

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS PARA CONTROLE DE
EROSÃO SUPERFICIAL HÍDRICA EM FACE DE TALUDE**

MARIA TEREZA DA SILVA MELO

ORIENTADOR: PROF.º ENNIO MARQUES PALMEIRA

CO-ORIENTADOR: PROF.º EDER CARLOS GUEDES DOS SANTOS

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD – 161/2020

BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2020

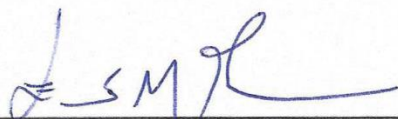
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS PARA CONTROLE DE
EROSÃO SUPERFICIAL HÍDRICA EM FACE DE TALUDE**


MARIA TEREZA DA SILVA MELO

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

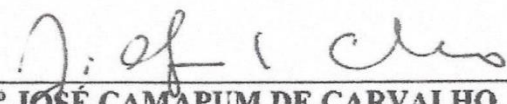
APROVADA POR:



**PROF.º ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD. (UnB)
(ORIENTADOR)**



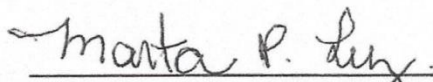
**PROF.º EDER CARLOS GUEDES DOS SANTOS, DSc. (UFG)
(CO-ORIENTADOR)**



**PROF.º JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**PROF.º MAURÍCIO MARTINES SALES, DSc. (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**



**PROF.ª MARTA PEREIRA DA LUZ, DSc. (ELETROBRAS FURNAS / PUC-Goiás)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

MARIA TEREZA DA SILVA MELO

Utilização de geossintéticos para controle de erosão superficial hídrica em face de talude, Distrito Federal, 2020. xxii, 152 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2020)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Geomanta

2. Erosão

3. Escoamento superficial

4. Chuva simulada

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, M. T. S. (2020). Utilização de geossintéticos para controle de erosão superficial hídrica em face de talude. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-161/20, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152 p.

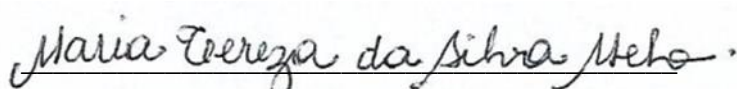
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maria Tereza da Silva Melo

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Utilização de geossintéticos para controle de erosão superficial hídrica em face de talude.

GRAU/ANO: Doutor/2020.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Maria Tereza da Silva Melo

mtsilvameo@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades que me concede a cada dia para meu crescimento espiritual com o objetivo de me tornar uma pessoa melhor aos Seus olhos. Obrigada pelas bênçãos recebidas!

Aos meus pais, Edwirges e Evilácio, pelo amor incondicional, pelo apoio, pelo cuidado e carinho em todos os dias da minha vida.

Ao meu querido esposo Cleber Melo e ao meu filho amado Bruno Antônio pelo apoio, incentivo e compreensão pelos momentos de minha ausência durante essa jornada.

Ao meu orientador, professor Ennio Marques Palmeira, por suas orientações, me ajudando a construir essa pesquisa, pela compreensão das minhas fragilidades e imperfeições. Por ser prestativo, ético e coerente em todas as suas atitudes. Obrigada pelo aprendizado!

Ao co-orientador professor Eder Carlos Guedes dos Santos por suas orientações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pela oportunidade de realização do curso de Doutorado em Geotecnia. Aos professores do Programa, em especial aos professores José Camapum de Carvalho e André Pacheco de Assis. Ao pessoal da secretaria da Geotecnia, em especial, Mariana, Brenda, Isabelle e Cida.

A todas as pessoas que colaboraram de forma direta ou indireta, em especial, a tia Cena, à minha irmã, aos meus irmãos e a minha prima Sheila Angélica.

Aos meus amigos e colegas da Geotecnia, que tanto me ajudaram durante este período, Carlos Cuartas, Débora, Michael, Manuelle Góis, dentre outros. Ao Thiago Augusto com o desenvolvimento do equipamento simulador de chuvas.

À Eletrobras Furnas pelo seu apoio, em nome de Renato Cabral Guimarães, Marta Pereira da Luz, Pedro, Renato Batista de Oliveira, Lucimar. Aos técnicos: Ademar, Helmar, Sílvio. Aos estagiários: Fernando Carolino, Rafael e Evanice. Ao Sr. Laudelino e Sr. Antônio. Ao pessoal da portaria e segurança.

À empresa Ingá Engenharia pelo apoio financeiro, representadas pelo Eng^o Arnaldo Teixeira Coelho e pelo Sr. Joaquim Coelho. Ao Eng^o João Victor.

Aos estagiários: Anna Marinella, Roniel e Ítalo pelo apoio e auxílio nos ensaios em Furnas e pela amizade. À ex-aluna, colega de profissão e amiga, Raísla, pelo auxílio em ensaios.

Ao colega de profissão Rideci de Jesus da Costa Farias pela ajuda na obtenção de materiais para pesquisa. À Maccaferri na pessoa do Sr. Itamar.

À Escola de Engenharia Civil e Ambiental - UFG Goiânia, aos professores do curso de Engenharia Civil, ao técnico de laboratório de Geotecnia, João Júnior pelo apoio nos ensaios.

Ao IESA-UFG representado pelos professores João Batista de Deus e Patrícia de Araújo Romão. E pelo técnico Lucas Espíndola Rosa no apoio à execução dos ensaios de granulometria a laser.

À Pró-Reitoria de Pós Graduação da UFG – Goiânia, na pessoa do Pró-Reitor, professor Laerte Guimarães Ferreira Jr. A professora Maria Helena e a Irakiles Pinheiro Souza.

À Universidade Federal de Goiás por me conceder o afastamento para a qualificação profissional. Ao Chefe da FENG (Faculdade de Engenharia), professor Antover Panazzolo Sarmiento e ao Subchefe professor Marco Paulo Guimarães. Aos colegas professores do curso de Engenharia Civil (Catalão–GO).

RESUMO

O estudo do comportamento do solo diante da ocorrência de precipitações é de suma importância para identificar o surgimento de processos erosivos em regiões com alterações no relevo, implantação de taludes e mudanças na ocupação do solo. A prevenção e a contenção dos processos erosivos podem ser executadas com a utilização de materiais geossintéticos. Esses materiais, quando utilizados como proteção da face em taludes expostos, minimizam ou eliminam a erosão superficial, o destacamento e o arraste dos grãos de solo. A utilização de materiais naturais ou sintéticos, sendo eles permanentes ou não, possibilitam a retenção da umidade e, por sua vez, ajudam na germinação de sementes, protegendo-as de ventos, chuvas e promovendo uma rápida e eficaz estabilização do conjunto solo/geossintético/vegetação. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo analisar a eficiência de geomantas como elemento de proteção de um solo submetido à chuva simulada em laboratório. Para esse fim, foram realizados ensaios com amostras de solo (coletado em talude) em uma caixa de grandes dimensões (1,0 x 1,0 x 0,15 m), com diferentes geomantas (sintéticas e biodegradáveis) e com o solo desprotegido. Também foram realizados ensaios em uma caixa de pequenas dimensões (0,3 x 0,3 x 0,1 m) com geomantas, com o solo desprotegido e com a introdução de vegetação artificial (em três densidades superficiais diferentes). Os parâmetros da chuva (intensidade, uniformidade e energia cinética) foram os mesmos para todos os ensaios. Com a realização dos ensaios foi possível identificar os valores de perdas parcial e total do solo analisado sem proteção e as influências das presenças de geomanta e da vegetação. Os ensaios com a caixa de grandes dimensões revelaram que uma das geomantas não obteve eficiência satisfatória para a contenção de sedimentos, apresentando um carreamento superior ao cenário com o solo desprotegido. Por outro lado, duas das geomantas investigadas praticamente não produziram sedimentos. Duas outras geomantas apresentaram uma eficiência razoável. Com o emprego da caixa de pequenas dimensões, duas das geomantas mostraram uma eficiência excelente em todas as condições ensaiadas. A presença da vegetação artificial reduziu a quantidade dos sedimentos em todas as situações analisadas, sendo verificada uma eficiência diretamente relacionada com a densidade da vegetação. Os resultados obtidos permitiram identificar fatores relevantes para o desempenho das geomantas na redução da produção de sedimentos. Conclui-se que, nas condições analisadas, geomantas sintéticas e biodegradáveis mostraram-se eficientes na contenção dos sedimentos, o que permite vislumbrar o emprego desses materiais no controle de processos erosivos.

ABSTRACT

Studies related to soil behavior and rainfalls are very important to identify the emergence of the erosive process in regions with changes in the landscape, slope implementation and changes in the soil occupation. The containment of erosive processes can be performed with the usage of geosynthetic materials. When these materials are used as a protection for the exposed slopes, they minimize or eliminate the superficial erosion, the detaching and the dragging of the soil grains. The use of natural or synthetic materials, permanently or not, enables the humidity retention, and therefore, they help with the seeds germination and shelter them from the storms and windy weather; in this way, they provide an efficient stabilization of the ground, the geosynthetics and the vegetation. This research is aimed to analyze the efficiency of geomats as an element of the protection of a soil submitted to simulated rain in the laboratory. For this purpose, tests were carried out with soil samples (collected from a slope) in a large box (1.0 x 1.0 x 0.15 m), with different geomats (synthetic and biodegradable) and with the unprotected soil. Tests were also carried out in a small box (0.3 x 0.3 x 0.1 m) with geomats, with the soil, also, unprotected and with the introduction of artificial vegetation (in three different surface densities). The rain parameters (intensity, uniformity and kinetic energy) were the same for all tests. With the performance of the tests it was possible to identify the values of partial and total losses of the analyzed soil without protection and the influences of the presence of geomat and vegetation. The tests with the large box revealed that one of the geomats did not obtain satisfactory efficiency for the containment of sediments, presenting a higher transport than the scenario with unprotected soil. On the other hand, two of the investigated geomats produced practically no sediment. Two other geomats were reasonably efficient. With the use of the small box, two of the geomats showed excellent efficiency in all conditions tested. The presence of artificial vegetation reduced the amount of sediment in all situations analyzed, with an efficiency directly related to the density of the vegetation. The results obtained allowed the identification of relevant factors for the performance of geomats in reducing sediment production. It is concluded that, under the conditions analyzed, synthetic and biodegradable geomats proved to be efficient in containing sediments, which allows us to glimpse the usage of these materials in the control of erosion processes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ASPECTOS GERAIS.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.3	ESTRUTURA DA TESE	2
2	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	4
2.2	PROCESSOS EROSIVOS	6
2.2.1	FLUXO SUPERFICIAL	7
2.2.2	PRECIPITAÇÃO	8
2.2.3	DECLIVIDADE.....	9
2.2.4	EROSÃO SUPERFICIAL.....	10
2.2.5	ERODIBILIDADE.....	11
2.2.6	VEGETAÇÃO	13
2.3	GEOSSINTÉTICOS	14
2.3.1	TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS.....	15
2.3.2	GEOMANTAS.....	18
2.3.3	BIOMANTAS	19
2.3.4	AÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS CONTRA PROCESSOS EROSIVOS.....	20
2.3.5	INSTALAÇÃO EM TALUDES	24
2.4	SIMULADORES DE CHUVA	26
2.4.1	TIPOS DE SIMULADORES	26
2.4.2	UTILIZAÇÃO DOS SIMULADORES	28
2.4.3	ENSAIOS PARA SIMULAÇÃO DE CHUVA.....	29
2.5	PARÂMETROS DA CHUVA SIMULADA	30
2.5.1	UNIFORMIDADE DA CHUVA	31
2.5.2	INTENSIDADE DA CHUVA	32

2.5.3	DIÂMETRO DAS GOTAS	33
2.5.4	ENERGIA CINÉTICA.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	35
3.1.1	GEOSINTÉTICOS.....	35
3.1.2	SOLO	37
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E COMPACTAÇÃO.....	39
3.2.1	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO A SER UTILIZADO NO ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA	39
3.3	CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO.....	41
3.4	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	42
3.4.1	PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO	42
3.4.2	EXECUÇÃO DO ENSAIO NA CONDIÇÃO DE UMIDADE NATURAL	43
3.4.3	EXECUÇÃO DO ENSAIO NA CONDIÇÃO INUNDADA	43
3.5	ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER.....	44
3.6	ENSAIO DE INDERBITZEN.....	45
3.7	EQUIPAMENTO SIMULADOR DE CHUVA	46
3.7.1	DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	46
3.7.2	ASPERSORES	50
3.7.3	DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	51
3.8	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CHUVA	52
3.8.1	UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA	52
3.8.2	INTENSIDADE DA CHUVA	53
3.8.3	DIÂMETRO DAS GOTAS DA CHUVA	54
3.8.4	VELOCIDADE TERMINAL E TEMPO DE QUEDA	60
3.8.5	ENERGIA CINÉTICA DA CHUVA.....	61
3.9	CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CHUVA.....	61

3.9.1	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE CHRISTIANSEN (CUC)	61
3.9.2	DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DA CHUVA	64
3.9.3	DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DA GOTA	66
3.9.4	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE TERMINAL E DO TEMPO DE QUEDA.....	69
3.9.5	DETERMINAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA DA CHUVA.....	69
3.9.6	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CHUVA PARA A CAIXA DE 0,3 X 0,3 M	70
3.9.7	DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE E INTENSIDADE DA CHUVA PARA A CAIXA ACRÍLICA 0,3 X 0,3 M	71
3.10	ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 1,0 X 1,0 M ..	71
3.10.1	PREPARAÇÃO DO SOLO PARA O ENSAIO	71
3.10.2	PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DO ENSAIO TESTE.....	72
3.10.3	REPAROS NO EQUIPAMENTO APÓS O ENSAIO TESTE	73
3.10.4	PREPARAÇÃO DA CAIXA ACRÍLICA	74
3.10.5	COMPACTAÇÃO PARA OS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVA.....	74
3.10.6	SEQUÊNCIA PARA OS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVAS.....	76
3.10.7	INSTALAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	77
3.10.8	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVA.....	78
3.11	ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 0,3 X 0,3 M ..	79
3.11.1	VEGETAÇÃO ARTIFICIAL	81
4	RESULTADOS E ANÁLISES - SOLO.....	86
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E COMPACTAÇÃO.....	86
4.2	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO PARA O ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA.....	87
4.3	MASSA ESPECÍFICA APARENTE COM EMPREGO DA BALANÇA HIDROSTÁTICA	88

4.4	CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO	88
4.5	ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	90
4.6	CÁLCULO DA ESTABILIDADE DE TALUDES	92
5	RESULTADOS E ANÁLISES DA INTENSIDADE DE EROÇÃO	93
5.1	ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 1,0 X 1,0 M.....	93
5.1.1	ANÁLISE VISUAL DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVA E DA CONDIÇÃO DO SOLO APÓS O ENSAIO	93
5.1.2	UMIDADE E ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO.....	98
5.1.3	QUANTIDADE DE SOLO ERODIDO DURANTE A CHUVA SIMULADA	99
5.2	GRANULOMETRIA A LASER DO MATERIAL ERODIDO	106
5.2.1	SOLO SEM PROTEÇÃO COM INCLINAÇÃO DE 25° E 45°	106
5.2.2	SOLO COM PROTEÇÃO DE GEOMANTAS COM INCLINAÇÃO DE 25°	109
5.3	ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DO MATERIAL ERODIDO.....	112
5.4	ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 0,3 X 0,3 M.....	113
5.4.1	CONDIÇÃO DO SOLO APÓS O ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA	113
5.4.2	UMIDADE E ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO.....	115
5.4.3	ANÁLISE DA PERDA DE SOLO DURANTE A CHUVA SIMULADA.....	116
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
	ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma com os fatores e causas da taxa de erosão do solo. Fonte: Adaptado de Lal (2001)	7
Figura 2.2 - Formação de sulcos erosivos em talude de corte. Fonte: JORNAL SISDERESP (2016)	8
Figura 2.3 - Imagens de alguns geossintéticos. Fonte: Palmeira (2013).....	15
Figura 2.4 - Imagens de alguns tipos de geomantas. Fonte: Palmeira (2013).....	21
Figura 2.5 - Geossintéticos para contenção de erosões. Fonte: Marques & Geroto (2015).....	23
Figura 2.6 - Talude com aplicação de geomanta. Fonte: Maccaferri do Brasil (2013).....	24
Figura 2.7 - Representação esquemática de um simulador de chuva. Fonte: Abrantes & Lima (2012)	27
Figura 2.8 - Esquema da construção de um simulador de chuva. Fonte: Ribeiro <i>et al.</i> (2000).....	28
Figura 3.1 - Compactação da segunda camada de solo e detalhe da diferença de altura	40
Figura 3.2 - Preparação das amostras para o ensaio de sucção usado na definição da curva característica.....	41
Figura 3.3 - Vista das amostras em saturação	42
Figura 3.4 - Vista das amostras para o ensaio de curva característica do solo.....	42
Figura 3.5 - Detalhe da montagem da caixa de cisalhamento	43
Figura 3.6 - Vista do equipamento Mastersizer 2000 - Malvern	44
Figura 3.7 - Estado da amostra de solo durante o ensaio de Inderbitzen	46
Figura 3.8 - Modelo do SPCA desenvolvido por Mendes (2019).....	47
Figura 3.9 - Vista geral do simulador portátil de chuva por aspersão.....	47
Figura 3.10 - Detalhe dos orifícios e registro de saída dos sedimentos e água	48
Figura 3.11 - Vista geral do sistema hidráulico	48
Figura 3.12 - Vista dos equipamentos do sistema de automação.....	49
Figura 3.13 - Detalhe do conjunto bico aspersor, válvula solenoide e manômetro	49
Figura 3.14 - Vista de todos os componentes do sistema SPCA. Fonte: (Mendes, 2019).....	50
Figura 3.15 - Imagem do aspersor de pulverização quadrada utilizado nos ensaios. Fonte: Catálogo do fabricante	51
Figura 3.16 - Vista geral da caixa metálica e os copos para o ensaio de uniformidade.....	52
Figura 3.17 - Detalhes do chuveiramento com altura de 1,89 m	53
Figura 3.18 - Determinação da massa da água da gota pelas agulhas hipodérmicas	55
Figura 3.19 - Vista geral dos materiais utilizados para determinação dos grânulos utilizando as	

agulhas hipodérmicas	56
Figura 3.20 - Bandejas preparadas para determinação do diâmetro da gota e do grânulo.....	56
Figura 3.21 - Bandejas com os grânulos formados pelo gotejamento com as agulhas hipodérmicas	57
Figura 3.22 - Bandejas após gotejamento de água na farinha com intervalos de tempos diferentes na estufa.....	57
Figura 3.23 - Grânulos formados pelo peneiramento.....	58
Figura 3.24 - Vista da centralização da bandeja na caixa acrílica.....	58
Figura 3.25 - Detalhe do chuveiramento nas bandejas com farinha	59
Figura 3.26 - Detalhe do peneiramento dos grânulos formados pela farinha	59
Figura 3.27 - Detalhe da contagem dos grânulos formados pela farinha.....	60
Figura 3.28 - Diâmetro da agulha versus diâmetro da gota de água pelas agulhas hipodérmicas	66
Figura 3.29 - Relação massa da gota d'água e massa do grânulo	67
Figura 3.30 - Relação entre massa da gota de água e massa do grânulo pela metodologia de seco ao ar + estufa	67
Figura 3.31 - Relação entre massa da gota de água e massa do grânulo pela metodologia de seco ao ar.....	68
Figura 3.32 - Relação entre diâmetro da gota e volume acumulado com aspersor quadrado de ¼" na pressão de 70kPa pela metodologia seco ao ar	68
Figura 3.33 - Detalhes da preparação do ensaio para determinação do CUC	70
Figura 3.34 - Vista geral do solo sendo compactado na caixa acrílica	72
Figura 3.35 - Vista do solo compactado na caixa acrílica e a verificação do prumo e centro .	73
Figura 3.36 - Detalhe do aumento da calha e do número de orifícios para escoamento.....	74
Figura 3.37 - Colocação da geomembrana e colagem de areia no fundo e lateral da caixa.....	74
Figura 3.38 - Caixa acrílica utilizada para simulação de chuva por Egeli & Pulat (2011)	75
Figura 3.39 - Compactação do solo com a utilização da placa de madeira abaixo do soquete	75
Figura 3.40 - Detalhe da escarificação entre as camadas de solo	75
Figura 3.41 - Detalhe da instalação das geomantas na superfície do solo (Geomantas 1, 2 e 3)	77
Figura 3.42 - Detalhe da instalação das geomantas na superfície do solo (Geomantas 4 e 5).	77
Figura 3.43 - Disposição dos grampos colocados para fixar os geossintéticos no solo: (a) nove grampos, (b) vinte e cinco grampos	78

Figura 3.44 - Detalhes da bomba de vácuo para a retirada da água dos recipientes coletores.	79
Figura 3.45 - Detalhes dos sedimentos antes e depois da estufa.....	79
Figura 3.46 - Detalhe das ranhuras entre as camadas e da compactação	80
Figura 3.47 - Detalhe do solo descoberto e das geomantas na caixa acrílica 0,30 x 0,30 m: a) solo descoberto, b) Geomanta 2, c) Geomanta 3, d) Geomanta 5	81
Figura 3.48 - Densidade da vegetação artificial instalada nas geomantas e no solo nu.....	82
Figura 3.49 - Instalação da vegetação artificial no solo descoberto – Densidade 1	82
Figura 3.50 - Instalação da vegetação artificial no solo descoberto – Densidade 2.....	82
Figura 3.51 - Instalação da vegetação artificial no solo descoberto – Densidade 3.....	83
Figura 3.52 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 3 – Densidade 1	83
Figura 3.53 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 3 – Densidade 2	83
Figura 3.54 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 3 – Densidade 3	84
Figura 3.55 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 2 – Densidade 1	84
Figura 3.56 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 2 – Densidade 2	84
Figura 3.57 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 2 – Densidade 3	85
Figura 3.58 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 5 – Densidade 1	85
Figura 3.59 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 5 – Densidade 2	85
Figura 3.60 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 5 – Densidade 3	85
Figura 4.1 - Curva granulométrica com e sem defloculante	86
Figura 4.2 - Curva de retenção do solo obtida pela equação de ajuste de van Genuchten (1980)	89
Figura 4.3 - Envoltória de tensão para a condição de umidade natural	90
Figura 4.4 - Envoltória de tensão para a condição de inundada.....	90
Figura 4.5 - Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal na condição de natural..	91
Figura 4.6 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal na condição de natural	91
Figura 4.7 - Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal na condição inundada...	91
Figura 4.8 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal na condição inundada	92
Figura 5.1 - Detalhe da ruptura do solo durante ensaio de simulação de chuva – inclinação 45°	94
Figura 5.2 - Vistas da execução do ensaio de simulação de chuva na inclinação de 25°	94
Figura 5.3 - Condição do solo após o ensaio de simulação de chuva – ensaio controle, inclinação de 25°	94
Figura 5.4 - Detalhe do fluxo gerado entre a Geomanta 1 e o solo durante o ensaio	95

Figura 5.5 - Detalhe dos sulcos no solo após o ensaio com a Geomanta 1 fixada com 9 grampos	95
Figura 5.6 - Detalhe dos sulcos no solo após o ensaio com a Geomanta 1 fixada com 25 grampos	96
Figura 5.7 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 2.....	96
Figura 5.8 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 3.....	97
Figura 5.9 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 4.....	97
Figura 5.10 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 5.....	98
Figura 5.11 - Variação de umidade no solo após o ensaio de simulação de chuva.....	99
Figura 5.12 - Perda de solo durante o ensaio de simulação de chuva com o solo descoberto: (a) perda parcial, (b) perda acumulada.....	100
Figura 5.13 - Perda acumulada de solo durante o ensaio de simulação de chuva.....	101
Figura 5.14 - Quantidade de perda de solo durante o ensaio de simulação de chuva	102
Figura 5.15 - Quantidade de sedimentos acumulada com o tempo chuva	103
Figura 5.16 - Detalhe da Geomanta 1	104
Figura 5.17 - Perda de solo acumulada para o Ensaio Controle e Geomanta 1	104
Figura 5.18 - Variações da porcentagem de silte, comparando os sedimentos na inclinação de 25° e 45°	107
Figura 5.19 - Variação da quantidade de silte presente nos sedimentos para cada geomanta e com o solo nu	109
Figura 5.20 - Variação da quantidade de areia presente nos sedimentos com cada geomanta e com o solo nu	110
Figura 5.21 - Densidade da vegetação artificial instalada nas geomantas e no solo nu.....	113
Figura 5.22 - Condição do solo após os ensaios de chuveiramento com o solo nu (descoberto) e a Geomanta 3, com as três densidades de vegetação artificial	114
Figura 5.23 - Condição do solo após os ensaios de chuveiramento com as Geomantas 2 e 5, com as três densidades de vegetação artificial	114
Figura 5.24 - Quantidade de solo carregado durante o ensaio de simulação de chuva - solo nu e Geomanta 3	116
Figura 5.25 - Quantidade de solo carregado durante o ensaio de simulação de chuva - Geomantas 2 e 5	117
Figura 5.26 - Perda de solo total comparando as geomantas e o solo nu (a) e com vegetação artificial na densidade 1 (b).....	117

Figura 5.27 - Perda de solo total comparando as geomantas e o solo nu com vegetação artificial nas densidades 2 e 3.....	118
Figura 5.28 - Perda de solo total do solo nu e da Geomanta 2 variando as densidades das vegetações artificiais	118
Figura 5.29 - Perda de solo total das Geomantas 3 e 5 variando as densidades das vegetações artificiais.....	118
Figura 5.30 - Perda de solo total do solo nu e das geomantas com a utilização da vegetação artificial	119
Figura 5.31 - Perda de solo acumulada nos ensaios de simulação de chuva com o solo nu (a) e as Geomantas 2 (b), 3 (c) e 5 (d).....	120
Figura 5.32 - Porcentagem de redução da perda de solo do solo nu e das geomantas com as respectivas densidades de vegetação artificial	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características requeridas aos materiais em função da inclinação dos taludes. Fonte: Marques & Geroto (2015).....	18
Tabela 2.2 - Tipos e características grampos para fixação das biomantas. Fonte: Deflor (2004)	25
Tabela 2.3 - Quantidade de ensaios de simulação de chuva realizados por diversos autores ..	27
Tabela 2.4 - Síntese das condições de teste de acordo com diferentes autores. Fonte: Adaptado de Touze-Foltz & Zanzinger (2016).....	30
Tabela 2.5 - Características físicas de chuvas produzidas por diferentes simuladores de chuva. Fonte: Adaptado de Thomaz & Pereira (2014)	31
Tabela 3.1 - Detalhes das geomantas utilizadas nos ensaios.....	35
Tabela 3.2 - Normas adotadas para os ensaios das propriedades físicas das Geomantas	36
Tabela 3.3 - Massa por unidade de área das geomantas utilizadas na pesquisa.....	36
Tabela 3.4 - Espessura das geomantas utilizadas na pesquisa	37
Tabela 3.5 - Valores de transmissividade das geomantas utilizadas na pesquisa	37
Tabela 3.6 - Valores de permissividade das geomantas utilizadas na pesquisa.....	37
Tabela 3.7 - Valores de permeabilidade das geomantas utilizadas na pesquisa	37
Tabela 3.8 - Desempenho de aspersores de pulverização quadrada. Fonte: Catálogo do fabricante.....	50
Tabela 3.9 - Intensidade da Chuva em mm/h. Município Três Rios-RJ. Fonte: Cardoso et al. (2016)	54
Tabela 3.10 - Dados gerais para determinação do CUC e da intensidade de precipitação	62
Tabela 3.11 - Valores de pressão e volume para determinação do CUC e da intensidade de precipitação	62
Tabela 3.12 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,05 m – aspersor de ½”	62
Tabela 3.13 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,05 m desprezando os valores das extremidades – aspersor de ½”	63
Tabela 3.14 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ½”	63
Tabela 3.15 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ½” desprezando os valores das extremidades	63
Tabela 3.16 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ¼”	

.....	63
Tabela 3.17 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ¼” desprezando os valores das extremidades	64
Tabela 3.18 - Valores de intensidade de chuva para diferentes pressões com altura de chuva de 1,89 m.....	64
Tabela 3.19 - Valores de intensidade e CUC para diferentes pressões e aspersor com altura de chuva de 1,89 m	65
Tabela 3.20 - Valores de intensidade para diferentes pressões com altura de chuva de 1,05 m	65
Tabela 3.21 - Valores de intensidade e CUC para diferentes pressões e aspersor com altura de chuva de 1,05 m	65
Tabela 3.22 - Massa média das gotas e diâmetro médio da gota de água pelas agulhas hipodérmicas	66
Tabela 3.23 - Resultados do chuveiramento com o aspersor quadrado de ¼"para a pressão de 70 kPa durante 2 segundos nas bandejas de farinha de trigo na metodologia seco ao ar	69
Tabela 3.24 - Valores da velocidade terminal, tempo de queda e coeficiente de atrito para o aspersor quadrado de ¼ na pressão de 70 kPa pela metodologia seco ao ar.....	69
Tabela 3.25 - Valor da energia cinética para a chuva simulada e para chuva natural.....	70
Tabela 3.26 - Valores de CUC com altura de 1,89 m e aspersor de ¼” - caixa acrílica pequena	71
Tabela 3.27 - Valores de intensidade e CUC para altura de chuva de 1,89 m - caixa acrílica pequena.....	71
Tabela 4.1 - Resultados dos Ensaios de Granulometria	86
Tabela 4.2 - Resultados dos Ensaios de Massa Específica Real dos Grãos e Limites de Consistência e Compactação sem reuso na energia normal	87
Tabela 4.3 -Comparação entre a massa específica de campo e laboratório	88
Tabela 4.4 - Parâmetros para cálculo da estabilidade de talude.....	92
Tabela 4.5 - Cálculo do Fator de Segurança com e sem percolação de água.....	92
Tabela 5.1 - Variação de umidade do solo após o ensaio de simulação de chuva	98
Tabela 5.2 - Índices físicos do solo compactado na caixa acrílica 1,0 x 1,0 m.....	99
Tabela 5.3 - Eficiência dos tratamentos utilizados na superfície do solo	105
Tabela 5.4 - Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial para cada situação de ensaio	106

Tabela 5.5 - Distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos dos ensaios de simulação de chuva – solo nu com inclinação de 45°	108
Tabela 5.6 - Distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos dos ensaios de simulação de chuva – solo nu com inclinação de 25°	108
Tabela 5.7 - Distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos dos ensaios de simulação de chuva – solo + geomantas e solo nu, inclinação de 25°	111
Tabela 5.8 - Resumo dos resultados dos ensaios de Difração de Raios-X.....	112
Tabela 5.9 - Variação de umidade entre o topo e a base da caixa acrílica pequena.....	115
Tabela 5.10 - Valores dos índices físicos do solo compactado na caixa acrílica pequena.....	116
Tabela 5.11 - Porcentagem de redução dos sedimentos durante os ensaios de simulação de chuva	119
Tabela 5.12 - Eficiência da proteção nos ensaios de simulação de chuva com a caixa acrílica pequena.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHE:	Aproveitamento Hidrelétrico
ASTM:	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BOP:	<i>Biaxially Oriented Process Nets</i>
C.V.:	Coeficiente de variação
C:	Coeficiente de atrito com o ar
C:	Coeficiente de escoamento
c' :	Coesão efetiva
CBS:	<i>Concrete Block Systems</i>
CETESB:	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
cm:	Centímetro
cm ³ :	Centímetro cúbico
CUC:	Coeficiente de Uniformidade da Chuva de Christiansen
CV:	Cavalo vapor
D.P.:	Desvio padrão
D:	Diâmetro das gotas
D:	Diâmetro médio da gota
D ₅₀ :	Diâmetro médio para 50% das gotas de água
DDI:	Danificação durante a instalação
e:	Índice de vazios
EC:	Energia cinética
ECB:	Erosion Control Blankets
ECMN:	Erosion Control Meshes and Nets
EECA:	Escola de Engenharia Civil e Ambiental
ENE:	Direção leste-nordeste
EP:	Eficiência da proteção
FFR:	Fabric Formed Revetments
FR:	Fator de rendimento
FS:	Fator de segurança
g:	Aceleração da gravidade
g:	Gramas

GCL:	Geocompostos argilosos
GCS:	<i>Geocellular Containment Systems</i>
GO:	Goiás
H:	Altura da camada de solo
h:	Hora
H:	Horizontal
ha:	Hectare
i:	Inclinação dos taludes
I:	Intensidade da chuva
IESA:	Instituto de Estudos Sócio Ambientais
IGS:	<i>International Geosynthetics Society</i>
IP:	Índice de Plasticidade
kg:	Quilograma
kN:	Quilonewton
kPa:	Quilopascal
l:	Litro
LabGeo:	Laboratório de Geotecnia
m:	Massa média da gota
m:	Metro
M _a :	Massa de água da gota
M _A :	Massa por unidade de área
M _g :	Massa do grânulo
mg:	Miligrama
min:	Minutos
MJ:	Megajoule
ml:	Mililitro
mm:	Milímetro
n:	Número de copos coletores
n:	Número de gotas
n:	Porosidade
P&D:	Pesquisa e Desenvolvimento
PERMs:	<i>Permanent Erosion and Revegetation Materials</i>
PID:	Proporcional Integral e Derivativo

PVC:	Policloreto de vinila
RJ:	Rio de Janeiro
RPM:	Rotações por minuto
S:	Área de coleta (caixa)
S:	Grau de saturação
s:	Segundo
SPCA:	Simulador portátil de chuva por aspersão
T:	Tempo de queda em segundos
t:	Tempo de teste
TERMs:	<i>Temporary Erosion and Revegetation Materials</i>
TRM:	<i>Turf Reinforcement Matrix</i>
UFG:	Universidade Federal de Goiás
un:	Unidade
uT:	Unidade de Turbidez
v:	Velocidade de impacto das gotas
V:	Vertical
V:	Volume da água coletado
V:	Volume da gota de água
V _e :	Volume de água escoado na superfície
VEA:	Valor de entrada de ar
V _p :	Volume precipitado
w:	Umidade
w:	Umidade gravimétrica
w:	watt
w _L :	Limite de Liquidez
W _{ot} :	Umidade Ótima
w _p :	Limite de Plasticidade
\bar{X} :	Lâmina média precipitada pelo chuveiramento
X _i :	Lâmina d'água em cada copo
Z:	Altura de queda da gota de chuva simulada
β :	Ângulo do talude
ϕ :	Ângulo de atrito do solo
γ :	Peso específico do solo

$\gamma_{dm\acute{a}x.}$:	Densidade seca máxima
γ_s :	Peso específico seco
λ :	Comprimento de onda
μm :	Micrometro
π :	Pi (3,1415)
ρ_s :	Massa Específica Real dos Grãos
ρ :	Massa específica da gua

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

Nas regiões com alterações do relevo, seja pela mudança de ocupação do solo ou pela implantação de taludes, a análise do potencial erosivo do solo faz-se fundamental para observar a influência de tais alterações no desencadeamento de erosões. Com essa análise, realizada por ensaios em campo, em laboratório e pela utilização de ferramentas de mapeamento, torna-se possível, além da avaliação da suscetibilidade à erosão, executar a contenção de processos erosivos tão prejudiciais ao meio ambiente.

Em taludes de cortes ou aterros existe a possibilidade do desencadeamento de processos erosivos, principalmente se estiverem com as suas faces expostas. Diante disso, tais processos podem ser minimizados ou evitados com a colocação de proteção na face dos taludes. Existem diversos tipos de tratamento de face para essa função, como, por exemplo, a aplicação de proteções físicas poliméricas, conhecidas como geossintéticos, que podem ter propriedades que evitam o destacamento e o arraste dos grãos de solo, mantendo sua integridade.

Segundo Fernandes *et al.* (2009), países tropicais, inclusive o Brasil, têm necessidade de aperfeiçoar os métodos para recobrimento de taludes. Portanto, segundo os autores, pesquisas e estudos se tornam necessários para a melhoria da utilização e eficácia das alternativas de mercado para a diminuição dos impactos ambientais causados nas superfícies de solo expostas aos fenômenos erosivos.

Esta pesquisa é fruto da parceria entre a Universidade de Brasília e a Eletrobras Furnas com a finalidade de analisar a aplicação de geossintéticos para a contenção de processos erosivos em taludes a partir de ensaios de bancada. Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o solo proveniente do canal de adução da Barragem de Simplício, que está localizada entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro.

O estudo em questão faz parte como produto do Projeto de P&D da Aneel N° 0396006/2016, com o título: “Utilização de Técnicas de Bioengenharia em Solos para Fins de Controle de Processos Erosivos no Âmbito de Empreendimentos de Usinas Hidrelétricas, em Especial em Margens de Reservatórios” (PDF.16006.01), Ciclo 2016. Esse Projeto de P&D é desenvolvido pela Eletrobras Furnas juntamente com a empresa Ingá Engenharia e Consultoria Ltda.

Nesse contexto, como ferramenta de análise do comportamento do solo de taludes em

relação às precipitações, foram realizados ensaios de simulação de chuva em laboratório, considerando o talude na condição exposta e com a proteção de diferentes geossintéticos. No campo, foram executados vários tipos de tratamento na face dos taludes para a verificação das suas eficiências.

Nesta pesquisa utilizaram-se simuladores de chuva que foram aproveitados para estudos de escoamento superficial, infiltração e processo erosivo. Nos ensaios realizados as especificações de precipitação são importantes para caracterizar e controlar a duração do evento, a distribuição dos tamanhos das gotas, a velocidade e intensidade da chuva simulada, servindo para determinar a quantidade de solo carregado. Neste sentido, a fim de propor um sistema para conter os processos erosivos advindos do escoamento superficial em encostas e taludes, foram realizados ensaios de simulação de chuva em solo retirado de taludes de corte, para avaliar a diminuição do destacamento e carregamento do solo por meio da aplicação de geossintético e da cobertura vegetal artificial para proteção do talude.

1.2 OBJETIVOS

Como objetivo geral desta pesquisa tem-se a análise da eficiência de materiais geossintéticos, sintéticos e biodegradáveis, como proteção do solo para redução da produção de sedimentos devido a chuvas.

Os objetivos específicos desta pesquisa foram os seguintes:

- Desenvolver um roteiro de ensaio para utilização com o equipamento simulador de chuvas;
- Analisar o desempenho dos sistemas de proteção utilizados contra a perda de solo em ensaios de simulação de chuva;
- Comparar os desempenhos dos diferentes materiais utilizados nos ensaios de simulação de chuva; e
- Analisar a redução da perda de solo diante da implantação de vegetação com três diferentes densidades de distribuição superficial.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em cinco capítulos. A seguir, apresenta-se uma breve descrição do conteúdo de cada um.

O **Capítulo 1 – Introdução** apresenta os aspectos gerais da pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos, além da estrutura da tese.

O **Capítulo 2 – Revisão da Literatura** apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema, proporcionando o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

O **Capítulo 3 – Materiais e Métodos** apresenta todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os equipamentos utilizados, e descreve as metodologias e os procedimentos adotados para a execução dos ensaios.

O **Capítulo 4 – Resultados e Análises – Solo** apresenta os resultados dos ensaios realizados com o solo utilizado nesta pesquisa.

O **Capítulo 5 – Resultados e Análises da Intensidade de Erosão** apresenta os resultados obtidos e as análises dos ensaios de simulação de chuva.

O **Capítulo 6 – Conclusões** apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões para pesquisas futuras.

As **Referências Bibliográficas** e os **Anexos** finalizam a tese.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO DA LITERATURA

Processos erosivos causados pelo escoamento superficial em taludes expostos são comuns em diversas regiões do país, devido às condições atmosféricas de períodos secos e chuvosos, intensidades de chuvas e propriedades dos solos, provocando o destacamento e carreamento das partículas de solo da face. A análise do comportamento do solo frente a essas condições pode ser representada em ensaios de laboratório para simular a condição de campo e propor soluções para o problema.

A utilização dos geossintéticos na aplicação em taludes tem o objetivo de diminuir a vazão, o volume e a energia transferida para a superfície inclinada do terreno. Essas técnicas utilizadas visam atenuar os possíveis impactos na base do talude ou a jusante da área.

Desta forma, este capítulo procura apresentar conteúdos relevantes a respeito de processos erosivos e do uso de simulação de chuva como embasamento teórico para a parte experimental da pesquisa, elaborando um resumo da bibliografia estudada, de maneira sucinta e objetiva.

2.1 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

De acordo com Luiz *et al.* (2012), nos processos hidrológicos, após a ocorrência da precipitação, a infiltração está diretamente ligada ao estado do solo. O processo de escoamento superficial é o que mais sofre com as intervenções antrópicas no ambiente, tais como, desmatamento, desnudamento do terreno, incrustação do solo e impermeabilização por materiais, como cimento e asfalto nas áreas urbanas. Essas alterações no ambiente modificam o escoamento superficial, seja pelo aumento das vazões de pico nas estações chuvosas devido às impermeabilizações do solo, ou pela diminuição ou extinção da vazão de base nas estações de estiagem, representando o comprometimento da recarga do lençol freático.

A erosão superficial tem como fator determinante o escoamento das águas de chuva. A variação do escoamento é função da quantidade e da intensidade da chuva onde, quanto maior o escoamento, maior será a energia disponível para desencadear a erosão (Rego, 1978).

Na ocorrência de chuva, quando o solo está com baixa umidade, a capacidade de absorção da camada superior do solo é normalmente muito alta, provocando uma capacidade de infiltração muito elevada no primeiro momento, sendo normalmente superior à intensidade da precipitação. Portanto, toda precipitação inicial se infiltra no solo e a taxa de infiltração é

igual à intensidade da precipitação. A partir de certo tempo pode ocorrer uma diminuição na capacidade de infiltração do solo, que se tornará menor que a intensidade de precipitação e, assim, gerará um excesso de água na superfície, originando o escoamento superficial. (Formiga *et al.*, 2012).

Cancelli *et al.* (1990), analisando a perda de solo de uma determinada área, afirmam que a erosão real é causada mais pelo escoamento do que pelas chuvas diretas. Deve-se levar em consideração o mecanismo de escoamento para análise dos fenômenos de erosão em uma simulação laboratorial, sendo essa opção a melhor maneira de estudar esse fenômeno tanto no plano qualitativo e no quantitativo.

Castro (2011) discorre sobre o escoamento superficial que ocorre quando a água precipitada causa o encharcamento do solo, em que se observará o início da formação da lâmina de água, sendo que o coeficiente de escoamento (Equação 2.1) calculado como a razão entre o volume de água escoado na superfície (V_e) e o volume precipitado (V_p), que varia de 0 a 1.

$$C = \frac{V_e}{V_p} \quad (2.1)$$

O coeficiente de escoamento, de acordo com CETESB (1980), citado por Moura (2005), engloba os efeitos de infiltração, armazenamento, retenção, evaporação e interceptação, uma vez que esses efeitos comprometem a distribuição cronológica e a amplitude de pico do escoamento superficial direto. Esse coeficiente também é afetado pelo tempo de duração e intensidade da precipitação.

Guedes (2015) afirma que vários autores confirmam que, quanto mais impermeável é a área, maior será o valor do coeficiente de escoamento e, diante disso, afirmam a importância de se manter áreas e revestimentos permeáveis. O valor do coeficiente de escoamento também depende do tipo e estado do solo, presença de vegetação e as intensidades de chuvas de cada região analisada.

Estudos de Thomaz & Pereira (2013) realizados em estradas não pavimentadas para análise de escoamento superficial e sedimentos, verificaram que a produção do sedimento no leito da estrada foi elevada e essa produção de sedimento diminuiu com o tempo de precipitação. Já o escoamento superficial se manteve estável ao longo do tempo.

De acordo com Sadeghi *et al.* (2015), existem poucos estudos considerando o efeito escala em ensaios com variações de coberturas no escoamento superficial e na perda de solos.

Os autores realizaram ensaios com cobertura dos solos com palha de arroz, comparando os coeficientes de escoamento superficial. Os resultados revelaram uma redução maior para a menor área ensaiada. Contudo, as diferenças entre as áreas eram grandes, consistindo em uma de 0,25 m² e outra de 6 m². Em seu trabalho, Sadeghi *et al.* (2015) citam que os resultados verificaram a eficácia da cobertura do solo na redução da erosão por escoamento superficial em diversas escalas, apresentando uma relação linear entre a redução da erosão e o comprimento da cobertura do solo.

Até o estabelecimento de uma cobertura vegetal, o solo fica vulnerável às taxas de desagregação e transporte provocadas pela ação do impacto das gotas de chuvas e pelo escoamento superficial. Com isso, a estabilidade dos agregados presentes na superfície do solo é muito importante, pois sua fragmentação possibilita a liberação das partículas do solo, o que pode formar uma crosta superficial que diminui a infiltração e aumenta o escoamento superficial (Silva & Carvalho, 2002).

2.2 PROCESSOS EROSIVOS

Boardman (2006) escreve sobre erosões de uma forma crítica abordando os dados sobre o assunto com uma visão ampla, afirmando que a afluência de impulsos políticos, sociais e econômicos relacionados a erosões ainda são negligenciados. Várias questões relacionadas aos processos erosivos não estão somente na área científica, mas também nas áreas de ciências sociais e de gestão. Em diversas regiões do mundo a qualidade do solo vem diminuindo devido à erosão e à perda de nutrientes, aumentando, portanto, os custos de produção de alimentos. O autor fala ainda dos poucos progressos com o passar dos anos com as questões de renovação dos solos, custos da erosão, modelos para processos erosivos e a difícil tarefa de separar a erosão por fatores “naturais” da erosão acelerada induzida antropogenicamente.

Menezes & Pejon (2010) afirmam que o principal agente erosivo é a água, entre muitos fatores que vão influenciar esse processo, pois a água é capaz de modificar a estrutura do maciço com maior ou menor resistência dos solos, de acordo com suas propriedades. Os autores afirmam que os processos erosivos dependem de suas propriedades intrínsecas, de infiltração e capacidade de absorção para diversos teores de umidade, sendo que a capacidade de retenção de água dos solos é que determinará o grau de infiltração, pois, para uma mesma intensidade de chuva, quanto maior a infiltração menor será o escoamento superficial.

Lal (2001) mostra um fluxograma apresentando os fatores e causas dos processos erosivos. Como fatores ele cita erodibilidade do solo, erosividade climática, terreno e cobertura do solo. Além disso, o autor cita as causas como sendo econômicas, sociais e políticas. A Figura 2.1 ilustra com mais detalhes cada item citado pelo autor.

