



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Flávia Silva dos Santos

Estudo do comportamento de geocompostos drenantes

Rio de Janeiro
2017

Flávia Silva dos Santos

Estudo do comportamento de geocompostos drenantes



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Rio de Janeiro

2017

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237 Santos, Flávia Silva dos.
Estudo do comportamento de geocompostos drenantes / Flávia
Silva dos Santos. – 2017.
135f.

Orientador: Ana Cristina Castro Fontenla Sieira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Geotecnia - Dissertações. 3.
Geossintéticos - Dissertações. 4. Solo - Drenagem - Dissertações.
5. Modelagem numérica - Dissertações. I. Sieira, Ana Cristina
Castro Fontenla. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III.
Título.

CDU 624.131.2

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Flávia Silva dos Santos

Comportamento de geocompostos drenantes

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 10 de março de 2017.

Banca Examinadora:



Prof.^a. Ana Cristina Castro Fontenla Steira – Presidente / Orientadora
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Paulo César de Almeida Maia
Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF



Prof. Armando Prestes de Menezes Filho
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro

2017

DEDICATÓRIA

A Deus, por conduzir com benevolência minha caminhada até aqui. A minha família, pelo amor, cuidado e carinho dedicados a mim.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Ana Cristina Castro Fontenla Sieira pela pessoa especial, dedicada e amiga que sempre demonstrou ser.

Aos amigos que fiz durante o mestrado, pelo apoio, incentivo e companheirismo.

Aos professores, pelas muitas lições, estímulos e apoio durante minha graduação e mestrado.

À UERJ, local que passou a ser minha segunda casa por um bom tempo e que aprendi a admirar e amar.

A todos que me apoiaram de alguma forma.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Assim, permanecem agora estes três: a fé, a esperança e o amor.

O maior deles, porém, é o amor.

1 Coríntios 13:13

RESUMO

SANTOS, Flávia S. *Estudo do comportamento de geocompostos drenantes*. 2017. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Muitas vezes considerada atrasada tecnologicamente quando comparada a outros setores, a construção civil tem buscado incorporar novas tecnologias às suas atividades tradicionais e na engenharia geotécnica podemos destacar o uso crescente dos materiais geossintéticos como evidência. Nesta área merecem destaque as aplicações dos geossintéticos nas funções de drenagem. Reconhecidamente a fonte de grandes problemas na construção civil, a drenagem exige atenção especial do projetista. O uso de geocompostos drenantes com a finalidade de captação e condução da água presente no solo tem se tornado cada vez mais frequente. Conhecer e compreender o comportamento deste tipo de material pode representar um dimensionamento mais preciso e conseqüentemente uma maior segurança na aplicação e redução de custos para implementação dessas soluções. Este trabalho buscou estudar o desempenho de um geocomposto drenante através de ensaios de laboratório para obtenção das características físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do geossintético além da realização de modelagem numérica utilizando os parâmetros obtidos nos ensaios. Através da correlação entre os ensaios de compressão, transmissividade e fluência foi possível fazer a previsão da redução na capacidade de vazão do material em longo prazo, estabelecendo fatores de redução quanto a fluência específicos para este tipo de material. Também foram realizadas análises numéricas dos ensaios de compressão simples e transmissividade com o objetivo de calibrar o modelo. Na modelagem do ensaio de compressão simples observou-se que para tensões inferiores a 200 kPa, o modelo numérico se aproximou satisfatoriamente dos resultados do ensaio. Na modelagem do ensaio de transmissividade constatou-se que os valores de vazão previstos numericamente encontram maior compatibilidade para tensões menores. Após essa fase, foram realizadas análises numéricas de uma situação de campo e os resultados obtidos foram comparados com os valores resultantes dos ensaios de caracterização do geocomposto drenante. A deformação sofrida pelo material na análise numérica mostrou-se compatível com os ensaios de compressão realizados, para a reprodução da capacidade de vazão do material foi necessária a atualização da permeabilidade do material, desta forma, uma segunda análise foi realizada e os resultados considerados satisfatórios.

Palavras-chave: Geocompostos drenantes; Geossintéticos; Drenagem; Modelagem numérica; Fluência; Transmissividade.

ABSTRACT

SANTOS, Flávia S. *Study of the drainage geocomposites behaviour*. 2017. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Often considered technologically delayed compared to other sectors, civil construction seeks to incorporate new technologies in traditional activities. In geotechnical engineering, we can highlight the use of geosynthetic materials as evidence. In this area, the applications of geosynthetics in the drainage functions deserve special attention. Often the reason for problems in construction, drainage requires special attention of the designer. The use of drainage geocomposites for the purpose of capturing and conducting water present in the soil has become increasingly frequent. Knowing and understanding the behavior of this type of material can represent a more precise dimensioning and consequently greater security in the application and reduction of costs for the implementation of these solutions. This research aimed to study the performance of a drainage geocomposite through laboratory tests to determine the physical, mechanical, hydraulic and durability characteristics of the geosynthetics in addition to the numerical modeling using the parameters obtained in the tests. Through the correlation between the compression, transmissivity and creep tests, it was possible to predict the reduction in the flow capacity of the material in the long term, establishing specific creep reduction factors for this type of material. In order to calibrate the model, numerical analyzes of the compression and transmissivity tests were performed. In the modeling of the compression test it was observed that the numerical model approached the results of the test. In the modeling of the transmissivity test it was found that the numerically predicted flow values find greater compatibility for lower stress. After this step, numerical analyzes of a field situation were performed and the results obtained were compared with the values resulting from the characterization tests of the draining geocomposite. The strain of the material in the numerical analysis proved to be compatible with the compression tests performed, in order to reproduce the material flow capacity, it was necessary to update the material permeability, in this way, a second analysis was performed and the results considered satisfactory.

Keywords: Drainage geocomposites; Geosynthetics; Drainage; Numerical modeling; Creep; Transmissivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo Hidrológico como um sistema.	25
Figura 2 - (a) Experimento de Reynolds e (b) Regimes de escoamento.	28
Figura 3 - Perda de carga entre dois pontos no solo.	30
Figura 4 - Fluxo através de um elemento de solo homogêneo.	32
Figura 5 - Partícula de fluido (trajetória).	37
Figura 6 - Fluxo de água para percolação em torno de cortina de estacas-prancha em um solo isotrópico e homogêneo.	38
Figura 7 - Utilização de geocomposto drenante.	43
Figura 8 - Exemplos de utilização.	44
Figura 9 - Permissividade e da transmissividade de geossintéticos.	47
Figura 10 - Comportamento típico de fluência à tração.	49
Figura 11 - Comparação entre ensaios não-confinados e confinados.	51
Figura 12 - Sistemas drenantes verticais.	52
Figura 13 - Amostra geocomposto drenante MacDrain 2L.	56
Figura 14 - Corte dos corpos de prova.	59
Figura 15 - Equipamento para ensaio de espessura nominal.	59
Figura 16 - Ensaio de espessura nominal.	60
Figura 17 - Balança para ensaio de gramatura.	61
Figura 18 - Equipamento para ensaio de tração faixa larga.	62
Figura 19 - Esquema do comportamento do geocomposto - ensaio de tração.	63
Figura 20 - Execução do ensaio de tração faixa larga.	64
Figura 21 - Esquema do comportamento do geocomposto - compressão.	65
Figura 22 - Curva típica tensão-deformação - compressão a curto prazo.	66
Figura 23 - Equipamento para ensaio de puncionamento.	68
Figura 24 - Esquema ilustrativo do ensaio de puncionamento CBR.	68
Figura 25 - Execução do ensaio de puncionamento.	69
Figura 26 - Equipamento para ensaio de permissividade.	70
Figura 27 - Ensaio de permissividade - alocação do corpo de prova.	71
Figura 28 - Equipamento para ensaio de transmissividade.	73
Figura 29 - Verificação de temperatura da água.	74
Figura 30 - Esquema para ensaio de transmissividade.	74

Figura 31 - Realização do ensaio de transmissividade.	75
Figura 32 - Equipamento para ensaio de fluência à compressão.	77
Figura 33 - Ensaio de fluência à compressão em georrede.	78
Figura 34 - Obtenção da curva de fluência acelerada pelo método SIM.	79
Figura 35 - Ensaio de fluência SIM à compressão.	80
Figura 36 - Resultados dos ensaios - resistência à compressão de curto prazo.	85
Figura 37 - Determinação da tensão de ruptura no ensaio de compressão.	86
Figura 38 - Resultados dos ensaios de compressão a curto prazo.	87
Figura 39 - Espessura residual média entre as cinco amostras.	88
Figura 40 - Resultados dos ensaios de puncionamento.	89
Figura 41 - Resultados dos ensaios de transmissividade.	91
Figura 42 - Vazão em diferentes condições de apoio.	92
Figura 43 - Resultados dos ensaios de fluência à compressão.	94
Figura 44 - Resultados dos ensaios de fluência à compressão.	94
Figura 45 - Curvas do ensaio de fluência em compressão.	95
Figura 46 - Fluência em compressão para 1 camada do geocomposto.	95
Figura 47 - Esquema para correlação entre os ensaios de transmissividade e fluência à compressão - Parte 1.	96
Figura 48 - Esquema para correlação entre os ensaios de transmissividade e fluência à compressão - Parte 2.	97
Figura 49 - Redução da capacidade de vazão ao longo do tempo devido à fluência – Tensão de 50 kPa.	98
Figura 50 - Fatores de redução da capacidade de vazão devido à fluência.	100
Figura 51 - Modelo elástico perfeitamente plástico.	103
Figura 52 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.	104
Figura 53 - Geometria e condições de contorno - Modelagem do ensaio de compressão simples.	106
Figura 54 - Malha de elementos finitos - Modelagem do ensaio de compressão simples	107
Figura 55 - Etapas de cálculo - modelagem numérica do ensaio de compressão.	107
Figura 56 - Última fase de aplicação de carga: Compressão = 8,29 mm.	108
Figura 57 - Comparação entre resultados numéricos e experimentais.	109
Figura 58 - Última fase de aplicação de carga: Compressão = 8,20 mm.	109

Figura 59 - Ensaio de compressão simples: Comparação entre resultados numéricos e experimentais.	110
Figura 60 - Geometria e condições de contorno: Ensaio de transmissividade.	111
Figura 61 - Relação entre a permeabilidade e a tensão.	112
Figura 62 - Malha - Modelagem do ensaio de transmissividade.	113
Figura 63 - Fases de cálculo: Ensaio de transmissividade.	113
Figura 64 - Comparação entre ensaios de transmissividade e modelagem.	114
Figura 65 - Caso de estudo.	116
Figura 66 - Geometria e condições de contorno .	117
Figura 67 - Capacidade de vazão do aterro.	117
Figura 68 - Vazão ao longo da camada de aterro.	117
Figura 69 - Geometria e condições de contorno.	118
Figura 70 - Malha de elementos finitos: situação de campo.	120
Figura 71 -Tensão horizontal efetiva - Modelagem da situação de campo.	121
Figura 72 - Tensões horizontais efetivas medidas na face do muro – Situação de campo.	121
Figura 73 - Poropressões previstas numericamente.	122
Figura 74 - Deformações horizontais resultantes da modelagem numérica da situação de campo.	122
Figura 75 - Resultado da modelagem numérica.	123
Figura 76 - Gráfico comparativo entre as deformações previstas numericamente e as medidas experimentalmente.	124
Figura 77 - Vazão no dreno em cada etapa de cálculo: Situação de campo.	125
Figura 78 - Vazão no dreno em cada etapa de cálculo – Valores de permeabilidade ajustados.	126
Figura 79 - Comparação entre as vazões previstas na modelagem da situação de campo e obtidas experimentalmente.	127
Figura 80 - Relação entre vazão e altura da camada de solo.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geossintéticos e suas funções.	40
Tabela 2 - Fatores de Redução.	54
Tabela 3 - Informações sobre capacidade de vazão do produto .	57
Tabela 4 - Informações sobre as propriedades mecânicas do produto.	57
Tabela 5 - Informações sobre as propriedades hidráulicas do produto.	57
Tabela 6 - Características físicas do produto.	57
Tabela 7 - Programa de ensaios.	58
Tabela 8 - Valores de viscosidade da água .	72
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de espessura nominal.	82
Tabela 10 - Resultado do ensaio de gramatura.	83
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de tração de faixa larga - direção longitudinal.	84
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de tração faixa larga - direção transversal.	84
Tabela 13 - Resultado dos ensaios de compressão a curto prazo.	86
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de puncionamento.	88
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de permeabilidade normal – Camada única de geotêxtil.	90
Tabela 16 - Resultados dos ensaios de permeabilidade normal – Camada dupla de geotêxtil.	90
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de transmissividade.	91
Tabela 18 - Resultado do ensaio de fluência à compressão.	93
Tabela 19 - Vazão residual devido à fluência.	99
Tabela 20 - Fatores de redução da capacidade de vazão devido à fluência para um período de 100 anos.	99
Tabela 21 - Parâmetros do geocomposto drenante: modelo linear elástico.	106
Tabela 22 - Resultado da modelagem do ensaio de compressão.	108
Tabela 23 - Resultado da modelagem do ensaio de compressão.	110
Tabela 24 - Parâmetros do geocomposto: ensaio de transmissividade.	112
Tabela 25 - Vazões previstas numericamente: Modelagem dos ensaios de transmissividade.	114
Tabela 26 - Parâmetros do Solo do Aterro.	116

Tabela 27 - Parâmetros do Materiais.	119
Tabela 28 - Comparação entre as deformações previstas numericamente e as medidas experimentalmente.	123
Tabela 29 - Valores de permeabilidade definidos em função da deformação.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials,
CRE	Constante Ratio of Extension
EUA	Estados Unidos da America
FEN	Faculdade de Engenharia
ISO	International Organization for Standardization,
MEF	Metodo dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PGECIV	Programa de Pos-Graduacao em Engenharia Civil
PLAXIS	Finite Element Code for Soil and Rock Analyses
RJ	Rio de Janeiro
SIM	Stepped Isothermal Method
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
h	Altura da estrutura
α	Ângulo da superfície
ϕ	Ângulo de resistência ao cisalhamento
A	Área do corpo de prova
q_{adm}	Capacidade de vazão admissível do geossintético
q_{adm}	Capacidade de vazão planar admissível do geossintético
$q_{p,i}$	Capacidade de vazão planar do geossintético
P	Carga aplicada
α	Carga aplicada
Z	Carga de elevação
h_1	Carga final
h_0	Carga inicial
N	Carga normal
k_p	Coefficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil
k_n	Coefficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil
ν	Coefficiente de Poisson
cv	Coefficiente de variação
k	Condutividade hidráulica ou permeabilidade
ε	Deformação
D	Diâmetro do tubo
t	Espessura do geossintético
t_{GT}	Espessura do geossintético
t_{GT}	espessura do geotêxtil
R_t	Fator de correção da temperatura
FR_{cb}	Fator de redução devido à colmatação biológica do núcleo drenante.
FR_{cpq}	Fator de redução devido à colmatação química do núcleo drenante
FR_{fl}	Fator de redução devido à deformação por fluência do núcleo drenante ou do geotêxtil filtrante

FR_{in}	Fator de redução devido a intrusão do geotêxtil filtrante no núcleo drenante
FS	Fator de segurança, que leva em consideração as imperfeições de cálculo.
F	Força de tração aplicada
i	Gradiente hidráulico
μ_A	Gramatura
S	Grau de saturação
e	Índice de vazios
B	Largura do corpo de prova
W	Largura ensaiada do corpo de prova
μ_i	Massa do i-ésimo corpo de prova
ρ_w	Massa específica da água
ρ_f	Massa específica da fibra ou do filamento
μ_{Ai}	Massa por unidade de área
E	Módulo de elasticidade
N_f	Número canais de fluxo
n	Número de corpos de prova
N_q	Número de perdas de carga unitária
Re	Número de Reynolds
γ_f	Peso específica da fibra
γ	Peso específico
γ_w	Peso específico da água
u	Poropressão
n_{GT}	Porosidade
$N_{máx i}$	Resistência à compressão do i-ésimo corpo de prova
$\alpha_{máx i}$	Resistência à tração do i-ésimo corpo de prova
$\overline{Fp}_{máx}$	Resistência ao puncionamento a amostra
$Fp_{máx}$	Resistência ao puncionamento do i-ésimo ensaio
T_m	Temperatura de fusão cristalina
T_g	Temperatura de fusão vítrea
σ	Tensão
σ_h	Tensão horizontal

σ_v	Tensão vertical
ΔL	Varição do comprimento em relação ao espaçamento-base
ΔL	Varição do comprimento em relação espessura inicial
q_{calc}	Vazão total
q_{calc}	Vazão unitária calculada pelo método teórico
q_d	Vazão unitária de contribuição de projeto
v	Velocidade
v_c	Velocidade do fluxo
μ	Viscosidade
u_{20c}	Viscosidade da água a 20 ° C
u_t	Viscosidade da água à temperatura de teste
V_w	Volume de água
V_s	Volume de sólidos
V_v	Volume de vazios
V_T	Volume total do geossintético

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	22
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
1. REFERENCIAL TEÓRICO	25
1.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE FLUXO EM SOLOS.....	25
1.1.1. DRENAGEM	26
1.1.2. REGIME DE ESCOAMENTO EM SOLOS	27
1.1.3. TEOREMA DE BERNOULLI	29
1.1.4. PERMEABILIDADE.....	30
1.1.5. EQUAÇÃO DE FLUXO EM SOLO	31
1.1.6. SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE LAPLACE PARA FLUXO EM MEIOS POROSOS.....	34
1.1.6.1. MÉTODOS ANALÓGICOS	34
1.1.6.2. MODELOS FÍSICOS.....	35
1.1.6.3. SOLUÇÃO ANALÍTICA	35
1.1.6.4. SOLUÇÃO GRÁFICA.....	37
1.1.6.5. SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	38
1.2. GEOSSINTÉTICOS.....	39
1.2.1. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS.....	40
1.2.2. GEOSSINTÉTICOS E DRENAGEM.....	41
1.2.3. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS RELEVANTES PARA A DRENAGEM.....	44
1.2.3.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	44
1.2.3.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	45
1.2.3.3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	46
1.2.3.4. PROPRIEDADES DE DURABILIDADE.....	48
1.2.3.5. FATORES QUE AFETAM O COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA.....	49
1.2.4. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DRENANTES.....	52
1.2.4.1. VAZÃO UNITÁRIA DE CONTRIBUIÇÃO DE PROJETO (QD).....	53
1.2.4.2. CAPACIDADE DE VAZÃO PLANAR DO GEOSSINTÉTICO(QP,I).....	53

1.2.4.3. CAPACIDADE DE VAZÃO ADMISSÍVEL DO GEOSSINTÉTICO(QADM) ..	53
1.2.4.4. ESPECIFICAÇÃO DO GEOSSINTÉTICO	54
1.2.4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
2. MATERIAIS E MÉTODOS	56
2.1. INTRODUÇÃO	56
2.2. GEOCOMPOSTO DRENANTE	56
2.3. PROGRAMA DE ENSAIOS	58
2.3.1. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA NOMINAL.....	58
2.3.2. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA MASSA POR UNIDADE DE ÁREA (GRAMATURA).....	61
2.3.3. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO FAIXA LARGA (NÃO CONFINADA)	62
2.3.4. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	64
2.3.5. RESISTÊNCIA AO PUNÇONAMENTO (CBR).....	67
2.3.6. PERMEABILIDADE NORMAL E PERMISSIVIDADE	70
2.3.7. PERMEABILIDADE PLANAR E TRANSMISSIVIDADE	72
2.3.8. FLUÊNCIA À COMPRESSÃO – MÉTODO SIM.....	76
2.3.9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	82
3.1. INTRODUÇÃO	82
3.2. ESPESSURA NOMINAL	82
3.3. MASSA POR UNIDADE DE ÁREA (GRAMATURA).....	83
3.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE FAIXA LARGA (NÃO CONFINADA).....	83
3.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	85
3.6. RESISTÊNCIA AO PUNÇONAMENTO (CBR)	88
3.7. PERMEABILIDADE NORMAL E PERMISSIVIDADE.....	89
3.8. PERMEABILIDADE PLANAR E TRANSMISSIVIDADE	90
3.9. FLUÊNCIA À COMPRESSÃO	93
3.10. PREVISÃO DA VAZÃO A LONGO PRAZO.....	96
3.11. CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
4. ANÁLISES NUMÉRICAS.....	101
4.1. INTRODUÇÃO	101
4.2. FERRAMENTA NUMÉRICA.....	101
4.2.1. MODELOS CONSTITUTIVOS	102
4.2.2. ESTRUTURA DO PROGRAMA	104

4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	105
4.3.1. MODELAGEM NUMÉRICA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	105
4.4. MODELAGEM NUMÉRICA DE UMA SITUAÇÃO DE CAMPO.....	115
4.4.1. ANÁLISES PRELIMINARES: SEM GEOCOMPOSTO	117
4.4.2. SITUAÇÃO REAL DE CAMPO: INTRODUÇÃO DO GEOCOMPOSTO DRENANTE.....	118
4.4.3. SITUAÇÃO DE CAMPO COM AJUSTE DE PERMEABILIDADE	125
4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	128
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	129
5.1. CONCLUSÕES	129
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
REFERÊNCIAS.....	133

INTRODUÇÃO

Considerações Iniciais

Muitas vezes considerada atrasada tecnologicamente quando comparada a outros setores, a construção civil tem buscado incorporar novas tecnologias às suas atividades tradicionais. Na Engenharia Geotécnica, pode-se destacar o uso crescente dos materiais geossintéticos como evidência.

Geossintéticos são produtos poliméricos que encontram as mais diversas aplicações dentro da Engenharia Civil. O aumento na utilização deste tipo de material se deve a fatores como facilidade de instalação e custo competitivo.

Na engenharia geotécnica merecem destaque as aplicações dos geossintéticos nas funções de drenagem. Reconhecidamente a fonte de grandes problemas na construção civil, a drenagem exige atenção especial do projetista. No passado, as drenagens de muros eram feitas com formas de madeira. Como material drenante era utilizada a brita, e como filtro um geotêxtil. Esse método resulta em um impacto ambiental maior, uma vez que usa agregados como meio drenante, além do custo mais elevado. Por esses motivos tem se tornado cada vez mais frequente o uso de geocompostos drenantes com a finalidade de captação e condução da água presente no solo. A instalação é mais rápida quando comparada ao processo anterior e resulta em uma espessura bem menor de superfície drenante.

Conhecer e compreender o comportamento deste tipo de material pode representar um dimensionamento mais preciso e, conseqüentemente, uma maior segurança na aplicação e redução de custos para implementação dessas soluções. A produção científica na área de geossintéticos tem crescido e pode-se encontrar vasta literatura sobre o tema, porém quando se trata de geocompostos drenantes os estudos são mais raros, sobretudo no Brasil. Esse cenário demanda pela produção de conhecimento na área.

Motivação e Objetivos

Inovação, desenvolvimento e pesquisa tecnológica são consideradas atualmente como estratégias competitivas para as organizações e não seria diferente na Engenharia Civil. No entanto, é comum observar uma certa resistência à adoção de novos produtos e sistemas construtivos.

Dois fatores importantes merecem destaque para justificar tal resistência: a natureza multidisciplinar dos projetos e a dependência quanto à pesquisa e desenvolvimento. Nesse contexto se faz importante o estreitamento da relação entre indústria e academia, proporcionando troca de conhecimentos e crescimento mútuo. O conhecimento deve tornar-se um elo da corrente do desenvolvimento integral, disponibilizado para benefício e usufruto da sociedade.

Este trabalho surge da necessidade de um estudo mais detalhado sobre o comportamento de geocompostos drenantes, em especial do produto MacDrain 2L. Com o objetivo de compreender o comportamento do material será realizado um programa de ensaios que conta com a execução de ensaios de laboratório para investigação das características físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do material. Além disso, serão feitas correlações entre os resultados obtidos para realização de investigações quanto à capacidade de vazão do geocomposto em longo prazo. Também serão realizadas modelagens numéricas que utilizarão os parâmetros extraídos dos ensaios em suas previsões. Com objetivo de refinar o modelo numérico, serão reproduzidos os ensaios de compressão simples e de transmissividade. Finalmente, será realizada a modelagem de uma situação de campo.

Entre os objetivos do estudo destacam-se:

- Estudar o desempenho do geocomposto através de ensaios de laboratório para obtenção das características físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do geossintético.
- Verificação da vazão nos drenos a diferentes pressões, buscando o limite de pressão para utilização adequada dos sistemas.
- Estabelecimento de correlação entre os ensaios de compressão simples, transmissividade e fluência para previsão de vazão em longo prazo;

- Realização de modelagem numérica dos ensaios de transmissividade e compressão com o objetivo de calibração do modelo e posterior análise de uma situação de campo.
- Determinação do comportamento do material mediante a fluência à compressão e atualização dos fatores de redução para este fenômeno;
- Proposição de ábacos de dimensionamento para os materiais ensaiados.

Estrutura da Dissertação

Este trabalho divide-se em seis capítulos conforme descrito:

O primeiro capítulo introduz o tema e os objetivos da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica exibindo os conceitos sobre as equações que regem o fluxo em solos, regimes de escoamento, drenagem e permeabilidade. Ainda neste capítulo, são apresentados os conceitos de materiais geossintéticos com um breve histórico e classificação das diversas funções do material. As funções de drenagem deste material foram expostas e as propriedades importantes para essa função foram enunciadas. No fim do capítulo, é especificado o método de dimensionamento de sistemas drenantes.

No terceiro capítulo será feita a descrição do programa de ensaios executados incluindo o detalhamento das normas usadas, preparação dos corpos de prova, equipamentos utilizados, métodos e procedimentos.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos através do programa de ensaios realizados nos laboratórios da Maccaferri, em Jundiaí, e TRI – Testing, Research, Consulting and Field Services, no Texas, EUA. Além dos resultados dos ensaios, neste capítulo, são expostas as correlações entre os ensaios de fluência à compressão, transmissividade e compressão simples a fim de obter a previsão de vazão do geocomposto em longo prazo. Com essa previsão foram estabelecidos fatores de redução relativos à fluência do material.

No quinto capítulo, são realizadas análises a partir do método dos elementos finitos utilizando o programa Plaxis. Com objetivo de refinar o modelo numérico, são reproduzidos os ensaios de compressão simples e transmissividade. Posteriormente, é feita a modelagem de uma situação de campo com análises quanto ao desempenho do material.

Finalmente o sexto capítulo apresenta as conclusões do estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Considerações Sobre Fluxo em Solos

A água, elemento essencial à vida, por vezes mostra sua grandeza ao homem que desde os primórdios se empenhou em tentativas de controle de sua força. “Ao longo da história há evidências de que a humanidade tem temido e respeitado o poder destrutivo da água” (CEDERGREN, 1967). Para a Engenharia Civil, esse controle é vital, e negligenciá-lo pode causar danos econômicos, ambientais e sobretudo a perda de vidas.

A água circula na natureza através do ciclo hidrológico. Tucci (1993) define que o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (Figura 1).

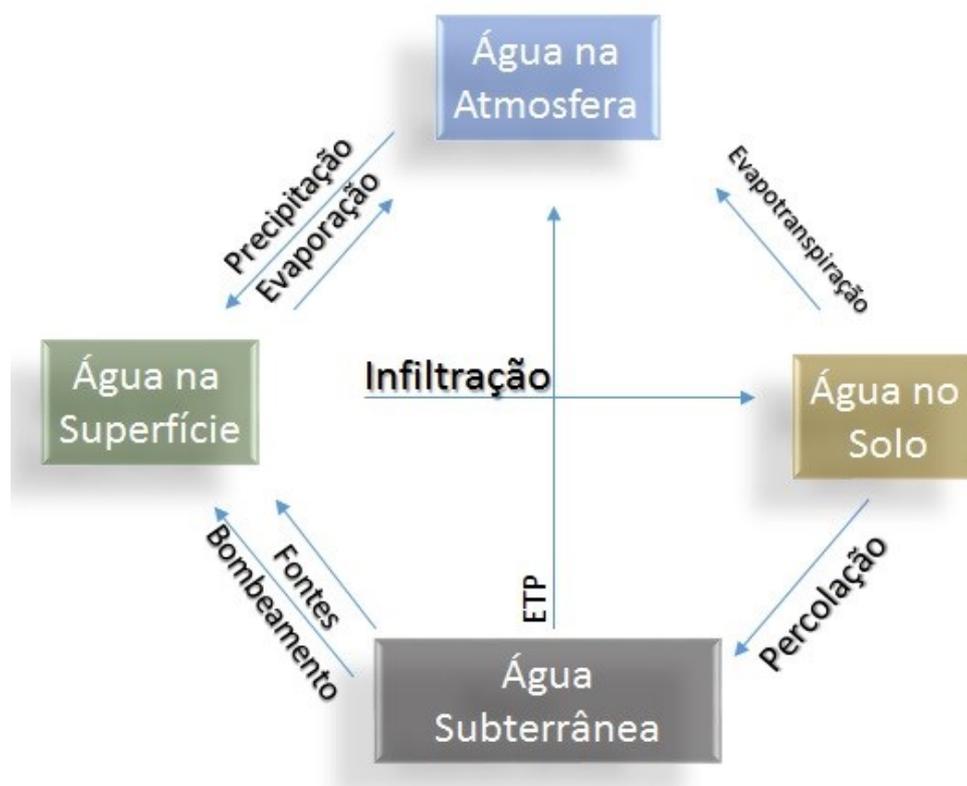


Figura 1 - Ciclo Hidrológico como um sistema. Fonte: (TUCCI, 1993)

Parte da água precipitada alcança o solo, rios, lagos, mares ou é interceptada pela vegetação. Deste volume, uma parte retorna à atmosfera por evapotranspiração e o saldo é absorvido pela vegetação ou cai na superfície do terreno. Do volume de água que cai no solo, uma parte infiltra e a outra parte escorre superficialmente, alterando as condições de umidade do solo.

Encontrar os valores dos componentes deste balanço hidrológico é um trabalho complexo em função da dificuldade de determinação de fatores como tipo de solo, vegetação, intensidade de precipitação, topografia, condições meteorológicas, entre outros.

1.1.1. Drenagem

O controle da água nas estruturas civis pode ser feito por métodos que mantenham a água longe dos locais onde pode causar danos, ou por meio da drenagem.

O processo de dessaturação ou drenagem consiste na remoção da água gravitacional do meio poroso, seguida pela substituição de ar, geralmente à pressão atmosférica (TUCCI, 1993).

Reconhecidamente a fonte de grandes problemas na construção civil, a drenagem exige atenção especial do projetista. O termo drenagem é aplicado ao processo de retirada artificial de água de uma massa de solo. Juntamente com outras operações de engenharia a drenagem é usada para aumentar a estabilidade do maciço de solo antes da escavação, ou antes da aplicação de cargas (TERZAGHI, 1943).

Um projeto de drenagem é parte fundamental para o sucesso de qualquer intervenção de engenharia e embora os princípios sejam básicos a aplicação nem sempre é simples, devendo-se considerar as peculiaridades e adaptações às situações específicas. Além disso, deve-se dar atenção especial à acurácia dos dados físicos, pois quanto mais próximos da realidade, maior é a eficiência do projeto.

Antes do século XX, a concepção e construção em solos e rochas em geral eram consideradas mais uma arte que uma ciência. Acreditava-se que a teoria, a ciência e matemática não tinham lugar na concepção de obras de engenharia construídas de materiais terrosos. As suposições sobre transbordamento de represas; os formatos de barragens de terra; a seleção de drenos para estradas e outros fins e assuntos semelhantes referentes a terraplenagem e drenagem foram desenvolvidos por empíricas "regras de ouro", "intuição" dos projetistas, "julgamento", ou simplesmente copiando algo bem-sucedido no passado. Infelizmente, estes procedimentos resultaram em sucessos ou falhas de concepções e muitas vezes levou a projetos economicamente inviáveis com nenhuma garantia de fatores marginais de segurança contra falhas. (CEDERGREN, 1967)

Reconhecer as condições que podem culminar na deterioração ou falha em casos de drenagem é fator importante para a eficiência do projeto. De acordo com Cedergren (1967), a maioria das falhas causadas pela água podem ser divididas em duas categorias:

1. Aquelas que acontecem quando partículas do solo migram para uma saída de escape, causando ruptura hidráulica;
2. Aquelas que são causadas por padrões descontrolados de escoamento e levam à saturação, inundações internas, poropressão excessiva, ou de força de percolação excessiva.

Para o entendimento deste processo foram fundamentais as contribuições das experiências de Darcy (1856) tratando de fluxo em meios porosos, a abordagem científica de Terzaghi (1943), as teorias de escoamento de Casagrande (1937), entre outros. Os benefícios advindos da abordagem racional para as obras de drenagem podem ser observados a partir da constatação da redução do número de falhas ocorridas quando tais métodos são aplicados de maneira coerente.

Experiência e bom senso devem desempenhar um papel importante na escolha de métodos adequados de análise e na avaliação do grau de precisão da solução final. Outro fator importante é a necessidade de conservação das obras concluídas. Devido a grandes variações de condições de infiltração, que podem se desenvolver em obras de drenagem, e às dificuldades de previsões, se torna necessária a observação do comportamento real dos projetos concluídos.

1.1.2. Regime de Escoamento em Solos

O conhecimento sobre o regime de escoamento em solos tem como base a experiência de Osborne Reynolds (1883) que estudou o fluxo em condutos fechados estabelecendo limites para a velocidade na qual o fluxo altera suas características entre laminar e turbulento. O experimento consistiu em permitir o fluxo de água através de uma tubulação transparente e através de um pequeno funil instalado no tanque superior. Um corante era introduzido no fluxo: caso o corante escoasse em trajetória retilínea, o regime de escoamento seria caracterizado como laminar, uma vez que as partículas têm trajetórias paralelas; do contrário, o regime seria turbulento.

A velocidade que define esses limites é chamada de velocidade crítica (v_c) e é governada por um número adimensional, denominado de número de Reynolds (Re). Verifica-se experimentalmente que a velocidade crítica para escoamento em tubos corresponde a um número de Reynolds de aproximadamente 2000. A experiência está ilustrada na Figura 2.

