

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ENSAIOS DE TRANSMISSIBILIDADE EM GEOCOMPOSTOS
PARA DRENAGEM

CÁSSIO ANDRÉ DA SILVA

ORIENTADOR: ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G. DM 157/2007

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2007

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

**ENSAIOS DE TRANSMISSIBILIDADE EM GEOCOMPOSTOS
PARA DRENAGEM**

CÁSSIO ANDRÉ DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

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

**LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DENISE MARIA SOARES GERSCOVICH, DSc. (UERJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 30 de MARÇO de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, CÁSSIO ANDRÉ DA

Ensaio de transmissibilidade em geocompostos para drenagem. [Distrito Federal] 2007. xx, 103 p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2007)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil

1. Geossintéticos

2. Drenagem

3. Transmissibilidade

4. Ensaio de Laboratório

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, C. A. (2007). Ensaio de Transmissibilidade em Geocompostos para Drenagem. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-157A/07, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cássio André da Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Ensaio de Transmissibilidade em Geocompostos para Drenagem

GRAU / ANO: Mestre / 2007

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

Cássio André da Silva

SQN 405, Bloco G, Apt. 204, Asa Norte

707846-070 - Brasília/DF – Brasil

e-mail: cassioasilva@unb.br

Aos meus queridos pais, Jacó e Neide, pelo incentivo em minha vida profissional.

AGRADECIMENTOS

O curso de pós-graduação em geotecnia da Universidade de Brasília tem como particularidade a congregação de pessoas provenientes de diversas regiões do Brasil, inclusive de outros países. A distância do local de origem e da família propicia o fortalecimento dos laços de amizade entre alunos, professores e funcionários. Sendo assim, expressarei meus agradecimentos principalmente às pessoas pertencentes ao ciclo de amizade formado em Brasília, e a outros que contribuíram de certa forma para a realização do meu curso de mestrado:

A minha família, base de minha formação pessoal, fonte de incentivo para minha realização profissional e fonte de apoio ao longo dos momentos de dificuldades.

Ao professor Ennio Palmeira, o qual admiro pela competência e discrição com os quais desempenha seu trabalho na UnB, expresso meus agradecimentos pela excelente orientação ao longo do desenvolvimento de meu trabalho, pelos esclarecimentos prestados, prontidão nas correções dos trabalhos e presteza no esclarecimentos de dúvidas.

Aos professores da graduação na UFRN, Olavo Santos e Lúcio Flávio, com os quais pude ter o primeiro contato com a pesquisa científica, agradeço pelas recomendações encaminhadas à Geotecnia, para minha admissão no mestrado.

Aos meus primeiros contatos em Brasília: Diêgo, Alexandre Gil, Patrícia, James e Eider, os quais contribuíram para minha instalação e adaptação na cidade, além das orientações iniciais a respeito do curso de mestrado.

Aos meus grandes amigos, pelo companheirismo ao longo do tempo em que estive em Brasília: Josi, Liris, Salomé, Giovane e Paulo Rafael.

Aos membros da “diretoria”: Daniel, Marcos e Ary, com os quais tive a oportunidade de conviver além da sala de aula, nos momentos de descontração.

Aos meus “irmãos” de orientação: Marianna, Gregório e Hélber, que proporcionaram um contato inicial com o Grupo de Pesquisa em Geossintéticos.

Aos demais colegas da UnB, com os quais pude conviver mais intensamente ao longo do decorrer do mestrado: Lorena, Graça, Enio, Carmem, Petrônio, Claudinha, Juan, Joel e Suzana (*in memorian*).

A colaboração de empresas como a Nortène Plásticos Ltda e Reforsolo Engenharia, nas pessoas de Indira Vidal e Haroldo Paranhos, respectivamente. Pelo fornecimento de amostras para a realização dos ensaios da pesquisa.

A todos os professores e funcionários da Geotecnia, pelo amigável convívio ao longo do curso de mestrado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Os geossintéticos têm sido amplamente empregados em sistemas de drenagem em obras geotécnicas, em virtude da escassez ou custo de materiais naturais. Dentre as principais vantagens oferecidas pelos geossintéticos com características drenantes, destaca-se a excelente capacidade de transmissão de fluidos ao longo do plano. Tal propriedade, denominada transmissibilidade, é obtida em função da permeabilidade ao longo do plano e da espessura do geossintético. Nessa dissertação a quantificação da transmissibilidade de vários geossintéticos foi realizada por meio do ensaio de transmissibilidade hidráulica, com a utilização de um equipamento desenvolvido na Universidade de Brasília (UnB). Foram ensaiados geossintéticos comumente encontrados no mercado nacional, tais como: geotêxteis não-tecidos, georredes e geocompostos formados pela combinação de geotêxteis não-tecidos e diferentes materiais drenantes (georredes e geoespaçadores). Novos geocompostos foram desenvolvidos com o intuito de produzir materiais de baixo custo, além de permitir a reutilização de materiais inservíveis. Desta forma, foram produzidos geocompostos alternativos, combinando-se geotêxteis não-tecidos com tampas de garrafa PET e tiras de pneus, como materiais constituintes do núcleo drenante. A metodologia de ensaio envolveu a aplicação de tensões normais de compressão variando de 2 a 400 kPa, sob gradientes hidráulicos de 0,5 e 1,0, realizando-se medições de vazão, variações de espessura dos geossintéticos e distribuição de carga hidráulica ao longo do comprimento do corpo-de-prova. Investigou-se também o efeito de intrusão de material nos vazios de georredes e geocompostos. O equipamento utilizado mostrou-se adequado aos objetivos da pesquisa e os resultados evidenciaram elevadas capacidades de descarga dos geocompostos constituídos por tampas com pequenos espaçamentos entre as faces externas. Os geocompostos convencionais apresentaram desempenhos compatíveis com os dados fornecidos pelos respectivos fabricantes e os comportamentos destes produtos sob elevados níveis de tensões normais foram investigados e quantificados.

ABSTRACT

Geosynthetics have been widely employed in drainage systems of geotechnical works due to scarcity or costs of granular materials. In this context, the high capacity of fluid transmission is one of the relevant properties of some geosynthetic products. This property is called transmissivity and is obtained as a function of the geosynthetic thickness and permeability along its plane. In this dissertation the transmissivity of different geosynthetic products was quantified using an apparatus developed at the University of Brasília (UnB). Several products commonly found in the Brazilian geosynthetic market were tested, such as: nonwoven geotextiles, geonets and geocomposites made from the combination of nonwoven geotextiles and different core materials (geonet and geospacers). New low cost alternative geocomposites were also developed combining non woven geotextiles and waste like materials such as strips of tires and caps of PET bottle as cores. The test methodology involved performing tests under normal stresses varying between 2 kPa and 400 kPa and hydraulic gradients of 0.5 and 1.0. Variations of flow rate, geosynthetic thickness and distribution of water heads along the specimen length with time were measured. Sagging effects on geonets and geocomposites were also investigated as part of the research programme. The apparatus used in the tests performed well for the objectives of the study and the results obtained showed high draining capacities of the alternative geocomposites. Conventional geocomposite materials performed as expected based on manufacturers' data and the evaluation on their behaviour under high stress levels was achieved.

Capítulo	Página
INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. GEOSSINTÉTICOS COM FUNÇÃO DRENANTE	4
2.1.1. INTRODUÇÃO	4
2.1.2. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS COMUMENTE UTILIZADOS.....	7
2.2. COMBINAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS	11
2.2.1. IMPORTÂNCIA E PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM A UTILIZAÇÃO DE GARRAFAS PET	12
2.2.2. RELEVÂNCIA AMBIENTAL DA RECICLAGEM DE PNEUS	13
2.2.3. PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM A UTILIZAÇÃO DE PNEUS PICOTADOS	15
2.3. PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS DE DRENAGEM.....	19
2.4. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS RELEVANTES PARA DRENAGEM.....	27
2.4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	27
2.4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	28
2.4.2.1. Compressão	28
2.4.2.2. Resistência ao cisalhamento.....	29
2.4.3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	30
2.5. DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO.....	32
2.5.1. VAZÃO UNITÁRIA DE CONTRIBUIÇÃO DE PROJETO.....	33
2.5.2. CAPACIDADE DE VAZÃO PLANAR DO GEOSSINTÉTICO.....	33

2.5.3.	CAPACIDADE DE VAZÃO ADMISSÍVEL DO GEOSSINTÉTICO.....	34
MATERIAIS EMPREGADOS		36
3.1. GEOSSINTÉTICOS		36
3.1.1.	GEOTÊXTEIS	36
3.1.2.	GEORREDES	37
3.1.3.	GEOCOMPOSTOS.....	37
3.2. MATERIAIS ALTERNATIVOS.....		40
3.2.1.	TAMPAS DE GARRAFAS PET	40
3.2.1.1.	Características físico-químicas.....	40
3.2.1.2.	Geocomposto GCT.....	41
3.2.2.	TIRAS DE PNEUS	43
3.2.2.1.	Geocomposto GCP	43
METODOLOGIA DE ENSAIOS		47
4.1. INTRODUÇÃO		47
4.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO		47
4.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO		51
4.3.1.	ASPECTOS RELATIVOS À AMOSTRAGEM	51
4.3.2.	SELEÇÃO DO GRADIENTE HIDRÁULICO	52
4.3.3.	SATURAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA.....	52
4.3.4.	APLICAÇÃO DA TENSÃO NORMAL	53
4.3.5.	REALIZAÇÃO DO ENSAIO	54
4.4. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO.....		55
4.4.1.	TAXA DE FLUXO NO PLANO	55
4.4.2.	VARIAÇÕES DE ESPESSURA	56
4.4.3.	VARIAÇÕES DE CARGA HIDRÁULICA.....	57
ANÁLISE DE RESULTADOS		58
5.1. INTRODUÇÃO		58
5.2. ENSAIOS COM GEOTÊXTEIS		59
5.3. ENSAIOS COM GEORREDES		65
5.4. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTOS COM NÚCLEO DE GEORREDE		69

5.5. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTOS COM NÚCLEO DE GEOESPAÇADOR	73
5.6. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTO COM NÚCLEO DE GEORREDE DE FILAMENTOS DE POLIPROPILENO	76
5.7. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTOS ALTERNATIVOS COM NÚCLEO DE TAMPAS DE GARRAFAS PET	78
5.8. ENSAIOS DE GEOCOMPOSTOS ALTERNATIVOS COM NÚCLEO DE TIRAS DE PNEUS	86
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	92
6.1. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO E METODOLOGIA UTILIZADA.....	92
6.2. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	93
6.2.1. GEOTÊXTEIS	93
6.2.2. GEORREDES	93
6.2.3. GEOCOMPOSTOS DRENANTES CONVENCIONAIS.....	93
6.2.4. GEOCOMPOSTOS DRENANTES ALTERNATIVOS	94
6.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 – Valores preliminares para os fatores de redução para $q_{p,i}$ em geocompostos que utilizam georredes (Koerner, 1997, <i>apud</i> Aguiar & Vertematti, 2004)	35
Tabela 3.1 – Materiais utilizados no ensaio de transmissibilidade hidráulica	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 - Sistemas drenantes convencionais.....	5
Figura 2.2 - Geotêxtil do tipo não-tecido.	8
Figura 2.3 – Materiais constituintes do núcleo drenante de geocompostos para drenagem.	8
Figura 2.4 – Alguns tipos de geocompostos drenantes: (a) geocomposto com núcleo constituído por georrede de filamentos de polipropileno, (b) geocomposto com núcleo constituído por georrede de polietileno e (c) geocomposto com núcleo constituído por geoespaçador.	9
Figura 2.5 – Influência da compressibilidade no comportamento de alguns geocompostos drenantes existentes no mercado norte-americano (modificado – Koerner, 1994).....	10
Figura 2.6 – Pilha de pneus amontoados em um local de disposição.	13
Figura 2.7 – Aplicação de pneus picotados na drenagem lateral de uma rodovia (Fonte: Construction Report, 2001).	16
Figura 2.8 – Tiras de pneus utilizadas em estudo experimental por Warith <i>et al.</i> (2004).	18
Figura 2.9 – Esquema de drenagem de líquidos percolados em uma célula experimental (Silva, 2004).	18
Figura 2.10 – Aplicação de geossintético no revestimento de um túnel (Fonte: Informativo Bidim, 2006).	20
Figura 2.11 – Geocomposto aplicado na drenagem de jardim em contato com laje de concreto (Fonte: Maccaferri – Case History, 2005).	21
Figura 2.12 – Sistema de drenagem pluvial subterrâneo de um campo de futebol (Fonte: MacDrain, 2004).	21
Figura 2.13 – Ilustração de geotêxtil aplicado em dreno-chaminé de uma barragem (modificado – Koerner, 1994).	22
Figura 2.14 - Geocomposto drenante e geotubo aplicados em drenagens sob impermeabilização e revestimento de canal (Aguiar & Vertematti, 2004).	23
Figura 2.15 – Aplicação de geotêxteis não-tecidos em obras de pavimentação (Fonte: Informativo Bidim, 2006).	24
Figura 2.16 – Esquema de drenagem em pavimentos.	24
Figura 2.17 – Esquema de utilização de geocomposto drenante em um aterro sanitário: (a) sistema de drenagem sub-superficial e (b) sistema de drenagem superficial.	26

Figura 2.18 – Compressibilidade de diferentes tipos de geotêxteis, onde: NW-NP = não-tecido, agulhado, e NW-HB = não-tecido, termoligado (modificado - Koerner, 1994).	28
Figura 2.19 – Esquema do efeito da redução do volume de vazios de um geocomposto drenante.	28
Figura 2.20 – Ilustração da transmissibilidade em um material.	30
Figura 2.21 – Esquema representativo de fluxo em um geocomposto aplicado em um muro de contenção (modificado – Koerner, 1994).	33
Figura 3.1 – Georredes de PEAD utilizadas na pesquisa.	37
Figura 3.2 – Geocompostos drenantes dos tipos DGC1 e DGC2.	38
Figura 3.3 – Geocomposto drenante do tipo DGC3, com núcleo constituído por geoespaçador.	38
Figura 3.4 – Geocomposto drenante DGC4 com núcleo constituído por filamentos de polipropileno.	39
Figura 3.5 – Ilustração do funcionamento do geocomposto DGC4 como elemento drenante em uma estrutura de contenção (Catálogo - Geocomposto para drenagem MacDrain, 2006).	39
Figura 3.6 – Sistema Internacional de Codificação dos Plásticos.	40
Figura 3.7 – Geocompostos do tipo GCT: (a) Ilustração do núcleo dos três tipos de geocompostos, (b) Geocomposto GCT1, (c) Geocomposto GCT2 e (d) Geocomposto GCT3.	43
Figura 3.8 – Tiras de pneus utilizadas na formação do núcleo drenante dos geocompostos denominados GCP.	44
Figura 3.9 – Geocompostos com núcleo drenante constituído por tiras de pneus: (a) GCP1 e (b) GCP2.	45
Figura 4.1 – Visão esquemática do equipamento utilizado no ensaio de transmissibilidade hidráulica.	48
Figura 4.2 – Equipamento utilizado no ensaio de transmissibilidade hidráulica.	50
Figura 4.3 – Saturação de um corpo-de-prova.	53
Figura 5.1 – Variação da transmissibilidade em função da tensão normal para os geotêxteis G1, G2 e G3.	60
Figura 5.2 – Compressão dos geotêxteis G1, G2 e G3.	61
Figura 5.3 – Relação entre a espessura do geotêxtil G1 e tensão normal.	62
Figura 5.4 – Relação entre a espessura do geotêxtil G2 e tensão normal.	62
Figura 5.5 – Relação entre a espessura do geotêxtil G3 e tensão normal.	63

Figura 5.6 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geotêxtil G1.	64
Figura 5.7 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geotêxtil G2.	64
Figura 5.8 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geotêxtil G3.	65
Figura 5.9 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para as georredes GN1 e GN2.	66
Figura 5.10 – Compressão das georredes GN1 e GN2.	66
Figura 5.11 – Relação entre a espessura da georrede GN1 e o acréscimo da tensão normal...	67
Figura 5.12 – Relação entre a espessura da georrede GN2 e o acréscimo da tensão normal...	68
Figura 5.13 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova da georrede GN1. ..	68
Figura 5.14 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova da georrede GN2. ..	69
Figura 5.15 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para os geocompostos drenantes DGC1 e DGC2.	70
Figura 5.16 – Compressão dos geocompostos DGC1 e DGC2.	70
Figura 5.17 – Relação entre a espessura do geocomposto DGC1 e o acréscimo da tensão normal.	71
Figura 5.18 – Relação entre a espessura do geocomposto DGC2 e o acréscimo da tensão normal.	71
Figura 5.19 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC1.	72
Figura 5.20 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC2.	73
Figura 5.21 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para o geocomposto DGC3.	74
Figura 5.22 – Compressão do geocomposto DGC3.	74
Figura 5.23 – Relação entre espessura do geocomposto DGC3 e o acréscimo de tensão normal.	75
Figura 5.24 – Variação de carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC3.	75
Figura 5.25 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para o geocomposto drenante DGC4.	76
Figura 5.26 – Compressão do geocomposto DGC4.	77

Figura 5.27 – Relação entre a espessura do geocomposto DGC4 e o acréscimo de tensão normal.....	77
Figura 5.28 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC4.	78
Figura 5.29 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para os geocompostos drenantes do tipo GCT.	79
Figura 5.30 – Comparação entre as capacidades de descarga dos geocompostos do tipo GCT3.	80
Figura 5.31 – Compressão dos geocompostos do tipo GCT (resultados obtidos do ensaio de transmissibilidade com utilização de espuma emborrachada).	80
Figura 5.32 – Compressão do geocomposto GCT1.	81
Figura 5.33 – Compressão do geocomposto GCT2.	81
Figura 5.34 – Compressão do geocomposto GCT3.	82
Figura 5.35 – Relação entre a espessura do geocomposto GCT1 e o acréscimo de tensão normal.....	83
Figura 5.36 – Relação entre a espessura do geocomposto GCT2 e o acréscimo de tensão normal.....	84
Figura 5.37 – Relação entre a espessura do geocomposto GCT3 e o acréscimo da tensão normal.....	84
Figura 5.38 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto GCT1.....	85
Figura 5.39 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto GCT2.....	85
Figura 5.40 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto GCT3.....	86
Figura 5.41 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para os geocompostos drenantes do tipo GCP.....	87
Figura 5.42 – Compressão dos geocompostos do tipo GCP (resultados obtidos do ensaio de transmissibilidade).	87
Figura 5.43 – Compressão do geocomposto GCP1.....	88
Figura 5.44 – Compressão do geocomposto GCP2.....	89
Figura 5.45 – Relação entre a espessura do geocomposto GCP1 e o acréscimo de tensão normal.....	89

Figura 5.46 – Relação entre a espessura do geocomposto GCP2 e o acréscimo de tensão normal.....	90
Figura 5.47 – Variação da carga hidráulica ao longo do geocomposto GCP1.....	91
Figura 5.48 – Variação da carga hidráulica ao longo do geocomposto GCP2.....	91

LISTA DE ABREVIÇÕES NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do geossintético
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
CP	Corpo-de-prova
DGC1	Geocomposto com núcleo drenante formado pela georrede GN1
DGC2	Geocomposto com núcleo drenante formado pela georrede GN2
DGC3	Geocomposto com núcleo formado por geoespaçador
DGC4	Geocomposto com núcleo formado por filamentos de polipropileno
EPA	Environmental Protection Agency
FOS	Abertura de filtração
FR _{cb}	Fator de redução devido à colmatação biológica
FR _{cpq}	Fator de redução devido à colmatação química
FR _{fl}	Fator de redução devido a deformação por fluência
FR _{in}	Fator de redução devido à intrusão do geotêxtil filtrante
FS	Fator de segurança
g	Gramas
G1	Geotêxtil não-tecido (gramatura = 200 g/m ²)
G2	Geotêxtil não-tecido (gramatura = 300 g/m ²)
G3	Geotêxtil não-tecido (gramatura = 400 g/m ²)
G4	Geotêxtil não-tecido (gramatura = 180 g/m ²)
G5	Geotêxtil não-tecido (gramatura = 100 g/m ²)
GCP1	Geocomposto com núcleo formado por tiras de pneus espaçadas de 5 cm
GCP2	Geocomposto com núcleo formado por tiras de pneus espaçadas de 12 cm
GCT1	Geocomposto com núcleo formado por tampas espaçadas de 0,4 cm
GCT2	Geocomposto com núcleo formado por tampas espaçadas de 4,0 cm
GCT3	Geocomposto com núcleo formado por tampas espaçadas de 10,0 cm

GN	Geonet
GN1	Georrede, GN900
GN2	Georrede, GN1250
GP	Georrede com filamentos de polipropileno
GS	Geoespaçador
H	Diferença de carga hidráulica entre os piezômetros extremos
i	Gradiente hidráulico
ISO	International Organization for Standardization
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
k_t	Permeabilidade do geossintético ao longo do seu plano
L	Comprimento do corpo-de-prova
l	Litros
L_n	Leitura registrada no deflectômetro
l_A	Leitura piezométrica registrada para o piezômetro inicial
l_x	Leitura piezométrica registrada para o piezômetro a uma distância x
L_x	Relação entre cargas hidráulicas
m	Metro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cúbico
M_A	Gramatura
ml	Mililitro
mm	Milímetros
NATM	New Austrian Tunneling Method
NBR	Norma Brasileira
NW-HB	Não-tecido, termoligado
NW-NP	Não-tecido, agulhado
P1	Núcleo drenante formado por tiras de pneus espaçadas de 12,0 cm
P2	Núcleo drenante formado por tiras de pneus espaçadas de 5,0 cm
PEAD	Polietileno de Alta Densidade

PET	Poliéster
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de vinila
q_{adm}	Capacidade de vazão planar admissível do geossintético
q_{calc}	Vazão unitária calculada
q_d	Vazão unitária de contribuição de projeto
$q_{p,i}$	Capacidade de vazão planar de um geossintético
R_T	Relação entre diferentes viscosidades da água
s	Segundo
T1	Núcleo drenante formado por tampas de garrafas PET espaçadas de 0,6 cm
T2	Núcleo drenante formado por tampas de garrafas PET espaçadas de 4,0 cm
T3	Núcleo drenante formado por tampas de garrafas PET espaçadas de 10,0 cm
t_G	Espessura do geossintético
t_{G0}	Espessura nominal do corpo-prova
t_{Gn}	Espessura no tempo n
UnB	Universidade de Brasília
US	United States
V	Volume total
V_v	Volume de vazios
W	Largura do corpo-de-prova
w_G	Largura do geossintético
μ_{20}	Viscosidade da água a 20 °C
μ_t	Viscosidade da água na temperatura do ensaio
%	Porcentagem
θ	Transmissibilidade hidráulica
e	Espessura normalizada
°	Graus
°C	Graus Celsius

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais poliméricos atualmente competem tecnicamente com materiais naturais no que diz respeito ao reforço de solos por inclusões, apresentando propriedades de engenharia e durabilidade equivalentes e, portanto, desempenhando relevante papel no que diz respeito à redução das incertezas relacionadas aos materiais tradicionalmente aplicados em obras de engenharia.

O crescimento no emprego dos geossintéticos em obras de engenharia geotécnica pode ser explicado pelos seguintes fatores: fabricação de produtos que atendam a necessidades particulares das obras; velocidade de execução devido à facilidade de instalação; controle de qualidade; facilidade de transporte; dispensa de mão-de-obra especializada; durabilidade e redução de custos. Dentre as principais aplicações dos geossintéticos destacam-se: reforço, proteção, filtração, drenagem, separação, barreira e controle de erosão superficial, podendo exercer, concomitantemente, uma ou mais funções numa obra de engenharia.

Uma das aplicações mais comuns de geossintéticos é em obras de drenagem. Ao longo do tempo, a utilização de geossintéticos em sistemas drenantes vêm se aprimorando, a partir do surgimento de novos produtos de melhor desempenho, que permitem rápida instalação e com garantia de suas propriedades em longo prazo. O conhecimento das propriedades hidráulicas desses materiais se faz necessário, frente à análise do desempenho destes sob as solicitações provenientes da obra, tais como o efeito da tensão vertical nas características drenantes e das condições de fluxo do fluido que atravessa o plano do geossintético. Dentre as principais propriedades hidráulicas, destaca-se a transmissibilidade, obtida em função da permeabilidade ao longo do plano do geossintético e da sua espessura. Deste modo, a presente pesquisa verificará o comportamento de alguns geossintéticos com propriedades drenantes em ensaios de transmissibilidade sob elevados níveis de tensão normal.

Aspectos de ordem ambiental também serão abordados, por meio da proposição de uma alternativa na destinação de materiais que possivelmente seriam descartados no meio ambiente, implicando no aumento do volume de materiais lançados em locais de disposição, ou até mesmo dispostos de maneira irregular em locais inapropriados, com agravantes para a qualidade de vida nas cidades. Concomitante à necessidade de caráter ambiental, tem-se o interesse de ordem econômica, na combinação de materiais alternativos com geossintéticos, criando-se compostos com propriedades que aliem drenagem eficiente e baixo custo.

Portanto, a presente pesquisa terá como objeto de estudo dos geossintéticos comumente empregados em obras de drenagem e comercializados no mercado nacional, bem como geocompostos para drenagem com núcleo formado por materiais alternativos.

1.2. OBJETIVOS

Para a investigação do desempenho dos materiais com características drenantes, realizaram-se ensaios de transmissibilidade hidráulica variando-se os tipos de materiais, os níveis de tensões, material constituinte do núcleo de alguns geocompostos e as condições de contorno adotadas. Portanto, a presente pesquisa terá como prioridade os seguintes objetivos:

- Implantação do ensaio de transmissibilidade hidráulica no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB) em maior escala em relação ao equipamento desenvolvido por Gardoni (2000);
- Obtenção de parâmetros como a taxa de fluxo ao longo do plano, transmissibilidade dos materiais e uniformidade de condições de fluxo ao longo do corpo de provas;
- Caracterização da compressibilidade dos materiais e influência desta nos seus parâmetros físicos e hidráulicos;
- Investigação da aplicabilidade de combinações entre geossintéticos e materiais alternativos em sistemas de drenagem;
- Comparações entre desempenhos de produtos geossintéticos convencionais e produtos resultantes da combinação entre geossintéticos e materiais alternativos.

1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Descrições sucintas dos seis capítulos dessa dissertação são apresentadas abaixo, dando-se ênfase aos principais aspectos de cada um deles.

O Capítulo 1 apresenta de maneira introdutória a natureza da presente pesquisa, evidenciando a importância da utilização de geossintéticos em obras de drenagem, descrevendo os principais objetivos da dissertação e as etapas do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica utilizada para o embasamento da pesquisa. Nesta são caracterizados os principais tipos de geossintéticos comumente utilizados em obras geotécnicas de drenagem, abordando-se as principais aplicações destes e suas propriedades. Também são citadas as principais pesquisas desenvolvidas sobre transmissibilidade e os aspectos considerados em projetos de obras de drenagem.

No Capítulo 3 são descritos todos os materiais empregados na pesquisa e suas propriedades relevantes. Com relação aos materiais alternativos, foram descritos alguns fatores que contribuíram para sua utilização e as recentes pesquisas desenvolvidas sobre a utilização desses materiais.

A metodologia de pesquisa é abordada no Capítulo 4, onde são descritos os componentes do equipamento utilizado, a metodologia empregada na realização dos ensaios e os procedimentos de cálculos.

O Capítulo 5 apresenta as análises e discussões dos resultados obtidos nos ensaios de transmissibilidade, bem como comparações entre desempenhos de diferentes produtos.

As conclusões da pesquisa e as sugestões para pesquisas futuras são apresentadas no Capítulo 6.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GEOSSINTÉTICOS COM FUNÇÃO DRENANTE

2.1.1. INTRODUÇÃO

A função drenagem, conforme definição da NBR 12.553 (ABNT, 2003), consiste na coleta e condução de um fluido pelo corpo de um geossintético, permitindo o equilíbrio do sistema solo-geossintético, assegurando o adequado fluxo de um líquido, sendo a perda de solo limitada com a utilização de geotêxteis, nos quais desempenham a função de filtração. Giroud (1986) propôs a utilização da expressão “transmissão de fluidos”, para denominação da drenagem em geossintéticos, visto que os mesmos captam os fluidos e os conduzem, em seu plano, em direção a um coletor principal.

Segundo Vertematti (1999) a drenagem é um elemento de proteção preventiva contra as ações negativas de fluidos. Para que isso ocorra, é importante observar os principais fatores para uma boa drenagem:

- Base teórica: à medida do possível e em função do porte e responsabilidade da obra, devem ser lançadas bases teóricas compatíveis.
- Segurança: pelo fato da drenagem envolver um grande número de variáveis de difícil determinação, muitas vezes é mais econômico adotar valores médios e compensar as incertezas por meio de coeficientes de segurança razoáveis. Diferentemente das estruturas em concreto armado, por exemplo, em drenagem pode-se ter que trabalhar com coeficientes de segurança variando tipicamente na faixa de 2 a 100.
- Materiais: a escolha e/ou processamento dos materiais, de acordo com o projeto, é também fundamental.
- Manutenção: sempre que possível, executar obras com acesso que possibilitem detectar falhas e corrigi-las ao longo do tempo.

No que se refere à eficácia de um sistema de drenagem, os materiais utilizados devem atender a requisitos básicos como: o de dreno, relacionado à necessidade de manter a capacidade drenante, conduzindo as águas de infiltração/percolação, saneando o solo; o de filtro, relacionado à retenção de partículas de solo, impedindo o carreamento das mesmas para o interior do elemento drenante, o que provocaria sua colmatção e conseqüente perda de capacidade de descarga; e o de coletor, que conduz a água drenada para a descarga.

Em certos casos, o solo, em condições naturais, atende aos requisitos necessários quanto à percolação; em outros, é necessário à execução de um sistema artificial para esse fim. Na maioria das obras geotécnicas o sistema filtro-dreno é executado para atender as necessidades mencionadas e deve apresentar, em princípio, um coeficiente de permeabilidade consideravelmente maior que o do solo de forma a se evitar o aumento excessivo de pressão da água, e garantir uma distribuição de tamanhos de poros que seja capaz de reter partículas de solo. O filtro tem como objetivo principal reter as partículas e deve obedecer, também, ao requisito de manter a capacidade drenante satisfatória.

A Figura 2.1 mostra sistemas drenantes constituídos por um material granular convencional envolto por geotêxtil não-tecido.



Figura 2.1 - Sistemas drenantes convencionais.

De uma forma geral, a ausência de drenos ou seu mau dimensionamento pode provocar os seguintes problemas:

- elevação do nível freático;

- aumento de poropressões;
- alteração da estrutura do solo;
- diminuição da capacidade de suporte do terreno por perda de solo;
- erosão tubular regressiva (“piping”);
- entupimento ou colmatção do sistema.

Os principais fatores e propriedades que intervêm na escolha e especificações dos materiais para drenos são:

- resistência mecânica ao transporte, manuseio, instalação e aos esforços durante a vida útil da obra;
- permeabilidade (permissividade e transmissibilidade);
- granulometria/porometria;
- resistência ao ataque químico e bacteriológico;
- facilidade de manuseio, transporte e estocagem;
- facilidade de obtenção.

A utilização dos geossintéticos em obras geotécnicas de drenagem pode apresentar vantagens como:

- facilidade de aplicação em superfícies irregulares ou descontínuas, em função de sua uniformidade, continuidade e flexibilidade;
- permitem uma significativa redução na espessura dos sistemas drenantes, em comparação com soluções convencionais, reduzindo escavações e implicando em um maior aproveitamento do espaço disponível;
- fácil manuseio, podendo sua instalação ser mecanizada, o que permite significativa redução de tempo e custos;

- incidência de menores sobrecargas nas estruturas e fundações de obras civis devido à extrema leveza;
- facilidade de transporte;
- elevado controle de qualidade de fabricação do produto;
- durabilidade.

Os geossintéticos que podem desempenhar a função de transmissão são os geossintéticos espessos com elevada condutividade hidráulica na direção de seu plano. Estes geossintéticos são caracterizados por uma elevada transmissibilidade hidráulica, definida como o produto da condutividade hidráulica pela espessura (Giroud *et al.*, 2000).

2.1.2. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS COMUMENTE UTILIZADOS

Em um sistema drenante, é possível a utilização de um ou mais geossintéticos com função drenante. Neste item serão abordados os tipos mais comumente utilizados, por possuírem maiores valores de transmissibilidade hidráulica.

Os geotêxteis espessos mais adequados para a função drenante são geotêxteis do tipo não-tecido (Figura 2.2), caracterizado pela distribuição aleatória das fibras, cujo processo de solidarização geralmente utilizado é a agulhagem. A espessura, da ordem de milímetros, permite ao geotêxtil filtrar e conduzir fluidos em seu plano, concomitantemente. A sua permeabilidade garante o eficiente escoamento da água através de sua estrutura, podendo substituir com vantagens técnicas, econômicas, construtivas e de durabilidade os tradicionais filtros de transição granulométrica, que compõem os diversos sistemas drenantes.

Koerner (1994) conceitua a drenagem em geotêxteis como o equilíbrio do sistema solo-geotêxtil para permitir um fluxo de líquido adequado, com a mínima perda de solo, no plano do geotêxtil com vida útil compatível com sua aplicação.

Geoespaçadores e georredes (Figura 2.3) são 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. Sua

utilização também se faz necessária em casos que a taxa de fluxo exceda a capacidade de desempenho dos geotêxteis.

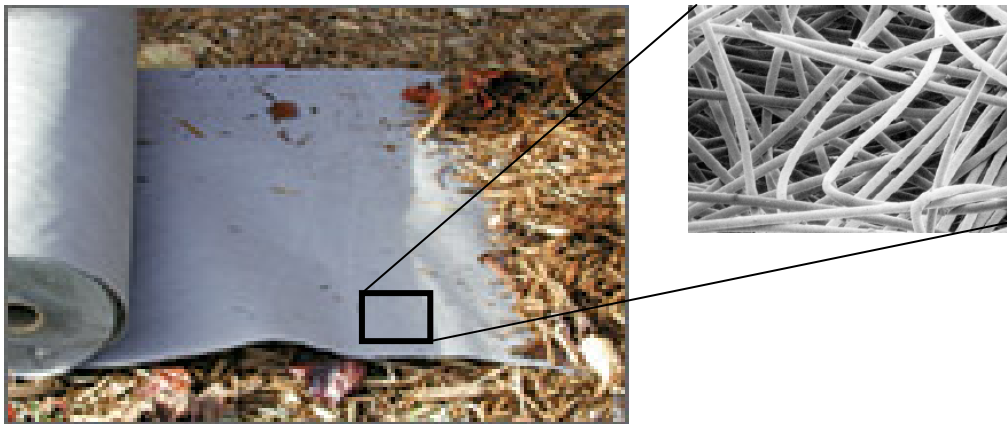


Figura 2.2 - Geotêxtil do tipo não-tecido.

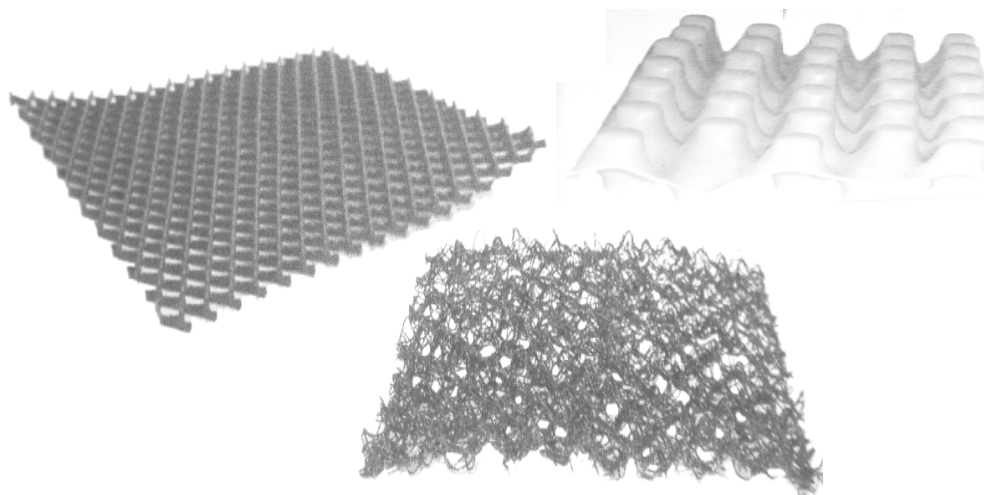


Figura 2.3 – Materiais constituintes do núcleo drenante de geocompostos para drenagem.

A filosofia básica dos geocompostos drenantes consiste na combinação das melhores características de diferentes materiais, de tal modo que sua finalidade seja atendida. Os geocompostos geralmente são constituídos de materiais sintéticos, podendo ser produzido industrialmente ou, simplesmente, montados no próprio canteiro de obras. Em alguns casos pode ser vantajosa a combinação com materiais não-sintéticos de forma a se atingir um melhor desempenho e/ou reduzir custos.

A Figura 2.4 mostra os geocompostos com função drenante comumente utilizados, destacando-se os compostos de geotêxteis-georrede, caracterizado pela utilização de

geotêxteis posicionados acima ou abaixo de uma georrede, ou uma georrede envolvida por dois geotêxteis, satisfazendo, desta forma, funções de filtração e drenagem. Outros geocompostos são constituídos por geotêxteis e núcleo polimérico (geoespaçadores), formado por uma lâmina de plástico semi-rígido, assegurando o fluxo no plano de sua estrutura, mesmo submetido a deslocamentos ou deformações. Nestes tipos de geocompostos, o geotêxtil protege o núcleo drenante, atuando como um filtro, em um lado ou em ambos os lados.

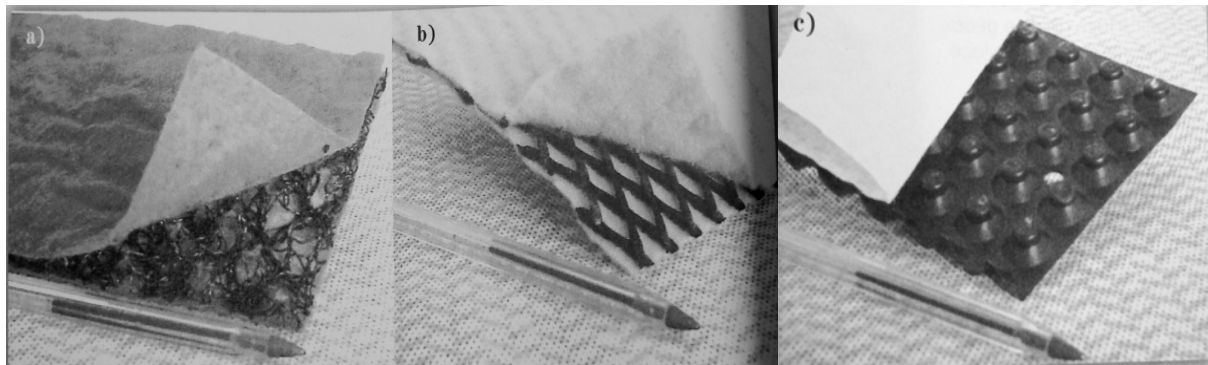


Figura 2.4 – Alguns tipos de geocompostos drenantes: (a) geocomposto com núcleo constituído por georrede de filamentos de polipropileno, (b) geocomposto com núcleo constituído por georrede de polietileno e (c) geocomposto com núcleo constituído por geoespaçador.

