-4} X_{27} - 1,48 \times 10^{-4} X_{28} - 1,55 \times 10^{-4} X_{29} - 1,67 \times 10^{-4} X_{30} + 5,30 \times 10^{-5} X_{34} - 1,24 \times 10^{-3} X_{35}$	0,92
3	$Y = -3,89 \times 10^{-2} + 5,11 \times 10^{-3} X_{14} - 1,25 \times 10^{-2} X_{15} + 5,41 \times 10^{-3} X_{16} - 7,27 \times 10^{-3} X_{18} + 5,33 \times 10^{-2} X_{33} + 3,21 \times 10^{-5} X_{34} - 5,66 \times 10^{-5} X_{36} + 8,33 \times 10^{-4} X_2 - 1,17 \times 10^{-2} X_4 + 1,53 \times 10^{-2} X_{13}$	0,91
4	$Y = 7,87 \times 10^{-2} - 4,99 \times 10^{-4} X_3 + 5,41 \times 10^{-2} X_8 - 3,21 \times 10^{-3} X_9 - 6,29 \times 10^{-3} X_{15} + 2,53 \times 10^{-5} X_{34} - 9,56 \times 10^{-3} X_{35} - 1,41 \times 10^{-4} X_{36} - 9,29 \times 10^{-3} X_{37}$	0,83
5	$Y = -3,21 \times 10^{-2} - 4,26 \times 10^{-2} X_4 - 8,65 \times 10^{-4} X_6 + 9,51 \times 10^{-4} X_7 + 3,13 \times 10^{-2} X_8 + 2,65 \times 10^{-2} X_1 + 8,83 \times 10^{-4} X_5 - 2,32 \times 10^{-3} X_{10} + 3,39 \times 10^{-3} X_{11} + 4,15 \times 10^{-3} X_{12}$	0,72

Tabela 2.9 – Descrição, códigos, valores mínimos, médios e máximos das variáveis dos solos estudados incluídos em modelos para estimativa da erodibilidade em latossolos brasileiros de acordo com SILVA ET AL. (1999)

variável	Descrição	Valor		
		Mínimo	Meio	Máximo
K obs.	Erodibilidade(thMJ ⁻¹ mm ⁻¹)	0,002	0,011	0,034
X ₁	Relação entre minerais leves e pesados na fração de areia (adimensional)	0,13	0,97	1,00
X ₂	Capacidade catiônica do solo PH (cmol _c Kg ⁻¹)	4,1	8,6	18,1
X ₃	Teor de matéria orgânica gKg ⁻¹	9,0	26,0	47,0
X ₄	ΔpH= pHKCl-pH-H ₂ O (adimensional)	-0,4	-0,7	-1,3
X ₅	Teor de matéria orgânica multiplicado ΔpH (gKg ⁻¹)	-4,5	-15,2	-42
X ₆	Al ₂ O ₃ extraídos pelo DCB (gKg ⁻¹)	3,0	18,0	35,0
X ₇	Al ₂ O ₃ extraídos pelo oxalato de amônio (gKg ⁻¹)	2,0	9,0	94,0
X ₈	Al ₂ O ₃ extraídos pelo pirofosfato de sódio (gKg ⁻¹)	0,10	0,50	1,20
X ₉	SiO ₂ extraídos pelo DCB (gKg ⁻¹)	2,0	7,0	12,0
X ₁₀	Relação de (Fe ₂ O _{3(o)} + Al ₂ O _{3(o)} /SiO _{2(o)}) (adimensional)	1,5	7,5	34,7
X ₁₁	Relação de (Fe ₂ O _{3(p)} / Al ₂ O _{3(p)}) (adimensional)	0,50	4,3	14,0
X ₁₂	Relação de (Fe ₂ O _{3(o)} /SiO _{2(o)}) (adimensional)	0,5	2,0	5,5
X ₁₃	Relação de Ki (adimensional)	0,67	1,33	2,03
X ₁₄	Código do matriz do solo úmido segundo Munsell (adimensional)	1,00	3,00	4,00
X ₁₅	Código da drenagem do perfil do solo (adimensional)	2,00	3,00	5,00
X ₁₆	Código do grau da estrutura (adimensional)	2,00	3,00	4,00
X ₁₇	Código do tamanho da estrutura (adimensional)	1,5	2,5	4,00
X ₁₈	Código da forma da estrutura (adimensional)	2,00	2,5	3,00
X ₁₉	Código da plasticidade do solo (adimensional)	2,00	3,00	4,00
X ₂₀	Teor de AMG dispersa com NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g Kg ⁻¹)	0,00	2,00	30
X ₂₁	Teor de AG dispersa com NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g Kg ⁻¹)	0,00	20	150
X ₂₂	Teor de AF dispersa com NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g Kg ⁻¹)	0,00	120	397
X ₂₃	Teor de AMF dispersa com NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g Kg ⁻¹)	7,00	50	490
X ₂₄	Teor de silte dispersa com NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g Kg ⁻¹)	1,00	80	160
X ₂₅	Teor de argila dispersa com NaOH 0,1 mol L ⁻¹ (g Kg ⁻¹)	1,00	170	330
X ₂₆	Teor de AMG dispersa em água (gKg ⁻¹)	0,00	10	35
X ₂₇	Teor de AG dispersa em água (gKg ⁻¹)	0,00	60	160
X ₂₈	Teor de AM dispersa em água (gKg ⁻¹)	50	130	230
X ₂₉	Teor de AF dispersa em água (gKg ⁻¹)	60	192	670
X ₃₀	Teor de AMF dispersa em água (gKg ⁻¹)	60	90	480
X ₃₁	Teor de silte dispersa em água (gKg ⁻¹)	60	240	629
X ₃₂	Teor de argila dispersa em água (gKg ⁻¹)	1,00	170	330

X ₃₃	Volumem total de poros (dm ³ dm ⁻³)	0,40	0,53	0,65
X ₃₄	Índice de floculação (adimensional)	0,555	0,685	0,999
X ₃₅	Diâmetro meio geométrico de agregados (mm)	1,46	3,11	4,35
X ₃₆	Índices de instabilidade de agregados (gKg ⁻¹)	21,5	72,4	313,9
X ₃₇	Relação entre (AMF +silte)(AMG+AG+AM+AF) dispersos em água (adimensional)	0,20	0,80	3,00

Os modelos da tabela 2.8 apresentaram elevados coeficientes de determinação e apresentaram a mesma magnitude que os encontrados em outros trabalhos (Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Römken et al., 1977; Denardin, 1990). A complexidade das equações é apenas aparente, pois sua linearidade facilita muito os cálculos. Além disso, nos modelos de previsão de perdas de solo são utilizados, atualmente, recursos computacionais, o que reduz o trabalho de cálculo. (MARQUES, et al. 1997)

2.6 Assoreamento de cursos de água

O assoreamento dos cursos de água e dos reservatórios naturais e artificiais constitui um dos principais impactos dos processos erosivos em uma bacia hidrográfica. Entre os métodos mais usados em estudos regionais sobre erosão em bacias hidrográficas, destaca-se o cálculo das taxas de erosão a partir da quantificação das taxas de assoreamento obtidas através de estudos hidrossedimentológicos nos reservatórios.

O processo de assoreamento numa bacia hidrográfica encontra-se intimamente relacionado aos processos erosivos, já que a erosão produz desagregação das partículas que se transportaram até os cursos de água. Quando não há energia suficiente para transportar dentro do curso de água, o material erodido se deposita. (GUERRA, 1995).

CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006) indicam que o assoreamento de reservatórios é um problema que vem sendo enfrentado há muitos anos no Brasil e no mundo. O mesmo autor afirma que pelo menos 40 reservatórios de usinas hidrelétricas localizadas em diferentes regiões brasileiras estão parcialmente ou totalmente assoreados. Além disso, também manifesta que a erosão constitui o início de todos os problemas causadores do assoreamento de corpos de água no meio ambiente; por isso, o conhecimento dos processos erosivos que ocorrem na bacia de contribuição de um reservatório é fundamental para o entendimento dos fenômenos de geração e movimento dos sedimentos na bacia.

OLIVEIRA (1996) afirma que as intervenções ocorridas no solo, durante o processo de erosão antrópica, favorecem o aporte de grande volume de sedimentos aos cursos de água e reservatórios. No caso dos cursos de água, os sedimentos contribuem na alteração da forma da seção do canalha, tornando-se a menos profunda e mais larga, originando diminuição na capacidade de transporte e provocando o desmoronamento das margens, causando prejuízos às populações ribeirinhas assim que se inicia a época das chuvas.

O volume acumulado nos reservatórios pode ser quantificado pela comparação entre modelos digitais de terreno do fundo do reservatório obtidos a partir de dados topobatimétricos realizados em diferentes épocas, e pela realização de ensaios de datação dos sedimentos coletados no leito do reservatório. Da formação dos sedimentos, pode-se obter uma visão histórica da evolução que os sistemas naturais têm sofrido no tempo, pois uma grande quantidade de informação dos fenômenos que podem ter acontecido grava-se nas diferentes camadas que os formam. CAMAPUM DE CARVALHO et al (2006)

A sedimentação no fundo da calha dos rios se produz quando a velocidade da corrente hidráulica diminui. Durante a sedimentação existe dos fenômenos distintos: a primeira a sedimentação produzida por as partículas grossas que são transportadas por arraste e a segunda produzida pelas partículas finas que se encontra em suspensão. (Marín 2005)

Para a análise do transporte dos sólidos em uma corrente fluvial a literatura apresenta fórmulas que nos permitem calcular a quantidade de material, tais como: Equações de Duboys que calcula o transporte de materiais arrastado no fundo da calha, Equação de Meyer Peter e Muller que calcula a quantidade do material em suspensão. Além de programas computacionais de análise de hidráulica HECRAS.

2.7 Disponibilidade Hídrica e Demanda no Brasil

A disponibilidade hídrica do país foi obtida a partir dos registros de vazões das estações fluviométricas, disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos da ANA (www.ana.gov.br). Para cada unidade hidrográfica de referência, foi selecionada a estação fluviométrica mais próxima, com a série hidrológica mais extensa (preferencialmente superior a 15 anos de dados) com esses dados, os pesquisadores podem calcular os seguintes indicadores para cada estação, vazão média de longo termo, que indica a disponibilidade hídrica superficial. Como a vazão média cresce com a área de drenagem, é comum se

expressar a disponibilidade hídrica em termos de vazão específica média, que é a relação entre a vazão média e a área de drenagem, expressa em L/s/Km². (ABDOM, 2004). A principal variável descritiva do regime fluvial é:

- **Vazão média de longo período Q_m (m³/s):** definida pela média aritmética das vazões diárias de todo o período da série disponível;
- **Vazão com permanência de 95% Q_{95} (m³/s):** vazão que é igualada ou excedida em 95% do tempo (obtida com base na série de vazões diárias disponíveis). Esta variável foi utilizada para caracterizar a disponibilidade hídrica natural, sendo aqui denominada de vazão crítica de referência.
- **Vazão específica média, em l/s. Km².**

$$q_{mlt} = \frac{Q_m}{A} \quad (2.19)$$

Onde:

Q_m = Vazão média de longo período

A = Área de drenagem

A disponibilidade hídrica da Sub-bacia do rio Araguari que pertence à bacia do rio Paranaíba pode alcançar valores máximos da ordem de 19L/s/km² (Empresa de Pesquisas Energética - EPA)

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Trecho de Vazão Reduzida de Capim branco I (TVR-CBI) está localizado mais especificamente entre a jusante do vertedouro da barragem e a casa de forças da Usina Hidroelétrica Capim Branco I (UHE - CBI). O TVR-CBI, foco de estudo de este trabalho, integra a bacia do Rio Araguari. A Figura 3.12 ilustra a localização do TVR – CBI.



Figura 3.12 – Localização da área de estudo PAULO (2007)

A vazão das águas do trecho com a implementação da Usina Hidroelétrica (UHE) sofreram redução devido ao direcionamento de parte das águas através de um túnel de adução localizado à montante da barragem até a casa de força. Como consequência desta redução de vazão, existe a preocupação do risco de erosão por exposição das margens do rio e o assoreamento do curso de água. Além disso, as mudanças climáticas e sócio-econômicas impostas na região com a implementação do empreendimento, podem alterar a vegetação local, expandindo o risco de erosão para outras áreas da bacia. A Figura 3.13 ilustra a implementação do empreendimento



Figura 3.13 – Construção de Capim Branco I

3.1 Reconhecimento da área e meio físico do TVR-CBI

Foi feito um reconhecimento do meio físico no TVR-CBI, para a constatação de áreas susceptíveis à erosão. Procurou-se identificar alguns fatores determinantes no desenvolvimento de processos erosivos tais como: uso do solo, sistema de drenagem, formação de voçorocas e o tipo de vegetação da zona. Além disso, fez-se a escolha dos pontos de coleta das amostras deformadas e indeformadas que foram usadas para os diversos ensaios.

Foram detectados dois pontos críticos de processos de erosão mais intensos, sendo ambos considerados os pontos de coleta, estes pontos foram georeferenciados através de um GPS (Ground Position System) e denominados de P2 e P3. O ponto inicial do trecho também foi georeferenciado e denominado de P1. Os pontos de coleta georeferenciados se localizam na área em estudo na ordem indicada nas tabelas 2.10 e a Figura 3.14

Tabela 2.10 – pontos definidos no TVR-CBI para coleta de amostras

PONTO	GEOREFERÊNCIA	TIPO DE AMOSTRAS	DENOMINAÇÃO DAS AMOSTRAS
P2	S 18° 48,607' W 048° 08,839' altitude: 571 m	Deformadas e Indeformadas	P2
P3	S 18° 47,128' W 048° 10,086' daltitude: 570	deformadas	P3



Figura 3.14 – Imagem de satélite do TVR-CBI (Adaptado de Google Earth & www.cemig.com.br)

A coleta de amostras foi feita nos pontos P2 e P3. O ponto P1 foi desconsiderado dentro da coleta, devido a esta área estar submetida a movimentos de solo pelas empresas responsáveis da construção do complexo de Aproveitamento Hidrelétrico Capim branco I.

Portanto foram definidos como pontos de estudo para esta dissertação os pontos P2 e P3 onde existem voçorocas. As coletas de amostras foram feitas em duas visitas técnicas na primeira visita coletamos amostras deformadas e indeformadas da voçoroca localizada georeferencialmente no ponto P2. A Figura 3.15 ilustra a coleta de amostra indeformada neste ponto. As condições meteorológicas durante esta primeira visita eram de dias chuvosos.



Figura 3.15 – Coleta de amostra indeformada do P2 do trecho

Já na segunda visita técnica, coletamos amostras no ponto georeferenciado P3, conforme Figura 3.16.



Figura 3.16 – Coleta de amostras deformadas no P3 do TVR-CBI

A Figura 3.17 ilustra o tipo de textura das amostras coletado para os dois pontos. É possível observar que a amostra P3 é mais arenosa do que a amostra P2, além disto, a figura 3.16 (b) evidencia a quantidade de raízes presentes no ponto. P2



Figura 3.17 – (a) amostra P3 e (b) amostra P2

As amostras indeformadas foram retiradas superficialmente pelo fato que o tipo de erosão avaliada através este trabalho foi à erosão laminar produzida pelo escoamento superficial.

3.2 Aspectos Geológicos - Geotécnicos da Região

A geologia regional tem como embasamento xistos e quartzitos do Pré-Cambriano Médio em seu alto curso, recobertos no seu médio curso por sedimentos mesozóicos da Bacia do Paraná. No baixo curso, o rio Araguari corta intercalações de arenito e basalto da formação Serra Geral, chegando ao fundo do vale a erodir gnaisses e granitos do Pré-Cambriano inferior. Sedimentos cenozóicos são encontrados nos planaltos tabulares e em relevos residuais, bem como recobrendo terraços estruturais. (RODRIGUES, 2002).

As características geológicas e geomorfológicas da bacia configuram uma morfodinâmica marcada pela ocorrência de pequenos rastejos de solo associados aos abatimentos (movimentos gravitacionais), os quais constituem o ponto de partida para o desenvolvimento dos processos erosivos lineares mais frequentemente verificados na área, representados por sulcos e ravinas. Estes processos ocorrem quase exclusivamente sobre rampas de colúvios argilosos ou argilo-arenosos de origem basáltica, desmatadas e utilizadas para pastagem. Há uma estreita relação entre estas feições e o uso de pastagens com pisoteio do gado. Outra ocorrência pontual pode ser verificada nas bordas da chapada, onde terrenos escarpados erodiram por fluxos concentrados por estradas e drenagem urbana, como é o caso das ocorrências da cabeceira do córrego Santo Antônio, córrego Desamparo e comunidade do Alto São João. (PCA – CONSÓRCIO CAPIM BRANCO ENERGÉTICO, 2002)

A área de Influência da UHE Capim Branco I está constituída por rochas metamórficas granito-gnáissicas de idade Arqueana pertencentes à Associação Gnáissica-Migmatítica; xistos e quartzitos proterozóicos do Grupo Araxá; rochas basálticas com intercalações locais de arenitos da Formação Botucatu do Mesozóico (idade Jurássico-cretácica - Grupo São Bento); e, ainda, por coberturas detríticas terciárias e sedimentos Quaternários. (PCA-CONSÓRCIO CAPIM BRANCO ENERGÉTICO, 2002)

A associação Gnáissica/Migmatítica ocorre geralmente em altitudes inferiores a 650 - 700 m. Assentados discordantemente sobre estas rochas gnáissicas, ocorrem os derrames de basalto, com espessuras variando, em média, de 150 m a 200 m. Ocorrências localizadas de remanescentes de xistos do Grupo Araxá, com pequenas espessuras, são encontradas nas proximidades da ponte do Pau Furado, a jusante do eixo da barragem do UHE Capim Branco I, depositadas entre o gnaisse e o basalto. (EIA/RIMA CAPIM BRANCO I LEME ENGENHARIA 1996)

Durante as visitas realizadas, foi possível perceber que os afloramentos rochosos são marcantes nesta região, principalmente na calha do rio (Figura 3.18).



Figura 3.18 – Presença de afloramento rochoso

3.3 Condições Climáticas e Meteorológicas

A região em estudo localiza-se em latitudes subtropicais, possuindo clima quente, com período chuvoso abrangendo todo verão e invernos secos. Além disso, a região está envolvida por regime pluviométrico que apresenta um ciclo básico unimodal, caracterizado por um verão chuvoso e inverno seco. O período chuvoso inicia-se em outubro, atingindo o máximo de precipitação em dezembro e janeiro, e termina em abril. A região se localiza em uma zona entre dois núcleos máximos de precipitação regional, com total anual da ordem de 1.500 mm. A temperatura média mensal varia entre 18,6 °C (julho) e 23,5 °C (fevereiro e março). (SOUZA et al 2006)

Durante todo o ano, a região se encontra sob o domínio do Anti-ciclone Subtropical do Atlântico Sul, sendo conseqüentemente submetida a movimentos descendentes de larga escala. Os ventos predominantes, na baixa troposfera, têm sentido nordeste e carregam umidade para a região. Além disso, no decorrer do ano, a região é invadida por sistemas extra-tropicais, com ventos do quadrante sul, associados às massas de ar frio provenientes do sul do continente, que provocam as baixas temperaturas no inverno. No período de verão, o setor quente dos sistemas extra-tropicais, envolvido em um ambiente condicionalmente instável, favorece a formação de sistemas sub-sinóticos, que acoplados ao aquecimento diurno, são responsáveis pela maior parte da precipitação anual. Esta precipitação se caracteriza como de

origem convectiva. Nessas condições, o regime pluviométrico apresenta um ciclo básico unimodal, com verão chuvoso e inverno seco. (RODRIGUES, 2002)

3.3.1 Precipitação

A partir de estudos efetuados com base nos dados meteorológicos das estações de Uberaba e Araxá, tem-se que o período chuvoso inicia-se em outubro, atingindo o máximo de precipitação em dezembro e janeiro, e terminando em abril. Os meses mais chuvosos (outubro a março) participam com 86% do total pluviométrico anual. Os períodos de maio a agosto são os mais secos e participam com apenas 6% do total de chuva anual. A análise de dados da CEMIG (1986), obtidos das estações de Patrocínio, Uberaba e Uberlândia, mostra que a área do empreendimento se localiza numa zona entre dois núcleos de máxima precipitação regional, com total anual de 1.500 mm.

Para ilustrar a variação da precipitação ao longo dos meses, é apresentado o gráfico a seguir, com base na estação Uberaba:

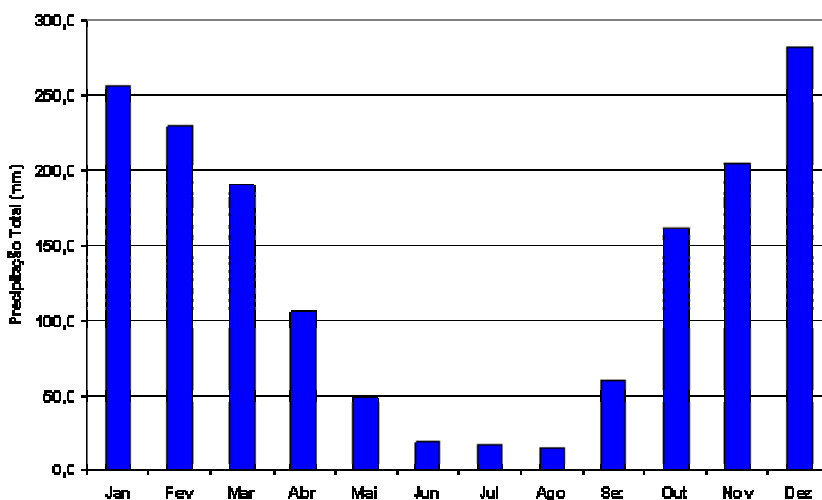


Figura 3.19 – Precipitações ao longo dos meses. CEMIG (1986)

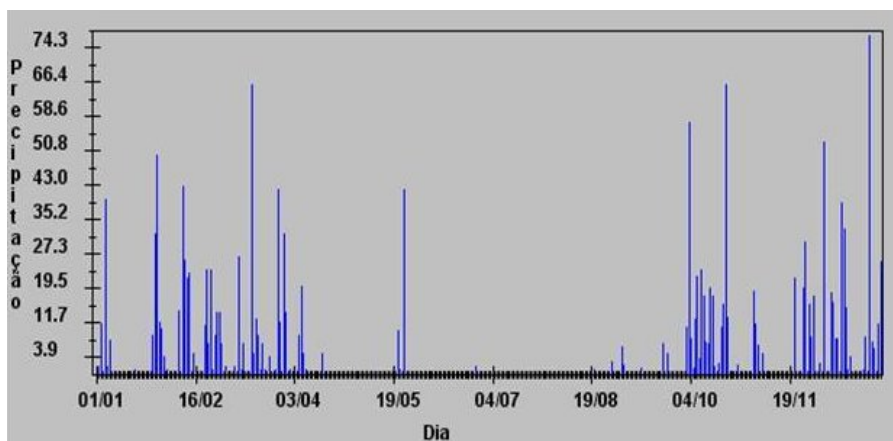


Figura 3.20 – Precipitações reportadas ano 2006 Estação de Uberaba. (WWW. Agritempo.gov.br)

3.3.2 Temperatura

Estando a região localizada em zona subtropical, o regime térmico apresenta variações suaves no decorrer do ano, sendo sua principal característica a maior variabilidade diária.

A temperatura média mensal varia entre 18,6°C (julho) e 23,5°C (fevereiro e março). Os meses mais frios são junho, julho e agosto, em contrapartida aos meses de janeiro, fevereiro e março, que se apresentam como os mais quentes. No inverno, devido à invasão de intensas massas de ar frio vindas do continente, a temperatura mínima absoluta pode atingir valores próximos de zero, mas somente em ocasiões muito raras. Para ilustrar a variação mensal da temperatura (bulbo seco), são apresentados os gráficos a seguir, com base na estação de Uberaba:

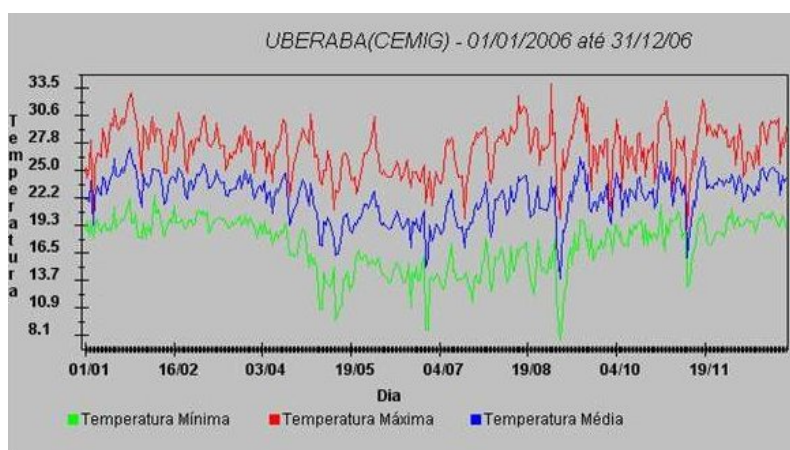


Figura 3.21 – Temperatura reportada ano 2006. (WWW. Agritempo.gov.br)

3.3.3 Ventos

Na região em estudo, existe predominância dos ventos do nordeste e aqueles que resultam do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. A oscilação do centro desse Anticiclone na direção noroeste-sudeste, do inverno para o verão, é responsável pelo aumento da frequência de ventos do noroeste e norte.

Os sistemas sinóticos transientes na região dos sistemas extratropicais associados a frentes frias dão origem a ventos de quadrante sul, mais especificamente de sudeste. As maiores velocidades dos ventos é 2,7 m/s, e esta velocidade está associada à uma direção predominante, que nesse caso, é o nordeste. A velocidade do vento diminuiu significativamente no período da noite, em torno das 21 horas locais. A ação da turbulência térmica atua no período da tarde, uniformizando a frequência das direções dos ventos.

3.4 Caracterização Pedológica

Observa-se na Área de Entorno do AHE Capim Branco I a ocorrência de Latossolos Rochos distróficos (solos férteis), Podzólicos Vermelho/Amarelos eutróficos (solos muito pobres quimicamente), Cambissolos eutróficos, Solos Litólicos eutróficos e distróficos. O material de origem a que esses solos estão correlacionados pertencem à seqüência gnáissica/migmatítica originada metassomaticamente a partir de rochas básicas e ultrabásicas e os basaltos da Formação Serra Geral. Estes materiais litológicos apresentam em sua composição minerais que conferem alta fertilidade aos solos. As unidades geomorfológicas em que esses solos são observados compreendem as “vertentes convexas”, que são as unidades predominantes, e os “terraços e rampas”. Na área de ocorrência dos basaltos predominam as “patamares ondulados”, os “patamares estruturais” e os esporões que se direcionam para superfície tabular. (PCA- CONSORCIO CAPIM BRANCO ENERGETICO 2002)

e afloramentos de rocha. O material de origem a que esses solos estão correlacionados As classes de solos presentes na Área Diretamente Afetada do AHE Capim Branco I compreendem os Podzólicos Vermelho/Amarelo eutróficos, Cambissolos eutróficos, Solos Litólicos eutróficos e distróficos pertencem à seqüência gnáissica/migmatítica originada metassomaticamente a partir de rochas básicas e ultrabásicas. Estas classes de solos são encontradas em vertentes convexas e em terraços e rampas, que constituem as unidades

geomorfológicas predominantes na ADA de Capim Branco I. (PCA- CONSÓRCIO CAPIM BRANCO ENERGETICO 2002)

Especificamente a voçoroca estudada está compreendida por uma classe de solos denominada cambissolos (Figura 3.22). Estes solos segundo RESENDE. M. et al (1999) se caracterizam essencialmente pelo horizonte B incipiente. O autor também observou que estes solos são pouco evoluídos, pois não sofreram uma interiorização muito forte, são solos que estão em processo de evolução (jovem).

RESENDE et al (1988) relataram que os cambissolos são um grupo bastante heterogêneo em termos de ambiente. Considerando o indicado pelo autor, pode-se observar que nas paredes das voçorocas (pontos de coleta P2 e P3) há influência do material aluvial e coluvial.



Figura 3.22 – Tipo de solo das paredes das voçorocas em estudo

Os Cambissolos e Neossolos Litólicos ocupam 10% da área do Cerrado. Os Neossolos Litólicos eram anteriormente chamados de Solos Litólicos.

3.5 Tipos de Vegetação

A área do UHE, de Capim Branco I, possui uma cobertura vegetal natural muito fragmentada e com remanescentes de pequena extensão. Há o predomínio de pastagens e pequenos cultivos tais como soja, milho e café. As categorias de uso do solo e cobertura vegetais mapeadas na área de influência de Capim Branco I, são descritas a seguir:

Áreas urbanas e de uso misto - fazem parte desta categoria às áreas de usos intensivos, ocupados por edificações, especialmente as cidades, vilas, distritos, chácaras, etc.

- Mata -. compreende a classe de cobertura vegetal natural de porte arbóreo representada por diversos tipos fitofisionômicos encontrados na região de cerrado, tais como a mata mesofítica (de galeria e de encosta) e a mata xeromórfica (cerradão). A mata de galeria, também denominada ciliar, ocupa os vales dos canais de drenagem bem marcados, ou cabeceiras de nascentes, sempre associados aos solos bastante úmidos. A mata de encosta fisionômica é idêntica à mata de galeria, porém está localizada em relevo inclinado, quando relacionada com afloramentos basálticos em solos bem drenados ou como extensão da mata de galeria. A mata mesofítica apresenta um alto teor de umidade em seu interior, propiciando a presença de pteridófitas, briófitas, algas e fungos. A altura média das árvores é de 20 metros, com uma cobertura da ordem de 100 %. Devido ao sombreamento, não existe estrato herbáceo-graminoso. O cerradão ou mata xeromórfica caracteriza-se por apresentar uma cobertura no terreno da ordem de 80 a 90 %. De uma maneira geral é muito difícil sua separação da mata mesofítica. Porém, através de uma análise mais detalhada, são observadas características distintas, como a altura média das espécies arbóreas menores do que na mata mesofítica. O cerradão apresenta um dossel com altura média entre 10 e 15 metros e um estrato intermediário (de até 5 metros) com grande número de arbustos. Esta categoria está localizada no fundo do vale, nas áreas de declividades mais elevadas. A Figura 3.23 ilustra a mata ciliar.



Figura 3.23 – Mata ciliar nas margens do rio Araguari: (Relatório de uso do solo CCB, 2006)

- Cerrado - o cerrado é um tipo de vegetação natural de porte médio a baixo (arbóreo e arbustos), que ocorre especialmente nos interflúvios. As árvores e arbustos possuem troncos e galhos retorcidos, folhas grandes, grossas, coriáceas, pilosas, cascas espessas e, são protegidas por uma camada de cortiça. É uma vegetação que apresenta acúleos e espinhos geralmente dispostos em até três estratos distintos. O crescimento das árvores é atrofiado em decorrência

das repetidas queimadas, ataques de insetos, deficiências nutricionais do solo e da escassez de água. A figura 3.24 ilustra a vegetação do cerrado.



Figura 3.24 – Vegetação do cerrado : (Relatório uso do solo CCB, 2006)

- Vegetação em Regeneração -..Este tipo de vegetação formara o corpo florestal contínuo que se inicia junto aos cursos de água e se entende pelas encostas, das áreas de solo mais fértil e com maior disponibilidade hídrica. A pressão sobre estas áreas é intensa, sendo que, os principais impactos observados são o pisoteio do gado, retirada de madeira e lenha e desmatamento para implantação de novas áreas de pastagens.



Figura 3.25 – Vegetação em regeneração perto do rio Araguari: (Relatório uso do solo CCB, 2006)

- Reflorestamentos São considerados nesta categoria as formações florestais artificiais, como: *Pinus Eliots*, *Eucalyptus sp* e *seringueira*.
- Pastagens -..nesta categoria estão incluídas, predominantemente, as áreas de pastagem cultivadas. Estão também presentes, os plantios de forrageiras para o pastoreio, onde houve

desmatamento ou onde a pastagem foi formada, conservando árvores dispersas com o objetivo de proporcionar sombras ao gado.



Figura 3.26 – Áreas de pastagem nas proximidades do rio Araguari

- Culturas anuais fazem parte desta categoria às áreas de cultivos anuais (soja e milho), entendidas como sendo as terras preparadas para o plantio com culturas de ciclo curto, colhidas a cada ano, ocupando o terreno durante aproximadamente 5 meses do ano, normalmente no período chuvoso (outubro a março). Também estão incluídos, os terrenos em posse de cultivos do ano anterior. Estão localizadas nas áreas de topo próximo aos divisores da área de influência.



Figura 3.27 – Áreas com culturas anuais localizadas na localidade próximas a Capim Branco: (Relatório uso do solo CCB, 2006)

3.6 Hidrologia

Os principais afluentes do rio Araguari, no trecho da área de influência de interesse para o UHE Capim Branco I, são os córregos do Salto, Taboca, Contenda e Santo Antônio, na

margem direita; e o córrego da Tenda, Boa Vista e Terra Branca/Marimbondo na margem esquerda.

No trecho do rio Araguari onde se verifica a redução na vazão de seu regime de escoamento original, verifica-se a contribuição de dois afluentes pela margem esquerda: o córrego Barreirinho e o córrego Terra Branca/Marimbondo, sendo o primeiro de porte bastante reduzido.

Nesse trecho, seu leito apresenta-se extremamente sinuoso, com ocorrência de afloramentos rochosos ao longo de todo seu curso, condicionando o seu meandro. Em função disso, a calha fluvial apresenta muitas irregularidades topográficas, configurando depressões de variadas dimensões.

A margem direita dessa porção do vale do rio Araguari é caracterizada pela drenagem intermitente. Na margem esquerda, cuja declividade é mais acentuada que a da margem direita, a drenagem é constituída pelos dois cursos de água permanentes, caracterizados anteriormente, além de diversos outros cursos intermitentes de pequeno porte.

Vale destacar que a quase totalidade do fluxo de água do rio Araguari, no trecho analisado, é proveniente da UHE Miranda, a montante, sendo pequenas as contribuições dos afluentes da bacia na sua Área de Influência.

Os contribuintes do rio Araguari são todos os córregos de pequeno porte, nos quais predominam os vales em "U", sendo freqüentes em suas margens depósitos coluviais encobrendo e interligando-se com os depósitos aluviais. Um encaixe maior dos vales é verificado nas proximidades da confluência dos córregos com o rio Araguari, nas áreas de substrato de rochas da Associação Gnáissica/Migmatítica. Ao seccionar as rupturas de declive, geradas pelas escarpas entre os derrames de basalto, os leitos dos córregos tornam-se encachoeirados. Já o rio Araguari, cujo curso encontra-se inserido em vale encaixado, apresenta ilhas em leito freqüentemente rochoso e irregular, configurando corredeiras e afloramentos rochosos. Cabe ressaltar que a bacia hidrográfica do Rio Araguari é bastante significativa para a região, pois é a única que apresenta afloramento de rochas no período Pré-Cambriano. Essa área com certeza apresenta evidências da evolução geológica e geomorfológica regional. (PCA- CONSÓRCIO CAPIM BRANCO ENERGÉTICO, 2002)

3.7 Geomorfologia

O vale do rio Araguari possui uma morfologia muito favorável à construção de barragens por ser profundo e estreito, com perfil longitudinal apresentando diversas rupturas de declive (RODRIGUES, 2002). O TVR-CBI é caracterizado por declives preponderantemente suaves, em especial na margem direita, apresentando altitudes menores que 700 m, conforme ilustra a Figura 3.28. Já a margem esquerda apresenta declividades relativamente mais acentuadas. Os mapas hipsométricos são as representações gráficas através dos quais pode visualizar-se a topografia declividade aspectos de fluxo do um rio de uma determinada área.



Figura 3.28 – Mapa hipsométrico da bacia do rio Araguari: ROSA et al 2004

4 METODOLOGIA

Neste trabalho, utilizou-se material de solos da margem direita do TVR-CBI, que se localiza na UHE - CBI situada entre os municípios de Araguari e Uberlândia MG.

Os solos estudados classificam-se como Cambissolos, tipo de solo caracterizado pelo horizonte B incipiente e presença de muito mineral primária facilmente intemperizável que são provenientes da alteração da rocha ígneas o metamórficas, mas podem ser herdados de rochas sedimentares, os minerais primários que encontramos frequentemente são: quartos, micas, feldspato. Sua aparência macroscópica é em geral caracterizada pela presença marcada de vazios. (SILVA et al 2005). Esta presença marcante de vazios favorece a infiltração, propriedade física que termina tendo uma relação direta com o fenômeno da erosão.

A erosão hídrica é um dos principais problemas relacionados ao manejo dos solos no país. Ela tem contribuído para o empobrecimento e redução dos agroecossistemas, decorrentes do arraste do solo, nutrientes e carbono orgânico pela água. SILVA et al (2005) explica que experiências realizadas com cambissolos, na estimativa de perda de solo no município de Lavras, Minas Gerais, a chuva simulada apresentou taxas de perdas de solo que, comparadas com outros tipos de solos, podem ser consideradas críticas.

Visando alcançar o objetivo geral desta dissertação foram executados os seguintes ensaios de laboratório.

4.1 *Ensaio de laboratório para avaliação da erodibilidade de forma indireta*

Dentro dos ensaios de avaliação da erodibilidade de forma indireta foram executados os ensaios de caracterização geotécnica.

4.1.1 Ensaio de caracterização Geotécnica

O procedimento para a execução dos ensaios foi de acordo á recomendações da Associação brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

- NBR 6508/1984 Massa Especifica Real dos Grãos;
- NBR 6457/1986 Teor de Umidade Natural;
- NBR 6459/1984 Determinação do limite de liquidez

- NBR 7180/1984 Solo – Determinação do limite de plasticidade;
- NBR 7181/1984 Solo – Análise Granulométrica;

A execução de estes ensaios permite conhecer parâmetros como à textura do solo, índices de consistência a massa específica média dos minerais presentes na fase sólida do solo. Estes parâmetros na análise da erodibilidade estimam a suscetibilidades do solo a erosão pela influência das propriedades físicas. O número de ensaios executados se ilustra na tabela abaixo:

Tabela 4.11 – Número de ensaios executados na caracterização Geotécnica

Ensaio	Amostra Deformada	
	P2	P3
Granulometria	02	02
Teor de umidade natural	01	01
Limite de Liquidez pelo método do Cone	03	-
Limite de Liquidez pelo método Casagrande	02	-
Limite de Plasticidade	01	01
Massa Específica Real dos grãos	01	01

4.1.2 Ensaios de caracterização Física, Química, Mineralógica.

Os ensaios de caracterização física fornecem propriedades físicas relevantes na análise da erodibilidade do solo como é a porosidade, também é relevante o estudo do teor de matéria orgânica em solos superficiais (horizonte O), tendo em vista o seu elevado poder agregador, a agregação constitui um elemento inibidor do processo erosivo. Além disso, na análise da erodibilidade a caracterização mineralógica retrata o nível de intemperização do perfil do solo, a intemperização é o fenômeno que sofre o solo e esta vinculada á perda de solo. Por estas questões encolhemos fazer os ensaios indicados abaixo.

4.1.2.1 Determinação da permeabilidade in-situ por meio do Permeâmetro de Guelph

Optou-se pela realização do ensaio de permeabilidade “in situ”, com a utilização do permeâmetro de Guelph modelo 2800 K1, pertencente ao Laboratório de Geotecnia da UFMG. Os ensaios forem realizados na segunda visita técnica, e os pontos escolhidos para a

execução do ensaio forem os pontos de coleta das amostras indeformadas e deformadas. As condições meteorológicas durante a segunda visita técnica foram de um dia ensolarado

O permeâmetro (Guelph permeâmetro – modelo 2800 KI) (Figura 4.29) opera sob condições de carga constante e variável. Possui parede flexível. O aparelho determina, simultaneamente, a condutividade hidráulica saturada, o fluxo potencial mátrico e a sorptividade do solo.



Figura 4.29 – Permeâmetro Guelph

A operação do equipamento é feita com a colocação do mesmo em um furo executado com trado do próprio equipamento (Figura 4.30). Aplica-se então uma carga hidráulica padronizada (coluna de água) e abre-se o reservatório de água do equipamento. Aguarda-se então, a estabilização do fluxo de água e inicia-se a leitura da velocidade do mesmo (em cm/s). As medidas são realizadas até que se obtenham três leituras iguais. Aplica-se posteriormente outra carga hidráulica preestabelecida e repete-se o procedimento. O equipamento é composto de dois reservatórios distintos que podem ser utilizados para solos mais ou menos permeáveis.



Figura 4.30 – Execução do furo utilizando o trado manual para a instalação do Guelph

A condutibilidade hidráulica (K_{fs}) e o fluxo potencial mátrico (ϕ_m) são calculados através de equações padronizadas para o equipamento e apresentadas no manual de instrução do mesmo, respectivamente por:

$$K_{fs} = [(0,0041)(xouy)(R_2)] - [(0,0054)(xouy)(R_1)] \quad (4.20)$$

$$\Phi_m = [(0,0572)(xouy)(R_1)] - [(0,0237)(xouy)(R_2)] \quad (4.21)$$

K_{fs} = Condutividade hidráulica (l/t)

Φ_m = Fluxo potencial mátrico (l²/ t)

x ou y = Constantes dos reservatórios de água, sendo x= 35,08 cm², respectiva ao reservatório que foi utilizado durante o ensaio;

R_1 = Leitura obtida com a primeira carga aplicada (coluna de água de 5 cm), (l/t); e

R_2 = Leitura obtida com a segunda carga aplicada (coluna de água de 10 cm), (l/t)

4.1.2.2 Curvas características de retenção de água (sucção) e determinação das curvas de secagem

A curva característica, ou curva de retenção de água foi determinada através da técnica do papel filtro. Para este ensaio, optou-se por trabalhar com o papel filtro Whatman N° 42. A escolha foi feita devido a algumas observações dos pesquisadores sobre qualidade dos papéis. Segundo SOTO (2004), o papel filtro Whatman N° 42 é mais apropriado para o uso por ser mais espesso e por apresentar um tamanho de poro pequeno. Também afirma que, nos seus

experimentos, o desempenho do papel filtro Whatman N° 42 foi mais consistente do que o papel filtro Schleicher & Schuell N° 589.

O ensaio foi realizado seguindo a norma ASTM D5298-92, com uma pequena variação. Segundo esta norma, deve-se inicialmente secar o papel filtro em estufa por 16 horas. Segundo MARINHO (1997), este procedimento pode afetar as características de absorção do papel resultando na alteração da curva de calibração, razão pela qual optou-se por não secar o papel filtro na estufa.

Foram retirados 9 corpos de prova referentes à amostra P2. Os corpos de prova eram cilíndricos com diâmetro igual a 5,01 cm e altura igual a 2,01 cm. Dividiu-se o intervalo de saturação iniciando pelo teor de umidade higroscópica até o teor de umidade de saturação em 9 trechos iguais e controlou-se a saturação das amostras buscando analisar todo segmento. Foi também determinada a condutividade hidráulica não saturada com auxílio da equação (VAN GENUTCHEN, 1980).

As curvas de secagem são montadas com o fim de entender melhor o fenômeno da contração do solo e seu fissuramento. O ensaio será feito conforme descrito em VILLAR (2002), e consiste na determinação do volume das amostras, do teor de umidade além do conhecimento de sua densidade total e relativa. Estas determinações exigem medições sistemáticas do volume e do teor de umidade o que demanda grande quantidade de amostras.

4.1.2.3 Ensaio de Porosidade por instrução de mercúrio

Dentre as propriedades físicas mais relevantes para o estudo de erosão destacam-se a porosidade e a distribuição dos poros. Executou-se o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio que foi executado através da aplicação de pressão. Utilizou-se um equipamento denominado porosizer de 9320 Micromeritics com uma pressão máxima 30000psi. A faixa de medição de tamanho de poros do equipamento é da ordem de 0,006 a 360 micron. Este ensaio foi executado no Centro de caracterização e desenvolvimento de Materiais da UFSCar/UNESP.

4.1.2.4 Ensaio de difração por raios X e microscopia eletrônica de varredura das amostras

As amostras P2 e P3 foram submetidas a análises qualitativas por difratometria de raios-X realizadas em um difratômetro Philips, modelo PW1710, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e cristal monocromador de grafita, velocidade de varredura $0,06^\circ 2\theta/\text{s}$, tempo de contagem 1s, intervalo de varredura de 3° até $90^\circ 2\theta$. Este ensaio foi feito no Laboratório de Microscopia da UFMG. A microscopia eletrônica de varredura foi executada no laboratório da Universidade Federal de Ouro Preto. Nestes ensaios foi possível identificar os minerais presentes nas amostras P2 e P3 principalmente os argilominerais que são os principais fatores que influenciam na maior ou menor susceptibilidade a sofrer processo erosivo segundo o critério de RAMIDAM (2003) principalmente para solos tropicais.

4.1.2.5 Ensaio para quantificar a quantidade de matéria orgânica

A determinação da quantidade de matéria orgânica existente foi feita através do método de calcinação “*Loss of Ignition*”. Este método consiste em secar 4 g de cada amostra previamente seca a 105°C , posteriormente estas amostras são levadas a uma mufla que é aquecida por 8 h a 250°C . Ulteriormente a amostra é pesada e a diferença entre o peso inicial e final corresponde ao teor de matéria orgânica. A quantificação da matéria orgânica é de importância fundamental para o análise de erosão. Ela influencia muito nas propriedades tais como a absorção e a retenção de água e plasticidade.