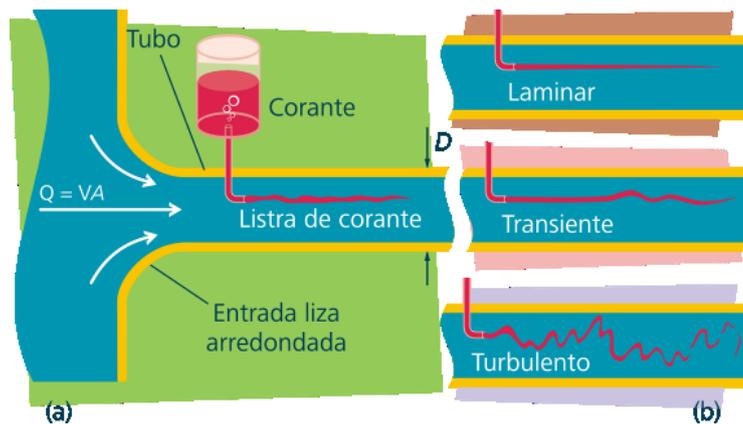


Figura 2- (a) Experimento de Reynolds para ilustrar o tipo de escoamento e (b) Regimes de escoamento
Fonte: (VILANOVA, LUCIANO CALDEIRA, 2011)

Em um fluxo laminar, a relação entre o gradiente hidráulico e a velocidade do fluxo é linear, o que não se configura em um regime turbulento. A Equação 1 apresenta a relação entre as grandezas segundo Reynolds:

$$v_c = \frac{Re\mu g}{D\gamma} \quad (1)$$

Onde: Re = nº de Reynolds = 2000;

μ = viscosidade;

γ = peso específico;

g = aceleração da gravidade;

D = diâmetro do tubo.

Para solos, considera-se o diâmetro dos poros inferiores a 5 mm, obtendo velocidades críticas relativamente altas. Sabe-se que a velocidade de escoamento em solos é da ordem de 0,01m/s, concluindo, portanto, que as velocidades de fluxo que de fato ocorrem no solo são menores que a velocidade crítica configurando um regime laminar. A partir desta conclusão, verifica-se a proporcionalidade entre a velocidade de escoamento e o gradiente hidráulico, também chamado de permeabilidade ou condutividade hidráulica (k).

1.1.3. Teorema de Bernoulli

Estudar o fluxo de água através do solo também implica no estudo do seu estado de energia, e, para tal, se faz necessário o conhecimento do Teorema de Bernoulli (1738). A Equação 2 apresenta a proposta para representar a energia total em um ponto do fluido, expressa em termos da razão energia/peso. A energia total ou carga total é igual à soma de três parcelas: carga piezométrica, carga cinética e carga altimétrica:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (2)$$

Onde:

h = carga total;

u = poropressão;

v = velocidade;

g = aceleração da gravidade;

z = carga de elevação;

γ_w = peso específico da água.

Como em solos a velocidade de percolação é muito pequena, a parcela correspondente a essa grandeza pode ser ignorada, reduzindo a Equação (2) a:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (3)$$

No movimento da água através do solo, há dissipação da carga total pela ocorrência do atrito da água com as partículas de solo (Figura 3). A perda de carga (Δh) entre dois pontos A e B pode ser calculada por:

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + z_A \right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + z_B \right) \quad (4)$$

Na forma adimensional tem-se:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

Onde:

i = gradiente hidráulico;

L = distância entre os pontos A e B.

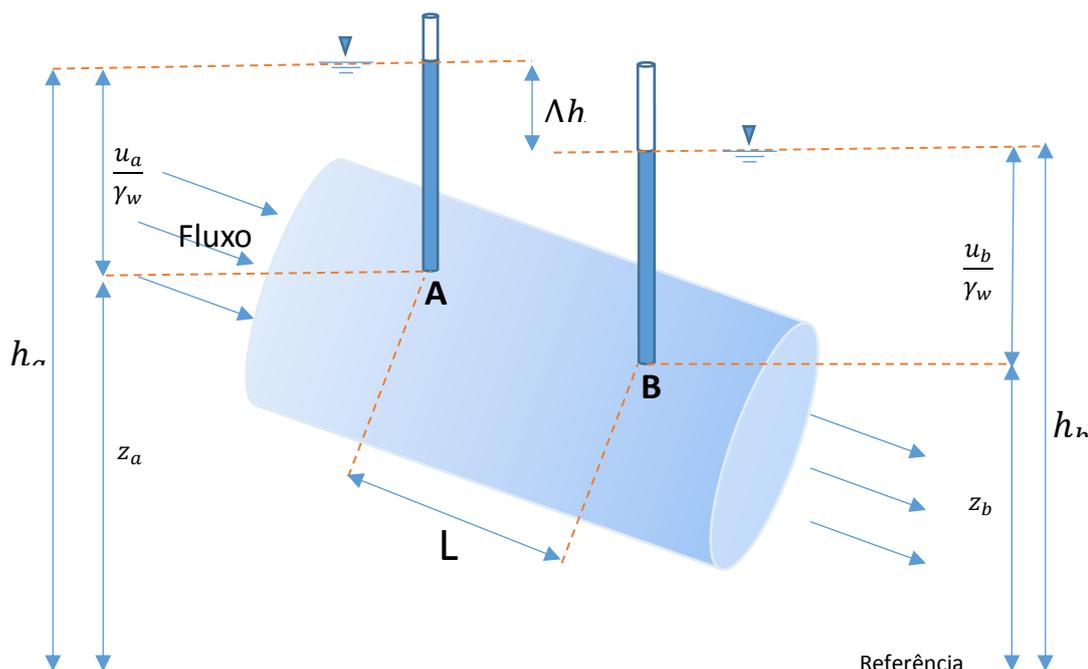


Figura 3 - Perda de carga entre dois pontos no solo.

1.1.4. Permeabilidade

Um material é dito permeável se ele contém vazios contínuos. Como esses vazios estão contidos em todos os solos, incluindo as argilas mais rígidas, e em praticamente todos os materiais não-metálicos de construção, incluindo granito e cimento, todos estes materiais são permeáveis. Além disso, o fluxo de água através de todos eles obedece aproximadamente às mesmas leis (TERZAGHI, PECK e MESTI, 1996).

A permeabilidade é um parâmetro importante para a avaliação do modo como a água flui através dos solos e das rochas.

Em 1856, Darcy definiu uma fórmula empírica para o comportamento do fluxo através solos saturados. A experiência consistia em variar o comprimento de uma amostra de solo de largura (L), a pressão de água no topo e no fundo da amostra, e verificar a vazão. Os resultados indicaram que a velocidade de percolação (v) é proporcional ao gradiente hidráulico (i), como segue:

$$v = ki \quad (6)$$

Onde: v = velocidade de percolação;

k = condutividade hidráulica ou permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade depende principalmente do tamanho médio dos poros, o que por sua vez está relacionado com a distribuição de tamanhos das partículas, a forma das partículas e a estrutura do solo. Em geral, quanto menor for o tamanho das partículas, menor é o tamanho médio dos poros e, conseqüentemente, menor é o coeficiente de permeabilidade.

1.1.5. Equação de Fluxo em Solo

Para um dado elemento de solo considerado homogêneo, a vazão que percola em um regime laminar (Figura 4), pode ser determinada por:

$$q = v \cdot A \quad (7)$$

A Equação 7 pode ser reescrita segundo as componentes nas direções x, y e z da vazão que entra no elemento de solo como:

$$q_x = v_x d_y d_z \quad (8)$$

$$q_y = v_y d_z d_x \quad (9)$$

$$q_z = v_z d_x d_y \quad (10)$$

Considerando os acréscimos que podem ocorrer no elemento de solo, pode-se definir como componentes do volume de saída:

$$q_x + dq_x = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx \right) d_y d_z \quad (11)$$

$$q_y + dq_y = \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \right) d_z d_x \quad (12)$$

$$q_z + dq_z = \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz \right) d_x d_y \quad (13)$$

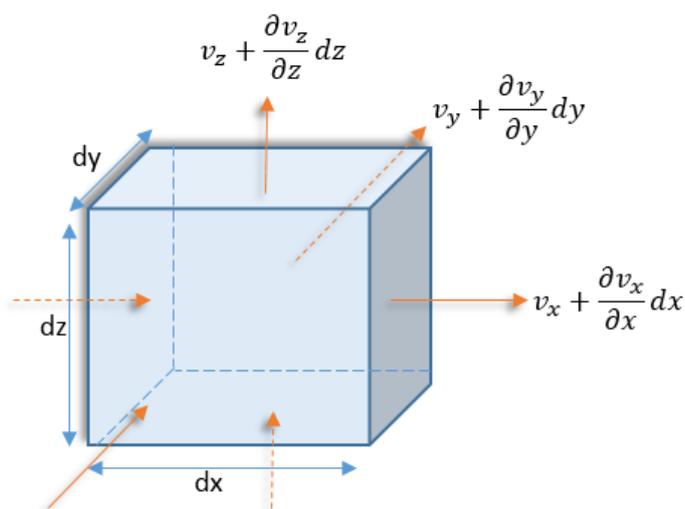


Figura 4 - Fluxo através de um elemento de solo homogêneo.

A diferença entre o volume de entrada e o volume de saída de água define a variação de volume por unidade de tempo no elemento:

$$q_x + q_y + q_z - (q_x + dq_x + q_y + dq_y + q_z + dq_z) = -\frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (14)$$

A equação da continuidade é escrita como:

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dx dy dz = -\frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (15)$$

Considerações fundamentais sobre a natureza do fluxo em meios porosos levaram os investigadores a concluir que a lei de Darcy da proporcionalidade entre velocidade macroscópica e gradiente hidráulico são aplicáveis a um regime de fluxo, desde que as velocidades sejam baixas (CEDERGREN, 1967).

Pela Equação (6) tem-se que:

$$v_x = k_x i_x \quad (16)$$

$$v_y = k_y i_y \quad (17)$$

$$v_z = k_z i_z \quad (18)$$

Ou:

$$v_x = k_x \left(-\frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (19)$$

$$v_y = k_y \left(-\frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$v_z = k_z \left(-\frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (21)$$

Considerando a permeabilidade constante em todas as direções, tem-se:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz = \frac{\partial V_w}{\partial t} \quad (22)$$

A partir dos índices físicos, sabe-se que:

$$V_w = SeV_s \quad (23)$$

$$V = V_s + V_w \quad (24)$$

$$V = V_s + (1 + e)V_s \quad (25)$$

$$V_s = \frac{dx dy dz}{1 + e} \quad (26)$$

$$V_w = \frac{Se}{1 + e} dx dy dz \quad (27)$$

Onde:

S = grau de saturação;

e = índice de vazios;

V_w = Volume de água;

V_s = volume de sólidos.

Sendo assim, a variação de vazão ao longo do tempo será dada por:

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Se}{1 + e} dx dy dz \right) \quad (28)$$

Substituindo (28) em (22), vem:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e} \left(e \frac{\partial S}{\partial t} + S \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (29)$$

A Equação (29) é conhecida como a equação geral de fluxo de água em solo não saturado, heterogêneo e anisotrópico.

De acordo com as condições de cada problema geotécnico, a Equação (29) pode ser adaptada. Em alguns casos mais simples, em que o fluxo se dá em apenas uma direção (permeâmetro), pode-se considerar um fluxo unidimensional. No entanto, a ocorrência mais comum é o fluxo tridimensional. Tais problemas podem, em muitos

casos, ser analisados sob ótica bidimensional, considerando planos ou seções representativas do problema.

A equação de Laplace, que descreve matematicamente fenômenos físicos de grande importância prática como: transmissão de calor e campo elétrico e que pode ser escrita sob forma operacional, também pode ser usada para representação de fluxo em solo.

Sabendo que a anisotropia da permeabilidade é uma condição encontrada frequentemente em solos compactados, pode-se utilizar um artifício matemático que permite estudar o fluxo através de um solo anisotrópico como se o mesmo estivesse ocorrendo em um solo isotrópico (CEDERGREN, 1967).

Para esse desenvolvimento deve-se assumir que:

1. O solo é homogêneo;
2. Os espaços vazios são completamente preenchidos com água;
3. Não há consolidação ou expansão do solo;
4. O solo e a água são incompressíveis (índice de vazios constante);
5. O fluxo é laminar, e a lei de Darcy é válida;
6. O solo está saturado ($S=1$);
7. Isotropia em relação à permeabilidade.

Desta maneira, a Equação (29) se reduz a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad \text{Equação de Laplace} \quad (30)$$

1.1.6. Solução da equação de Laplace para Fluxo em Meios Porosos

A resolução de um problema de fluxo através da equação geral pode ser obtida de diversos modos:

1.1.6.1. Métodos Analógicos

Uma vez que o fluxo elétrico através de um condutor também obedece à equação de Laplace, é possível fazer a correspondência entre voltagem e carga elétrica,

condutividade elétrica e permeabilidade, assim como corrente elétrica e vazão estabelecendo uma rede de fluxo por analogia e obtendo o traçado necessário.

Esse tipo de modelo é restrito a situações de fluxo permanente e pode ser utilizado para problemas de fluxo em duas ou três dimensões, desde que o modelo possua a mesma forma geométrica do meio poroso sujeito à percolação.

1.1.6.2. Modelos Físicos

Um dos modelos físicos com vários registros na literatura é o modelo em escala reduzida de areia. Através da reprodução da seção transversal do problema em questão, em um tanque de acrílico, utilizando corante para o traçado das linhas de fluxo e instalando piezômetros para estabelecer as linhas equipotenciais, é possível determinar a rede de fluxo em questão. A dificuldade de simulação das condições de contorno e permeabilidade limitam a utilização deste tipo de método.

1.1.6.3. Solução Analítica

Nas soluções analíticas, a equação de Laplace é resolvida de acordo com condições de contorno. Devido à complexidade do processo, as soluções analíticas são indicadas para casos de geometria simples e condições de contorno bem determinadas. Ainda assim, esse tipo de solução é extremamente útil para efeitos comparativos e análise de confiabilidade de outros métodos. Nos casos de fluxo unidimensional, a equação de Laplace é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (31)$$

A solução da Equação (31) é dada pela equação de reta: $h(z) = Az + B$, onde A e B são condições de contorno e $h(z)$ é a função que representa a carga total.

Nos casos de fluxo bidimensional, a solução da Equação (30) é obtida por dois grupos de funções representadas por duas famílias de curvas ortogonais entre si (linhas de fluxo e linhas equipotenciais) que formam um reticulado chamado rede de fluxo.

Uma linha de fluxo é a linha ao longo da qual a partícula de água se desloca de montante para jusante, no meio do solo permeável. Uma linha equipotencial é a linha ao longo da qual a carga potencial tem o mesmo valor em todos os pontos.

Dada a função potencial $\phi(x, z)$ que obedece a equação:

$$\phi(x, z) = -k \cdot h + c \quad (32)$$

Dada a função de fluxo $\psi(x, z)$ definida de modo que:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = V_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (33)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = V_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (34)$$

Considerando a trajetória de uma partícula de fluido pela linha AB (Figura 5) passando pelo ponto P com velocidade tangencial (V), tem-se:

$$tg\theta = \frac{V_z}{V_x} = \frac{dz}{dx} \quad (35)$$

ou

$$V_z \cdot dz - V_x \cdot dx = 0 \quad (36)$$

Substituindo as equações (33) e (34) em (35), obtém-se:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} dz + \frac{\partial \psi}{\partial x} dx = 0 \quad (37)$$

ou

$$\partial \psi = 0, \text{ assim: } \psi = cte \quad (38)$$

Deste modo, as curvas definidas por $\psi = cte$ definem trajetórias das partículas de fluxo.

Pode-se observar ainda na Figura 5 que a vazão unitária que passa pela seção 1-2 entre as linhas de fluxo é dada por:

$$q = \int_{\psi_2}^{\psi_1} V_x \cdot dz = \int_{\psi_2}^{\psi_1} d\psi = \psi_1 - \psi_2 \quad (39)$$

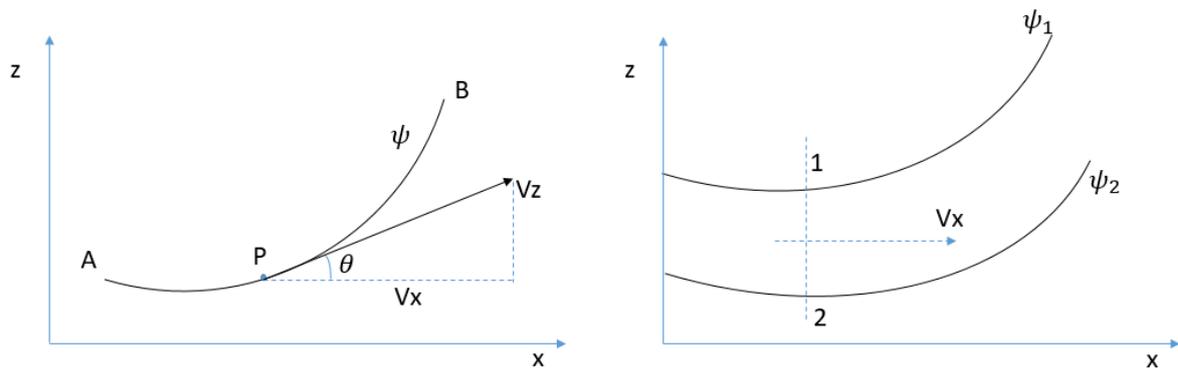


Figura 5 - Partícula de fluido (trajetória).

Pode-se admitir que a vazão em cada canal de fluxo é constante e igual para todos os canais, uma vez que a rede de fluxo é desenhada de modo que $\psi_n - \psi_{n-1}$ seja constante. Para solos isotrópicos, verifica-se a ortogonalidade entre as linhas de fluxo e equipotenciais, a qual pode ser verificada pelas equações:

$$(dz/dx) = \frac{-\frac{\partial\psi}{\partial x}}{\frac{\partial\psi}{\partial z}} = \frac{V_z}{V_x} \quad (40)$$

Para $\phi(x, z)$ constante, vem:

$$(dz/dx) = -\frac{1}{dz/dx} \quad (41)$$

Assim a família de curvas $\phi(x, z)$ constante é ortogonal a $\psi(x, z)$ constante.

1.1.6.4. Solução Gráfica

Este tipo de solução consiste no traçado de uma rede de fluxo composta por linhas de fluxo e equipotenciais dentro da região de interesse interceptando-se em ângulos retos. Essa solução requer experiência do projetista e conhecimento pleno das condições de contorno que a situação envolve. A solução gráfica permite a determinação rápida de três importantes fatores: gradiente hidráulico, cargas (hidráulica, elevação e pressão) e vazão. A Figura 6 ilustra um exemplo de traçado de rede de

fluxo. Casagrande (1937) apresenta recomendações para um traçado eficiente das redes de fluxo.

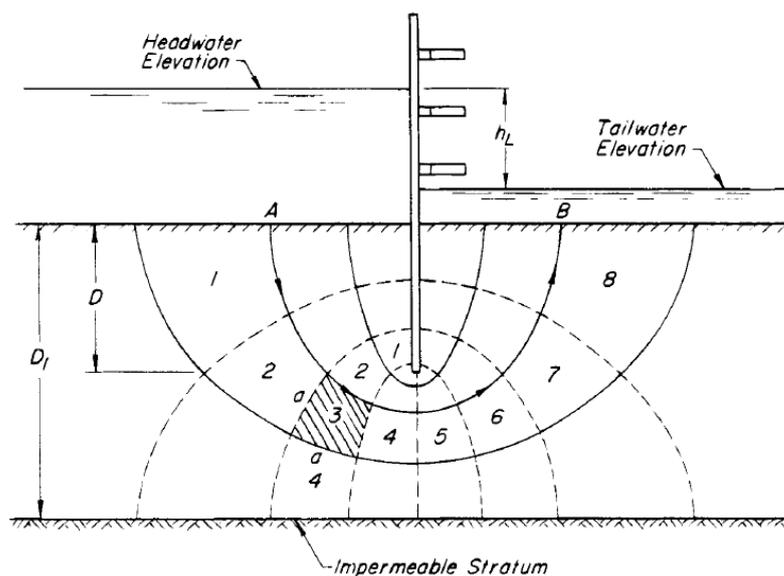


Figura 6 - Fluxo de água para percolação em torno de cortina de estacas-prancha em um solo isotrópico e homogêneo (Terzaghi et al, 1996)

1.1.6.5. Solução Numérica

Esta solução consiste na utilização de ferramentas numéricas como o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas, facilitadas pelo emprego de programas computacionais. No geral esses métodos compreendem uma divisão da zona de fluxo em uma série de pequenos elementos geométricos, sendo o comportamento do fluxo estudado em cada um deles. A solução é encontrada através da discretização de duas formas distintas: domínio dos pontos nodais para o Método das Diferenças Finitas (MDF) e domínio dos elementos para o Método dos Elementos Finitos (MEF). Tais técnicas demandam conhecimento de cálculo variacional, álgebra matricial, mecânica dos sólidos e técnicas computacionais.

Pela praticidade e agilidade, este tipo de solução tornou obsoletas as demais e possui a vantagem de permitir o estudo de geometrias e condições de contorno mais complexas.

O MEF é uma das técnicas mais versáteis e populares para a análise de problemas de fluxo permanente ou transiente, bidimensionais ou tridimensionais. Inicialmente desenvolvido para análises de problemas de mecânica estrutural o MEF ganhou aceitação como uma técnica capaz de ser aplicada a outros problemas de engenharia.

Um dos programas baseados no MEF mais utilizados atualmente e que também será utilizado neste trabalho é o PLAXIS (*Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*, versão 8.2).

1.2. Geossintéticos

Geossintéticos são produtos poliméricos (sintéticos ou naturais) industrializados, desenvolvidos para aplicação em obras geotécnicas, desempenhando uma ou mais funções (NBR 12553).

Introduzidos no mercado brasileiro na década de 70, os geossintéticos ganham cada vez mais espaço e impulsionam o desenvolvimento de pesquisas na área de Engenharia Civil. Como um componente extremamente versátil, os geossintéticos encontram variados fins e são disponibilizados nas mais diversas formas, cada um adequado a um determinado uso ou necessidade.

Os grupos profissionais mais fortemente influenciados foram a engenharia geotécnica, engenharia de transportes, engenharia ambiental e engenharia hidráulica (KOERNER, 1997). Estes produtos encontram muitas aplicações na área geotécnica, como: aeroportos, ferrovias, rodovias, aterros, estruturas de contenção, reservatórios, canais e barragens.

O uso de geossintéticos tem dois objetivos principais: eficiência no trabalho executado (por exemplo, sem deterioração do material ou consumo excessivo) e o fator econômico (menor custo, maior durabilidade, maior vida útil e redução de custos de manutenção) (KOERNER, 1997). A Tabela 1 reúne as principais funções dos geossintéticos na engenharia geotécnica.

Tabela 1- Geossintéticos e suas funções

Principais funções dos geossintéticos de acordo com a NBR 12553	
Controle de erosão	Prevenção de erosão superficial de partículas de solo devido ao escoamento superficial de um fluido.
Drenagem	Coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético.
Filtração	Retenção do solo ou de outras partículas, permitindo a passagem livre do fluido em movimento.
Barreira	Controle ou desvio de fluidos.
Proteção	Limitação ou prevenção de danos a elementos de obras geotécnicas.
Reforço	Utilização das propriedades mecânicas de um geossintético para a melhoria do comportamento mecânico de uma estrutura geotécnica.
Separação	Ação de impedir a mistura ou interação de materiais adjacentes.

1.2.1. Tipos de Geossintéticos

O número de geossintéticos no mercado é cada vez maior, tornando complexa a sua catalogação e classificação. No entanto, seguem alguns exemplos de uso mais frequente:

Geotêxteis: são produtos têxteis, bidimensionais, permeáveis, compostos de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhem várias funções em uma obra geotécnica (NBR 12553 – Terminologia).

Geogrelha: são produtos com estrutura em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, e constituído por elementos resistentes à tração. É considerada unidirecional quando apresenta elevada resistência à tração apenas em uma direção, e bidirecional quando apresenta elevada resistência à tração nas duas direções principais (ortogonais). Em função do processo de fabricação, as geogrelhas podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas (NBR 12553 - Terminologia).

Geocélulas: são produtos com estrutura tridimensional aberta, constituídos de células interligadas que confinam mecanicamente os materiais neles inseridos, com função predominante de reforço e controle de erosão (NBR 12553 - Terminologia).

Georredes: são produtos com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem (NBR 12553 - Terminologia).

Geomantas: são produtos com estrutura tridimensional, permeáveis, usados para controle de erosão superficial do solo, também conhecidos como biomanta, quando biodegradáveis (NBR 12553 – Terminologia).

Geomembrana: são produtos bidimensionais de baixíssima permeabilidade, compostos predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizados para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação (NBR 12553 – Terminologia).

Geotubos: são produtos em forma tubular com função drenante (NBR 12553 - Terminologia).

Geoformas: são estruturas realizadas a partir de geossintéticos, com a finalidade de conter materiais de modo permanente ou provisório (NBR 12553 - Terminologia).

Geocompostos: são produtos industrializados, formados pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebidos para desempenhar função específica (NBR 12553 - Terminologia).

Em especial esta pesquisa busca aprofundar o conhecimento dos geocompostos drenantes, que consistem em um núcleo polimérico ao qual está ligado um geotêxtil sobre um ou ambos os lados. O núcleo polimérico constitui o meio de transmissão de líquido principal, enquanto o geotêxtil, dependendo das condições de contorno, atua como um filtro ou uma camada de atrito.

1.2.2. Geossintéticos e Drenagem

No Brasil, a utilização de produtos geossintéticos na drenagem de gases e líquidos, objetivando a substituição de materiais naturais, a redução de peso e a diminuição de espessura, teve início nos anos 1980. No exterior, provavelmente uma das primeiras especificações de geossintéticos com função drenante foi determinada pelo Departamento de Transportes da Grã-Bretanha, em 1987, o que permitiu uma maior disseminação desta técnica (VERTEMATTI, 2004).

A versatilidade e diversidade de materiais geossintéticos drenantes possibilita a implantação deste tipo de material em diversos tipos de obras. Há uma sofisticação desta utilização conforme aumenta o conhecimento e a familiarização com as novidades que o mercado cria.

As principais vantagens da utilização deste tipo de geossintético são (VERTEMATTI, 2004):

- São produtos uniformes, contínuos e flexíveis, que cumprem sua função mesmo quando aplicados em superfícies irregulares ou descontínuas;
- Permitem uma significativa redução na espessura dos sistemas drenantes, em comparação com as soluções convencionais, reduzindo escavações e permitindo um maior aproveitamento do espaço disponível;
- São facilmente manuseados, podendo sua instalação ser mecanizada, o que permite significativa redução de cronogramas e custos;
- São extremamente leves, em comparação com os agregados naturais, proporcionando menores sobrecargas nas estruturas e fundações das obras civis.

De acordo com a NBR 12.553/03, a drenagem consiste na coleta e condução de um fluido pelo corpo de geossintético. O desempenho desta função pode ser creditado a um ou mais geossintéticos, como segue:

Geotubos: Consistem em tubos-drenos sintéticos, especialmente projetados para utilização em drenagem.

Geotêxteis espessos: São constituídos por um ou mais camadas de geotêxtil não tecido agulhado, com espessura de alguns milímetros, a qual filtra e conduz fluidos em seu plano, concomitantemente.

Geospassadores, georrede, geomantas e geoexpandidos: tratam-se de produtos utilizados como núcleo drenante, para criar um grande volume de vazios e, assim substituir os materiais – pedra britada, argila expandida, seixo rolado, cascalho e outros – empregados nos drenos convencionais.

Geocompostos drenantes: A combinação de um geotêxtil filtrante com um núcleo drenante, e/ou com um geotubo, constitui um geocomposto drenante, que pode ser produzido industrialmente ou, simplesmente, manufaturado no próprio canteiro de obras.

Como resultam da combinação de vários geossintéticos, a variedade de geocompostos drenantes é grande e se justifica também pelo fato de admitir a adequação às dificuldades a serem vencidas pelo projeto.

Geocompostos proliferaram na comunidade da Engenharia Civil ao longo dos últimos anos. Extensas investigações têm sido realizadas ao uso e desempenho destes materiais sintéticos de drenagem, e vários autores têm destacado as vantagens e limitações desses produtos.

A Figura 7 apresenta a forma de atuação de um geocomposto drenante, e a Figura 8 reúne exemplos de utilização.

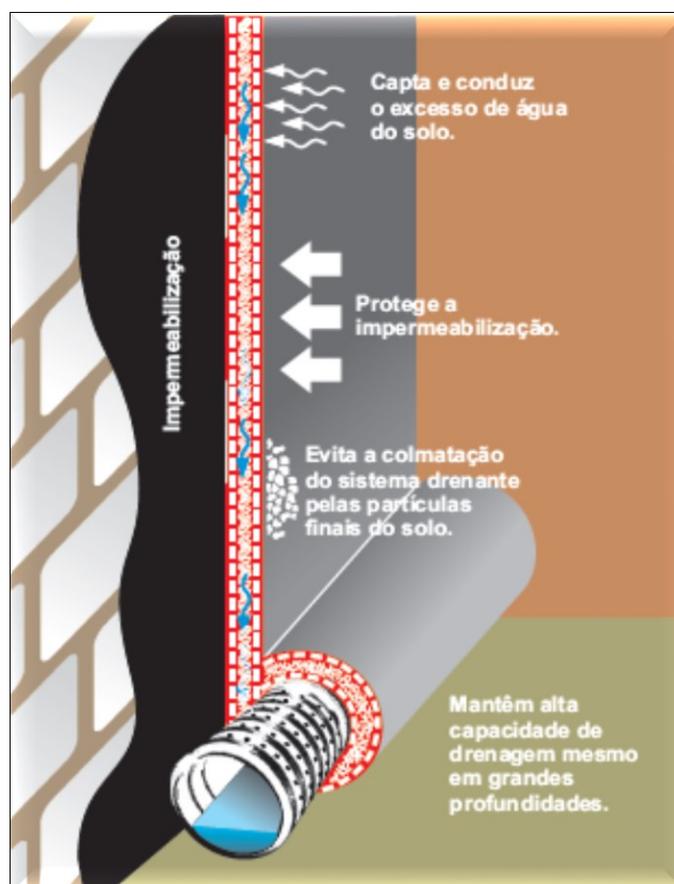


Figura 7 - Utilização de geocomposto drenante. Fonte: Catálogo Maccaferri

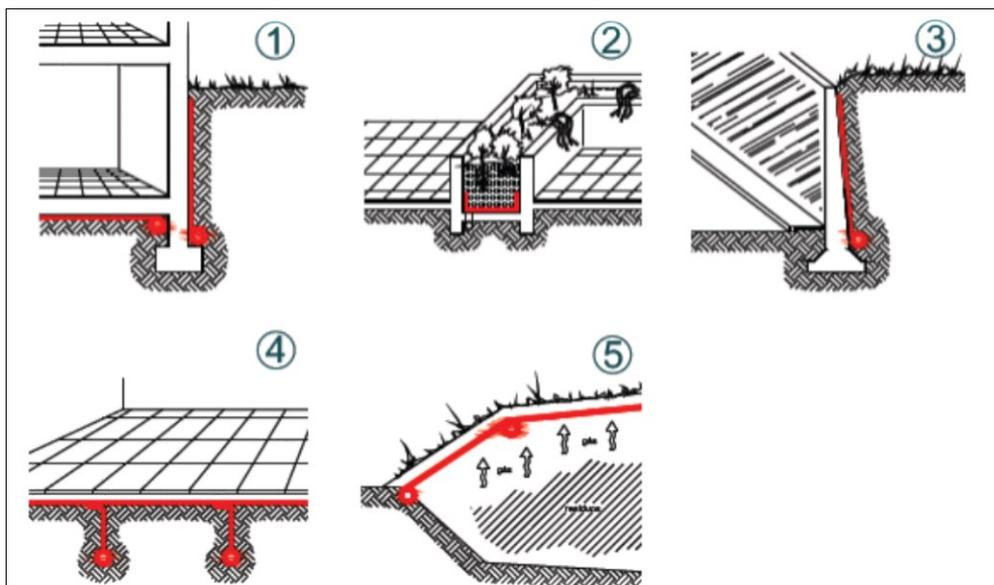


Figura 8 - Exemplos de utilização 1) Construções subterrâneas. 2) Áreas verdes. 3) Estruturas de contenção. 4) Estacionamento e pátios. 5) Aterros sanitários. Fonte: Catálogo Maccaferri

1.2.3. Propriedades dos Geossintéticos Relevantes para a Drenagem

Neste item, serão apresentadas as propriedades relevantes para drenagem. Os procedimentos de ensaio, no entanto, serão descritos no Capítulo 2.

1.2.3.1. Propriedades Físicas

Peso Específico (γ)

Define-se peso específico como a razão entre o peso da substância em módulo e o seu volume.

Espessura nominal (t_{CT})

A espessura nominal, em milímetros, é calculada registrando a distância interna entre duas placas rígidas, que comprimem os corpos de prova sob tensão vertical de 2 kPa. De acordo com a NBR 12569, a área de contato entre as placas deve ser 2.500 mm².

Massa por unidade de área (Gramatura μ_A)

A gramatura é definida como massa por unidade de área, sendo expressa em gramas por metro quadrado. É um dos parâmetros mais usados para a identificação dos geotêxteis e geocompostos. O valor médio de dez determinações expresso em g/m² representa a gramatura média.

Vertematti (2004) alerta que a gramatura deve ser entendida como um índice de caracterização sendo usada apenas como comparação entre membros de uma mesma família de produtos uma vez que produtos com processos de fabricação diferentes podem possuir gramaturas semelhantes.

Porosidade (n_{GT})

A porosidade é expressa pela razão entre o volume dos poros e o volume total de uma amostra. Pode ser obtida pela expressão:

$$n_{GT} = \frac{V_v}{V_T} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_f} \left(1 - \frac{\mu_A}{t_{GT} \cdot \rho_f \cdot \rho_w} \right) \times 100\% \quad (42)$$

Onde:

μ_A : gramatura;

ρ_f : massa específica da fibra ou do filamento;

ρ_w : massa específica da água;

V_v : volume de vazios;

V_T : volume total do geossintético;

γ : peso específico total do geossintético;

γ_f : peso específico da fibra (densidade da fibra multiplicada pelo peso específico da água).

1.2.3.2. Propriedades mecânicas

Resistência à tração

Quando tracionados, os geossintéticos podem apresentar variações em propriedades importantes como a espessura. A determinação da resistência à tração pode ser feita de várias formas diferentes a depender dos objetivos da medição.

Resistência à compressão

A compressibilidade é uma característica de interesse especial deste trabalho, uma vez que a capacidade de condução através do geossintético está ligada à espessura. A compressibilidade é obtida registrando a espessura sob diferentes níveis de carregamento. Essa compressibilidade faz com que a permeabilidade dos geotêxteis seja função da tensão normal a qual estão submetidos.

Resistência ao cisalhamento

Quando há tensões de cisalhamento opostas atuando nas faces superior e inferior de um geocomposto drenante, a aderência entre o núcleo e o geotêxtil adquire especial importância. Tal característica deve ser aferida a fim de verificar a existência de planos preferenciais de ruptura.