Os geoespaçadores e as georredes foram desenvolvidos especialmente para atuar como núcleo drenante na condução de fluidos, apresentando maiores valores de permeabilidade ao longo do plano em relação à geotêxteis não-tecidos e, portanto, são relativamente pouco compressíveis.

As vantagens da utilização das georredes são muitas, permitindo menor tempo de instalação da camada drenante, economia de material e maior capacidade de armazenamento do aterro, uma vez que a espessura da camada drenante é menor. Permite também a construção de taludes mais íngremes, porque na drenagem com materiais granulares o ângulo de atrito é um condicionante na inclinação máxima possível. A georrede é um material que pode atuar na melhoria da estabilidade de taludes, além de permitir uma alta capacidade de escoamento sob carregamento.

Jeon *et al.* (2004) afirmam que a intrusão de materiais drenantes causa decréscimo da eficiência de drenagem das georredes. Na pesquisa desenvolvida pelos autores, foram criados

geotêxteis ‘inteligentes’, com o objetivo de substituir geocompostos convencionais na proteção das geomembranas e sistemas lineares de aterros sanitários. Estes geotêxteis são do tipo não-tecido, possuem diferentes composições, devido ao emprego de um método especial de agulhagem para preparo da teia fibrosa, conferindo-lhes, portanto, uma excelente capacidade drenante. Como resultado constatou-se um excelente desempenho desses materiais com relação à permeabilidade no plano sob carregamento, quando comparados a georredes envolvidas por geotêxteis não-tecidos.

As georredes constituídas por uma malha de filamentos sintéticos de polipropileno são muitas vezes utilizadas como núcleo drenante e, estão sujeitas a uma maior redução de espessura quando submetidos a grandes tensões confinantes, por serem mais compressíveis. A Figura 2.5 mostra o comportamento de alguns sistemas de geocompostos drenantes submetidos à compressão normal. Tal comportamento, obviamente, condicionará a capacidade de descarga para uma determinada situação sob um determinado estado de compressão.

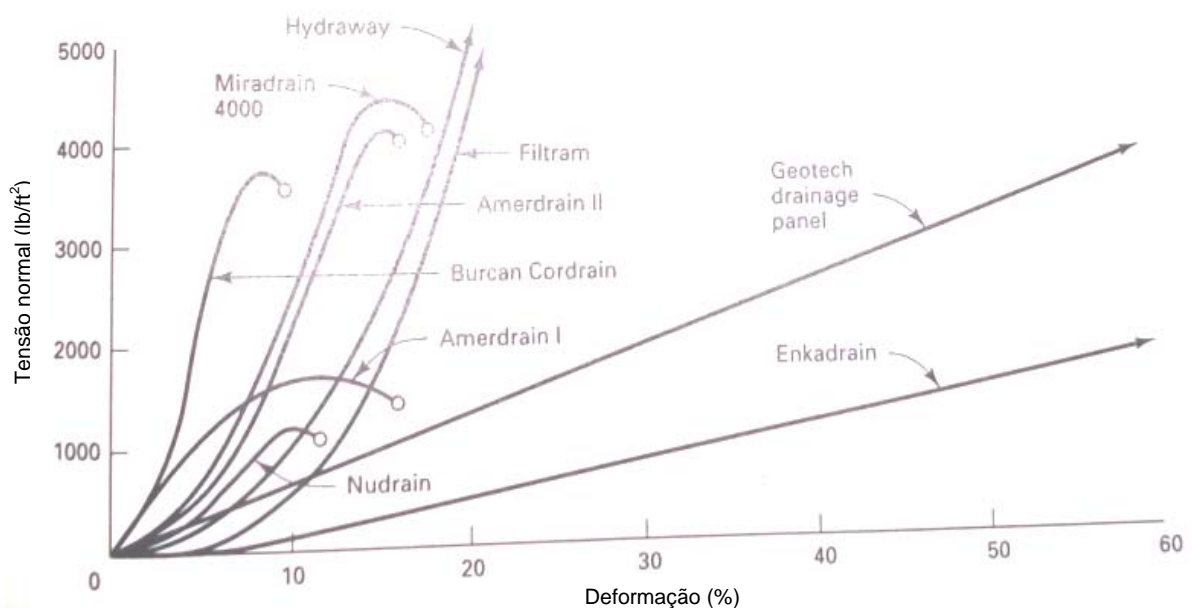


Figura 2.5 – Influência da compressibilidade no comportamento de alguns geocompostos drenantes existentes no mercado norte-americano (modificado – Koerner, 1994).

No presente trabalho pretende-se também analisar o comportamento drenante de geocompostos cujo núcleo é constituído por materiais alternativos, com características que possibilitem uma elevada condutividade hidráulica ao longo do plano. O objetivo da utilização desses materiais consiste na redução de custos do emprego destes em obras

geotécnicas, além de permitir a reutilização de materiais que seriam dispostos no meio ambiente ou acumulados em aterros sanitários ou lixões.

2.2. COMBINAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS

Em aplicações da engenharia geotécnica, se faz necessária a utilização de diferentes materiais que possibilitem satisfazer as necessidades impostas pelas solicitações da obra, bem como pelo ambiente circundante. Neste contexto, a utilização de produtos sintéticos vem, progressivamente, tendo uma expressiva aceitabilidade de utilização em diversas etapas de uma obra, devido às vantagens oferecidas, citadas anteriormente.

A fabricação de geossintéticos requer um severo controle do processo produtivo, o que pode implicar num elevado custo de produção por parte da indústria, influenciando, desta forma, o custo de material comercializado. Tal fator, pode inibir a aplicação dos geossintéticos em grande escala, sendo necessária a adoção de alternativas que possibilitam agregar fatores como eficiência construtiva e economia.

Nos últimos anos tem aumentado o interesse no gerenciamento e na disposição dos resíduos sólidos urbanos. A minimização de produção de resíduos, bem como reciclagem, reutilização e destino final adequado a alguns materiais são algumas das práticas de gerenciamento de resíduos sólidos utilizadas hoje por todo o mundo. Palmeira *et al.* (2006) apresentaram resultados de ensaios e exemplos de aplicações de geocompostos formados por pneus (picados ou inteiros), agregados de entulho reprocessado e garrafas PET prensadas em obras de drenagem urbana e de áreas de disposição de resíduos. Nesse estudo foram realizados ensaios de permeabilidade e compressão em grande escala em sistemas filtro-drenantes envolvendo geotêxteis não-tecidos e materiais alternativos. Os resultados obtidos mostraram o grande potencial de utilização destes geocompostos alternativos.

Na parte experimental dessa dissertação serão abordados alguns casos de combinações de materiais reciclados, tais como tampas de garrafas PET e pneus picotados, com geossintéticos, com o objetivo de obter geocompostos para drenagem com menores custos. Será avaliado o desempenho destes como material drenante, considerando o seu comportamento físico sob condições que simulem uma obra geotécnica.

2.2.1. IMPORTÂNCIA E PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM A UTILIZAÇÃO DE GARRAFAS PET

A utilização do PET (sigla representativa do poliéster) apresentou notável crescimento na década de 80, devido, principalmente, ao seu emprego como garrafas para refrigerantes. Em 2001 eram produzidas, no Brasil, mais de 12 milhões de unidades por dia, segundo dados da ABEPET (2001), com expectativa de crescimento do consumo anual de 10%.

As principais qualidades do PET - transparência, resistência mecânica, leveza, brilho, barreira a gases e custo razoável - contribuíram para que este fosse muito utilizada na indústria de embalagens. Graças a estas qualidades, os produtos embalados sofreram considerável redução de preço para o consumidor e em alguns casos, como os refrigerantes, de até 30%.

Sob os aspectos técnico e econômico a garrafa PET é um material bem sucedido, em virtude do custo extremamente baixo, visto que se trata de um produto descartado, abundante e fácil de encontrar em ambiente urbano. Entretanto, quando analisado sob o ponto de vista ecológico, apresenta algumas limitações. Como a maioria das embalagens, o uso da garrafa PET tem um ciclo de vida extremamente curto, transcorrendo, muitas vezes, apenas uma semana entre sua produção, distribuição, consumo e descarte. Entretanto, a vida inútil da embalagem PET - quando se torna um problema ambiental - pelo contrário, é extremamente longa. Estima-se que cada garrafa produzida levará séculos para ser degradada pela natureza.

Santos (2005) desenvolveu estudos procurando viabilizar a utilização das garrafas PET em obras de contenções e fundações, denominados de Muro PET e Estaca PET, respectivamente. Os resultados indicaram que o Muro PET pode ser adotado de forma direta em contenções com altura de até 1,8 m. No caso de fundações, a Estaca PET seria indicada para obras de pequeno porte, podendo ser transmitidas cargas de até 10 kN por estaca.

Paranhos (2002) desenvolveu uma pesquisa visando a utilização de garrafas PET como elemento drenante na substituição de britas e seixos rolados. Tais garrafas foram submetidas a um processo de compressão, reduzindo seu volume em torno de 30% e aumentando a resistência ao esmagamento. Após o processo de compressão, as garrafas foram envolvidas por um geotêxtil formando um núcleo drenante, dando origem a um cilindro flexível, cujo comprimento e diâmetros variam de acordo com as características da obra em que o dreno é empregado.

Esta dissertação apresenta estudos sobre a utilização das tampas proveniente das garrafas PET, na formação do núcleo drenante de geocompostos para drenagem. De um modo geral, a obtenção das tampas pode ocorrer de forma conjunta com a reutilização das garrafas em uma outra aplicação, desonerando o custo de obtenção e reduzindo o acúmulo destes materiais em locais de disposição de resíduos sólidos.

2.2.2. RELEVÂNCIA AMBIENTAL DA RECICLAGEM DE PNEUS

A importância ambiental na destinação adequada aos pneus usados é bastante discutida entre órgãos governamentais vinculados ao meio ambiente. No Brasil, a Resolução N° 256/99 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) determina que fabricantes e importadores recolham e dêem uma destinação adequada aos pneus usados, o que implica numa forma de reaproveitamento, contribuindo, assim, para evitar a degradação da natureza e o risco potencial à saúde pública, por meio da proliferação de vetores de doenças como a dengue e a febre amarela.

A Figura 2.6 demonstra o impacto visual causado pelo acúmulo excessivo de pneus inservíveis em locais de disposição.



Figura 2.6 – Pilha de pneus amontoados em um local de disposição.

Um dos grandes problemas ambientais modernos consiste na destinação adequada dos resíduos de lenta degradação. Os pneus, por serem materiais fundamentais e insubstituíveis no

transporte de passageiros ou de cargas, tendem a ser consumidos em grande quantidade, e no final de sua vida útil, quando não passam por um processo de recauchutagem, são geralmente descartados e dispostos no meio ambiente, mais precisamente em lixões ou aterros sanitários. Estes materiais, sob tais condições, acarretam uma série de problemas: são objetos perceptíveis e incomodamente volumosos, que precisam ser armazenados em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de mosquitos e roedores.

A disposição dos pneus inservíveis em aterros sanitários se torna inviável em virtude da baixa compressão e lenta degradação. Além disso, quando enterrados, tendem a subir e sair para a superfície (Jardim, 1995).

Na sua forma inteira, os pneus podem ser aplicados em obras de contenções nas margens de rios para evitar desmoronamentos; como recifes artificiais, na construção de quebra-mares; no controle de erosão; como combustível em fábricas de celulose e papel, em fornos de cimento e em usinas termelétricas, etc. Simulações numéricas da construção de muros de arrimo foram desenvolvidas por Sieira *et al.* (2006), cujos resultados foram comparados aos dados de instrumentação do muro construído. Tal simulação mostrou-se uma ferramenta útil para o estabelecimento dos parâmetros de deformabilidade do material solo-pneus, além de avaliar as dimensões de seção transversal adequadas. As análises indicaram que o conjunto solo-pneus pode ser representado como um material homogêneo, linear e elástico, com módulo de deformabilidade E igual a 2,5 MPa.

Segundo Bertollo *et al.* (2000), o pneu, no sentido exato do termo, não é verdadeiramente reciclável, pelo seu caráter compósito, e com uma estrutura complexa, formada por diversos materiais, tais como: borracha, aço e tecido (náilon ou poliéster). Estes materiais visam conferir as características necessárias ao seu desempenho e segurança.

Quando analisados os vários mercados para utilização de borracha de pneus inservíveis, somente dois apresentam potencial para utilização de número significativo de pneus: o energético e o de misturas asfálticas.

Segundo Heitzman (1992) *apud* Bertollo *et al.* (2000), nos EUA estima-se que 285 milhões de pneus inservíveis são dispostos por ano, algo em torno de 4,7 milhões de toneladas, o que representa mais de um pneu, por habitante, por ano. Desse montante, 33 milhões de pneus são recauchutados, 22 milhões são reutilizados (revendidos) e os outros 42 milhões são destinados

a diferentes aplicações. Os 188 milhões de pneus restantes são enviados para aterros ou dispostos ilegalmente.

No Brasil, algumas estimativas indicam que são gerados 35 milhões de carcaças de pneus anualmente e que existem mais de 100 milhões de pneus abandonados em todo o País. Diante desse cenário, o poder público municipal proíbe a entrada dos pneus nos aterros, eximindo-se da responsabilidade de coletar e armazenar adequadamente esses resíduos e contribuindo para a disposição ilegal em terrenos baldios, rios etc.

2.2.3. PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM A UTILIZAÇÃO DE PNEUS PICOTADOS

Dentre os materiais obtidos a partir de reutilização, os pneus vêm sendo pesquisados por empresas norte-americanas de consultoria em geotecnia, e por órgãos atuantes na área de transporte rodoviário nos Estados Unidos. Tais materiais foram estudados com o objetivo de verificar suas características drenantes quando combinados com geossintéticos.

Os pneus, após serem submetidos a processos de redução em pedaços, podem ser utilizados como material de preenchimento em sistemas de drenagem de obras geotécnicas. As tiras de pneus são compostas de uma combinação de borracha natural e borracha sintética e com elastômeros derivados do óleo e gás. Corantes de carbonos múltiplos, óleos expansivos, ceras, antioxidantes, além de polímeros e outros materiais são adicionados para melhorar as características de desempenho e eficiência industrial. Os fragmentos de pneus possuem arames, com diâmetros em torno de 3 mm, relativamente rijos e envolvidos pela borracha por meio de um contato firme.

Krzysztof *et al.* (1998) pesquisaram a aplicabilidade dos pneus picotados em aterros sanitários nas seguintes situações:

- cobertura diária;
- camada de fundação de um sistema de cobertura final;
- material de aterro para coleta de gás;
- drenagem do chorume e;

- camada de proteção.

As desvantagens no emprego de tais materiais consistem na possibilidade de combustão espontânea em aterros espessos, verificadas para temperaturas acima de 322 °C, sendo tal possibilidade diminuída em 50% pela mistura com solo (Krzysztof *et al.*, 1998). Outros fatores são a alta suscetibilidade a colmatação devido a um maior tamanho e graduação uniforme, e as perfurações e rasgos em geomembranas ou GCL's, provenientes do contato com arames protraídos das tiras.

A Figura 2.7 mostra a aplicação de pneus picotados, dispostos de forma aleatória e em grandes quantidades, formando um sistema drenante lateral de uma rodovia.



Figura 2.7 – Aplicação de pneus picotados na drenagem lateral de uma rodovia (Fonte: Construction Report, 2001).

Em estudos realizados para caracterização dos pneus em forma de tiras, obtiveram-se parâmetros dependentes do tamanho dos fragmentos (gradação), verificando-se densidades entre 5,9 a 6,7 kN/m³, cerca de 60% menor que de solos compactados, e condutividades hidráulicas de tiras com tamanhos entre 12 e 75 mm, variando de 0,6 a 24,0 cm/s (Humphrey, 1997, *apud* Krzysztof, 1998).

Parâmetros de resistência ao cisalhamento de três tipos de tiras de pneus apresentaram valores de ângulo de atrito (ϕ) variando de 19 a 26° e coesão (c) de 4,3 a 11,5 kPa, para ensaios com tensões normais entre 48 e 483 kPa (Humphrey & Manion, 1992; Humphrey & Sandford,

1993). Tais valores indicam a adequabilidade de utilização destes materiais nos taludes laterais da cobertura do aterros.

Charron & Rodgers (1989) realizaram ensaios de transmissibilidade hidráulica em geocompostos formados por tiras de pneus entre camadas de geotêxtil e geomembrana, submetendo-os a variados gradientes hidráulicos e tensões de compressão variando de 9,58 a 718,5 kPa. Verificou-se uma deformação de 60% das tiras de pneus, e a influência destas no surgimento de fissurações na geomembrana, produzidas pelos pedaços de aço protraídos. Os ensaios de cisalhamento direto permitiram avaliar as condições de interface entre as tiras de pneus, geomembranas e geotêxtil não-tecido, obtendo-se como resultados: o elevado coeficiente de atrito e baixa adesão entre as tiras de pneus; na interface destas com a geomembrana de polietileno de alta densidade verificou-se um baixo coeficiente de atrito e elevada adesão; na interface com geotêxtil observou-se elevado ângulo de atrito e maior adesão; e em contato com geomembrana texturizada, foi observado uma boa adesão e um baixo ângulo de atrito.

Estudos desenvolvidos por Warith *et al.* (2004) em tiras de pneus (Figura 2.8), utilizadas como material drenante do chorume na base de aterros sanitários, correlacionaram parâmetros de compressão, condutividade hidráulica e pH do líquido percolante. Os resultados indicaram que tiras com formato regular necessitam de pouca pressão para comprimi-las, além de apresentarem maiores decréscimos de condutividade hidráulica quando submetidas a sobrecargas. Os descarregamentos mostraram a combinação de deformações elasto-plásticas para casos de deformações acima de 50%, verificando-se a não permanência desta deformação, e aumento do grau de descompressão. O comportamento plástico foi constatado para amostras soltas sem compactação. O pH exerceu pouca influência nas características de compressão e condutividade hidráulica.



Figura 2.8 – Tiras de pneus utilizadas em estudo experimental por Warith *et al.* (2004).

Uma célula experimental de um aterro sanitário foi desenvolvida por Silva (2004), tendo como camada drenante a combinação de pneus picotados dispostos como material de enchimento em uma vala central, juntamente com um tubo de PVC perfurado. Um tapete drenante formado por pneus justapostos foi distribuído ao longo da base da célula (Figura 2.9). Para o sistema de filtro utilizou-se uma camada de geotêxtil não tecido com gramatura de 200g/m^2 , a qual recobria toda a camada drenante. Concluiu-se que o dreno de pneu mostrou-se eficiente na drenagem da célula.

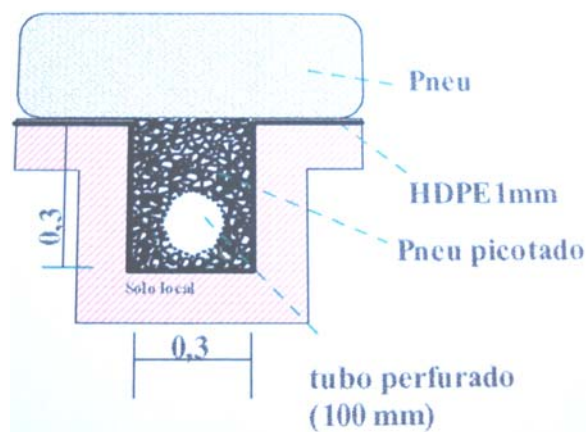


Figura 2.9 – Esquema de drenagem de líquidos percolados em uma célula experimental (Silva, 2004).

Na decomposição do pneu, a dissolução de aço exposto (ferro) e óxido de zinco podem ocorrer em ambientes aquosos que dependem das condições de pH. A fonte de zinco lixiviada

pode ser proveniente do óxido de zinco da borracha ou do zinco que cobre a correia de aço e o arame de borda. Conforme pesquisa desenvolvida por Gray (1997), os compostos orgânicos lixiviados ocorrem em níveis baixos.

2.3. PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS EM OBRAS DE DRENAGEM

Segundo Aguiar & Vertematti (2004) a diversidade dos problemas de engenharia e dos condicionantes de projeto pode requerer que, em situações específicas, haja produtos manufaturados diversos à disposição que possam atender às necessidades particulares das obras. Nesse sentido, o fato de se poder contar com produtos fabricados a partir de matérias-primas diferentes, com propriedades físicas, mecânicas e químicas distintas, constitui uma grande vantagem técnica, pois em cada situação específica um produto pode fornecer as características exigidas pelo projeto.

Há inúmeras utilizações de geossintéticos na drenagem de fluidos em obras geotécnicas, destacando-se as seguintes:

- drenagem profunda e subsuperficial de rodovias;
- drenagem agrícola;
- cortinas drenantes de edifícios;
- revestimentos de margens de canais e reservatórios;
- jardins suspensos;
- aterros e obras de terra em geral;
- estruturas de contenção;
- túneis (cut-and-cover, NATM e galerias);
- aterros sanitários (no sistema de revestimento da base e na cobertura);
- lagoas de efluentes industriais e de dejetos animais;

- campos esportivos;
- terraços;
- recomposição de taludes rompidos.

A Figura 2.10 ilustra a utilização de um dreno sintético, aplicado em faixas, entre os revestimentos primário e secundário de um túnel, com o objetivo de controlar as infiltrações das águas que percolam pelo maciço e surgem pela face de concreto.

A execução de um sistema de drenagem utilizando geocomposto drenante em uma laje de cobertura, mostrada na Figura 2.11, foi necessária para evitar possíveis infiltrações na estrutura e eliminar a sobrecarga ocasionada pelo acúmulo de água no solo constituinte do jardim localizado sobre a laje.

A Figura 2.12 mostra outra aplicação de geossintéticos em um sistema de drenagem. Neste caso, utilizou-se geocomposto no sistema de drenagem pluvial subterrânea do gramado de um campo de futebol.



Figura 2.10 – Aplicação de geossintético no revestimento de um túnel (Fonte: Informativo Bidim, 2006).



Figura 2.11 – Geocomposto aplicado na drenagem de jardim em contato com laje de concreto (Fonte: Maccaferri – Case History, 2005).



Figura 2.12 – Sistema de drenagem pluvial subterrâneo de um campo de futebol (Fonte: MacDrain, 2004).

Ao considerar as condições de capacidade de fluxo, particularmente dos geotêxteis, existem duas categorias a serem consideradas, nas quais determinam o tipo de obra na qual será aplicado o material: o fluxo gravitacional, direcionado pela inclinação do posicionamento do geotêxtil, e o fluxo sob pressão, no qual a água será conduzida de locais de elevada pressão para locais de baixa pressão, independentemente da orientação do geotêxtil.

A drenagem gravitacional é verificada nos seguintes casos:

- drenos-chaminés em barragens (Figura 2.13);
- dissipadores de poro-pressão, atrás de paredes de contenção;
- interceptadores de fluxo, como drenos espinha-de-peixe;
- abaixo de geomembranas para condução de água ou gás.

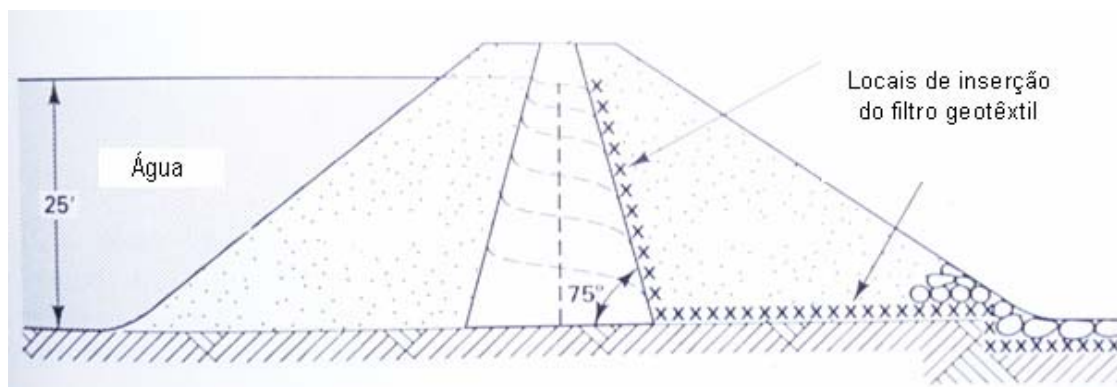


Figura 2.13 – Ilustração de geotêxtil aplicado em dreno-chaminé de uma barragem (modificado – Koerner, 1994).

Em projetos envolvendo este tipo de drenagem, considera-se como parâmetros a geometria, juntamente com a permeabilidade requerida, por meio da fórmula de Darcy. Este valor é então comparado à permeabilidade admissível do geotêxtil, para obtenção do fator de segurança.

Na maioria dos casos, os geocompostos drenantes filtram, captam e concentram as águas drenadas do solo. No entanto, por serem estruturas esbeltas, não podem não ser capazes de conduzir toda a água acumulada ao longo dos drenos, cujos comprimentos podem atingir dezenas ou centenas de metros. Assim, é usual associar-se um geotubo à extremidade do

geocomposto drenante para acumular e conduzir as águas do dreno até o local do desemboque (Figura 2.14).

Em relação às tensões durante a construção, Giroud (1996) faz os seguintes comentários:

- Altas tensões de compressão geralmente não afetam os filtros granulares, mas os geotêxteis não tecidos são muito compressíveis, o que acarreta os seguintes efeitos: (a) como o geotêxtil comprime, sua abertura de filtração decresce; (b) a transmissividade hidráulica decresce com o decréscimo da espessura e (c) em alguns geocompostos para drenagem, a cobertura de geotêxtil não tecido pode penetrar nos vazios da georrede interna, diminuindo a capacidade drenante do geocomposto.
- Em aplicações como barragens, pilhas de rejeito de mineração, aterros, etc. as mantas sintéticas podem estar submetidas a cargas estáticas muito grandes e que podem alterar a sua estrutura.

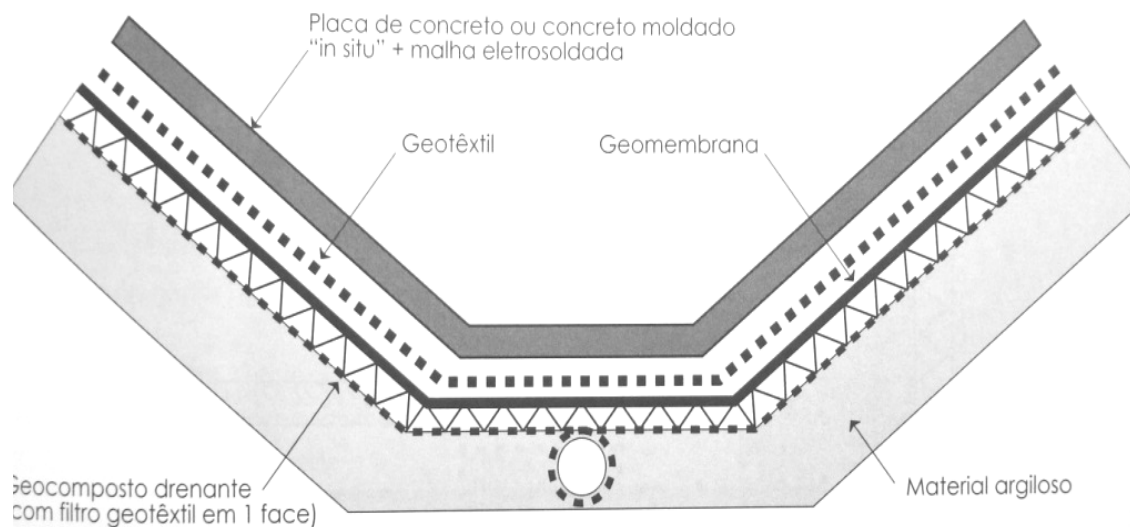


Figura 2.14 - Geocomposto drenante e geotubo aplicados em drenagens sob impermeabilização e revestimento de canal (Aguiar & Vertematti, 2004).

A utilização desses materiais em rodovias (Figura 2.15) pode melhorar o desempenho destas, aumentando a vida útil, em virtude da capacidade de drenagem do material drenante abaixo do pavimento. Entre outras razões, a aceitação dos geotêxteis se deve às características de flexibilidade e drenagem ao longo de seu plano, captando e conduzindo a água proveniente da parte superior e inferior, além de atuar como separador entre materiais.

Os geocompostos, conforme ilustrado na Figura 2.16, atuam drenando e conduzindo o fluxo proveniente da base pedregulhosa, da superfície do pavimento e de eventuais fluxos provenientes do solo abaixo do pavimento. Se não especificados de forma correta, tais geocompostos podem ter partículas de solo carregadas para dentro do núcleo do geocomposto, colmatando-o.



Figura 2.15 – Aplicação de geotêxteis não-tecidos em obras de pavimentação (Fonte: Informativo Bidim, 2006).

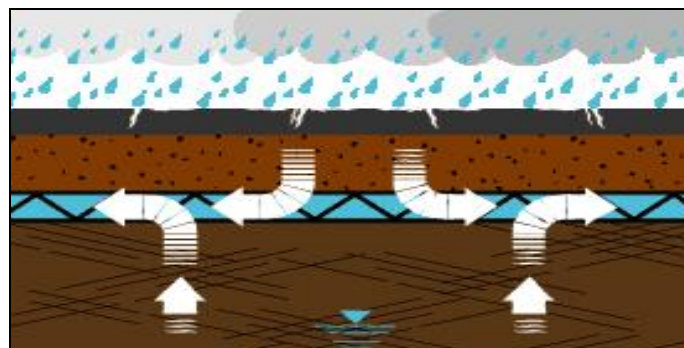


Figura 2.16 – Esquema de drenagem em pavimentos.

Em todas as aplicações dos geotêxteis como filtros em obra de engenharia o geotêxtil deve satisfazer aos requisitos de permeabilidade e retenção do solo. Estas propriedades, se adequadas, vão garantir a vida útil do sistema dreno-filtrante (Van Zanten, 1986).

Geocompostos formados pela combinação de geotêxteis e georredes têm sido amplamente empregados na interceptação e condução do chorume em aterros sanitários e na condução do vapor ou água abaixo de vários tipos de revestimentos, sendo assim uma solução técnica e economicamente atrativa em obras de disposição de resíduos. Uma outra forma de utilização

consiste no cobrimento de um dos lados da geomembrana com geotêxtil formando um composto que permite combinar funções de barreira impermeabilizante com a condução de água ou chorume pelo geotêxtil.

Leite (1995) comenta que o aterro sanitário é o método de disposição mais difundido em todo o mundo, visto que é a solução mais econômica quando comparada com os processos de compostagem e de incineração. É um dos principais sistemas de destino final dos resíduos sólidos domésticos hoje no Brasil e pode ser também definido como um reator heterogêneo, em que resíduos sólidos e água constituem as principais entradas, e o gás de aterro e o lixiviado ou chorume como as principais saídas. O gás de aterro e o líquido percolado são produtos indesejáveis formados num aterro sanitário e, se não houver um tratamento para ambos, poderá ocorrer, entre outros problemas, a contaminação do ar pelo gás de aterro e do lençol freático e do solo pelo percolado.

Segundo Van Impe (1998) *apud* Silva (2004), a camada de drenagem em um aterro sanitário é opcional, sendo necessária somente em locais onde existir um grande fluxo de água ou altas forças de percolação através da camada de proteção.

Dentre os elementos estruturais drenantes básicos que compõem um aterro sanitário, têm-se o sistema de drenagem sub-superficial de líquidos percolados (Figura 2.17a), no qual visa coletar do corpo do aterro o chorume e os líquidos provenientes da infiltração que estão confinados pela impermeabilização do aterro e conduzi-los para uma unidade de tratamento. Tal sistema pode constituir-se da combinação de geotêxteis e georredes, em substituição aos materiais granulares drenantes. O seu dimensionamento é feito a partir do conhecimento do volume de líquidos percolados, que depende de muitos fatores, entre eles: concepção de projeto, precipitação pluviométrica, escoamento superficial, líquidos oriundos da decomposição da matéria orgânica, capacidade do solo de reter umidade e grau de compactação dos resíduos.

Outro elemento essencial é o sistema de drenagem superficial (Figura 2.17b), o qual intercepta e desvia o escoamento superficial das águas pluviais, durante e após, a vida útil do aterro, evitando sua infiltração na massa de resíduos e diminuindo o volume de líquido percolado.

De acordo com a NBR 13896/1997, o sistema de drenagem dos líquidos percolados deve obedecer às seguintes prescrições:

- Deve ser instalado imediatamente acima da camada de impermeabilização;
- O dimensionamento deve ser feito de tal forma que evite a formação de uma lâmina de líquido percolado superior a 30 cm sobre a impermeabilização;
- Ser constituído de material quimicamente resistente aos resíduos e ao líquido percolado, e suficientemente resistente às pressões originárias da estrutura local do aterro e dos equipamentos utilizados em sua operação;
- Ser projetado e operado de forma a não sofrer obstrução durante a sua vida útil e pós-fechamento do aterro.

Em aterros operados em talude, o dreno de geocomposto ou georrede posicionados nos declives laterais, além da função drenante, pode contribuir para evitar problemas de deslizamento do sistema primário de coleta de chorume.

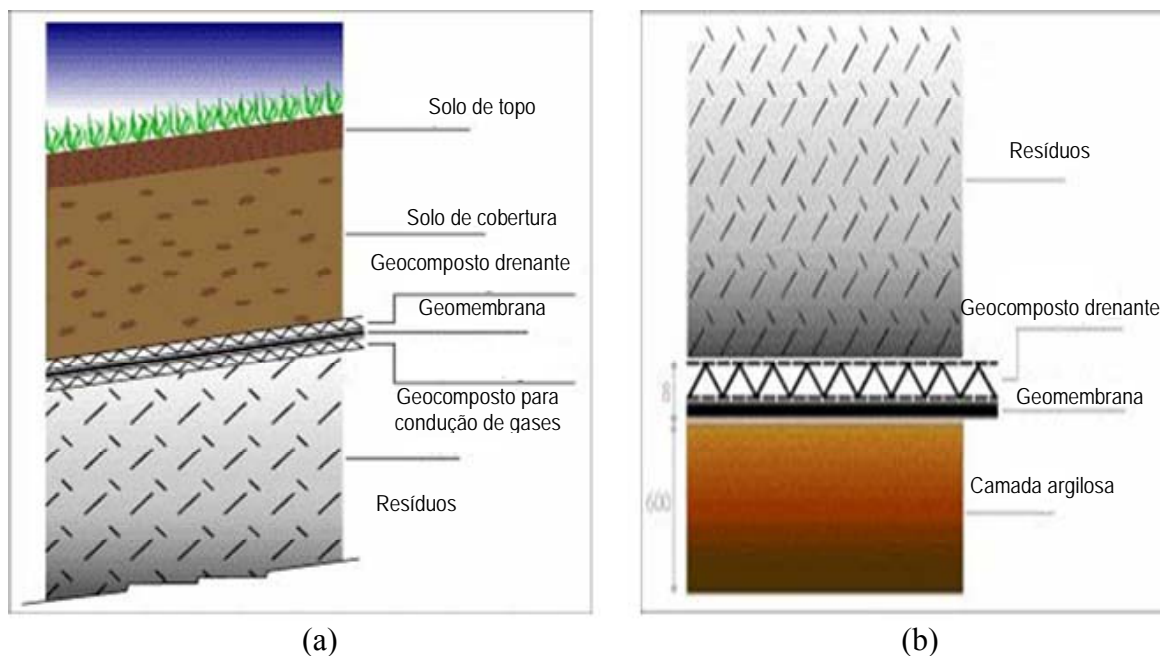


Figura 2.17 – Esquema de utilização de geocomposto drenante em um aterro sanitário: (a) sistema de drenagem sub-superficial e (b) sistema de drenagem superficial.

2.4. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS RELEVANTES PARA DRENAGEM

Quando no desempenho da função drenagem, os geossintéticos apresentam elevada capacidade de escoamento, o que, no entanto, pode variar significativamente dependendo das tensões confinantes de compressão a que estiverem sujeitos na obra (Aguiar & Vertematti, 2004).

A identificação e caracterização de geossintéticos são de fundamental importância para a seleção apropriada destes materiais para uso em obras geotécnicas e de proteção ambiental. Sob este aspecto, serão citadas as principais propriedades dos geossintéticos.

2.4.1. PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas mais importantes dos geossintéticos são a sua gramatura, porosidade, espessura, densidade (ou peso específico), forma e diâmetro dos fios, arranjo estrutural dos fios e forma e distribuição dos poros. Tais propriedades serão abordadas a seguir:

- Gramatura (M_A): valor da massa por unidade de área, geralmente expressa em g/m^2 .
- Espessura (t_G): quantificada pela distância entre as superfícies superior e inferior do material. O procedimento de medição é normatizado pela norma NBR 12569 (ABNT, 1992).
- Porosidade: razão entre o seu volume de vazios (V_V) e o seu volume total (V).
- Abertura de filtração (“Filtration Opening Size” – FOS): grandeza utilizada para avaliar o seu potencial de filtração.

Segundo Faure (1988), a massa de fibras por unidades de área, sob condição de tensão nula, intervém indiretamente na transmissibilidade. Gardoni & Palmeira (1998) e Gardoni *et al.* (1998) efetuaram uma modelagem estatística com dados de ensaios de transmissibilidade com geossintéticos sob condições de tensão de compressão e constataram que a gramatura possui influência na transmissibilidade dos geotêxteis não tecidos agulhados de poliéster analisados.

2.4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

2.4.2.1. Compressão

Tal propriedade, relacionada à aplicação da tensão normal, influencia diretamente na capacidade de transmissão de líquidos e gases, em virtude da variação da espessura. Conforme indica a Figura 2.18, os geotêxteis não-tecidos agulhados são os mais compressíveis, estando a compressão diretamente relacionada à massa por unidade de área (Koerner, 1994).

A Figura 2.19 ilustra um esquema de um geocomposto drenante submetido ao efeito de redução do seu volume de vazios e, portanto, de sua transmissibilidade, pela deformação do filtro geotêxtil submetido a esforços de compressão. Esse efeito acontece em diferentes proporções para uma mesma carga solicitante, dependendo do tipo de núcleo drenante empregado.