A tabela abaixo ilustra o número de ensaios:

Tabela 4.12 – Número de ensaios executados na caracterização Física

Ensaio	In - situ		Amostra deformada		Amostra indeformada	
	P2	P3	P2	P3	P2	P3
Permeabilidade in-situ Guelph	1,0	1,0				
Curvas de sucção					9,0	
Curvas de secagem					13,0	
Ensaio de Porosidade por instrução de mercúrio			1,0	1,0		

Ensaio de difração por raios X			1,0	1,0		
Ensaio de microscopia eletrônica de varredura			1,0	1,0		
Ensaio de matéria orgânica					1,0	1,0

4.1.2.6 Ensaio de classificação do tipo MCT

O sistema de classificação para solos tropicais, MCT (Miniatura, Compactada Tropical) proposto por NOGAMI & VILLIBOR (1981), em face das limitações geotécnicas tradicionais a que esses solos estão sujeitos. As classificações usuais podem classificar solos pedogeneticamente diferentes como sendo pertencentes à mesmas classes, embora possuam propriedades geotécnicas distintas, principalmente quando compactadas. Inicialmente desenvolvida para estudos rodoviários, essa metodologia passou a ser utilizada para outros fins como o ensaio de perda de massa por imersão em água, sendo este último parte integrante da metodologia NOGAMI E VILLIBOR (1995), que em conjunto com o ensaio de compactação do procedimento de mini-MCV (Moisture Condition Value), permite distinguir os solos de comportamento laterítico dos solos de comportamento não laterítico, bem como as características de erodibilidade que podem ser comparadas com a das amostras indeformadas, permitindo uma avaliação da estrutura natural no potencial de erosão. A execução de estes ensaios está normalizado pela DNER-ME 258/94 e DNER-ME 256/94, respectivamente. O equipamento utilizado no ensaio é mostrado na figura 4.31



Figura 4.31 – Equipamento para ensaio Mini – MCV

4.1.3 Ensaio de Caracterização Geomêcnica

A Caracterização Geomêcnica permite analisar a erodibilidade em função de propriedades geomecânicas dos solos como a colapsibilidade, coesão, resistência à tração.

4.1.3.1 Ensaio de compressão edométrico convencional

Foram realizados dois ensaios de compressão edométrico para a amostra P2, com corpo de prova em estado natural e outro com um corpo de prova compactado através destes dois ensaios pode-se observar a influência da estrutura. Para esta simulação utilizamos a densidade e umidade de campo. O procedimento adotado para a realização dos ensaios foi de acordo com a NBR 12007/90.

Cada etapa do ensaio é realizada com um carregamento diferente. Após cada uma destas, um gráfico de deslocamento vertical em função do tempo é gerado e através dele o coeficiente de adensamento (C_v) e o t_{90} , ou seja, tempo com o qual ocorrem 90% do adensamento no solo são obtidos. No caso dos ensaios presentes neste trabalho, os C_v 's foram determinados pelo método de Taylor. Estes índices são de fundamental importância para avaliar recalques futuros e em ensaios como o de cisalhamento direto no qual deve ser realizado de forma drenada.

Durante a execução do ensaio avaliamos a susceptibilidade ao colapso pelo critério proposto por VARGAS (1978), que consiste em executar ensaios edométricos simples com carregamentos progressivos até de 4000kPa (12kPa, 25kPa, 50kPa e 100kPa, 200kPa, 400kPa, 800kPa, 1600kPa, 3200kPa, 4000kPa) e posterior inundação no carregamento correspondente a 25kPa. Escolhemos fazer a inundação na tensão de 25kPa com o objetivo de observar a variação brusca na redução do índice de vazios. No carregamento edométrico a inundação do solo gera diminuição da pressão da sucção ou o amolecimento do cimento natural, o que provoca microrupturas, que se manifestam só pelo recalque em virtude do solo estar contido no anel do ensaio edométrico. Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa de Adensamento tipo "Bishop" (Figura 4.32). Além disso, foi realizado também o ensaio de permeabilidade a carga variável que permitiu comparar com os resultados obtidos através do permeômetro de Guelph no campo.



Figura 4.32 – Prensa de adensamento tipo “Bishop”

4.1.3.2 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento foi realizado com amostras indeformadas e saturadas, na condição drenada. Foram feitos ensaios apenas para a amostra P2. A tensão de pré-adensamento obtida no ensaio de compressão edométrico influenciará na escolha das tensões que se aplica aos corpos de prova, neste caso, escolheu-se três tensões pré- adensantes que são de 25, 50 e 90 kPa e também três tensões normalmente adensadas que são de 200, 300 e 400 kPa. A escolha destas tensões foi feita com base no resultado da tensão de pré-adensante ($\sigma_{PA} = 103$ kPa), esse critério foi escolhido pelo fato que solo apresenta características muito distintas quando o solo rompe acima e abaixo desse valor de tensão. Os ensaios cisalhamento forem executados com uma velocidade constante de 0,048 mm/min.

Com o objetivo de uniformizar uma definição da resistência nos gráficos das curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal foi utilizado o critério de ruptura proposta por CAMPOS & CARRILLO (1995) e o critério de ruptura a 2mm e 12mm. O critério de CAMPOS & CARRILLO (1995) assume que o solo havia rompido quando a curva tensão cisalhante (τ) versus deslocamento horizontal (δ_h) atingisse pela primeira vez uma inclinação (α) aproximadamente constante. A Figura 4.33 ilustra o critério utilizado por CAMPOS & CARRILLO (1995)

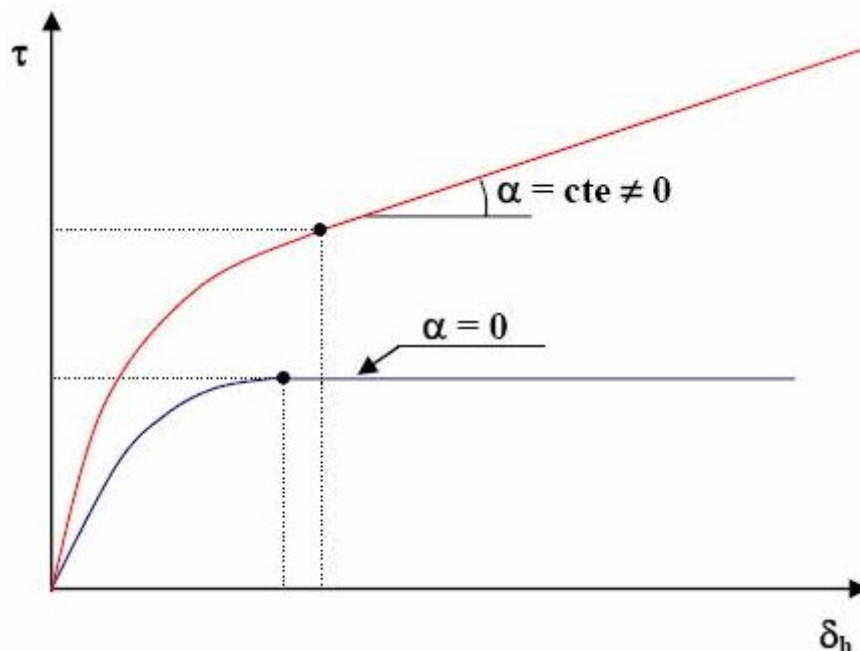


Figura 4.33 – Critério de definição dos pontos de ruptura (CAMPOS & CARRILLO, 1995)

Os critérios de ruptura a 2mm e 12mm consistem em estimar as tensões cisalhante que provocam a ruptura do solo quando o deslocamento horizontal atinge 2 e 12mm

De posse de estimar 3 pares de valores de tensões que são obtidas através dos critérios de ruptura é possível construir a envoltória de resistência e dela obter os parâmetros de resistência, no caso, coesão e ângulo de atrito (c e ϕ).

4.1.3.3 Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples foi executado para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), sendo este valor considerado como a “coesão aparente de solos argilosos”. A coesão é a propriedade do solo que melhor se relaciona com a perda de solo, já que ela influencia na resistência das partículas à desagregação.

Foram realizados 11 ensaios com corpos de prova, com diâmetro de 3,5 cm e altura de 9,0 cm aproximadamente. Primeiramente, o corpo de prova indeformado foi colocado numa bacia com água destilada até a completa saturação por capilaridade. Logo após a saturação o corpo de prova foi colocado para secar na sombra até se obter a umidade desejada (ou grau de saturação desejado). A Figura 4.34 fornece uma visão geral do ensaio.



Figura 4.34 – Ensaio de compressão simples

4.1.3.4 Ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro

A resistência à tração do solo é uma propriedade que depende geralmente da sucção. Foram ensaiados 11 corpos de provas indeformados na condição não drenada. Os procedimentos adotados foram os mesmos adotados para o ensaio de compressão simples, ou seja, primeiramente o corpo de prova indeformado foi colocado numa bacia com água destilada até a completa saturação por capilaridade. Logo após a saturação o corpo de prova foi colocado para secar a sombra até se obter a umidade desejada (ou grau de saturação desejado). O procedimento de saturação está ilustrado na Figura 4.35.



Figura 4.35 – Saturação do corpo de prova

Posteriormente, com as amostras com grau de saturação desejado, procedia-se à aplicação de cargas de compressão vertical. O corpo prova era cilíndrico, conforme ilustra a Figura 4.35. Foram moldados corpos de prova com 7,5 cm de diâmetro e 2 cm de espessura. Este ensaio é executado pelo fato que durante o processo de secagem o trincamento do solo que é assumido

de ocorrer quando as forças atrativas entre as partículas, surgem pelo aumento da sucção a medida que o solo seca supera a resistência à tração do solo. A resistência a tração por sua vez, seria uma resultante, entre outras coisas, das ligações físico-químicas agindo entre partículas. Por esta razão é necessário o estudo da resistência à tração e de sua relação com os teores de umidade e grau de saturação. Além disso a resistência de tração permite conhecer a resistência dos agregados e indiretamente, do potencial de desagregação e erodibilidade. (VILLAR 2002)



Figura 4.36 – Ensaio de tração

4.1.3.5 Ensaio de Compactação

Este ensaio foi executado para auxiliar na verificação da influência da estrutura do solo no seu comportamento. Resultados em amostras compactadas foram comparados com os resultados de amostra natural e a diferença destes resultados pode ser vista como uma indicação desta influência. Este ensaio foi realizado de acordo com NBR7182/86. Foram realizados ensaios para as amostras P2 e P3 utilizando a energia normal.

A Tabela 4.13 indica o número de ensaios executados para a caracterização Geomecânica

Tabela 4.13 – Número de ensaios executados na caracterização Geomecânica

Ensaio	Amostra deformada		Amostra indeformada	
	P2	P3	P2	P3
Ensaio compressão edométrico	1.0		1.0	
Ensaio de cisalhamento direto			6.0	
Ensaio de compressão simples			11.0	-
Ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro			11.0	-
Ensaio de Compactação	6,0	6,0		

4.2 Ensaio de laboratório para avaliação da erodibilidade em forma direta

A determinação da erodibilidade dos solos através de ensaios geotécnicos tem sido uma ferramenta importante na identificação e entendimento ou até mesmo para propor soluções. A erodibilidade pode ser avaliada em forma direta através dos ensaios abaixo indicados em alguns deles a avaliação da erodibilidade é através de taxa de perda de solo e outros a avaliação é feita através das observações a comportamento físico quando o solo entra em contato com a água.

4.2.1 Ensaio Inderbitzen

O ensaio Inderbitzen foi escolhido para ser executado neste trabalho por ser simples e rápido além de simular de forma prática e direta o efeito do escoamento laminar sobre a superfície do solo. Basicamente, ele consiste em uma rampa, cuja declividade pode ser alterada, onde uma amostra é colocada na parte mais baixa e sobre ela é deixado correr uma lâmina de água, sendo que as partículas arrastadas são coletadas e quantificadas. O solo primeiramente é submetido a um tempo de embebedimento para umedecimento. Logo após, inicia-se o

escoamento, e o solo erodido é retido numa peneira #200 e coletado em tempos pré-determinados. O potencial de erodibilidade é definido pela quantidade acumulada de solo retido na #200, dividido pela área da amostra.

O equipamento foi construído baseado no modelo proposto por FRAGASSI (2001) amostrado na figura 4.37, foram realizados testes para a eleição do tipo de material que seria utilizado para a construção da rampa, de modo a ter uma idéia de como pode ser o efeito do atrito. Foram testados dois tipos de material, aço e acrílico usando solo saprolítico de Belo Horizonte, com amostras indeformadas. As amostras estavam na mesma umidade e densidade. O resultado está ilustrado na Figura (4.38)



Figura 4.37 – Aparelho Inderbitzen usado nos ensaios : FRAGASSI (2001)

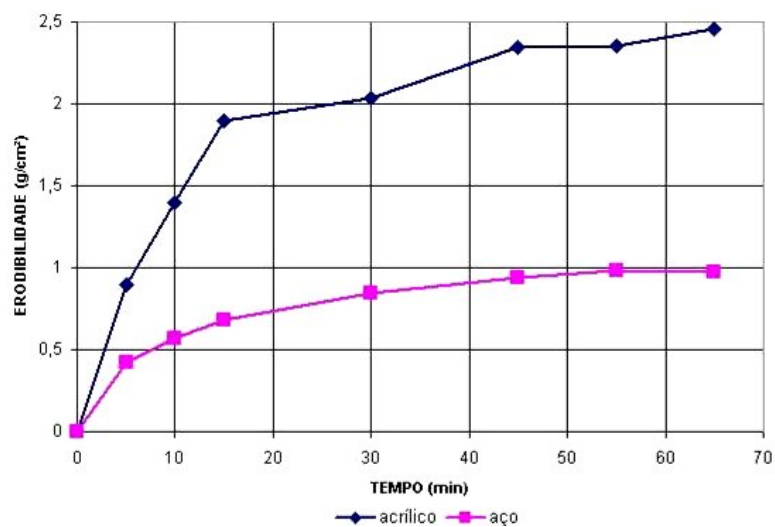


Figura 4.38 – Ensaio realizado para determinar o material da rampa do aparelho Inderbitzen

Conforme pode ser observado na Figura 4.37, o ensaio conduzido com rampa de aço originou uma curva mais bem definida, ao contrário do ensaio conduzido com a rampa de acrílico. O pico na curva do ensaio conduzido com rampa de acrílico foi devido à mudança da direção do fluxo de água que se formou devido à baixa rugosidade do material. Não se conseguiu estabelecer na rampa de acrílico um fluxo uniforme, conforme mencionado por FRAGASSI (2001). Por tanto decidiu-se utilizar nos ensaios a rampa de aço.

Os ensaios com material do TVR-CBI foram realizados com amostras indeformadas coletadas superficialmente no ponto (P2). A fim de representar melhor as condições de campo, foram adotadas as declividades e vazões máximas e mínimas do TVR-CBI fornecidas pelo CCBE (Consórcio Capim Branco Energia), que foram as seguintes: vazão máxima de 2,30 l/min e mínima de 1,20 l/min, declividade máxima de 25° e mínima de 10°.

Foram mantidos os 15 minutos de embebedimento proposto por FÁCIO (1991) para anular eventuais forças de sucção. Foi coletado o material erodido e retido na peneira #200. A duração do ensaio foi de 65 minutos, tempo no qual se pode obter valores aproximadamente constantes para a taxa de erosão do solo.

Também no ensaio Inderbitzen foi calculada uma tensão cisalhante hidráulica (t_h) para cada tipo de vazão e declividade, além disso, se estimou o potencial de erodibilidade e as tensões de cisalhamento hidráulico crítico através da metodologia proposta por NORI et al (2005).

4.2.2 Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação tem por objetivo verificar a estabilidade de uma amostra de solo indeformada quando imerso em água destilada, independente da dispersão do material. O resultado deste ensaio é puramente qualitativo. A relação entre o potencial de desagregação e a erodibilidade é evidente (LIMA, 2003).

Para a amostra P2 foram realizados dois métodos, para verificar se existe alguma influência no comportamento do solo, assim como a classificação final do solo com relação à reação de inundação, de acordo com proposta de SANTOS & CAMAPUM (1998). Os métodos são: método da imersão parcial e método da imersão total. O método da imersão parcial consiste em colocar a amostra sobre uma pedra porosa com o nível de água sendo mantido na altura da base das amostras por um período de 30 minutos. A seguir, a altura de água é aumentada

sucessivamente para 1/3, 2/3, até a submersão total da amostra, mantendo-se entre cada uma destas fases um intervalo de 15 minutos. Após a submersão total o ensaio prossegue até o período de 24 horas. Por sua vez, o método de imersão total consiste em colocar a amostra sobre uma bandeja com água, de modo que a amostra fique totalmente submersa, observando-se suas reações ao processo de submersão durante 24 horas. Após o término do ensaio, além da verificação da desagregabilidade, pode ser feita a classificação quanto à reação a inundação de acordo com os seguintes comportamentos:

- Sem resposta: quando a amostra mantém sua forma e tamanho original;
- Abatimento (slumping): quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado;
- Fraturamento: quando a amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas;
- Dispersão: quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma “nuvem” coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

A quantidade de ensaios de avaliação da erodibilidade em forma direta encontrasse na tabela abaixo:

Tabela 4.14 – Número de ensaios executados na avaliação da erodibilidade em forma direta

Ensaio	Amostra deformada		Amostra indeformada	
	P2	P3	P2	P3
Ensaio Inderbitzen			14,0	
Ensaio de desagregação			4,0	

Observa-se que nos ensaios onde foram utilizadas amostras indeformadas somente foi possível utilizar amostras de solo do ponto P2, pelo fato de que não foi possível realizar a coleta de amostras indeformadas do ponto P3. Já que o processo erosivo desta voçoroca estava bem acelerado e a desagregação das partículas de solo era muito alta, as raízes formavam entre elas uma malha de proteção que não permitia o desabamento do solo, portanto quando estas raízes eram cortadas pelo amostrador os corpos de prova se desmoronavam.

Diante desta dificuldade tentou-se executar o ensaio de frasco de areia para conhecer a densidade de campo e em laboratório, com este dado poder-se-ia simular os corpos de prova. Infelizmente as chuvas do mês de dezembro não permitiram obter a densidade de campo.

4.3 Modelos matemáticos para a estimativa da perda de solo

A estimativa de perda de solo, também pode ser determinada por meio de modelos matemáticos, que fazem uma estimativa através de diversos parâmetros, que influem no processo erosivo. Segundo SOUZA et al (2006) a maior parte dos modelos para a estimativa de produção de sedimentos em pequenas bacias tem origem na Equação Universal da perda de solo (EUPS) e a Equação Universal Modificada de perda de solo (MUSLE)

4.3.1 Equação Universal de perda de solo EUPS

A perda de solo média anual (A, em t/ha ano) é dada pelo produto $A = R K L S C P$, onde R é o fator de erosividade da chuva, K é a erodibilidade do solo, L e S são, respectivamente, o fator de comprimento e de declividade de vertente, C é o fator de uso e manejo do solo, e P é o fator de práticas conservacionistas. O fator de erosividade da chuva (R) foi estimado de acordo com um mapa de erodibilidade anual formulada por SILVA (2004). Para o cálculo do parâmetro K foi utilizado o nomograma proposto por WISCHMEIER & SMITH (1978), os demais parâmetros foram calculados através de planos topográficos, fotografias aéreas e mapas de uso de solo.

4.3.2 Equação Universal de perda de solo modificada MUSLE

A formulação da MUSLE difere da USLE no que se refere ao termo R, substituído por informações relativas à expectativa de escoamento superficial da água “runoff” (WILLIAMS, 1975; PINTO et al, 1994), de modo que o fator de erosividade da chuva muda através do fator de escoamento que é calculado através da equação:

$$R = 89,6 (Q \cdot qp)^{0,56} . \quad (4.17)$$

Substituindo-se este termo na equação da USLE tem-se então a equação final:

$$A = 89,6 (Q \cdot qp)^{0,56} \cdot K.L.S. CP \quad (4.16)$$

O parâmetro de escoamento depende Q = volume de escoamento superficial total (m^3) e de q_p = vazão pico do escoamento (m^3/seg).

Para o cálculo do Q (volume de escoamento superficial) foi utilizada a disponibilidade hídrica agora para a q_p (vazão pico do escoamento) foi feito através da equação de vazão de pico segundo a metodologia SCS (*Soil Conservation Service*) MENDES FILHO, et al (2007).

4.3.3 Estimativa do volume de assoreamento e a disponibilidade hídrica

Para determinar a estimativa do volume de assoreamento utilizaremos dados tais como: área, declividade, vazão líquida de algumas seções bati métricas que se encontram próximas aos pontos de coleta. Estes dados forem estimados no trabalho PAULO (2007), além de utilizaremos equações matemáticas propostas pela hidráulica para estimar o transporte dos sedimentos, Também se utilizou o programa computacional HEC-RAS para a simulação da quantidade de sedimento que por ano ficaria depositado no fundo da calha do rio. Já na estimativa da disponibilidade hídrica se utilizara as equações que nos permitam calcular vazão específica média de longo termo.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Resultados dos ensaios utilizados para a avaliação da erodibilidade em forma indireta

Os ensaios de laboratório para avaliação da erodibilidade na forma indireta englobam os ensaios de caracterização geotécnica do solo.

5.1.1 Ensaios de caracterização Geotécnica

5.1.1.1 Análise granulométrica

Com a finalidade de se obter a correlação entre a erodibilidade dos solos e as propriedades físicas, foram executados ensaios granulométricos com uso de defloculante e sem uso de defloculante. Estes ensaios foram realizados em três etapas, de acordo com a NBR 7181/84: peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação. As curvas granulométricas obtidas para as amostras P2 e P3 utilizando defloculante e sem defloculante estão ilustradas nas Figuras 5.39, 5.40. O uso do agente dispersor (defloculante) dentro da execução do ensaio permitiu desagregar de forma mais eficiente as partículas finas que não foram desagregadas através do destorroamento.

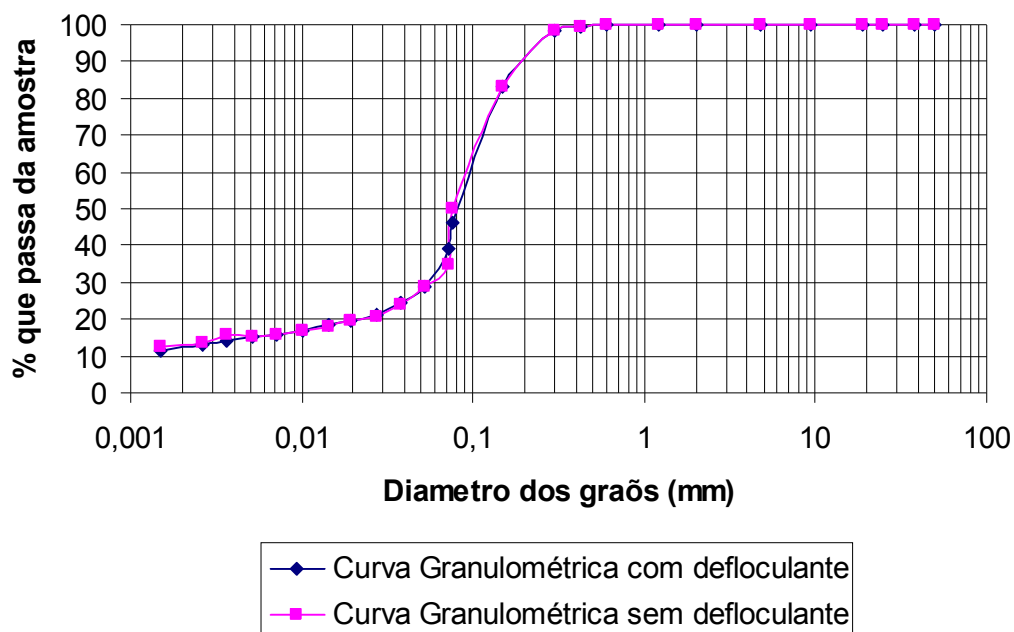


Figura 5.39 – Curvas granulométricas das amostras P2 com defloculante e sem defloculante

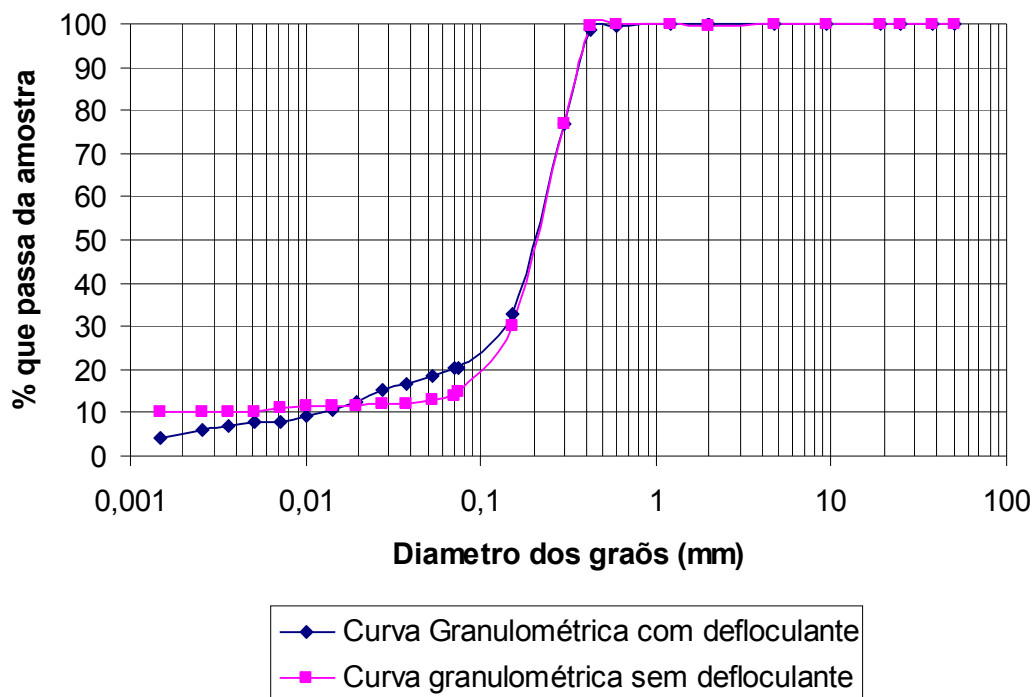


Figura 5.40 – Curva granulométrica das amostras P3 com defloculante e sem defloculante

Das curvas granulométricas se estima o coeficiente de curvatura (C_c) e o coeficiente de uniformidade (C_u) (Tabela 5.15) parâmetros que nos permitiram conhecer os intervalos de variação dos diâmetros dos grãos, e a tendência de continuidade ou descontinuidade da curva.

Tabela 5.15 – Parâmetros da curva granulométrica com defloculante e sem defloculante

	AMOSTRA P2		AMOSTRA P3	
	c/d	s/d	c/d	s/d
C_c	19,6	19,6	0,068	52,26
C_u	63	63	22	133

A curva da amostra P2 com defloculante e sem defloculante acusa um comportamento bastante semelhante: os resultados quase são coincidentes. Já as curvas da amostra P3 apresentam diferença. Este fato indicaria que o solo do ponto P2 apresenta, quanto ao aspecto químico, fácil defloculação, não sendo necessária a utilização do defloculante para desfazer os pequenos grumos ou torrões de partículas finas. Agora o solo do ponto P3 mostra variação na quantidade de fração de partículas finas. Quanto à análise do problema de erosão pelo comportamento do solo P2 existe possibilidade de que pela simples atuação da força trativa da água este solo possa desagregar. Agora o solo do ponto P3, através do uso do agente dispersor, apresenta variação na porcentagem presente de argila e silte, mas não influenciou

na classificação final, por tanto acredito que este fato deva-se ao procedimento do destorroamento. Analisando a erodibilidade dos pontos P2 e P3 desde o ponto de vista de sua textura e tendo em consideração trabalhos de outros pesquisadores em solos com predomínio de areias tais como: FACIO (1991), FRAGASSI (2001), RAMIDAN (2003) pode se considerar que o solo em estudo é susceptível a processos erosivos.

Analisando os coeficientes de uniformidade (C_u) e (C_c) percebe-se que a curva granulométrica não pode ser consideradas bem graduadas GRAND (1970) indicou que solos não graduadas são mais susceptíveis a sofrer processos de erosão. O coeficiente de uniformidade das duas amostras é $C_u \geq 6$ portanto, considerando a correlação de erodibilidade e granulométrica estabelecida por FACIO (1991), onde solos considerados erodíveis são aqueles que $C_u < 5$, o solo em estudo pode ser considerado pouco erodível.

As divisões de cada fração, segundo a ABNT e a classificação pelo Sistema Unificado do solo estão na tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Parâmetros obtidos através da granulometria

CARACTERÍSTICAS	COM DEFLOCULANTE		SEM DEFLOCULANTE	
	AMOSTRA P2	AMOSTRA P3	AMOSTRA P2	AMOSTRA P3
Pedregulho (%)	0,0	0,1	0,0	0,1
Areia grossa (%)	0,1	0,5	0,1	0,5
Areia média (%)	6,9	49,4	6,9	49,4
Areia fina (%)	60,0	30,0	63	30,0
silte (%)	20,0	14,0	18	12,0
Argila (%)	13,0	6,0	12	8,0
	SC-SM		SC-SM	SM
Classificação SUCS	Areia -argilo - siltosa	SM Areia siltosa	Areia -argilo -siltosa	Areia siltosa

Percebe-se que o solo P3 é muito mais arenoso que o solo P2, o que indicaria uma maior friabilidade, já que possui menores níveis de sucção ou coesão aparente, além disso, desagregará mais facilmente. Ou seja, a região onde fica o solo P3, pela análise granulométrica é mais potencialmente sujeita a erosão.

As quantidades de argila encontrada nas amostras P2 e P3 são menores que 30 e 35%, que são as porcentagens de materiais argilosos consideradas por RAMIDAN (2003) como indicadores de resistência à erosão. Por este fato pode-se considerar, a princípio que o solo tem pouca resistência aos efeitos erosivos da chuva.

Na análise de erosão os diâmetros das partículas de solo influenciaram na sua facilidade de desagregação e transporte. FRAGASSI (2001) conclui que as partículas de solo que estão na ordem das areias finas e siltes são mais erodíveis. No solo em estudo foi identificada maior quantidade de partículas de areia fina, portanto, sob o ponto de vista de sua textura ele pode ser considerado erodível.

5.1.1.2 Limites de Atterberg

Os limites de liquidez (LL) de plasticidade (LP) forem obtidos de acordo com HEAD (1992) e NBR 7180/84, respectivamente. Para o cálculo do valor de LL utilizou-se o método do cone, que é baseado na medida da penetração no solo de um cone padrão e também o método Casagrande que consiste em fechar uma ranhura no solo através de golpes que são geradas pela queda livre da concha do aparelho. A Tabela 5.17 apresenta resultados médios das diversas determinações de LL, LP e IP do ponto de coleta P2. Também nesta tabela é apresentado o limite de contração, que foi obtido através da curva de secagem. O gráfico “Umidade x Penetração” que é utilizado para a determinação do LL para a amostra P2 encontra-se na Figura 5.41. O solo do ponto P3, por ser muito arenoso, não permitiu a execução do ensaio.

Tabela 5.17 - Valores do limite de Atterberg obtidos

	LL (%) Metodo do cone	LL (%) Metodo Casagrande	LP (%)	Lc (%)	IP = LL-LP (%)
Amostra P2	29,0	32	24,0	23	5,0
Amostra P3	NP	NP	NP	NP	NP

Com a finalidade de medir a influência da fração argila no comportamento do solo, foi utilizado o conceito de atividade coloidal (Ac), definida por SKEMPTON (1953). A atividade de argila para a amostra P2 foi calculada através da formula indicada abaixo:

$$Ac = \frac{IP}{\% \text{ arg}} \quad (5.22)$$

O resultado foi de 0.38. SKEMPTON (1953) indicou que quando $Ac < 0,75$, a fração argila presente no solo pode ser considerada inativa, portanto em termos de comportamento esta inatividade influenciará na coesão. O autor estabeleceu uma correlação entre a plasticidade e coesão com a natureza mineralógica do solo e indicou, que um solo com atividade de argila inativa se desagrega com facilidade, isto implica que a coesão entre partículas foi superada por forças que geram deslocamento. O solo em estudo, não apresenta uma quantidade significativa de argila o que afetará a coesão, isto já é um indicativo de uma possível susceptibilidade do solo a processos de erosão.

Analisando o índice de plasticidade (IP) e considerando a classificação proposta por FACIO (1991) com relação ao potencial de erodibilidade, o IP do ponto P2 é um valor menor que 6 portanto estariam indicando que o solo é de baixa resistência a processos erosivos.

5.1.1.3 Massa específica dos grãos

A obtenção da massa específica dos grãos foi feita de acordo com a NBR 6508/84. A Tabela 5.18 apresenta os valores encontrados para cada amostra.

Tabela 5.18 - Valores de massa específica dos grãos

AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS (g/cm ³)
P2	2.620
P3	2.660

A massa específica encontrada em cada uma das amostras representa o valor médio das massas específicas de cada tipo de grãos de minerais que constituem a fase sólida do solo. PESSOA, (2004) apresenta uma tabela com os valores de massa específica dos sólidos de minerais mais comuns.

Tabela 5.19 – Massa Específica dos sólidos de diferentes minerais (PESSOA, 2004)

MINERAL	MASSA ESPECIFICA DOS SÓLIDOS (Kg/m ³)
Feldspato	2590 - 2900
Mica	2700 – 3200
Caulinita	2600 – 2650
Montmorilonita	2500 – 2800
Ilmenita	4500 – 5000
Magnetita	5200
Goetita	4400
Quartzo	2650

A massa específica das amostras P2 encontra-se dentro dos valores dos solos que contêm Quartzo, Feldspato, Caulinita, Montmorilonita, que são argilominerais. Já o valor da massa específica da amostra P3 localiza-se dentro dos valores dos solos que apresentam Feldspato, Montmorilonita, Caulinita que também são considerados argilominerais. A identificação de estes minerais com maior exatidão será feita através do ensaio de difração de raios X, mas os resultados deste ensaio estariam indicando a possível presença de argilominerais dentro da fase sólida do solo. Os argilominerais são considerados por RAMIDAM (2003) como os principais fatores que influenciam na susceptibilidade do solo para sofrer processos erosivos. Por exemplo, as argilas do tipo Montmorilonitas aumentam consideravelmente a plasticidade, já as Iilitas, possui maior resistência à erosão que as Caulinitas. Portanto, se realmente se confirma a presença destes minerais no solo através do ensaio de difração de raio X, com certeza eles influenciaram no potencial erosivo do solo em estudo.

5.1.2 Ensaio de compactação

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7182/86 para as amostras P2 e P3 utilizando a energia Proctor Normal. A Tabela 5.20 apresenta os valores obtidos para cada amostra ensaiada. No Anexo I Figuras A1 e A2 encontram-se as curvas de compactação determinadas para os corpos de prova P2 e P3.

Tabela 5.20 – Valores de umidade ótima e Peso específico aparente seco para todas as amostras

Ponto.	Peso Específico Aparente Seco (KN/m ³)	Umidade Ótima (%)
Amostra P2	16,51	16,3
Amostra P3	16,19	17,2

Este ensaio fornece os valores do peso específico aparente seco e a umidade ótima que, segundo PINTO (2002), não são índices físicos do solo. Estes valores, na realidade, dependeram da energia aplicada. O autor indica que quando o solo se encontra com umidade abaixo da ótima, a aplicação de maior energia de compactação provoca aumento de densidade seca, mas quando a umidade é maior do que a ótima a aplicação da energia na compactação não provocará aumento na densidade seca, pois não consegue expelir o ar dos vazios. Este critério nos ajudará a entender como o pisoteio do gado influencia na diminuição do espaço poroso entre partículas, levando o solo a perder a sua capacidade de absorção. Esta perda de capacidade de absorção em épocas de chuva originará que a água não possa infiltrar tendo que escoar pela superfície e de fato causando susceptibilidade a processos erosivos do tipo laminar.

5.1.3 Ensaio de compressão edométrica

O resultado dos ensaios de compressão edométrica e os parâmetros utilizados para a avaliação a colapsividade proposta descrita por VARGAS (1978) encontra-se no Anexo III (Tabela A2, A3, A4, A5). Já com os valores de deformação equivalente a cada estágio de carregamento e descarregamento foi construída a curva de “Índice de vazios versus Tensão Efetiva”, a qual permite a determinação da tensão de pré-adensamento e compressibilidade do solo. Figura 5.41.

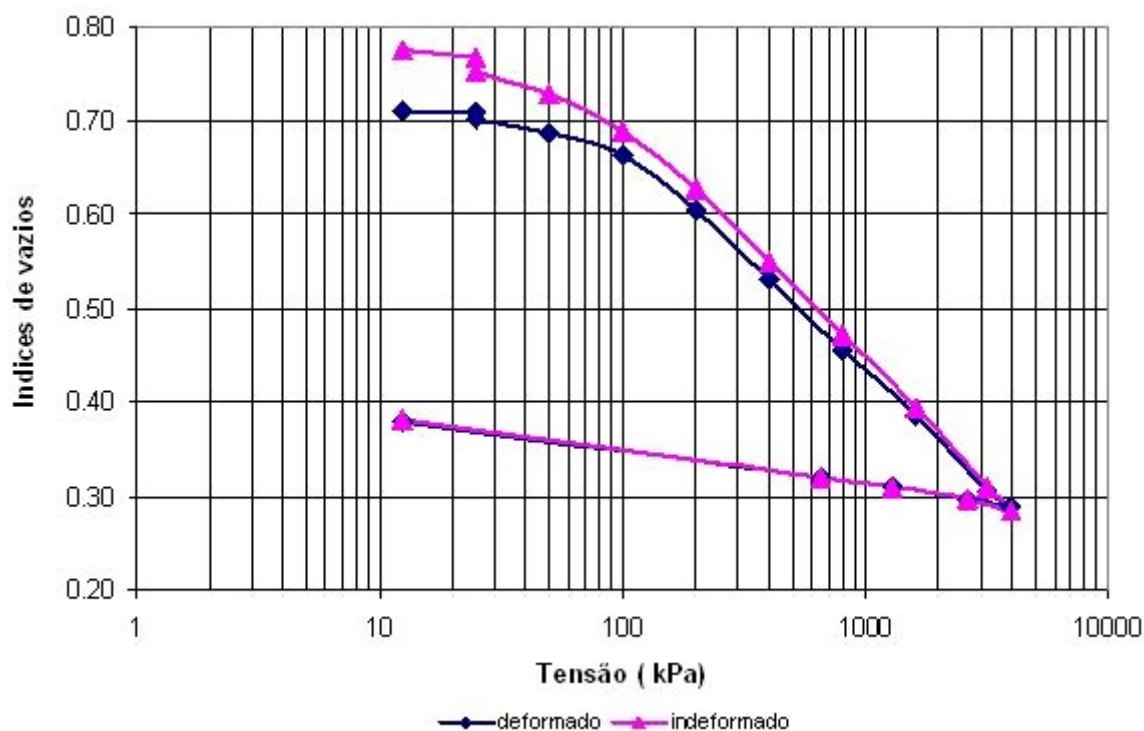


Figura 5.41 – Resultado do ensaio de compressão edométrica da amostra P1

As curvas da Figura 5.41 foram utilizadas para a determinação da Tensão de Pré – Adensamento, cujos valores são apresentados na tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Valores obtidos para tensão de pré-adensamento para a amostra P2

MÉTODO	TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO	TENSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO
	(kPa) – AMOSTRA SIMULADA	(kPa) – AMOSTRA NATURAL
Casagrande	90,0	90,0
Pacheco Silva	100,0	103,0

Observa-se que as tensões de pré-adensamento obtidas tanto para a amostra em estado natural quanto para a amostra compactada são praticamente as mesmas. Isto significa que a eliminação de ar nos espaços porosos do corpo de prova através das pressões exercidas pelas forças normais e a quantidade de água expulsa do interior dos vazios foi à mesma apesar de mexer na sua estrutura, portanto a variação da estrutura do solo não afetou as ligações entre partículas. Por se tratar de um solo arenoso, os baixos valores de tensão de pré-adensamento encontrados evidenciam o fato de que o solo não esteja sob forte cimentação.

De acordo com a proposta de VARGAS (1978), foi avaliada a colapsividade do solo, utilizando a fórmula indicada abaixo. Os valores obtidos para a amostra P2 estão apresentados na Tabela 5.22.

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_i} \quad (5.25)$$

Onde:

Δe = variação de índices de vazios pela saturação

e_i = índice de vazios antes da saturação

Tabela 5.22 – Valores do colapso estrutural		
	AMOSTRA COMPACTADA (P2)	AMOSTRA NATURAL (P2)
Colapso estrutural	0,006%	0,004%

Conforme é possível observar na tabela acima os valores de colapsibilidade encontrados são ainda bem inferiores ao valor que é considerado por VARGAS (1978) como colapsível ($i > 2\%$.) Portanto, o solo do ponto P2 é considerado não colapsível. CARDOSO et al (1998) manifestam que os fenômenos de colapso e erosão se relacionam pelo processo de desagregação do solo em água. O solo em estudo não é colapsível, portanto tendo em consideração o indicado por CARDOSO et al (1998), este solo apresenta resistência ao arranjo estrutural pela forte agregação das partículas, além de também apresentar resistência à erosão quando os taludes foram atingidos pela água.

O ensaio de adensamento também permitiu o cálculo da permeabilidade para cada valor de tensão efetiva aplicada. A Figura 5.42 apresenta os resultados deste ensaio. Na figura é possível observar que, para índices de vazios abaixo do valor do índice de vazios correspondente à tensão de pré-adensamento (e aproximadamente igual a 0,7), o comportamento das curvas índice de vazios versus coeficiente de permeabilidade é parecido.

Isto pode ser explicado devido à influência da água na estrutura da amostra indeformada e da amostra compactada ser a mesma. Como já era de se esperar, quanto maior o índice de vazios maior é o coeficiente de permeabilidade. Além disto, as ordens de grandeza obtida para os coeficientes de permeabilidade encontram-se na faixa que corresponde às areias. Este resultado coincidiu com o resultado que obtivemos no campo, com a utilização do permeâmetro Guelph modelo 2800 K1.

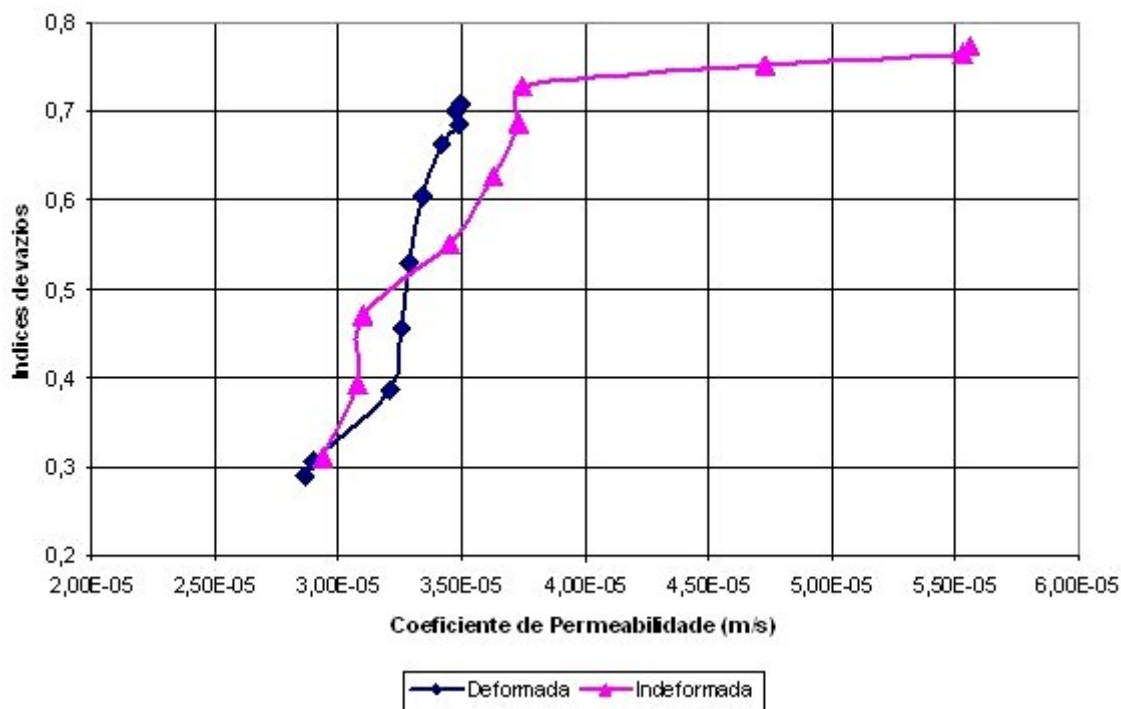


Figura 5.42 – Gráfica do coeficiente de permeabilidade versus índice de vazios

5.1.4 Ensaio de permeabilidade in-situ por meio do Permeômetro de Guelph

Foram feitos dois ensaios em cada ponto (P2, P3) e os respectivos resultados se encontram no Anexo IV (A 6, 7, 8, 9, 10,11). A Tabela 5.25 apresenta valores dos coeficientes de permeabilidade médios obtidos para cada ponto. Todos eles apresentaram a ordem de grandeza equivalente a uma areia fina, sendo que o resultado do solo P2 mostrou um comportamento que indicaria que ele é ligeiramente mais fino que do outro ponto (P3). Agora comparando estes resultados com os coeficientes de permeabilidade obtida no ensaio de adensamento pode-se observar que ambas as respostas indicam uma ordem de grandeza correspondente a areia fina. Somente cabe aclarar que a permeabilidade obtida para o ponto P2 através do permeômetro Guelph apresenta um valor (10^{-6}), mas baixo que o conseguido através do ensaio de adensamento (10^{-5}). Acredito que este comportamento se deva, possivelmente, à influência das raízes, já que elas absorvem a água reduzindo a percolação.

Tabela 5.23 – Valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos pelo ensaio do tipo Guelph

PONTO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)
(P2)	$3,28 \times 10^{-6}$
(P3)	$5,04 \times 10^{-5}$

5.1.5 Ensaio de compressão simples

A Figura 5.43 ilustra o comportamento do solo à resistência não drenada (S_u) em relação à umidade volumétrica, respectivamente. Desta correlação (umidade versus resistência), foi obtida uma reta, em escala semilogarítmica, onde para altas umidades correspondem pequenas resistências à compressão simples e vice-versa, comportamento previsto e descrito por VARGAS (1978).