Resistência ao puncionamento

Esforços de compressão localizados podem gerar perfurações ao geossintéticos. A verificação deste tipo de resistência é feita pela fixação de um corpo de prova à borda de um cilindro rígido submetendo-o a uma força estática ou dinâmica.

Resistência à propagação de rasgo

O rasgo pode ocorrer durante a instalação, sob a ação de ventos ou durante a vida útil. É importante avaliar a resistência do geossintético à propagação do mesmo.

1.2.3.3. Propriedades hidráulicas

Permissividade e Permeabilidade Normal (k_n)

A permeabilidade na direção normal ao plano dos geocompostos e geotêxteis é geralmente alta. Essa propriedade decresce em função da compressibilidade dos materiais. Assim, para cada espessura, o material apresenta uma condutividade hidráulica diferente. Deste modo, define-se o parâmetro permissividade que relaciona o coeficiente de permeabilidade normal (k_n)(em m/s) e a espessura do geossintético (t_{GT}) sob determinada tensão como:

$$\psi = \frac{k_n}{t_{GT}} (s^{-1}) \quad (43)$$

Onde:

k_n = coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geotêxtil.

Transmissividade e Permeabilidade Planar (k_p)

A permeabilidade no plano é função do esforço normal aplicado, sendo assim, a medida que o geossintético comprime a vazão no plano diminui. Como o volume percolado é função da espessura do geossintético, define-se a transmissividade (θ), como produto da permeabilidade planar do geossintético pela sua espessura sob certa tensão normal de confinamento. A transmissividade exprime a capacidade que o geotêxtil possui de conduzir fluido no seu próprio plano, expressa em cm^2/s . A transmissividade é a característica principal de um geocomposto drenante.

$$\theta = k_p \cdot t \quad (44)$$

Onde:

k_p = coeficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil;

t_{GT} = espessura do geossintético.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** esquematiza a permissividade e a transmissividade de materiais geossintéticos.

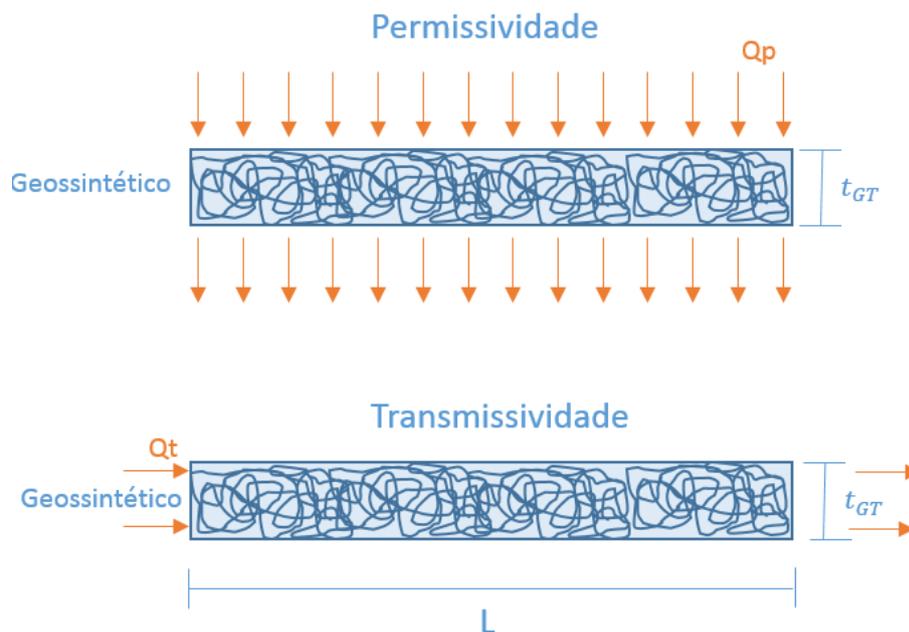


Figura 9- Representação da permissividade e da transmissividade de geossintéticos.

Abertura de filtração

É estabelecida como o diâmetro da maior partícula que passa pelo geotêxtil nas condições específicas de ensaio. Para a utilização de geossintéticos com função de filtro de camada de solo, deve ser utilizada a curva granulométrica do solo.

1.2.3.4. Propriedades de durabilidade

Fluência à compressão ISO 25619-1

Geossintéticos são materiais poliméricos que possuem propriedades viscoelásticas. Quando submetidos a esforços de longa duração, ocorre o processo de fluência do material. Comportamento de fluência refere-se a um processo de deformação dependente do tempo com uma tensão inferior à resistência do material (NIELSEN, 1974).

A magnitude do carregamento, temperatura, o tipo de polímero, processo de fabricação dos geossintéticos e o meio em que está inserido impactam diretamente no fenômeno. A determinação do comportamento do geocomposto mediante a fluência é de extrema importância, uma vez que as deformações sofridas afetam a espessura do material e, conseqüentemente, a capacidade de escoamento do mesmo.

No projeto de geossintéticos deve se dar atenção especial à aplicação de fatores de redução de fluência apropriados. A redução da capacidade de drenagem do geocomposto é contabilizada através da utilização de um fator de redução (FR_{fl}). Para Koerner (1997), os fatores de redução variam de 1 a 2 dependendo da aplicação do geossintético.

O comportamento padrão de fluência pode ser dividido em três etapas: fluência primária, secundária e terciária caracterizados pela linha sólida (Figura 10). A linha pontilhada representa a taxa de deformação por fluência. Na fase primária (ou transitória), a tensão aumenta com a diminuição da taxa de deformação. Durante o estágio secundário, a tensão aumenta linearmente com o tempo, resultando em uma tensão constante. A fase terciária é caracterizada por um rápido aumento da deformação, que conduz à ruptura. Diferentemente da fluência primária, as parcelas referentes às fases secundária e terciária das deformações por fluência dependem principalmente do tipo do polímero.

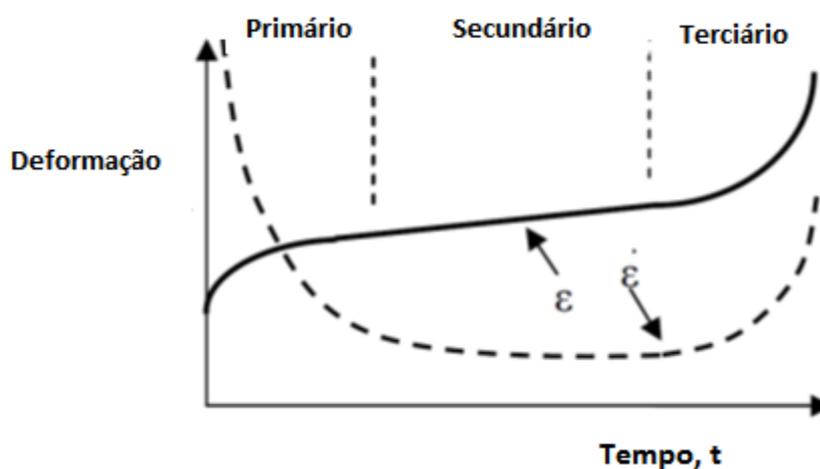


Figura 10 - Comportamento típico de fluência à tração.

O comportamento de fluência à compressão é semelhante ao de fluência à tração na fase de fluência primária e secundária. Porém na fase terciária, a taxa de deformação de fluência diminui à medida que a deformação aumenta. Além disso, a ruptura por fluência não ocorre no comportamento de compressão uma vez que o material se comporta como um material sólido, em contraste com o comportamento à tração.

1.2.3.5. Fatores que afetam o comportamento de fluência

Processo de formação e tipo de polímero

Uma parte das deformações referentes à fluência dos geossintéticos acontece em função do rearranjo estrutural macroscópico das fibras que compõem o material. Sendo assim, os geossintéticos com maior grau de liberdade entre as fibras demonstram as maiores deformações por fluência. Por outro lado, aqueles com fibras unidas são menos sensíveis à fluência.

As propriedades dos polímeros influenciam de forma significativa o comportamento de fluência dos geossintéticos. A formação de materiais poliméricos é caracterizada por cadeias moleculares longas a partir de unidades de repetição chamadas monômeros. Tais cadeias podem assumir formas geométricas de relativa complexidade, e estarem unidas através de ligações cruzadas. O polímero apresenta regiões onde a orientação molecular é predominantemente aleatória, conhecidas como zonas

amorfos, e áreas de grande orientação, conhecidas como áreas cristalinas. O grau de orientação cristalina e a percentagem de zonas amorfas, aliadas à temperatura de transição vítrea, ditam o comportamento das propriedades do polímero.

O comportamento tensão-deformação de curto prazo dos geossintéticos é significativamente influenciado por deformações das regiões amorfas. Por outro lado, a porção cristalina passa a ter um papel mais importante nos carregamentos de longo prazo. Assim, o grau de cristalinidade do polímero que compõe o referido geossintético apresenta-se como um aspecto a ser considerado no estudo da fluência desse material. Quanto mais cristalino é o polímero, maior é sua resistência mecânica e maior é a sua disposição à fluência.

Nível de carregamento

O nível de carregamento ao qual o geossintético está submetido influencia de maneira significativa no seu comportamento. De acordo com Koerner (2005) este pode ser o fator mais significativo nos estudos de fluência de materiais geossintéticos.

A determinação do nível de tensão aplicado durante o ensaio de fluência está relacionada com o tipo de informação solicitada. A caracterização do produto deve contar com a determinação de curvas isócronas (que relacionam carga e deformação) e a curva de ruptura por fluência (que estabelece tempos de ruptura para vários níveis de carregamento). De acordo com Vertematti (2015) o nível de carregamento para determinação das curvas isócronas pode variar entre 10% e 60% de carga de ruptura, enquanto a determinação da curva de ruptura por fluência pode utilizar níveis de carregamento entre 60% e 90% da carga de ruptura.

Temperatura

As condições de temperatura são capazes de promover a aceleração do processo de fluência. Em função da energia cinética presente no corpo molecular, as cadeias poliméricas movimentam-se constantemente. Com o aumento da temperatura essa movimentação cresce. Tal efeito depende das propriedades do polímero.

Quanto à movimentação molecular, as seguintes temperaturas são importantes: a temperatura de fusão cristalina (T_m) e a temperatura de fusão vítrea (T_g). A temperatura de fusão cristalina é a temperatura a partir da qual o polímero se encontra

em seu estado fundido e não apresenta mais nenhuma região cristalina. A temperatura de fusão vítrea é definida como um ponto ou pequena região na escala de temperatura onde o coeficiente de expansão termal sofre uma descontinuidade, caracterizando a passagem do estado físico sólido para um outro conhecido como de mobilidade, quando se torna essencialmente mais deformável. Assim, as deformações geradas por fluência serão mais acentuadas quando o material estiver submetido a temperaturas acima do valor T_g .

Confinamento

O confinamento do geossintético pode impactar no comportamento de fluência do material, uma vez que geossintéticos são materiais compressíveis e apresentam rigidez maior quando confinados. Alguns estudos mostram que as deformações por fluência nesta condição são inferiores às previstas com base em ensaios não confinados (COSTA, 2004). Desta forma, ensaios não confinados podem superestimar as deformações a longo prazo. A Figura 11 compara os resultados de ensaios de fluência sob condição não confinada e confinada (50 kPa de tensão vertical) em geotêxtil não-tecido agulhado de polipropileno (COSTA, 1999). Os resultados confirmam deformações maiores sob condições não confinadas. Sabe-se que a longo prazo essas deformações tendem a se igualar.

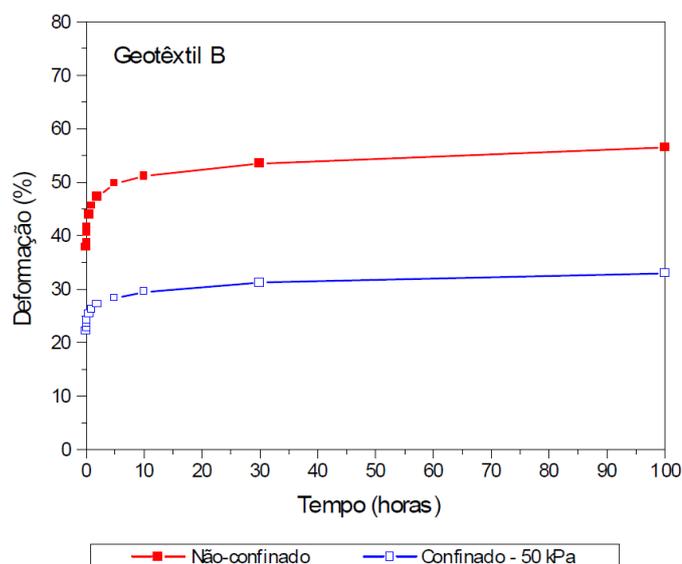


Figura 11- Comparação entre ensaios não-confinados e confinados de fluência com carga de igual a 40% da resistência à tração Fonte: (COSTA, 1999)

1.2.4. Dimensionamento de Sistemas Drenantes

O dimensionamento de sistemas drenantes implica no conhecimento das solicitações impostas pelo projeto, na definição de fatores de segurança adequados e na aplicação dos métodos teóricos de determinação específicos para cada caso. De especial interesse deste trabalho é o dimensionamento de sistemas drenantes verticais como exemplificado na Figura 12.

Para o dimensionamento deste tipo de sistema, utiliza-se o traçado de uma rede de fluxo. Este traçado permite a estimativa da vazão, da poropressão e consequentemente dos gradientes hidráulicos. Definindo a relação entre as linhas de fluxo e equipotenciais (N_f/N_q) e aplicando a fórmula da vazão total em uma região de fluxo, tem-se:

$$q_{calc} = k \cdot h \cdot \left(\frac{N_f}{N_q} \right) \quad (45)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade do solo;

h = altura da estrutura;

N_f = número canais de fluxo;

N_q = número de perdas de carga unitária;

q_{calc} = vazão total.

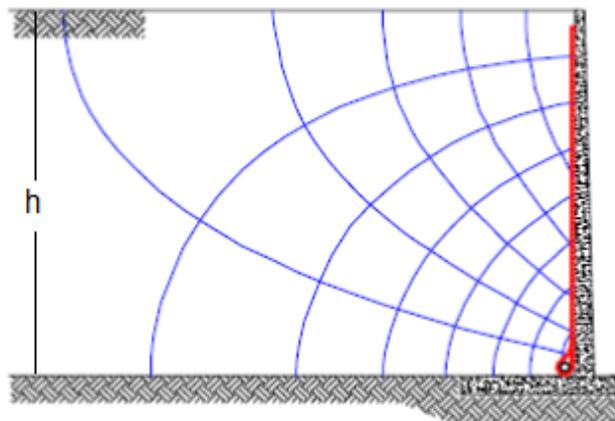


Figura 12 - Sistemas drenantes verticais

1.2.4.1. Vazão unitária de contribuição de projeto (q_d)

A vazão unitária de contribuição de projeto pode ser calculada pela Equação 46:

$$q_d = FS \cdot q_{calc} \quad (46)$$

Onde:

q_d = vazão unitária de contribuição de projeto;

q_{calc} = vazão unitária calculada pelo método teórico;

FS = fator de segurança, que leva em consideração as imperfeições de cálculo.

1.2.4.2. Capacidade de vazão planar do geossintético ($q_{p,i}$)

Obtida a partir do ensaio de transmissividade de acordo com ASTM 4713. Devido à grande variação de geocompostos drenantes, essa informação precisa ser obtida através do catálogo do fabricante para o produto específico.

1.2.4.3. Capacidade de vazão admissível do geossintético (q_{adm})

Os valores de capacidade de vazão planar do geossintético ($q_{p,i}$) são últimos e não consideram adversidades na utilização do geocompostos, ou seja, são valores ideais. Por esse motivo devem haver considerações diversas abrangendo situações de operação do material através da introdução de fatores de redução como:

$$q_{adm} = \frac{q_{p,i}}{FR_{in} \times FR_{fl} \times FR_{cpq} \times FR_{cb}} \quad (47)$$

Onde:

q_{adm} = capacidade de vazão planar admissível do geossintético;

FR_{in} = fator de redução devido a intrusão do geotêxtil filtrante no núcleo drenante;

FR_{fl} = fator de redução devido à deformação por fluência do núcleo drenante ou do geotêxtil filtrante;

FR_{cpq} = fator de redução devido à colmatação química do núcleo drenante;

FR_{cb} = fator de redução devido à colmatação biológica do núcleo drenante.

Os fatores de redução para georredes podem ser estendidos a outros núcleos drenantes de acordo com (KOERNER, 1997).

Tabela 2- Fatores de Redução

Aplicação	FR_{in}	FR_{fl}	FR_{cpq}	FR_{cb}
Campos esportivos	1,0 a 1,2	1,0 a 1,5	1,0 a 1,2	1,1 a 1,3
Camada de interrupção de capilaridade	1,1 a 1,3	1,0 a 1,2	1,0 a 1,5	1,1 a 1,3
Lajes e áreas suspensas	1,2 a 1,4	1,0 a 1,2	1,0 a 1,2	1,1 a 1,3
Muros de contenção, percolação de rochas fraturadas e taludes de solo	1,3 a 1,5	1,2 a 1,4	1,1 a 1,5	1,0 a 1,5
Colchões drenantes	1,3 a 1,5	1,2 a 1,4	1,0 a 1,2	1,0 a 1,2
Drenos superficiais para coberturas de aterros sanitários	1,3 a 1,5	1,1 a 1,4	1,0 a 1,2	1,2 a 1,5
Camada secundária de coleta de chorume (aterros sanitários)	1,5 a 2,0	1,4 a 2,0	1,5 a 2,0	1,5 a 2,0
Camada primária de coleta de chorume	1,5 a 2,0	1,4 a 2,0	1,5 a 2,0	1,5 a 2,0

Fonte: (Koerner, 1997)

1.2.4.4. Especificação do geossintético

A especificação do geossintético drenante baseia-se na correlação:

$$q_{adm} \geq q_d \quad (48)$$

Desta forma, para geocompostos drenantes e geotêxteis não-tecidos espessos tem-se:

$$q_{p,i} \geq FS \times FR_{in} \times FR_{fl} \times FR_{cpq} \times FR_{cb} \times q_{calc} \quad (49)$$

1.2.4.5. Considerações Finais

O conhecimento referente à forma com que a água pode influenciar e modificar o meio levou ao desenvolvimento de muitos estudos cujos resultados contribuíram significativamente ao crescimento da engenharia geotécnica, fomentando a experiência e o sucesso das obras de drenagem. A realização da drenagem para o controle de águas nas estruturas mostrou-se fundamental para a eficiência de qualquer intervenção de engenharia.

Neste capítulo, foram apresentados os conceitos de ciclo hidrológico, drenagem e regime de escoamento em solos. O estudo do fluxo de água através dos solos foi abordado por meio do teorema de Bernoulli bem como da equação de Darcy. A permeabilidade foi destacada como um parâmetro crítico para a avaliação do modo como a água flui através dos solos. A equação de Laplace, que descreve matematicamente fenômenos físicos de grande importância prática, também foi usada para representação de fluxo em solo.

Ainda neste capítulo, foram estabelecidos os conceitos de materiais geossintéticos com um breve histórico e classificação das diversas funções do material. As funções de drenagem deste material foram expostas e as propriedades importantes para essa função foram enunciadas. No fim do capítulo, foi especificado o método de dimensionamento de sistemas drenantes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Introdução

A determinação das propriedades de um material é fundamental para o conhecimento do comportamento e desempenho do mesmo. Inicialmente será feita a caracterização do geocomposto e exibição das informações do fabricante para posterior comparação com os resultados dos ensaios.

Para compreender a performance do material faz-se necessária a fase experimental que conta com a preparação das amostras e execução de ensaios de laboratório. No presente capítulo, será feita a descrição do programa de ensaios executado incluindo o detalhamento das normas usadas, preparação dos corpos de prova, equipamentos utilizados, métodos e procedimentos.

2.2. Geocomposto Drenante

O material ensaiado é o geocomposto MacDrain 2L, produto destinado a drenagem, cujo núcleo é formado por uma geomanta tridimensional e termosoldada a dois geotêxteis não-tecidos em todos os pontos de contato (Figura 13).

A geomanta é fabricada com filamentos espessos de polipropileno, que por processos de extrusão e união por entrelaçamento, formam uma estrutura tridimensional que apresenta cerca de 90% de vazios em sua estrutura. O geotêxtil não-tecido consiste em uma manta têxtil fabricada com filamentos sintéticos dispostos aleatoriamente.



Figura 13 - Amostra geocomposto drenante MacDrain 2L.

Durante a fabricação, ocorre a sobreposição do geotêxtil não-tecido com a geomanta, cuja aderência se dá por meio de processos térmicos. A geomanta atua como núcleo drenante, conduzindo o fluido a ser drenado, enquanto o geotêxtil trabalha como filtro, impedindo que as partículas de solos sejam carregadas para o interior da geomanta, o que pode causar a sua colmatação. As Tabelas 3 a 6 reúnem as informações extraídas do catálogo do produto, referentes à capacidade de vazão, propriedades mecânicas, hidráulicas e características físicas.

Tabela 3 - Informações sobre capacidade de vazão do produto MacDrain 2L.
Capacidade de vazão

Gradiente hidráulico	Drenagem horizontal		Drenagem vertical	
	i=0,01		i=1,00	
Pressão	(l/s).m	(l/h).m	(l/s).m	(l/h).m
5 kPa	0,65	2340	3,2	11520
10 kPa	0,54	1944	2,84	10224
20 kPa	0,15	540	2,17	7812

Fonte: Catálogo Maccaferri

Tabela 4 - Informações sobre as propriedades mecânicas do produto MacDrain 2L.
Propriedades mecânicas do geocomposto

Resistência à tração	kN/m	11
Puncionamento CBR	kN	2
Adesão geotêxtil e núcleo	kgf	20

Fonte: Catálogo Maccaferri

Tabela 5 - Informações sobre as propriedades hidráulicas do produto MacDrain 2L.
Propriedades hidráulicas do geotêxtil

Abertura aparente (O95)	mm	0,40
Permissividade	s ⁻¹	3,20
Permeabilidade	cm/s	0,45

Fonte: Catálogo Maccaferri

Tabela 6 - Características físicas do produto MacDrain 2L.
Características físicas

Espessura	mm	12
Gramatura	g/m ²	650

Fonte: Catálogo Maccaferri

2.3. Programa de Ensaios

A Tabela 7 apresenta o programa de ensaios de caracterização do geocomposto drenante. A maior parte dos ensaios foi realizada e acompanhada no laboratório da Maccaferri em Jundiaí-SP, com exceção dos ensaios de fluência à compressão e compressão a curto prazo que foram executados no Laboratório da TRI – Testing, Research, Consulting and Field Services, no Texas, EUA.

Tabela 7 – Programa de ensaios	
Ensaios de caracterização do material	
Propriedades físicas	
Espessura nominal	
Massa por unidade de área (Gramatura)	
Propriedades mecânicas	
Resistência à tração faixa larga	
Resistência à compressão	
Resistência ao puncionamento	
Propriedades hidráulicas	
Permeabilidade normal e permissividade	
Permeabilidade planar e transmissividade	
Propriedades de durabilidade	
Fluência à compressão	

2.3.1. Ensaio para Determinação da Espessura Nominal

A norma adotada no ensaio é a NBR 12569, que determina a espessura nominal do geossintético sob determinados níveis de pressão de carregamento. Para a execução dos ensaios, foram obtidos dez corpos de prova com lado 10 cm, cortados e condicionados conforme a NBR 12593. A Figura 14 apresenta o detalhe do corte dos corpos de prova.



Figura 14 - Corte dos corpos de prova.

O sistema de aplicação de carga consiste em um cilindro com superfícies de 25 cm², da marca Equitecs, como mostra a Figura 15. Acoplado ao equipamento, existe um relógio de precisão.

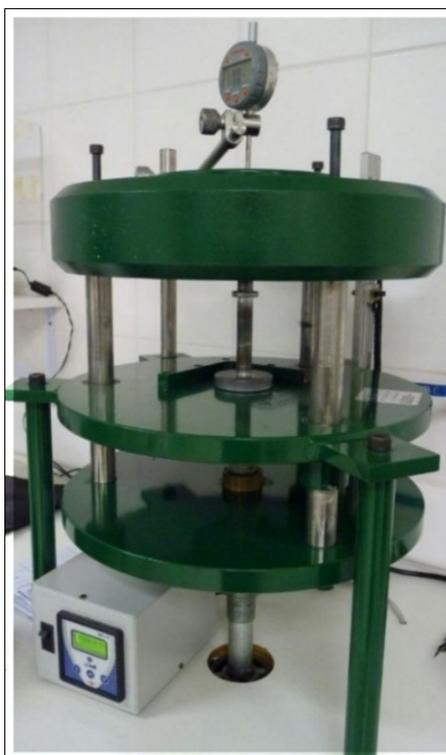


Figura 15 - Equipamento para ensaio de espessura nominal.

Como mencionado no Capítulo 1, a espessura nominal (t_{GT}), em milímetros, é calculada registrando a distância interna entre as duas placas rígidas, que comprimem

os corpos de prova sob tensão vertical de 2 kPa. De acordo com a NBR 12569, a área do cilindro deve ser inferior à área do corpo de prova.

A medição da espessura de cada corpo de prova para o nível de tensão de 2 kPa, é feita da seguinte maneira: a amostra é colocada sobre a placa de referência, tomando-se as devidas precauções de modo que nenhum ponto do cilindro aplicador de carga estivesse a menos de 2 cm da borda do corpo de prova.

O cilindro aplicador de carga é colocado em contato com o corpo de prova e a aplicação da carga é realizada (Figura 16). A leitura da medida da espessura é feita após 30 s.

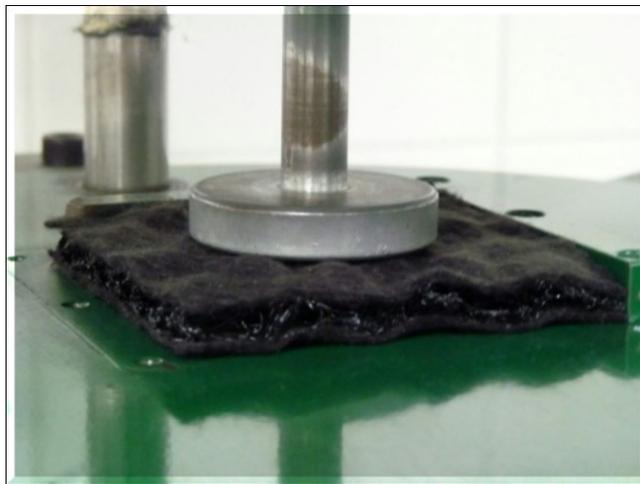


Figura 16 - Ensaio de espessura nominal.

Para a definição da espessura, é calculada a média aritmética dos valores obtidos e determinado o coeficiente de variação, de acordo com a equação:

$$cv = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{gi} - T_g)^2}{n - 1}}}{T_g} \times 100 \quad (50)$$

Onde:

cv = coeficiente de variação, em porcentagem;

T_{gi} = espessura do i -ésimo corpo de prova, em mm;

T_g = espessura, em mm;

n = número de corpos de prova.

2.3.2. Ensaio para Determinação da Massa por Unidade de Área (Gramatura)

A norma adotada no ensaio é a NBR 12568, que descreve o método para determinação da massa por unidade de área de geossintéticos.

Para a determinação da gramatura, foram obtidos dez corpos de quadrados com lado igual a 10 cm, cortados e condicionados conforme a NBR 12593. O equipamento utilizado consiste em uma balança da marca Bel Engineering, para pesagem dos corpos de prova (Figura 17).



Figura 17 - Balança para ensaio de gramatura.

A gramatura é obtida através da pesagem dos corpos de prova extraídos através de cortes distribuídos sobre toda a largura da amostra.

Após a pesagem de cada corpo de prova com dimensões conhecidas, determina-se a gramatura de acordo com a equação:

$$\mu_A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_{Ai}}{n} \quad (51)$$

Onde:

$$\mu_{Ai} = \frac{\mu_i}{A_i}$$

μ_i = massa do i-ésimo corpo de prova, em gramas;

A_i = área do i-ésimo corpo de prova, em metros quadrados;

n = número de corpos de prova;

μ_{Ai} = massa por unidade de área, em gramas por metro quadrado.

O coeficiente de variação é calculado pela expressão:

$$cv = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{Ai} - \mu_A)^2}{n - 1}} \times 100 \times \frac{1}{\mu_A} \quad (52)$$

Onde:

cv = coeficiente de variação, em porcentagem.

2.3.3. Resistência à tração faixa larga (não confinada)

Neste ensaio a norma adotada foi a NBR 10319. Para a determinação da resistência à tração, foram utilizados doze corpos de prova secos, seis no sentido da fabricação (longitudinal) e seis no sentido transversal, com dimensões de 25 cm x 20 cm, cortados e condicionados conforme a NBR 12593.

O equipamento adotado consiste em uma máquina de tração (MTS QTest25) capaz de assegurar variações uniformes do comprimento da amostra ao longo do tempo, com um sistema de garras rígidas e paralelas com distância de 10 cm entre elas. A Figura 18 ilustra o equipamento utilizado no programa de ensaios. E a Figura 19 ilustra o comportamento do material durante o ensaio.

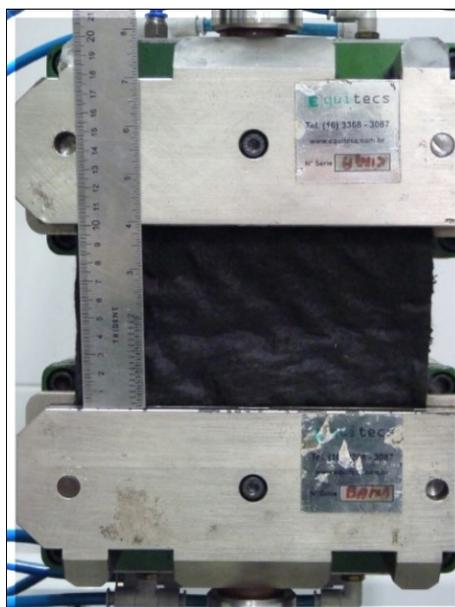


Figura 18 - Equipamento para ensaio de tração faixa larga.

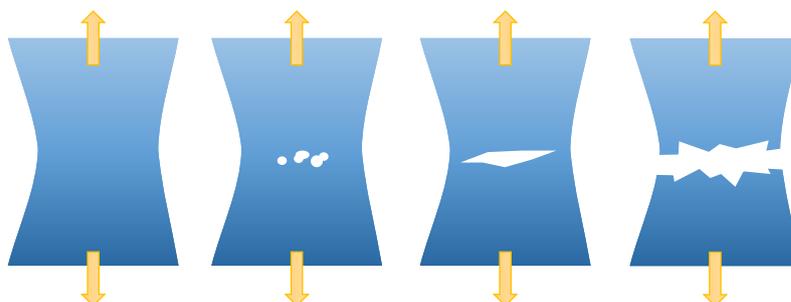


Figura 19 - Esquema do comportamento do geocomposto durante o ensaio de tração.

As cargas aplicadas e os alongamentos correspondentes são registrados, e os resultados são expressos em gráficos que relacionam força por unidade de comprimento (kN/m) e deformação (%).

Para cada corpo de prova foi feita a alocação e o ajuste inicial entre as garras de tração na faixa de 10 cm. O procedimento de ajuste do corpo de prova foi feito cuidadosamente para garantir a centralização e orientação, de tal forma que o seu comprimento estivesse posicionado paralelamente à direção de aplicação das cargas.

Inicialmente foi imposto um pré-estiramento ao corpo de prova com aplicação de tensão uniforme inicial ao longo da amostra. Em seguida, foi feito o ajuste do sistema de leitura dos deslocamentos entre as garras. Cada amostra foi tracionada à velocidade constante e foram registrados os deslocamentos e as cargas aplicadas até a ruptura. A Figura 20 apresenta detalhes da execução dos ensaios de tração de faixa larga.

Para a obtenção da curva carga (α) *versus* alongamento (ϵ), são utilizadas as seguintes equações:

$$\alpha = F/B \quad (53)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \times 100 \quad (54)$$

Onde:

α = carga aplicada, em kN /m;

F = força de tração aplicada kN;

B = largura do corpo de prova, em m;

ΔL = variação do comprimento em relação ao espaçamento-base, em mm, correspondente a uma dada carga;

L = espaçamento inicial entre garras, em mm;

ϵ = alongamento, em %.

A resistência à tração é dada pela média aritmética dos valores de resistência à tração máxima (α_{max}) de cada corpo de prova ensaiado.

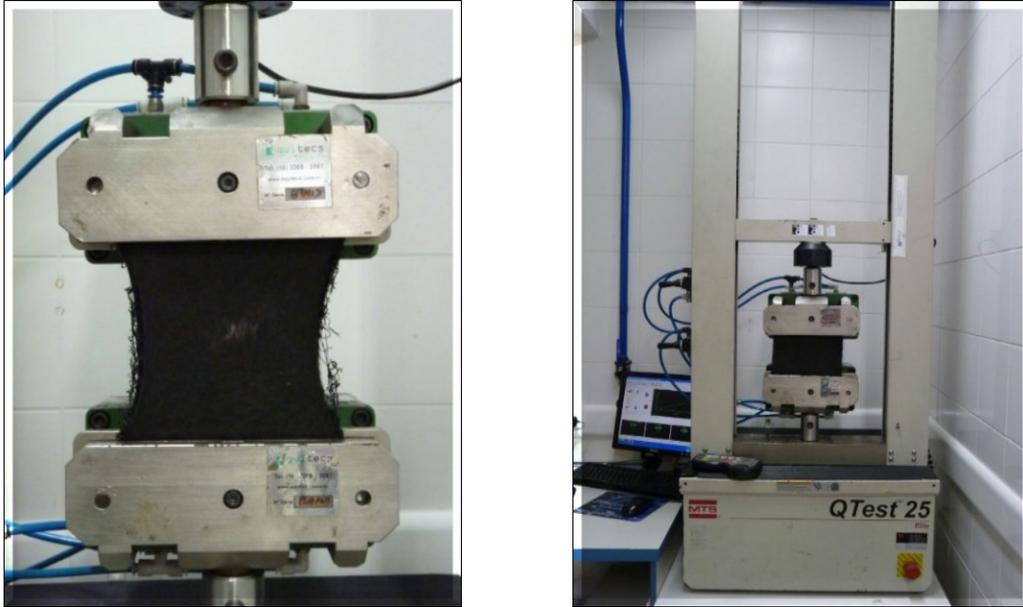


Figura 20 - Execução do ensaio de tração faixa larga.

