



**EFEITOS DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA DE GEOSSINTÉTICOS NO
COMPORTAMENTO COMO FILTRO EM SISTEMAS DE COBERTURA DE
ESTRUTURAS DE CONFINAMENTO DE RESÍDUOS**

Simão Pedro de Castro Neves Marques Moreira
Outubro de 2009

Dissertação para Mestrado em Engenharia do Ambiente
na
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

à memória do meu pai

Tratado sobre a luz

Sol

Noite

Lua

E estrelas

O teu cabelo em fogo

O teu peito cheio de dor

A tua voz dourada

Silêncio

E tu

Perdido no verde dos montes

queimados

Da nossa terra

A tua terra que nunca será a minha

Por vontade de Deus

Pelo meu pecado

Grande

Humano

Meu

Pessoal

[24 de Junho de 2008

São João Baptista

Ao Simão]

Pe. José Alfredo

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
AGRADECIMENTOS.....	xi
ÍNDICE DE TEXTO.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE QUADROS.....	xxiii
SIMBOLOGIA.....	xxv
 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	 1
 CAPÍTULO 1 - GEOSSINTÉTICOS.....	 5
 CAPÍTULO 2 - DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS.....	 39
 CAPÍTULO 3 - FILTRAGEM COM GEOSSINTÉTICOS.....	 69
 CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PAPEL DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS.....	 107
 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 135
 BIBLIOGRAFIA.....	 137

RESUMO

A danificação mecânica que ocorre durante a instalação dos geossintéticos pode afectar o seu desempenho durante o tempo de vida útil das construções onde estão inseridos. A danificação durante a instalação (DDI) dos geossintéticos pode ser avaliada, quer através de ensaios laboratoriais, nos quais se simula as acções de danificação mecânica, quer através de aterros experimentais, em que se procede à instalação e remoção imediata das amostras de geossintéticos.

A norma EN ISO 10722 (2007) descreve um procedimento laboratorial para simular os danos sofridos pelos geossintéticos durante a instalação em obra. A degradação ocorrida nos materiais pode ser avaliada através da monitorização de propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Deste modo, é possível concluir acerca da eventual alteração no comportamento dos geossintéticos, fornecendo dados úteis para projecto e permitindo o conhecimento dos mecanismos de danificação e dos seus efeitos.

No presente trabalho, procedeu-se ao estudo do efeito da DDI nas propriedades hidráulicas, nomeadamente, na permeabilidade à água na direcção normal ao plano, de geossintéticos normalmente usados como filtros. Assim, cinco diferentes geotêxteis não tecidos foram submetidos a ensaios laboratoriais de DDI e, posteriormente, foi avaliado o seu comportamento hidráulico, através de ensaios de acordo com NP EN ISO 11058 (2003). Na determinação das características hidráulicas dos geotêxteis foi utilizado um equipamento protótipo concebido para o Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Os resultados obtidos para as amostras danificadas laboratorialmente foram comparados com os resultados das amostras de referência, isto é, sem qualquer tipo de danificação.

ABSTRACT

The mechanical damage that occurs on geosynthetics during construction operations can affect their lifetime performance. Damage during installation (DDI) of geosynthetics can be assessed by laboratory tests, in which the construction damage is simulated, and by experimental landfills, in which the geosynthetics specimens are placed under the landfill and, then, removed.

The EN ISO 10722 (2007) describes a laboratory procedure that simulates mechanical damage on geosynthetics during installation operations. The damage can be assessed evaluating some physical, mechanical and hydraulic properties of geosynthetics. With this procedure, it is possible to conclude on the modification on geosynthetics performance. It provides, also, useful information to design and increases knowledge on damage and its effects.

In this research, hydraulic properties of geosynthetics, like permeability normal to plane were studied mainly on geotextiles. In fact, this kind of geosynthetics are commonly used like filters on construction. Five different nonwoven geotextiles were damaged in laboratory, according to EN ISO 10722 (2007) procedure and, then, their permeability normal to plane was assessed according to NP EN 11058 (2003) procedure. The hydraulic tests were carried on a prototype equipment developed in the Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). The permeability of the damaged samples was compared with the permeability of the reference samples (not damaged).

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos são muitos, a uma grande quantidade de pessoas boas:

- à Sra. Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, por me ter estendido a mão e me ter convidado a trabalhar no Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em 2003; por me ter orientado neste trabalho nas fases em que andei sem rumo; pelo seu exemplo de honestidade e de rigor que são um verdadeiro conforto e um alento para quem de perto com ela trabalha;
- à Sra. Professora Doutora Margarida Pinho Lopes e ao Mestre Rui Silvano, pelo acolhimento na “comunidade geossintética” da FEUP; pelo empenho, pela preocupação, pelas suas caras amigas;
- ao Mestre José Ricardo Carneiro, pela amizade e pela partilha permanente;
- aos Srs. Engenheiros André Lopes e Marc Paulo Igreja pelas horas, pelos dias, pelos meses e pelos anos de cumplicidade;
- ao Mestre Miguel Paula e à Sra. Professora Doutora Castorina Vieira, pela simpatia;
- à Sra. Professora Doutora Cristina Gomes, por ter estado perto, no início, antes de a investigação ter tomado este rumo;
- à D. Maria Teresa e à D. Júlia, pelo cuidado;
- ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção da FEUP, pela disponibilidade;
- ao meu actual chefe, Sr. Dr. Alexandre Garcêz, pela compreensão, pelo apoio;

- ao Sr. Adriano Mota, meu fiscal, pelos seus ombros largos;
- à Rosa Barros, pela serenidade;
- ao Sr. Padre Dr. José Alfredo Costa, meu pároco, por ser, por estar, por tanto;
- à minha tia Ana Maria, por me dar a conhecer uma força incrível, que é a sua, que parece não ter limites;
- à minha irmã, por me pôr diante de uma inteligência brilhante, que é a sua, que parece não ter limites;
- à minha mãe, pelo amor, que é seu, que é tudo, que parece não ter limites.

E a Deus, pelo que me deu; pelo que, também, já me tirou.

ÍNDICE DE TEXTO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
CAPÍTULO 1 - GEOSSINTÉTICOS	
1.1 - INTRODUÇÃO.....	5
1.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS.....	6
1.3 - MATERIAIS CONSTITUINTES.....	9
1.4 - PROCESSOS DE FABRICO.....	11
1.4.1 - COMPONENTES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	11
1.4.2 - GEOTÊXTEIS TECIDOS E NÃO TECIDOS.....	13
1.4.3 - GEOGRELHAS.....	15
1.4.4 - GEOMEMBRANAS.....	16
1.4.5 - GEOTAPETES.....	17
1.5 - PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	18
1.5.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS.....	19
1.5.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	19
1.5.3 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS.....	21
1.5.4 - DURABILIDADE.....	21
1.5.5 - NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL AOS ENSAIOS DE GEOSSINTÉTICOS.....	24
1.6 - FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS.....	30
1.6.1 - DRENAGEM.....	31
1.6.2 - FILTRAGEM.....	31
1.6.3 - PROTECÇÃO.....	32
1.6.4 - REFORÇO.....	32

1.6.5 - SEPARAÇÃO.....	33
1.6.6 - CONTROLO DA EROÇÃO SUPERFICIAL.....	33
1.6.7 - BARREIRA DE FLUIDOS.....	33
1.7 - COLOCAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS EM OBRA.....	34

CAPÍTULO 2 - DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

2.1 - INTRODUÇÃO.....	39
2.2 - DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO.....	40
2.2.1 - TIPOS DE DANOS PROVOCADOS EM GEOSSINTÉTICOS.....	40
2.2.2 - FACTORES QUE INFLUENCIAM A DDI.....	44
2.3 - SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA DDI.....	46
2.4 - INFLUÊNCIA DA DDI LABORATORIAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS.....	52
2.4.1 - INTRODUÇÃO.....	52
2.4.2 - MATERIAIS UTILIZADOS E PROGRAMA DE ENSAIOS.....	53
2.4.3 - RESULTADOS OBTIDOS.....	55
2.4.3.1 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE GEOSSINTÉTICO.....	56
2.4.3.2 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO CONFINANTE.....	61
2.4.4 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS POR PAULA (2003) COM OS DE OUTROS AUTORES.....	66
2.5 - PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO ESTUDO DE PAULA (2003).....	68

CAPÍTULO 3 - FILTRAGEM COM GEOSSINTÉTICOS

3.1 - INTRODUÇÃO.....	69
3.2 - APLICAÇÕES DE GEOTÊXTEIS COMO FILTROS.....	70

3.3 - PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS ASSOCIADAS À FUNÇÃO DE FILTRAGEM.....	73
3.3.1 - POROSIDADE.....	73
3.3.2 - PERMEABILIDADE.....	75
3.3.2.1 - PERMEABILIDADE NO PLANO DO MATERIAL.....	76
3.3.2.2 - PERMEABILIDADE NO PLANO NORMAL AO DO MATERIAL.....	81
3.4 - DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO DO MATERIAL.....	87
3.4.1 - EQUIPAMENTO DE ENSAIO DA PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO DO MATERIAL.....	88
3.4.2 - METODOLOGIA DE ENSAIO - MÉTODO DE CARGA CONSTANTE.....	95
3.5 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA DDI NA FUNÇÃO DE FILTRAGEM	101
3.5.1 - DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE FILTRAGEM COM GEOTÊXTEIS.....	102
3.5.2 - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA DDI.....	104
 CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PAPEL DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS	
4.1 - INTRODUÇÃO.....	107
4.2 - MATERIAIS UTILIZADOS.....	108
4.2.1 - GEOTÊXTEIS.....	108
4.2.2 - MATERIAIS GRANULARES.....	113
4.3 - PROGRAMA DE ENSAIOS.....	114
4.4 - INFLUÊNCIA DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOTÊXTEIS.....	115
4.5 - INFLUÊNCIA DA DDI NAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS.....	119

4.5.1 - INTRODUÇÃO.....	119
4.5.2 - APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	120
4.5.2.1 - AMOSTRAS INTACTAS.....	120
4.5.2.2 - AMOSTRAS DANIFICADAS LABORATORIALMENTE.....	125
4.5.3 - ANÁLISE DE RESULTADOS.....	129
4.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133
 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	 135
 BIBLIOGRAFIA.....	 137

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 - GEOSSINTÉTICOS

Figura 1.1 -	Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura (adaptado de Pinho-Lopes, 2004).....	7
Figura 1.2 -	Exemplos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido com tira e monofilamento; b) geotêxtil tecido com multifilamento e monofilamento; c) geotêxtil não tecido mecanicamente ligado (agulhado); d) geotêxtil não tecido termicamente ligado (Lopes, 1998).....	7
Figura 1.3 -	Exemplos de geogrelhas: a) geogrelha uniaxial de uniões integrais; b) geogrelha biaxial de uniões integrais; c) geogrelha de uniões tecidas; d) geogrelha de uniões fundidas; e) geogrelha com uniões efectuadas por laser (Lopes, 1998).....	8
Figura 1.4 -	Exemplos de geossintéticos: a) geocélulas; b) georredes; c) geomalhas; d) geotapetes.....	8
Figura 1.5 -	Exemplos de geomembranas: a) geomembrana lisa; b) e c) geomembrana rugosa (pitonada).....	8
Figura 1.6 -	Exemplos de geocompósitos: a) geocompósito de drenagem; b) geocompósito bentonítico.....	9
Figura 1.7 -	Componentes básicos dos geossintéticos (adaptado de Koerner, 1999 e Lopes, 1998).....	12
Figura 1.8 -	Estiramento dos componentes básicos dos geossintéticos (Lopes, 1998).....	13
Figura 1.9 -	Processo de fabrico de geotêxteis tecidos (adaptado de Koerner, 1999).....	14
Figura 1.10 -	Ligação mecânica por agulhagem de geotêxteis não tecidos: a) esquema geral; b) pormenor das agulhas utilizadas adaptado de Koerner, 1999).....	14

Figura 1.11 -	Processo de fabrico de geogrelhas por perfuração seguida de estiramento (adaptado de Koerner, 1999).....	15
Figura 1.12 -	Geogrelha uniaxial obtida por estiramento após perfuração (adaptado de Jewell, 1996).....	16
Figura 1.13 -	Processo de fabrico de geomembranas: a) sistema de cilindros de rotação contrária - calandragem; b) processo de fabrico de geomembranas multicamadas (adaptado de Lopes, 1998).....	17
Figura 1.14 -	Funções dos geossintéticos: a) drenagem; b) filtragem; c) protecção; d) reforço; e) separação; f) controlo de erosão superficial; g) barreira de fluidos.....	31
Figura 1.15 -	Vários métodos disponíveis para efectuar ligações entre geomembranas (adaptado de Koerner, 1999).....	36
Figura 1.16 -	Esquema da geometria das juntas de geomembranas (adaptado de Lopes, 1998).....	36

CAPÍTULO 2 - DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

Figura 2.1 -	Mecanismo de danificação por abrasão (adaptado de Shukla, 2002)..	41
Figura 2.2 -	Efeito de abrasão num plástico tecido em poliéster - imagem obtida por microscopia electrónica de varrimento (Pinho-Lopes, 2004).....	41
Figura 2.3 -	Mecanismo de danificação por punçoamento (adaptado de Shukla, 2002).....	42
Figura 2.4 -	Mecanismo de danificação por concentração de tensões e deformações (adaptado de Shukla, 2002).....	43
Figura 2.5 -	Efeito de danificação por concentração de tensões e deformações sobre um geotêxtil (Watn e Chew, 2002).....	43
Figura 2.6 -	Vista geral do equipamento de danificação de geossintéticos (Paula, 2003).....	48
Figura 2.7 -	Caixa de danificação: a) vista geral; b) parte inferior; c) parte superior (Paula, 2003).....	49
Figura 2.8 -	Placa de carregamento (Paula, 2003).....	49
Figura 2.9 -	Material granular de confinamento (<i>Corundum</i>).....	50
Figura 2.10 -	Enchimento da caixa inferior: a) colocação da 1.ª camada; b) compactação da 1.ª camada; c) colocação da 2.ª camada; d) e e) compactação da 2.ª camada (Paula, 2003).....	51
Figura 2.11 -	Colocação do provete e da a caixa superior (Paula, 2003).....	51
Figura 2.12 -	Enchimento da caixa superior (Paula, 2003).....	51
Figura 2.13 -	Aplicação da carga cíclica (Paula, 2003).....	52
Figura 2.14 -	Programa de ensaios (Paula, 2003).....	54

Figura 2.15 -	Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório (Paula, 2003).....	55
Figura 2.16 -	Coeficiente de variação (em%) da resistência à tracção dos geossintéticos (Paula, 2003).....	56
Figura 2.17 -	Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).....	57
Figura 2.18 -	Curvas força-extensão: a) GGeu; b) GGtb; c) Ggeb (Paula, 2003).....	58
Figura 2.19 -	Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).....	58
Figura 2.20 -	Curvas força-extensão: a) GTt; b) GTnt (Paula, 2003).....	60
Figura 2.21 -	Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).....	60
Figura 2.22 -	Curvas tensão-extensão: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa (Paula, 2003).....	61
Figura 2.23 -	Geossintéticos: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação (Paula, 2003).....	62
Figura 2.24 -	Curvas força-extensão: a) GGeu; b) GGtb; c) Ggeb (Paula, 2003).....	63
Figura 2.25 -	Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).....	64
Figura 2.26 -	Curvas força-extensão: a) GTt; b) GTnt (Paula, 2003).....	64
Figura 2.27 -	Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).....	65
Figura 2.28 -	Curvas tensão-extensão: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa (Paula, 2003).....	65
Figura 2.29 -	Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).....	67

CAPÍTULO 3 - FILTRAGEM COM GEOSSINTÉTICOS

Figura 3.1 -	Geotêxtil utilizado como filtro, envolvendo: a) um dreno de gravilha; b) um tubo de drenagem (Ingold, 1994).....	70
Figura 3.2 -	Geotêxtil utilizado como filtro, no tardo de muro: a) num sistema de drenagem; b) de gabiões (Ingold, 1994).....	70
Figura 3.3 -	Geotêxtil utilizado como filtro, entre duas zonas distintas de uma barragem de terra com enrocamento (Ingold, 1994).....	71
Figura 3.4 -	Geotêxtil utilizado como filtro, na base de um aterro construído sobre solo em processo de consolidação (Ingold, 1994).....	71
Figura 3.5 -	Geotêxtil utilizado como filtro, na margem de rio ou canal (Ingold, 1994).....	71

Figura 3.6 -	Geotêxtil utilizado como filtro em função secundária: a) sob o balastro de linhas de caminho de ferro; b) sob o leito de estradas provisórias (Ingold, 1994).....	71
Figura 3.7 -	Geotêxtil utilizado como filtro num sistema de drenagem na cobertura de um aterro sanitário (Zanzinger e Gartung, 2002).....	72
Figura 3.8 -	Ensaio de determinação da dimensão da abertura, no LGS: a) Provete colocado no equipamento; b) Solo colocado sobre o provete; c) Peneiração por via húmida (Pinto, 2005).....	74
Figura 3.9 -	Determinação de O_{90} a partir da curva granulométrica do solo passado através de um geotêxtil.....	74
Figura 3.10 -	Permeabilidade no plano do material (adaptado de Shukla, 2002)...	75
Figura 3.11 -	Permeabilidade no plano perpendicular ao do material (adaptado de Shukla, 2002).....	75
Figura 3.12 -	Vista geral do equipamento do LGS, de ensaio da permeabilidade no plano do material.....	77
Figura 3.13 -	Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade no plano do material (adaptado de Ingold, 1994).....	77
Figura 3.14 -	Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade no plano do material (adaptado de Shukla, 2002).....	78
Figura 3.15 -	Figura 3.15 - Relação Pressão Normal - $q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$	79
Figura 3.16 -	Equipamento de ensaio da permeabilidade no plano normal ao do material existente no LGS.....	82
Figura 3.17 -	Figura 3.17 - Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade normal ao plano do material (adaptado de Ingold, 1994).....	82
Figura 3.18 -	Figura 3.18 - Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade normal ao plano do material (adaptado de Shukla, 2002).....	83
Figura 3.19 -	Figura 3.19 - Relação V_{20} - perda de carga.....	84
Figura 3.20 -	Figura 3.20 - Efeito da compressão na permissividade e na transmissividade (adaptado de Giroud, 1980 e Shukla, 2002)...	86
Figura 3.21 -	Figura 3.21 - Equipamento laboratorial do LGS para determinação da permeabilidade dos geossintéticos.....	87
Figura 3.22 -	Figura 3.22 - Esquema de equipamento para determinação da permeabilidade normal ao plano de geossintéticos: 1) Entrada de fluxo; 2) Fluxo recolhido; 3) Provete; 4) Perda de carga (NP EN ISO 11058, 2003).....	88
Figura 3.23 -	Equipamento de ensaio da permeabilidade normal ao plano do material: vista geral, com os reservatórios superior e inferior.....	89
Figura 3.24 -	Equipamento hidromecânico de bombagem.....	89
Figura 3.25 -	Partes transparentes do circuito: a) Inferior; b) Superior.....	90
Figura 3.26 -	Plataforma em madeira.....	90
Figura 3.27 -	Sistema para colocação dos provetes: a) Vista exterior; b) Vista interior.....	91