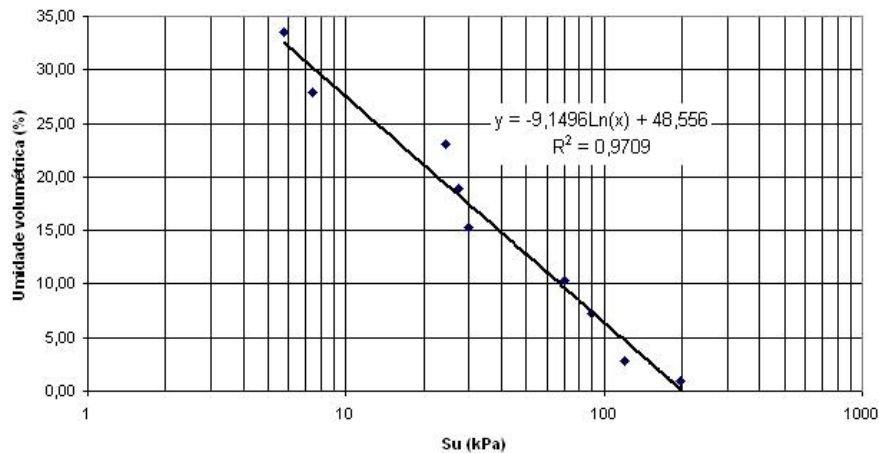


Figura 5.43 – Relação linear entre resistência e teor de umidade volumétrica

Com o objetivo de observar a influência do teor de umidade com a resistência ao cisalhamento não drenado se construiu o gráfico da Figura 5.44

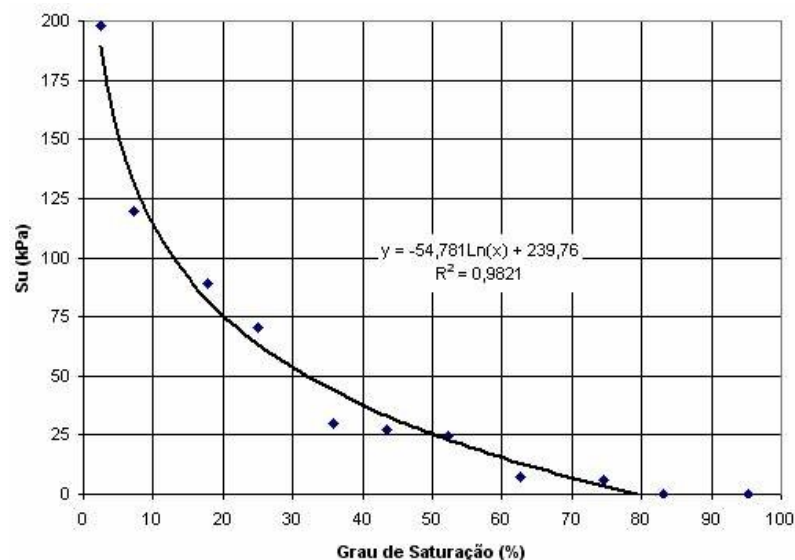


Figura 5.44 – Relação entre resistência e teor de umidade

Pode-se observar na Figura 5.44 que para graus de saturação superiores a 80% não foram obtidas as resistências ao cisalhamento não drenadas (S_u). As amostras sofreram deformação sem acusar resistência. Este fato pode ser explicado porque na medida em que se aumenta o

grau de saturação do solo há diminuição da sucção, responsável por uma parcela de resistência do solo. Para estas umidades altas, mesmo quando o grau de saturação ainda não chegou a 100%, a ausência da resistência ao cisalhamento não drenada pode ser explicada pela ausência de cimentação no solo.

Para observar a influência da coesão na erodibilidade tornou-se necessário estabelecer a relação que existe entre a coesão e a perda de solo, razão pela qual foram relacionados alguns dos resultados de resistência ao cisalhamento não drenado (S_u) com os resultados obtidos no ensaio Inderbitzen (representada pelos valores da taxa de erodibilidade K). A figura 5.45 ilustra esta correlação. Os dados da ilustração encontram-se na tabela 5.24

Tabela 5.24 – Valores obtidos do ensaio Inderbitzen versus Compressão Simples

Grau de saturação (%)	Taxa de erosão g/cm ²	Su (kPa)
18	0,0025	84
47	0,0045	55
33	0,0074	30
62	0,0149	17

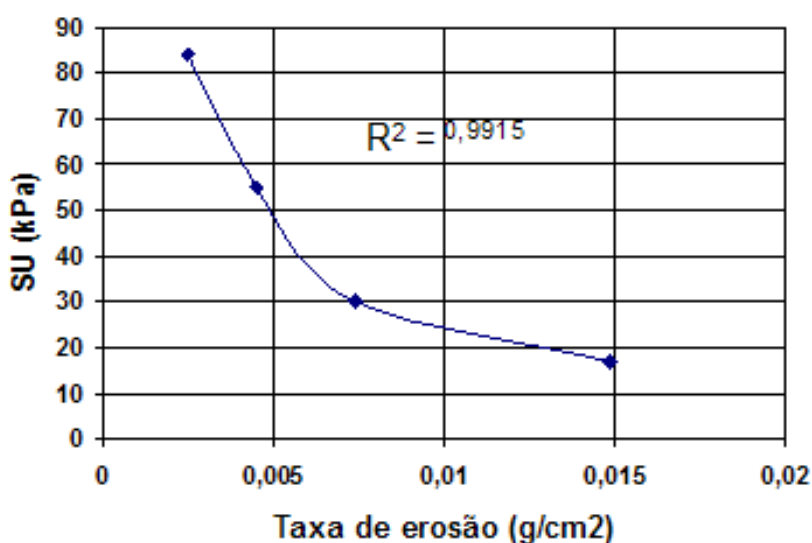


Figura 5.45 – Relação entre resistência SU e taxa de erosão

Observa-se que a coesão aparente (S_u) influencia na tendência de crescimento da taxa de erodibilidade, por exemplo, quando o (S_u) é superior a 80 kPa a taxa de erosão tende a ser praticamente inversamente proporcional à resistência não drenada, que por sua vez tem uma correlação lineal com a umidade volumétrica. Portanto o solo em estudo, quanto mais seco, apresentará coesão aparente e de fato nota-se perda de solo por escoamento. À medida que o

solo sofre incremento no grau de saturação, a coesão se perderá e conseqüentemente será incrementada a perda de solo. Este resultado está confirmando o comportamento já observado na figura 5.44 onde a umidades superiores a 80%, o solo não apresentava resistência. Portanto na presença de grande pluviosidade pode saturar uma zona maior originando susceptibilidade a processos erosivos.

5.1.6 Ensaio de compressão diametral o ensaio brasileiro

A partir de pressões de compressão diametral foi determinada a tensão de tração através da metodologia de ensaio descrita por VILLAR (2002).

Observou-se somente resultado no corpo de prova que se encontrava na umidade higroscópica de 3%. Os outros 10 corpos de provas que se encontrava com a umidade acima de 3% sofreram deformações sem acusar força. No processo de secagem, foram observadas as formações de pequenas fissuras para os corpos de prova com um teor de umidade menor que 24% aproximadamente. Este comportamento era esperado, já que a partir de teores de umidade menores de (24%) o solo deixa de ser plástico começando a sofrer ressecamento VARGAS (1978). A figura 5.46 apresenta o único resultado que poço ser obtido

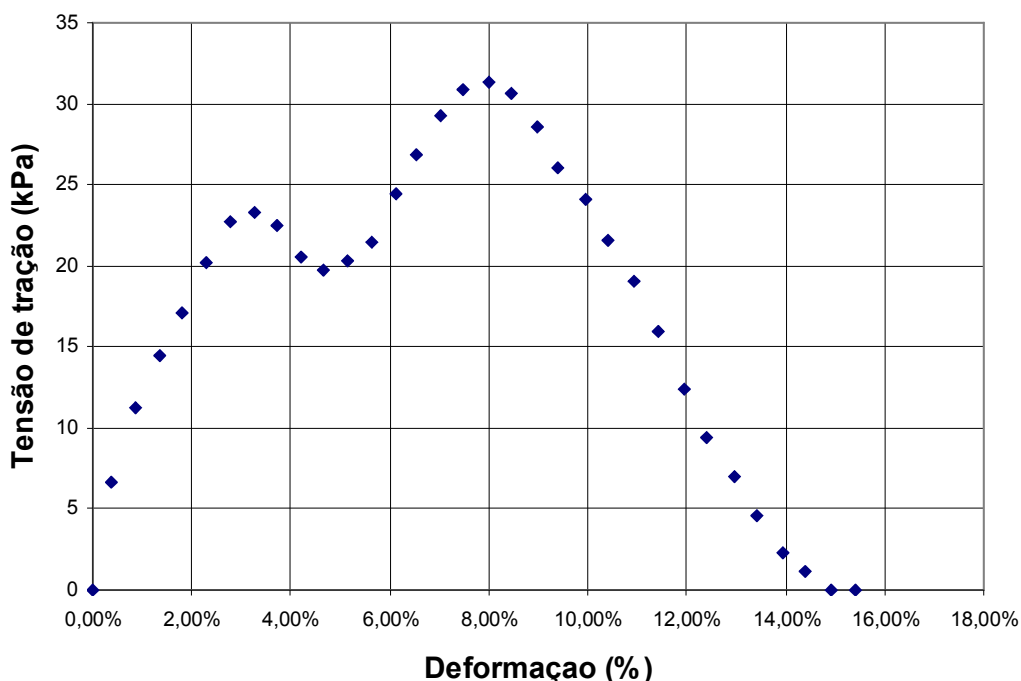


Figura 5.46 – Curva tensão versus deformação obtida pelo ensaio de tração

Observando a figura 5.46 pode indicar-se que foi aberta uma primeira trinca na amostra para um valor de resistência à tração em torno de 23kPa. Em seguida, com a continuação das deformações, os grãos e solo se rearranjaram e a amostra voltou a mostrar ganho de resistência até atingir o valor máximo de 32 kPa, quando então, rompeu. Portanto, considerando a abertura da primeira trinca como o rompimento do solo devido ao esforço de compressão diametral, tem-se que a resistência a tração é da ordem de 23kPa.

Pelo comportamento das amostras podemos indicar que a resistência de tração está diretamente relacionada com a sucção, já que à medida que o solo seca surgem às forças atrativas entre as partículas, estas forças levaram ao aumento das ligações físicas e químicas. Do resultado do ensaio pode-se indicar que no campo quando o solo, por efeito do processo de secagem, começar aparecer uma fissura, a resistência de tração será de 23 kPa . Esta resistência será gerada pelo aumento das ligações entre partículas, estas ligações provavelmente irão a aumentar à medida que o solo seca até o momento em que toda a estrutura do solo esteja afetada pelo fissuramento.

5.1.7 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado com o objetivo de obter parâmetros de resistência tais como coesão e ângulo de atrito parâmetros que será utilizado na interpretação da erodibilidade. Os ensaios foram executados na condição inundada, deste modo eliminou-se a influência da sucção, para este ensaio se utilizou amostras indeformadas do ponto (P2). Não se executando este ensaio para a amostra P3 pelo fato que foi impossível tirar corpos de prova indeformados de este ponto já que o solo estava completamente desagregado, as raízes eram os únicos elementos que estavam agrupando estas partículas. Tentamos compactar amostras do ponto P3 utilizando a densidade de campo, mas infelizmente o inverno intenso não permitia que podamos obter a densidade de campo razão pela qual ficamos com as amostras do ponto P2.

A tensão de pré-adensamento que foi obtida no ensaio de adensamento edométrico, influenciou na escolha das tensões que foram utilizadas durante o ensaio. A partir desta tensão foram feitos ensaios pré-adensados com a aplicação de tensões de 25, 50 e 90 kPa. E ensaios normalmente adensados com a aplicação de tensões de 200, 300 e 400 kPa. Foram executados dois ensaios de cisalhamento direto pelo fato que no primeiro ensaio se observo que na gráfica que ilustra a variação volumétrica correspondente as tensões pré - adensadas existia um

comportamento não coerente que possivelmente era gerada por problemas de calibração da prensa de cisalhamento direto Figuras (5.48). Os resultados de estes ensaios se ilustram nas Figuras 5.47, 5.48, 5.49, 5. 50 5.51, 5. 52, 5. 53, 5. 54, 5.55, 5.56, 5. 57. No segundo ensaio Figura 5.52 confirma-se que certamente este comportamento não coerente da variação volumétrica observada na Figura 5.48 foi gerado pela má calibração da prensa cisalhante onde foi executado o primeiro ensaio.

Das ilustrações dos dois ensaios observa-se que a resistência do solo aumenta com deslocamento horizontal, logo este não apresenta uma definição de pico na curva tensão - deslocamento horizontal Figuras 5.47, 5.49 comportamento típico de solos que não apresentam uma grande interação estrutural. As curvas de deslocamento vertical-deslocamento horizontal mostram que o material ensaiado apresenta uma expansão de volume que em um dado instante o volume praticamente não varia até o fim do ensaio, comportamento característico de areia fofa. Por este fato para a montagem da envoltória se utilizou 3 critérios de ruptura que são: critério de ruptura proposto por SOARES (2005), critério de ruptura a 2mm e critério de ruptura a 12mm. As velocidades dos ensaios foram calculadas levando em conta o t_{90} , obtidos no ensaio de adensamento. A velocidade utilizada em todos os ensaios foi de 0,048 mm/min. Os resultados se ilustram abaixo:

Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal

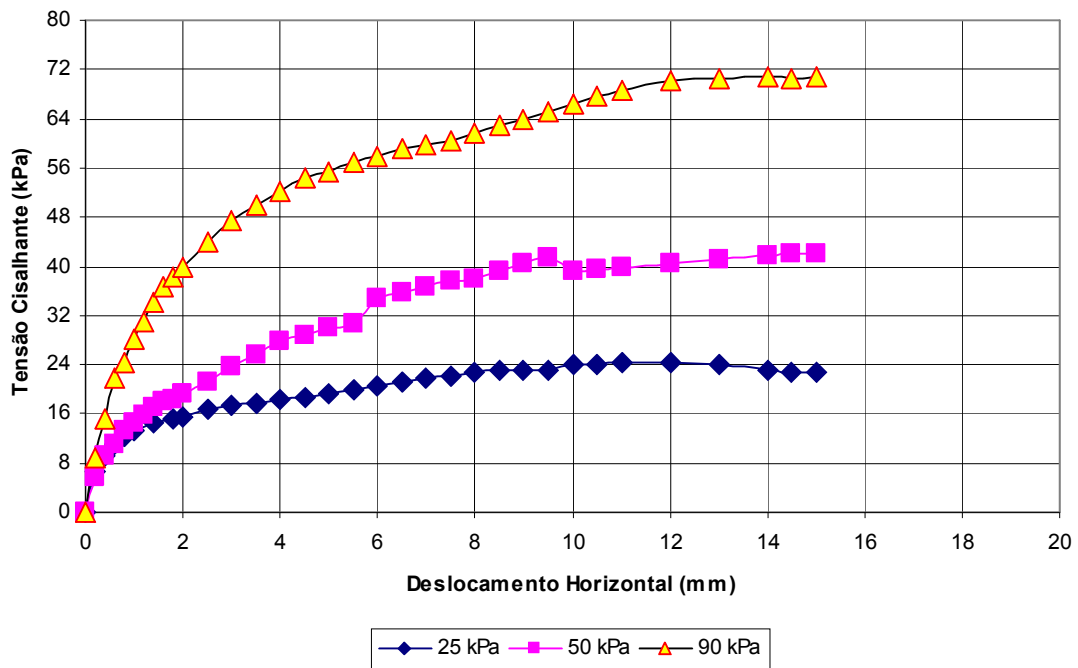


Figura 5.47 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição Pré- adensada

Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal

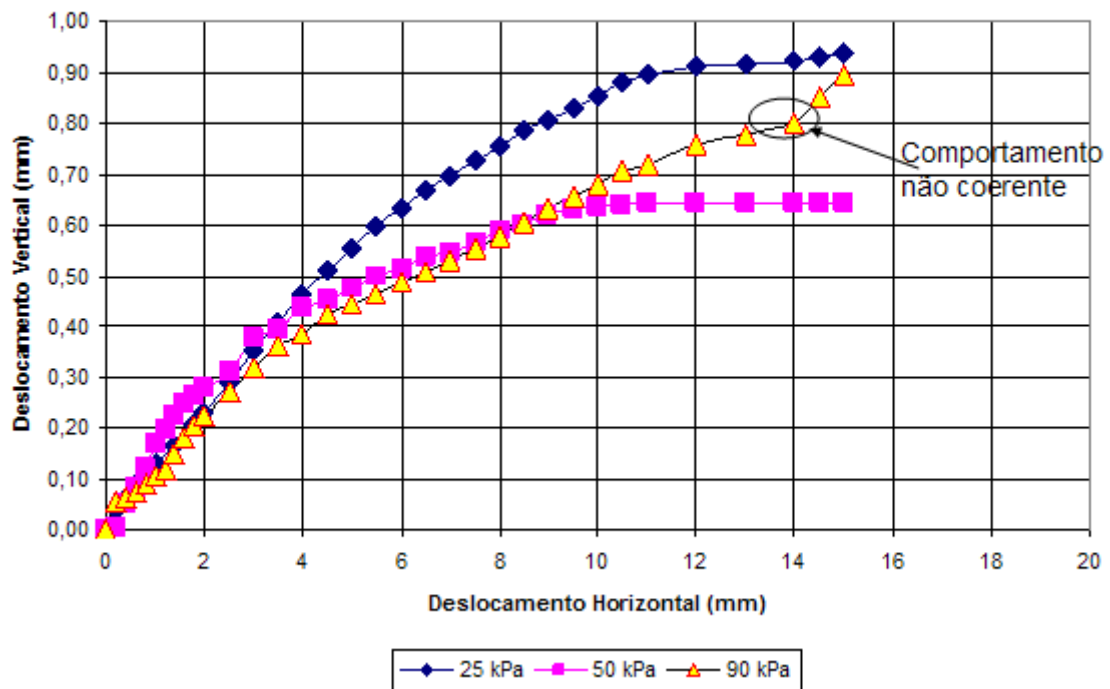


Figura 5.48 - Curvas de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição pré-adensada

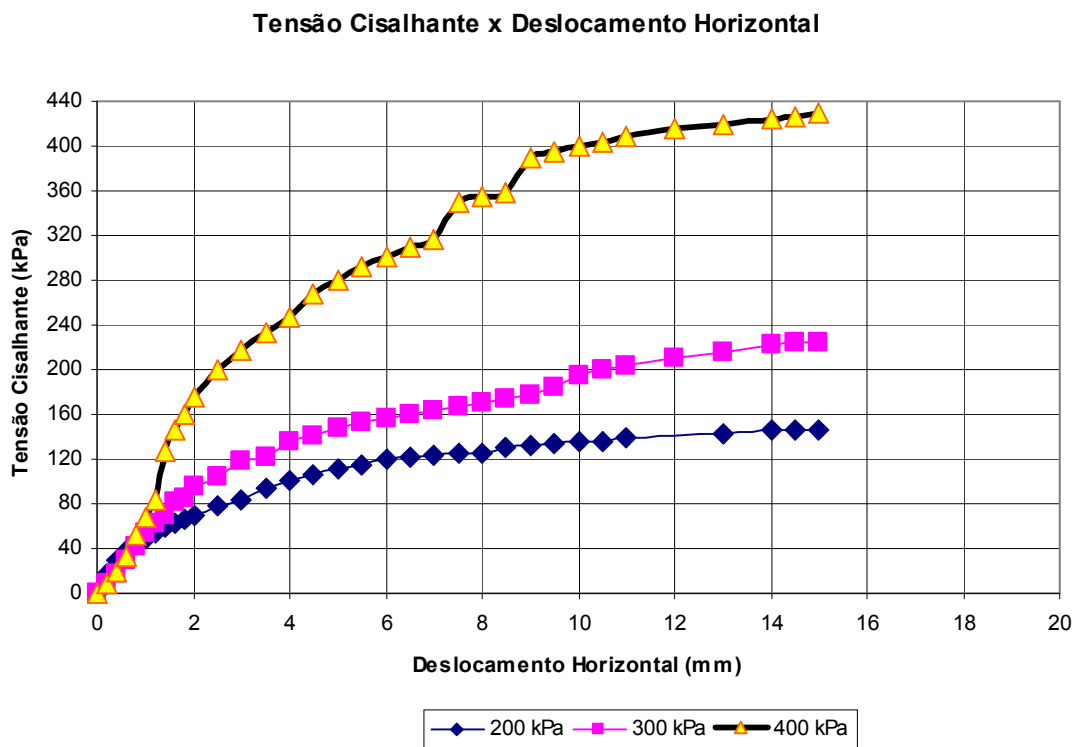


Figura 5.49 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada

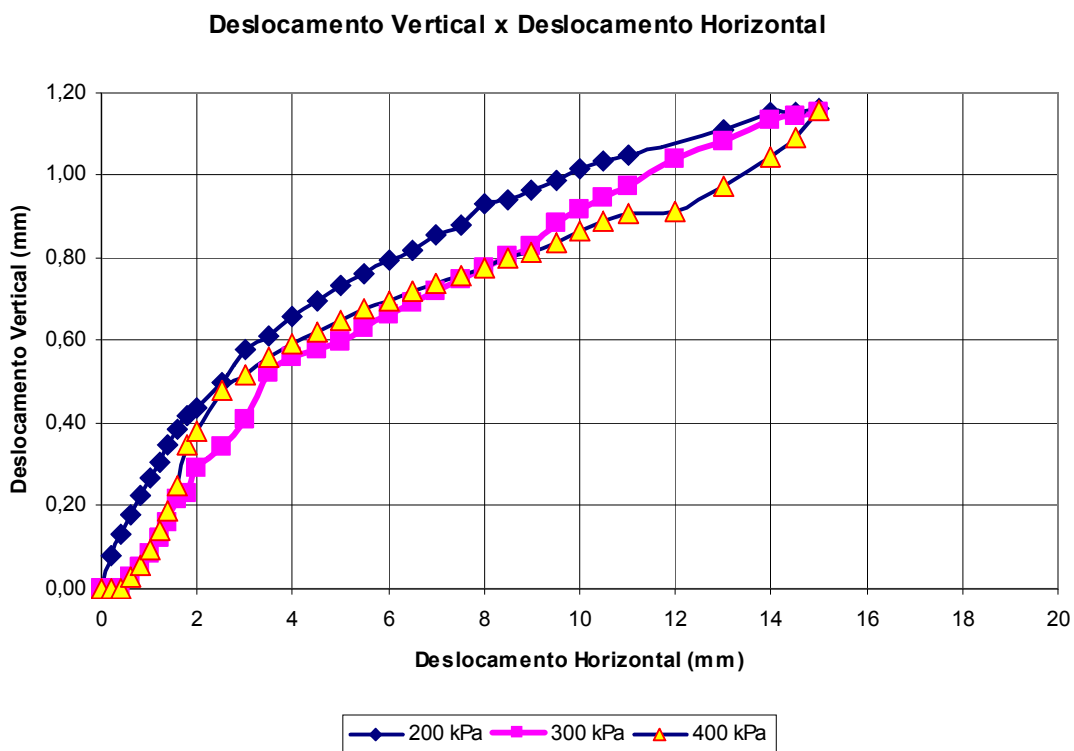


Figura 5.50 - Curvas de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada

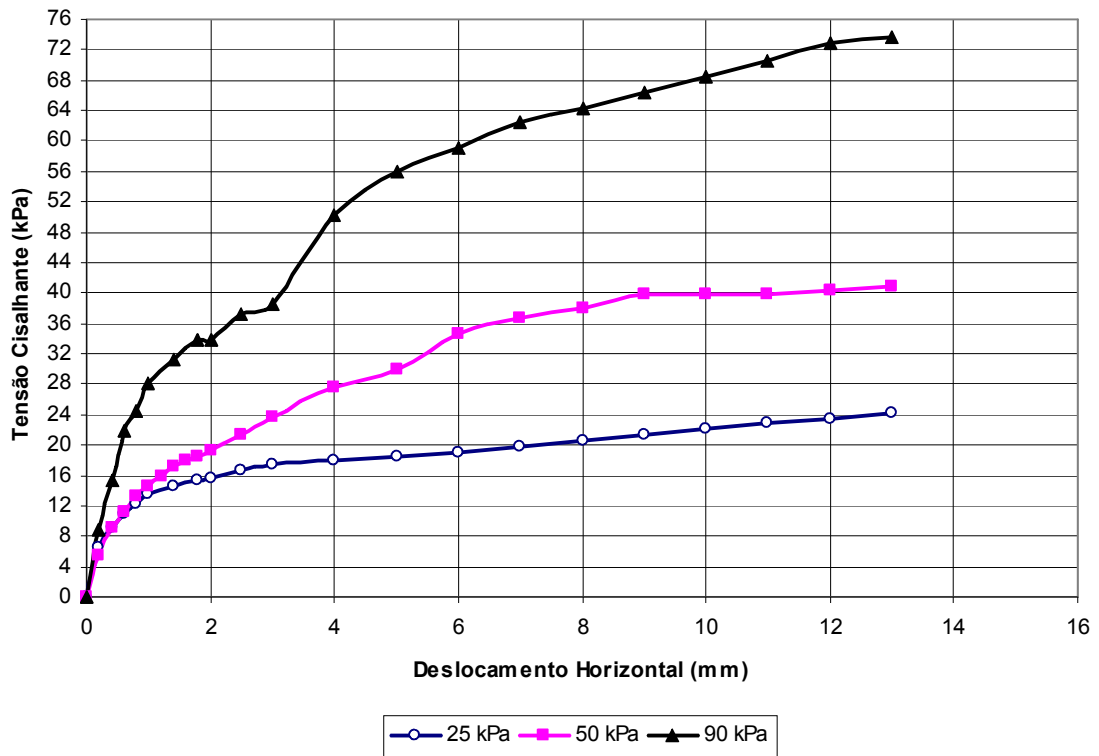


Figura 5.51 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição Pré - adensada

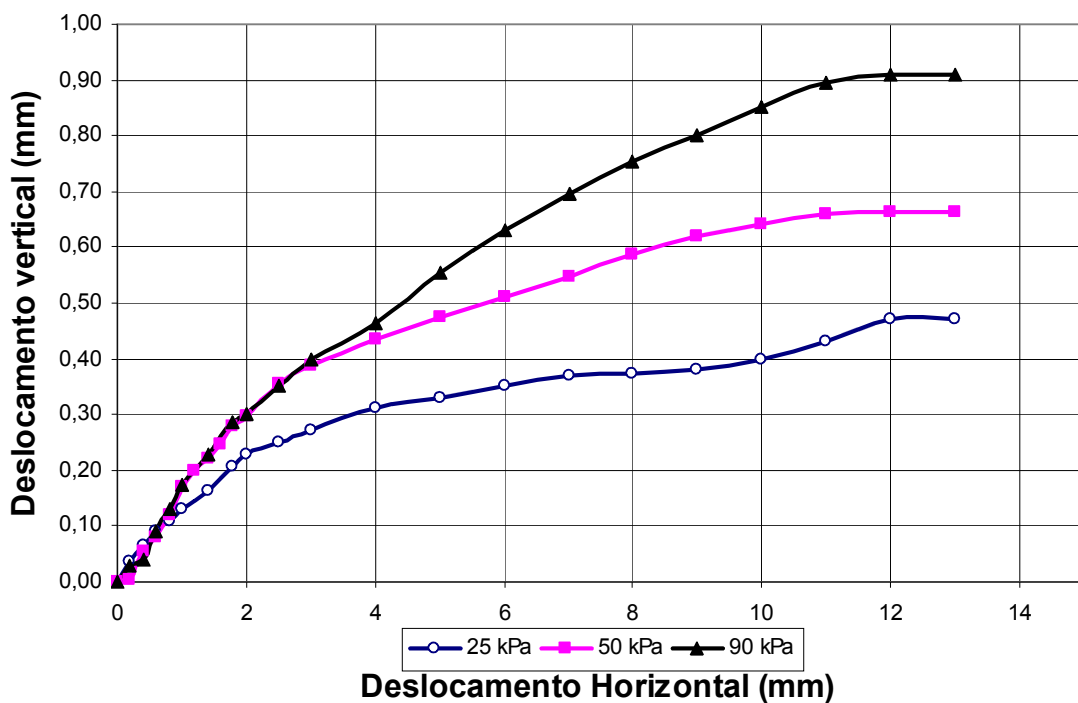


Figura 5.52 – Curva de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição Pré-adensada

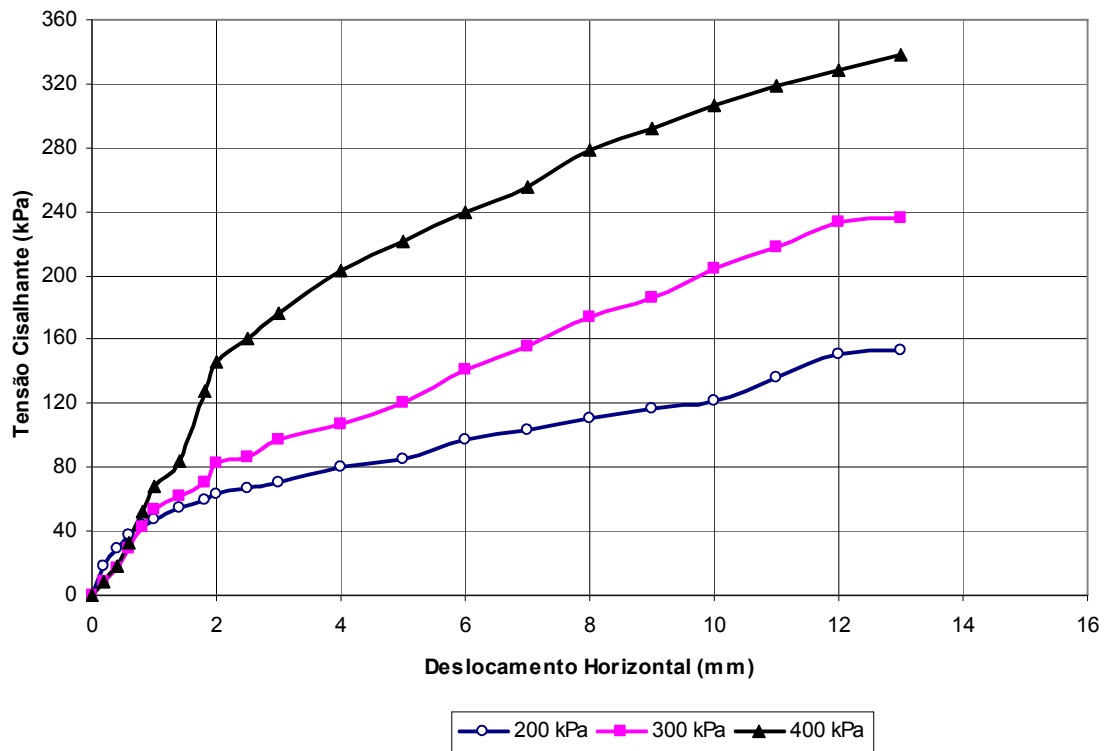


Figura 5.53 – Curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada

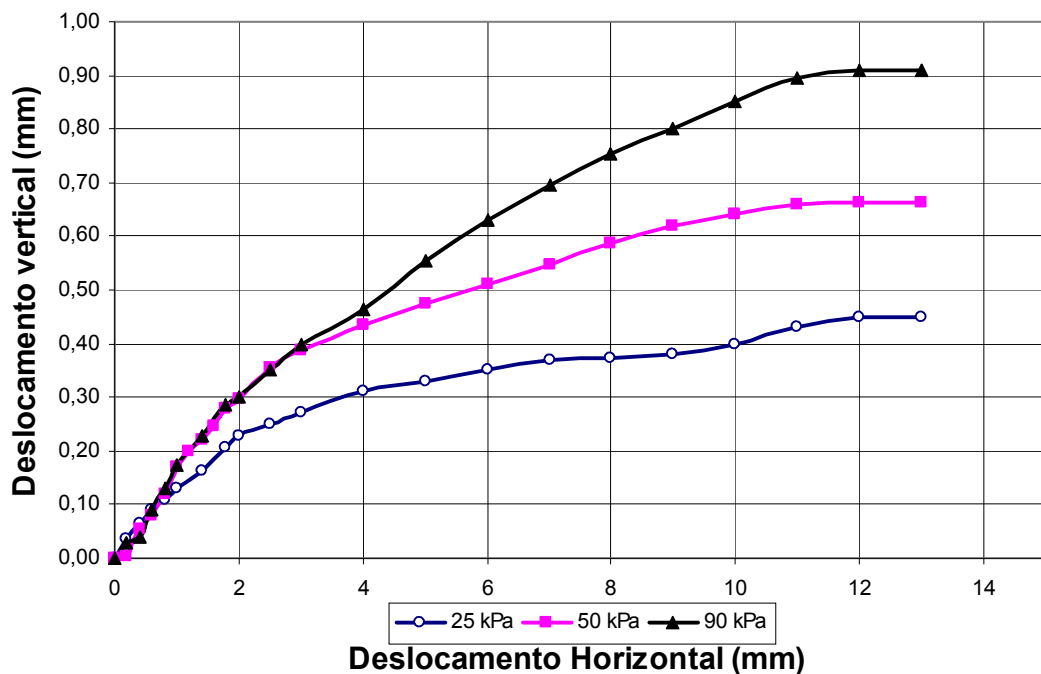


Figura 5.54 – Curva de variação de volume para o ensaio de cisalhamento na condição normalmente adensada

A Tabela 5.25 e Tabela 5.26 apresentam os valores dos parâmetros obtidos quando utilizamos o critério de definição de ruptura proposta por SOARES (2005) que indica que quando a gráfica tensão cisalhante versus deslocamento horizontal não apresenta uma definição de pico pode assumir-se que o solo rompe quando a curva tensão cisalhante (τ) versus deslocamento horizontal (δ_h) atingisse pela primeira vez uma inclinação constante.

Tabela 5.25 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura

ENSAIO PRÉ-ADENSADO			ENSAIO NORMALMENTE ADENSADO		
Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
25	17	3,0	200	100	4,0
50	35	6,5	300	150	5,5
90	60	7,0	400	250	4,0

Tabela 5.26 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura

ENSAIO PRÉ-ADENSADO			ENSAIO NORMALMENTE ADENSADO		
Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
25	15	2	200	70	3
50	30	5	300	125	6
90	40	4	400	255	7

Com base no ajuste dos dados apresentados na Tabela 5.25 e Tabela 5.26 foram construídas as envoltórias de resistência saturada que esta apresentada na Figura 5.55. Observa-se que os valores de deslocamento horizontais obtidos através de este critério de ruptura SOARES (2005) (Tabela 5.20 e 5.21). São muita diferentes esta diferencia pode gerar que na estimativa dos parâmetros de resistência através da envoltória não sejam muito reais.

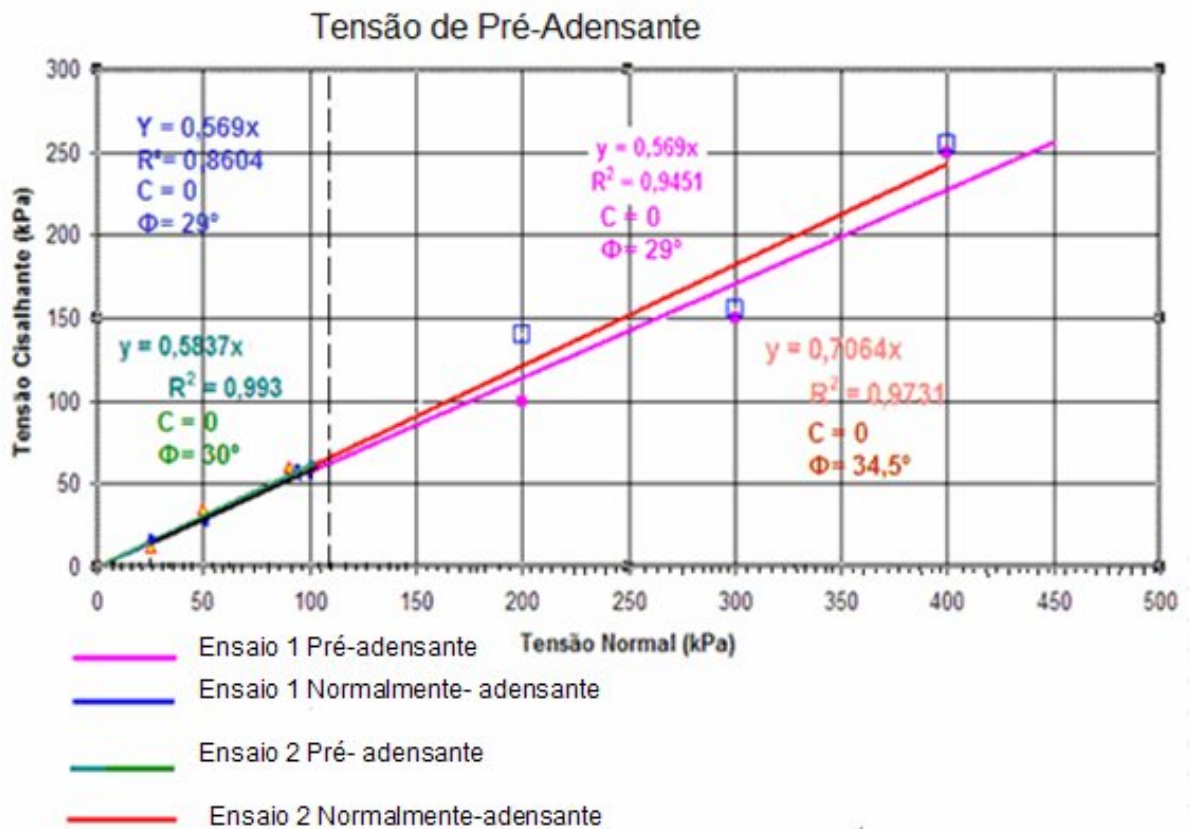


Figura 5.55 – Envolvórias de resistência obtidas pelo critério de ruptura proposto SOARES (2005)

As Tabelas 5.27 e 5.28 apresentam os resultados dos parâmetros obtidos através do critério de ruptura a 2 mm para os dois ensaios

Tabela 5.27 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura

ENSAIO PRÉ-ADENSADO			ENSAIO NORMALMENTE ADENSADO		
Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
25	15	2,0	200	96	2,0
50	24	2,0	300	119	2,0
90	49	2,0	400	216	2,0

Tabela 5.28 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura

ENSAIO PRÉ-ADENSADO			ENSAIO NORMALMENTE ADENSADO		
Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
25	15,53	2	200	70	2
50	19,23	2	300	90	2
90	33,78	2	400	148	2

Com estes resultados traçamos as envoltórias de resistência saturada ilustradas na Figura 5.56.

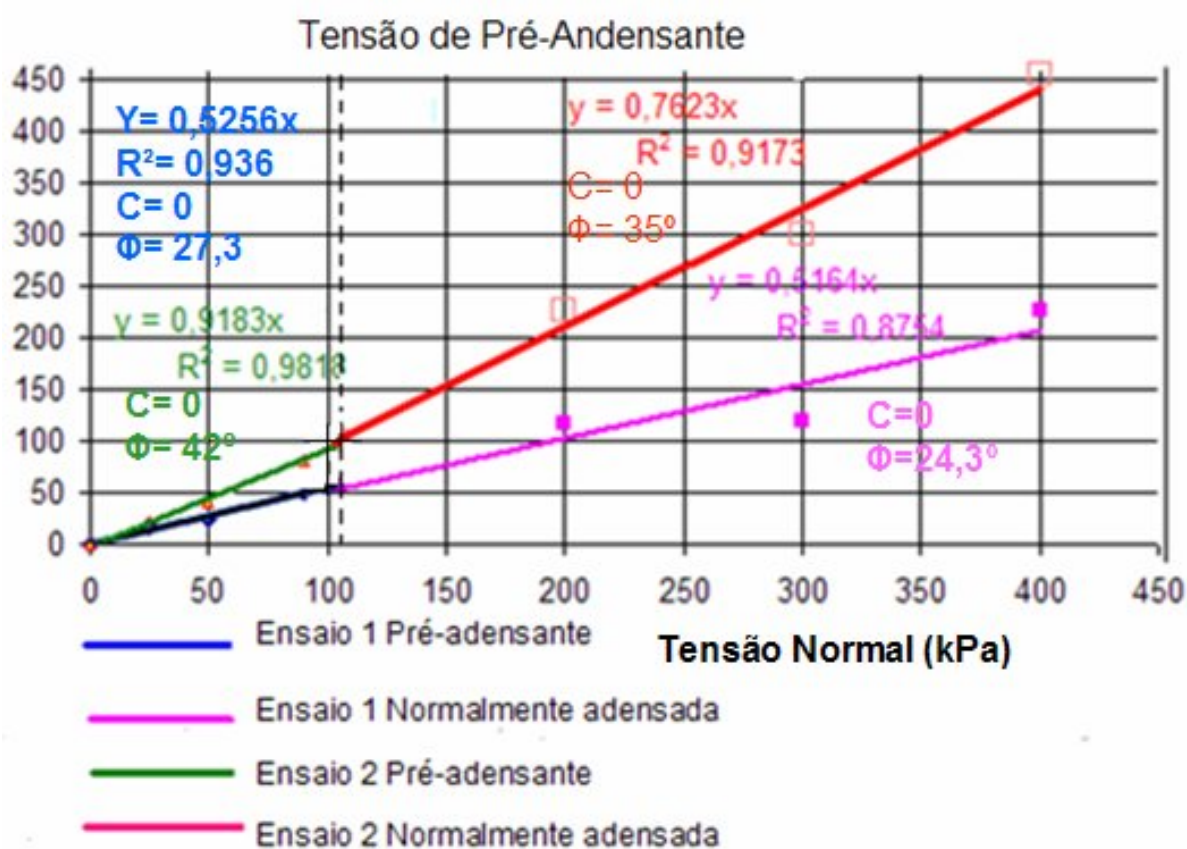


Figura 5.56 – Envoltórias de resistência obtidas pelo critério de ruptura (2mm)

Através do critério de ruptura a (2mm) conseguiu-se que os valores correspondentes ao deslocamento horizontais sejam uniformes

Agora as Tabelas 5.29,5.30 ilustram os parâmetros obtidos utilizando o critério de ruptura a 12 mm.

Tabela 5.29 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura

ENSAIO PRÉ-ADENSADO			ENSAIO NORMALMENTE ADENSADO		
Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
25	17	12,0	200	96	12,0
50	24	12,0	300	119	12,0
90	49	12,0	400	216	12,0

Tabela 5.30 – Dados obtidos para as tensões normais e de cisalhamento na ruptura

ENSAIO PRÉ-ADENSADO			ENSAIO NORMALMENTE ADENSADO		
Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)	Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	Deslocamento Horizontal (mm)
25	15,53	12	200	70	12
50	19,23	12	300	90	12
90	33,78	12	400	148	12

Através de este critério também se observe que os valores de deslocamento são uniformes, e além disso garantiu-se que todos os ensaios forem executados na condição de bem drenados. A Figura 5.57 ilustra a envoltória obtida através de este critério.

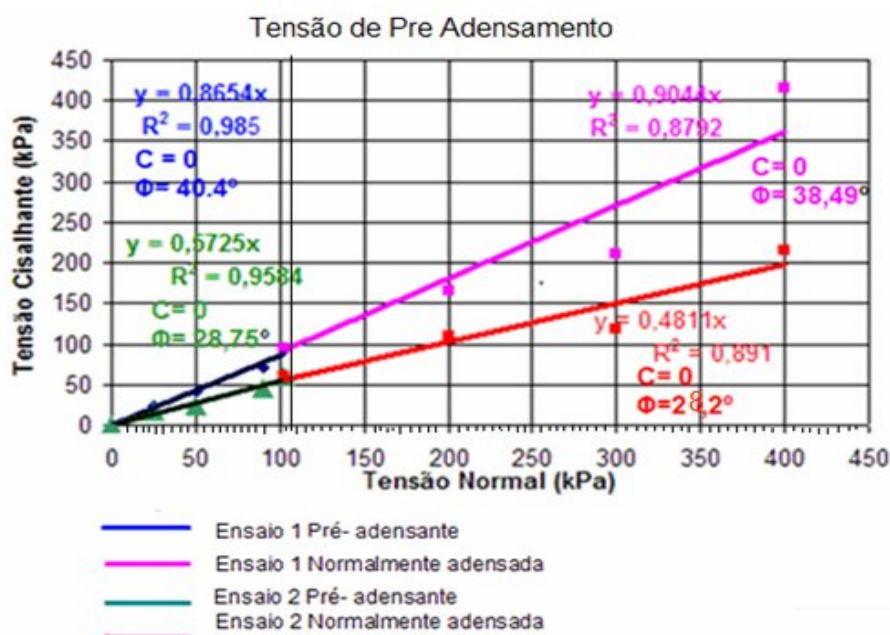


Figura 5.57 – Envoltórias de resistência obtidas pelo critério de ruptura (12 mm)

Em ensaios drenados, deseja-se garantir a dissipação do excesso de poropressões e esta dissipação de poropressões é garantida quando seja comprovado que ensaio foi executado na condição drenada. Por tanto dos três critérios de ruptura o critério correspondente a 12mm garantiu-se que os ensaios foi realizado de maneira drenada, não comprometendo a qualidade do ensaio razão pela qual neste trabalho para a análise de erodibilidade utilizaremos os parâmetros de resistência obtidos através da envoltória montada baixo o critério de ruptura de 12mm Figura 5.57.

Observa-se na Figura 5.57 que os valores de coesão forem zero BASTOS ET AL (2001) indica que: a perda de coesão com a inundação é um importante indicativo da susceptibilidade do solo a erosão por fluxo superficial por tanto no primeiro análise o solo em estudo apresentara maior susceptibilidade de processos erosivos em épocas de chuvas fortes. Também nesta figura 5.62 observa-se que os valores dos ângulos de atrito obtidos correspondem a valores típicos de ângulos de atrito de areias mal graduadas que segundo a literatura variam de 28 a 43 graus (ORTIGÃO 1993). Este resultado já era esperado pelo fato que na granulometria apresentava maior predomínio de areias, além disso, as formas das curvas granulométricas acusarem que o solo em estudo é mal graduado. GRAND (1970) indicou que os solos mal graduados são mais propensos a erosão.

5.1.8 Execução de ensaios de difração por raios x e microscopia eletrônica de varredura das amostras

As amostras P2 e P3 foram submetidas a análises qualitativas por difratometria de raios-X realizadas em um difratômetro Philips, modelo PW1710, utilizando radiação $CuK\alpha$ e cristal monocromador de grafita, velocidade de varredura $0,06^{\circ}2\theta/s$, tempo de contagem 1s, intervalo de varredura de 3° até $90^{\circ} 2\theta$.

O resultado qualitativo do ensaio de difração por raios-X está apresentado na Tabela 5.21. Os difratogramas encontrados para cada amostra estão apresentados na Figura 5.58.