Finalmente, determina-se o coeficiente de variação pela expressão:

$$cv = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_{m\acute{a}x\ i} - \alpha_{m\acute{a}x})^2}{n - 1}}}{\alpha_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (55)$$

Onde:

cv = coeficiente de variação, em porcentagem;

$\alpha_{m\acute{a}x\ i}$ = resistência à tração do i -ésimo corpo de prova, em kN/m;

n = número de corpos de prova.

2.3.4. Resistência à compressão

A norma adotada no ensaio de resistência à compressão é a ASTM D 6364, que estabelece os procedimentos para avaliação das deformações de um geossintético sob carga de compressão de curto prazo.

Para a execução desses ensaios, foram obtidos cinco corpos de prova com as dimensões 120 mm x 120 mm. As amostras foram mantidas à temperatura controlada de $21 \pm 1^\circ \text{C}$ e uma umidade relativa entre 50% e 70%.

O equipamento utilizado consiste em uma máquina de aplicação de carga capaz de promover a compressão a uma taxa constante de deformação de 10% da espessura nominal do corpo de prova por minuto, com a amostra entre placas de metal paralelas de uma estrutura de sustentação como esquematizado na Figura 21.

No ensaio foi usada uma placa fixa de dimensão maior que a amostra, plana, lisa e uniformemente apoiada. Placa móvel de espessura e resistência suficiente para excluir qualquer flexão durante o carregamento, paralela à placa fixa e ligada ao mecanismo de compressão.

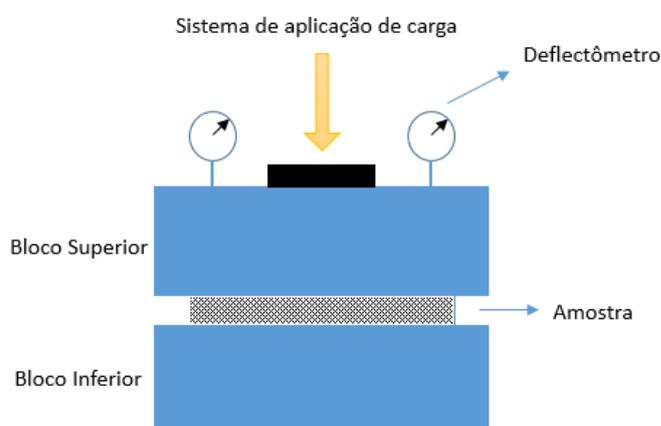


Figura 21 - Esquema do comportamento do geocomposto durante o ensaio de compressão.

Durante o ensaio, são registradas as cargas aplicadas e a compressão correspondente. Os resultados são expressos em gráficos que relacionam força por unidade de comprimento (kN/m) e deformação (%). O limite de elasticidade à compressão é avaliado a partir da relação tensão *versus* deformação para aqueles materiais que apresentam um ponto de escoamento à compressão bem definido.

O comprimento, a largura e a espessura da amostra foram medidos com equipamento cuja precisão era $\pm 1\%$. A espessura nominal, determinada utilizando a ASTM D5199, foi usada para estabelecer a pressão mínima em que geocomposto permanece estável.

Cada corpo de prova de teste foi colocado sobre a placa de fundo e centrada em relação ao eixo do mecanismo de carregamento. O mecanismo de carga move-se a uma velocidade constante de encontro ao corpo de prova. O mecanismo registra a tensão aplicada e a correspondente deformação. O procedimento segue até que um

ponto de escoamento é alcançado e/ou até que o limite de deformação máximo aceitável for atingido, o que ocorrer primeiro.

Em seguida, a amostra de ensaio foi descarregada e removida do mecanismo de carregamento. O mesmo procedimento foi repetido para todos os corpos de prova. A partir dos resultados, é construída a curva carga *versus* alongamento. A Figura 22 apresenta uma curva típica deste ensaio. Observa-se que existe um trecho AC que não representa uma propriedade do material. É uma imprecisão causada pelo alinhamento ou assentamento da amostra. Se isto ocorrer, esta imprecisão deve ser corrigida, estendendo-se a porção mais íngreme da curva ao ponto zero no eixo de deformação (ponto B). Assim, pode-se obter os valores corretos de parâmetros tais como a tensão, o ponto de escoamento, etc.

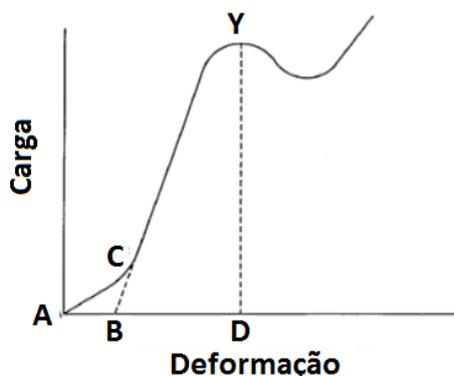


Figura 22 - Curva típica tensão-deformação - ensaio de compressão a curto prazo.
Fonte: ASTM D 6364

A carga e o alongamento correspondente são calculados pelas expressões:

$$N = P \cdot \cos(\alpha) \quad (56)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (57)$$

Onde:

N= carga normal kN;

P = carga aplicada, em kN /m;

α = ângulo em relação à horizontal da superfície das placas de metal, em graus;

ΔL = variação do comprimento em relação espessura inicial, em mm, correspondente a uma dada carga;

L = espessura inicial, em mm;

ε = compressão, em %.

A resistência à compressão é dada pela média aritmética dos valores de resistência à compressão máxima (N_{max}) de cada corpo de prova ensaiado.

O coeficiente de variação é dado por:

$$cv = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{m\acute{a}x\ i} - N_{m\acute{a}x})^2}{n - 1}}}{N_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (58)$$

Onde:

cv = coeficiente de variação, em porcentagem;

$N_{m\acute{a}x\ i}$ = resistência à compressão do i-ésimo corpo de prova, em kN/m;

n = Número de corpos de prova.

2.3.5. Resistência ao puncionamento (CBR)

A norma adotada no ensaio para determinação da resistência ao puncionamento é a NBR 13359, que determina a resistência ao puncionamento estático de geotêxteis e produtos correlatos, usando punção em um plano de seção circular.

Para a execução destes ensaios, foram utilizados quatro corpos prova secos e circulares com diâmetro de 25 cm, cortados e condicionados conforme a NBR 12593.

O equipamento consiste em uma máquina de tração/compressão (MTS QTest25) capaz de assegurar variações uniformes de penetração ao longo do tempo (tipo CRE – Constante Ratio of Extension), permitindo uma penetração total de pelo menos 100 mm. O equipamento inclui punção em aço inoxidável com diâmetro de 50 mm e sistema de fixação. Instrumentos de medida permitem a aferição dos dados relativos a cargas aplicadas e deslocamentos correspondentes ao longo do ensaio. A Figura 23 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios de puncionamento.



Figura 23 - Equipamento para ensaio de puncionamento.

Esforços de compressão localizados podem gerar perfurações nos geossintéticos. A verificação deste tipo de resistência é feita pela fixação de um corpo de prova à borda de um cilindro rígido submetendo-o a uma força estática, como mostra a Figura 24. O deslocamento do punção deve ocorrer sob velocidade constante, perpendicularmente ao corpo de prova e sobre o seu eixo central.

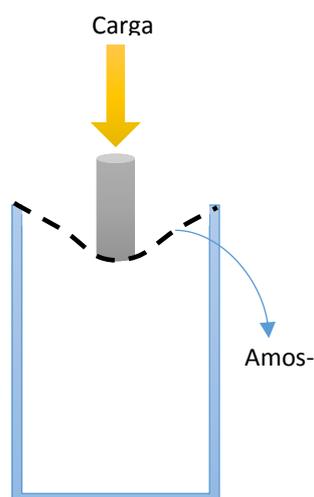


Figura 24 - Esquema ilustrativo do ensaio de puncionamento CBR.

Inicialmente, foi feita a regulagem da velocidade de deslocamento definida em 5 mm/m. Em seguida, o corpo de prova foi ajustado ao sistema de fixação conforme mostra a Figura 25. O sistema de fixação foi posicionado sob o punção e travado na

base. O punção é posto em contato com o corpo de prova e o puncionamento é iniciado. Os registros dos deslocamentos, em mm, e da força de puncionamento correspondente, em kN, foram realizados. O procedimento foi repetido para os demais corpos de prova.



Figura 25 - Execução do ensaio de puncionamento.

O resultado do ensaio consiste na representação gráfica dos valores registrados de força de puncionamento (kN) e deslocamento correspondente (mm).

A resistência ao puncionamento é calculada pela média aritmética dos valores de resistência ao puncionamento de cada corpo de prova.

O coeficiente de variação é definido por:

$$\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Fp_{m\acute{a}x} - \overline{Fp}_{m\acute{a}x})^2}{n-1}}}{Fp_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (59)$$

Onde:

cv = coeficiente de variação, em porcentagem;

$Fp_{m\acute{a}x}$ = resistência ao puncionamento do i-ésimo ensaio;

$\overline{Fp}_{m\acute{a}x}$ = resistência ao puncionamento a amostra;

n = número de corpos de prova.

A penetração máxima é dada pela média aritmética das penetrações máximas de cada corpo de prova.

2.3.6. Permeabilidade normal e permissividade

Para a determinação da permeabilidade normal e da permissividade são adotadas as normas ASTM D4991, que determinam as características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento de um geotêxtil.

A fase de preparação dos corpos de prova constou de quatro corpos de prova circulares com diâmetro de 8 cm, cortados e condicionados conforme a norma NBR 12593. Num primeiro momento foi utilizada somente uma camada de geotêxtil. Adicionalmente também foram realizados ensaios com camadas duplas de geotêxtil.

O equipamento adotado consiste em um permeômetro transparente (Figura 26), composto por dois cilindros verticais de mesmo diâmetro, interligados.



Figura 26 - Equipamento para ensaio de permissividade.

Este ensaio tem o objetivo de determinar a permissividade de geotêxteis usando procedimento de teste com carga variável. Uma coluna de água flui através do geotêxtil e as leituras de mudanças de carga em função do tempo são tomadas. A taxa de fluxo de água através do geotêxtil deve ser lenta o suficiente para obter leituras precisas.

Antes de ensaiados, os corpos de provas foram imersos e saturados por um período de 12 horas. O corpo de prova foi alocado e a estanqueidade do sistema foi verificada, como mostra a Figura 27.



Figura 27 - Ensaio de permissividade - alocação do corpo de prova.

Para cada corpo de prova ensaiado, foi verificada a equalização da carga hidráulica e, em seguida, a válvula foi fechada, e a aplicação da carga hidráulica foi executada.

A temperatura da água e do ambiente foram registradas. Os instrumentos de leitura do equipamento foram acionados em seguida à abertura da válvula. O ensaio é encerrado quando verificada a nulidade da perda de carga e a velocidade do fluxo.

Finalizado o ensaio, calcula-se a permissividade pela equação:

$$\psi = \frac{a}{A_t} \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) R_t \quad (60)$$

Onde:

$A = \frac{\pi D^2}{4}$ área do corpo de prova, em mm²;

$a = \frac{\pi d^2}{4}$ área da seção transversal do tubo vertical acima da amostra;

t = tempo para a coluna d'água ir de h_0 para h_1 , em segundos;

h_0 = carga inicial (80 mm);

h_1 = carga final (20 mm);

R_t = fator de correção da temperatura;

$$R_t = \frac{u_t}{u_{20c}} \quad (61)$$

u_t = viscosidade da água à temperatura de teste, tal como determinado a partir da Tabela 8;

u_{20c} = Viscosidade da água a 20 ° C.

Tabela 8 - Valores de viscosidade da água - APoiseuille = $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ **Viscosidade da água em função da temperatura**

Temperatura °C	Viscosidade (Poiseuille) ^A
0	1.7921×10^{-3}
1	1.7313×10^{-3}
2	1.6278×10^{-3}
3	1.6191×10^{-3}
4	1.5674×10^{-3}
5	1.5188×10^{-3}
6	1.4728×10^{-3}
7	1.4284×10^{-3}
8	1.3860×10^{-3}
9	1.3462×10^{-3}
10	1.3077×10^{-3}
11	1.2713×10^{-3}
12	1.2363×10^{-3}
13	1.2028×10^{-3}
14	1.1709×10^{-3}
15	1.1404×10^{-3}
16	1.1111×10^{-3}
17	1.0828×10^{-3}
18	1.0559×10^{-3}
19	1.0299×10^{-3}
20	1.0050×10^{-3}
21	0.9810×10^{-3}
22	0.9579×10^{-3}
23	0.9358×10^{-3}
24	0.9142×10^{-3}
25	0.8937×10^{-3}

Fonte: ASTM 4491

2.3.7. Permeabilidade planar e transmissividade

A norma adotada no ensaio é a que determina a capacidade de fluxo sob carga hidráulica constante no plano do geossintético ASTM 4716. Na fase de preparação dos corpos de prova, foram obtidos três corpos de prova com o comprimento paralelo

à direção de fabricação e três corpos de prova com o comprimento paralelo à direção transversal à de fabricação com dimensões de 30 cm x 30 cm, cortados e condicionados conforme a NBR 12593. Ressalta-se que as amostras devem ser manuseadas o menos possível para evitar alteração de sua estrutura e devem ser mantidas em posição horizontal, sem dobras e sobrecarga. Deve ser feita a imersão dos corpos de prova em água por pelo menos 12 hs.

O equipamento utilizado está apresentado na Figura 28. Este equipamento é capaz de manter a carga hidráulica constante a diferentes níveis correspondendo a gradientes hidráulicos de 0,01; 0,1 e 1. O mecanismo de carregamento é capaz de manter tensões de 10, 20, 50 e 100 kPa, com acurácia de 5%.

A temperatura da água deve ser igual ou superior à temperatura do ambiente de laboratório variando entre 18°C e 22°C. É necessário fazer a correção de temperatura considerando como parâmetro a temperatura de 20°C. Como essas correções são relacionadas apenas para fluxo laminar, é aconselhável trabalhar com temperaturas mais próximas possíveis a 20°C. A Figura 29 mostra o momento de verificação da temperatura da água.

Cabe salientar que caso existam partículas sólidas suspensas visíveis a olho nu, ou se sólidos acumulados sobre a amostra estiverem inibindo o fluxo, a água deve ser filtrada.



Figura 28 - Equipamento para ensaio de transmissividade.



Figura 29 - Verificação de temperatura da água.

A permeabilidade no plano (k_p) é função do esforço normal aplicado. Sendo assim, à medida que o geossintético comprime, a vazão no plano diminui (Figura 30). Como o volume percolado é função da espessura do geossintético, define-se a transmissividade (θ), como o produto da permeabilidade planar do geossintético pela sua espessura sob certa tensão normal de confinamento. A transmissibilidade exprime a capacidade que o geossintético possui de conduzir fluido no seu próprio plano, expressa em cm^2/s :

$$\theta = k_p \cdot t \quad (62)$$

Onde:

k_p = coeficiente de permeabilidade no plano do geotêxtil;
 t = espessura do geossintético.

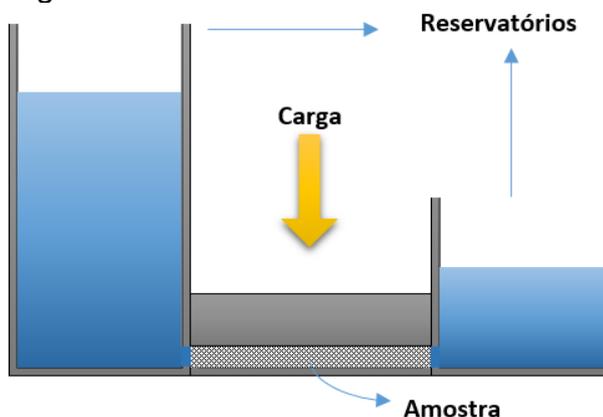


Figura 30 - Esquema para ensaio de transmissividade.

O procedimento de ensaio consistiu nas seguintes etapas:

1. Foi efetuada a medição da espessura nominal de cada corpo de prova sob tensão de 2 kPa.
2. Após esta verificação, o material e o sistema aplicador de tensão foram posicionados.
3. Em seguida, foi aplicada a tensão normal de 2 kPa e aguardado o tempo necessário para estabilização do sistema.
4. O reservatório a montante foi cheio fazendo a água fluir pelo corpo de prova com a finalidade de remover o ar.
5. Foi ajustada a tensão normal até a tensão de interesse (10 kPa) e aguardada a estabilização.
6. O reservatório a montante foi cheio até o nível correspondente ao gradiente hidráulico 0,01, e foi realizada a medida de vazão de água passando correspondente a este gradiente.
7. Em seguida, os últimos passos foram repetidos para os gradientes 0,1 e 1.

O processo é repetido para as tensões de 20, 50 e 100 kPa em todos os corpos de prova.



Figura 31 - Realização do ensaio de transmissividade.

A velocidade de fluxo no plano ($q_{\text{tensão/gradiente}}$) a 20°C (em m^2/s) para cada gradiente hidráulico e tensão normal, pode ser determinada pelas equações:

$$q_{\frac{\text{tensão}}{\text{gradiente}}} = \frac{V_t \times R_T}{W} \quad (63)$$

$$V_{t=} = \frac{V}{t} \quad (64)$$

$$R_T = \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = \frac{1,763}{1 + 0,0337 \times T + 0,0002 \times T^2} \quad (65)$$

$$\eta_T = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \times T + 0,0002 \times T^2} \quad (66)$$

R_T = fator de correção para 20°C;

η_T = viscosidade dinâmica da água à temperatura T, em MPa/s;

T = temperatura da água em °C;

η_{20} = viscosidade dinâmica da água a 20°C, em MPa/s;

V = volume medido, em metros cúbicos;

T = tempo medido para obtenção do volume, em segundos;

W = largura ensaiada do corpo de prova, em metros.

2.3.8. Fluência à compressão – Método SIM

A norma adotada no ensaio é a ASTM D7361 que estabelece o método de ensaio acelerado para determinação de fluência à compressão de geossintéticos baseado na superposição de tempo e temperatura usando o método SIM (*Stepped Isothermal Method*).

Os corpos de prova utilizados para testes SIM e R+H (*Ramp and Hold*), ou seja, ensaio de compressão inicial em que as etapas de carregamento inicial são aplicadas e mantidas, paulatinamente, até atingir a carga de ensaio desejada) devem ser tomados a partir das mesmas dimensões de corpos de prova de 120 mm × 120 mm.

O equipamento de teste deve possuir as seguintes capacidades:

- Medição de carga e controle;
- Medição de tensão;
- Medição de tempo;
- Medição de temperatura e instalações de controle.

Além disso, deve possuir câmara de temperatura para controlar as condições

de ensaio. A Figura 32 apresenta o equipamento para ensaio de fluência à compressão.

O método SIM é um procedimento em etapas, onde alterações de temperatura são aplicadas para acelerar características de fluência viscoelásticas. Durante o ensaio, a tensão e a carga são monitoradas em função do tempo. Este método é aplicado para reduzir problemas de variabilidade do material, uma vez que é utilizado um único corpo de prova. Para aplicação do método, de acordo com (THORTON, 1998) presume-se que o material possui comportamento de viscoelasticidade linear. Desta maneira, pode-se aplicar o princípio de superposição de Boltzmann, onde o evento independente é a temperatura e não a carga. Neste método, é feita uma variação da temperatura, portanto o ensaio é feito em ambiente controlado.



Figura 32- Equipamento para ensaio de fluência à compressão - Cortesia TRI Ambiental do Brasil

A Figura 33 apresenta um resultado típico de ensaio de fluência à compressão executado para uma georrede usando o método SIM (YEO, 2007). Após a obtenção dos dados de teste, a curva principal de fluência é gerada pelo deslocamento na horizontal da curva de deformação em cada uma das temperaturas de ensaio ao longo do eixo de tempo de registro.

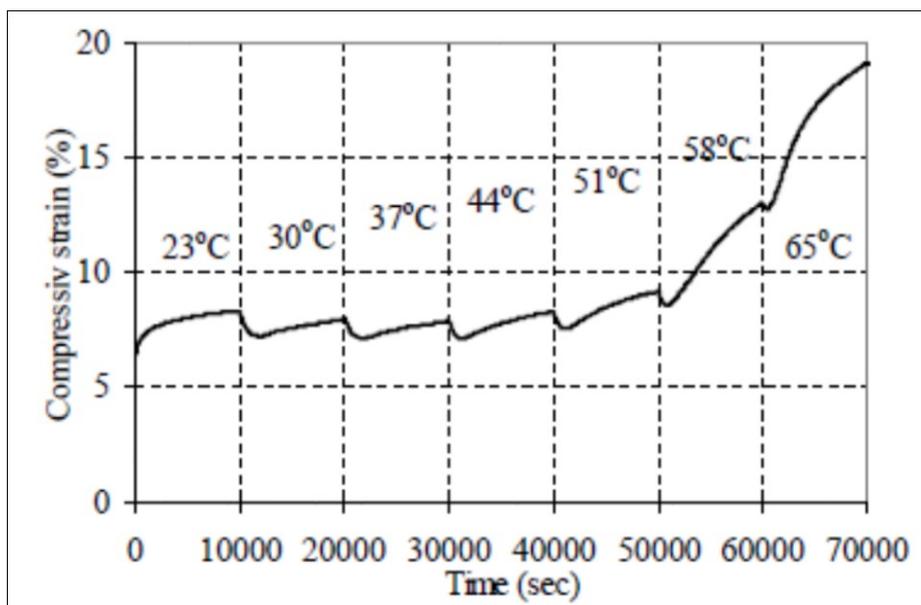


Figura 33 - Ensaio de fluência à compressão em georrede. Fonte: (Yeo, 2007).

Na Figura 34, é apresentado um exemplo de obtenção da curva de fluência acelerada pelo método SIM. Em cada passo S_n exibido na Figura 34 (S1, S2, etc) deve ser realizado o acréscimo de temperatura. Observa-se uma redução da tensão de compressão provocada provavelmente pela expansão térmica do geossintético ensaiado que atua na direção oposta da carga de compressão. Em seguida, é feito o registro do tempo de cada fase (Figura 34.b). As curvas de fluência com as temperaturas elevadas são escalonadas por subtração a partir de cada etapa (S_i), como mostrado na Figura 34 (c). Uma vez que a parte inicial de cada curva é afetada pela expansão térmica do corpo de prova, essa parte da curva é eliminada. A curva principal de fluência é então gerada pelos deslocamentos horizontal e vertical, como mostrado na Figura 34 (d).

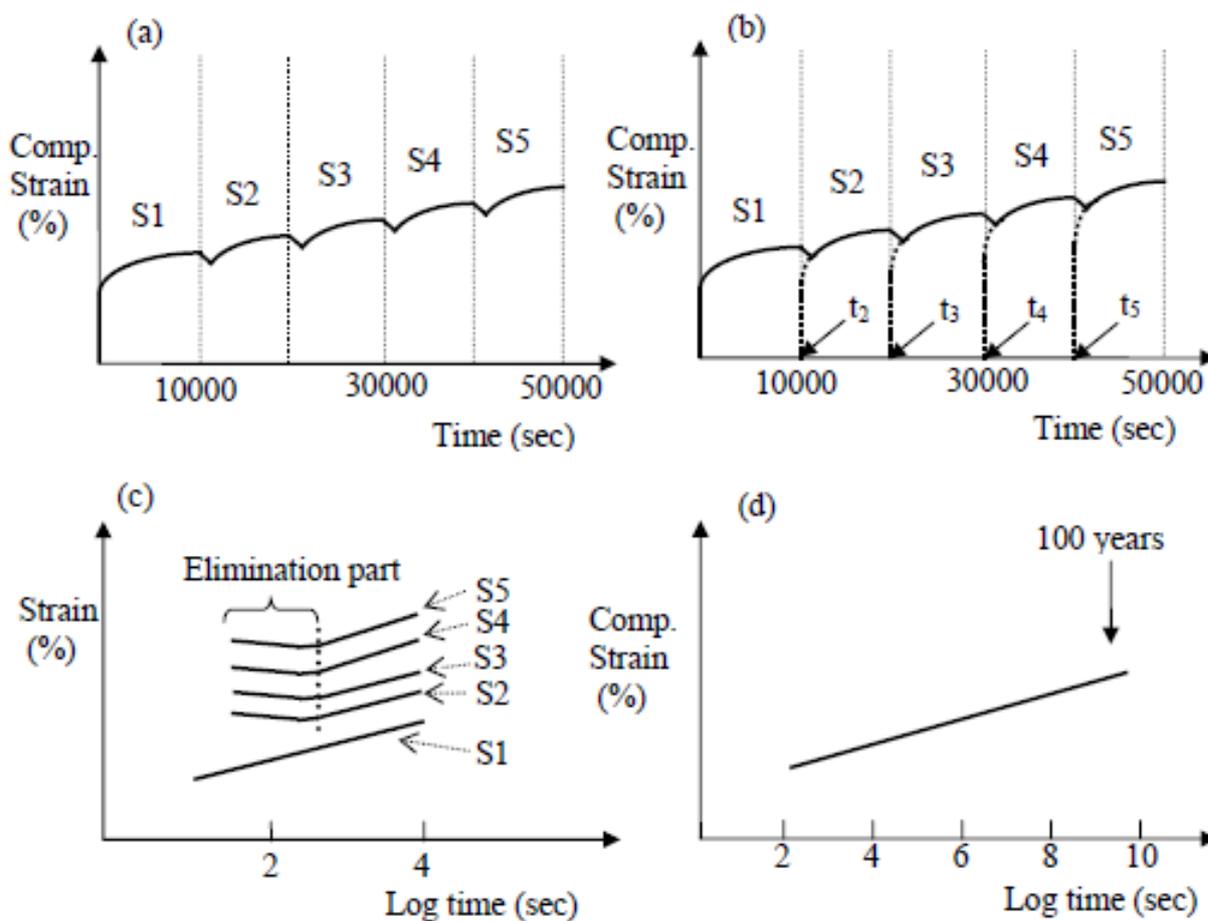


Figura 34 - Obtenção da curva de fluência acelerada pelo método SIM. Fonte: (Yeo, 2007).

O controle da taxa de carga inicial (em kN/min), aplicada até o valor da carga desejada para o ensaio, deve atingir uma estreita faixa de taxas de deformação conforme acordado, geralmente 10% da espessura nominal do corpo de prova por minuto ou $1,0 \pm 0,1$ mm/min. A fase inicial do ensaio (R + H) corresponde a um ensaio de compressão de curta duração necessário para o alcance da tensão desejada. Na presente pesquisa, a tensão foi de 50 kPa.

O alcance das cargas de ensaio para testes SIM e R+H foi atingido com equipamento de $\pm 2\%$ de precisão com manutenção da carga alcançada dentro de $\pm 0,5\%$ dos seus valores durante todo o teste. É importante salientar que uma breve ultrapassagem da carga alvo com variação de $\pm 2\%$ limitado a um tempo de duração de 1 a 2 segundos é aceitável para sistemas de controle de carga.

O posicionamento do corpo de prova foi feito de modo a garantir o alinhamento do material com as placas e com o eixo de carga. Além disso, foi assegurada a calibração da célula de carga utilizada, a fim de medir com precisão o intervalo de cargas

de compressão previstos. Verificou-se, também, a calibração do extensômetro a fim de medir com precisão o intervalo de deformação de compressão.

Os registros de tempo, carga e deformação foram colhidos a uma taxa mínima de duas leituras por segundo durante a fase inicial de testes e a uma taxa mínima de duas leituras por minuto durante o restante do ensaio a carga constante. A Figura 35 mostra o ensaio de fluência SIM à compressão.



Figura 35 - Ensaio de fluência SIM à compressão - Cortesia TRI Ambiental do Brasil.

Para cada amostra, é traçada a curva tensão (fluência compressiva) vs. deformação, utilizando o método de módulo de compensação. Em seguida, traça-se a deformação devido à fluência de compressão, módulo de deformação à compressão, temperatura e tensão como uma função do tempo linear. Deve ser verificada cada parcela para identificar se os objetivos do teste foram alcançados.

O traçado do módulo de compressão de fluência *versus* logaritmo do tempo após o reescalonamento dos segmentos de temperatura é realizado para se obter a correspondência de inclinação. A curva módulo de compressão de fluência (ou tensão) *versus* logaritmo do tempo é redesenhada após reescalonamento.

A adaptação de deslocamentos verticais e horizontais geralmente requer alguma iteração para alcançar curvas mestre. Também deve-se calcular a temperatura média e uma medida de variação, como desvio padrão ou valores extremos para cada etapa da temperatura.

2.3.9. Considerações Finais

O presente capítulo apresentou uma breve descrição dos procedimentos dos ensaios realizados para a obtenção das características físicas, mecânicas, hidráulicas e de durabilidade do geocomposto MacDrain 2L.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados dos ensaios, buscando-se os parâmetros representativos do geocomposto para a adoção nas análises numéricas.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Neste Capítulo, serão exibidos os resultados do programa de ensaios de caracterização executados com o geocomposto drenante.

O programa experimental consistiu em ensaios para a determinação das propriedades físicas (espessura nominal, gramatura), mecânicas (resistência à tração faixa larga, resistência à compressão e ao puncionamento), hidráulicas (permissividade e transmissividade) e de durabilidade (fluência à compressão) do geocomposto drenante. Adicionalmente, são apresentadas correlações para a previsão da vazão a longo prazo.

3.2. Espessura nominal

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios de espessura nominal, realizados em dez corpos de prova, segundo a norma NBR 12569.

Tabela 9- Resultados dos ensaios de espessura nominal

Corpo de Prova	2 kPa
1	12,21
2	12,14
3	11,21
4	11,47
5	12,63
6	12,57
7	11,83
8	11,87
9	11,33
10	12,59
Média	11,99
Desvio Padrão	0,53
Coefficiente de variação	4,42

Os resultados indicaram que a espessura nominal média é de 11,99 mm, com uma pequena variação nos resultados, que pode ser atribuída ao processo de fabricação. Para efeitos práticos, a espessura do geocomposto considerada no presente trabalho será de 12,0 mm.

3.3. Massa por unidade de área (Gramatura)

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de massa por unidade de área realizados nos dez corpos de prova estão reunidos na Tabela 10. A norma adotada no ensaio foi a NBR 12568 e a média dos valores de gramatura encontrados foi de 707 g/m². Mais uma vez, a variação encontrada nas amostras pode ser atribuída ao processo de fabricação do material, estando a acima do padrão especificado.

Tabela 10- Resultado do ensaio de gramatura

Corpo de Prova	Gramatura (g/m²)
1	744
2	653
3	676
4	674
5	748
6	659
7	730
8	731
9	737
10	721
Média	707
Desvio Padrão	37,30

3.4. Resistência à tração de faixa larga (não confinada)

Para a determinação da resistência à tração, foram ensaiados 12 corpos de prova, sendo seis na direção da fabricação (longitudinal) e seis na direção transversal.

A Tabela 11 reúne os resultados dos ensaios executados na direção longitudinal. Observa-se que a média de resistência à tração longitudinal foi de 11,37 kN/m, com uma deformação média de 45%.

Tabela 11-- Resultados dos ensaios de tração de faixa larga - direção longitudinal

Corpo de Prova	Carga kN	Rest. Tração N/mm	Deformação na Resistência Máxima (%)	Deformação na ruptura (50% da res. máx.) (%)
1	2,18	10,92	48	60
2	2,18	10,91	48	61
3	2,49	12,45	46	63
4	2,02	10,11	43	61
5	2,12	10,62	42	59
6	2,64	13,19	45	53
Desvio Padrão	0,24	1,19	2	3
Média	2,27	11,37	45	59

Os resultados obtidos para os corpos de prova ensaiados na direção transversal encontram-se na Tabela 12. A média de resistência à tração transversal foi de 12,24 kN/m, próxima à obtida na direção longitudinal, indicando que o geocomposto é bidirecional.

Tabela 12- Resultados dos ensaios de tração faixa larga - direção transversal

Corpo de Prova	Carga kN	Rest. Tração N/mm	Deformação na Resis- tência Máxima (%)	Deformação na ruptura (50% da res. máx.) (%)
1	2,54	12,72	72	105
2	2,81	14,05	69	83
3	2,68	13,38	70	85
4	2,18	10,88	64	77
5	2,28	11,38	65	79
6	2,21	11,03	61	78
Desvio Padrão	0,27	1,33	4	11
Média	2,45	12,24	67	85

3.5. Resistência à compressão

Os ensaios de compressão foram realizados em cinco corpos de prova de uma mesma amostra de geocomposto. As amostras foram posicionadas entre as placas paralelas de uma estrutura de sustentação, e cargas de compressão foram aplicadas a uma velocidade constante. Este ensaio foi realizado no laboratório do TRI Environmental, Inc. em Austin, Texas, EUA com apoio e gerenciamento pelo TRI Ambiental do Brasil Ltda.

A norma ASTM D 6364 prevê uma correção no trecho inicial das curvas de ensaio. O ensaio de compressão foi conduzido até a tensão aproximada de 9.000 kPa em função das especificações do maquinário utilizado. As curvas já devidamente corrigidas no trecho inicial estão apresentadas na Figura 36.

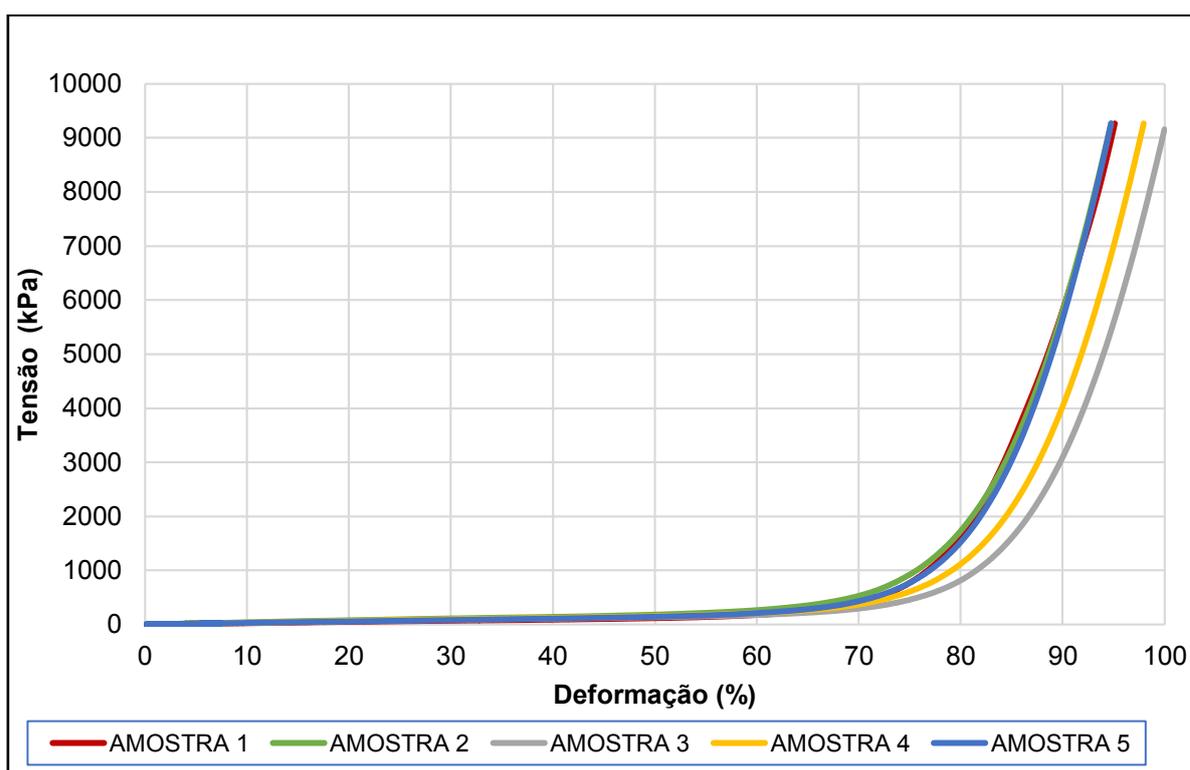


Figura 36- Resultados dos ensaios de resistência à compressão de curto prazo

Para obter a resistência à compressão de cada amostra foi delimitada a seção de interesse através de alterações na escala do gráfico. Desta forma, foram determinadas as retas tangentes inferior e superior, conforme indica a norma ASTM 6364. Na Figura 36, a visualização do trecho de escoamento fica comprometida devido à escala do gráfico.