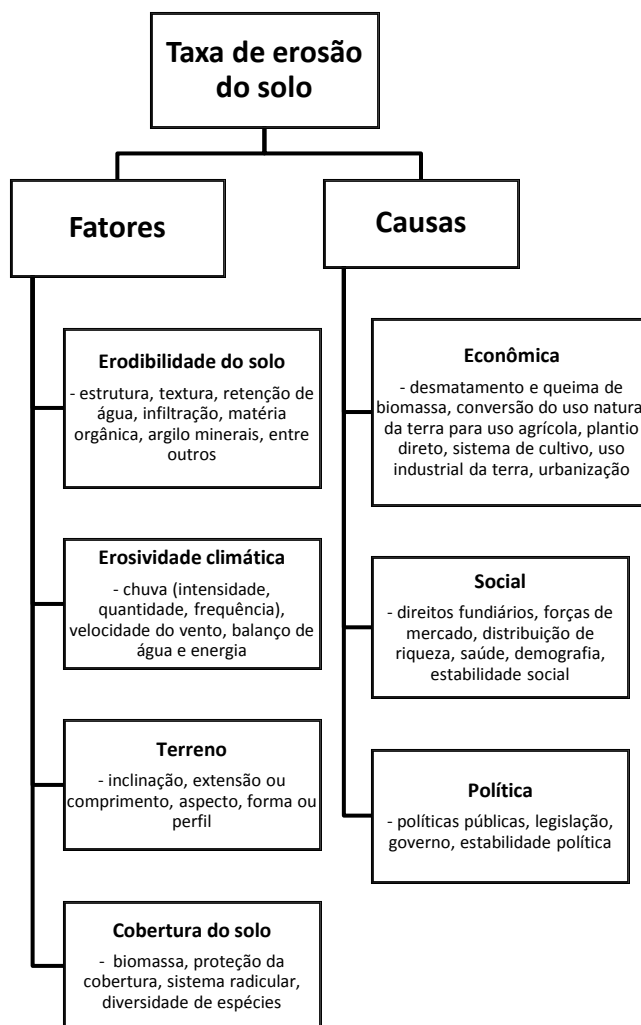


Figura 2.1 - Fluxograma com os fatores e causas da taxa de erosão do solo. Fonte: Adaptado de Lal (2001)

2.2.1 FLUXO SUPERFICIAL

O escoamento das águas de chuvas por fluxo superficial está diretamente relacionado à quantidade de infiltração da água no solo, sendo o processo de erosão superficial caracterizado pela remoção uniforme do solo ao longo da vertente. Dependendo da inclinação do talude ou encosta, ocorre o aparecimento de sulcos, podendo levar, com o passar do tempo, a outro tipo de erosão, de acordo com seu estágio de evolução (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006), conforme mostra a Figura 2.2.

De acordo com Touze-Foltz & Zanzinger (2016), a perda de solo devido à erosão causada pela chuva é uma combinação de desprendimento do solo e transporte imediato, sendo, nesse caso, os dois agentes principais os impactos das gotas de chuva e o fluxo superficial. E, quando a intensidade da precipitação excede a permeabilidade atual do solo nu, a água excedente correrá talude abaixo como fluxo superficial transportando as partículas de solo desprendidas pelo impacto das gotas de chuva e pelo próprio fluxo.



Figura 2.2 - Formação de sulcos erosivos em talude de corte. Fonte: JORNAL SISDERESP (2016)

Na condição do solo seco, a perda de material é maior e, com o aumento da água no solo, diminui a sua resistência ao cisalhamento e o solo fica mais vulnerável ao fluxo de água (Ngezahayo *et al.*, 2019; Thomaz, 2012). Ademais, a influência da sucção na resistência ao cisalhamento diminui à medida que o teor de umidade do solo diminui (Campos & Motta, 2015).

A quantidade de água e solo perdida pelo escoamento superficial, quando forma o sulco no solo, dá início a um canal de condução das partículas já desagregadas e em movimento. Nesse caso, o transporte de agregados é maior devido à energia do fluxo (Ferreira *et al.*, 2010).

2.2.2 PRECIPITAÇÃO

Atualmente, a precipitação é um dos fatores mais importantes para ser considerado em um plano de urbanização, pois o fluxo de água gerado pela precipitação deve ser disciplinado evitando problemas, tais como erosão, alagamento e inundação. Os mais importantes tópicos

para a análise da precipitação são a sua intensidade e a sua distribuição, que são definidos pelo volume de água distribuído entre a infiltração e o escoamento superficial (Camapum de Carvalho *et al.* 2012).

A precipitação em forma de chuva é a principal responsável pela origem do escoamento superficial no Brasil (Sousa Júnior, 2011; Rego, 1978). Esse escoamento superficial, na maioria das vezes provoca a erosão, dependendo do tipo de solo, inclinação e cobertura vegetal, sendo a intensidade da precipitação determinante para aumentar ou diminuir o volume e a velocidade do escoamento (Rego, 1978).

Conforme Cancelli *et al.* (1990), as precipitações que produzem grandes efeitos erosivos são caracterizadas por curta duração e alta intensidade. Nessa situação, após um curto intervalo de tempo, a camada superficial do solo fica completamente saturada e ocorre escoamento superficial, em que a cobertura vegetal tem importante papel no controle da erosão. Os autores afirmam também que um talude semeado deve ser protegido até que as gramíneas cresçam o suficiente para protegê-lo, essa proteção pode ser com geossintéticos compostos por fibras biodegradáveis.

Mariano (2015) afirma que solos expostos mostram que, para a mesma inclinação do talude e a mesma intensidade de precipitação, os solos com partículas de granulometria mais grossa apresentam maior resistência à erosão do que um solo com partículas de granulometria fina. O autor também expõe que, para a mesma intensidade de precipitação e mesmo tempo, a quantidade de solo erodido aumenta com o aumento da inclinação do talude.

Silva & Carvalho (2002), em suas pesquisas de campo, puderam observar que as perdas de massa de solo, por efeito de salpico, variaram proporcionalmente com a intensidade das precipitações ocorridas. Suas pesquisas analisaram as taxas de erosão por salpico para as condições de solo descoberto e com cobertura, onde essa taxa foi maior para o solo descoberto; já para a condição do solo com cobertura, as taxas de erosão por salpico foram inferiores.

Em ensaios de simulação de chuva foram observados que, quanto maior a intensidade da precipitação, maior o aumento do escoamento superficial, ocasionando uma maior capacidade de transporte de sedimentos do solo (Ferreira *et al.*, 2010).

2.2.3 DECLIVIDADE

Santos (2015) comenta em seu trabalho que a inclinação e o comprimento da rampa

estão diretamente ligados à velocidade de escoamento e ao volume de material escoado, sendo o comprimento da rampa a distância entre o ponto superior, onde tem início o fluxo, até o ponto inferior, no qual ocorre a deposição do material transportado. Não obstante, a perda de solo aumenta com o aumento do comprimento do declive.

No estudo sobre a susceptibilidade dos solos à erosão na área do entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica de Tombos – MG, Calderano Filho *et al.* (2014) expõem que o relevo é importante no processo erosivo, sendo a declividade o fator responsável pela maior ou menor infiltração da água no solo, afirmando que onde o relevo é plano não existe o arraste e o transporte das partículas de quaisquer classes de solo.

Segundo Amorim *et al.* (2001), a perda de solo devido ao aumento da declividade da superfície é atribuído a fatores como o aumento no desprendimento das partículas provocado pelo maior ângulo de impacto das gotas de chuva, maior facilidade de movimentação das partículas pelo efeito da gravidade e aumento da velocidade de escoamento superficial. Quando se tem uma declividade pequena da superfície do solo, o escoamento superficial ocorre com baixa velocidade e, como consequência, o transporte de sedimentos fica limitado à vazão de escoamento.

Quansah (1985), nos seus estudos com um simulador de chuva, analisou diversas declividades e observou que para valores menores que 10% o principal agente desencadeador do processo erosivo era o impacto da chuva no solo. Já para declividades maiores que 10% o escoamento superficial é que predominantemente provocava o destacamento das partículas do solo.

Ferreira *et al.* (2010) e Amorim *et al.* (2001) observaram, em seus estudos com um simulador de chuva em diferentes declividades, uma diferença na velocidade da água escorrendo na superfície do solo, decorrente da maior declividade, proporcionando uma maior energia cinética e, como consequência, uma maior capacidade de transporte de partículas do solo, ocasionando um aumento na sua perda.

2.2.4 EROSÃO SUPERFICIAL

Os tipos de erosões que existem são vários, geralmente classificados em quatro grandes grupos constituídos em: hídrico, eólico, glacial e organogênico. A classificação também abrange a forma de aparecimento dos processos erosivos como sendo natural ou geológica e antrópica ou acelerada (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

Segundo Mariano (2015), o homem, quando destrói a vegetação, contribui para acentuar o processo erosivo, sendo a vegetação importante na defesa do solo contra a erosão pelo vento e pela água, impedindo o impacto direto da chuva sobre o maciço e dificultando a erosão superficial.

Thomaz (2012) conclui que a erosão provocada pelo efeito “*splash*”, que representa o destacamento das partículas de solo, foi significativa em seus estudos e que o desprendimento de partículas a partir de uma superfície seca do solo foi mais que o dobro para o solo úmido. Almeida (2013) diz que, a diminuição da umidade causa um aumento na sucção, onde grande parte dos processos erosivos se inicia em solo não saturados.

De acordo com Mermut *et al.* (1997), a redução de materiais respingados pelo efeito “*splash*” pode ser explicada pelo desenvolvimento de um filme de água na superfície, que reduz o impacto da gota de água da chuva.

A taxa de erosão é definida por Magalhães (2001) como sendo a razão em que o solo é removido a partir de uma determinada área, expressa por peso ou volume do material erodido, por unidade de área e tempo. Essa definição contribui para a determinação da erosão nos ensaios de simulação de chuva.

Os parâmetros do solo, tais como, granulometria e coesão, são decisivos para a evolução do processo erosivo; a matéria orgânica do material e as partículas de argila são as primeiras frações do solo a serem desprendidas, sendo elas as porções mais ricas em nutrientes para as plantas e sua conservação (Magalhães, 2001).

Bertoni e Lombardi Neto (2010), comparando alguns solos, certificam que a granulometria é um dos fatores que mais influenciam na perda dos solos, principalmente quando relacionados à estrutura. Solos com textura argilosa e estrutura granular, como os latossos, apresentam melhores condições físicas e, conseqüentemente, maior resistência à erosão hídrica.

2.2.5 ERODIBILIDADE

Couto (2015) afirma que a erodibilidade pode ser definida como sendo a maior ou menor facilidade que as partículas de um solo possuem de serem destacadas e transportadas pela ação do agente erosivo, por exemplo, a água. Os primeiros modelos desenvolvidos sobre a erodibilidade eram empíricos, fundamentados nos fatores que influenciam a quantidade de solo removido e transportado. Esses modelos evoluíram e atualmente são nomeados de

modelos de processos, considerando mecanismos hidrológicos, hidráulicos e físicos, que interagem nos processos de erosão hídrica (Bastos, 1999).

De acordo com Bastos (1999), a susceptibilidade à erosão hídrica causada por fluxo superficial é uma das propriedades dos solos mais complexas devido ao grande número de variáveis intervenientes. Segundo Llopis Trillo (1999), citado por Gomes (2001), para formações sedimentares, a erodibilidade depende da textura, estrutura, capacidade de infiltração e teor de minerais. A textura é função da granulometria, representada pela curva granulométrica. A estrutura é a distribuição da parte sólida do solo e dos poros ocupados por água e/ou ar, essa distribuição determina as propriedades físicas do solo. A velocidade de infiltração depende da textura do solo, onde os solos arenosos possuem uma velocidade de infiltração maior, os solos siltosos com infiltração intermediária e os argilosos com valores menores. O fator mais importante a respeito dos componentes minerais do solo é a proporção de argila facilmente dispersiva (Gomes, 2001).

Conforme Bastos (1999), a taxa de erodibilidade dos solos é determinada por meio da razão entre a massa seca da porção erodida da amostra e a área superficial da mesma, variando entre solos de baixa erodibilidade, solos de mediana erodibilidade e solos de alta erodibilidade. Já a metodologia de Heidemann (2008) classifica como erodível o solo com perda de massa superior a 5%, considerando o ensaio com a amostra na condição de umidade natural e seca ao ar por 24 horas.

Segundo Correchel (2003), os solos argilosos são mais resistentes à erosão devido à ação da coesão. Já Heidemann (2008) observou, no seu trabalho de análise das curvas granulométricas, a ocorrência de uma maior concentração de finos nas amostras que apresentaram elevadas perdas de massa.

Para Menezes & Pejon (2010), a intensidade da erodibilidade depende do tipo de solo, e materiais com granulometria mais fina costumam ser menos erodíveis que os de granulometria grossa, devido às forças de coesão que dificultam o destacamento dos grãos de solo. Na literatura existe divergência entre diversos autores sobre qual tipo de material é mais susceptível à erosão quando é levada em consideração somente a sua granulometria. Shi *et al.* (2012) também descreve em sua pesquisa sobre relatos conflitantes na literatura a respeito da fração granulométrica dos sedimentos.

Almeida (2013) observou em sua pesquisa que a maior erodibilidade do solo ocorreu em amostras secas que foram saturadas, devido ao escoamento superficial da água ou inundação. Assim sendo, a erodibilidade do solo sofreria um aumento no início do período

chuvoso, correspondendo à ação das chuvas intensas e baixo grau de saturação. Portanto, a erodibilidade está relacionada ao ciclo pluviométrico da região.

Em vista do exposto, a análise do potencial erosivo do maciço é de grande importância para projetos que envolvam o comportamento do solo em determinadas condições de solicitação, buscando soluções de prevenção e mitigação das erosões.

2.2.6 VEGETAÇÃO

De acordo com Fernandes (2004), as metodologias que se destacam para proteção do solo e estabelecimento de vegetação em taludes de corte em estradas são: placa de grama, plantio em covas ou semeadura, hidro-semeadura, sacos de aniagem e geossintéticos.

A vegetação possui um efeito estético na face de taludes terrosos, além de sua ação contra a erosão, sendo empregada em diferentes obras de engenharia, em taludes de corte ou de aterro e em taludes naturais, para diminuir o impacto visual, quando da sua ausência (Mariano, 2015).

De acordo com Coelho (2007), a utilização de vegetação para controle de processos erosivos não possui resultados efetivos em todas as situações aplicadas, mas a vegetação exerce efeitos de proteção mecânica e hidrológica. A vegetação também se torna importante na transferência da água da atmosfera para o solo, na infiltração da água e na drenagem superficial, alterando o padrão de volume e intensidade do escoamento relacionado à erosão.

Segundo Zhang *et al.* (2019), o efeito hidráulico mais facilmente reconhecido pelo uso de vegetação para conservação do solo é a precipitação que é interceptada pela planta e suas raízes, o que evita a erosão do solo por gotas de chuva e escoamento superficial. Os autores também dizem que o efeito mecânico mais benéfico da vegetação é o reforço do solo pela ancoragem das raízes, aumentando a coesão aparente do solo e a estabilidade da camada superficial instável. A desvantagem é que, dependendo do tipo da planta, o seu peso adiciona carga à superfície do solo e diminui a estabilidade do talude.

Mariano (2015) diz que a remoção da cobertura vegetal dos taludes gera um aumento dos efeitos instabilizadores, independente da intensidade dos agentes envolvidos. O revestimento dos taludes com vegetação favorece a integração paisagística, diminuindo o impacto ambiental gerado pelas ações antrópicas. Por essas e outras razões torna-se importante a cobertura vegetal apropriada nos taludes.

Guerra (2015) descreve a utilização de simuladores de chuva em campo com cobertura

vegetal onde, a partir de 30% de cobertura do solo, há uma redução significativa de escoamento superficial, tornando-se mais difícil a formação de processos erosivos na superfície do terreno.

Ferreira *et al.* (2010) utilizaram simulador de chuvas com o objetivo de analisar a perda de solo com diferentes declividades e coberturas, constatando que a adoção de práticas conservacionistas adequadas para o controle da erosão se fazem necessárias, dentre elas a proteção do solo com cobertura vegetal, terraceamentos, plantios em contorno, cordões vegetados etc. Seus resultados mostraram que a cobertura vegetal protegeu o solo contra o impacto da gota de chuva, diminuindo a energia cinética, evitando a desagregação e a formação da camada de selamento superficial.

2.3 GEOSSINTÉTICOS

Há muito se vem utilizando geossintéticos na contenção de maciços de terra e de processos erosivos. Para Marques & Geroto (2015), os geossintéticos passaram a compor o rol de materiais de construção empregados em obras de engenharia, trazendo grandes vantagens para solucionar problemas diversos em situações específicas, com prazo de execução reduzido, diminuição de custos, controle na qualidade dos serviços e aumento no período de manutenções periódicas.

Segundo a ABNT NBR ISO 10318-1:2018, “geossintético é um termo genérico para descrever um produto em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil”.

Bezerra & Costa (2012) dizem também que, os geossintéticos utilizados em soluções geotécnicas e de proteção ambiental, exercem as funções de filtração, drenagem, contenção de fluidos/gases, reforço, separação, barreira e proteção.

A grande maioria das aplicações em controle de erosões é por meio dos geossintéticos em taludes de cortes e aterros, margens de canais e de cursos d'água (Marques & Geroto, 2015). Esses autores também citam outro grande grupo de aplicação dos geossintéticos, que são as barreiras de contenção e controle de sedimentos, chamadas de *silt fences*.

Melo (2016) afirma que os geotêxteis normalmente são usados em obras geotécnicas para proteção superficial de taludes e canais, agindo como barreira de proteção do solo contra a ação erosiva do vento e da água, diminuindo a velocidade da água que escorre sobre as

superfícies do solo e evitando o transporte das partículas. Os geotêxteis também podem ter a função de reforço do solo em áreas com susceptibilidade à erosão ou já erodidas.

Segundo Marques & Geroto (2015), os geossintéticos utilizados para exercer a função de controle de processos erosivos devem ter propriedades de reter os finos dos solos subjacentes ou dos materiais transportados, combater as velocidades de escoamento e os esforços tangenciais gerados pelo fluxo superficial.

2.3.1 TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

Conforme a IGS (2015), os geossintéticos são classificados em categorias segundo o processo de fabricação, sendo que as denominações mais usuais são: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompostos, geocompostos argilosos (GCL), tubos geossintéticos, geocélulas e geoexpandidos. A Figura 2.3 mostra alguns tipos de geossintéticos.

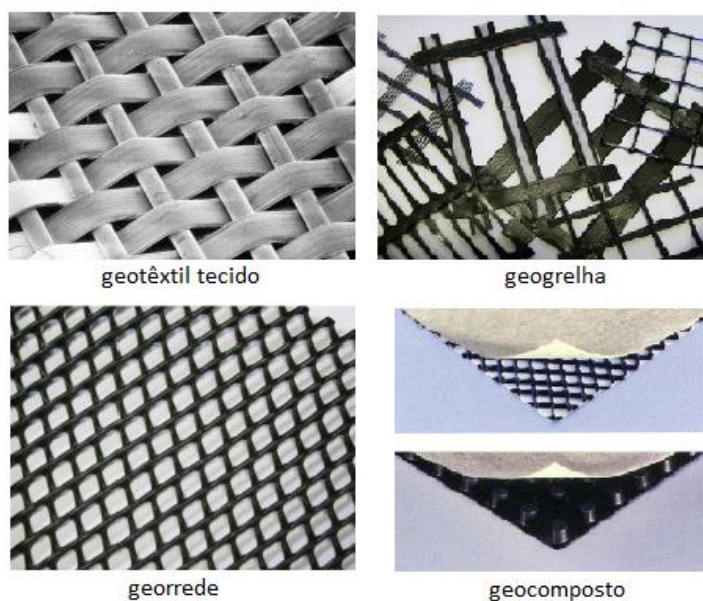


Figura 2.3 - Imagens de alguns geossintéticos. Fonte: Palmeira (2013)

Bueno & Vilar (2015) apresentam os ensaios que são executados com geotêxteis e que também podem ser aplicados a outros tipos de geossintéticos, que são divididos em quatro categorias, sendo elas os ensaios para determinação das propriedades físicas, propriedades mecânicas, propriedades hidráulicas e ensaios de desempenho.

Farias (2005) afirma que as principais propriedades físicas dos geotêxteis são a massa

por unidade de área, a porosidade e a espessura, e que o conhecimento dessas propriedades tem como objetivo principal a caracterização e o controle de qualidade do produto. Em relação às propriedades mecânicas dos geotêxteis, têm-se a compressibilidade, resistência à tração, resistência à perfuração, resistência à propagação do rasgo e flexibilidade, que servem para controlar a qualidade do material e o comportamento em condições de solicitação para parâmetros de projetos. Finalmente, as propriedades hidráulicas são relevantes para a utilização do material em filtração, drenagem e separação, devendo-se conhecer as permeabilidades da manta e sua porometria.

Os geossintéticos 100% sintéticos são amplamente utilizados para estabilizar e prevenir a erosão do solo, quando bem projetados, de acordo com as necessidades geotécnicas do talude. As principais vantagens desse tipo de geossintético são a não biodegradabilidade, maior durabilidade, ótima processabilidade, facilidade de uso e custo baixo. Entre as principais desvantagens estão a possibilidade de fotodegradação, baixo coeficiente de atrito entre solo e geossintético, densidade inferior à da água e estrutura fechada restringindo o crescimento de vegetação (Basu *et al.*, 2019).

Os geossintéticos em uma obra geotécnica podem desempenhar mais de uma função de acordo com a sua utilização. Entre elas, têm-se as funções de impermeabilização, filtragem, drenagem, separação, reforço, proteção e controle de erosão. Na função de controle de erosão, o geossintético também pode agir como reforço, proteção e impermeabilização do terreno, controlando o destacamento e o escoamento de materiais, com o bloqueio ou desvio do fluxo (Barrela, 2007).

De acordo com Shukla & Yin (2006), citado por (Barrela, 2007), os geossintéticos apresentam características não corrosivas, resistentes à degradação química e biológica, alta flexibilidade, espessura e volume reduzidos, facilidade no transporte e rápida instalação. Apesar de todas essas vantagens, não se deve esquecer os cuidados com o manuseio e armazenamento dos produtos para não causar danos à sua utilização.

A danificação dos geossintéticos pelos efeitos das operações de construção e instalação dos produtos nas obras deve ser analisada com responsabilidades, sendo de grande importância, pois durante a instalação pode-se induzir alterações nos materiais, condicionando a resposta dos geossintéticos.

Normalmente, no dimensionamento das estruturas com geossintéticos são utilizados fatores de redução da resistência devido à danificação durante a instalação e degradação ao longo do tempo, o que pode comprometer o comportamento mecânico dos geossintéticos a

curto e longo prazos. Para uma interpretação mais fácil dessas consequências da danificação durante a instalação (DDI) nos geossintéticos, Paula (2003) apresenta uma relação entre o geossintético e o seu dano associado. O autor descreve o dano do material de acordo com a sua gravidade, como perda de resistência e a redução da eficácia no caso de perfurações, deixando de cumprir sua função para grandes aberturas.

A função de utilização dos geossintéticos aplicados a processos erosivos visa diminuir o tempo de escoamento, a perda de solo e aumentar a concentração de sedimentos retidos e a infiltração, ou seja, levar a uma redução do coeficiente de escoamento superficial.

Cabe salientar que, na utilização dos geossintéticos, as soluções são de baixo custo se comparadas a outras soluções tradicionais e ambientalmente corretas, podendo proporcionar uma aparência estética melhor ao meio ambiente.

Os materiais que têm a função de servir de cobertura da superfície do solo e de sementes contra o efeito do impacto da chuva e ações de outros agentes até o crescimento da vegetação de forma temporária são denominados TERM (*Temporary Erosion and Revegetation Materials*). Os materiais do grupo que se mantêm intactos, mesmo após o crescimento da vegetação, são denominados PERM (*Permanent Erosion and Revegetation Materials*). A escolha do sistema a ser adotado leva em consideração as vantagens e desvantagens de cada um, como também o custo e a eficiência dos projetos (Barrela, 2007).

Marques & Geroto (2015) descrevem um grupo de geossintéticos com suas características e condicionando o seu emprego em função da inclinação dos taludes, oferecendo condições de estabilidade à solução adotada em projetos (Tabela 2.1). Esses aspectos técnicos, juntamente com os econômicos, têm papel decisivo na escolha de determinada técnica ou sistema a ser aplicado. De modo geral, o tipo de solução e de geossintético, sendo ele classificado como TERM ou PERM, interfere diretamente nos custos envolvidos na implantação do sistema. Finalizando, os autores afirmam que, quanto mais resistentes e duráveis forem os geossintéticos, maiores serão os custos para implantação da solução.

Existem produtos geossintéticos bidimensionais que são instalados em contato com a superfície do solo, protegendo-a contra o impacto da chuva, reduzindo a energia cinética das gotas e impedindo o desprendimento das partículas do solo. Por esses motivos, tais produtos são empregados para proteção de taludes contra a erosão hídrica, protegendo efetivamente os taludes contra a erosão, e têm efeito positivo no desenvolvimento da vegetação (Nguyen *et al.*, 2019).

Tendo em vista informações apresentadas, pode-se concluir que a utilização adequada de geossintéticos contribui na contenção dos processos erosivos, diminuindo o escoamento e carregamento de partículas sólidas do solo, aumentando a infiltração e mantendo o solo aderido ao sistema de proteção executado.

Tabela 2.1 - Características requeridas aos materiais em função da inclinação dos taludes. Fonte: Marques & Geroto (2015)

Características requeridas aos materiais em função da inclinação dos taludes					
Grupo/geossintéticos		$i \leq 20^\circ$	$20^\circ \leq i \leq 30^\circ$	$30^\circ \leq i \leq 45^\circ$	$i \geq 45^\circ$
<i>ECMN</i>	Fibras torcidas e mantas de PP ou fibras naturais	Sem exigência significativa	Materiais com maior resistência à tração e maior densidade de grampos	Materiais reforçados e elevada densidade de grampos	Estudos específicos dos materiais e método de fixação nos taludes
<i>ECB</i>	Geomantas ou geogrelhas aderidas a fibras vegetais				
<i>BOP</i>	Georredes e geogrelhas		Sem exigências significativas	Utilizar geossintéticos mais resistentes e maior densidade e comprimento dos grampos	
<i>TRM</i>	Geomantas, os geotêxteis e geogrelhas tridimensionais		Avaliar resistência à tração do material empregado (caso das biomantas)	Utilizar geossintéticos mais resistentes (ou reforçados) e maior densidade de grampos	Estudos específicos dos materiais e método de fixação nos taludes
<i>ECRM</i>	Geocompostos constituídos por geomantas ou geotêxteis e solo				
<i>GCS</i>	Geocélulas preenchidas com solo		Sem exigências significativas	Avaliar estabilidade. Utilizar geocélulas com menor espaçamento e maior altura	Avaliar a possibilidade de instalação de geocélulas dispostas na horizontal (camadas)
<i>GCS</i>	Geocélulas preenchidas com brita ou concreto				
<i>FFR</i>	Geofôrmas preenchidas com solo ou argamassa		Avaliar a estabilidade ao deslizamento, a ancoragem e a resistência dos materiais	Avaliar estabilidade. Eventualmente alterar a disposição de montagem	Alterar o tipo de geofôrma (plana para volumétrica) e disposição de montagem
<i>CBS</i>	Geotêxteis combinados com elementos inertes e blocos				

Legenda: ECMN – Erosion Control Meshes and Nets; ECB – Erosion Control Blankets; BOP – Biaxially Oriented Process Nets; TRM – Turf Reinforcement Matrix; GCS – Geocellular Containment Systems; FFR – Fabric Formed Revetments; CBS – Concrete Block Systems

2.3.2 GEOMANTAS

De acordo com a ABNT NBR ISO 10318-1:2018, as geomantas possuem uma estrutura tridimensional permeável, com elementos sintéticos ou naturais, interligados mecanicamente e/ou termicamente, e/ou quimicamente.

A sua estrutura é formada por mais de 90% de vazios, e a sua utilização está associada à estabilização de taludes de corte e aterro, canais de irrigação, aterros ou canais de descargas. As especificações de uso são em função de algumas características tais como durabilidade,

espessura, porosidade, resistência à tração, deformação na ruptura e fotodecomposição (Santos, 2015).

Segundo Santos (2015), as geomantas são responsáveis por diminuir o impacto das gotas de chuva durante o escoamento superficial enquanto a vegetação não cresce, evitando a perda de umidade do solo e ajudando na germinação e fixação das sementes, e também, proteger contra a erosão eólica.

As geomantas são empregadas em solos com condições favoráveis à instalação de processos erosivos, tais como topografia acidentada, áreas desprotegidas e locais com ação de escoamento superficial, mantendo a umidade e retendo as partículas de solo e auxiliando na germinação das sementes (Melo, 2016).

Em comparação com o concreto projetado, as geomantas estabelecem uma proteção no talude baseado na cobertura superficial, mas não impermeabiliza o maciço, formando um revestimento flexível capaz de reduzir o impacto das gotas e o desprendimento das partículas do solo, com um custo em torno de 70% mais barato e considerada como uma solução sustentável com menores impactos ambientais e economia de recursos naturais (Santos, 2015).

Melo (2016) afirma ser necessária a realização de ensaios de permeabilidade na área onde a geomanta for aplicada para a garantia da estabilidade do talude e a verificação de obras de drenagem, sendo a infiltração da água no solo a principal verificação geotécnica. O tipo de vegetação selecionado também é importante, tornando-se necessário o estudo do clima e das características do solo para a escolha da vegetação adequada na área de aplicação da geomanta.

2.3.3 BIOMANTAS

Uma alternativa para o controle de erosão são as biomantas, que são produzidas a partir de materiais naturais, tais como fibras de coco, palha ou capim. A sua estrutura é semelhante as das geomantas e são biodegradáveis, diminuindo o impacto ambiental e atribuindo sustentabilidade à obra (Santos, 2015).

Mariano (2015) fala sobre a ação de proteção imediata das biomantas que permite uma estabilidade quando da utilização com plantas, reforçando e entrelaçando o conjunto de plantas-solo e criando um sistema artificial de fixação das raízes no solo, justificando sua aplicação em taludes muito íngremes.

Contradizendo Mariano (2015), Santos (2015) diz que a solução em biomanta torna-se inviável para taludes muito inclinados, existindo também restrições no caso de solos com baixa coesão, devido à insuficiente estabilidade das camadas superficiais para a instalação da biomanta e áreas de fluxos hidráulicos como barrancos de rios e canais.

Melo (2016) também afirma que a biomanta não é aconselhada para utilização em taludes muito íngremes, pois neste caso, quando da ocorrência de chuva, a biomanta fica muito pesada e se desestabiliza na face do talude. Além disso, o autor descreve as principais vantagens de utilização da biomanta que são a proteção superficial de taludes contra intempéries, diminuição do escoamento superficial da água e abastecimento do solo com nutrientes, por ser um produto degradável servindo como matéria orgânica. Segundo Melo (2016), a biomanta apresenta um preço menor do que as geomantas.

Santos (2015) cita os problemas mais comuns no emprego de biomantas, que estão associados às deficiências no processo de armazenagem e instalação. Se as biomantas ficarem expostas durante a estocagem, estão sujeitas a sofrerem danos mecânicos e ambientais, que podem levar a inviabilização do material antes mesmo de sua aplicação.

Barrela (2007) comprovou que a biomanta constituída por fibra de coco é vantajosa para o controle de erosão em vertentes naturais. A erosão do solo foi reduzida pela associação da rede de fibras de coco com a vegetação, sendo a perda anual de solo cerca de 95% inferior à perda anual de solo de uma vertente desprotegida. A aplicação da biomanta melhorou a quantidade de matéria orgânica, teor de água e crescimento vegetativo nas vertentes protegidas por elas.

Segundo Basu *et al.* (2019), a fibra de coco é um material adequado para aplicação devido à sua lenta biodegradabilidade e alta disponibilidade com baixo custo. Marques & Geroto (2015) afirmam que as biomantas atuam como fonte de nutrientes para a vegetação e aceleram o desenvolvimento e a consolidação da mesma devido à sua característica biodegradável. Já os geossintéticos não degradáveis geram maior retenção da camada de solo fértil e da sementeira.

2.3.4 AÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS CONTRA PROCESSOS EROSIVOS

De acordo com Magalhães (2001), os processos erosivos podem ser contidos utilizando-se algumas interferências no ambiente onde eles se instalaram. Como exemplo, ele cita controlar a vazão do escoamento por meio de desvio ou condução das águas por

caminhos preferenciais, abater a declividade do terreno por meio de retaludamento ou instalação de obstáculos para diminuir a velocidade da água, alterando o terreno com a implantação de cobertura vegetal ou reforço da superfície do solo.

Farias (2005) faz referência aos primeiros usos de geossintéticos para controle de processo erosivo, que datam da década de 70. Os estudos mostram que esses materiais sintéticos podem ser usados substituindo filtros de materiais granulares, sendo utilizados para prevenção de erosão de material subjacente em uma camada de “rip-rap”, tendo resultados satisfatórios na contenção dos processos erosivos ocasionados por fluxo de águas subterrâneas, escoamento superficial, precipitação e ação de ondas (Carrol *et al.*, 1992).

Os geossintéticos utilizados no controle de erosão são geomantas, geocompostos, geocélulas, biomantas, tubos geotêxteis, geofôrmas e geotêxteis biodegradáveis, não sendo eles os únicos empregados com esse objetivo, mas que possuem função principal para esse tipo de interferência. Na Figura 2.4 são apresentados alguns tipos de geomantas utilizadas no controle de processos erosivos.

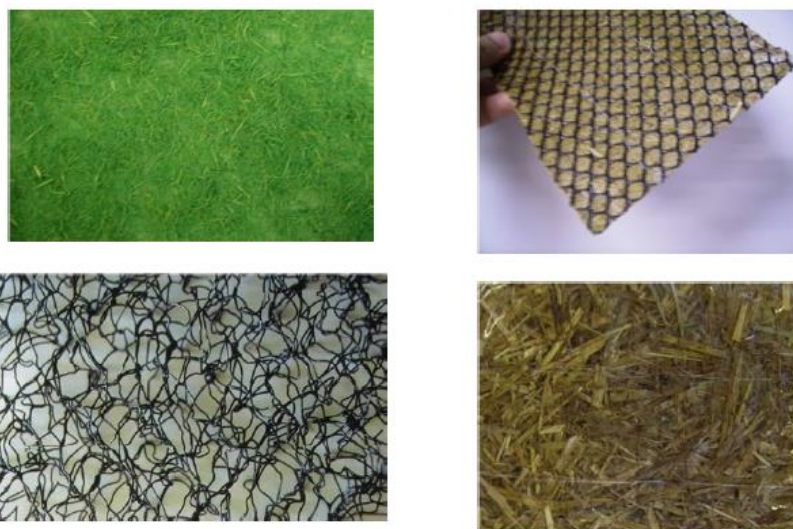


Figura 2.4 - Imagens de alguns tipos de geomantas. Fonte: Palmeira (2013)

Segundo Palmeira (2018), os taludes podem ser protegidos por geomantas ou geocélulas preenchidas com solo e vegetação, brita ou concreto, para controle do escoamento superficial.

Os geossintéticos também possuem vantagens em relação a outros produtos tradicionais de controle de erosão, tais como diminuição de peso, volume e espessura do sistema de proteção, instalação fácil e rápida, acomodação a recalques diferenciais e aumento da vida útil da obra (Barrela, 2007).

Farias (2005) ressalta que o uso combinado de geossintéticos e vegetação é um método de baixo custo e eficiente para controle de processo erosivo. No entanto, deve ser avaliada cada situação, pois se tem o tempo de crescimento da vegetação e interferências climáticas para validar a aplicação da solução que, se aprovada, é uma proteção contra a erosão superficial gerada por fluxo de água e impacto de gotas de chuva (efeito “*splash*”).

Como resultados dos ensaios realizados por Ogbobe *et al.* (1998), têm-se que os biogeotêxteis apresentam uma alta capacidade de absorção de água em relação ao geotêxtil convencional, apresentando, portanto, menores velocidades de escoamento. Observou-se que, após a estabilização da superfície do solo, a quantidade relativa de perda de solo tornou-se constante.

Farias (1999) obteve resultados favoráveis com a utilização de geotêxteis como barreiras para partículas sólidas do solo em estruturas de controle de erosões tipo barreiras de sedimentos (*silt fences*). O autor observou que o diâmetro das partículas de solo que atravessaram o geotêxtil foi significativamente menor que o esperado. Adotando como base os resultados fornecidos nos catálogos dos fabricantes, verificou-se também que os geotêxteis de baixa gramatura e baixo custo ensaiados podiam ser utilizados como solução para a retenção de partículas sólidas de solo provenientes de processos erosivos no Distrito Federal.

A Figura 2.5 ilustra de forma esquemática aplicações de geossintéticos no controle de processos erosivos, sendo elas barreiras de proteção superficial e de contenção. A cobertura da superfície do solo com material geossintético fornece uma superfície rugosa que retarda a velocidade de escoamento, promove a infiltração da água no solo e a deposição de sedimentos (Nguyen *et al.*, 2019).

Cancelli *et al.* (1990) constataram a função efetiva do geossintético em seus testes de erosão e escoamento com ação de confinamento. Eles discorrem que os geossintéticos têm a função de confinar o solo e evitar o deslizamento localizado do mesmo. Essa condição ocorre porque os produtos fornecem uma distribuição uniforme da água do escoamento superficial do solo, de maneira que a água não possui força suficiente para produzir sulcos profundos, como acontece no solo desprotegido. Embora a erosão possa ocorrer, ela será distribuída e não ocorrerão os sulcos no solo.

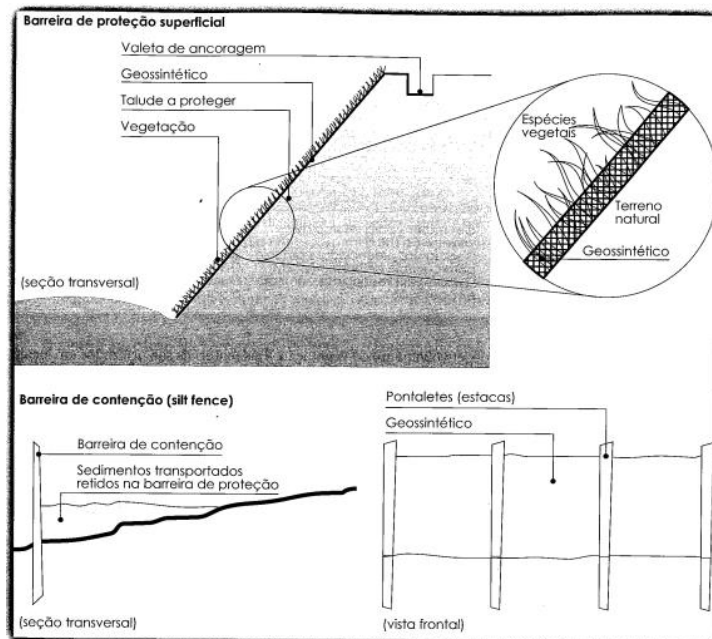


Figura 2.5 - Geossintéticos para contenção de erosões. Fonte: Marques & Geroto (2015)

Thomson & Ingold (1988), citados por Touze-Foltz & Zanzinger (2016), definem o fator de rendimento e a eficiência da proteção. O fator de rendimento (FR) é a razão entre o peso do solo erodido de uma parcela protegida e o peso erodido de uma parcela desprotegida nas mesmas condições, ou seja:

$$FR = \frac{\text{peso de solo erodido com proteção}}{\text{peso de solo erodido sem proteção}} \quad (2.2)$$

A eficiência da proteção (EP) é diretamente proporcional ao fator de rendimento, apresentada na Equação 2.3.

$$EP = (1 - FR) * 100 \quad (2.3)$$

Fernandes *et al.* (2009) fizeram alguns experimentos em campo para verificar a erosão superficial num talude de corte de estrada, localizado em Viçosa (MG). Os autores utilizaram uma combinação de tratamentos com geomantas com e sem vegetação, analisando o volume de água escoada e a massa de sólidos carregadas pelas chuvas. Esses experimentos revelaram uma tendência de redução da erosão com proteção superficial do solo, devido ao impedimento do impacto direto das gotas no solo.

Smets *et al.* (2011) verificaram, nos seus experimentos de simulação de chuva, que a precipitação que cai sobre os geotêxteis contribui diretamente para o escoamento superficial,

levando a uma diminuição da profundidade do escoamento em comparação com o tratamento do solo nu, onde a infiltração da água é maior.

2.3.5 INSTALAÇÃO EM TALUDES

Para a aplicação de geossintéticos em uma obra, a atenção ao processo construtivo é muito importante para o resultado final e para o que se espera do comportamento da estrutura solo-geossintético, de acordo com as condições específicas do local. A Figura 2.6 mostra um talude sendo revestido com uma geomanta tridimensional aplicada diretamente sobre o terreno já regularizado.



Figura 2.6 - Talude com aplicação de geomanta. Fonte: Maccaferri do Brasil (2013)

Para os sistemas com revestimento em enrocamento, Farias (1999) descreve os procedimentos que devem ser adotados na instalação de geotêxteis. Os procedimentos consistem na preparação da superfície de suporte do sistema de controle de erosão, regularização da superfície e remoção de materiais que dificultem a instalação do geotêxtil, verificação de sobreposições, costuras e espaçamento entre os mesmos. Também é necessário não provocar tensões no material durante a sua instalação, para que não ocorram danos. É importante verificar o ângulo de inclinação do talude para manter a estabilidade do sistema, evitar formação de rugas no geotêxtil e colocar as devidas ancoragens, quando necessárias.




Na verdade, todos os tipos de produtos geossintéticos utilizados para contenção de processos erosivos em taludes possuem uma sequência básica para instalação. Primeiro é a regularização do talude, retirando-se materiais de entulho ou outros que atrapalhem a boa

instalação do produto. Logo após, deve-se proceder a retirada de ondulações na superfície do solo para que o material esteja totalmente em contato com o maciço. A seguir, é necessário posicionar o produto no topo do talude, desenrolando a bobina até o pé do talude e fazer a ancoragem do material de acordo com as instruções do fabricante. E, posteriormente, fazer o plantio de gramíneas, onde são colocadas as sementes, fertilizantes e adubos para melhorar a condição do solo e beneficiar o desenvolvimento da vegetação.

Como comentado acima, para a instalação da biomanta, a superfície do talude deve estar regularizada para que elas fiquem totalmente aderidas à superfície. Essa regularização pode ser manual ou mecanizada, visando eliminar os sulcos erosivos e preencher os espaços vazios, para se evitar novos focos de erosão, desmoronamentos e escorregamentos (Deflor, 2004).

Como as biomantas são fornecidas em bobinas, elas devem ser instaladas a partir do topo do talude, desenrolando-as no sentido do pé do talude. Sua fixação deve ser com grampos, que devem ser especificados em quantidade e espaçamento de acordo com recomendação técnica estabelecida em projeto. A Tabela 2.2 mostra alguns tipos e características dos grampos para fixação das biomantas.

Tabela 2.2 - Tipos e características grampos para fixação das biomantas. Fonte: Deflor (2004)

Grampos	Tipo	Comprimento dos Grampos (cm) e Uso em Taludes (corte / aterro)					
		7,5	10,0	12,0	15,0	20,0	30,0
Aço		Corte	Corte	Corte	Aterro	Aterro	Aterro
Bambu		-	-	Corte	Corte	Aterro	Aterro
Madeira		-	-	-	Aterro	Aterro	Aterro

Santos (2015) discute sobre a importância da ancoragem ser bem feita e a quantidade de grampos, que devem ser adequada, conforme a inclinação do maciço, para que a manta vegetal não seja removida total ou parcialmente pela força da chuva, desprotegendo a área susceptível à erosão. Quanto maior a inclinação do maciço maior será a quantidade de grampos necessários para a fixação e completa adesão do produto à superfície do talude.

No caso de utilização de geotêxteis, Palmeira (2018) apresenta o cálculo de valores das forças de tração e atrito para que o geotêxtil tenha uma perfeita ancoragem no topo do talude. O geotêxtil também pode ser ancorado em cava, envolvendo sua extremidade em bloco de concreto.

A estabilidade do conjunto material de cobertura-geotêxtil sobre a superfície de talude

é muito importante. Existem dois mecanismos de instabilidade, neste caso, sendo eles, deslizamento do material de cobertura sobre o geotêxtil e deslizamento do conjunto ao longo da interface geotêxtil-superfície do talude (Palmeira, 2018).

Basu *et al.* (2019) apresentaram um trabalho utilizando geotêxteis com fibras sintéticas misturados com geossintéticos de fibras naturais para obtenção de maior resistência ao atrito com o solo, maior densidade que a da água, melhor estabilidade e condições adequadas para o crescimento de vegetação. Os autores concluem que a mistura de material sintético pode aumentar a durabilidade dos geossintéticos à base de fibras naturais.

2.4 SIMULADORES DE CHUVA

2.4.1 TIPOS DE SIMULADORES

Segundo Sousa Júnior (2011), existem dois grandes grupos de simuladores de chuva que podem ser utilizados para pesquisas de campo e de laboratório: os simuladores com dispositivos gotejadores (*drop-forming*) e os simuladores com aspersores pressurizados (*pressurized nozzle simulators*).

Sousa Júnior (2011) descreve sobre os dois tipos de simuladores, afirmando que os simuladores aspersores podem ser utilizados em campo e laboratório com uma extensa faixa de intensidades de chuva, necessitando menor altura para atingir a velocidade requerida. Já os simuladores gotejadores possuem um custo menor que os simuladores aspersores, geralmente são de fácil transporte e manuseio, mas apresentam a desvantagem de que para produzir uma distribuição uniforme de chuva precisam de uma quantidade grande de gotejadores (agulhas hipodérmicas, tubos capilares).

Atualmente, os simuladores de chuva possuem variados tamanhos, características físicas da chuva simulada gerada e da área de molhagem, sendo em muitas das vezes construídos para atender às necessidades específicas do trabalho ou pesquisa, variando também os custos envolvidos em sua construção (Thomaz & Pereira, 2014).

Não existe uma quantidade padrão de ensaios de simulação de chuva, que dependem das condições e dos elementos que se quer analisar. A Tabela 2.3 apresenta quantidades de ensaios sugeridas para se analisar o comportamento do solo.

Tabela 2.3 - Quantidade de ensaios de simulação de chuva realizados por diversos autores

Autor / Ano	Quantidade de ensaios
Cancelli et al. (1990)	8
Mermut et al. (1997)	4
Ogbobe et al. (1998)	15
Lascelles et al. (2000)	18
Römken et al. (2001)	10
Ben-Hur & Assouline (2006)	10
Fernandes et al. (2009)	6
Bhattacharyya et al. (2011)	5
Egeli & Pulat (2011)	12
Thomaz (2012)	8
Shi et al. (2012)	12
Thomaz & Pereira (2013)	23
Thomaz & Pereira (2014)	30
Sadeghi et. al. (2015)	16

A Figura 2.7 apresenta esquematicamente um simulador de chuva com sistema de aspersor para análise sob chuvas intensas. Já a Figura 2.8 mostra um simulador com o sistema de gotejamento por meio de agulhas hipodérmicas para estudos de erosão e poluição do solo.

