



Orlando da Silva Rojas

Estudo do comportamento de um geocomposto drenante em relação à sua capacidade de vazão

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro
Setembro de 2014



Orlando da Silva Rojas

Estudo do comportamento de um geocomposto drenante em relação à sua capacidade de vazão

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Michéle Dal Toé Casagrande
Orientadora

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

Prof. Raquel Quadros Veloso

Departamento de Engenharia Civil — PUC-Rio

Prof. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães
Instituto Militar de Engenharia

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de setembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Orlando da Silva Rojas

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade San Andrés de La Paz - UMSA em 2009. Principais áreas de interesse: Novos materiais na construção.

Ficha Catalográfica

Rojas, Orlando da Silva

Estudo do comportamento de um geocomposto drenante em relação à sua capacidade de vazão / Orlando da Silva Rojas ; orientador: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2014.

126 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Geocomposto. 3. Permeabilidade planar. 4. Transmisividade. 5. Fluência. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD:624

*Agradeço primeiramente a Deus que me iluminou,
guiou-me e esteve sempre presente.
A minha amada mãe Vilma, pelos pensamentos,
amor infinito, carinho e dedicação.
A meu irmão Roberto por todo o apoio e força,
para levar em diante este trabalho.*

Agradecimentos

A Deus!

À professora Michéle Dal Toé Casagrande, pela dedicação, paciência, atenção dispensada durante o desenvolvimento da tese, por o conhecimento compartilhado e a amizade.

À Macaferri pela disponibilização de material e equipamento para o desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao Eng. Paulo Rocha pela atenção dispensada.

À minha família, em especial à minha tia Elizabeth, pela sua eterna preocupação.

Aos meus amigos e colegas de Pós Graduação da PUC-Rio Daniel Velez, Julia Camargo, Carlos Luza, Rhaissa Rodrigues, Natália Louzada, Gustavo Sobreira, Sandra Trindade, pela amizade e companheirismo e colaboração de este trabalho.

Também aos amigos que foram de fundamental apoio, Matias, Rodrigo, Roberto, Oswaldo, Arquimedes.

À banca examinadora, pelas sugestões ao presente trabalho.

À Rita de Cassia, pelo apoio e preocupação.

Aos professores da PUC-Rio, pelas aulas ministradas, e pelos quais guardo grande respeito, apreço e admiração.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, pela oportunidade de estudar nesta prestigiosa instituição

Resumo

da Silva Rojas, Orlando; Dal Toé Casagrande, Michéle (orientador). **Estudo do comportamento de um geocomposto drenante em relação à sua capacidade de vazão**. Rio de Janeiro, 2014. 126p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos grandes problemas apresentados nas Rodovias é a drenagem de água, gerada principalmente pela chuva, tendo como consequência a diminuição da resistência na estrutura do pavimento ou destruição do mesmo, causada pela pressão hidráulica. Esta pesquisa tem o objetivo de analisar a fluência do geocomposto, avaliando o comportamento drenante deste no solo, em relação à sua capacidade de vazão. Foram realizados ensaios laboratoriais de curto e médio prazo baseado no ensaio de permeabilidade planar e transmissividade em que, à medida que o geocomposto é comprimido por um carregamento constante de 10 kPa, sua vazão planar decresce e a deformação da amostra aumenta. Determinou-se a deformação por compressão ao longo do tempo de ensaio do material, que está diretamente ligado à sua capacidade de vazão. Para conferir este comportamento foi feita a modelagem da amostra de solo argiloso que inicialmente se encontra saturado e que é parte do subleito de uma rodovia em um estudo de caso, com o geocomposto como parte do sistema de drenagem (trincheira drenante) no programa PLAXIS, nas mesmas condições de carregamento, determinando-se a variação da fluência com inserção de geocomposto o que foi comparando com os valores obtidos no laboratório. Os resultados foram satisfatórios e se conclui que há geração de deformações causadas pelos carregamentos no solo, que influenciam na capacidade de vazão de drenagem do conjunto.