A Figura 37 ilustra o procedimento de determinação da tensão de ruptura no ensaio de compressão.

A partir do ponto de encontro das retas tangentes foi determinada a tensão de escoamento do material para cada corpo de prova e, posteriormente, calculada a média. O valor médio de resistência à compressão foi de 324 kPa (Tabela 13). Para esta tensão, a deformação média foi de 67,54 %.

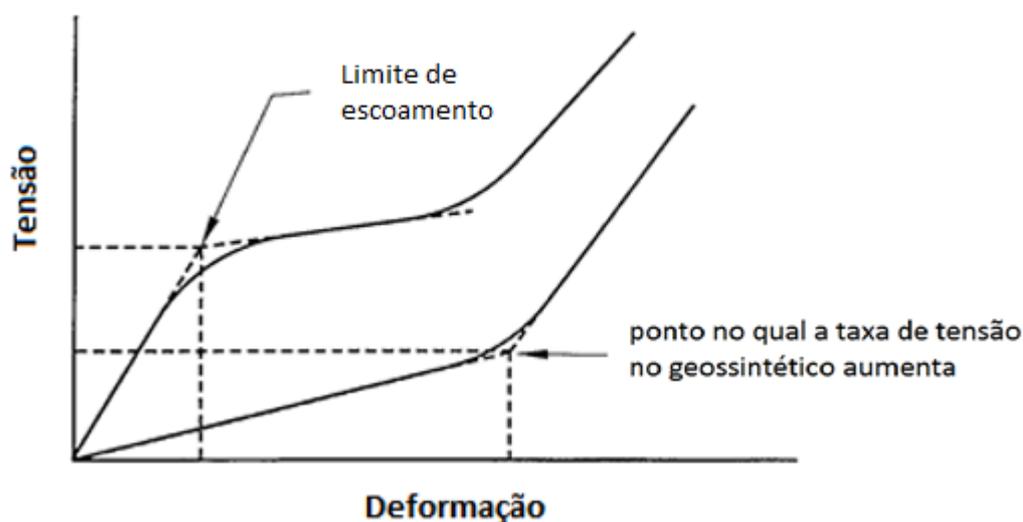


Figura 37 - Determinação da tensão de ruptura no ensaio de compressão. Fonte ASTM: D6364

Tabela 13 -Resultado dos ensaios de compressão a curto prazo

Corpo de Prova	Espessura inicial (mm)	Resistência à compressão (kPa)	Deformação (%)
1	13,99	322	67,84
2	13,26	331	63,92
3	12,44	348	72,10
4	12,95	313	67,82
5	13,3	306	66,04
Média	13,16	324	67,54

Na Figura 38, pode-se observar com maior clareza o comportamento do material nas tensões de maior aplicação prática. Nota-se que até o ponto em que as deformações atingem o valor de 50% o comportamento do material é muito próximo de um comportamento linear. Esta informação será considerada na fase de modelagem numérica usada nesta pesquisa.

A partir deste ensaio, também podem ser retirados os módulos de elasticidade do material. Para os objetivos do presente trabalho, serão determinados os módulos de elasticidade referentes a diversos níveis de tensão, essas informações serão obtidas a partir do gráfico e/ou planilhas de resultados dos ensaios.

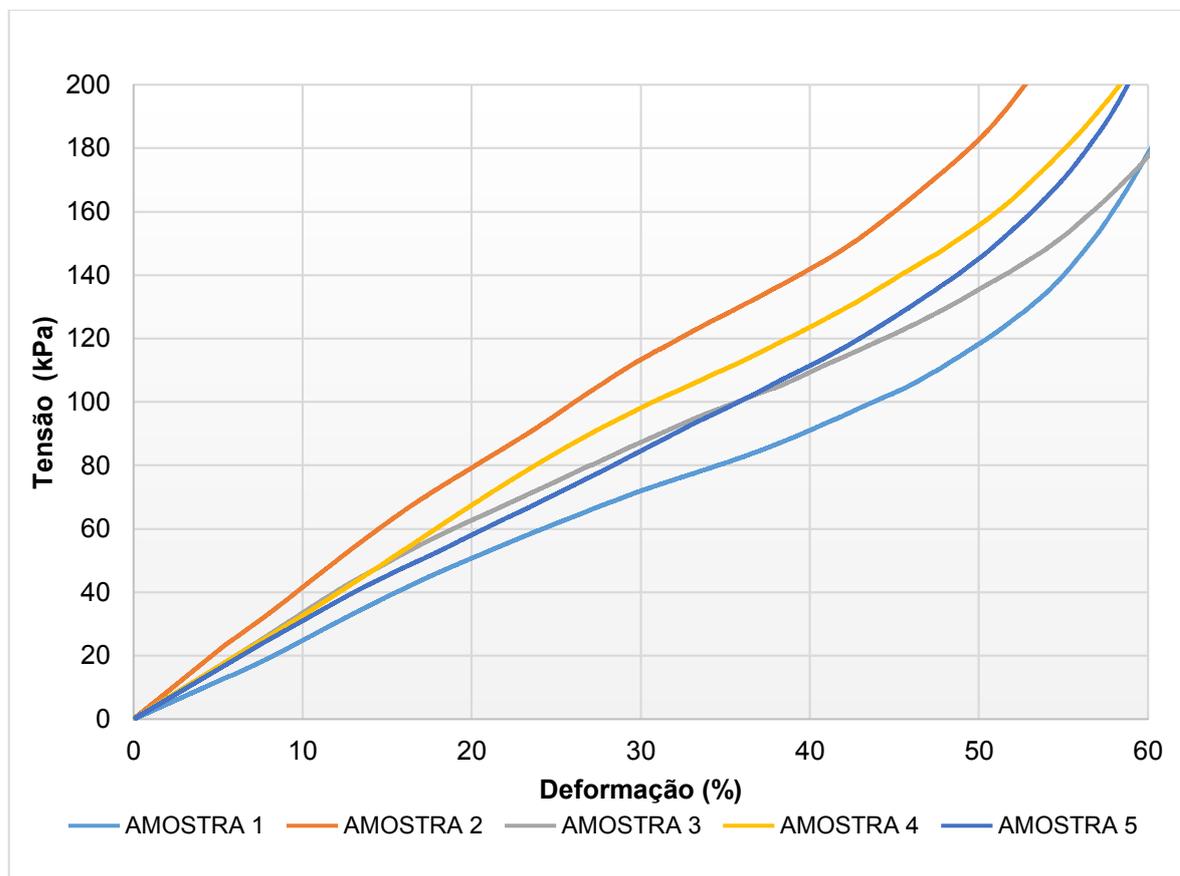


Figura 38 - Resultados dos ensaios de compressão a curto prazo - Tensões de interesse prático.

Para o cálculo da espessura residual foi determinada a tensão correspondente a cada nível de deformação e calculada a espessura residual a partir da média de espessura inicial das amostras que foi de 13,16mm. Observa-se que a compressão inicial para tensões inferiores a 200 kPa ocorre à uma taxa maior enquanto que, para tensões mais elevadas, a taxa de compressão é menor pois ocorre o confinamento do núcleo e uma tendência à estabilização da espessura (Figura 39).

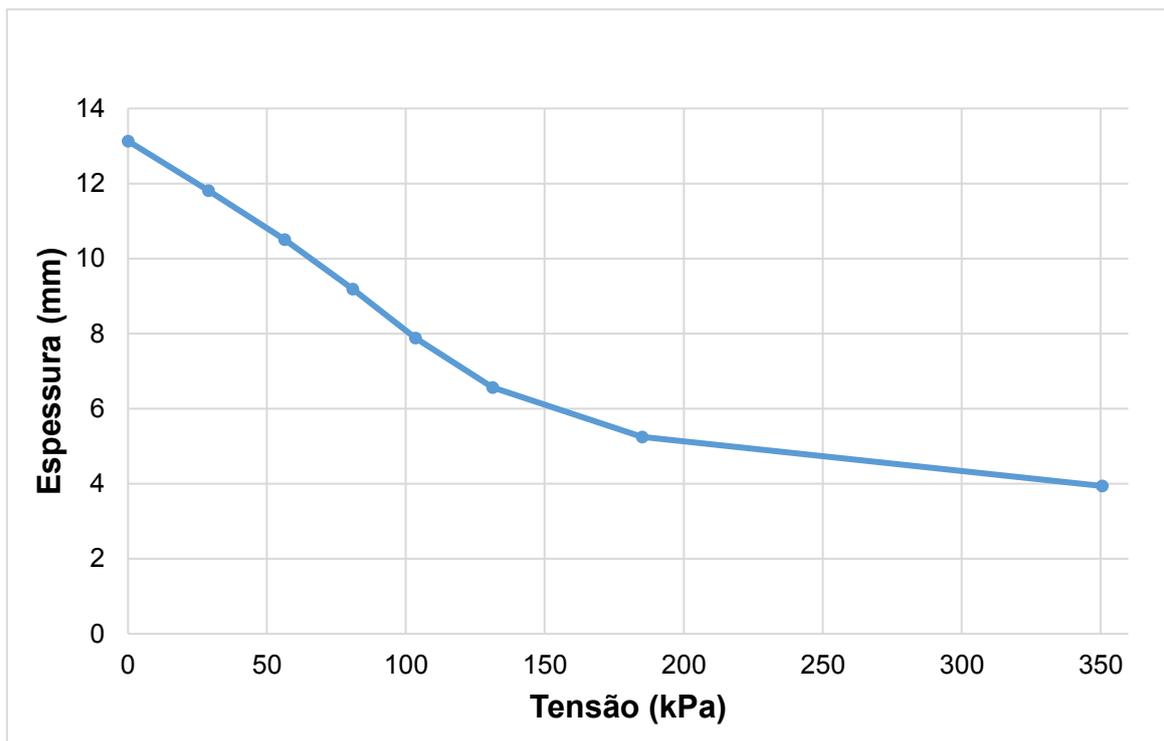


Figura 39 - Espessura residual média entre as cinco amostras ensaiadas – Ensaio de compressão a curto prazo

3.6. Resistência ao puncionamento (CBR)

Os ensaios de puncionamento foram realizados em quatro amostras de geocomposto. O objetivo do ensaio consiste em determinar a penetração máxima, ou seja, a distância equivalente ao deslocamento de punção após o contato com o geocomposto. O valor médio de resistência ao puncionamento obtido foi de 2,313 kN, como mostra a Tabela 14. A Figura 40 apresenta os resultados do ensaio.

Tabela 14 -Resultados dos ensaios de puncionamento

Corpo de Prova	Resistência ao puncionamento (kN)
1	2,416
2	2,284
3	2,237
4	2,314
Média	2,313
Desvio Padrão	0,076

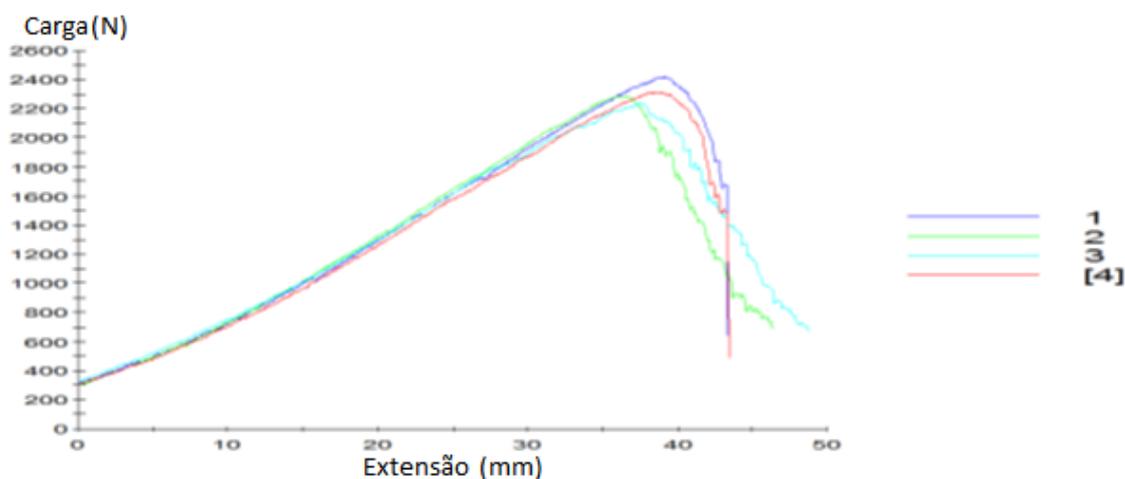


Figura 40 - Resultados dos ensaios de puncionamento.

3.7. Permeabilidade normal e permissividade

O ensaio de permeabilidade normal foi executado apenas na camada de geotêxtil e não no geocomposto como um todo. Para melhor enquadramento nos objetivos desta pesquisa, os ensaios de permeabilidade foram executados de duas formas diferentes: primeiramente foram executadas as medições considerando uma camada única de geotêxtil; em seguida, foram ensaiadas amostras compostas de camadas duplas de geotêxtil.

A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios de permeabilidade executados para os corpos de prova com camada única de geotêxtil. Os valores médios obtidos de permeabilidade normal e permissividade foram iguais a 0,36 cm/s e 3,60 s⁻¹, respectivamente.

Para corpos de prova com camada dupla de geotêxtil, foi obtido um valor médio de permeabilidade normal de 0,25 cm/s e uma permissividade média de 1,29 s⁻¹ (Tabela 16). Coerentemente, os resultados indicam maior valor de permeabilidade normal quando se executa o ensaio com camada única de geotêxtil.

Tabela 15- Resultados dos ensaios de permeabilidade normal – Camada única de geotêxtil

Corpo de Prova	Permissividade (s⁻¹) (20°C)	Permeabilidade (cm.s⁻¹)
1	3,97	0,40
2	4,69	0,39
3	2,96	0,33
4	2,78	0,33
Média	3,60	0,36
Desvio Padrão	0,87	0,04

Tabela 16- Resultados dos ensaios de permeabilidade normal – Camada dupla de geotêxtil

Corpo de Prova	Permissividade (s⁻¹) (20°C)	Permeabilidade (cm.s⁻¹)
1	1,28	0,23
2	1,24	0,26
3	1,38	0,27
4	1,24	0,26
Média	1,29	0,25
Desvio Padrão	0,07	0,02

3.8. Permeabilidade planar e transmissividade

Para este ensaio foram selecionados três corpos de prova com o comprimento paralelo à direção de fabricação e três corpos de prova com o comprimento paralelo à direção transversal de fabricação com dimensões de 30 cm x 30 cm. Todos os corpos de prova foram mantidos submersos por um período de 24 hs.

Os ensaios foram realizados para tensões de 10, 20, 50 e 100 kPa e gradientes 1; 0,1 e 0,01. Os resultados obtidos para os seis corpos de prova foram registrados em planilha e foi feita a média aritmética entre os corpos de prova longitudinais e transversais. A Tabela 17 apresenta os valores médios obtidos para os diferentes gradientes. Coerentemente, observa-se que a capacidade de vazão diminui com o aumento da tensão e cresce com o aumento do gradiente (Figura 41).

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de transmissividade

Capacidade de vazão (l/s).m			
Tensão kPa	Gradiente hidráulico		
	1	0,1	0,01
10	2,6321	0,6168	0,1562
20	2,1536	0,5377	0,1383
50	0,8952	0,2176	0,0605
100	0,2585	0,0497	0,0141

Como esperado, o acréscimo de tensão impacta de maneira significativa na redução da capacidade de vazão do geocomposto. Observa-se que essa capacidade sofre maior impacto para tensões inferiores a 50 kPa (Figura 41). Para tensões maiores, ocorre um maior confinamento do núcleo e redução dos poros, havendo uma tendência à estabilização da espessura e, conseqüentemente, da capacidade de vazão.

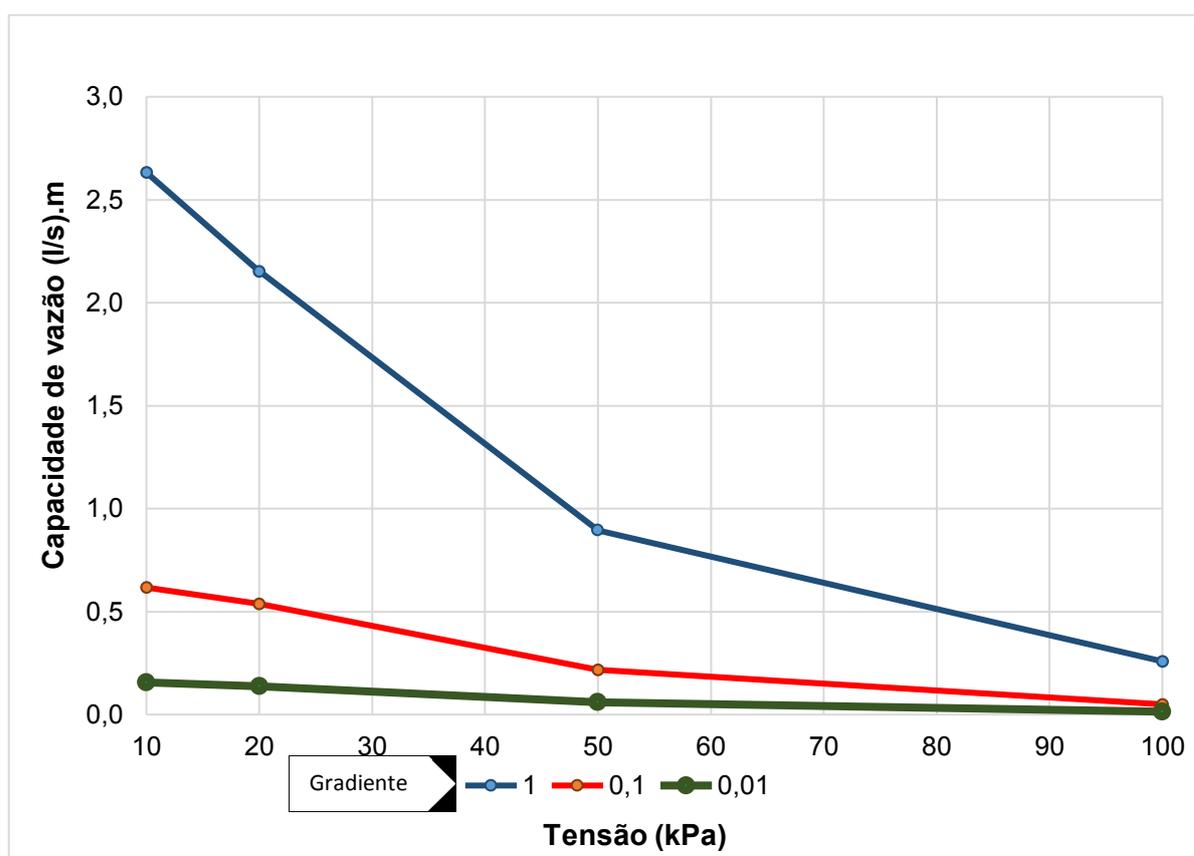


Figura 41 - Resultados dos ensaios de transmissividade - Vazão vs tensão

O tipo de apoio utilizado no ensaio de transmissividade foi rígido/rígido. Sabe-se que este tipo de apoio permite a condução de maior volume passante, uma vez que o material utilizado em apoios flexíveis pressiona o geotêxtil filtro para dentro do núcleo reduzindo a vazão.

Um estudo realizado por Zanziger et al (2010) demonstrou a influência do tipo de apoio na capacidade de vazão de geocompostos drenantes. Os autores executaram ensaios em dois laboratórios diferentes, e ensaiaram as amostras sob tensões de 20 kPa e 50 kPa. Foi realizado o ensaio de fluência e, para a determinação da vazão, as amostras foram retiradas em intervalos regulares e testadas com as mesmas condições de carga e apoio do ensaio de fluência. Foram ensaiadas as condições de apoio rígido/flexível (h/s) e rígido/rígido (h/h).

O estudo mostrou que a capacidade de escoamento de água quando utilizado o apoio rígido/rígido (h/h) é maior (Figura 42). Tal comportamento era esperado já que a placa de espuma pressiona o geotêxtil filtro de drenagem para dentro do núcleo e, portanto, uma menor capacidade de fluxo de água é medida.

Mesmo cientes das diferenças decorrentes das condições de apoio, não foi possível, para este estudo, a obtenção do material necessário para a realização do ensaio de transmissividade em condições diferentes das usadas. Sendo assim, os resultados obtidos devem levar em consideração tal diferença.

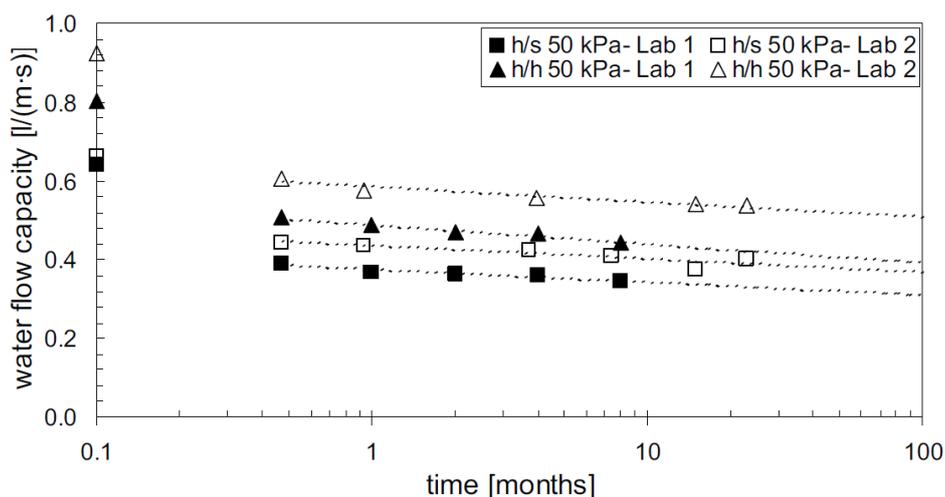


Figura 42 – Vazão em diferentes condições de apoio. Fonte: Zanziger et al (2010).

3.9. Fluência à compressão

O ensaio de fluência SIM à compressão foi realizado em corpo de prova único de acordo com a norma ASTM D 7361. A referida norma estabelece o método de ensaio acelerado para determinação de fluência à compressão de geossintéticos baseado na superposição de tempo e temperatura usando o método SIM (Stepped Isothermal Method). Este método permite a estimativa da deformação do geocomposto em longo prazo. Uma das vantagens deste tipo de ensaio é a duração. Para os objetivos desta pesquisa, este ensaio deve determinar a deformação em longo prazo, o que pode ser feito pelo método SIM em um curto espaço de tempo, e que seria impraticável em um ensaio de fluência à compressão convencional.

O ensaio foi realizado no laboratório do TRI Environmental, Inc. em Austin, Texas, EUA com apoio e gerenciamento pelo TRI Ambiental do Brasil Ltda. A tensão aplicada foi de 50 kPa e a espessura inicial da amostra foi de 12,95 mm. Os resultados do ensaio estão reunidos na Tabela 18 e nas Figura 43 e 44.

Tabela 18 - Resultado do ensaio de fluência à compressão – Método SIM

Tempo	Deformação	Espessura Residual
Anos	(%)	mm
0,003	28,98	9,20
0,019	30,30	9,03
0,082	31,28	8,90
0,246	32,02	8,80
0,5	32,50	8,74
1	32,97	8,68
2	33,23	8,65
5	34,10	8,53
10	34,64	8,46
20	35,03	8,41
50	35,55	8,35
100	36,09	8,28

Fonte: Relatório de Ensaio -TRI Ambiental do Brasil Ltda.

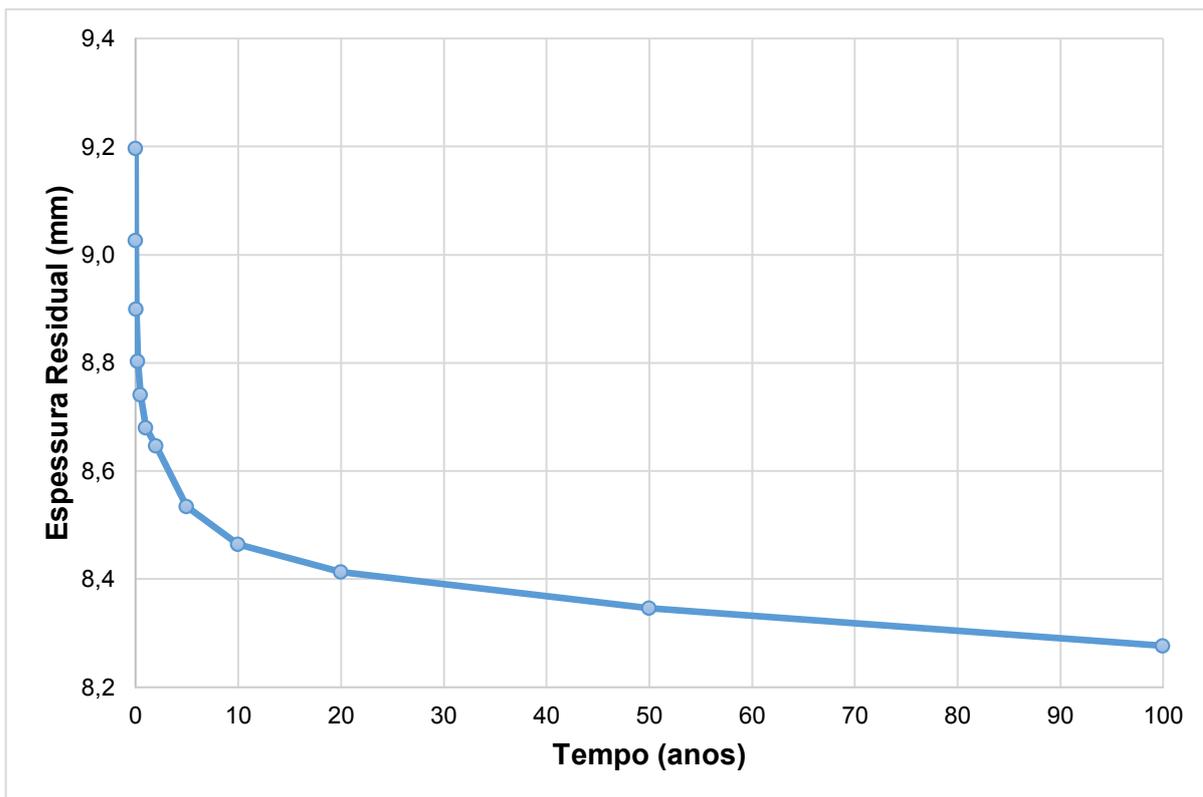


Figura 43 - Resultados dos ensaios de fluência à compressão – Método SIM – Espessura Residual vs Tempo

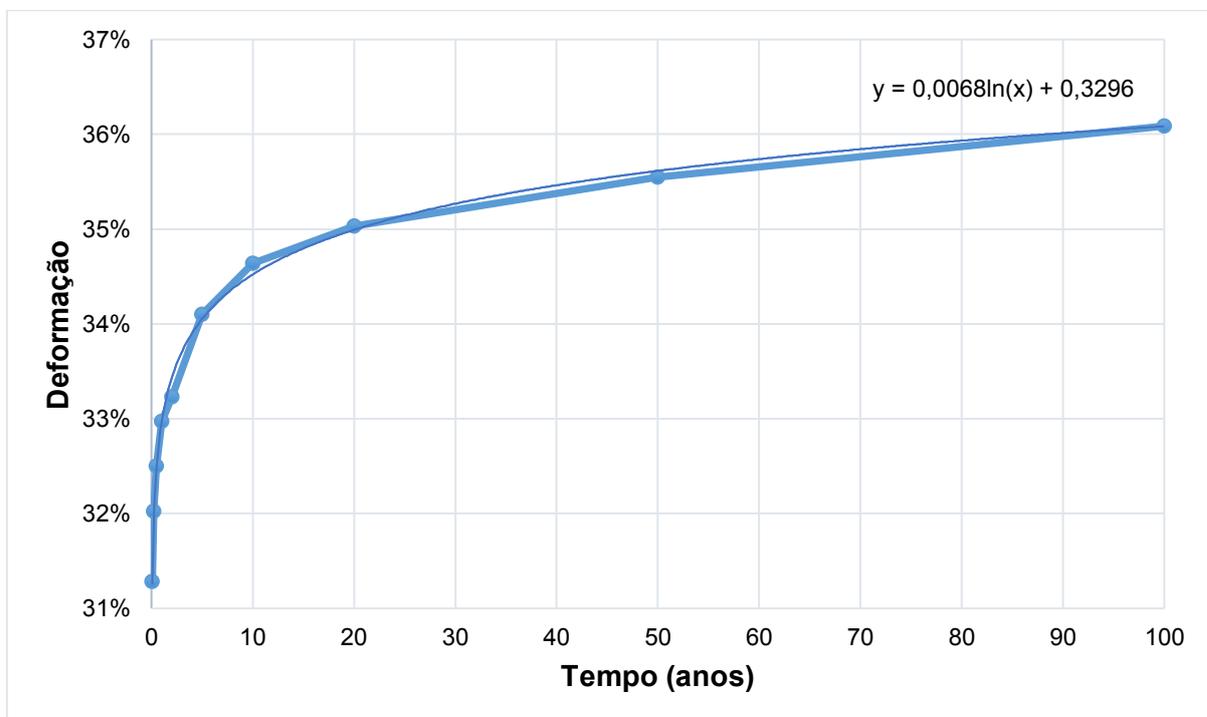


Figura 44 - Resultados dos ensaios de fluência à compressão – Método SIM – Deformação vs Tempo

Buscando-se um maior detalhamento do comportamento do material no trecho inicial da curva de fluência à compressão, foram analisados os resultados dos ensaios executados por Plácido (2006) e Rojas (2014), que mostram a tendência da curva desde a origem ($t=0$).

Plácido (2006) executou ensaios para três níveis diferentes de tensões: 20, 100 e 200 kPa, com duração de pouco mais de 70 horas (Figura 45). O programa de ensaios de Rojas (2014) foi realizado em corpos de prova de dimensões de 100 mm x 100 mm, sob dois diferentes níveis de tensões: 2 kPa e 20 kPa (Figura 46). Os resultados dos dois estudos citados indicam que as deformações significativas para o material geocomposto ocorrem nas primeiras horas de ensaio. Após esse período, a variação da espessura é pequena.

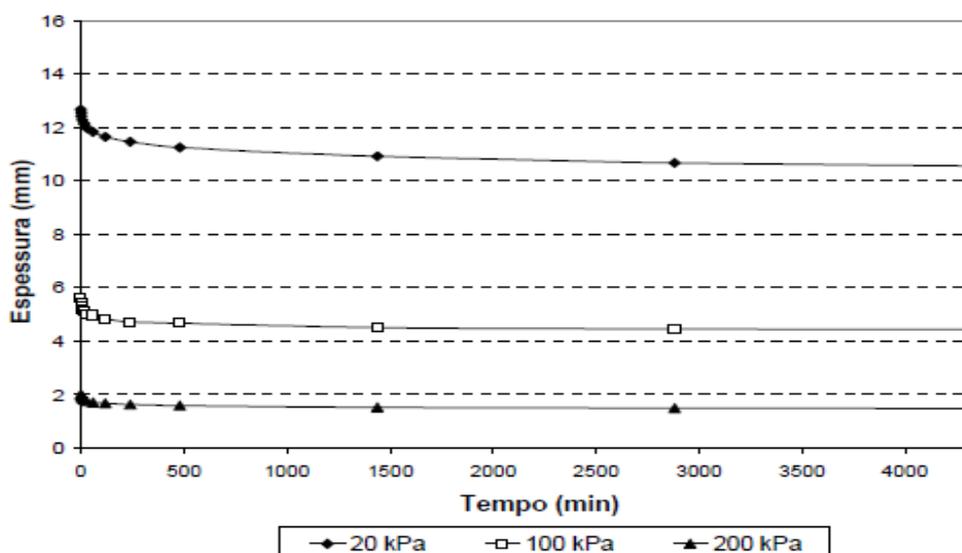


Figura 45 - Curvas do ensaio de fluência em compressão. Fonte: Plácido (2006)

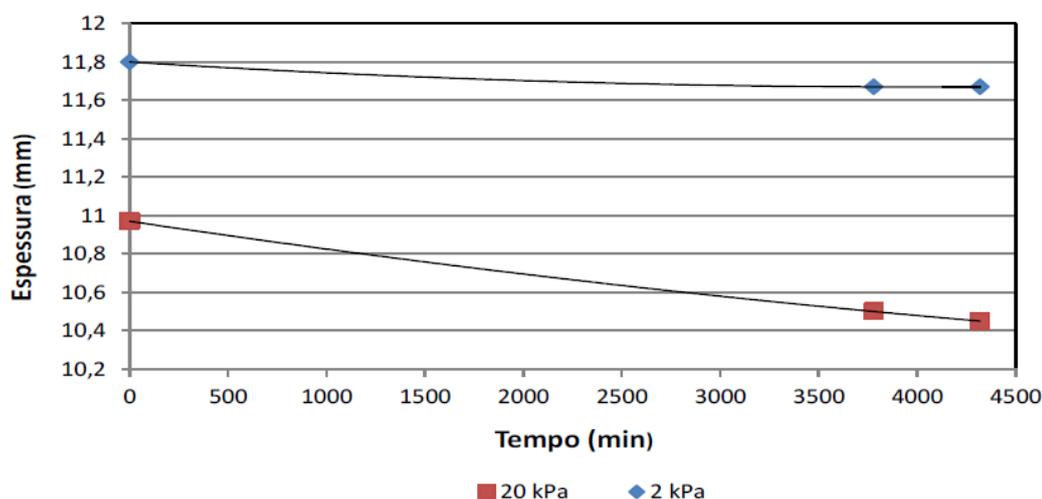


Figura 46 - Curvas do ensaio de fluência em compressão para 1 camada do geocomposto. Fonte: Rojas (2014)

Os resultados destes dois estudos corroboram as informações obtidas no ensaio de fluência demonstrando que a maior parte da deformação do material ocorre nas primeiras horas de utilização.