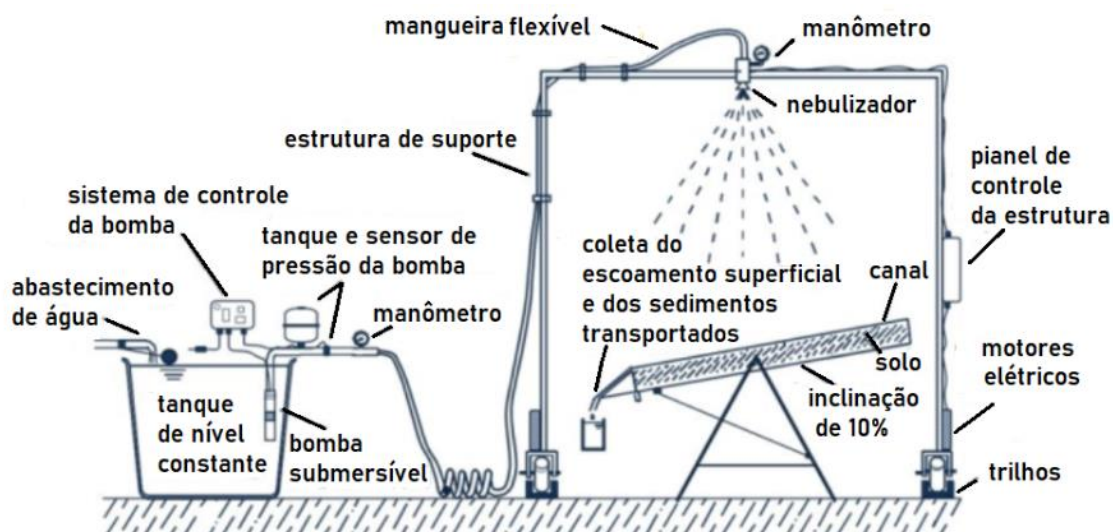


Figura 2.7 - Representação esquemática de um simulador de chuva. Fonte: Abrantes & Lima (2012)

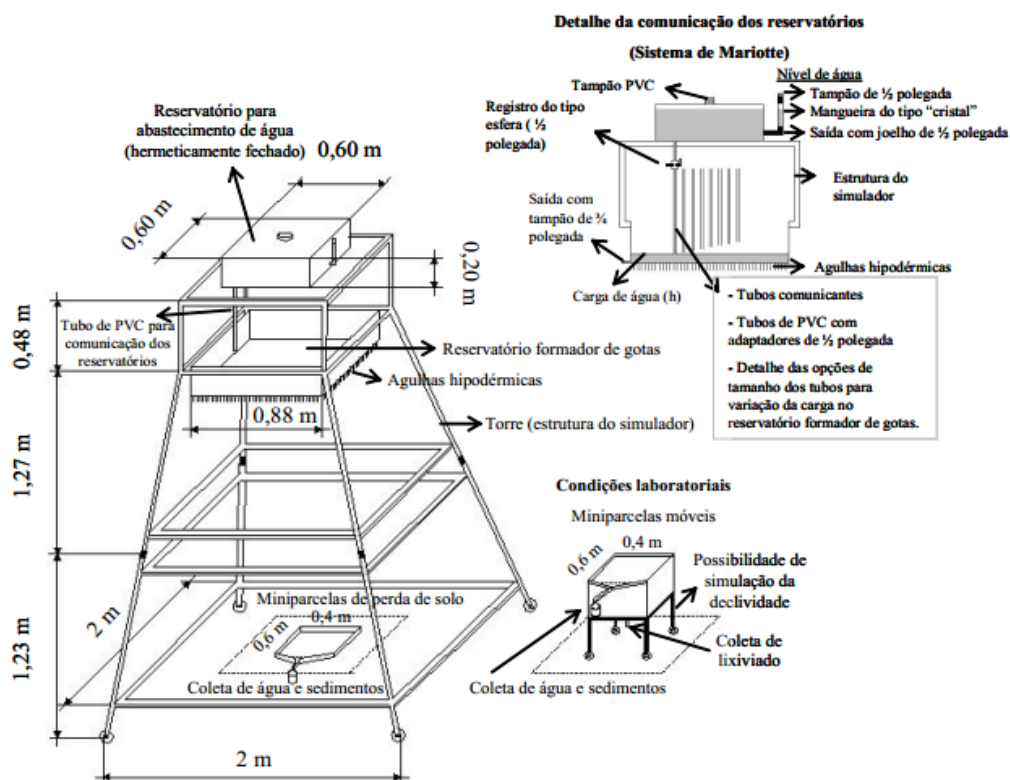


Figura 2.8 - Esquema da construção de um simulador de chuva. Fonte: Ribeiro *et al.* (2000)

2.4.2 UTILIZAÇÃO DOS SIMULADORES

Os simuladores de chuva têm sido usados em estudos diversos, tais como para avaliar as perdas de solo, água e nutrientes, infiltração de água e lixiviação em solos, tendo como principal vantagem a utilização em qualquer época do ano e o controle das características da chuva. Dentre essas características, tem-se o diâmetro e a distribuição das gotas da chuva simulada, altura e velocidade, tempo de duração, intensidade e energia cinética, não sendo possível controlar todos esses parâmetros em condição de chuva natural (Mascarenha *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2000).

Ogboke *et al.* (1998) realizaram estudos com simulador de chuvas visando a prevenção de erosões em taludes, variando as inclinações do equipamento de 10° a 45° com o material protegido e desprotegido, ou seja, com e sem geossintético. Para verificar a eficiência do uso entre dois geotêxteis, um biodegradável e um sintético, determinou-se a quantidade de solo erodido em cada caso e, posteriormente, calculou-se um valor que representava a razão entre as quantidades de solo erodido no talude protegido e no talude desprotegido.

O equipamento utilizado por Ogboke *et al.* (1998) nos ensaios apresentava um canal de teste inclinado, com 1,60 m de comprimento, 1,20 m de largura e 0,31 m de profundidade, com o final da rampa aberta para a coleta do escoamento. Utilizou-se um sistema de bico

único de pulverização contínua para simular uma chuva uniforme e com intensidade de fluxo calibrada para atingir 264 mm/hora na área teste de talude. Os tamanhos das aberturas da trama dos geossintéticos utilizados apresentaram diferenças, sendo que para os biogeotêxteis foi de 10 mm x 10 mm e para o sintético não foi mencionado o valor, somente informado que era muito inferior aos outros.

Os resultados obtidos por Ogbobe *et al.* (1998) sobre a eficácia dos geotêxteis, dizem que: i) os biogeotêxteis apresentaram alta absorção de água, enquanto o sintético não apresentou nenhuma absorção; ii) as velocidades de escoamento para os produtos sintéticos foram 38% e 13% maiores que para os geotêxteis de fibras naturais utilizados; iii) os geotêxteis de fibra sintética foram 58% e 82% mais eficazes na prevenção da perda de solo em relação aos de fibras naturais.

2.4.3 ENSAIOS PARA SIMULAÇÃO DE CHUVA

Os ensaios de laboratório têm a vantagem de possibilitar o controle dos fatores que afetam o processo de erosão, sendo a replicação mais fácil (Touze-Foltz & Zanzinger, 2016). Smets *et al.* (2011) realizaram um trabalho fazendo ensaios de campo e laboratório com simulador de chuva utilizando diferentes tipos de geotêxteis biológicos. Os autores chegaram à conclusão de que, apesar de algumas deficiências na realização dos ensaios de laboratório para representar as condições verdadeiras do campo, os experimentos tiveram resultados semelhantes aos resultados de campo no que se refere à taxa de escoamento e à perda de solo média.

As diferenças entre os resultados de campo e laboratório são explicadas por Smets *et al.* (2011) pela simplificação das condições de campo nos experimentos de laboratório. Citam como exemplo, perfil, umidade e estrutura do solo, comprimento da área de ensaio, características da precipitação e qualidade da água.

Egeli & Pulat (2011) realizaram ensaios de simulação de chuva em laboratório. Os autores discorrem sobre a importância do teor inicial de água no solo, sendo o comportamento de solo muito dependente do grau de umidade inicial e, também, de sua densidade, que é aumentada com o processo de compactação do solo. Afirmam que esses parâmetros afetam a estabilidade do talude devido à variação da umidade e da densidade seca do material.

Nos experimentos de Egeli & Pulat (2011), um número total de doze, com simulação de chuva, foram mantidos constantes a intensidade da chuva, o tempo de chuveiramento, e os

parâmetros que sofreram variações foram os ângulos de inclinação, as umidades e as densidades do solo.

Os autores concluíram que se o grau de compactação relativa aumenta, o fator de segurança para a estabilidade da inclinação aumenta. Por outro lado, o fator de segurança diminui se o ângulo de inclinação aumenta. Para todas as inclinações utilizadas, o fator de segurança aumentou com o aumento relativo do grau de compactação (em %) e diminuiu com o aumento ângulo de inclinação. A Tabela 2.4 mostra um resumo de algumas condições para o ensaio de simulação de chuva apresentado por Touze-Foltz & Zanzinger (2016), de acordo com vários autores.

Tabela 2.4 - Síntese das condições de teste de acordo com diferentes autores. Fonte: Adaptado de Touze-Foltz & Zanzinger (2016)

Autores	Cancelli <i>et al.</i> (1990)	Urroz & Israelen (1990)	Römkens <i>et al.</i> (2001)	SMETS <i>et al.</i> (2011)	Böker <i>et al.</i> (2012)	Midha & Suresh Kumar (2013)	Mawenu (2014)	Sadeghi <i>et al.</i> (2015)
Tamanho do equipamento:								
comprimento	1,5 m	6,0 m	3,7 m	0,94 m	2,35 m	0,75 m	2,0 m	6,0 m - 0,5 m
largura	1,0 m	0,8 m aprox.	0,61 m	0,6 m	1,1 m	0,5 m	1,0 m	1,0 m - 0,5 m
profundidade	0,2 m	0,2 m	0,23 m	0,1 m	0,2 m	0,25 m	0,1 m	0,15 m
Inclinação	26,6° (1V:2H)	até 43°	2%, 8%, 17%	15%, 45%	33,7° (1V:1,5H)	15°, 30°, 45°	7°, 15°	
Solo	50% areia média, 30% areia muito fina, 20% silte	63% areia 24% silte, 13% argila 1,4% matéria orgânica	18% argila, 80% silte, 2% areia	13% argila, 24% silte, 63% areia - 12% argila, 80% silte, 8% areia	argila, argila arenosa e areia argilosa		arenoso, argiloso (75% areia 14% silte, 11% argila	14% argila, 24% silte, 62% areia
Intensidade da chuva (mm/h)	75 (30 min por etapa)	- (40 min)	60, 45, 30, 15 (-) 66 (45 min)	45 - 67	10, 20 e 60 (420 min)	100 (3 tentativas de 3 min, com intervalo de 3 min)	112 (15 min ou 30 min)	50 e 90 (15 min)
Diâmetro da gota de chuva (mm)	1,5 - 2,8							diâmetro médio de 1,3 mm
Vegetação					sem cobertura, 30% e 60% de cobertura			

Nos estudos de Thomaz (2012) a infiltração foi maior no início da simulação e diminuiu gradualmente ao longo do experimento. O autor também comenta que a profundidade, a velocidade de fluxo e a descarga são essenciais para o transporte dos sedimentos. Durante as simulações observou-se uma mudança nesses parâmetros, afetando as características do fluxo e da taxa de sedimentos. Os valores registrados durante a simulação de chuva realizada por Thomaz (2012) indicam que as condições de escoamento hidráulico reproduziram o transporte de agregados semelhante aos produzidos por eventos naturais.

2.5 PARÂMETROS DA CHUVA SIMULADA

Como principais parâmetros que influenciam a erosão, Cancelli *et al.* (1990) destacam

a intensidade da chuva, o tamanho da gota e a energia cinética. Neste caso, é importante que a intensidade da chuva seja maior que a capacidade de infiltração do solo para iniciar o processo erosivo. A energia cinética das gotas de chuva provoca o desprendimento e movimento das partículas do solo, aumentando a rugosidade da sua superfície.

Herngren (2005) afirma que para a utilização de um simulador de chuva os parâmetros como intensidade, uniformidade da precipitação e distribuição do tamanho da gota precisam ser calibrados para reproduzir com precisão as características da chuva de projeto.

Thomaz & Pereira (2014) apresentaram valores dos parâmetros de chuva simulada utilizados por diferentes autores, tais como intensidade, tamanho da gota, energia cinética, altura de simulação e área de molhagem, mostrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Características físicas de chuvas produzidas por diferentes simuladores de chuva. Fonte: Adaptado de Thomaz & Pereira (2014)

Fonte	Intensidade (mm/h)	Tamanho da Gota (mm)	¹ Energia cinética (%)	Altura de simulação (m)	Área de molhamento (Parcela m ²)
EMMETT (1970)	198,1 – 215,9	0,5	-	-	-
CERDÀ et al. (1997)	54,6	<0,82 (56%)	-	2,00	0,24
BATTANY & GRISMER (2000)	-	-	70	3,50	0,64
IDOWU et al. (2002)	128	1,45	-	1,75	-
ALVES SOBRINHO et al. (2002)	100 (19 - 308)	1,5 – 3,0	90	2,00	0,7
ZIEGLER & SUTHERLAND (2006)	90 - 120	0,99	-	2,70	-
MARTÍNEZ-ZAVALA et al. (2008)	90	-	-	3,50	0,23
JORDÁN & MARTÍNEZ-ZAVALA (2008)	33,0 – 54,0	5,9	-	-	0,0625
SMETS et al. (2011)	45 - 67	-	60	3,25	0,56
THOMAZ & PEREIRA (2014)	71,4 – 148,3	0,7	51 - 77	0,90 - 1,5	0,4
		(0,3 - 1,2)			(0,28 – 0,55)
		(n=220)			(n=19)
SADEGHI et al. (2015)	50 - 90	-	-	4,00	6,00
		1,3			0,25
		-			-

Nota: ¹Energia cinética comparada a uma chuva natural de mesma intensidade. (-) parâmetro não avaliado.

2.5.1 UNIFORMIDADE DA CHUVA

De acordo com Miguntanna (2009), o coeficiente de uniformidade é expresso em porcentagem, e quanto mais uniforme for a intensidade de precipitação, mais o coeficiente de uniformidade aproxima-se de 100%. Nos estudos realizados pelo autor, o coeficiente de uniformidade obtido para as diferentes intensidades de precipitações testadas foi cerca de

70%, sendo considerado suficiente para uma simulação de precipitação bem sucedida. Tal valor foi validado por outros autores (Loch *et al.*, 2001; Montebeller *et al.* (2001); Lascelles *et al.*, 2000).

O simulador de chuva desenvolvido por Sousa Júnior & Siqueira (2011), com a utilização de um aspersor FullJet ½ SSHH40, apresentou uma média do coeficiente de uniformidade (CUC) entre 68,3% e 82,2% para uma pressão na água de 80 kPa, sendo considerados os resultados obtidos adequados para uma intensidade de precipitação observada no estado de Goiás.

Herngren (2005), na determinação dos coeficientes de uniformidade, constatou que quando as extremidades da área de ensaio foram excluídas dos cálculos, os valores do CUC aumentaram. O autor considerou em seu trabalho uma área menor, onde a uniformidade da chuva é melhorada.

Loch *et al.* (2001) também verificaram que, uma variação entre 8% a 10% da uniformidade ocorre na região mais central da parcela ou área, e essa variação aumenta em direção as bordas da parcela entre 12,2% a 13,4%.

2.5.2 INTENSIDADE DA CHUVA

Römken *et al.* (2001) fizeram estudos de erosão do solo com ensaios de simulação de chuva com diferentes intensidades de precipitação e diferentes condições de rugosidade das superfícies do solo. Nesses estudos, os autores verificaram que, quando aumentaram a intensidade da precipitação, houve aumento na produção de sedimentos. Os autores ainda indicam que, para precipitações com intensidade inicialmente elevada, tem-se maior probabilidade de desenvolvimento de sulcos do que em um regime com intensidade inicial baixa. Portanto, uma precipitação com menor intensidade de chuva inicial oferece mais chance de desenvolvimento da selagem da superfície, proporcionando maior resistência à erosão.

Segundo Lascelles *et al.* (2000), o controle da intensidade da chuva é importante, pois o pesquisador pode precisar de intensidade fixa durante o experimento, encontrando relações entre intensidade e escoamento, podendo determinar a quantidade de material transportado, enquanto que, em um evento de chuva natural, essa intensidade é variável.

Os dois simuladores estudados por Lascelles *et al.* (2000), embora muito diferentes no projeto (no processo construtivo, na aplicação e nos padrões de distribuição das chuvas),

mostraram muitas semelhanças em termos de variação temporal e espacial. Nenhum dos dois simuladores produziu uma precipitação espacial completamente uniforme no padrão de distribuição. Embora pareça que existe um padrão completamente uniforme da precipitação, isso se torna impossível devido às inevitáveis perturbações das gotas individuais geradas pela chuva simulada, provocada pela turbulência do ar durante os ensaios.

Mermut *et al.* (1997) afirmam em seus estudos que a perda de solo com alta intensidade de chuva foi quase quatro vezes maior que a de menor intensidade. A alta intensidade de precipitação causou uma redução entre dez e vinte minutos na infiltração do escoamento produzido. A quantidade acumulada de sedimentos escoados aumentou linearmente com o tempo, tornando importante a duração da chuva na contribuição para a erosão. A alta intensidade de chuva destruiu os agregados superficiais e gerou alto efeito “*splash*”, onde o valor erodido é quase o dobro do valor considerado como erosão hídrica tolerável em um ano. Após cerca de 50 minutos de chuva, os respingos reduziram, correspondendo ao início do escoamento superficial. A superfície foi coberta por uma fina camada de vedação, diminuindo a infiltração, e um filme de água na superfície contribuiu para essa redução (Mermut *et al.* 1997).

2.5.3 DIÂMETRO DAS GOTAS

Existem vários métodos para determinar o diâmetro e a distribuição das gotas geradas por chuvas naturais ou simuladas. Entre eles, tem-se a Placa de Petri, o método da farinha, o método do óleo, o método da mancha, o método do disdrômetro e o método do laser óptico (Carvalho *et al.*, 2012).

Silva *et al.* (2015) discorrem sobre a importância da determinação do diâmetro médio da gota e a sua relação com a força de impacto, gerando maior ou menor poder de desagregação e erosão do solo, juntamente com o uso e declividade do talude.

A utilização do método da farinha é um método trabalhoso, mas é uma alternativa atraente, pois não necessita de equipamentos sofisticados e são de baixo custo de execução, sendo úteis para a calibração e avaliação do funcionamento de simuladores de chuva.

O diâmetro das gotas está relacionado com a intensidade de precipitação (Cancelli *et al.*, 1990). Como exemplo, eles citam que uma precipitação com intensidade entre 26-127 mm/h tem entre 6-7% de gotas com diâmetro de 2-4 mm.

2.5.4 ENERGIA CINÉTICA

Segundo Cancelli *et al.* (1990), para se ter uma boa simulação da energia cinética das chuvas, a velocidade final do impacto das gotas deve ser muito semelhante à velocidade limite das gotas reais de precipitação.

Existem várias equações para o cálculo da energia cinética, relacionando parâmetros da chuva. Algumas dessas equações foram desenvolvidas para padrões de chuvas diferentes das do Brasil. De acordo com Ribeiro (2006), alguns autores propuseram equações de energia cinética para os padrões de chuva dos EUA relacionando a energia cinética com a intensidade de precipitação.

Wagner & Massambani (1988), com estudos dos padrões de chuva para a região de São Paulo, propuseram uma equação com as mesmas relações entre energia cinética e intensidade de precipitação. Seus resultados foram semelhantes aos dos outros autores.

A erosividade da chuva pode ser analisada por meio de sua energia cinética. Uma precipitação, com uma energia cinética muito alta, faz com que a velocidade de impacto da chuva desprenda os grãos de solo provocando o efeito “*splash*” e desencadeando o escoamento dos sedimentos (Ngezahayo *et al.*, 2019).

De Maria (1994) afirma que chuvas não erosivas são aquelas em que a energia cinética é menor que 3,6 MJ, ou que tenham uma intensidade máxima, em 15 minutos, menor que 24 mm/h, sendo esse valor muito baixo para precipitações mais expressivas.

Amorim *et al.* (2001) concluem em seu trabalho que a energia cinética influenciou no desprendimento das partículas do solo e na vazão de escoamento nas condições analisadas, e que a energia está associada a maiores lâminas de água. Já a declividade do solo influencia na velocidade do escoamento superficial.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

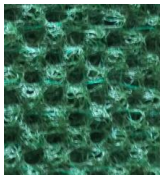

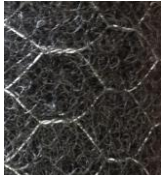

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

3.1.1 GEOSSINTÉTICOS

Nesta pesquisa foram utilizados cinco geossintéticos diferentes, sendo três biodegradáveis. Os geossintéticos foram denominados de Geomanta 1, Geomanta 2, Geomanta 3, Geomanta 4 e Geomanta 5. A Tabela 3.1 apresenta os detalhes e a descrição de cada um, fornecidos no catálogo do fabricante.

As Geomantas 2, 3, 4 e 5 foram utilizadas em campo pela Eletrobras Furnas no restabelecimento dos taludes e atuando contra os processos erosivos do canal de adução da Barragem de Simplício.

Tabela 3.1 - Detalhes das geomantas utilizadas nos ensaios

Geossintéticos	Detalhe	Descrição
Geomanta 1		geomanta de alta flexibilidade, tridimensional, fabricada a partir de filamentos de polietileno fundido nos pontos de contato, acoplada a uma tela de poliéster de alta tenacidade
Geomanta 2		biomanta com 100% fibras de coco, entrelaçadas em rede de polipropileno nos dois lados e uma malha com fios de polipropileno resistente à ação dos raios ultravioleta
Geomanta 3		geomanta flexível tridimensional fabricada a partir de filamentos grossos de polipropileno fundidos nos pontos de contato, e um reforço metálico em malha hexagonal de dupla torção
Geomanta 4		biomanta com 100% fibras de coco, entrelaçadas em rede com fios resistentes e biodegradáveis de polipropileno nos dois lados
Geomanta 5		biomanta com 100% fibras vegetais rasgadas e desidratadas (palha), entrelaçadas em rede com fios resistentes e degradáveis de polipropileno

Realizaram-se ensaios para determinar algumas propriedades físicas dos geossintéticos utilizados nesta pesquisa, sendo eles, massa por unidade de área, espessura e transmissividade para todas as geomantas.

Os ensaios de permissividade/permeabilidade foram executados nas Geomantas 1, 2, 3 e 4. Esse ensaio não pôde ser realizado com a Geomanta 5, pois, durante o preparo dos corpos de prova, a amostra se desfez, inviabilizando sua execução.

As metodologias adotadas para a realização dos ensaios foram de acordo com as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e da *American Society for Testing and Materials* - ASTM. A Tabela 3.2 mostra quais as normas adotadas para cada ensaio realizado.

Tabela 3.2 - Normas adotadas para os ensaios das propriedades físicas das Geomantas

Ensaio Executado	Norma Adotada
Massa por unidade de área (M_A)	ABNT NBR ISO 9864 (2013)
Espessura	ABNT NBR ISO 9863 (2013)
Transmissividade	ASTM D 4716 (2004)
Permissividade / Permeabilidade	ASTM D 4491 (2015)

Os resultados dos ensaios das propriedades físicas dos geossintéticos foram fornecidos por Furnas/Eletrabras. Os valores apresentados nas Tabelas 3.3 a 3.7 correspondem, respectivamente, aos ensaios de massa por unidade de área (M_A), espessura, transmissividade, permissividade e permeabilidade. Essas tabelas apresentam a média dos resultados obtidos, o coeficiente de variação (C.V.) e o desvio padrão (D.P.). No ANEXO 3 estão todos os resultados, e também as fotos obtidas utilizando microscópio com aumento de até 25 vezes.

Tabela 3.3 - Massa por unidade de área das geomantas utilizadas na pesquisa

Massa por unidade de área - M_A (g/m²)					
	Geomanta 1	Geomanta 2	Geomanta 3	Geomanta 4	Geomanta 5
Valor Médio	563	412	1545	202	420
C.V. (%)	5,30	25,42	3,85	25,10	17,06
D.P.	29,70	104,74	59,50	50,70	71,65

Tabela 3.4 - Espessura das geomantas utilizadas na pesquisa

Espessura (mm)					
	Geomanta 1	Geomanta 2	Geomanta 3	Geomanta 4	Geomanta 5
Valor Médio	12,45	5,77	10,33	3,22	7,01
C.V. (%)	6,40	30,82	5,50	19,7	12,88
D.P.	0,80	1,78	0,57	0,60	0,90

Tabela 3.5 - Valores de transmissividade das geomantas utilizadas na pesquisa

Transmissividade (m²/s)					
	Geomanta 1	Geomanta 2	Geomanta 3	Geomanta 4	Geomanta 5
Valor Médio	5,51E-03	1,54E-03	9,56E-03	1,34E-03	8,99E-04
C.V. (%)	9,17	5,97	14,30	8,98	5,62
D.P.	5,05E-04	9,21E-05	1,38E-03	1,20E-04	5,05E-05

Tabela 3.6 - Valores de permissividade das geomantas utilizadas na pesquisa

Permissividade (s⁻¹)					
	Geomanta 1	Geomanta 2	Geomanta 3	Geomanta 4	Geomanta 5
Valor Médio	7,84	6,85	7,71	6,49	-
C.V. (%)	4,23	6,71	2,14	6,52	-
D.P.	0,33	0,46	0,16	0,42	-

Tabela 3.7 - Valores de permeabilidade das geomantas utilizadas na pesquisa

Permeabilidade (cm/s)					
	Geomanta 1	Geomanta 2	Geomanta 3	Geomanta 4	Geomanta 5
Valor Médio	9,75	4,80	7,97	2,09	-
C.V. (%)	4,23	6,71	2,14	6,52	-
D.P.	0,41	0,32	0,17	0,13	-

As geomantas com maiores espessuras foram as Geomantas 1 e 3, que possuem formato tridimensional. As geomantas biodegradáveis têm maior capacidade de absorção de água em comparação com os geotêxteis constituídos de materiais sintéticos, o que pode beneficiar o desenvolvimento da vegetação e diminuir a velocidade de escoamento da água (Barrela, 2007).

3.1.2 SOLO

O solo utilizado neste trabalho foi retirado de taludes localizados nos canais de adução da Barragem de Simplício (Eletrobras/Furnas), localizada na divisa dos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. A Barragem encontra-se no Rio Paraíba do Sul, na divisa entre os

estados do Rio de Janeiro (ao sul) e de Minas Gerais (ao norte). O circuito hidráulico está localizado no estado de Minas Gerais. A região da barragem abrange os municípios de Três Rios e Sapucaia, no estado do Rio de Janeiro, e os municípios de Chiador e Além Paraíba, no estado de Minas Gerais (Viana, 2010).

A geologia regional da área de implantação do empreendimento AHE Simplício desenvolveu-se durante os processos tectônicos arrolados à orogênese brasileira, ao longo da Faixa Ribeira, que se estende na direção ENE ao longo da porção atlântica dos estados do Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro (Marinho, 2007).

A geologia local do entorno do empreendimento AHE Simplício constitui-se de substrato cristalino de gnaisses, migmatitos e rochas granitoides, intrudidos por diques de diabásio recobertos parcialmente por depósitos superficiais, sendo a cobertura cenozoica por sedimentos aluvionares, colúvios e solos residuais (Marinho, 2007). A área de estudo refere-se à unidade geológica do Complexo Paraíba do Sul, sendo que sua variedade litológica provém do fato de sua ocorrência se estender ao longo de uma zona de cisalhamento dúctil.

Segundo Marinho (2007), o canal de adução é escavado ao longo de uma dorsal topográfica com presença de um espesso capeamento de solos intemperizados, não havendo afloramentos de rocha em toda extensão do canal. O autor ainda afirma que a região do médio Paraíba apresenta processos erosivos influenciados pelos aspectos característicos de clima, relevo, constituição geológica e ocupação humana, sendo que o clima úmido com alta pluviosidade fornece um escoamento abundante e torrencial de águas na região. O relevo regional é constituído, em sua maioria, por encostas extensas de planalto, com predominância de vertentes com forte declividade e de rios com grande capacidade erosiva e energia de transporte.

O solo extraído para os ensaios foi retirado dos taludes localizados no município de Sapucaia-RJ, onde, de acordo com as informações de Brasil (1983), a área é predominantemente composta por solos com associação de argissolos vermelhos e latossolos vermelho-amarelos. Pela diversidade dos materiais de origem para a formação dos solos e mantos de alteração, a área de estudo apresenta solos com diferentes matrizes granulométricas com predomínio de granulometrias argilo-siltico, mas com ocorrência de materiais arenosos.

Os ensaios de caracterização geotécnica, compactação e difração de raios-X foram realizados no laboratório da Eletrobras Furnas, localizado em Aparecida de Goiânia-GO, tendo sido acompanhados todos os procedimentos. Os ensaios foram executados de acordo com as normas da ABNT pertinentes. Os ensaios de Inderbitzen, cisalhamento direto e curva

característica foram realizados no LABGeo da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), localizado em Goiânia-GO. Os ensaios de granulometria a laser foram realizados no LABOGEF do Instituto de Estudos Sócio Ambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), localizado em Goiânia-GO.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E COMPACTAÇÃO

A norma ABNT NBR-6502:1995 define os solos de acordo com suas dimensões. A análise granulométrica conjunta torna-se necessária para solos com partículas tanto na fração grossa (areia e pedregulho) quanto na fração fina (silte e argila).

A distribuição granulométrica de materiais granulares é obtida por meio do processo de peneiramento de uma amostra seca em estufa, após lavar o material retido na peneira de 2,0 mm a fim de eliminar os finos aderidos. Sendo que, para siltes e argilas utiliza-se a sedimentação dos sólidos no meio líquido. O ensaio de análise granulométrica do solo está normalizado pela ABNT NBR-7181:2018.

Os ensaios de Limites de Consistência foram executados de acordo com as normas da ABNT NBR-6459:2017, para o Limite de Liquidez e ABNT NBR-7180:2016, para o Limite de Plasticidade, calculando também o índice de plasticidade (IP) do material.

O ensaio de compactação foi realizado com energia equivalente ao Proctor Normal - sem reutilização do material da amostra, com secagem prévia do solo, em cilindro pequeno, com soquete com 2,5 kg, com três camadas e 26 golpes em cada camada, obedecendo a norma ABNT NBR-7182:2016. Para determinar a massa específica dos grãos foi utilizada a norma ABNT NBR-6458:2016. A massa específica aparente foi determinada seguindo a norma ABNT NBR-10838:1988.

3.2.1 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO A SER UTILIZADO NO ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

A finalidade era reproduzir, na caixa acrílica onde foi executado o ensaio de simulação de chuva, a densidade natural *in situ* do material; sabendo-se, entretanto, que não seria possível reproduzir a estrutura do solo dos taludes, uma vez que se trata de elementos naturais. Para isso, fizeram-se testes iniciais em uma caixa com dimensões menores. O teste foi executado em uma caixa de zinco de 0,30 x 0,30 x 0,15 m.

Foi retirada a umidade higroscópica do solo e, posteriormente, acrescentou-se água para chegar à umidade adotada para os ensaios de simulação de chuva, deixando esse material em recipiente fechado por aproximadamente 12 horas, para que o solo pudesse absorver toda a água que foi acrescentada. Após esse período, foi feita a compactação do material na caixa de zinco, dividindo em duas camadas com 7 cm de altura, para obtenção de uma folga de 1 cm da borda superior da caixa. Após a compactação das duas camadas, verificou-se uma diferença na altura do solo na caixa por causa da abertura lateral. Devido a esse deslocamento lateral, e pelo solo ter ficado muito fofo na caixa, não foi possível continuar com o ensaio e determinar a densidade do material (ver detalhes na Figura 3.1).



Figura 3.1 - Compactação da segunda camada de solo e detalhe da diferença de altura

Depois desta primeira tentativa sem êxito, realizou-se o ensaio em um recipiente de ferro com paredes espessas, colocando o solo e compactando-o também em duas camadas.

Após a compactação do solo no cilindro de ferro, foi retirada uma amostra indeformada para a verificação do valor da densidade do material compactado. Com essa amostra, foi determinado o valor da massa específica aparente por meio da balança hidrostática. Os resultados foram muito próximos dos valores de campo, concluindo-se que o método adotado foi eficiente.

Antes e após cada ensaio de simulação de chuva foi determinada a massa específica aparente com balança hidrostática. O objetivo foi representar a densidade de campo em laboratório. A massa específica aparente foi determinada seguindo a norma ABNT NBR-10838:1988. Esta norma foi substituída pela ABNT NBR-16867:2020.

3.3 CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO

A curva característica de um solo é representada graficamente pela relação entre o teor de umidade do solo e a sucção, em que a sucção varia inversamente com o teor de umidade ou com o grau de saturação do solo.

O solo ensaiado para a determinação da curva característica foi o mesmo utilizado no ensaio de simulação de chuva, na condição natural. Foram preparadas três amostras com o mesmo solo, sendo elas compactadas em um cilindro metálico na umidade de 15,6% e na energia Proctor Normal, conforme mostram as imagens na Figura 3.2.

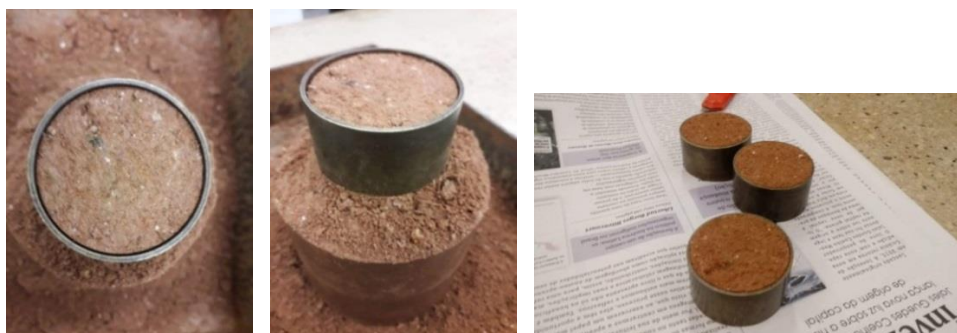


Figura 3.2 - Preparação das amostras para o ensaio de sucção usado na definição da curva característica

O solo foi passado na peneira #2.0 mm sendo acrescentada água para que o mesmo ficasse com a umidade de 15,6%, que foi a umidade média de todos os ensaios realizados. A amostra ficou em repouso por 24 horas. Posteriormente, o solo foi compactado em um anel cilíndrico metálico com dimensão interna de 0,052 m e altura de 0,030 m na energia Proctor Normal.

Existem diversas formulações empíricas para obtenção da curva característica de um solo. Nesta pesquisa, foi adotada a proposta de van Genuchten (1980) para definir a forma da curva característica a fim de obter os parâmetros do solo não saturado, bem como seu comportamento.

A técnica utilizada foi mediante *Tempe cell*, sendo o ensaio realizado nas pressões de 0 a 100 kPa, com três repetições. A Figura 3.3 apresenta as amostras em processo de saturação, e na Figura 3.4 as amostras estão montadas nas células.

Nascimento (2002) afirma que a principal vantagem de utilização de células de pressão individual como método para determinação da curva característica de um solo é a necessidade de somente um corpo de prova para a obtenção dos pontos da curva característica, podendo se utilizar réplicas para obtenção de uma curva média dos valores encontrados.



Figura 3.3 - Vista das amostras em saturação



Figura 3.4 - Vista das amostras para o ensaio de curva característica do solo

O volume de água foi quantificado em termos do teor de umidade gravimétrica (w), que é a relação entre peso de água e de sólidos. Foi determinada a curva característica de secagem. Com esse ensaio mediu-se o potencial matricial da água em três amostras com umidades estabelecidas, utilizando-se a curva de ajuste de van Genuchten (1980).

3.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

3.4.1 PREPARAÇÃO PARA O ENSAIO

Para a execução do ensaio de cisalhamento direto, foram moldados corpos de prova com intuito de atingir a densidade do solo em campo. O solo foi preparado anteriormente passando-o na peneira #4 e acrescentando-se água na quantidade específica para atingir a umidade de campo. Amostras para determinação da umidade foram retiradas a cada moldagem dos cilindros.

Posteriormente, passou-se o solo na peneira 4.8 mm, sendo calculada a quantidade de solo necessária para atingir a densidade e ocupar o volume do cilindro. O cilindro foi dividido em 5 camadas iguais e, posteriormente, foi colocado o solo, o qual foi compactado com o uso da prensa até se atingir a espessura esperada da camada – ranhuras foram feitas entre as mesmas.

A compactação foi realizada no cilindro, não sendo possível a compactação diretamente no molde metálico da caixa de cisalhamento, pois não se conseguiu atingir a massa específica desejada.

Após a compactação do solo no cilindro, ele foi retirado com um extrator de amostras e o cilindro de solo foi embalado em filme plástico para conservação da umidade e guardado até a realização da moldagem da amostra para o ensaio de cisalhamento direto no anel metálico.

Os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto foram preparados em um molde metálico de 0,06 x 0,06 m, o qual era cravado lentamente no cilindro de solo. Durante esse processo, o solo lateral (externo ao molde) era retirado para facilitar a cravação do molde no cilindro (de solo). Para cada cilindro, foram moldados 4 corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto. A Figura 3.5 apresenta a caixa de cisalhamento com o solo e a caixa bipartida com o quepe ou cabeçote (já encaixado) para a transmissão da carga.

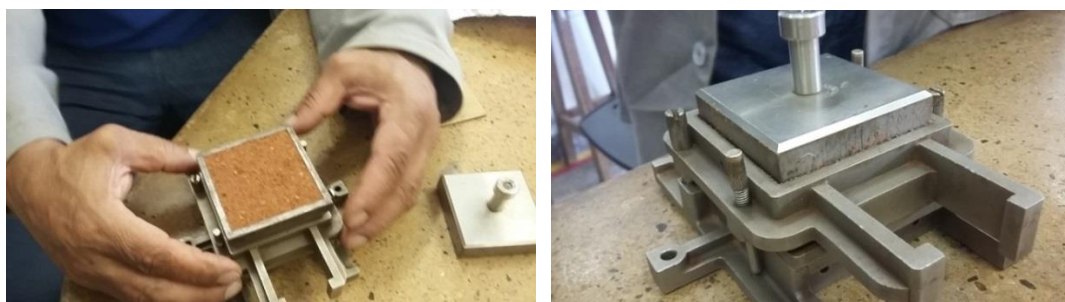


Figura 3.5 - Detalhe da montagem da caixa de cisalhamento

3.4.2 EXECUÇÃO DO ENSAIO NA CONDIÇÃO DE UMIDADE NATURAL

O ensaio de cisalhamento direto foi executado na condição não saturada aproximando as condições de campo quanto à densidade e umidade. Como se tratava da caracterização do solo, as tensões utilizadas foram de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa. Vale ressaltar que o nível de tensões superficiais no talude não é alto, o que justifica a não utilização de tensões muito elevadas para algumas análises de erosão superficial. A velocidade utilizada para o ensaio foi de 0,042 mm/min.

3.4.3 EXECUÇÃO DO ENSAIO NA CONDIÇÃO INUNDADA

Para a execução do ensaio na condição inundada, os procedimentos foram os mesmos

descritos no item anterior, somente a caixa de cisalhamento que foi preenchida com água para que ocorresse a inundação do solo. A água foi colocada lentamente no equipamento para o devido preenchimento e melhor saturação do corpo de prova. As tensões utilizadas foram de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa.

3.5 ENSAIO DE GRANULOMETRIA A LASER

As amostras utilizadas para a análise granulométrica com o granulômetro a laser foram colhidas a cada 5 minutos durante o ensaio de simulação de chuva. Empregou-se nesta análise o equipamento Mastersizer 2000 – Malvern (Figura 3.6). Esse equipamento trabalha com o método de difração a laser espalhando os raios a menores e maiores ângulos, com comprimento de onda fixo (λ) em $0,63 \mu\text{m}$ (Sampaio *et al.*, 2007) e uma amplitude de leitura entre $0,020$ a $2000 \mu\text{m}$.



Figura 3.6 - Vista do equipamento Mastersizer 2000 - Malvern

O Mastersizer 2000 – Malvern é um equipamento utilizado para medir o tamanho das partículas do solo, apresentando a distribuição dos diversos tamanhos de partículas da amostra com uso do raio laser, com rapidez, precisão e confiabilidade, devido à sua alta resolução em dispersão aquosa. Esse método não altera o comportamento de sedimentação das partículas, portanto, esse tipo de análise torna-se bastante conveniente para aplicação em sedimentos (Carvalho *et al.*, 2000).

A amostra utilizada no ensaio foi proveniente da sedimentação do material carregado durante o ensaio de simulação de chuva. Como esse solo não continha material granular, ele foi utilizado diretamente no aparelho, não sendo necessária a separação do material. Deste

modo, as amostras para essa análise foram secas ao ar, bem como homogeneizadas e quarteadas, sendo em seguida dispostas em um béquer com 800 ml de água destilada e rotacionadas por micro hélices a 2000 RPM. O índice de refração dos raios laser para a água destilada é de 1,43.

A dispersão física dos materiais foi realizada por intermédio do equipamento de ultrassom acoplado ao aparelho, com potência de 13 watts, com objetivo de separar partículas adsorvidas, com período de exposição de 30 segundos, que não apresenta capacidade destrutiva às partículas com vistas ao seu subdimensionamento.

A metodologia utilizada nesses ensaios foi o Mie, em que foram realizadas no método de análise “*default*” com índice de refração de 1,52, tendo em vista a possibilidade de comportamento distinto (areia, silte e argila) do material. A metodologia de Mie consiste na inserção de índices específicos de refração do material em análise do meio dispersivo, no caso a água destilada, e pode ser aplicada a diferentes materiais com valores específicos, ou com o valor padrão (*default*).

Com a realização desse ensaio foi possível saber qual a composição granulométrica dos sedimentos provenientes dos ensaios de simulação de chuva na condição de solo descoberto e com as proteções de geomantas. Esses ensaios foram executados com os sedimentos provenientes de todos os ensaios de simulação de chuva realizados na caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m.

3.6 ENSAIO DE INDERBITZEN

Foram retiradas amostras indeformadas dos taludes do canal de adução da Barragem de Simplício/Eletronbras Furnas para a execução do ensaio de Inderbitzen. Para esses ensaios foi utilizado o equipamento do Laboratório de Geotecnia (LabGeo), da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), da Universidade Federal de Goiás (UFG). O equipamento é composto por uma estrutura metálica que sustenta uma rampa de material acrílico que pode ser ajustada para diversas inclinações, e um suporte para colocar a amostra de solo.

Depois de duas tentativas de execução do ensaio, foi descartada a realização do mesmo devido à desfragmentação de toda a amostra pelo fluxo de água durante o ensaio num curto período de tempo, que foi em torno de três minutos, conforme é apresentado na Figura 3.7, não sendo possível a coleta de dados.

De acordo com Bastos (1999), o ensaio de Inderbitzen é sugerido para a avaliação

direta da erodibilidade, pela sua simplicidade e eficiência comprovada com base nos solos estudados.

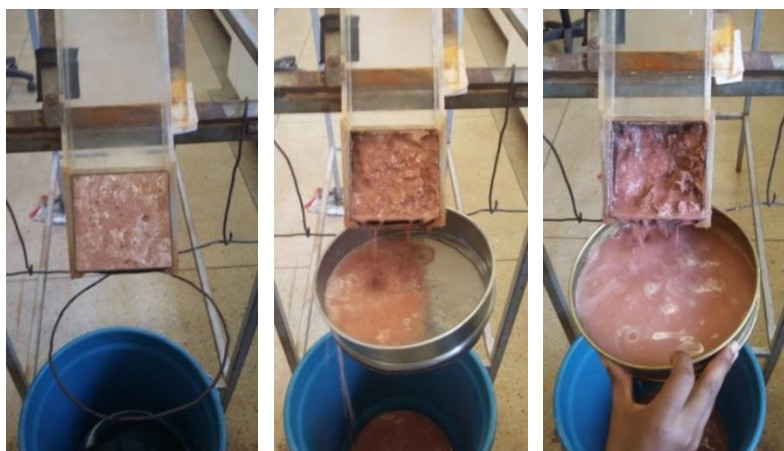


Figura 3.7 - Estado da amostra de solo durante o ensaio de Inderbitzen

3.7 EQUIPAMENTO SIMULADOR DE CHUVA

3.7.1 DESENVOLVIMENTO E MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado nesta pesquisa é um simulador portátil de chuva por aspersão (SPCA), idealizado e desenvolvido por Mendes (2019), que justifica o seu desenvolvimento por reproduzir chuvas artificiais com características muito próximas das chuvas reais e com diferentes intensidades. O modelo de Mendes (2019), proposto para a modelagem física, é apresentado na Figura 3.8.

O equipamento permite analisar o escoamento superficial em obras geotécnicas levando em consideração o fator de declividade, que pode ser alterado de acordo com o interesse e o objetivo de cada ensaio. Com isso, avalia-se o comportamento do solo em relação à infiltração e à quantidade carregada de material a uma dada inclinação.

O simulador portátil de chuva por aspersão (SPCA) é composto por quatro partes: estrutura metálica, caixa de acrílico, sistema hidráulico e sistema de automação. O equipamento possui opção de regulagem para algumas inclinações, que são de 0,2°, 5°, 14°, 25° e 45° – essa última corresponde à inclinação máxima do equipamento.

A estrutura é feita em aço, com componentes estruturais compostos por perfis tipo metalon em chapa com encaixes desmontáveis, pensando na praticidade e facilidade de montagem e transporte, sendo projetada para suportar uma carga de aproximadamente 20 kN. A Figura 3.9 mostra uma vista geral do equipamento.