Palavras-chave

Geocomposto.; permeabilidade planar.; transmissividade.; fluência.

Abstract

da Silva Rojas, Orlando; Dal Toé Casagrande, Michéle (advisor). **Study of the behavior of a draining geocomposite in relation of the flow rate capacity.** Rio de Janeiro, 2014. 126p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the main problems that are seen on highways is that of water drainage, generated mainly by rain. This may reduce the quality and structure of the pavement as time passes or it may damage the pavement because of hydraulic pressure. This research intends to object an analysis of fluency of geocomposite; in so doing it will evaluate the behavior of geocomposite drainage on soil in relation to its capacity to flow. Test were carried out in short and half term in laboratory, based on planar permeability and transmisivity ,where as the geocomposite is compressed by a constant load -in our case of 10 kPa its planar wealth decreases, but the distortion of the sample increases. To determine the distortion for compression throughout the time of the material testing, which is directly related to the flow capacity. To verify the results obtained in the laboratory, the model of the soil samples and the geocomposite were analyzed in PLAXIS program, taking into account the same conditions and characteristics of the tests. This helped us to determine the variation of fluency with the geocomposite inclusion compared to the values obtained in the laboratory. The results were satisfactory and it is concluded that there is generation of deformation caused by loads on the ground, influencing the flow capacity of the drain assembly.

Keywords

Geocomposite, planar permeability, transmisivity, fluency, creep.

Sumário

1	Introdução e objetivos	20
1.1.	Introdução	20
1.2.	Objetivos	21
1.3.	Estrutura da dissertação	21
2.	Revisão da literatura I: Comportamento de solo reforçado com geossintético	23
2.1.	Geotêxteis	24
2.2.	Uso de geossintéticos nas rodovias	25
2.2.1	Proteção de geomembranas com geossintéticos	26
2.3.	Funções desempenhadas pelos geossintéticos	27
2.3.1.	Separação	27
2.3.2.	Filtração	28
2.3.3.	Drenagem	28
2.3.4.	Impermeabilização	29
2.3.5.	Reforço	29
2.3.6.	Proteção	30
2.4.	Propriedades e normas de ensaios hidráulicos	30
2.4.1	Permeabilidade transversal	30
2.4.2	Ensaio de determinação de espessura	32
2.5.	Aplicação dos geossintéticos em pavimentos	32
2.5.1.	Recapeamento asfáltico	32
2.5.2.	Proteção de impermeabilização	34
2.6.	Drenos longitudinais profundos	35
2.7.	Drenos de pavimentos	35
2.8.	Outras aplicações e tecnologias de uso dos geotêxteis	37
2.9.	Reforço de solo com geossintético-histórico	37
2.9.1.	Estruturas de solos finos coesivos com reforços permeáveis	39
2.9.2.	Interação solos coesivos-reforços permeáveis	39
2.9.3	Efeito de confinamento nas propriedades mecânicas de geotêxteis não tecidos	42

3. Revisão da literatura II: Fluxo em meios porosos	46
3.1. Meio poroso saturado e parcialmente saturado	46
3.2. Equação fundamental do fluxo no meio poroso	47
3.3. Método dos elementos finitos para fluxo no meio poroso	50
3.3.1. Elementos finitos bidimensionais no sistema de coordenadas	51
3.3.2. Funções de interpolação	52
3.3.3. Elementos triangulares com funções de interpolação de grau elevado	53
4. Materiais e métodos	55
4.1. Introdução	55
4.2. Geocomposto	55
4.3. Etapa experimental	56
4.3.1. Ensaio de permeabilidade planar e transmisividade	56
4.3.1.1 Normas	56
4.3.1.2 Método	56
4.3.1.3 Especificações	58
4.3.1.4 Equipamento	59
4.3.1.4.1 Água	60
4.3.1.4.2 Recipiente de medida	61
4.3.1.5. Amostra	61
4.3.1.5.1. Condição dos corpos de prova	62
4.3.1.6. Procedimento do ensaio	62
4.3.1.7. Cálculos	63
4.3.2. Ensaio de determinação de espessura	64
4.3.2.1. Normas	64
4.3.2.2. Procedimento	64
4.3.2.3. Aplicação	65
4.4. Verificação de caso	65
4.4.1. Introdução	66
4.4.2. Software plaxis 2D	67
4.4.3. Modelos constitutivos	68
4.4.3.1. Modelo Soft Soil Creep	68
4.4.4 Geometria do modelo	72
4.4.5 Materiais	73