No presente estudo pode-se constatar a redução de espessura para um período de 100 anos apresentando deformação de 36,09% para este tempo.

3.10. Previsão da vazão a longo prazo

Para prever a redução da capacidade de vazão do geocomposto para longos períodos de tempo será definida uma correlação que terá como base os ensaios de fluência à compressão, compressão a curto prazo e transmissividade.

Para estabelecimento desta correlação foi usada a metodologia designada por Muller et al (2008). Esta abordagem começa com a determinação da tensão de compressão a curto prazo necessária para produzir uma determinada espessura residual originada pelo ensaio de fluência à compressão (Figura 47). De posse desta tensão, verifica-se no ensaio de transmissividade a vazão correspondente (Figura 48).

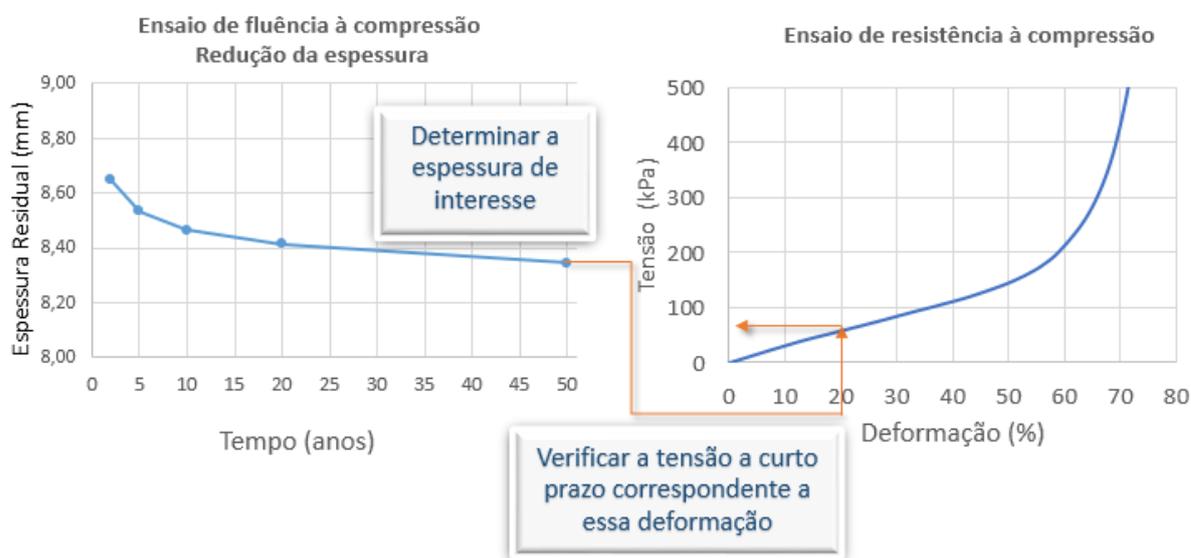


Figura 47 - Esquema para correlação entre os ensaios de transmissividade e fluência à compressão - Parte 1

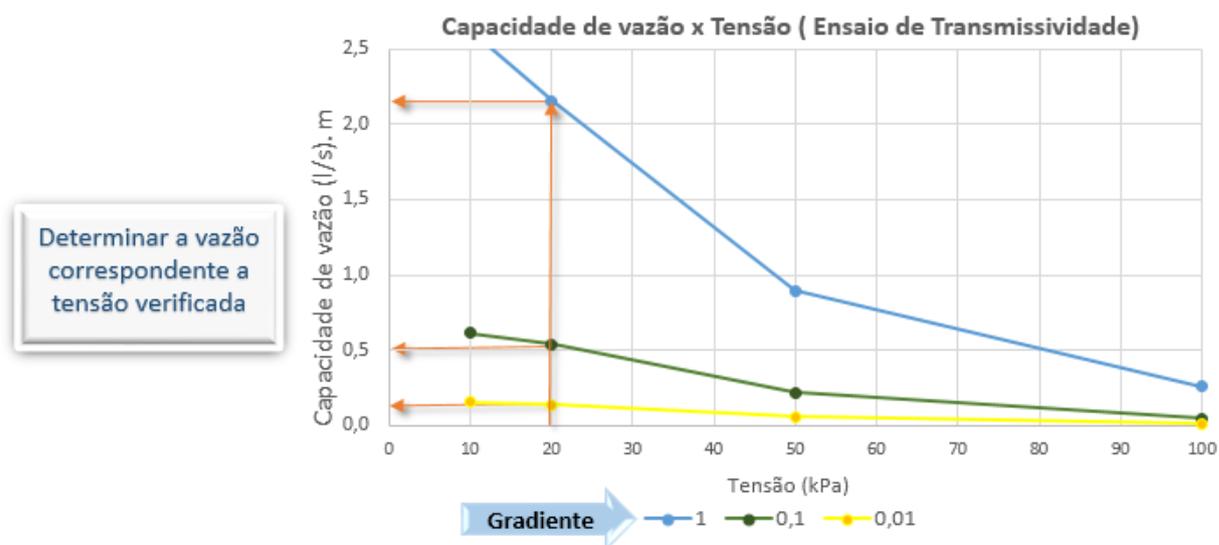


Figura 48 - Esquema para correlação entre os ensaios de transmissividade e fluência à compressão - Parte 2

A partir deste método, são estabelecidas as espessuras/deformações de interesse decorrentes do ensaio de fluência à compressão. Para este trabalho, foram executados ensaios de compressão a curto prazo em cinco amostras (com pequenas variações na espessura). Em função desta variação foi necessário encontrar as tensões médias entre as cinco amostras, de modo a relacionar essas médias a espessura/deformação referente ao ensaio de fluência à compressão. De posse destas médias de tensão, foi selecionado o intervalo de interesse no gráfico do ensaio de transmissividade que relaciona as tensões determinadas às previsões de vazão a longo prazo.

A partir da correlação pode-se fazer a previsão da redução na capacidade de escoamento do geocomposto como demonstrado na Figura 49. Cabe observar que essa previsão utiliza um ensaio de fluência cuja tensão constante é de 50 kPa, portanto deve-se ter em mente que todo o comportamento do material a longo prazo refere-se a este nível de carregamento. Deve-se levar em conta, também, a utilização de apoio rígido/rígido na realização do ensaio de transmissividade.

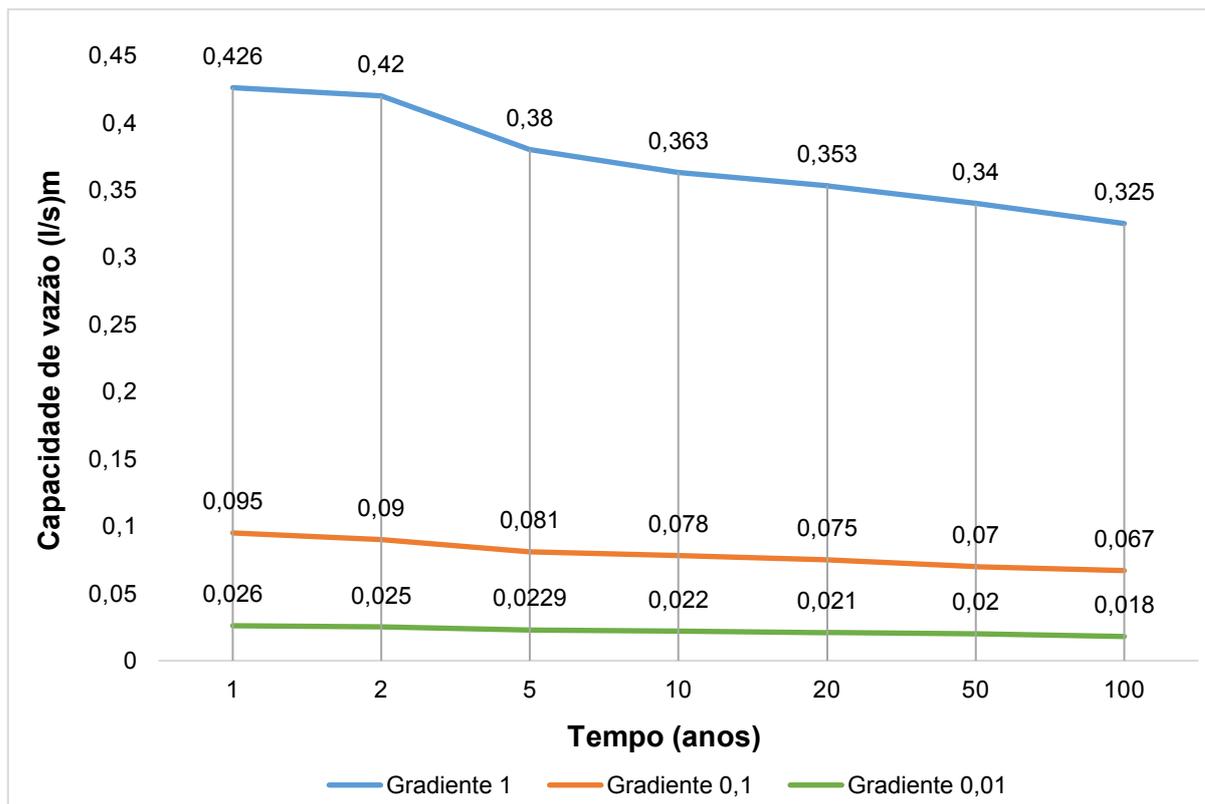


Figura 49 - Redução da capacidade de vazão ao longo do tempo devido à fluência – Tensão de 50 kPa

Os resultados apresentados na Figura 49 mostram que a redução da capacidade de vazão em longo prazo se mostra um pouco mais acentuada para o gradiente 1. À medida que o gradiente diminui, a redução da vazão se torna mais sensível.

O cálculo da redução da capacidade de vazão constante na Tabela 19 foi realizado a partir da razão entre a vazão obtida de acordo com as correlações entre os ensaios de transmissividade e fluência à compressão e a vazão inicial, retirada do ensaio de transmissividade à 50 kPa para os devidos gradientes.

Como já exposto anteriormente, a maior parte da deformação neste material ocorre nas primeiras horas de utilização, portanto era esperado que a fase mais impactante na redução da vazão tenha ocorrido antes do primeiro ano e que, para longos prazos, a diminuição na condução de fluxo fosse pequena. O estudo mostra o grau de sensibilidade desta redução considerando um período 100 anos. Baseando-se nos resultados, o material mostrou um desempenho considerado bastante satisfatório, uma vez que a tensão utilizada (50 kPa) é relativamente frequente para as aplicações práticas.

Tabela 19 - Vazão residual devido à fluência

Previsão de redução da capacidade de vazão em longo prazo						
Gradiente	1		0,1		0,01	
	(l/s)m	Vazão	(l/s)m	Vazão	(l/s)m	Vazão
Vazão inicial à 50 kPa	0,8952	Residual	0,2176	Residual	0,0605	Residual
1 ano	0,426	48%	0,095	44%	0,026	43%
2 anos	0,42	47%	0,09	41%	0,025	41%
5 anos	0,38	42%	0,081	37%	0,0229	38%
10 anos	0,363	41%	0,078	36%	0,022	36%
20 anos	0,353	39%	0,075	34%	0,021	35%
50 anos	0,34	38%	0,07	32%	0,02	33%
100 anos	0,325	36%	0,067	31%	0,018	30%

Adicionalmente, pode-se estabelecer fatores de redução baseados nos resultados da Tabela 20. Observa-se que os fatores encontrados diferem dos valores orientados por Koerner (1997) na Tabela 2, cujas especificações se referem a geocompostos que utilizam georredes, embora ainda sejam úteis na estimativa para outros núcleos. Os resultados aqui exibidos fazem diferenciação entre gradientes e a estipulação dos fatores de redução por fluência considera a ocorrência do fenômeno para uma tensão específica de 50 kPa.

Tabela 20- Fatores de redução da capacidade de vazão devido à fluência para um período de 100 anos.

Fatores de redução devido à deformação por fluência para uma previsão de 100 anos

Gradiente	1		0,1		0,01	
	(l/s)m	Fator de redução	(l/s)m	Fator de redução	(l/s)m	Fator de redução
Vazão inicial à 50 kPa	0,8952		0,2176		0,0605	
1 ano	0,426	2,10	0,095	2,29	0,026	2,33
2 anos	0,42	2,13	0,09	2,42	0,025	2,42
5 anos	0,38	2,36	0,081	2,69	0,0229	2,64
10 anos	0,363	2,47	0,078	2,79	0,022	2,75
20 anos	0,353	2,54	0,075	2,90	0,021	2,88
50 anos	0,34	2,63	0,07	3,11	0,02	3,03
100 anos	0,325	2,75	0,067	3,25	0,018	3,36

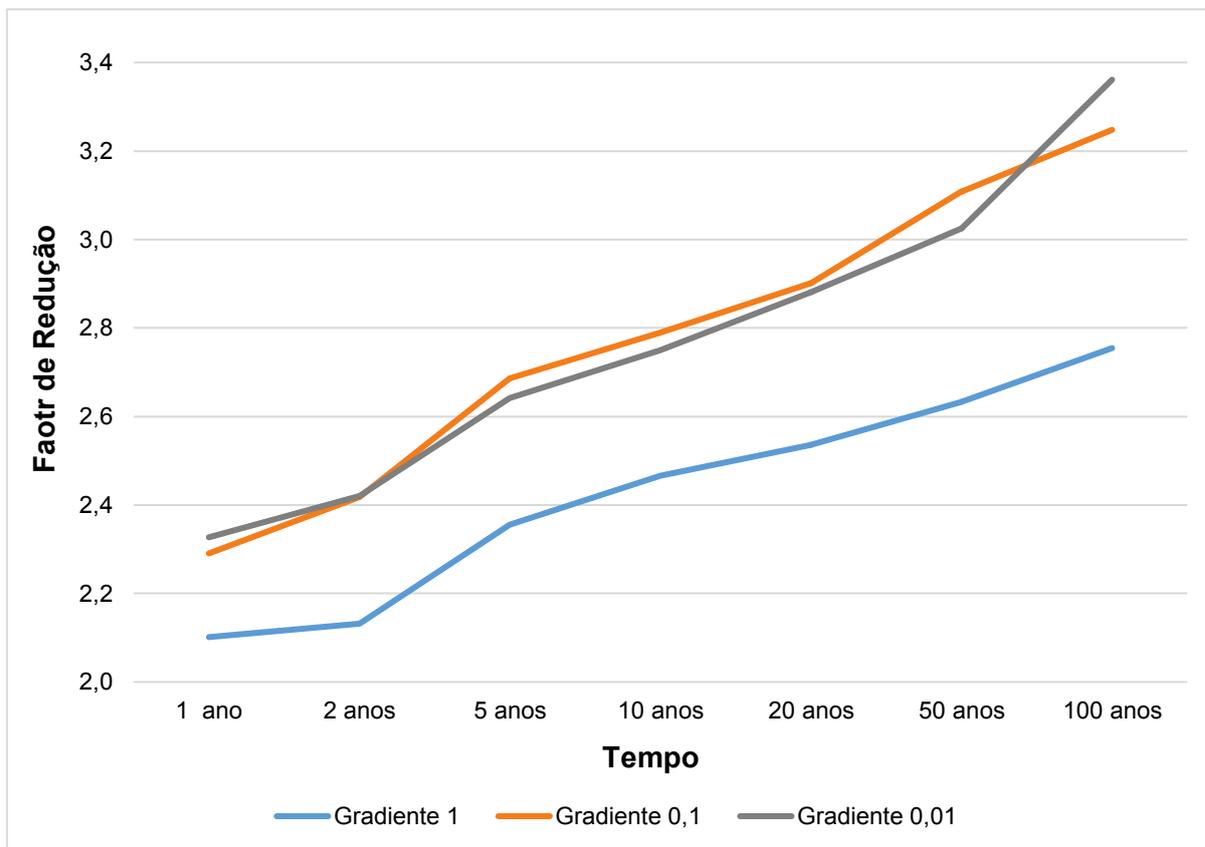


Figura 50 - Fatores de redução da capacidade de vazão devido à fluência – Previsão de 100 anos.

3.11. Considerações Finais

O presente capítulo apresentou os resultados obtidos através do programa de ensaios realizados nos laboratórios da Maccaferri e TRI – Testing, Research, Consulting and Field Services, no Texas, EUA.

Além dos resultados dos ensaios foram exibidas as correlações entre os ensaios de fluência a compressão, transmissividade e compressão simples a fim de obter a previsão de vazão do geocomposto a longo prazo. Com essa previsão foram estabelecidos fatores de redução relativos à fluência do material. Tais fatores diferem dos estipulados na literatura, o que reforça a importância da realização de ensaios e do estudo detalhado de tais materiais.

4. ANÁLISES NUMÉRICAS

4.1. Introdução

O presente Capítulo apresenta a metodologia adotada nas análises numéricas (ferramenta, geometria, modelos constitutivos, condições de contorno, etc.) e discute os resultados obtidos. As análises foram executadas com o programa computacional PLAXIS (*Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*, versão 8.2), baseado no Método dos Elementos Finitos (BRINKGREVE e VERMEER, 1999).

Em uma fase preliminar, foram reproduzidos numericamente os ensaios de compressão simples e transmissividade, apresentados no Capítulo 3. Uma vez calibrado o modelo, procedeu-se à simulação numérica de uma situação de campo, com o objetivo de prever o desempenho do geocomposto como elemento drenante.

4.2. Ferramenta Numérica

O Plaxis é uma ferramenta numérica amplamente utilizada, capaz de simular problemas com condições de contorno complexas, além de diferentes etapas construtivas e distintos modelos constitutivos. Inicialmente concebido para resolução de problemas estruturais, o método dos elementos finitos (MEF) passou por várias adaptações para aplicação em outras áreas, como a Engenharia Geotécnica. A aplicação eficiente do método dos elementos finitos exige a escolha adequada dos modelos constitutivos e dos parâmetros representativos dos materiais. Quanto maior for a precisão dos parâmetros, maior será a confiabilidade dos resultados obtidos nas análises numéricas.

4.2.1. Modelos constitutivos

O programa Plaxis possui vários modelos constitutivos para simular o comportamento tensão-deformação de solos e outros materiais. São eles: Linear Elástico, Soft-Soil, Hardening-Soil, Mohr-Coulomb e Soft-Soil-Creep. Dentre os citados, destaca-se para uso no presente trabalho os modelos: linear elástico e Mohr-Coulomb. Maiores detalhes sobre os demais modelos constitutivos podem ser obtidos em Brinkgreve (1999).

4.2.1.1. Modelo Linear elástico (LE)

Um material é considerado elástico quando o estado de tensão é uma função da deformação, ou seja, materiais que se deformam diante de uma solicitação que removida retorna o elemento à sua configuração original. Nestes casos, as trajetórias de carregamento e descarregamento coincidem. O modelo linear elástico é baseado na lei de Hooke, e fundamentado na relação linear entre tensão e deformação para materiais isotrópicos. Dois parâmetros são utilizados para descrever o modelo: o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν). A relação pode ser escrita para um caso unidimensional, como:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (67)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] & \frac{1}{2G} \tau_{xy} & \frac{1}{2G} \tau_{xz} \\ \frac{1}{2G} \tau_{yx} & \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] & \frac{1}{2G} \tau_{yz} \\ \frac{1}{2G} \tau_{zx} & \frac{1}{2G} \tau_{zy} & \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{bmatrix} \quad (68)$$

O módulo cisalhante ou módulo de elasticidade transversal (G) e é determinado pela equação 69.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (69)$$

O modelo linear elástico é usualmente utilizado para representar elementos estruturais como paredes, e também pode representar materiais geossintéticos. O uso deste tipo de modelo para solos se torna mais limitado em função da anisotropia e do comportamento não linear entre tensão e deformação. No entanto, em casos específicos, podem ser feitas aproximações para utilização deste modelo.

4.2.1.2. Modelo Mohr-Coulomb (MC)

O modelo Mohr-Coulomb é um modelo elástico perfeitamente plástico, que obedece ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb, assim sendo, ele se comporta como linear elástico até a ruptura, e a partir deste ponto passa a apresentar um comportamento plástico. Na Figura 51 o ponto **p** indica a mudança de comportamento do material.

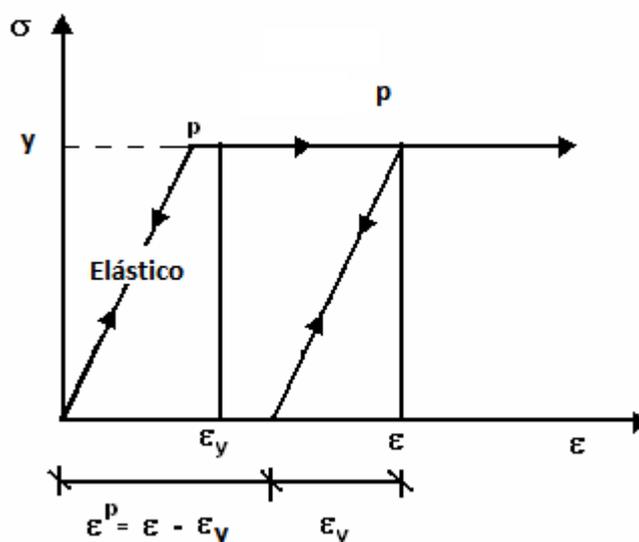


Figura 51 - Modelo elástico perfeitamente plástico.

Esse modelo pode ser considerado como uma aproximação de primeira ordem de comportamento verdadeiro do solo e requer os seguintes parâmetros de entrada de dados: γ (peso específico), E (modulo de deformabilidade), ν (coeficiente de Poisson), ϕ' (ângulo de atrito efetivo), c' (coesão efetiva), k (permeabilidade) e ângulo de dilatação, ψ .

De acordo com o critério, a resistência ao cisalhamento τ na iminência da ruptura, no plano de ruptura, é determinada pela equação 70.

$$\tau = c + \sigma \times \tan \phi \quad (70)$$

Onde:

c = coesão;

σ = tensão normal no plano de ruptura, no momento da ruptura;

ϕ = ângulo de atrito.

A Figura 52 apresenta a representação gráfica do critério no plano ($\sigma - \tau$).

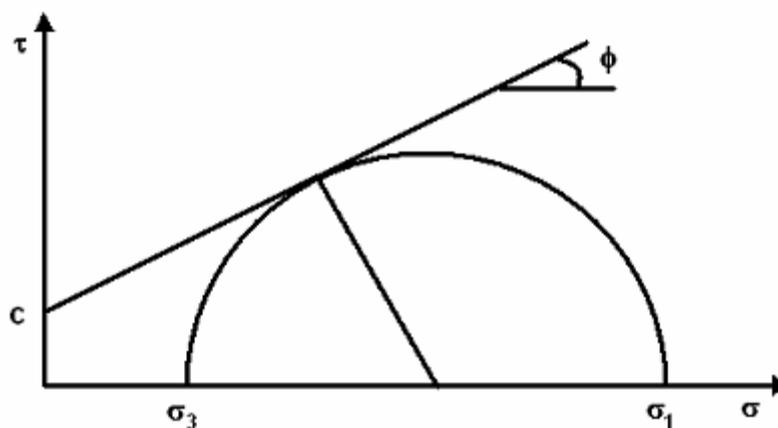


Figura 52 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

O diagrama de Mohr na Figura 52 apresenta o estado de tensões em torno de um ponto da massa de solo. O estado de tensões no momento da ruptura é representado pelo círculo de Mohr tangenciando a envoltória de resistência.

4.2.2. Estrutura do programa

O programa é subdividido em quatro sub-rotinas: *Input*, *Calculation*, *Output* e *Curves*. Na primeira sub-rotina é realizada a entrada de dados: definição da geometria, dos modelos constitutivos, dos parâmetros, das condições de contorno, a geração de malha e a definição das condições iniciais. Na segunda, são definidos os tipos de análise (plástica, adensamento, determinação de fator de segurança, etc), as

condições de carregamento e as etapas construtivas. Nesta fase, também se definem os pontos onde se deseja avaliar as relações esforços-deslocamentos e tensões-deformações. Na terceira sub-rotina, são obtidas as saídas de dados dos cálculos em diversos formatos: tensões totais e efetivas, deformações, deslocamentos, pontos de plastificação, condições de fluxo e poropressões. Os resultados podem ser visualizados através da interface gráfica ou em forma de tabelas. A última sub-rotina permite a geração de diversas curvas (tensão *versus* deformação, poropressão *versus* tempo, recalque *versus* tempo, etc) para os pontos pré-selecionados na fase de cálculo.

4.3. Calibração do Modelo

Para a calibração do modelo numérico e aferição dos parâmetros, procedeu-se à reprodução dos ensaios de compressão simples e de transmissividade, executados no Laboratório da Maccaferri e da TRI – Testing, Research, Consulting and Field Services apresentados no Capítulo 3.

4.3.1. Modelagem numérica do ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi conduzido até a tensão aproximada de 9000 kPa, em função das especificações do maquinário utilizado. De interesse desta pesquisa, é o comportamento do material para tensões de utilização do material na prática, que chegam em torno de 100 kPa. Para um conhecimento mais abrangente, a modelagem numérica será conduzida até tensões da ordem de 200 kPa. Como já mencionado, o geossintético será modelado como um material linear elástico, uma vez que para as tensões de interesse essa condição é atendida.

4.3.1.1. Geometria e condições de contorno

A Figura 53 apresenta a geometria e as condições de contorno pertinentes ao ensaio. A amostra de geocomposto é disposta entre placas paralelas de uma estrutura de sustentação, e cargas de compressão (carregamento A) são aplicadas.

Para efeito de comparação com o ensaio realizado, foi considerada uma espessura de 13,16 mm conforme as médias das amostras do ensaio de compressão. A aplicação crescente de carga foi dividida em seis fases de carregamento (10, 20, 50, 100, 150 e 200 kPa).

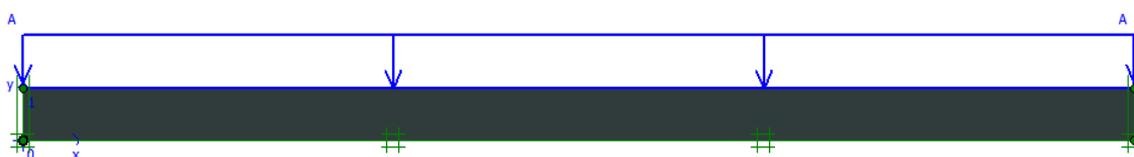


Figura 53 - Geometria e condições de contorno - Modelagem do ensaio de compressão simples.

4.3.1.2. Parâmetros dos materiais

Os parâmetros necessários para a adoção do modelo linear estão reunidos na Tabela 21. Os módulos de elasticidade foram obtidos a partir dos ensaios de compressão simples e definidos de acordo com o nível de tensão (fase de carregamento) durante o processo de cálculo. O peso específico foi determinado experimentalmente, a partir da razão peso/volume do geocomposto.

Tabela 21 - Parâmetros do geocomposto drenante: modelo linear elástico.

Peso específico	1 kN/m³	
Coefficiente de Poisson	0,1	
	Tensão	E
	10	315,46
	20	317,97
Módulo de elasticidade	50	318,47
	100	290,70
	150	296,37
	200	339,78

4.3.1.3. Malha de elementos finitos

Na simulação dos ensaios de compressão, foram utilizados elementos triangulares de 15 nós, e executado um refinamento da malha para maior precisão dos resultados em função da espessura reduzida do material. A Figura 54 apresenta a malha de elementos finitos, composta por 980 elementos e 8237 nós.

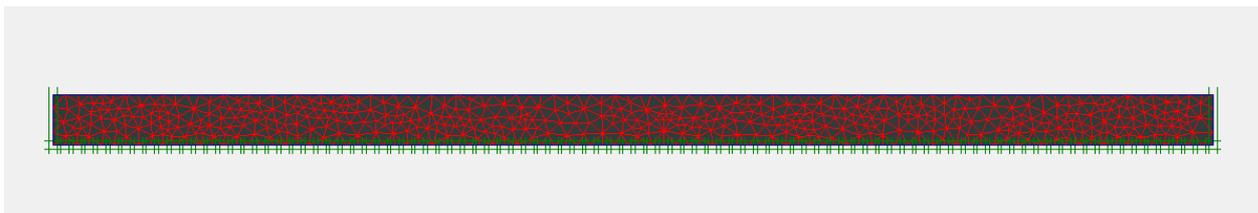


Figura 54- Malha de elementos finitos - Modelagem do ensaio de compressão simples

4.3.1.4. Metodologia de cálculo

Em cada etapa de cálculo (nível de tensão), o material representativo do geocomposto drenante foi modificado com novos valores de módulo de elasticidade.

Interface de software de cálculo com a seguinte configuração:

- Phase Number / ID.: 6 / 200
- Start from phase: 5 - 150
- Calculation type: Plastic analysis
- Log info: Prescribed ultimate state fully reached

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	0	0	0
✓ 10	1	0	Plastic analysis	Staged construction	0,00 s	1	1	1
✓ 20	2	1	Plastic analysis	Staged construction	0,00 s	2	2	2
✓ 50	3	2	Plastic analysis	Staged construction	0,00 s	3	3	3
✓ 100	4	3	Plastic analysis	Staged construction	0,00 s	4	4	4
✓ 150	5	4	Plastic analysis	Staged construction	0,00 s	5	5	5
✓ 200	6	5	Plastic analysis	Staged construction	0,00 s	6	6	6

Figura 55 - Etapas de cálculo - modelagem numérica do ensaio de compressão.

apresenta as diferentes etapas inseridas no programa, que consistiram na alteração do valor do carregamento A, que variou de 10 a 200 kPa.

4.3.1.5. Apresentação dos Resultados

A Figura 56 apresenta a malha deformada após a última etapa de carregamento (200 kPa). A espessura inicial do geocomposto era de 13,16 mm. Após a aplicação da carga, as análises indicaram uma compressão de 8,29 mm, resultando em uma espessura residual do geocomposto de 4,87 mm.

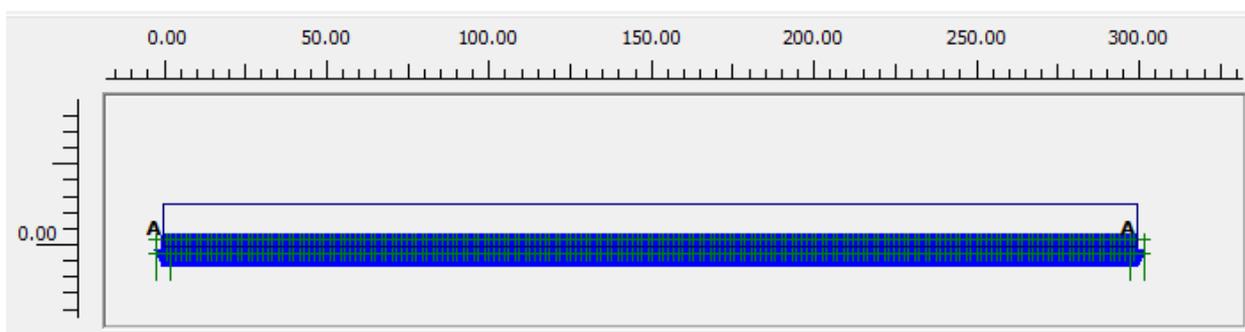


Figura 56 - Última fase de aplicação de carga: Compressão = 8,29 mm.

A Tabela 22 reúne os resultados da modelagem numérica do ensaio de compressão para os diferentes níveis de tensão e a Figura 57 compara os resultados previstos numericamente com os obtidos experimentalmente.

Tabela 22 - Resultado da modelagem do ensaio de compressão

Tensão (kPa)	Compressão (mm)	Espessura Residual (mm)
10	0,41	12,75
20	0,81	12,35
50	2,02	11,14
100	4,23	8,93
150	6,40	6,76
200	8,29	4,87

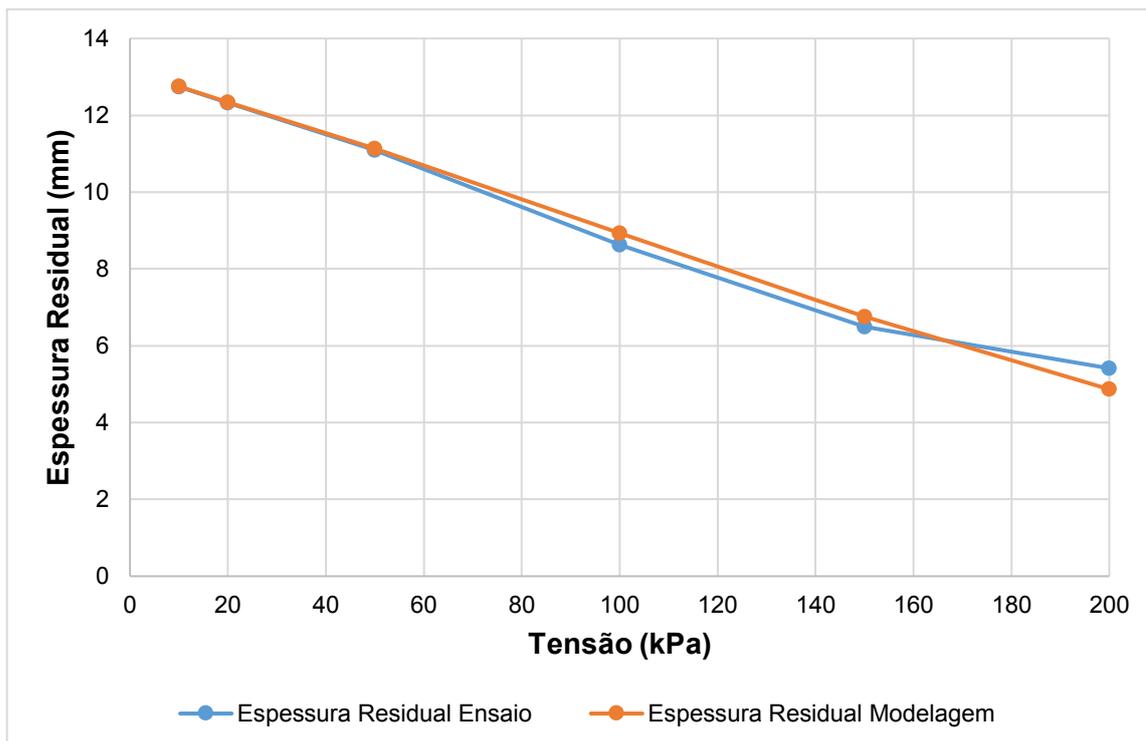


Figura 57 - Ensaio de compressão simples: Comparação entre resultados numéricos e experimentais

Observa-se que o modelo numérico se aproxima satisfatoriamente dos resultados do ensaio de compressão simples. No ensaio de compressão, pode-se verificar que o material apresenta um comportamento que pode ser considerado como linear. Sabe-se que a tensão adotada para utilização do material na prática fica em torno de 100 kPa. Portanto, para fins de investigação do comportamento efetivo do material, a adoção do modelo linear é válida.