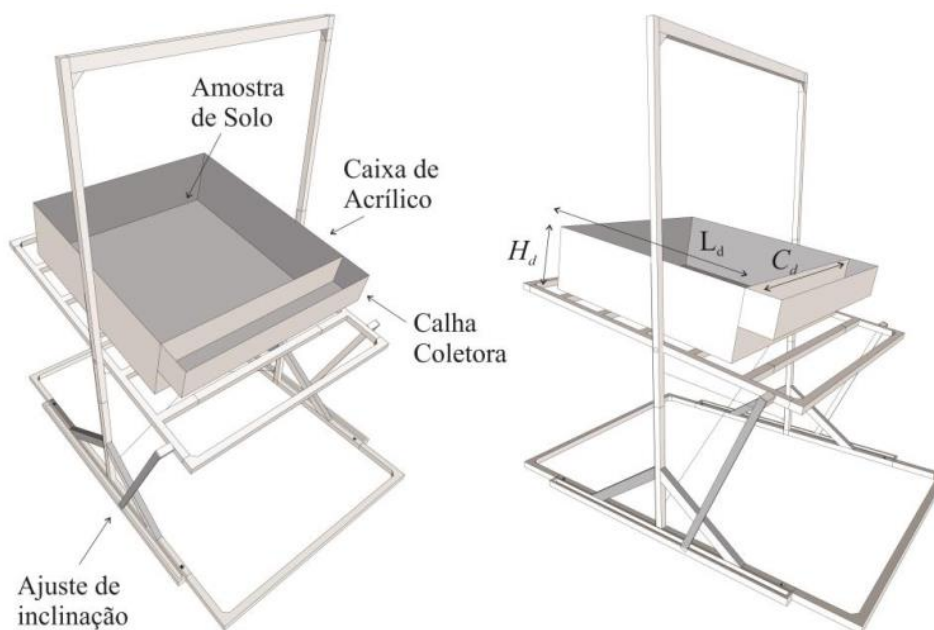


Figura 3.8 - Modelo do SPCA desenvolvido por Mendes (2019)



Figura 3.9 - Vista geral do simulador portátil de chuva por aspersão

A caixa porta amostra foi executada em acrílico transparente com espessura de 10 mm, possui dimensões de 1,0 x 1,0 x 0,15 metros, correspondendo ao comprimento, largura e profundidade, respectivamente. O equipamento possui também uma canaleta para captar o fluxo escoado após a simulação da chuva. Na sua execução, foram consideradas as condições de estanqueidade e resistência como um todo para suportar a colocação do solo para o ensaio. O acabamento das bordas superiores é abaulado, evitando-se quinas. As abas componentes da calha possuem espessuras de 4 mm com saídas para o escoamento da água e de sedimentos (Figura 3.10). As bordas da caixa e da calha são niveladas.



Figura 3.10 - Detalhe dos orifícios e registro de saída dos sedimentos e água

O sistema hidráulico que gera a simulação da chuva foi confeccionado em PVC rígido soldável, com manômetros e sensores instalados para a automação do sistema. Uma bomba d'água centrífuga monoestágio com potência de $\frac{3}{4}$ CV, trifásica, é utilizada no sistema para bombear a água, que fica em um reservatório plástico de 200 litros, para a tubulação e levar ao aspersor para o chuveiramento. Todos esses itens são apresentados na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Vista geral do sistema hidráulico

O sistema de automação foi desenvolvido para a operação, acionamento, controle, monitoramento e aquisição de dados dos ensaios de simulação de chuva. O projeto de automação de Mendes (2019) contempla o acionamento/desligamento da bomba d'água e o controle da velocidade por meio de controle tipo PID (Proporcional Integral e Derivativo), que controla a pressão de serviço no sistema e o tempo de duração da chuva, ou seja, do ensaio de chuveiramento por meio do controle de abertura e fechamento da válvula solenoide localizada no aspersor.

De acordo com Mendes (2019), o controlador PID é o algoritmo de controle mais comum de uso na indústria e aceito universalmente, sendo sua popularidade atribuída ao seu potente desempenho em inúmeras condições operacionais e à simplicidade funcional.

O monitoramento, aquisição dos dados e controle de pressão do sistema são realizados por meio de sensores de pressão absoluta (0 a 10 bar), micro-controlador do tipo Arduino e inversor de frequência (Figuras 3.12 e 3.13). A Figura 3.14 mostra todos os componentes que fazem parte do simulador portátil de chuva por aspersão (SPCA), desenvolvido por Mendes (2019), descrito anteriormente.

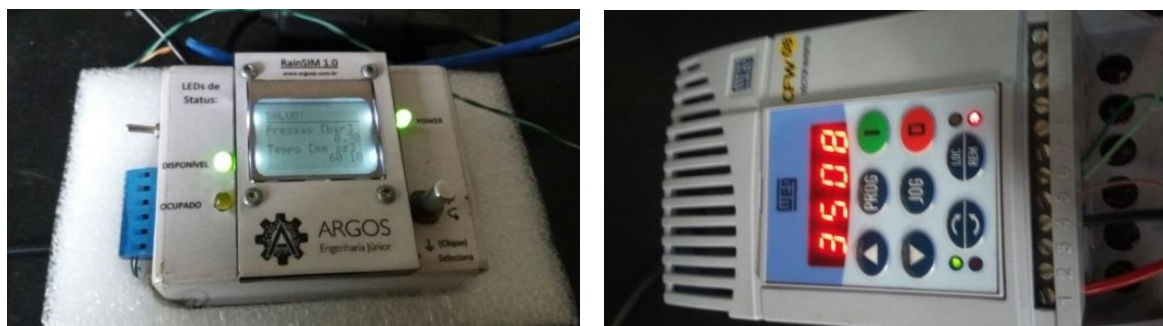


Figura 3.12 - Vista dos equipamentos do sistema de automação

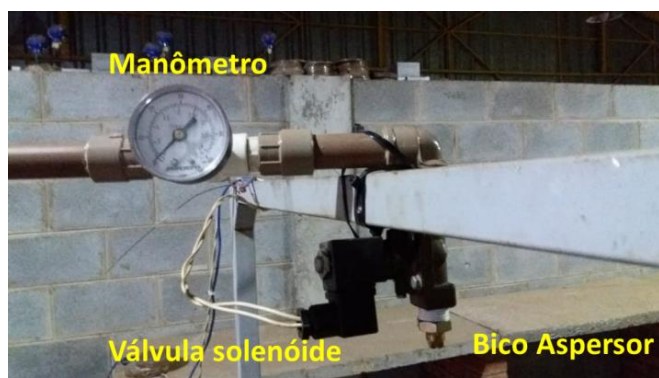


Figura 3.13 - Detalhe do conjunto bico aspersor, válvula solenóide e manômetro

As áreas de ensaio adotadas nesta pesquisa foram de 1,0 m² e 0,09 m², equivalentes às áreas das caixas de acrílico, de forma a se acomodar convenientemente os geossintéticos que foram utilizados. Duas pessoas são necessárias para a execução do ensaio de chuveiramento para a simulação da chuva natural após a montagem de todo o equipamento.

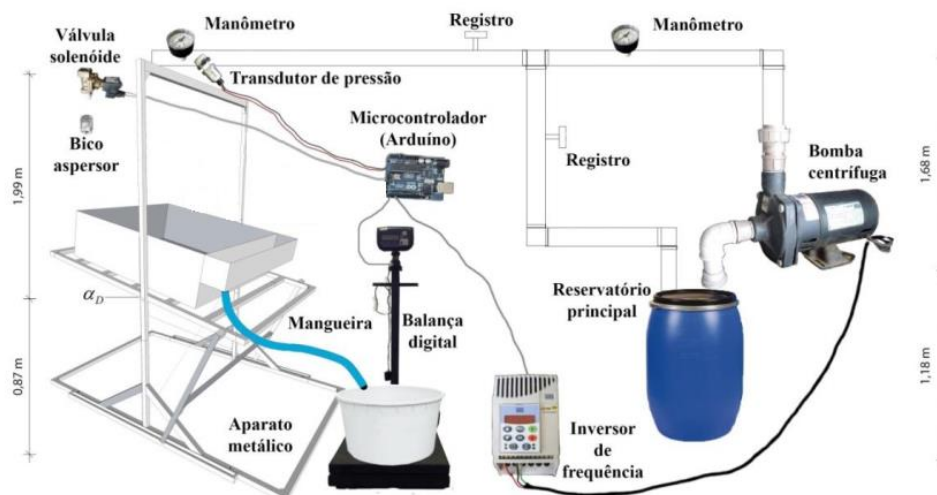


Figura 3.14 - Vista de todos os componentes do sistema SPCA. Fonte: (Mendes, 2019)

3.7.2 ASPERSORES

Foram utilizados dois aspersores de pulverização quadrada de ângulo aberto, proporcionando uma pulverização uniforme por toda a área, de acordo com o catálogo industrial de produtos da empresa. Tais dispersores são indicados para instalações que necessitem de uma cobertura completa de áreas retangulares. Os aspersores utilizados nesta pesquisa são da empresa Spraying Systems do Brasil Ltda.

Os aspersores utilizados foram o de $\frac{1}{4}$ - 10SQ – HHSQ e o de $\frac{1}{2}$ - 29SQ – HHSQ para os testes de definição da intensidade e uniformidade da chuva gerada por eles. Na Tabela 3.8 são apresentadas as características dos aspersores e seus desempenhos, segundo dados do fabricante, referente aos aspersores de pulverização quadrada, onde os aspersores utilizados estão realçados em vermelho. A Figura 3.15 mostra uma imagem padrão do tipo de aspersor utilizado.

Tabela 3.8 - Desempenho de aspersores de pulverização quadrada. Fonte: Catálogo do fabricante

*Pressão expressa em bar.

Conexão de Entrada (pol.)	Tipo do Bico				Capacidade	Diâmetro do Orifício (mm)	Diâmetro Máximo de Passagem Livre (mm)	Vazão (litros por minuto)*										Ângulo de Pulverização (°)*		
	G-SQ	GG-SQ	HH-SQ	H-SQ				0.4	0.5	0.7	1.5	2	3	4	6	7	10	0.5	1.5	6
1/8	●	●	●		3.6SQ	1.6	1.3	1.1	1.2	1.4	1.9	2.2	2.7	3.1	3.7	4.0	4.7	40	52	47
	●	●	●		4.8SQ	1.9	1.3	1.4	1.6	1.8	2.6	3.0	3.6	4.1	4.9	5.3	6.2	48	63	57
	●	●	●		6SQ	2.4	1.3	1.8	2.0	2.3	3.2	3.7	4.5	5.1	6.1	6.6	7.8	60	66	60
1/4	●	●	●		10SQ	2.8	1.6	2.9	3.3	3.8	5.4	6.2	7.4	8.5	10.2	11.0	13.0	62	67	61
	●	●	●		12SQ	3.2	1.6	3.5	3.9	4.6	6.5	7.4	8.9	10.2	12.3	13.2	15.5	70	75	68
			●		14.5SQ	3.9	1.6	4.3	4.7	5.5	7.8	9.0	10.8	12.3	14.8	15.9	18.8	78	82	75
3/8	●	●			18SQ	4.0	2.4	5.3	5.9	6.9	9.7	11.1	13.4	15.3	18.4	19.8	23	71	75	68
	●	●	●		29SQ	5.6	3.2	8.5	9.5	11.1	15.7	17.9	22	25	30	32	38	71	75	68
1/2			●		36SQ	6.4	3.2	10.6	11.8	13.7	19.5	22	27	31	37	40	47	78	82	75
			●		50SQ	6.7	4.4	14.7	16.3	19.1	27	31	37	42	51	55	65	71	75	68



Figura 3.15 - Imagem do aspersor de pulverização quadrada utilizado nos ensaios. Fonte: Catálogo do fabricante

O bico aspersor utilizado foi colocado no centro da área a ser ensaiada a uma altura de 1,89 metros da caixa contendo o solo, podendo atuar sob pressões diversas exercidas por um conjunto motor-bomba elétrico e monitorado por um manômetro e uma válvula solenoide, localizados na tubulação da rede hidráulica. Próximo ao conjunto motor-bomba está localizado um reservatório de água constituído por um reservatório plástico de 200 litros, mostrado na Figura 3.11.

3.7.3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENSAIO

A inclinação da caixa acrílica para o primeiro ensaio - considerado ensaio teste - foi de 45°, em conformidade com os taludes de campo localizados nos canais de adução da Barragem de Simplício/Eletrobras Furnas, que possuem a mesma inclinação. Após a realização do primeiro ensaio teste verificou-se a ruptura do solo para essa inclinação. Foi realizado então o ensaio de cisalhamento direto para verificar os parâmetros de resistência do material e uma análise de estabilidade de taludes (condição de talude infinito) nas condições desejadas e, a partir daí, realizar os próximos ensaios com nova inclinação. A inclinação definida a partir do ensaio de cisalhamento foi de 25° para todos os ensaios de simulação da chuva. Os detalhes para os cálculos da estabilidade de taludes estão no ANEXO 1.

A chuva gerada pelo equipamento foi com o aspersor de pulverização quadrada de ¼ - 10SQ – HHSQ na pressão de 70 kPa, gerando um Coeficiente de Uniformidade da Chuva de Christiansen - CUC de 70% e uma intensidade de 131 mm/h. O tempo de duração da chuva foi de 1 hora. Esses dados serão determinados no item 3.9 referente aos parâmetros da chuva.

Foram realizados ensaios para determinação da uniformidade e intensidade da chuva gerada pelo equipamento. Vale ressaltar que a norma ASTM D7101-13 (2013) estabelece que as calibrações realizadas para a determinação dos parâmetros da chuva, tais como, uniformidade, intensidade e tamanho da gota, devem ser realizadas anualmente ou após

qualquer manutenção do equipamento.

O solo foi compactado na caixa acrílica, em camadas, atingindo a densidade de campo, executando o ensaio de massa específica com emprego de balança hidrostática e umidade, para a verificação dos valores. Posteriormente, foi verificada a centralidade da caixa em relação ao aspersor utilizando-se um prumo de centro.

3.8 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CHUVA

3.8.1 UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA

Como estudos e testes preliminares para determinar a uniformidade de distribuição da chuva, foi executado o ensaio com a colocação de 25 copos plásticos em toda a área da caixa, com 0,20 m de distância entre eles, como mostra a Figura 3.16. O procedimento para determinar a uniformidade foi baseado no trabalho de Sousa Júnior (2011). Em uma primeira etapa de testes, foram executados os ensaios com o aspersor na altura de 1,05 m; na segunda etapa, a altura do aspersor foi de 1,89 m.

Na primeira etapa, foi testado o aspersor de pulverização quadrada $\frac{1}{2}$ - 29SQ – HHSQ nas pressões de 40, 70, 100 e 150 kPa para o tempo de 1 minuto de chuveiramento. Para cada uma dessas pressões, o ensaio foi executado três vezes para verificar a variabilidade dos resultados. O aspersor foi fixado na parte superior da estrutura metálica e, posteriormente, foi verificado se ele estava no prumo e no centro da caixa.



Figura 3.16 - Vista geral da caixa metálica e os copos para o ensaio de uniformidade

Após a colocação dos copos, foi ligado o conjunto motor-bomba e ajustada a frequência em um inversor de frequência para a pressão desejada e verificada no manômetro. Estando na pressão desejada, abria-se o registro que ligava ao aspersor colocando-se um recipiente abaixo dele até a estabilização do jato. Após a estabilização, o recipiente era

retirado e contava-se 1 minuto de chuveiramento. Posteriormente, cada copo foi pesado e calculada a quantidade de água em cada um. Depois, com esses dados, calculou-se o Coeficiente de Uniformidade da Chuva de Christiansen (CUC) para cada pressão aplicada.

Na segunda etapa, foram testados dois tipos de aspersores nas pressões de 70, 100 e 150 kPa para o tempo de 1 minuto de chuveiramento a uma altura de 1,89 m, sendo executado o ensaio três vezes para cada uma das pressões citadas. Os aspersores utilizados foram de pulverização quadrada $\frac{1}{4}$ - 10SQ – HHSQ e o $\frac{1}{2}$ - 29SQ – HHSQ. A Figura 3.17 apresenta detalhes deste ensaio.



(a) Vista geral



(b) Distribuição dos copos

Figura 3.17 - Detalhes do chuveiramento com altura de 1,89 m

3.8.2 INTENSIDADE DA CHUVA

Durante o ensaio para determinar a uniformidade da chuva, obteve-se também dados para a determinação da intensidade, a qual foi calculada pela Equação 3.3.

$$I = \left[\frac{V/S}{t} \right] * 60 \quad (3.3)$$

Onde: I é a intensidade da chuva, em mm/h;

V é o volume da água coletado, em litros;

S é a área de coleta (caixa), em m²; e

t é o tempo de teste, em minutos.

Conforme dados obtidos de Cardoso *et al.* (2016) oriundos da estação pluviométrica Moura Brasil, no município de Três Rios - RJ, localizada na região próxima à Barragem de

Simplício, tem-se, para um período de retorno de 10 anos e uma duração de chuva de 20 minutos, a intensidade média de chuvas de 124,7 mm/h, conforme mostra a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Intensidade da Chuva em mm/h. Município Três Rios-RJ. Fonte: Cardoso et al. (2016)

Duração da Chuva	Tempo de Retorno (anos)											
	2	5	10	15	20	25	40	50	60	75	90	100
5 Minutos	146,3	173,8	198,0	213,6	225,5	235,1	256,8	267,8	277,1	288,9	299,0	305,0
10 Minutos	122,0	144,9	165,1	178,1	188,0	196,1	214,1	223,3	231,1	241,0	249,4	254,3
15 Minutos	104,9	124,6	142,0	153,2	161,7	168,6	184,1	192,0	198,7	207,2	214,4	218,7
20 Minutos	92,2	109,5	124,7	134,6	142,1	148,2	161,8	168,7	174,6	182,1	188,4	192,2
30 Minutos	74,5	88,5	100,8	108,8	114,8	119,7	130,8	136,3	141,1	147,1	152,3	155,3
45 Minutos	58,2	69,1	78,7	84,9	89,7	93,5	102,1	106,5	110,2	114,9	118,9	121,3
1 Horas	47,9	56,9	64,9	70,0	73,9	77,0	84,1	87,7	90,8	94,7	98,0	99,9
2 Horas	28,6	34,0	38,7	41,8	44,1	46,0	50,2	52,4	54,2	56,5	58,5	59,7
3 Horas	20,7	24,6	28,0	30,2	31,9	33,2	36,3	37,8	39,2	40,8	42,2	43,1
4 Horas	16,3	19,4	22,0	23,8	25,1	26,2	28,6	29,8	30,8	32,2	33,3	34,0
5 Horas	13,5	16,0	18,3	19,7	20,8	21,7	23,7	24,7	25,6	26,7	27,6	28,1
6 Horas	11,6	13,7	15,6	16,9	17,8	18,6	20,3	21,1	21,9	22,8	23,6	24,1
7 Horas	10,1	12,0	13,7	14,8	15,6	16,3	17,8	18,5	19,2	20,0	20,7	21,1
8 Horas	9,0	10,7	12,2	13,2	13,9	14,5	15,8	16,5	17,1	17,8	18,4	18,8
12 Horas	6,3	7,5	8,6	9,2	9,8	10,2	11,1	11,6	12,0	12,5	12,9	13,2
14 Horas	5,5	6,6	7,5	8,1	8,5	8,9	9,7	10,1	10,5	10,9	11,3	11,5
20 Horas	4,0	4,8	5,5	5,9	6,2	6,5	7,1	7,4	7,6	8,0	8,3	8,4
24 Horas	3,4	4,1	4,6	5,0	5,3	5,5	6,0	6,3	6,5	6,8	7,0	7,2

O valor da intensidade da chuva definido para o ensaio foi de acordo com os resultados dos ensaios de uniformidade que também fornecem elementos para esse cálculo, e tomando como referência os dados pluviométricos da região da Barragem de Simplício.

3.8.3 DIÂMETRO DAS GOTAS DA CHUVA

Existem vários métodos para determinar o diâmetro da gota de água, tais como, método da farinha, do papel filtro, do disdrômetro, do laser óptico e da placa de Petri. Neste trabalho, foi utilizado o método da farinha para determinar o diâmetro da gota de água, sendo este método executado tomando-se como base o estudo realizado por Carvalho *et al.* (2012) e, também, outros trabalhos relacionados.

O método da farinha consiste em coletar gotas de água em bandejas com uma camada de farinha de trigo peneirada na peneira de 1,18 mm, com dois centímetros de altura, onde posteriormente essas gotas de água transformam-se em grânulos de farinha que, depois de secos, serão separados em diversas aberturas de peneiras para determinar o diâmetro médio dos grânulos.

Segundo Carvalho *et al.* (2012), para a aplicação do método são necessárias duas

etapas. Primeiramente, faz-se a curva de calibração das gotas; posteriormente, obtém-se a distribuição volumétrica das mesmas. Para a obtenção dessa curva de calibração, foram feitos experimentos com agulhas hipodérmicas de diversas aberturas, para conseguir a relação da massa de água da gota e a massa do grânulo.

A primeira etapa de todo o procedimento foi elaborar uma curva com o diâmetro da agulha e diâmetro da gota de água, baseado em Carvalho *et al.* (2012). O experimento foi realizado com agulhas hipodérmicas de várias aberturas (0,30; 0,45; 0,55; 0,70; 0,80; 1,20 e 1,60 mm). Essas aberturas foram baseadas no trabalho de Souza Júnior (2011).

Para o referido experimento, foi utilizado um frasco de soro fisiológico com água destilada até a sua parte superior, sendo mantido o nível da água dentro do frasco durante todos os ensaios para as diferentes aberturas das agulhas, regulando-se também a velocidade de queda da gota de água.

O frasco com a agulha estava fixado a uma altura de 0,40 m em relação à balança eletrônica para peso do conjunto copo mais água, conforme mostra a Figura 3.18. Foi executado o gotejamento de 100 gotas para cada agulha, obtendo-se a massa de água total. Este ensaio foi repetido três vezes, e utilizou-se nos cálculos o valor médio das três repetições para se encontrar a massa média para cada agulha.



Figura 3.18 - Determinação da massa da água da gota pelas agulhas hipodérmicas

Após a determinação da massa de água da gota, é necessário determinar a massa e o diâmetro dos grânulos. Para isso, foi feito o gotejamento da água destilada em bandejas com farinha de trigo, conforme descrição a seguir. Os materiais utilizados foram as agulhas hipodérmicas nas mesmas aberturas anteriores, peneiras com diferentes aberturas (0,85; 1,00; 1,18; 1,40; 1,70; 1,80; 2,00; 2,36; 2,8 e 4,75 mm), frasco de soro fisiológico com água

destilada, farinha de trigo, bandejas de alumínio, cápsulas e estufa à 60°C. A Figura 3.19 mostra os materiais usados.



Figura 3.19 - Vista geral dos materiais utilizados para determinação dos grânulos utilizando as agulhas hipodérmicas

As bandejas foram lavadas e secas, fazendo-se uma marca de 2 cm de altura para a camada de farinha. Depois, foi peneirada a farinha de trigo com a peneira de 1,18 mm até a altura demarcada, como mostra a Figura 3.20 com as bandejas já preparadas para o ensaio.



Figura 3.20 - Bandejas preparadas para determinação do diâmetro da gota e do grânulo

O frasco de soro fisiológico tinha água destilada até a parte superior e o nível de água foi mantido no frasco durante todos os ensaios. Posteriormente, foi ajustada a altura de 2,00 m da agulha em relação à bandeja preenchida com a farinha de trigo e feito o alinhamento e o nivelamento.

A velocidade de gotejamento foi regulada. Foram gotejadas 50 gotas em cada bandeja para cada diâmetro de agulha (Figura 3.21). Como esperado, a água em contato com a farinha não compactada formou os grânulos. Após a secagem, estes foram separados por peneiras em diferentes tamanhos.



Figura 3.21 - Bandejas com os grânulos formados pelo gotejamento com as agulhas hipodérmicas

Para a determinação do diâmetro do grânulo foram utilizadas duas metodologias, uma de secagem ao ar e a outra de secagem ao ar mais estufa. Uma das metodologias testadas é a de realizar o peneiramento logo após a secagem ao ar por 24 horas para obtenção dos grânulos de farinha. Na outra metodologia, após o período de 24 horas de secagem ao ar, colocam-se as bandejas na estufa a 60°C até se atingir a constância de massa. A Figura 3.22 mostra as bandejas em intervalos de tempos diferentes na estufa.



Figura 3.22 - Bandejas após gotejamento de água na farinha com intervalos de tempos diferentes na estufa

Posteriormente a esses procedimentos diferentes de secagem, foi realizado o peneiramento para se obter os grânulos de farinha referentes a cada malha de peneira levados novamente à estufa até a constância de massa. Os grânulos formados pelo procedimento são mostrados na Figura 3.23.

Para obter-se a distribuição volumétrica das gotas das chuvas geradas pelo aspersor, gerou-se uma chuva com o aspersor especificado, que, nesse caso, foi o aspersor de pulverização quadrada de ¼ - 10SQ – HHSQ, com uma pressão de 70 kPa, para atender a intensidade desejada.

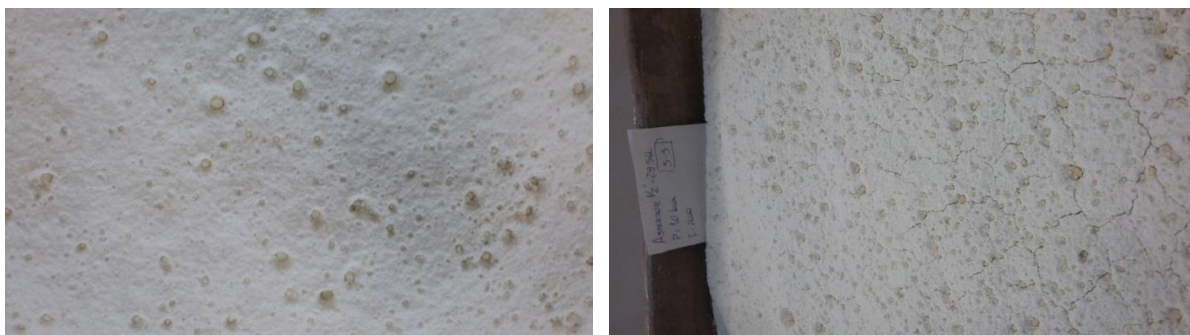


Figura 3.25 - Detalhe do chuveiramento nas bandejas com farinha

Depois da precipitação de 2 segundos em cada bandeja, elas foram deixadas secar ao ar por 24 horas. Após esse período, três bandejas foram colocadas na estufa para secagem e as outras três foram levadas para peneirar os grânulos nas peneiras 4,75; 3,35; 2,80; 2,36; 2,00; 1,70; 1,40; 1,18; 1,00; 0,85 e 0,60 mm. Foram feitas pesagens com as três bandejas que foram levadas à estufa até a constância de massa e peneirados os grânulos como nas bandejas secas ao ar.

Posterior ao peneiramento e a retirada da umidade na estufa até a constância de massa, foi calculado o peso total dos grânulos retidos em cada peneira, a contagem dos grânulos e seu peso médio. As Figuras 3.26 e 3.27 mostram a sequência usada para o peneiramento e a contagem dos grânulos utilizando uma balança digital com precisão de 0,001 g.



Figura 3.26 - Detalhe do peneiramento dos grânulos formados pela farinha

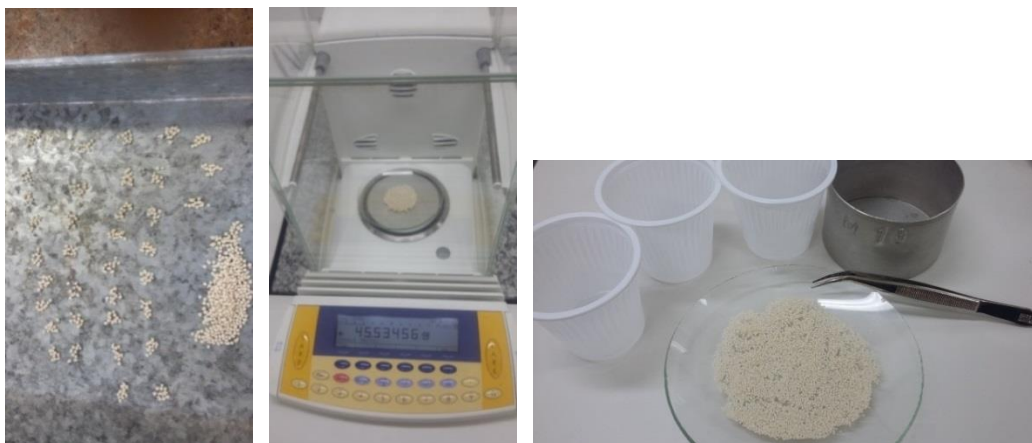


Figura 3.27 - Detalhe da contagem dos grânulos formados pela farinha

Com esses dados foi possível calcular o diâmetro médio dos grãos em cada peneira utilizando a Equação 3.4, que D é o diâmetro médio da gota em mm, m é a massa média da gota em mg, e ρ é a massa específica da água em mg/mm^3 . A massa específica da água foi considerada igual a $0,997 \text{ mg}/\text{mm}^3$.

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho}} \quad (3.4)$$

O volume de cada gota é obtido pela Equação 3.5, sendo V o volume da gota de água em mm^3 e D é o diâmetro médio da gota em mm. O volume de água por peneira é calculado multiplicando o volume da gota pelo número de grânulos em cada peneira.

$$V = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \quad (3.5)$$

Encontrado o volume de água por peneira, calcula-se o volume acumulado e, a partir daí, é elaborado um gráfico com a relação entre o diâmetro médio do grânulo retido em cada peneira e o volume de água acumulado, sendo possível determinar o diâmetro médio para 50% das gotas, ou seja, o D_{50} .

3.8.4 VELOCIDADE TERMINAL E TEMPO DE QUEDA

Com o valor de D_{50} na pressão definida para o aspersor é possível calcular o valor da velocidade terminal da gota pela Equação 3.6 descrita a seguir.

$$v = \left(\frac{g}{C}\right)^{1/2} * \tanh[T(g * C)^{1/2}] \quad (3.6)$$

Nessa equação v é a velocidade de impacto das gotas em m/s, g é a aceleração da gravidade, considerada $9,81 \text{ m/s}^2$, C é o coeficiente de atrito com o ar, adimensional, e T é o tempo de queda em segundos. Calcula-se o tempo de queda T pela Equação 3.7 e o coeficiente de atrito com o ar pela Equação 3.8, apresentadas abaixo.

$$T = \cosh^{-1}[\exp(Z * C)] * (g * C)^{-1/2} \quad (3.7)$$

$$C = \frac{(0,804 - 0,264D + 0,066D^2 - 0,004D^3)}{1,109D} \quad (3.8)$$

Onde Z é a altura de queda da gota de chuva simulada, em m e D é o diâmetro das gotas, em mm.

3.8.5 ENERGIA CINÉTICA DA CHUVA

Para a determinação da energia cinética, adotou-se a equação de Wagner & Massambani (1988), que relaciona a energia cinética e a intensidade de precipitação da chuva, dada por:

$$EC = 0,153 + 0,0645 \log I \quad (3.9)$$

Onde EC é a energia cinética, em $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, e I é a intensidade da chuva, em mm/h .

3.9 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CHUVA

3.9.1 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE CHRISTIANSEN (CUC)

Para definir os parâmetros da chuva a serem utilizados nos ensaios de simulação de chuva, foram realizados vários ensaios para a determinação da intensidade e uniformidade da chuva para que fossem compatíveis com os valores prováveis no campo.

Os dados utilizados para obtenção do Coeficiente de Uniformidade são os mesmos

usados para a determinação da intensidade da precipitação, pois esses parâmetros se relacionam (Tabelas 3.10 e 3.11). Os valores apresentados na Tabela 3.11 correspondem aos dados fornecidos pelo fabricante dos aspersores.

Tabela 3.10 - Dados gerais para determinação do CUC e da intensidade de precipitação

Área do copo (m ²)	Quantidade de copos (un.)	Altura da chuva (m)	Duração da chuva (min.)	Área da amostra (m ²)
0,00126	25	1,89	1	1
0,00594	25	1,05	1	1

Tabela 3.11 - Valores de pressão e volume para determinação do CUC e da intensidade de precipitação

Aspersor	Pressão do ensaio (kPa)	Volume da chuva (l/min.)
Quadrado 1/2	150	15,7
	100	13,4
	70	11,1
Quadrado 1/4	200	6,2
	150	5,4
	70	3,8

Para o cálculo do CUC foi utilizada a Equação 4.1.

$$CUC (\%) = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n * \bar{X}}\right) \quad (4.1)$$

Onde: X_i é a lâmina d'água em cada copo;

\bar{X} é a lâmina média precipitada pelo chuveiramento; e

n é o número de copos coletores.

Para a obtenção dos valores de CUC e intensidade da precipitação foram realizados os ensaios em duas etapas, variando-se na primeira etapa a altura da chuva e na segunda etapa a altura da chuva e o aspersor. Na primeira etapa, a altura foi de 1,05 metros e, na segunda etapa, de 1,89 metros. Nas condições apresentadas para a 1ª etapa de ensaios foram encontrados os resultados mostrados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,05 m – aspersor de ½"

Pressão do ensaio kPa	Coeficiente de Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
150	86,26	86,77	85,86	86,30
100	73,11	74,60	73,91	73,87
70	64,87	62,94	60,28	62,70
40	6,85	6,54	0,42	4,60

Quando se desprezam os copos de coleta de amostras da água da chuva das extremidades, os valores de CUC aumentam, mostrando que na área ensaiada a região mais central possui uma maior uniformidade de chuveiramento (Herngren, 2005; Loch *et al.*, 2001; Lascelles *et al.*, 2000). A Tabela 3.13 mostra os valores obtidos desprezando-se os copos das extremidades.

Tabela 3.13 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,05 m desprezando os valores das extremidades – aspersor de ½”

Pressão do ensaio kPa	Coeficiente de Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
150	87,71	87,97	87,47	87,72
100	81,98	83,40	82,36	82,58
70	83,99	84,60	80,79	83,13
40	48,41	49,31	44,92	47,55

Já para os valores da 2ª etapa, para a altura de 1,89 metros, foram utilizados dois aspersores, um de ½” e o outro de ¼”, com as mesmas características, como apresentado anteriormente no item 3.7.2. As Tabelas 3.14 a 3.17 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 3.14 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ½”

Pressão do ensaio kPa	Coeficiente de Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
150	81,64	80,45	81,18	81,09
100	83,72	81,32	81,75	82,26
70	79,12	81,16	78,26	79,51

Tabela 3.15 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ½” desprezando os valores das extremidades

Pressão do ensaio kPa	Coeficiente de Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
150	90,62	88,77	88,15	89,18
100	87,89	88,56	90,08	88,84
70	83,04	85,10	85,81	84,65

Tabela 3.16 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ¼”

Pressão do ensaio kPa	Coeficiente de Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
200	60,23	62,05	62,06	61,45
150	62,01	62,95	60,71	61,89
70	60,03	57,88	57,70	58,54

Tabela 3.17 - Valores de CUC para diferentes pressões com altura de 1,89 m e aspersor de ¼” desprezando os valores das extremidades

Pressão do ensaio kPa	Coeficiente de Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
200	76,36	79,64	80,36	78,79
150	68,49	76,11	75,63	73,41
70	65,13	70,23	73,27	69,54

Os maiores coeficientes de uniformidade (CUC) foram obtidos tanto para o aspersor ½ - 29SQ – HHSQ quanto para o aspersor ¼ - 10SQ – HHSQ, quando submetidos a maiores pressões de ensaio.

O trabalho de Miguntanna (2009) apresentou um coeficiente de uniformidade em torno de 70%, assim como os trabalhos de Sousa Júnior & Siqueira (2011) e Loch *et al.* (2001), sendo esse valor considerado suficiente para uma simulação de chuva bem sucedida. Sendo assim, para os ensaios desta pesquisa foi adotado o aspersor de ¼ - 10SQ – HHSQ na pressão de 70 kPa, isso porque para essa pressão tem-se uma intensidade de chuva com valor próximo de 124 mm/h, que é a intensidade de campo, e um valor de CUC de 70%.

3.9.2 DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE DA CHUVA

Com os resultados dos ensaios de uniformidade, calculou-se a intensidade de precipitação originada para aquelas condições. Na Tabela 3.18 têm-se os dados coletados e resultados obtidos para a determinação da intensidade da chuva gerada com o tempo de 1 minuto de aspersão, altura de 1,89 metros e várias pressões.

Tabela 3.18 - Valores de intensidade de chuva para diferentes pressões com altura de chuva de 1,89 m

Aspersor	Pressão do ensaio kPa	Volume coletado no ensaio (l)			Volume médio l	Intensidade (mm/h)			Intensidade média mm/h
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
FullJet Quadrado 1/2	150	4,37	4,46	4,38	4,41	262,39	267,58	263,09	264,35
	100	3,77	3,71	3,67	3,72	226,00	222,72	220,11	222,95
	70	3,69	3,69	3,76	3,71	221,64	221,50	225,38	222,84
FullJet Quadrado 1/4	200	3,22	3,22	3,00	3,15	193,00	193,18	180,15	188,78
	150	2,61	2,70	3,00	2,77	156,64	162,17	180,13	166,31
	70	2,16	2,20	2,20	2,19	129,44	131,91	131,98	131,11

A Tabela 3.19 apresenta os resultados de intensidade e CUC desprezando-se as coletas nas extremidades para as mesmas condições acima. Assim, a intensidade da chuva correspondente às condições adotadas nesta pesquisa foi de 131 mm/h.

Tabela 3.19 - Valores de intensidade e CUC para diferentes pressões e aspersor com altura de chuva de 1,89 m

Aspersor	Pressão do ensaio	Intensidade média	CUC médio
	kPa	mm/h	%
FullJet Quadrado 1/2	150	264	89
	100	223	89
	70	223	85
FullJet Quadrado 1/4	200	189	79
	150	166	73
	70	131	70

Na Tabela 3.20 são mostrados os valores de intensidade para diferentes pressões de serviço, com uma altura de chuveiramento de 1,05 m e com o aspersor de pulverização quadrada de ½". Não foi executado este ensaio na altura de 1,05 m com o aspersor de ¼".

Tabela 3.20 - Valores de intensidade para diferentes pressões com altura de chuva de 1,05 m

Aspersor	Pressão do ensaio kPa	Volume coletado no ensaio (l)			Volume médio l	Intensidade (mm/h)			Intensidade média mm/h
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
FullJet Quadrado 1/2	150	12,78	12,61	12,94	12,78	766,80	756,84	776,67	766,77
	100	11,45	11,37	11,39	11,40	687,20	682,23	683,29	684,24
	70	9,45	9,22	9,41	9,36	567,30	553,40	564,74	561,82
	40	5,95	5,90	5,68	5,84	357,05	353,92	340,65	350,54

Observa-se que, para altura menor, a intensidade apresentou valores muito altos, impossibilitando a utilização dessa situação para os ensaios de chuveiramento. Os valores do CUC não aumentaram para a altura de 1,05 m, sendo maiores para a altura de 1,89 m. Entretanto, a intensidade é muito elevada, demonstrando que, quanto maior a altura de geração da precipitação, menor a intensidade da mesma. A Tabela 3.21 mostra um resumo dos resultados dos ensaios de intensidade e CUC para a altura de 1,05 m.

Tabela 3.21 - Valores de intensidade e CUC para diferentes pressões e aspersor com altura de chuva de 1,05 m

Aspersor	Pressão do ensaio	Intensidade média	CUC médio
	kPa	mm/h	%
FullJet Quadrado 1/2	150	767	88
	100	684	83
	70	562	83
	40	351	48

Tendo em vista os resultados apresentados, foi adotado para os ensaios de simulação de chuva o aspersor de pulverização quadrada de ¼ - 10SQ – HHSQ, com a pressão de 70 kPa e intensidade de 131 mm/h.

3.9.3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DA GOTA

Para a determinação do diâmetro das gotas geradas pela precipitação simulada pelos aspersores, foram executados testes por meio do Método da Farinha.

Na primeira etapa de calibração foi encontrada a massa média para o gotejamento de 100 gotas de água destilada para cada agulha. Com os valores da massa média da gota de água calculou-se o diâmetro médio da gota com os dados apresentados na Tabela 3.22. Após esse procedimento, elaborou-se o gráfico contendo a curva com o diâmetro da agulha versus o diâmetro da gota de água, mostrado na Figura 3.28.

Tabela 3.22 - Massa média das gotas e diâmetro médio da gota de água pelas agulhas hipodérmicas

Diâmetro da agulha (mm)	Massa média de água da gota (g)	Diâmetro médio da gota (mm)
0,30	0,0033	1,84
0,45	0,0051	2,13
0,55	0,0080	2,48
0,70	0,0112	2,78
0,80	0,0130	2,92
1,20	0,0192	3,32
1,60	0,0223	3,50

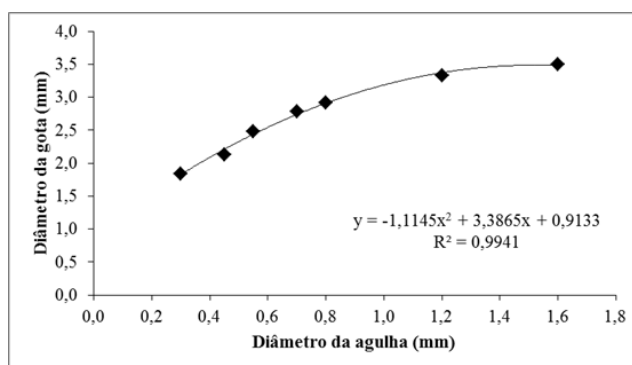


Figura 3.28 - Diâmetro da agulha versus diâmetro da gota de água pelas agulhas hipodérmicas

Posterior a essa etapa, foi realizado o gotejamento de água com as agulhas hipodérmicas nas bandejas com farinha de trigo. O ensaio foi realizado duas vezes, para testar duas metodologias diferentes para o cálculo do diâmetro do grânulo. Depois do gotejamento da água nas bandejas com a farinha de trigo, as mesmas foram deixadas por 24 horas secando ao ar. As duas metodologias para o gotejamento nas bandejas foram: seco ao ar e seco ao ar + estufa.

Com o gotejamento nas bandejas de farinha obteve-se os valores da massa do grânulo formado. Na Figura 3.29 é apresentada a relação entre a massa da gota d'água e a massa do grânulo.

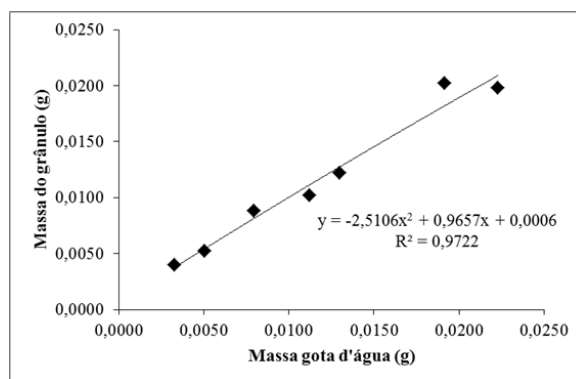


Figura 3.29 - Relação massa da gota d'água e massa do grânulo

Seguindo a metodologia usada por Carvalho *et al.* (2012), com os dados adquiridos elabora-se a curva de calibração apresentada na Figura 3.30, que expressa a relação entre a massa de água da gota e massa do grânulo formado pelo gotejamento. Apesar da alta dispersão, também observado por Carvalho *et al.* (2012), foi ajustada a curva obtendo o coeficiente de determinação de 0,41.

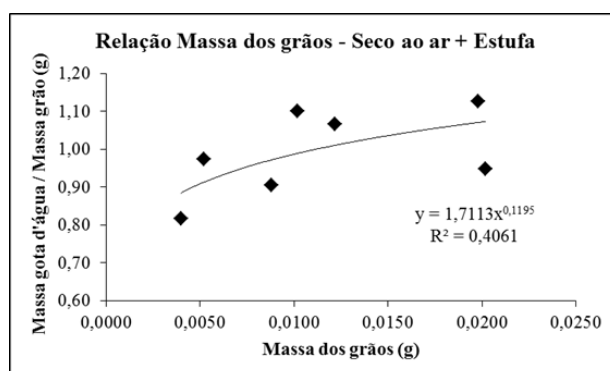


Figura 3.30 - Relação entre massa da gota de água e massa do grânulo pela metodologia de seco ao ar + estufa

Da interpolação obteve-se a Equação 4.2, onde M_a é a massa de água da gota e M_g é a massa do grânulo.

$$\frac{M_a}{M_g} = 1,7113 * M_g^{0,1195} \quad (4.2)$$

Refazendo os cálculos para a opção somente de seco ao ar sem levar para a secagem na estufa posteriormente, têm-se os resultados apresentados na Figura 3.31.

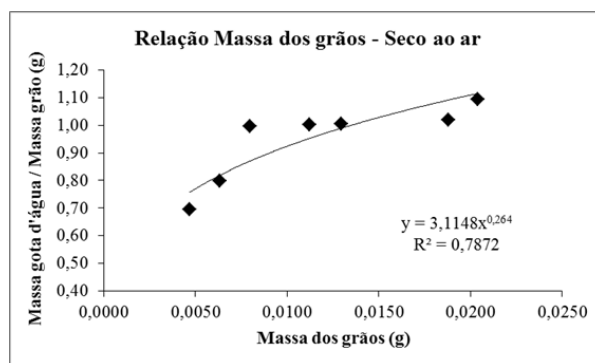


Figura 3.31 - Relação entre massa da gota de água e massa do grânulo pela metodologia de seco ao ar

Com os resultados da opção de seco ao ar tem-se a Equação 4.3, onde M_a é a massa de água da gota e M_g é a massa do grânulo.

$$\frac{M_a}{M_g} = 3,1148 * M_g^{0,264} \quad (4.3)$$

Para essa opção, a dispersão foi menor, e depois do ajuste conseguiu-se um coeficiente de determinação de 0,79. Esse valor é praticamente o dobro da opção de seco ao ar + estufa. Portanto, a partir desse resultado foi adotada a metodologia de seco ao ar para os cálculos futuros, não se utilizando os dados de seco ao ar + estufa.

Após a obtenção da curva de calibração e do chuveiramento com o aspersor nas bandejas de farinha por dois segundos, calculou-se o diâmetro e a distribuição volumétrica das gotas nas peneiras e o volume acumulado que está apresentado na Tabela 3.23.

Na Figura 3.32 é apresentada a relação entre o diâmetro médio do grânulo retido em cada peneira e o volume de água acumulado. Com essa relação tem-se o diâmetro médio para 50% das gotas, ou seja, o D_{50} . Com os dados da figura encontrou-se o valor do D_{50} igual a 1,92 mm.