4.4.6. Obtenção de dados para interpretação	73
5. Resultados e análises	75
5.1. Introdução	75
5.2. Etapa experimental	75
5.2.1. Ensaio de transmissividade planar	75
5.2.2. Determinação da fluência por compressão da espessura	79
5.3. Estudo de caso	80
5.3.1.1. Relações de McClelland	81
5.3.1.2. Metodologia de cálculo	82
5.3.1.3. Verificação da capacidade de vazão do Mac Drain TD	83
5.4. Análise dos cálculos	84
5.4.1. Caso 1-1	85
5.4.2. Malha	85
5.4.3. Modelo utilizado	85
5.4.4. Propriedades hidráulicas	86
5.4.5. Condições de contorno	87
5.4.6. Resultados	87
5.4.7. Análise da fluência	87
5.4.8 Análise de fluxo	90
5.5. Caso 2-1	92
5.5.1. Análise da fluência	93
5.5.2 Análise de fluxo	95
5.6. Caso 3-1	98
5.6.1. Análise da fluência	98
5.5.2 Análise de fluxo	101
5.7. Caso 1-2	103
5.7.1. Malha	104
5.7.2. Modelo utilizado	104
5.7.3. Propriedades hidráulicas	105
5.7.4. Condições de contorno	105
5.7.5. Resultados	105
5.7.6. Análise da fluência	106
5.7.8 Análise de fluxo	108

5.8. Caso 2-2	111
5.8.1. Análise da fluência	111
5.8.2 Análise de fluxo	113
5.9. Caso 3-2	116
5.9.1. Análise da fluência	116
5.9.2 Análise de fluxo	119
6. Conclusões	121
6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	123
7. Referências Bibliográficas	124

Lista de figuras

Figura 2.1 Arranjo estrutural dos principais geotêxteis tecidos e não tecidos. (Fonte: Benjamin, 2006)	24
Figura 2.2 Amostra de geotêxtil exposta contraluz.	25
Figura 2.3 Funções e propriedades dos geotêxteis.	27
Figura 2.4 Função separação.	27
Figura 2.5 Função filtração.	28
Figura 2.6 Função drenagem planar.	29
Figura 2.7 Função reforço.	29
Figura 2.8 Função proteção.	30
Figura 2.9 Esquema de ensaio para determinação de permeabilidade transversal de geotêxteis.	31
Figura 2.10 Recapeamento asfáltico com utilização de geotêxtil.	32
Figura 2.11 Aplicação de geotêxtil sobre a capa antiga, já imprimada com asfalto através de suporte rodante.	33
Figura 2.12 Amostra extraída de recapamento asfáltico, após anos de uso, onde se constata o bloqueio de ascensão das trincas pela ação do geotêxtil.	33
Figura 2.13 Seção esquemática de proteção de manta asfáltica em impermeabilização de laje.	34
Figura 2.14 Seção esquemática de dupla proteção de geomembrana polimérica/elastométrica delgada em impermeabilização de laje.	34
Figura 2.15 Seção esquemática de drenos longitudinais profundos ao longo de cortes rodo-ferroviários.	35
Figura 2.16 Seção esquemática de pavimento viário dotado de drenos de pavimento paralelos.	36
Figura 2.17 Dreno de pavimento rodoviário construído junto com a estrada.	36
Figura 2.18 Resultados de cisalhamento direto de interface de três diferentes tipos de geotêxteis em solo argiloso	41
Figura 2.19 Ensaios arrancamento em argila: a) condição não drenada; b) condição drenada	42
Figura 2.20 Resultados de tração confinada de geotêxteis não tecidos: a) efeito do nível do confinamento; b) efeito da superfície de confinamento	43