Figura 3.28 -	Grelha metálica: a) Face superior; b) Face inferior.....	91
Figura 3.29 -	Tubos piezométricos: a) Montante do provete; b) Jusante do provete.....	92
Figura 3.30 -	Tubos em acrílico para observação da carga hidráulica.....	92
Figura 3.31 -	Sistema detector de água: a) Sensor; b) Sistema de ajuste; c) Escala graduada.....	93
Figura 3.32 -	Verificação da perda de carga: a) Contacto entre água e sensor; b) Intervalo na escala graduada.....	93
Figura 3.33 -	Válvulas para ajuste do escoamento: a) de grandes dimensões; b) de pequenas dimensões.....	94
Figura 3.34 -	Sistema de descarga.....	94
Figura 3.35 -	Provete: a) Após o corte; b) Em saturação em água.....	95
Figura 3.36 -	Provete: a) Colocação; b) Colocação da grelha; c) Aperto do sistema; d) Processo de colocação concluído.....	96
Figura 3.37 -	Teste inicial: a) Perda de carga de 50mm; b) Igualdade nas cargas hidráulicas.....	97
Figura 3.38 -	Perda de carga máxima (70mm).....	97
Figura 3.39 -	Quantificação da água passada através do provete: a) Recolha de água; b) Pesagem.....	98
Figura 3.40 -	Curva quadrática ajustada aos resultados obtidos.....	99
Figura 3.41 -	Relação V_{20} - perda de carga para um ensaio (série de 5 provetes)..	100
Figura 3.42 -	Curvas quadráticas ajustadas aos resultados obtidos num ensaio (série de 5 provetes).....	100
Figura 3.43 -	Filtro na interface solo-geotêxtil (adaptado de Ingold, 1994).....	101

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PAPEL DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS

Figura 4.1 -	Geotêxteis não tecidos agulhados: a) e b) GT1a, GT2a e GT3a, de cima para baixo.....	109
Figura 4.2 -	Geotêxteis não tecidos termossoldados: a) e b) GT1ts, GT2ts, de cima para baixo.....	109
Figura 4.3 -	Medição da espessura: a) Equipamento; b) Colocação de peso; c) Ensaio de um provete.....	110
Figura 4.4 -	Avaliação da massa por unidade de área.....	110
Figura 4.5 -	Curvas força-extensão dos geotêxteis GT1a e GT2a.....	112
Figura 4.6 -	Curvas força-extensão dos geotêxteis GT1ts e GT2ts.....	112
Figura 4.7 -	Curva força-extensão do geotêxtil GT3a.....	112
Figura 4.8 -	Materiais granulares utilizados: a) Brita granítica; b) Brita calcária.....	113

Figura 4.9 -	Programa de ensaios.....	115
Figura 4.10 -	Aspecto dos geotêxteis após a DDI com <i>Corundum</i> como material confinante: a) GT1a; b) GT2a; c) GT1ts; d) Gt2ts.....	117
Figura 4.11 -	Diagrama representativo da resistência residual dos provetes danificados durante a instalação com <i>Corundum</i>	118
Figura 4.12 -	Valores dos coeficientes de variação da resistência à tracção dos geotêxteis intactos e danificados durante a instalação com <i>Corundum</i>	119
Figura 4.13 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1a intacto.....	121
Figura 4.14 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2a intacto.....	121
Figura 4.15 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT3a intacto.....	122
Figura 4.16 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1ts intacto.....	122
Figura 4.17 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2ts intacto.....	123
Figura 4.18 -	Relação V_{20} - perda de carga para os geotêxteis agulhados intactos.....	124
Figura 4.19 -	Relação V_{20} - perda de carga para os geotêxteis termossoldados intactos.....	124
Figura 4.20 -	Relação V_{20} - perda de carga para os geotêxteis agulhados T1a e GT2a) e termossoldados (GT1ts e Gt2ts) intactos.....	125
Figura 4.21 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1a intacto e danificado com <i>Corundum</i> (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).....	127
Figura 4.22 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2a intacto e danificado com <i>Corundum</i> (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).....	128
Figura 4.23 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT3a intacto e danificado com <i>Corundum</i> (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).....	128
Figura 4.24 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1ts intacto e danificado com <i>Corundum</i> (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).....	129
Figura 4.25 -	Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2ts intacto e danificado com <i>Corundum</i> (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).....	129
Figura 4.26 -	Alteração nos valores do índice de velocidade VI_{H50} dos geotêxteis danificados.....	131
Figura 4.27 -	Variação do índice de velocidade VI_{H50} dos geotêxteis danificados em relação ao valor de referência.....	131
Figura 4.28 -	Coeficientes de variação dos valores do índice de velocidade VI_{H50}	133

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 1 - GEOSSINTÉTICOS

Quadro 1.1 -	Propriedades dos polímeros base - Comparação (adaptado de Ladeira, 1995).....	11
Quadro 1.2 -	Normas de terminologia, identificação e amostragem dos geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).....	25
Quadro 1.3 -	Normas referentes às exigências para os geossintéticos com vista à marcação CE (adaptado de IGS-Portugal, 2009).....	25
Quadro 1.4 -	Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).....	27
Quadro 1.5 -	Normas referentes à durabilidade dos geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).....	28
Quadro 1.6 -	Normas para ensaios hidráulicos de geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).....	30

CAPÍTULO 2 - DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

Quadro 2.1 -	<i>Factores que influenciam a danificação durante a construção (Austin, 1998 e Pinho-Lopes, 2004).....</i>	45
Quadro 2.2 -	<i>Propriedades relevantes dos geossintéticos (adaptado de Paula, 2003).....</i>	53

CAPÍTULO 3 - FILTRAGEM COM GEOSSINTÉTICOS

Quadro 3.1 -	Quadro 3.1 -Tabela a preencher no decorrer do ensaio de cada provete.....	98
--------------	---	----

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PAPEL DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS

Quadro 4.1 -	Valores da espessura e da massa por unidade de área dos geotêxteis.....	111
Quadro 4.2 -	Valores médios da resistência à tracção, da extensão para a força máxima e da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis.....	111
Quadro 4.3 -	Resultados dos ensaios tracção - extensão dos geotêxteis intactos..	116
Quadro 4.4 -	Resultados dos ensaios tracção - extensão dos geotêxteis danificados com <i>Corundum</i>	118
Quadro 4.5 -	Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis intactos.....	123
Quadro 4.6 -	Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis danificados com <i>Corundum</i>	126
Quadro 4.7 -	Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis danificados com brita granítica.....	126
Quadro 4.8 -	Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis danificados com brita calcária.....	127
Quadro 4.9 -	Alteração percentual no Índice de velocidade VI_{H50} para os geotêxteis danificados.....	130

SIMBOLOGIA

B	- dimensão transversal do provete
D_j	- dimensão das partículas do solo
i	- gradiente hidráulico
k	- coeficiente de permeabilidade
k_n	- coeficiente de permeabilidade perpendicular ao plano do material
k_p	- coeficiente de permeabilidade no plano do material
L	- dimensão longitudinal do provete
M	- massa de água
O_i	- abertura dos poros do geotêxtil
O_n	- dimensão aparente da abertura dos poros do geotêxtil
O_{90}	- dimensão equivalente da abertura dos poros do geotêxtil
PA	- poliamida
PE	- polietileno
PEAD	- polietileno de alta densidade
PET	- poliéster
PVC	- policloreto de vinilo
Q	- caudal
$q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$	- coeficiente hidráulico
R_T	- factor correctivo da temperatura
S	- área de atravessamento da água
t	- tempo
T	- temperatura

V	- volume
V_{20}	- velocidade do escoamento a 20°C
Vl_{H50}	- índice de velocidade para perda de carga de 50mm
α	- coeficiente adimensional
β	- coeficiente adimensional
Δh	- perda de carga
Δx	- espessura do provete
θ	- transmissividade
ψ	- permissividade

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho pretende ser um contributo para o melhor conhecimento dos efeitos das acções mecânicas de danificação que podem ocorrer sobre os geossintéticos durante as operações de colocação em obra. A maior parte deste tipo de trabalhos tem sido desenvolvido com o intuito de se avaliar a modificação nas propriedades de resistência mecânica deste tipo de materiais. Com este estudo, pretende-se alargar o âmbito da investigação sobre os efeitos da danificação durante a instalação (DDI) para outro tipo de propriedades, nomeadamente, as propriedades hidráulicas.

Assim, no Capítulo 1, faz-se uma breve apresentação do tema dos geossintéticos, com noções básicas sobre estes materiais e o “mundo” que os envolve. Em primeiro lugar, faz-se uma descrição muito sucinta dos diferentes processos de fabrico e das suas características e propriedades principais. Deste modo, é feita a sua classificação e são enumeradas as suas propriedades de carácter físico, mecânico, hidráulico e as que se relacionam com a durabilidade.

No mesmo capítulo, é referido o trabalho de comissões que procedem à normalização de procedimentos de ensaio de geossintéticos, para que haja uniformidade de critérios, e é apresentada a lista de normas actualmente em vigor.

Em seguida, são referidas as diferentes funções que os geossintéticos podem desempenhar e, por fim, são abordados alguns aspectos particulares, relativos à colocação em obra dos distintos tipos de materiais.

No segundo capítulo, é revisto o trabalho desenvolvido Paula (2003), relativo ao estudo dos efeitos da danificação sobre geossintéticos, no que concerne às características de resistência mecânica. Este autor utilizou, na simulação laboratorial da danificação, materiais granulares naturais, em lugar do material preconizado na normalização aplicável (EN ISO 10722 (2007)).

Também apresentou o equipamento existente no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) que permite a simulação laboratorial da DDI e descreveu a metodologia de ensaio.

Paula (2003) estuda os efeitos da danificação sobre sete materiais distintos, efectuando ensaios de tracção sobre amostras intactas e amostras danificadas laboratorialmente. Em seguida, procede à comparação entre os valores de resistência para os materiais danificados e os que são obtidos para as amostras intactas. À razão entre estes dá-se o nome de resistência residual, pois fornece a informação de quanto da resistência do material subsiste, após acções de DDI.

Por fim, o autor analisa a contribuição do tipo de geossintético na resistência às acções de danificação e o papel do material granular sobre o nível de danificação produzida procedendo, também, à comparação dos resultados obtidos com outros, encontrados na literatura da especialidade.

No Capítulo 3 procede-se ao estudo da função de filtragem desempenhada pelos materiais geotêxteis e das propriedades com as quais aquela está relacionada. Assim, são destacadas as propriedades hidráulicas dos geossintéticos, como a porosidade, a permeabilidade no plano do material e a permeabilidade no plano normal ao do material.

Uma vez que, para a função de filtragem, a propriedade mais importante é a permeabilidade no plano normal ao do material, é-lhe feita uma referência mais extensa. Neste ponto, é apresentado o equipamento de ensaio à permeabilidade normal ao plano, existente no LGS da FEUP e é descrita a metodologia de ensaio preconizada na NP EN ISO 11058 (2003).

Por fim, para justificar a finalidade deste trabalho, é realçada a importância DDI no desempenho de geotêxteis como filtros. Para isso, é feita uma breve referência aos critérios de dimensionamento de filtros e faz-se notar, também, a alteração que os processos de danificação podem provocar nos materiais dimensionados e colocados em obra.

No último capítulo é apresentado o trabalho experimental realizado. Em primeiro lugar faz-se a caracterização dos geotêxteis seleccionados com o recurso aos valores da massa por unidade de área, da espessura, da resistência mecânica à tracção e da permeabilidade normal ao plano do material. Também são apresentados os materiais granulares utilizados nos ensaios de DDI: *Corundum*, brita granítica e brita calcária.

Em seguida, analisa-se o efeito da DDI sobre a resistência mecânica dos geotêxteis, tentando confirmar as conclusões retiradas por Paula (2003), no seu estudo.

Por fim, apresenta-se os resultados obtidos na caracterização da permeabilidade normal ao plano dos materiais geotêxteis, tanto nas amostras intactas, como nas que foram danificadas com os três tipos de solo granular. Neste ponto, tenta-se concluir, para a permeabilidade, de modo semelhante ao que Paula (2003) fez.

CAPÍTULO 1

GEOSSINTÉTICOS

1.1 - INTRODUÇÃO

O presente capítulo pretende ser uma introdução geral ao tema dos geossintéticos. Uma vez que Geraldès (2008) apresentou essa introdução de forma clara e actual, optou-se por seguir de perto este autor.

A aplicação de fibras e telas na estabilização e melhoramento de solos data de há milhares de anos. Com efeito, os babilónios já usavam esses materiais no reforço de solos há três mil anos. Com o mesmo objectivo, os chineses aplicavam madeira, bambu e raízes e os romanos utilizavam juncos e madeira. A estes materiais acrescentou-se, na Idade Média, as peles de animais.

No século XX, apesar da primeira referência à aplicação de telas datar de 1926 (reforço de pavimentos de estradas nos Estados Unidos da América), a sua utilização sistemática só surge após o aparecimento dos polímeros sintéticos, na década de 40, associado ao desenvolvimento das técnicas de fabrico de geotêxteis com estes materiais, quer tecidos (década de 50), quer não tecidos (década de 60).

As vantagens técnicas e económicas do emprego de geotêxteis, nomeadamente a partir da introdução dos geotêxteis não tecidos agulhados na década de 70, conduziram a um

elevado incremento na sua utilização. Por outro lado, o desenvolvimento e expansão do mercado de geotêxteis conduziram ao aparecimento de novos produtos, de entre os quais se destacam as geogrelhas, que surgiram no início dos anos 80.

Em 1983, o constante aparecimento de novos produtos levou a que se introduzisse o termo “geossintético” para designar indiferenciadamente todos os novos produtos com aplicação em obras de carácter ambiental. Embora esta designação possa não ser completamente adequada, uma vez que alguns dos produtos utilizados não têm origem sintética, a Sociedade Internacional de Geotêxteis e Produtos Afins consagrou-a universalmente ao adoptar a designação de Sociedade Internacional de Geossintéticos, em 1994.

A rápida aceitação dos geossintéticos e o espectacular aumento da sua utilização derivam de algumas vantagens identificadas por Giroud (1986). Enquanto que os empreiteiros estão interessados numa construção mais rápida e menos dependente das condições meteorológicas, numa redução dos volumes de terras movimentados e na possibilidade de utilizar solos de pior qualidade, os projectistas apreciam a fiabilidade derivada das propriedades uniformes dos geossintéticos, da facilidade de colocação e da capacidade destes materiais para mitigar defeitos locais do solo. Na perspectiva dos donos de obra, o factor mais importante é a obtenção de menores custos de construção e de manutenção (Jewell, 1996).

1.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são, na maior parte dos casos, elementos obtidos a partir de polímeros sintéticos que se colocam à superfície ou no interior de obras de terra com vista a melhorar o seu desempenho, podendo exercer, basicamente, funções de drenagem, filtragem, separação, protecção, reforço, controlo de erosão superficial e barreira de fluidos.

Embora as propriedades dos geossintéticos sejam muito influenciadas pelos tipos de polímeros que os constituem, a classificação destes materiais assenta, essencialmente, nas diferenças estruturais que decorrem dos diversos processos de fabrico, sendo que, numa primeira aproximação, podem ser divididos em permeáveis e impermeáveis (Figura 1.1). Os geotêxteis (Figura 1.2) e os produtos relacionados, dentro dos quais se destacam as geogrelhas (Figura 1.3), as georredes, as geomalhas, os geotapetes e as geocélulas (Figura 1.4) constituem o grupo dos geossintéticos permeáveis. O grupo dos

geossintéticos impermeáveis é constituído pelas barreiras geossintéticas - poliméricas (geomembranas (Figura 1.5)) e argilosas (geocompósitos bentoníticos (Figura 1.6)).