Tabela 5.31 – Resultada de análises mineralógicas

AMOSTRA	MINERAIS ENCONTRADOS
P2	quartzo, mica, feldspato, caulinita
P3	quartzo, mica, feldspato, caulinita, gibsitita

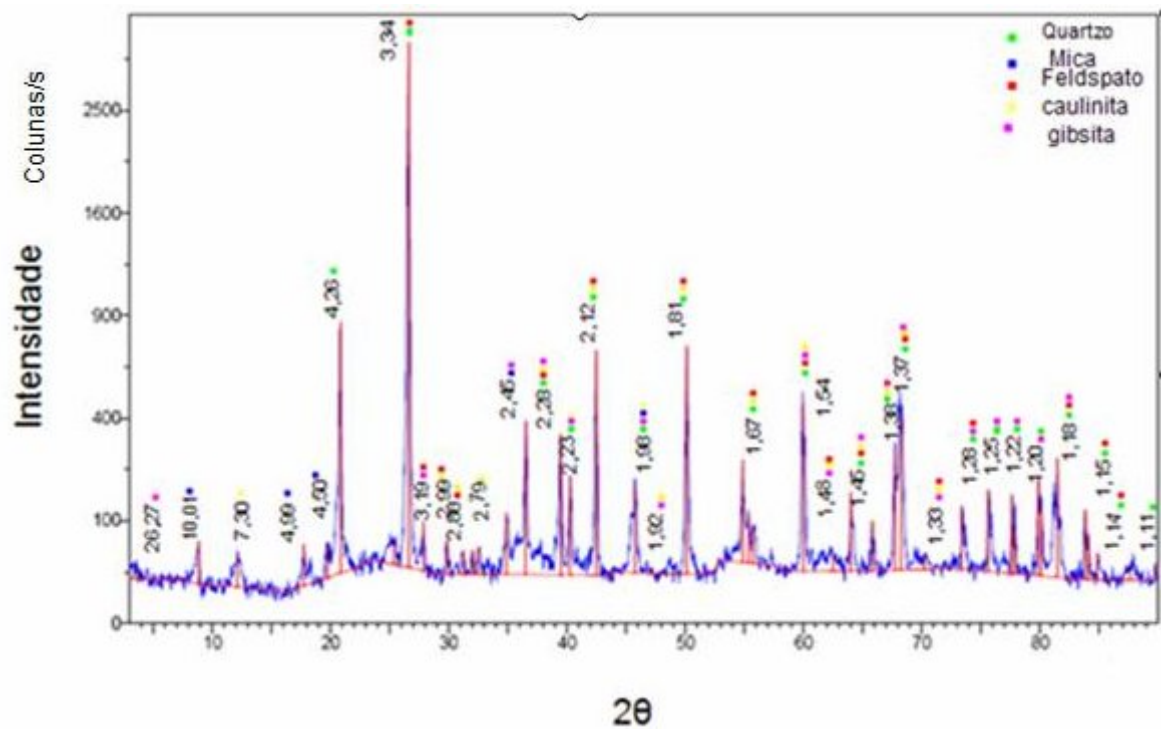


Figura 5.58 (a) – Difratoograma das amostras P2

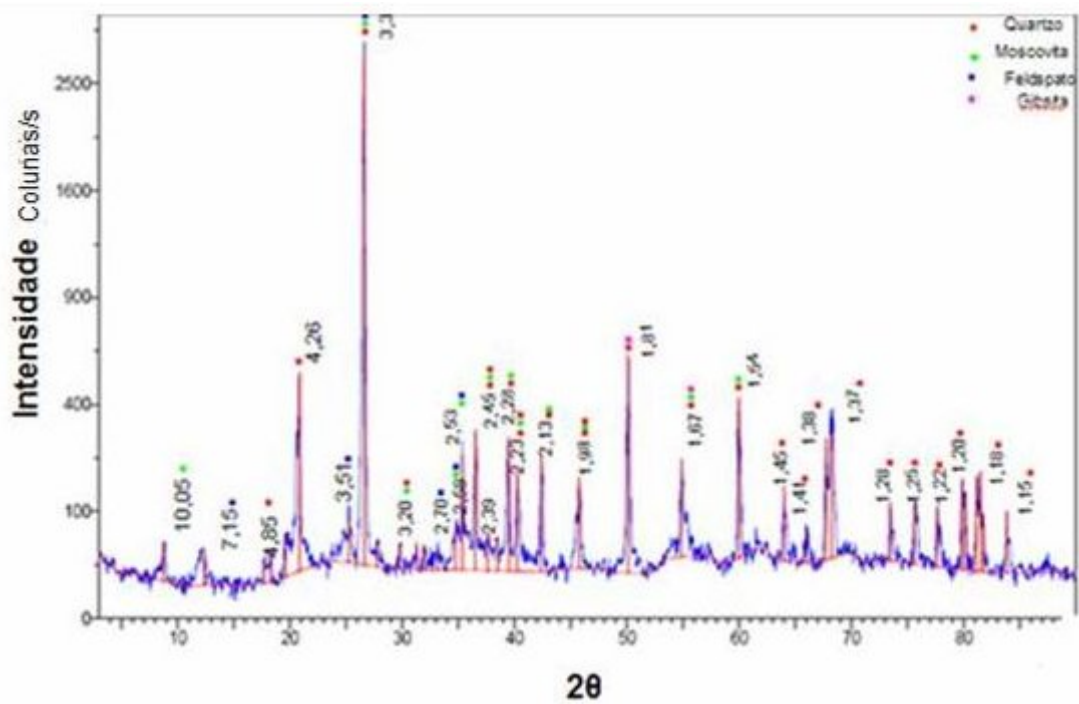


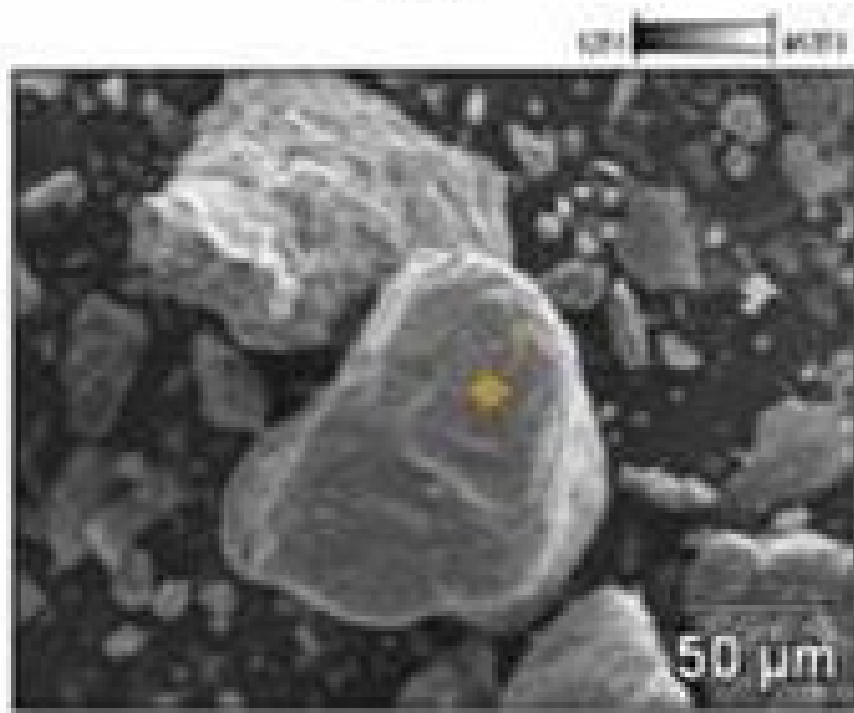
Figura 5.58 (b) – Difratoograma das amostras P3

Estes resultados confirmam a presença dos argilominerais já identificados através dos valores obtidos da massa específica dos grãos e outros minerais que também foram identificados inicialmente. Estes argilominerais segundo FACIO (1997) e OLIVEIRA (2003) contribuem de forma geral, na plasticidade e coesão do solo. A resistência do solo à processos de erosão

tem relação direta com a coesão, propriedade que é afetada pela inundação, Estes minerais indicariam que o solo em estudo a pesar de estar constituído por areias, pode apresentar resistência aos processos erosivos.

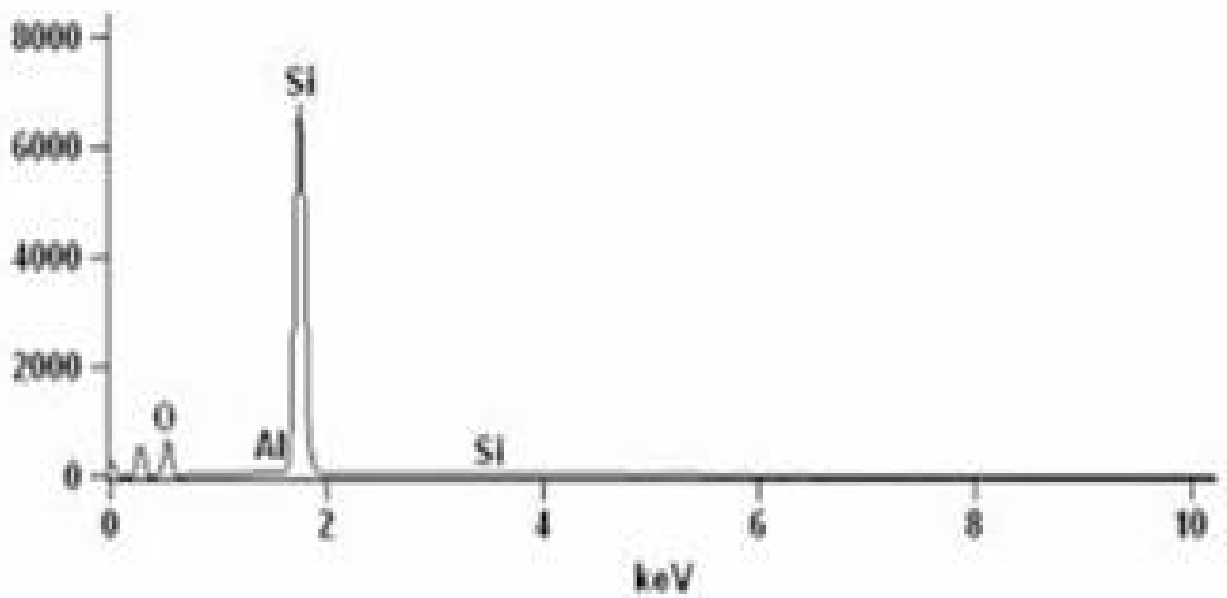
Os resultados encontrados da microscopia eletrônica de varredura estão apresentados na Figura 5.59 (a), (b),(c),(d),(e) onde se observa que o solo apresenta tendência à flocculação e formação de micro e macro poros no seu interior, já que a porcentagem de finos na sua formação não é significativa. A Figura 5.54 (e), porém, indica um floco. O termo floco é dado a estrutura das partículas do solo. A ocorrência desta distribuição bi-modal de poros interfere na capacidade de retenção de água do solo e, conseqüentemente, no seu comportamento em relação ao potencial de erosão. Os resultados das identificações dos minerais presentes no solo apontaram à presença de silício e alumínio, principalmente, o que é típico de solos mais intemperizados. SILVA et al (1999) indicou que a interação entre os óxidos de silício, ferro e alumínio nos processos erosivos ajuda a aumentar a coesão além de contribuir à redução da erodibilidade. Portanto este resultado explicaria a coesão aparente que apresenta o solo em estudo

5(t)

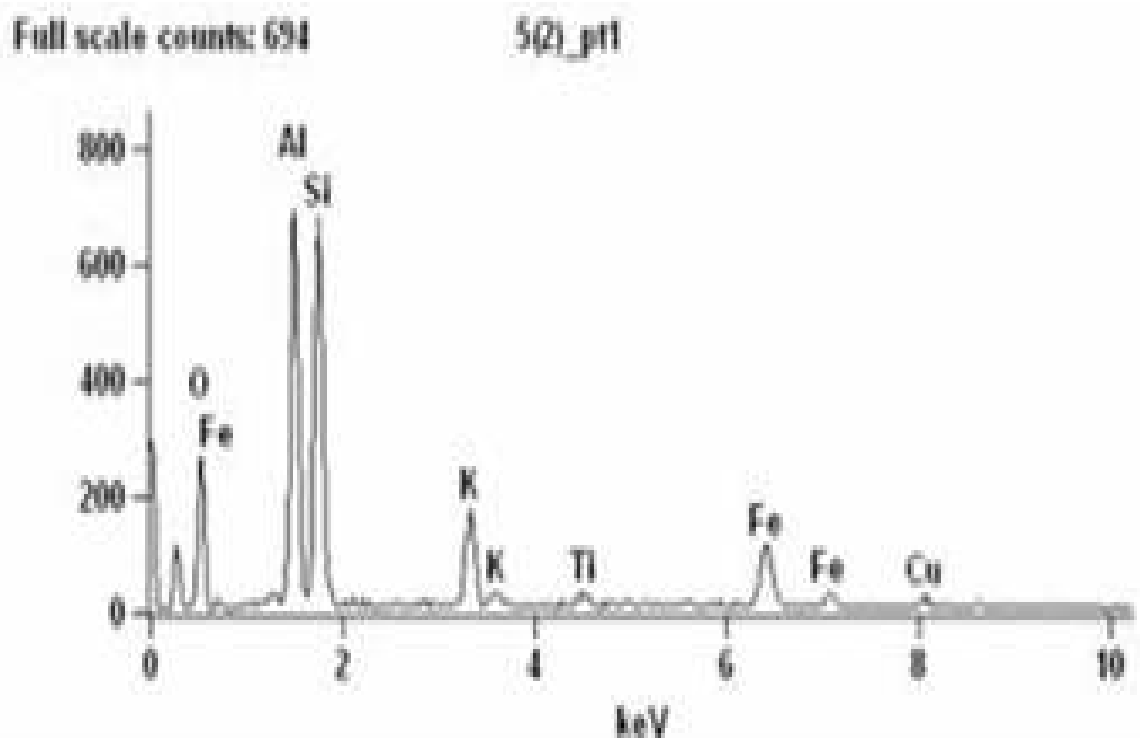
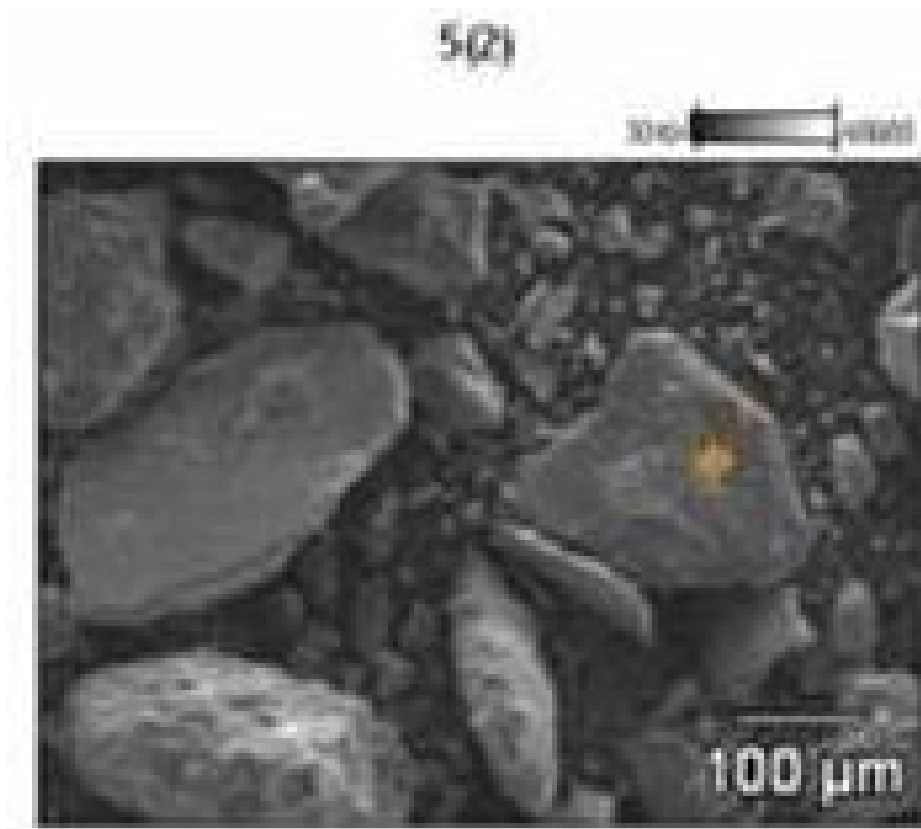


Full scale counts: 6753

5(t)_pt1

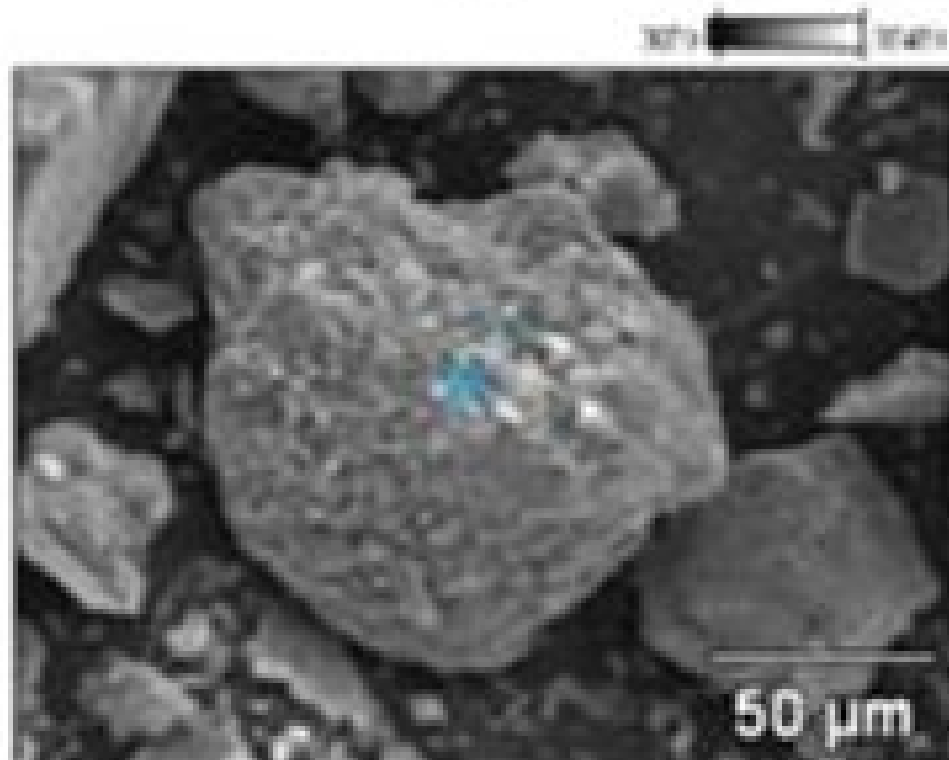


(a)



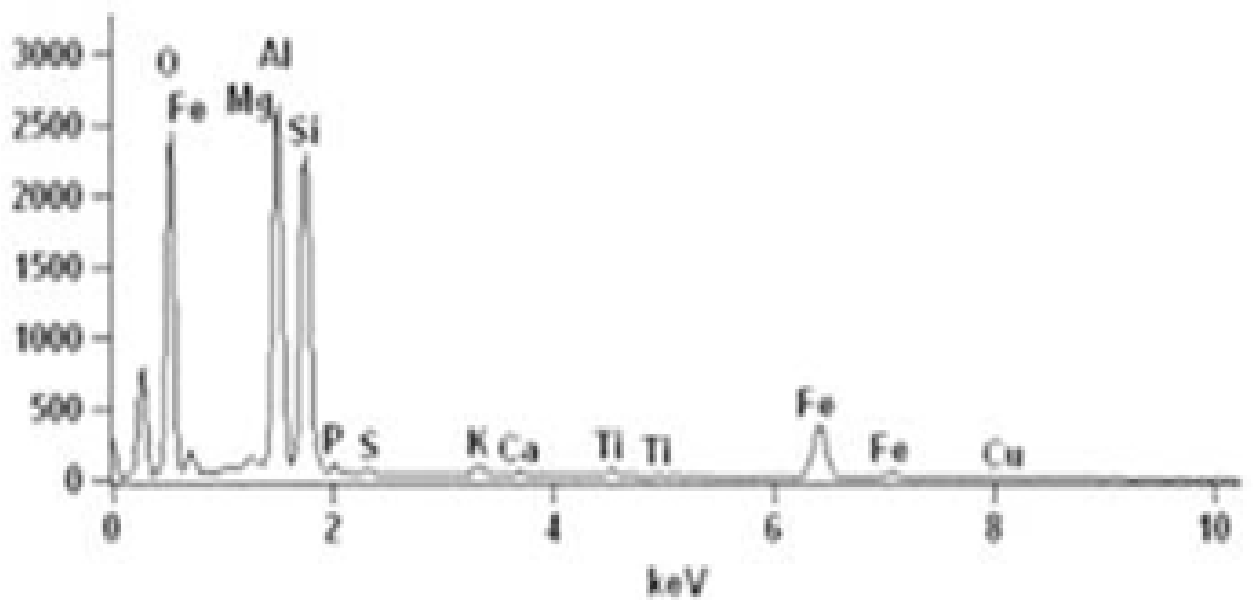
(b)

5(4)



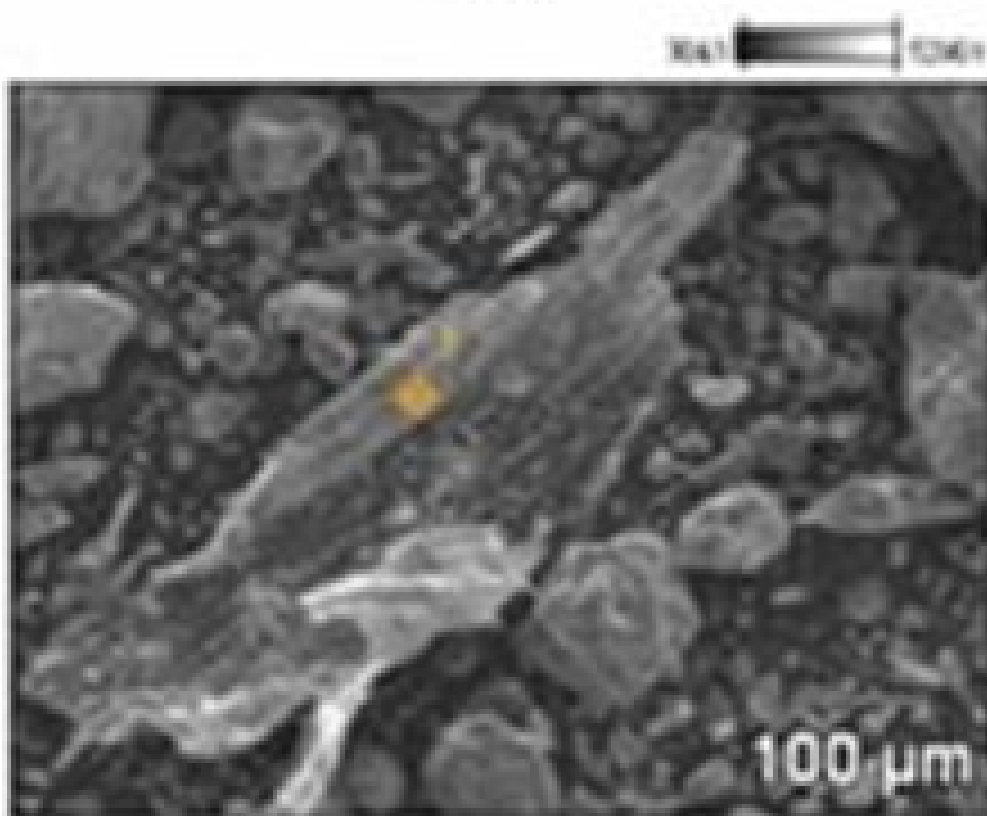
Full scale counts: 2630

5(4)_pt1



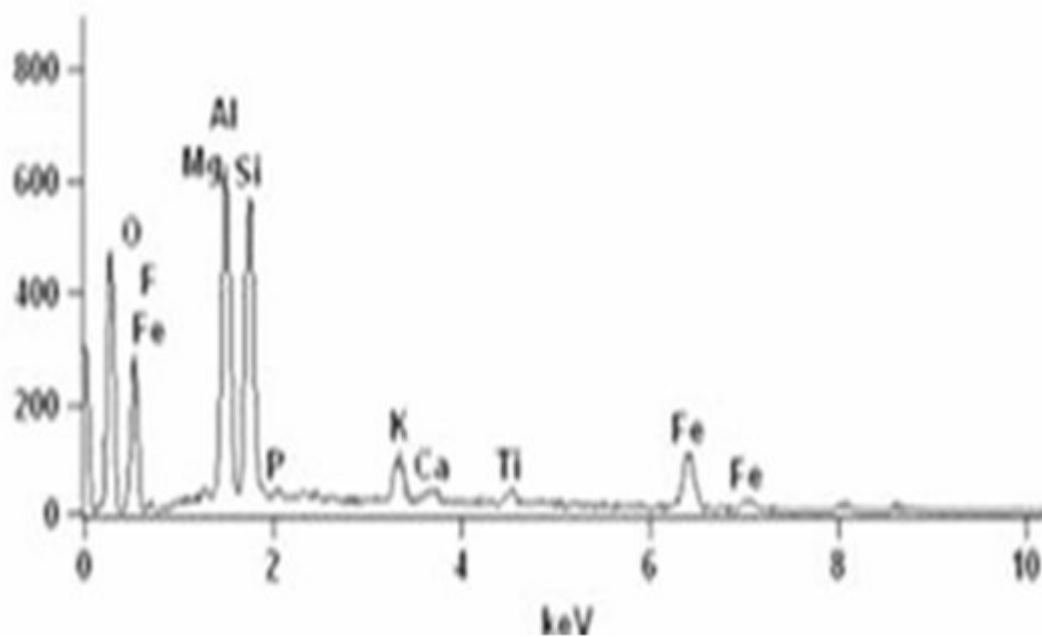
(c)

5(4)



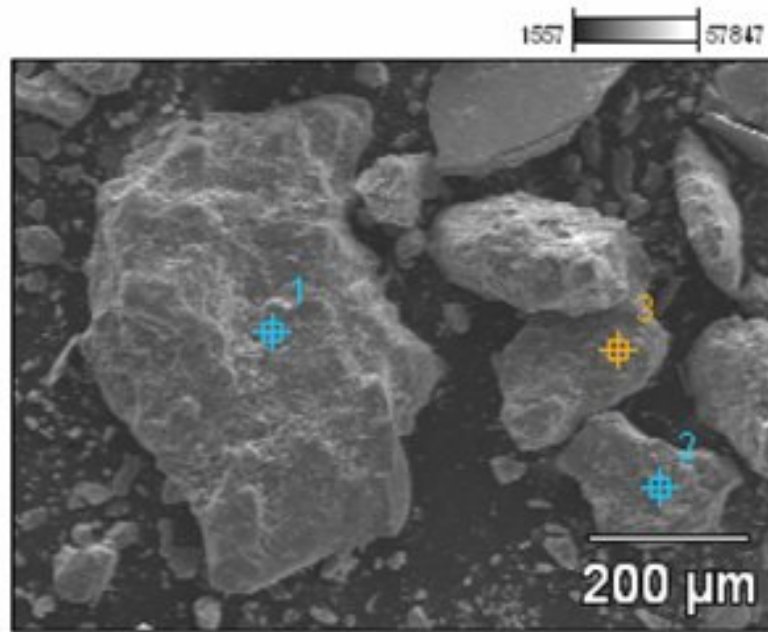
Full scale counts: 629

5(4)_pt1



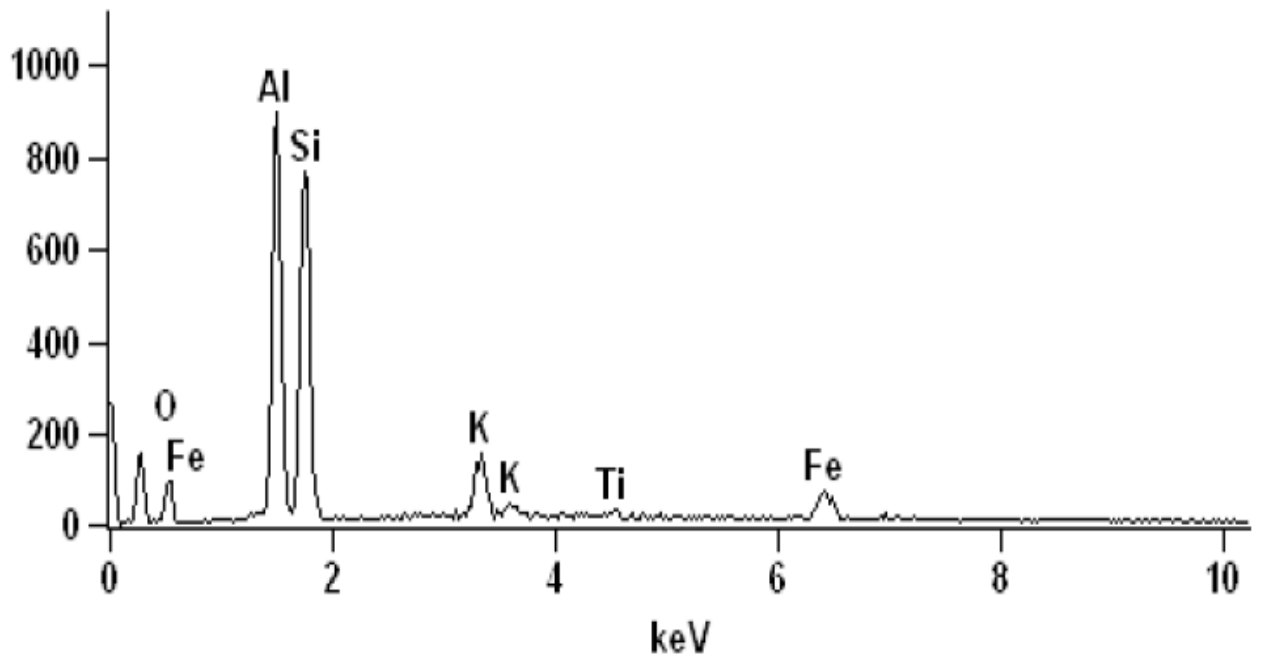
(d)

5(5)



Full scale counts: 897

5_pt2



(e)

Figura 5.59 – Resultados dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura

5.1.9 Resultados da quantidade de matéria orgânica presente na amostra

Os resultados estão apresentados na Tabela. 5.32

Tabela 5.32 – Teor de matéria orgânica presente nas amostras

TEOR DE MATERIAL ORGÂNICO (%)	
Amostra P2	3,0
Amostra P3	2,0

RAMIDAN (2003) indicou que os solos instáveis são aqueles que possuem menos de 2% de matéria orgânica. Os resultados obtidos da quantidade de matéria orgânica do solo em estudo são maiores e iguais aos 2%, Portanto, dentro da análise de erodibilidade e tendo em consideração o critério de MENDEZ (2006) que indicou que os solos com pouca matéria orgânica podem ser considerados propensos as erosões, podem indicar que a presença de matéria orgânica será um dos fatores que estaria influenciando na resistência do solo aos processos erosivos. Esta resistência é também influenciada por os argilominerais e componentes químicos do solo. A presença da matéria orgânica está vinculada a propriedades de retenção de água, a fortalecimento das ligações entre grãos e aumento da resistência à desagregação e à dispersão.

5.1.10 Ensaio de Classificação do tipo MCT

Este ensaio correlaciona-se com os processos de erodibilidade através dos seguintes parâmetros que se ilustram na (Tabela 5.33) Parâmetros que são obtidos através das curvas mini-mcv e a família de curvas de compactação (ver anexo II Figuras A3, A4, A5, A6).

Tabela 5.33 – Parâmetros obtidos no ensaio mini-MCV e perda de massa por imersão

PARÂMETRO	AMOSTRA P2	AMOSTRA P3
c'	0,42	0,50
d'	20,6	8,30

O d' é o coeficiente angular do ramo seco da curva de compactação correspondente a 12 golpes (relacionada com a energia Proctor Normal) e c' é a inclinação da curva de deformabilidade para mini-mcv igual a 10. Valores de c' elevados (acima de 1,50) caracterizam as argilas e solos argilosos, enquanto que valores baixos (abaixo de 1,00) caracterizam as areias e os siltes não plásticos ou pouco coesivos. Valores de c' entre 1,00 e

1,50 podem englobar solos de vários tipos granulométricos, tais como areias siltosas, areias argilosas, argilas arenosas, argilas siltosas, etc. Numa análise crítica dos parâmetros acima, pode-se observar que c' está abaixo de 1,00 nas duas amostras (P2 e P3), o que caracteriza areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos.

O ensaio de perda de massa por imersão foi proposto para analisar a erodibilidade dos solos tropicais. Dele é retirado o valor do parâmetro P_i , obtido na curva “mini-MCV. Durante a realização dos ensaios, foram observados, nos primeiros minutos, os desprendimentos de bolhas, independente do teor de umidade inicial do solo. Além disso, corpos de prova com umidade acima da ótima apresentaram uma desagregação mais acelerada se comparada com aqueles cuja umidade estava abaixo da ótima.

A Figura 5.60 ilustram este comportamento para o solo P2, lembrando que a umidade ótima do mesmo é de 16,5%. A Figura 5.61 mostra aspectos da amostra P2 no final do ensaio de perda por imersão. A amostra P3 apresentou o mesmo comportamento mencionado.

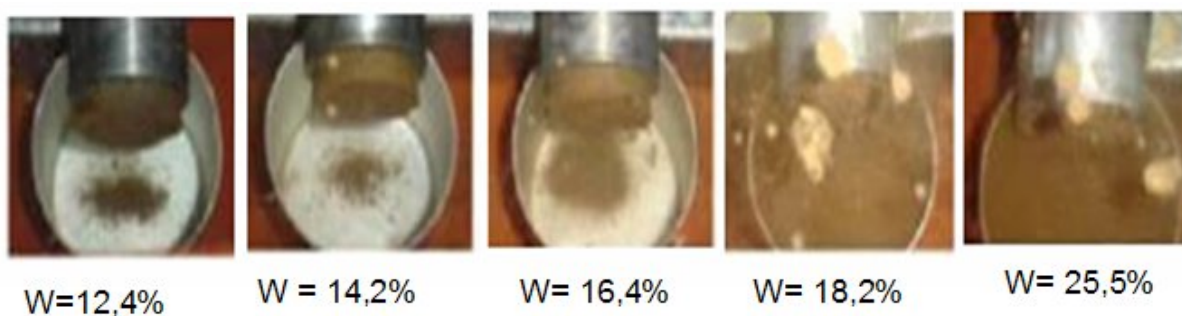


Figura 5.60 – Comportamento da amostra P2 durante o ensaio de perda por imersão

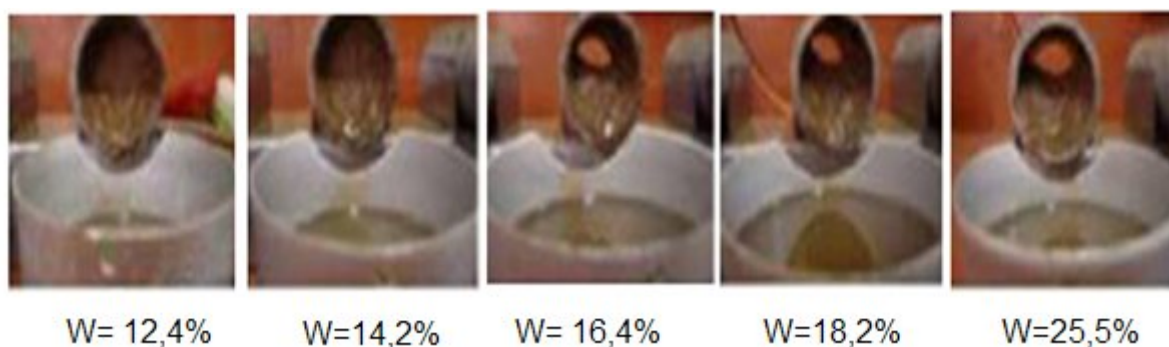


Figura 5.61 – Aspecto final da amostra P2 após o ensaio de perda por imersão

Tabela 5.34 – Parâmetros obtidos no ensaio de perda de massa por imersão

PARÂMETRO	AMOSTRA P2	AMOSTRA P3
Pi	252,2%	290,0%
e'	1,52	1,54

Observa-se que o parâmetro e' se encontra próximo de 1,40, que é a linha arbitrada para solos pobres em finos. Os gráficos obtidos dos ensaios para a obtenção dos parâmetros c' , d' , P_i , e' para a amostra P2 e P3 estão no Anexo II (Figuras A3, A4, A5, A6).

Para a classificação de solos lateríticos e não lateríticos se utilizaram os parâmetros c' e e' que expressam, respectivamente, a argilosidade do solo e seu caráter laterítico, parâmetros que foram superpostos no ábaco ilustrado na figura 5.62. A classificação final foi de NA abrange os solos com predomínio de areia, grãos e quartzo e/ou mica. Dentro do grupo NA estão incluídos os solos de comportamento não-laterítico: argilas siltosas e argilas arenosas.

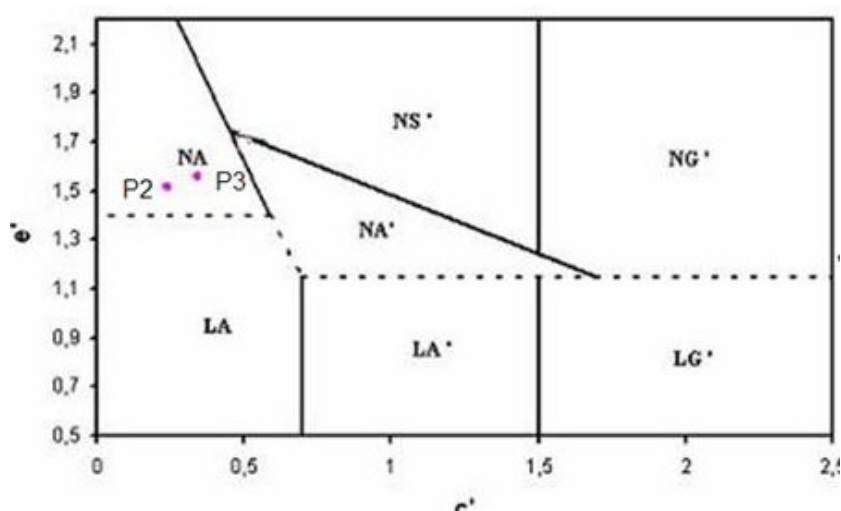


Figura 5.62 – Ábaco de Classificação

Desta forma, a classificação das amostras através do ábaco de classificação MCT foi à de um solo não laterítico (NA). Portanto, levando-se em conta o comportamento do solo apresentado no ensaio de imersão, onde os corpos de prova com teores de umidade superiores à umidade ótima se desagregarem mais rapidamente que os corpos de prova que tinham teores de umidade abaixo da ótima, já é um indicativo da possível suscetibilidade a processos erosivos quando a sucção é nula.

5.1.11 Curvas de retenção de água

Foram retirados 9 corpos de prova referentes à amostra P2. Os corpos de prova eram cilíndricos com diâmetro igual a 5,01 cm e altura igual a 2,01 cm. Dividiu-se o intervalo de saturação iniciando pelo teor de umidade higroscópica até o teor de umidade de saturação controlou-se a saturação das amostras, buscando analisar todo segmento.

As Figuras abaixo apresentam as ilustrações da relação do teor de umidade volumétrico, grau de saturação e o teor de umidade gravimétrico, em função da tensão de sucção.

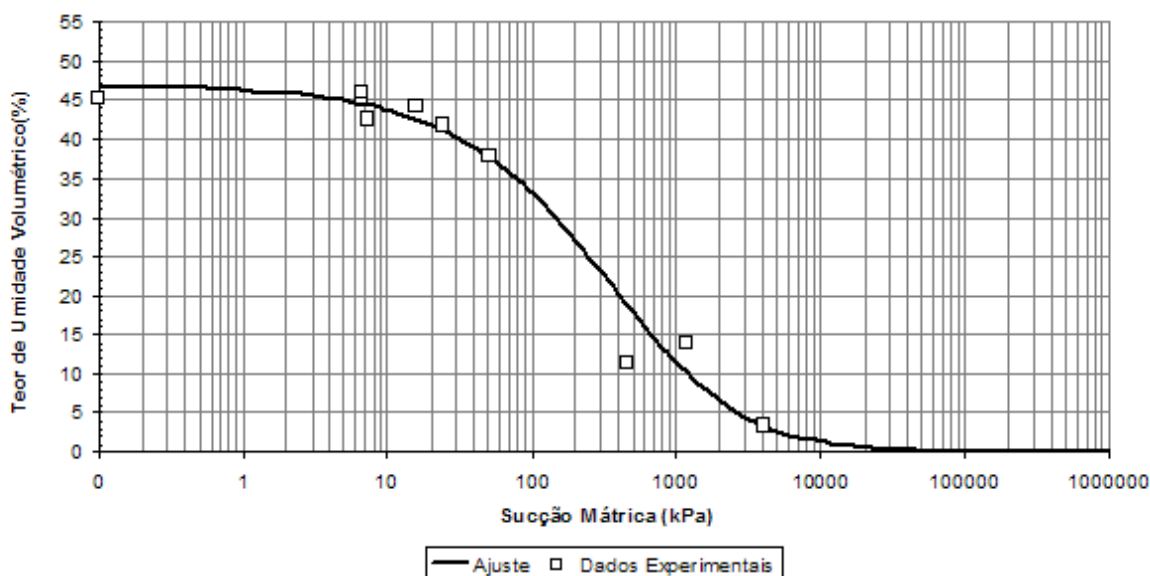


Figura 5.63 – Teor de umidade volumétrica em função da sucção mátrica

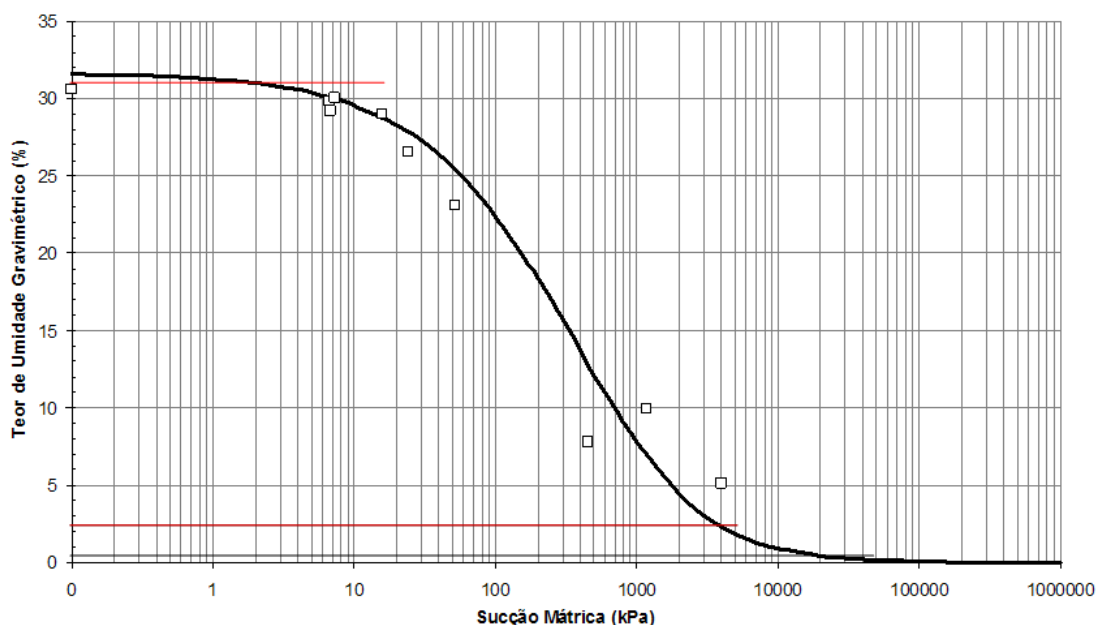


Figura 5.64 – Teor de umidade gravimétrica em função da sucção mátrica

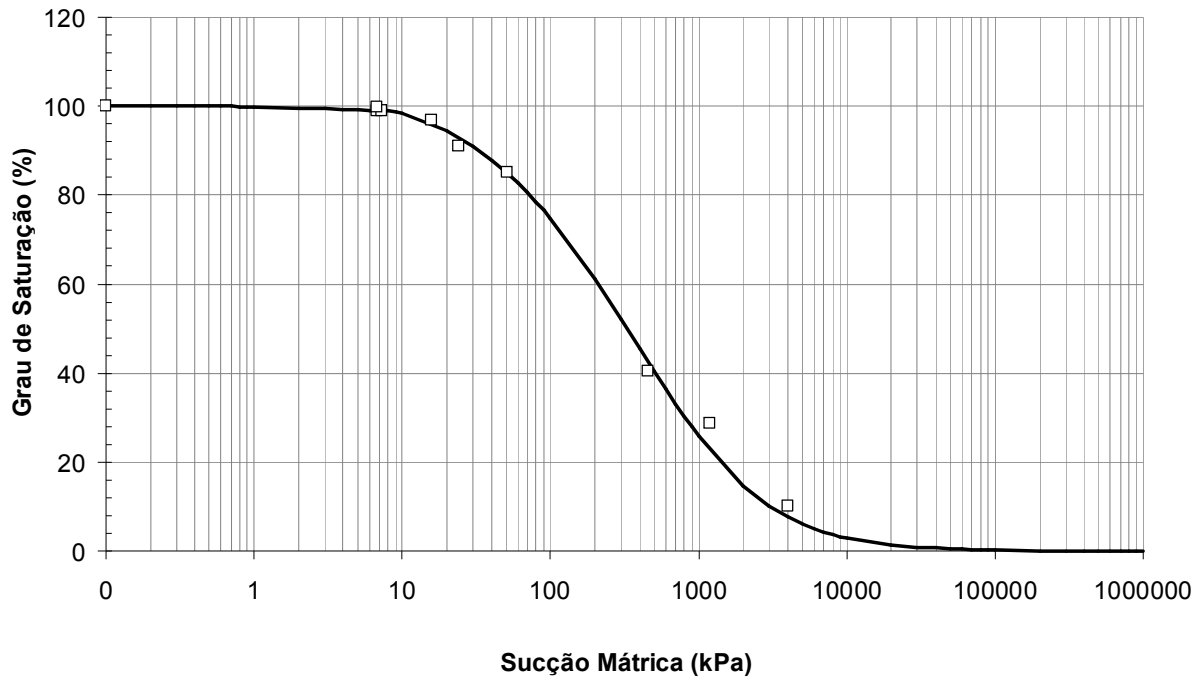


Figura 5.65 – Grau de saturação em função da sucção mátrica

A forma das curvas características ao ser comparadas com as curvas apresentadas na literatura, percebe-se que tem uma semelhança com a curva característica de uma areia.