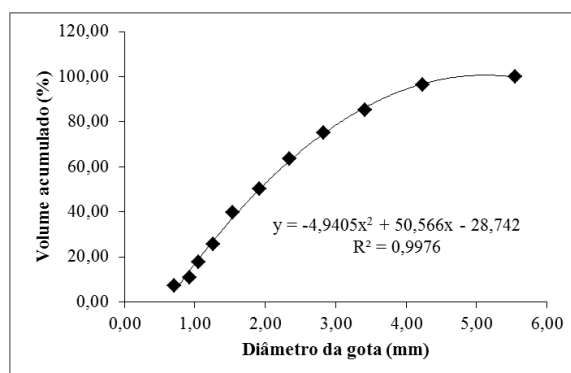


Figura 3.32 - Relação entre diâmetro da gota e volume acumulado com aspersor quadrado de 1/4" na pressão de 70kPa pela metodologia seco ao ar

Tabela 3.23 - Resultados do chuveiramento com o aspersor quadrado de ¼" para a pressão de 70 kPa durante 2 segundos nas bandejas de farinha de trigo na metodologia seco ao ar

Peneira (mm)	4,75	3,35	2,80	2,36	2,00	1,70	1,40	1,18	1,00	0,85	0,60
Nº de grânulos	1	19	21	47	96	162	421	299	481	423	1967
Massa Total grânulos por peneira (g)	0,0983	0,5983	0,193	0,5237	0,6043	0,6260	0,8653	0,3477	0,3460	0,2027	0,4480
Massa Unitária grânulos por peneira (g)	0,0608	0,0344	0,0165	0,0112	0,0063	0,0038	0,0021	0,0012	0,0007	0,0005	0,0002
Massa média de água da gota (g)	0,1031	4,0345	0,0173	0,0112	0,0059	0,0034	0,0017	0,0009	0,0005	0,0003	0,0001
Relação das Massas	1,6961	117,3446	1,0481	1,0009	0,9347	0,8806	0,8171	0,7634	0,7206	0,6861	0,6292
Diâmetro médio da gota d'água (mm)	4,3252	4,0345	3,2117	2,7819	2,2474	1,8653	1,4769	1,1939	0,9974	0,8558	0,6528
Volume médio da gota (cm³)	0,1034	0,0345	0,0174	0,0113	0,0059	0,0034	0,0017	0,0009	0,0005	0,0003	0,0001
Volume total das gotas na classe (cm³)	0,1379	0,6437	0,3645	0,5338	0,5686	0,5517	0,7102	0,2665	0,2502	0,1387	0,2867
% de Volume	3,0963	14,4578	8,1870	11,9882	12,7699	12,3906	15,9514	5,9864	5,6183	3,1157	6,4385
% de Volume Acumulado	100,0000	96,9037	82,4460	74,2589	62,2708	49,5008	37,1102	21,1589	15,1725	9,5542	6,4385
Coefficiente de Atrito	0,1195	0,1230	0,1416	0,1602	0,2001	0,2491	0,3328	0,4351	0,5446	0,6574	0,9098

3.9.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE TERMINAL E DO TEMPO DE QUEDA

Com o valor de D_{50} pode-se estimar o valor da velocidade terminal da gota (v), ou seja, a velocidade de impacto com que a gota chega ao solo a ser submetido ao chuveiramento. Determina-se também qual o tempo que a gota gasta para atingir o solo. Na Tabela 3.24 são apresentados os valores utilizados nos respectivos cálculos. As equações correspondentes foram apresentadas no item 3.8.4.

Tabela 3.24 - Valores da velocidade terminal, tempo de queda e coeficiente de atrito para o aspersor quadrado de ¼ na pressão de 70 kPa pela metodologia seco ao ar

D_{50}	g	Z	C	T	v
mm	m/s ²	m		s	m/s
1,92	9,81	1,89	0,2405	0,2262	2,1335

3.9.5 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA CINÉTICA DA CHUVA

Com a utilização da equação de Wagner & Massambani (1988), encontra-se o valor da energia cinética para a condição de intensidade de precipitação 131 mm/h gerada por uma pressão de 70 kPa com um aspersor quadrado de ¼" e altura de chuva de 1,89 m (Tabela 3.25). Nesse caso, a porcentagem da energia cinética da chuva simulada comparada com a da chuva natural é de 100%. Esse é um ótimo resultado, pois a literatura recomenda que essa porcentagem deve ser de, no mínimo, 75%.

Tabela 3.25 - Valor da energia cinética para a chuva simulada e para chuva natural

Chuva Simulada		Chuva Natural	
I	EC	I	EC
mm/h	MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹	mm/h	MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹
131	0,290	124,7	0,288

3.9.6 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CHUVA PARA A CAIXA DE 0,3 X 0,3 M

Para a determinação dos parâmetros da chuva utilizada nos ensaios de simulação de chuva com a caixa acrílica 0,3 x 0,3 x 0,10 m, foi empregada a mesma metodologia utilizada para a caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m. Portanto, neste item serão apresentadas somente as diferenças pertinentes ao tamanho da caixa.

Não foram executados ensaios para definir a pressão de ensaio, pois isso já foi definido nos ensaios para a caixa acrílica maior (1,0 x 1,0 x 0,15 m). Para a determinação da uniformidade da chuva, já se partiu da pressão de 70 kPa, com o tempo de 1 minuto de chuveiramento, a uma altura de 1,89 m, com o ensaio sendo executado três vezes para a obtenção da média dos valores. O aspersor utilizado foi o mesmo, aspersor de pulverização quadrada de ¼ - 10SQ – HHSQ.

Foram colocados 16 copos na caixa acrílica 0,3 x 0,3 x 0,10 m, com uma distância de 0,08 m entre eles, como apresenta a Figura 3.33. Após a disposição dos copos na caixa, foi ajustada a pressão de 70 kPa e, após a sua estabilização, aplicou-se 1 minuto de chuveiramento. Com os valores dos três ensaios calculou-se o Coeficiente de Uniformidade da Chuva de Christiansen (CUC). A intensidade da chuva também foi determinada no mesmo ensaio juntamente com o coeficiente de uniformidade.



Figura 3.33 - Detalhes da preparação do ensaio para determinação do CUC

3.9.7 DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE E INTENSIDADE DA CHUVA PARA A CAIXA ACRÍLICA 0,3 X 0,3 M

A determinação da uniformidade e da intensidade da chuva, para a caixa acrílica pequena (0,3 x 0,3 x 0,1 m) foi de acordo com os mesmos procedimentos utilizados para a caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m.

A Tabela 3.26 mostra o resultado do CUC médio para a pressão de 70 kPa (pressão definida de acordo com os ensaios na caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m), sendo adotado nesta pesquisa o valor de 84%.

Tabela 3.26 - Valores de CUC com altura de 1,89 m e aspersor de 1/4" - caixa acrílica pequena

Pressão do ensaio	Coeficiente Uniformidade da Chuva (CUC) (%)			CUC médio (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	
kPa				
70	84,31	84,94	81,33	83,53

No ensaio para a determinação do coeficiente de uniformidade também foi determinada a intensidade da chuva simulada. A Tabela 3.27 mostra o valor da intensidade adotada para os ensaios utilizando a caixa acrílica pequena.

Tabela 3.27 - Valores de intensidade e CUC para altura de chuva de 1,89 m - caixa acrílica pequena

Aspersor	Pressão do ensaio	Intensidade média	CUC médio
	kPa	mm/h	%
FullJet Quadrado 1/4	70	130	84

3.10 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 1,0 X 1,0 M

3.10.1 PREPARAÇÃO DO SOLO PARA O ENSAIO

Para a realização do ensaio na caixa acrílica, o solo foi preparado na umidade que corresponde à densidade de campo. A preparação do solo seguiu o procedimento de passar o material na peneira #4 (peneira grande de pé), sendo que o material retido foi destorroado no almofariz e passado na peneira #4 (pequena). Em seguida, retiraram-se três cápsulas para a determinação da umidade higroscópica.

Com o resultado da umidade higroscópica do material, calculou-se a quantidade de água necessária a ser acrescentada no solo. Para isso, espalhou-se o solo na superfície do piso e acrescentou-se água. Coletaram-se três cápsulas para serem levadas à estufa para verificação

da umidade novamente. Após esse procedimento, foi calculada a quantidade de solo necessária para preencher a caixa, sendo em torno de 223 kg. Todo o material foi separado em sacos com aproximadamente 55 kg.

3.10.2 PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DO ENSAIO TESTE

Para a execução do ensaio teste o solo foi compactado na caixa acrílica em quatro camadas com uma altura de 0,0375 m, marcando-se esse valor com um pincel em volta de toda a caixa para facilitar a visualização no momento da compactação.

O solo foi compactado em cada camada com soquete até atingir a marca na caixa, conforme mostra a Figura 3.34. Após a compactação, fizeram-se ranhuras entre as camadas para maior aderência entre elas.



Figura 3.34 - Vista geral do solo sendo compactado na caixa acrílica

A Figura 3.35 exibe alguns detalhes após a compactação do solo na caixa acrílica, onde a camada superior ficou lisa com o solo rente ao limite da caixa. As camadas foram compactadas com alturas iguais; foi marcado o centro da caixa e conferido o prumo do aspersor em relação a essa medida.



Figura 3.35 - Vista do solo compactado na caixa acrílica e a verificação do prumo e centro

Antes da realização do ensaio e após a preparação do solo na caixa, foi realizado outro ensaio de densidade por meio da balança hidrostática para conferir se a massa específica estava próxima à densidade em campo. O valor da umidade foi mantido o mesmo para o valor da densidade seca em campo (15,54%).

Para o ensaio teste, o simulador de chuvas equipado com o aspersor foi regulado pela placa de automação para aplicar uma pressão de 70 kPa em uma área de 1,0 m², gerando uma intensidade de precipitação de 131 mm/h.

3.10.3 REPAROS NO EQUIPAMENTO APÓS O ENSAIO TESTE

Como o equipamento nunca havia sido utilizado, esta pesquisa desenvolveu uma metodologia de procedimento para os ensaios. O primeiro ensaio foi também um teste para o equipamento em si, portanto, houve alguns imprevistos na montagem do ensaio e na sua primeira utilização.

Após a colocação de todo o solo na caixa, com massa em torno de 223 kg, foi iniciada a inclinação da caixa para atingir 45°. No momento da inclinação da caixa, o equipamento não aguentou o peso e a caixa foi abaixo. Com o acontecido, foi necessário instalar uma trava no equipamento para sustentar a caixa com o solo no momento da inclinação e a fixação da estrutura no piso para evitar que ele pudesse girar e cair.

Durante o ensaio, a calha para a coleta de água e sedimentos e os dois orifícios não foram suficientes para o fluxo de água, sendo que, em vários momentos durante o ensaio os sedimentos quase transbordaram. Devido a isso, foram acrescentados mais dois orifícios e foi executado um acréscimo na altura da calha para aumentar a capacidade de coleta, conforme mostra a Figura 3.36.



Figura 3.36 - Detalhe do aumento da calha e do número de orifícios para escoamento

3.10.4 PREPARAÇÃO DA CAIXA ACRÍLICA

Após a avaliação das condições do solo e da caixa acrílica no ensaio teste, resolveu-se recobrir a caixa acrílica com uma geomembrana para aumentar o atrito do solo com a caixa e evitar o seu escorregamento durante a inclinação da caixa. Depois de colocada a geomembrana, foi aplicada uma cola de contato para fixação de areia seca peneirada em toda a caixa, incluindo o fundo e as laterais (Figura 3.37).



Figura 3.37 - Colocação da geomembrana e colagem de areia no fundo e lateral da caixa

3.10.5 COMPACTAÇÃO PARA OS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

Após a execução do ensaio teste, nos outros ensaios a compactação do solo foi feita em duas camadas de 0,075 m e com auxílio de um soquete. Esse modo de compactação acabou por danificar a caixa acrílica. Para diminuir o impacto da compactação na caixa acrílica, adotou-se o método de compactação apresentado por Egeli & Pulat (2011), que compactaram o solo com o apoio de uma placa nas dimensões de 0,50 x 0,50 m, produzindo uma compactação uniforme na caixa. A Figura 3.38 mostra a caixa acrílica utilizada por Egeli & Pulat (2011) nas suas pesquisas.

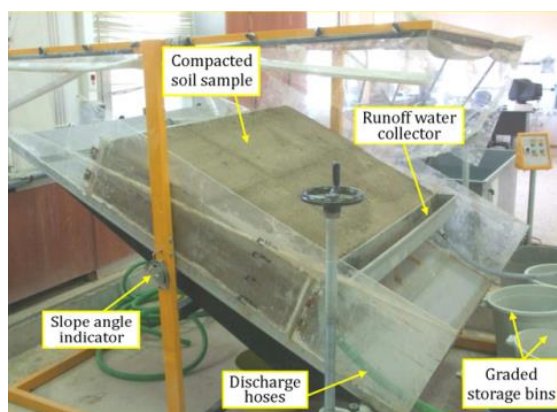


Figura 3.38 - Caixa acrílica utilizada para simulação de chuva por Egeli & Pulat (2011)

Compactaram-se as duas camadas de solo utilizando-se uma placa de madeira nas dimensões de 0,40 x 0,40 m, para prover uma uniformidade maior na camada a ser compactada e como apoio de base para o soquete compactador utilizado, como mostra a Figura 3.39.

Posteriormente, fizeram-se ranhuras significativas na camada, conforme mostrado na Figura 3.40. A verificação da compactação foi feita com a retirada de uma amostra indeformada e a realização do ensaio de massa específica utilizando-se a balança hidrostática.



Figura 3.39 - Compactação do solo com a utilização da placa de madeira abaixo do soquete



Figura 3.40 - Detalhe da escarificação entre as camadas de solo

Para os ensaios seguintes foi adotado o procedimento descrito acima como padrão para a colocação do solo na caixa acrílica revestida. Foi adotada a inclinação de 25° para atender

os parâmetros de resistência do material obtidos por meio dos ensaios de cisalhamento direto e a análise de estabilidade de taludes. A seguir, é apresentada a sequência adotada para todos os ensaios executados.

3.10.6 SEQUÊNCIA PARA OS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVAS

Sequência da preparação do solo para realização do Ensaio de Simulação de Chuva (caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m):

1º Passo:

Pesar o solo para conferência do material.

Massa do solo total = 223,22 kg

2º Passo:

Marcar na caixa uma altura de 0,075 m para a primeira camada.

Altura de cada camada de solo = 0,075 m

3º Passo:

Compactação da primeira camada de solo.

Massa do solo por camada = 111,61 kg

Colocar a quantidade de solo acima e compactar até a marca na caixa da primeira camada.

4º Passo:

Escarificar a camada compactada para receber a outra camada.

5º Passo:

Compactação da segunda camada de solo.

Massa do solo por camada = 111,61 kg

Colocar o "colarinho" na caixa acrílica para compactação da última camada.

6º Passo:

Retirada de uma amostra indeformada para realização do ensaio de massa específica com o emprego da balança hidrostática.

Resultado esperado para a densidade úmida para as condições dos ensaios realizados nesta tese = entre 1,40 e 1,65 g/cm³.

7º Passo:

Se o resultado da densidade estiver dentro do esperado, recompor a camada onde foi retirada a amostra.

Se não, retirar o solo da camada superior e compactar novamente.

8º Passo:

Molhar bem os sacos de tecido e colocar por cima do solo para evitar a perda de umidade até a hora do ensaio.

Foi elaborada uma planilha para preenchimento com os dados do ensaio e tabelas baseadas nas normas ASTM D7101-13 (2013) e ASTM D6459-15 (2015), que poderão servir de roteiro para outros ensaios e pesquisas futuras (ver ANEXO 2).

3.10.7 INSTALAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Após o ensaio teste e o ensaio controle com a superfície do solo descoberto, nas condições especificadas de inclinação, intensidade de chuva e densidade seca, foram realizados os ensaios com os materiais geossintéticos instalados na superfície do solo, sendo os mesmos fixados com grampos metálicos. Estes grampos tem um comprimento médio de 3 cm fabricados com arame recozido N° 14.

Os materiais utilizados estão descritos no item 3.1.1, sendo denominados de Geomanta 1, Geomanta 2, Geomanta 3, Geomanta 4 e Geomanta 5. As Figuras 3.41 e 3.42 mostram os materiais colocados na superfície do solo antes da execução do ensaio de simulação de chuva.



Figura 3.41 - Detalhe da instalação das geomantas na superfície do solo (Geomantas 1, 2 e 3)



Figura 3.42 - Detalhe da instalação das geomantas na superfície do solo (Geomantas 4 e 5)

No primeiro ensaio com o recobrimento do solo com a Geomanta 1, foram utilizados 09 (nove) grampos metálicos. Percebeu-se, durante o ensaio, que o material não ficou totalmente em contato com o solo, portanto, a partir deste ensaio, foi adotada uma quantidade única de grampos para todos os ensaios executados, que foi de 25 grampos. Essa quantidade permitiu que toda a amostra estivesse em contato com o solo não havendo espaço entre os mesmos que pudesse desencadear um caminho preferencial que provocasse erosões na superfície do solo. A Figura 3.43 mostra a disposição dos grampos para os ensaios com os tratamentos colocados na superfície do solo.

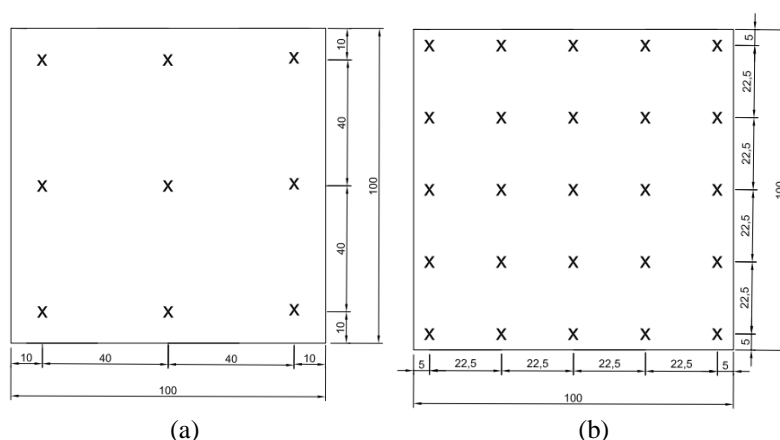


Figura 3.43 - Disposição dos grampos colocados para fixar os geossintéticos no solo: (a) nove grampos, (b) vinte e cinco grampos

3.10.8 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

O equipamento simulador de chuvas equipado com o aspersor quadrado ¼ - 10SQ – HHSQ foi regulado pela placa de automação com uma pressão de 70 kPa em uma área de 1,0 m², gerando, assim, uma intensidade de precipitação de 131 mm/h.

A chuva foi aplicada sobre o solo e a calha coletora do material possui orifícios conectados a uma mangueira que direciona o material para recipientes coletores de água e solo carregados pela chuva gerada pelo simulador. A água utilizada nos ensaios de chuveiramento apresentava valor de pH de 7,7 e turbidez de 0,5 uT.

A inclinação da caixa foi de 45° para o ensaio teste, e de 25° para o ensaio controle e demais ensaios com os geossintéticos.

Antes da realização de cada ensaio e após a preparação do solo na caixa, foi realizado o ensaio de densidade empregando uma balança hidrostática para conferir se as massas específicas estavam próximas às de campo.

O ensaio foi realizado durante um período de 1 hora, com as amostras de materiais coletadas a cada 5 minutos. Todo o solo e água da caixa acrílica foram carregados para a calha e coletados em recipientes.

No final de cada ensaio, as amostras foram levadas ao laboratório para a determinação da quantidade de solo carregado em cada tempo especificado. As amostras foram deixadas em repouso para decantação do material em suspensão por aproximadamente 60 horas. Em seguida, retirou-se a água que estava em excesso no recipiente coletor com uma bomba de vácuo (Figura 3.44). O solo com água de cada recipiente foi transferido para bandejas metálicas e levadas à estufa por 24 horas a uma temperatura de 105° C, para a secagem da água (Figura 3.45) e verificação da quantidade de solo erodido em cada tempo.



Figura 3.44 - Detalhes da bomba de vácuo para a retirada da água dos recipientes coletores



Figura 3.45 - Detalhes dos sedimentos antes e depois da estufa

3.11 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 0,3 X 0,3 M

Os ensaios de simulação de chuva na caixa acrílica nas dimensões 0,3 x 0,3 x 0,10 m, que corresponde à largura, profundidade e altura respectivamente, foram realizados seguindo os mesmos métodos de preparação na caixa acrílica de 1,0 x 1,0 x 0,15 m.

O procedimento de preparação do solo está descrito no item 3.10.6, sendo alterada somente a quantidade de material. A quantidade de solo para preencher a caixa acrílica na

densidade e umidade definidas anteriormente equivaleu a 14,30 kg, mas foi preparada uma quantidade maior de solo para se fazer vários ensaios.

A compactação do solo na caixa acrílica foi realizada em duas camadas de 5 cm, com o soquete sendo apoiado em uma placa de madeira, nas dimensões de 0,29 x 0,29 m, para produzir uma compactação uniforme na caixa. Foram executadas ranhuras entre as camadas. Os detalhes das ranhuras e da compactação são mostrados na Figura 3.46. Todos os ensaios foram executados na inclinação de 25° para atender as condições de estabilidade requeridas.



Figura 3.46 - Detalhe das ranhuras entre as camadas e da compactação

Nesta caixa acrílica foram executados ensaios com as Geomantas 2, 3 e 5 e também com o solo descoberto. Posteriormente, foi acrescentada a vegetação artificial em três densidades (número de espécimes por unidade de área) diferentes para verificar a variação da erosão superficial ocorrida. A Figura 3.47 mostra a instalação das geomantas na superfície do solo para a execução do ensaio de simulação de chuva, mostrando também a condição de solo descoberto.

O ensaio de simulação de chuva foi realizado durante o período de 1 hora, e o solo carreado foi coletado a cada 5 minutos. Todo o material (solo e água) carreado durante o ensaio foi direcionado para a calha coletora e recolhidos em recipientes, que foram deixados em repouso para decantação do material em suspensão.

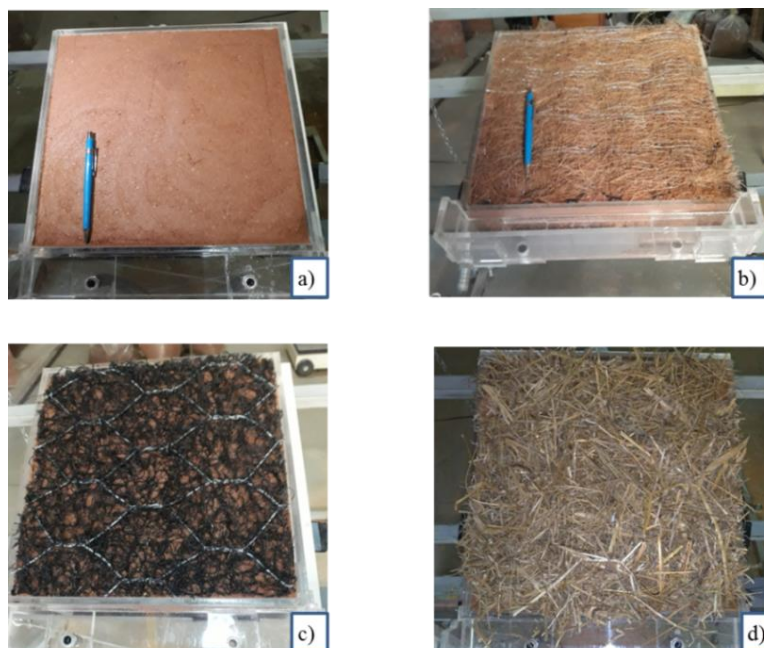


Figura 3.47 - Detalhe do solo descoberto e das geomantas na caixa acrílica 0,30 x 0,30 m: a) solo descoberto, b) Geomanta 2, c) Geomanta 3, d) Geomanta 5

Após o período de decantação, retirou-se a água que estava em excesso no recipiente coletor. O solo com água de cada recipiente foi transferido para bandejas metálicas e levadas à estufa por 24 horas, a uma temperatura de 105° C, para a secagem da água e verificação da quantidade de solo erodido em cada intervalo de tempo.

O ensaio com o solo descoberto foi denominado de ensaio de controle, para comparação com todos os demais ensaios executados. Após este ensaio, foram realizados mais três ensaios instalando vegetação artificial na superfície do solo em densidades diferentes. Nos ensaios realizados com as geomantas instaladas na superfície do solo, as mesmas foram fixadas por grampos metálicos para promover maior contato entre a geomanta e o solo.

3.11.1 VEGETAÇÃO ARTIFICIAL

Foram realizados três ensaios instalando vegetação artificial nas geomantas e no solo descoberto com densidades diferentes, sendo estas denominadas de Densidade 1, 2 e 3. As disposições da vegetação artificial em suas respectivas densidades como foram instaladas nas geomantas e no solo descoberto são apresentadas na Figura 3.48, e suas quantidades estão descritas abaixo:

- Densidade 1 = 400 unidades/m²;
- Densidade 2 = 678 unidades/m²;
- Densidade 3 = 1233 unidades/m².



Figura 3.48 - Densidade da vegetação artificial instalada nas geomantas e no solo nu

Nas Figuras 3.49 a 3.54 são apresentadas as vegetações artificiais já instaladas no solo descoberto e na Geomanta 3 antes da execução do ensaio de simulação de chuva.



Figura 3.49 - Instalação da vegetação artificial no solo descoberto – Densidade 1

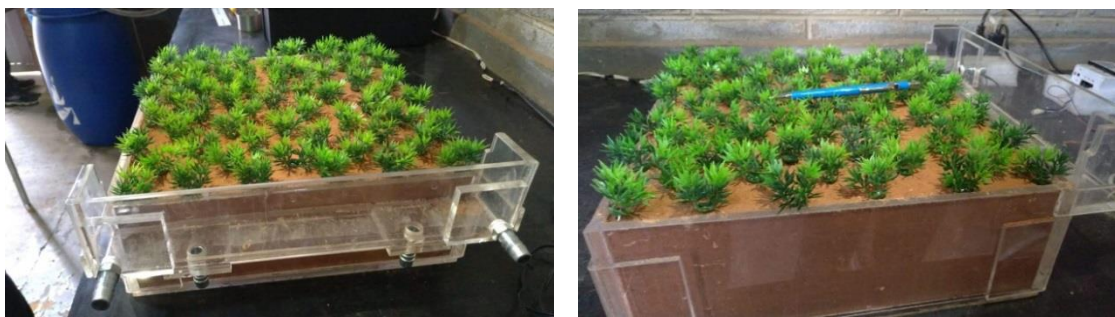


Figura 3.50 - Instalação da vegetação artificial no solo descoberto – Densidade 2

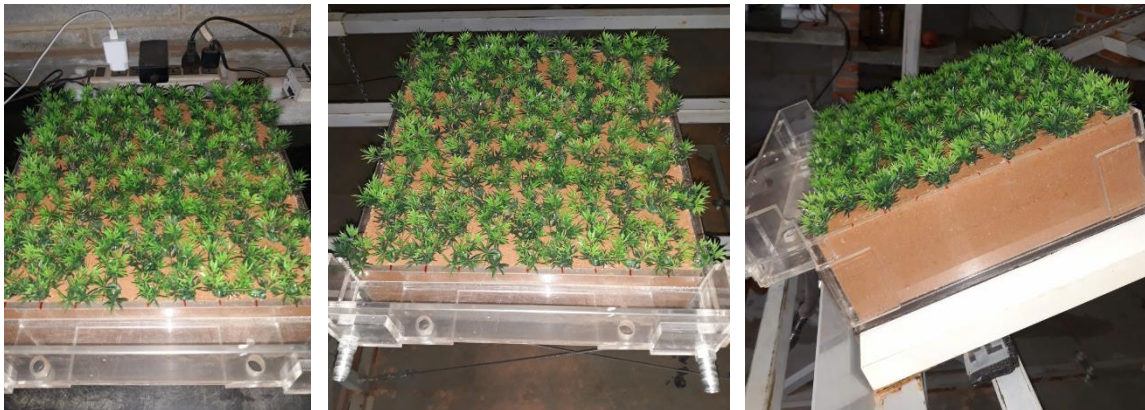


Figura 3.51 - Instalação da vegetação artificial no solo descoberto – Densidade 3



Figura 3.52 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 3 – Densidade 1

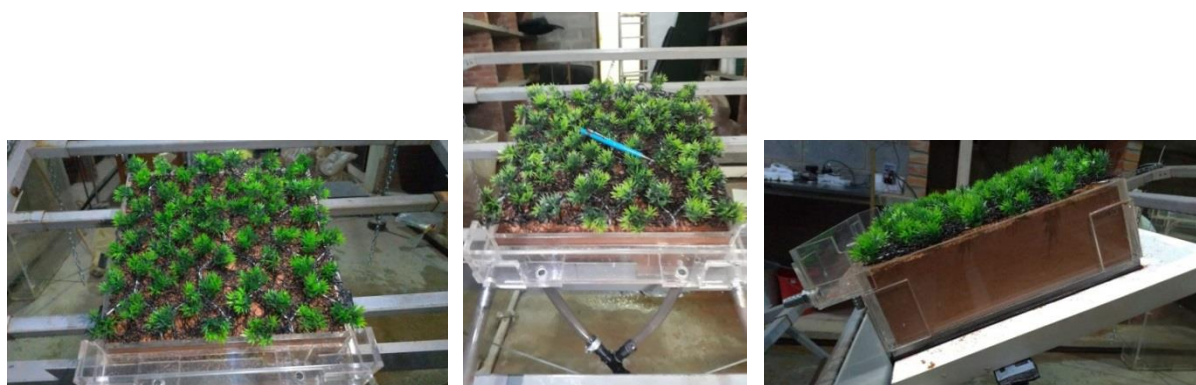


Figura 3.53 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 3 – Densidade 2



Figura 3.54 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 3 – Densidade 3

As Figuras 3.55 a 3.60 apresentam as Geomantas 2 e 5 instaladas na superfície do solo mais a vegetação artificial nas três densidades para a execução do ensaio de simulação de chuva.



Figura 3.55 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 2 – Densidade 1



Figura 3.56 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 2 – Densidade 2



Figura 3.57 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 2 – Densidade 3



Figura 3.58 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 5 – Densidade 1



Figura 3.59 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 5 – Densidade 2



Figura 3.60 - Instalação da vegetação artificial na Geomanta 5 – Densidade 3

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E ANÁLISES - SOLO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório do solo utilizado nesta pesquisa juntamente com suas análises.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA E COMPACTAÇÃO

De acordo com os resultados apresentados na análise granulométrica, o solo utilizado possui predominância de silte de cor vermelho rosado, com presença de raízes finas (análise visual do solo utilizado nos ensaios). A Tabela 4.1 mostra os resultados da granulometria por peneiramento e sedimentação (análise granulométrica conjunta). O ensaio de sedimentação foi executado com e sem defloculante. Os gráficos apresentam os resultados de acordo com a ABNT NBR-7181:2018, mostrados na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados dos Ensaio de Granulometria

	Granulometria (% que passa)																
	# 11/2"	# 1"	# 3/4"	# 3/8"	# 4"	# 10"	# 40"	# 100"	# 200"	Sedimentação							
										0,064	0,046	0,033	0,023	0,016	0,009	0,004	0,002
com defloculante				100,0	99,7	99,3	93,4	77,2	65,3	68,5	66,0	58,4	55,8	50,7	45,0	38,7	32,8
sem defloculante				100,0	99,7	99,3	94,5	79,2	67,8	63,4	55,8	48,2	45,6	45,6	12,0	-	-

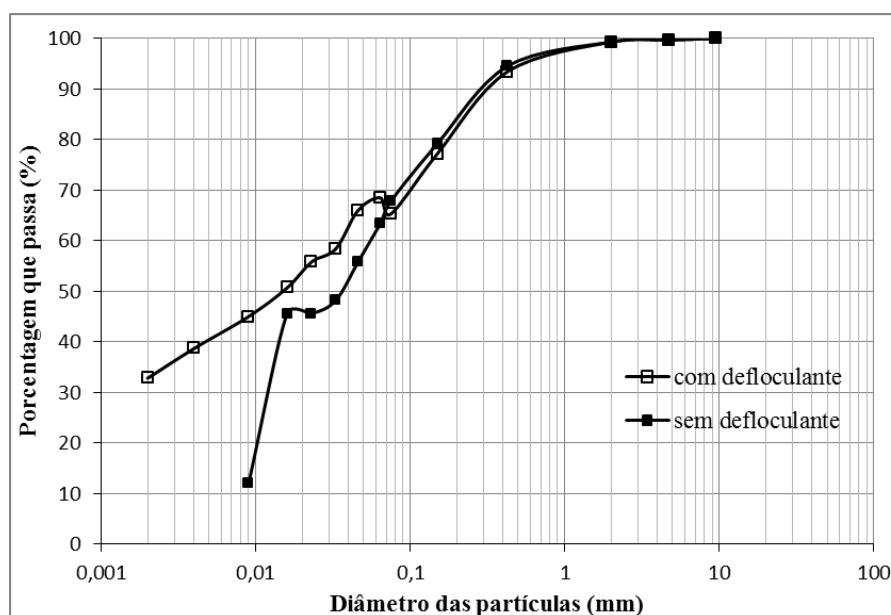


Figura 4.1 - Curva granulométrica com e sem defloculante

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de limites de consistência, massa específica real dos grãos e compactação. O índice de plasticidade tem valor de 17%, estando no intervalo de média plasticidade (Das, 2011; Fiori & Carmignani, 2009).

Tabela 4.2 - Resultados dos Ensaios de Massa Específica Real dos Grãos e Limites de Consistência e Compactação sem reuso na energia normal

ρ_s (g/cm ³)	Limites de Atterberg			Compactação	
	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x.}$ (g/cm ³)	w _{ot.} (%)
2,66	44	27	17	1,69	17,8

Legenda:

ρ_s : Massa Específica Real dos Grãos

w_L: Limite de Liquidez

w_P: Limite de Plasticidade

IP: Índice de Plasticidade

$\gamma_{dm\acute{a}x.}$: Densidade máxima seca

w_{ot.}: Umidade Ótima

4.2 DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO SOLO PARA O ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

Os dados médios fornecidos de densidade *in situ* revelaram uma massa específica para o solo igual a 1,38 g/cm³ e umidade natural de 15,54%. No entanto, deve-se considerar que a umidade sofre alterações de valores devido às variações climáticas. Para esse solo, tem-se um índice vazios de 0,93, a porosidade de 48% e grau de saturação de 45%.

Com o material dos taludes da Barragem de Simplício, foram retiradas 3 amostras para a verificação da umidade higroscópica do solo, sendo observado o valor de 9,1%. Posteriormente, em laboratório, foi realizado o ensaio teste para obtenção da densidade (massa específica) de campo.

Depois da execução do ensaio, fez-se a comparação com os valores de campo e verificou-se que a massa específica era praticamente a mesma. O próximo passo foi compactar o solo na caixa acrílica com as mesmas condições do teste feito com o cilindro de ferro, para se alcançar o valor da massa específica seca de campo nos ensaios de simulação de chuva.

A partir do resultado da umidade higroscópica (9,1%), calculou-se a quantidade de água a ser acrescida no solo para se aproximar da umidade de campo (15,54%). A massa do solo úmido que foi compactado na caixa acrílica foi de 223,22 kg.

4.3 MASSA ESPECÍFICA APARENTE COM EMPREGO DA BALANÇA HIDROSTÁTICA

Este ensaio foi executado todas as vezes que era necessário conferir a massa específica após a compactação do solo nos ensaios com a caixa acrílica nas dimensões 1,0 x 1,0 x 0,15 m para a simulação de chuva.

Os valores encontrados de massa específica foram muito próximos ao obtido em campo, ocorrendo uma variação máxima de 10% entre eles. A umidade com que o solo foi compactado na caixa acrílica também esteve próxima do resultado de campo, com diferença de até 3% para os ensaios na inclinação de 25° e de 13% na inclinação de 45° (Ensaio Teste).

A Tabela 4.3 apresenta todos os valores dos ensaios de massa específica com o emprego da balança hidrostática para os ensaios de simulação de chuva, onde se pode verificar que os valores estão próximos dos valores de campo.

Tabela 4.3 -Comparação entre a massa específica de campo e laboratório

		Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica úmida (g/cm ³)	Umidade (%)
Valores de campo		1,38	1,59	15,54
Valores de laboratório Ensaio de Simulação de Chuva	Ensaio Teste - 45°	1,39	1,58	13,5
	Ensaio Controle - 25°	1,25	1,44	15,5
	Geomanta 1	1,43	1,65	15,2
	Geomanta 2	1,31	1,50	15,1
	Geomanta 3	1,27	1,46	15,2
	Geomanta 4	1,28	1,47	15,1
	Geomanta 5	1,30	1,50	15,8
Média dos valores		1,32	1,51	15,1

4.4 CURVA CARACTERÍSTICA DO SOLO

Para a determinação da curva característica, o solo foi preparado com as seguintes características: massa específica seca de 1,38 g/cm³ e umidade de 15,6%. A Figura 4.2 apresenta a curva obtida das três amostras ensaiadas pela equação de ajuste de van Genuchten (1980).

A trajetória de secagem apresenta uma saída gradual da água com o aumento do valor da sucção matricial. A forma da curva é influenciada pelo tipo de solo, teor de umidade na moldagem dos corpos de prova, a distribuição dos vazios e da granulometria do mesmo. O que torna uma curva mais suave é a distribuição de poros mais uniforme. A curva do ensaio está apresentada na Figura 4.2.

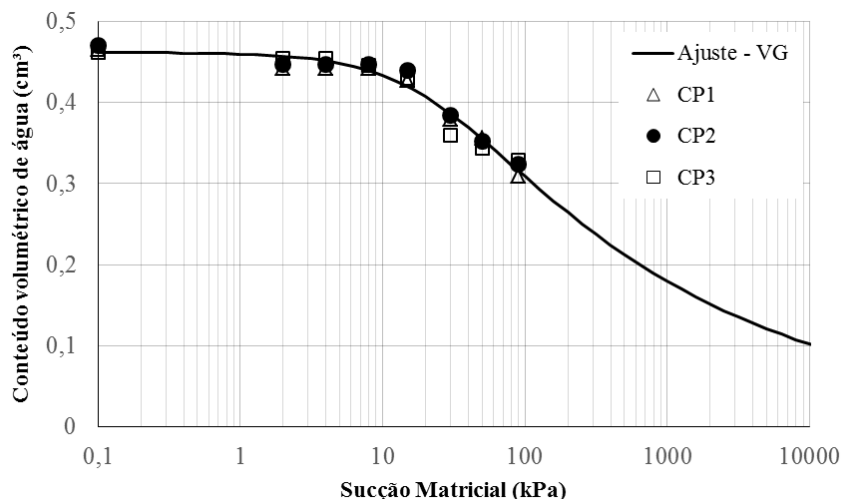


Figura 4.2 - Curva de retenção do solo obtida pela equação de ajuste de van Genuchten (1980)

Para solos arenosos, a curva de retenção é a representação da distribuição granulométrica. Quanto mais fino for o solo, maior será o valor da entrada de ar (Gitirana Júnior *et al.*, 2015). Por meio da curva de sucção é possível estimar a capacidade de retenção de água no solo (Almeida, 2013).

A curva característica é influenciada pela composição granulométrica, pela mineralogia e pela distribuição dos poros, mas não só as propriedades físicas permitem prever a forma e os valores presentes na curva de retenção (Hernandez Moncada, 2008). Gitirana Júnior *et al.* (2015) dizem que a mineralogia do solo influencia na capacidade de absorção da água. Outra questão apresentada por Almeida (2013) é a influência da umidade no aumento de erodibilidade do solo, que ocorre com a redução gradual do teor de umidade do solo e com o incremento da sucção, isso acontece com solos caracterizados pela granulometria com bem graduados.

Como o solo utilizado na pesquisa tem o valor de entrada de ar (VEA) por volta de 10kPa (apenas trajetória de secagem), teoricamente ele tende a ser um material com maior dificuldade drenante, devido à granulometria, por ser mais fino e bem graduado.

O solo, cuja infiltrabilidade é relativamente baixa, é mais suscetível à ocorrência de fluxo superficial e, conseqüentemente, mais propenso à erosões hídricas (Mendes, 2019). Relativamente, devido à capacidade de infiltração do solo ser mais baixa que as altas intensidades de chuvas aplicadas pelo simulador, ocorrerão maior escoamento e maior carregamento de partículas, influenciado pela declividade de cada ensaio.

4.5 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento revelaram, para a condição de umidade natural, uma envoltória de resistência com valores de ângulo de atrito de 34° e de intercepto de coesão de 16,5 kPa, considerando-se a aproximação dos valores. Na condição inundada, os parâmetros de resistência foram iguais a um ângulo de atrito de 30° e coesão de 1,6 kPa. Esse comportamento demonstra que, na presença de água, o material perde muito a parcela de resistência por coesão.

Ademais, os solos são considerados erodíveis quando apresentam maior perda de coesão com o umedecimento e inundação (Mascarenhas *et al.*, 2015; Almeida, 2013; Bastos, 1999), e solos com menor perda de coesão com o umedecimento são mais resistentes ao cisalhamento hidráulico (Almeida, 2013).

As envoltórias de resistência obtidas para cada uma das condições de ensaio são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4. O último ponto foi considerado ao final do ensaio, já que não ocorreu um ponto de pico na curva. Se o quarto ponto do ensaio fosse desconsiderado os valores de ângulo de atrito e coesão passariam para 28° e 20,7 kPa, respectivamente.

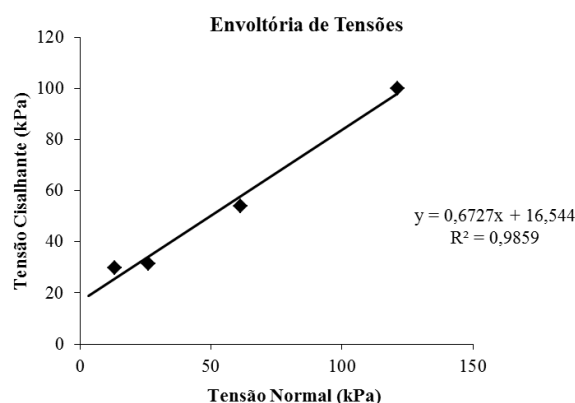


Figura 4.3 - Envoltória de tensão para a condição de umidade natural

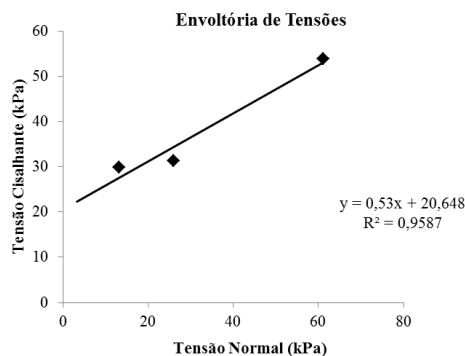


Figura 4.4 - Envoltória de tensão para a condição de inundada

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados de deslocamentos horizontais, verticais e as tensões de cisalhamento, para a condição de umidade natural.

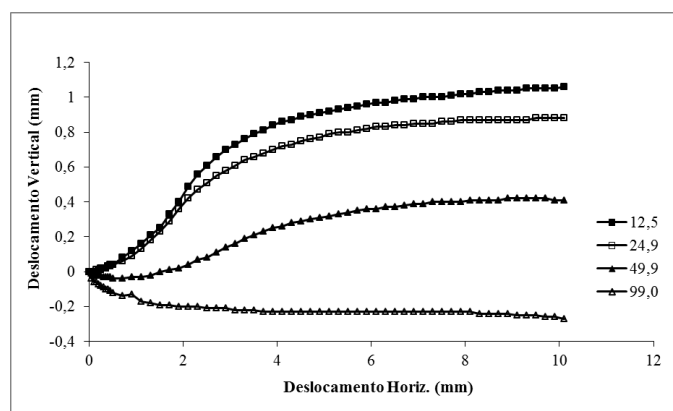


Figura 4.5 - Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal na condição de natural

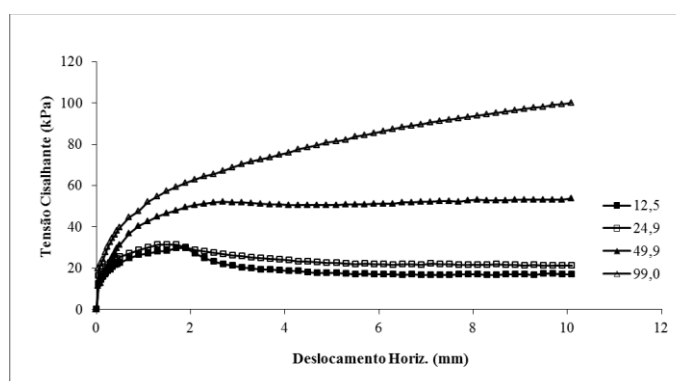


Figura 4.6 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal na condição de natural

Nas Figuras 4.7 e 4.8 encontram-se os resultados dos deslocamentos verticais, horizontais e da tensão cisalhante para a condição inundada.

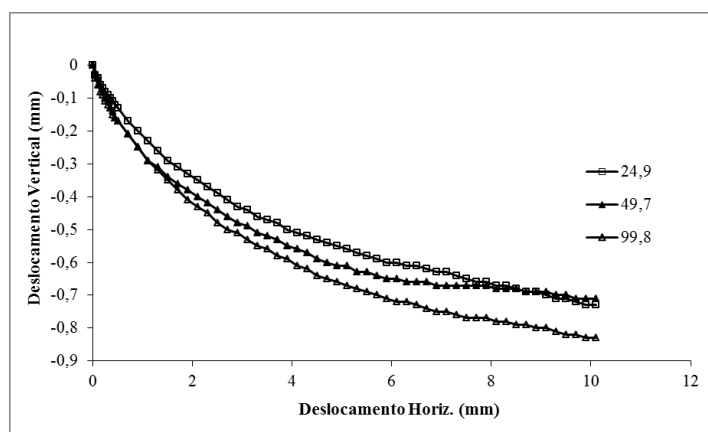


Figura 4.7 - Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal na condição inundada

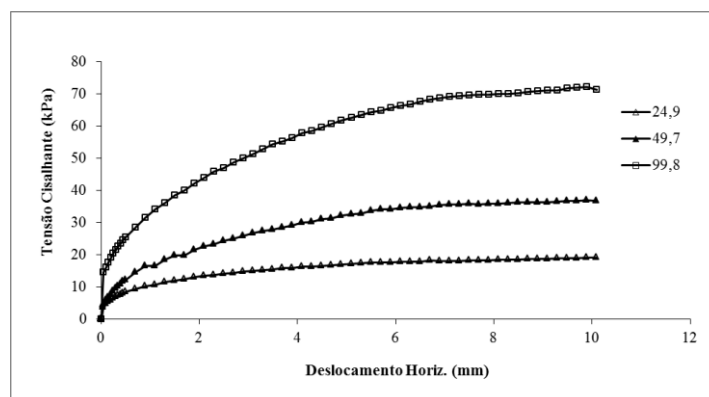


Figura 4.8 - Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal na condição inundada

4.6 CÁLCULO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

O cálculo da estabilidade de talude pelo Método do Talude Infinito foi realizado com os parâmetros de resistência na pior situação (condição inundada) e considerando-se dois cenários de inclinação (25° e 30°) e duas opções de espessura de camada (75 mm e 150 mm). Os parâmetros utilizados para o cálculo foram retirados do ensaio de cisalhamento direto. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 4.4. A partir dos valores obtidos, foi calculado o fator de segurança (FS) para cada um dos cenários (Tabela 4.5), considerando as situações com e sem percolação de água no talude.