Figura 2.21 Comparação entre ensaios de fluência confinada e não confinada de: a) geotêxtil não tecido resinado; b) não tecido agulhado.	45
Figura 3.1 Distribuição da pressão no meio poroso.	46
Figura 3.2 Fluxo através de um elemento infinitesimal no meio poroso	47
Figura 3.3 Condutividade hidráulica meio estratificado	48
Figura 3.4 MEF sistemas de coordenadas a) global, b) local.	51
Figura 3.5 a) Função de interpolação quadrática, b) Função de interpolação cubica (Fonte: Kazda, 1990).	53
Figura 3.6 Elemento triangular de quarta ordem utilizado no programaPlaxis.	54
Figura 4.1 Vista geral do geocomposto utilizado nos ensaios.	56
Figura 4.2 Esquema do ensaio de permeabilidade planar e transmissividade.	57
Figura 4.3 Esquema do ensaio de permeabilidade planar e transmissividade.	57
Figura 4.4 Equipamento para ensaio de transmissividade - detalhe da calha.	58
Figura 4.5 Equipamento ensaio de transmissividade - detalhe do reservatório	58
Figura 4.6 Compressão-deflexão.	59
Figura 4.7 Detalhe do ensaio de espessura com pressões de 20 kPa.	65
Figura 4.8 Ligação entre tensão e deformação: equação constitutiva.	66
Figura 4.9 Relação logarítmicaentre a deformação volumétrica e a tensão efetiva média (Fonte: Brinkgreve, Broere, &Waterman, 2002).	69
Figura 4.10 Superfícies de Rotura do modelo Soft Soil no plano $p'-q$ (Fonte: Brikgreve, Broere, &Waterman, 2002).	70
Figura 4.11 Consolidação e fluência em ensaio edométricos (Fonte: Brinkgreve, Broere,&Waterman, 2002)	71
Figura 4.12 Exemplo de malha de elementos finitos adoptada.	73
Figura 5.1 Curva de fluência a compressão, amostra 1.	76
Figura 5.2 Curva de fluência a compressão, amostra 2.	76
Figura 5.3 Curva de fluência a compressão, amostra 3.	76
Figura 5.4 Curva de fluência a compressão, amostras 1-2-3	77
Figura 5.5 Curva de vazão ao longo do tempo	77
Figura 5.6 Curva deformação - permeabilidade.	78
Figura 5.7 Curvas do ensaio de fluência em compressão para 1 camada do geocomposto.	79
Figura 5.8 Curvas do ensaio de fluência em compressão para 1 camada do geocomposto (Fonte: Rafael Rivero Plácido USP)	80