A partir da medição da sucção matricial também foi possível determinar a curva de condutividade hidráulica não saturada (Figura 5.66), para o cálculo do coeficiente de condutibilidade hidráulica não saturada $K(\psi)$ utilizamos a fórmula proposta por VAN GENUCHTEN (1980) indicada na Equação (2.8):

$$K(\psi) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2.8)$$

Onde:

$K(\psi)$ = Coeficiente de condutibilidade hidráulica não saturada (L/T)

K_s = Coeficiente de condutibilidade hidráulica saturada (L/T)

θ_s = Umidade volumétrica saturada (L^3/L^3)

θ_r = Umidade volumétrica residual (L^3/L^3)

n, m = Constantes empíricas

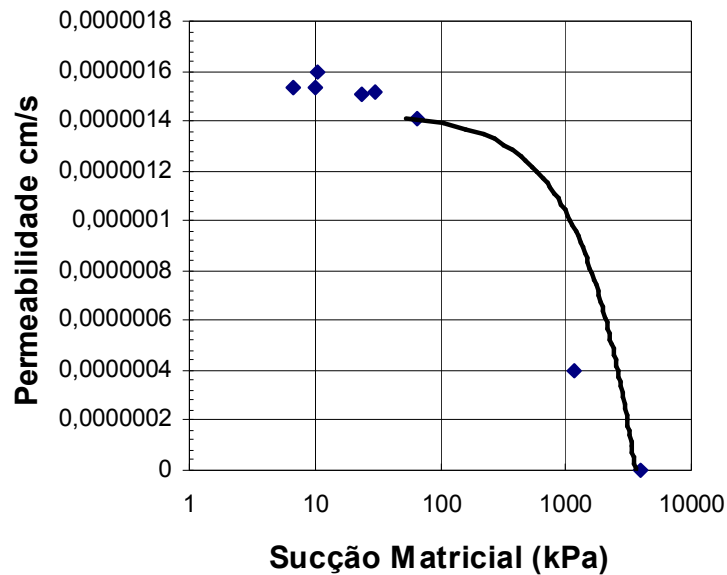


Figura 5.66 – Curva de condutividade Hidráulica não saturada ajustada pela equação de VAN GENUTCHEN (1980)

Analisando esta curva pode-se verificar que o material apresenta valores da ordem de 10^{-6} cm/s na condição saturada e decresce rapidamente para cerca de 10^{-7} cm/s em uma sucção de cerca de 1170 kPa. Estes valores de permeabilidade estão dentro da faixa de valores para solos arenosos, portanto os poros são relativamente grandes. Esta afirmação será mais exata no ensaio de porosimetria, o tamanho dos poros faz com que a capacidade de retenção de água seja menor. BARRO (2005) indica que o grau de saturação tem influência importante sobre a condutividade hidráulica. A proporção a qual os vazios são preenchidos com água é crucial. Bolhas de ar podem bloquear os canais de percolação entre as partículas, reduzindo significativamente a condutibilidade hidráulica. O autor indica que quando o solo atinge graus de saturação inferiores de 85% o ar é provavelmente contínuo, ao invés de bolhas isoladas, o que invalida a lei de Darcy. Analisando a curva característica observa-se que o grau de saturação são superiores a 85%. Portanto existe a tendência de que bolhas de ar broquem os canais de percolação e não permitam a infiltração da água incrementando o escoamento. Os gráficos das curvas também fornecem dados dos seguintes parâmetros (Tabela 5.35)

Tabela 5.35 – Parâmetros mais importantes relacionados à curvas características

SUCÇÃO DE ENTRADA DE AR	TEOR DE UMIDADE RESIDUAL	TEOR DE UMIDADE SATURADO (θ_s)
(ψ_b)	(θ_r)	
9 kPa	2,2 %	30 %

Analisando os parâmetros pode-se concluir que a sucção de entrada de ar (ψ_b) nos macroporos, é de aproximadamente 9 kPa, isto significa que a partir desta pressão denominada também como crítica, a água presente nos macroporos começa a sair, influenciando diretamente os parâmetros de coesão e permeabilidade. O teor de umidade residual (θ_r) é de aproximadamente 2,2%.

VERTAMATTI (1998) elaborou um ábaco que analisa a influência da gênese do solo e da sucção sobre a erosão. Este ábaco correlaciona o parâmetro teor de umidade residual (θ_r) obtido através das curvas características com o parâmetro e' (inclinação da curva de deformabilidade para mini-mcv igual a 10) (ver Tabela 5.24) da metodologia MCT. Para poder utilizar o ábaco forma-se o par ordenado ($100Tg\theta_r$, $100e'$). Este par ordenado será superposto no ábaco de erodibilidade elaborado por VERTAMATTI. Ao ser superposto os dados do ponto P2 no ábaco de erodibilidade o resultado foi de medianamente erodível.

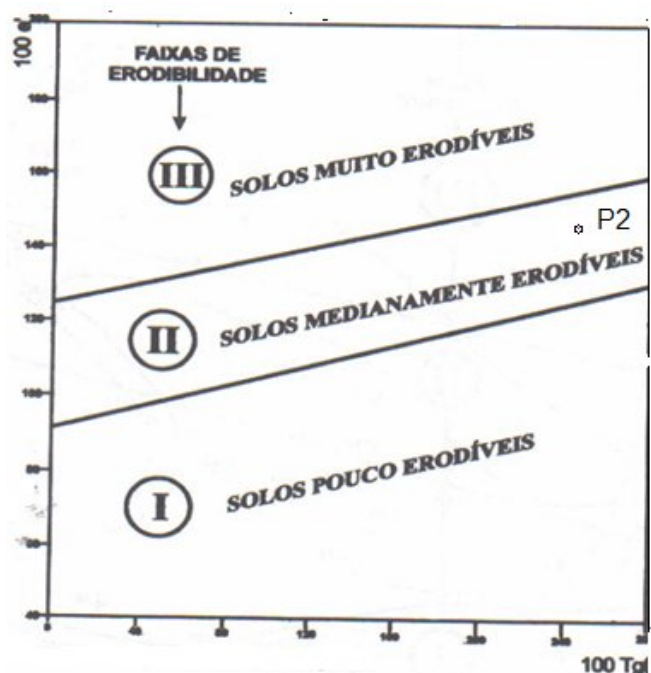


Figura 5.67 – Ábaco de erodibilidade de solos tropicais

5.1.12 Ensaio de Porosimetria por intrusão de mercúrio

A figura 5.68 ilustra os resultados obtidos no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio quando são relacionados o diâmetro dos poros versus volume acumulado. Nesta figura está também incluída a classificação segundo WEBB e ORR (1997) em relação aos tamanhos dos poros. A Tabela 5.36 apresenta todos os resultados obtidos do ensaio de porosimetria por

intrusão de mercúrio na amostra P2 e P3. E a Figura 5.69 (a,b,c) ilustra as fotografias obtidas durante o ensaio.

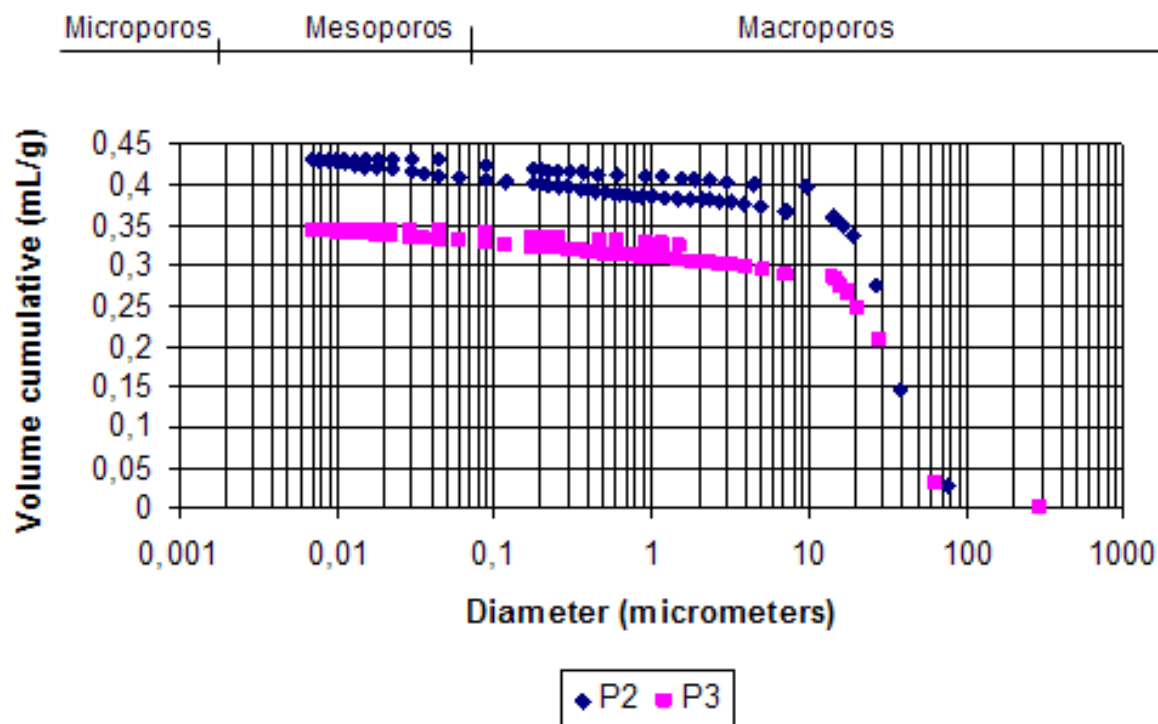
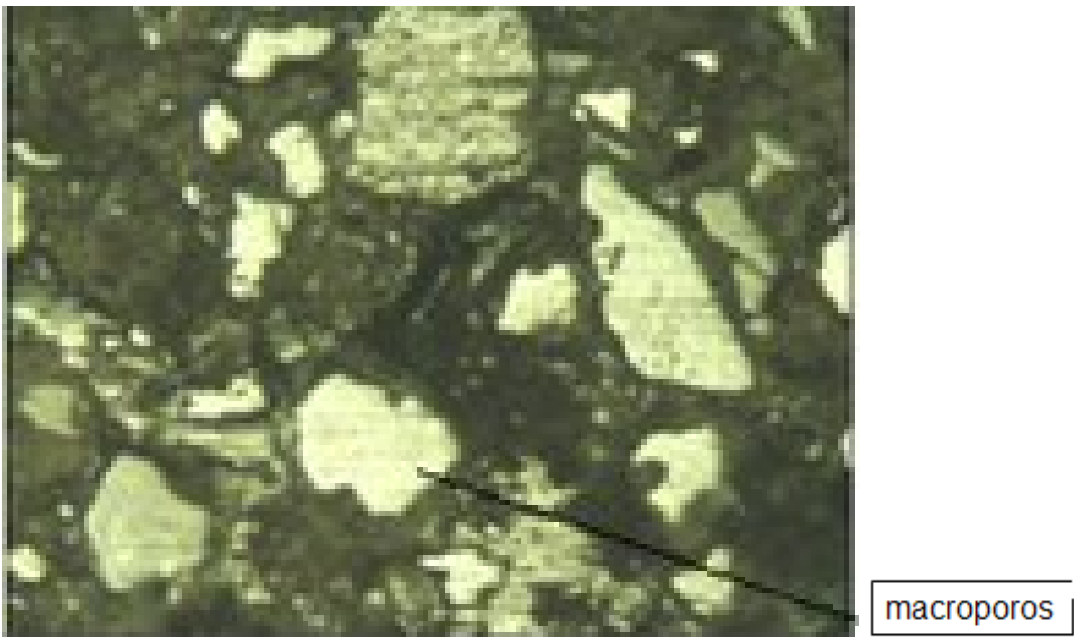


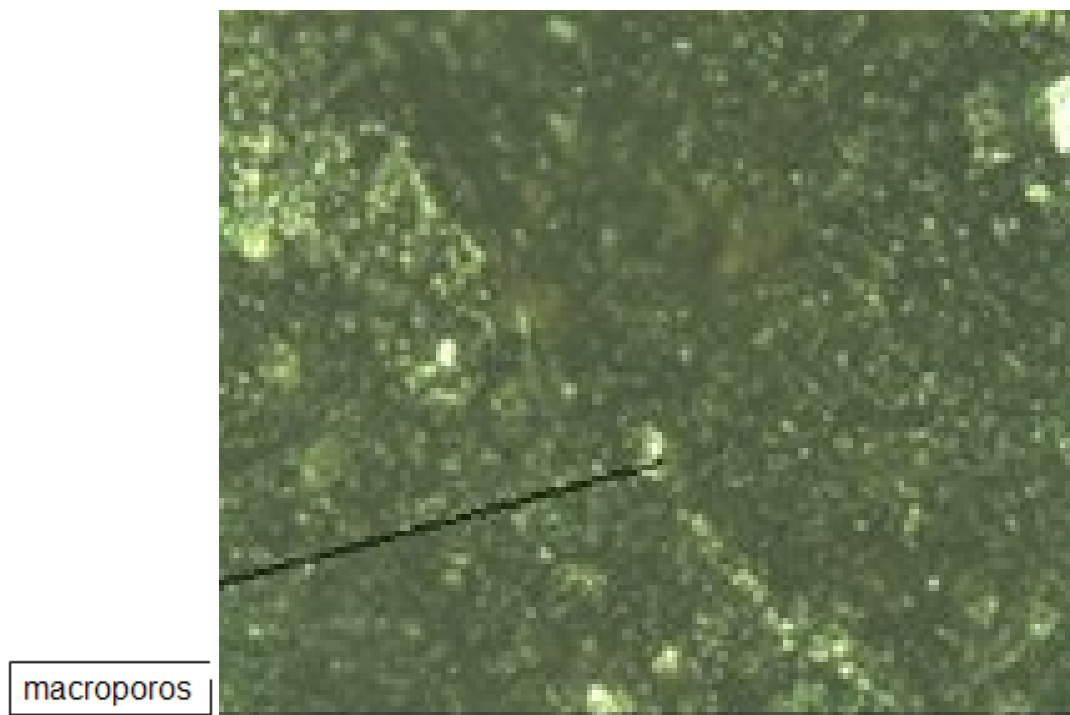
Figura 5.68 – Diâmetro de poros versus volume acumulado

Tabela 5.36 – Resultados da Porosimetria

Amostras	Área Total de Poros (m^2/g)	Diâmetro Médio (volume) (μm)	Média do Diâmetro ($4V/A$) (μm)	Densidade do corpo (g/mL)	Densidade do esqueleto (g/mL)	Porosidade (%)	Total Intrusão (volume)
P2	3.244	30.7159	0.4225	1.3602	2.5470	46.60	0.3426
P3	5.415	31.1176	0.3182	1.286	2.8860	55.42	0.4308

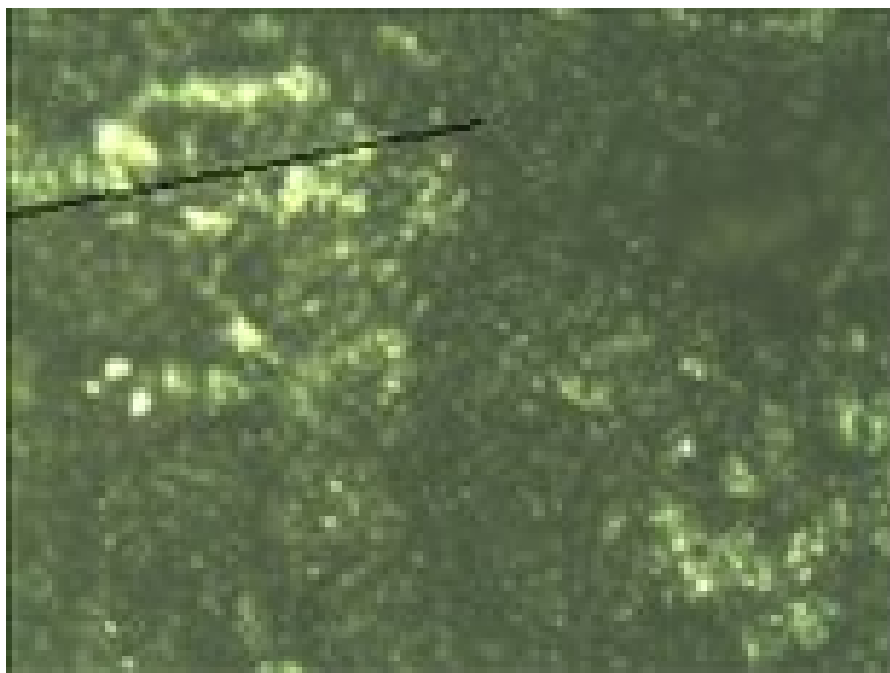


a) Observe-se macroporos



b) Macroporos

Microporos



c) Microporos

Figura 5.69 – Resultados do ensaio de porosimetria

As análises das fotografias da figura 5.69 (a,b,c) mostram a formação de micro-agregados. Esses micro-agregados, segundo SOARTES (2005) ligam-se aos outros, seja por cimentação, ou também por pontes de argila, dando origem a uma distribuição bimodal de poros, também na fotografia observa-se a presença de macroporos que já foi observado nas curvas características. Os resultados do ensaio de porosimetria são coerentes com o resultado da microscopia óptica onde já se havia observado que existia uma distribuição bi-modal de poros. Observa-se que a variação da porcentagem de porosidade presente na amostra P2 com relação a P3 é alta, como esperado já que a textura do solo do ponto P2 é muito mais fina que a do solo do ponto P3. Observado na fotografia, o solo em estudo apresenta presença marcante de macroporos e, por conseqüência, apresenta elevada permeabilidade, o que favorece a infiltração. A infiltrabilidade do solo termina tendo uma relação direta com o fenômeno da erosão, pois, se por um lado reduz o escoamento superficial e, com isso, a erosão laminar, por outro pode, quando em excesso, gerar os processos de esqueletização ou erosão interna. (CAMAPUM DE CARVALHO, 2006)

5.1.13 Curvas de Secagem

Uma das conseqüências diretas do processo de secagem é o trincamento do solo que é gerado pelo incremento das forças atrativas que surgem com o aumento da sucção. À medida que o solo seca os índices físicos como teores de umidade, grau de saturação, porosidade, densidade seca variam. Estas variações permitiram compreender o processo de contração que inicia com elevados teores de umidade e se caracteriza pelo fato do volume do solo contrair ao longo do processo de ressecamento até atingir a contração zero, que é aquela onde o solo não mais varia de volume alcançando sua densidade máxima (VILLAR 2002). O trincamento do solo incrementa a infiltrabilidade que termina tendo uma relação direta com o fenômeno da erosão.

Será apresentada a seguir a tabela 5.37 com todos os índices físicos calculados para os corpos de prova do ponto P1 ensaiados.

Tabela 5.37 – Resultados dos índices físicos

Índices físicos ajustados					
e %	W(%)	θ(%)	S(%)	n(%)	δ_a
97,5	37,4	49,74	100	49,36	1,33
97	37	47,8	100	48,84	1,33
99,56	38	49,21	100	49,24	1,33
92	35	47,6	100	47,92	1,36
90	34	46,92	100	47,37	1,38
94,32	36	48,6	100	48,54	1,35
96,94	37	49,21	100	49,22	1,33
Índices físicos estimados no laboratório					
96	33,3	44,29	90,88	48,98	1,33
91,53	25,69	35,19	73,53	47,79	1,36
90,56	19,78	27	57,23	47,52	1,37
90,04	16	28	46,56	47,38	1,38
93,31	27,15	37	76,23	48,27	1,36
96,66	32	43	86,74	49,15	1,33
89,06	9,17	12,75	26,98	47,11	1,39
94,56	31	42	85,89	48,60	1,35
95	30,8	41	84,94	48,72	1,34
88	1,12	1,55	3,33	46,81	1,39
94,18	30	40,2	83,46	48,81	1,35
97,03	29	40,19	78,31	49,25	1,33

Onde:

e = índices de vazios

W = Teor de umidade gravimétrico

θ = Teor de umidade volumétrico

S = Grau de saturação

n = Porosidade

δ_d = Densidade seca

Uma vez que todos os índices físicos foram calculados, se procedeu a estabelecer relações entre eles. Estas relações foram plotadas em gráficos que se apresentam abaixo. A primeira relação estabelecida foi dos índices de vazios versus teor de umidade gravimétrico, com esta relação conseguimos ilustrar a curva característica de contração (Figura 5.65). Observando esta curva pode indicar-se que existem pontos estimados no laboratório que estão dispersos especificamente aqueles que correspondem a teores de umidade gravimétricos superiores a 30% situação que não permite traçar a curva em forma clara, razão pela qual se procedeu a ajustar pontos, esta dispersão se gerou pelo fato de que quando o solo fica mais úmido apresenta maior dificuldade para poder obter as medidas sistemáticas de volume e do teor de umidade.

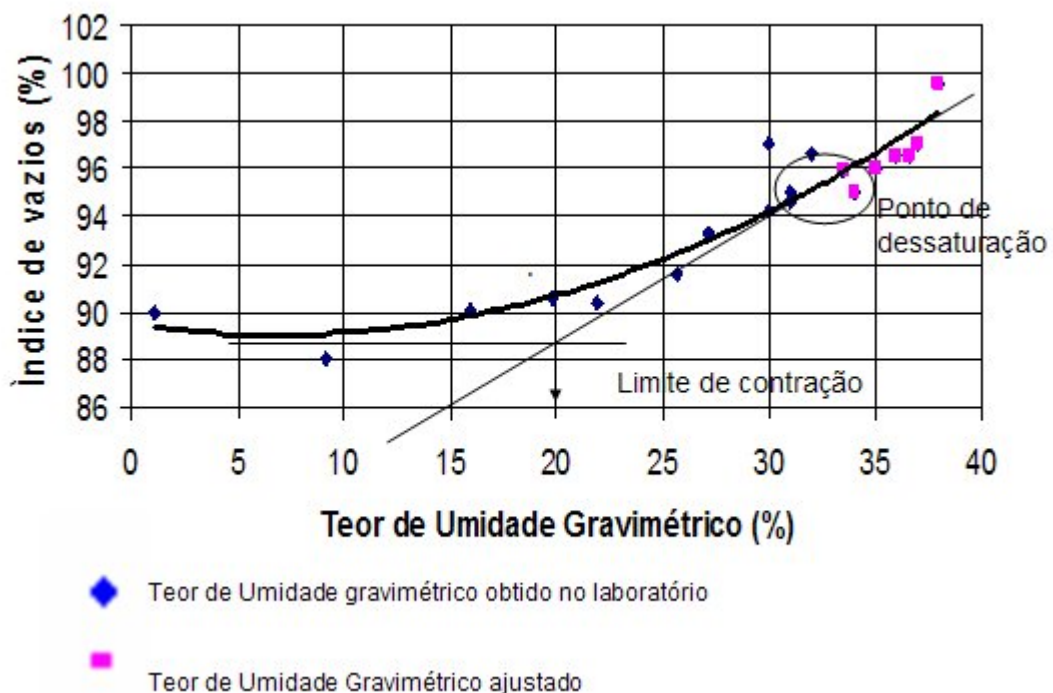


Figura 5.70 – Curva característica de Contração

Na Figura 5.70 pode observar-se que o ponto de entrada de ar na amostra, ou seja, o momento de dessaturação ocorreu para um teor de umidade gravimétrica de aproximadamente 31% e

um índice de vazios de 0,948. O valor do teor de umidade gravimétrico correspondente ao ponto de dessaturação está minimamente acima do valor do limite de liquides encontrado através do método do Cone que foi de (29%) e a baixo do valor de limite de liquides encontrado pelo método Casagrande (32,5%) este fato indicaria que para o tipo de solo em estudo o aparelho de Casagrande é adequado para a estimativa do limite de liquides, ainda que a variação apresentada do limite de liquides estimada através do método do Cone com respeito ao valor estimado do ponto de dessaturação é aceitável pelo fato que na estimativa do limite de liquides utilizamos amostra deformada, entretanto que para a curva de secagem se utilizou amostras indeformadas condições estruturais que acredito que levo a ter esta mínima diferencia.

Pela literatura se conhece que a medida que perde água, o solo endurece e, a partir de certo teor de umidade, denominado limite de liquides (LL), perde sua capacidade de fluir, mas ainda pode ser moldado facilmente e conservar sua forma, encontrando-se em seu estado plástico. Com a continuação de perda de umidade, a capacidade de ser moldado diminui, até que a partir de um teor de umidade correspondente ao limite de plasticidade (LP), a amostra sofre fratura à tentativa de moldagem. Desta forma o solo se encontra em seu estado semi-sólido, onde apresenta aparência sólida, mas sofre reduções de volume enquanto continua secando. (CAPUTO 1988)

Durante o processo de secagem ocorre no solo a passagem gradual do estado semi-sólido para o estado sólido, onde praticamente não há variação de volume (ΔV) devida à perda de umidade. O limite entre esses dois últimos estados é representado pelo teor de umidade correspondente ao limite de contração LC (ORTIGÃO, 1995). O LC para o solo em estudo foi estimado também através da curva da Figura 5.64 e foi de 20%. Da umidade gravimétrica. Portanto, o solo com umidades abaixo do LC (20%), suas ligações fisico-químicas presentes entre as partículas aumentaram até um momento em que toda a estrutura este afetada pelo fissuramento. (VILLAR 2002) Este fissuramento na estrutura do solo reduz a resistência à tração da massa de solo. Na análise de erosão, a ruptura da estrutura do solo incrementará a rápida infiltração da água no interior do solo e permitirá o rompimento das ligações entre partículas originando a desagregação. A infiltrabilidade reduz o escoamento superficial, mas, quando em excesso, gera processos de esqueletização (CAMAPUM DE CARVALHO et al 2006). O solo do ponto P2 pela granulometria apresenta predomínio de areias por tanto tem

alta capacidade de infiltração, com a presença de fissuras, esta capacidade se incrementará podendo este fato gerar erosão interna.

Também será apresentada a seguir, a relação entre o teor de umidade volumétrico versus o teor de umidade gravimétrico (Figura 5.71). Entendendo-se que o teor de umidade gravimétrico é a relação entre a massa de água presente numa amostra de solo e a massa seca da mesma amostra. Agora o teor de umidade volumétrico é definido como a relação entre o volume de água presente numa amostra e o volume total da amostra. (PINTO 2002).

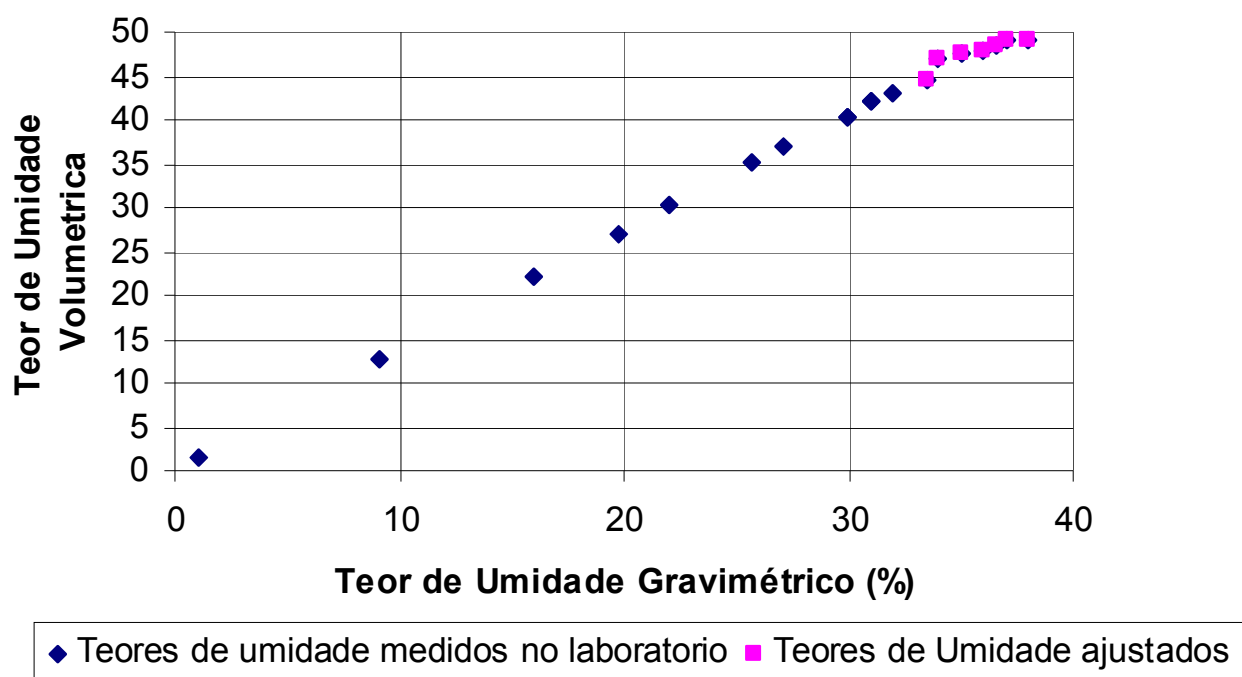
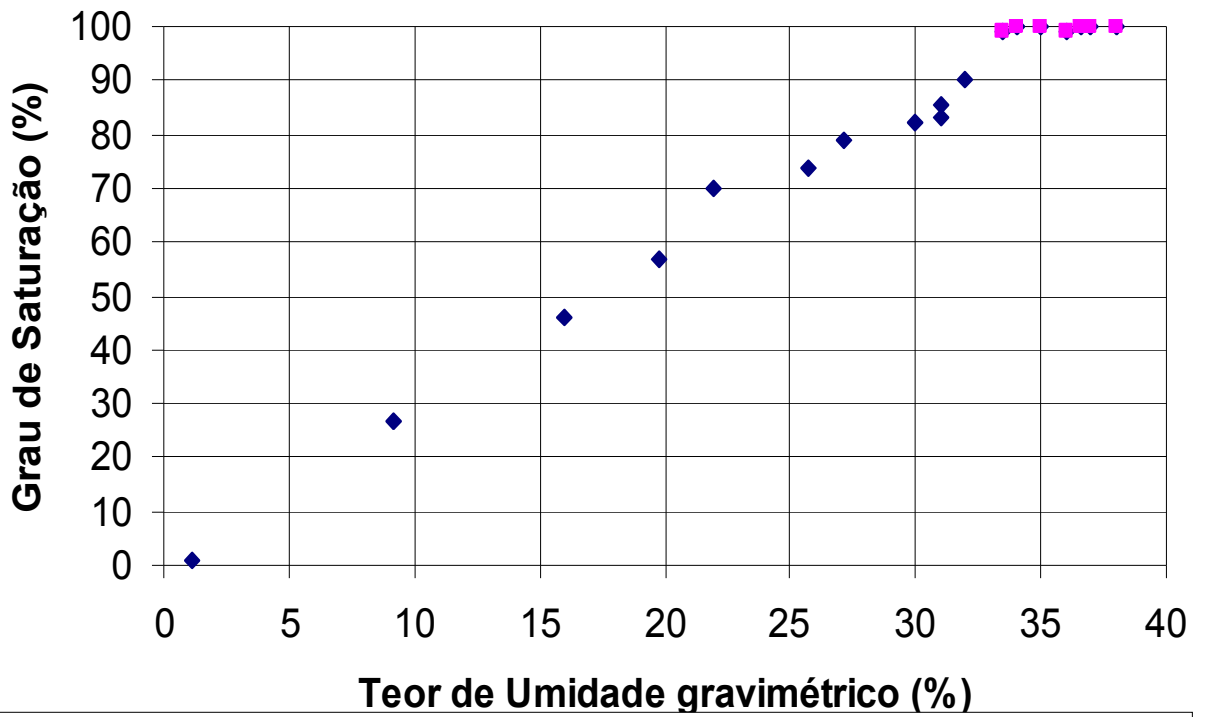


Figura 5.71 – Curva que relaciona os teores de umidade volumétricos versus gravimétricos

Observando a Figura 5.71 pode indicasse que nas proximidades do valor do ponto de dessaturação (31% teor de umidade gravimétrica) existe uma mudança de inclinação, isto se deve a que o solo esta ficando saturado e não tem mais poros para ser preenchidos de água apresentando uma variação volumétrica quase constante. Agora observe-se que o solo com teores de umidade menores do ponto de dessaturação (31%) a inclinação da curva é lineal comportamento gerado pelo fato que quando o solo perde umidade se contra e, por tanto sofre mudanças no se peso e volume. A contração depende da sua textura e dos minerais presentes na sua fase sólida. Alem disto deve indicar-se que neste caso o volume do solo contraído foi igual ao volume de água evaporada. Portanto fica definido que o ponto de dessaturação corresponde a 31% da umidade gravimétrica.

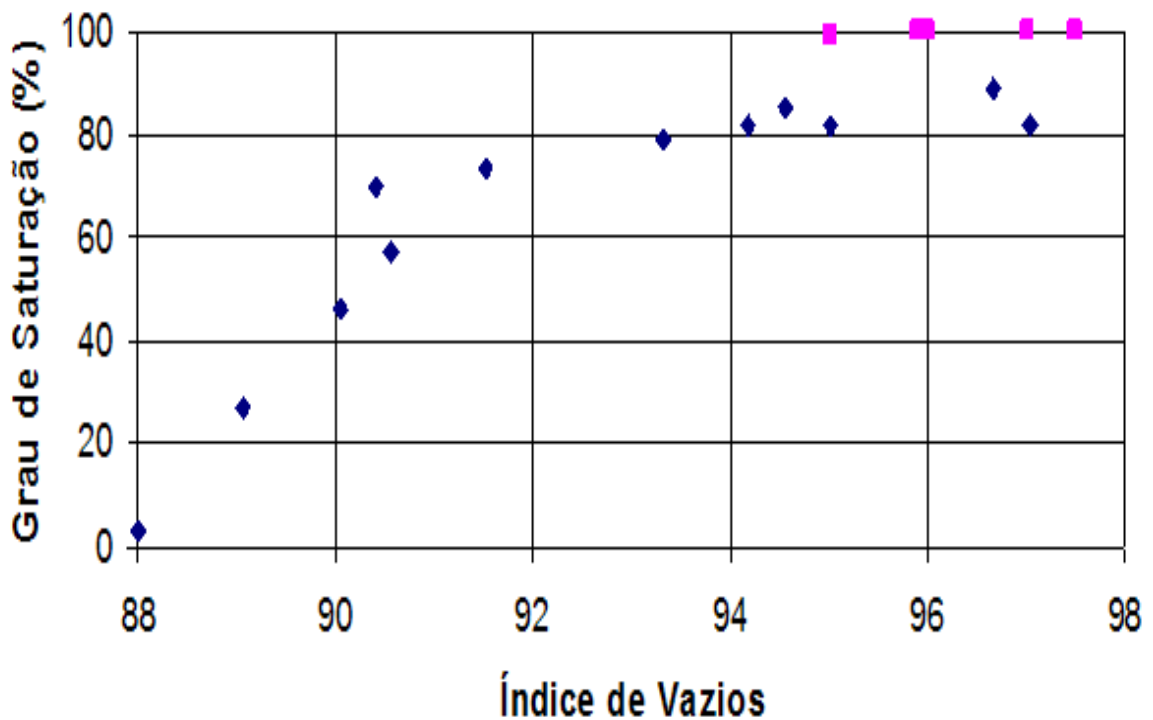
Também na gráfica se visualiza como os pontos estimados no laboratório a partir do ponto de dessaturação (31%) com respeito aos pontos ajustados apresentam uma ligeira variação estou pelo fato da dificuldade que tínhamos em medir o volume e seu teor de umidade quando este ficava próximo a saturação. Na análise de erosão o conhecimento do valor do ponto de dessaturação é importante, pois, quando o solo alcança teores de umidade a cima deste, estará saturado que é a condição, mas critica. Nos ensaios de compressão simples e de Inderbitzen foi demonstrado que quando o solo está saturado, não oferece resistência à compressão mecânica, e a perda de solo por escoamento laminar é maior. Portanto nesta condição o solo em estudo é muito susceptível a erosão.

As Figuras 5.72 (a), (b) e (c) correlacionam, umidade gravimétrica, índice de vazios e porosidade versus grau de saturação. Em todas estas figuras observarse como a inclinação da curva varia a partir do ponto de dessaturação (31% teor de umidade gravimétrico), comportamento que era esperado pelo fato que com teores de umidade acima de este o solo atinge grau de saturação de 100%, por tanto também através dos gráficos de estas correlações ficou definido que o ponto de saturação corresponderia a 31% da umidade gravimétrico. Alem disso temos que indicar que também nestas gráficas se pode observar que os pontos estimados no laboratório apresentavam graus de saturação na faixa de 80 a 85% no alcançando teores superiores, razão pela qual se procedeu a ajustar alguns pontos. O fato de não haver conseguido ter umidades gravimétricos superiores a 85% no laboratório se deve a falta de precisão nas medições quando o solo ficava muito úmido quase saturado já que as medidas forem estimadas usando um paquímetro manual quando o, mas certo seria o uso de um paquímetro digital. Alem disso cave salientar que também na estimativa dos graus de saturação temos a influencia da massa especifica dos sólidos, dado que foi estimado no ensaio de massa especifica dos grãos. Este dado foi estimado através de amostras deformadas, a massa especifica dos sólidos representa o valor meio da massa especifica de cada mineral que constitui a fase sólida de um solo. Acredito que a condição de ser um valor meio influencia na estimativa do grau de saturação .



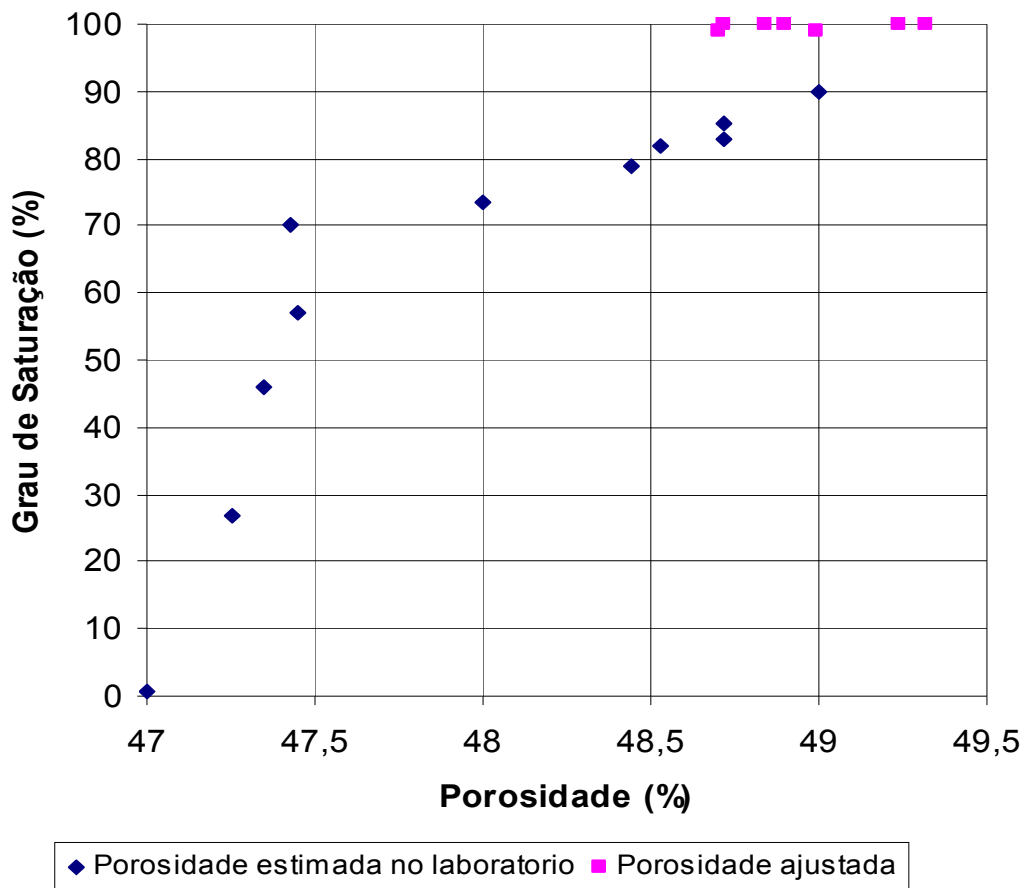
◆ Graus de Saturação obtidos no laboratório ■ Graus de Saturação ajustados

(a)



◆ Índices de vazios estimados no laboratório ■ índices de vazios ajustados

(b)



(c)

Figura 5.72 – Curva de secagem: relação entre o teor de umidade gravimétrico, índices de vazios e a porosidade versus grau de saturação

A figura 5.73 apresenta a relação entre o teor de umidade volumétrico e a porosidade. Nesta figura também se observa que a partir do ponto de dessaturação, o gráfico deixa de ser linear e com uma inclinação igual a 45° , comportamento já esperado pelo fato de que solo a partir do ponto de dessaturação está próximo a ficar saturado. A segunda mudança de inclinação se dá próxima a porosidade de 47,4 %, correspondente aproximadamente à região do limite de contração. Também se observa que se nestes gráficos se ajustou alguns pontos para poder ilustrar, mas claramente a mudança da declividade da curva a partir do ponto de dessaturação.