4.3.1.6. Considerações sobre o módulo de elasticidade médio

Adicionalmente foi realizada uma modelagem numérica considerando o módulo de elasticidade médio para efeitos comparativos. Tal média foi calculada com os valores expostos na Tabela 21, o valor encontrado foi de 314 kPa. A Figura 58 apresenta a configuração deformada referente à última fase de aplicação de carga.



Figura 58 – Última fase de aplicação de carga: Compressão = 8,20 mm.

A Tabela 23 reúne os resultados da modelagem numérica do ensaio de compressão para os diferentes níveis de tensão e a Figura 59 compara os resultados previstos numericamente com os obtidos experimentalmente.

Tabela 23 - Resultado da modelagem do ensaio de compressão - $E_{médio}$.

Tensão (kPa)	Compressão (mm)	Espessura Residual (mm)
10	0,41	12,75
20	0,82	12,34
50	2,05	11,11
100	4,10	9,06
150	6,15	7,01
200	8,20	4,96

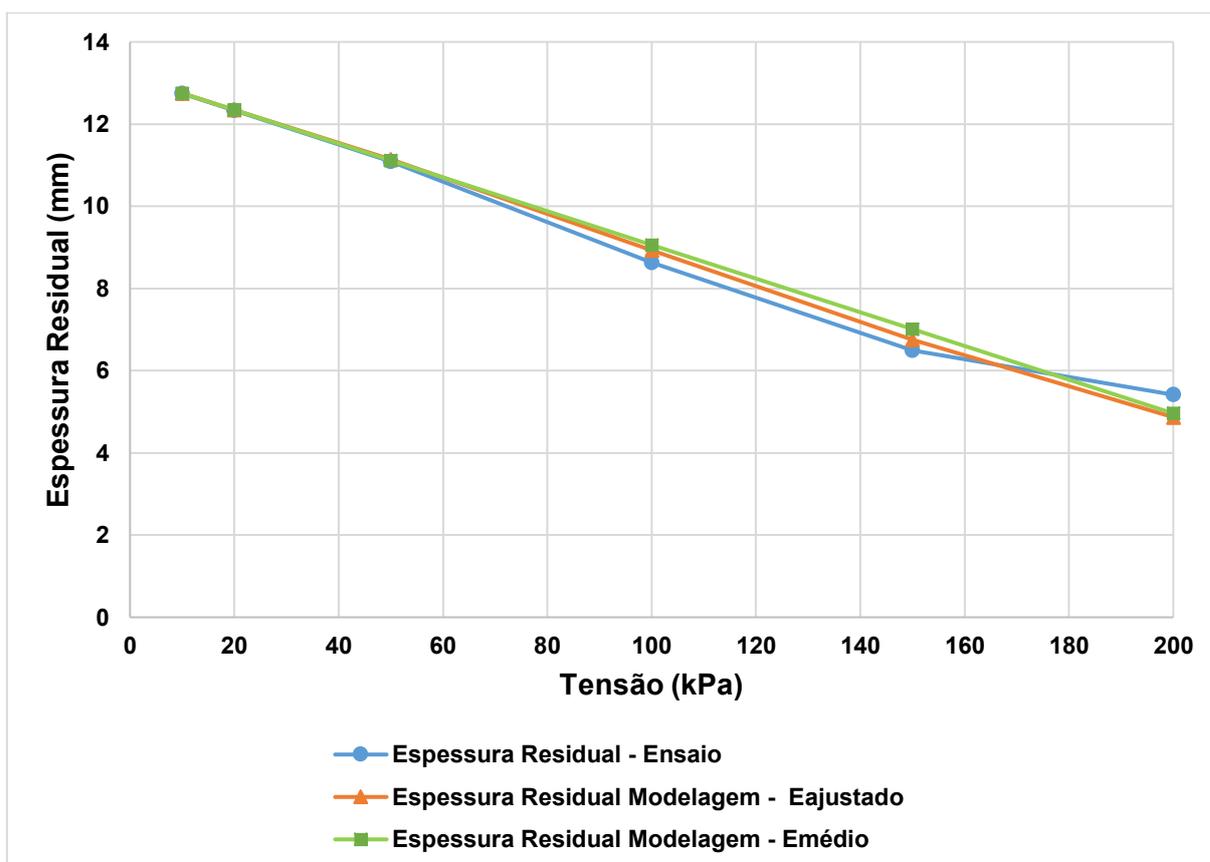


Figura 59 - Ensaio de compressão simples: Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

Observa-se que os resultados obtidos com o módulo de elasticidade ajustado apresentaram valores mais satisfatórios, estando um pouco mais próximos dos resultados ensaiados. Dada a pequena diferença entre os resultados, conclui-se que a utilização do módulo de elasticidade médio pode ser considerada para efeitos de simplificação.

4.3.1.7. Modelagem Numérica do Ensaio de Transmissividade

Os ensaios de transmissividade foram realizados para tensões de 10, 20, 50 e 100 kPa, e gradientes iguais a 1; 0,1 e 0,01. As análises foram realizadas separadamente para cada gradiente hidráulico. Após as simulações, são obtidas a compressão do material e a vazão correspondente a cada gradiente.

4.3.1.8. Geometria e condições de contorno

A espessura do geocomposto inserida no modelo foi de 12 mm, conforme ensaios de transmissividade. A Figura 60 apresenta a geometria adotada nas análises numéricas, onde se observa a presença do carregamento de compressão (A).



Figura 60 - Geometria e condições de contorno: Ensaio de transmissividade.

4.3.1.9. Parâmetros dos Materiais

Para a representação do geocomposto drenante, foram utilizados os dados de permeabilidade (k) e compressibilidade (E) obtidos nos ensaios de compressão e de transmissividade, além dos dados já informados na Tabela 21. Para cada nível de

tensão, esses parâmetros foram estabelecidos e adotados na modelagem de acordo com a carga aplicada em cada fase de cálculo.

A Figura 61 apresenta a relação entre a permeabilidade e a tensão, obtida com os valores de vazão extraídos do ensaio de transmissividade, considerando a redução de espessura decorrente da compressão do geocomposto, para diferentes valores de gradiente hidráulico.

Tabela 24 - Parâmetros do geocomposto: ensaio de transmissividade

Tensão kPa	PERMEABILIDADE (m/dia)			Módulo de Elasticidade E (kN/m ³)
	Gradiente 1	Gradiente 0,1	Gradiente 0,01	
10	19571,0	45862,2	116142,6	315,46
20	16554,5	41332,4	106309,6	317,97
50	7650,4	18596,2	51703,6	318,47
100	2837,9	5456,3	15479,6	290,70

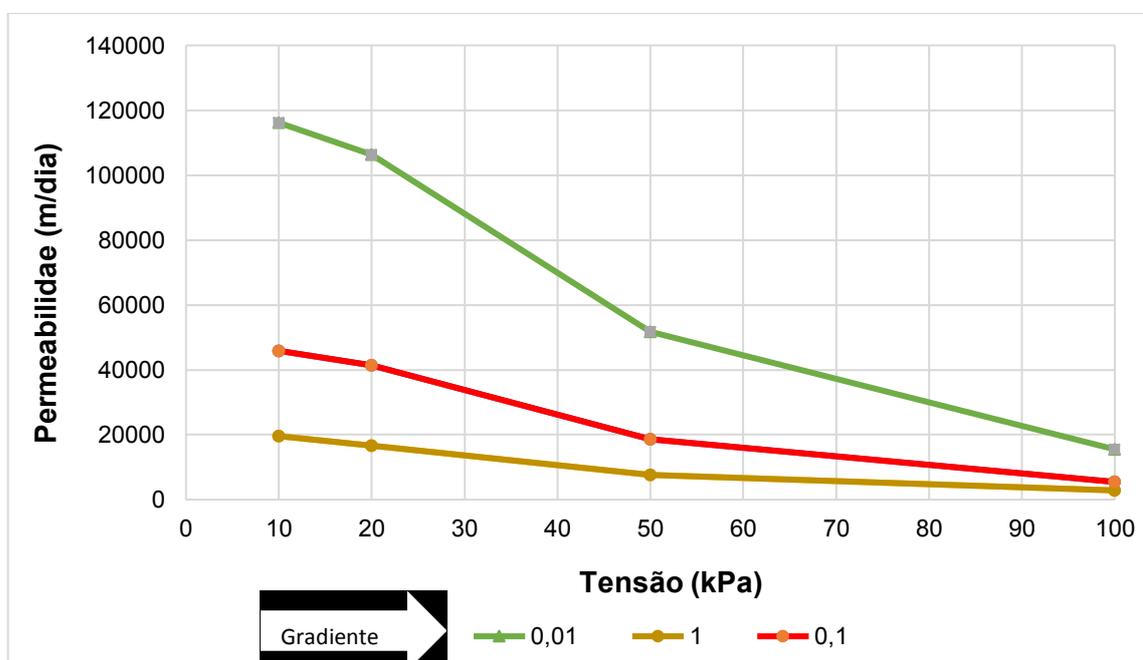


Figura 61 - Relação entre a permeabilidade e a tensão: ensaios de transmissividade.

4.3.1.10. Malha de Elementos Finitos

A Figura 62 apresenta a malha de elementos finitos adotada na reprodução dos ensaios de transmissividade. A malha é composta por 980 elementos triangulares e 8237 nós. Nas análises, também foi executado um refinamento da malha para maior precisão dos resultados em função da espessura reduzida do material, como na simulação dos ensaios de compressão.

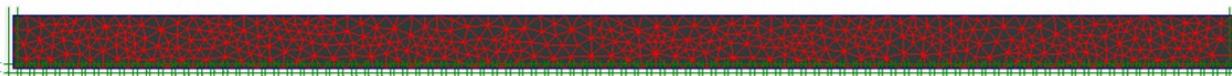


Figura 62 - Malha de elementos finitos - Modelagem do ensaio de transmissividade.

4.3.1.11. Metodologia de Cálculo

Na fase de cálculo, foram introduzidas quatro etapas de carregamento (Figura 63), buscando-se reproduzir fielmente as etapas de ensaio. Para cada etapa, foram adotados os valores de módulo de elasticidade e permeabilidade obtidos a partir dos ensaios de compressão e transmissividade apresentados na Tabela 24.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	Firs
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 s	0	0
✓ 10	1	0	Plastic	Staged construction	0,00 s	1	1
✓ 20	2	1	Plastic	Staged construction	0,00 s	2	2
✓ 50	3	2	Plastic	Staged construction	0,00 s	3	3
✓ 100	4	3	Plastic	Staged construction	0,00 s	4	4

Figura 63 - Fases de cálculo: Ensaios de transmissividade.

4.3.1.12. Apresentação dos Resultados

Nos ensaios de transmissividade, as tensões aplicadas foram de 10, 20, 50 e 100 kPa. Nas análises numéricas, após aplicação de carga em cada fase, foram obtidas as vazões previstas numericamente, e comparadas com as fornecidas pelos ensaios. A Tabela 25 apresenta as vazões previstas numericamente, para os diferentes gradientes hidráulicos, e a Figura 64 compara os resultados experimentais com as previsões numéricas.

Tabela 25- Vazões previstas numericamente: Modelagem dos ensaios de transmissividade

Tensão (kPa)	Vazão (l/s).m		
	Gradiente (1,0)	Gradiente (0,1)	Gradiente (0,01)
10	2,6600	0,5110	0,1562
20	2,2500	0,4610	0,1383
50	1,0400	0,2100	0,0605
100	0,3822	0,0630	0,0141

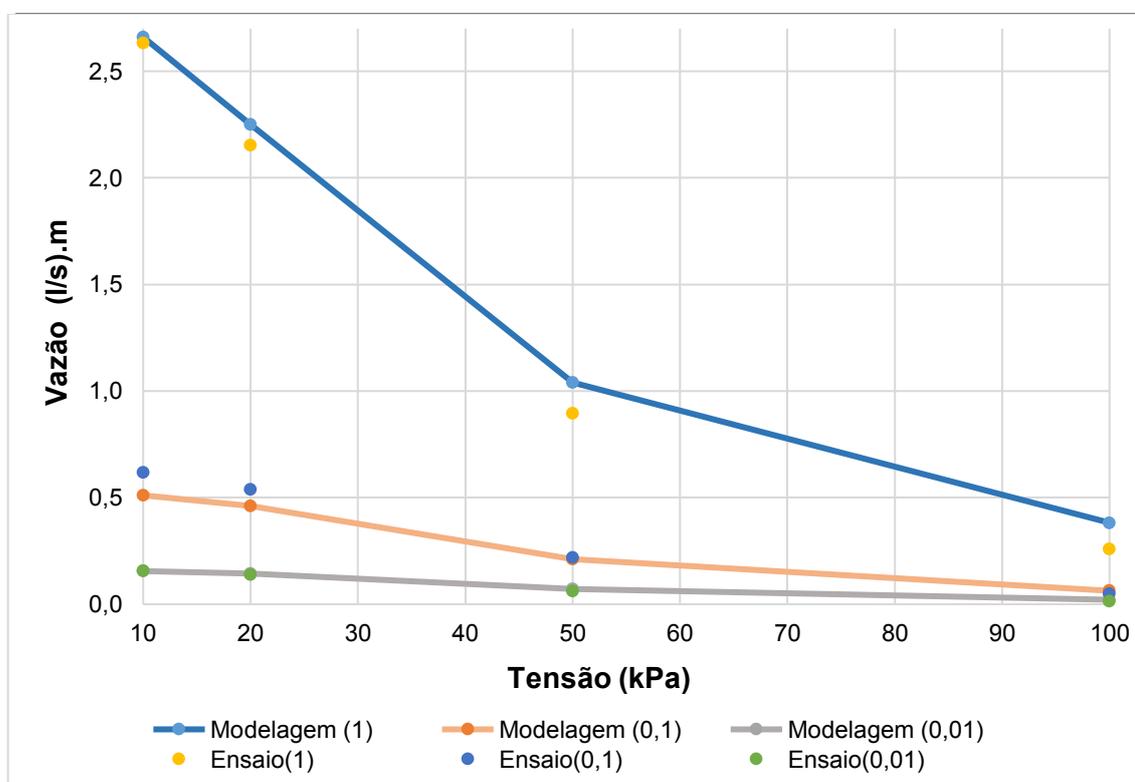


Figura 64 – Comparação entre ensaios de transmissividade e modelagem numérica.

Para o gradiente de maior interesse, gradiente 1, os valores de vazão previstos numericamente encontram maior compatibilidade para tensões menores, o que era esperado, visto que o modelo linear elástico admitido não se adequa para tensões maiores e/ou mais próximas a 200 kPa. Para os demais gradientes, os resultados se mostraram satisfatoriamente próximos dos valores de ensaio, corroborando os parâmetros adotados.

4.4. Modelagem Numérica de uma Situação de Campo

Para efeitos de comparação, será reproduzido um exemplo genérico de uma situação de campo como representada na Figura 65. Neste exemplo, tem-se o cálculo da capacidade de captação de fluxo de água que percola através de um aterro contido por uma estrutura de contenção de 10 m de altura.

A partir da rede de fluxo, determina-se, de forma simplificada, a vazão máxima que percola pelo solo:

$$Q = k \times h \times \left(\frac{N_f}{N_q} \right) \quad (71)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade do solo = 10^{-3} cm/s;

h = altura da estrutura = 10 m;

N_f = número canais de fluxo = 6;

N_q = número de perdas de carga unitária = 8.

Assim, tem-se como resultado:

$$Q = 10^{-5} \times 10 \times \left(\frac{6}{8} \right) = 0,075 (l/s)/m = 6,48 m^3/dia$$

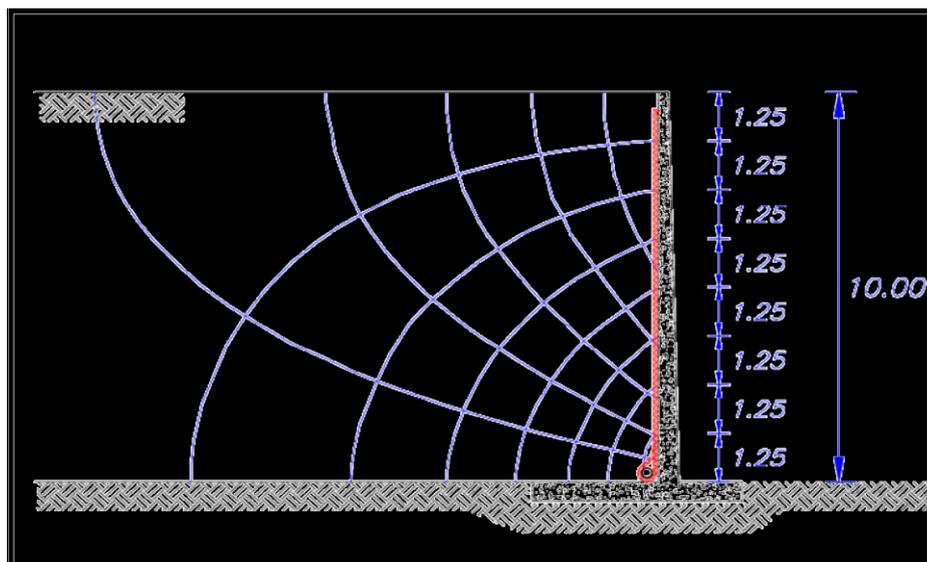


Figura 65 – Caso de estudo. Fonte: Informe Técnico Maccaferri.

Para o cálculo da tensão horizontal efetiva máxima, adotou-se um peso específico saturado igual a 20 kN/m^3 , e um coeficiente de empuxo no repouso (k_0) igual a 0,5, referente a um solo com ângulo de atrito de 30° . A Tabela 26 apresenta os parâmetros geotécnicos adotados para o solo do aterro.

Tabela 26 – Parâmetros do Solo do Aterro

Parâmetro Geotécnico	Valor
Peso específico saturado (kN/m^3)	20
Coeficiente de empuxo no repouso	0,5
Coeficiente de permeabilidade (cm/s)	10^{-3}
Coeficiente de Poisson	0,3
Ângulo de atrito ($^\circ$)	30

O caso de campo foi idealizado em duas dimensões, e as análises numéricas foram executadas em condições de deformação plana. Sabe-se que a representação bidimensional representa uma aproximação, já que a geometria real é tridimensional. No entanto, a análise bidimensional foi considerada aceitável para este caso.

A partir das análises numéricas, serão obtidas as deformações e as vazões do geocomposto, permitindo uma comparação com o comportamento observado nos ensaios de laboratório, e estimado analiticamente.

4.4.1. Análises Preliminares: sem geocomposto

Inicialmente, foi executada uma simulação sem geocomposto, para determinação da vazão que percola pela massa de solo. As análises consideraram os parâmetros listados na Tabela 26. A Figura 66 apresenta a geometria adotada nas análises numéricas preliminares.

As Figura 67 e Figura 68 apresentam os resultados numéricos. Observa-se a tendência de fluxo na Figura 67, e o valor máximo de vazão previsto, que foi de 6,28 m³/dia (Figura 68), próximo ao estimado analiticamente (6,48 m³/dia). Os resultados mostram a capacidade do programa em reproduzir as vazões de campo.

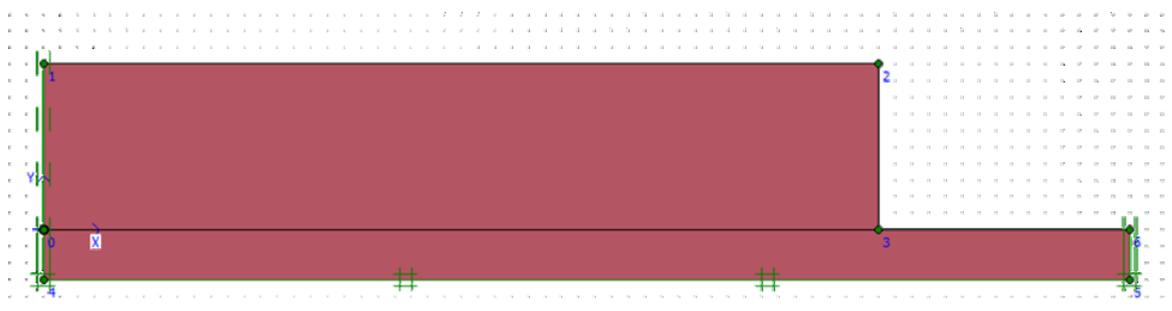


Figura 66 - Geometria e condições de contorno – Aterro sem geocomposto.

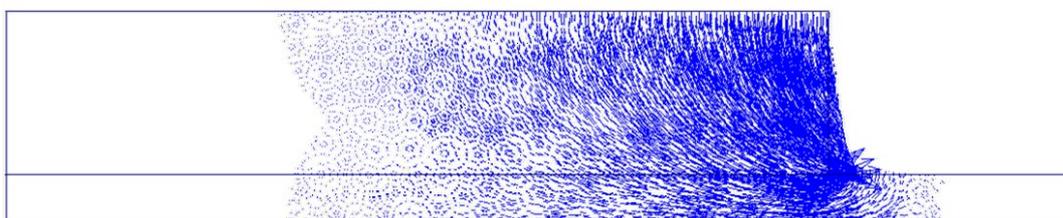


Figura 67 - Capacidade de vazão do aterro.

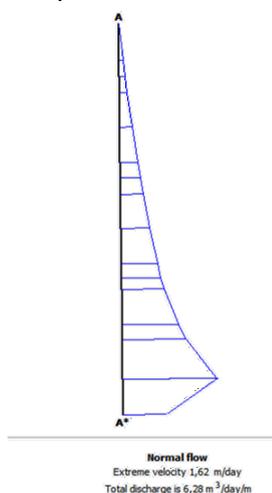


Figura 68 - Vazão ao longo da camada de aterro: 6,28 m³/dia

4.4.2. Situação real de campo: introdução do geocomposto drenante

Uma vez reproduzida a vazão sem dreno, procedeu-se à introdução do geocomposto no problema analisado. Cabe salientar que as condições de estabilidade do muro foram verificadas e garantidas.

4.4.2.1. Geometria e condições de contorno

A Figura 69 apresenta a geometria adotada nas análises numéricas com geocomposto. As condições de contorno consistiram na restrição dos deslocamentos horizontais nas fronteiras laterais, esquerda e direita, e restrição dos deslocamentos verticais na fronteira inferior. Ressalta-se que, em uma etapa preliminar, foi analisada a influência dos contornos nos resultados, chegando-se à geometria ótima apresentada na Figura 69.

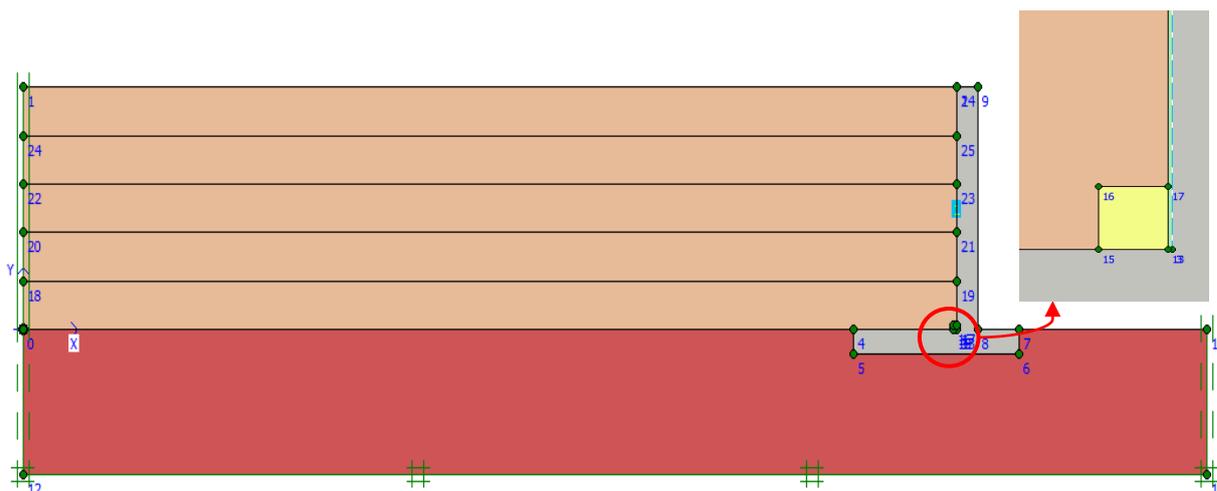


Figura 69 - Geometria e condições de contorno - Modelagem da situação de campo.

No detalhe da Figura 69, pode-se observar a inclusão de um cluster em amarelo representando o tubo dreno responsável pela captação do fluxo proveniente do geocomposto drenante alocado na face interna do muro. A modelagem irá considerar uma construção em etapas, portanto o aterro foi dividido em 5 partes, cada uma com 2,0 m de altura.

4.4.2.2. Parâmetros dos materiais

Na Tabela 27, são apresentados os parâmetros adotados para cada material nas análises da situação de campo. A permeabilidade do geocomposto drenante foi calculada a partir do ensaio de transmissividade e considera a área não deformada do geocomposto com espessura de 12 mm (permeabilidade inicial). O módulo de elasticidade do geocomposto, apresentado na Tabela 27, é referente à condição inicial. Durante as etapas de carregamento, esse valor foi alterado de acordo com o nível de tensão, conforme executado na reprodução dos ensaios de compressão.

Os parâmetros da fundação e do solo compactado foram arbitrados, considerando-se o exemplo escolhido. Com relação ao tubo dreno, foram adotados valores típicos de permeabilidade e deformabilidade.

Tabela 27 – Parâmetros do Materiais

Material	Modelo Constitutivo	Peso	Permeabilidade	Permeabili-	Coeficiente de Poisson	Módulo de elasticidade
		específico	horizontal	dade vertical		
		γ [kN/m ³]	k_x [m/dia]	k_y [m/dia]	ν	E [kN/m ²]
Geocomposto drenante	Linear elástico	1	216	18951	0,10	325
Fundação	Mohr-Coulomb	20	0,005	0,005	0,30	100000
Solo compactado	Mohr-Coulomb	20	0,864	0,864	0,30	80000

4.4.2.3. Malha de elementos finitos

Para obter resultados mais precisos, procedeu-se a um refinamento da malha de elementos finitos no *cluster* referente ao geocomposto. A Figura 70 ilustra a malha de elementos finitos adotada nesta simulação.

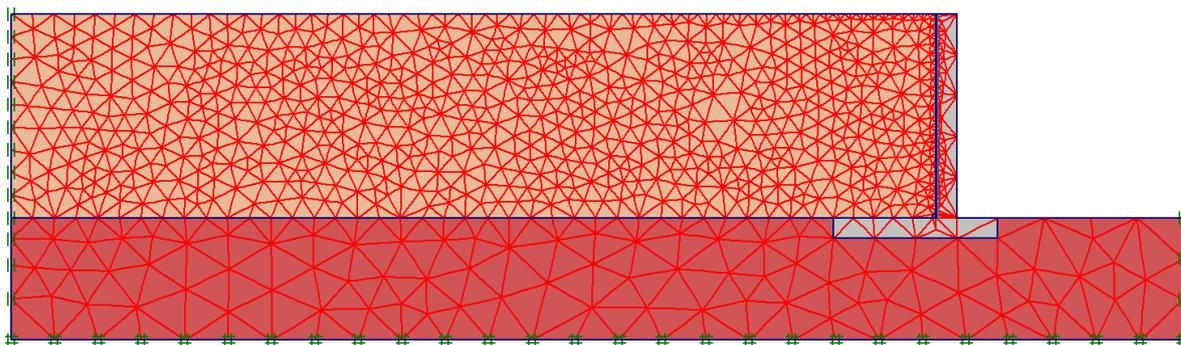


Figura 70 - Malha de elementos finitos: situação de campo.

4.4.2.4. Metodologia de cálculo

A simulação numérica constou de cinco etapas de cálculo. Em cada fase, foram acrescentadas camadas de 2,0 m de altura de solo compactado (aterro) até atingir a altura final de 10,0m. Para o geocomposto drenante, foram adotados, conforme ensaio, módulos de elasticidade correspondentes à tensão atuante.

A permeabilidade do geocomposto, no entanto, foi mantida constante durante todo o cálculo, de forma a verificar se o programa é capaz de considerar a redução da permeabilidade com a diminuição da espessura do elemento drenante.

4.4.2.5. Apresentação de resultados

Na Figura 71, são apresentadas as distribuições das tensões horizontais efetivas para cada estágio de carregamento. Nessa fase de cálculo é feita a ativação do dreno e, conseqüentemente, a poropressão na face do muro é nula, ocasionando um aumento da tensão efetiva. A Figura 72 mostra a comparação entre os resultados obtidos na análise e os calculados analiticamente para o repouso e a condição ativa. Observa-se que os resultados da análise figuram de modo intermediário entre as duas condições. O programa detecta o deslocamento do muro e o solo deixa a condição inicial de repouso e aproxima-se da condição ativa, ocorrendo uma variação nas tensões horizontais efetivas.

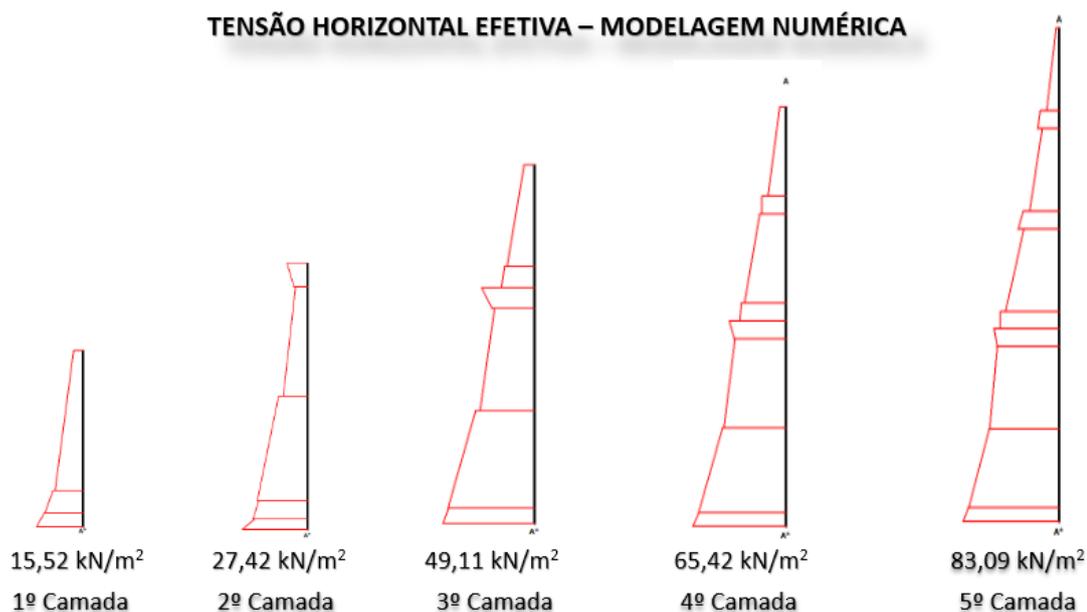


Figura 71 -Tensão horizontal efetiva - Modelagem da situação de campo.

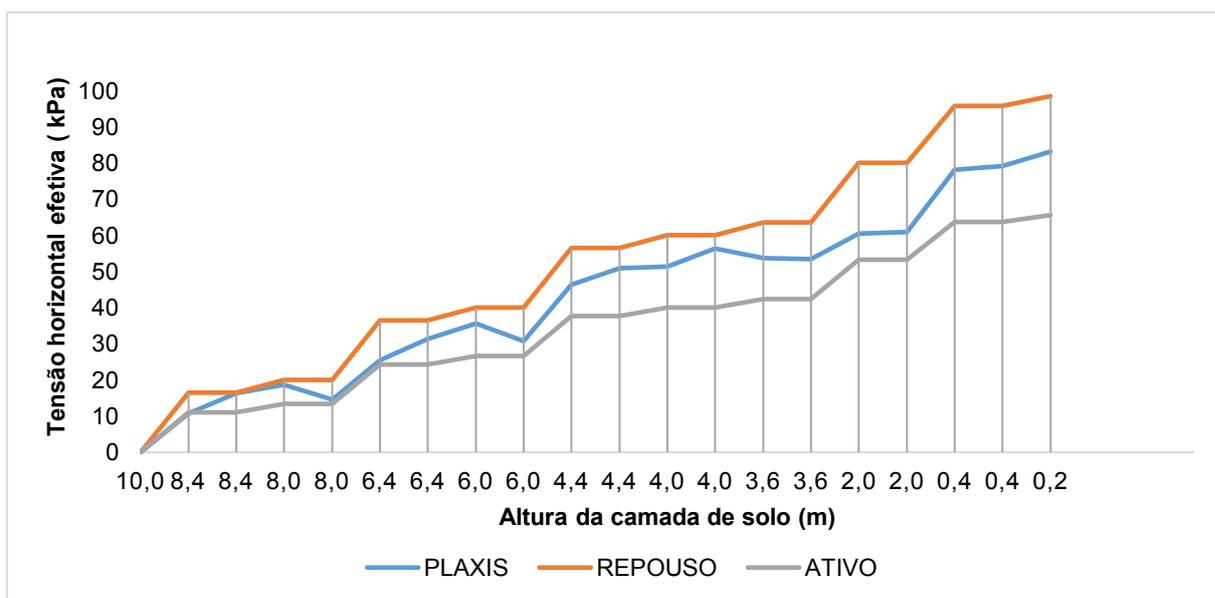


Figura 72 - Tensões horizontais efetivas medidas na face do muro – Situação de campo.

A distribuição das poropressões está exibida na Figura 73. Observa-se o comportamento coerente do geocomposto nas análises numéricas, com valores de poropressão nulos nos pontos próximos ao material drenante, indicando a coerência do modelo.