Figura 5.9 Drenagem subsuperficial com geocomposto como trincheira drenante	81
Figura 5.10 Seção tipo que apresenta as condições de contorno para o exemplo.	81
Figura 5.11 Representação do rebaixamento da superfície freática causado pela utilização de drenagem por trincheira.	82
Figura 5.12 Ábaco interpolando as condições impostas pelo método proposto por McClelland (Fonte: McClelland 1943).	83
Figura 5.13 Seção de cálculo do solo para 1 dreno.	85
Figura 5.14 Malha da seção de cálculo caso 1.	85
Figura 5.15 Aplicação de carregamento e condições de contorno.	87
Figura 5.16 Seção deformada caso 1-1	88
Figura 5.17 Variação do deslocamento solo-geossintético caso 1-1.	88
Figura 5.18 Gráfico de deslocamento solo-geossintético caso 1-1.	89
Figura 5.19 Gráfico de deslocamento no solo caso 1-1.	89
Figura 5.20 Gráfico de deformações no solo exx.	90
Figura 5.21 Gráfico de variação da Poro pressão caso 1-1.	90
Figura 5.22 Variação da poro pressão com a espessura do solo.	91
Figura 5.23 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo caso 1-1.	91
Figura 5.24 Variação da rede de fluxo	91
Figura 5.25 Curva da vazão ao longo do tempo.	92
Figura 5.26 Seção de cálculo do solo para 2 drenos.	92
Figura 5.27 Aplicação de carregamento e condições de contorno.	93
Figura 5.28 Seção deformada Solo-geossintético caso 2-1.	93
Figura 5.29 Variação de deslocamento solo-geossintético caso 2-1	94
Figura 5.30 Deslocamento solo-geossintético	94
Figura 5.31 Gráfico de deslocamento no solo	95
Figura 5.32 Gráfico de deformações no solo exx.	95
Figura 5.33 Variação da Poro pressão, com a espessura do solo	96
Figura 5.34 Gráfico de variação da Poro pressão.	96
Figura 5.35 Gráfico de variação da rede de fluxo.	97
Figura 5.36 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo.	97
Figura 5.37 Curva da vazão ao longo do tempo.	97
Figura 5.38 Seção de cálculo do solo para 3 drenos.	98
Figura 5.39 Condições do modelo de cálculo.	98
Figura 5.40 Seção deformada do solo - geossintético caso 3-1.	99

Figura 5.41 Variação de deslocamento solo-geossintético caso 3-1.	99
Figura 5.42 Deslocamento solo-geossintético, caso 3-1.	100
Figura 5.43 Deslocamento no solo-geossintético, caso 3-1.	100
Figura 5.44 Gráfico de deformações no solo exx, caso 3-1.	101
Figura 5.45 Variação da Poro pressão, com a espessura do solo caso 3-1.	101
Figura 5.46 Gráfico de variação da Poro pressão.	102
Figura 5.47 Gráfico de variação da rede de fluxo, caso 3-1.	102
Figura 5.48 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo.	103
Figura 5.49 Curva da vazão ao longo do tempo	103
Figura 5.50 Seção de cálculo para 1 dreno, caso 1-2	104
Figura 5.51 Malha da seção de cálculo, caso 1-2.	104
Figura 5.52 Aplicação de carregamento e condições de contorno.	105
Figura 5.53 Seção deformada solo - geossintético caso 1-2.	106
Figura 5.54 Variação de deslocamento solo-geossintético.	106
Figura 5.55 Gráfico de deslocamento solo-geossintético.	107
Figura 5.56 Gráfico de deslocamento no solo.	107
Figura 5.57 Gráfico de deformações no solo exx.	108
Figura 5.58 Variação da poro pressão, com a espessura do solo caso 1-2.	108
Figura 5.59 Gráfico de variação da Poro pressão, caso 1-2.	109
Figura 5.60 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo.	109
Figura 5.61 Variação da rede de fluxo.	110
Figura 5.62 Curva da vazão ao longo do tempo.	110
Figura 5.63 Seção de cálculo para 2 drenos.	111
Figura 5.64 Aplicação de carregamento e condições de contorno.	111
Figura 5.65 Seção deformada Solo-geossintético.	111
Figura 5.66 Variação de deslocamento solo-geossintético, caso 2-2.	112
Figura 5.67 Gráfico de deslocamento solo-geossintético, caso 2-2	112
Figura 5.68 Gráfico de deslocamento no solo, caso 2-2	113
Figura 5.69 Gráfico de deformações no solo exx, caso 2-2.	113
Figura 5.70 Variação da Poro pressão, com a espessura do solo caso 2-2.	114
Figura 5.71 Gráfico de variação da Poro pressão.	114
Figura 5.72 Gráfico de variação da rede de fluxo, caso 2-2	115
Figura 5.73 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo.	115
Figura 5.74 Curva de variação da vazão ao longo do tempo, caso 2-2.	115