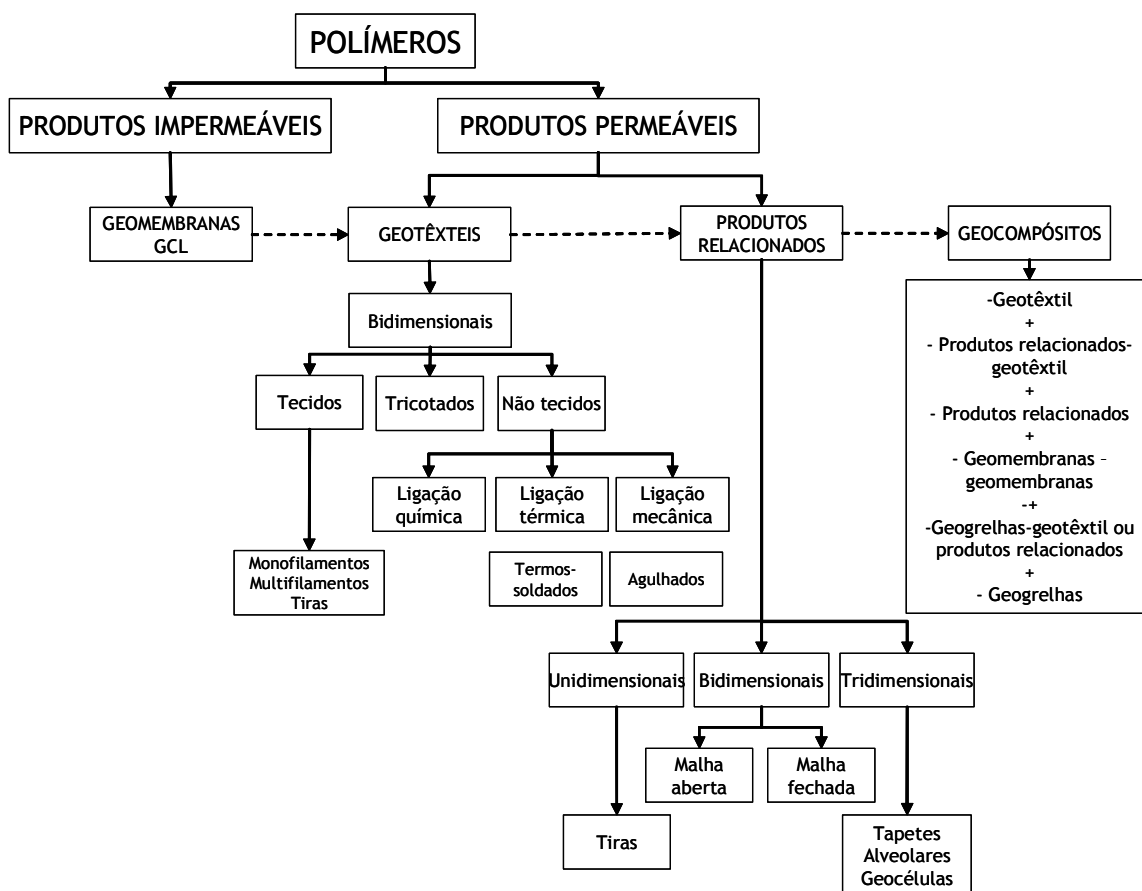


Figura 1.1 - Classificação dos geossintéticos de acordo com a sua estrutura (adaptado de Pinho-Lopes, 2004).

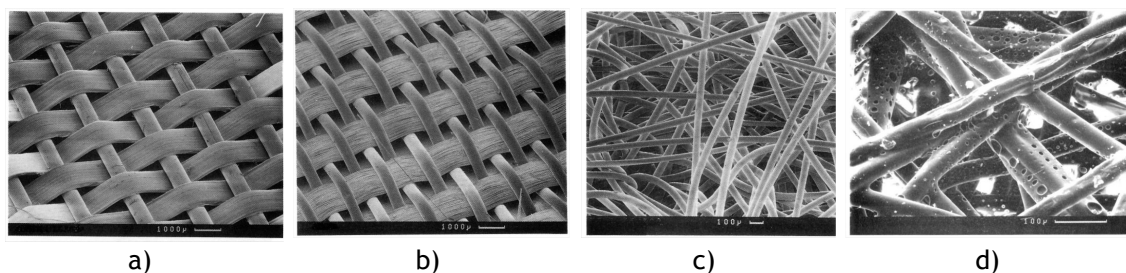


Figura 1.2 - Exemplos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido com tira e monofilamento; b) geotêxtil tecido com multifilamento e monofilamento; c) geotêxtil não tecido mecanicamente ligado (agluhado); d) geotêxtil não tecido termicamente ligado (Lopes, 1998).

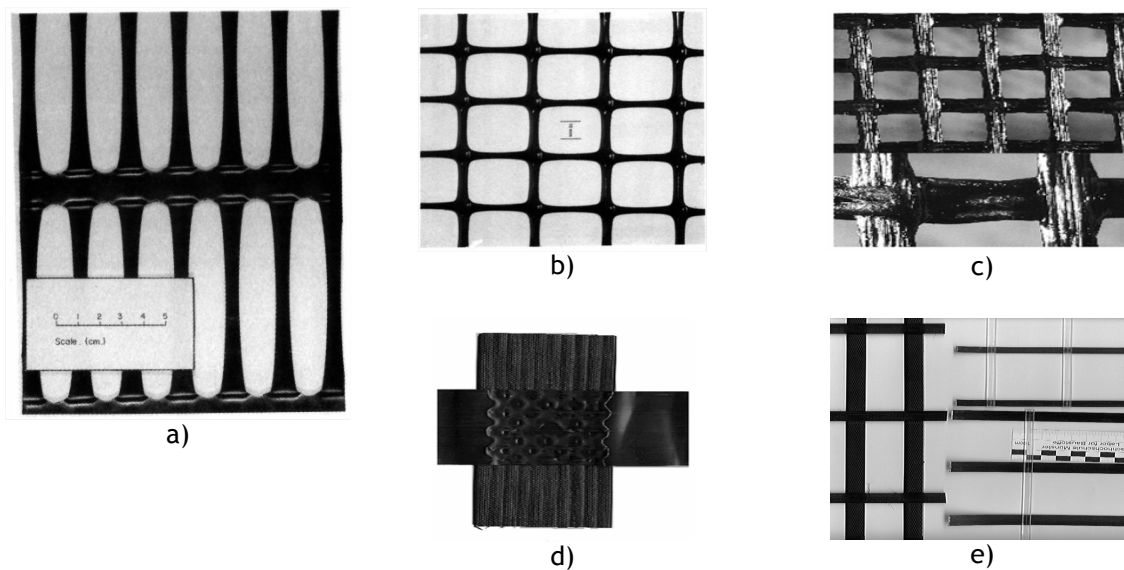


Figura 1.3 - Exemplos de geogrelhas: a) geogrelha uniaxial de uniões integrais; b) geogrelha biaxial de uniões integrais; c) geogrelha de uniões tecidas; d) geogrelha de uniões fundidas; e) geogrelha com uniões efectuadas por laser (Lopes, 1998).

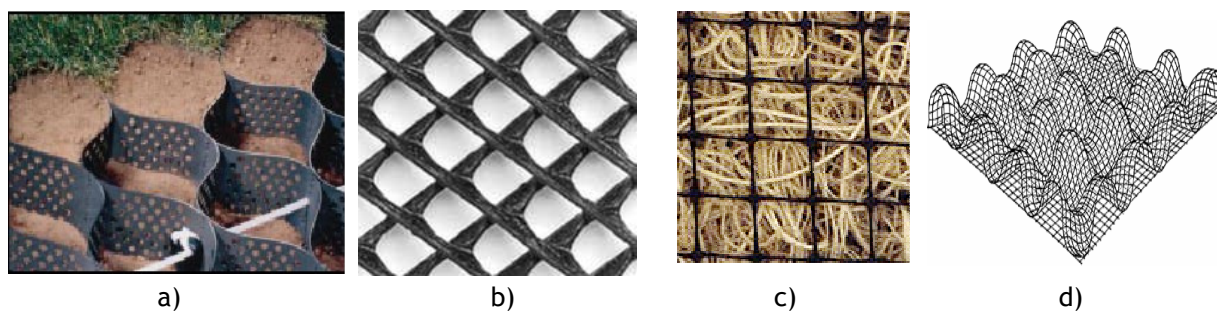


Figura 1.4 - Exemplos de geossintéticos: a) geocélulas; b) georredes; c) geomalhas; d) geotapetes.

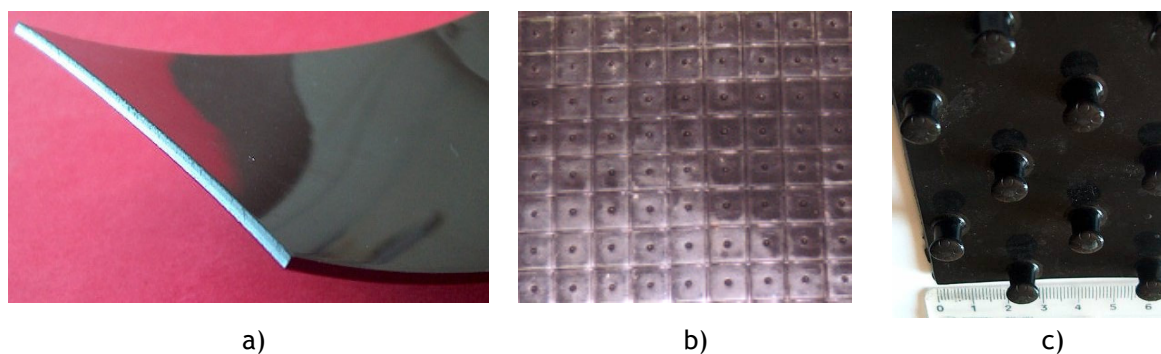


Figura 1.5 - Exemplos de geomembranas: a) geomembrana lisa; b) e c) geomembrana rugosa (pitonada).



a)
b)
*Figura 1.6 - Exemplos de geocompósitos: a) geocompósito de drenagem;
b) geocompósito bentonítico.*

1.3 - MATERIAIS CONSTITUINTES

As matérias-primas utilizadas na indústria têxtil dividem-se em dois grandes grupos: naturais e químicas. Enquanto que as matérias-primas naturais podem ter origem vegetal (juta, algodão, linho e cânhamo), animal (lã e seda) e mineral (amianto), as matérias-primas químicas dividem-se em orgânicas (polímeros naturais transformados e polímeros sintéticos) e inorgânicas (minerais e metais).

As fibras naturais, dado o seu carácter biodegradável e por não possuírem propriedades adequadas a um grande número de aplicações, raramente são usadas. Assim, os materiais mais utilizados no fabrico de geossintéticos são vulgarmente designados por plásticos, mais concretamente por termoplásticos. Estes são materiais orgânicos sintéticos obtidos a partir do petróleo e que, ao contrário dos outros plásticos, têm a propriedade de amolecer e endurecer por acção do calor e do frio, respectivamente.

No que diz respeito à sua composição química, os termoplásticos são compostos poliméricos cujo monómero base é uma molécula constituída por átomos de carbono e hidrogénio. A polimerização é o processo através do qual os monómeros se juntam, por vários mecanismos químicos, formando longas cadeias moleculares e dando origem aos polímeros.

Durante este processo, para além dos monómeros, podem ainda estar presentes aditivos que permitem obter polímeros com propriedades distintas.

O peso molecular de um polímero define-se como o produto entre o peso molecular do monómero base e o grau de polimerização (número de vezes que esse monómero se repete na cadeia molecular). O comportamento de um polímero é muito dependente, não só do peso molecular médio como, também, da sua distribuição estatística. Assim sendo, o aumento do peso molecular médio resulta num aumento da elongação e da resistência à tracção, ao impacto, à fendilhação e ao calor, enquanto conduz à diminuição da fluência e da trabalhabilidade do material (Koerner, 1999).

A cristalinidade é outra propriedade determinante no comportamento dos polímeros. Quanto à cristalinidade, os polímeros podem ser classificados em amorfos e semicristalinos (não pode haver polímeros completamente cristalinos). O aumento da cristalinidade de um polímero leva ao aumento da rigidez, da resistência química e da resistência ao calor e à tracção. Pelo contrário, conduz à diminuição da permeabilidade, da deformação na rotura, da flexibilidade e da resistência ao impacto e à fendilhação.

No fabrico de geossintéticos, particularmente, de geotêxteis, podem ser usados diversos tipos de polímeros, mas os mais comuns são: os poliésteres (PET), as poliamidas (PA), os polipropilenos (PP) e os polietilenos (PE). Estes dois últimos pertencem ao grupo das poliolefinas e são, a par dos poliésteres, os de uso mais corrente.

A gama de polímeros utilizados no fabrico de geomembranas é mais larga dadas as maiores exigências feitas a estes materiais, quer em termos de resistência ao ataque ambiental, quer em termos de custos. No fabrico de geomembranas, para além dos termoplásticos, podem ser usados materiais termoendurecidos ou a combinação de ambos.

A melhoria das propriedades de um termoplástico pode ser conseguida por introdução de diversos aditivos durante o seu processo de fabrico. Os aditivos mais vulgarmente utilizados para melhorar a resistência à degradação dos termoplásticos são os estabilizantes térmicos, os anti-UV e os anti-oxidantes. A natureza dos estabilizantes depende do tipo de polímero base.

No Quadro 1.1, estabelece-se uma comparação entre as propriedades dos polímeros base mais utilizados no fabrico de geossintéticos. Pretende-se, assim, ilustrar de forma resumida, o modo como o tipo de polímero base utilizado influencia o comportamento do geossintético.

Quadro 1.1 - Propriedades dos polímeros base - Comparação (adaptado de Ladeira, 1995).

Propriedades dos polímeros base						
Polímeros			Poliéster	Poliamida	Polipropileno	Polietileno
Resistência			3	2	1	1
Módulo de Elasticidade			3	2	1	1
Deformação na rotura			2	2	3	3
Fluência			1	2	3	3
Densidade relativa			3	2	1	1
Custo			3	2	1	1
Resistência a	Radiações UV	Estabilizado	3	2	3	3
		Não estabilizado	3	2	2	1
	Bases		1	3	3	3
	Microrganismos		2	2	2	3
	Óleos		2	2	1	1
	Detergentes		3	3	3	3

Legenda: 3 - Elevado; 2 - Médio; 1 - Baixo

1.4 - PROCESSOS DE FABRICO

Os processos de fabrico dos geossintéticos são muito variados e, reflectindo esse facto, são determinantes para a definição da sua estrutura e, consequentemente, das suas propriedades. O fabrico dos geossintéticos, em geral, compreende três passos:

- 1 - Produção do polímero com os seus vários aditivos;
- 2 - Produção dos componentes;
- 3 - Conversão dos componentes no geossintético.

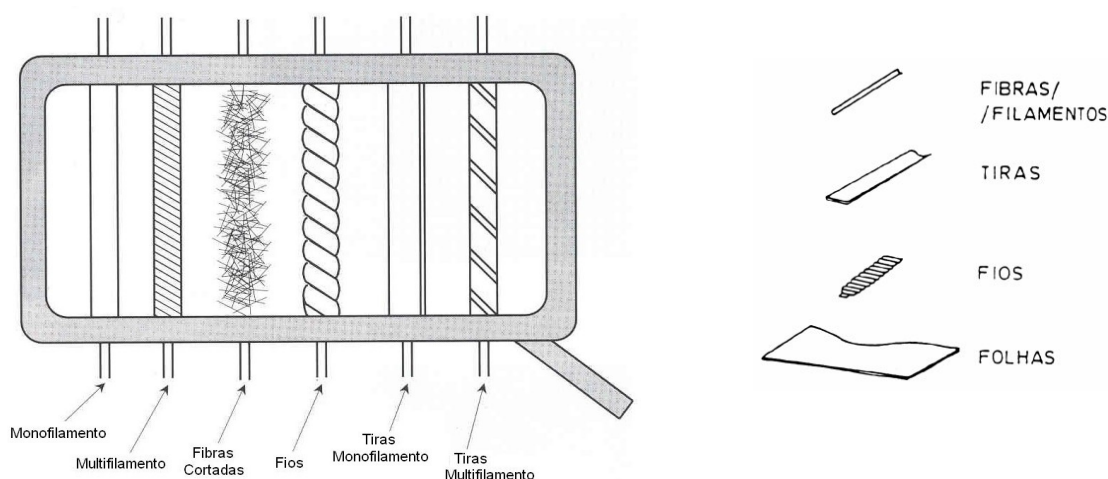
1.4.1 - COMPONENTES DOS GEOSSINTÉTICOS

A primeira fase do fabrico passa, como se referiu, pela produção do polímero constituinte, mediante processos químicos com inclusão de aditivos. Em seguida, o polímero é fornecido ao fabricante dos componentes sob a forma granular ou esférica. Os componentes dos geossintéticos, obtidos por extrusão ou fiação líquida do polímero, podem ter formas muito variadas, destacando-se as mais comuns:

- Filamento contínuo circular com uma fracção de milímetros de diâmetro;

- Tira plana contínua com vários milímetros de largura, uma fracção de milímetros de espessura e um comprimento indefinido;
- Folha ou película, podendo ter vários metros de largura e uma espessura variando entre uma fracção de milímetro (película) e vários milímetros (folha).

Estes componentes básicos podem, ainda, ser sujeitos a fases intermédias de fabrico, dando origem a formas mais complexas. Na realidade, o filamento contínuo pode ser torcido (obtendo-se um fio), alinhado paralelamente (multifilamento) ou cortado em pequenos troços, em geral com 50mm de comprimento (fibras cortadas). De forma análoga, as tiras podem ser usadas isoladamente ou torcidas, formando fios de tiras. Na Figura 1.7 encontram-se representados esquematicamente os componentes básicos mais comuns dos geossintéticos.



*Figura 1.7 - Componentes básicos dos geossintéticos
(adaptado de Koerner, 1999 e Lopes, 1998).*

Nos processos de extrusão ou fiação líquida, o polímero é introduzido num recipiente, juntamente com os aditivos, ficando sujeito a pressão e temperatura controladas. O objectivo deste procedimento é provocar a fusão dos constituintes sólidos, assim como a sua mistura e expulsão do oxigénio. Posteriormente, a massa líquida é forçada a atravessar um sistema de bombas rotativas, que controla a quantidade de polímero em passagem, expelindo-o através de uma placa perfurada. As fibras ou filamentos são arrefecidos ao ar ou em água. No caso das tiras ou películas, o processo é semelhante, mas o polímero é forçado a sair através de fendas. As tiras podem ser obtidas directamente ou por corte de películas.