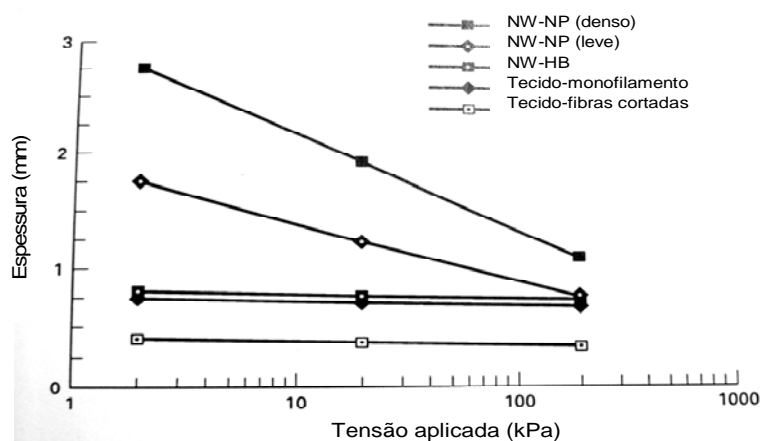


Figura 2.18 – Compressibilidade de diferentes tipos de geotêxteis, onde: NW-NP = não-tecido, agulhado, e NW-HB = não-tecido, termoligado (modificado - Koerner, 1994).

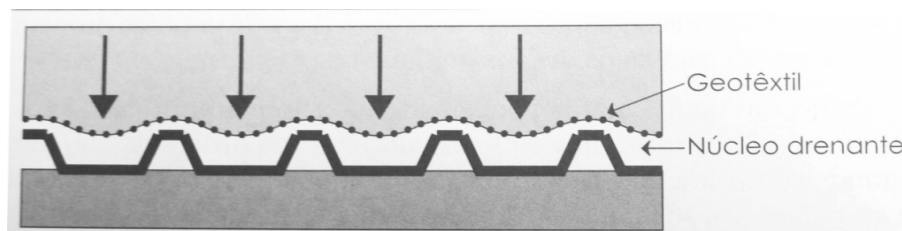


Figura 2.19 – Esquema do efeito da redução do volume de vazios de um geocomposto drenante.

Entende-se por fluência por compressão o processo de deformação lenta que os materiais apresentam quando são deixados sob carga constante. É um fenômeno físico que envolve a dependência da deformação em relação ao tempo e que é proporcional à magnitude do carregamento aplicado (McCrum *et al.*, 1967 *apud* Bueno *et al.*, 2005). No caso de materiais de reforço sintéticos, a susceptibilidade à fluência depende do tipo de polímero, considerando sua natureza visco-elástica, e do processo de confecção do elemento de reforço. De um modo geral, materiais feitos de poliéster ou poliamida são pouco sensíveis, em termos práticos, à fluência. Porém materiais a base de polipropileno, polietileno e nylon tendem a apresentar maior tendência a ocorrência de tal fenômeno.

Fannin *et al.* (1998) e Campbell & Wu (1994) observaram o colapso da estrutura da georrede de menor gramatura para níveis de tensões de compressão elevados, devido ao efeito da fluência. Estes autores constataram que a taxa de fluxo e a espessura do material decresce com o tempo devido ao fenômeno conhecido por fluência, observado no geossintético drenante, geotêxtil separador, e solo subjacente. Observou-se, também, que sob pequenas tensões normais o efeito do tempo não é significativo.

As deformações por fluência aumentam com o acréscimo de carregamento e temperatura. Sob baixas temperaturas, os polímeros podem se comportar como materiais rígidos. À medida que a temperatura aumenta, os polímeros apresentam deformações do tipo visco-elástica, com maior sensibilidade destas ao carregamento (Ferry, 1980 *apud* Bueno *et al.*, 2005).

Jarousseau & Gallo (2004) realizaram ensaios de fluência em geocompostos drenantes, segundo a norma EN 1897, aplicando combinações de carregamentos de compressão normal e cisalhamento. As tensões normais variaram de 50 a 200 kPa, foram aplicadas durante 504 horas, e a tensão cisalhante corresponde a 20% da tensão normal. Aplicou-se também somente a tensão normal por um período de 1 hora. Como resultados, obtiveram-se maiores reduções de espessura, com valores entre 15% a 30%, sob tensões combinadas, do que em relação à aplicação de somente tensão normal.

2.4.2.2. Resistência ao cisalhamento

Nos geocompostos drenantes, a aderência entre o núcleo drenante e o geotêxtil filtrante tem especial importância quando há a atuação de tensões de cisalhamento. Deve-se verificar a aderência entre os elementos constituintes do geocomposto e, portanto, a possibilidade de se

constituir um plano preferencial de ruptura, o que implicaria em uma intrusão excessiva ou deformação plástica nos canais de fluxo, tendo como consequência uma diminuição da taxa de fluxo. Em alguns casos, elevadas temperaturas podem afetar adversamente o sistema.

2.4.3. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

A transmissibilidade permite quantificar a capacidade do geossintético em transportar rapidamente volumes elevados de líquidos ao longo do seu plano.

A Figura 2.20 ilustra a passagem de fluxo ao longo do plano do material, evidenciando as grandezas fundamentais para o cálculo da transmissibilidade de um corpo-de-prova: vazão que atravessa o plano do material e a espessura.

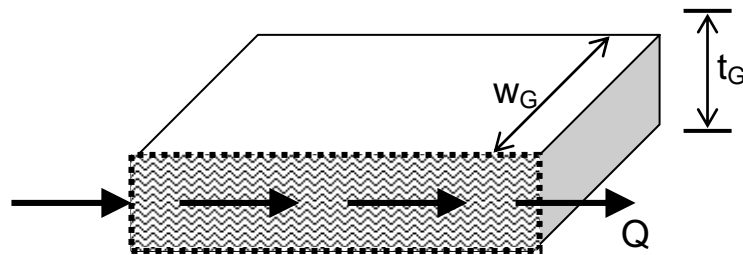


Figura 2.20 – Ilustração da transmissibilidade em um material.

Gardoni & Palmeira (2000) observaram que o coeficiente de permeabilidade no plano é maior que o coeficiente de permeabilidade normal nos geotêxteis não-tecidos ensaiados. Contudo, o coeficiente de permeabilidade no plano decresce a uma taxa maior com o aumento das tensões.

A transmissibilidade hidráulica, derivada da Lei de Darcy (Equação 2.1), é a taxa volumétrica de fluxo de água por unidade de largura do corpo-de-prova por unidade de gradiente na direção paralela ao plano do espécime. Tal grandeza, derivada da Lei de Fluxo de Darcy para regime laminar, é medida pela quantidade de água que passa através do corpo-de-prova ensaiado num intervalo de tempo específico, sob determinados valores de tensão normal e gradiente hidráulico, sendo matematicamente expressa pela Equação 2.2.

$$q = k_t \cdot i \cdot A = k_t \cdot i \cdot (t_G \times w_G) = (k_t \times t_G) \cdot (i \times w_G) \quad (2.1)$$

$$\theta = k_t \cdot t_G = \frac{q}{i \times w_G} \quad (2.2)$$

onde:

θ = transmissibilidade hidráulica;

k_t = permeabilidade do geossintético ao longo do seu plano;

t_G = espessura do geossintético;

w_G = largura do geossintético;

i = gradiente hidráulico;

A = área da seção transversal do geossintético.

Jeon *et al.* (2004) concluíram em suas pesquisas em geocompostos sob diferentes condições de intrusão por partículas de solo, que a transmissibilidade decresce com a diminuição da espessura e com o aumento do grau de intrusão, provocada pela aplicação da tensão vertical normal. Tal fator pode ser verificado durante o espalhamento e compactação de camadas de um aterro e pelo carreamento de partículas de solo pelo fluxo d'água ao longo da vida útil da obra (Palmeira & Gardoni, 2000).

A presença de partículas de solo nos poros do geotêxtil reduz os valores de coeficientes de permeabilidade normal e longitudinal (Palmeira & Gardoni, 2000). A compressibilidade do geotêxtil é reduzida devido à sua impregnação por partículas de solo. Assim, a transmissibilidade sob tensão do geotêxtil impregnado não necessariamente diminui com a impregnação em relação à situação do geotêxtil no estado virgem, dependendo no nível de impregnação do geotêxtil. Para os geocompostos, a gramatura do geotêxtil de cobertura não tem influência significativa no comportamento hidráulico quanto à transmissibilidade, pois o escoamento da água depende muito mais da forma espacial do núcleo do geocomposto (canais, conchas de ovos, etc.) do que do geotêxtil de cobertura (Gardoni, 2000).

Gardoni (2000) realizou ensaios de transmissibilidade em diferentes tipos de geotêxteis, georredes e geocompostos formados pela combinação desses materiais, obtendo as seguintes conclusões:

- A transmissibilidade decresce com a tensão normal mais acentuadamente para os geotêxteis de menor gramatura.
- Os valores de transmissibilidade dos geotêxteis não-tecidos foram maiores do que para o geotêxtil tecido.
- Quanto menor a gramatura do geotêxtil, menor sua transmissibilidade, particularmente para tensões verticais acima de 200 kPa, e menos uniforme é a variação da carga hidráulica ao longo de seu comprimento.
- A redução da espessura devido a tensões de compressão nas georredes é substancialmente menor que nos geotêxteis.
- Em geral, todas as georredes ensaiadas começaram a sofrer reduções consideráveis na capacidade de fluxo para tensões acima de 1000 kPa. Para georredes de menor gramatura, ocorre uma significativa mudança na transmissibilidade para o aumento de tensões acima de 200 kPa.
- Para geocompostos formados por um mesmo tipo de georrede e geotêxteis de gramaturas diferentes a vazão decresce mais significativamente para o geocomposto com geotêxtil de maior espessura.
- Em relação aos geocompostos formados por diferentes tipos de georredes e um mesmo tipo de geotêxtil, a influência da espessura do geocomposto é preponderante.

2.5. DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO

Em projetos de engenharia envolvendo a aplicação de geossintéticos como elemento drenante deve-se levar em consideração todas as solicitações impostas, de modo que a seleção do produto atinja capacidade drenante necessária, com fator de segurança adequado.

Serão apresentados a seguir os critérios de dimensionamento de drenos com a utilização de geossintéticos, indicando parâmetros para escolha dos mesmos.

A Figura 2.21 ilustra esquematicamente um geocomposto atuando como elemento drenante em um muro de contenção, submetido às condições de percolação impostas pelo meio circundante.

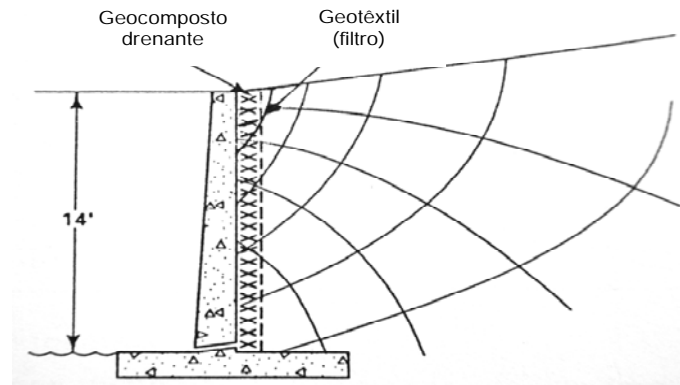


Figura 2.21 – Esquema representativo de fluxo em um geocomposto aplicado em um muro de contenção (modificado – Koerner, 1994).

2.5.1. VAZÃO UNITÁRIA DE CONTRIBUIÇÃO DE PROJETO

A vazão de contribuição unitária de projeto (Equação 2.3) pode ser determinada a partir da permeabilidade do solo, do gradiente hidráulico atuante sobre o dreno, e da adoção de um fator de segurança FS , utilizando-se diretamente das leis de Darcy e da continuidade, ou por meio de outros métodos clássicos de dimensionamento disponíveis.

$$q_d = FS \cdot q_{calc} \quad (2.3)$$

onde:

q_d = vazão unitária de contribuição do projeto;

FS = fator de segurança;

q_{calc} = vazão unitária, calculada de acordo com o método teórico adotado.

2.5.2. CAPACIDADE DE VAZÃO PLANAR DO GEOSSINTÉTICO

A capacidade de vazão planar de um geossintético ($q_{p,i}$), para determinada pressão confinante a um certo gradiente hidráulico, é fornecida pelos catálogos técnicos dos fabricantes, e deve

ser determinada em ensaios de laboratório, em conformidade com preceitos de normas específicas (ISO 12.958 ou ASTM D4716, por exemplo).

2.5.3. CAPACIDADE DE VAZÃO ADMISSÍVEL DO GEOSSINTÉTICO

O desempenho do geossintético é afetado em virtude das situações limitantes ao qual estará submetido em uma obra, tendo, portanto, afetando seu desempenho reduzido de longo prazo. A partir da introdução de fatores de redução que levam em consideração diversos condicionantes de comportamento (intrusão do geotêxtil filtrante, deformação por fluência e colmatação, por exemplo) pode-se obter, por meio da Equação 2.4, a capacidade de vazão planar admissível do geossintético (q_{adm}).

$$q_{adm} = \frac{q_{p,i}}{FR_{in} \times FR_{fl} \times FR_{cpq} \times FR_{cb}} \quad (2.4)$$

sendo:

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

$q_{p,i}$ = capacidade de vazão planar de um geossintético;

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

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

FR_{cpq} = fator de redução devido à colmatação química e/ou precipitação química no núcleo drenante e;

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

A Tabela 2.1 apresenta valores de fatores de redução para georredes (Koerner, 1997), sendo útil na estimativa de valores para outros tipos de núcleos drenantes.

Tabela 2.1 – Valores preliminares para os fatores de redução para $q_{p,i}$ em geocompostos que utilizam georredes (Koerner, 1997, *apud* Aguiar & Vertematti, 2004)

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	1,1 a 1,5	1,1 a 1,3
Lajes e áreas subterrâneas	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 em 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 (aterros sanitários)	1,5 a 2,0	1,4 a 2,0	1,5 a 2,0	1,5 a 2,0

O geossintético selecionado para uma determinada aplicação deve ter uma transmissibilidade que proporcione o fator de segurança desejado. Em projetos de drenagem, fatores de segurança de 5 a 30 podem ser encontrados na prática. O bom senso, por parte do projetista, é fundamental na determinação do fator de segurança a ser empregado. A vida útil de projeto e as conseqüências de um mau funcionamento do sistema de drenagem são também fundamentais na seleção do fator de segurança adequado.

Gardoni & Palmeira (2002) recomendam a incorporação aos critérios de dimensionamento de geotêxteis a possibilidade de compressão sob tensão e a impregnação por grãos de solo durante o espalhamento e compactação de aterros sobre camadas drenantes.

Capítulo 3

MATERIAIS EMPREGADOS

3.1. GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos utilizados no desenvolvimento da pesquisa consistem de amostras fornecidas por fabricantes de diversas marcas existentes no mercado brasileiro, permitindo a comparação dos parâmetros obtidos e os fornecidos pelos catálogos.

Segundo Koerner (1994) a seguinte seqüência em ordem crescente de capacidade de drenagem no plano é seguida, dependendo do tipo de material e método de fabricação: geotêxteis tecidos de filamentos cortados; geotêxteis tecidos de monofilamento; geotêxteis não-tecidos termo-ligados; geotêxteis não-tecidos resinados; geotêxteis não-tecidos agulhados e os sistemas híbridos de drenagem constituídos particularmente por georredes e geocompostos drenantes.

3.1.1. GEOTÊXTEIS

Utilizaram-se amostras de geotêxteis não-tecidos de fibras contínuas de poliéster, agulhados, ensaiados isoladamente, para verificação de seu desempenho como material drenante, visto que sua função de filtro já foi previamente pesquisada por Gardoni & Palmeira (2002). Os geotêxteis estudados são do tipo Bidim, com gramaturas variando de 200 a 400 g/m², antes comercialmente conhecidos como OP-20, OP-30 e OP-40, sendo denominados doravante nessa dissertação por G1, G2 e G3, respectivamente.

Gardoni (2000) concluiu em sua pesquisa com geotêxteis que os valores de transmissibilidade dos geotêxteis não-tecidos foram maiores do que para o geotêxtil tecido. Dessa forma, o presente estudo se detém apenas aos do tipo não-tecido, uma vez que tais materiais possuem um melhor desempenho para drenagem.

3.1.2. GEORREDES

As georredes são materiais comumente encontrados em sistemas de drenagem, em virtude do bom desempenho na transmissão de fluidos ao longo do plano. Khire *et al.* (2005) afirmam que uma georrede de 5 mm de espessura é hidraulicamente equivalente a uma camada granular drenante de 200 a 300 mm de espessura sob condições equivalentes.

Dois tipos de georredes, tendo como matéria-prima o PEAD (polietileno de alta densidade), foram empregados na realização dos ensaios de transmissibilidade. Ambas têm como característica comum o mesmo ângulo de abertura entre fibras, diferenciando-se pela espessura e, conseqüentemente, pela gramatura. A nomenclatura utilizada para as georredes provém do termo em inglês *geonet*, sendo distinguidas nos seguintes tipos: georrede GN1, para georrede conhecida comercialmente como GN900, cuja gramatura é de 879 g/m²; e GN2, para georrede cuja nomenclatura comercial é GN1250, a qual apresenta gramatura igual a 1190 g/m² (Figura 3.1).

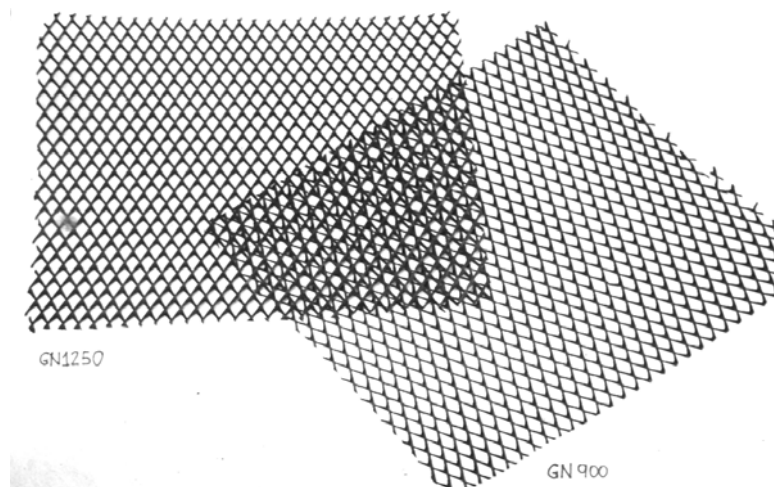


Figura 3.1 – Georredes de PEAD utilizadas na pesquisa.

3.1.3. GEOCOMPOSTOS

Na formação de geocompostos drenantes, é comumente utilizado o geotêxtil do tipo não tecido como elemento filtrante. Segundo Rad *et al.* (1998) a transmissibilidade hidráulica decresce em virtude da utilização de geotêxteis mais densos/espessos, provavelmente pelo potencial de intrusão desenvolvido de forma mais intensa por estes geotêxteis.

A combinação dos dois tipos de georredes citados com o geotêxtil G1 resultou nos seguintes geocompostos drenantes: DGC1 e DGC2 (Figura 3.2). Tais materiais foram utilizados conforme comercializado atualmente, cuja fixação entre a georrede e as duas camadas de geotêxtil é obtida por um processo de termosoldagem.

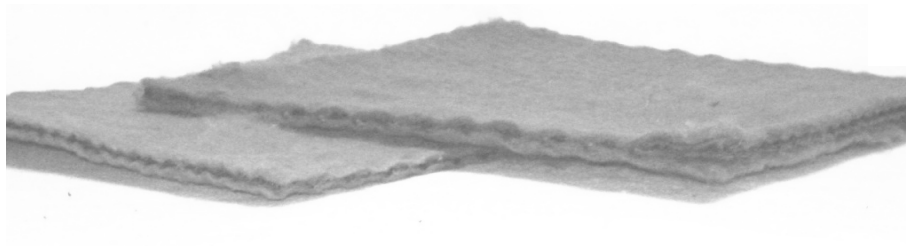


Figura 3.2 – Geocompostos drenantes dos tipos DGC1 e DGC2.

A Figura 3.3 mostra o geocomposto (DGC3) cujo elemento drenante é um geoespaçador de estrutura tridimensional constituída por um grande volume de vazios, caracterizado por cúspides nas duas faces. A face superior está em contato com um geotêxtil do tipo não-tecido, denominado G4, com gramatura igual a 180 g/m^2 .

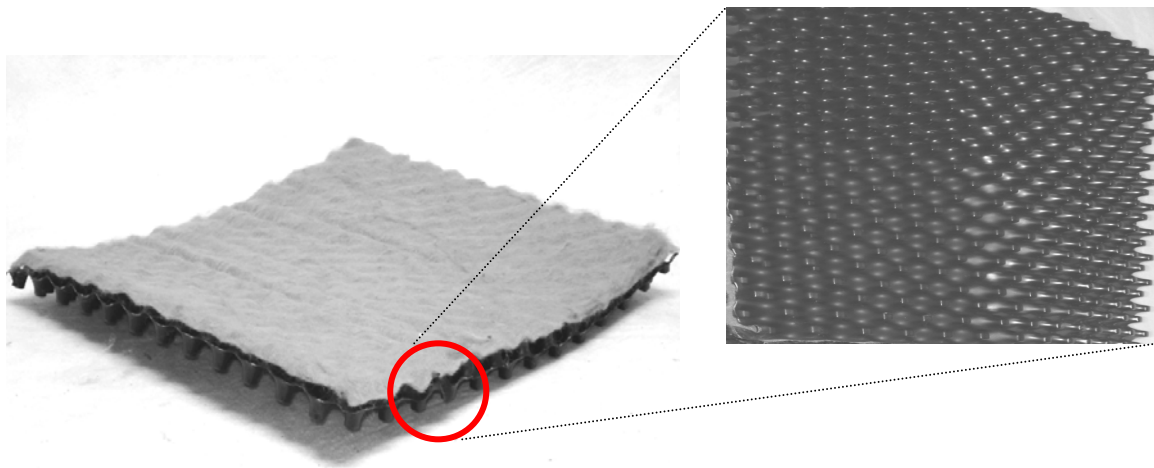


Figura 3.3 – Geocomposto drenante do tipo DGC3, com núcleo constituído por geoespaçador.

O geocomposto denominado DGC4, mostrado na Figura 3.4, está entre os geocompostos drenantes desenvolvidos pela indústria, buscando aliar eficiência e economia. Comercialmente conhecido como MacDrain 2L, tal material tem sido bastante empregado em obras de drenagem vertical (Figura 3.5), aliviando o empuxo hidrostático e proporcionando

melhores condições de estabilidade a estruturas de contenção, por exemplo. Tal geocomposto é caracterizado por suas características de leveza e flexibilidade, cujo núcleo, termosoldado a dois geotêxteis de poliéster, é constituído por uma georrede semelhante a uma geomanta tridimensional fabricada a partir de filamentos de polipropileno ou poliamida (nylon), com índice de vazios em torno de 95%.

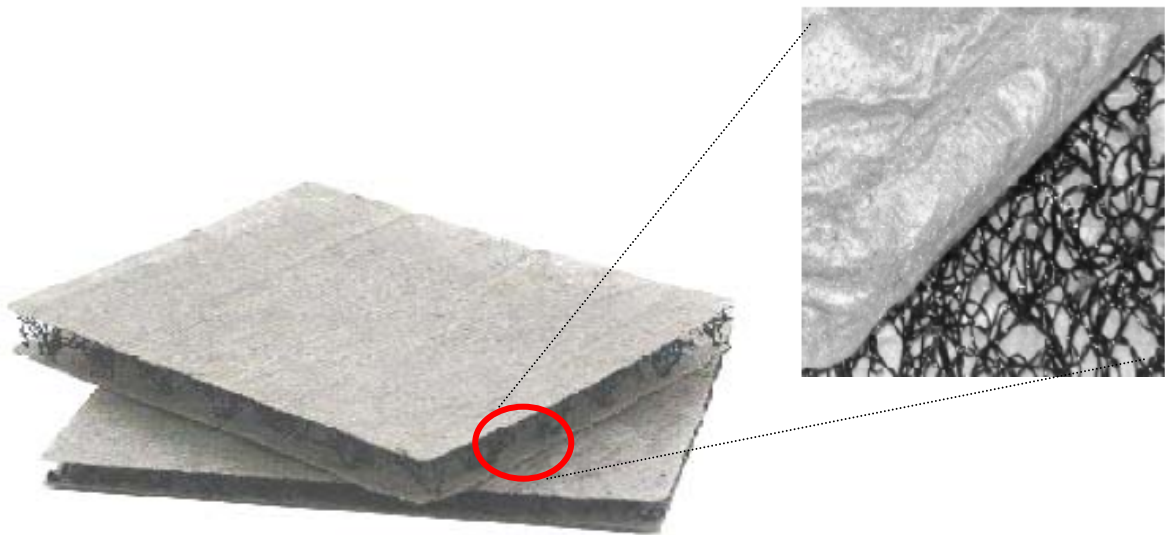


Figura 3.4 – Geocomposto drenante DGC4 com núcleo constituído por filamentos de polipropileno.

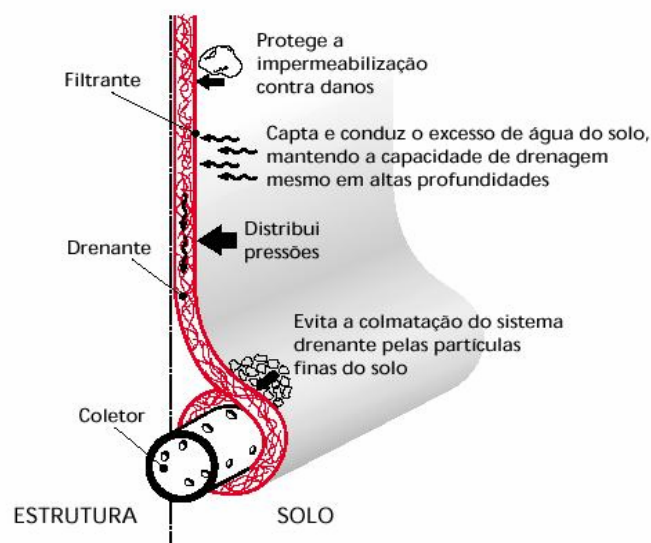


Figura 3.5 – Ilustração do funcionamento do geocomposto DGC4 como elemento drenante em uma estrutura de contenção (Catálogo - Geocomposto para drenagem MacDrain, 2006).

3.2. MATERIAIS ALTERNATIVOS

A utilização dos plásticos “pós-consumo” como núcleos poliméricos para geocompostos convencionais, é interessante em virtude da possibilidade de viabilidade técnica e econômica, aliadas a aspectos como a diminuição dos resíduos sólidos dispostos nos aterros e substituição de materiais tradicionais de engenharia. No Brasil dentre as principais aplicações de resíduos em engenharia, pode-se citar muros de contenção feitos com pneus usados, fabricação de tubos, tintas, vernizes e material drenante (como garrafas PET), etc.

3.2.1. TAMPAS DE GARRAFAS PET

3.2.1.1. Características físico-químicas

O polímero constituinte das tampas de garrafas PET é o PEAD (Polietileno de Alta Densidade), identificado pela codificação da resina característica impressa na própria tampa, conforme o Sistema Internacional de Codificação dos Plásticos (Figura 3.6).

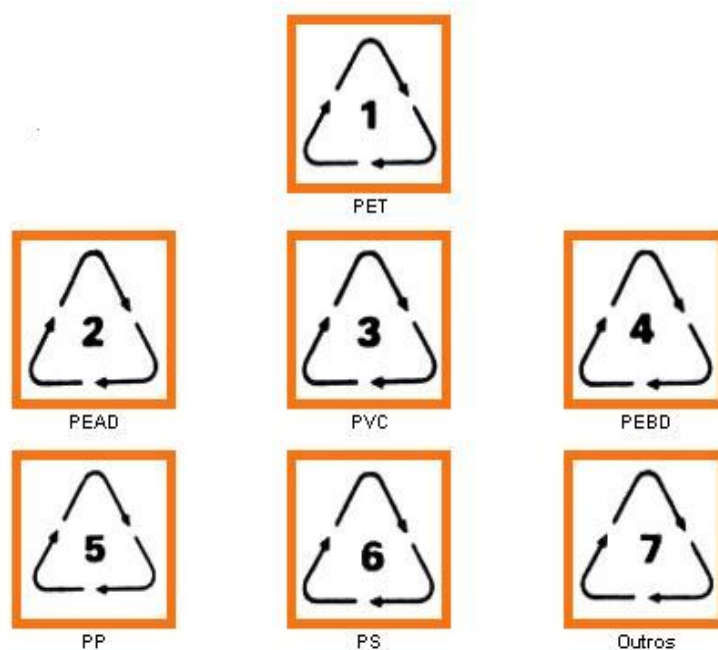


Figura 3.6 – Sistema Internacional de Codificação dos Plásticos.

O PEAD é um tipo de polímero termoplástico, o qual amolece quando aquecido e endurece novamente ao resfriamento. Este fato permite moldá-lo sucessivas vezes, permitindo, assim, o processo de reciclagem.

Os polímeros, de uma maneira geral, apresentam características como: baixa condutividade térmica; baixa condutividade elétrica; maior resistência à corrosão por oxigênio ou produtos químicos e baixa densidade, em virtude da elevada porosidade, o que implica numa elevada permeabilidade a gases. Porém, o polietileno apresenta baixa permeabilidade à água.

O PEAD, com densidades entre 0,935 e 0,960 g/cm³, é um plástico rígido, resistente à tração, com moderada resistência ao impacto. É utilizado na fabricação de recipientes, garrafas, filmes, brinquedos, materiais hospitalares, tubos para distribuição de água e gás, tanques de combustível automotivos, etc. (Mano, 1991).

3.2.1.2. Geocomposto GCT

O uso de tampas de garrafas PET na formação de geocompostos, como material constituinte do núcleo drenante, é semelhante ao dos geoespaçadores, formando uma estrutura tridimensional rígida com elevado volume de vazios.

A resistência das tampas e a intrusão do filtro geotêxtil nos vazios são importantes para o desempenho do geocomposto. A taxa de fluxo irá diminuir rapidamente se ocorrer uma intrusão excessiva ou deformação plástica nos canais de fluxo do material do núcleo, fechando significativamente os canais de fluxo.

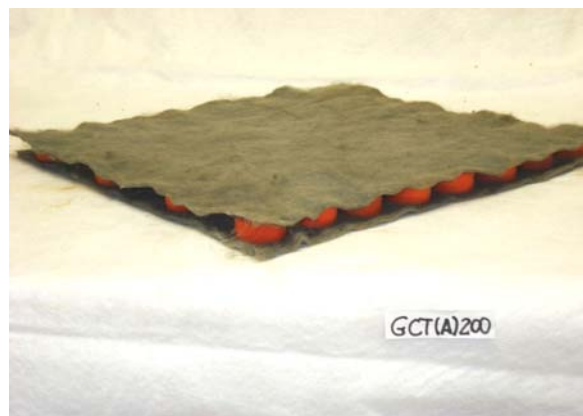
Para os ensaios, formaram-se três tipos de geocompostos, denominados de GCT's, obtidos por meio da colagem, com selante de silicone ou adesivo bicomponente a base de resina epóxi, do fundo cego das tampas no geotêxtil não-tecido do tipo G1, o qual atuou como elemento filtrante. A adição de um outro geotêxtil como camada inferior do geocomposto resulta em um produto flexível com espessura da ordem dos valores encontrados em geocompostos que utilizam geoespaçadores como núcleo drenante.

Com relação às tampas, foi realizada uma seleção de acordo a cor e a rotulagem, separando-se o tipo mais abundante dentre a amostragem provida do processo separação das garrafas PET. Tais tampas, mesmo depois de submetidas ao processo de triagem, apresentaram variações de diâmetro e de espessura, entretanto não ultrapassando 5%.

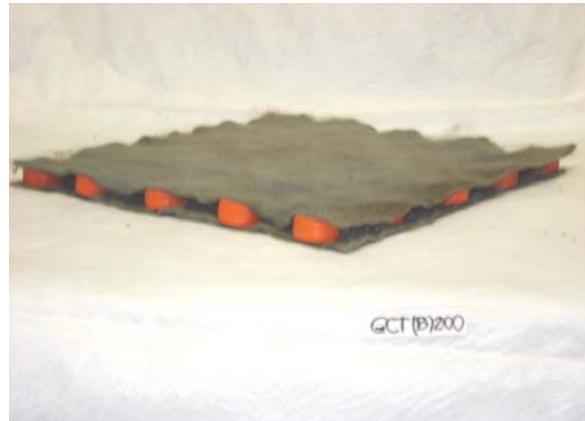
Criaram-se três geocompostos (Figura 3.7) denominados GCT1, GCT2 e GCT3, cujos espaçamentos entre as faces externas são: 0,6, 4,0 e 10,0 cm, respectivamente.



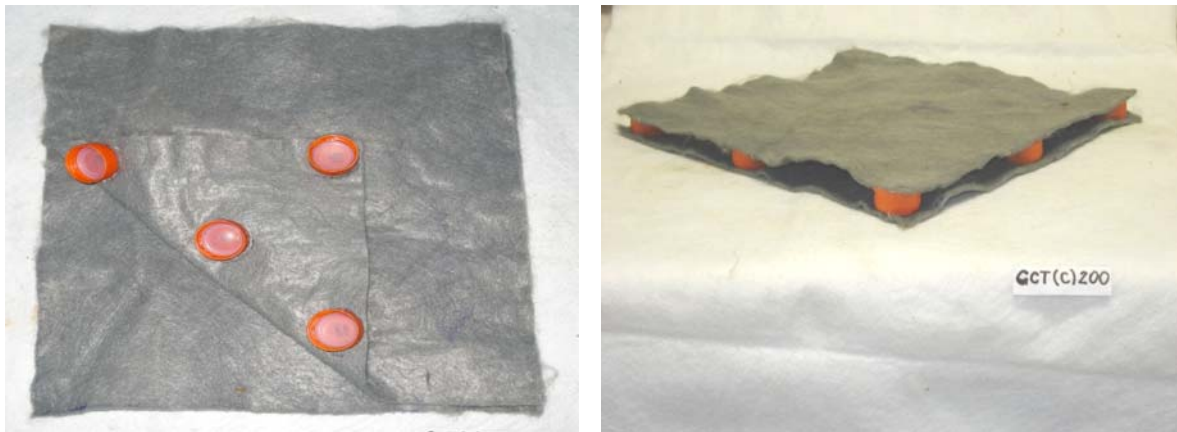
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.7 – Geocompostos do tipo GCT: (a) Ilustração do núcleo dos três tipos de geocompostos, (b) Geocomposto GCT1, (c) Geocomposto GCT2 e (d) Geocomposto GCT3.

3.2.2. TIRAS DE PNEUS

O Capítulo 2, referente a revisão bibliográfica dessa dissertação, aborda os aspectos que contribuíram para a adoção de tal material como parte integrante dos geocompostos a serem criados.

3.2.2.1. Geocomposto GCP

A formação do núcleo drenante dos geocompostos do tipo GCP foi baseada no funcionamento das georredes. Para isso, procedeu-se à formação de uma trama constituída por tiras de pneus sobrepostas segundo direções perpendiculares. Os pedaços de pneus provenientes de uma usina de recauchutagem foram cortados em partes menores com o auxílio de serra circular metálica, a qual possibilitou o corte dos fios de aço incrustados. As tiras obtidas possuem dimensões de aproximadamente 2 cm de largura e comprimentos variados. Cuidados especiais devem ser tomados com relação a aspectos relativos a saúde e segurança no manuseio, devido aos fragmentos de aço contidos nas tiras.

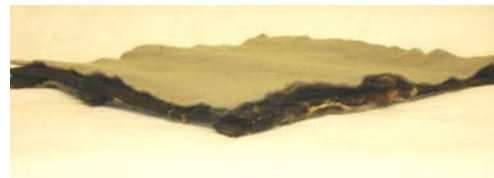
As tiras para compor o núcleo drenante foram formadas pela colagem dos pedaços dos pneus cortados, por meio de adesivo bicomponente à base de resina epóxi, resultando em tiras de comprimento aproximadamente igual a 30,0 cm. A Figura 3.8 mostra as tiras de pneus utilizadas na formação da trama, a qual não teve a utilização de elemento colante para

sobreposição das tiras. Tais materiais foram selecionados de acordo com a espessura, com tolerâncias de 5% de variação.



Figura 3.8 – Tiras de pneus utilizadas na formação do núcleo drenante dos geocompostos denominados GCP.

Dois tipos de geocompostos foram formados, tendo como diferencial o espaçamento entre tiras. A Figura 3.9a mostra o geocomposto denominado GCP1, cujo espaçamento entre tiras é de 12 cm. O GCP2, representado na Figura 3.9b, apresenta núcleo drenante com espaçamento entre tiras de aproximadamente 5 cm.



(a)

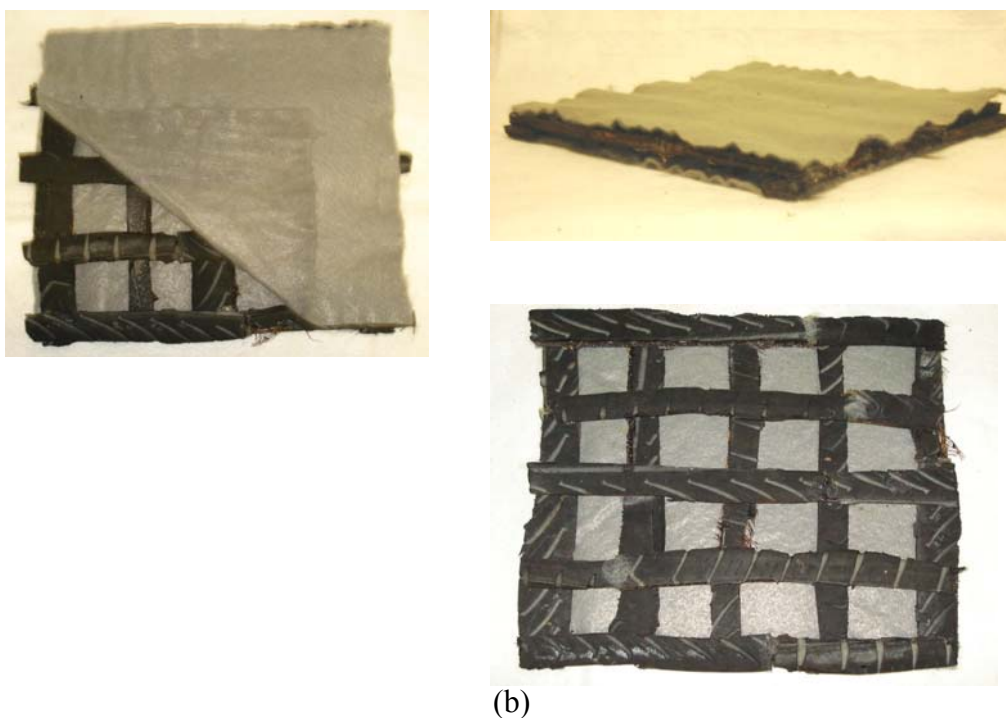


Figura 3.9 – Geocompostos com núcleo drenante constituído por tiras de pneus: (a) GCP1 e (b) GCP2.