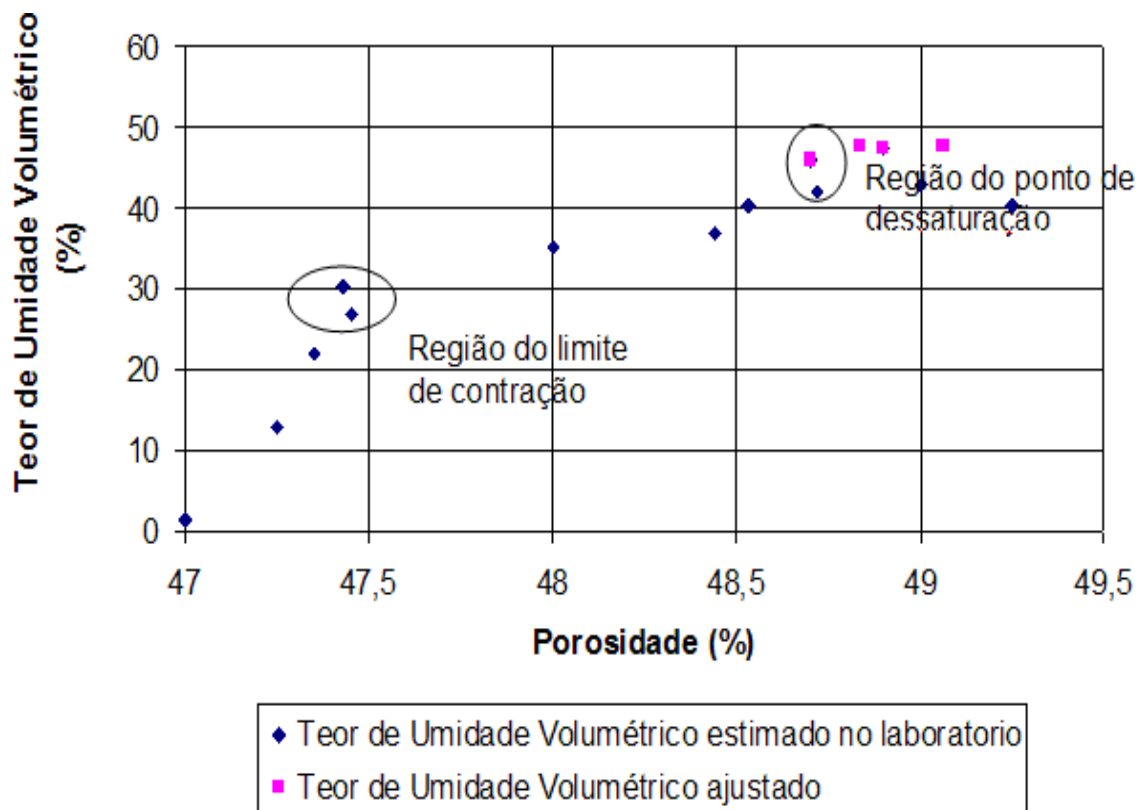


Figura 5.73 – Curva de secagem: relação entre o teor de umidade volumétrica e a porosidade

A figura 5.74 ilustra as relações entre a densidade seca do solo e o teor de umidade gravimétrico. A densidade pela literatura se conhece que é a razão entre sua massa específica e a massa específica da água destilada, isenta de ar à 4° C. Como esta última vale 1,000 g/cm³, a densidade e a massa específica são expressas pelo mesmo valor numérico. (CAPUTO 1988)

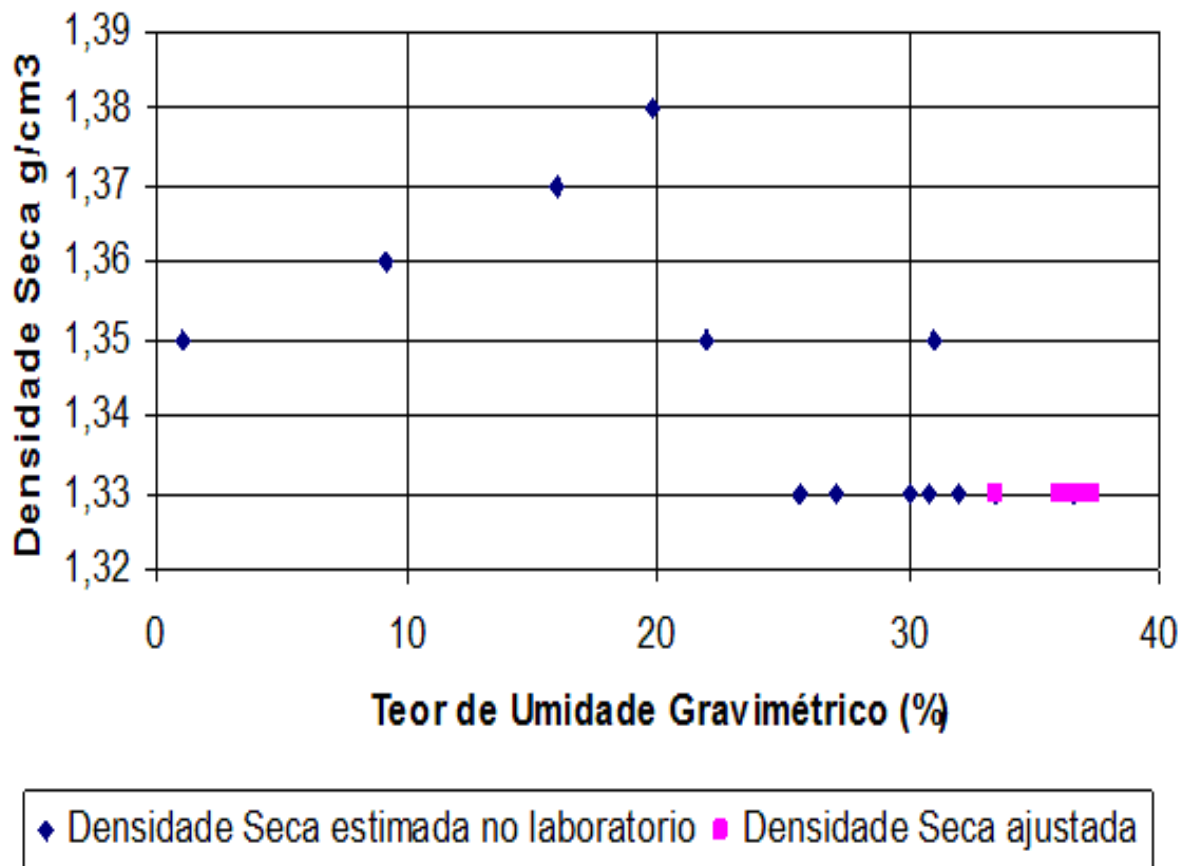
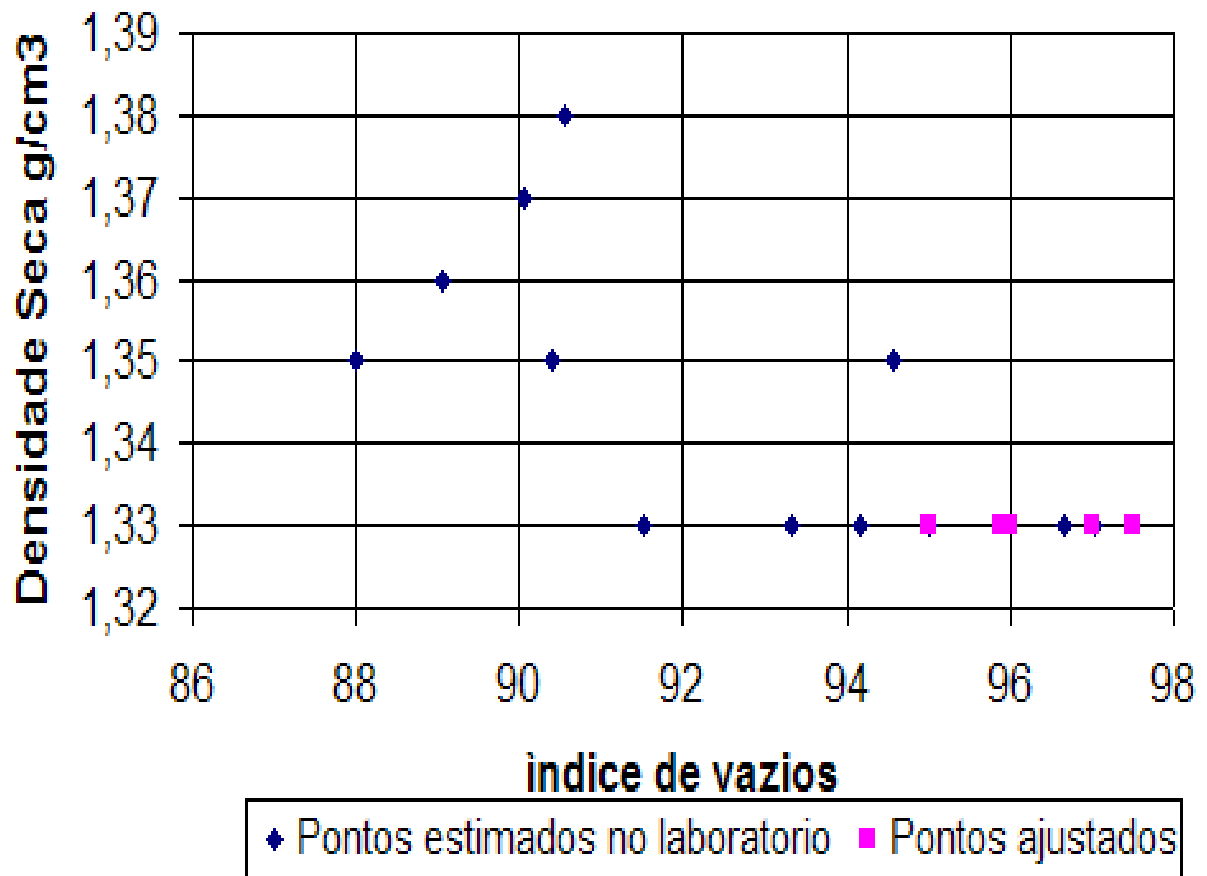


Figura 5.74 – Curva de secagem: relação entre a densidade total versus teor de umidade gravimétrico

Percebe-se também na Figura 5.74 que à medida que o solo perde umidade vai incrementando os valores da densidade seca. O valor da densidade seca máxima surge aproximadamente no teor de umidade correspondente ao LC.

Quando solo atinge teores de umidade menores que o valor LC (20%) a curva apresenta uma declividade estourada pelo fato que o solo praticamente não apresenta variação de volume (ΔV) devida à perda de umidade.

Com o objetivo de observar o comportamento dos índices de vazios versus a densidade seca se plote a Figura 5.75



(b)

Figura 5.75 – Curva de secagem: relação entre a densidade total versus índice de vazios

Nesta figura também pode observarse que a curva sofre uma mudança na sua declividade quando durante o processo de ressecamento o solo atinge índices de vazios próximos aos índices de vazios que corresponde ao LC que foi de (88%) por tanto o LC está bem definido. Nas figura 5.74 e Figura 5.75 percebe-se um ponto disperso devido ao fato da dificuldade encontrada para poder medir seu volume e teor de umidade das amostras quando elas ficavam com teores de umidade superiores a 30% .

5.2 Ensaios de avaliação da erodibilidade em forma Direta

5.2.1 Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação foi realizado para a amostra P2 sendo que, se utilizou em sua execução dois métodos para verificar se existe alguma influência no comportamento do solo. Os métodos aplicados foram o da imersão parcial e imersão total (Figura 5.76). Após o

término do ensaio, além da verificação da desagregabilidade, foi feita a classificação de acordo com proposta de SANTOS & CAMAPUM (1998).

A classificação final foi “sem resposta”, pois a amostra manteve sua forma e tamanho originais, apesar de ter desagregado um pouco na base do corpo de prova, como é possível observar na Figura 5.77.



Figura 5.76 – Métodos de Imersão Parcial e Imersão total da amostra P2

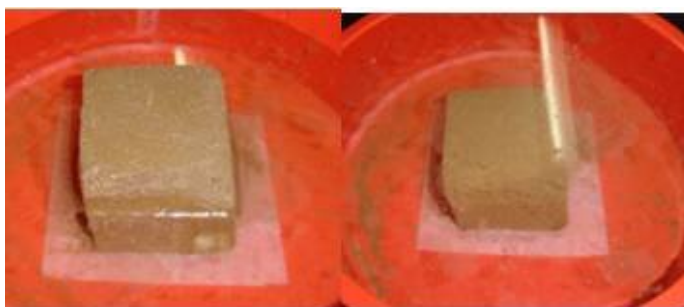


Figura 5.77 – Classificação final do Ensaio de Desagregação para a amostra P2

A presença de matéria orgânica como raiz de gramíneas forrageiras pode ter sido o principal fator que levou as amostras à não se desagregarem, propiciando sustentação mecânica ao solo. LIMA (2003) considera como solos altamente erodíveis aqueles que desagregam totalmente em água. Entretanto, não são verificadas relações diretas do potencial de desagregação com os níveis intermediários e baixos de erodibilidade. Estudos feitos pelo CCBE (Consórcio Capim Branco Energia) mostram que o volume de água que chega à calha do córrego é superior à capacidade de escoamento do mesmo, propiciando, assim, o aumento do nível de água e o possível solapamento das margens. Pelo menos este ensaio já mostra que o solo da margem da voçoroca denominada P2 não perderá a sua estrutura pelo simples contato com água. Se ocorrer a erosão, neste caso de variação do nível de água do trecho, será em função dos efeitos do fluxo e/ou impacto da água corrente com o solo. O comportamento do solo no ensaio

confirma a hipótese de CARDOSO et al (1998) que todo solo não colapsível não sofre processos de desagregação quando submerso em água.

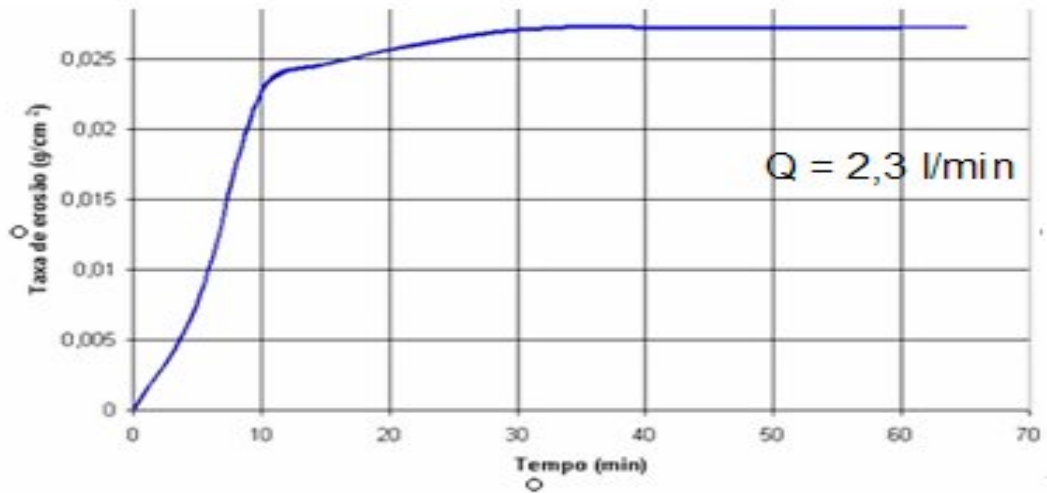
5.2.2 Ensaio do tipo Inderbitzen

Foram feitos ensaios variando o teor de umidade vazão e declividade. Os resultados médios estão ilustrados na Figura 5.78 (a) (b) e Tabela 5.38 os corpos de prova foram moldadas nas mesmas condições de umidade (6,18%) e densidade, sendo três ensaios conduzidos com declividade de 25° e vazão de 2,3 l/min e três com declividade 25° e vazão de 1,2 l/min. Já a Figura 5.79 e Tabela 5.39 ilustram os resultados dos ensaios onde duas amostras foram moldadas nas umidades de 19,63 e 21,38%, sendo o ensaio conduzido com declividade de 25° e vazão de 1,2 l/min e outras duas amostras moldadas com umidade de 30 e 31%, o ensaio destas amostras foi conduzido com declividade de 25° e vazão de 2,3 l/min, também a Figura 5.80 e Tabela 5.40 representam os resultados das amostras que foram conduzidas com declividade de 10° e vazão de 1,2 l/min e 2,3 l/min e teores de umidade de 23%, e 29%.

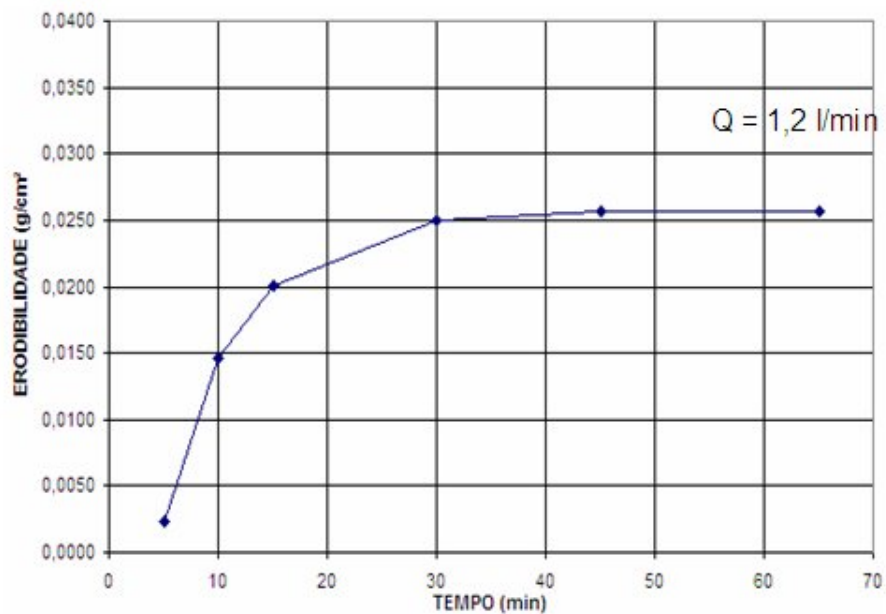
A taxa de erosão nos ensaios conduzidos com vazão de 2,3 l/min é bem maior que a taxa de erosão obtida nos ensaios conduzidos com vazão de 1,2 l/min. Este fato é explicado devido à tensão cisalhante que é maior nos ensaios conduzidos com uma vazão de 2,3 l/min, já que a altura da lâmina de água será maior. Quanto maior seja a tensão cisalhante hidráulica, maior será o arraste de material, ocasionado um processo erosivo maior. Estou devido aqui a tensão cisalhante hidráulica é influenciada pela altura da lamina de água do fluxo. Quanto maior a altura da lamina do fluxo tenderá a ter maior energia cinética e por tanto maior poder de desagregação das partículas

Tabela 5.38 – Resultados dos ensaios Inderbitzen

			Taxa de erosão (g/cm ² min)					
W%	Q(l/min)	declividade	5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	65 min
6,18	2,3	25°	0,0075	0,0226	0,0246	0,027	0,027	0,027
6,18	1,2	25°	0,0023	0,0147	0,0201	0,0249	0,0257	0,0257



(a)



(b)

Figura 5.78 – Ensaio realizado com 25° e 10 ° 2,3 l/min, 1,2 l/min

Tabela 5.39 – Resultados dos ensaios Inderbitzen

W%	Q(l/min)	declividade	Taxa de erosão (g/cm ² min)					
			5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	65 min
19,63	1,2	25°	0,0044	0,0051	0,0059	0,0071	0,0074	0,0074
21,38	2,3	25°	0,0062	0,0064	0,0065	0,007	0,0074	0,0074

30	2,3	25°	0,0116	0,0126	0,0132	0,0144	0,0151	0,0151
31	1,2	25°	0,0114	0,0124	0,0129	0,0141	0,0149	0,0149

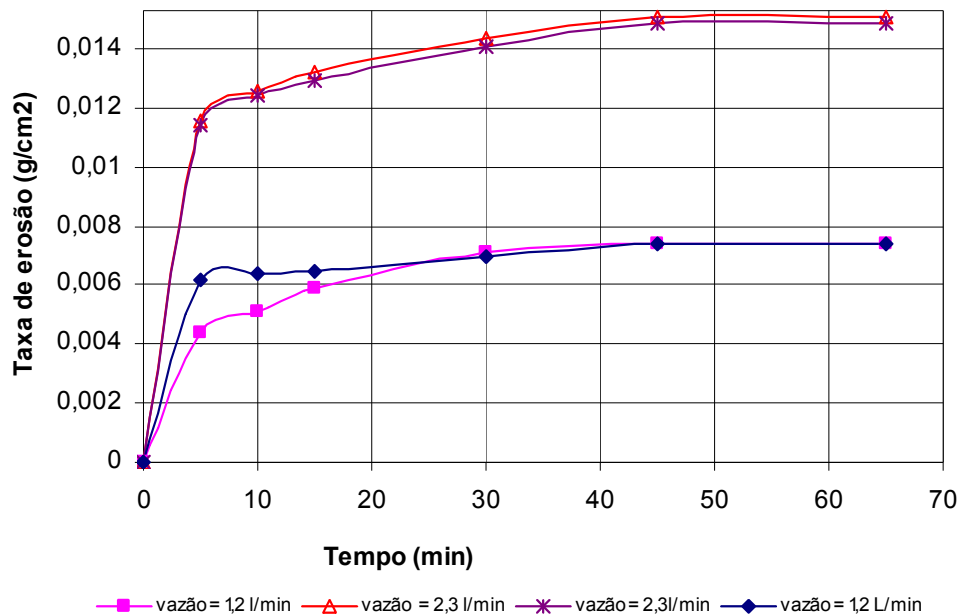


Figura 5.79 – Ensaio realizado com 25° e 2,3 l/min, 1,2 l/min

Tabela 5.40 – Resultados dos ensaios Inderbitzen

W%	Q(l/min)	declividade	Taxa de erosão (g/cm ² min)					
			5 min	10 min	15 min	30 min	45 min	65 min
23	1,2	10°	0,0222	0,0487	0,0605	0,0666	0,0703	0,0703
29	2,3	10°	0,0299	0,0334	0,0367	0,0427	0,0454	0,0454

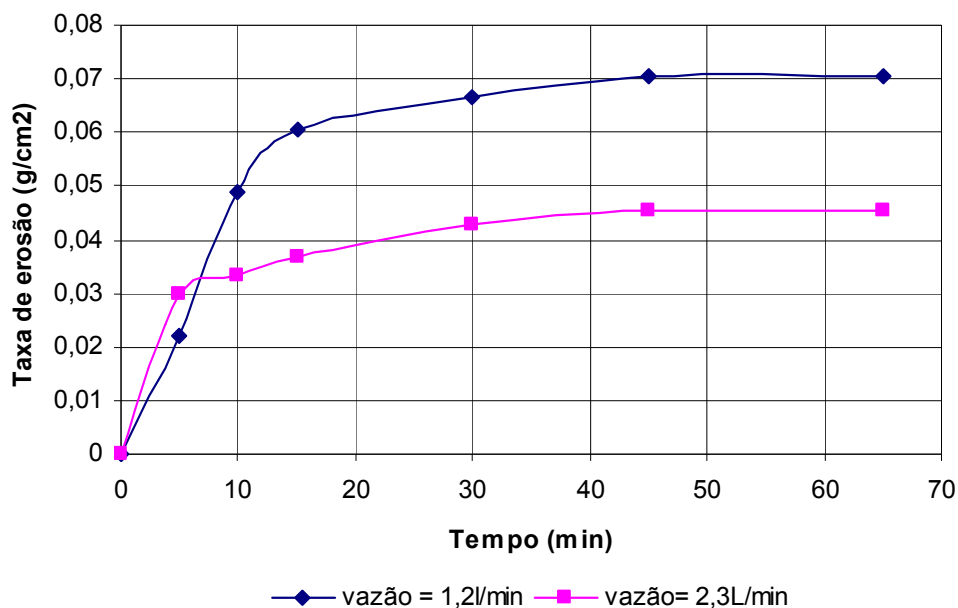


Figura 5.80 – Ensaio realizado com 10° e $Q = 2,3 \text{ l/min}$, $1,2 \text{ l/min}$

Os gráficos acima ilustram a taxa de perda de solo obtida ao longo dos intervalos de tempo. Salientado que somente foi simulado através de este ensaio o efeito do escoamento laminar. Fazendo uma análise dos resultados, podemos indicar que dos ensaios observa-se que a taxa de erosão das amostras moldadas com teor de umidade de 6,18% é maior do que das outras amostras que forem moldadas com teores de umidade superiores. Este resultado se deve principalmente a que corpos de prova moldados na condição de umidade de 6,18 % foram extraídos de blocos indeformados trazidos na primeira visita e os corpos de prova foram moldados na parte final do bloco. Esta parte final apresenta um material aluvionar caracterizado pelo solo mais claro. E também evidencia a ausência de raízes, como se pode observar na ilustração (Figura 5.81). Este fato das condições dos blocos indeformados pode ter influenciando na taxa de perda de solo já que as raízes ajudam a agrupar os grãos impedindo a fácil desagregação.



Figura 5.81 – Deposição de material aluvial e ausência de raízes

Outras amostras que foram ensaiadas em condições de umidade superiores a 6,18% foram moldadas dos blocos indeformados trazidos na segunda visita e da parte superior e intermédia dos blocos (Figura 5.82) onde se observa uma quantidade considerável de raízes de gramíneas forrageiras e predomínio de deposição coluvionar



Figura 5.82 – Deposição de material coluvionar com presença de raízes

É possível perceber que as taxas de erosão dos ensaios feitos com as amostras com predomínio de raízes de gramíneas forrageiras foram menores que as taxas de erosão das amostras moldadas no bloco trazido na primeira visita, que não apresentava predomínio de raízes, apesar da condição de umidade ser menor. Este fato estaria indicando que as raízes estão influenciando no agrupamento de seus grãos e impedindo que as partículas sejam arrastadas pelo fluxo laminar, a pesar de ter maior grau de umidade.

Nos blocos indeformados trazidos na segunda viagem foram feitos os ensaios com cobertura vegetal e sem cobertura vegetal. Para isso foi utilizada a situação mais crítica em campo: 25° de declividade e vazão de 2,30 l/min, os corpos de prova foram moldados nas mesmas condições de umidade 20% e densidade de 1,38 g/cm³ aproximadamente. O resultado está ilustrado na Figura 5.83. É possível perceber que em termos de taxa final existe uma diferença não muito considerável entre o ensaio com cobertura vegetal e os resultados do ensaio sem cobertura vegetal. Isto ocorreu devido às condições do ensaio, que consiste em simular uma lâmina de água na superfície de uma amostra de solo sem representar uma condição de chuva. A cobertura vegetal exerce grande proteção no solo, no que diz respeito ao impacto das gotas

de chuva, e a matéria orgânica, como já foi demonstrado nos ensaios analisados acima, agrupa os grãos do solo através de suas raízes impedindo que as partículas sejam arrastadas por escoamento. MENDES (2006) indica que o fluxo superficial só é capaz de transportar as partículas menores, mas o salpico da chuva pode arrastar partículas maiores, conforme a granulometria. O ponto P2 apresenta um 67% de material granular (areia) e 33% de finos (siltes e argilas), portanto o solo do ponto P2 apresentará menor quantidade de partículas a ser carregada pelo fluxo superficial.

Se o ensaio fosse conduzido com simulação de chuva, provavelmente esta diferença entre os ensaios com e sem cobertura vegetal seria maior. Porém, pode-se perceber que a cobertura vegetal retardou o tempo para se atingir à taxa de erosão máxima, o que já é um ponto positivo, pois implica que solos com cobertura em eventos rápidos de precipitação serão menos suscetíveis à erosão.

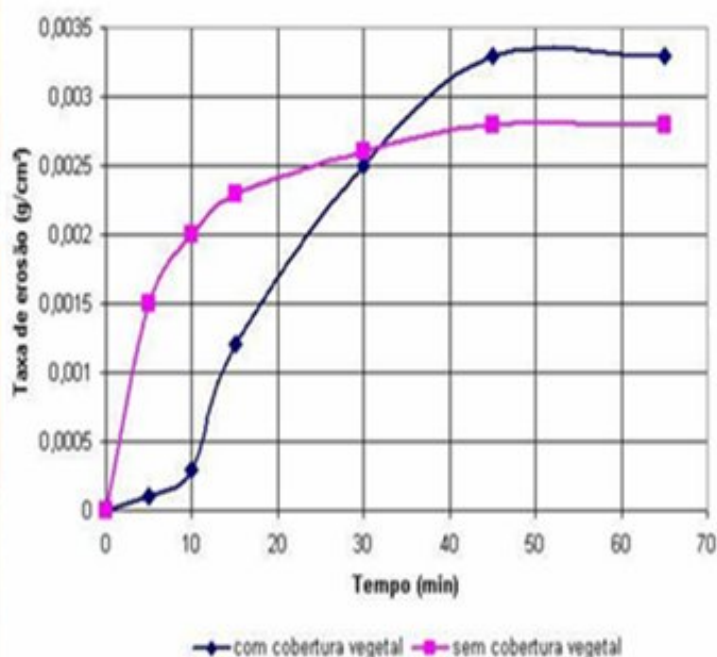


Figura 5.83 – Ensaio realizado com e sem cobertura vegetal W% 20 e Q = 2,3 l/min

Foi analisada também a influência do grau de saturação das amostras. Os ensaios foram feitos com a declividade de 25° e vazão de 2,3 l/min. Os corpos de prova apresentavam graus de saturação de 84,93; 84,83 e 68,13 %. Conforme é possível observar na Figura 5.84, quanto maior o grau de saturação inicial, maior a susceptibilidade à erosão. Isto ocorre porque, para

os solos já com muita água em seus vazios, há diminuição da infiltração, fazendo com que o run-off aumente e ocasione, então, uma maior perda de solo. Através de determinações do teor de umidade realizadas antes e após o ensaio, foi possível perceber que o solo não saturou por completo, havendo então uma contribuição da sucção na manutenção de sua integridade. Em termos práticos, isto mostra que chuvas contínuas, mesmo que de baixa intensidade, mas que tentem a saturar o solo, podem ter como consequência o aumento da taxa de erosão.

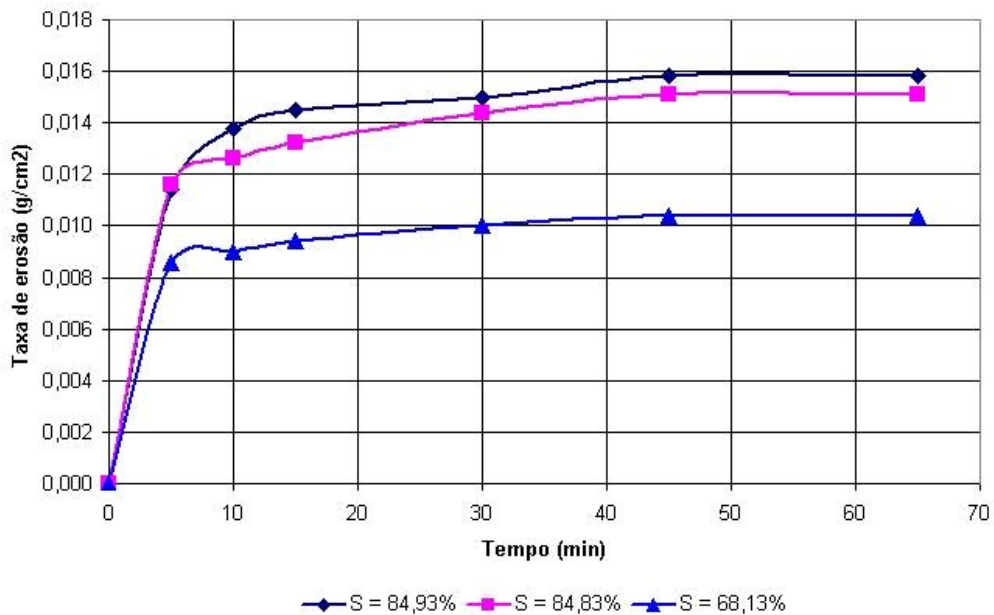


Figura 5.84 – Ensaio realizado com diferentes graus de saturação

Também neste ensaio foi analisada a influência da tensão cisalhante no processo de erosão, a tensão cisalhante é provocada pela altura da lâmina de água, e este parâmetro influencia na resistência do solo a processos erosivos, o parâmetro de maior importância que é obtido da correlação tensão cisalhante hidráulica versus taxa de erosão: a erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento. A tensão cisalhante hidráulica (τ_h) é a tensão gerada pelo escoamento laminar que provoca perda de solo. A tensão cisalhante hidráulica (τ_h) é estimada através da equação abaixo.

$$\tau_h = \sigma \cdot h \cdot d \quad (5.24)$$

Onde:

σ = peso específico do fluido,

h = Altura da lâmina de fluxo,

d = Declividade do escoamento.

Tendo em vista a dificuldade para a medição direta da lâmina de água no aparelho de Inderbitzen, esta foi determinada utilizando-se a equação de Manning com coeficiente de rugosidade para canal de aço já tendo sofrido intemperismo ($n = 0,028$), condição que mais se aproximou das condições da calha do Inderbitzen.

$$Q = \left(\frac{1}{n} * A * R_h^{2/3} * D^{1/2} \right) \quad (5.25)$$

Onde:

Q = Vazão (m^3/s);

n = Coeficiente de rugosidade de Manning;

A = Área transversal do escoamento (m^2);

R_h = Raio hidráulico (m);

D = Declividade.

O R_h é obtido pela equação 24 tendo em consideração a forma da calha do Inderbitzen.

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (5.26)$$

Onde:

A : Área da calha;

P_m : Perímetro molhado (m).

Para determinação da erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento do solo, foram correlacionados os valores médios de perda de solo obtidos dos ensaios de Inderbitzen versus a tensão de cisalhamento hidráulica. Esses dados (Figura 5.79). Tabela 5.41

A erodibilidade do solo foi obtida pela inclinação da linha da Figura 5.80, enquanto que a tensão crítica de cisalhamento foi estimada através da projeção da linha da Figura 5.80 até o eixo X, ou seja, perda de solo nula. Os resultados destes parâmetros também se ilustram na Tabela 5.41.

Tabela 5.41 – Resultados da tensão cisalhante hidráulica (τ_h) e perda de solo (Inderbitzen)

Q (lt/min)	τ_h (Pa)	declividade	W%	Valores médios de perda de solo (g/cm^2)	K($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$)	τ_h crit (Pa)
1,2	1,58	10°	29	0,0025	0,006	0,9
	4,38	25°	20	0,007		
			21	0,007		
2,3	2,22	10°	23	0,0045	0,01	0,9
	6,13	25°	33	0,0070		
			30	0,0149		
			31	0,0151		

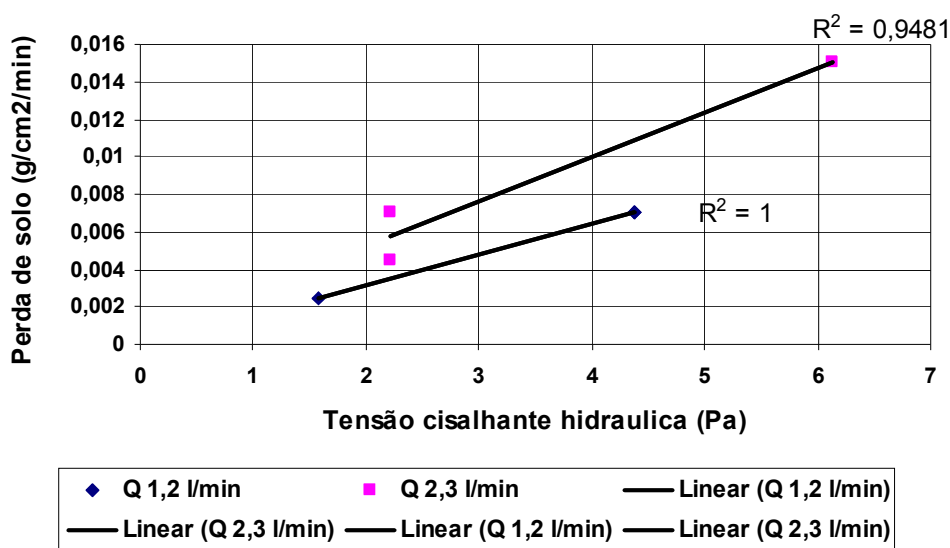


Figura 5.85 – Tensão cisalhante hidráulica – Resultados dos ensaios Inderbitzen

Analisando os resultados e considerando NORI, et al (2005), que indica que a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que haja desprendimento de suas partículas é o valor da tensão cisalhante crítica, o que pode indicar então, que para que o solo em estudo sofra desprendimento de partículas ele precisa ser submetido a esforços que superem a tensão de 0,90 Pa que é a tensão cisalhante crítica.

Quanto a sua resistência à erosão observa-se que os valores de K são baixos. Citado por BASTOS (1999), MENDEZ (2006) assinala que solos mais erodíveis são aqueles que apresentam valores de K superiores a 0,1 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$). Os valores de K obtidos na tabela 5.29 são muito menores a 0,1 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$). Por tanto o solo do ponto P2 oferecerá resistência aos processos erosivos.

5.3 Cálculo da disponibilidade hídrica na área de drenagem na Sub-Bacia incremental

As chuvas fortes e as enchentes são os agentes causadores da erosão e transporte de partículas sólidas que, ao longo do tempo, modificam as características dos fluidos. O processo de erosão em cursos de água tem três fases: a primeira fase inicia-se com o desprendimento das partículas sólidas presentes na superfície, posteriormente as partículas soltas são transportadas e por último elas são depositadas nos cursos de água produzindo assoreamento. Razão pela qual neste item estimaremos a disponibilidade hídrica da área de drenagem da sub-bacia incremental onde fica o TVR-CBI (Figura 5.86). Este dado também será utilizado na estimativa do fator de escoamento R_w da equação de perda de solo modelo matemático MUSLE.

Para o cálculo da disponibilidade Hídrica e, considerando que a área de drenagem é maior que 2 km^2 , o coeficiente de runoff não será utilizado, já que este coeficiente se utiliza principalmente em bacias urbanas. O valor da disponibilidade hídrica da área de drenagem da Sub-bacia incremental foi estimado através da vazão ao longo tempo obtido do PCA do Consorcio Capim Branco Energético (2002).

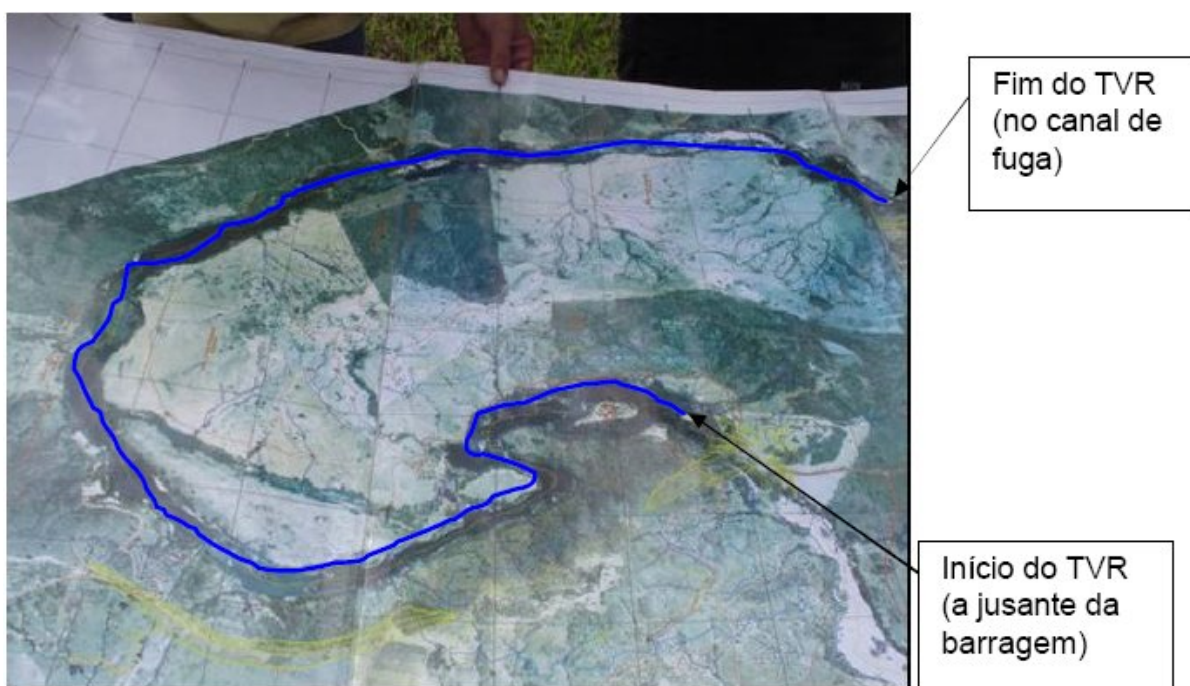


Figura 5.86 – Área de drenagem PAULO (2007)

$Q_{mlt} = 359 \text{ m}^3/\text{s}$ este dado representa a vazão média de longo termo de Capim Branco I dado fornecido pelo PCA do Consorcio Capim branco Energético (2002).

Com o Q_{mlt} , foi calculado a vazão média de longo termo específica, cuja formula é:

$$\boxed{q_{mlt, \text{especifica}} = \frac{Q_{mlt}}{A}} \quad (5.31)$$

Onde:

$$Q_{mlt} = 359 \text{ m}^3/\text{s}$$

A: área de drenagem da cabeceira da bacia até o eixo do Capim Branco I (este dado foi obtido do EIA, 1996). Sendo $A = 18.300 \text{ Km}^2$

Deste modo, substituindo na equação da vazão média de longo termo específica, obtemos:

$$q_{mlt} = 0,0196 \text{ m}^3/\text{s.km}^2 = 19,6 \text{ l/ s.km}^2$$

Este valor significa que em 1 km^2 da área de drenagem existe uma disponibilidade hídrica de $19,6 \text{ L/s}$

Para o cálculo da disponibilidade hídrica na área de drenagem da sub-bacia incremental que inicia no eixo de Capim Branco I, é necessário multiplicar o valor da vazão média de longo termo pela área da sub-bacia incremental, o valor da área da sub-bacia incremental segundo PAULO (2007), é de $75,9 \text{ km}^2$. Estimando-se que a área de influência dos pontos P2 e P3 sejam de 8% da área da sub-bacia incremental, esta área foi estimada através de planos topográficos fornecidos pelo Consorcio Capim Branco Energético (2002) tem que:

$$q_{mlt} = 19,6 \text{ l/ s.km}^2 \times 6,072 \text{ km}^2$$

$$q_{mlt} = 119,621 \text{ l/ s}$$

A disponibilidade hídrica da área de drenagem da sub-bacia incremental, será de $119,6 \text{ l/ s}$. Esta disponibilidade hídrica permitira transportar os sedimentos da superfície até o curso de água.

5.4 Avaliação da erodibilidade pelos Modelos Matemáticos EUPS e MUSLE

5.4.1 Perda de solo através do modelo matemático EUPS (Equação Universal de perda de solos)

A perda de solos pela EUPS foi determinada através da equação matemática proposta por WISCHMEIER e SMITH (1965, 1978) e está indicada abaixo Equação (2.9):

$$E = R.K.LS.C.P \quad (2.9)$$

A seguir são calculados os fatores que compõe a EUPS:

- **Fator R** (Fator erosividade da chuva)

Devido à falta de dados de intensidade pluviométrica optou-se por utilizar o proposto por SILVA, A.M. (2004) apud MIRANDA (2005), que colheu dados de vários anos em várias estações meteorológicas. O gráfico da estação de Uberaba de 2006 não foi utilizado aqui porque se trata de informações de apenas um ano. O autor investigou a distribuição espacial de erosividade anual das chuvas no Brasil utilizando uma equação adaptada para aplicar os registros pluviométricos de 1.600 estações meteorológicas. A interpolação desses dados possibilitou a geração de um mapa com a variação espacial de erosividade do Brasil (Figura 5.87), com a utilização da equação modificada de FOURNIER (1960) como apresentado abaixo:

$$C_c = M^2/P \quad (5.27)$$

Onde:

C_c: índice de Fournier que expressa a média mensal do índice de erosão;

M: valor mensal de precipitação (mm) durante um mês x;

P: valor anual de precipitação (mm).

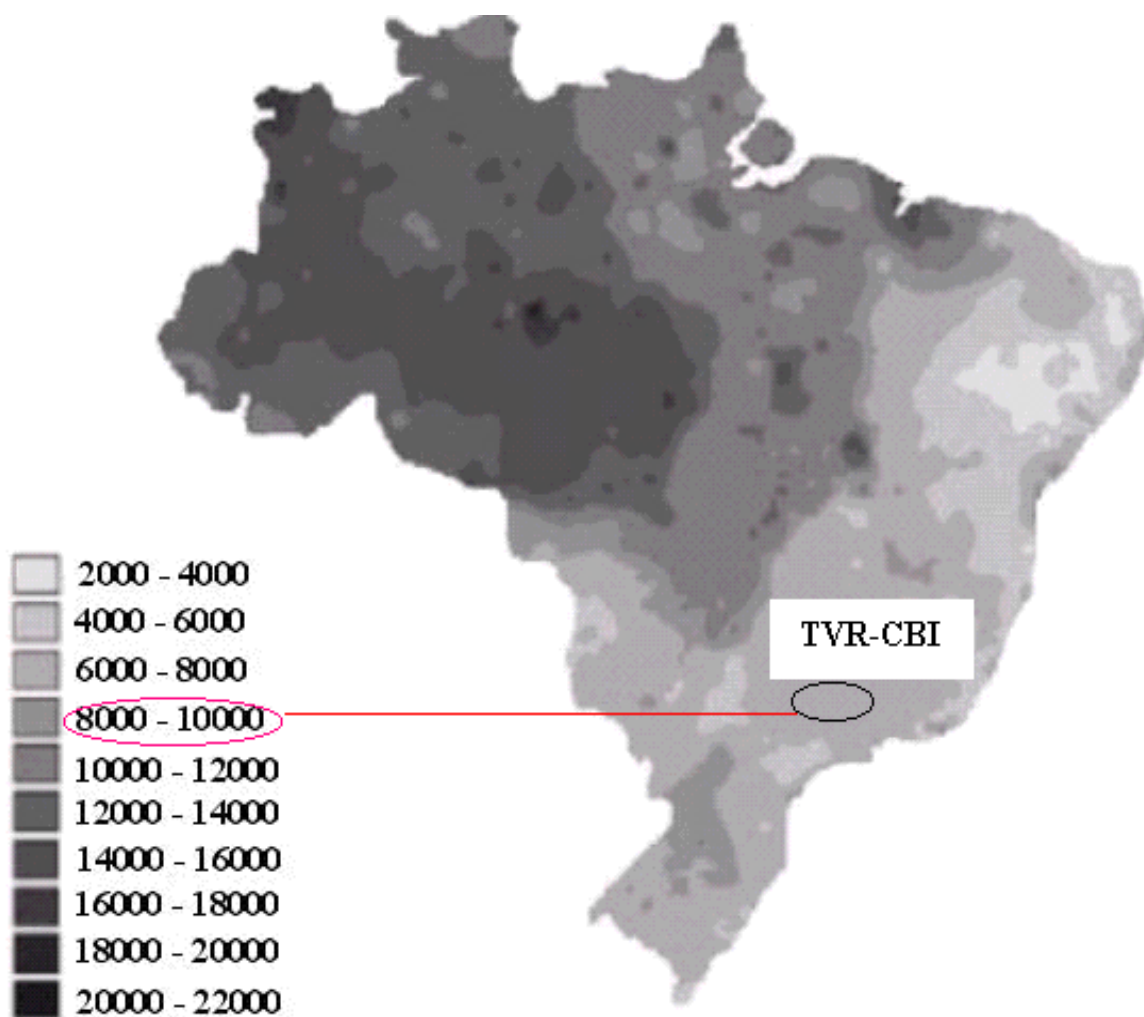


Figura 5.87 – Mapa de erosividade anual (MJ.mm/ha.h.ano) de acordo com SILVA (2004)

- **Fator K**

O nomograma proposto por WISCHMEIER & SMITH (1978) para o cálculo da erodibilidade do solo inclui cinco parâmetros: % de argila, % de areia grossa, % de matéria orgânica (OM), estrutura (s) e permeabilidade (p). Cada parâmetro foi classificado por classes, de acordo com as tabelas abaixo.

Tabelas 5.42 – Componentes do solo (WISCHMEIER & SMITH, 1978)

CLASSES	(mm)
argila	0 – 0,002
silte	0,10 – 0,002
areia muito fina	0,05 – 0,10
areia	0,10 – 2,0

Tabela 5.43 – Classes de permeabilidade (WISCHMEIER & SMITH, 1978)

CLASSES	DESCRIÇÃO
1	Rápida
2	moderada a rápida
3	Moderada
4	lenta a moderada
5	Lenta
6	muito lenta

Tabela 5.44 – Classes de estrutura (WISCHMEIER & SMITH, 1978)

CLASSES	DESCRIÇÃO
1	granular muito fina (< 1 mm)
2	granular fina (1 – 2 mm)
3	granular grosseira (> 2 mm)
4	em bloco, massas ou placas

Para a obtenção do parâmetro K com maior aproximação (erodibilidade do solo) pode ser utilizada a equação abaixo, já apresentada, de WISCHMEIER & SMITH (1978). O valor de K é expresso em t.ha.h/ha.MJ.mm.

$$K = \frac{2,1M^{1,14}10^{-4}(12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)}{100} \quad (2.11)$$

Onde:

k: erodibilidade do solo (t.ha.h/MJ.mm.ha)

a: matéria orgânica, determinada pela mufla a 250°C

b: classe de estrutura do solo; (Este valor se obteve tendo em consideração si sua estrutura es granular muito fina o fina)

c: classe de permeabilidade do solo, o valor será dada tendo em consideração que seja esta rápida, moderada, lenta.

M: parâmetro que define o tamanho das partículas

M = (% silte + % areia muito fina) x (100 - % argila)

O k apresentado por WISCHMEIER & SMITH (1978) e a taxa de erosão estimada no ensaio de Inderbitzen representam uma quantidade de perda de solo de uma determinada área em determinado tempo.

Os valores encontrados para cada parâmetro da equação de WISCHMEIER & SMITH (1978) estão apresentados na Tabela 5.45.

Tabela 5.45 – Parâmetros utilizados na equação de WISCHMEIER & SMITH (1978)

Pontos	Parâmetros para a estimativa do fator K				Valores de K (tha.h/MJ.mm.ha)
	(a)	(b)	(c)	(M)	
P2	3	1	2	4350	0,027
P3	2	1	1	2726	0,015

O parâmetro (a) foi calculado pelo método “*Loss of Ignition*”, o parâmetro (b) foi adotado igual a um com base nos ensaios granulométricos, que mostram que os grãos são inferiores a 1mm, o valor do parâmetro (c) foi dado pelo fato de que a permeabilidade medida não é moderadamente rápida para o (P2) e rápida (P3), o parâmetro (M) foi calculado pela soma da porcentagem dos materiais granulares e finos presentes no solo.