Depois dos procedimentos descritos, as tiras e os filamentos são sujeitos a estiramento (Figura 1.8) e solidificação, sendo necessários dois ou mais tratamentos por aquecimento. Estes destinam-se a melhorar as propriedades do material (resistência à tracção, módulo de rigidez, deformação na rotura, fluência, etc.). A cadeia molecular é progressivamente orientada na direcção de estiramento, resultando uma estrutura final mais cristalina.

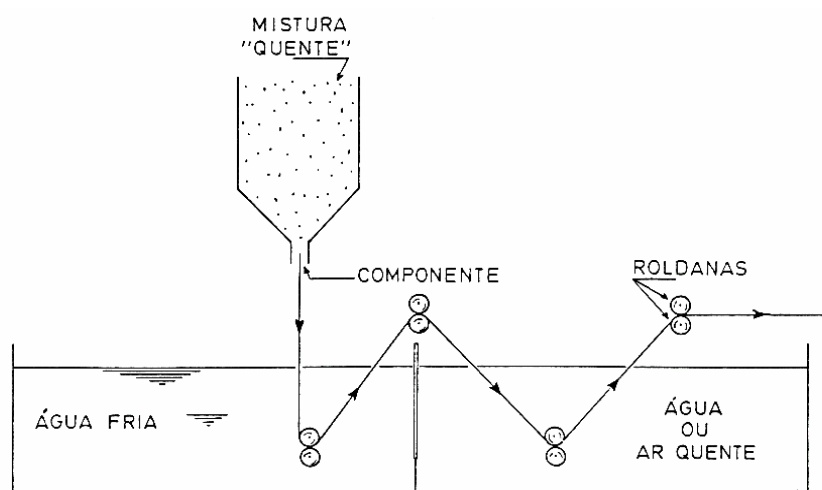


Figura 1.8 - Estiramento dos componentes básicos dos geossintéticos (Lopes, 1998).

1.4.2 - GEOTÊXTEIS TECIDOS E NÃO TECIDOS

Os geotêxteis tecidos são compostos por dois conjuntos, habitualmente perpendiculares, de componentes paralelos entrelaçados, formando uma estrutura planar, com poucos milímetros de espessura e uma distribuição de poros relativamente regular (Figuras 1.2 a) e 1.2 b)). Os geotêxteis deste tipo são fabricados segundo os princípios de tecelagem tradicionais recorrendo, no entanto, a teares cada vez mais versáteis e sofisticados (Figura 1.9). Os componentes basicamente utilizados no fabrico de geotêxteis tecidos são o monofilamento, o multifilamento, ou uma combinação dos dois. No entanto, ultimamente, tem-se tornado comum o fabrico destes materiais com tiras. A espessura dos geotêxteis tecidos fabricados a partir de mono e multifilamentos varia entre 1mm e 2mm. Nos geotêxteis tecidos obtidos a partir de tiras, a espessura é habitualmente inferior a 0,5mm.

Por sua vez, os geotêxteis não tecidos são fabricados dispondo os componentes aleatoriamente numa trama solta, ligeiramente mais espessa do que o produto final. Os componentes são posteriormente ligados, obtendo-se uma estrutura planar com uma distribuição aleatória de poros (Figuras 1.2 c) e 1.2 d)). Os processos mais comuns de ligação entre os componentes são mecânicos, térmicos ou químicos.

A ligação mecânica é conseguida fazendo passar a trama solta sob milhares de agulhas (Figura 1.10) que penetram completamente na trama, arrastando consigo alguns dos filamentos e entrelaçando-os uns nos outros. Obtêm-se, então, os geotêxteis não tecidos agulhados, cuja espessura varia entre 0,5mm e 5mm.

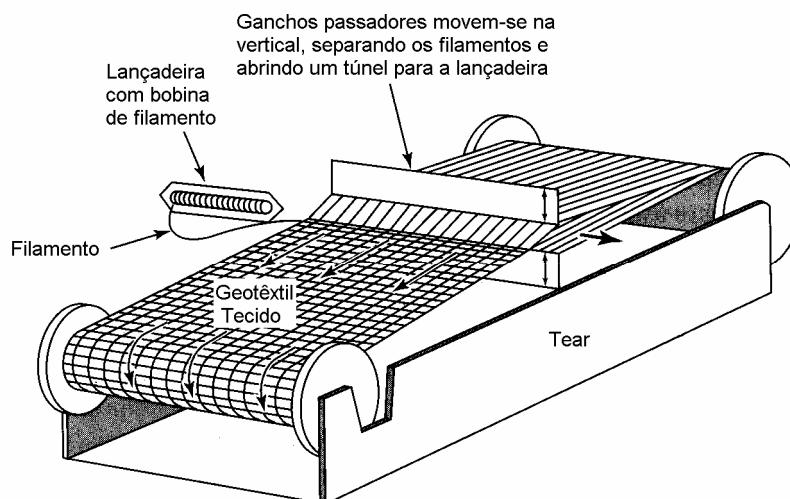


Figura 1.9 - Processo de fabrico de geotêxteis tecidos (adaptado de Koerner, 1999).

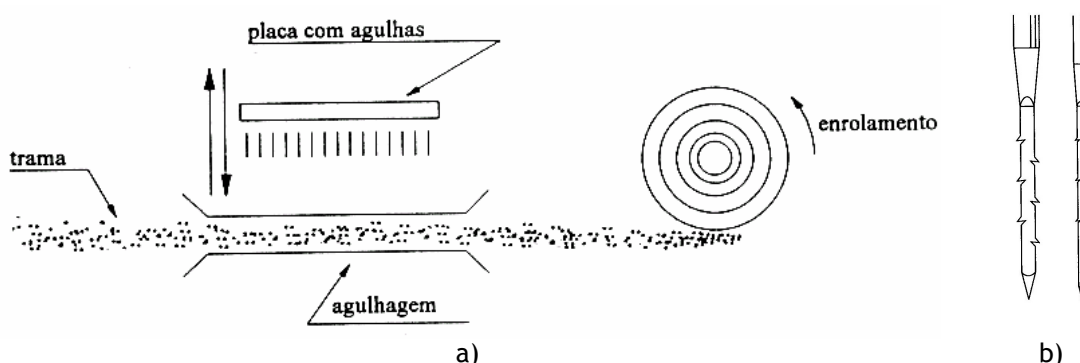


Figura 1.10 - Ligação mecânica por agulhagem de geotêxteis não tecidos: a) esquema geral; b) pormenor das agulhas utilizadas (adaptado de Koerner, 1999).

A ligação térmica é conseguida por aquecimento. A fusão parcial dos componentes, constituídos por mais do que um tipo de polímero com pontos de fusão diferentes, permite a sua ligação nos pontos de contacto obtendo-se, assim, os chamados geotêxteis não tecidos termoligados, ou termossoldados, cuja espessura varia entre 0,5mm e 1mm (Lopes, 1998).

A ligação química é conseguida através da pulverização ou impregnação da trama com um ligante químico, como por exemplo uma resina sintética. Posteriormente, na maior

parte dos casos, é necessária uma secagem com ar forçado para restabelecer a porosidade do geotêxtil. Neste caso, os produtos obtidos designam-se por geotêxteis não tecidos quimicamente ligados e a sua espessura varia entre 0,5mm e 3mm. Muitas vezes, a ligação química segue-se ao processo de agulhagem com vista ao melhoramento da ligação entre os componentes.

1.4.3 - GEOGRELHAS

As geogrelhas são geossintéticos muito abertos, com uma configuração do tipo grelha, em que a área das aberturas é superior à área das barras que a constituem. Podem ser fabricadas por ligação dos pontos de intersecção de barras perpendiculares de polímero (ligações por laser, tecidas, fundidas, etc.) ou por perfuração de uma folha de polímero, seguida de estiramento (geogrelhas de ligações integrais) (Figura 1.11).

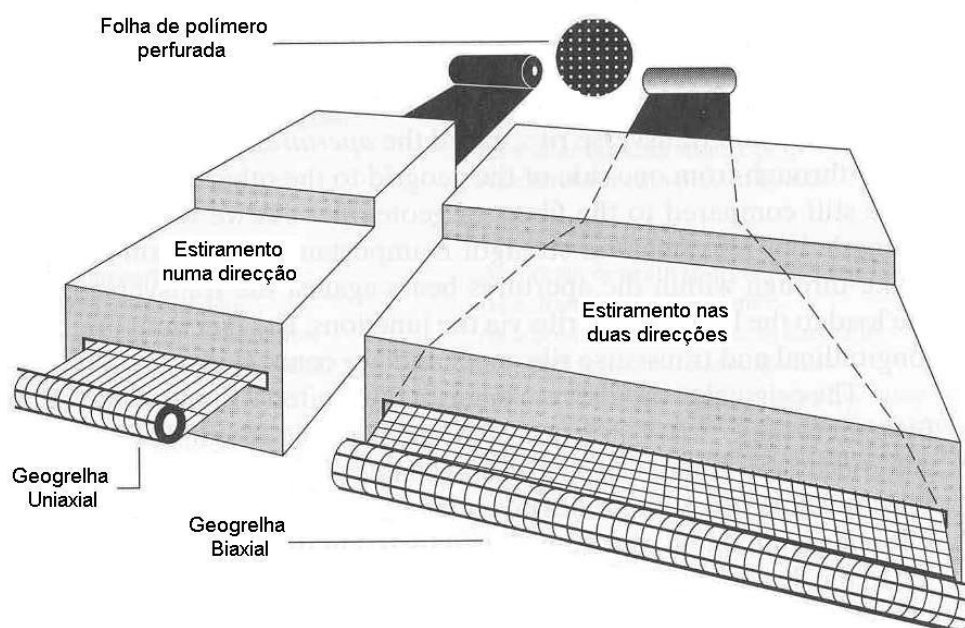


Figura 1.11 - Processo de fabrico de geogrelhas por perfuração seguida de estiramento (adaptado de Koerner, 1999).

Neste último processo de fabrico das geogrelhas, a folha de polímero é, em primeiro lugar, perfurada regularmente. Em seguida, a folha perfurada é aquecida e estirada numa máquina direccionada. Os orifícios alongam-se ao mesmo tempo que as moléculas do polímero se orientam na direcção da distensão (Figura 1.12). Embora o grau de orientação seja variável ao longo do comprimento da geogrelha, o efeito global é o de aumento da rigidez e da resistência à tracção. Caso o processo de fabrico termine nesta

fase, obtém-se uma geogrelha orientada uniaxialmente. Porém, se a grelha for de novo aquecida e estirada agora na direcção transversal, obtém-se uma geogrelha orientada biaxialmente.

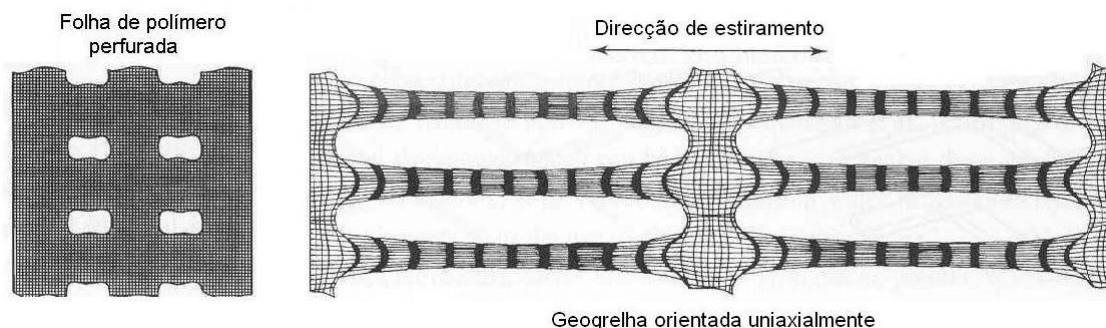


Figura 1.12 - Geogrelha uniaxial obtida por estiramento após perfuração (adaptado de Jewell, 1996).

1.4.4 - GEOMEMBRANAS

As geomembranas podem ser fabricadas, após a mistura do componente básico com os aditivos, pelos seguintes processos: extrusão, calandragem ou espalhamento superficial.

O processo de extrusão conduz ao fabrico das geomembranas mais simples, isto é, de uma só camada e não reforçadas, com espessuras entre 0,13mm e 5,10mm e larguras entre 0,90m e 5,20m (10,40m através de soldadura em fábrica). As geomembranas assim produzidas podem ser aplicadas sem que haja necessidade de as sujeitar a qualquer operação adicional mas, muitas vezes, são introduzidas num sistema de cilindros de rotação contrária com o objectivo de uniformizar a superfície e melhorar as suas propriedades mecânicas.

O processo de calandragem (Figura 1.13 a)) permite o fabrico de geomembranas de multicamadas, que pode ser levado a cabo laminando várias camadas em conjunto. As geomembranas deste tipo podem ser reforçadas ou não reforçadas. Nas geomembranas reforçadas introduz-se, entre as camadas de geomembrana, um geotêxtil, vulgarmente em poliéster ou poliamida, devendo a adesão entre os diferentes materiais ser efectiva (Figura 1.13 b)). A inclusão do geotêxtil melhora as propriedades mecânicas do material compósito não reforçando, contudo, o solo sobre o qual a geomembrana é colocada.

O processo de espalhamento superficial é o mais recente recorrendo-se, para a produção da geomembrana, a um geotêxtil não tecido agulhado sobre o qual se verte e espalha,

até à espessura pretendida, o polímero em fusão. Geralmente, a adesão entre camadas é boa.

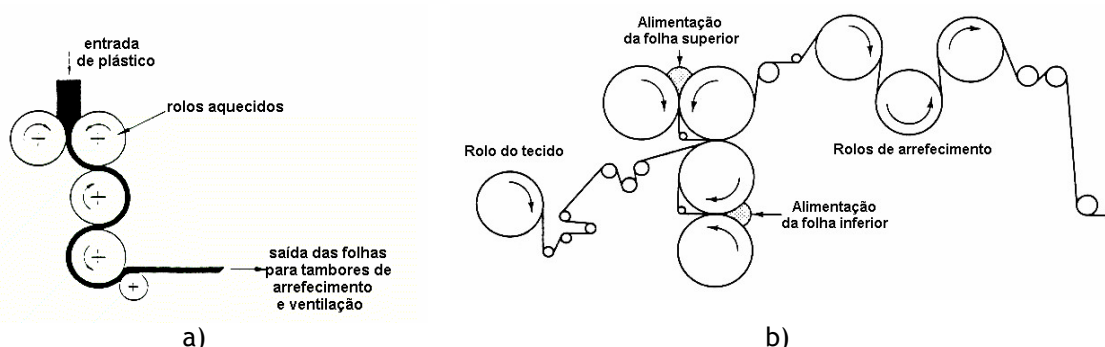


Figura 1.13 - Processo de fabricação de geomembranas: a) sistema de cilindros de rotação contrária - calandragem; b) processo de fabricação de geomembranas multicamadas (adaptado de Lopes, 1998).

1.4.5 - GEOTAPETES

Os geotapetes têm, geralmente, uma espessura entre 10mm e 20mm e são utilizados, principalmente, em aplicações de controlo de erosão de taludes. No mercado está disponível uma grande variedade destes produtos, resultante dos vários processos de fabrico utilizados.

Na sua maioria, os geotapetes são fabricados a partir de monofilamentos semi-rígidos de diâmetro inferior a 1mm que são, posteriormente, ligados termicamente formando uma estrutura final aberta com disposição mais ou menos regular dos poros. Nalguns casos é, ainda, incorporada uma geogrelha nesta estrutura, com o objectivo de aumentar a resistência à tracção do tapete e, consequentemente, melhorar o seu desempenho.

Em alternativa, é bastante utilizado um outro processo de fabrico de geotapetes, que consiste em ligar termicamente, em pontos regularmente espaçados, duas ou mais redes ou geogrelhas, constituindo uma estrutura tridimensional.

Existem, também, geotapetes biodegradáveis, fabricados com fibras naturais, bem como vários geocompósitos. Dentro destes, destacam-se as associações de geotêxteis, geogrelhas ou materiais granulares com ligante betuminoso aos geotapetes tradicionais.

1.5 - PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

Para poder desempenhar eficazmente a função para a qual foi escolhido, um geossintético deve apresentar um conjunto adequado de propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. A definição desse conjunto de propriedades deve considerar, principalmente, a funcionalidade do geossintético ao longo do período de vida útil da obra não esquecendo, contudo, as acções a que irá estar sujeito durante as operações de manuseamento, armazenagem e colocação em obra.

Dado que o campo de aplicação dos geossintéticos é muito amplo e que a sua utilização como alternativa aos materiais tradicionais tem aumentado muito rapidamente, a escolha dos métodos de ensaio para os caracterizar ou para simular o seu comportamento é, por vezes, difícil.

A necessidade de controlo das propriedades dos geossintéticos levou a que muitos países e alguns organismos internacionais desenvolvessem normas de ensaio próprias para estes materiais. No entanto, sendo o comportamento dos geossintéticos muito dependente das condições de ensaio (dimensões do provete, atmosfera (temperatura e humidade), velocidade do ensaio, entre outras), os resultados dos ensaios realizados segundo normas diferentes para a definição de uma mesma propriedade não são comparáveis. Esta situação pode gerar alguma confusão e arbitrariedade no uso dos geossintéticos, pois o mesmo material é susceptível de apresentar valores muito diferentes para uma dada propriedade.

Uma vez que a heterogeneidade normativa atrás referida em nada beneficia o alargamento do uso de geossintéticos, a Comissão Europeia de Normalização (CEN) criou, no domínio destes materiais, as Comissões Técnicas (TC) TC 189 e JWG TC 189/TC 254 que se têm vindo a ocupar, por um lado, da elaboração das normas europeias de ensaio de geossintéticos e, por outro, da definição de especificações com vista ao dimensionamento destes materiais.

Nesta secção serão referidas, de forma não exaustiva, algumas das propriedades mais importantes dos geossintéticos. Será apresentado, também, um resumo sobre o actual estado da normalização aplicável aos ensaios de geossintéticos na Europa.