Pode-se observar na Figura 3.9a que o geocomposto com maior espaçamento entre tiras (GCP1), apresenta um maior abaulamento de geotêxtil de cobertura, implicando, dessa forma, num maior potencial de intrusão do núcleo drenante. A Tabela 3.1 sumaria os dados dos materiais submetidos ao ensaio de transmissibilidade, nessa pesquisa.

Tabela 3.1 – Materiais utilizados no ensaio de transmissibilidade hidráulica

Nomenclatura – Material	Geossintético - Tipo	Gramatura (g/m²)	Espessura nominal (mm)	Nomenclatura comercial
G1	Geotêxtil não-tecido (PET)	200	1,9	OP-20
G2	Geotêxtil não-tecido (PET)	300	3,5	OP-30
G3	Geotêxtil não-tecido (PET)	400	3,8	OP-40
GN1	Georrede (PE)	879	5,0	GN 900
GN2	Georrede (PE)	1190	7,0	GN 1250
DGC1	G1 – GN1 – G1	1279	8,4	DGC 900/200
DGC2	G1 – GN2 – G1	1590	10,4	DGC 1250/200
DGC3	G4 – GS	1980	22,4	-
DGC4	G5 – GP – G5	700	11,00	MacDrain 2L
GCT1	G1 – T1 – G1	2020	19,35	-
GCT2	G1 – T2 – G1	1620	19,35	-
GCT3	G1 – T3 – G1	850	19,35	-
GCP1	G1 – P1 – G1	6080	22,0	-
GCP2	G1 – P2 – G1	9095	23,0	-

Notas: PET = poliéster; PE = polietileno; G4 = geotêxtil não-tecido ($\mu = 180 \text{ g/m}^2$; esp. = 1,9 mm); GS = geoespaçador de polietileno ($\mu = 180 \text{ g/m}^2$; esp. = 1,9 mm); G5 = geotêxtil não tecido ($\mu = 100 \text{ g/m}^2$; esp. = 0,7 mm); GP = georrede formada por filamentos de polipropileno; T1 = tampas de garrafas PET espaçadas de 0,6 cm; T2 = tampas de garrafas PET espaçadas de 4,0 cm; T3 = tampas de garrafas PET espaçadas de 10,0 cm; P1 = tiras de pneus espaçadas de aprox. 12,0 cm; P2 = tiras de pneus espaçadas de aprox. 5,0 cm.

Capítulo 4

METODOLOGIA DE ENSAIOS

4.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo aborda aspectos relativos à realização do ensaio de transmissibilidade hidráulica, dando ênfase ao procedimento adotado segundo as recomendações gerais da norma ASTM D4716 (ASTM, 1991).

Os procedimentos de ensaio aqui descritos abordam as seguintes condições de fluxo:

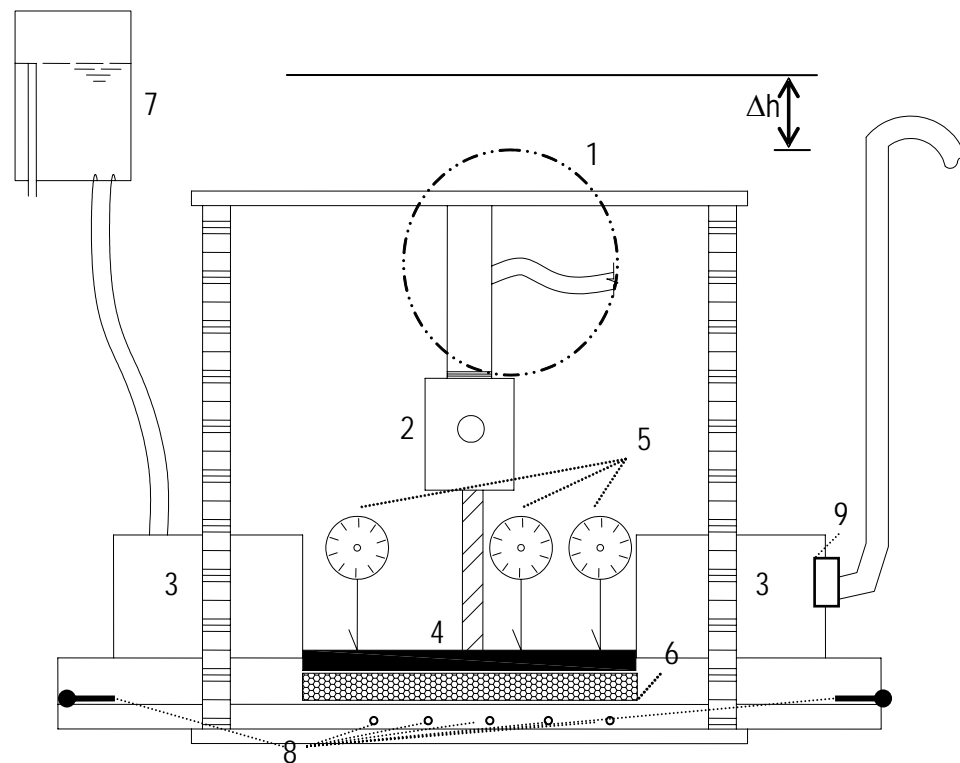
- Fluxo do tipo laminar, caracterizado pela relação linear entre a taxa de fluxo por unidade de largura e o gradiente hidráulico, permitindo utilização da Lei de Darcy.
- Fluxo turbulento, o qual apresenta uma relação não-linear entre a taxa de fluxo por unidade de largura e o gradiente hidráulico, indicando a diminuição da transmissibilidade com o aumento do gradiente hidráulico. Segundo Fannin e Choy (1998), para esse tipo de regime, a velocidade de fluxo aumenta em proporção à raiz quadrada do gradiente hidráulico.
- Fluxo sob pressão, fluxo na direção paralela ao plano do material conduzido predominantemente por diferença de pressão.

Os materiais que possuem um regime de fluxo do tipo turbulento apresentam as curvas que relacionam a taxa de fluxo com o gradiente hidráulico de forma não-linear. Portanto, para esses casos a taxa de fluxo por unidade de largura será a grandeza utilizada para expressar a vazão que atravessa o plano desses materiais.

4.2. EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento para a realização do ensaio de transmissibilidade foi desenvolvido na Universidade de Brasília, sendo similar ao proposto pela ASTM D4716 (1991). O projeto do mesmo foi adaptado para a utilização de amostras maiores, em relação aos equipamentos convencionais, uma vez que se pretende também investigar o comportamento de materiais

alternativos como núcleo drenante dos geocompostos. Uma visão esquemática do equipamento é mostrada na Figura 4.1.



1- Sistema de aplicação de carga; 2- Célula de carga; 3- Reservatórios de acrílico; 4- Placa metálica rígida; 5- Deflectômetros; 6- Corpo-de-prova; 7- Reservatório com extrusor; 8- Piezômetros; 9- Válvula de descarga.

Figura 4.1 – Visão esquemática do equipamento utilizado no ensaio de transmissibilidade hidráulica.

A amostra de geossintético é acomodada no interior de uma caixa formada por uma célula de aço de 41,5 mm de altura, sobreposta por uma placa de acrílico de 10 mm de espessura. O corpo-de-prova tem a forma quadrada, com lados iguais a 30 cm, é posicionado entre dois reservatórios de acrílico de dimensões iguais, cuja largura corresponde à do CP, e altura igual a 11 cm.

A tensão vertical distribuída sobre o corpo-de-prova é aplicada por uma placa rígida de metal com 20 mm de espessura, cuja área de projeção abrange toda a superfície do CP. Tanto a base de acrílico quanto a face da placa metálica em contato com o corpo-de-prova foram cobertas com uma fina camada de silicone, formando uma película rugosa pouco compressível, que atua impermeabilizando as interfaces do corpo-de-prova.

Em alguns ensaios é utilizada espuma emborrachada na interface do corpo-de-prova com a placa rígida com o objetivo de eliminar caminhos preferenciais de água, distribuir as pressões sobre o CP de maneira mais uniforme e simular algum nível de intrusão nos vazios de georredes e geocompostos.

Alguns materiais foram utilizados na vedação das juntas em torno das bordas da placa de metal. Produtos como silicone, selante elástico e massa para calafetagem foram empregados. O silicone apresentou-se mais adequado em virtude de suas características como facilidade de aplicação, tempo de cura e comportamento elasto-plástico sob as variações de tensão empregadas no ensaio.

O sistema de pressão utilizado para aplicação das tensões normais variando de 25 a 400 kPa é composto por um conjunto bomba-cilindro, com sistema hidráulico a base de óleo. O cilindro, modelo RCY-104 da marca Yellow Power, possui capacidade máxima de carga de 100 kN. A bomba, da mesma marca (modelo PY-80), tem o funcionamento do tipo manual, com duas velocidades, sendo recomendada para trabalhar sob pressões até 70.000 kPa.

O monitoramento dos carregamentos aplicados foi realizado com a utilização de uma célula de carga tipo S (marca Kratos), tração/compressão, capacidade de 50 kN, juntamente com um indicador eletrônico, onde são realizadas as leituras das cargas. Essa célula é posicionada entre o cilindro de aplicação de carga e um pistão de aço conectado à placa metálica.

O acompanhamento da variação de espessura do corpo-de-prova é realizado pela leitura de três deflectômetros com bases magnéticas instalados sobre a superfície da placa metálica. A espessura dos corpos-de-prova é obtida pela média das leituras dos três deflectômetros.

O sistema para geração de fluxo d'água no equipamento é constituído por um reservatório suspenso dotado de extravasor e os dois reservatórios de acrílico, fixos à caixa metálica. Tais reservatórios são úteis no armazenamento da água a ser conduzida ao longo do plano do corpo-de-prova. Uma válvula de descarga coleta a água proveniente dos reservatórios, que por sua vez é conduzida por uma mangueira, que permite o registro da vazão que atravessa o corpo-de-prova.

Cinco piezômetros conectados à base do equipamento, dispostos ao longo do corpo-de-prova e espaçados de 50 mm, permitem o acompanhamento da variação da carga hidráulica ao longo

do comprimento do corpo-de-prova, com o auxílio do painel mostrado na Figura 4.2. Tais registros são úteis na verificação da uniformidade das propriedades hidráulicas ao longo do comprimento do geossintético (Gardoni & Palmeira, 1999). Outros dois piezômetros localizados nas extremidades da caixa metálica são úteis na visualização da diferença de carga hidráulica entre os níveis de entrada e saída de fluxo no equipamento, permitindo o monitoramento do gradiente hidráulico.

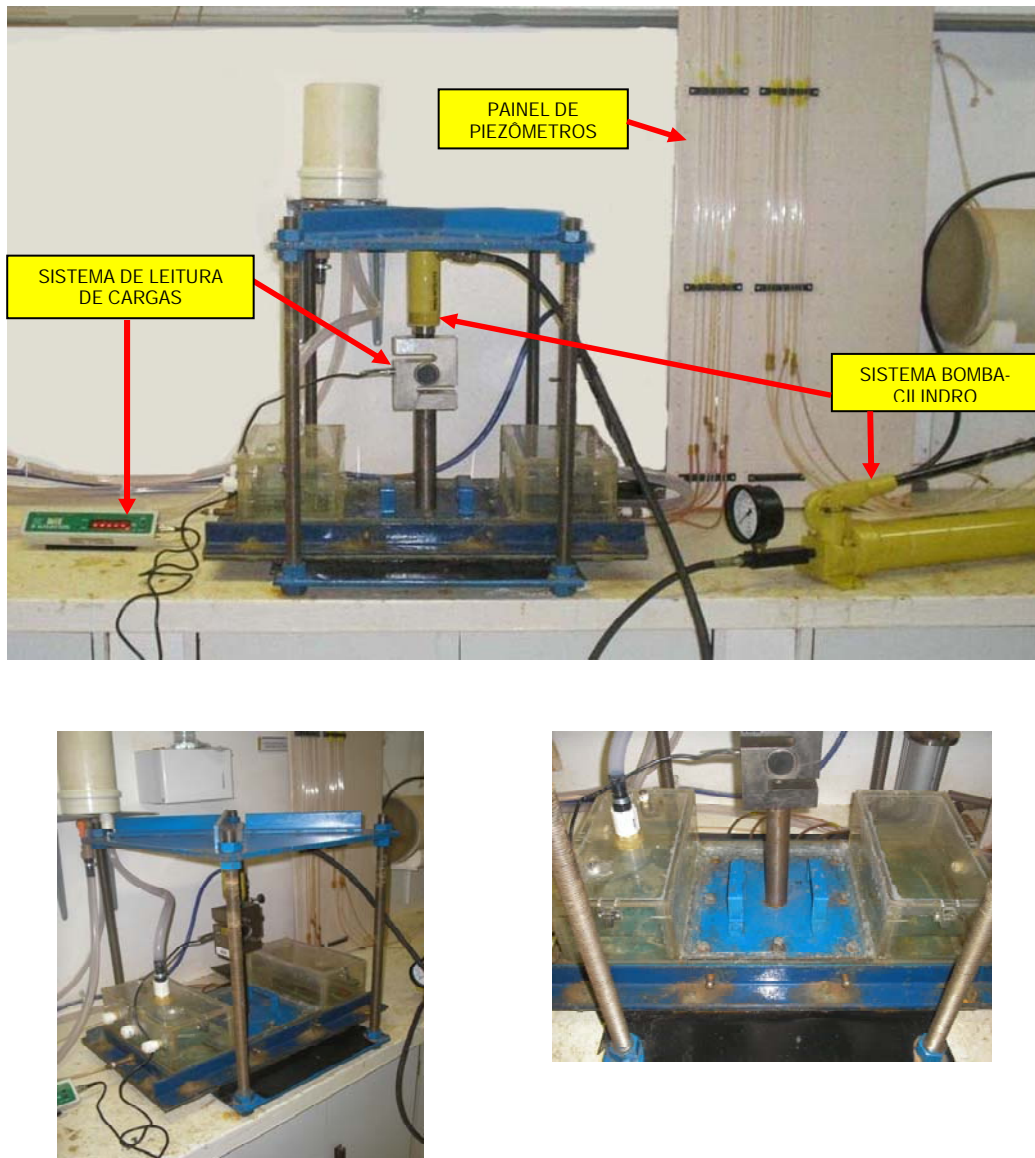


Figura 4.2 – Equipamento utilizado no ensaio de transmissibilidade hidráulica.

4.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

4.3.1. ASPECTOS RELATIVOS À AMOSTRAGEM

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de transmissibilidade foram obtidos com base nas dimensões do equipamento disponíveis para o assentamento do CP. As dimensões estabelecidas variam de acordo com o material ensaiado, sendo a largura limitada a todos os materiais em 30,0 cm. Entretanto, o comprimento dos corpos-de-prova deve exceder um pouco o estabelecido, de modo a que suas extremidades adentrem aos reservatórios, assegurando o fluxo no interior do plano dos mesmos. A ASTM D4716 (1991) especifica um comprimento de no mínimo duas vezes maior que sua largura, para corpos-de-prova de largura até 300 mm. Segundo Campbell & Wu (1994) o corpo-de-prova no formato quadrado reduz os efeitos de borda e permite um carregamento mais uniforme.

Os geotêxteis foram obtidos por amostragem aleatória simples, observando-se a distância de 10 cm a partir da borda dos rolos, para retirada do corpo de prova do geotêxtil, segundo preconiza a norma NBR 12593 (ABNT 1992). Os corpos-de-prova das georredes foram obtidos respeitando a direção longitudinal de fabricação. Visto que, conforme dados fornecidos pelo fabricante, ocorrem diferenças significativas dos valores de capacidade de descarga das georredes dependendo da direção do fluxo no plano destes materiais. Os geocompostos dos tipos DGC1 e DGC2, também tiveram sua amostragem obtida respeitando o critério de direção adotado para as georredes. Os corpos-de-prova dos demais geocompostos convencionais também foram obtidos de maneira que o comprimento esteja de acordo com a direção de fabricação do produto, ou seja, conforme o sentido de estiramento dos rolos, permitindo, assim, a passagem do fluxo na direção longitudinal.

As dimensões dos corpos-de-prova dos geocompostos alternativos obedecem aos critérios que permitam a montagem dos mesmos sobre a área disponível na base metálica do equipamento. No caso dos materiais do tipo GCT, o procedimento de montagem dos corpos-de-prova obedece ao posicionamento inicial do geotêxtil inferior, seguido da inserção do geotêxtil superior com as tampas aderidas. Deve-se salientar que toda a operação de colocação do CP, ocorre com este previamente inundado, e na presença de lâmina d'água no interior do equipamento. Tais procedimentos também foram utilizados na amostragem dos geocompostos com núcleo constituído por tiras de pneus, cujo preparo do corpo-de-prova consistiu na inserção do geotêxtil inferior, em seguida, a montagem da trama das tiras de pneus sobre o

mesmo, obedecendo aos espaçamentos especificados, e posteriormente a inserção do geotêxtil de cobertura.

Após obtenção dos corpos-de-prova, realizou-se a caracterização dos mesmos por meio da determinação de parâmetros como a espessura e a massa por unidade de área (gramatura). O procedimento para determinação da espessura obedeceu a NBR 12.569 (ABNT, 1992), a qual prescreve a determinação da espessura mediante a aplicação da tensão de compressão de 2 kPa. A obtenção da gramatura é realizada por meio de pesagem do corpo-de-prova, dividindo-se o valor de massa obtido pela área do CP.

Nos ensaios realizados com geocompostos, a utilização da espuma emborrachada em contato com a face superior dos materiais tem o objetivo de eliminar vazios existentes na interface do corpo-de-prova com a placa metálica de aplicação de carga e, ao mesmo tempo, permite simular, até certo ponto, compressão ou intrusão do solo sobrejacente nos vazios do geocomposto.

4.3.2. SELEÇÃO DO GRADIENTE HIDRÁULICO

Os tipos de materiais condicionam ao tipo de fluxo no ensaio, em virtude da relação entre a transmissibilidade e o gradiente hidráulico. Nos geotêxteis, por apresentarem regime de fluxo do tipo laminar, tal relação ocorre de forma linear, e para estes materiais adotou-se um gradiente igual a 1,0. Narejo (2005) afirma que os geocompostos de georrede apresentam uma relação não-linear entre gradiente hidráulico e transmissibilidade, justificando a ocorrência de regime de fluxo do tipo turbulento. Segundo Fannin *et al.* (1998) tal relação não-linear já ocorre para baixos gradientes, o que justifica a utilização do gradiente hidráulico de valor 0,5 para materiais que apresentam regime de fluxo do tipo turbulento, valor esse utilizado nos ensaios dessa dissertação.

4.3.3. SATURAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA

A ASTM D 4716 (1991) especifica o uso de água deaerada, mais não especifica um método de deaeração ou algum nível aceitável de oxigênio dissolvido. Estudos anteriores com georredes e geocompostos tanto utilizaram água da rede (Koerner & Wu, 1990; Gallup *et al.*, 1991; Shaner & Menoff, 1991) ou não declararam a utilização de água deaerada. A Figura 4.3 mostra o método adotado para saturação de grande parte dos materiais ensaiados, no qual se

utiliza uma mangueira com água proveniente da rede, para jateamento sobre o corpo-de-prova inserido em um recipiente com água. O processo foi realizado para ambos os lados do CP, até o desaparecimento de bolhas de ar. Uma outra técnica, utilizada particularmente para geotêxteis, consistiu na fervura dos corpos-de-prova, inseridos em um recipiente com água destilada, até a constatação do desaparecimento das bolhas.



Figura 4.3 – Saturação de um corpo-de-prova.

4.3.4. APLICAÇÃO DA TENSÃO NORMAL

As tensões normais de compressão exercidas em todos os materiais no ensaio de transmissibilidade foram aplicadas conforme os seguintes estágios de carregamento: 2, 25, 50, 100, 200 e 400 kPa. A norma ASTM D4716 (1991) recomenda o tempo mínimo de aplicação de carga para assentamento do corpo-de-prova de 15 min, além da seleção das tensões normais mínima e máxima, a serem aplicadas quando se conhece a finalidade de uso do material. Na presente pesquisa, optou-se pela aplicação de carregamentos com duração mínima de 1 h, conforme também desempenhado por Gardoni (2000), caracterizando assim, ensaios de curta duração. No Capítulo 5, que trata da análise dos resultados dos ensaios, são explicitados os casos em que a duração do estágio de aplicação da tensão normal foi maior que 1 h. Tal situação ocorreu devido a verificação de fenômeno da fluência mais intensa.

4.3.5. REALIZAÇÃO DO ENSAIO

Inicialmente submete-se o corpo-de-prova ao processo de saturação com água proveniente da rede de abastecimento. Tal saturação é concluída após a inserção do CP no equipamento, o qual deve estar previamente inundado com lâmina d'água suficiente para cobrir o corpo-de-prova. O período mínimo para saturação corresponde a 2 horas. Concomitantemente a tal processo, procede-se à vedação das juntas entre a placa metálica em contato com as bordas da caixa metálica e os reservatórios de acrílico. O material utilizado é o selante a base de silicone de cura acética, cujas características de endurecimento e elasticidade permitem manter a vedação do mesmo quando submetido às deformações provenientes da aplicação das cargas.

Procede-se a montagem do sistema, com o posicionamento dos defletômetros de base magnética, distribuídos ao longo da placa metálica, seguido da colocação da célula de carga, conectada ao indicador de leituras dos carregamentos. O peso do conjunto placa metálica-célula de carga é equivalente a uma tensão de 2 kPa, necessária a um nivelamento inicial do corpo-de-prova.

O fluxo d'água inicial é então liberado, por meio do acionamento de uma válvula de registro, que permite o enchimento do reservatório suspenso, que por sua vez libera o fluxo por gravidade para enchimento dos reservatórios de acrílico, até a ocorrência de vazão pela válvula de descarga. Tal fluxo inicial é aplicado por um período mínimo de 15 min, para assegurar mais ainda a remoção de eventuais bolhas inclusas no corpo-de-prova.

Aplica-se o primeiro carregamento, acompanhando-se as leituras dos defletômetros em intervalos de 5 min. Conforme descrito no item 4.3.4, em geral o tempo de aplicação de cada estágio de carregamento corresponde a 1 h. Tal período de tempo foi o necessário para estabilização da variação da espessura da amostra. Em casos que a fluência ocorreu de forma mais expressiva, o tempo de aplicação da carga foi estendido, atingindo cerca de 1h30, para um determinado estágio de compressão.

A estabilização da compressão do corpo-de-prova foi o critério estabelecido para a realização das seguintes leituras:

- Volume de água (ml) para o tempo estabelecido em segundos, com duas repetições para obtenção da vazão média que atravessa o corpo-de-prova durante o estágio de carregamento;

- Leitura dos níveis de água nos piezômetros conectados à base do corpo-de-prova.

Eleva-se a tensão normal, repetindo-se os procedimentos descritos acima até se atingir a máxima tensão normal de ensaio. Durante o ensaio registra-se o valor da temperatura da água.

Para obtenção de resultados acurados, os parâmetros não devem variar durante o intervalo em que tais medidas são efetuadas. Sendo assim, é importante que as medidas de vazão e perda de carga sejam efetuadas sob condições de fluxo permanente, bem como a espessura do geotêxtil também seja medida após a estabilização da sua compressão.

4.4. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

4.4.1. TAXA DE FLUXO NO PLANO

A obtenção da taxa de fluxo no plano dos materiais foi realizada conforme o regime de fluxo encontrado.

- Os geotêxteis, por apresentarem regime de fluxo do tipo laminar, o cálculo da taxa de fluxo foi expresso pela aplicação da fórmula de transmissibilidade (Equação 4.1).
- Os demais materiais ensaiados sob condições de fluxo do tipo turbulento, tiveram a taxa de fluxo no plano obtida por unidade de largura (capacidade de descarga).

A Equação 4.1 relaciona a capacidade de descarga com a transmissibilidade.

$$\frac{Q}{W} = \theta \cdot \left(\frac{H}{L} \right) \quad (4.1)$$

onde:

Q = quantidade média de água que atravessa o corpo-de-prova por unidade de tempo (m³/s);

W = largura do corpo-de-prova (m);

θ = transmissibilidade hidráulica (m²/s);

H = diferença de carga hidráulica entre os piezômetros extremos (m), e;

L = comprimento do corpo-de-prova.

O valor de taxa de fluxo no plano para cada estágio de tensão resultou da média aritmética entre os três registros de vazão realizados após estabilização da compressão do corpo-de-prova. Tais valores foram corrigidos por meio de um fator de correção de temperatura (R_T), expresso pela Equação 4.2, a qual relaciona a viscosidade da água na temperatura do ensaio com a viscosidade da água a 20 °C (ASTM D5493, 1993).

$$R_T = \frac{\mu_t}{\mu_{20}} \quad (4.2)$$

onde:

μ_t = viscosidade da água na temperatura do ensaio;

μ_{20} = viscosidade da água a 20 °C.

4.4.2. VARIAÇÕES DE ESPESSURA

As médias aritméticas das leituras dos deflectômetros foram utilizadas para expressar a espessura do corpo-de-prova ao final de cada estágio de tensão, baseando-se na diferença entre as leituras antes e após a aplicação do carregamento.

Os registros provenientes dos deflectômetros ao longo do tempo são úteis na caracterização da compressão do material. No Capítulo 5 serão demonstradas graficamente as variações de espessura normalizadas, baseadas nas variações das leituras médias dos deflectômetros. A Equação. 4.3 foi utilizada para o cálculo da espessura normalizada do geossintético. Tal artifício permite uniformização das variações de espessura de modo a realizar comparações das compressões de diferentes materiais.

$$|e| = \frac{t_{Gn}}{t_{G0}} = \frac{t_{G(n-1)} - \left[\frac{(L1_{(n-1)} - L1_{(n)}) + (L2_{(n-1)} - L2_{(n)}) + (L3_{(n-1)} - L3_{(n)})}{3} \right]}{t_{G0}} \quad (4.3)$$

onde:

$|e|$ = espessura normalizada;

t_{Gn} = espessura no tempo n ;

t_{G0} = espessura nominal do corpo-prova;

$t_{G(n-1)}$ = espessura no tempo $(n-1)$;

$L1_{(n)}$, $L2_{(n)}$ e $L3_{(n)}$ = leituras dos defletômetros no tempo n ;

$L1_{(n-1)}$, $L2_{(n-1)}$ e $L3_{(n-1)}$ = leituras dos defletômetros no tempo $(n-1)$.

4.4.3. VARIAÇÕES DE CARGA HIDRÁULICA

As leituras registradas dos piezômetros conectados a base do equipamento apresentam variações com relação aos diferentes materiais ensaiados. Portanto, para haver uma uniformização das mesmas, permitindo comparações das cargas hidráulicas ao longo dos corpos-de-prova dos diferentes materiais, será demonstrada no Capítulo 5, referente à análise de resultados, a variação relativa entre cargas hidráulicas ao longo dos piezômetros (Equação 4.4) em função do comprimento do CP.

$$\Delta h_{rel} = \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{total}} \quad (4.4)$$

onde:

Δh_i = diferença de carga hidráulica no piezômetro localizado a uma distância x e o piezômetro conectado ao reservatório entrada de fluxo;

Δh_{total} = variação entre a carga hidráulica de entrada e a carga hidráulica de saída no sistema.

Capítulo 5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Serão apresentados nesse capítulo os resultados dos ensaios de transmissibilidade de todos os materiais empregados na pesquisa. Inicialmente serão abordados os geotêxteis não-tecidos, para efeito comparativo com os resultados obtidos por Gardoni (2000), permitindo assim, uma avaliação de efeito escala, bem como uma validação inicial dos dados para as condições de contorno adotadas. Posteriormente serão analisados os resultados dos seguintes materiais: georredes; geocompostos resultantes da combinação de geotêxteis não-tecidos com georredes de polietileno; geocompostos com núcleo formado por geoespaçadores; geocompostos com núcleo de georrede com filamentos de polipropileno; e geocompostos formados por materiais de núcleo alternativos.

A partir do ensaio de transmissibilidade obtiveram-se diversas correlações que permitem avaliar as propriedades e o desempenho dos materiais empregados frente às condições de contorno adotadas. Será ilustrada, por meio de gráficos a variação da transmissibilidade hidráulica em função da tensão normal de compressão aplicada. Segundo Williams *et al.* (1984) quando o regime de fluxo ocorrido no plano dos geossintéticos é do tipo turbulento, o que não permite a aplicação da Lei de Darcy, é comum expressar a variação da capacidade de descarga em função da tensão normal de compressão aplicada.

A compressão dos materiais é um parâmetro fundamental na caracterização do comportamento dos mesmos, em virtude da influência da variação da espessura na transmissibilidade. Dessa forma, serão mostradas graficamente as variações de espessura normalizadas, conforme procedimento descrito no item 4.4.1, em função do tempo, ao longo da realização do ensaio de transmissibilidade. Para os materiais que utilizaram espuma emborrachada em contato com a interface superior, tais como os geocompostos, foi realizada a aplicação da compressão nos corpos-de-prova sem a presença do fluxo d'água, nem tampouco da espuma emborrachada. Visualizando de maneira mais precisa a variação de espessura normalizada ao longo do tempo.

Gráficos adicionais também permitem visualizar as espessuras dos materiais ao final de cada estágio de carregamento, relacionadas à respectiva tensão normal aplicada.

Outros dados a serem analisados são as perdas de carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova, baseadas nas leituras dos níveis d'água dos piezômetros interligados à base do equipamento. Os resultados encontrados nos gráficos possuem valores de variações relativas destas leituras, para efeito comparativo entre os diferentes tipos de materiais. Tal artifício foi utilizado pelo fato de que diversos tipos de materiais impõem diferentes características de fluxo ao longo do plano, implicando em variações de carga hidráulica ao longo do comprimento dos mesmos. Tais gráficos permitem visualizar a perda de carga hidráulica para as tensões impostas durante a realização do ensaio de transmissibilidade hidráulica.

Os registros de taxa de fluxo no plano dos materiais, bem como das variações de carga hidráulica ao longo do comprimento dos corpos-de-prova, foram realizados após a constatação da estabilização da compressão dos CP's, ocorrida geralmente após 1 hora do início da aplicação da carga.

5.2. ENSAIOS COM GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis apresentaram comportamentos semelhantes com relação à tendência de variação da transmissibilidade hidráulica para cada estágio de carregamento. A Figura 5.1 ilustra os três tipos de geotêxteis ensaiados, indicando a diminuição da permeabilidade no plano com a aplicação da tensão de compressão.

Comparando-se os resultados obtidos para os geotêxteis não-tecidos na Figura 5.1 é verificado que geotêxteis de maiores gramaturas tendem a apresentar uma maior permeabilidade ao longo do plano. Portanto, o geotêxtil G3, oferece maiores permeabilidades ao longo do plano, durante a aplicação das tensões normais de compressão. O geotêxtil G2 apresenta um comportamento com características aproximadas em relação ao G3, sendo observada uma maior diferenciação do geotêxtil G1 em relação aos demais, em virtude das características de fabricação e das diferenças na microestrutura deste geotêxtil, cuja gramatura apresenta consideráveis variações ao longo de uma amostra, o que provoca dispersões nos dados de transmissibilidade obtidos. Tais resultados estão de acordo com os valores de

transmissibilidade obtidos por Gardoni (2000), sob tais condições de gradiente hidráulico e tensões normais.

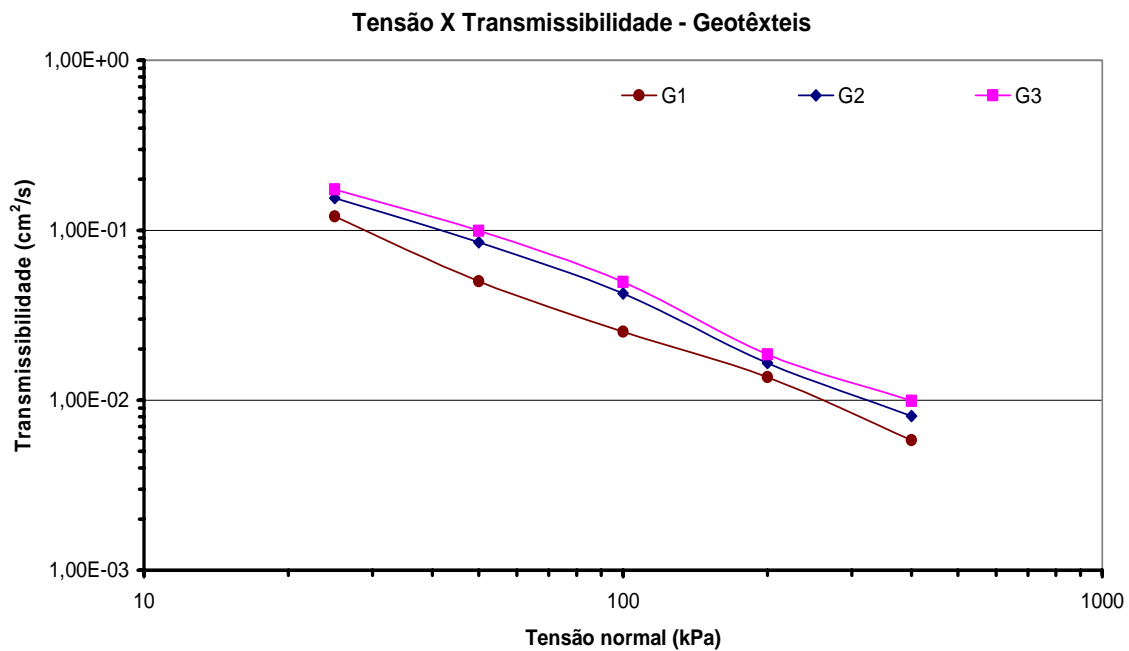


Figura 5.1 – Variação da transmissibilidade em função da tensão normal para os geotêxteis G1, G2 e G3.

A Figura 5.2 mostra a compressão dos geotêxteis ensaiados, indicando a variação de espessura normalizada ao longo do tempo. Observa-se que para o carregamento inicial de 25 kPa, os geotêxteis G2 e G3 sofrem maiores influências na variação da espessura. Entretanto, acima deste valor de tensão, é constatado que geotêxteis de maior gramatura possuem uma menor compressão ao longo do tempo e durante as transições de carregamentos. Uma considerável variação da espessura do geotêxtil G1 é verificada durante a transição dos carregamentos de 25 a 50 kPa. Ou seja, a partir desse nível de tensão, o geotêxtil G1 apresenta variações de espessura normalizadas semelhantes ao geotêxtil G2. Durante a aplicação de tensão normal, a compressão do corpo-de-prova é mais pronunciada para os primeiros minutos do carregamento, seguida da compressão por fluência, tendendo-se a estabilização após 1 hora de aplicação de carga. Após estabilização da compressão do corpo-de-prova, foram realizadas, para cada carregamento, as leituras de vazão e da carga hidráulica nos piezômetros.

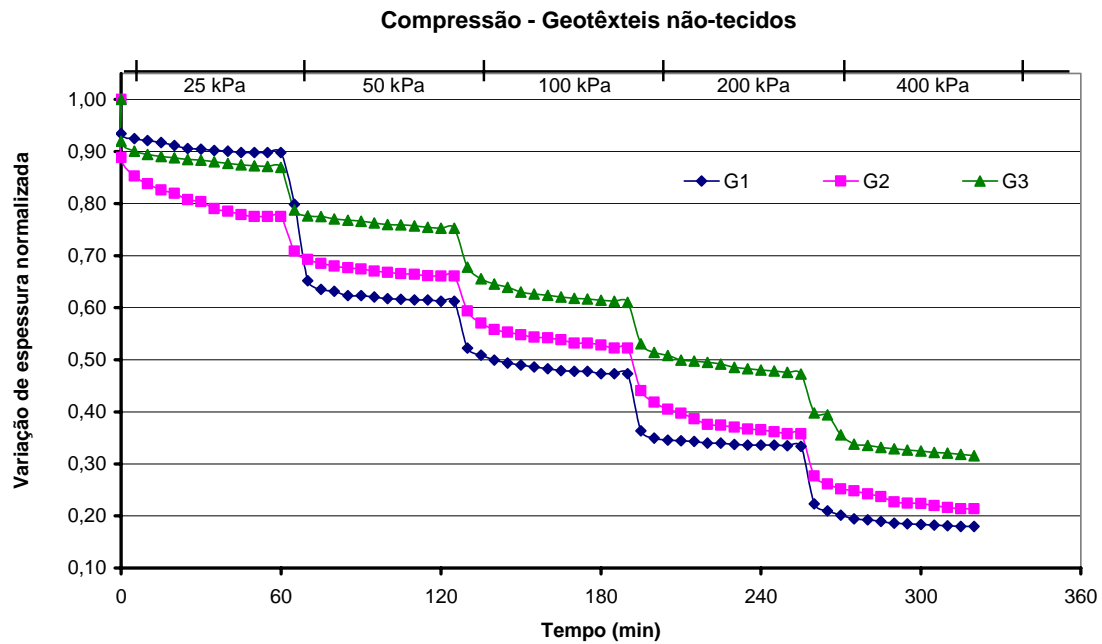


Figura 5.2 – Compressão dos geotêxteis G1, G2 e G3.

As Figuras 5.3 a 5.5 permite verificar as variações de espessura dos corpos-de-prova e as variações de vazão por unidade de largura com o acréscimo da tensão vertical. É observado que os maiores decréscimos de espessura para os geotêxteis ocorre para carregamentos abaixo de 200 kPa. A partir desse nível de tensão existe uma menor quantidade de vazios interconectados na estrutura fibrosa do geotêxtil, caracterizando um estado “adensado” do material. Para todos os geotêxteis, constata-se uma tendência a diminuição da vazão com o aumento da tensão normal de compressão. Maiores valores de vazão são registrados pra geotêxteis com maior gramatura.