Tabela 4.4 - Parâmetros para cálculo da estabilidade de talude

Parâmetros	unidade	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
c'	(kPa)	1,6	1,6	1,6	1,6
γ	(g/cm ³)	1,68	1,68	1,68	1,68
H	(cm)	7,5	7,5	15	15
β	($^\circ$)	30	25	30	25
ϕ	($^\circ$)	30	30	30	30

Tabela 4.5 - Cálculo do Fator de Segurança com e sem percolação de água

Cálculo do FS			
	Inclinação	Sem percolação	Com percolação
Caso 1	30°	3,92	2,48
Caso 2	25°	4,54	2,87
Caso 3	30°	2,46	1,56
Caso 4	25°	2,89	1,83

O Caso 2 foi o cenário mais seguro, mesmo na condição de percolação e com a altura da camada de 75 mm e 25° de inclinação, cenário utilizado nos ensaios de simulação de chuva.

CAPÍTULO V

5 RESULTADOS E ANÁLISES DA INTENSIDADE DE EROSÃO

Neste capítulo estão os resultados dos ensaios de simulação de chuva, que são os ensaios primordiais desta pesquisa, para analisar a susceptibilidade do solo ao processo de erosão superficial quando submetido a diversos tipos de proteção geossintética.

5.1 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 1,0 X 1,0 M

5.1.1 ANÁLISE VISUAL DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVA E DA CONDIÇÃO DO SOLO APÓS O ENSAIO

Durante os ensaios de simulação da chuva o solo comportou-se de forma diferente de acordo com a situação de cada ensaio. Primeiramente, executou-se o ensaio teste para verificação e adequação do equipamento com o solo descoberto na inclinação de 45°. Logo após esse ensaio, executou-se o ensaio com o solo na mesma condição, alterando-se a inclinação para 25°, que foi denominado ensaio controle. Posteriormente, o ensaio foi executado com os materiais geossintéticos colocados na superfície do solo. Em cada ensaio executado, o solo comportou-se de forma diferente, com maior ou menor volume de material carreado.

Foi observado durante os ensaios que a quantidade de água foi abundante, mostrando, assim, que a definição da pressão de ensaio para atender a intensidade de precipitação da região foi adequada. Essa intensidade também foi adequada ao tempo de ensaio, que foi de 1 hora, e à produção de sedimentos.

Durante a execução do ensaio teste com inclinação de 45° ocorreu o cisalhamento do solo, tendo o início do processo sido visualizado em torno do tempo de 45 minutos de ensaio. Observou-se que, após o término do ensaio de chuveiramento, a fissura aumentou de tamanho e largura, como mostra a Figura 5.1. Fez-se uma escarificação do solo e pôde-se observar que a ruptura atingiu a profundidade até o final da primeira camada (compactada).

A Figura 5.2 mostra imagens durante a execução do ensaio com o solo descoberto na inclinação de 25°. Este ensaio foi considerado o ensaio de controle para comparação com os outros com utilização de proteção da superfície do solo.



Figura 5.1 - Detalhe da ruptura do solo durante ensaio de simulação de chuva – inclinação 45°



Figura 5.2 - Vistas da execução do ensaio de simulação de chuva na inclinação de 25°

A execução do ensaio com o solo descoberto, na inclinação de 25°, não apresentou ruptura do solo, sendo observado somente o carreamento de material, deixando a superfície do solo mais áspera e com pequenas rugosidades, como mostra a Figura 5.3.



Figura 5.3 - Condição do solo após o ensaio de simulação de chuva – ensaio controle, inclinação de 25°

O primeiro ensaio com utilização de geossintético foi realizado com o material denominado Geomanta 1. Durante a execução desse ensaio ocorreu um carreamento muito grande de material, tendo sido bem maior que o carreamento do ensaio controle (solo descoberto). Nesse ensaio, a Geomanta 1 foi fixada no solo com nove grampos e, como ela possui uma forma tridimensional, não ficou totalmente em contato com o solo, gerando um fluxo de água entre a amostra e o solo (Figura 5.4). A Figura 5.5 mostra o solo após o ensaio e a retirada da Geomanta 1, onde percebe-se a formação de grandes sulcos na superfície, justificando a grande quantidade de material carreado.



Figura 5.4 - Detalhe do fluxo gerado entre a Geomanta 1 e o solo durante o ensaio



Figura 5.5 - Detalhe dos sulcos no solo após o ensaio com a Geomanta 1 fixada com 9 grampos

Devido ao observado, decidiu-se então pelo aumento no número de grampos de fixação da manta, sendo executado o ensaio seguinte nas mesmas condições, somente com o aumento da quantidade de grampos. Com a quantidade de grampos maior, num total de 25, a quantidade de material carreado foi um pouco menor, mas os sulcos na superfície do solo foram semelhantes, como mostra a Figura 5.6. O primeiro ensaio com a Geomanta 1 foi desconsiderado nos resultados, sendo considerado somente o ensaio realizado com a fixação do material com os 25 grampos para todos os geossintéticos.

Portanto, nos dois ensaios realizados com a Geomanta 1 o carreamento de solo foi muito maior que no solo descoberto, para as mesmas condições de ensaio.



Figura 5.6 - Detalhe dos sulcos no solo após o ensaio com a Geomanta 1 fixada com 25 grampos

A finalidade do aumento da quantidade de grampos foi para melhorar a aderência do geossintético com o solo, não sendo verificada uma diminuição significativa na quantidade de solo erodido. No entanto, conclui-se que esse resultado – de elevada massa de material carregada – deu-se devido ao formato tridimensional do material e por ele ser muito leve, o que possibilitou um fluxo de água entre o material e a superfície do solo.

A Figura 5.7 mostra o detalhe da superfície do solo após o ensaio de simulação de chuva utilizando a Geomanta 2, onde verificaram-se pequenos sulcos em toda a extensão da superfície do solo, comportamento diferente do observado com a Geomanta 3. No entanto, mesmo com a formação dos sulcos na extensão de toda superfície, a quantidade de material carregado foi de 77 g/m², sendo, portanto, o melhor resultado obtido para os materiais ensaiados.



Figura 5.7 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 2

No ensaio de simulação de chuva com a Geomanta 3, o solo na caixa acrílica mostrou-se mais preservado, mas com a formação de um sulco na parte inferior da caixa, conforme mostra a Figura 5.8, talvez por influência de perturbação do fluxo superficial próximo à extremidade inferior da caixa. Nesse ensaio, também foram utilizados 25 grampos para a fixação do material e não foi observada a ruptura do solo, devido a uma inclinação menor. Em

relação à quantidade de material erodido, ela foi menor que a do solo descoberto, deixando a superfície do solo mais rugosa na parte central da caixa.



Figura 5.8 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 3

A Geomanta 4 comportou-se de maneira parecida com a Geomanta 2 em termos de quantidade de solo carreado, sendo o valor carreado de 90 g/m^2 . Em relação à superfície do solo, foi a que ficou mais preservada dentre todos os materiais ensaiados. A superfície do solo após a retirada da geomanta estava mais áspera e, em algumas regiões pontuais, ocorreram furos pequenos no solo, conforme mostra a Figura 5.9.



Figura 5.9 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 4

A Geomanta 5 é constituída por fibras vegetais desidratadas, com a matriz orgânica 100% palha, conforme informações do fabricante. Por essa razão, é muito fácil de se desfazer a trama do material, não mantendo sua integridade e não permanecendo como um material homogêneo na sua composição. Devido a tais características, a quantidade de solo carreado foi grande, sendo menor somente do que as quantidades de solo referentes à Geomanta 1 e ao solo descoberto. O solo após o ensaio ficou muito encharcado, e na superfície instalaram-se sulcos em toda a região central da amostra. A Figura 5.10 apresenta a condição do solo após o ensaio com a Geomanta 5.



Figura 5.10 - Detalhe da superfície do solo após o ensaio com a Geomanta 5

5.1.2 UMIDADE E ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO

Foram coletadas amostras para verificação de umidade do solo após a realização dos ensaios de simulação de chuva. As amostras foram retiradas na base (parte inferior) e no topo (parte superior) da caixa, com a intenção de verificar a diferença de umidade no solo dentro da caixa.

A Tabela 5.1 apresenta os valores encontrados, onde percebe-se que na parte superior da caixa o valor da umidade foi menor do que na parte inferior, concentrando a água no solo na base da caixa, como acontece em um talude no campo. A retenção de umidade no solo foi maior nos ensaios com a utilização das geomantas, apresentando maior umidade no final da simulação de chuva, essa condição é apresentada na Figura 5.11. Percebe-se também, que o solo descoberto com menor inclinação (25°) apresentaram os valores de umidade de 11% e 18% (base e topo da caixa, respectivamente) maiores que o solo descoberto com maior inclinação (45°).

Tabela 5.1 - Variação de umidade do solo após o ensaio de simulação de chuva

Ensaio Simulação de Chuva	Umidade do solo após o ensaio (%)	
	Base da caixa (lado da calha)	Topo da caixa (lado oposto à calha)
Ensaio Teste - 45°	24,5	20,9
Ensaio Controle - 25°	27,2	24,7
Geomanta 1	31,8	27,7
Geomanta 2	32,2	27,9
Geomanta 3	36,3	30,4
Geomanta 4	32,3	31,0
Geomanta 5	41,1	31,7

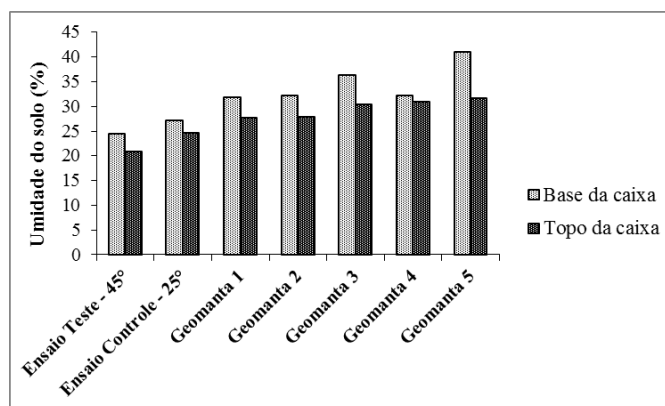


Figura 5.11 - Variação de umidade no solo após o ensaio de simulação de chuva

Após a compactação do solo na caixa acrílica, antes do início do ensaio de simulação de chuva, foram calculados os valores do índice de vazios, da porosidade, do grau de saturação e grau de compactação. Apresentando diferença de 13% para os valores da massa específica e do grau de compactação. A umidade teve uma diferença de 15%, o índice de vazios e o grau de saturação apresentaram uma diferença média de 23% nos valores. Todos os dados estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Índices físicos do solo compactado na caixa acrílica 1,0 x 1,0 m

Ensaio Simulação de Chuva	ρ_s (g/cm ³)	e	n (%)	w (%)	S (%)	GC (%)
Ensaio Teste - 45°	1,39	0,91	48	13,5	39	82
Ensaio Controle - 25°	1,25	1,13	53	15,5	37	74
Geomanta 1	1,43	0,86	46	15,2	47	85
Geomanta 2	1,31	1,03	51	15,1	39	78
Geomanta 3	1,27	1,09	52	15,2	37	75
Geomanta 4	1,28	1,08	52	15,1	37	76
Geomanta 5	1,30	1,05	51	15,8	40	77

5.1.3 QUANTIDADE DE SOLO ERODIDO DURANTE A CHUVA SIMULADA

A comparação entre os ensaios realizados, somente com o solo descoberto e com diferentes inclinações, revelou um aumento da quantidade de solo carreado no ensaio teste na inclinação de 45° com o decorrer do tempo até atingir o valor máximo, de 427 g/m², com 35 minutos de ensaio. Após esse tempo, a quantidade de solo erodida foi diminuindo até atingir o valor de 225 g/m² no final do ensaio (1 hora).

Já no ensaio controle na inclinação de 25°, a quantidade de material carreada foi de 110 g/m², com 35 minutos de ensaio, estabilizando-se a partir desse tempo. A Figura 5.12 apresenta os valores obtidos de perda parcial de solo durante o ensaio de simulação de chuva

para cada ensaio. A perda parcial de solo é o valor obtido em cada tempo de coleta de material, ou seja, a cada 5 minutos.

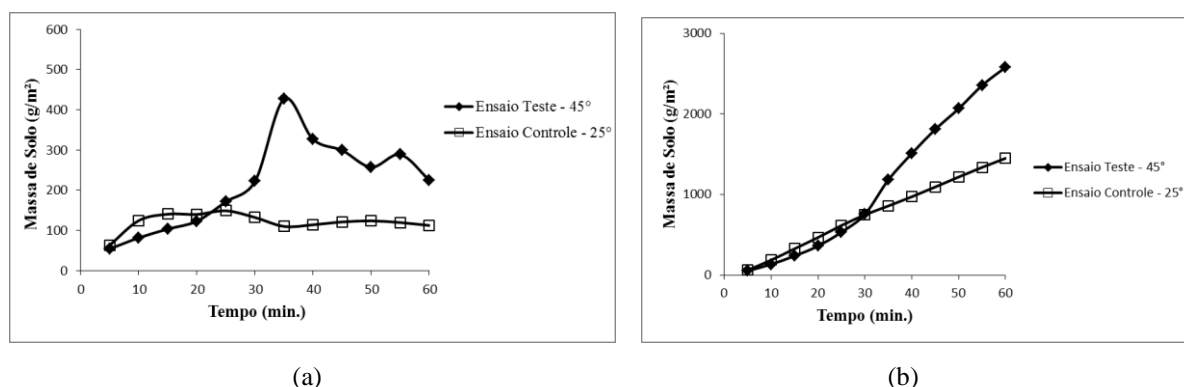


Figura 5.12 - Perda de solo durante o ensaio de simulação de chuva com o solo descoberto: (a) perda parcial, (b) perda acumulada

Observa-se, na Figura 5.12(b), que a perda acumulada de solo durante o ensaio de simulação de chuva apresenta um aumento aproximadamente linear do material carreado no ensaio controle na inclinação de 25° . Já no ensaio teste com 45° de inclinação, verificou-se um aumento muito grande a partir da metade do tempo de ensaio. Tal comportamento também foi constatado por Mermut *et al.* (1997), Kinnell (2000) e Amorim *et al.* (2001), que salientam a importância da duração da chuva para análise do processo erosivo, mostrando que a linearidade da perda de solo acumulada indica taxas constantes ao longo do tempo considerando as mesmas condições de intensidade e inclinação.

A perda de solo é influenciada diretamente pela declividade em até quatro vezes mais do que o comprimento de rampa (Renard *et al.*, 2011). Desse modo, a variação da declividade também apresenta ganho de energia potencial, proporcionando maiores velocidades de escoamento superficial, ocasionando mais erosão. O comprimento de rampa também interfere na quantidade de solo perdido, existindo uma relação entre o comprimento do talude e a produção de sedimentos (Kinnell, 2000). Nesta pesquisa não houve variação do comprimento de rampa, variando somente a inclinação, demonstrando que para a maior inclinação ocorreu um aumento de 78% na quantidade de material carreado.

O efeito *splash* apresenta-se mais incisivo nos primeiros instantes da erosão, em que, com o tempo de 5 minutos, o carreamento do solo descoberto na declividade de 45° apontou perda de $54,24 \text{ g/m}^2$, enquanto o solo descoberto na declividade de 25° apresenta perda de $63,53 \text{ g/m}^2$.

Já no final do ensaio de simulação de chuva, para o tempo de 60 minutos, a situação

de dominância das perdas invertem-se, com cerca de 225 g/m² de sedimentos perdidos em 45° de declividade e cerca de 112 g/m² para o solo descoberto em 25° de declive, ou seja, um crescimento de cerca de 100% na perda de solos, para uma perda parcial em 5 minutos.

Os resultados observados estão de acordo com Mariano (2015), dado que o autor expôs que, para a mesma intensidade de precipitação e mesmo tempo, a quantidade de solo erodido aumenta com o aumento da inclinação do talude, conforme mostra a Figura 5.12(b).

Após todos os ensaios de simulação de chuva, fez-se uma comparação do valor da perda de solo entre os mesmos. Compararam-se o resultado do ensaio do solo descoberto com os resultados dos ensaios com os tratamentos com as geomantas, todos na inclinação de 25°. Os resultados revelaram que o tratamento com a Geomanta 2 foi o mais eficaz, com uma quantidade bem menor de solo carreado, como mostrado na Figura 5.13. A Geomanta 4 teve resultado um pouco maior que a Geomanta 2, mas também com uma eficiência muito boa. O ensaio com a Geomanta 3 também apresentou uma quantidade de solo erodido bem menor que na condição do solo descoberto. A Geomanta 5 comportou-se melhor que todas as outras geomantas no início do ensaio, mas com o decorrer do tempo de ensaio a perda de solo foi aumentando e se tornando maior que as das outras, conforme mostra a Figura 5.13, ficando abaixo somente da perda de massa observada no ensaio controle.

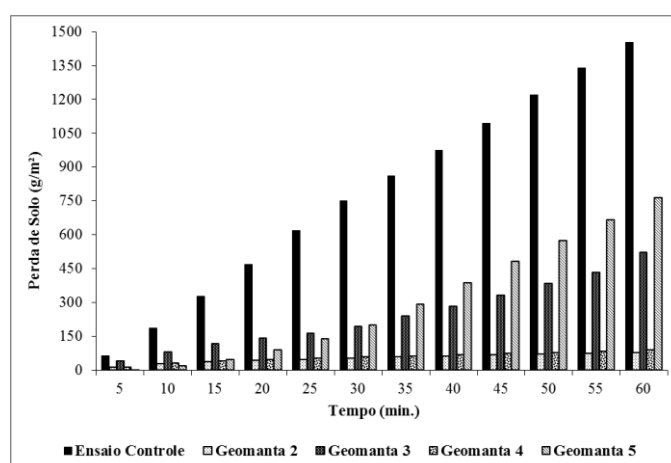


Figura 5.13 - Perda acumulada de solo durante o ensaio de simulação de chuva

Tendo como referência todos os ensaios realizados com 25 grampos de fixação e inclinação de 25°, observou-se que a Geomanta 1 foi a que apresentou o pior resultado para o controle do processo erosivo durante o ensaio de simulação de chuva, apresentando maior quantidade de material carreado, maior até que o solo descoberto (Figura 5.13). O ensaio da Geomanta 1 com 09 (nove) grampos foi desconsiderado dessas análises.

Os resultados revelaram que o tempo de 35 (trinta e cinco) minutos de ensaio

apresentou-se como referência para a estabilização da quantidade de perda de material, exceto para a Geomanta 1 (com 25 grampos), a qual apresentou uma oscilação na perda de solo (Figura 5.14). Diversos autores também constataram um aumento crescente seguido de estabilização da quantidade de perda de material ao longo do tempo de ensaio, tais como, Amorim *et al.* (2001); Ogbobe *et al.* (1998) e Mermut *et al.* (1997). Os autores apresentam que nos estudos sobre a erosão, em função do tempo, a taxa de perda de solo torna-se constantes considerando os mesmos parâmetros, tornando o tempo de ensaio importante para determinar a modelagem do processo erosivo.

A formação de sulcos sob a proteção geossintética adotada também foi observada por alguns autores em seus ensaios de simulação de chuva em laboratório, tais como, Smets *et al.* (2011) e Cancelli *et al.* (1990). Porém, a maioria dos autores não descreve a condição do solo sob o material de proteção. Nesta pesquisa, para cada ensaio realizado, foi elaborada uma descrição da condição do solo após o ensaio.

Até 30 minutos, a Geomanta 5 apresentou valores de perda de solo compatíveis com os das Geomantas 2, 3 e 4. A partir desse tempo, ocorreu uma elevação nos valores de material carregado, quase se igualando ao ensaio com o solo descoberto no final do ensaio.

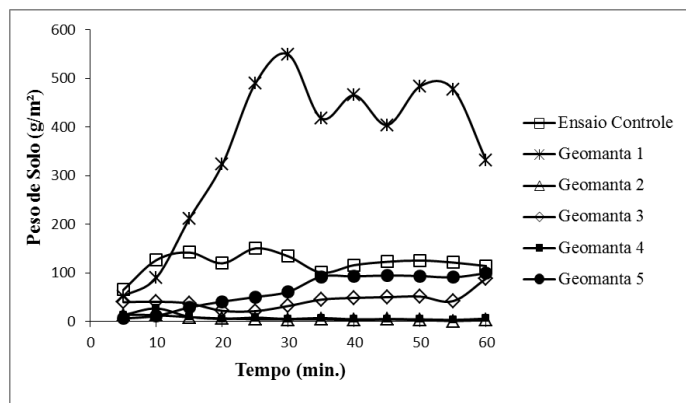


Figura 5.14 - Quantidade de perda de solo durante o ensaio de simulação de chuva

A Figura 5.15 mostra que a quantidade acumulada de sedimentos no escoamento aumentou linearmente com o tempo de chuveiramento, o que prova a importância da duração da chuva para a contribuição no processo erosivo. Estes fatores também foram comprovados nas pesquisas dos autores Mermut *et al.* (1997) e Amorim *et al.* (2001).

Também é possível observar, na Figura 5.15, que os tratamentos com as Geomantas 2, 3, 4 e 5 foram eficientes e a perda de solo foi menor do que com o solo descoberto (ensaio controle). A Geomanta 1 mostrou-se ineficiente quanto à diminuição da ação erosiva durante o processo de simulação de chuva.

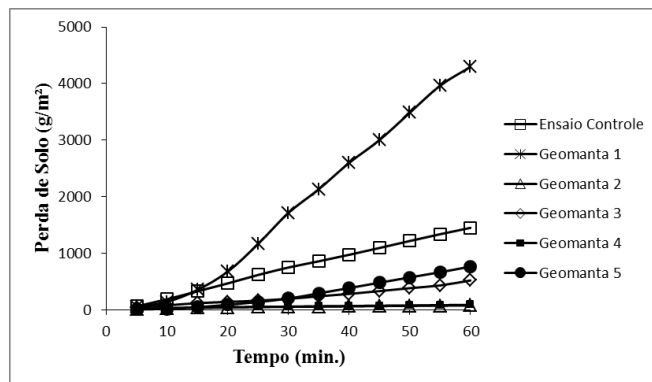


Figura 5.15 - Quantidade de sedimentos acumulada com o tempo chuva

No ensaio com a Geomanta 1 a perda de solo foi 296% maior do que com o solo descoberto (Figura 5.15). Deve-se notar que os ensaios foram realizados com a inclinação de 25°. No ensaio com a Geomanta 1, o material não apresentou bom desempenho devido à maior abertura da malha, não protegendo, assim, o solo contra a energia cinética da chuva, permitindo um fluxo preferencial e induzindo a sua concentração – algo claramente observado durante o ensaio – entre o geossintético e o solo. Isso provocou sulcos na superfície do solo em decorrência de uma força erosiva maior. Esse tipo de comportamento também foi observado por Cancelli *et al.* (1990) em materiais com aberturas maiores.

O maior valor do resultado do ensaio de permissividade foi de $7,84 \text{ s}^{-1}$, para a Geomanta 1. No resultado de transmissividade o maior valor foi de $9,56\text{E-}03 \text{ m}^2/\text{s}$, para a Geomanta 3 e depois para a Geomanta 1, com o valor de $5,51\text{E-}03 \text{ m}^2/\text{s}$. Maior permissividade tem como consequência menor absorção do impacto das gotas que as demais geomantas. Transmissividade alta indica que o fluxo ao longo do plano é mais intenso e, assim sendo, pode desencadear o processo erosivo. Isso, associado a um contato deficiente com a superfície do solo, explicam esse desempenho ruim.

Os valores de maiores permeabilidade foram de $9,75 \text{ cm/s}$ e $7,97 \text{ cm/s}$, para as Geomantas 1 e 3, respectivamente, sendo as geomantas que tiveram piores resultados de contenção do carreamento do solo. Devido às suas características, a Geomanta 1 pode ser utilizada como material drenante, por possuir uma permeabilidade alta e por permitir o fluxo de água com rapidez.

As Geomantas 1 e 3 tiveram valores de espessuras de $12,45 \text{ mm}$ e $10,33 \text{ mm}$, respectivamente, possuindo formato tridimensional, sendo os maiores valores dentre as geomantas utilizadas. A Geomanta 4 teve um valor de $3,22 \text{ mm}$ de espessura. A espessura dificulta o contato da geomanta com o solo, proporcionando um fluxo de água entre os dois, aumentando, portanto, a quantidade de material erodido. A Figura 5.16 ilustra o formato da

Geomanta 1, mostrando que o contato da face inferior com solo é prejudicado, deixando espaços vazios por onde a água pode escoar em fluxo concentrado, explicando o desempenho ruim dessa geomanta e relação às outras.

As geomantas biodegradáveis têm maior capacidade de absorção de água, em comparação com os geotêxteis constituídos de materiais sintéticos, beneficiando o desenvolvimento de vegetação e diminuindo a velocidade de escoamento da água (Barrela, 2007).

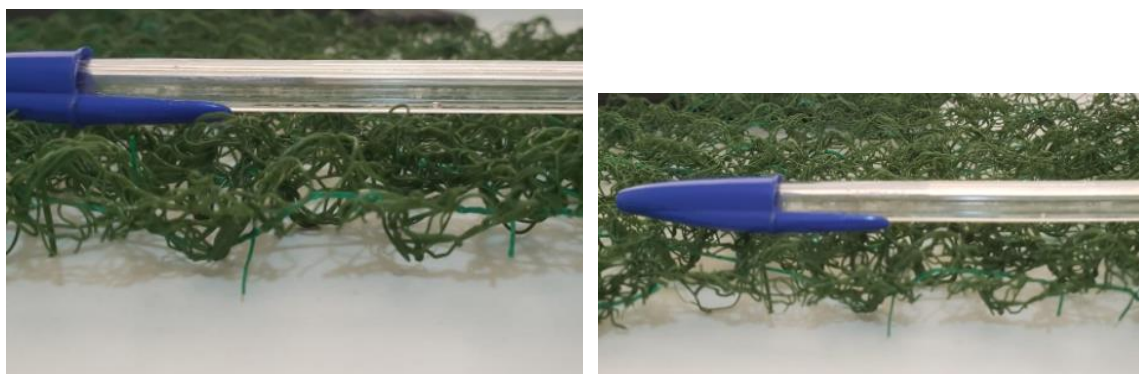


Figura 5.16 - Detalhe da Geomanta 1

A tentativa de aumentar o número de grampos – de 9 para 25 – no ensaio com a Geomanta 1 (Ensaio 2 na Fig. 5.17) provocou uma melhora dos resultados de perda de solo acumulada só a partir de 45 minutos de ensaio. No entanto, a perda de solo total foi mais que o dobro para o ensaio com a menor quantidade de grampos (Figura 5.17). Talvez um pressionamento da manta contra o solo antes da chegada da chuva possa melhorar o desempenho desse tipo de geomanta.

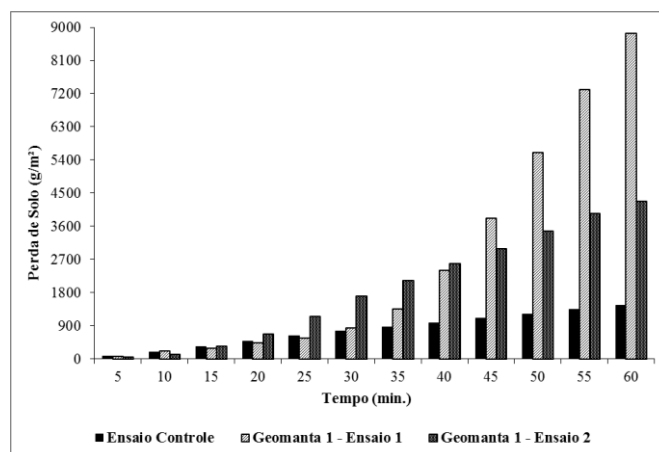


Figura 5.17 - Perda de solo acumulada para o Ensaio Controle e Geomanta 1

O resultado das Geomantas 2 e 4 foram muito parecidos (Fig. 5.14), isso porque as duas Geomantas são de fibra de coco, sendo a diferença entre elas a presença de uma tela de reforço de polipropileno na Geomanta 2. As duas mostraram-se eficientes no processo de contenção do solo, com 95% e 94% de retenção de material.

Nesses casos, os resultados foram melhores devido ao fato do material promover uma cobertura maior da superfície do solo, diminuindo a influência do impacto das gotas de chuva e distribuindo o fluxo na superfície do solo de forma mais uniforme. A eficiência do tratamento de acordo com a Equação 2.3 atingiu 95% para a Geomanta 2 e 94% para a Geomanta 4. A Tabela 5.3 apresenta a eficiência de todas as proteções ensaiadas. A Geomanta 5 foi a que apresentou a menor eficiência (47%).

Tabela 5.3 - Eficiência dos tratamentos utilizados na superfície do solo

Tipo de Tratamento	Massa de solo carreado (g/m²)	Eficiência da Proteção (%)
Ensaio Controle - 25°	1.451,31	-
Geomanta 1 - Ensaio 1	8.849,46	-510
Geomanta 1 - Ensaio 2	4.297,78	-196
Geomanta 2	77,18	95
Geomanta 3	521,34	64
Geomanta 4	89,58	94
Geomanta 5	765,40	47

A análise do coeficiente de escoamento revelou que cerca da metade do valor precipitado infiltrou no solo (Tabela 5.4). As Geomantas 1 e 2 apresentam valores do coeficiente de escoamento similares ao solo sem proteção, com valor médio de 0,52%. As Geomantas 3, 4 e 5 têm um coeficiente com valor médio de 0,43%, permitindo maior infiltração de água no solo. No entanto, deve-se ressaltar que, quanto mais impermeável o solo maior será o valor do coeficiente de escoamento (Guedes, 2015).

Os valores do coeficiente de escoamento superficial não tiveram grandes variações, pois, com a compactação do solo na caixa, a massa específica manteve-se com pequenas alterações. Os dados da Tabela 5.4 apresentam um valor médio de 0,49, com um desvio padrão de 0,051 e um coeficiente de variação (CV) de 10,51%.

Tabela 5.4 - Valores do Coeficiente de Escoamento Superficial para cada situação de ensaio

Tipo de Tratamento	Coefficiente de Escoamento (%)
Ensaio Teste - 45°	0,54
Ensaio Controle - 25°	0,50
Geomanta 1 - Ensaio 1	0,55
Geomanta 1 - Ensaio 2	0,52
Geomanta 2	0,51
Geomanta 3	0,44
Geomanta 4	0,41
Geomanta 5	0,45

5.2 GRANULOMETRIA A LASER DO MATERIAL ERODIDO

Os ensaios de granulometria a laser foram realizados com os sedimentos provenientes do carreamento do solo pelo escoamento superficial produzido pelas simulações de chuva na caixa acrílica de 1,0 x 1,0 x 0,15 m, nas condições de solo descoberto (sem proteção – solo nu), com inclinações de 45° e 25°, e com a proteção das Geomantas utilizadas na pesquisa (Geomanta 1, Geomanta 2, Geomanta 3, Geomanta 4 e Geomanta 5). Foram analisados os sedimentos coletados a cada 5 minutos de ensaio.

O solo carregado durante os ensaios de simulação de chuva foram analisados em relação à sua granulometria, para examinar as porcentagens de suas frações. Em todas as amostras coletadas dos sedimentos carregados pelo escoamento superficial produzido pela chuva simulada, a quantidade maior da fração granulométrica encontrada foi o silte, seguido da areia, com valores médios de 70% e 25%, respectivamente.

A distribuição das frações dos sedimentos pode ser influenciada pela distribuição da dimensão das partículas do solo original, pela quebra dos agregados durante o carreamento e pela velocidade de sedimentação dos diferentes tamanhos das partículas ou agregados (Shi *et al.*, 2012).

5.2.1 SOLO SEM PROTEÇÃO COM INCLINAÇÃO DE 25° E 45°

A Figura 5.18 mostra as flutuações da porcentagem de silte, comparando os sedimentos na inclinação de 25° e 45°. A porcentagem média de silte presente nos sedimentos durante o período do ensaio (1 hora) para o solo nu e inclinação de 45° foi de 61,4%; já para a inclinação de 25° foi de 58,6%. A diferença entre eles foi de 4,5%. Portanto, a inclinação não teve influência significativa em relação à variação da fração granulométrica carregada pelo escoamento superficial.

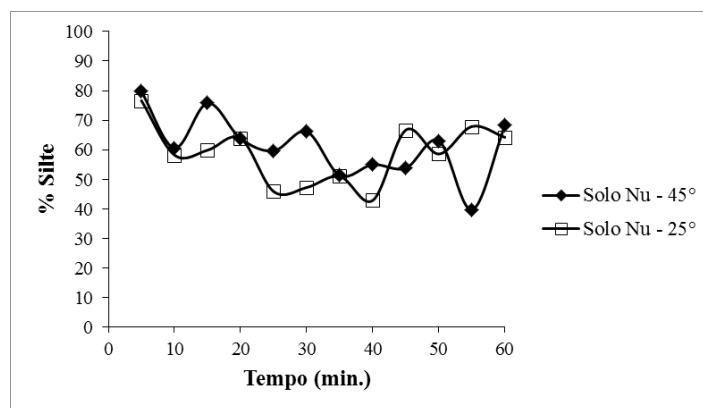


Figura 5.18 - Variações da porcentagem de silte, comparando os sedimentos na inclinação de 25° e 45°

As partículas de silte são mais facilmente erodidas do que as das outras frações granulométricas, e os solos tornam-se menos erodíveis quando as frações de areia ou argila aumentam e a fração de silte diminui (Rego, 1978).

Ngezahayo *et al.* (2019) também constatam isso na sua pesquisa. As partículas de silte e areias finas foram facilmente deslocadas pelas tensões da energia cinética das gotas e do fluxo superficial. Constataram também que, para as partículas maiores e para a argila, são necessárias mais energias para desalojá-las, devido à robustez das partículas e às forças de coesão, respectivamente.

Os sedimentos são compostos pela maior quantidade das frações de silte e areia. Tal comportamento pode ser explicado em decorrência dessas partículas apresentarem maior facilidade de serem carreadas a partir do desprendimento e arraste, dando início aos processos erosivos hídricos (Ngezahayo *et al.*, 2019; Thomaz, 2012; Guerra, 2015; Bertoni & Lombardi Neto, 2010; Malam Issa *et al.*, 2006; Guerra, 1995; Rego, 1978).

Segundo Morgan (2005), estudos relacionados à energia cinética das chuvas destacam que o efeito de sua gota torna-se importante na deflagração dos processos erosivos em partículas de solo com tamanhos médios de 125 μm , sendo que a faixa granulométrica mais vulnerável está posicionada entre 63 μm – 250 μm , que corresponde ao silte e a areia fina.

Ademais, esse resultado pode ser explicado pela massa e tamanho das partículas mais grosseiras, na faixa da areia, enquanto que nas partículas finas, na faixa granulométrica da argila, sua resistência se dá pela atração decorrente das ligações químicas, conferindo-as características coloidais, sobretudo quando relacionadas aos óxidos e hidróxidos de ferro, materiais mais resistentes aos processos erosivos (Ngezahayo *et al.*, 2019; Kämpf & Curi, 2012; Morgan, 2005).

O efeito *splash* também atua no transporte das partículas de argila e silte,

principalmente no início da chuva, explicado pelo agente físico envolvido no desprendimento das partículas, contribuindo com o fenômeno erosivo. Dependendo da intensidade da chuva, os agregados da superfície do solo são destruídos gerando os respingos e o efeito *splash*, e, conseqüentemente, mais erosão (Mermut *et al.*, 1997). A ação do efeito *splash* é o estágio inicial do processo erosivo, pois prepara as partículas do solo para o destacamento e são transportadas pelo escoamento superficial (Ngezahayo *et al.*, 2019; Fu *et al.*, 2017; Guerra, 2015).

As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram a variação da composição granulométrica (argila, silte e areia) dos sedimentos durante todo o ensaio de simulação de chuva com coletas a cada cinco minutos nas inclinações de 45° e 25°, para o solo descoberto (nu). Essas tabelas também mostram que a maior quantidade de silte encontrada nos ensaios com o solo nu foi no intervalo inicial de 5 minutos, para as duas inclinações (45° e 25°), correspondendo, respectivamente, a 79,71% e 76,64%.

Além disso, observa-se nestas tabelas que, com o tempo, houve uma tendência de variação do início para o final, com média dos percentuais de silte de 60%, areia de 36% e argila de 4%.

Tabela 5.5 - Distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos dos ensaios de simulação de chuva – solo nu com inclinação de 45°

Sedimentos - Inclinação 45° - Solo Nu (%)												
Fração	Tempo (min.)											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
argila	5,61	2,55	5,57	5,06	4,36	4,87	4,01	4,38	4,64	4,95	1,77	5,05
silte	79,71	60,6	75,81	63,8	59,63	66,14	51,33	54,97	53,79	63,06	39,66	68,23
areia	14,68	36,85	18,62	31,14	36,01	28,99	44,66	40,65	41,57	31,99	58,57	26,72
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabela 5.6 - Distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos dos ensaios de simulação de chuva – solo nu com inclinação de 25°

Sedimentos - Inclinação 25° - Solo Nu (%)												
Fração	Tempo (min.)											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
argila	4,81	4,35	4,57	4,38	3,49	3,54	3,81	3,38	4,81	4,47	5,42	5,02
silte	76,64	58,2	59,84	63,89	45,85	47,21	50,99	42,85	66,7	58,56	67,88	64,2
areia	18,55	37,45	35,59	31,73	50,66	49,25	45,2	53,77	28,49	36,97	26,7	30,78
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Em função do tamanho das partículas de solo, quanto maior o tamanho das partículas, maior a sua desagregabilidade e, quanto menor o seu tamanho, maior sua transportabilidade.

Portanto, as areias são mais facilmente desagregadas que as argilas, e as argilas são mais facilmente transportadas do que as areias (Rego, 1978).

Para a fração de argila, o valor máximo para a inclinação de 45° foi de 5,61%, com 5 minutos de ensaio. Já para a inclinação de 25° foi de 5,42%, com 55 minutos de ensaio, não mostrando uma padronização nos tempos de amostragem (Tabelas 5.5 e 5.6), mas demonstrando uma pequena quantidade de sedimentos nessa fração para ambos os ensaios. A fração de argila analisada também com o granulômetro a laser para o solo original foi de 4,13%, não demonstrando diferença significativa com a fração do sedimento.

5.2.2 SOLO COM PROTEÇÃO DE GEOMANTAS COM INCLINAÇÃO DE 25°

Os ensaios de granulometria a laser também foram realizados com os sedimentos carregados dos ensaios de simulação de chuva, onde a superfície do solo foi protegida com as Geomantas utilizadas na pesquisa. A porcentagem de silte foi maior nos casos em que o solo estava com a proteção das Geomantas, em comparação com o solo sem proteção, conforme mostrado na Figura 5.19, que apresenta esta variação com cada Geomanta durante a simulação de chuva.

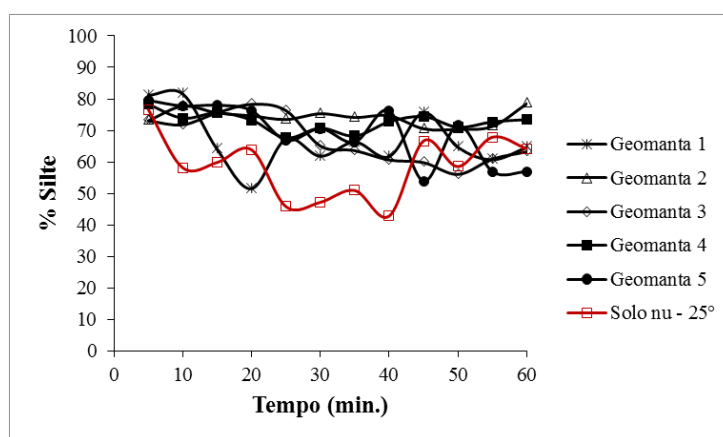


Figura 5.19 - Variação da quantidade de silte presente nos sedimentos para cada geomanta e com o solo nu

A quantidade de material carregado na fração de areia foi menor que na condição de solo sem proteção, logo, as Geomantas impediram o carregamento do material mais granular, atuando também como filtro, retendo partículas maiores. Tal comportamento pode ser explicado pelo solo descoberto, que se apresenta mais exposto à energia cinética do salpicamento (*splash*), assim como ao efeito da enxurrada, o que contribui para o transporte de partículas maiores, como as de areia. Em comparação com o solo sem proteção, a

quantidade de areia para todos os tipos de geomantas utilizadas foi menor na maior parte do ensaio (Figura 5.20).

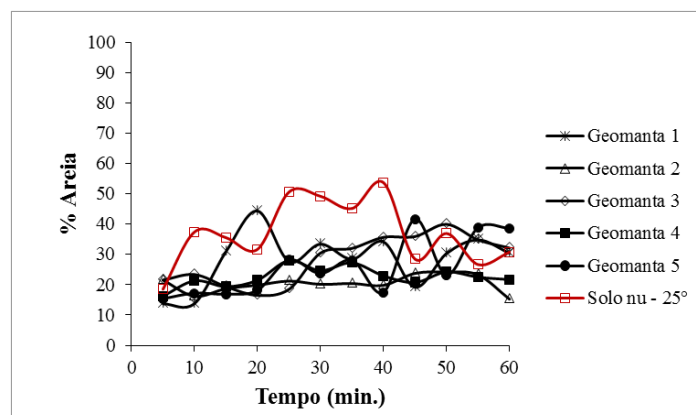


Figura 5.20 - Variação da quantidade de areia presente nos sedimentos com cada geomanta e com o solo nu

Conforme mostra a Tabela 5.7, não houve variação significativa da granulometria com o tempo e com o tipo de proteção, permanecendo o mesmo padrão de sedimentos escoados, sendo a maior quantidade de silte, seguido de areia e uma pequena quantidade de argila.

Como no solo nu, as Geomantas 1, 4 e 5 tiveram, nos 5 primeiros minutos, o intervalo com maior quantidade de silte. Para a Geomanta 2, a maior quantidade de silte carregada ocorreu com 60 minutos e, para a Geomanta 3, para 20 minutos. Esses dados constam na Tabela 5.7.

Os teores baixos de argila podem ser explicados pela agregação dos sedimentos que influenciam na distribuição do tamanho granulométrico (Wang & Shi, 2015). A seleção das partículas destacadas pode ser explicada em decorrência dos agentes físicos envolvidos no fenômeno erosivo, considerando a atuação inicial do efeito *splash* (salpicamento) e depois do efeito *runoff* (escoamento) (Le Bissonnais, 2016; Meyer *et al.*, 1992).

Considerando ambos os efeitos, tanto o *splash* quanto o de escoamento superficial, os maiores valores percentuais são para granulometrias menores que 200 μm . Assim sendo, em todas as situações os sedimentos produzidos e avaliados apresentaram uma dominância amostral menor que 200 μm . Quando considerados somente os teores menores que 50 μm (argila + silte), a pesquisa constatou que o teor de finos apresenta uma média de 75% do total dos sedimentos para os solos protegidos com as geomantas, sendo no solo natural 57% do total.

Tabela 5.7 - Distribuição granulométrica dos sedimentos oriundos dos ensaios de simulação de chuva – solo + geomantas e solo nu, inclinação de 25°

Composição Relativa (%)																		
Tempo (min.)	Solo Nu			Proteção do Solo														
				Geomanta 1			Geomanta 2			Geomanta 3			Geomanta 4			Geomanta 5		
	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia
5	4,81	76,64	18,55	5,12	81,15	13,73	5,36	73,07	21,57	5,36	73,07	21,57	5,41	78,34	16,25	4,99	79,59	15,42
10	4,35	58,20	37,45	4,57	81,58	13,85	6,07	77,69	16,24	4,79	71,80	23,41	4,75	73,92	21,33	4,98	77,78	17,24
15	4,57	59,84	35,59	5,02	64,03	30,95	5,70	75,57	18,73	4,99	75,60	19,41	4,99	75,60	19,41	5,07	78,02	16,91
20	4,38	63,89	31,73	4,07	51,53	44,40	5,47	74,66	19,87	5,19	78,29	16,52	5,14	73,34	21,52	5,48	76,33	18,19
25	3,49	45,85	50,66	4,98	67,33	27,69	5,28	73,47	21,25	5,17	76,32	18,51	4,37	67,62	28,01	4,91	66,88	28,21
30	3,54	47,21	49,25	4,72	61,84	33,44	4,53	75,32	20,15	4,46	65,06	30,48	4,55	70,76	24,69	5,68	70,61	23,71
35	3,81	50,99	45,20	5,17	66,36	28,47	5,44	74,12	20,44	4,35	63,61	32,04	4,47	68,25	27,28	5,61	66,29	28,10
40	3,38	42,85	53,77	4,08	61,74	34,18	5,46	74,70	19,84	3,67	60,63	35,70	4,25	72,77	22,98	6,16	76,29	17,55
45	4,81	66,70	28,49	5,10	75,68	19,22	5,68	70,54	23,78	4,24	59,81	35,95	4,79	74,42	20,79	4,32	53,96	41,72
50	4,47	58,56	36,97	5,06	64,64	30,30	5,43	70,37	24,20	3,94	56,06	40,00	4,70	71,04	24,26	5,11	71,62	23,27
55	5,42	67,88	26,70	4,45	60,72	34,83	5,41	71,28	23,31	4,18	60,93	34,89	4,73	72,74	22,53	4,15	56,98	38,87
60	5,02	64,20	30,78	4,90	64,63	30,47	6,23	78,50	15,27	4,59	63,25	32,16	4,80	73,45	21,75	4,39	56,93	38,68

5.3 ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DO MATERIAL ERODIDO

O método de difratometria de Raios-X foi utilizado para identificação dos minerais formadores do solo submetido ao ensaio de simulação de chuva, proveniente dos taludes da Barragem de Simplício.

Os resultados dos quatro ensaios realizados estão apresentados no Anexo 4. A Tabela 5.8 mostra um resumo dos resultados dos ensaios, apresentando a menor ou maior presença dos minerais no solo na condição do solo natural (antes do chuveiramento), com 15, 35 e 60 minutos de chuva.