1.5.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS

As principais propriedades físicas dos geossintéticos são a massa por unidade de área, a densidade relativa dos polímeros de que são constituídos e a espessura.

Massa por unidade de área (MUA) - A massa por unidade de área é um indicador da uniformidade e da qualidade de um geossintético, podendo ser usada para identificação de um produto. Para um dado tipo de polímero e de processo de fabrico, a gramagem pode ser directamente relacionada com as propriedades mecânicas. Esta grandeza exprime-se em g/m^2 .

Densidade relativa dos polímeros - Esta grandeza adimensional é definida como a razão entre o peso volúmico dos elementos que constituem o geossintético e o peso volúmico da água a 4°C. É um indicador do tipo de polímero e, como tal, pode ser usado para identificação e controlo de qualidade. Permite avaliar se o geossintético flutua, o que pode ser importante nalgumas aplicações.

Espessura - A espessura, expressa em mm, é definida como a distância entre as superfícies inferior e superior de um geossintético, medida para uma dada pressão. A espessura nominal é obtida com uma pressão de 2kPa. As relações entre a espessura e a pressão permitem avaliar a compressibilidade dos geossintéticos. A espessura dos materiais geossintéticos tem influência directa no seu comportamento mecânico e hidráulico.

1.5.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS

Durante o seu tempo de vida, um geossintético pode ser sujeito a variadas acções mecânicas, quer estáticas quer dinâmicas como, por exemplo, esforços de tracção, de compressão, de punçoamento e de rasgamento. As respostas destes materiais às solicitações em causa dependem das suas propriedades mecânicas, de entre as quais se salientam o comportamento à tracção, a resistência ao punçoamento e ao rasgamento e o atrito nas interfaces.

Comportamento à tracção - Esta propriedade dos geossintéticos depende de factores como o polímero constituinte, a estrutura, o processo de fabrico e o tipo de ligação, entre outros. De forma simplificada, a deformação total de um geossintético é composta por duas parcelas: uma, relativa à deformação dos componentes (mais significativa em

geogrelhas e geotêxteis tecidos) e, outra, relativa à deformação estrutural (mais importante em geotêxteis não tecidos). A resposta dos geossintéticos sujeitos a tracção é, usualmente, caracterizada pela curva que relaciona a força por unidade de largura (expressa em kN/m) com as extensões (expressas em percentagem). A partir desta curva, é possível obter a resistência à tracção (força por unidade de largura na rotura), a extensão na rotura e o módulo de rigidez (razão entre a força por unidade de largura e a extensão correspondente).

Resistência ao punçoamento - Os geossintéticos estão vulgarmente sujeitos a acções de punçoamento, seja durante, seja após a sua colocação em obra. Assim, pode surgir uma descontinuidade no material, provocada por um dos três mecanismos seguintes: perfuração (golpe), punçoamento (efeito de compressão) e rebentamento. A resistência ao punçoamento é definida com base na medição da vulnerabilidade dos geossintéticos às compressões diferenciais ou a choques. A solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica e, consoante o mecanismo que lhe dá origem, a resistência ao punçoamento pode ser quantificada por um comprimento, uma força ou uma pressão.

Resistência ao rasgamento - Define-se rasgamento como a rotura progressiva resultante de duas acções: uma, localizada, do tipo “perfuração” e outra, distribuída, do tipo “tracção”. A força de rasgamento, expressa em kN, mede a resistência dos geossintéticos à propagação de rasgões locais.

Atrito nas interfaces - Dado que a transferência de tensões do solo para os geossintéticos é feita através da interacção entre eles, esta é uma propriedade extremamente importante quando estes materiais actuam como reforço. A caracterização dessa interacção é feita com base na resistência ao corte da interface solo - geossintético sendo, geralmente, expressa em kN/m^2 e podendo ser representada por uma lei idêntica à lei de Mohr - Coulomb, ou seja, através da adesão e do ângulo de atrito.

A resistência ao corte da interface resulta da mobilização de atrito lateral entre o solo e o geossintético e da mobilização de impulso passivo nos seus elementos transversais, caso a dimensão das suas aberturas seja superior à dos grãos de solo (como no caso das geogrelhas). Como se compreende, a resistência ao corte da interface solo-geossintético será sempre menor ou igual à do solo, dependendo de factores como a rugosidade do geossintético e da granulometria do solo, entre outros.

1.5.3 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

As principais propriedades hidráulicas dos geossintéticos são a distribuição e dimensão das aberturas e a permeabilidade, na sua vertente dual, isto é, na direcção do plano do material e na direcção perpendicular a esta. Este conjunto de propriedades voltará a ser referido, com maior detalhe, no Capítulo 3. Podem, ainda, ser referidas outras propriedades tais como a permeabilidade ao ar e a capacidade de filtragem de solos. É, ainda, de referir que as propriedades hidráulicas de um geossintético são mais influenciadas pelo processo de fabrico do que pelo tipo de polímero.

Distribuição e dimensão das aberturas - No caso das geogrelhas, as aberturas são uniformes, bastando medir o tamanho de uma delas para determinar a dimensão das aberturas do material. Porém, no caso dos geotêxteis, verifica-se que as suas aberturas não possuem um único tamanho, mas sim um intervalo de tamanhos. Assim sendo, a representação desse intervalo faz-se de forma análoga à utilizada para representar a granulometria de um solo e designa-se por porometria. A dimensão equivalente de abertura, O_n (em geral, n tem o valor de 90%) representa a dimensão que é maior do que $n\%$ das aberturas do geossintético. Normalmente, o diâmetro das aberturas é expresso em mm ou em μm .

Permeabilidade no plano do material - A permeabilidade no plano do material, geralmente expressa em m^2/s , caracteriza as condições de escoamento no plano do geossintético, sendo dependente da espessura e da distribuição e dimensão das aberturas.

Permeabilidade normal ao plano do material - A permeabilidade na direcção perpendicular ao plano do geotêxtil é expressa em m/s (ou mm/s) dependendo, também, da distribuição e dimensão das aberturas.

1.5.4 - DURABILIDADE

Brown e Greenwood (2002), referindo-se aos plásticos em geral, afirmam que a durabilidade cobre todos os aspectos referentes a alterações irreversíveis nas propriedades dos materiais em estudo, decorrentes da sua utilização e do tempo, incluindo todos os agentes ambientais que contribuem para a degradação, bem como todos os aspectos relativos a acções mecânicas (Pinho-Lopes, 2004).

O problema básico envolvendo a questão da durabilidade consiste na determinação do intervalo de tempo durante o qual um geossintético terá a capacidade de manter, dentro dos valores mínimos requeridos, as propriedades que lhe são exigidas, num dado meio ambiente.

Apesar das vantagens económicas associadas ao emprego de geossintéticos em obras de terra e em obras de índole ambiental, a utilização destes materiais é ainda limitada pela existência de dúvidas relativas à questão da permanência das características dos geossintéticos ao longo do tempo. A alteração das características dos geossintéticos pode resultar de:

- Deterioração durante as operações de transporte, manuseamento, armazenamento e colocação em obra;
- Acção interna (evolução da matéria prima);
- Acção externa, que pode ser mecânica (fluência e relaxação), física, química ou bacteriológica.

Os danos causados pelas operações de instalação podem ser controlados com relativa facilidade, através da realização de ensaios durante as diversas fases de execução.

Em relação ao envelhecimento causado por acções internas, é de referir que os polímeros sintéticos, devido ao seu processo de fabrico, têm alterações estruturais que podem, com o decorrer do tempo, conduzir a situações como, por exemplo, cristalizações, sem que tal indique, à partida, a degradação do geossintético.

No que se refere às acções externas, em particular às acções mecânicas, é de notar que a fluência e a relaxação são determinantes no comportamento dos geossintéticos a longo prazo.

A fluência é um fenómeno que conduz ao aumento de deformação sob tensão constante. Isto acontece porque os polímeros que constituem os geossintéticos exibem comportamento elasto-viscoplástico, dependente do tempo, carga e temperatura, sob tensão constante. A fluência de um geossintético depende, essencialmente, do tipo de polímero tendo o processo de fabrico e, consequentemente, a estrutura, uma influência bastante reduzida.

A rotura por relaxação dá-se por acção de solicitações alternadas como, por exemplo, o tráfego numa via de circulação. Contrariamente ao que se passa em relação à fluência,

sabe-se que a estrutura do geossintético é mais sensível à relaxação do que o tipo de polímero constituinte do material.

Uma das grandes preocupações, em termos de comportamento a longo prazo, diz respeito à possibilidade de colmatção dos geossintéticos, pois esta pode comprometer as propriedades hidráulicas dos materiais. Este fenómeno é provocado pela migração de partículas de solo para o geossintético que, ocupando as suas aberturas, impedem o fluxo dos fluidos. A colmatção pode ocorrer por acção de fenómenos físicos, químicos e biológicos.

No que se refere à degradação dos geossintéticos provocada por agentes físico-químicos podem-se destacar: a degradação fotoquímica e térmica, em regra, provocada pelas condições atmosféricas; e a degradação química e bacteriológica resultante, por norma, do contacto com o solo envolvente.

Degradação fotoquímica - A gama de comprimentos de onda a que pertence a radiação ultravioleta do espectro solar que atinge a superfície terrestre possui energia suficiente para quebrar a maior parte das ligações químicas presentes nas macromoléculas dos polímeros. A intensidade e a duração destas radiações são os factores preponderantes da degradação fotoquímica do polímero, embora as acções do oxigénio, da humidade e das altas temperaturas facilitem essa degradação. Assim sendo, deve evitar-se a exposição dos geossintéticos à luz solar, envolvendo-os em revestimentos opacos e armazenando-os em estaleiro ao abrigo da luz, até se proceder à sua aplicação, que deve ser tão rápida quanto possível.

Degradação térmica - Uma vez que o aumento da temperatura acelera as reacções químicas, a degradação de um polímero, sendo um fenómeno essencialmente químico, é favorecida por esse aumento. A este factor pode-se aliar o efeito do oxigénio, desenvolvendo-se um tipo de degradação designada como termo-oxidativa. A intensidade deste tipo de degradação depende, naturalmente, da concentração de oxigénio em contacto com o polímero sendo, por isso, menor quando este está submerso em água.

Degradação química - A degradação química pode ser provocada pela acção do oxigénio, dos iões metálicos, dos ácidos, das bases, dos solventes e da água. Estas espécies químicas são responsáveis por profundas alterações nas cadeias moleculares constituintes dos polímeros como a quebra de ligações químicas e consequente diminuição do comprimento das cadeias moleculares, a alteração química das cadeias, a formação de espécies quimicamente activas e a incorporação de iões estranhos nas cadeias, entre

outras. A perda nas propriedades mecânicas de um polímero, resultante deste tipo de degradação, depende da sua natureza química. Assim, torna-se necessário juntar aos polímeros de base alguns aditivos que impeçam o desenvolvimento dos processos de degradação atrás referidos, tais como estabilizantes térmicos, anti-UV e anti-oxidantes.

Degradação biológica - Os plásticos podem degradar-se biologicamente por acção de microrganismos presentes nos maciços terrosos. Estes microrganismos podem actuar directamente sobre os polímeros de base dos plásticos, desenvolver a sua acção destrutiva sobre determinados aditivos presentes na composição dos geossintéticos ou, ainda, favorecer o desenvolvimento de produtos agressivos para os materiais plásticos. Os estudos realizados até ao momento apontam para uma boa resistência biológica dos polímeros mais comuns no fabrico de geossintéticos, uma vez que os microrganismos apenas consomem as fracções poliméricas de muito baixo peso molecular. As geogrelhas, por serem produzidas com materiais mais grosseiros, aos quais é adicionada uma significativa quantidade de carbono, possuem melhores características de durabilidade do que os geotêxteis convencionais.

1.5.5 - NORMALIZAÇÃO APLICÁVEL AOS ENSAIOS DE GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são, geralmente, ensaiados pelo fabricante, para controlo da produção, e pelo utilizador, com dois objectivos:

- Seleccionar um determinado produto para uma dada aplicação (ensaios de qualificação);
- Identificar e controlar a qualidade dos produtos seleccionados (ensaios de recepção, identificação e controlo de qualidade).

Os ensaios de qualificação, que pretendem definir o comportamento do sistema solo - geossintético para níveis de tensão e condições ambientais idênticas às que previsivelmente ocorrerão na obra a construir, são normalmente mais longos, caros e complexos que os ensaios de identificação. Estes últimos têm por objectivo identificar o produto seleccionado e verificar se, após as operações de transporte, manuseamento e armazenamento, os valores das propriedades relevantes estão de acordo com os limites estabelecidos nas especificações de qualidade do material.

Os Quadros 1.2 a 1.6 resumem as normas em vigor para o ensaio de geossintéticos aplicáveis no espaço comunitário.

Quadro 1.2 - Normas de terminologia, identificação e amostragem dos geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).

Número	Nome
NP EN ISO 9862: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Amostragem e preparação de provetes
NP EN ISO 9863-1: 2006 (Ed. 1)	Geossintéticos. Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples
EN ISO 9863-2: 1996 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of thickness at specified pressures - Part 2: Procedure for determination of thickness of single layers of multilayer products
NP EN ISO 9864: 2006 (Ed. 1)	Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados
NP EN ISO 10318	Geossintéticos. Termos e definições (aguarda publicação)
NP EN ISO 10320: 2003 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Identificação em obra
NP EN 14196: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Métodos de ensaio para a determinação da massa por unidade de área das barreiras geossintéticas argilosas

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)
EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

Quadro 1.3 - Normas referentes às exigências para os geossintéticos com vista à marcação CE (adaptado de IGS-Portugal, 2009).

Número	Nome
NP EN 13249: 2007 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Características requeridas para a utilização na construção de estradas e outras zonas de tráfego (excluindo vias-férreas e pavimentos betuminosos)
NP EN 13250: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de vias-férreas
NP EN 13251: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em obras de terraplenagem, fundações e estruturas de suporte
NP EN 13252: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em sistemas de drenagem
NP EN 13253: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em obras para controlo da erosão (protecção costeira, revestimento das margens)

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)
EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

Quadro 1.3 (Cont.) - Normas referentes às exigências para os geossintéticos com vista à marcação CE (adaptado de IGS-Portugal, 2009)

Número	Nome
NP EN 13254: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de reservatórios e barragens
NP EN 13255: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de canais
NP EN 13256: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização na construção de túneis e estruturas subterrâneas
NP EN 13257: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em depósitos de resíduos sólidos
NP EN 13265: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Características requeridas para a utilização em projectos de depósitos de resíduos líquidos
NP EN 13361: 2006 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização na construção de depósitos e barragens
EN 13361:2004/A1: 2006 (Ed. 1)	Geosynthetic barriers - Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams
NP EN 13362: 2007 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas. Características requeridas para utilização na construção de canais
NP EN 13491: 2006 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas - Características requeridas para a utilização como barreira aos líquidos na construção de túneis e obras subterrâneas
EN 13491: 2004/A1: 2006 (Ed. 1)	Geosynthetic barriers - Characteristics required for use as fluid barrier in the construction of tunnels and underground structures
NP EN 13492: 2007 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas. Características requeridas para a utilização na construção de estruturas de deposição de resíduos líquidos, estações de transferência ou confinamento secundário
EN 13492: 2004/A1: 2006 (Ed. 1)	Geosynthetic barriers - Characteristics required for use in the construction of liquid waste disposal sites, transfer stations or secondary containment
NP EN 13493: 2007 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas. Características requeridas para a utilização na construção de estruturas de armazenamento e de deposição de resíduos sólidos

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)

EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

Quadro 1.3 (Cont.) - Normas referentes às exigências para os geossintéticos com vista à marcação CE (adaptado de IGS-Portugal, 2009)

Número	Nome
EN 15381: 2008	Geotextiles and geotextile-related products - Characteristics required for use in pavements and asphalt overlays (aguarda publicação)
EN 15382: 2008	Geotextiles and geotextile-related products - Characteristics required for use in transportation infrastructure (aguarda publicação)

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)
EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

Quadro 1.4 - Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).

Número	Nome
EN 1897: 2001 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextiles related-products. Determination of the compressive creep properties
NP EN ISO 10319: 2005 (Ed. 1)	Geotêxteis. Ensaio de tracção em tiras largas
EN ISO 10319: 2008 (Ed. 2)	Geosynthetics. Wide-width tensile test
EN ISO 10321: 2008 (Ed. 2)	Geosynthetics. Tensile test for joints/seams by wide-width strip method
EN ISO 10722: 2007 (Ed. 1)	Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material
EN ISO 12236: 2006 (Ed. 2)	Geosynthetics. Static puncture test (CBR-Test)
NP EN ISO 12957-1: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Determinação das características de atrito. Parte 1: Ensaio de corte directo
NP EN ISO 12957-2: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Determinação das características de atrito. Parte 2: Ensaio em plano inclinado
EN ISO 13426-1: 2003 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the strength of internal structural junctions - Part 1: Geocells
EN ISO 13426-2: 2005 (Ed 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the strength of internal structural junctions - Part 1: Geocomposites
NP EN ISO 13427: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão (ensaio de bloco deslizante)

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)
EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

*Quadro 1.4 (Cont.) - Normas para ensaios mecânicos de geossintéticos
(adaptado de IGS-Portugal, 2009).*

Número	Nome
NP EN ISO 13428: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Determinação da eficácia de protecção de um geossintético contra danos por impacto
EN ISO 13431: 1999 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and tensile creep rupture behaviour
EN ISO 13433: 2006 (Ed. 1)	Geosynthetics. Dynamic perforation test (cone drop test)
EN 13719: 2002 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of long term protection efficiency
NP EN 13738: 2007 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência ao arranque no solo
EN ISO 13431: 1999 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and tensile creep rupture behaviour
prEN ISO 25619-1	Geosynthetics - Determination of compressive behaviour - Part 1: Compressive creep properties
prEN ISO 25619-2	Geosynthetics - Determination of compressive behaviour - Part 2: Determination of short-term compression behaviour
prEN 14151	Geosynthetics - Determination of burst strength

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)

EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

*Quadro 1.5 - Normas referentes à durabilidade dos geossintéticos
(adaptado de IGS-Portugal, 2009).*

Número	Nome
NP EN 12224: 2007 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência ao envelhecimento devido ao clima
NP EN 12225: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Método para a determinação da resistência microbiológica através de um ensaio de enterramento no solo
NP EN 12226: 2005 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Ensaio gerais para avaliação após os ensaios de durabilidade
NP EN 12447: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Método de ensaio selectivo para a determinação da resistência à hidrólise na água

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)

EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

Quadro 1.5 (Cont.) - Normas referentes à durabilidade dos geossintéticos (adaptado de IGS-Portugal, 2009).