Os resultados obtidos por Gardoni (2000) apresentam dispersões dos valores de espessura para um determinado nível de carregamento. Entretanto, os valores médios aproximam-se dos obtidos nesta pesquisa. Deve-se levar em consideração a diferença de escala dos corpos-de-prova entre os ensaios realizados por Gardoni (2000) e os da presente pesquisa, nos quais se utilizou CP's de dimensões 30 cm x 30 cm, enquanto que os utilizados por aquela possuíam dimensões 10 cm x 10 cm. O fator escala pode ser preponderante para obtenção de resultados mais realistas.

Variações de espessura e vazão - G1

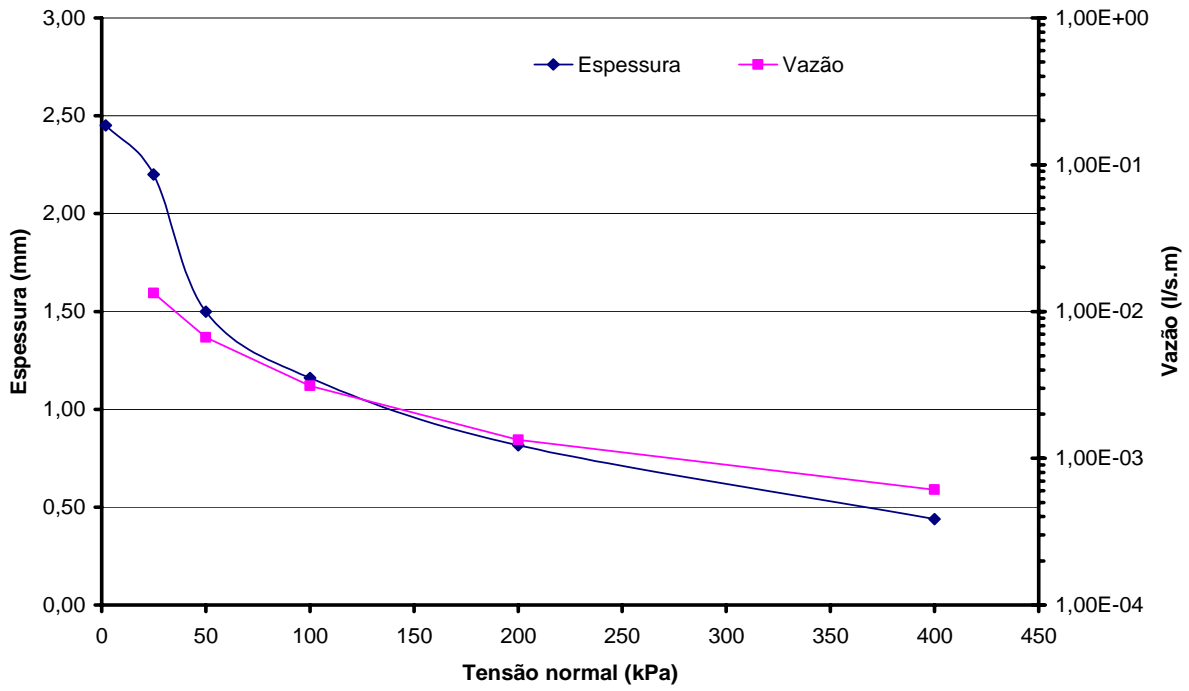


Figura 5.3 – Relação entre a espessura do geotêxtil G1 e tensão normal.

Variações de espessura e vazão - G2

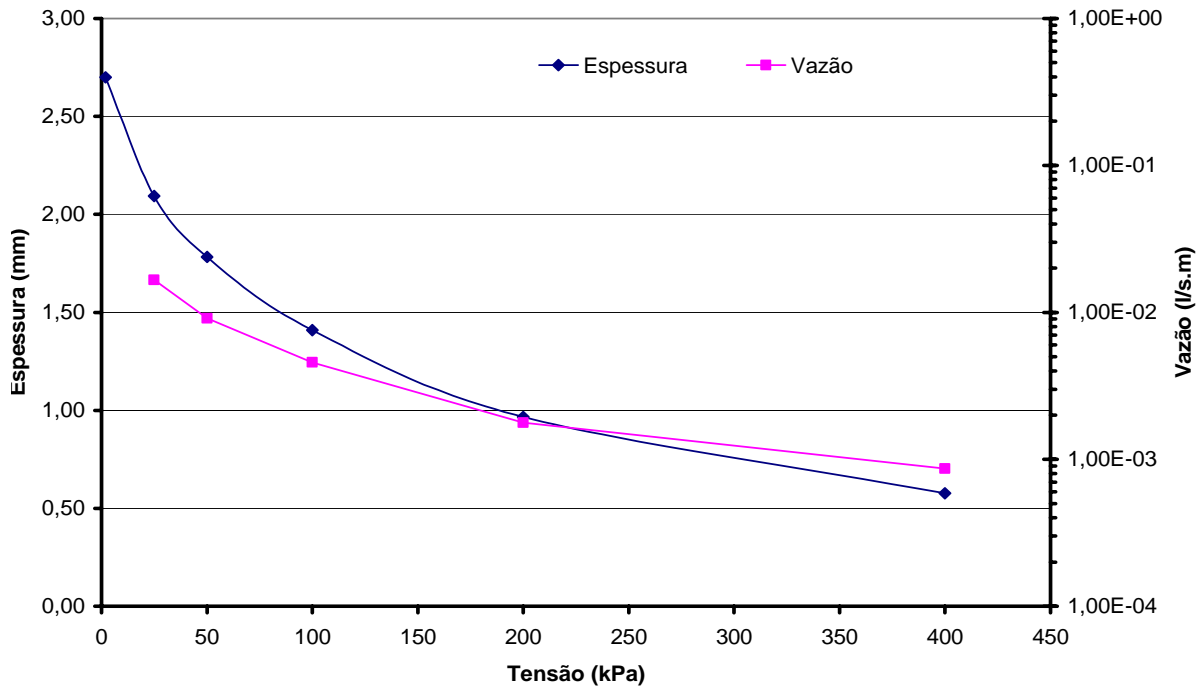


Figura 5.4 – Relação entre a espessura do geotêxtil G2 e tensão normal.

Variações de espessura e vazão - G3

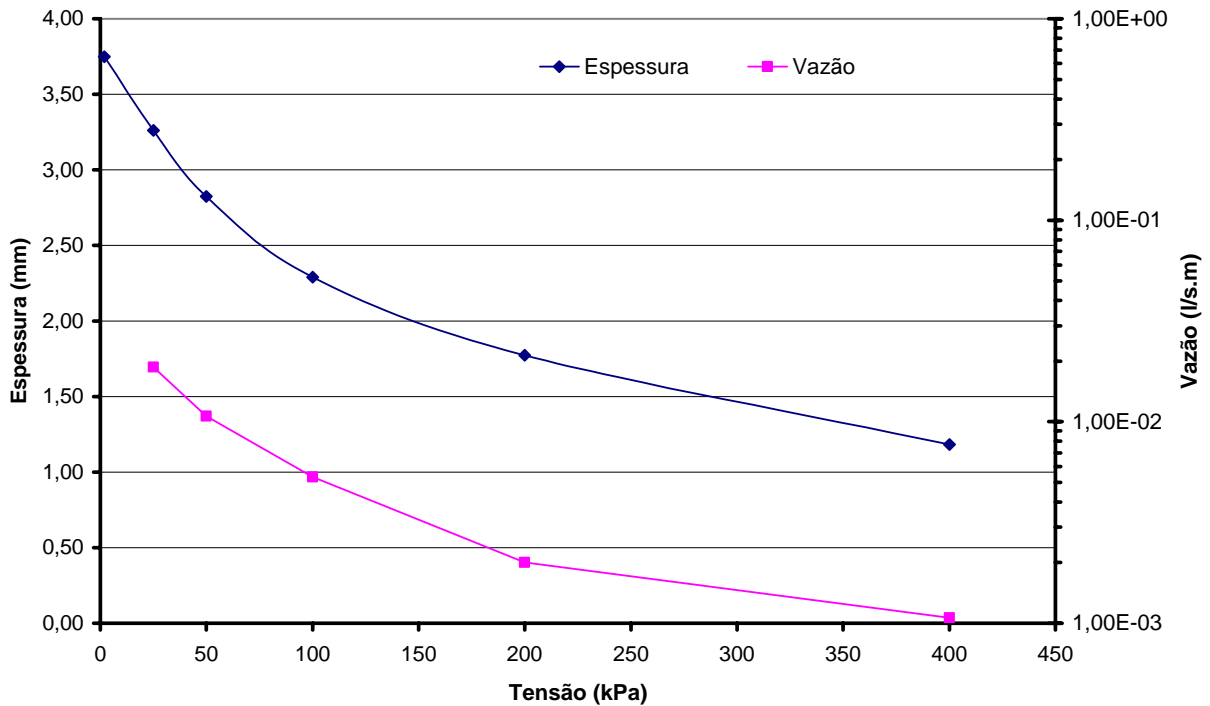


Figura 5.5 – Relação entre a espessura do geotêxtil G3 e tensão normal.

As perdas de carga hidráulica ao longo dos CP's normalizadas em relação à perda de carga máxima (perda de carga entre os extremos do CP) estão mostradas na Figuras 5.6 a 5.8. Nestas figuras são também apresentados os valores de gradiente hidráulico (i) usados. Por meio destas pode-se observar primeiramente que quanto menor a gramatura, maior a desuniformidade das cargas hidráulicas ao longo da amostra. Isso pode ser atribuído à não uniformidade de gramatura em geotêxteis mais leves, como comentado anteriormente. As curvas obtidas para cada carregamento indicam que as perdas de carga hidráulica registradas entre os piezômetros são mais acentuadas para maiores acréscimos de tensão normal.

Para baixos níveis de tensão normal, sob gradiente hidráulico mantido constante, o geotêxtil G1 (Figura 5.6) tende a apresentar variações de cargas hidráulicas ao longo do CP semelhantes. Tal comportamento é afetado pelo acréscimo da tensão normal, na qual implica em maiores variações devido as alterações da estrutura dos geotêxteis e efeitos da acomodação da placa metálica sobre o corpo-de-prova. Para os geotêxteis de maior gramatura observou-se uma maior uniformidade na variação de carga hidráulica ao longo do plano.

Variações relativas de carga hidráulica - G1

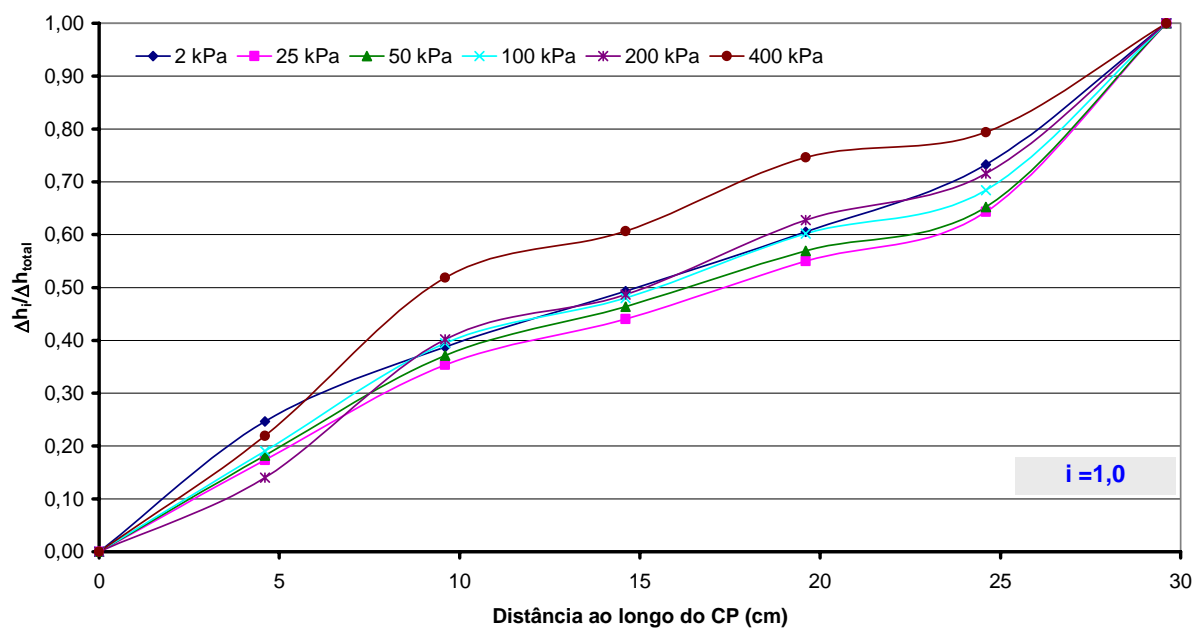


Figura 5.6 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geotêxtil G1.

Variações relativas de carga hidráulica - G2

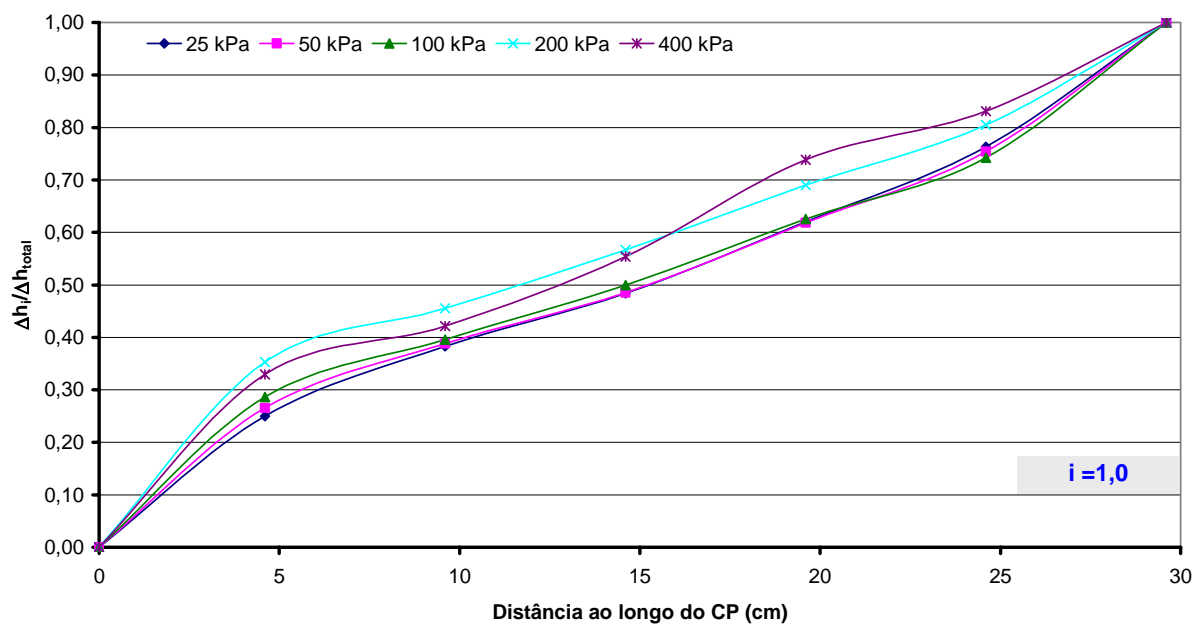


Figura 5.7 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geotêxtil G2.

Variações relativas de carga hidráulica - G3

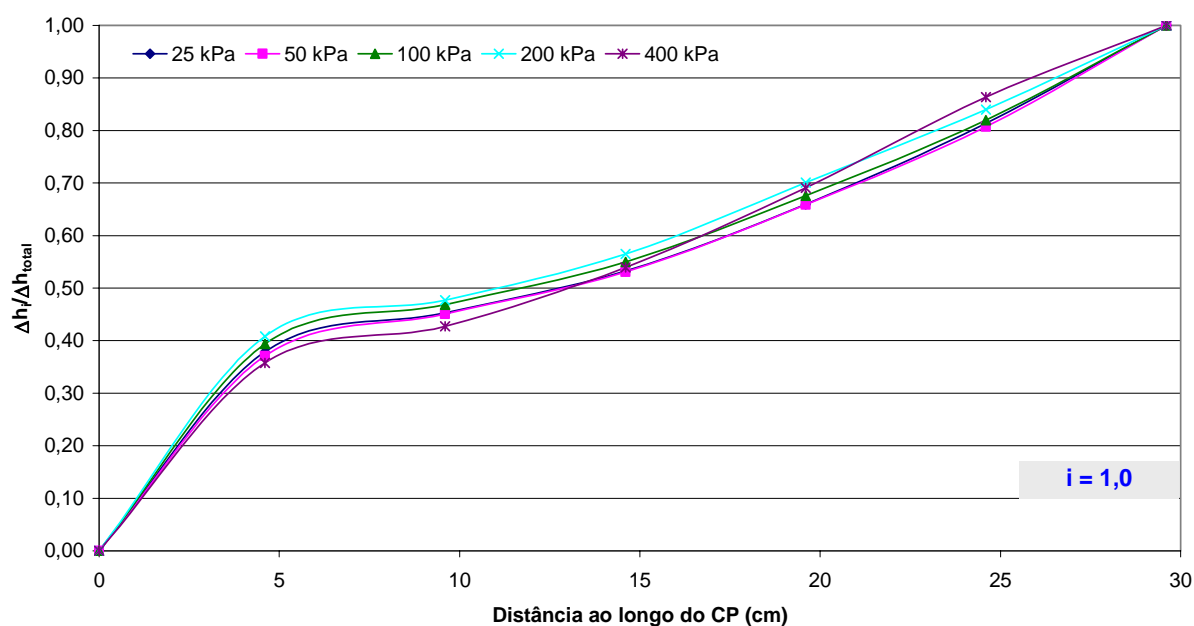


Figura 5.8 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geotêxtil G3.

5.3. ENSAIOS COM GEORREDES

Os resultados aqui descritos são os obtidos para as georredes GN1 e GN2, cujos corpos-de-prova foram dispostos no sentido longitudinal, ou seja, de acordo com a direção de fabricação. Como condição de contorno, tem-se a sobreposição de espuma emborrachada na face superior destes CP's como forma de simular, de alguma maneira, uma possível interpenetração de camada sobrejacente nos vazios da georrede, o que pode ocorrer no campo.

De acordo com a Figura 5.9, é observada uma tendência da diminuição de taxa de fluxo no plano das georredes com o acréscimo de tensão vertical. Esta tendência é mais pronunciada para a georrede GN1, mostrando que o volume dos poros disponível sob tensão é condicionante no valor da capacidade de descarga.

Outro fator importante é a consideração da intrusão da espuma, posicionada na interface superior, nos vazios da georrede. Sua influência na diminuição da capacidade de descarga é mais pronunciada para elevadas tensões verticais.

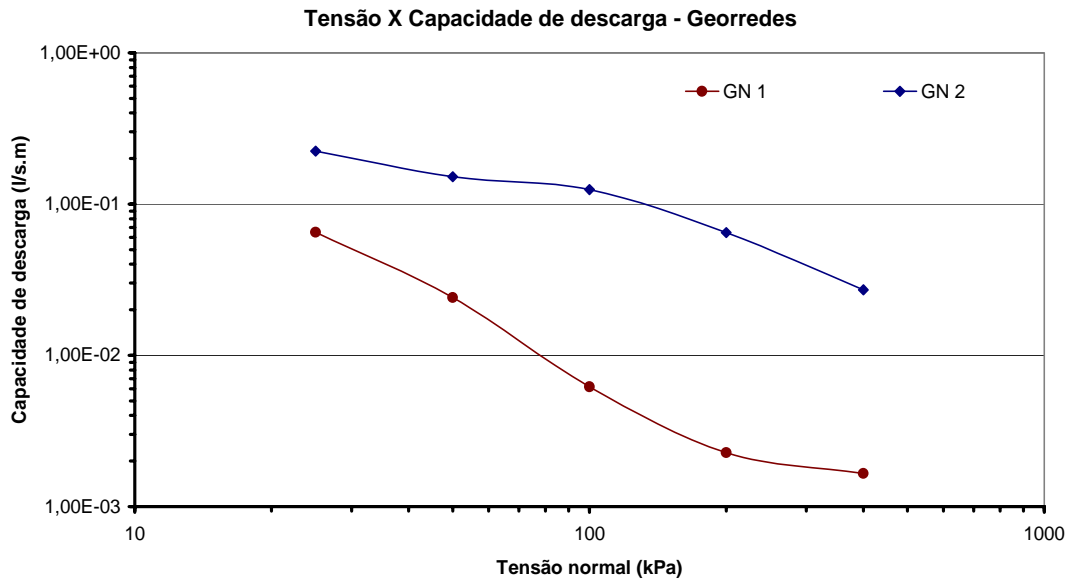


Figura 5.9 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para as georredes GN1 e GN2.

A Figura 5.10 relaciona a compressão (variação percentual da espessura no decorrer do tempo) com as tensões normais aplicadas sem a utilização da espuma emborrachada na interface superior do corpo-de-prova. É observada uma maior compressão para a georrede GN1, a qual apresenta uma maior compressão nas transições dos carregamentos e uma maior variação da espessura durante o estágio de aplicação da tensão vertical. Portanto, a gramatura e a espessura são propriedades que influenciam diretamente na compressão desses materiais.

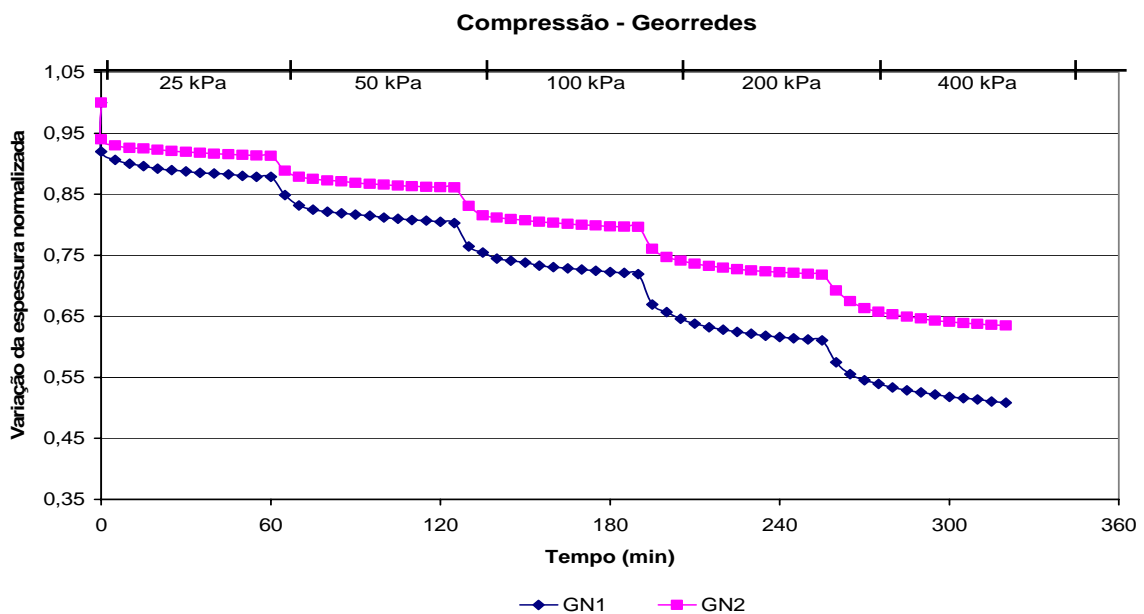


Figura 5.10 – Compressão das georredes GN1 e GN2.

O início dos estágios de carregamento é caracterizado por menores variações de espessura, sendo estas progressivamente aumentadas ao longo do tempo, com a compressão por fluência da georrede. A partir de 200 kPa, a compressão por fluência é mais evidenciada, implicando em maiores variações de espessura a partir de tais carregamentos.

A relação entre a variação da espessura das georredes GN1 e GN2 com o aumento da tensão normal é mostrada nas Figuras 5.11 e 5.12. Para tensões abaixo de 200 kPa, é verificado que ocorre uma maior variação da espessura ao longo da aplicação do carregamento.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam as variações de carga hidráulica ao longo das georredes GN1 e GN2, para cada estágio de tensão normal. É perceptível o aumento da variação da carga hidráulica ao longo do CP, com o acréscimo da tensão normal. Para a georrede GN1, é verificada uma variação mais pronunciada para as tensões de 200 e 400 kPa, para as quais se verifica uma maior intrusão da espuma emborrachada nos poros da georrede. A georrede GN2 apresenta tais perdas de forma menos pronunciada para os carregamentos abaixo de 200 kPa.

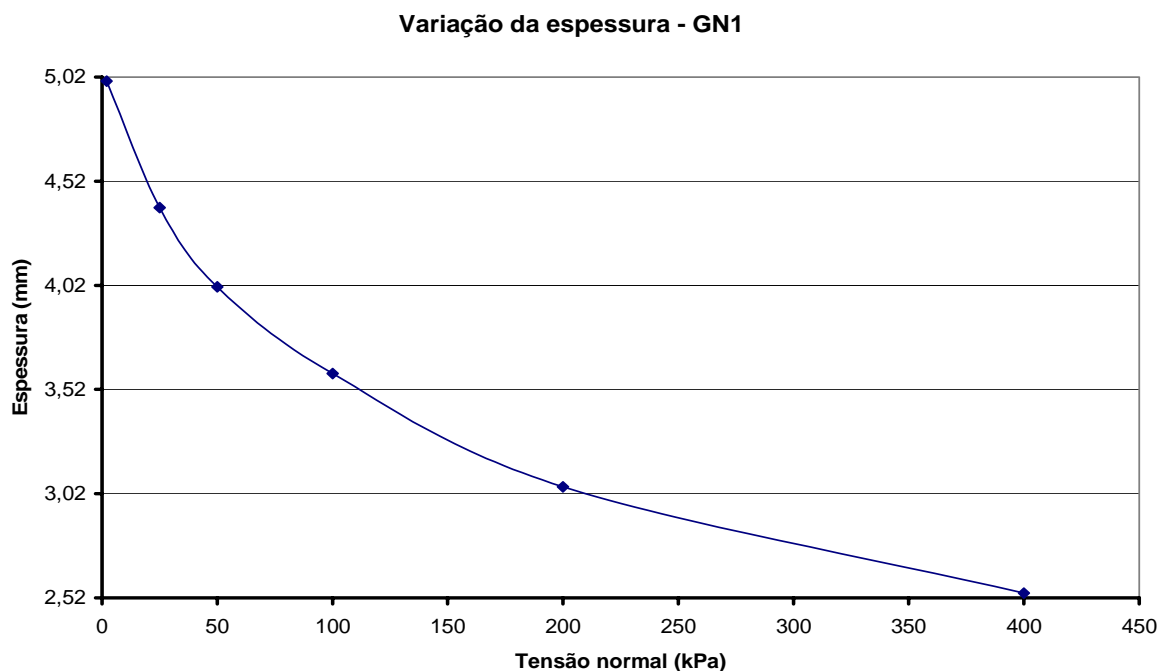


Figura 5.11 – Relação entre a espessura da georrede GN1 e o acréscimo da tensão normal.

Variação da espessura - GN2

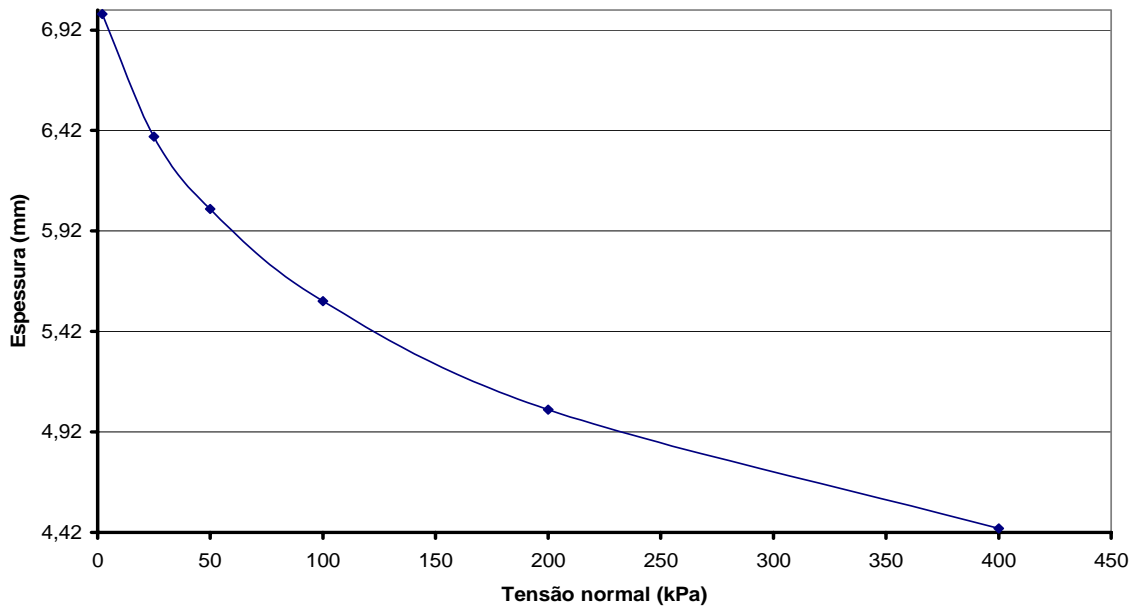


Figura 5.12 – Relação entre a espessura da georrede GN2 e o acréscimo da tensão normal.

A partir das Figuras 5.13 e 5.14 constata-se maiores variações de carga hidráulica relativa para os maiores níveis de tensão normal (200 e 400 kPa). A não linearidade da variação da carga hidráulica ao longo do comprimento do corpo de provas, particularmente para maiores valores de tensões normais, pode indicar colapsos localizados da estrutura da georrede.

Variações relativas de carga hidráulica - GN1

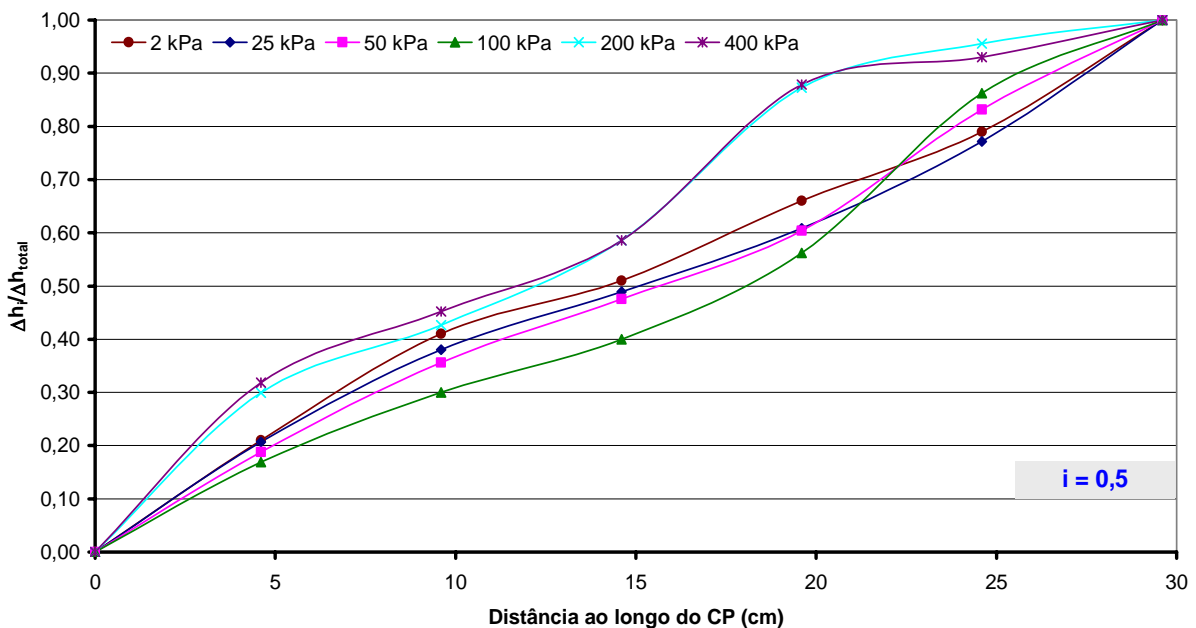


Figura 5.13 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova da georrede GN1.

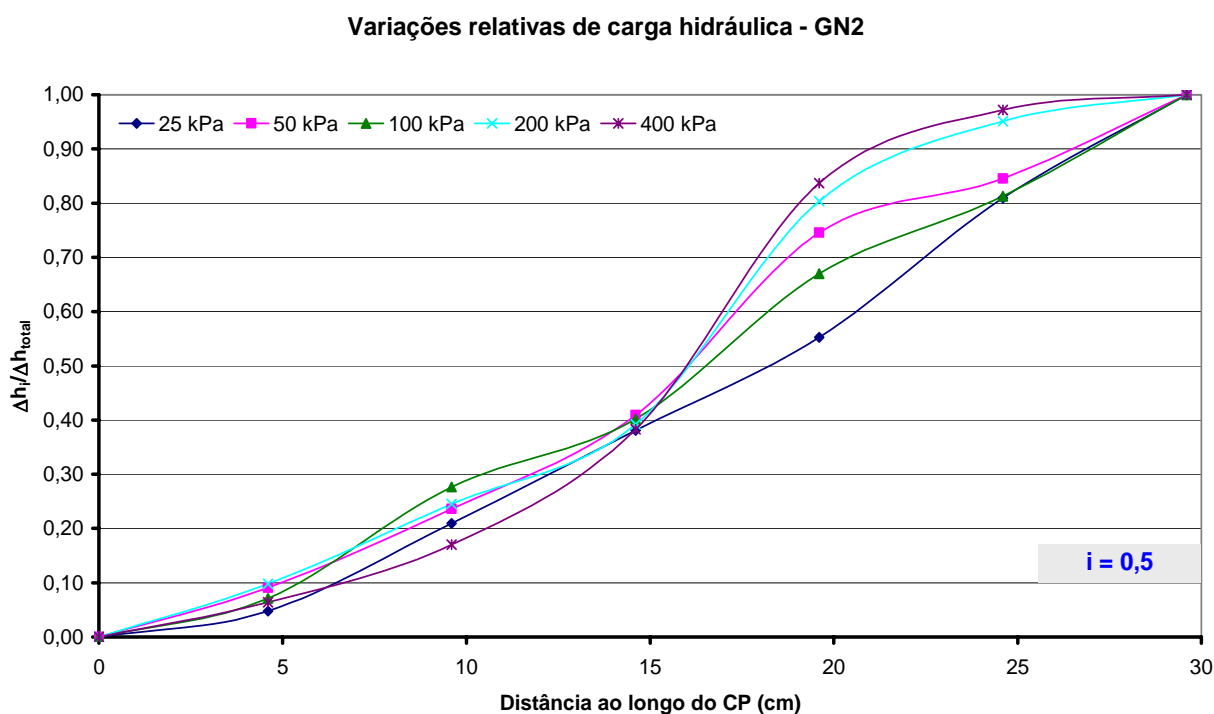


Figura 5.14 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova da georrede GN2.

5.4. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTOS COM NÚCLEO DE GEORREDE

Os ensaios de transmissibilidade dos geocompostos formados pela combinação de geotêxteis não-tecidos e georredes de polietileno demonstraram uma tendência da diminuição da capacidade de descarga com o acréscimo de tensão normal (Figura 5.15), como era de se esperar. Ao se comparar com o gráfico da Figura 5.9, que mostra o comportamento das georredes, é verificada que a adição dos geotêxteis, atuantes como elemento filtrante envolvendo a georrede, implica em maiores valores de capacidade de descarga e menores variações deste parâmetro particularmente para tensões acima de 100 kPa. Isso se deve ao fato de que as georredes utilizadas de forma isolada permitem uma maior intrusão dos materiais adjacentes em sua estrutura de poros, diminuindo de maneira mais acentuada a sua capacidade de descarga.

A diferenciação entre os resultados dos geocompostos na Figura 5.15 deve ser atribuída ao núcleo drenante, cujas características influenciam diretamente o comportamento drenante do geocomposto. Desta forma, o geocomposto DGC2, por possuir o núcleo com georrede de maior espessura, resultou em maiores valores de capacidade de descarga.

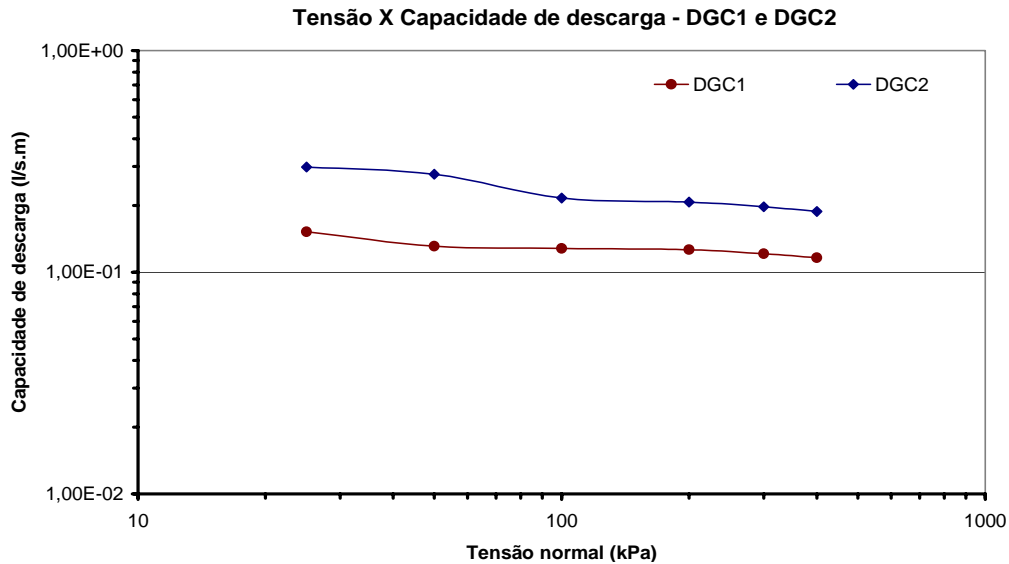


Figura 5.15 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para os geocompostos drenantes DGC1 e DGC2.

O gráfico da Figura 5.16 permite caracterizar a compressão dos geocompostos DGC1 e DGC2, em ensaios de transmissibilidade em que não se utilizou espuma emborrachada como material de contorno. Deve ser observado que ambos os geocompostos apresentam valores próximos de compressão para tensões abaixo de 100 kPa, e pouca variação de espessura na transição dos estágios de carregamento. A partir de 100 kPa, o geocomposto DGC2 se mostra menos compressível.