Também o fator (K) foi estimado através dos ábacos do monograma de WISCHMEIER & SMITH (1978) o resultado deu uma pequena diferença pela razão de que na estimativa do fator K no ábaco utilizamos faixas que não são valores pontuais a Figura 5.88 ilustra o ábaco e a Tabela 5.46 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.46 – Comparação dos resultados do fator K através da equação e o nomograma de WISCHMEIER & SMITH (1978)

Pontos	Fator (K) estimado através da equação	Fator (K) estimado através do Nomograma de WISCHMEIER & SMITH (1978)
P2	0,027	0,03
P3	0,015	0,017

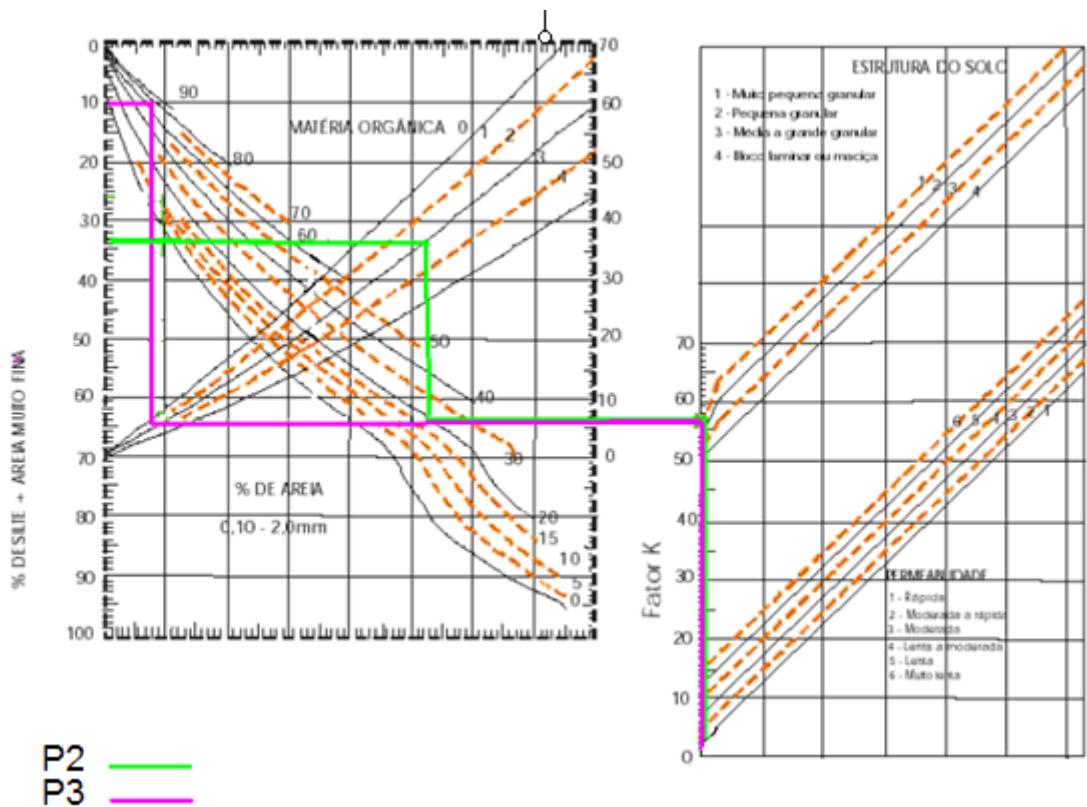


Figura 5.88 – Resultados do fator K através do monograma proposto por WISCHMEIR & SMITH (1978) para o ponto P2 e P3

Os valores do fator K estimado dos pontos do trecho (P2 e P3) foi comparado com outros valores obtidos na literatura para cambissolos. Segundo BLOISE (2001), BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), MACEDO (2000) e SILVA (1997), os valores do fator (K) para cambissolos variam na faixa de 0,015 a 0,030 t.ha.h/Mj.mm.ha, portanto comparando os valores obtidos eles ficam dentro desta faixa.

- **Fator LS**

O fator LS foi calculado utilizando a fórmula de PRADO et al. (2005):

$$LS = 0,00984.L^{0,63}S^{1,18} \quad (2.14)$$

Onde:

LS: fator topográfico;

L: comprimento de rampa em (m)

S: declividade (%).

A Tabela 5.47 apresenta os valores adotados para as variáveis L e S da fórmula acima, assim como o fator LS encontrado.

Tabela 5.47 – Variáveis e fator LS para cada ponto do trecho

PONTO	L (m)	S (%)	LS
P2	20,00	12,57	1,30
P3	8,97	14,31	0,89

O valor do comprimento é calculado em função da variação de nível, no caso do ponto P2 a variação de nível foi de 4m e no ponto P3 foi de 2m, o fator S é o ângulo de declividade da voçoroca expressado em porcentagem.

- **Fator C**

O fator C foi obtido de SILVA (2004), de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 5.48 – Valores do fator C de acordo com SILVA, V.C. (2004)

Classe de uso e ocupação do solo	Fator C
Água	0,000
Área urbana	0,001
Vegetação de Várzea	0,001
Mata	0,012
Reflorestamento	0,012
Pastagem	0,025
Cerrado	0,042
Campo	0,042
Agricultura de sequeiro	0,180
Agricultura irrigada	0,180
Mineração	1,000

Foi utilizado o mesmo valor do fator C para os pontos P2 e P3 do TVR-CBI, equivalente a 0,025 cujo uso e ocupação do solo correspondem às pastagens.

- **Fator P**

O fator P foi determinado de acordo com as práticas conservacionistas da área em estudo para isso, utilizamos a tabela de BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), que está apresentada abaixo:

Tabela 5.49 – Valores do fator P de acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (1999)

Práticas conservacionistas	Valor de P
Plantio morro abaixo	1,0
Rotacionado	0,75
Plantio em contorno	0,5
Altemância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Foi utilizado o mesmo valor do fator P para os pontos P2 e P3 do TVR-CBI, equivalente a 0,2 cuja prática conservacionista corresponde aos cordões de vegetação permanente, pois é a que mais se aproxima das observações feitas em campo nos pontos onde as amostras foram coletadas. Retomando a equação da EUPS, com todos os seis parâmetros calculados foram obtidos os resultados que estão apresentados na Tabela 5.50.

$$E = R.K.LS.C.P \quad (2.11)$$

Tabela 5.50 – Resultados do Modelo Matemático EUPS

PONTO	R (MJ.mm/ha.h.ano)	K (t.ha.h/MJ.mm.ha)	LS	C	P	E (t/ha.ano)
P2	10000	0,027	1,30	0,025	0,2	1,756
P3	10000	0,015	0,89	0,025	0,2	0,668

Os resultados obtidos da equação representam a quantidade de perda de solo por ano dos pontos P2 e P3, considerando a classificação de erodibilidade relativa feita por SALAMON (1992) onde, para solos classificados pela pedologia como cambissolos, a erodibilidade está na faixa de 10,0 a 8,1 t/ha.ano e são considerados como extremadamente susceptíveis a erosão. Os valores estimados do ponto P2 e P3 comparados com estes valores seriam considerados baixos.

5.4.2 Cálculo da perda de solo através do Modelo Matemático MUSLE (Equação de Perda de solos Modificada)

Este modelo matemático mudou o fator de erosividade da chuva (R) da Equação Universal de perda de solo (EUPS) pelo fator do escoamento superficial, os outros parâmetros continuam sendo os mesmos. A equação matemática é apresentada abaixo:

$$Y = R_w.K.LS.C.P \quad (5.28)$$

Onde:

Y: Produção de sedimentos t/ha.ano;

R_w: Fator de escoamento (MJmm/há.h.ano);

K: Fator de erodibilidade do solo (t,ha.h/(MJ. mm.ha));

LS: Fator conjunto de comprimento e grau do declive;

C: Fator de uso e manejo do solo;

P: Fator de prática conservacionista.

O fator R_w avalia a erosividade do escoamento superficial e é determinado através da seguinte relação:

$$R_w = 89,6(QS.qp)^{0,56} \quad (5.29)$$

Onde:

QS: Volume escoamento superficialmente, em m³;

qp: Vazão de pico do escoamento superficial, em m³/s

O fator R_w, é dependente da vazão de pico e do volume escoado, para o cálculo da vazão de pico utilizamos a equação proposta pela metodologia SCS: o dado da precipitação efetiva foi estimado através das precipitações média anual proposta por SILVA (2004).

$$qp = \frac{0,208(Ape)}{ta} \quad (5.30)$$

Onde:

qp : Vazão de pico unitária, em m³/s;

A: Área da micro bacia, em estudo em km² ;

ta : Tempo de ascensão, em horas

pe : Precipitação efectiva.

O volume de escoamento superficial foi calculado através da disponibilidade hídrica da área de influência dos pontos de coleta estimadas no item 5.3. O coeficiente de escoamento de cada ponto de coleta foi:

R_w (P2): 4640,68 MJmm/h.ha.ano

R_w (P3) : 4640,68 MJmm/h.ha.ano

Os outros parâmetros da equação do MUSLE são os mesmos da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) por tanto a Tabela 5.51 ilustra os resultados da perda de solo obtido através deste modelo matemático MUSLE.

Tabela 5.51 – Fatores do MUSLE e cálculo da perda de solos

PONTO	Rw (MJ.mm/ha.h.ano)	K (t.ha.h/MJ.mm.ha)	LS	C	P	E (t/ha.ano)
P2	4640,68	0,027	1,30	0,025	0,2	0,814
P3	4640,68	0,015	0,89	0,025	0,2	0,310

Os valores obtidos pela equação da MUSLE continuam sendo baixos com respeito à classificação de SALAMON (1992). Uma vez que $R_w < R$. Para poder concluir de forma mais clara sobre a influência do parâmetro R_w e do parâmetro R sobre a perda de solo precisamos trabalhar com dados reais já que, infelizmente, neste trabalho, para a estimativa destes parâmetros utilizamos valores da literatura, portanto recomendaremos que para trabalhos futuros seja utilizado valores reais dos parâmetros R_w e R para poder avaliar com precisão a real influência no resultado final de perda de solo.

5.5 Transporte de sedimentos no curso de água (rio Araguari)

Para a estimativa do assoreamento foi necessário estimar a descarga líquida em as secções bati métricas da calha do rio próximas aos pontos de coleta. Esta estimativa foi feita através da equação 5.25, os dados de área , declividade das secções foram fornecidos por PAULO (2007). Para este cálculo, assumimos a hipótese de regime uniforme de escoamento, os resultados da descarga líquida estão ilustrados na (Tabela 5.52).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} I^{1/2} \quad (5.25)$$

Onde:

Q = Vazão (m³/s);

n = Coeficiente de rugosidade de Manning;

A = Área transversal do escoamento (m²);

R_h = Raio hidráulico (m);

D = Declividade.

Tabela 5.52 – Secções- bati métricas : PAULO (2007)

Seção	Área (m ²)	Declividade (m/m)	Q (m ³ /s)
28	152,77	0,000041	0,3862
29	80,13	0,000230	0,9095
30	282,34	0,000013	0,2147
31	136,31	0,000074	0,5152
32	74,12	0,000299	1,0384
34	64,51	0,000648	1,5301
36	45,28	0,002355	2,9028
37	111,82	0,000336	1,1029

Conhecida a descarga líquida do solo prosseguiu-se com o cálculo da descarga sólida em suspensão para cada um dos das seções bati métricas e para isso utilizaremos a equação 5.32 extraída de MARTÍNEZ (2005). Os resultados da descarga sólida estão ilustrados na Tabela 5.53:

$$Q_{sstd} = 0,0864.C.Ql \quad (5.32)$$

Onde:

C = concentração média diária (mg/l) 194mg/l foi adotada de (LEME et al 2004) é um dado real.

Ql = Descarga líquida diária(m³/s)

Qsstd = Descarga sólida em suspensão total diária (t/dia)

Tabela 5.53 – Resultados da descarga sólida (PAULO2007)

Secções- bati metricas	Concentração média diária (mg/l)	Descarga Liquida (m3/s)	Descarga sólida (t/dia)
28	194	0,3862	0,559
29	194	0,9095	1,317
30	194	0,2147	0,311
31	194	0,5152	0,746
32	194	1,0384	1,503
34	194	1,5301	2,216
36	194	2,9028	4,204
37	194	1,1019	1,597

Com o dado da descarga sólida da secção bati métrica 30 , pode estimar-se a perda de solo real da área de influência dos pontos P2 e P3 esta área estimou-se que é 8% da área da sub-bacia incremental (75,9 Km²), resultado que será comparada com as perdas de solo estimadas através dos modelos matemáticos Tabela 5.54. Então temos a seguinte equação:

$$\boxed{Perda = \frac{Q_s}{A}} \quad (5.33)$$

Onde:

Qs = Descarga sólida (t/di)

A = Área de influência dos pontos P2 e P3 6,072 Km²)

Perda = 0,1869 t/ha. Calculado em base na concentração média diária.

Tabela 5.54 – Comparação de resultados de perda de solo

Perda de solo estimada atraves da EUPS (t/ha.ano)	Perda de solo estimada atraves da MUSLE (t/ha.ano)	Perda de solo estimada através da concentração media diaria (t/ha.ano)
2,424	1,124	0,1869

Da Tabela 5.55 observa-se que a perda de solo estimada através da concentração média diária é 13 vezes menor que a perda de solo estimada através da EUPS e 6 vezes menor que a perda estimada através da MUSLE. Acredita-se que se deva pelo fato que na estimativa da perda de solo através dos modelos matemáticos ante a dificuldade para obter dados de intensidade pluviométrica da área em estudo, utilizamos na estimativa dos parâmetros R e R_w valores propostos na literatura e não reais.

Obtida a descarga sólida, foi calculado o volume de sedimento por ano para cada seção da calha do rio. Para isto será necessário dividir a descarga de sólidos diários pelo peso específico das partículas que, para o ponto P2 foi estimado de $2,62 \text{ tn/m}^3$ e no ponto P3 foi estimado de $2,66 \text{ tn/m}^3$ indicando que as seções 28, 29, 30, 31 e 32 são influenciadas pelo ponto P2 e as seções 34, 36, 37 pelo ponto P3. Os resultados finais se apresentam na Tabela 5.55.

Tabela 5.55 – Resultado do volume de sedimento anual

Secções bati métricas	Volume m^3/ano
28	77,87
29	183,47
30	43,33
31	103,93
32	209,39
34	304,08
36	576,86
37	219,14

Estima-se uma produção de sedimentos na faixa de variação de $77,87$ a $576,6 \text{ m}^3$ por ano. O sedimento estimado encontrou-se em movimento, ao longo da calha do rio. Para estimar a quantidade de sedimento que se fixará no fundo da calha do rio, precisamos conhecer a velocidade de sedimentação. Para a análise escolhe-se a secção bati métrica 30 (Figura 5.89) por considerar que esta secção esta próxima ao ponto P2, considerado como ponto crítico pelo fato que na estimativa de perda de solo o ponto P2 apresenta maior quantidade de perda de solo que no ponto P3.

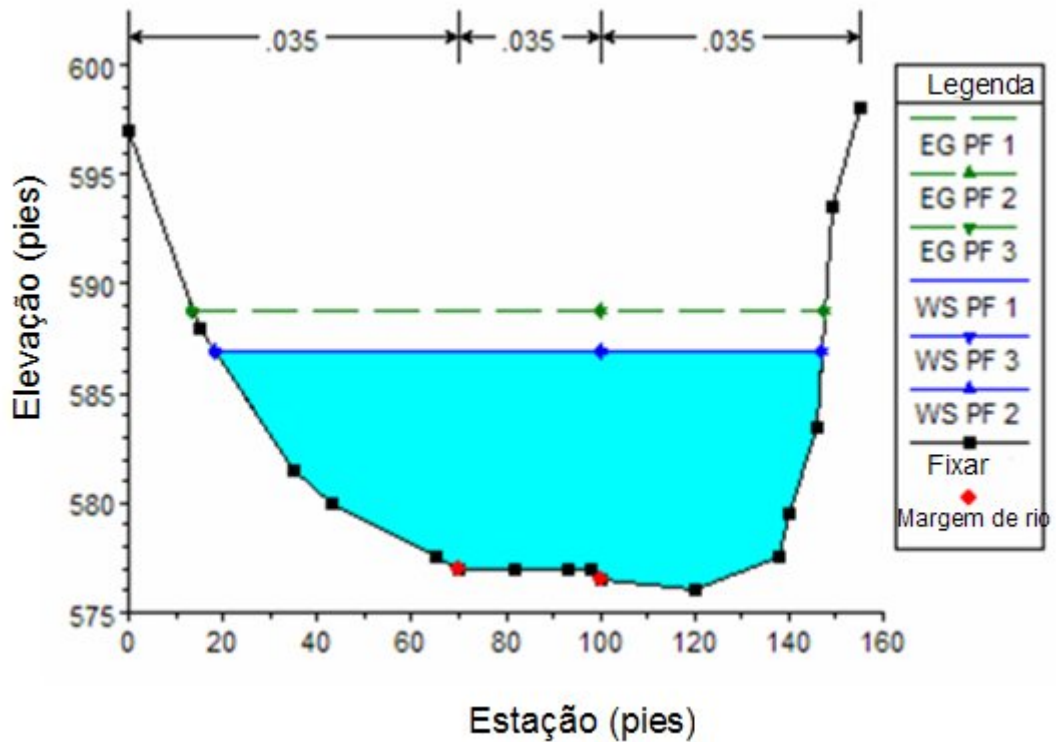


Figura 5.89 – Seção 30 HEC-RAS

A velocidade de sedimento será calculada através da fórmula de RUBEY fórmula extraída de MARÍN (2005):

$$W = F * \sqrt{D_s \left(\frac{\sigma_s - \sigma}{\sigma} \right)} \quad (5.35)$$

Onde:

D_s = Diâmetro nominal

σ_s = Peso específico das partículas

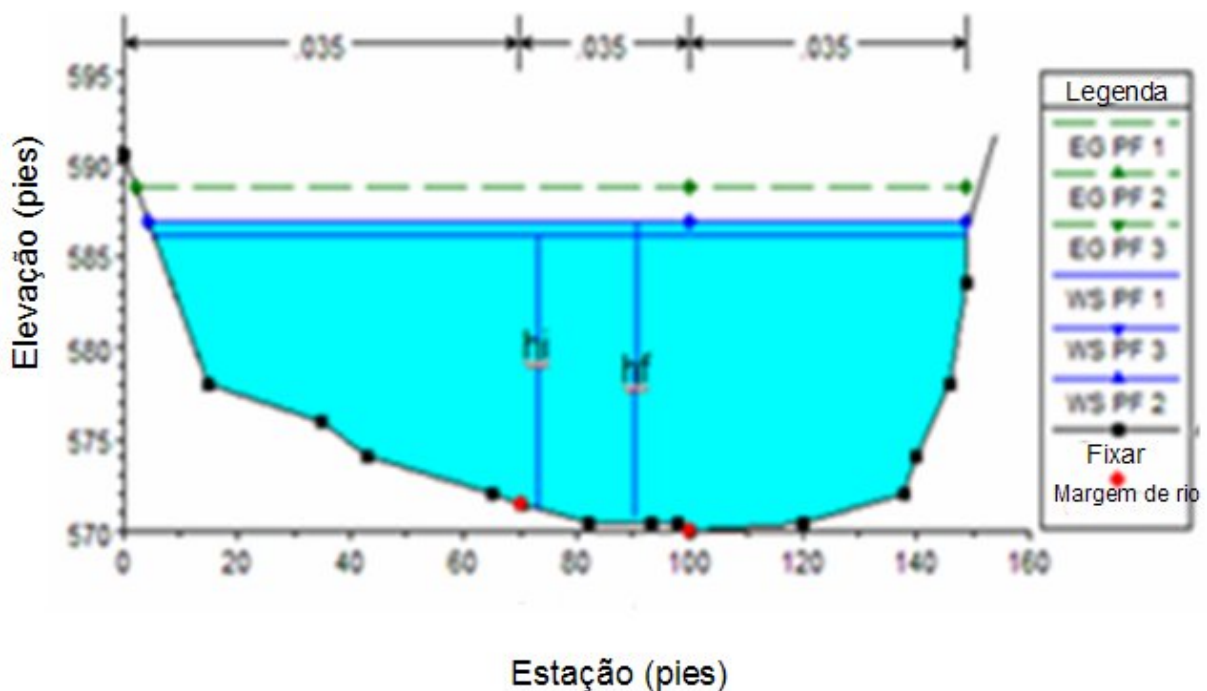
σ = Peso específico da água

A temperatura da água foi assumida como 23°C. Segundo a literatura consultada MARÍN (2005) o coeficiente F é igual a 0.79 para temperatura maiores que 10 °C e menores que 25 °C além de depender do tamanho do diâmetro nominal que deve ser maior a 1mm. Pela granulometria temos predomínio de areias, portanto, o diâmetro nominal estará variando entre 0.075mm a 4,8mm o que indicaria que o F será igual a 0.79. A velocidade de sedimentação é

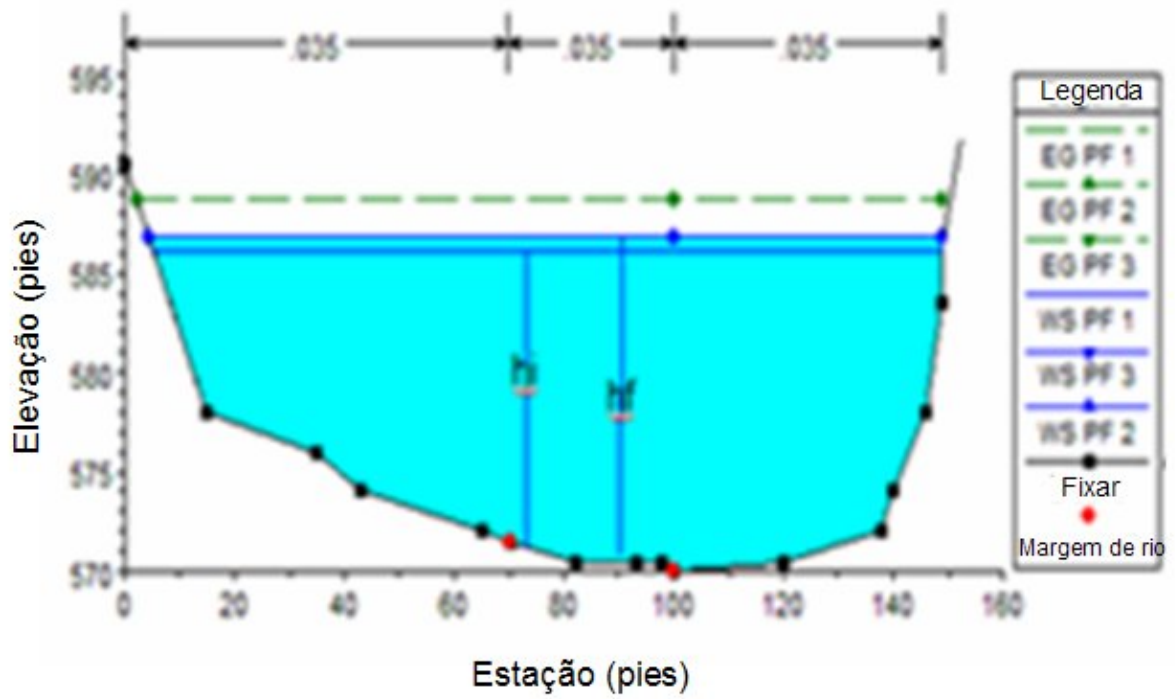
de 14,2 cm/s e a velocidade da água do rio 0,076 cm/s. Como pode observar-se esta última é menor que a velocidade de sedimentação, resultado que indicaria que uma parte do material em suspensão se fixara na calha do rio.

O seguinte passo na determinação do sedimento fixado no fundo da calha é a estimativa da área de sedimentação. Para o cálculo, foi utilizado como dado a descarga sólida em suspensão e a velocidade de sedimentação, obtendo uma área de 0,074 m².

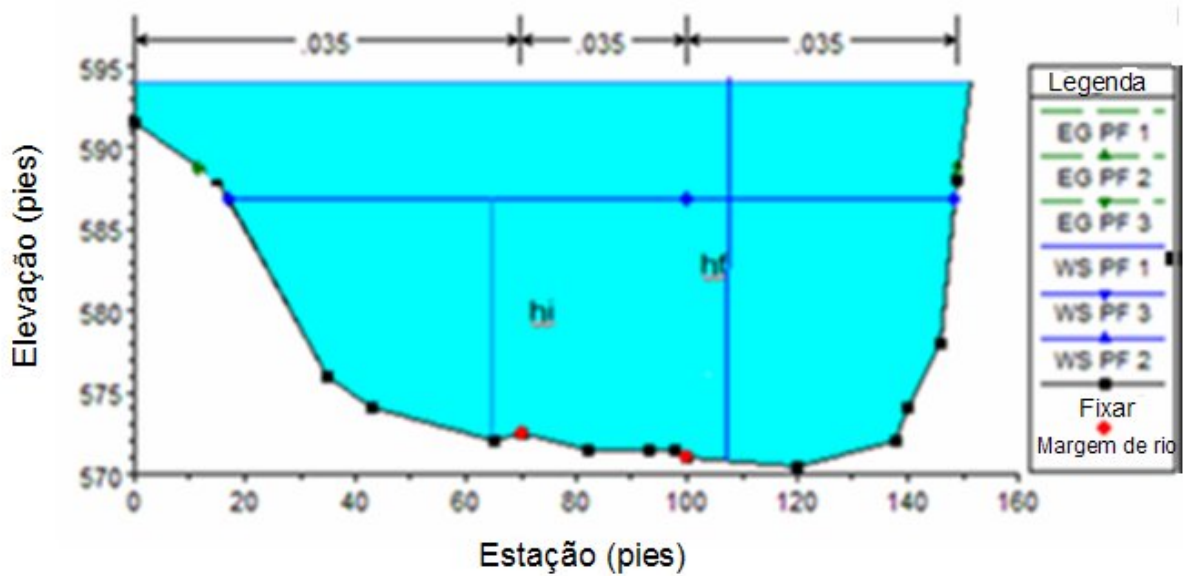
Para a secção bati métrica 30 estimou-se que ocorreria um assoreamento de 0,5cm por ano. A diferença de nível entre o espelho de água e o terreno é de 7m, portanto estima-se que no futuro aproximadamente em 1400 anos as águas inundassem as margens do trecho ficando o solo na sua pior condição saturado onde ele não oferece resistência alguma a processos erosivos, isto pode acontecer se as condições climáticas hidráulicas e de uso do solo não sofreram mudanças. A figura 5.90 ilustra as simulações de transporte de sedimentos feitos com ajuda do HEC-RAS para um ano (a), dois anos (b) e quatorze anos (c). A quantidade de material que fixara no fundo da calha não representa perigo significativo a problema de erosão.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.90 – Simulação do assoreamento para um ano, dois anos e quatorze anos.

5.6 Índice de Vulnerabilidade à Erosão

Foi criado um índice de vulnerabilidade (IVE) que tentasse refletir e quantificar a problemática da erosão no ponto mais crítico do TVR-CBI que é o P2, para isso se adotou a metodologia proposta por VIANA (2000). Esta metodologia foi escolhida pelo fato de que os indicadores que compõem o IVE de VIANA (2000) são dados de fácil disposição e, além disso, as pontuações são dadas para cada classe dos indicadores e baseiam-se o quanto possível em critérios quantitativos. Os indicadores são:

- Geologia: As notas dadas para a pontuação do fator geologia basearam-se nos resultados do ensaio Inderbitzen que foram comparados com os resultados obtidos por VIANA (2000), esta comparação foi feita pelo fato de que VIANA (2000) também trabalhou com solos originados de deposição coluvionar como é o caso do solo do ponto P2 e P3 ;
- Declividade: foi adotado o critério de pontuação propostas por VIANA (2000). Os dados de declividade foram obtidos através dos mapas topográficos fornecidos pelo Consórcio Capim Branco Energético;
- Fator exposição do terreno: Para este fator foram adotados os mesmos critérios de pontuação propostos por VIANA (2000). Fundamentam-se no reflexo das intervenções antrópicas que são capazes de expor o solo à ação dos agentes erosivos;
- Padrão de ocupação: foram adotados os mesmos padrões de ocupação propostos por VIANA (2000). Isto pelo fato de que os pontos de avaliação deste padrão refletem a forma de ocupação da área de estudo.

Deste modo foram distribuídas pontuações de 0 a 1 para cada fator, conforme as Tabelas a seguir:

Tabela 5.56 – Unidade de análise para o fator declividade (VIANA, 2000)

FATOR DECLIVIDADE	PONTUAÇÃO PREVISTA
Alta declividade	1
Áreas com realização de cortes	0,8
Média a alta declividade	0,7
Média declividade	0,5
Baixa a média declividade	0,3
Baixa declividade	0,2
Áreas planas	0

Tabela 5.57 – Unidade de análise para o fator exposição do terreno (VIANA, 2000)

FATOR EXPOSIÇÃO DO TERRENO	PONTUAÇÃO PREVISTA
Remoção do colúvio e/ou do solo residual	1
Presença de aterro	0,9
Terraplanagem	0,7
Corte	0,6
Desmatamento	0,5
Remoção parcial da vegetação	0,3
Presença de vegetação rasteira	0,2
Sem intervenção no terreno	0,1
Impermeabilização	0

Tabela 5.58 – Unidade de análise para o fator padrão de ocupação

UNIDADE USO DO SOLO	PONTUAÇÃO PREVISTA
Favela	1
Baixo	0,9
Médio não consolidado	0,7
Alto não consolidado	0,6
Não urbanizado	0,3
Área especial	0,2
Consolidado	0

No fator geológico foi atribuída a menor pontuação prevista por VIANA (2000), que é referente a 0,3 devido à baixa taxa de erosão encontrada nos ensaios do tipo Inderbitzen em comparação com os resultados encontrados por VIANA (2000). Outros fatores que foram levados em consideração foram às condições de ensaio utilizadas no estudo. A autora utilizou o método proposto por SANTOS (1997), que consiste em se estabelecer um fluxo de vazão

1,5 l/min e declividade de 10°. As condições adotadas neste trabalho para a criação do IVE foram as mais críticas, sendo que a vazão utilizada foi de 2,3 l/min e declividade de 25°. Para o ponto P1 TVR-CBI a análise dos fatores está apresentada na Tabela 5.59.

Tabela 5.59 – Análise de fatores e suas respectivas pontuações para cada voçoroca

PONTO	FATOR GEOLÓGICO	FATOR DECLIVIDADE	FATOR EXPOSIÇÃO DO TERRENO	FATOR USO DO SOLO
P2	0,3	Baixa a média declividade (0,3)	Desmatamento (0,5)	Não urbanizado (0,3)

A equação geral proposta para o cálculo do IVE foi à mesma adotada por VIANA (2000):

$$IVE = FG(FD + FEx + FUS)/3 \quad (5.34)$$

Onde:

IVE: índice de vulnerabilidade à erosão;

FG: fator geológico;

FD: fator declividade;

FEx: fator exposição do terreno;

FUS: fator uso do solo.

O IVE encontrado para o ponto P2 do TVR-CBI foi de 0,11, que é um valor baixo, o qual indica baixa susceptibilidade à erosão. Variando as condições de exposição do terreno e, considerando uma situação em que não há intervenção, conforme Tabela 5.60, o novo IVE encontrado foi de 0,07. Considerando a situação mais crítica com relação à exposição do terreno, que é a remoção do colúvio e/ou do solo cambisolo conforme Tabela 5.61, o novo IVE encontrado foi de 0,16. Comparando os 3 IVE com os IVE apresentados por VIANA (2000), pode-se observar que são índices baixos, o mais recomendável para poder comparar seria com valores IVE estimados na área em estudo, infelizmente não temos conhecimento de algum trabalho. Portanto, continuando com a análise podemos indicar que os índices não são preocupantes, mesmo se for analisada a situação mais crítica de exposição do terreno.

Tabela 5.60 – Análise de fatores e suas respectivas pontuações para cada voçoroca

PONTO	FATOR GEOLÓGICO	FATOR DECLIVIDADE	FATOR EXPOSIÇÃO DO TERRENO	FATOR USO DO SOLO
P2	0,3	Baixa a média declividade (0,3)	Sem intervenção no terreno (0,1)	Não urbanizado (0,3)

Tabela 5.61 – Análise de fatores e suas respectivas pontuações para cada voçoroca

PONTO	FATOR GEOLÓGICO	FATOR DECLIVIDADE	FATOR EXPOSIÇÃO DO TERRENO	FATOR USO DO SOLO
P2	0,3	Baixa a média declividade (0,3)	Remoção do colúvio e/ou do solo residual (1)	Não urbanizado (0,3)

6 CONCLUSÕES

O ensaio de granulometria mostra que o solo do ponto P2 é uma areia fina com 33% de finos e o P3 é uma areia média a fina com 20% de finos. Apesar de serem areias, estes finos podem ser suficientes para criar uma coesão aparente de modo a reduzir a erodibilidade. No entanto os ensaios de consistência mostram que os finos são pouco plásticos e não são estruturados, o que aumenta a susceptibilidade à erosão, fato este verificado pelos ensaios da metodologia MCT. Quanto maior a saturação inicial maior a susceptibilidade. Parece sempre permanecer uma grande quantidade de ar, mesmo depois da entrada de água.

As areias pela literatura são suscetíveis à erosão, mas ao executar os ensaios de avaliação da erodibilidade em forma direta mostram baixa erodibilidade este fato deve estar associado a presença dos argilominerais, porcentagens de finos e as raízes e à forma de execução do ensaio Inderbitzen. Salientando que neste trabalho o ensaio Inderbitzen somente simula o efeito do escoamento laminar não se analisou o efeito do impacto das gotas da chuva no solo.

Os ensaios de desagregação, apesar de sua simplicidade, revelaram resultados coerentes com aqueles obtidos nos ensaios do tipo Inderbitzen e uma boa correlação com as observações de campo. Estes resultados aliados às observações em campo demonstram que o processo erosivo que se iniciou no ponto (P2) TVR-CBI pode ter sido pela ação antrópica e/ou pelo pisoteio do gado, ou ainda devido aos efeitos de impactos de gotas de chuva ou de solapamento provocado pelo curso da água.

O fator K da equação universal de perdas de solo obtido para os dois pontos do trecho (P2 e P3) foi comparado com outros valores obtidos na literatura para cambissolos. Os valores encontrados, da ordem de 0,015 a 0,030 t.ha.h/Mj.mm.ha, são coerentes com os valores encontrados em trabalhos prévios, tais como os de BLOISE (2001), BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), MACEDO (2000) e SILVA (1997). Além disto, o cálculo da perda de solo pela EUPS e MUSLE não forneceu valores altos, sendo o ponto P2 do TVR-CBI o mais susceptível a fornecer algum tipo de risco.

Na comparação da estimativa de perda de solo calculada com base na concentração média diária da sub-bacia incremental com os resultados obtidos através dos modelos matemáticos EUPS e MUSLE, verificou-se que existe uma diferença considerável já que a perda de solo estimada através da EUPS foi 13 vezes maior e o resultado da MUSLE foi de 6 vezes.

Acredita-se que o fato se deva por que na estimativa da perda de solo, através dos modelos matemáticos e ante a dificuldade para obter dados de intensidade pluviométrica da área em estudo, utilizamos na estimativa dos parâmetros R e R_w valores propostos na literatura e não valores reais.

A técnica de porosimetria de mercúrio mostrou-se bastante adequada para a avaliação do tamanho, volume e distribuição dos poros, apresentando resultados coerentes tanto com a avaliação dos índices físicos e a comparação quanto com as observações provenientes da microscopia óptica. O resultado de porosidade obtida através do ensaio de adensamento é de 44,4% valor próximo do obtido pela porosimetria que foi de 46%

Através de observações feitas em campo, realmente foi possível constatar que a situação erosiva na área está associada principalmente à atividade antrópica. As áreas de ocorrência ativa são marcadas pelo desmatamento e uso intensivo da região por pastagens. A compactação do solo devido ao pisoteio do gado pode reduzir o espaço poroso entre partículas, levando o solo a perder a sua capacidade de absorção. O comprometimento da estrutura do solo causada pela compactação restringe o crescimento das raízes, a capacidade de armazenamento de água, a fertilidade, a atividade biológica e a estabilidade. Além disso, na época de chuvas as águas já não conseguem infiltrar-se facilmente no solo, resultando em um aumento dos riscos de erosão.

Foi também mostrada nesta dissertação que muitos autores, como SALOMÃO (1999) e MORATO (1997), indicam a maior susceptibilidade dos cambissolos a um processo erosivo, quando comparados a outros tipos de solo. Entretanto, ensaios específicos de erosão revelam que o solo do ponto (P2) do TVR-CBI, que também é um cambissolo apresentou considerável resistência à erosão quando comparados aos valores apresentados por outros pesquisadores em amostras de mesma classificação pedológica. Vale salientar que o ponto (P2) é o mais crítico dos estudados até agora com relação a processos erosivos. Este comportamento de baixa erodibilidade de uma maneira geral pode ser consequência da matéria orgânica presente no solo, podendo ter modificado a sua estrutura e propiciando melhores condições de arejamento e de retenção de água ou mesmo de retenção física dos grãos do solo. Em solos arenosos, como é o caso das amostras P2 e P3, a presença de matéria orgânica promove a aglutinação de partículas, firmando a estrutura e diminuindo o diâmetro dos poros, aumentando assim a capacidade de retenção de água e diminuindo a susceptibilidade à erosão

(CORRECHEL, 2003), ao mesmo tempo em que aumenta a resistência às forças de percolação.

O índice de vulnerabilidade à erosão buscou reunir fatores relacionados ao processo erosivo. Trata-se de um instrumento de planejamento e gestão urbana específico para a erosão, podendo ser utilizado de forma fácil e direta (VIANA, 2000). Com o índice obtido, foi possível demonstrar a magnitude da atuação dos processos erosivos no ponto mais crítico do TVR-CBI, mesmo se fossem adotados outros tipos de exposição do terreno. Entretanto, o fator geológico utilizado na determinação do IVE foi definido com base nos resultados dos ensaios do tipo Inderbitzen realizados no aparelho de FRAGASSI (2001).

No TVR-CBI o assoreamento é baixo, não constituindo um perigo na diminuição da altura do nível da água de forma direta para acelerar e interferir na dinâmica do rio.

No controle do processo erosivo no TVR-CBI a vegetação demonstrou muita influência e eficiência o que faz com que seja necessário, como fator mitigador, o cultivo da vegetação ciliar e o uso de técnicas de bioengenharia.

7 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base nas conclusões da pesquisa, recomenda-se que.

- Sejam realizados ensaios Inderbitzen com chuva simulada para poder comparar com os resultados obtidos nesta pesquisa. MENDES (2006) indica que o fluxo superficial só é capaz de transportar as partículas menores, mas o salpico da chuva pode arrastar partículas maiores, conforme a granulometria. A área em estudo tem predomínio de areias e em épocas de inverno são registradas chuvas fortes, pelo efeito das gotas de chuva, segundo MENDES (2006), as areias têm maior probabilidade de ser arrastadas, fato que pode incrementar as taxas de perda de solo, já quantificadas neste trabalho.
- Execução de ensaio furo de agulha e ensaios de Inderbitzen modificada para poder estabelecer as possíveis diferenças que possam existir na análise da erosão por infiltração.
- Estimar a perda de solo através de modelos matemáticos que utilizem parâmetros mais reais a fim de ser comparados com a estimativa de perda de solo executada através da concentração média diária a fim de avaliar a eficiência.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDON, M.M (2004). Os impactos Ambientais nos meio meios físicos Erosão e assoreamento na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari, MS em decorrência da Pecuária. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- ABNT (1984). NBR 6508. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.
- ABNT (1984). NBR 7180. Solo - Determinação do limite de plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas São Paulo-SP, 3p.
- ABNT (1984). NBR 7181. Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo-SP, 2p.
- ABNT (1986). NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo-SP, 9p.
- ABNT (1986). NBR 7182. Solo – Ensaio de Compactação. Associação Brasileira de Normas Técnicas São Paulo-SP, 10p.
- ABNT (1990). NBR 12007/90. Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional. Associação Brasileira de Normas Técnicas São Paulo-SP, 13p.
- ABRAHÃO, W.A.P. & MELLO, J.W.V. (1988) Fundamentos de pedologia e geologia de interesse no processo de recuperação de uma área degradada. DIAS, L.E. & MELLO, J.W.V. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, SBRAD, 251p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília. Aneel., 153. p. 2002.
- AGRITEMPO (2007). Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura - <http://www.agritempo.gov.br> - 02/02/2007.
- AGUILAR.J, MENJIVAR.J.C, GARCIA.I, MARTÍN.F, SIMÓN.M, BOUZA.P (2004). Estudio de Metales pesados y Arsénico en los suelos de olivar de sierra Mágina Jaén España. I Congresso Ibérico da Ciência do Solo do 15-18 de Junho, Bragança Portugal.
- ALCÂNTARA, M.A.T. (1997) Aspectos geotécnicos da erodibilidade dos solos. São Carlos, SP, Universidade de São Paulo, 1997. 99p. (Tese de Mestrado)
- ALVARENGA, M.M.; CARMO, J.C.(1976). Alguns problemas de estabilidade de taludes de corte em materiais residuais de rocha gnáissica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., 1976, Rio de Janeiro/RJ. Anais... Rio de Janeiro/RJ: ABGE, 1976. v.1, p.117–129.
- ALVES,A, SOUZA.F.J, MARQUES (2005). Avaliação do potencial à erosão dos solos : uma análise comparativa entre lógica fuzzy e o metodo USLE, SIMPÓSIO BRASILEIRO XII DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, abril.
- AMORIM, R.S.S; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T., (2001). Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola
- ANDRADE, A. G; COSTA, G. S.; FARIA, S. M., (2000). Deposição e Decomposição da Serapilheira em Povoamentos de Mimosa Caesalpinifolia, Acacia Mangium e Acacia

- Holosericea com Quatro Anos de Idade em Planossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, V. 24, p.777-785.
- ANGUAS. P.G, PEÑA.M.I.E.G, CARDONA P.J.E (2003) Aspectos de la Resistencia a la Tensión y Fatiga en suelos arcillosos com cal. Publicación tecnica N^o 230, secretaria de comunicaciones y transportes instituto Mexicano del transporte, Sanfandila
- BAHIA, V. G. CURI, N.; CARMO, D. N. Fundamentos da erosão do solo. *Informe Agropecuário*, v. 16, n. 176.p. 25-31, 1992.
- BARROS, S. H. A. (2005). Estudo dos solos da região metropolitana de Fortaleza para aplicação na Engenharia Rodoviária. Tese de Mestrado. Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo.
- BASTOS, B.C.A; DIAS, R. D; Y. GEHLING, J.M.W;Y.; DIAS,R.D.(1998). Avaliação da erodibilidade de perfis de solos residuais da Grande Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XI. , Brasília, 1998. *Anais*. Vol 1, p 557-563.
- BASTOS, B.C.A; DIAS, R. D; Y. GEHLING, J.M.W;Y.; MILITITSKY,J.(2001). Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomacânicas. Escola de Engenharia – UFRGS, Porto Alegre, RS, Teoria e Práticas da Engenharia Civil, No. 2, p 9-18, maio.
- BASTOS, C. A. B.; GEHLING, W. Y. Y. & MILITISKY, J.; BICA, A. D. & DAVISON DIAS R., (1998). Resistência ao Cisalhamento de um Solo Granítico Através de Ensaio de Cisalhamento Direto com Controle de Sucção. In; CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, XI, BRASÍLIA/DF. *Anais*, ABMS, vol. 1, p. 43-50.
- BASTOS, C.A.B (1999). Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 256p. Tese de Doutorado
- BATISTA, P. (2003). Processos erosivos na área de expansão urbana de Passos – MG: subsídios para a elaboração de uma carta de susceptibilidade à erosão. Monografia. Faculdade de Engenharia de Passos, UEMG. Passos, Minas Gerais.
- BENDER, H. (1985) Erosion: Un probleme de resistance au cisaillement en fonction du chemin des contraintes pendant l'infiltration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANIS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1., 1985, Brasília/DF. *Proceedings...*, Brasília/DF : ABMS, 1985. v.2, p.15–25
- BERTONI & LOMBARDI NETO (1999). Conservação do solo. Editora Ícone, Coleção Brasil Agrícola, São Paulo, 4ª edição, 335 p.
- BIGARELLA, J. J.; SANTOS, G. F. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais: intemperismo biológico, pedogênese, lacterização, bauxitização e concentração de bens minerais. Santa Catarina: Ed. da UFSC, 1996.
- BLOISE, G.L.F. ET ALL. (2001). Avaliação da susceptibilidade natural à erosão dos solos da bacia do Olaria-DF. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento*, EMBRAPA. Planaltina DF. 33p.
- BONTA, J.V.; RAO, A.R.(1996) Estimating peak flows small agricultural watersheds. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v.118, n.1, p.122-37, 1992.