Número	Nome
NP ISO TR 13434	Geotêxteis e produtos relacionados - Directrizes sobre durabilidade (aguarda publicação)
NP EN ISO 13437: 2007 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Método para instalação e extracção de amostras no solo e preparação de provetes para ensaios em laboratório
NP EN ISO 13438: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência à oxidação
EN 14030: 2001 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile related-products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids
EN 14030: 2001/A 1: 2003 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile related-products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids
NP EN 14414: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Método de ensaio selectivo para a determinação da resistência química para utilização em aterros de resíduos
NP EN 14415: 2007 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas. Método de ensaio para a determinação da resistência à lixiviação
NP CEN TS 14416	Barreiras Geossintéticas - Método de ensaio para a determinação da resistência às raízes (aguarda publicação)
CEN TS 14417: 2005	Geosynthetic Barriers - Determination of resistance to wet/dry cycles
CEN TS 14418: 2005	Geosynthetic Barriers - Determination of resistance to freeze/thaw cycles
NP EN 14575: 2007 (Ed. 1)	Barreiras geossintéticas. Método de ensaio para a determinação da resistência à oxidação
NP EN 14576: 2007 (Ed. 1)	Geossintéticos. Método de ensaio para a determinação da resistência das barreiras geossintéticas poliméricas à fissuração por tensão provocada pelos agentes ambientais
NP CEN/TR 15019	Geotêxteis e produtos relacionados - Controlo de qualidade em obra (aguarda publicação)

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)
EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

*Quadro 1.6 - Normas para ensaios hidráulicos de geossintéticos
(adaptado de IGS-Portugal, 2009).*

Número	Nome
NP EN ISO 11058: 2003 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento
NP EN ISO 12956: 2006 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da dimensão característica da abertura
NP EN ISO 12958: 2005 (Ed. 1)	Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da capacidade de escoamento no seu plano
EN 13562: 2000 (Ed. 1)	Geotextiles and geotextile-related products - Determination of resistance to penetration by water (Hydrostatic pressure test)
EN 14150: 2006 (Ed. 1)	Geosynthetic Barriers - Determination of permeability to liquids

Notas: NP EN - Norma Portuguesa em vigor (traduzida da norma Europeia)

EN - Norma Europeia em vigor (ainda não traduzida, mas obrigatória em Portugal)

1.6 - FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

A utilização dos geossintéticos em obras de construção civil e de cariz ambiental tem sido cada vez maior, quer como substitutos de materiais de construção tradicionais, quer como reforço dos materiais naturais. Numa determinada aplicação, um geossintético pode desempenhar, simultaneamente, várias funções. Apenas com a definição dessas funções e com a sua hierarquização é possível definir as características que o material deve possuir para desempenhar adequadamente as funções para que foi escolhido. Por função, entende-se uma acção específica que o produto deve desempenhar para que sejam atingidos os objectivos da sua aplicação, que resulta da combinação de algumas das suas propriedades.

A Comissão Europeia de Normalização (CEN), na norma NP EN ISO 10318 “Geossintéticos - termos e definições”, destaca sete funções principais (Figura 1.14) que os geossintéticos podem desempenhar:

- Drenagem;
- Filtragem;
- Protecção;
- Reforço;

- Separação;
- Controlo de erosão superficial;
- Barreira de fluidos.

Nas secções seguintes é feita uma descrição sumária de cada uma das funções referidas.

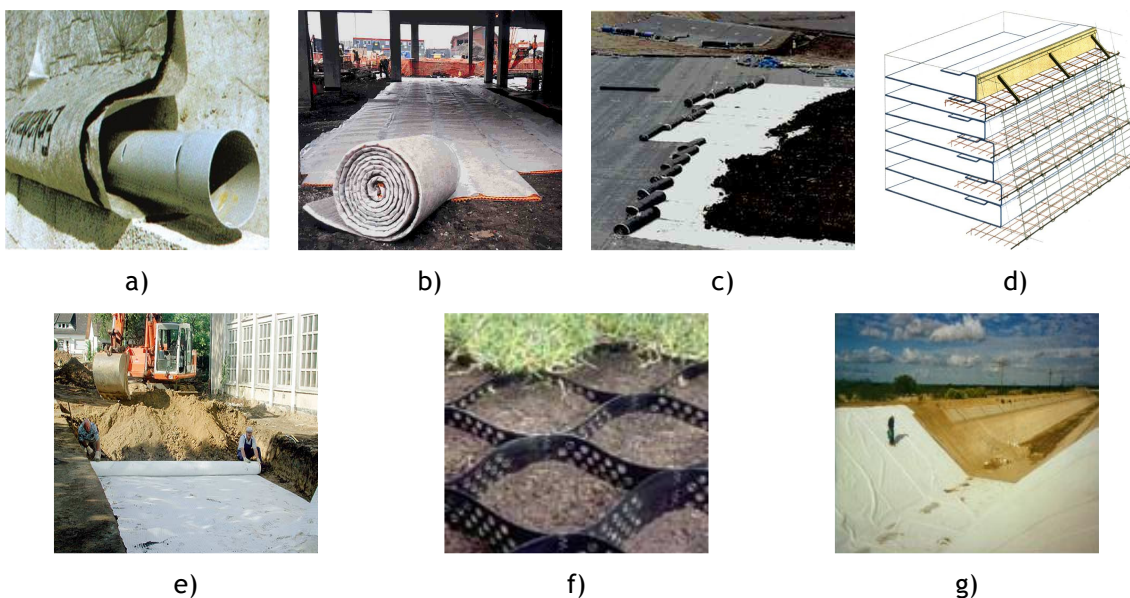


Figura 1.14 - Funções dos geossintéticos: a) drenagem; b) filtragem; c) protecção; d) reforço; e) separação; f) controlo de erosão superficial; g) barreira de fluidos.

1.6.1 - DRENAGEM

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de drenagem consiste em recolher e transportar águas pluviais, águas freáticas e/ou outros fluidos ao longo do plano de um geotêxtil ou de um produto relacionado. Assim, as exigências fundamentais são as de assegurar a evacuação da água ou gás no plano do geossintético com uma pequena perda de carga, o que se consegue garantindo que este apresente espessura e compressibilidade adequadas e que a dimensão das aberturas seja tal que impeça a passagem das partículas sólidas e o bloqueio ou colmatação.

1.6.2 - FILTRAGEM

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de filtragem consiste em reter o solo ou outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, enquanto permite a passagem de fluidos para o interior ou através de um geotêxtil ou produto relacionado. Para permitir o

livre fluxo do fluido fazendo, simultaneamente, a retenção do solo no sentido do fluxo, o material deve ter características hidráulicas e dimensão de aberturas adequadas. Deve, ainda, exibir a flexibilidade necessária ao bom ajustamento à superfície por ele protegida. A compatibilidade solo - geossintético é muito importante em termos de fluxo a longo prazo, de forma a evitar a colmatação.

1.6.3 - PROTECÇÃO

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de protecção consiste em evitar ou limitar a danificação local de um determinado elemento ou material através da utilização de um geotêxtil ou produto relacionado. Desta forma, um geossintético desempenha a função de protecção quando é colocado entre dois materiais, de forma a absorver e distribuir as tensões e deformações transmitidas ao material a ser protegido. O geossintético deve, então, exibir propriedades mecânicas e espessura adequadas e deve apresentar continuidade.

1.6.4 - REFORÇO

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de reforço não é mais do que a utilização do comportamento força - extensão de um geotêxtil ou produto relacionado para melhorar as propriedades mecânicas do solo ou outros materiais de construção. Os geossintéticos, sendo materiais que resistem a esforços de tracção, podem ser utilizados para complementar materiais que não possuam essa capacidade. O reforço de solos funciona como um melhoramento mecânico do solo, permitindo que este suporte esforços de corte superiores aos que suportaria de outra forma.

A função de reforço pode ser exercida em duas situações: quando os geossintéticos exercem acção mecânica de membrana, ou seja, quando são colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua tensão equilibra a diferença de pressões entre elas; e quando são colocados no interior de maciços para suportar tensões de tracção. Assim, quando os geossintéticos desempenham a função de reforço, as suas propriedades mecânicas são fundamentais, bem como a sua evolução no tempo. Para além disso, é muito importante que a resistência das interfaces solo - reforço seja adequada, pois é através delas que se desenvolvem as interacções necessárias ao funcionamento conjunto da estrutura compósita.

1.6.5 - SEPARAÇÃO

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de separação consiste em evitar a mistura entre dois materiais adjacentes, solos e/ou materiais de aterro, através da utilização de um geotêxtil ou produto relacionado. Para exercer esta função, o geossintético necessita de ter características mecânicas e hidráulicas apropriadas aos solos em causa.

1.6.6 - CONTROLO DA EROSÃO SUPERFICIAL

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de controlo da erosão superficial consiste na utilização de um geotêxtil ou produto relacionado para evitar ou limitar os movimentos de solo ou outras partículas na superfície de, por exemplo, um talude.

Assim, os geossintéticos são colocados sobre os maciços, protegendo-os da acção de agentes atmosféricos, tráfego, etc. Este tipo de função tem vindo a ganhar importância, nomeadamente, em aplicações de protecção de taludes e protecção costeira, entre outras.

Esta função pode ser desempenhada de forma provisória ou permanente. Podem ser utilizados, por exemplo, geossintéticos biodegradáveis para proteger temporariamente uma estrutura da erosão superficial e promover o crescimento da vegetação que, por sua vez, irá assegurar o controlo da erosão após a degradação daqueles.

Como exemplos da aplicação de geossintéticos em sistemas de controlo da erosão superficial, pode referir-se a protecção de taludes face à acção dos agentes meteorológicos e o revestimento de leitos de canais ou lagos para evitar a erosão superficial dos leitos ou margens.

1.6.7 - BARREIRA DE FLUIDOS

De acordo com a NP EN ISO 10318, a função de barreira de fluidos consiste em utilizar um geossintético para evitar a migração de fluidos. Assim sendo, quando os geossintéticos exercem a função de barreira de fluidos é importante que, durante as operações de transporte, manuseamento e colocação em obra, a continuidade do material seja

garantida e que este sobreviva às diferentes acções a que estará submetido, nomeadamente, aos ataques químicos que os fluidos com que contacta possam implicar.

1.7 - COLOCAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS EM OBRA

Como já foi referido neste trabalho, as operações de transporte, manuseamento, armazenamento e colocação em obra representam uma fase crítica no período de vida dos geossintéticos, durante a qual estes são submetidos a acções intensas que podem conduzir à sua degradação. No entanto, se forem respeitados alguns cuidados básicos, a fase de colocação em obra pode terminar com o geossintético praticamente intacto e, consequentemente, apto a desempenhar com toda a segurança as funções para as quais foi escolhido.

Os procedimentos de colocação dependem do tipo de aplicação e do tipo de geossintético. Contudo, esses procedimentos devem, genericamente, ter em atenção os seguintes aspectos:

- Preparação do terreno;
- Colocação e sobreposição dos elementos individuais;
- Ligação dos elementos individuais.

A preparação do terreno tem por objectivo evitar que os materiais instalados possam ser rasgados ou fortemente comprimidos ou distendidos em zonas localizadas. Assim sendo, devem ser retirados todos os corpos contundentes e, caso seja necessário, deve ser colocado um solo arenoso entre o solo existente e o material geossintético. Deste modo, procura-se uniformizar a distribuição das tensões transferidas do geossintético para o terreno e vice-versa.

Quando se aplicam materiais fornecidos em rolos, é necessário ter alguns cuidados nos procedimentos de colocação, sobreposição e ligação. Assim, as faixas devem ser colocadas na direcção dos maiores esforços, realizando-se a sobreposição longitudinal nessa direcção. Caso seja necessária sobreposição transversal, deve ter-se em conta o sentido de lançamento dos materiais de aterro e o sentido de actuação das acções hidrodinâmicas, para evitar que as duas faixas deixem de estar em contacto. A fixação dos bordos com pedras ou ganchos, eventualmente associada ao lançamento imediato do aterro, pode ser aconselhável quando se prevê que, por qualquer motivo, possa ocorrer levantamento das telas.

No caso dos geotêxteis, a ligação entre faixas pode ser efectuada por sobreposição directa, grampeamento, costura ou colagem. A ligação por costura é a mais eficaz e, ao contrário do que acontece com os outros tipos de ligação possíveis para geotêxteis, é aplicável seja qual for a função desempenhada por estes. A costura é efectuada com uma máquina de coser apropriada. A sobreposição neste tipo de ligação varia entre 10cm e 20cm e o fio e ponto utilizados devem garantir a manutenção das propriedades hidráulicas e mecânicas nas zonas de costura.

A ligação entre faixas de geogrelhas pode ser realizada por sobreposição directa, unindo com fio entrançado as barras sobrepostas, ou entrelaçando varões ou barras nas aberturas do material sobreposto (ligação com passador). Este último tipo de ligação, embora sendo o mais eficaz, não é de aplicação geral. A ligação com fio entrançado apresenta eficiência adequada à generalidade das geogrelhas, pelo que a sua utilização é mais comum.

A ligação entre faixas de geomembranas é uma operação delicada que deve ser realizada com todo o cuidado pois dela depende, em elevada percentagem, o exercício eficaz da função de barreira de fluidos. O mecanismo fundamental para unir geomembranas consiste em reorganizar temporariamente a estrutura do polímero nas duas faces opostas que se pretende juntar.

Para proceder a esta reorganização é necessário fornecer energia à zona a unir, podendo essa energia ser originada por processos químicos ou térmicos. Após este fornecimento energético, que pode envolver a adição de polímero na zona de ligação, a aplicação de pressão e a passagem do tempo resultam na união das duas folhas de geomembrana.

Os tipos de ligações mais comuns, representadas esquematicamente na Figura 1.15, são as seguintes (Koerner, 1999):

- Ligação por extrusão, sendo que a extrusão pode ser realizada sobre a geomembrana superior ou no meio das duas folhas a unir;
- Ligação por fusão parcial simples ou dupla das geomembranas a unir, na zona da ligação;
- Ligação química, através do uso de solventes líquidos;
- Ligação por colagem.

Na Figura 1.16, apresenta-se, de forma esquemática, a geometria corrente das ligações simples e duplas. As ligações duplas apresentam a vantagem de permitir a utilização do

espaço entre as duas zonas efectivamente ligadas para avaliar a qualidade da ligação. Num procedimento deste tipo, pressuriza-se o espaço vazio entre as ligações e verifica-se a ocorrência de perdas de pressão, o que pode indicar a existência de fugas.

Refira-se por fim que, sempre que possível, é conveniente cobrir os geossintéticos logo após a sua colocação, para evitar eventuais deslocações das suas posições e para os proteger da acção dos raios solares e de outros agentes atmosféricos.

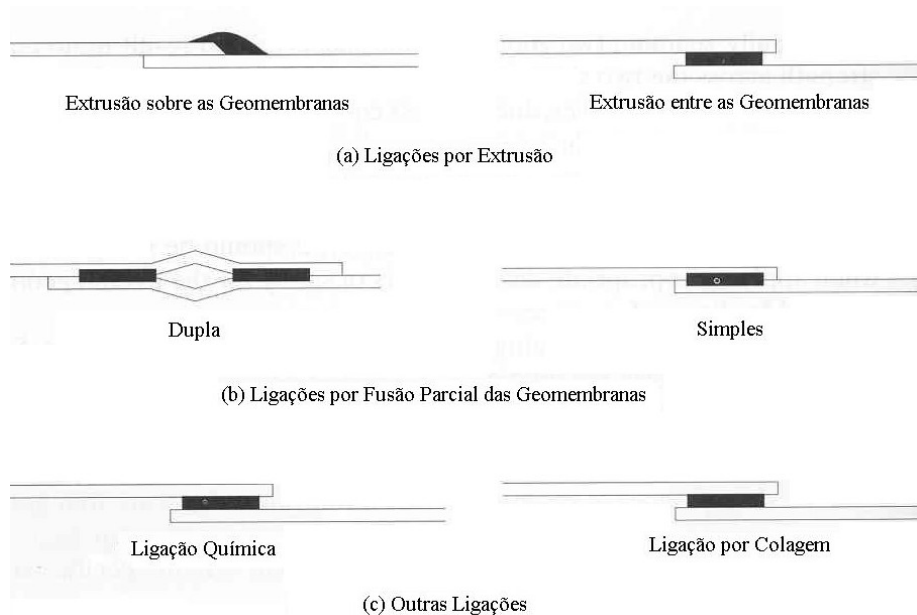


Figura 1.15 - Vários métodos disponíveis para efectuar ligações entre geomembranas (adaptado de Koerner, 1999).