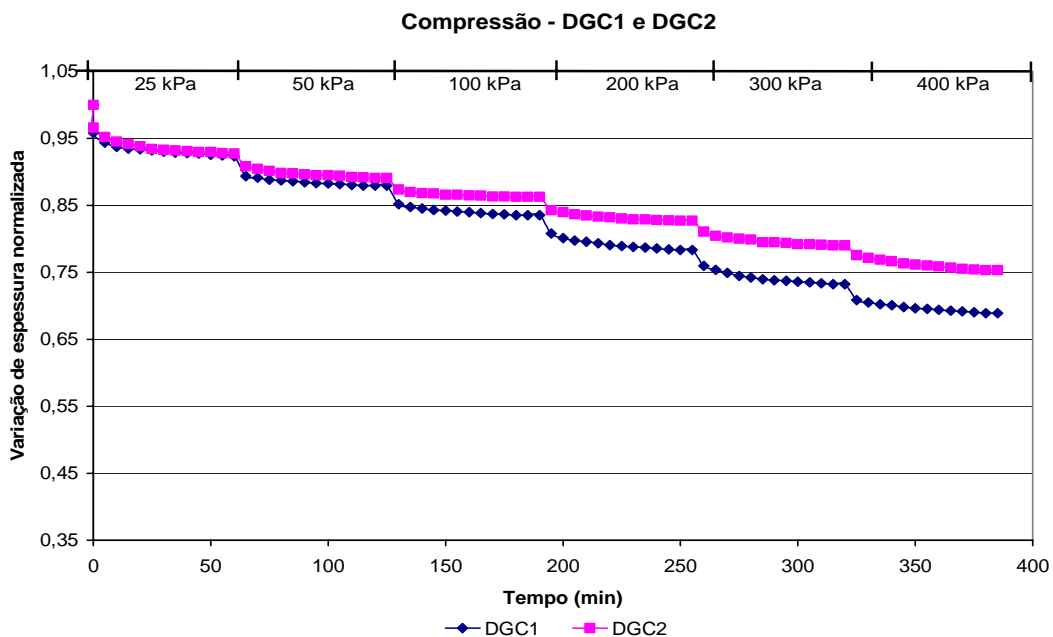


Figura 5.16 – Compressão dos geocompostos DGC1 e DGC2.

As variações de espessura com a tensão normal dos geocompostos DGC1 e DGC2, representadas nas Figuras 5.17 e 5.18, indicam um comportamento semelhante entre ambos os materiais. Comparando-se com as Figuras 5.11 e 5.12 verifica-se que os geocompostos apresentam maiores taxas de variações das espessuras inicial e final em relação às georredes.

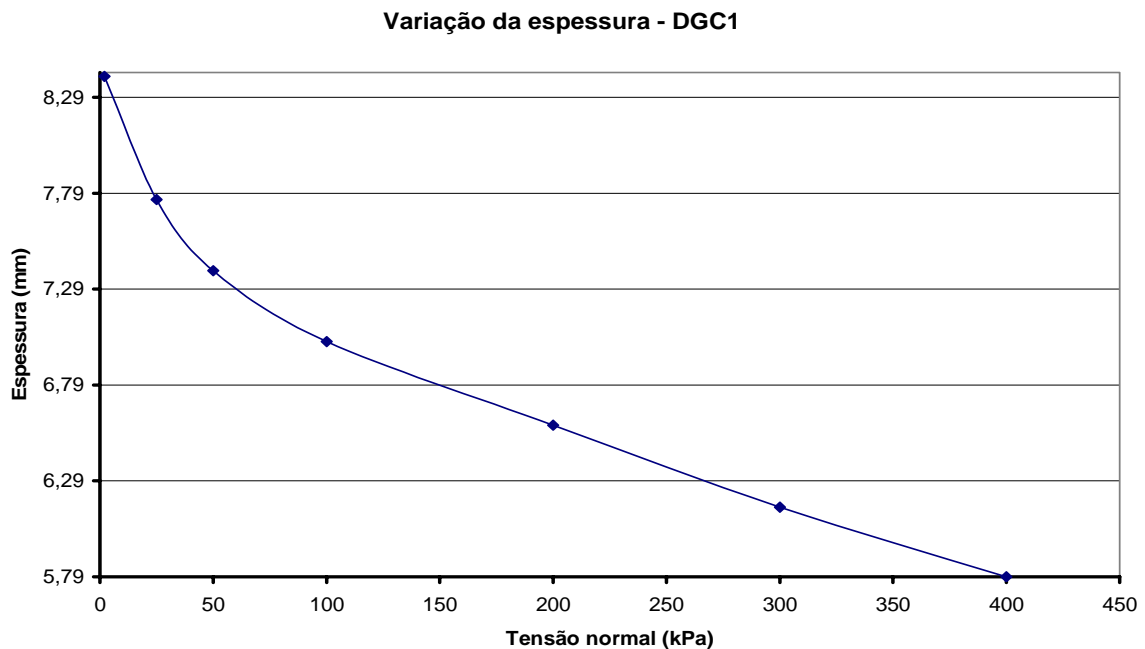


Figura 5.17 – Relação entre a espessura do geocomposto DGC1 e o acréscimo da tensão normal.

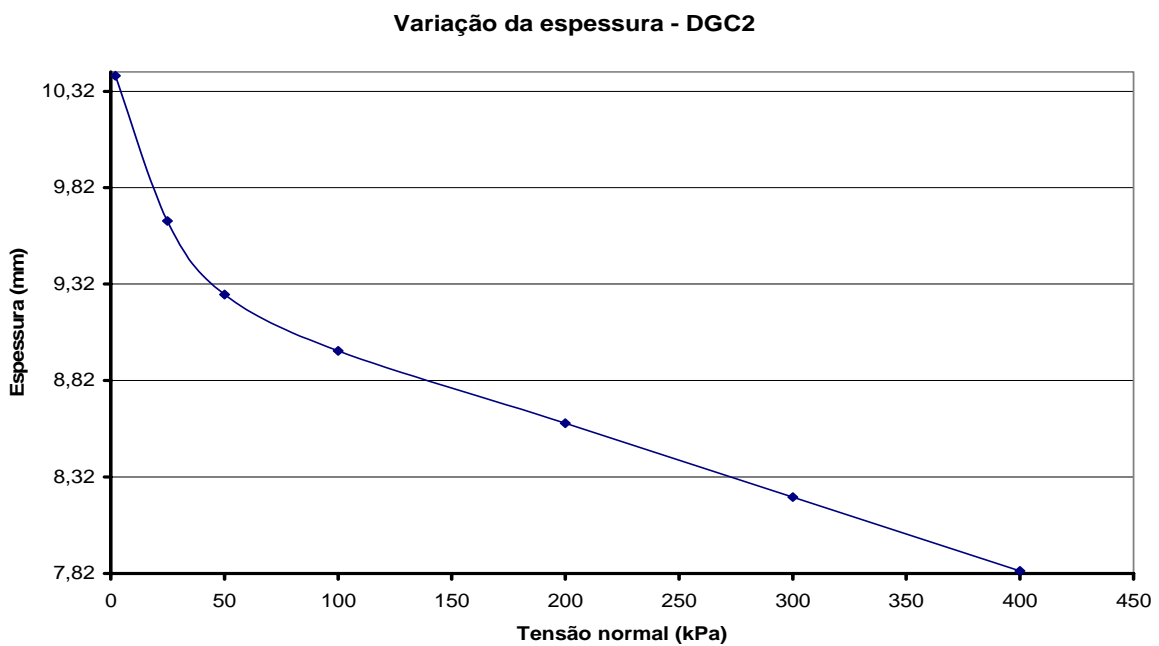


Figura 5.18 – Relação entre a espessura do geocomposto DGC2 e o acréscimo da tensão normal.

As Figuras 5.19 e 5.20 apresentam as perdas de carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova para diversos estágios de tensão normal. São notáveis maiores das variações proporcionais ao incremento de tensões normais. O DGC1 (Figura 5.19) apresentou uma maior dispersão entre as variações de carga hidráulica, em virtude de uma maior alteração em sua estrutura, devido a compressão e a intrusão do geotêxtil de cobertura. O DGC2 (Figura 5.20) mostra uma variação mais uniforme das perdas de cargas no CP, sendo verificada uma alteração mais pronunciada na transição entre o carregamento inicial e os posteriores. A resistência da georrede, constituinte do núcleo drenante, constitui um fator preponderante na tendência a menores deformações de sua estrutura, o que acarreta a manutenção da uniformidade do material implicando em menores variações das perdas de carga hidráulica ao longo do comprimento do mesmo.

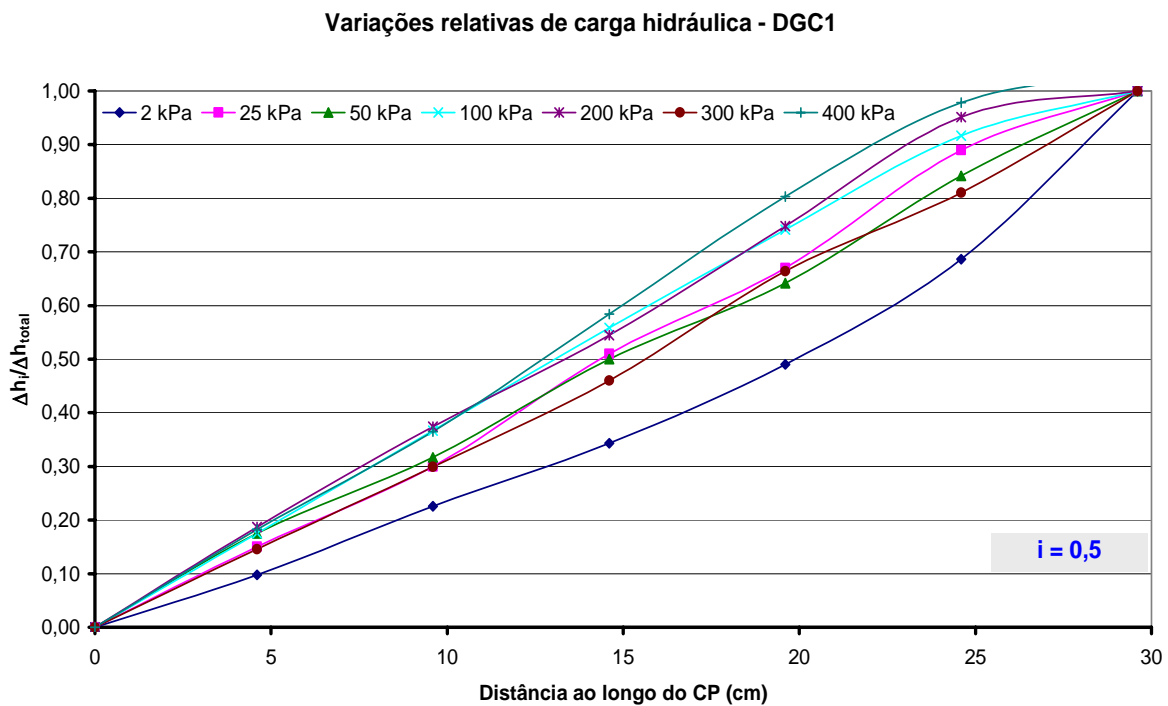


Figura 5.19 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC1.

Variações relativas de carga hidráulica - DGC2

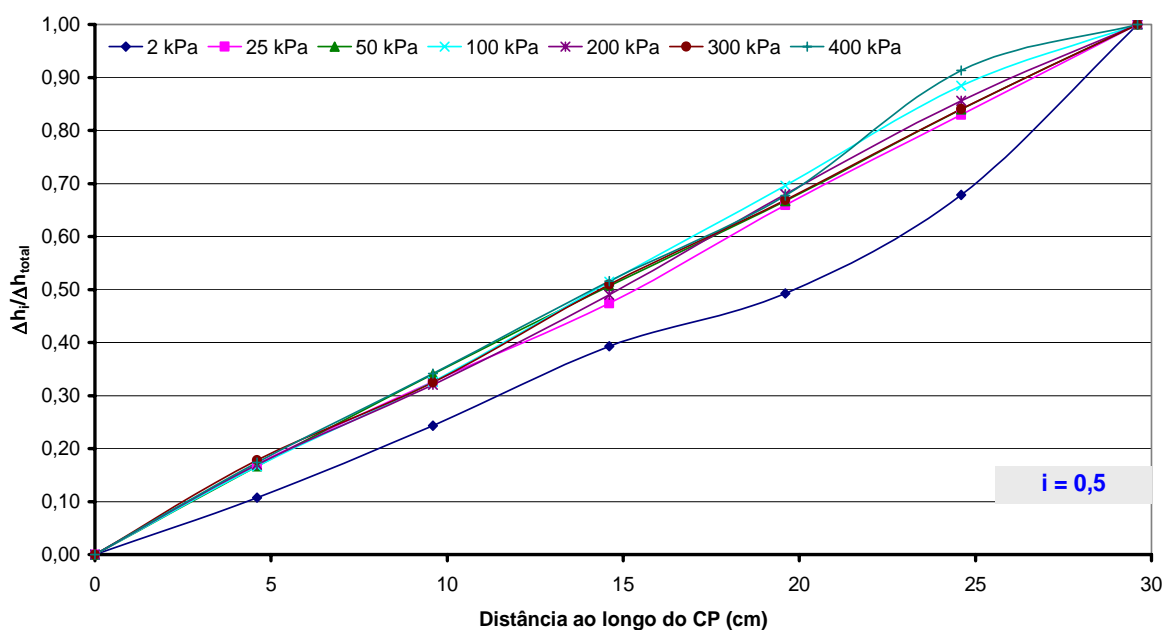


Figura 5.20 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC2.

5.5. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTOS COM NÚCLEO DE GEOESPAÇADOR

O geocomposto cujo núcleo é formado por um geoespaçador apresenta diversas particularidades com respeito ao seu comportamento drenante em relação aos demais tipos de geocompostos. A Figura 5.21 ilustra o comportamento hidráulico do geoespaçador, o qual apresenta poucas variações de sua capacidade de descarga para tensões abaixo de 200 kPa. A partir desta, ocorre uma diminuição acentuada da taxa de fluxo que atravessa o plano do geocomposto, conseqüência da ocorrência de maiores variações de espessura durante os primeiros minutos de aplicação da tensão de compressão de 400 kPa (Figura 5.22). Tal efeito pode ser também constatado pela Figura 5.23, observando-se a compressão do corpo-de-prova, sem o posicionamento da espuma sobre o CP, verificando uma variação de espessura em torno de 45%.

Os resultados obtidos mostram que o geocomposto DGC3 apresenta compressão por fluência de forma mais acentuada para as tensões normais de 50 e 200 kPa, cuja estabilização da variação da espessura ocorreu por volta de 1 h e meia após o início de aplicação do carregamento. O início da aplicação da tensão normal de 400 kPa é caracterizado por elevadas

variações de espessura durante os primeiros minutos, sendo a compressão do corpo-de-prova estabilizada em seguida, sem compressões significativas por fluência.

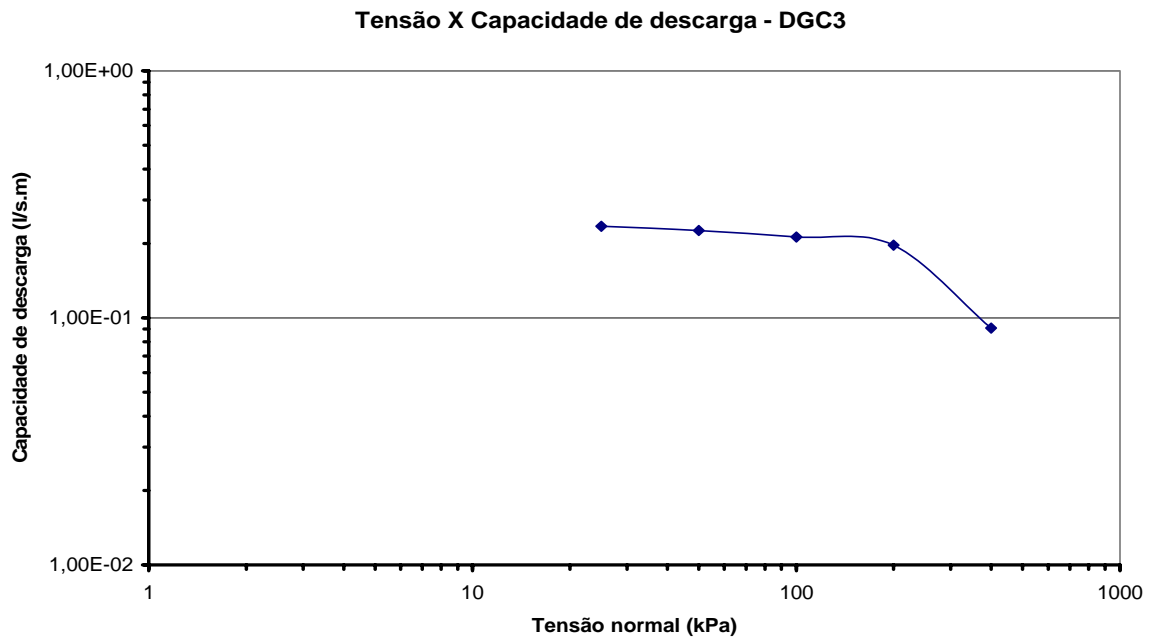


Figura 5.21 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para o geocomposto DGC3.

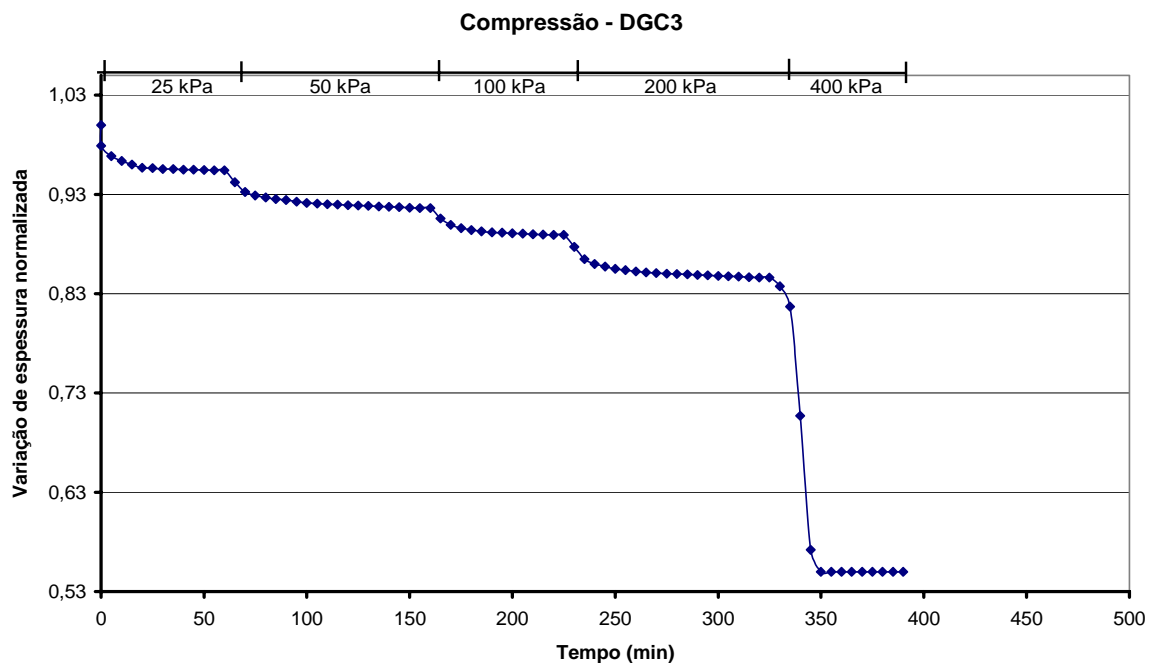


Figura 5.22 – Compressão do geocomposto DGC3.

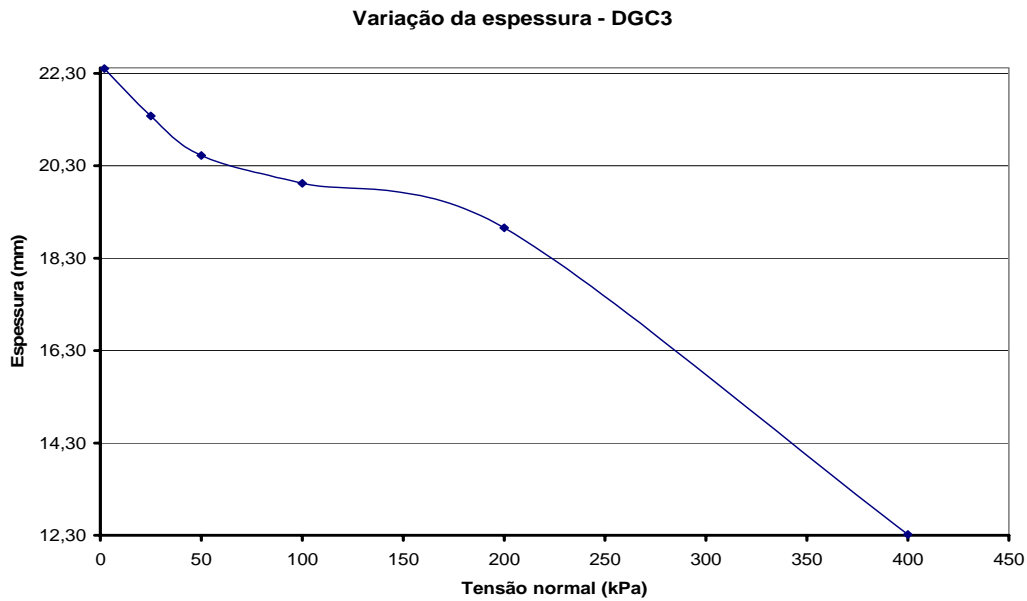


Figura 5.23 – Relação entre espessura do geocomposto DGC3 e o acréscimo de tensão normal.

Analisando-se as perdas de carga hidráulica ao longo do CP do geocomposto DGC3 (Figura 5.24) notam-se variações mais pronunciadas para as tensões normais de 50 e 200 kPa, em virtude da elevada alteração na estrutura do núcleo drenante devido a compressão provocada pelos carregamentos. Deve-se salientar que tal geocomposto não possui camada inferior de geotêxtil não-tecido, implicando em maiores diferenças de cargas hidráulicas em relação aos demais materiais.

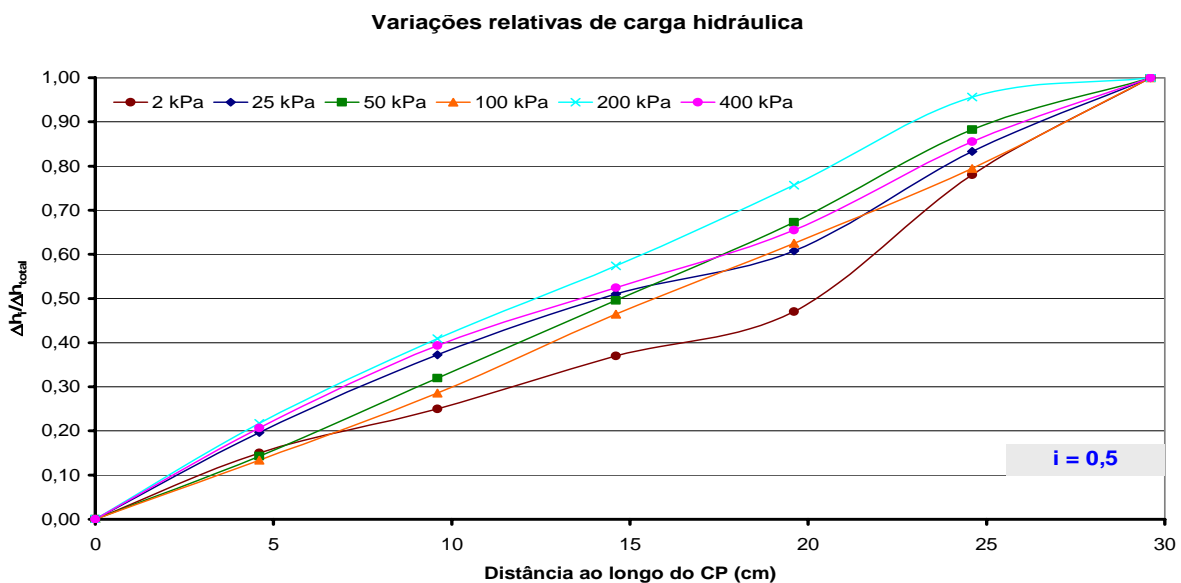


Figura 5.24 – Variação de carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC3.

5.6. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTO COM NÚCLEO DE GEORREDE DE FILAMENTOS DE POLIPROPILENO

A Figura 5.25 ilustra a variação da transmissibilidade hidráulica do geocomposto cujo núcleo drenante é constituído por georredes de filamentos de polipropileno (DGC4). A taxa de diminuição da capacidade de descarga com o acréscimo de tensão é mais pronunciada em relação aos geocompostos citados anteriormente. Tal fato está associado a uma maior compressão e susceptibilidade à fluência durante os carregamentos (Figura 5.26).

A compressão do geocomposto DGC4 ocorre de maneira mais intensa para os carregamentos abaixo de 200 kPa, verificando-se a estabilização da espessura após 1h30, particularmente para tensões de 25 e 50 kPa. Durante os dois últimos estágios de carregamento, ocorre um maior confinamento do núcleo, diminuindo, desta forma, os poros existentes, adquirindo maior resistência à compressão e uma tendência à estabilização da espessura num menor tempo. Verifica-se uma elevada variação de espessura com a aplicação da tensão normal, conforme mostrado na Figura 5.27, sendo tal variação mais pronunciada para os carregamentos iniciais.

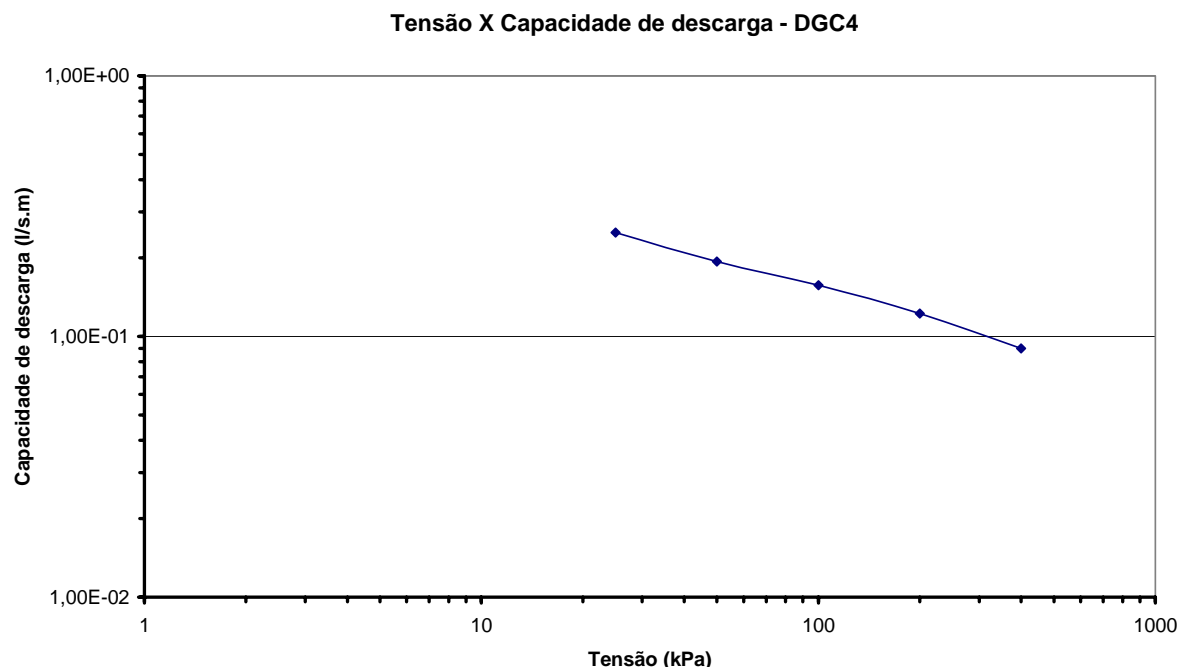


Figura 5.25 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para o geocomposto drenante DGC4.

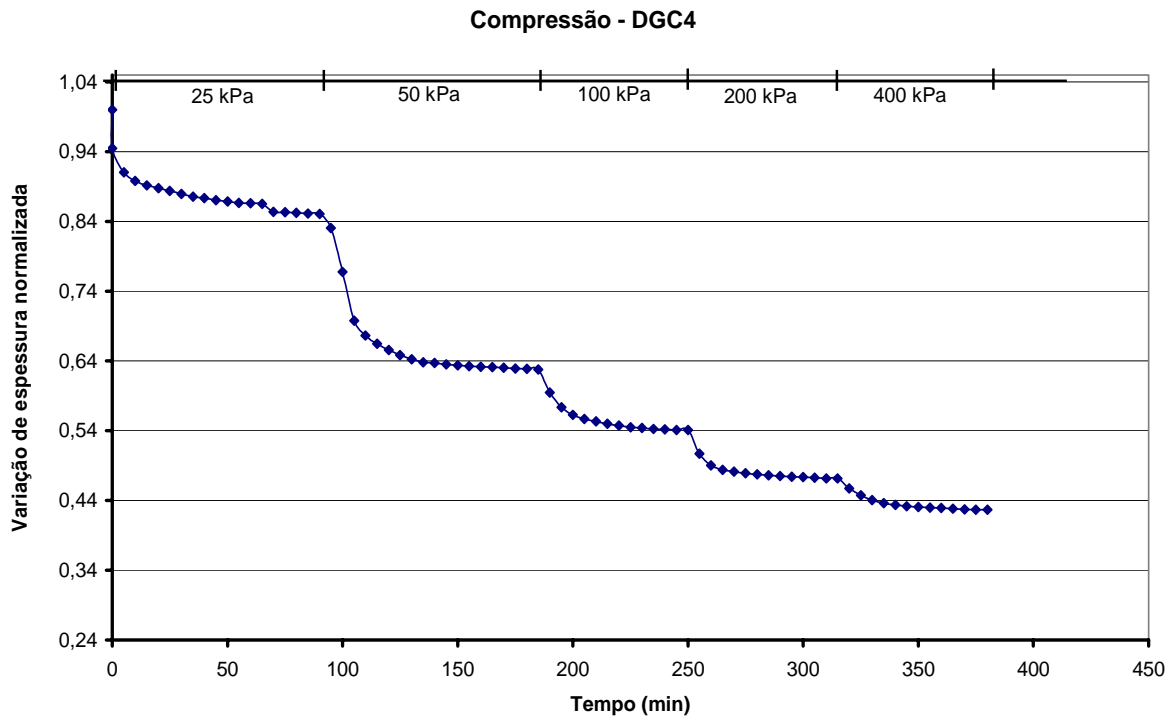


Figura 5.26 – Compressão do geocomposto DGC4.

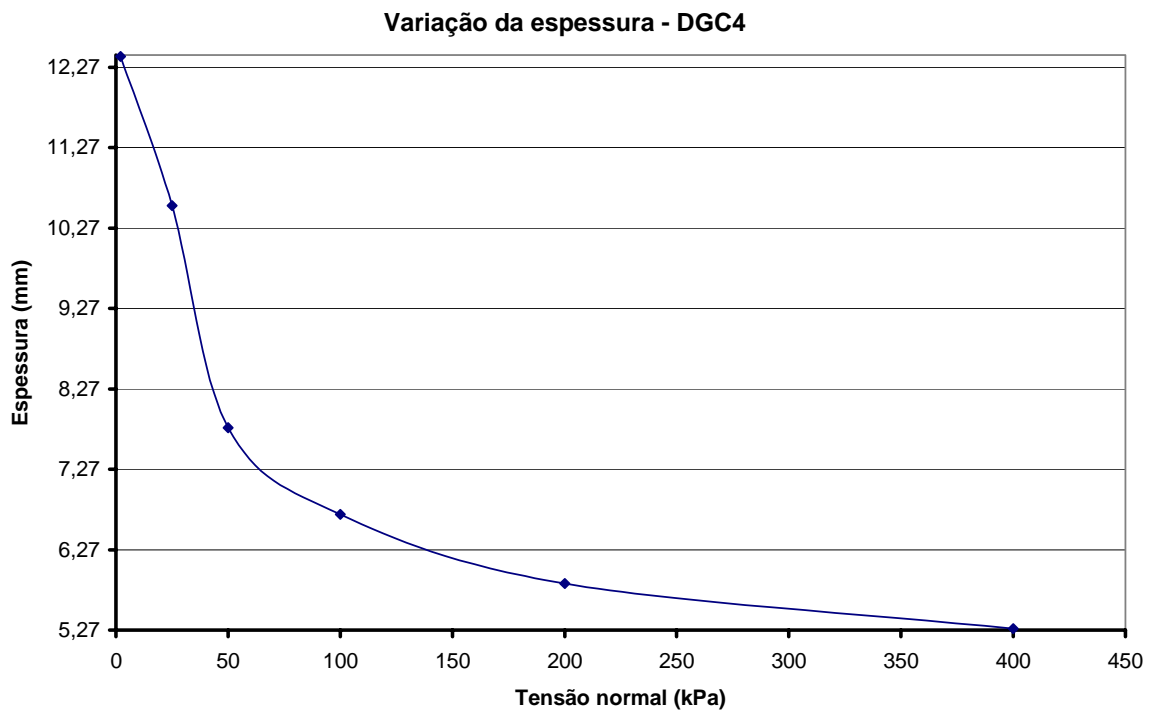


Figura 5.27 – Relação entre a espessura do geocomposto DGC4 e o acréscimo de tensão normal.

A Figura 5.28 fornece a perda de carga hidráulica ao longo do plano do DGC4, onde se verifica menores variações das perdas de carga em relação a outros materiais.

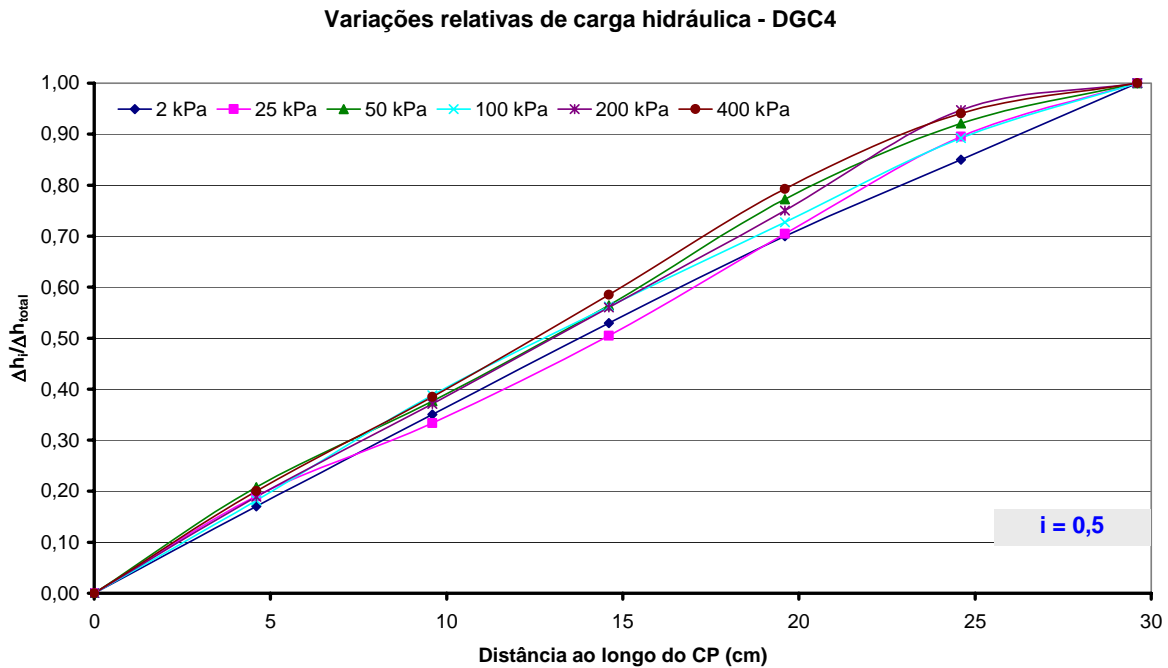


Figura 5.28 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto DGC4.

5.7. ENSAIOS EM GEOCOMPOSTOS ALTERNATIVOS COM NÚCLEO DE TAMPAS DE GARRAFAS PET

O primeiro parâmetro a ser analisado, a transmissibilidade hidráulica, demonstrou uma boa eficiência do geocomposto GCT1 (Figura 5.29), para o qual se tem uma menor distância entre as tampas, e cuja capacidade de descarga com a aplicação da tensão normal manteve-se praticamente constante com valores da ordem de $2,0 \times 10^{-1}$ l/s.m. O GCT2, o qual possui uma menor quantidade de tampas em seu núcleo em relação ao GCT1, permite, inicialmente, uma maior passagem do fluxo ao longo do plano, sendo tal condição afetada pelo acréscimo de carregamento, onde verifica-se que a menor quantidade de tampas existentes contribui também para que ocorra uma maior diminuição da capacidade de descarga ao longo do processo de compressão do corpo-de-prova. O GCT2 demonstrou um comportamento análogo ao GCT3, com maiores variações de capacidade de descarga a partir de 100 kPa. O fato de este possuir os maiores espaçamentos entre as tampas, não implica, necessariamente, em maior capacidade de fluxo ao longo do plano do geocomposto, visto que em virtude da pouca quantidade de tampas por unidade de área para compor a estrutura do geocomposto, ocorre à intrusão do geotêxtil superior e da espuma emborrachada posicionada acima do corpo-de-prova, no interior do seu núcleo, conforme verificado para o geocomposto GCT3.

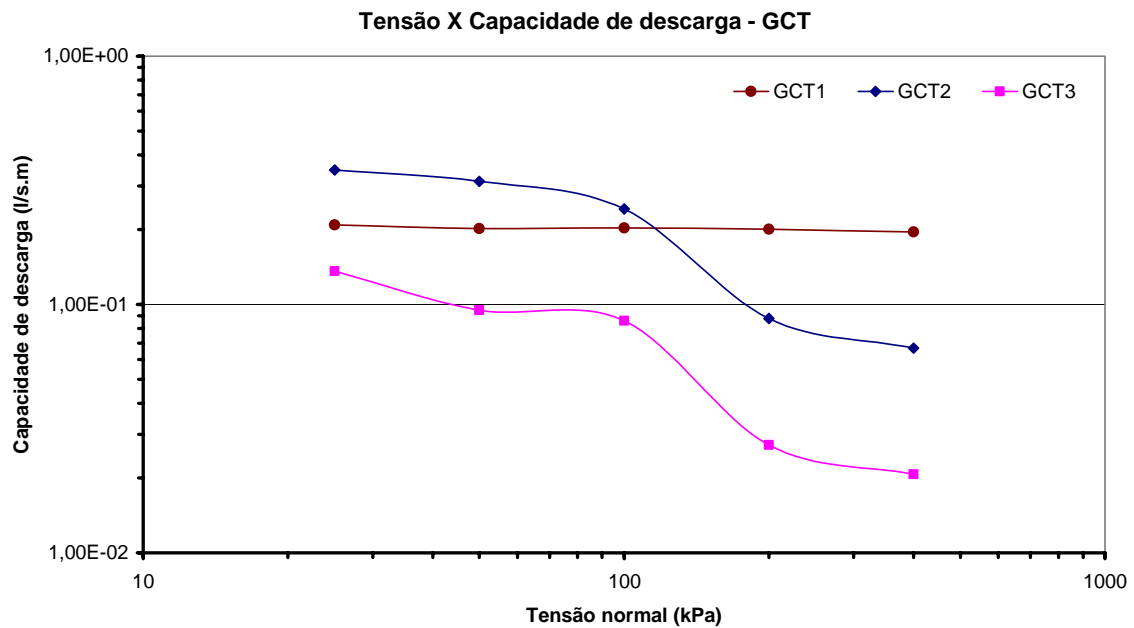


Figura 5.29 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para os geocompostos drenantes do tipo GCT.