- BRAIDA, J. A. & CASSOL, E. A., (1996). Erodibilidade em Sulcos e em Entressulcos de um Podzólico Vermelho-escuro Franco-arenoso. Campinas. Revista Brasileira de Ciência do solo, 20: 127-134.
- BURLAND, J.B. (1990). On the compressibility and strength of natural clays. *Géotechnique*, vol. 40 (3), 329-378 pp.
- CALLE J.A.C (2000) “ Análise de ruptura de talude em solo não saturado” Tese de Mestrado-Escola de Engenharia de São Carlos, USP
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; PEIXOTO, R.J.; PEREIRA, J.H.F.; GITIRANA JR, G.F.N.; CUNHA, R.P. (2001). Superfície de Estado do Solo Poroso Colapsível do Distrito Federal - Brasil. In: 4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 2001, Porto Alegre. 4º SMSNS, 2001. p. 99-109.
- CAMAPUM DE CARVALHO.J.C; CRUZ;J.; LIMA, MC & MONTARI (2001). Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. 7º SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO. ABGE, Goiânia, GO
- CAMAPUM DE CARVALHO.J.C; SALES.M.M.; SOUZA.N.M; MELO.M.T;MELO.S.M (2006). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília Editora Finatec.
- CAMPOS, T.M.P.; CARRILHO, C.W. (1995). Direct shear testing on na unsaturated soil from Rio de Janeiro. In: ISSM (Org.). *Unsaturated Soils*. 1 ed Paris, França. A.A. Balkema Publishers, v.1.
- CAPUTO, HP. (1996) Mecânica dos solos e suas aplicações. 6ª Edição, Editora LTC S.A, Rio de Janeiro, RJ.
- CAVICHIOLO, S.R. (2005) Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica em diferentes métodos de preparo do solo em plantio de pinus taeda Tese de Doutorado em ciência florestal. Escola de Engenharia da Universidade federal do Paraná, Curitiba.
- CEMIG (2006). www.cemig.com.br - 15/06/2006
- CHAVES, H. M.L (1994). Método estocástico para estimativa da erosão em sulcos e voçorocas. Revista Brasileira de Ciência do solo, vol. 18 (2), pp. 285- 294.
- CHILDS E.C, COLLIS GEORGE, N. (1950). The permeability of porous materials *proceedings of the Royal Society ser A* 2001 392-405
- CHOW, V.; MAIDMT, D.R.; MAYS, L.; SALDARRIAGA, J.G.; SANTOS G.R. (1998). *Hidrologia aplicada*. Editora Martha Edna Suárez R. Colômbia, 577 p.
- COELHO NETO, A. L. (1998). A abordagem geo-hidroecológica: um procedimento analítico-integrativo fundamentado na geomorfologia, hidrologia e geoecologia. In: FÓRUM GEO-BIO-HIDROLOGIA: ESTUDO EM VERTENTES E MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS, 1., 1998, Curitiba. *Anais...* Curitiba: UFPR, 1998. p. 26-29.
- COELHO NETTO, A.L. & AVELAR, A.S., (1996). *Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia*, Cap. 3, in: Cunha, S.B. & Guerra, A.J.T. (org.) - 1996 – “Geomorfologia. Exercícios, técnicas e aplicações”, Ed. Bertrand, Rio de Janeiro, 343 p.
- COELHO, T.A. (2001) Avaliação de Efeitos do Recobrimento Organico nos processos Erosivos Laminares em Talude de Corte Rodoviário na Região de Ribeirão das Neves M.G.Dissertação de Mestrado, Meio Ambiente e recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte.

- CONCIANI, W.(1998). Surgimento de voçorocas em áreas de solo colapsível. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CONTROLE DE EROÇÃO, 6., Presidente Prudente/SP. Anais... Presidente Prudente/SP: ABGE, 1998. (em CD). *conservation engineering*. 2nd ed. New York: John Wiley, 1966. 683 p.
- CORRECHEL, V. (2003). Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do “fallout” do ^{137}Cs . Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- COUTINHO, R. Q.; COSTA, F. Q. & SOUZA NETO, J. B. (1997). Resultado de ensaios de laboratório e de campo em um solo residual de gnaiss não saturado. Anais do 3º NSAT, Rio de Janeiro, vol 1, 189 p.
- CRUZ,R.S (2003). Evaluación de la Erosión Hídrica en la cuenca del Rio Ñirihuau. Universidad Nacional del Comahue Universidad de Poitiers.
- D’AGOSTINI,L.R (1999) Erosão. Ed. Da UFSC, Florianópolis, 125 p.
- DAS, B.M., YEN, S.C. & DASS, R.N. (1995). Brazilian tensile strength test of lightly cemented sand. Technical note – Canadian Geotech Journal, 32, 166-171 pp.
- DENARDIN, J.E. (1990). Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Tese de Doutorado. ESALQ, Piracicaba. 81 p.
- DOMINGOS, J.L. (2006). Estimativa de perda de solo por erosão hídrica em uma bacia hidrográfica. Monografia. Departamento de Geografia, UFES. Vitória, Espírito Santo.
- DRUMOND, M. A. Alterações Fitossociológicas e Edáficas Decorrentes de Modificações da Cobertura Vegetal na Mata Atlântica, Região do Médio Rio Doce, MG. Viçosa: UFV, 73 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- EASTMAN, J.R; JIN.W;KIEMP.P.A.K; TOLEDANO.J. (1995) Raster Procedures for multi-criteria/multi-objetive decisions. Photogrammetri Engennering & Remote sensing.V.61.n.5p.539-547.
- EIA (1996). Estudo de Impacto Ambiental. Relatório de Impacto Ambiental. LEME Engenharia, CEMIG.
- ELLISOM , W. D (1947) Soil erosion. Soil Science society America Proceeding. Madison, v12, p479-488
- EMBRAPA (2003). Erosão na bacia do alto Taquari. Centro de Pesquisa Agropecuária do Pantanal. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 47 p.
- FÁCIO, J.A. (1991). Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 120_p.
- FAO, (2001). Conventional Ploughing Erodes The Soil -Zero-Tillage Is An Environmentally-Friendly Alternative. International Conference on Conservation Agriculture. Madrid, October, p. 1-5.
- FAVARETTI, M. (1995). Tensile strenght of compacted clays. Unsaturated Soils, Paris, 1-56 pp.
- FENDRICH, R. ET AL (1984). Drenagem e controle de erosão Urbana. Editora Universitária Champagnat, 4^{ta} edição, Curitiba, PR, 486p.

- FERNÁNDEZ, N. (1989). Evaluación de prácticas de conservación de suelos y aguas en cultivos hortícolas (repollo y coliflor). X CONGRESO VENEZOLANO DE LA CIENCIA DEL SUELO. MATURÍN. VENEZUELA. 10 P.
- FERREIRA, A. B.; SANTOS, C. R.; BRITO, J. L. S.; ROSA, R. (2005). Análise comparativa do uso e ocupação do solo na área de influência da Usina Hidrelétrica Capim Branco I a partir de técnicas de geoprocessamento. In: Anais XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. GOIÂNIA. 2997-3004 pp.
- FORDHAM, G.A. (1993) Stabilization of soil from Werombi region, New South Wales, TRN Earthmoving Co. (personal communication).
- FOSTER, G.R.; LANE, L.J., (1982). Beyond the USLE: advancements in soil erosion prediction. In: Boersma (ed.) Future developments in soil science research, Madison, Soil Sci. Am. Soc., p.315-326.
- FRAGASSI, P.F.M. (2001) Estudo da Erodibilidade dos Solos Residuais de Gnaisse da Serra de São Geraldo e de Viçosa. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UFV, Viçosa, MG.
- FREIRE, E.P. (2001). Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. 7º SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, GOIÂNIA: ABGE, CD-ROM.
- GAMEIRO, M.G. (2003). Avaliação de métodos para obtenção dos fatores “L” e “S” da EUPS numa microbacia, via geoprocessamento e banco de dados. Tese de Mestrado. INPE, São José dos Campos.
- GARCIA, J.G (2002). Experiências de Aplicação de Geotecnologias e modelos na análise das Bacias Hidrográficas, Revista do Departamento de Geografia da USP
- GERCOVICH D.M.S. (2001) “Equações para modelagem da curva característica aplicadas a solos brasileiros”. 4º Simpósio Brasileiro de solos não saturados - Porto Alegre Brasil.
- GLOSSÁRIO (2004). Portal de Recursos Minerais. Disponível em <http://www4.prossiga.br/recursosminerais/glossario>. Acesso em 30/04/2004.
- GONZÁLEZ, S.E.J. (2004) Importancia de la conservación del suelo. Asociación Española de Agricultura. www.aeac-sv.org; egonzalez@aeac-sv.org.
- GRANT (1970). The puce programme for terrain evaluation for engineering purpose. Australia CSIRO: Divison of applied geomechanics. Paper 15.
- GRAY, D.H. & LEISER, A.T. (1989). Biotechnical Slope Protection—Erosion Control. Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, FL. 271 p.
- GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (1998). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 3ª edição. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 472 p.
- GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B., (org) (1995). Processos Erosivos nas Encostas. Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos. Rio de Janeiro. Editora Bertrand, cap. 4, p. 149-209.
- GUIMARÃES, R.C. (2002). Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao Estudo do Desempenho de Estacas escavadas. Dissertação de Mestrado em Geotécnica, Departamento de Engenharia civil e Ambiental, FT, UnB, Brasília.
- HEAD, K.H. (1992). Manual of Soil Laboratory Testing. New York: J. Wiley, vols 1 e 2.

- INFANTE Jr,N.; FORNASARI FILHO, N. (1998). Processo de Dinâmica Superficial. In:Oliveira,S.M.A. ; Brito,S.N.A. Geologia de Engenharia. São Paulo.ABGE Cap.9, p.131-152.
- JACINTO E.C. (2005) Estudo do Comportamento e Diagnóstico de Erosões nas Fazendas da Faber Castell no Município da Prata-MG. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- KONDO, M.K. & DIAS JUNIOR, M.S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 23:497-506, 1999.
- KRISHNAYYA, A.V.G. & EINSENSTEIN, A. (1974). Brazilian tensile test for soils. Canadian Geotech Journal, 11, 632-642 pp.
- KUNZE, G. W.; DIXON, J. B. Pretreatments for mineralogical analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). *Method of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1986. Part 1, p. 91-99
- LAFAYETTE, K. P. V.; COUTINHO, R. Q.; CAVALCANTI, B. C. H.: Avaliação da erosão no município do Cabo de Santo Agostinho / PE – Parque Metropolitano Armando de Holanda Cavalcante. 2005. IV COBRAE.
- LAL, R., 1988. Erodibility and Erosivity. In. LAL, R (editor). Soil Erosion Research Methods. Soil p. 141-160.
- LANDELL, M.G.A.; PRADO, H; VASCONCELOS, A.C.M.; PERECIN, D.; ROSETTO, R.R.; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA; M.A.; XAVIER, M.A.(2003) Oxisol subsurface chemical related to sugarcane productivity. Scientia Agrícola, Piracicaba, v.60, n. 4, p. 741-745.
- LANE, L.J.; RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M., (1997). Development and application of modern Soil Erosion Prediction Technology: the USDA experience. Eurasian Soil Science.
- LIMA, M.C. (2003). Degradação Físico-Química e Mineralógica de maciço junto às voçorocas. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- LOMBARDI NETO, F., MOLDENHAUER, W.C., (1992). Erosividade da Chuva: Sua Distribuição e Relação com Perdas de Solo em Campinas, SP. Bragantia, Campinas,
- MACEDO, MARIZA ALVES DE (2000). Estimativa de perda de solo por erosão laminar na bacia do rio São Bartolomeu-DF usando técnicas de geoprocessamento. SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCION REMOTA, 9. Puerto Iguazú, AR.
- MACIEL, I.C.Q. (1991). Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaiss facoidal. Dissertação de mestrado – DEC, PUC-Rio.
- MARINHO, F.A.M. (1997) Medição de Sucção em solos, Anais do 3^o Simpósio Brasileiro de Solos não saturados, 2, 373-398, Rio de Janeiro
- MARQUES, J.J.G.S.M.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; SÁ, M.A.C. de. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.21, n.3, p.447-456, 1997a.
- MARTÍNEZ, E.M (2005). Hidrologia Práctica, Segunda Edição, Impresso em Espana Madrid Editora RUGARTEL,S.L.

- MARÍN, M. (2005). Hidrologia Práctica. Segunda edição. Editora Rugarte puerto de Arlabán,33-28053 Madrid.
- MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; FONTES, M.P.F. & SCHAEFER, C.E.G.R.(2000). Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. R. Bras. Ci. Solo, 24:269-284.
- MENDES, C.A.R. (2006). Erosão em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ. Tese de Doutorado. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- MENDES FILHO, W.M, VENDRAME,I.F, CARVALHO, R.G (2007). Utilização de Sistema de Informações Geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil 21,26 abril.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2000). Gestão dos recursos naturais: subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Brasília. 200 p.
- MIRANDA, J.G. (2005). Mapeamento geotécnico e estudo da susceptibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala: 1:100.000. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.
- MITCHELL, J.K. (2003). Fundamentals of soil behavior. 2ª Edition, New York, John Wiley and Sons Inc. 437 p.
- MORAIS, F. (2004). Estudo dos processos erosivos subsuperficiais na bacia do rio Maracujá Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.28 no.6 Viçosa Nov.
- MORAIS, F; BACELLAR, L.A.P.; SOBREIRA, F.G. (2004) Análise da erodibilidade de Saprolitos de Gnaiss. Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.28 no.6 Viçosa Nov
- MORATO, R.G.; KAWAKUBO, F.S.; LUCHIARI, A. (1997). O geoprocessamento como subsídio ao estudo da fragilidade ambiental. X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. GEO UERJ, nº 1. Rio de Janeiro, RJ. 709 – 719 pp.
- MORETI, D,CARVALHO.M.P, MANNIGEL.A.R, MENDEIROS.L.R.(2003). Importantes características de chuva para a conservação do solo e da água no município de São Manuel (SP). Rev. Bras. Cienc. Solo. Campinas, v. 1, n. 1, p. 713726.
- MORGAM, R.P.C.Soil Erosion & Conservation. 2.ed New York. John Wiley & Sons 1995 198p.
- N.J. KOREVAAR, An Easy Proof of the Interior Gradient Bound for Solutions to the Prescribed Mean Curvature Problem, *Trans. A.M.S.*
- NASCIMENTO, R. A. M., (1998). Fundamentos da Ciência do Solo. Apostila de Aula, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, 122p.
- NEARING, M. A; PARKER, S.C. (1994). Detachment of soil by flowing water under tubulent and laminar conditions. Soil Science Society American Journal, 58 (6): 1609-14. 1994
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1981). Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS. RIO DE JANEIRO/RJ. COPPE/ABMS. 30-40 pp.

- OLIVEIRA, M.A.T. (1999). Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, RJ. 57 – 100 pp.
- OLIVEIRA, M.G.B (1996). Estudo dos Processos Erosivos e avaliação da produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica da Pampulha. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Hidráulica e recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte UFMG.
- ORTIGÃO J.A.R. (1995). Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos. Editora Afiliada, 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ.
- PAULO, F.G.R (2007) Ferramentas para a determinação de vazões Ecológicas no Trecho de Vazão Reduzida Capim Branco I Dissertação (Mestrado em saneamento Meio Ambiente e Recursos hídricos) Escola de Engenharia Universidade federal de Minas Gerais, Belo horizonte.
- PCA (2002). Plano de Controle Ambiental. Consórcio Capim Branco Energia.
- PESSOA, F.H.C. (2004). Análises dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- PINHEIRO (1998). Resistência ao cisalhamento Residual de alguns solos do estado do Rio Grande do Sul. XI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Brasília 5-10 de novembro. Pág 35.
- PINTO, C. S. (2000). Curso Básico de Mecânica dos solos em 16 aulas. São Paulo, Oficina de Textos. São Paulo, SP 355p
- PINTO, C. S., (2002). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas, Oficina de Textos, 2a ed. São Paulo, SP, 355 p.
- PINTO, S.A.F. (1996). Contribuição metodológica para análise de indicadores da erosão do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelo preditivo. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Branco, 1996.c
- PRADO, H (2005). Solos do Brasil-gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo de solos. Piracicaba. 281p. 4a edição.
- PROFOREST (2005). Relatório de concepção e estruturação da informação geográfica para o planejamento e gestão florestal. Valimar ComUrb. Portugal.
- RALHARDJO (1993). Soil mechanics for um saturated soil, Toronto 517
- RAMIDAN, M.A.S. (2003). Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara-GO. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, RJ.
- REGO, J.J.V. (1978). Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaise. Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPE, UFRJ, Rido de Janeiro, RJ, 125 p.
- RESENDE. M, CURI. M,BATISTA DE REZENDE.S, CORRÊA.F.G (1999). Pedologia Base para distinção de Ambientes, Editoral NEPUT. Viçosa 3ª ed p219.
- REYNOLDS, W.D; ELRICK, D.E. (1985). In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameters using the Guelph permeameter. Soil Science, Baltimore, v. 140, nº 4, 292 – 302 pp.

- ROCHA, I.P. (2006). Controle da erosão marginal no baixo São Francisco: o uso da bioengenharia de solos associada à recuperação da vegetação ciliar. Monografia. Departamento de Engenharia Agrônômica. UFS. São Cristóvão, SE.
- RODRIGUES, S. C. (2002). Mudanças ambientais na região do cerrado, análise das causas e efeitos da ocupação e uso do solo sobre o relevo. O caso da Bacia Hidrográfica do rio Araguari, MG. GEOUSP – Espaço e Tempo. São Paulo. nº 12.
- RODRIGUES, R., ARBELO, C.D, GUERRA, J.A, MORA, J.L.(2002). Erosión Hídrica em Andosoles de las islas Canarias Edafologia, vol 9 (1) pp 23-30. Universidad de la Laguna Avda. Astrofísico Francisco Sánchez s/n, 38204, La Laguna, Tenerife
- ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; LIMA, E.F.; SIQUEIRA, C.A.; MACEDO, D. (2004). Elaboração de uma Base Cartográfica e Criação de um Banco de Dados Georreferenciados da Bacia do rio Araguari - MG. In: Gestão Ambiental da Bacia do Rio Araguari - rumo ao desenvolvimento sustentável. Lima, S.C.; Santos, R.J. (Org.). Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia/ Instituto de Geografia; Brasília; CNPq,
- SALOMÃO, F. X. T. (1999). Controle e prevenção dos processos erosivos. In: Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações. GUERRA, A. T. G. (Org) Rio de Janeiro. Ed. Bertrand Brasil. p 229 – 267.
- SALOMÃO, F.X. (1992). Erosão e ocupação Rural e Urbana. In: IPT. 3º Curso de Geologia Engenharia Aplicada a problemas ambientais. AGAMA- DIGEM. São Paulo.
- SANTOS, A. G. (2002). Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.
- SANTOS, R.M.M. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (1998). Ensaio de Erodibilidade em Voçorocas do Município de Goiânia. 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Vol. 1, ABMS, Brasília, DF, 581 – 588 pp.
- SANTOS, R.M.M. (1997) Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, Distrito Federal.
- SANTOS, D, CURI, N, FERREIRA, M. M, EVANGELISTA, A. R, DA CRUZ, B. A, TEXEIRA, W.G (1999). Perdas de solo e produtividade de pastagens nativas melhoradas sob diferentes práticas de manejo. Saprolitos de gnaiss. Rev. Bras. Ciência do Solo. 28:1055-1062
- SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura: Estatísticas do setor florestal brasileiro:
- SCHWAB, G.O.; FREVERT, R.K.; EDMINSTER, T.W.; BARNES, K.K. *Soil and water*
- SHERARD, J.L.; DUNNIGAN, L.P.; DECKER, R.S. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings, American Society of Civil Engineers, v. 102, pp. 69-85.
- SILVA, J.M.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D; CECÍLIO, R. A.(2006). Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial em encostas e canais. Parte I: Desenvolvimento e avaliação. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.3, p.695-703, set./dez.2006.
- SILVA, M. L. N; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D.F. (1999). Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v. 34, nº 12. 2287 – 2298 pp.

- SILVA, R. B.(2002). Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo sob diferentes intensidades de uso na região dos cerrados. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 142p.
- SILVA, R.D DE OLIVEIRA FILHO, L.M (2003). Estudos experimentais do processo de ressecamento de um rejeito fino de mineração, revista escola de Minas Ouro Preto vol 56 Dezembro
- SILVA, T.R.M. (2000). Caracterização e erodibilidade dos solos de uma voçoroca na região. de Ouro Preto MG, Rio de Janeiro Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEC/COPPE/UFRJ, 2000. 106p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, V.C. (2004). Estimativa da erosão atual da bacia do rio Paracatu (MG/GO/DF). Pesquisa Agropecuária Tropical, 34 (3). 147 – 159 pp.
- SUARES, R.M. (2005). Resistência ao Cisalhamento de um solo Coluvionar não Saturado da Cidade do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, fevereiro.
- SOTO,A.M. A. (2004) Comparação entre Métodos de imposição e de controle de sucção em solos não saturados. Dissertação de Doutorado em Geotécnica, escolha de engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo.
- SOUZA, C. F, DARNELLES, A. M, ACROLI, L. A, MERTEN, G. (2006). Comparação dentre estimativas de produção de sedimentos na bacia do rio Potiribu. VII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS. SIMPÓSIO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, ABRH. Porto Alegre, RS.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J.J. (1990). Ambientes fluviais. 2. ed. Florianópolis:Editora da UFSC: Editora da Universidade Federal do Paraná. 183 p. II.
- TEIXEIRA, A. (1999). Avaliação de Efeitos do Recobrimento Orgânico nos processos Erosivos laminares em Taludes de corte Rodoviário na Região de Riberão das Neves MG. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente)- Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte
- TUCCI, C.E.M., (1993). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade; UFRGS; Edups; ABRH, 943 p.
- VAN GENUCHTEN, M.TH, (1980). “A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils” soil science society of America Journal, vol 44pp, 892-298.
- VARGAS, M. (1978). Introdução à mecânica dos solos: Editora MacGraw Hill, São Paulo, SP
- VAUGHAN, P.R. ET AL. (1988). Indexing the engineering properties of residual soil. Quaterly Journal do Engineering Geology, London, vol.21, 69-84 pp.
- VERTAMATTI, E (1998) Elaboração de ábaco de Erodibilidade de solos tropicais. XI Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica, Brasília, novembro, 1998.
- VIANA, C. S. (2000). Caracterização dos processos erosivos no município de Belo Horizonte uma contribuição à gestão ambiental e ao planejamento urbano. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

- VIANA, R.F. (1999). Parametrização e Regionalização de Atributos Físicos para a Dinâmica de Erosão na Bacia das Codornas. Dissertação de Mestrado em Scientiane, UFV, Viçosa, MG, 94 p.
- VILAR, O.M, PRANDI.E.C (1999). Erosão dos Solos In: JCA Cintra; JH Albiero (Org). Solos do Interior de São Paulo. São Carlos-SP
- VILLAR, L.F.S & DE CAMPOS, T.M.P. (2004). Relações entre propriedades índices e sucção obtidas via curvas características de secagem para materiais muito compressíveis. Anais do 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, São Carlos, SP.
- VILLAR, L.F.S. (2002). Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita. Tese de Doutorado. DEC PUC-Rio, 511 pp.
- WILLIAMS, J.R. (1975). Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Washington, D.C.: USDA-ARS Handbook 5-40, 1975. 228 p.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook nº 537, Soil Conservation Service. Department of Agriculture, United States.
- WISSMAR, R. C.; BEER, W. N.; TIMM, R. K. (2004). Spatially explicit estimates of erosion-risk indices and variable riparian buffer widths in watersheds. Aquatic Sciences, vol. 66, nº 4, pp.446-455.
- ZACHAR, D. (1982). Soil erosion. Elsevier Scientific Publishing Company, 548 p.

9 ANEXOS

ANEXO I

(Resultados dos ensaios de granulometria e compactação)

Tabela A1- Parâmetros das amostras com defloculante

CARACTERÍSTICAS	AMOSTRA P2	AMOSTRA P3
D ₁₀	0,0015 mm	0,0102
D ₁₅	0,0037 mm	0,0273
D ₃₀	0,0528 mm	0,0140
D ₅₀	0,0800 mm	0,2000
D ₆₀	0,0950 mm	0,2200
D ₈₅	0,1500 mm	0,3200
C _u	64	22
C _c	19,6	0,068

Tabela A2- Parâmetros das amostras sem defloculante

CARACTERÍSTICAS	AMOSTRA P2	AMOSTRA P3
D ₁₀	0,0015 mm	0,0102
D ₁₅	0,0038 mm	0,073
D ₃₀	0,0529 mm	0,0140
D ₅₀	0,0800 mm	0,2000
D ₆₀	0,0950 mm	0,2200
D ₈₅	0,1500 mm	0,3200
C _u	63	133
C _c	19,64	52,26

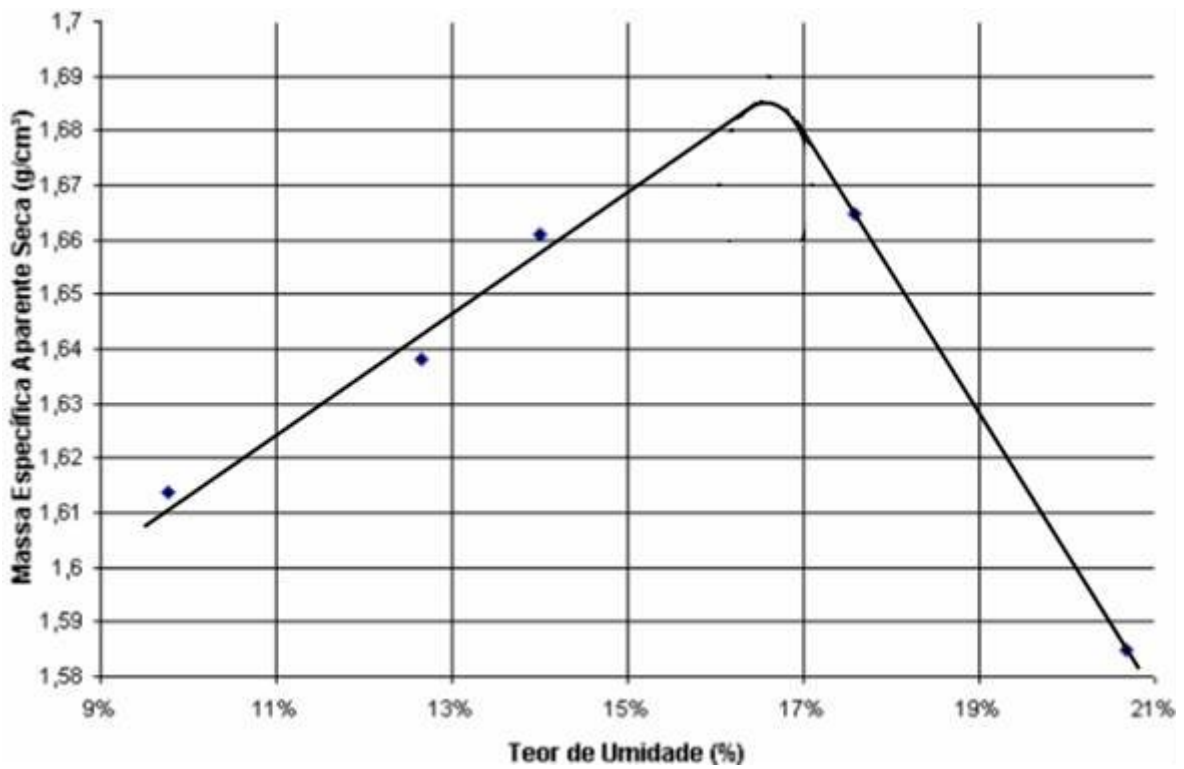


Figura A1- Curva de compactação para a amostra P2

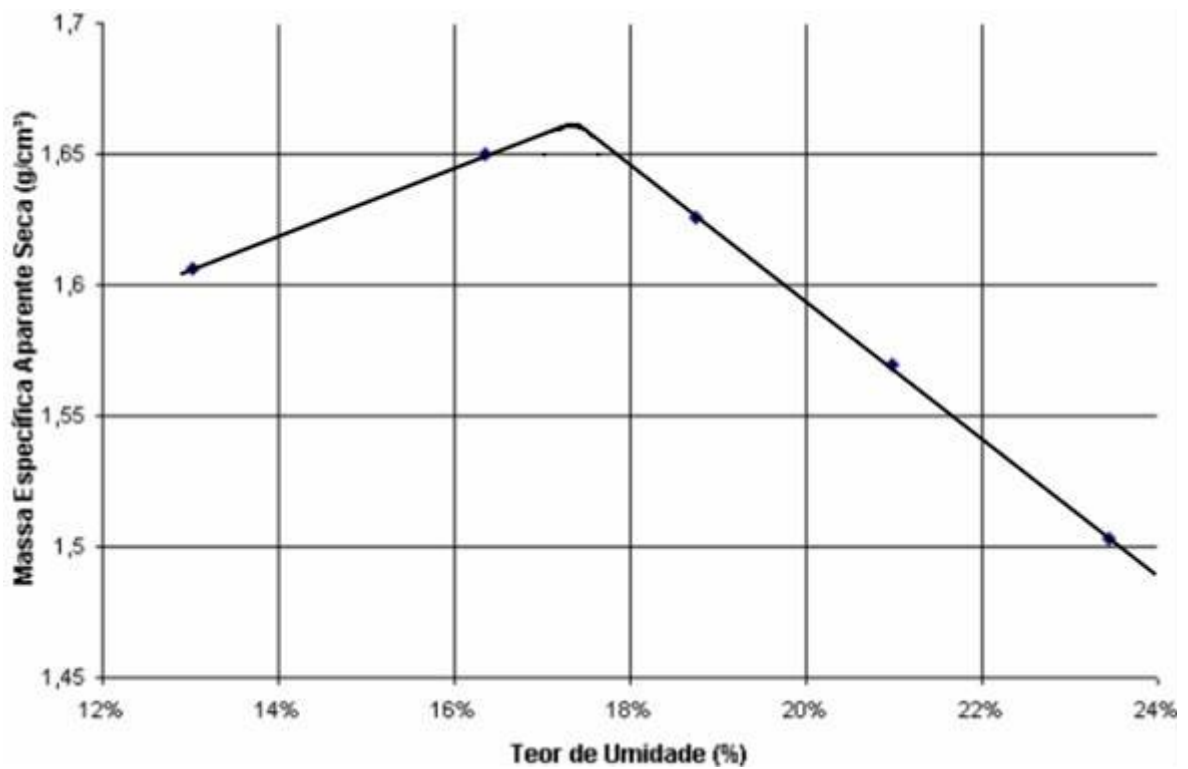


Figura A2: Curva de compactação para a amostra P3

ANEXO II

(Resultados dos ensaios de mini-mcv)

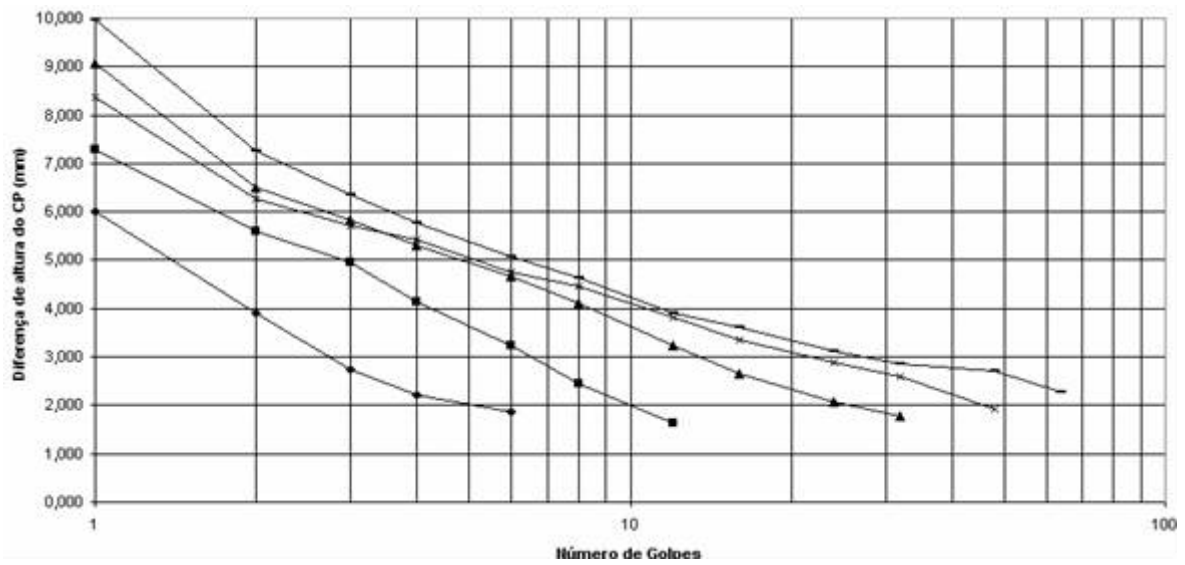


Figura A3- Curva mini-mcv para a amostra P2

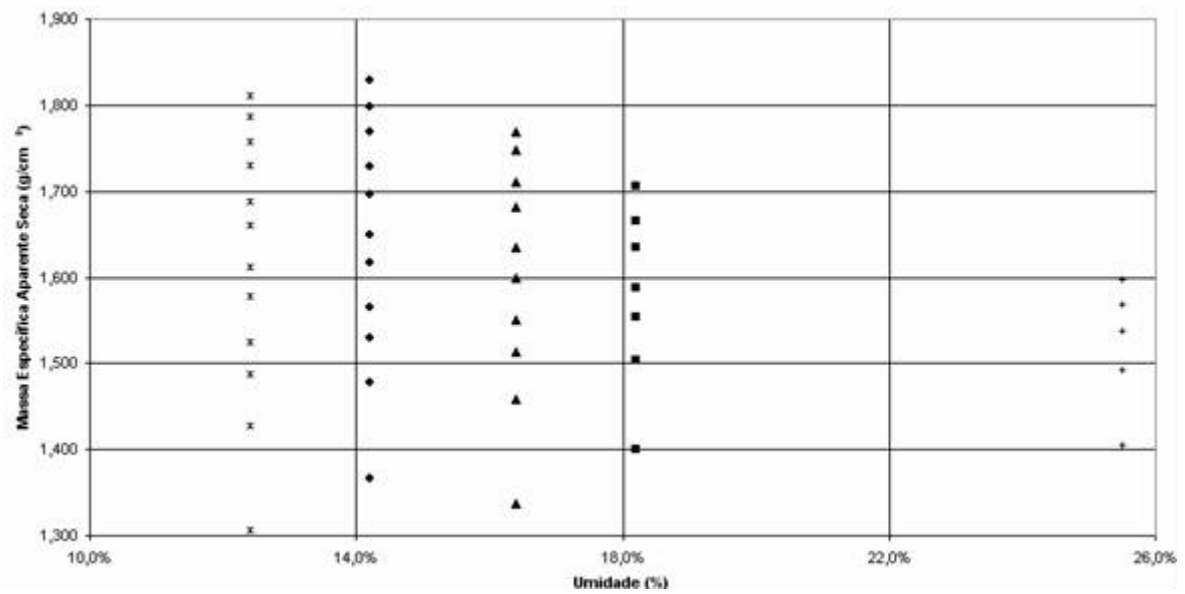


Figura A4- Família de curva de compactação para a amostra P2

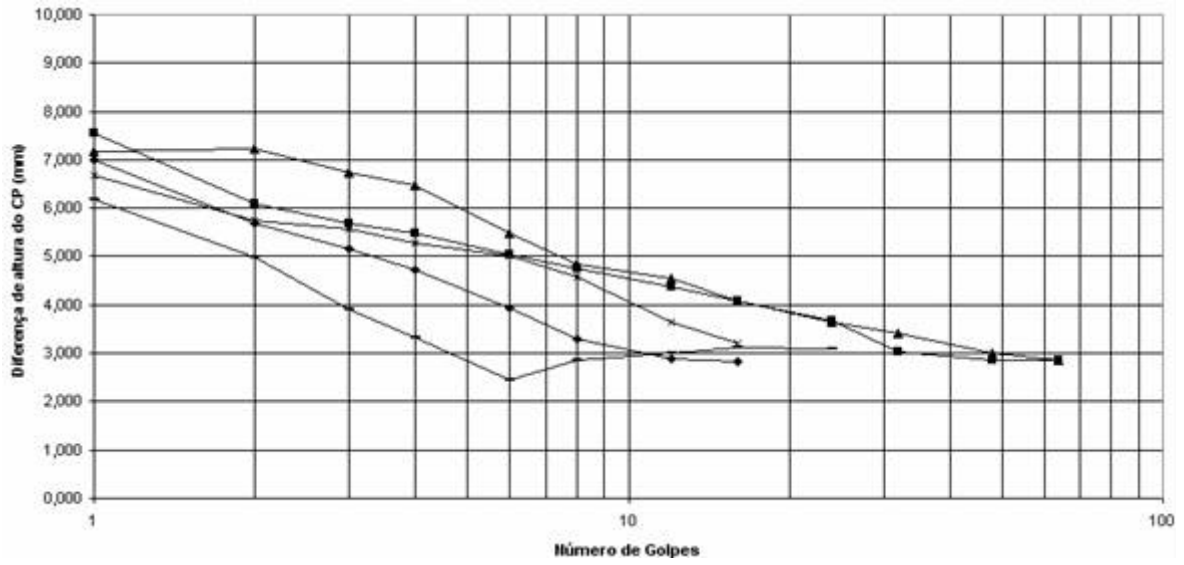


Figura A5- Curva mini-mcv para a amostra P3

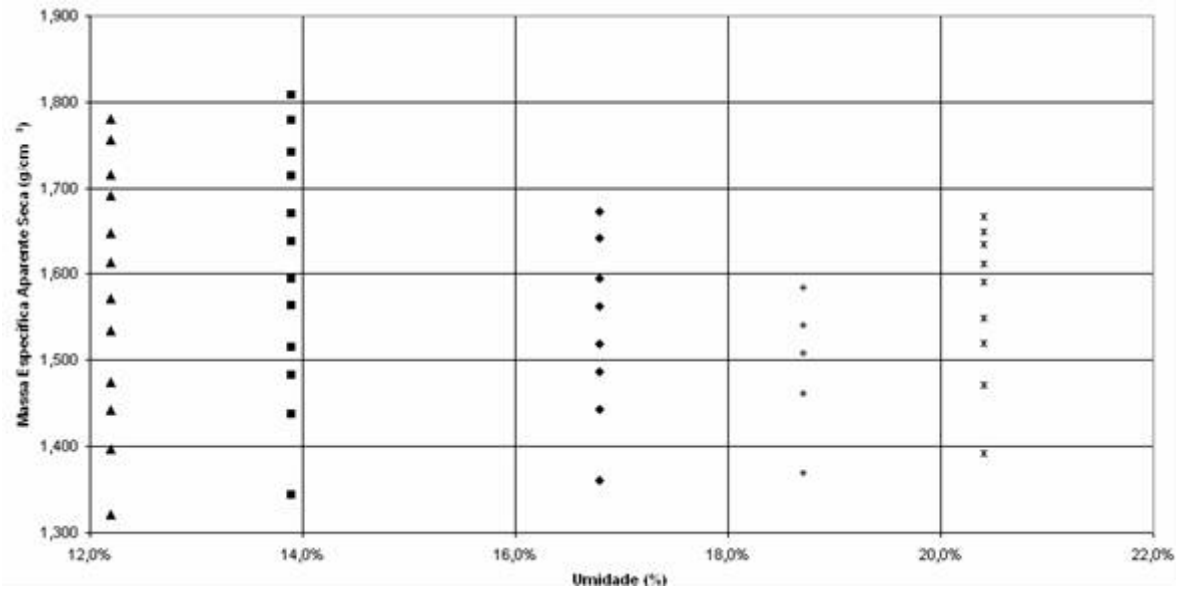


Figura A6- Família de curva de compactação para a amostra P3

ANEXO III

(Resultados dos ensaios de Adensamento para a amostra P1)

Tabela A2- Ensaio de adensamento para amostra P2 indeformada

ΔH (mm)	H (mm)	e_i	e_f	σ (kPa)
0,337	20,200	0,8044	0,7743	12,50
0,157	19,863	0,7664	0,7524	25,00
0,263	19,706	0,7524	0,7289	50,00
0,460	19,443	0,7289	0,6877	100,00
0,682	18,983	0,6877	0,6265	200,00
0,856	18,301	0,6265	0,5500	400,00
0,888	17,445	0,5500	0,4707	800,00
0,861	16,557	0,4707	0,3938	1600,00
0,941	15,696	0,3938	0,3097	3200,00
0,280	14,755	0,3097	0,2847	4000,00
-0,065	14,475	0,2847	0,2965	2650,00
-0,106	14,540	0,2965	0,3100	1300,00
-0,100	14,646	0,3100	0,3191	650,00
-0,677	14,746	0,3191	0,3800	12,50
	15,423	0,3800		

Tabela A3: Dados do corpo de prova (P2 – indeformado)

	Início do ensaio	Término do ensaio
Teor de umidade (%)	5,10	20,20
Densidade (g/cm^3)	1,53	1,89
Índice de Vazios	0,80	0,38
Porosidade (n)	44,4%	28%
Grau de saturação (%)	16,50	79,74

Tabela A4- Ensaio de adensamento para amostra P2 deformada

ΔH (mm)	H (mm)	e_i	e_f	σ (kPa)
0,660	20,200	0,7676	0,7099	12,50
0,106	19,540	0,7095	0,7002	25,00
0,168	19,434	0,7002	0,6855	50,00
0,246	19,266	0,6855	0,6640	100,00
0,432	19,020	0,6640	0,6043	200,00
0,300	18,588	0,6043	0,5303	400,00
0,458	18,288	0,5303	0,4556	800,00
0,577	17,830	0,4556	0,3853	1600,00
0,673	17,253	0,3853	0,3055	3200,00
0,224	16,580	0,3055	0,2879	4000,00
-0,066	16,356	0,2847	0,2965	2650,00
-0,108	16,422	0,2965	0,3100	1300,00
-0,090	16,530	0,3100	0,3191	650,00
-0,677	16,620	0,3191	0,3800	12,50
	17,297	0,3800		

Tabela A5- Dados do corpo de prova (P2 – deformado)

	Início do ensaio	Término do ensaio
Teor de umidade (%)	5,10	25,80
Densidade (g/cm ³)	1,55	1,72
Porosidade (n)	44%	28%
Índice de Vazios	0,78	0,38
Grau de saturação (%)	17,20	73,34

ANEXO IV

(Resultados dos ensaios de Permeabilidade Guelph)

Figura A7- Ensaio de permeabilidade Guelph para ponto P2 (2ª determinação)

Laboratório de Geotecnia		Permeabilidade de campo (Guelph)		UFMG	
Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Geotecnia					
Local:	Capim Branco - Ponto Final do TVRCB1 - Vçoroca 2	Amostra:	P2	Operador:	Andréa/Fábio
		Data:	14/5/2006		
Constante do Reservatório X ou Y (cm ²)	Profundidade do furo (cm)	Observação:	Ponto 2 - 2ª ensaio realizado		
35,08	22,5				
Carga Hidráulica 1 - (H1) = 5cm			Carga Hidráulica 2 (H2) - 10cm		
Intervalo de tempo de leitura (min) = 0,5			Intervalo de tempo de leitura (min) = 0,5		
Tempo (min)	Nível d'água (cm)	Varição Nível d'água (cm)	Tempo (min)	Nível d'água (cm)	Varição Nível d'água (cm)
0	3,8	2,4	0	14,5	2,4
0,5	6,0	1,2	0,5	16,9	1,7
1	7,2	1,2	1	18,6	1,4
1,5	8,4	1,0	1,5	20,0	1,5
2	9,4	1,0	2	21,5	1,4
2,5	10,4	1,0	2,5	22,9	1,5
3	11,4		3	24,4	1,4
3,5			3,5	25,8	
4			4		
4,5			4,5		
5			5		
5,5			5,5		
6			6		
6,5			6,5		
7			7		
$\Delta 1 =$	1		$\Delta 2 =$	1,4	
R1 = (cm/s)	0,033333		R2 = (cm/s)	0,046667	
K = (m/s)	0,0003975733		K = (m/s)	3,96E-06	

Figura A8: Ensaio de permeabilidade Guelph para ponto P3 (1ª determinação)

Laboratório de Geotecnia		Permeabilidade de campo (Guelph)		UFMG	
Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Geotecnia					
Local:	Capim Branco - Ponto Final do TVRCB1 - Vçoroca 2	Amostra:	P3	Operador:	Andréa/Fábio
		Data:	14/5/2006		
Constante do Reservatório X ou Y (cm ²)	Profundidade do furo (cm)	Observação:	Ponto 1 - 1ª ensaio realizado após tentativa da retirada de bloco		
35,08	22				
Carga Hidráulica 1 - (H1) = 5cm			Carga Hidráulica 2 (H2) - 10cm		
Intervalo de tempo de leitura (min) = 0,25			Intervalo de tempo de leitura (min) = 0,25		
Tempo (min)	Nível d'água (cm)	Varição Nível d'água (cm)	Tempo (min)	Nível d'água (cm)	Varição Nível d'água (cm)
0	3,0	1,5	0	12,0	0,7
0,25	4,5	0,8	0,25	12,7	0,7
0,5	5,1	0,4	0,5	13,4	0,7
0,75	5,5	0,6	0,75	14,1	
1	6,1	0,4	1		
1,25	6,5	0,4	1,25		
1,5	6,9	0,4	1,5		
1,75	7,3		1,75		
2			2		
2,25			2,25		
2,5			2,5		
2,75			2,75		
3			3		
3,25			3,25		
3,5			3,5		
$\Delta 1 =$	0,4		$\Delta 2 =$	0,7	
R1 = (cm/s)	0,026667		R2 = (cm/s)	0,046667	
K = (m/s)	0,0016604633		K = (m/s)	1,66E-05	

Figura A9: Ensaio de permeabilidade Guelph para ponto P3 (2ª determinação)

 Laboratório de Geotecnia Escola de Engenharia		Permeabilidade de campo (Guelph)		 UFMG	
Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Geotecnia					
Local:	Capim Branco - Ponto Final do TVRCB1 - Vçoroca 2	Amostra:	P3	Operador:	Andréa/Fábio
		Data:	14/5/2006		
Constante do Reservatório X ou Y (cm ²)	Profundidade do furo (cm)	Observação:	Ponto 2 - 2ª ensaio realizado		
35,08	22				
Carga Hidráulica 1 - (H1) = 5cm			Carga Hidráulica 2 (H2) - 10cm		
Intervalo de tempo de leitura (min) = 0,25			Intervalo de tempo de leitura (min) = 0,25		
Tempo (min)	Nível d'água (cm)	Varição Nível d'água (cm)	Tempo (min)	Nível d'água (cm)	Varição Nível d'água (cm)
0	4,0	1,9	0	16,0	3,4
0,25	5,9	1,9	0,25	19,4	2,1
0,5	6,8	1,0	0,5	21,5	2,0
0,75	7,9	0,6	0,75	23,5	1,9
1	8,5	0,8	1	25,4	2,0
1,25	9,3	0,7	1,25	27,4	1,8
1,5	10,0	0,7	1,5	29,2	1,8
1,75	10,7	0,7	1,75	31,0	1,8
2	11,4		2	32,8	
2,25			2,25		
2,5			2,5		
2,75			2,75		
3			3		
3,25			3,25		
3,5			3,5		
Δ1 = 0,7		Δ2 = 1,8			
R1 = (cm/s)	0,04667	R2 = (cm/s)	0,120000		
K = (cm/s)	0,0084192000	K = (m/s)	8,42E-05		