Figura 5.75 Seção de cálculo para 3 drenos.	116
Figura 5.76 Condições do modelo de cálculo.	116
Figura 5.77 Seção deformada.	116
Figura 5.78 Gráfico de deslocamento solo-geossintético.	117
Figura 5.79 Deslocamento solo-geossintético.	117
Figura 5.80 Deslocamento no solo-geossintético.	118
Figura 5.81 Gráfico de deformações no solo ϵ_{xx} .	118
Figura 5.82 Variação da poro pressão com a espessura.	119
Figura 5.83 Gráfico de variação da poro pressão.	120
Figura 5.84 Gráfico de variação da rede de fluxo	120
Figura 5.85 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo.	121
Figura 5.86 Curva da vazão ao longo do tempo.	121

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Funções de alguns geossintéticos em projetos de engenharia (Fonte: Vertematti, 2004).	23
Tabela 4.1 Características gerais do geocomposto.	56
Tabela 4.2 Propriedades do solo	73
Tabela 5.1 Correlações obtidas pelas experiências de McClelland	83
Tabela 5.2 Capacidade de vazão do MacDrain TD.	84
Tabela 5.3 Propriedades do solo para a modelagem, caso 1.	86
Tabela 5.4 Propriedades hidráulicas do solo, caso 1	86
Tabela 5.5 Propriedades do solo para a modelagem, caso 2.	104
Tabela 5.6 Propriedades hidráulicas do solo, caso 2.	105

Lista de Símbolos

Q	Vazão.
ΔH	Perda de carga total.
K_T	Permeabilidade transversal.
L	Comprimento da amostra na direção do fluxo.
A	Área do fluxo.
θ	Transmissividade hidráulica
k	Condutividade hidráulica do meio poroso.
v_x	Velocidade de fluxo na direção x.
v_y	Velocidade de fluxo na direção y.
v_z	Velocidade de fluxo na direção z.
$\frac{\partial v_x}{\partial x}$	Variação da velocidade na direção x.
$\frac{\partial v_y}{\partial y}$	Variação da velocidade na direção y.
$\frac{\partial v_z}{\partial z}$	Variação da velocidade na direção z.
$h(x,y,z)$	Potencial hidráulico.
k_{xx}	Permeabilidade na direção x
K_{yy}	Permeabilidade na direção y.
K_{zz}	Permeabilidade na direção z
ND	Número de canais de fluxo.
NF	Número de quedas equipotenciais.
N_i	Funções de interpolação.
k^*	Índice de expansibilidade.
K_{dr}	Módulo de rigidez volumétrica.
E_{dr}	Módulo de deformabilidade.
ν_{dr}	Coefficiente de Poisson.
P_p	Tensão de pré-consolidação isotrópica.
p^{eq}	Tensão média efetiva.
p_p^{eq}	Tensão equivalente de pré-consolidação.
ε	Fluência (compressão secundária).
ε_c	Fluência no fim da consolidação primária.
C_B	Constante do material.
t	Tempo.
ε^H	Deformação volumétrica logarítmica.
μ^*	Índice de compressão secundária modificada.
γ_s	Peso volumétrico seco.
γ_{ss}	Peso volumétrico saturado.
FR_{IN}	Fator de redução, por intrusão do solo.
FR_{CR}	Fator de redução, por fluência.
FR_{CC}	Fator de redução, colmatção química.
FR_{BC}	Fator de redução, colmatção biológica.
e_0	Índice de vazios.

ϕ	Ângulo de resistência ao corte.
C	Coesão
E'	Modulo de elasticidade.
ν	Coefficiente de Poisson.
u_x	Deslocamento na direção x.
u_y	Deslocamento na direção y.