No presente trabalho, optou-se pela utilização de geocompostos drenantes cujo geotêxtil separador possui gramaturas igual ou inferior a 200 g/m^2 , por razões de eficiência e redução de custos (ver Capítulo 3). Entretanto, para verificação do efeito da gramatura do geotêxtil filtrante na eficiência do geocomposto, realizou-se um ensaio de transmissibilidade hidráulica com geocomposto do tipo GCT3, o qual possui maior espaçamento entre tampas, utilizando o geotêxtil não tecido com gramatura de 400 g/m^2 . A Figura 5.30 mostra poucas variações da capacidade de descarga ao longo do plano com o acréscimo de tensão normal para os diferentes tipos de geotêxteis empregados. Conclui-se, portanto, que a gramatura não exerceu grande influência na capacidade de fluxo de geocompostos com núcleo espesso, tal como o GCT3.

Os dados de compressão obtidos para esse tipo de geocomposto são apresentados na Figura 5.31. Nesses ensaios utilizou-se espuma emborrachada como material de contorno da parte superior do corpo-de-prova. Tais condições impostas pelo referido ensaio não permitem uma precisão adequada da compressão dos referidos materiais, visto que a espuma emborrachada, utilizada para nivelamento da superfície de contato entre o corpo-de-prova e a placa rígida e para impedimento de fluxos preferenciais, interfere na precisão dos resultados. Portanto, para uma melhor análise do comportamento destes novos materiais, realizou-se a compressão do corpo-de-prova, utilizando equipamento de transmissibilidade sem o fluxo de água, com a

aplicação de cargas em estágios com duração de 1 h a 1 h30, de acordo com a intensidade de fluência verificada. Os resultados das Figuras 5.32 a 5.34 mostram as variações de espessura, em termos relativos, dos geocompostos, sob condição seca, ao longo do tempo.

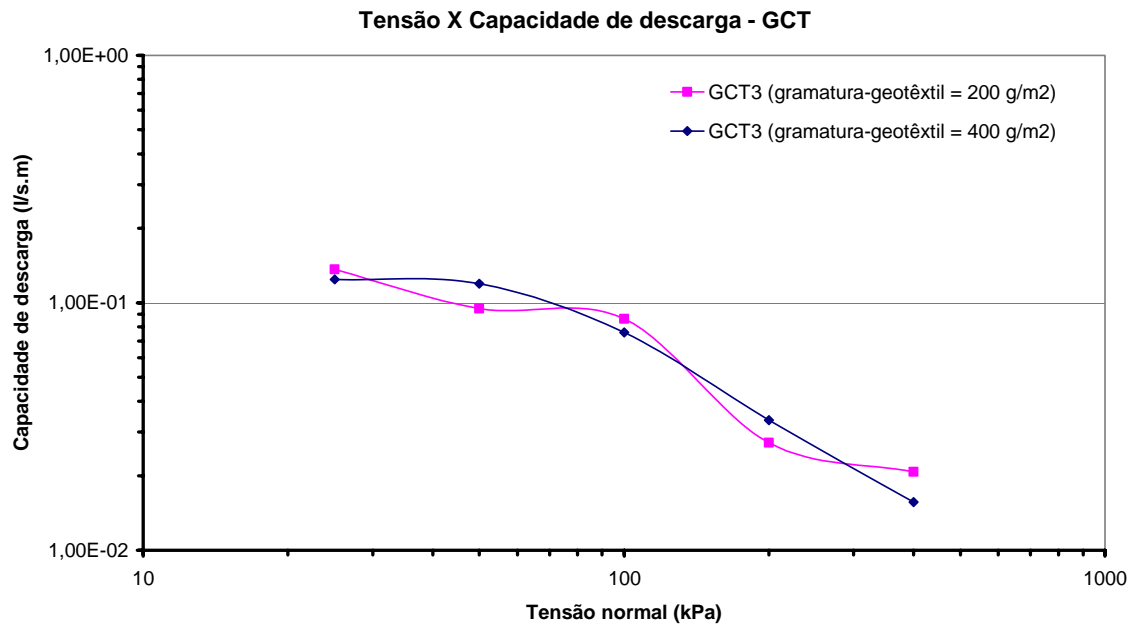


Figura 5.30 – Comparação entre as capacidades de descarga dos geocompostos do tipo GCT3.

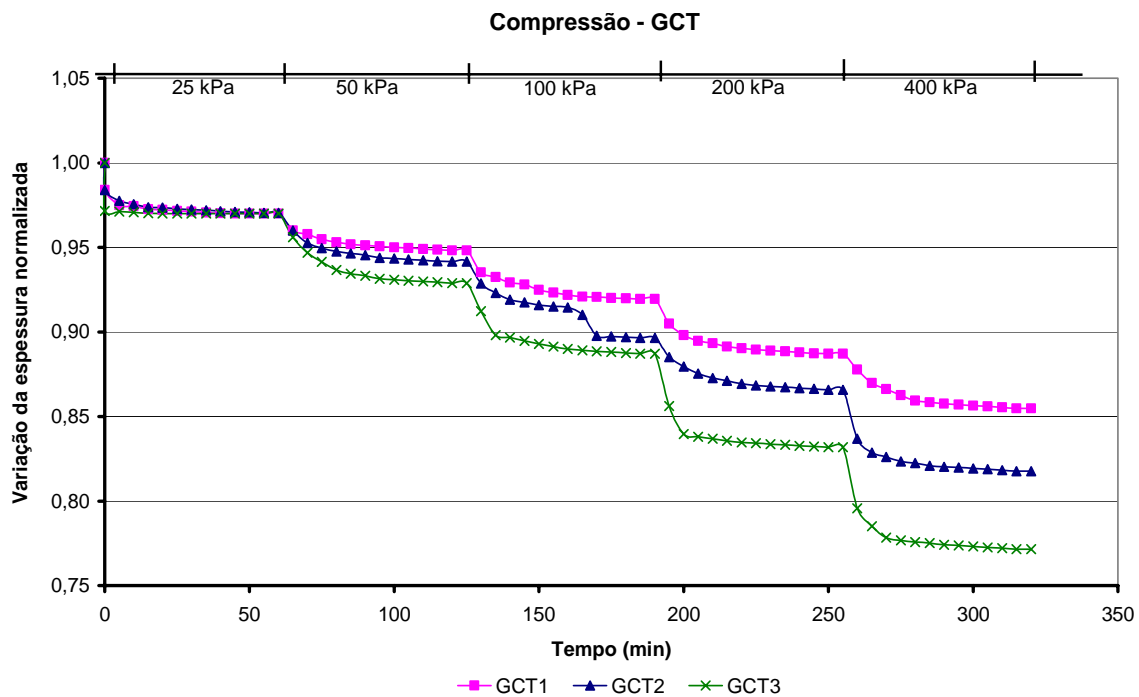


Figura 5.31 – Compressão dos geocompostos do tipo GCT (resultados obtidos do ensaio de transmissibilidade com utilização de espuma emborrachada).

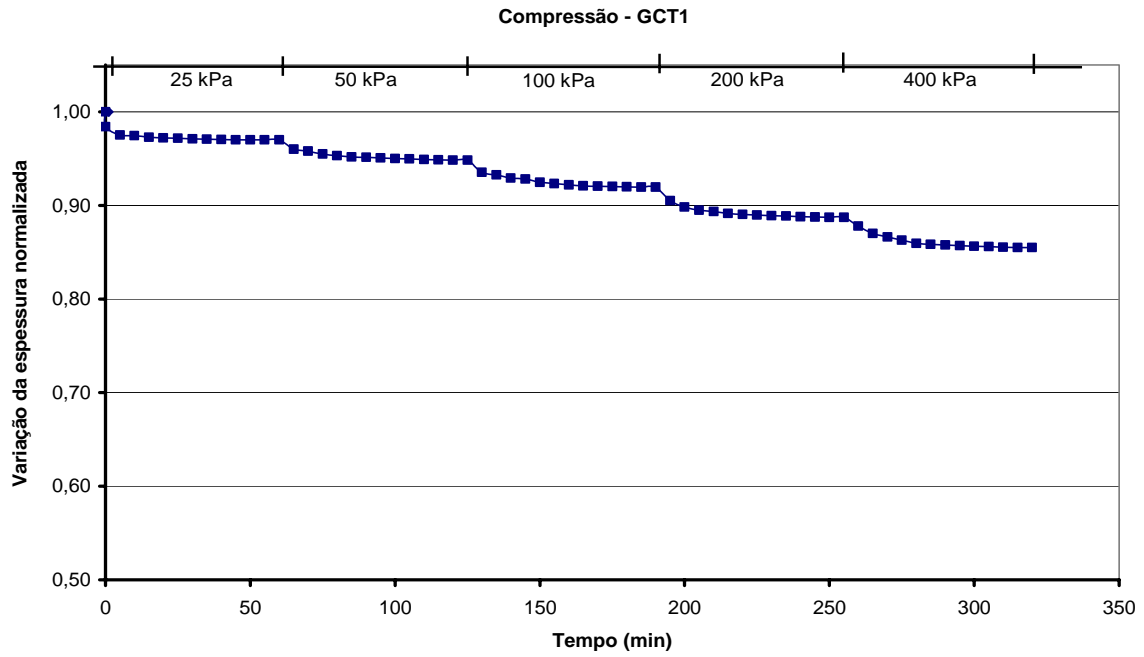


Figura 5.32 – Compressão do geocomposto GCT1.

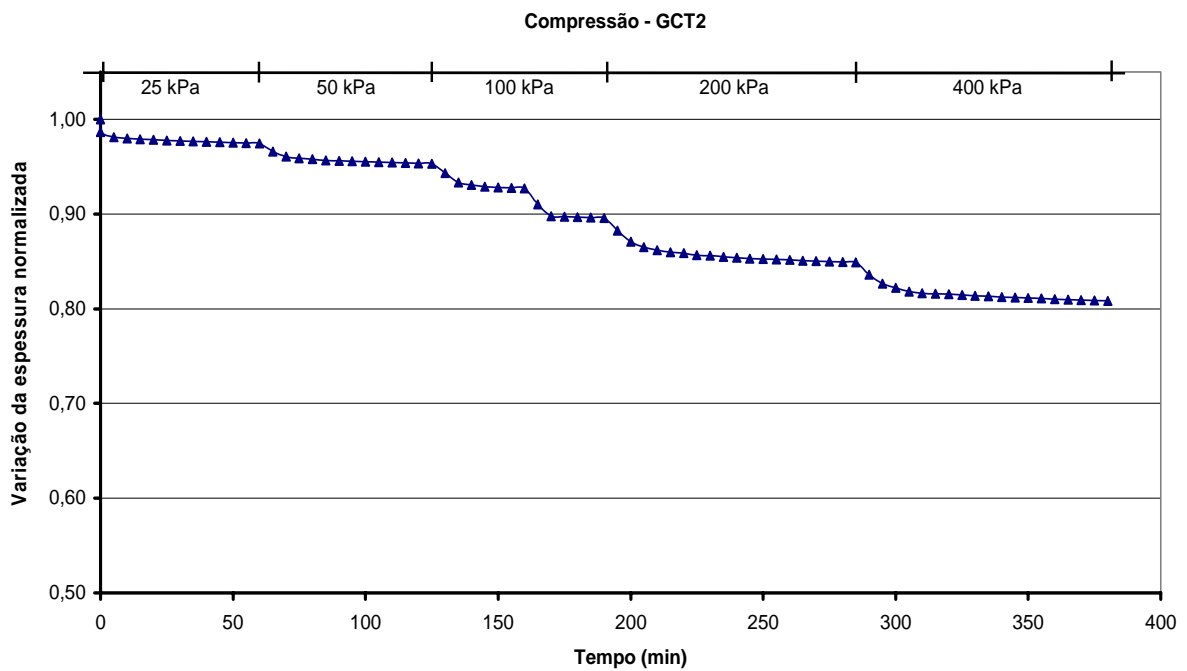


Figura 5.33 – Compressão do geocomposto GCT2.

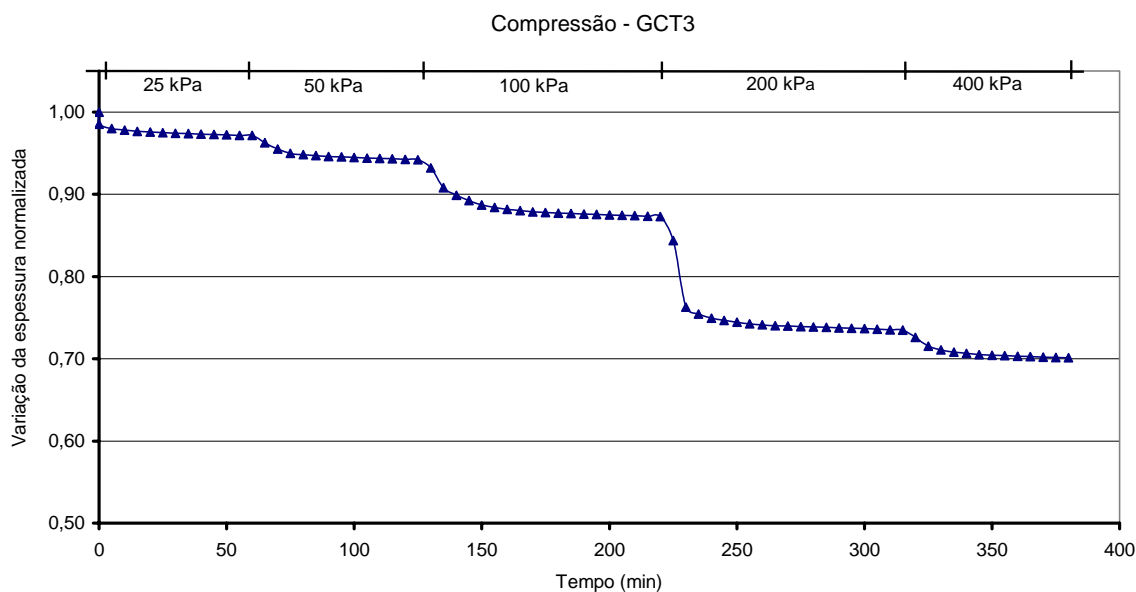


Figura 5.34 – Compressão do geocomposto GCT3.

O comportamento dos geocompostos sob tensões normais, mostrado nas Figuras 5.32 a 5.34, indica a freqüente ocorrência de fluência por compressão. O GCT1 possui poucas variações de espessura ao longo do tempo, atingindo a estabilização da compressão em menos de 1 hora de aplicação do nível de carregamento. O GCT2 apresenta uma brusca variação de espessura durante a aplicação de 100 kPa, indicando desta forma que a partir desse carregamento a fluência ocorre de forma mais pronunciada. A Figura 5.34 ilustra o comportamento diferenciado do GCT3 sob tensões de compressão em relação aos demais geocompostos, verificando-se consideráveis diferenças de espessuras nas transições dos carregamentos, particularmente para tensões de 100 e 200 kPa, para as quais também é verificada o efeito da fluência de maneira mais expressiva. A partir da aplicação de 400 kPa é constatada uma tendência estabilizadora em virtude do achatamento do núcleo ocorrido durante a aplicação das cargas anteriores, o que implica em menor compressão.

Os dados obtidos da compressão dos corpos-de-prova sem o fluxo de água permitiram o traçado de curvas mostradas nas Figuras 5.35 a 5.37, que permitem, de maneira mais precisa, a obtenção da espessura do CP ao final de cada estágio de carregamento.

As Figuras 5.38 a 5.40 mostram, por meio de gráficos em mesma escala, o comportamento da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova. Verifica-se que o geocomposto do tipo GCT1 (Figura 5.38) por apresentar maior capacidade de descarga, possui menores perdas de carga

hidráulica ao longo de seu comprimento. Observa-se na Figura 5.39 que o geocomposto do tipo GCT2 possui um comportamento semelhante ao GCT1. As variações mais pronunciadas das perdas de carga hidráulica ao longo do CP ocorrem para o geocomposto GCT3 (Figura 5.40), em virtude da baixa resistência do núcleo à compressão, permitindo a intrusão do geotêxtil e da espuma emborrachada de forma mais pronunciada para a tensão de 400 kPa, implicando em alterações nas condições de fluxo ao longo do núcleo, refletindo em maiores diferenciações entre cargas hidráulicas.

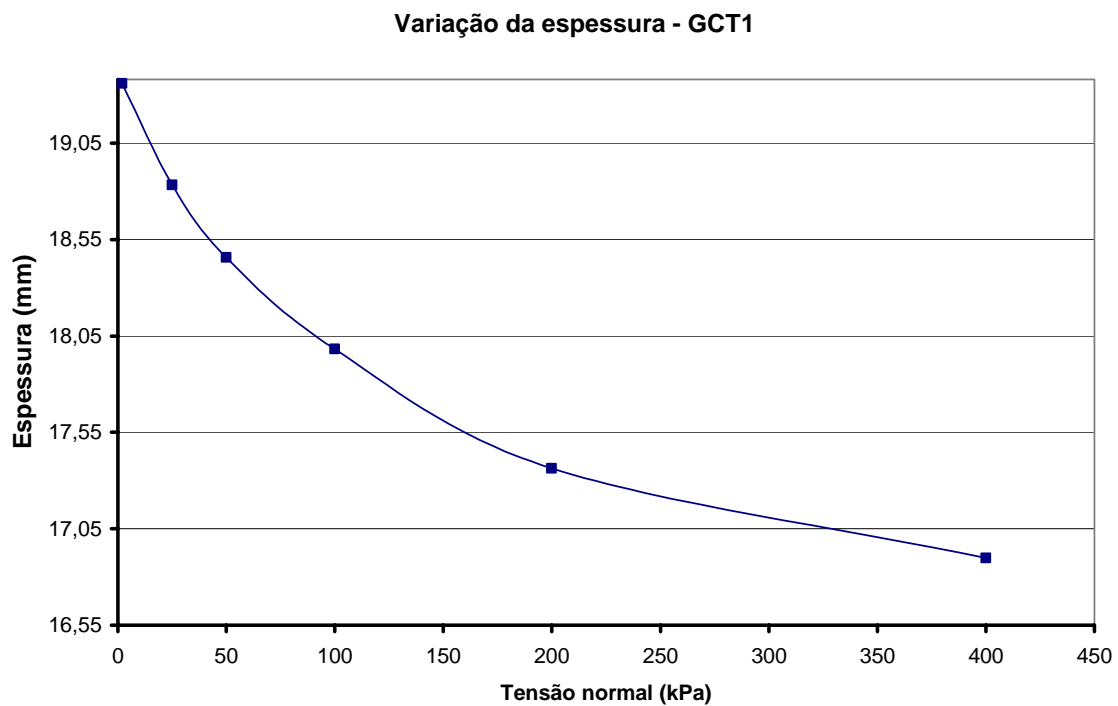


Figura 5.35 – Relação entre a espessura do geocomposto GCT1 e o acréscimo de tensão normal.

Varição da espessura - GCT2

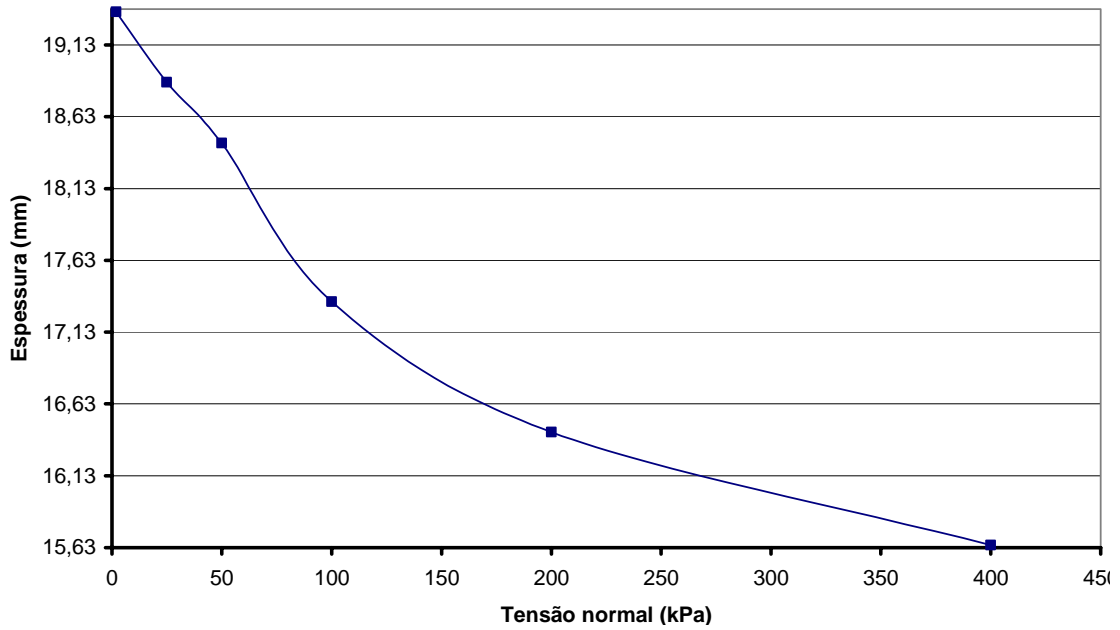


Figura 5.36 – Relação entre a espessura do geocomposto GCT2 e o acréscimo de tensão normal.

Varição da espessura - GCT3

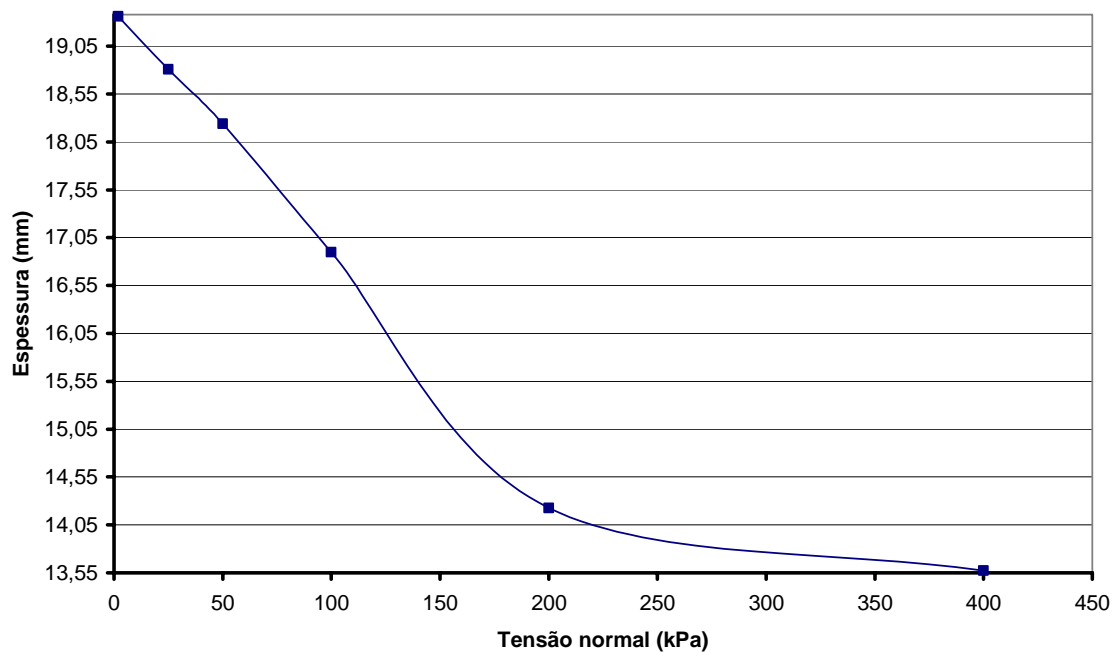


Figura 5.37 – Relação entre a espessura do geocomposto GCT3 e o acréscimo da tensão normal.

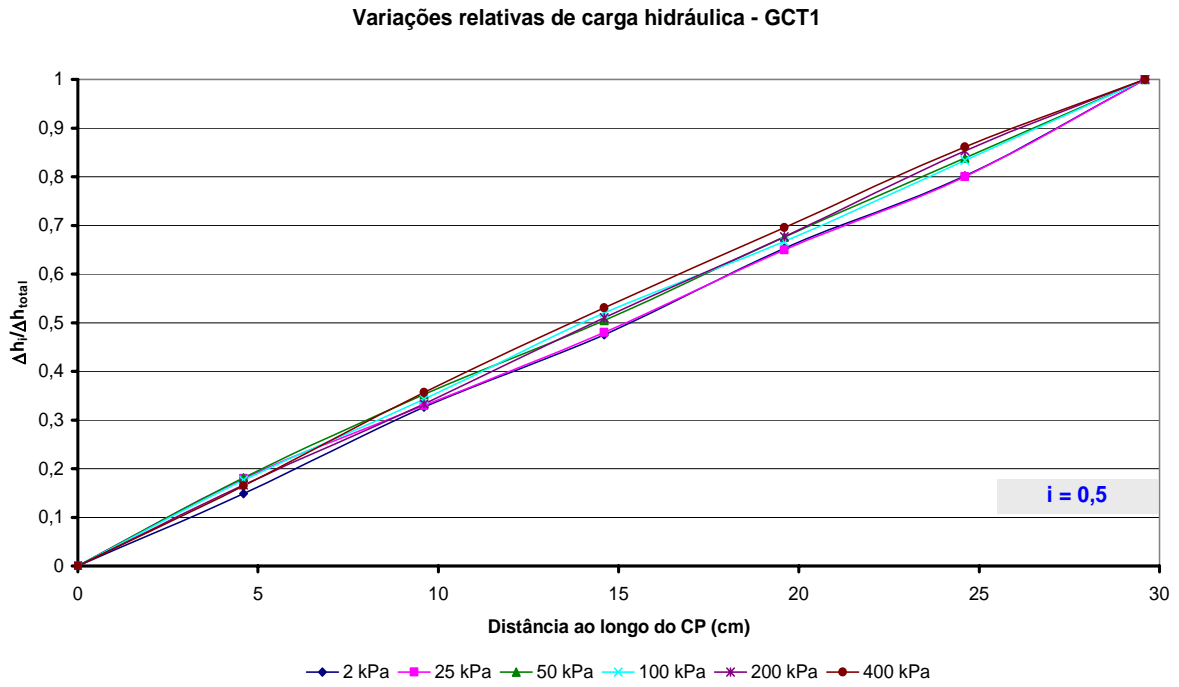


Figura 5.38 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto GCT1.

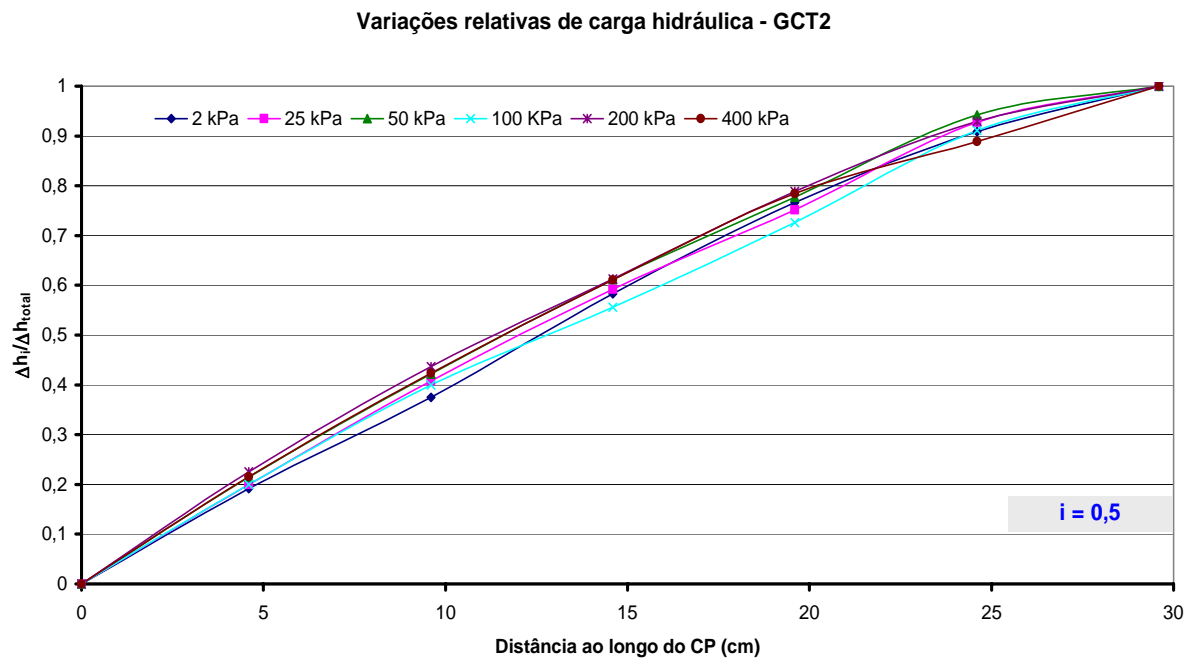


Figura 5.39 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto GCT2.

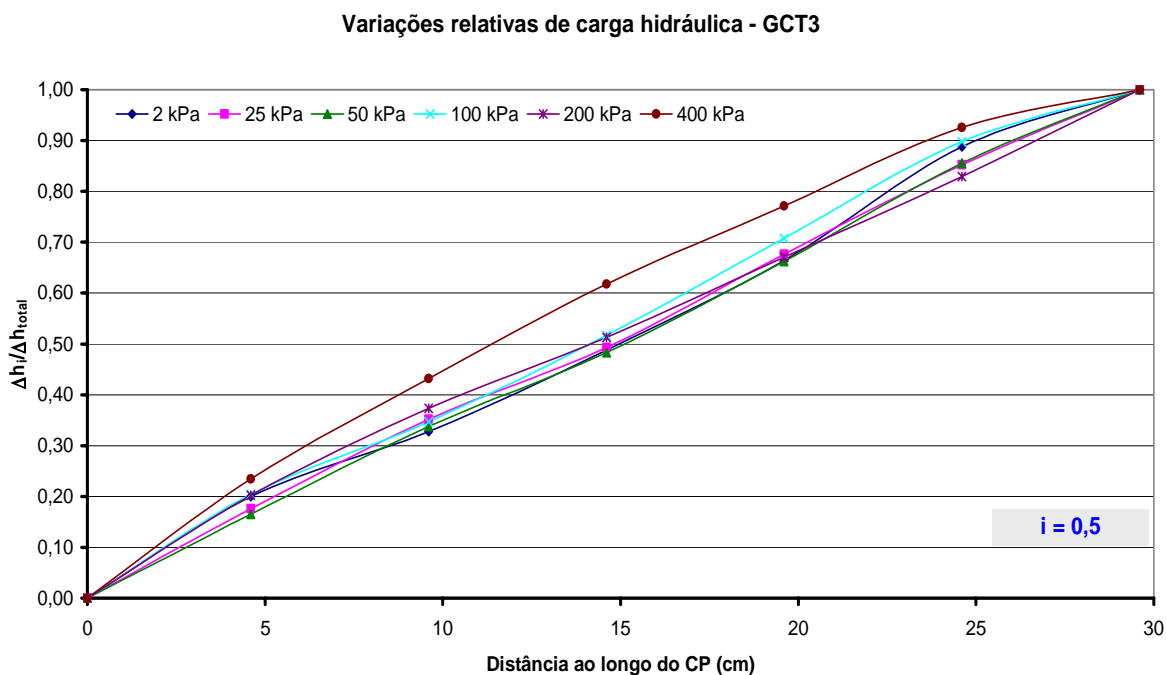


Figura 5.40 – Variação da carga hidráulica ao longo do corpo-de-prova do geocomposto GCT3.

5.8. ENSAIOS DE GEOCOMPOSTOS ALTERNATIVOS COM NÚCLEO DE TIRAS DE PNEUS

Os geocompostos denominados GCP1 e GCP2 apresentaram comportamentos diferenciados ao serem submetidos ao ensaio de transmissibilidade. A Figura 5.41 mostra que o GCP2, por possuir um núcleo com espaçamento menor entre as tiras, implicando em um menor potencial de intrusão pelos materiais de cobertura, apresenta maiores capacidades de descarga ao longo do plano. A espessura e a quantidade de tiras presentes no núcleo do geocomposto são fundamentais na caracterização do comportamento hidráulico do mesmo frente às condições impostas pela tensão normal.

As Figuras 5.42 a 5.44 mostram a compressão dos geocompostos do tipo GCP para as mesmas condições abordadas no item 5.7, com relação aos resultados de compressão dos corpos-de-prova em condições em que não há a presença de fluxo de água e a não utilização da espuma emborrachada como material de contorno.

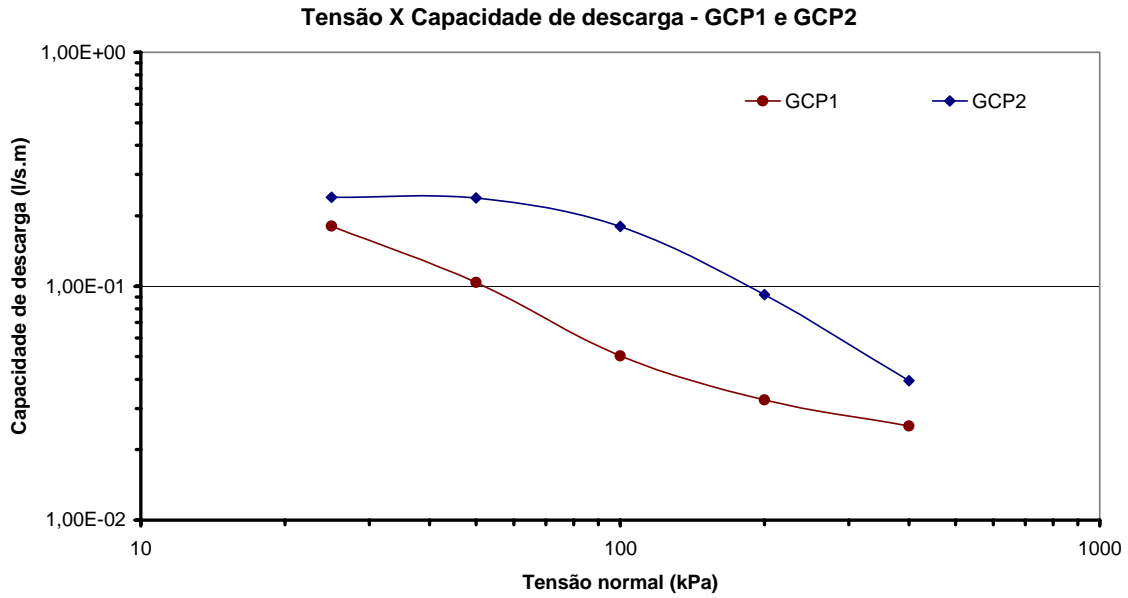


Figura 5.41 – Variação da capacidade de descarga em função da tensão normal para os geocompostos drenantes do tipo GCP.

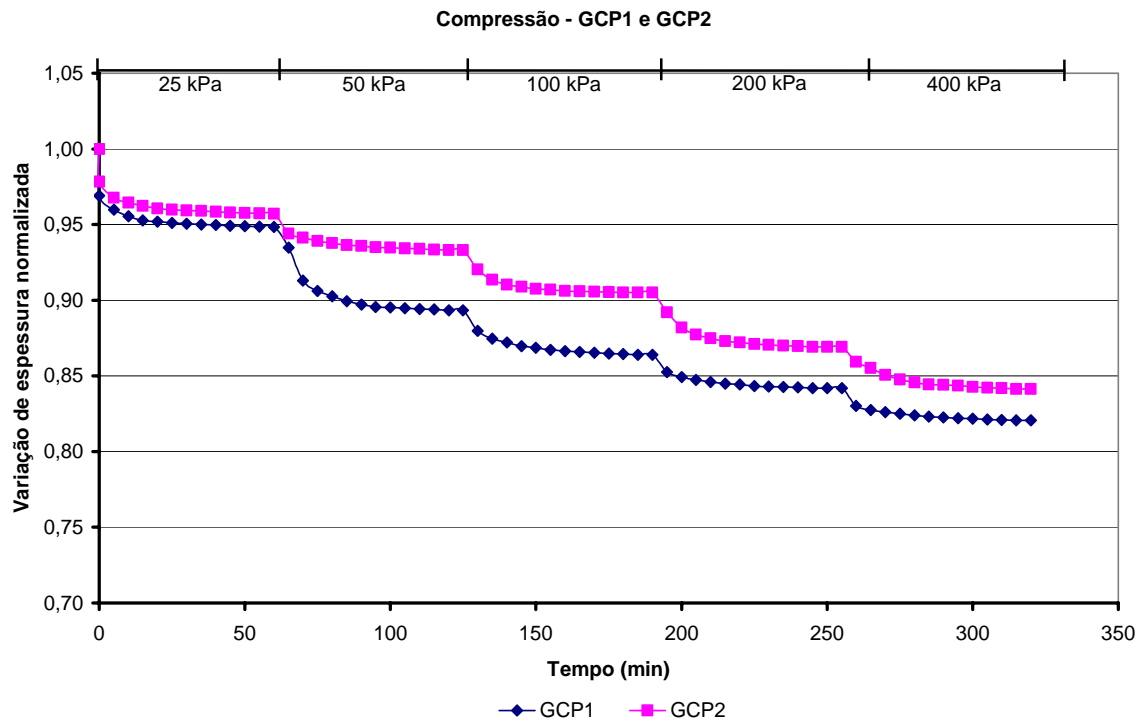


Figura 5.42 – Compressão dos geocompostos do tipo GCP (resultados obtidos do ensaio de transmissibilidade).

As conclusões obtidas por meio da Figura 5.41 estão em conformidade com as compressões demonstradas na Figura 5.42, onde se pode visualizar uma menor resistência do GCP1 à

compressão ao longo do tempo, o que implica em menores capacidades de descarga, devido à intrusão do geotêxtil de cobertura e da espuma emborrachada no núcleo drenante.