Tabela 5.8 - Resumo dos resultados dos ensaios de Difração de Raios-X

Amostras	Amostra Total						
	Quartzo	Caulinita	Ilita	Rutilo	Zircão	Anquerita	Anatásio
Natural	+++	++	++	+	+	+	-
15 min.	+++	++	++	+	+	-	+
35 min.	+++	++	++	+	-	-	+
60 min.	+++	++	++	+	-	-	+

Legenda: Principal: +++; Subordinado: ++; Traço: +

Na análise integral da difratometria, em todas as amostras analisadas apresentou-se uma maior quantidade de quartzo, seguido de caulinita e ilita, como mineral subordinado e traços de rutilo. Além desses minerais, a amostra natural apresentou também traços de zircão e anquerita, e a amostra de 15 minutos apresentou traços de zircão e anatásio. Já as amostras de 35 e 60 minutos apresentaram traços de anatásio. Os traços de rutilo e anatásio aludem à cor avermelhada do solo.

As presenças dos argilominerais caulinita e ilita indicam que o solo encontra-se em processo de intermediária intemperização, principalmente pela ocorrência da ilita, que é um argilomineral encontrado em solos menos intemperizados, em decorrência da menor atividade de lixiviação, e que apresenta grande estabilidade à água, como resultado da presença do potássio (Kämpf & Curi, 2012). Comumente, a ilita origina-se em ambientes semelhantes aos da esmectita, ou seja, ambientes preferencialmente mal drenados, sendo que a diferença entre esses dois argilominerais é caracterizada também pela presença do potássio, apresentando a muscovita como principal mineral de origem (Mitchell & Soga, 2005; Suguio, 2003).

Com base nos resultados apresentados, o quartzo foi o mineral principal para todas as amostras analisadas, e a caulinita e a ilita como minerais subordinados, não apresentando, portanto, alterações representativas com a variação do tempo de chuva durante o ensaio.

5.4 ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA – CAIXA ACRÍLICA 0,3 X 0,3 M

Os ensaios de simulação de chuva foram realizados na caixa acrílica de 0,3 x 0,3 x 0,1 m com o solo descoberto (nu) e com o solo protegido pelas Geomantas 2, 3 e 5. Tais Geomantas foram escolhidas uma vez que a Geomanta 2 apresentou o melhor resultado para a proteção do solo e a diminuição do processo erosivo, a Geomanta 3 teve o melhor resultado entre as Geomantas que possuíam material sintético e a Geomanta 5 por ter obtido o pior resultado entre as Geomantas com material biodegradável. O ensaio não foi realizado com a Geomanta 4, pois ela obteve praticamente o mesmo resultado que a Geomanta 2.

Com a caixa acrílica menor, além dos ensaios realizados com as geomantas, foram realizados ensaios com três densidades diferentes de vegetação artificial, para verificar qual a contribuição na redução da quantidade de solo erodido. A Figura 5.21 apresenta as três densidades utilizadas nesta pesquisa.



Figura 5.21 - Densidade da vegetação artificial instalada nas geomantas e no solo nu

5.4.1 CONDIÇÃO DO SOLO APÓS O ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

A quantidade de ensaios de simulação de chuva realizados na caixa acrílica pequena (0,3 x 0,3 x 0,1 m) foi maior do que na caixa acrílica de 1,0 x 1,0 x 0,15 m. A Figura 5.22 mostra as condições superficiais do solo após os ensaios de chuveiramento com o solo nu, além dos ensaios realizados acrescentando as três densidades de vegetação artificial descritas no item 3.9.1 e, também, o resultado para a Geomanta 3. Na Figura 5.23 estão apresentadas as condições superfícies do solo após os ensaios com as Geomantas 2 e 5.





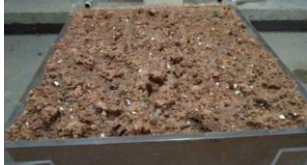



Geomantas	Condição do solo após o ensaio	Descrição	Geomantas	Condição do solo após o ensaio	Descrição
Solo nu		Superfície do solo: - pouco úmida - rugosa	Geomanta 3		Superfície do solo: - muito úmida - muito rugosa - grande quantidade de sulcos
Solo nu + veg. 1		Superfície do solo: - úmida - muito rugosa - início de formação de sulcos	Geomanta 3 + veg. 1		Superfície do solo: - muito úmida - muito rugosa - grande quantidade de sulcos
Solo nu + veg. 2		Superfície do solo: - úmida - muito rugosa - grande quantidade de sulcos	Geomanta 3 + veg. 2		Superfície do solo: - muito úmida - muito rugosa - grande quantidade de sulcos
Solo nu + veg. 3		Superfície do solo: - úmida - muito rugosa - grande quantidade de sulcos	Geomanta 3 + veg. 3		Superfície do solo: - muito úmida - muito rugosa - grande quantidade de sulcos - sinais de selamento

Figura 5.22 - Condição do solo após os ensaios de chuveiramento com o solo nu (descoberto) e a Geomanta 3, com as três densidades de vegetação artificial









Geomantas	Condição do solo após o ensaio	Descrição	Geomantas	Condição do solo após o ensaio	Descrição
Geomanta 2		Superfície do solo: - úmida - pouco rugosa - sinais de selamento - marcada pela geomanta	Geomanta 5		Superfície do solo: - muito úmida - pouco rugosa - solo solto
Geomanta 2 + veg. 1		Superfície do solo: - úmida - preservada - marcada pela geomanta	Geomanta 5 + veg. 1		Superfície do solo: - muito úmida - preservada - solo solto
Geomanta 2 + veg. 2		Superfície do solo: - muito úmida - pouco rugosa - sinais de selamento - marcada pela geomanta	Geomanta 5 + veg. 2		Superfície do solo: - muito úmida - pouco rugosa - pequenos sulcos
Geomanta 2 + veg. 3		Superfície do solo: - muito úmida - preservada - lisa - marcada pela geomanta	Geomanta 5 + veg. 3		Superfície do solo: - muito úmida - preservada - lisa

Figura 5.23 - Condição do solo após os ensaios de chuveiramento com as Geomantas 2 e 5, com as três densidades de vegetação artificial

5.4.2 UMIDADE E ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO

Para a caixa acrílica pequena (0,3 x 0,3 x 0,1 m), também foram coletadas amostras para a verificação da umidade do solo após a realização dos ensaios de simulação de chuva. As amostras foram retiradas na parte superior (base) e inferior (topo) da caixa acrílica para verificar a diferença de umidade no solo. A Tabela 5.9 apresenta os valores encontrados, onde se percebe que na parte superior da caixa o valor da umidade é menor do que na parte inferior, concentrando a água no solo na parte inferior (base) da caixa.

Os valores de umidade com o acréscimo da vegetação, não manteve um padrão, mas em geral foram maiores que os valores do solo sem a vegetação. Comparando os valores de umidade após o ensaio, da caixa acrílica maior (1,0 x 1,0 x 0,15 m) com a caixa acrílica menor (0,3 x 0,3 x 0,1 m), na condição sem vegetação, tem-se que, a caixa acrílica maior apresentou os maiores valores.

Tabela 5.9 - Variação de umidade entre o topo e a base da caixa acrílica pequena

Ensaio Simulação de Chuva	Umidade do solo após o ensaio (%)	
	Base da caixa	Topo da caixa
Solo Nu	28,2	27,6
Solo Nu + veg.1	32,6	32,2
Solo Nu + veg.2	33,6	32,9
Solo Nu + veg.3	29,7	30,0
Geomanta 3	31,5	27,8
Geomanta 3 + veg.1	30,6	27,9
Geomanta 3 + veg.2	35,2	30,0
Geomanta 3 + veg.3	37,5	32,5
Geomanta 2	29,7	27,6
Geomanta 2 + veg.1	29,1	31,1
Geomanta 2 + veg.2	36,1	35,5
Geomanta 2 + veg.3	30,3	29,2
Geomanta 5	36,6	29,2
Geomanta 5 + veg.1	33,1	34,0
Geomanta 5 + veg.2	31,2	32,0
Geomanta 5 + veg.3	30,3	31,0

Foram obtidos os índices físicos para o solo compactado na caixa acrílica pequena (0,3 x 0,3 x 0,1 m). Os valores estão apresentados na Tabela 5.10. A diferença entre os valores foram menores do que na caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m. A massa específica dos ensaios e o grau de compactação obtiveram uma diferença de 3%, a umidade 9% de diferença entre os valores, o índice de vazios teve 6% e o grau de saturação 11% de diferença.

Tabela 5.10 - Valores dos índices físicos do solo compactado na caixa acrílica pequena

Ensaio Simulação de Chuva	ρ_s (g/cm ³)	e	n (%)	w (%)	S (%)	GC (%)
Solo Nu	1,35	0,97	49	15,3	42	80
Solo Nu + veg.1	1,37	0,94	48	15,3	43	81
Solo Nu + veg.2	1,38	0,93	48	15,3	44	82
Solo Nu + veg.3	1,36	0,96	49	16,8	47	80
Geomanta 3	1,34	0,99	50	15,3	41	79
Geomanta 3 + veg.1	1,34	0,99	50	15,3	41	79
Geomanta 3 + veg.2	1,35	0,97	49	15,3	42	80
Geomanta 3 + veg.3	1,37	0,94	48	15,3	43	81
Geomanta 2	1,35	0,98	49	16,8	46	80
Geomanta 2 + veg.1	1,35	0,97	49	16,8	46	80
Geomanta 2 + veg.2	1,36	0,96	49	16,8	47	80
Geomanta 2 + veg.3	1,36	0,96	49	16,8	47	80
Geomanta 5	1,36	0,96	49	16,8	47	80
Geomanta 5 + veg.1	1,35	0,97	49	16,8	46	80
Geomanta 5 + veg.2	1,36	0,96	49	16,8	47	80
Geomanta 5 + veg.3	1,34	0,98	50	16,8	46	79

5.4.3 ANÁLISE DA PERDA DE SOLO DURANTE A CHUVA SIMULADA

Com a realização dos ensaios de simulação de chuva na caixa acrílica menor, pôde-se analisar qual seria a redução da porcentagem de solo carregado acrescentando-se a vegetação artificial e alterando-se sua densidade. Em cada situação foram executados 4 ensaios, sendo o primeiro com o solo descoberto (nu) ou protegido com a geomanta, e os outros 3 variando-se a densidade da vegetação artificial.

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam a quantidade de solo carregado a cada 5 minutos de ensaio. A Figura 5.24 mostra as variações para o solo desprotegido (nu) e da Geomanta 3, plotados na mesma escala. Já a Figura 5.25 mostra o mesmo tipo de resultado para as Geomantas 2 e 5. Percebe-se que as quantidades de solo erodido para as duas últimas geomantas foram bem menores do que para a Geomanta 3 e para o solo nu, sendo que o solo nu foi a pior situação.

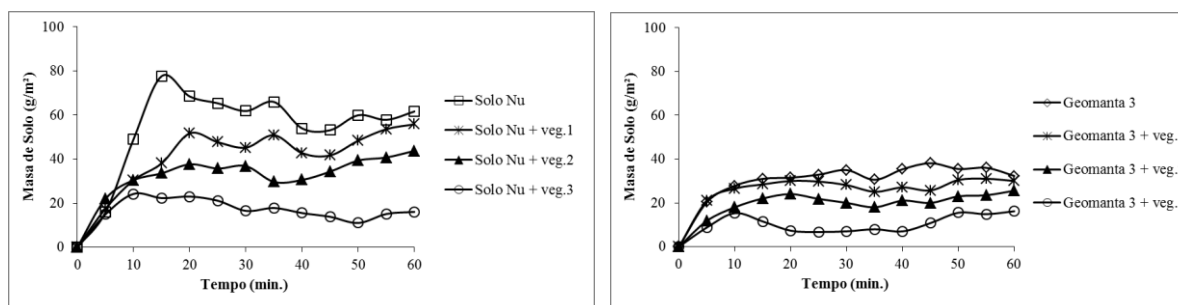


Figura 5.24 - Quantidade de solo carregado durante o ensaio de simulação de chuva - solo nu e Geomanta 3

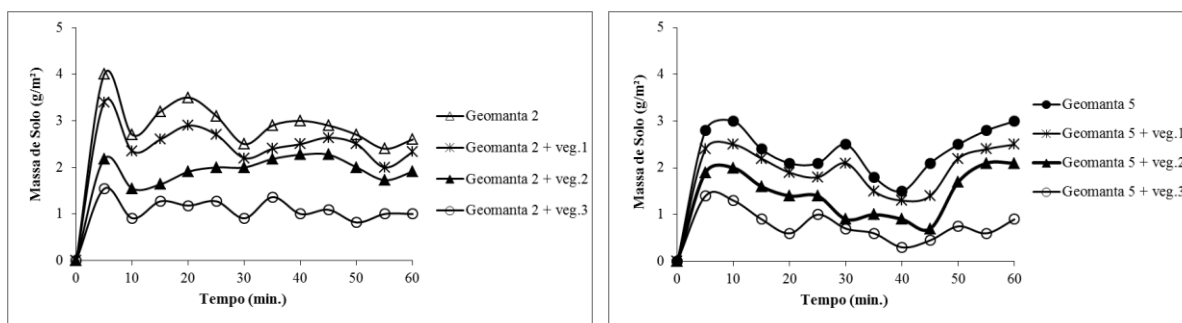


Figura 5.25 - Quantidade de solo carreado durante o ensaio de simulação de chuva - Geomantas 2 e 5

A Figura 5.26(a) mostra uma comparação entre as perdas totais de solo para cada geomanta utilizada nos ensaios e o solo nu, relacionando-os com a perda total de solo. A Figura 5.26(b) apresenta a perda total de solo das geomantas e do solo nu, avaliadas de acordo com a vegetação artificial na densidade 1. A Figura 5.27 mostra os resultados dos ensaios com a vegetação artificial nas densidades 2 e 3.

A perda de solo total foi maior para o solo sem proteção (nu), com o valor de 690 g/m². Comparando com a Geomanta 3, a perda de solo foi 80% maior na condição sem vegetação. Com o acréscimo da vegetação artificial essa diferença diminuiu, variando entre 57% e 66% entre as três densidades. A Geomanta 3 com vegetação na densidade 3 obteve uma redução de 66% na quantidade de material erodido comparado com a condição sem vegetação.

De acordo com as Figuras 5.26 e 5.27, as Geomantas 2 e 5 tiveram comportamentos semelhantes, com uma perda de solo muito pequena em comparação com o solo nu e a Geomanta 3. A diminuição mais significativa foi com a introdução da vegetação na densidade 3 para as Geomantas 2 e 5, com uma redução de 60% e 70%, respectivamente.

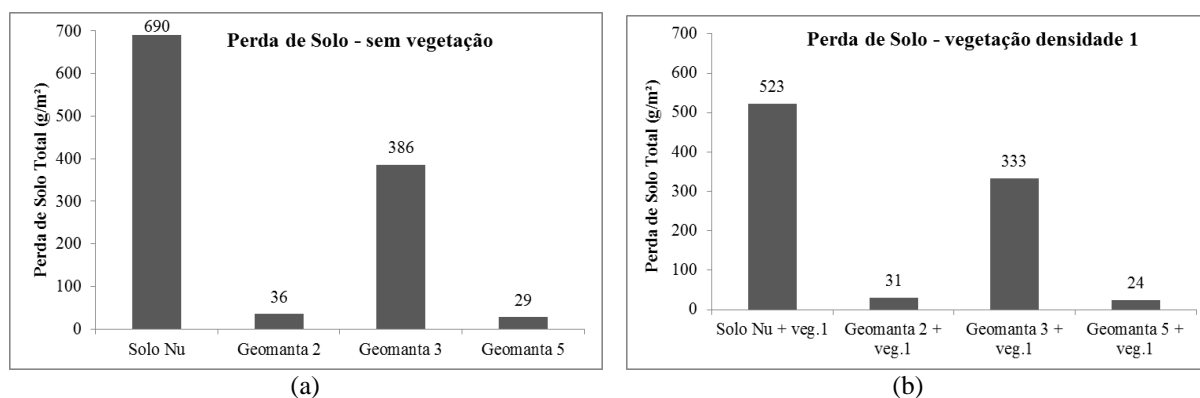


Figura 5.26 - Perda de solo total comparando as geomantas e o solo nu (a) e com vegetação artificial na densidade 1 (b)

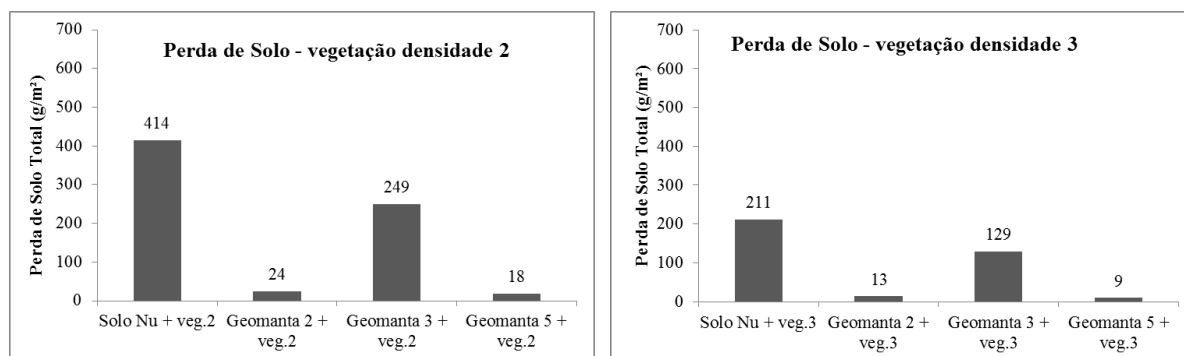


Figura 5.27 - Perda de solo total comparando as geomantas e o solo nu com vegetação artificial nas densidades 2 e 3

Os gráficos das Figuras 5.28 e 5.29 mostram os valores de perda de solo total para cada geomanta e solo nu variando as densidades das vegetações artificiais. Neles é possível observar a quantidade de sedimentos escoados. Percebe-se que a quantidade de sedimentos no solo nu e na Geomanta 3 foi bem maior que nas Geomantas 2 e 5. Quando a vegetação é acrescentada, nota-se uma redução na quantidade de material carreado. Esta redução é consequência do aumento da densidade da vegetação artificial.

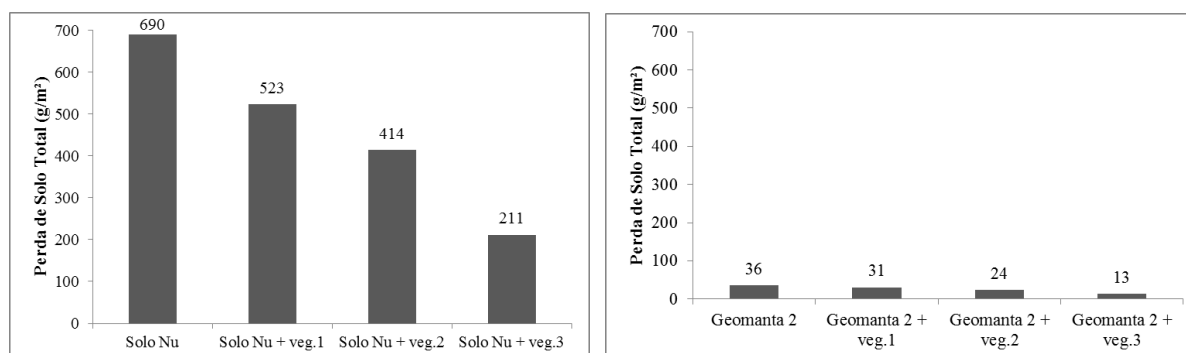


Figura 5.28 - Perda de solo total do solo nu e da Geomanta 2 variando as densidades das vegetações artificiais

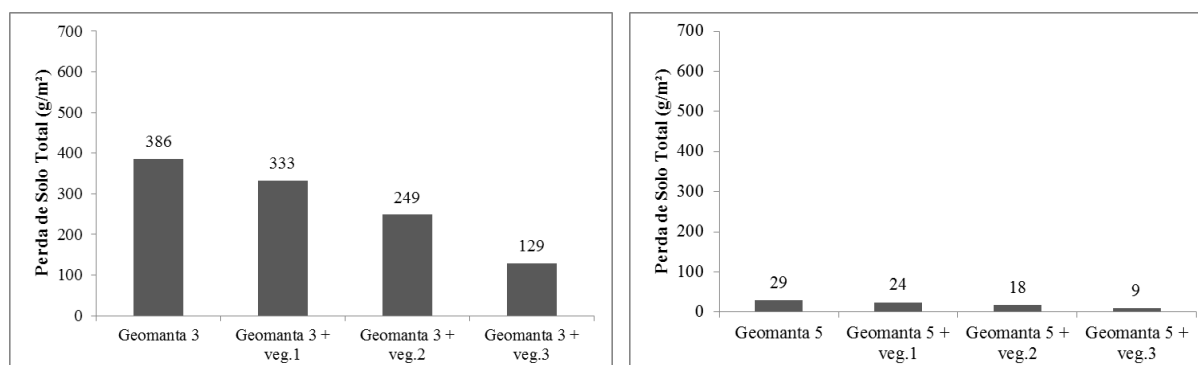


Figura 5.29 - Perda de solo total das Geomantas 3 e 5 variando as densidades das vegetações artificiais

Ao realizar a comparação do solo em condições sem vegetação e com vegetação nas

diferentes densidades, há uma porcentagem de redução de carreamento em cada uma, como pode ser observado na Tabela 5.11. Nota-se que a condição do solo sem proteção (nu) possui uma maior redução ao acrescentar-se a vegetação artificial, porém, essa redução não foi muito maior do que as geomantas. Nos ensaios com as geomantas também ocorreram reduções na quantidade de material carreado com o acréscimo da vegetação nas diferentes densidades, conforme apresentado na Tabela 5.11. Observa-se que as reduções são similares para os três tipos de geomantas, sendo que as comparações foram entre as Geomantas e as vegetações artificiais.

Tabela 5.11 - Porcentagem de redução dos sedimentos durante os ensaios de simulação de chuva

% de redução do material carreado durante o ensaio				
	Solo Nu	Geomanta 2	Geomanta 3	Geomanta 5
veg. 1	24	14	14	15
veg. 2	40	33	36	38
veg. 3	69	62	67	67

A redução na porcentagem de material erodido com a utilização de vegetação artificial foi parecida nas três Geomantas utilizadas na pesquisa (Tabela 5.11). Cabe ressaltar que, conforme apresentado anteriormente, a quantidade de sedimentos escoados na Geomanta 3 foi bem maior do que nas Geomantas 2 e 5, como mostrado na Figura 5.30.

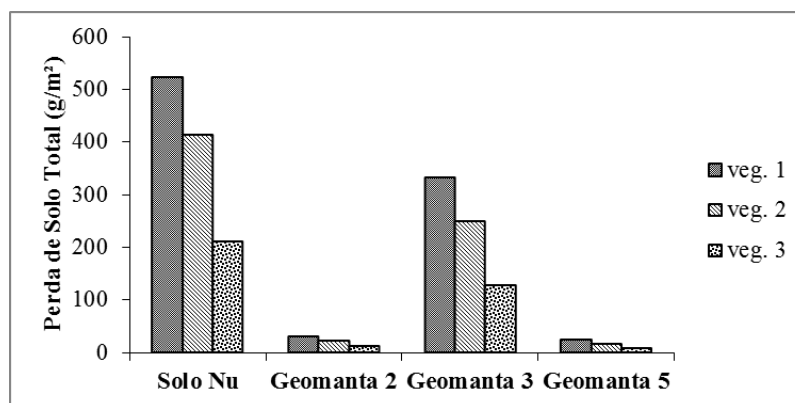


Figura 5.30 - Perda de solo total do solo nu e das geomantas com a utilização da vegetação artificial

Os resultados dos ensaios mostram que as proteções do solo, quando acrescidas de vegetação artificial, tiveram uma menor quantidade de sedimentos gerados, se comparados com a condição em que não houve adição da vegetação artificial, como ratificado por Fernandes *et al.* (2009); Barrela (2007); Cancelli *et al.* (1990).

A Figura 5.31 mostra que a quantidade acumulada dos sedimentos teve um aumento linear ao longo do tempo. A literatura também comprova esse comportamento durante a

execução deste tipo de ensaio (Smets *et al.*, 2011; Amorim *et al.*, 2001; Mermut *et al.*, 1997).

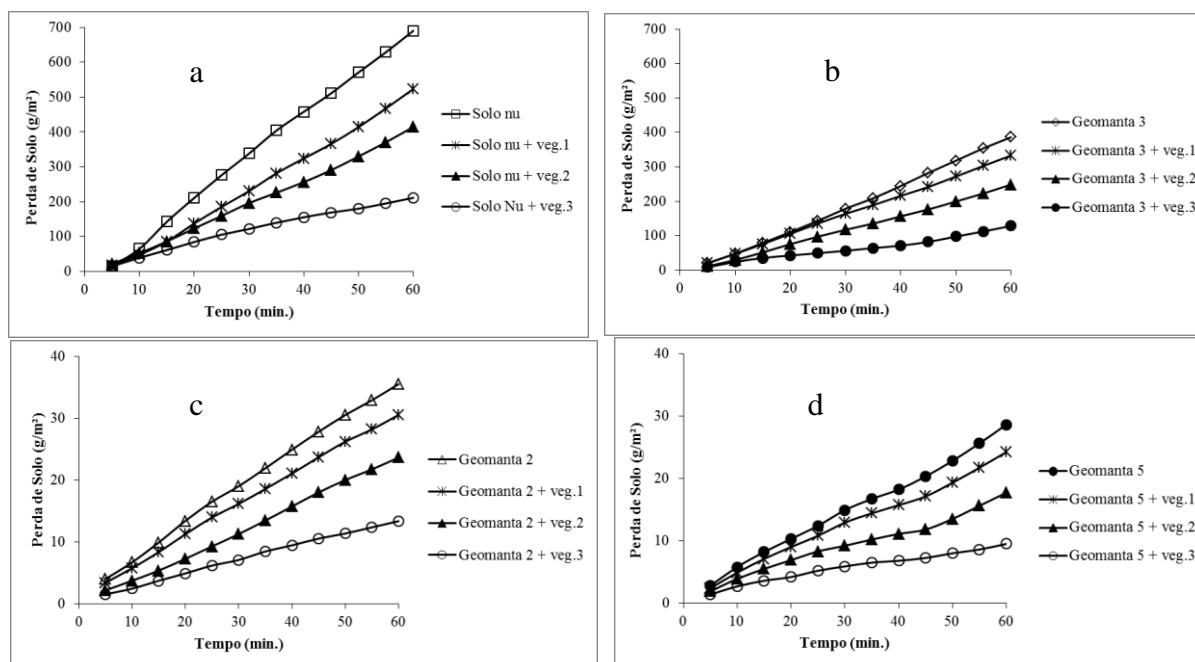


Figura 5.31 - Perda de solo acumulada nos ensaios de simulação de chuva com o solo nu (a) e as Geomantas 2 (b), 3 (c) e 5 (d)

A proteção utilizada nos ensaios demonstrou-se eficiente na medida em que, em todos os cenários executados com proteções geossintéticas e vegetações artificiais, as perdas de solo foram menores, se comparadas às do solo nu, conforme a Tabela 5.12. Smets *et al.* (2011); Fernandes *et al.* (2009) e Barrela (2007) também obtiveram resultados semelhantes.

Tabela 5.12 - Eficiência da proteção nos ensaios de simulação de chuva com a caixa acrílica pequena

Tipo de Tratamento	Massa de solo carregado (g/m ²)	Eficiência da Proteção (%)
Solo Nu	690,29	-
Solo Nu + veg.1	523,40	24
Solo Nu + veg.2	414,36	40
Solo Nu + veg.3	211,25	69
Geomanta 3	386,36	44
Geomanta 3 + veg.1	333,13	52
Geomanta 3 + veg.2	248,70	64
Geomanta 3 + veg.3	128,89	81
Geomanta 2	35,50	95
Geomanta 2 + veg.1	30,52	96
Geomanta 2 + veg.2	23,64	97
Geomanta 2 + veg.3	13,36	98
Geomanta 5	28,60	96
Geomanta 5 + veg.1	24,20	96
Geomanta 5 + veg.2	17,70	97
Geomanta 5 + veg.3	9,50	99

A Figura 5.32 mostra a porcentagem de redução da perda de solo de cada Geomanta e do solo nu juntamente com suas densidades de vegetações artificiais. O gráfico abaixo representa a eficiência de cada proteção ensaiada. As Geomantas 2 e 5 obtiveram uma redução de quase 100%, mostrando-se bastante eficientes.

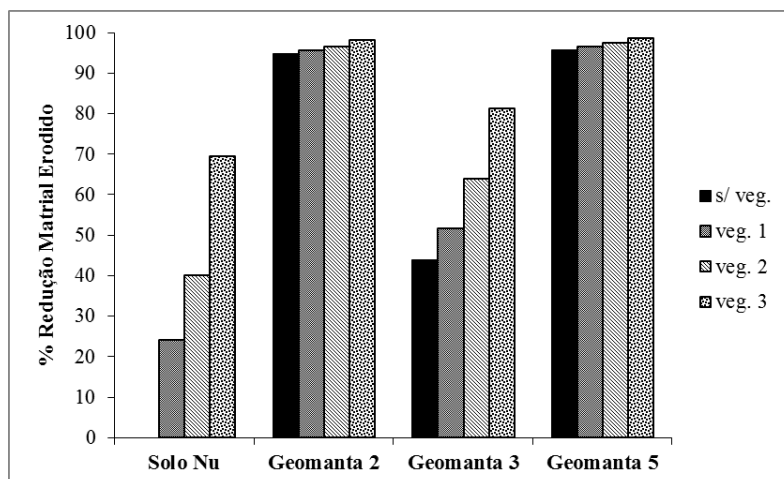


Figura 5.32 - Porcentagem de redução da perda de solo do solo nu e das geomantas com as respectivas densidades de vegetação artificial

A utilização das geomantas para diminuição da produção de sedimentos foi eficiente em todas as situações analisadas na pesquisa, bem como, ao se acrescentar a vegetação artificial a eficiência aumentou em: 14% para a vegetação na densidade 1, 36% na densidade 2 e 65% na densidade 3. Já no acréscimo da vegetação artificial no solo nu, essa porcentagem de redução foi maior, onde para a vegetação na densidade 3 a eficiência foi de 69%, portanto nesse caso a sua utilização previne o aparecimento de processos erosivos.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

CONCLUSÕES

Esta tese analisou a eficiência de cinco materiais geossintéticos para a aplicação em faces de taludes visando a prevenção à erosão. Para isso, foram executados ensaios de simulação de chuva do tipo aspersão para se determinar a perda de solo em cada situação. Os escoamentos superficiais e as quantidades de sedimentos gerados foram comparados. Os resultados obtidos permitiram avaliar qual tipo de geomanta foi mais eficiente na proteção da superfície do solo durante a simulação de chuva. Também foram executados ensaios com o solo nu e com a vegetação artificial em três densidades superficiais diferentes.

Com os sedimentos gerados pela simulação de chuva foram executados ensaios de granulometria a laser. A distribuição das frações granulométricas dos sedimentos pode ser influenciada pela distribuição da dimensão das partículas do solo original, pela quebra dos agregados e pela velocidade de assentamento das partículas (Shi *et al.*, 2012).

Na análise dos sedimentos para o solo nu nas inclinações de 45° e 25°, percebeu-se que a inclinação não teve influência em relação à variação da fração granulométrica carregada pelo escoamento superficial. As frações granulométricas mantiveram-se parecidas para os dois casos, sendo alterada somente a quantidade de material carregado. Deste modo, a quantidade de sedimento gerado pela maior inclinação (45°) foi 100% maior para o tempo de 60 minutos de ensaio e 78% maior considerando o total de sedimentos gerados durante os ensaios. Assim, a inclinação interferiu na quantidade de solo carregado, mas não na composição granulométrica. A maior inclinação proporciona maiores velocidades de escoamento superficial, levando a um maior carregamento de material.

Foram analisados também os sedimentos gerados pela simulação de chuva em que a superfície do solo foi protegida com as geomantas utilizadas na pesquisa. Nesses casos, a porcentagem de silte foi maior do que nos casos do solo nu. A quantidade de sedimentos na fração de areia foi menor para todos os tipos de geomantas utilizadas quando comparadas à condição de solo nu. Assim sendo, as geomantas impediram o carregamento do material mais granular devido à redução de energia cinética no salpicamento e o efeito filtro retendo os grãos maiores em relação à situação de solo nu.

No solo nu, com a proteção das geomantas na superfície do solo, não houve variação granulométrica com o tempo de ensaio, tendo-se maior quantidade de silte, depois areia e uma

pequena quantidade de argila. Em todos os cenários analisados com as geomantas, os sedimentos produzidos apresentam uma dominância amostral menor do que 200 μm . Quando considerados somente os teores menores que 50 μm (argila + silte), a pesquisa constatou que o teor de finos apresenta uma média de 75% do total dos sedimentos, para os solos protegidos com as geomantas, e de 64%, para o solo não protegido (solo nu).

A característica da geomanta utilizada foi importante para sua eficácia. As Geomantas 1 e 3 possuem uma espessura maior e formato tridimensional, com permeabilidade maior, favorecendo o fluxo preferencial entre o solo e a geomanta. Já as Geomantas 2, 4 e 5, acomodaram-se melhor ao solo, são menos permeáveis, mas absorveram mais água, diminuindo a velocidade de escoamento e a quantidade de material carreado, conseguindo reter maior percentual de partículas da fração areia.

Os resultados dos ensaios de simulação de chuva com as geomantas na caixa acrílica 1,0 x 1,0 x 0,15 m foram comparados com o ensaio com o solo nu, para verificar a eficiência em relação à redução da produção de sedimentos. As Geomantas 2 e 4, constituídas com materiais biodegradáveis, foram as que obtiveram os melhores resultados como tratamento para a redução de erosões. A Geomanta 2 foi a mais eficiente entre todas; a Geomanta 4 teve um desempenho muito parecido com o da Geomanta 2, sendo também muito eficaz. A Geomanta 5, também constituída de material biodegradável, teve um comportamento diferente. No início do ensaio apresentou um comportamento bom, mas, no decorrer do tempo de ensaio, teve um aumento elevado na perda de solo, quando comparado às Geomantas 2, 3 e 4.

A Geomanta 1 não obteve eficiência para contenção de sedimentos, apresentando um carregamento muito maior do que na situação do solo nu. Observou-se que sua geometria, com maiores aberturas, não permitiu um bom contato com o solo, permitindo um fluxo de água concentrado entre a superfície do solo e a geomanta. Já a Geomanta 3 apresentou eficiência razoável, reduzindo a quantidade de sedimentos erodidos em 64%.

As Geomantas 2 e 4 obtiveram uma eficiência de 95% e 94%, praticamente não produzindo sedimentos durante o ensaio de simulação de chuva. Portanto, são adequadas para serem utilizadas contra o desencadeamento de erosões por escoamento superficial.

Com a proteção da superfície do solo pelas geomantas biodegradáveis, a distribuição da água foi mais uniforme, quando da ocorrência do escoamento superficial, uma vez que a água não possuía força suficiente para produzir sulcos profundos, como aconteceu com o solo nu.

Os ensaios de simulação de chuva na caixa acrílica 0,3 x 0,3 x 0,1 m analisaram a redução da geração de sedimentos, colocando as geomantas na superfície do solo e acrescentando vegetação artificial com três densidades diferentes. As Geomantas 2 e 5 produziram os melhores resultados, em comparação com a Geomanta 3 e com o solo nu. A Geomanta 3 produziu menos material carregado do que no caso do solo nu. Em todos os cenários analisados, a Geomanta 2 e a Geomanta 5 comportaram-se de maneira muito parecida, com uma quantidade muito pequena de material carregado, principalmente quando se acrescentou a vegetação com maior densidade.

Com o acréscimo da vegetação artificial, a porcentagem de redução dos sedimentos foi equivalente para as três geomantas utilizadas na pesquisa, sendo que a Geomanta 3 teve uma quantidade de sedimentos bem maior do que as Geomantas 2 e 5. As eficiências de proteção para as Geomantas 2 e 5 foram maiores ou iguais a 95% em todas as situações. Para a condição de maior densidade de vegetação (densidade 3), as duas geomantas obtiveram uma eficiência de praticamente 100%.

A Geomanta 3 teve sua eficiência variando entre 44% e 81%, onde o menor valor foi obtido para a situação sem vegetação e o maior para a situação com vegetação artificial na densidade 3.

A utilização da Geomanta 3, juntamente com a vegetação artificial, melhorou muito a contenção dos sedimentos. Para as Geomantas 2 e 5, o acréscimo de vegetação artificial aumentou em 3% a eficiência da proteção, não sendo portanto primordial nesse caso.

Os sistemas de controle de erosão e sedimentos por meio da utilização de materiais geossintéticos estão cada vez mais desenvolvidos, desempenhando funções de proteção, retenção e confinamento do solo com melhor qualidade e efetividade. Nesta pesquisa a utilização das geomantas reduziram de maneira significativa a erosão e a produção de sedimentos.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões à continuidade da pesquisa propõem-se:

- Variar a umidade do solo para se analisar a influência do grau de saturação inicial e da sucção na infiltração e no escoamento superficial.
- Variar a intensidade e a inclinação da rampa para se analisar a alteração na infiltração e no escoamento superficial.

- Verificar o efeito de *splash* e o selamento da superfície do solo com a variação da intensidade da chuva e da inclinação.
- Ensaiar solos diferentes para verificar a eficácia dos materiais geossintéticos utilizados nesta pesquisa.
- Ensaiar outros materiais geossintéticos para avaliar suas eficácias para a diminuição na produção de sedimentos.
- Introdução de vegetação natural nos ensaios de simulação de chuva.
- Executar simulação de chuva em campo com os materiais geossintéticos utilizados e fazer um comparativo com os ensaios de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR 10838. Determinação da Massa Específica Aparente de Amostras Indeformadas, com Emprego da Balança Hidrostática. Rio de Janeiro, RJ, 4p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502. Rochas e Solos – Terminologia. Rio de Janeiro, RJ, 18p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458. Grãos de Pedregulho Retidos na Peneira de Abertura 4.8 mm – Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água. Rio de Janeiro, RJ, 10p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 3p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, 9p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459. Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 5p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 12p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR ISO 10318-1. Geossintéticos – Parte 1: Termos e Definições. Rio de Janeiro, RJ, 9p.
- ABRANTES, J. R. C. B. & LIMA, J. L. M. P. (2012). Modelação Hidrológica de Zonas Urbanas Costeiras em Laboratório com Recurso a Simulador de Chuva e a Canal de Terra. Conference Paper, ResearchGate, 11p.
- ALMEIDA, J. G. R. (2013). Erodibilidade de Solos Tropicais não Saturados nos Municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis - GO. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, UFG, Goiânia, GO, 133p.
- 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 e Ambiental, Campina Grande, PB, Volume 5 Nº 1: 124 - 130.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2013). D7101-13. Standard Index Test Method for Determination of Unvegetated Rolled Erosion Control Product (RECP) Ability to Protect Soil from Rain Splash and Associated Runoff Under Bench-Scale Conditions. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 7p.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (2015). D6459-15. Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product (RECP) Performance in

- Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion. West Conshohocken, Pensilvânia, EUA, 10p.
- BARRELA, C. (2007). Aplicação de Geossintéticos no Controlo da Erosão Superficial e Costeira. Relatório 206/2007 – NGE, LNEC, Departamento de Geotecnia, Núcleo de Geologia de Engenharia, Lisboa, Portugal, 51p.
- BASTOS, C. A. B. (1999). Estudo Geotécnico sobre a Erodibilidade de Solos Residuais não Saturados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, 303p.
- BASU, G., ROY, A. N., SANYAL, P., MITRA, K., MISHRA, L., GHOSH, S. K. (2019). Bioengineering of River Earth Embankment Using Natural Fibre-based Composite-structured Geotextiles. Elsevier Geotextiles and Geomembranes, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.03.002>.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. (2010). Conservação do Solo. Editora Ícone, 7ª Edição, São Paulo, SP, 360 p.
- BEZERRA, V. M. N. & COSTA, C. M. L. (2012). Análise da Especificação de Geossintéticos Disponíveis no Mercado Nacional para Controle de Erosão em Taludes. Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, VII CONNEPI, IFT, Palmas, Tocantins, 7p.
- BOARDMAN, J. (2006). Soil Erosion Science: Reflections on the Limitations of Current Approaches. Elsevier Science B. V. Catena, 68: 73-86.
- BRASIL (1983). Folhas SF. 23/24, Rio de Janeiro/Vitória: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra / Projeto RADAMBRASIL. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, Rio de Janeiro, RJ, Volume 32, 775p.
- BUENO, B. S. & VILAR, O. M. (2015). Propriedades, Ensaio e Normas. Manual Brasileiro de Geossintéticos, J. C. VERTEMATTI (eds), 2ª edição, Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, pp. 47-84.
- CALDERANO FILHO, B., CARVALHO JÚNIOR, W., CALDERANO, S. B., GUERRA, A. J. T. (2014). Suscetibilidade dos Solos à Erosão na Área de Entorno do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Tombos (MG). Revista Geonorte, Revista do Departamento de Geografia, UFAM, Manaus, Edição Especial 4, Volume 10 Nº 10: 476 – 481.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., LUIZ, G. C. & GONÇALVES, T. D. (2012). A Infiltração no Contexto do Plano Urbanístico e dos Projetos Paisagístico e Arquitetônico. Tópicos sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior & E. T. L. Carvalho (orgs.), Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Série Geotecnia Volume 4, Brasília, DF, pp. 25-47.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J., SALES, M. M., MORTARI, D., FÁZIO, J. A., MOTTA, N. O. & FRANCISCO, R. A. (2006). Processos Erosivos. Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro, J. Camapum de Carvalho, M. M. Sales, N. M. Souza & M. T. S. Melo (orgs.), Universidade de Brasília, Editora FINATEC, Brasília, DF, pp. 39-91.

- CAMPOS, T. M. P & MOTTA, M. F. B. (2015). Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturadas. Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior, S. L. Machado, M. M. A. Mascarenha & F. C. Silva Filho (orgs.), Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), São Paulo, SP, pp. 465-497.
- CANCELLI, A., MONTE, R. & RIMOLDI, P. (1990). Comparative Study of Geosynthetics for Erosion Control. 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, Netherlands: 403 – 408.
- CARDOSO, A. T., PICKBRENNER, K. & PINTO, E. J. A. (2016). Atlas Pluviométrico do Brasil, Equações Intensidade-Duração-Frequência (Desagregação de Precipitações Diárias). Município: Três Rios/RJ. Estação Pluviométrica: Moura Brasil, Código 02243015. CPRM, Goiânia, GO, 14p.
- CARROL, R. G., RONDECAL, J. & COLLIN, J. G. (1992). Geosynthetics in Erosion Control - The Principles. Geotextiles and Geomembranes. International Geotextile Society, Vol. 11, 523-534.
- CARVALHO, M. F., TARQUI, J. L. Z., SILVA, V. S. & LOBO, B. R. H. (2012). Avaliação do Funcionamento de um Simulador de Chuva pelo Método da Farinha. RBRH, Porto Alegre, RS, Volume 17 Nº 3: 115 – 124.
- CARVALHO, N. O., FILIZOLA JÚNIOR, N. P., SANTOS, P. M. C. & LIMA, J. E. F. W. (2000) Guia de Práticas Sedimentométricas. ANEEL – Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília, DF, 154p.
- CASTRO, T. Q. (2011). Avaliação do Desempenho de Pavimentos Permeáveis. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, UFG, Goiânia, GO, 91p.
- COELHO, A. T. (2007). Efeitos da Vegetação Herbácea Associada a Técnicas de Bioengenharia de Solos no Controle de Erosão em Margens de Áreas de Reservatório da UHE Volta Grande, nos Municípios de Água Comprida/MG e Miguelópolis/SP. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, MG, 184p.
- CORRECHEL, V. (2003). Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica de análise da redistribuição do “fallout” do ¹³⁷Cs. Tese de Doutorado, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 79p.
- COUTO, B. O. C. (2015). Análise de Erodibilidade em Taludes com Horizontes Resistentes e Suscetíveis aos Processos Erosivos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG, 124p.
- DAS, B. M. (2011). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 7ª Edição Norte-Americana. Cengage Learning, São Paulo, SP, 610p.

- DEFLOR BIOENGENHARIA. (2004). Guia de Instalação de Biomantas Antierosivas, Retentores de Sedimentos e Hidrossemeio. Deflor Bioengenharia, Belo Horizonte, MG, 11p.
- DE MARIA, I. C. (1994). Cálculo da Erosividade da Chuva. Instituto Agronômico de Campinas. Manual de Programas de Processamento de Dados de Campo e de Laboratório para fins de Experimentação em Conservação do Solo. Boletim Técnico. IAC-SCS, Campinas, SP, 6p.
- EGELI, I. & PULAT, H. F. (2011). Mechanism and Modelling of Shallow Soil Slope Stability During High Intensity and Short Duration Rainfall. Sharif University of Technology. Scientia Iranica. Transactions A: Civil Engineering, 18 (6): 1179-1187.
- FARIAS, R. J. C. (1999). Utilização de Geossintéticos no Controle de Erosões. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF, 120p.
- FARIAS, R. J. C. (2005). Utilização de Geossintéticos em Sistemas de Controle de Erosões. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 188p.
- FERNANDES, L. S. (2004). Avaliação de Mantas Comerciais na Vegetação de Talude em Corte de Estrada. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, UFV, Viçosa, MG, 81p.
- FERNANDES, L. S., GRIFFITH, J. J., FONSECA, D. M., DIAS, L. E. & RUIZ, H. A. (2009). Uso de Geomantas no Controle da Erosão Superficial Hídrica em um Talude em Corte de Estrada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33: 199-206.
- FERREIRA, A. O., GONZATTO, R., MIOLA, A., ELTZ, F. L. F. & AMADO, T. J. C. (2010). Influência da Declividade e de Níveis de Cobertura do Solo no Processo de Erosão com Chuva Simulada. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró, RN, 5(5): 182-190.
- FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. (2009). Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes. 2ª Edição Revista e Ampliada. Editora UFPR, Curitiba, PR, 604p.
- FORMIGA, K. T. M., SEIBT, A. C., CASTRO, T. Q. & BERNARDES, R. S. (2012). A Infiltração e o Escoamento Superficial. Tópicos sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior & E. T. L. Carvalho (orgs.), Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Série Geotecnia Volume 4, Brasília, DF, pp. 101-116.
- FU, Y., LI, G., ZHENG, T., LI, B. & ZHANG, T. (2017). Splash Detachment and Transport of Loess Aggregate Fragments by Raindrop Action. Elsevier Science B. V. Catena 150: 154-160.
- GITIRANA JÚNIOR, G. F. N., MARINHO, F. A. M. & SOTO, M. A. A. (2015). A Curva de Retenção de Água de Materiais Porosos. Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior, S. L. Machado, M. M. A. Mascarenha &

- F. C. Silva Filho (orgs.), Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), São Paulo, SP, pp. 205-229.
- GOMES, F.S. (2001). Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um Solo em Processo Erosivo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE, Recife, PE, 207p.
- GUEDES, C. S. (2015). Avaliação do Desempenho Hidrológico de Pavimentos Permeáveis. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, UFG, Goiânia, GO, 95p.
- GUERRA, A. J. T. (1995). Processos Erosivos nas Encostas. Geomorfologia: uma Atualização de Bases e Conceitos, A. J. T. Guerra & S. B. Cunha (orgs.), Bertrand Brasil, 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, pp. 149-209.
- GUERRA, A. J. T. (2015). O Início do Processo Erosivo. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações, A. J. T. Guerra, A. S. Silva, R. G. M. Botelho (orgs.), Bertrand Brasil, 10ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, pp.17-55.
- HEIDEMANN, M. (2008). Mapeamento Geotécnico de um Vetor de Expansão Urbana do Município de Tubarão – SC. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, SC, 178p.
- HERNANDEZ MONCADA, M. P. (2008). Avaliação de Propriedades Hidráulicas de Solos Tropicais Não Saturados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 324p.
- HERNGREN, L. (2005). Build-up and Wash-off Process Kinetics of PAHs and Heavy Metals on Paved Surfaces Using Simulated Rainfall. Degree of Doctor of Philosophy, Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, Australia, 351p.
- IGS - International Geosynthetics Society (2015). Classificação dos Geossintéticos. BATHURST, R. J. (Preparação). MENDES, M. J. A. (Tradução). Brasil, 2p.
- JORNAL SISDERESP. Disponível em: < <http://www.jornal-sisderesp.com.br/products/monitoramento-ambiental/> > Acesso em 10 setembro 2016.
- KÄMPF, N. & CURI, N. (2012). Formação e Evolução do Solo (Pedogênese). Pedologia: Fundamentos, J.C. Ker, N. Curi, C.E.G.R. Shaefer & P. VIDAL-TORRADO (eds.), Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, pp. 207-302.
- KINNELL, P. I. A. (2000). The Effect of Slope Length on Sediment Concentrations Associated with Side-Slope Erosion. Soil Science Society of America Journal, v. 64, 3: 1004-1008.
- LAL, R. (2001). Soil Degradation by Erosion. Land Degradation & Development, 12: 519-539.