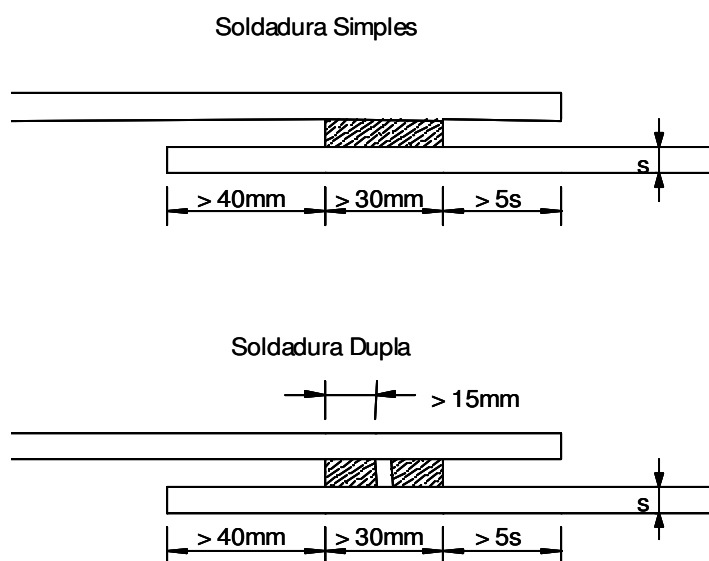


Figura 1.16 - Esquema da geometria das juntas de geomembranas (adaptado de Lopes, 1998).

De um ponto de vista mais técnico, Giroud (1986) acrescenta que as propriedades dos solos são complementadas pelas propriedades dos geossintéticos pois, enquanto que os primeiros podem sofrer erosão ou romper devido a tensões de tracção, os geossintéticos permanecem contínuos devido à sua resistência a este tipo de esforços. Além disso, as estruturas geotécnicas são flexíveis e estão sujeitas a movimentos diferenciais, sendo os geossintéticos compatíveis com este tipo de comportamento.

CAPÍTULO 2

DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO - - INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

2.1 - INTRODUÇÃO

A danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos é um dos factores de redução de resistência mais significativos e decorre, essencialmente, das operações de colocação e compactação dos solos que ficam em contacto com os geossintéticos e das operações de manuseamento destes.

Dado que se trata de um fenómeno resultante, fundamentalmente, das operações em obra, a danificação durante a instalação de geossintéticos pode ser estudada recorrendo a ensaios de campo e ensaios laboratoriais de simulação desse tipo de danificação.

No estudo laboratorial da danificação dos geossintéticos durante a instalação, o material é colocado entre duas camadas de solo granular compactado. A danificação é avaliada através da perda de resistência à tracção, ou outro parâmetro de referência, e por inspecção visual da estrutura do geossintético. Em seguida, o material danificado é

ensaiado à propriedade em estudo de modo a registar a alteração do valor dessa propriedade.

As propriedades mais correntemente consideradas são as mecânicas, em particular a resistência à tracção.

2.2 - DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO

Há já várias décadas que os materiais geossintéticos têm sido utilizados como separadores, filtros, reforços, meios de drenagem e camadas de protecção, nos mais variados tipos de obras. Apesar de, na generalidade, os elementos de construção elaborados com este tipo de materiais, cumprirem a função para que são concebidos e dimensionados, há muitos casos em que a danificação provocada aquando da sua instalação em obra compromete o seu correcto funcionamento. Por vezes, as acções a que se submete os materiais durante os processos de instalação adquirem um nível mais elevado do que as solicitações para que foram dimensionados (Koerner, 1999).

Note-se que a maior parte das obras em que são utilizados materiais geossintéticos são obras que envolvem operações pesadas, de preparação de terrenos, espalhamento e compactação de solos, etc., e em que se utilizam máquinas e equipamentos com alguma envergadura. Assim, apesar de se poder imputar alguma culpa na indução da danificação nos materiais à falta de sensibilidade e de especialização de muitos trabalhadores que procedem à sua aplicação, é necessário entender que a sua ocorrência é inevitável.

De forma a contornar esta questão, um procedimento habitual é o de, na fase de projecto, prever a utilização de um material mais robusto do que o necessário. No entanto, visto que este método vai contra o conceito de optimização de custos e de recursos, o tema da danificação durante a instalação tem sido alvo de investigação, no sentido de se avaliar as alterações nas propriedades dos geossintéticos, decorrentes dos processos de colocação em obra.

2.2.1 - TIPOS DE DANOS PROVOCADOS EM GEOSSINTÉTICOS

Em primeiro lugar, é necessário tentar perceber quais os tipos de danos que podem ser causados nos geossintéticos, durante a sua instalação em obra para, posteriormente, tomar medidas como, por exemplo, regulamentar as exigências mínimas nas

características dos materiais, implementar boas práticas de construção, elaborar recomendações, etc.

Os tipos de danos que podem ser causados e verificados nos materiais geossintéticos são a abrasão, o aparecimento de fendas e separação de material, o punçoamento, a rotura em tensão, o corte de fibras e o rasgamento (Pinho-Lopes, 2004). Note-se que os diversos tipos de danos dependem das próprias características dos geossintéticos e de factores externos como as condições das obras em que são colocados. De entre estas podem-se designar as características do solo subjacente ao geossintético e do que lhe é colocado por cima, o tipo de equipamento e os procedimentos utilizados e as condições climáticas verificadas durante a aplicação dos materiais.

A abrasão é provocada por uma acção repetida de contacto entre o geossintético e um material abrasivo ou sempre que há acções cíclicas que implicam movimento relativo entre o geossintético e o solo em contacto com este (Pinho-Lopes, 2004). Na Figura 2.1 pode-se observar um esquema representativo de um mecanismo como o que se acabou de referir, ao passo que, na Figura 2.2 são visíveis os efeitos da abrasão sobre a superfície de uma amostra de um material em poliéster.

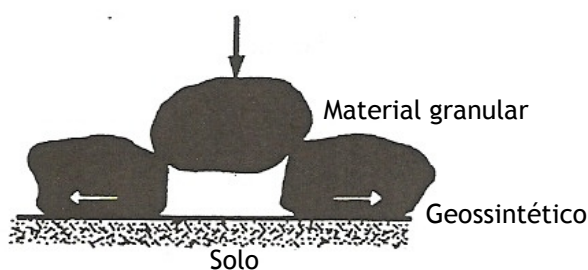


Figura 2.1 - Mecanismo de danificação por abrasão (adaptado de Shukla, 2002).

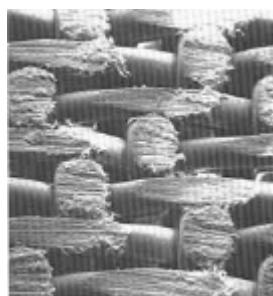


Figura 2.2 - Efeito de abrasão num plástico tecido em poliéster - imagem obtida por microscopia electrónica de varrimento (Pinho-Lopes, 2004).

Este tipo de danificação pode ocorrer em qualquer tipo de geossintético sendo, todavia, mais usual em geotêxteis não tecidos agulhados. Os efeitos mais evidentes da abrasão são a redução da espessura e a alteração nas propriedades hidráulicas do material podendo ocorrer, mesmo, a destruição total das áreas afectadas. Por fim, refira-se que os efeitos da abrasão não dependem tanto do tamanho das partículas de solo como da própria natureza deste. Na realidade, é possível verificar que partículas angulosas, mesmo de pequenas dimensões produzem efeitos mais nefastos sobre os geossintéticos do que partículas maiores mas com menor angulosidade.

O aparecimento de fendas e separação de material é um tipo de dano que ocorre essencialmente em geogrelhas extrudidas (Pinho-Lopes, 2004). É provocado pelo contacto das partículas angulosas e com arestas cortantes do material de aterro com as faces dos geossintéticos.

A danificação por punçoamento manifesta-se, muitas vezes, em casos de utilização de geotêxteis com função de filtragem e/ou de separação e de geomembranas, usadas como barreiras de fluidos. Resulta, como no caso anterior, do contacto de partículas angulosas com os geossintéticos. A Figura 2.3 ilustra, esquematicamente, o processo de danificação por punçoamento.

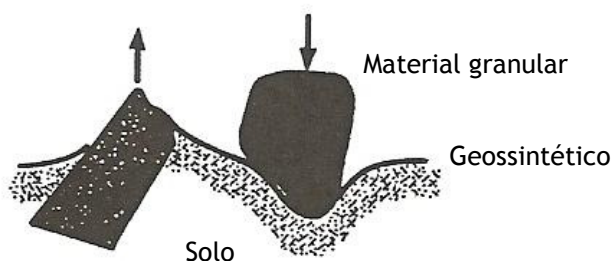


Figura 2.3 - Mecanismo de danificação por punçoamento (adaptado de Shukla, 2002).

Como exemplos em que este mecanismo ocorre podem ser citados os casos em que o material de aterro é vertido directamente sobre a manta de geossintético ou quando se procede à compactação de camadas finas de material granular com equipamento pesado. Note-se que a abertura de furos nesses materiais altera, por completo, as suas características hidráulicas modificando ou comprometendo o seu desempenho.

A rotura em tensão é um tipo de danificação que pode ocorrer nos materiais geossintéticos, quer em fase de instalação quer em fase de serviço da obra. Os danos de

rotura em tensão ocorrem quando são exercidas sobre os geossintéticos cargas e deformações excessivas. De facto, pode haver situações, ao longo do plano do geossintético, onde ocorra a concentração de tensões e de deformações, conforme se ilustra no esquema da Figura 2.4. Nestes casos, pode ocorrer a rotura do material, se forem ultrapassados os seus valores de resistência. Note-se que, após a danificação de um geossintético por rotura em tensão, este já não é capaz de desempenhar as funções de separação, de filtragem ou de reforço. Na Figura 2.5 é possível observar o aspecto de um geotêxtil que sofreu este tipo de danificação.

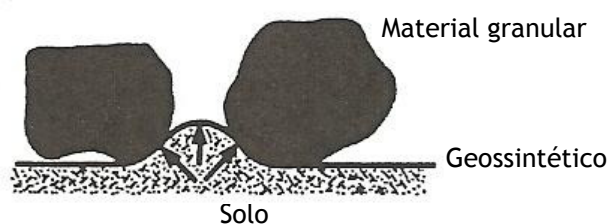


Figura 2.4 - Mecanismo de danificação por concentração de tensões e deformações (adaptado de Shukla, 2002).



Figura 2.5 - Efeito de danificação por concentração de tensões e deformações sobre um geotêxtil (Watn e Chew, 2002).

O corte de fibras é, também, um tipo de danificação que pode ocorrer nos materiais geossintéticos, durante a fase de colocação de materiais em obra. Tal como no caso do aparecimento de fendas e separação de material, ocorre devido ao contacto dos geossintéticos com as arestas cortantes dos materiais granulares, principalmente, quando o substrato apresenta bastante rigidez. Os materiais que, mais frequentemente, exibem danos deste género são os geotêxteis tecidos, as geogrelhas e as fitas de reforço.

A danificação dos materiais geossintéticos por rasgamento ocorre quando há concentração de tensões em zonas onde já existam perfurações e/ou cortes. O processo

de rasgamento não é mais, portanto, do que a propagação de rasgões já existentes, causada pelo aumento de tensão nas fibras circundantes às zonas danificadas, sendo frequente em geotêxteis não tecidos em contacto com partículas com arestas cortantes.

Os tipos de danificação infligida aos materiais geossintéticos têm algumas consequências como alterações do aspecto visual e efeitos no desempenho dos materiais a curto e a longo prazo. De um modo geral, as alterações do aspecto visual traduzem-se na deposição de pó e sujidade nos geossintéticos, na sua abrasão superficial, na existência de cortes, perfurações, zonas gastas, esmagamentos, etc. (Pinho-Lopes, 2004). Existem diversas classificações para avaliar visualmente o efeito da DDI mas as metodologias baseadas neste tipo de avaliação são muito subjectivas. Além disso, é muito difícil estabelecer uma relação directa entre os tipos de danificação observados e as alterações nas propriedades funcionais dos geossintéticos (Pinho-Lopes, 2004). Assim, mais importante do que avaliar o efeito da DDI no aspecto visual dos materiais, é avaliar o seu efeito nas propriedades a curto e a longo prazo. A metodologia de trabalho, aqui, passa por comparar as propriedades exibidas por geossintéticos intactos e por geossintéticos danificados. Neste âmbito, foram desenvolvidos trabalhos de investigação por Paula (2003) e Pinho-Lopes (2004), nomeadamente, no que diz respeito à alteração na resistência mecânica dos geossintéticos provocada pela DDI.

2.2.2 - FACTORES QUE INFLUENCIAM A DDI

Conforme se verá à frente, os efeitos da danificação sobre geossintéticos dependem de vários factores que podem ser agregados em três grupos, de acordo com a proposta de Austin (1998), apresentada no Quadro 2.1. Assim, consoante o tipo de geossintético utilizado, as características do solo que entra em contacto com o geossintético e as condições de instalação em obra, observam-se distintos desempenhos no que concerne à resistência dos materiais à danificação.

No que diz respeito à influência das características dos geossintéticos na sua resistência à danificação, normalmente, a materiais com maiores valores de massa por unidade de área corresponderá maior resistência às acções de DDI. Por seu turno, os geotêxteis tecidos tendem a apresentar menor resistência à danificação, assim como os que são produzidos em PET, quando comparados com os de PP ou de polietileno de alta densidade (PEAD).

No entanto, um estudo levado a cabo por Khay (1998) revelou que, no caso dos geotêxteis não tecidos termossoldados e dos geotêxteis tecidos em PP, a materiais com maiores valores de MUA correspondia menor resistência às acções de danificação. Contudo, no caso dos geotêxteis não tecidos agulhados, a tendência é a inversa, indo de encontro ao referido no parágrafo anterior.

Quadro 2.1 - Factores que influenciam a danificação durante a construção (Austin, 1998 e Pinho-Lopes, 2004).

Factores relacionados com o geossintético
Tipo de geossintético (geotêxtil, geogrelha, geomembrana, geocompósitos, etc.) Processo de fabrico e forma do produto Geotêxteis: tricotados, tecidos, não tecidos (agulhados, termossoldados, etc.) Geogrelhas: juntas integrais, tecidas, tricotadas, com ligação térmica, etc. Tipo de polímero (PEAD, PET, PP, PE, etc.) Polímero de reforço/revestimento (PVC, geotêxtil, nenhum)
Factores relacionados com o tipo de solo
Dimensão máxima das partículas Granulometria Dureza Angulosidade
Factores relacionados com as condições de instalação
Tamanho e tipo de equipamento Cuidados na instalação e na operação do equipamento Variação da espessura da camada de solo não compactada e na densidade do aterro Resistência e consistência do conjunto

De modo muito sucinto pode-se dizer que os materiais mais resistentes à DDI são as geogrelhas e os geotêxteis não tecidos agulhados. Pelo contrário, os materiais que mais sofrem com a danificação mecânica são os geotêxteis tecidos com fibras de PE e de PET.

No que se refere às características dos solos que entram em contacto com os geossintéticos, os que apresentam maiores dimensões, normalmente, induzem maior grau

de danificação sobre os materiais. De modo inverso, a utilização de solos bem graduados, isto é, com uma granulometria extensa, provoca um menor grau de DDI do que no caso de se utilizarem solos mais uniformes, formados por partículas de dimensões pouco variadas. No que diz respeito à dureza dos materiais granulares e à superfície das partículas, é bastante fácil concluir acerca do maior grau de danificação que os materiais mais duros e mais angulosos podem induzir, quando comparados com os que possuem as características contrárias.

Em relação à influência das condições de instalação no nível de DDI pode-se dizer que há factores importantes como o peso dos equipamentos e a espessura das camadas de material granular de aterro. Note-se que a utilização de equipamentos pesados para a compactação de camadas pouco espessas de materiais granulares é a situação que produz maior grau de danificação.

Face ao exposto nestes três aspectos, o estudo da DDI sobre os materiais geossintéticos reveste-se da maior importância, uma vez que os seus efeitos podem comprometer o correcto funcionamento das estruturas. Como se referiu anteriormente, esta situação pode ser resolvida com o recurso a materiais mais robustos do que o necessário. No entanto, a melhor abordagem passa por estudar, em situações reais e laboratoriais, os efeitos da DDI. Nesse sentido, há autores que recorrem à exumação de amostras danificadas em situações reais de compactação de aterros. Por outro lado, pode-se recorrer a procedimentos normalizados de danificação que permitem simular, em laboratório, as condições de instalação em obra dos materiais geossintéticos. No ponto seguinte apresenta-se a metodologia de ensaio utilizada no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

2.3 - SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA DDI

A norma em vigor para simulação laboratorial da danificação durante a instalação é a EN ISO 10722-2007 “Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material”. Este documento apresenta as seguintes definições:

- *Ensaio de referência* - ensaio para determinar uma propriedade em particular do geossintético a ser danificado durante o ensaio;
- *Índice de danificação* - variação, em percentagem, da propriedade usada para avaliar a danificação provocada durante o ensaio.

Os princípios de procedimento descritos na norma (relativos ao ensaio de identificação e controlo de qualidade) consistem em colocar um provete de geossintético entre duas camadas de um agregado sintético e submetê-lo a uma carga dinâmica durante um determinado intervalo de tempo. O provete de geossintético é, então, retirado do equipamento de ensaio e, posteriormente, é examinado para que se detecte a danificação visível. Por fim, é submetido a um ensaio mecânico ou hidráulico, para se avaliarem as alterações nas propriedades mecânicas ou hidráulicas, respectivamente. O resultado é expresso em termos da variação, em percentagem, da propriedade de referência devendo ser também incluída no relatório do ensaio a referência à danificação visual observada.

Devem ser preparadas seis amostras de geossintético com 1,0m de comprimento por 0,5m de largura (cortados de acordo com o especificado na NP EN ISO 9862: 2007 “Geossintéticos. Amostragem e preparação de provetes”. Cada amostra é, depois, cortada em duas com 1,0m de comprimento e 0,25m de largura. Uma delas é utilizada no processo de danificação laboratorial, a outra é utilizada no ensaio de referência.

Os ensaios à tracção dos provetes devem ser realizados de acordo com a NP EN ISO 10319: 2005 “Geotêxteis: Ensaio de tracção em tiras largas”. Quando outro ensaio de referência é usado, devem ser seguidos os procedimentos de ensaio definidos pelas normas em vigor.

Os provetes a ensaiar devem ser acondicionados e os ensaios devem ser conduzidos nas condições definidas na norma ISO 554: 1976 “Standard atmospheres for conditioning and/or testing - Specifications” (para geotêxteis e produtos relacionados $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa).