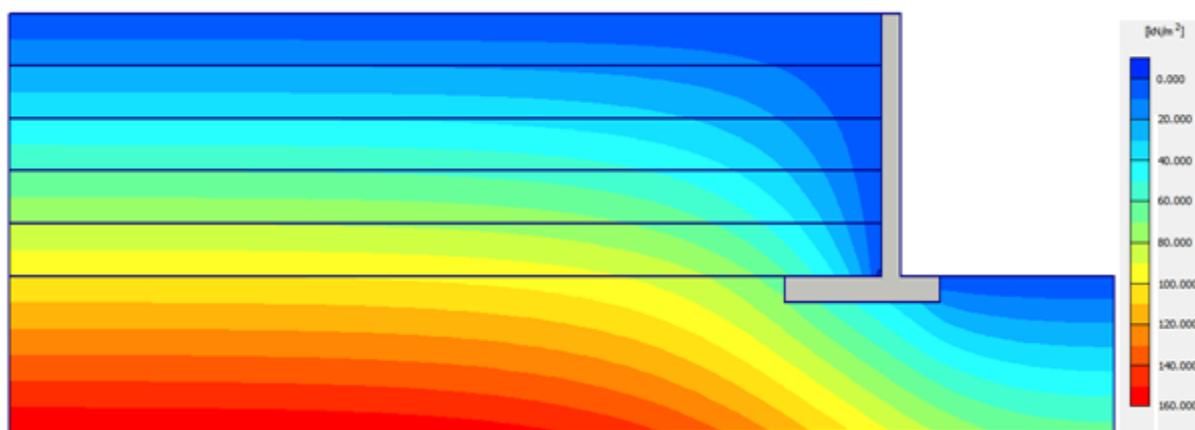


Figura 73 - Poropressões previstas numericamente.

A Figura 74 apresenta as deformações sofridas pelo geocomposto, decorrentes do carregamento horizontal imposto pelo solo do retroaterro. A Figura 75 exibe uma visão mais detalhada dos resultados finais de deformação horizontal. Nota-se que a deformação localiza-se basicamente no geocomposto drenante, uma vez que os materiais circundantes apresentam módulos de elasticidade mais elevados.

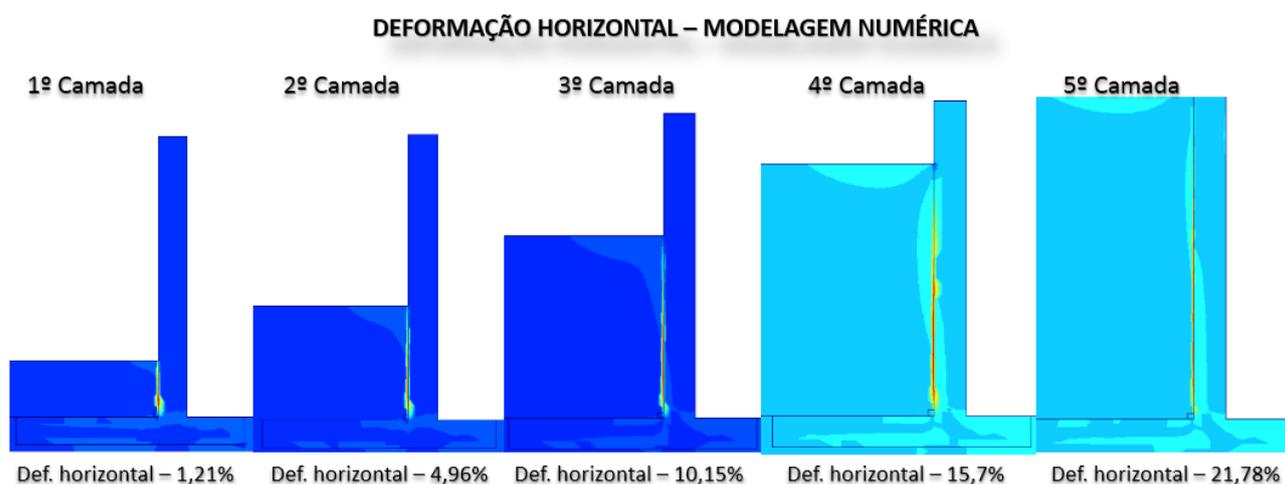


Figura 74 - Deformações horizontais resultantes da modelagem numérica da situação de campo.

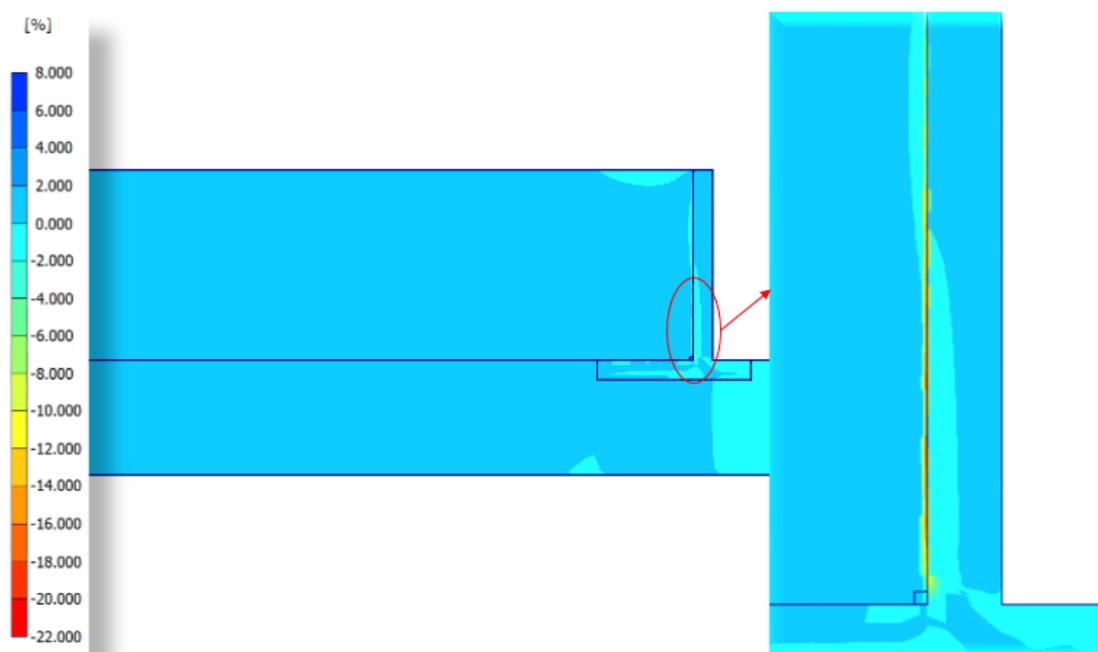


Figura 75 - Resultado da modelagem numérica - Deformação horizontal final 20,49%

Para as respectivas tensões horizontais na face do muro extraídas da modelagem numérica, foram calculadas as deformações obtidas no ensaio de compressão. Os resultados constam na Tabela 28, em comparação com as deformações previstas na modelagem.

Tabela 28 - Comparação entre as deformações previstas numericamente e as medidas experimentalmente

Tensão efetiva horizontal kN/m ²	Modelagem Numérica	Ensaio de Laboratório
	Deformação (ϵ)	Deformação (ϵ)
15,52	1,21%	4,39%
27,42	4,96%	9,27%
49,11	10,15%	17,65%
65,42	15,70%	23,52%
83,09	21,78%	29,46%

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** compara as deformações resultantes da modelagem numérica e os valores determinados a partir do ensaio de compressão simples. A deformação sofrida pelo geocomposto na situação de campo mostrou-se inferior à obtida nos ensaios de compressão. Cabe ressaltar que nos ensaios de compressão ocorre a aplicação de uma carga uniformemente distribuída

ao longo da geocomposto, o que não ocorre na condição de campo. Além disso, no campo, ocorrem pequenos deslocamentos do muro, que, de certa forma, aliviam a tensão no geocomposto. Passa a existir uma pequena parcela de deslocamento de corpo rígido que impacta na deformação do geocomposto.

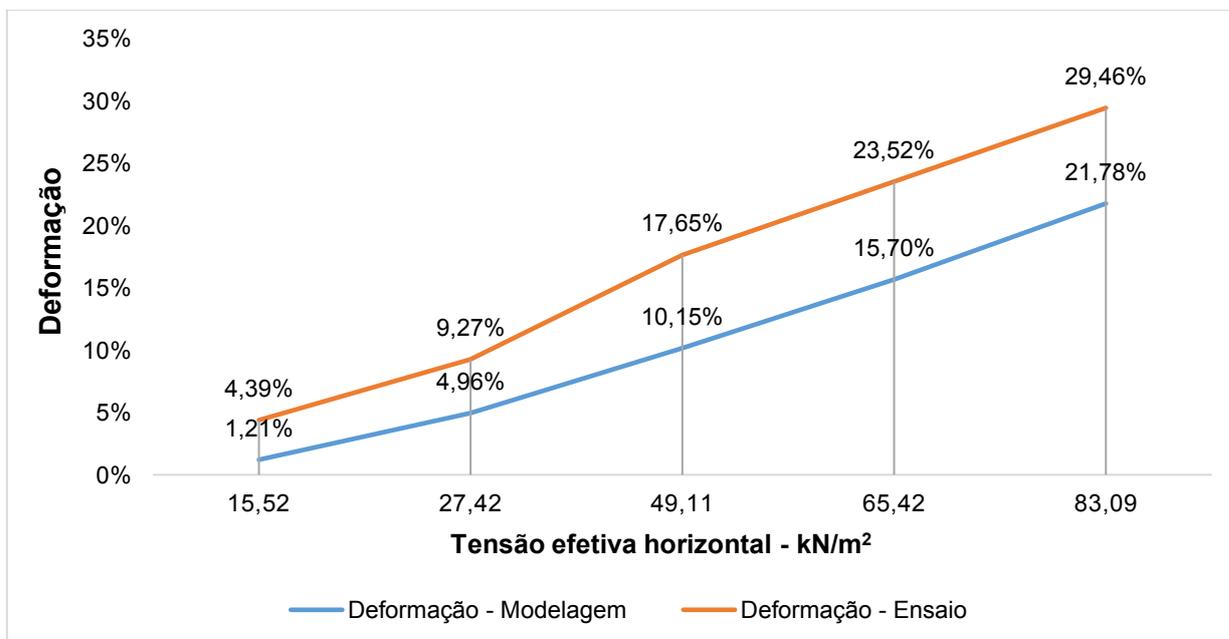


Figura 76 - Gráfico comparativo entre as deformações previstas numericamente e as medidas experimentalmente.

A Figura 77 apresenta os resultados de vazão no dreno para as diferentes etapas de carregamento. Observa-se que os valores da vazão no geocomposto não se alteraram com o nível de carregamento. Esperava-se que, com a deformação do geocomposto e consequente redução na espessura, o programa ajustasse a permeabilidade e, assim, a vazão seria reduzida, como ocorreu no ensaio de transmissividade. O programa, no entanto, não é capaz de realizar uma análise acoplada tensão-deformação-permeabilidade, sendo necessário o uso de uma metodologia para incorporar a redução da permeabilidade com a deformação.

VAZÃO NO GEOCOMPOSTO DRENANTE – MODELAGEM 1

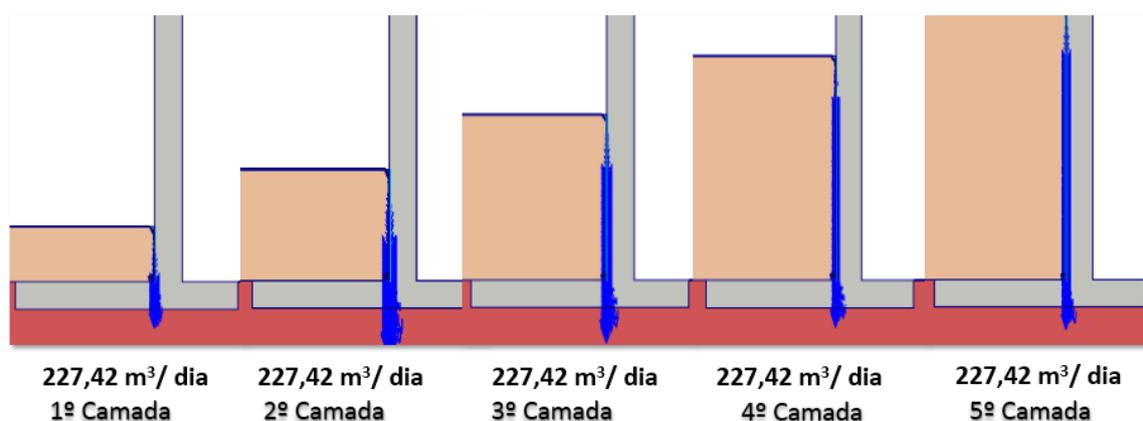


Figura 77 - Vazão no dreno em cada etapa de cálculo: Situação de campo.

Apesar da deformação sofrida pelo geocomposto ter sido reproduzida pela modelagem, os valores da vazão no geocomposto não se alteraram como esperado. Esperava-se que, com a deformação do material e redução na espessura do geocomposto, o programa ajustasse a permeabilidade e, assim, a vazão seria reduzida, como ocorreu no ensaio de transmissividade. Em função desta incompatibilidade, foi realizada uma segunda modelagem numérica da situação de campo no item 5.4.3.

4.4.3. Situação de campo com ajuste de permeabilidade

A geometria, as condições de contorno e as etapas de cálculo são iguais às apresentadas no Item 4.4.2. A diferença desta análise consiste no ajuste da permeabilidade em função da deformação do geocomposto drenante.

Tendo em vista que as deformações do geocomposto foram satisfatoriamente reproduzidas nas análises numéricas, optou-se por variar a permeabilidade em cada etapa de cálculo em função da deformação prevista numericamente. Para tanto, foram utilizados os resultados da modelagem de campo (Figura 74) e a equação da curva referente à permeabilidade do geocomposto obtida no ensaio de transmissividade para o gradiente 1 (Figura 61). De acordo com esta metodologia, foram obtidos os valores de permeabilidade constantes na Tabela 29.

Tabela 29- Valores de permeabilidade definidos em função da deformação.

MODELAGEM NUMÉRICA		ENSAIO DE TRANSMISSIVIDADE
Deformação horizontal prevista numericamente	Tensão normal efetiva máxima atuante no geocomposto [kN/m ²]	Permeabilidade definida por ensaios de transmissividade [m/dia]
1,41%	15,52	17344
4,07%	27,42	13349
7,49%	49,11	8283
10,50%	65,42	5786
20,49%	83,09	3922

Desta forma, nas análises subsequentes, o geocomposto foi atualizado em cada etapa de carregamento através da modificação da permeabilidade e do módulo de elasticidade, em função do nível de tensão.

A Figura 79 apresenta os valores de vazão previstos nas novas análises, em cada etapa de cálculo. Observa-se que os resultados se mostraram coerentes e compatíveis com os obtidos nos ensaios de transmissividade.

VAZÃO NO GEOCOMPOSTO DRENANTE – MODELAGEM NUMÉRICA

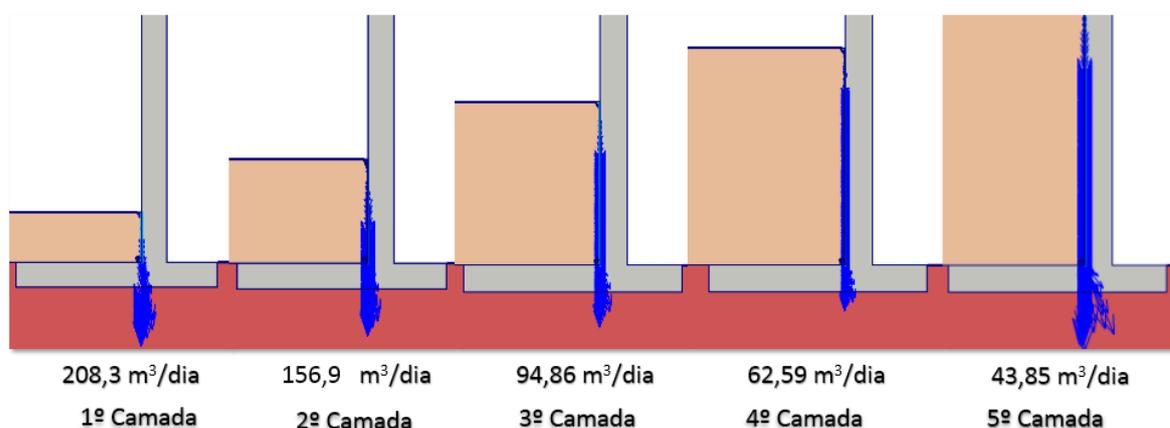


Figura 78 - Vazão no dreno em cada etapa de cálculo – Valores de permeabilidade ajustados.

Na Figura 79, apresenta-se uma comparação entre os valores de vazão previstos na modelagem numérica e os resultados de vazão obtidos no ensaio de transmissividade. Os valores da capacidade de vazão obtidos na modelagem numérica apresentaram concordância com os resultados dos ensaios.

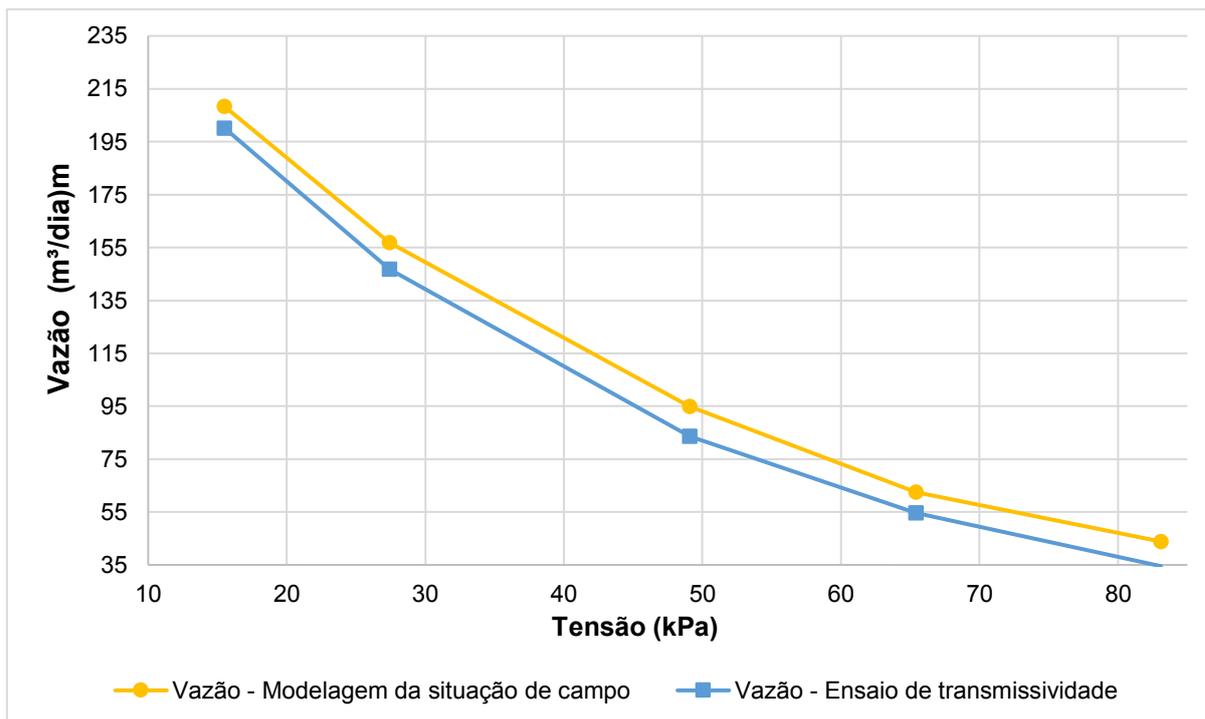


Figura 79 - Comparação entre as vazões previstas na modelagem da situação de campo e obtidas experimentalmente.

Adicionalmente, pode-se observar na Figura 80 um gráfico que ilustra a variação da capacidade de vazão de acordo com a altura do muro/camada de solo. Os resultados da modelagem foram considerados satisfatórios. As pequenas diferenças encontradas nos valores de vazão se devem a ajustes da função que define a permeabilidade do material extraída do ensaio de transmissividade.

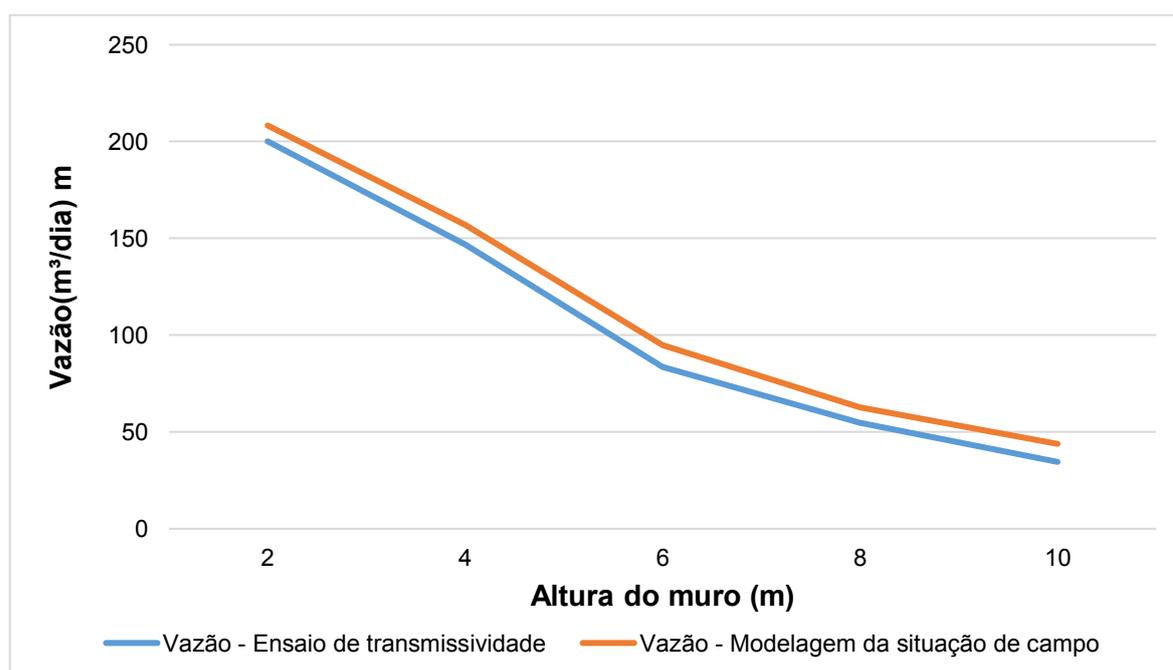


Figura 80 – Relação entre vazão e altura da camada de solo.

4.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados da modelagem numérica. Foram modelados os ensaios de compressão simples e transmissividade com o objetivo de calibrar o modelo. Após essa fase, foram realizadas análises numéricas de uma situação de campo. Os resultados obtidos foram comparados com os valores obtidos nos ensaios de caracterização do geocomposto drenante, e mostraram-se satisfatórios em termos de permeabilidade e deformabilidade.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a coleta de dados mais apurados sobre o desempenho de um geocomposto drenante. A pesquisa foi realizada com o apoio da empresa Maccaferri do Brasil, e constou de um programa de ensaios de laboratório visando obter as características físicas, mecânicas, hidráulicas e de desempenho do MacDrain 2L. Adicionalmente, foram executadas análises numéricas para a previsão do comportamento deste material em condições de campo.

- Com relação aos ensaios de laboratório:

Os ensaios para determinação das características físicas do geocomposto (espessura nominal e gramatura) forneceram valores coerentes com a especificação do fabricante. Os resultados dos ensaios de espessura nominal mostraram pequena variação, que pode ser atribuída ao processo de fabricação. Para efeitos práticos, a espessura do geocomposto considerada no presente trabalho foi de 12 mm.

Os ensaios referentes às propriedades mecânicas como resistência à tração de faixa larga e resistência ao puncionamento apresentaram resultados superiores aos especificados no catálogo do fabricante.

Embora os ensaios de compressão tenham sido conduzidos até a tensão de 9000 kPa, a seção de interesse deste estudo se restringe a valores próximos de 100 kPa, pois é o limite de aplicação do produto. O valor médio de resistência à compressão foi de 324 kPa, correspondendo a uma deformação média de 67,54 %. A partir destes ensaios, foram obtidos os módulos de elasticidade do geocomposto sob diferentes níveis de tensão. Observou-se, também, que a compressão ocorreu de maneira mais intensa para tensões inferiores a 200 kPa. Para tensões mais elevadas ocorre o confinamento do núcleo e uma tendência à estabilização da espessura.

Os ensaios de permeabilidade normal, executados considerando uma camada única de geotêxtil e camadas duplas de geotêxtil mostraram-se dentro dos padrões esperados.

Nos ensaios de transmissividade, o acréscimo de tensão impactou de maneira significativa na redução da capacidade de vazão do geocomposto. Essa capacidade

sofre maior impacto para tensões inferiores a 50 kPa. Para tensões maiores, ocorre um maior confinamento do núcleo e redução dos poros, havendo uma tendência à estabilização da espessura e, conseqüentemente, da capacidade de vazão.

Deve-se destacar que no ensaio de transmissividade o tipo de apoio utilizado foi rígido/rígido. Sabe-se que este tipo de apoio permite a condução de maior volume passante, uma vez que o material utilizado em apoios flexíveis pressiona o geotêxtil filtro para dentro do núcleo reduzindo a vazão. Mesmo cientes das diferenças decorrentes das condições de apoio, não foi possível, para este estudo, a obtenção do material necessário para a realização do ensaio de transmissividade em condições diferentes das usadas. Sendo assim, os resultados obtidos devem levar em consideração tal diferença.

A definição do comportamento do material geossintético frente à fluência à compressão foi estudada através do ensaio acelerado para determinação de fluência à compressão de geossintéticos baseado na superposição de tempo e temperatura usando o método SIM. A tensão constante aplicada foi de 50 kPa e a espessura inicial da amostra foi de 12,95 mm. Buscando entender com maior profundidade o comportamento do material para o período inicial, foram analisados os resultados dos ensaios executados por Plácido (2006) e Rojas (2014). Tais estudos indicam que as deformações significativas para o material geocomposto ocorrem nas primeiras horas de ensaio. Após esse período, a variação de espessura é pouco sensível. Os resultados destes dois estudos corroboram as informações obtidas no ensaio de fluência, pode-se constatar a redução de espessura para um período de 100 anos apresentando deformação de 36,09% para este tempo.

Com os dados obtidos através dos ensaios de fluência à compressão, transmissividade e compressão simples foram feitas correlações com o objetivo de prever a redução da capacidade de vazão do geocomposto para longos períodos de tempo. Cabe observar que essa previsão utilizou um ensaio de fluência cuja tensão constante é de 50 kPa, portanto deve-se ter em mente que todo o comportamento do material a longo prazo refere-se a deste nível de carregamento. Os resultados mostraram que a redução da capacidade de vazão em longo prazo se mostra um pouco mais acentuada para o gradiente 1. À medida que o gradiente diminui, a redução da vazão se torna mais sensível.

A maior parte da deformação neste material ocorre nas primeiras horas de utilização, portanto era esperado que a fase mais impactante na redução da vazão tenha

ocorrido antes do primeiro ano e que, para longos prazos, a diminuição na condução de fluxo fosse pequena. Este estudo mostrou o grau de sensibilidade desta redução e ainda permitiu uma previsão para o período de 100 anos. Baseando-se nos resultados, o material mostrou um desempenho considerado bastante satisfatório, uma vez que a tensão utilizada é suficiente para as aplicações práticas.

Ainda com os dados obtidos, foram calculados fatores de redução. Os valores obtidos neste estudo diferem dos valores orientados por Koerner (1997) que variam de 1 a 2. Os resultados aqui exibidos fizeram diferenciação entre gradientes e a determinação dos fatores de redução por fluência considerou a ocorrência do fenômeno para uma tensão específica de 50 kPa.

- Com relação à reprodução numérica dos ensaios de laboratório:

Nas análises numéricas foram reproduzidos numericamente os ensaios de compressão simples e transmissividade com a finalidade de calibrar o modelo, em seguida procedeu-se à simulação numérica de uma situação de campo.

Na modelagem do ensaio de compressão simples observou-se que o modelo numérico se aproximou satisfatoriamente dos resultados do ensaio. Sabe-se que a tensão adotada para utilização do material na prática é inferior a 200 kPa, assim, para fins de investigação do comportamento efetivo do material, a adoção do modelo linear foi considerada válida.

Na modelagem do ensaio de transmissividade constatou-se que para o gradiente de maior interesse, gradiente 1, os valores de vazão previstos numericamente encontram maior compatibilidade para tensões menores, o que era esperado, visto que o modelo linear admitido não se adequa para tensões maiores e/ou mais próximas a 200 kPa.

- Com relação à previsão de comportamento no campo:

Na modelagem da situação de campo foi reproduzido o cálculo da capacidade de captação de fluxo de águas que percola através de um aterro contido por uma estrutura de contenção de 10 m de altura. Para a modelagem, em cada fase de construção foram acrescentadas camadas de 2m de altura de solo compactado (aterro) até atingir a altura final.

A deformação sofrida pelo geocomposto na primeira análise mostrou-se compatível com os ensaios de compressão realizados, no entanto, os valores da

vazão no geocomposto não se alteraram. Nesta análise a permeabilidade do material foi mantida a mesma durante todo o cálculo, o que resultou em valores de vazão incoerentes. Para corrigir, foi feita uma segunda modelagem considerando a adequação da permeabilidade do geocomposto em cada fase de cálculo. Desta forma o geocomposto foi atualizado em cada etapa de carregamento através da modificação da permeabilidade e do módulo de elasticidade, em função do nível de tensão de acordo com as deformações/tensões da primeira modelagem. Os resultados relativos a capacidade de vazão do material obtida na segunda análise foram considerados satisfatórios, apresentando concordância com os resultados dos ensaios de transmissividade. As pequenas variações encontradas nos valores de vazão se devem a ajustes da função que define a permeabilidade do material extraída do ensaio de transmissividade.

5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

São apresentadas algumas sugestões e recomendações que podem ser úteis para estudos posteriores:

Recomenda-se a realização de um estudo que considere a execução de ensaios de transmissividade em condições de apoio variadas. Esta consideração poderia avaliar tanto a influência do tipo de apoio na capacidade de vazão de geocompostos drenantes quanto estudar as condições de apoio mais próximas da realidade.

Sugere-se uma avaliação sobre o comportamento de geocompostos com outros núcleos para calcular a influência do material componente.

Recomenda-se também a realização de ensaios de fluência em outros níveis de tensão para obtenção de fatores de redução mais abrangentes.

Propõe-se ainda a realização de instrumentação de obra, permitindo o confronto entre os dados de campo, previsões numéricas e experimentais. A exumação de amostras de campo também permitirá avaliar o comportamento dos geocompostos à fluência, e a comparação entre diferentes sistemas de drenagem.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12553 - Geossintéticos - Termos e definições**. Rio de Janeiro. 2003.
- __**NBR 13359 - Geotêxteis - Determinação da resistência ao puncionamento estático - Ensaio com pistão tipo CBR - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1995
- __**NBR 12568 - Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área.** Rio de Janeiro, 2003.
- __**NBR 12569 - Geossintéticos - Determinação de espessura**. Rio de Janeiro, 2003.
- __**NBR 12593 - Amostragem e preparação de corpos-de-prova de geotêxteis – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.
- __**NBR 10319 - Geossintéticos - Ensaio de tração faixa larga**. Rio de Janeiro, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4491 - Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity**, West Conshohocken, PA, 1999.
- __**ASTM D5199 - Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics**, West Conshohocken, PA, 1999.
- __**ASTM D 6364 – Standard Test Method for Determining the Short–Term Compression Behavior of Geosynthetics**, West Conshohocken, PA, 1999
- __**ASTM D 7361 – Standard Test Method for Accelerated Compressive Creep of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method**, West Conshohocken, PA, 2012
- __**ASTM D 4716 – Standard Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head**, West Conshohocken, PA, 2013.
- __**ASTM D 4991 – Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity**, West Conshohocken, PA, 2006.
- CASAGRANDE, A. Seepage Trough Dams. [S.l.]: Journal of the New England Water Works Association, v. II, 1937. p. 136-179.
- CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967.

- COSTA, C. M. **Deformações dependentes do tempo em muros de solo reforçado com geotêxteis**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 2004. 362 p.
- COSTA, C. M. **Fluência de geotêxteis**. Dissertação de Mestrado. ed. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, 1999. 116 p.
- CRAIG, R. F. Craig's Soil Mechanics. In: _____ **Craig's Soil Mechanics**. 7ª Ed. ed. London: Spon Press, 2004. p. 30-70.
- BRAJA, M. Das. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 7ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- KOERNER, M. R. **Designing with Geosynthetics**. 4ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- MULLER, W. W.; JAKOB, I.; TATZKY-GERTH, R. Long-term water flow capacity of geosynthetic drains and structural stability of their drain cores. **Geosynthetics International**, n. 15, p. 437-451, Abril 2008. ISSN 6.
- NIELSEN, L. E. **Mechanical properties of polymers and composites**. NY: Marcel Dekker Inc., 1974. 63-123 p.
- PLÁCIDO, R.. **O uso de geocomposto como camada indutora para redução de tensões sobre estruturas enterradas**. São Paulo: USP, 2006.
- ROJAS, D. S. **Estudo do comportamento de um geotêxtil drenante em relação à sua capacidade de vazão**. Rio de Janeiro: RJ, 2014.
- TERZAGHI, PECK, R. B.; MESTI, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice**. 3ª Ed. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. p. 87-120.
- TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. London: John Wiley & Sons, Inc, 1943
- THORTON, J. **The stepped isothermal method (SIM) for time-temperature superposition**. Creep and Assessment of geosynthetics for Soil Reinforcement, 1998.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia Ciência e Aplicação. In: TUCCI, C. E. M.. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 4ª. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993. p. 769-792.
- VERTEMATTI, C. J. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1ª. ed. São Paulo: Blucher, 2004.
- VILANOVA, LUCIANO CALDEIRA. **Mecânica dos Fluidos**. 3. Ed. ed. Santa Maria - RS: e-Tec Brasil, 2011.

YEO, S.-S. **Evaluation of Creep Behavior of Geosynthetics Using Accelerated and Conventional Methods.** [S.l.]: Drexel University, 2007. 40 - 43 p.

ZANZINGER, H.; SAMA, S. R.; DOBRATA, A. **Method for direct measurements of the long-term water flow capacity of drainage geocomposites under soft bedding conditions.** 9th International Conference on Geosynthetics, 2010.