- LASCELLES, B., FAVIS-MORTLOCK, D. T., PARSONS, A. J. & GUERRA, A. J. T. (2000). Spatial and Temporal Variation in Two Rainfall Simulators: Implications for Spatially Explicit Rainfall Simulation Experiments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 709–721.
- LE BISSONNAIS, Y. (2016). Aggregate Stability and Assessment of Soil Crustability and Erodibility: I. Theory and Methodology. *British Society of Soil Science, European Journal of Soil Science*, 67: 11-21.
- LOCH, R. J., ROBOTHAM, B. G., ZELLER, L., MASTERMAN, N., ORANGE, D. N., BRIDGE, B. J., SHERIDAN, G. & BOURKE, J. J. (2001). A Multi-purpose Rainfall Simulator for Field Infiltration and Erosion Studies. *Australian Journal of Soil Research*, 39: 559-610.
- LUIZ, G. C., MARTINS, L. F. R. & CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2012). A Influência do Clima na Infiltrabilidade do Solo. Tópicos sobre Infiltração: Teoria e Prática Aplicadas a Solos Tropicais, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior & E. T. L. Carvalho (orgs.), Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Série Geotecnia Volume 4, Brasília, DF, pp. 49-73.
- MACCAFERRI DO BRASIL LTDA. (2013). Revestimento de Taludes: Necessidades e Soluções. Catálogo, Jundiaí, SP, 15p.
- MAGALHÃES, R. A. (2001). Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, ABGE, Goiânia, GO, 11P.
- MALAM ISSA, O., LE BISSONNAIS, Y., PLANCHON, O., FAVIS-MORTLOCK, D., SILVERA, N. & WAINWRIGHT, J. (2006). Soil Detachment and Transport on Field- and Laboratory Scale Interill Areas: Erosion Processes and the Size-Selectivity of Eroded Sediment. *Earth Surf. Proc. Land*, 31: 929–939.
- MARIANO, D. P. (2015). Efeito do Coberto Vegetal no Reforço e na Proteção de Taludes. Dissertação de Mestrado, Engenharia Geológica (Geotecnia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 95p.
- MARINHO, C. A. S. (2007). Estudos Geológico-Geotécnicos do AHE Simplício. Trabalho de Graduação, Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 88p.
- MARQUES, A. C. M. & GEROTO, R. E. (2015). Aplicações em Controle de Erosão Superficial. Manual Brasileiro de Geossintéticos, J. C. Vertematti (eds.), Editora Edgar Blücher, 2ª edição, São Paulo, SP, pp. 421-456.
- MASCARENHA, M. M. A., MAHLER, C. F., LAFAYETTE, K. P. V., NACINOVIC, M. G. G., BANDEIRA, A. P. N. & ALMEIDA, J. G. R. (2015). Erosão. Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico, J. Camapum de Carvalho, G. F. N. Gitirana Júnior, S. L. Machado, M. M. A. Mascarenha & F. C. S. Filho (orgs.), ABMS, São Paulo, SP, pp. 581-612.

- MELO, J. F. G. (2016). Utilização de Geossintético no Controle da Erosão. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 61p.
- MENDES, T. A. (2019). Modelagem física e numérica da infiltração e escoamento em superfícies não saturadas e cobertura vegetativa. Tese de Doutorado, G.TD-337/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação e Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 255p.
- MENEZES, M. B. M. & PEJON, O. J. (2010). Análise da Influência do Teor de Umidade na Absorção D'água e Sucção dos Solos em Estudos de Erodibilidade. *Geociências*, UNESP, São Paulo, 29(2): 211-228.
- MERMUT, A. R., LUK, S. H., RÖMKENS, M. J. M. & POESEN, J. W. A. (1997). Soil Loss by Splash and Wash During Rainfall from Two Loess Soils. *Elsevier Science B. V. Geoderma* 75: 203-214.
- MEYER, L. D., LINE, D. E. & HARMON, W. C. (1992). Size Characteristics of Sediment from Agricultural Soils. *Journal Soil Water Conservation*, 47: 107-111.
- MIGUNTANNA, N. S. (2009). Determining a Set of Surrogate Parameters to Evaluate Urban Stormwater Quality. Degree of Master of Science in Engineering, Faculty of Built Environment and Engineering, Queensland University of Technology, Australia, 311p.
- MITCHELL, J.K. & SOGA, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons, USA, 3^a Edition, 592 p.
- MONTEBELLER, C. A., CARVALHO, D. F., SOBRINHO, T. A., NUNES, A. C. S. & RUBIO, E. (2001). Avaliação Hidráulica de um Simulador de Chuvas Pendular. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, DEAg/UFPB, Campina Grande, PB, Volume 5 N° 1: 1 – 5.
- MORGAN, R. P. C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing, Third Edition, 304p.
- MOURA, T. A. M. (2005). Estudo Experimental de Superfícies Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial em Ambientes Urbanos. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, DF, 117p.
- NASCIMENTO, A. C. (2002). Avaliação da Umidade no Perfil do Solo a partir de Sensoriamento Remoto. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, UnB, Brasília, DF, 91p.
- NGEZAHAYO, E., BURROW, M. P. N. & GHATAORA, G. S. (2019). The Advances in Understanding Erodibility of Soils in Unpaved Roads. *International Journal of Civil Infrastructure*, Volume 2.

- NGUYEN, G., BRODA, J. & GRZYBOWSKA-PIETRAS, J. (2019). Effectiveness of Geotextile Ropes in Slope Erosion Protection. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 221, Conference 1.
- OGBOBE, O., ESSIEN, K. S. & ADEBAYO, A. (1998). A Study of Biodegradable Geotextiles Used for Erosion Control. *Geosynthetics International*, Vol. 5, 5: 545 – 553.
- PALMEIRA, E. M. (2013). Aplicações de Geossintéticos em Obras Geotécnicas e Geoambientais. Notas de Aula, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação e Geotecnia, UnB, Brasília, DF, 50p.
- PALMEIRA, E. M. (2018). Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP, 294p.
- PAULA, A. M. V. (2003). Danificação Durante a Instalação – Avaliação Laboratorial da Influência no Comportamento dos Geossintéticos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Lisboa, 176p.
- QUANSAH, C. (1985). Rate of Soil Detachment by Overland Flow, with and without rain, and its Relationship with Discharge, Slope Steepness and Soil Type. EL-SWAIFY, S.A.; MOLDENHAUER, W.C. & LO, A., eds. Soil erosion and conservation. Iowa, Soil Conservation Society of America: 406-423.
- REGO, J. J. V. (1978). Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 125p.
- RENARD, K. G., YODER, D. C., LIGHTLE, D. T. & DABNEY, S.M. (2011). Universal Soil Loss Equation and Revised Universal Soil Loss Equation. Handbook of Erosion Modelling, R. P. C. Morgan & M.A. Nearing (orgs.), Blackwell Publishing, 1ª Edition, USA, pp. 137-167.
- RIBEIRO, B. T.; MAGALHÃES, C. A. S.; LIMA, J. M. & SILVA, M. L. N. (2000). Calibração e Uso de Minissimulador de Chuva Para Estudos de Erosão e Poluição do Solo. *Boletim Técnico, Lavras, MG, 77: 1-17.*
- RIBEIRO, B. T. (2006). Energia Cinética de Gotas de Chuva Simulada e Energia Ultra-Sônica na Desagregação de um Cambissolo. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Agronomia, UFLA, Lavras, MG, 65p. (arquivo eletrônico: Ribeiro (2006) Energia Cinética Gotas de Chuva Simulada)
- RÖMKENS, M. J. M., HELMING, K. & PRASAD, S. N. (2001). Soil Erosion Under Different Rainfall Intensities, Surface Roughness, and Soil Water Regimes. *Elsevier Science B. V. Catena 46: 103-123.*
- SADEGHI, S. H. R., GHOLAMI, L., SHARIFI, E., KHALEDI DARVISHAN, A. & HOMAEE, M. (2015). Scale Effect on Runoff and Soil Loss Control Using Rice Straw Mulch Under Laboratory Conditions. *Solid Earth, 6: 1 – 8.*

- SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. & BRAGA, P. F. A. (2007). Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, RJ, 570p.
- SANTOS, L. M. (2015). Erosão em Taludes de Corte: Métodos de Proteção e Estabilização. Trabalho de Graduação, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 73p.
- SHI, Z. H., FANG, N. F., WU, F. Z., WANG, L., YUE, B. J. WU, G. L. (2012). Soil Erosion Processes and Sediment Sorting Associated with Transport Mechanisms on Steep Slopes. *Journal of Hydrology*, 454: 123 - 130.
- SILVA, J. C. & CARVALHO, R. J. T. (2002) Métodos de Determinação do Salpico e Influência da Cobertura do Solo em Condições de Chuva Natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 26: 473-481.
- SILVA, J. J., BEZERRA, S. A., RIBEIRO, P. R., BARROS, A. P. S. M., SILVA, E. L. & PEREIRA, R. A. (2015). Determinação das Médias dos Diâmetros das Gotas de um Simulador de Chuvas para Servir de Ferramenta para Pesquisas Científicas Relacionadas à Erosão Hídrica Utilizado o Método da Farinha de Trigo. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Natal, RN, 1: 1-3.
- SMETS, T., POESEN, J., BHATTACHARYYA, R., FULLEN, M. A., SUBEDI, M., BOOTH, C. A., KERTÉSZ, A., SZALAI, Z., TOTH, A., JANKAUSKAS, B., JANKAUSKIENE, G., GUERRA, A., BEZERRA, J.F.R., ZHENG YI, PANOMTARANICHAGUL, M., BÜHMANN, C. & PATERSON, D. G. (2011). Evaluation of Biological Geotextiles for Reducing Runoff and Soil Loss Under Various Environmental Conditions Using Laboratory and Field Plot Data. *Land Degradation & Development*, 22: 480–494.
- SOUSA JÚNIOR, S. F. (2011). Desenvolvimento e Avaliação de um Simulador de Chuva para Estudos Ambientais. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, UFG, Goiânia, GO, 195p.
- SOUSA JÚNIOR, S. F. & SIQUEIRA, E. Q. (2011). Development and Calibration of a Rainfall Simulator for Urban Hydrology Research. 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, RS, 11-16.
- SUGUIO, K. (2003). *Geologia Sedimentar*. Editora Blucher, São Paulo, SP, 416 p.
- THOMAZ, E. L. (2012). Runoff and Sediment Transport in a Degraded Area. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(1): 243-252.
- THOMAZ, E. L. & PEREIRA, A. A. (2013). Estrada Rural Não Pavimentada como Fonte de Escoamento Superficial e Sedimento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 14(1): 13-21.
- THOMAZ, E. L. & PEREIRA, A. A. (2014). Performance Assessment of a Microsprinkler. *Acta Scientiarum. Technology*, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 36(2): 315-321.

- TOUZE-FOLTZ, N. & ZANZINGER, H. (2016). Laboratory Tests for Evaluating the Performance of Geosynthetics for Surface Erosion Control. European Geosynthetics Conference, EuroGeo 6, IGS, Ljubljana, Slovenia, 10p.
- VAN GENUCHTEN, M. T_H. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Saturated Soils. *Soil Science of America Journal*, 44: 892-898.
- VIANA, L. L. (2010). Individualização de Orto e Paragnaisses que Ocorrem no Sítio de Obras da UHE Simplício – Queda Única, Rio de Janeiro, RJ. Trabalho de Graduação, Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 34p.
- WAGNER, C. S. & MASSAMBANI, O. (1988). Análise da Relação Intensidade de Chuva - Energia Cinética de Wischmeier & Smith e sua Aplicabilidade à Região de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 12(3): 197-203.
- WANG, L. & SHI, Z. H. (2015) Size Selectivity of Eroded Sediment Associated with Soil Texture on Steep Slopes. *Soil & Water Management & Conservation. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 79: 917–929.
- ZHANG, C., LI, D., JIANG, J., ZHOU, X., NIU, X., WEI, Y., MA, J. (2019). Evaluating the Potential Slope Plants Using New Method for Soil Reinforcement Program. *Elsevier Science B. V. Catena*, 180: 346-354.

ANEXOS

ANEXO 1

CÁLCULO DA ESTABILIDADE DO TALUDE

O Método de Equilíbrio Limite compara a resistência ao cisalhamento do solo com as solicitações atuantes. Para essa análise utiliza-se a geometria do talude e seus parâmetros de resistência. A condição analisada foi uma ruptura planar para o caso de Talude Infinito, em que a superfície de ruptura é paralela ao talude, conforme mostra a Figura A1.1.

Das (2011) apresenta duas opções para o cálculo do fator de segurança, uma para o caso sem percolação de água no talude (Equação A1.1) e outra com percolação de água (Equação A1.2).

$$F_s = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (\text{A1.1})$$

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (\text{A1.2})$$

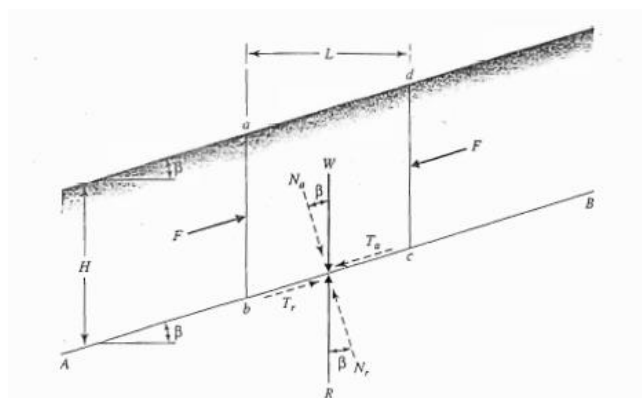


Figura A1 1 - Análise de um talude infinito sem percolação de água (Das, 2011)

A caixa acrílica foi preenchida com solo compactado em duas camadas de 0,075 m, sendo executadas ranhuras entre elas para melhorar a interação. Com os parâmetros para a situação analisada, calcularam-se os fatores de segurança contra a ruptura do solo considerando as alturas das camadas de 0,075 m e de 0,15 m. Para as duas alturas calculou-se a estabilidade do talude para as opções de inclinação da caixa de 25° e 30°.

ANEXO 2

ROTEIRO PARA ENSAIO DE EROSÃO COM A CAIXA ACRÍLICA:

REFERÊNCIA DO ENSAIO EXECUTADO	DATA
	ENSAIO 1
SOLO DESCOBERTO – ENSAIO CONTROLE	
SOLO + GEOSSINTÉTICO (Amostra 1)	
SOLO + GEOSSINTÉTICO (Amostra 2)	
SOLO + GEOSSINTÉTICO (Amostra 3)	
SOLO + GEOSSINTÉTICO (Amostra 4)	
SOLO + GEOSSINTÉTICO (Amostra 5)	
SOLO + VEGETAÇÃO ARTIFICIAL	

INFORMAÇÕES PARA O ENSAIO	UNIDADE	VALORES
TEMPERATURA AMBIENTE DURANTE O ENSAIO		
DENSIDADE DO SOLO IN SITU		
TEOR DE UMIDADE ÓTIMA IN SITU		
TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICA IN SITU		
TEOR DE UMIDADE DO SOLO NA CAIXA		
DENSIDADE DO SOLO NA CAIXA		
MASSA DO SOLO NA CAIXA ACRÍLICA		
INCLINAÇÃO DO EQUIPAMENTO		
INTENSIDADE DA CHUVA		
COMPACTAÇÃO (90 ± 3% da densidade seca, umidade ótima ± 2%)		

GEOSSINTÉTICOS UTILIZADOS NO ENSAIO	DADOS
NOME DO FABRICANTE	
NOME DO PRODUTO	
TAMANHO DA AMOSTRA	
DESCRIÇÃO DO PRODUTO	
ESPECIFICAÇÃO DO PRODUTO:	
ESPESSURA	
MASSA POR UNIDADE DE SUPERFÍCIE	
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	
PENETRAÇÃO DE LUZ	

INSTALAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS	DADOS
ORIENTAÇÃO	
COLOCAÇÃO	
PADRÃO DE INSTALAÇÃO	

DADOS DA VEGETAÇÃO UTILIZADA NO ENSAIO	DADOS
TIPOS DE SEMENTES	
FONTE DE SEMENTES	
METODOLOGIA DE PREPARAÇÃO	
PROGRAMA DE REGA	
FERTILIZANTES E ADITIVOS	
VARIÁVEIS CLIMÁTICAS	
PERÍODO DE MATURAÇÃO	
DENSIDADE E MATURIDADE NO MOMENTO DO ENSAIO	
DATA DE PLANTIO	
CONDIÇÃO DA VEGETAÇÃO ANTES DO ENSAIO	

OPERAÇÃO E COLETA DE DADOS	DADOS
LOCAL DO ENSAIO	
DATA	
HORA	
NOME DO OPERADOR	
PRESSÃO DE OPERAÇÃO	
ASPERSOR ATIVADO	
TEMPO DE ENSAIO	
TEMPO DE INÍCIO DA CHUVA	
INÍCIO DE ESCOAMENTO DA PARCELA	
TEMPO QUE PAROU O ESCOAMENTO	
TEMPO DE LEITURAS DE VOLUME	5 MINUTOS

COLETA DE SEDIMENTOS			
TEMPO DE COLETA (MIN)	QUANTIDADES (KG)		
	ÁGUA + SOLO	ÁGUA	SOLO
5			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
55			
60			
VALORES TOTAIS (Σ)			

CONDIÇÕES APÓS O ENSAIO	
PRODUTO	INFORMAÇÕES
GEOSINTÉTICO	
VEGETAÇÃO ARTIFICIAL	
GRAMÍNEAS	
SOLO	
FOTOGRAFIAS	

PLANILHA DE ENSAIO

ENSAIO DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

ENSAIO:				NÚMERO:		
DATA:			HORA:		DENSIDADE:	
SOLO NU ()		SOLO COM GEOSSINTÉTICO ()		1() 2() 3()		
COLETA DE SEDIMENTOS						
ORDEM DAS COLETAS	TEMPO DE COLETA (MIN)	QUANTIDADES (KG)				
		BALDE		ÁGUA + SOLO + BALDE	ÁGUA + SOLO	SOLO
		NÚMERO	PESO (g)			
1	5					
2	10					
3	15					
4	20					
5	25					
6	30					
7	35					
8	40					
9	45					
10	50					
11	55					
12	60					

PESOS DA CAIXA ACRÍLICA 30X30		
Caixa acrílica (Kg)	Caixa acrílica + Solo (Kg)	
	antes ensaio	após ensaio

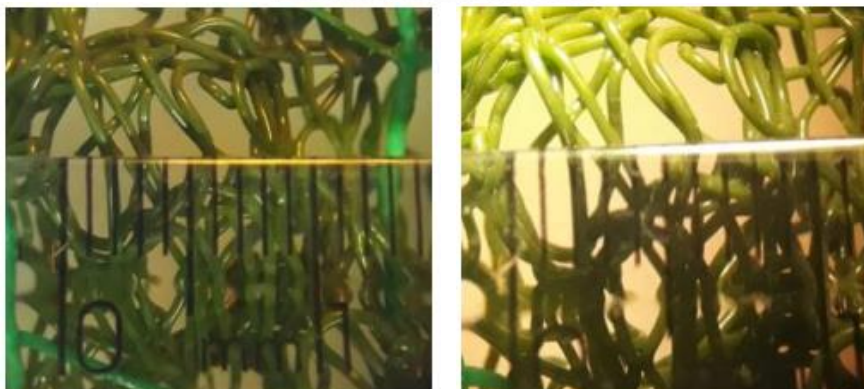
UMIDADE APÓS O ENSAIO					
	TOPO DA CAIXA		BASE DA CAIXA		
	esquerdo	direito		esquerdo	direito
cápsula Nº			cápsula Nº		
cápsula			cápsula		
cápsula + solo úmido			cápsula + solo úmido		
cápsula + solo seco			cápsula + solo seco		

NÚMERO BANDEJAS	TEMPO DE COLETA (MIN)	BANDEJA (g)	BANDEJA + SOLO SECO (g)	SOLO SECO (g)
1	5			
2	10			
3	15			
4	20			
5	25			
6	30			
7	35			
8	40			
9	45			
10	50			
11	55			
12	60			

ANEXO 3

Propriedades físicas e imagem da Geomanta 1:

Imagem da Geomanta 4 obtida em um Microscópio Binocular da marca Bel Photonics, utilizando lentes de aumento de até 25 vezes.



Valores de Massa por unidade de área e Espessura para a Geomanta 1:

Corpo de Prova	MUA (g/m ²)	Espessura (mm)
1	549	13,60
2	595	13,15
3	583	12,30
4	609	12,90
5	528	11,71
6	558	13,00
7	579	10,95
8	554	11,85
9	512	12,80
10	562	12,25
Média	563	12,45
C.V. (%)	5,3	6,4
D.P.	29,7	0,8

Valores de Transmissividade para a Geomanta 1:

Corpo de Prova	Transmissividade (m ² /s)
1	4,98E-03
2	5,55E-03
3	5,99E-03
Média	5,51E-03
C.V. (%)	9,17
D.P.	5,05E-04

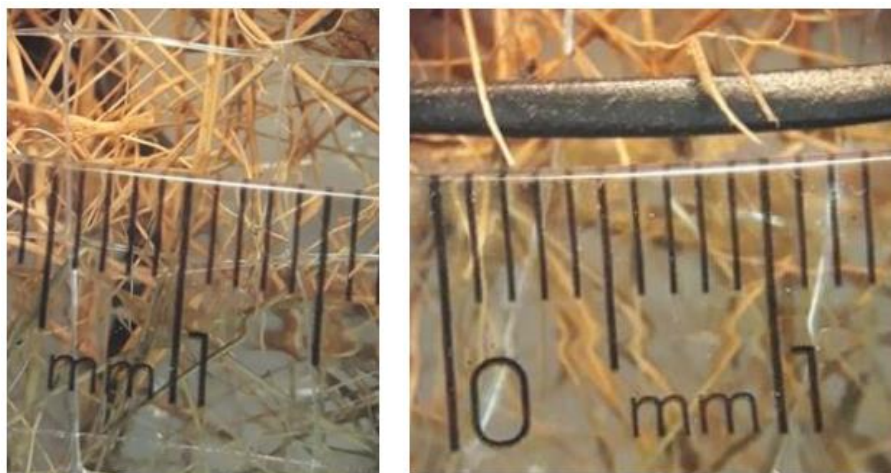
Valores de Permissividade e Permeabilidade para a Geomanta 1:

Corpo de Prova	Permissividade (s ⁻¹)	Permeabilidade (cm/s)
1	7,85	9,77
2	7,42	9,23
3	7,85	9,77
4	8,23	10,24
Média	7,84	9,75
C.V. (%)	4,23	4,23
D.P.	0,33	0,41

Propriedades físicas e imagem da Geomanta 2:

Imagem da Geomanta 4 obtida em um Microscópio Binocular da marca Bel Photonics, utilizando lentes de aumento de até 25 vezes.





Valores de Massa por unidade de área e Espessura para a Geomanta 2:

Corpo de Prova	MPA (g/m²)	Espessura (mm)
1	360	4,75
2	365	5,18
3	245	5,06
4	439	10,29
5	455	6,86
6	531	5,96
7	610	5,26
8	388	3,93
9	413	5,72
10	315	4,66
Média	412	5,77
C.V. (%)	25,42	30,82
D.P.	104,74	1,78

Valores de Transmissividade para a Geomanta 2:

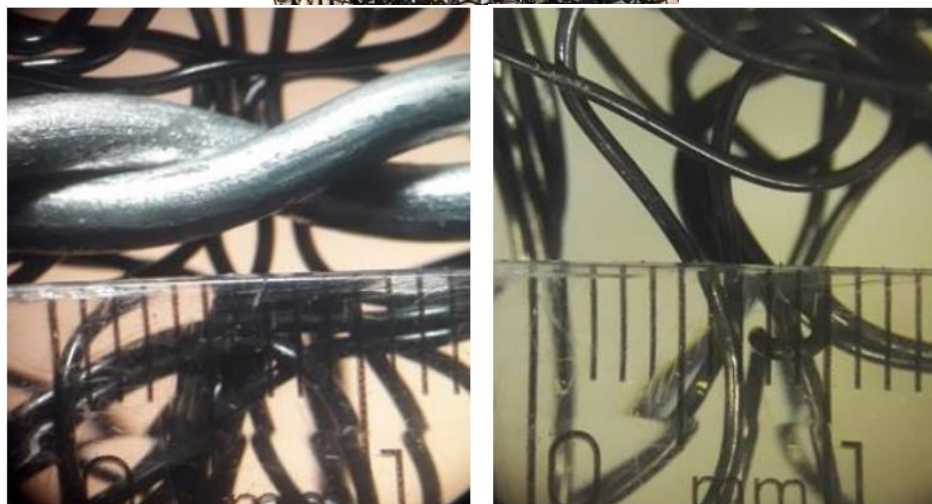
Corpo de Prova	Transmissividade (m²/s)
1	1,63E-03
2	1,45E-03
3	1,55E-03
Média	1,54E-03
C.V. (%)	5,97
D.P.	9,21E-05

Valores de Permissividade e Permeabilidade para a Geomanta 2:

Corpo de Prova	Permissividade (s^{-1})	Permeabilidade (cm/s)
1	6,19	4,34
2	6,98	4,89
3	6,98	4,89
4	7,27	5,09
Média	6,85	4,80
C.V. (%)	6,71	6,71
D.P.	0,46	0,32

Propriedades físicas e imagem da Geomanta 3:

Imagem da Geomanta 4 obtida em um Microscópio Binocular da marca Bel Photonics, utilizando lentes de aumento de até 25 vezes.



Valores de Massa por unidade de área e Espessura para a Geomanta 3:

Corpo de Prova	MUA (g/m ²)	Espessura (mm)
1	1568	10,54
2	1492	9,58
3	1461	10,24
4	1567	10,91
5	1513	10,09
6	1564	10,48
7	1477	11,16
8	1598	10,53
9	1553	9,27
10	1655	10,47
Média	1545	10,33
C.V. (%)	3,85	5,50
D.P.	59,50	0,57

Valores de Transmissividade para a Geomanta 3:

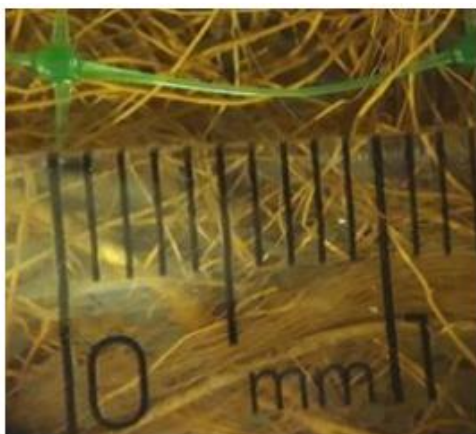
Corpo de Prova	Transmissividade (m ² /s)
1	1,09E-02
2	9,58E-03
3	8,17E-03
Média	9,56E-03
C.V. (%)	14,3
D.P.	1,38E-03

Valores de Permissividade e Permeabilidade para a Geomanta 3:

Corpo de Prova	Permissividade (s ⁻¹)	Permeabilidade (cm/s)
1	7,77	8,03
2	7,58	7,83
3	7,92	8,18
4	7,58	7,83
Média	7,71	7,97
C.V. (%)	2,14	2,14
D.P.	0,16	0,17

Propriedades físicas e imagem da Geomanta 4:

Imagem da Geomanta 4 obtida em um Microscópio Binocular da marca Bel Photonics, utilizando lentes de aumento de até 25 vezes.



Valores de Massa por unidade de área e Espessura para a Geomanta 4:

Corpo de Prova	MUA (g/m ²)	Espessura (mm)
1	271	3,63
2	176	4,25
3	198	2,88
4	248	2,38
5	142	2,65
6	181	2,85
7	138	4,06
8	228	3,13
9	161	2,75
10	273	3,63
Média	202	3,22
C.V. (%)	25,1	19,7
D.P.	50,7	0,6

Valores de Transmissividade para a Geomanta 4:

Corpo de Prova	Transmissividade (m²/s)
1	1,22E-03
2	1,46E-03
3	1,33E-03
Média	1,34E-03
C.V. (%)	8,98
D.P.	1,20E-04

Valores de Permissividade e Permeabilidade para a Geomanta 4:

Corpo de Prova	Permissividade (s⁻¹)	Permeabilidade (cm/s)
1	6,56	2,11
2	5,89	1,89
3	6,63	2,13
4	6,89	2,21
Média	6,49	2,09
C.V. (%)	6,52	6,52
D.P.	0,42	0,13

Propriedades físicas e imagem da Geomanta 5:

Imagem da Geomanta 4 obtida em um Microscópio Binocular da marca Bel Photonics, utilizando lentes de aumento de até 25 vezes.





Valores de Massa por unidade de área e Espessura para a Geomanta 5:

Corpo de Prova	MPA (g/m ²)	Espessura (mm)
1	429	7,00
2	352	7,08
3	350	7,10
4	461	7,00
5	466	5,57
6	364	6,58
7	537	8,70
8	412	5,81
9	503	7,73
10	325	7,50
Média	420	7,01
C.V. (%)	17,06	12,88
D.P.	71,65	0,90

Valores de Transmissividade para a Geomanta 5:

Corpo de Prova	Transmissividade (m ² /s)
1	8,91E-04
2	9,53E-04
3	8,53E-04
Média	8,99E-04
C.V. (%)	5,62
D.P.	5,05E-05

Valores de Permissividade e Permeabilidade para a Geomanta 5:

Não foi possível realizar o ensaio, porque a amostra se desfazia quando do preparo dos corpos de prova, impossibilitando a execução do mesmo.

ANEXO 4

RESULTADOS DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

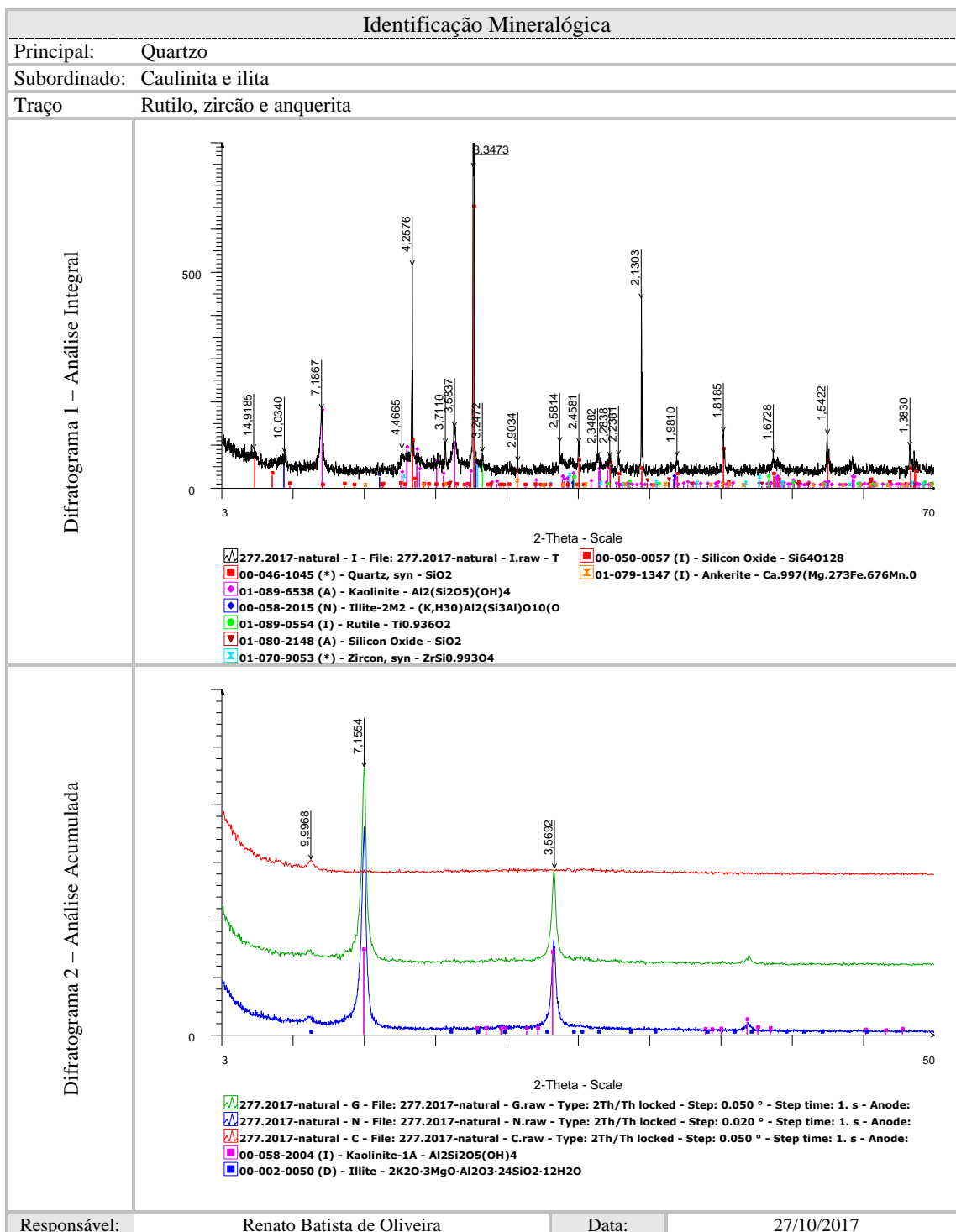


Figura A4 1 - Difratograma da amostra natural, análise integral e acumulada

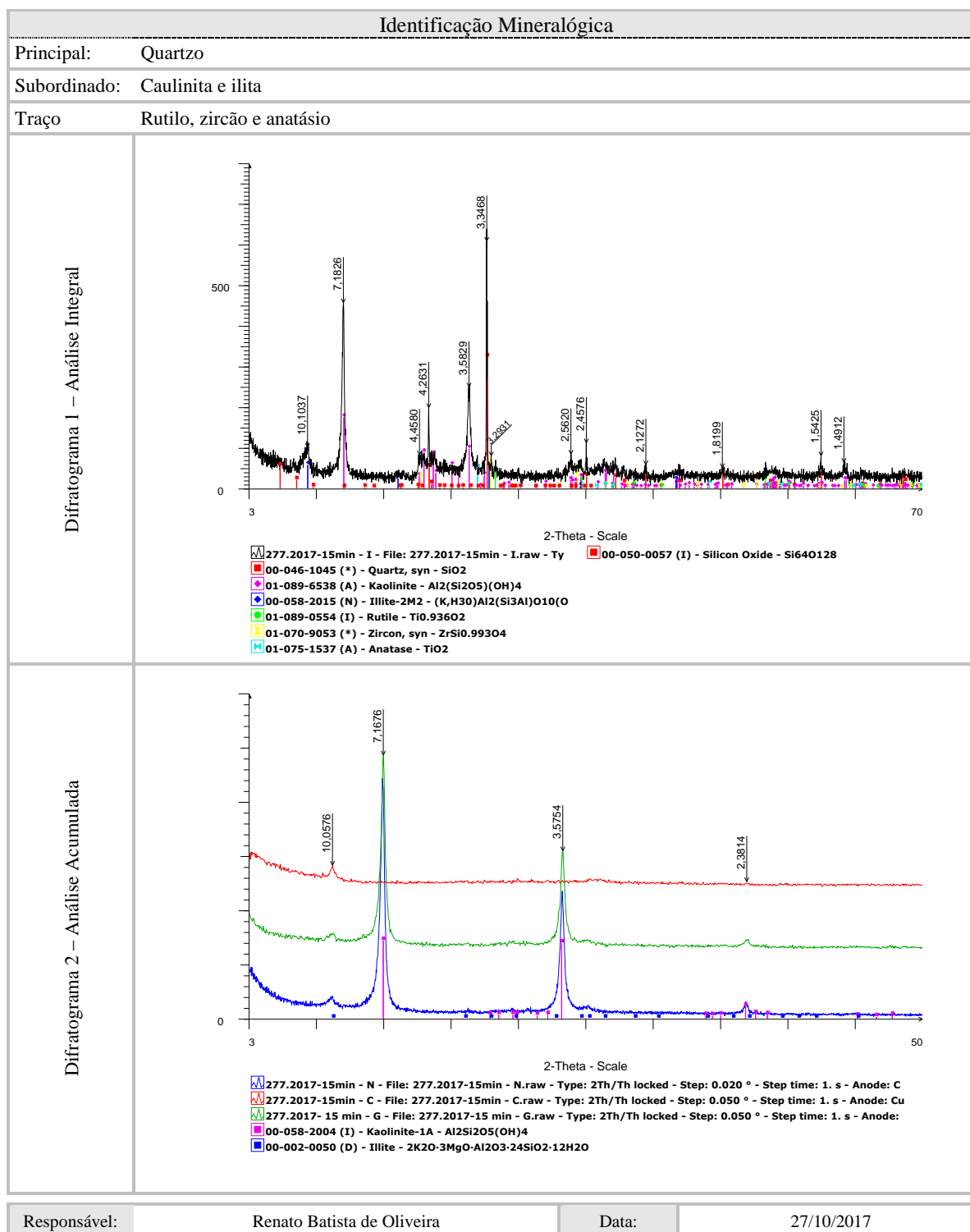


Figura A4 2 - Difratograma da amostra 15 minutos de chuva, análise integral e acumulada

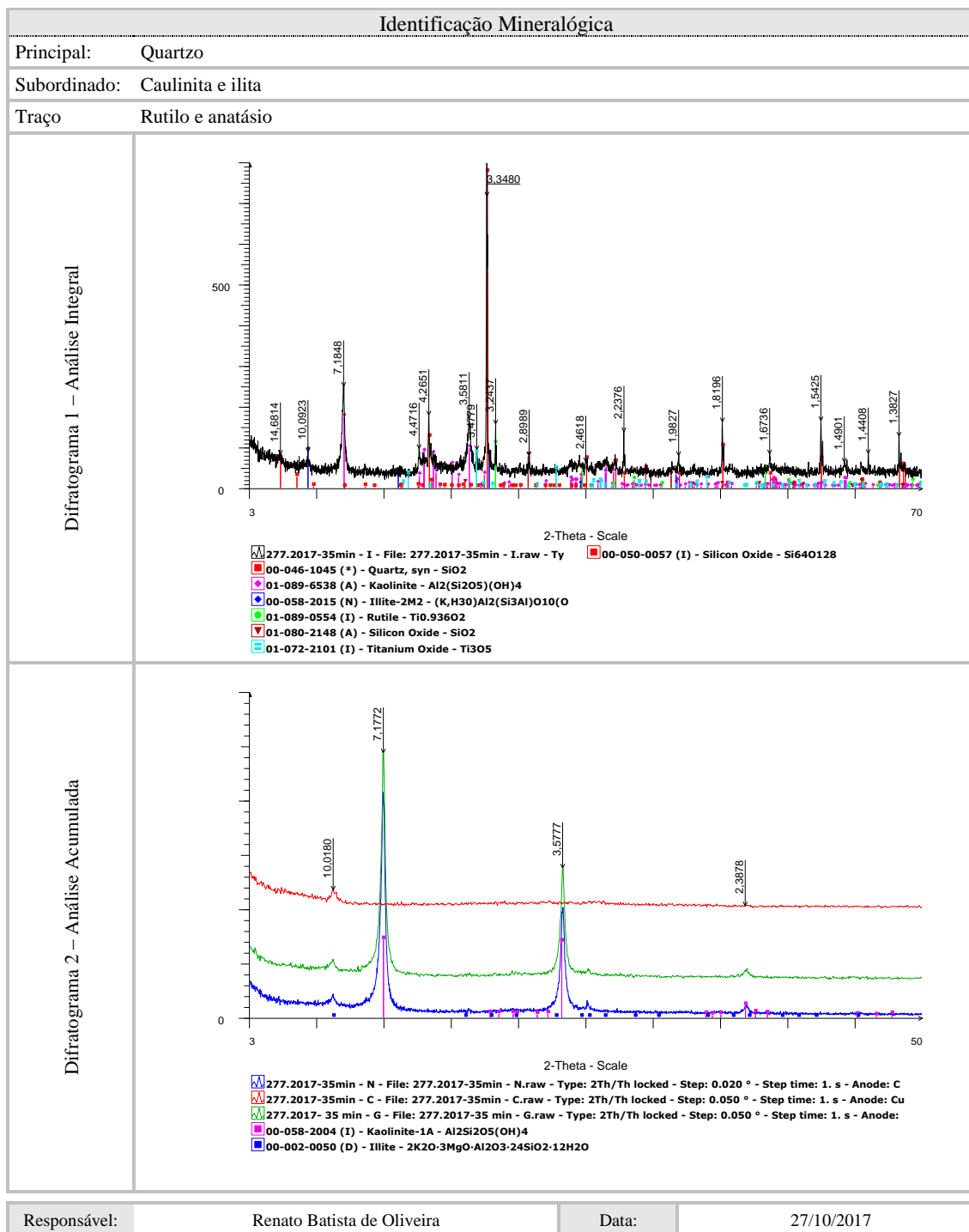


Figura A4 3 - Difratograma da amostra 35 minutos de chuva, análise integral e acumulada

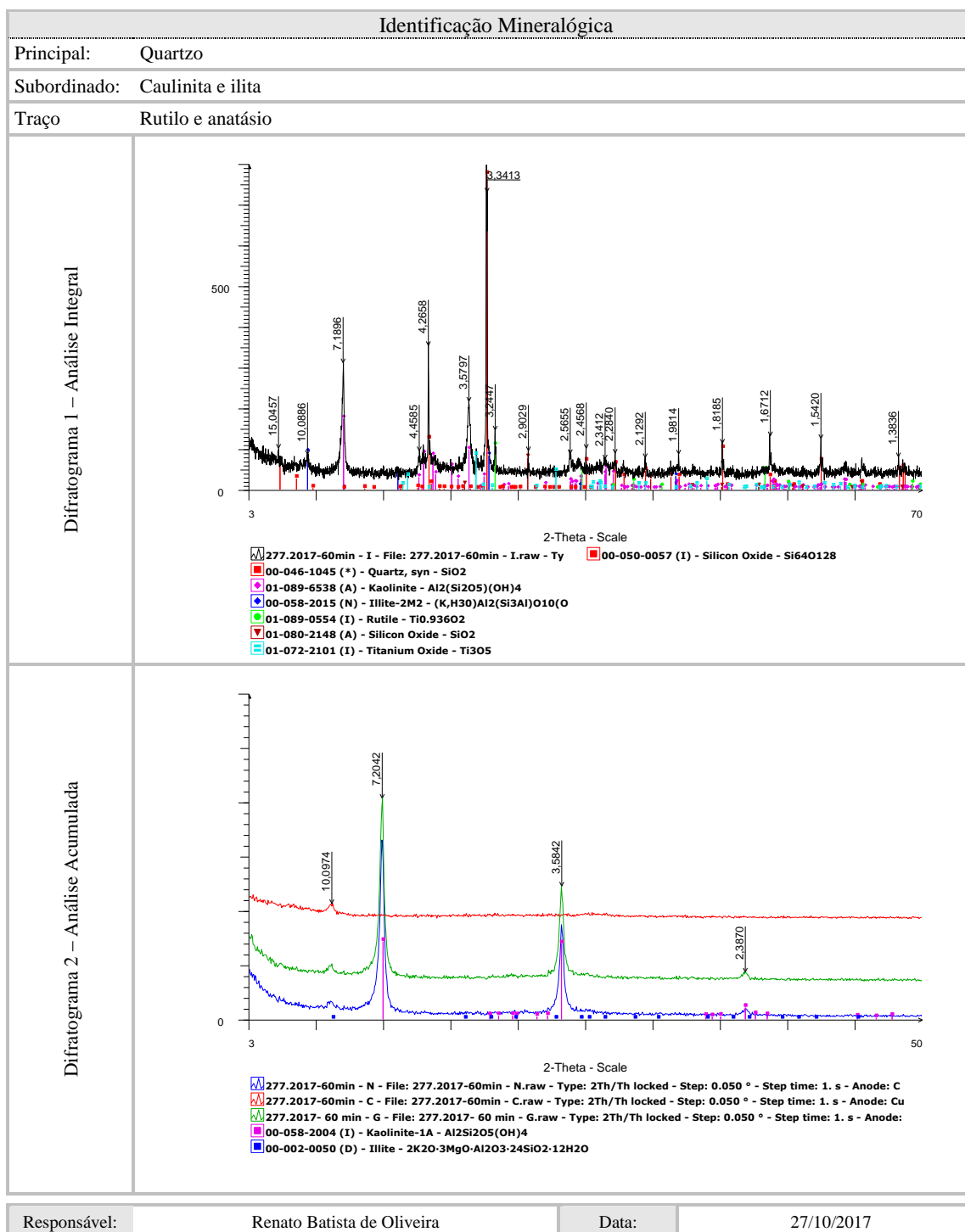


Figura A4 4 - Difratograma da amostra 60 minutos de chuva, análise integral e acumulada