A compressão do GCP1 (Figura 5.43) demonstra uma tendência a maiores variações de espessura para carregamentos até 200 kPa. A partir desse nível de tensão, a trama formada pelas tiras de pneus encontra-se num estado de achatamento que impede maiores variações de espessura com acréscimo do carregamento. O GCP2 apresenta um comportamento mais estável durante as transições dos carregamentos (Figura 5.44). Apesar de desempenhos diferentes durante as transições de cargas e ao longo da aplicação destas, ambos os materiais possuem pouca tendência à fluência e apresentam valores similares de espessura normalizada, ou seja, os corpos-de-prova comprimiram aproximadamente 15 %. Avaliando-se a compressão durante o ensaio de transmissibilidade (Figura 5.42) é observada uma compressão em torno de 18% para o GCP1, indicando a influência da sobreposição da espuma.

As Figuras 5.45 e 5.46 relacionam a espessura ao final de cada estágio de carregamento com a respectiva tensão normal. A maior inclinação da curva na Figura 5.45 indica que as maiores variações de espessura do GCP1 ocorrem para os carregamentos abaixo de 100 kPa. Enquanto que para o GCP2 tais variações são menos pronunciadas.

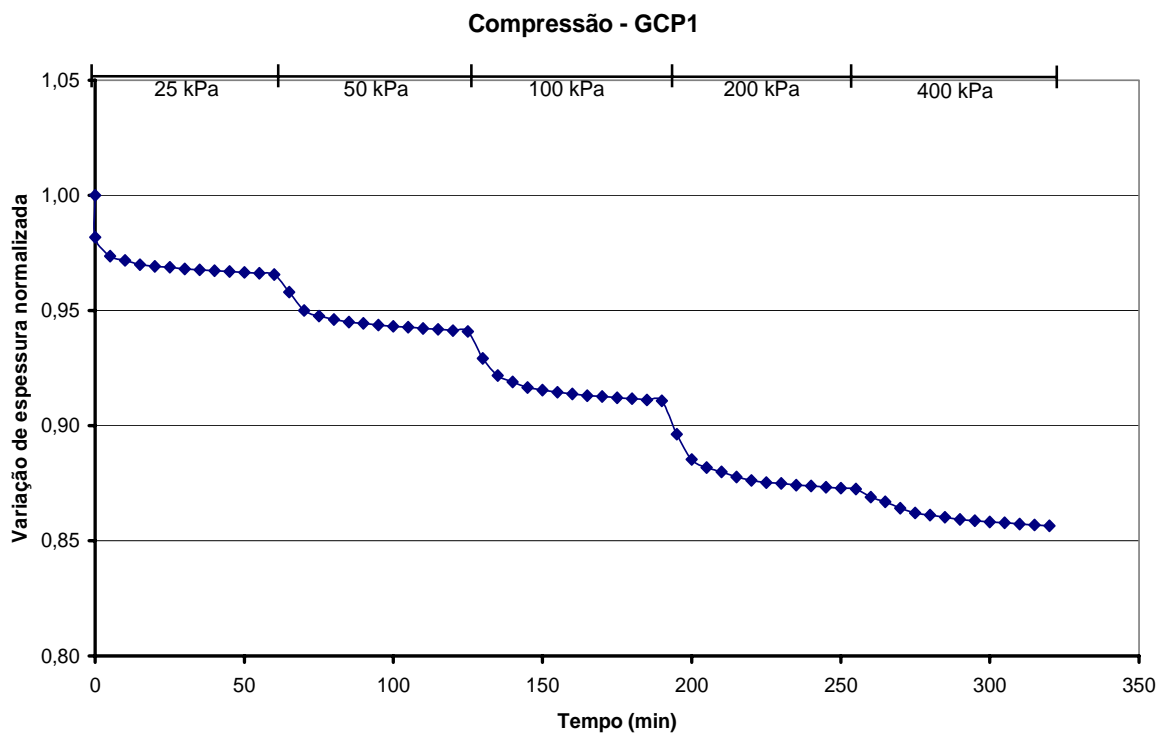


Figura 5.43 – Compressão do geocomposto GCP1.

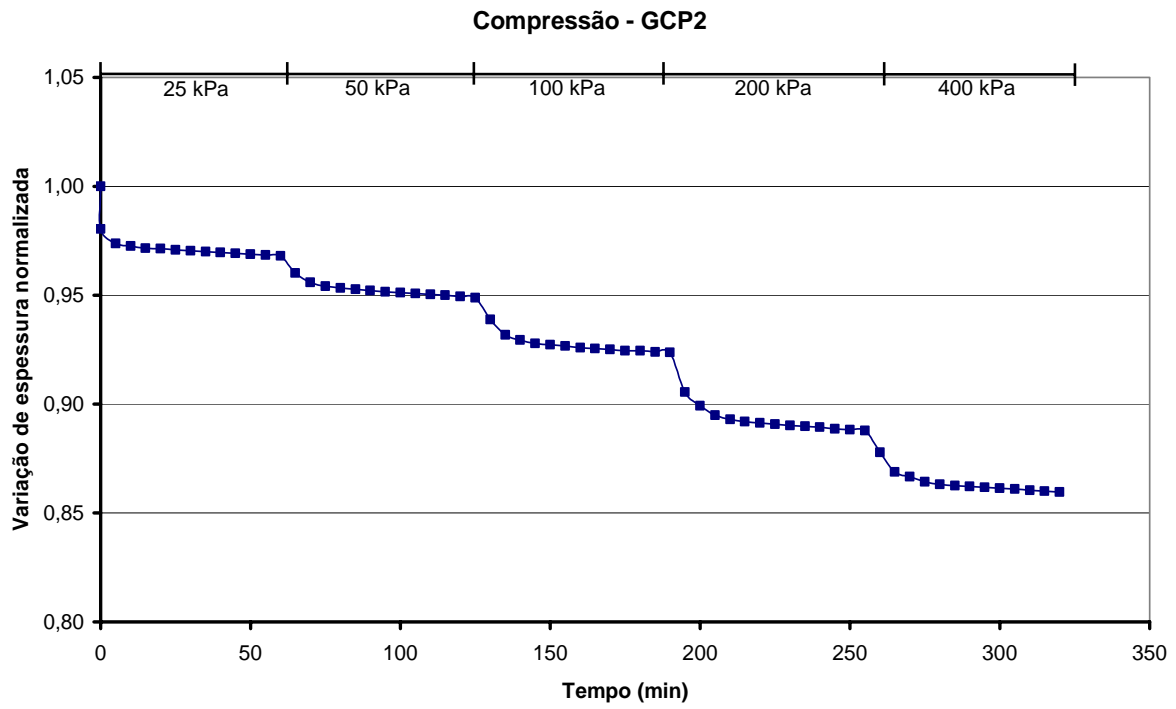


Figura 5.44 – Compressão do geocomposto GCP2.

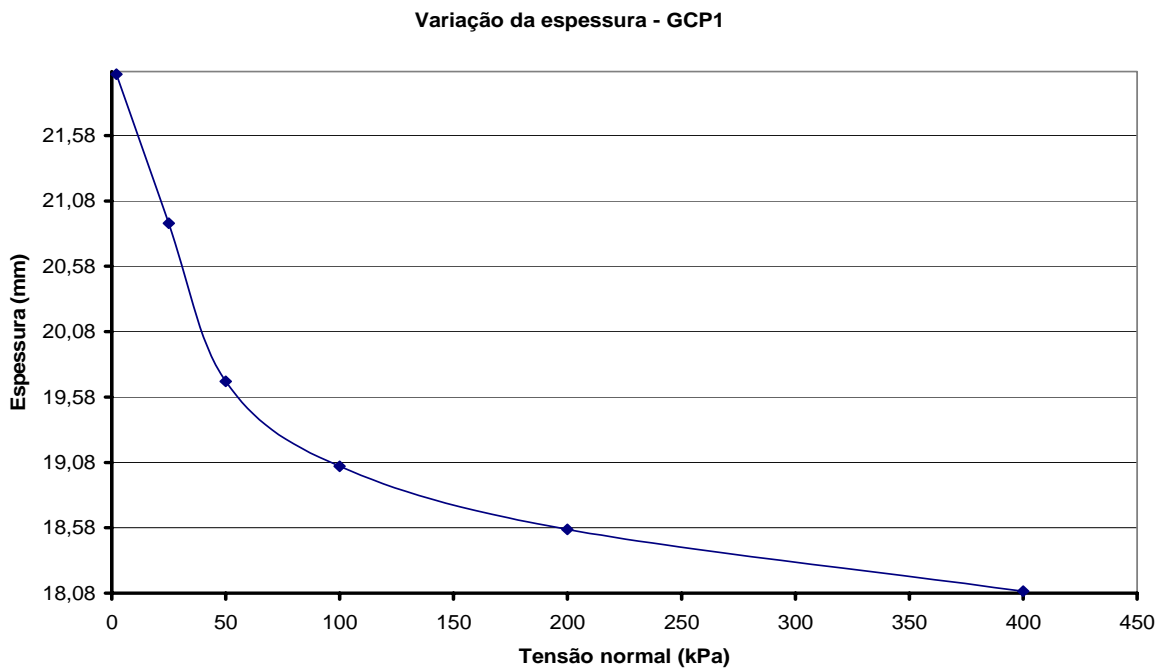


Figura 5.45 – Relação entre a espessura do geocomposto GCP1 e o acréscimo de tensão normal.

Varição da espessura - GCP2

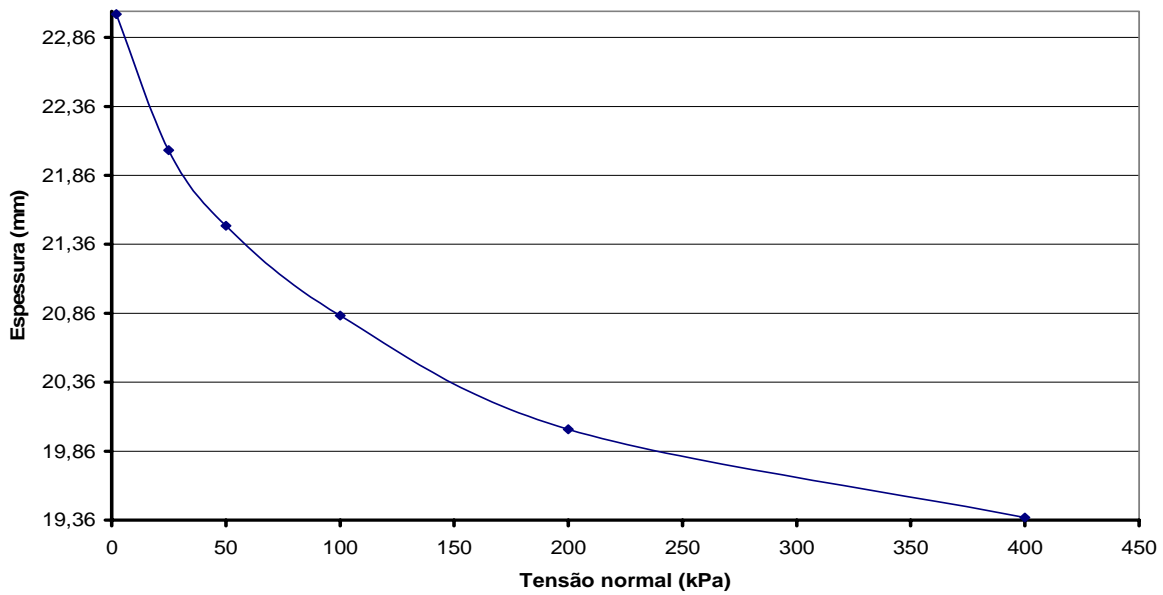


Figura 5.46 – Relação entre a espessura do geocomposto GCP2 e o acréscimo de tensão normal.

As variações das perdas de carga hidráulica ao longo dos corpos-de-prova são apresentadas nas Figuras 5.47 e 5.48. O geocomposto GCP1 que apresenta menores capacidades de descarga com a aplicação de tensões possui maiores perdas e maiores variações de carga hidráulica ao longo do plano, em virtude do elevado grau de intrusão no geotêxtil de cobertura e da espuma emborrachada nos espaços vazios do núcleo. O geocomposto GCP2 (Figura 5.48) apresenta uma menor susceptibilidade ao achatamento do núcleo e à intrusão pelos materiais de cobertura, implicando, portanto, em menores variações de carga hidráulica ao longo do comprimento do material.

Variações relativas de carga hidráulica - GCP1

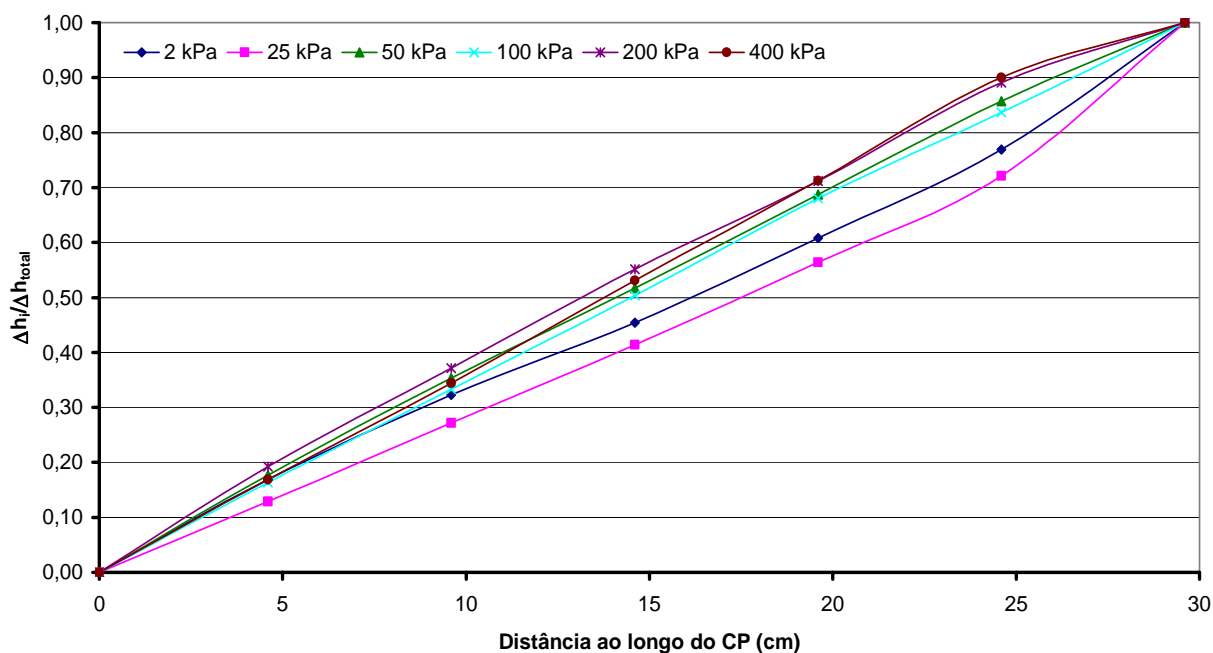


Figura 5.47 – Variação da carga hidráulica ao longo do geocomposto GCP1.

Variações relativas de carga hidráulica - GCP2

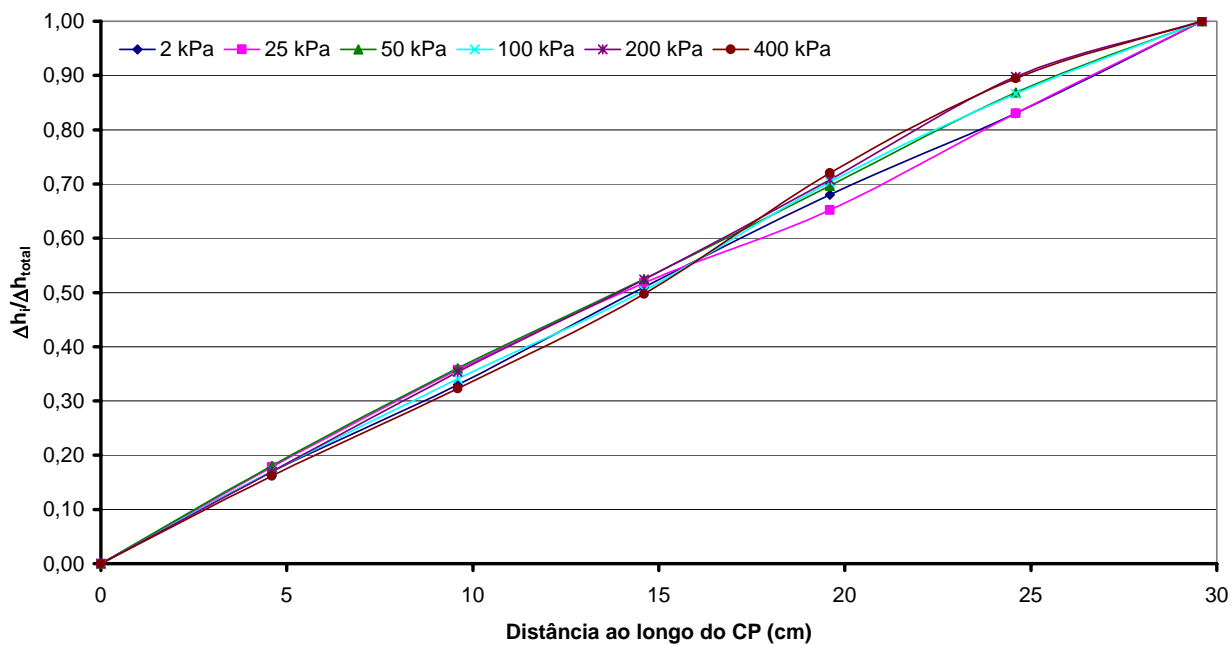


Figura 5.48 – Variação da carga hidráulica ao longo do geocomposto GCP2.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este capítulo trata das considerações finais a serem feitas com relação ao desempenho dos materiais pesquisados. São abordadas vantagens e limitações destes materiais frente às condições de solicitação do ensaio de transmissibilidade.

6.1. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIO E METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada, baseada na ASTM D4716 (1991), necessitou de procedimentos complementares, visto que a mesma não especifica com detalhes, todas as etapas a serem realizadas. Portanto, foram adotados procedimentos como: a saturação do corpo-de-prova por meio de jateamento d'água e a vedação das juntas ao redor da placa metálica com material vedante à base de silicone. Tal vedação é essencial para que não ocorram vazamentos ou caminhos preferenciais no decorrer do ensaio.

A aplicação de carga com a utilização de bomba de funcionamento manual e o monitoramento das variações de espessura pelos deflectômetros, implicou na limitação do tempo de aplicação da carga de compressão no corpo-de-prova, caracterizando ensaios realizados como de curta duração.

Cuidados com a verificação da superfície das interfaces em contato com o corpo-de-prova são fundamentais para que não surjam caminhos preferenciais de fluxo d'água, que implicam na alteração dos valores de vazão quantificados ao longo do ensaio. Dessa forma, a aplicação de uma camada de silicone nas interfaces acima e abaixo do corpo-de-prova foi fundamental na impermeabilização de regiões fora do plano interior do corpo-de-prova. A espuma emborrachada utilizada na interface superior do corpo-de-prova com a placa metálica rígida foi fundamental para evitar fluxos preferenciais. As características de compressão da espuma, além do seu potencial de intrusão na estrutura porosa dos materiais, permitem a simulação, embora limitada, de uma camada de solo acima do geocomposto.

6.2. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

6.2.1. GEOTÊXTEIS

Os geotêxteis não-tecidos apresentaram consideráveis decréscimos da taxa de fluxo no plano com a aplicação das tensões de compressão ao serem ensaiados isoladamente. Foi verificada uma relação de proporcionalidade entre a gramatura e a transmissibilidade desses materiais. Os geotêxteis de menor gramatura se caracterizaram por apresentar maiores decréscimos de espessura ao longo do tempo e variações de cargas hidráulicas ao longo do corpo-de-prova menos uniformes.

6.2.2. GEORREDES

As condições de ensaio às quais foram submetidas as georredes influenciaram o comportamento desses materiais. A espuma emborrachada localizada na interface superior contribuiu para uma maior diminuição da capacidade de descarga ao longo do plano desses materiais, em virtude da intrusão na estrutura porosa das georredes.

As georredes com maiores valores de gramatura e espessura tenderam a apresentar um maior grau de resistência à intrusão e, conseqüentemente, apresentaram maior capacidade de descarga e menores variações de espessura com o acréscimo de tensão vertical.

A necessidade da aplicação de tensões normais acima das utilizadas nos ensaios, além de estágios de carregamentos de maior duração é evidente, visto que a partir de 200 kPa é verificada uma tendência a maiores compressões do material.

As variações de carga hidráulica ao longo das georredes foram mais significativas para a georrede de menor gramatura devido às maiores perdas de carga ao longo do comprimento do corpo-de-prova, em função da intrusão da espuma emborrachada nos poros da georrede.

6.2.3. GEOCOMPOSTOS DRENANTES CONVENCIONAIS

Os geocompostos convencionais dos tipos DGC2 e DGC4 apresentaram desempenhos compatíveis com as especificações de catálogo fornecidas pelos fabricantes, para as condições específicas adotadas no ensaio. As maiores capacidades de descarga foram encontradas para os geocompostos cujo núcleo é constituído por georrede, particularmente a de maior

gramatura, e por geoespaçador. As menores taxas de variação da capacidade de descarga com a pressão foram encontradas para os geocompostos com núcleo constituído por georrede de polietileno.

As variações de espessura indicaram que os geocompostos com núcleo formado por geoespaçador apresentam um comportamento peculiar. Particularmente, a partir da aplicação da tensão de 400 kPa, a qual se verifica elevadas alterações na capacidade de descarga e na compressão do material. A partir das variações das leituras entre os três deflectômetros, constataram-se diferenças de variações de espessura ao longo do plano do corpo-de-prova, particularmente para o geocompostos DGC3 e DGC4, quando submetidos aos maiores carregamentos.

O geocomposto com núcleo formado pelos filamentos de polipropileno apresentou elevadas taxas de variações de capacidade de descarga ao longo de todos os carregamentos aplicados. Entretanto, as taxas de variação de espessura foram mais pronunciadas para os carregamentos abaixo de 100 kPa.

As variações de carga hidráulica ao longo do comprimento do corpo de provas aumentaram com o acréscimo da tensão normal. Portanto, foram mais pronunciadas para a tensão normal de 400 kPa. As exceções foram os geocompostos DGC1 e DGC2, para os quais não se verificaram grandes alterações de cargas hidráulicas com o aumento da tensão normal.

6.2.4. GEOCOMPOSTOS DRENANTES ALTERNATIVOS

O desempenho dos geocompostos com núcleo constituído por materiais alternativos mostrou-se satisfatório, uma vez que, as taxas de fluxo no plano desses materiais apresentam valores compatíveis com os dos geocompostos drenantes convencionais. Dentre todos os materiais ensaiados, foram constatadas maiores taxas de fluxo para os geocompostos com núcleo constituído por tampas de garrafas PET espaçadas de 0,6 e 4,0 cm. Os geocompostos formados por tiras de pneus apresentaram desempenho compatível com os demais materiais durante os carregamentos iniciais, tendo sua capacidade de descarga diminuída devido a acomodação da trama formada pelas tiras de pneus e da elevada intrusão do geotêxtil de cobertura e da espuma emborrachada. Tal comportamento foi mais evidenciado para o geocomposto CGP1, que possui maiores espaçamentos entre as tiras.

O comportamento sob compressão dos geocompostos do tipo GCT apresentou características de estabilidade para os materiais cujo núcleo possui menores espaçamentos entre tampas. Os maiores espaçamentos entre tampas conferiu uma maior susceptibilidade à diminuição de espessura dos geocompostos, bem como da capacidade de descarga, também afetada pela elevada intrusão dos materiais de cobertura.

As maiores variações de espessura para os geocompostos constituídos por tiras de pneus, registradas durante os primeiros carregamentos, evidenciaram a influência da acomodação inicial da estrutura do corpo-de-prova, no comportamento compressível desses materiais.

A técnica empregada na formação dos geocompostos alternativos utilizados na presente pesquisa, tem como proposição a criação de um processo industrial para confecção de tais produtos, que serão posteriormente lançados ao campo. Dificuldades foram encontradas com relação a obtenção de tiras, em virtude da necessidade de um mecanismo que possibilite cortar a borracha juntamente com o aço incrustado. Com relação as tampas de garrafas PET, existem poucos inconvenientes em sua obtenção, em virtude da elevada quantidade de garrafas descartadas, além da existência de usinas de reciclagem, que possibilitam o fornecimento desses materiais em grande quantidade. É importante salientar que o processo de separação das tampas de suas respectivas garrafas é auto-sustentável, uma vez que, a garrafa, tem sua utilização em diversos segmentos da sociedade.

A água proveniente da circulação no ensaio não apresentou alterações no aspecto visual, durante a passagem pelos geocompostos com núcleo formado pelas tiras de pneus. Certamente isso se deveu ao fato de que tais materiais foram previamente limpos.

6.3. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

As seguintes sugestões são apresentadas para pesquisas futuras:

- Realização de ensaios com diferentes configurações e com outros tipos de materiais;
- Realização de ensaios com maior duração;
- Realização de ensaios sob maiores níveis de tensões normais;

- Investigação de outros mecanismos de intrusão do material de cobertura nos vazios de georredes e geocompostos;
- Estudo do comportamento de materiais impregnados por solo;
- Estudo sobre a utilização de outros materiais alternativos como núcleos de geocompostos de baixo custo;
- Realização de ensaios com outros tipos de fluidos (chorume, por exemplo).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEPET (2001). Aspectos da reciclagem, folheto de divulgação. Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET.
- ABNT (1992). NBR 12569: Geotêxteis – Determinação da espessura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 2 p.
- ABNT (1992). NBR 12593: Amostragem e Preparação de Corpos-de-Porva de Geotêxteis, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2p.
- ABNT (1997). NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – critérios para projeto, implantação e operação, São Paulo, SP, 12p.
- ABNT (2003). NBR 12553: Geossintéticos – Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 3p.
- ABNT (2003). NBR 12568: Geossintéticos – Determinação da massa por unidade de área. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 2p.
- Aguiar, P. R. & Vertematti, J. C. (2004). Aplicações em drenagens. Manual Brasileiro de Geossintéticos, Vertematti, J. C. (ed.), Edgard Blücher, São Paulo, pp. 225-240.
- Apostila de Geossintéticos. Profº Ennio Marques Palmeira. UnB.
- Aspectos da Reciclagem, Folheto de divulgação, 2001.
- ASTM (1991). Standard Test Method for Constant Head Hydraulic Transmissivity (In – Plane Flow) of Geotextiles and Geotextiles Related Products, D 4716. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, pp. 48-51.
- Bertollo, S. A. M., Fernandes Jr., J. L., Villaverde, R. B. & Migotto Filho, D. (2000). Revista Limpeza Pública nº 54.
- Bueno, B. S., Costanzi, M. A. e Zornberg, J. G. (2005). Convencional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles. *Geosynthetics International*, 12 (6): 276-287.
- Campbel, R. P. & Wu, J.T.H. (1994). In-plane flow of four geosynthetics for landfill drainage. *Geotechnical Testing Journal*, vol.17 (1): 3-16.
- Cazzuffi, D., Ferrara, G. & Venesia, S. (1986). Transmissivity of geotextiles and related products: laboratory tests and practical applications. 3rd International Conference on Geotextiles, Vienna, Austria, pp. 879-884.
- Charron, R. M. & Rodgers, G. (1989). Results of a Testing Program to Evaluate the Use of Tires Chips as a Liquid Transmission Medium for Landfill Detection and Collection Systems. Draft Final Report, Environment Resources, Inc., Geosyntec, Inc., Florida, USA, 66 p.

Construction Report (2001). Experimental Utilization of Tire Shreds to enhance highway drainage. Experimental Construction Project – ME 00-20. Transportation Research Division, Bureau of planning. State of Maine, Department of Transportation, USA, 14 p.

Cosgrove, T. A. (1995). Interface strength between tire chips and geomembrane for use as a drainage layer in a landfill cover. *Geosynthetics '95*, NAGS, Tennessee, USA, 3: 1157-1168.

DIN EN 1897 (2002): Geotextiles and geotextile-related products – Determination of the compressive creep properties. German Institute for Standardization. European Standards.

EN ISO 12958 (1999): Geotextiles and geotextiles-related products – Determination of water flow capacity in their plane, International Organization for Standardization, 16p.

EPA, (1989). Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure, Seminar Document, EPA/625/4-89/022, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, OH, USA.

Fannin, R. J. & Choy, H. W. (1995). Factors influencing the long-term flow capacity of geonets, *Geosynthetics'95*, pp. 267-280.

Fannin, R. J., Choy, H. W. & Atwater, J. W. (1998). Interpretation of transmissivity test data for geonets. *Geosynthetics International*, vol. 5 (3): 265-285.

Faure, Y. H. (1988). *Approche Structurale du Comportement Filtrant-drainant des Géotextiles*. These de Doctor Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 337 p.

Gardoni, M. A. & Palmeira, E. M. (1999). Transmissivity of geotextiles under high normal stresses. *Geosynthetics' 99*. Boston, Massachusetts, USA, (2): 769-782.

Gardoni, M. A., Matsushita, R. Y., Jacques, M. A. & Palmeira, E. M. (1998). Estudo da transmissividade dos geotêxteis não tecidos sob elevadas pressões. XI Congresso Brasileiro da Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, Brasília, DF, (1): 1109-1117.

Gardoni, M. G. A. & Palmeira, E. M. (2002). Desempenho de drenos geotêxteis em condições de serviço. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS, São Paulo, (2): 823-833.

Gardoni, M. G. A. (2000). Estudo do Comportamento Dreno-Filtrante de Geossintéticos sob Compressão. Tese de Doutorado, Publicação G.T.D.-003A/2000, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 313 p.

Gardoni, M. G. A., Palmeira, E. M. & Mlynarek, J. (2000). Influence of vertical stresses on the hydraulic behaviour of nonwoven geotextiles. 3rd International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Warsaw, Poland, 127-133.

Giroud, J. P. (1986). Geotextiles to Geosynthetics: A Revolution on Geotechnical Engineering. 3rd International Conference on Geotextiles, Viena, Áustria.

Giroud, J. P. (1996). Granular filters and geotextiles filters. *Geofilters' 96*, Jean Lafleur and Andre L. Rollin (eds.), Quebec, Canada, pp. 565-678.

- Giroud, J. P., Zornberg, J.G. & Zhao, A. (2000). Hydraulic design of geosynthetic and granular liquid collection layers. *Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection Systems*, vol. 7 (4-6): pp. 285-380.
- Giroud, J., Zhao A. & Richardson G. (2000). Effect of thickness reduction on geosynthetic hydraulic transmissivity. *Geosynthetics International*, vol. 7(4-6): 433-452.
- Gray, T. (1997). Preliminary directional plan for CIWMB market development/ demonstrations contract, Prepared for the California Integrated Waste Management Board, 3 p.
- Hufenus, R. & Schrade, U. (2006). An optimized method to measure the hydraulic conductivity of geosynthetics under load. *Geotextile and Geomembranes*, 24 (4): 243-253.
- Humphrey, D. N. & Manion, W. P. (1992). Properties of Tire Chips for Lightweight Fill, Grouting, Soil Improvement, and Geosynthetics, R. H. Borden, et al., eds., *ASCE*, (2): 1344 - 1355.
- Humphrey, D. N. & Sandford, T. C. (1993). Tire chips as lightweight subgrade fill and retaining wall backfill. *Symposium on Recovery and Effective reuse of Discarded Materials and By-Products for Construction of Highway Facilities*, FHWA, U. S. Department of transportation, Washington D. C., USA, pp. 5-87 to 5-99.
- Hwu, B.-L., Sprague, C. J. & Koerner, R. M. (1990). Geotextile intrusion into geonets. 4th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, pp. 351-356.
- Jardim, N. S. (1995). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), e Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), São Paulo, SP, 278 p.
- Jarousseau, C & Gallo, R. (2004). Drainage geocomposites: relation between water flow capacity and thickness in the long term. 3rd EuroGeo conference, Munich, Germany,
- Jeon, H. Y., Kim, S. H., Chung, Y., Park, Y. M. & Chung, C. G. (2004). Analysis of the drainage performance of geotextile composites under confined loads. *Polymer Testing*, (23): 239-244.
- Khire, M. V., Member, P. E. & Haydar, M. M. (2005). Leachate recirculation using geocomposite drainage layer in engineered MSW landfills. *GeoFrontier's 05*, American Society of Civil Engineers, Austin, TX, USA.
- Koerner, G. R., Koerner, R. M. & Fahny, R. F. W. (1994). Long-term performance of geosynthetics in drainage applications. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council Report 367, Washington, DC, 53 p.
- Koerner, G. R., Koerner, R. M. & Fahny, R. F. W. (1996). Field performance of geosynthetics highway drainage systems. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Geocomposites*, ASTM STP 1281, Shobha Bhatia et al. (eds), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, pp. 165-195.
- Koerner, R. M. & Bove, J. A. (1983). In-plane hydraulic properties of geotextiles, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 6 (4): 190-195.

- Koerner, R. M. (1994). *Designing with Geosynthetics*. 3rd ed. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 783 p.
- Koerner, R. M., and Hwu, B. L. (1989). Behavior of Double Geonet Drainage Systems, *Geotechnical Fabrics Report*, 7, (5):39-44.
- Koerner, R. M., Koerner, G. R., Fahim, A. K. & Wilson-Fahmy, R. F. (1993). Long Term Performance of Geosynthetics in Drainage Application, Transportation Research Board, Washington, DC, Final Report NCHRP Project 15-13.
- Krzysztof, S. & Jesionek, P. E. (1998). Tire Shreds as Leachate Drainage Material at Municipal Solid Waste Landfills. Guidance Manual, Geosyntec Consultants, Inc., California, USA, 35 p.
- Leite, J. C. (1995). Metodologia para Elaboração da Carta de Susceptibilidade a Contaminação e Poluição das Águas Subsuperficiais. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 219 p.
- Mano, E. B. (1991). Polímeros como materiais de engenharia. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 197 p.
- Narejo, D. B. (2005). Determination of transmissivity of synthetic drainage materials at low gradients, *Geotextiles and Geomembranes*, (23): 534-539.
- Palmeira, E. M. & Gardoni, M. G. A. (2000). Geotextiles in filtration: a state of the art review and remaining challenges. International Symposium on Geosynthetics in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, in association with GeoEng2000, Melbourne, Australia, pp. 85-110.
- Palmeira, E.M., Silva, A.R.L. e Paranhos, H. (2006). Recycled and alternative materials in drainage systems of waste disposal areas. 5th International Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff, Reino Unido, 2: 1511-1518.
- Paranhos, H. (2002). Utilização de Sucatas PET, Entulho de Obras e Pneus como Material Drenante em Obras de Geotecnia e Meio Ambiente. Programa de Capacitação de Recursos Humanos para Atividade Estratégica, Universidade de Brasília, Brasília, 69 p.
- Rad, N. S., Gokmen C. & Stalcup, J. M. (1998). Factors influencing the hydraulic transmissivity on drainage geocomposite systems. 6th International Conference on Geosynthetics, IGS, Atlanta, Georgia, USA, (2): 349-354
- Santos, D. B. (2005). Estudo do uso das garrafas PET em geotecnia. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 213 p.
- Sieira, A. C. C. F., Gerscovich, D. M. S., Medeiros, L. V. & Sayão, A. S. F. J. (2006). Simulação Numérica de um Muro Experimental Solo-Pneus, *Boletim SBMAC*, Rio de Janeiro, vol. 7 (2): 337-347.
- Silva, A. R. L. (2004). Estudo do Comportamento de Sistemas Dreno-Filtrante em Diferentes Escalas em Sistemas de Drenagem de Aterros Sanitários. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-025/2004, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 329 p.

Van Zanten, K. (1986). The relation between specification of geotextiles and their essential properties. *Geotextiles and Geomembranes*, (3): 53-76.

Warith, M.A., Evgin E. & Benson, P.A.S. (2004). Suitability of shredded tires for use in landfill leachate collection systems. *Waste Management*, 24: 967–979.

PLANILHA DE ENSAIO UTILIZADA PARA REGISTRO DOS DADOS DO ENSAIO DE TRANSMISSIBILIDADE HIDRÁUICA



ENSAIO DE TRANSMISSIBILIDADE EM GEOSSINTÉTICOS

Operador: _____
 Data: _____

1- Dados da amostra:

Tipo: _____ Gramatura: _____ g/m²
 Espessura: _____ mm Origem: _____

2- Dados do ensaio:

Gradiente hidráulico: _____ Condições de contorno: _____

Observações: _____

Leituras iniciais (defletômetros): Div: _____ mm

L1: _____ L2: _____ L3: _____

Carregamento: **25 kPa** _____ kgf _____ div

Leituras finais (defletômetros): L1: _____ L2: _____ L3: _____

Variações de espessura (mm): e1: _____ e2: _____ e3: _____

Leitura (vazões):	Tempo: _____ s		Média
Volume (ml)			
Capacid._descarga (l/s.m)	L1: _____	L2: _____	L3: _____
θ (cm ² /s)			

Carregamento: **50 kPa** _____ kgf _____ div

Leituras finais (defletômetros): L1: _____ L2: _____ L3: _____

Variações de espessura (mm): e1: _____ e2: _____ e3: _____

Leitura (vazões):	Tempo: _____ s		Média
Volume (ml)			
Capacid._descarga (l/s.m)	L1: _____	L2: _____	L3: _____
θ (cm ² /s)			

Carregamento: **100 kPa** _____ kgf _____ div

Leituras finais (defletômetros): L1: _____ L2: _____ L3: _____

Variações de espessura (mm): e1: _____ e2: _____ e3: _____

Leitura (vazões):	Tempo: _____ s		Média
Volume (ml)			
Capacid._descarga (l/s.m)	L1: _____	L2: _____	L3: _____
θ (cm ² /s)			

Carregamento: **200 kPa** _____ kgf _____ div

Leituras finais (defletômetros): L1: _____ L2: _____ L3: _____

Variações de espessura (mm): e1: _____ e2: _____ e3: _____

Leitura (vazões):	Tempo: _____ s		Média
Volume (ml)			
Capacid._descarga (l/s.m)	L1: _____	L2: _____	L3: _____
θ (cm ² /s)			

Carregamento: **400 kPa** _____ kgf _____ div

Leituras finais (defletômetros): L1: _____ L2: _____ L3: _____

Variações de espessura (mm): e1: _____ e2: _____ e3: _____

Leitura (vazões):	Tempo: _____ s		Média
Volume (ml)			
Capacid._descarga (l/s.m)	L1: _____	L2: _____	L3: _____
θ (cm ² /s)			