Uma vista geral do equipamento utilizado na realização dos ensaios de danificação pode ser observada na Figura 2.6.

Este equipamento é constituído por:

- *Mecanismo de aplicação da carga* - deve ser tal que se possa controlar o processo sinusoidal da pressão aplicada na placa de carregamento entre $5\pm 5\text{kPa}$ e $500\pm 10\text{kPa}$, com uma frequência de 1Hz;
- *Caixa de danificação* (Figura 2.7) - que contém o agregado sintético e o geossintético a danificar, deve ser uma caixa rígida de metal, fabricada em aço, com dimensões internas mínimas de 300mm por 300mm. A caixa é constituída por duas

partes com uma altura de 75mm cada, o que conduz a uma altura total da caixa de 150mm. As duas partes que constituem a caixa são fixas por encaixe e por aplicação da carga. A caixa deve ser colocada sobre uma base rígida;

- *Placa de carregamento* (Figura 2.8) - deve ter dimensões de 100mm x 200mm. A placa deve ser construída em aço ou alumínio e deverá ser suficientemente rígida de modo a que na transmissão da força ao agregado não sofra flexão.



Figura 2.6 - Vista geral do equipamento de danificação de geossintéticos (Paula, 2003).

O Material granular (Figura 2.9) utilizado para confinar a amostra de geossintético e para proceder à sua danificação deverá ser um agregado sintético. Trata-se de um óxido de alumínio que deverá cumprir os seguintes requisitos:

- *Granulometria* - quando ensaiado de acordo com a NP EN 933-1: 2000 “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”, 100% do material deverá passar no peneiro de 10mm e 0% deverá passar através do peneiro de 5mm de abertura;
- *Dureza* - quando ensaiado de acordo com NP EN 1097-2: 2002 “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”, o agregado deverá ter uma resistência à abrasão Los Angeles não inferior a 1,9;
- *Utilização* - antes da utilização, o material deve ser passado através de um peneiro com abertura de malha de 5mm. Todo o material passado deve ser eliminado. Além

disso, o material granular deve ser peneirado no mesmo peneiro após 10 utilizações e posto de parte após 20 utilizações.

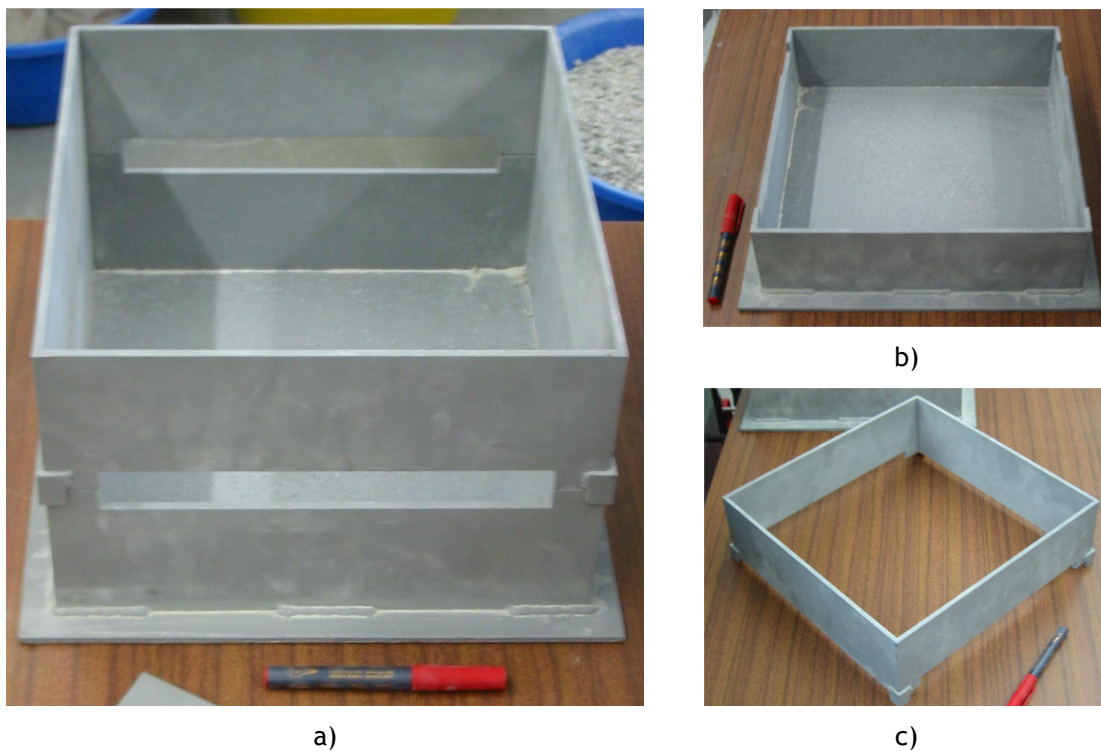


Figura 2.7 - Caixa de danificação: a) vista geral; b) parte inferior; c) parte superior (Paula, 2003).

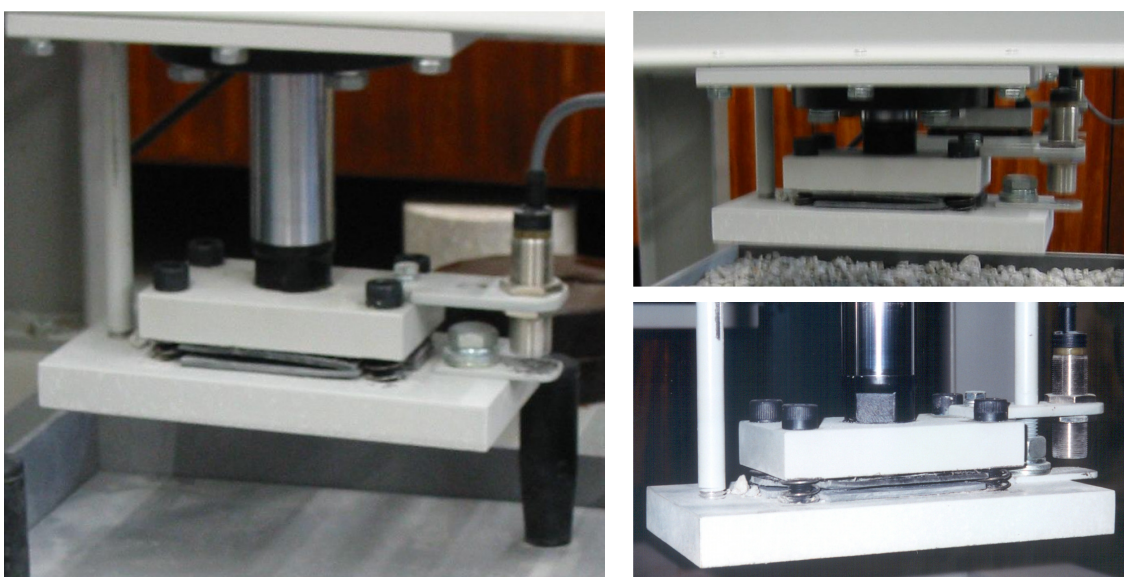


Figura 2.8 - Placa de carregamento (Paula, 2003).



Figura 2.9 - Material granular de confinamento (Corundum).

O procedimento do ensaio descrito na norma consiste no seguinte: a parte inferior da caixa é cheia com um agregado sintético, colocando-se duas camadas de igual altura, as quais perfazem uma altura total de 75mm. Cada uma dessas camadas é compactada com uma placa colocada sobre toda a área da caixa e onde é aplicada uma tensão de $200 \pm 2 \text{ kPa}$ durante 60 segundos (Figura 2.10). O topo da segunda camada de material granular deve estar ao nível do topo da parte inferior da caixa. A parte superior da caixa é colocada sobre a parte inferior e fixada por encaixe.

O provete é colocado atravessando a meia altura da caixa, ou seja, no topo da parte inferior (ver Figura 2.11), estando o centro do provete alinhado com o centro da caixa. As extremidades livres do provete, no exterior da caixa, são enroladas para que não sofram danificação durante o ensaio.

A parte superior da caixa é, então, cheia com o agregado solto, até 75mm de altura, o que corresponde ao topo da caixa (Figura 2.12).

A placa de carga é, depois, posicionada no centro da caixa e é-lhe aplicada uma carga de $5 \pm 5 \text{ kPa}$. O carregamento é feito aplicando uma carga cíclica triangular entre $5 \pm 5 \text{ kPa}$ a $500 \pm 10 \text{ kPa}$ com frequência de 1Hz, durante 200 ciclos (Figura 2.13). É de notar, tal como é frisado na norma europeia, que a tensão a aplicar é determinada usando a área da placa de carga e não a área total da caixa.

No fim do ensaio o provete é retirado da caixa, cuidadosamente, assegurando que não ocorra danificação adicional durante esta operação.

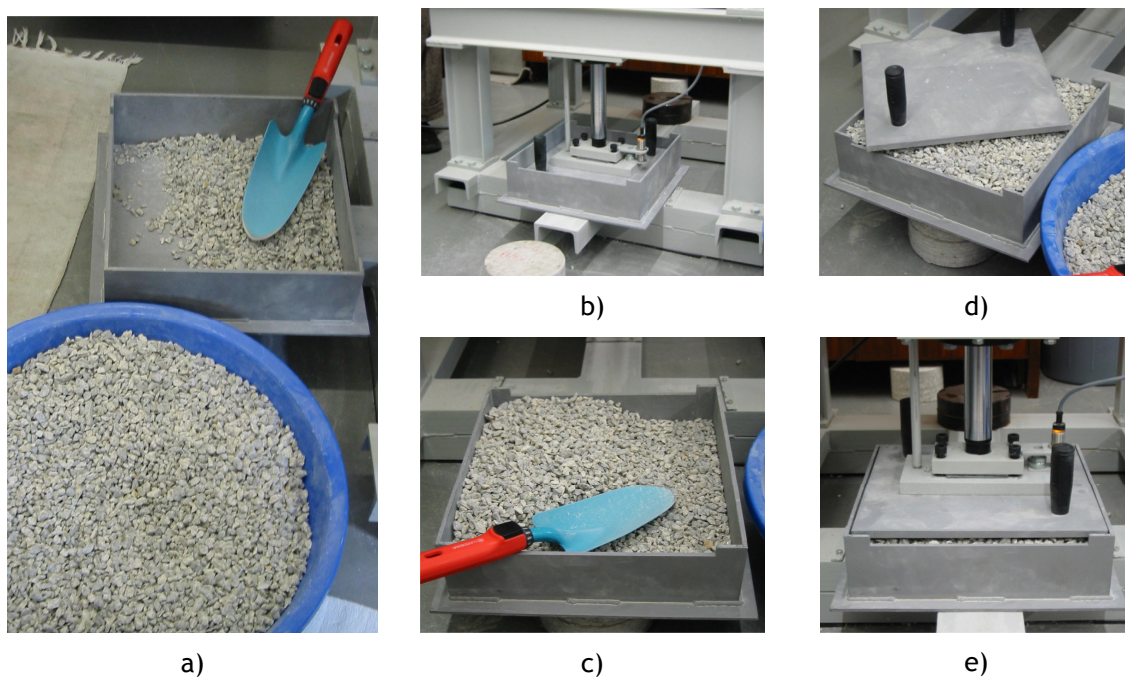


Figura 2.10 - Enchimento da caixa inferior: a) colocação da 1.^a camada; b) compactação da 1.^a camada; c) colocação da 2.^a camada; d) e e) compactação da 2.^a camada (Paula, 2003).

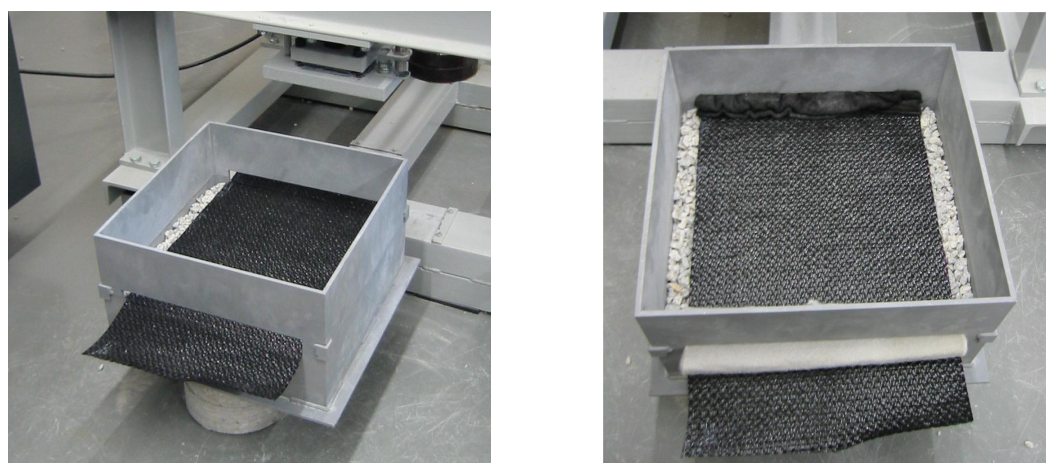


Figura 2.11 - Colocação do provete e da a caixa superior (Paula, 2003).



Figura 2.12 - Enchimento da caixa superior (Paula, 2003).

O provete de geossintético danificado é examinado para detectar a danificação visual existente e submetido ao ensaio de referência, para avaliação das alterações das propriedades de referência. O resultado é expresso em termos de variação, em percentagem, desta propriedade.

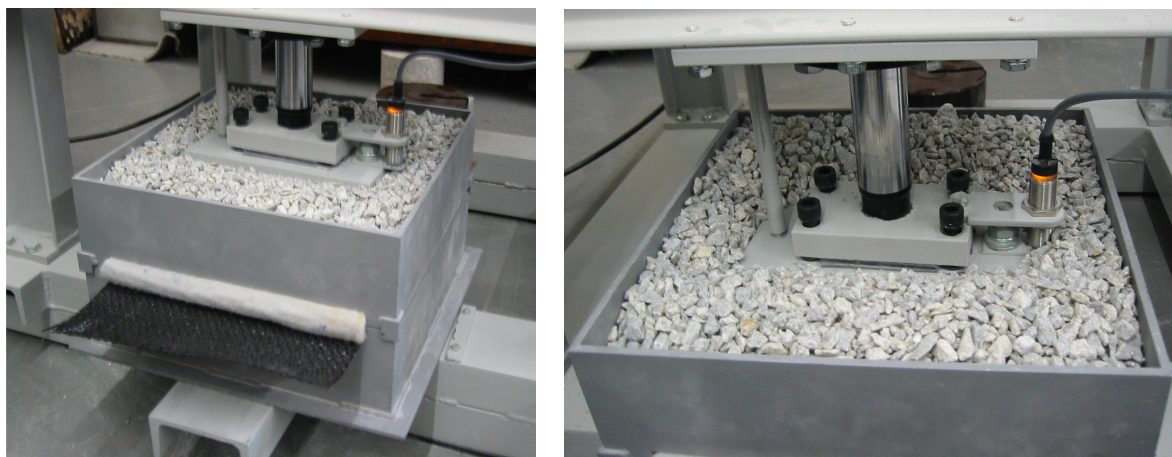


Figura 2.13 - Aplicação da carga cíclica (Paula, 2003).

2.4 - INFLUÊNCIA DA DDI LABORATORIAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOSSINTÉTICOS

2.4.1 - INTRODUÇÃO

Nesta secção analisar-se-á a influência da DDI laboratorial nas propriedades mecânicas dos geossintéticos com base na investigação desenvolvida por Paula (2003). De referir que este autor seguiu no seu estudo a norma de ensaio de DDI laboratorial de geossintéticos em vigor à data do desenvolvimento do mesmo, isto é, a EN ISO 10722-1: 1998 “Geotextiles and geotextile-related products - Porcedure for simulating damage during installation - Part 1: Installation in granular materials”, cuja diferença fundamental em relação à que está actualmente em vigor (EN ISO 10722:2007), tem a ver com a gama de variação da carga cíclica triangular aplicada durante o carregamento. De facto na EN ISO 10722-1: 1998 esta variava entre $5\pm 5\text{kPa}$ e $900\pm 10\text{kPa}$ e na EN ISO 10722: 2007 a variação é entre $5\pm 5\text{kPa}$ e $500\pm 10\text{kPa}$.

2.4.2 - MATERIAIS UTILIZADOS E PROGRAMA DE ENSAIOS

Paula (2003) considerou sete geossintéticos: duas geogrelhas extrudidas (uma uniaxial em PEAD (GGeu) e outra biaxial em PP (GGeb)), uma geogrelha tecida biaxial em PE (GGtb), dois geotêxteis em PP (um tecido (GTt) com 320g/m^2 de massa por unidade de área e outro não tecido agulhado (GTnt) com 800g/m^2 de massa por unidade de área) e duas geomembranas (uma lisa (GMI) com 1,5mm de espessura e outra rugosa (GMr) com 2mm de espessura).

No Quadro 2.2 apresenta-se os valores médios de algumas das propriedades dos geossintéticos não danificados (intactos). No caso dos geotêxteis e das geogrelhas as propriedades mais relevantes para o estudo desenvolvido são a resistência à tracção e extensão na rotura, enquanto que nas geomembranas são a resistência e a deformação na rotura e/ou na cedência.

Acresce referir que os valores dos parâmetros mecânicos indicados no Quadro 2.2 foram definidos na direcção de fabrico dos geossintéticos, uma vez que a influência da danificação durante a construção no comportamento dos materiais foi estudada apenas nessa direcção.

Quadro 2.2 - Propriedades relevantes dos geossintéticos (adaptado de Paula, 2003).

	Resistência à tracção (kN/m)	Extensão na rotura (%)	Resistência na rotura (N/mm^2)	Deformação na rotura (%)	Resistência na cedência (N/mm^2)	Deformação na cedência (%)
Materiais	EN ISO 10319		ASTM D638			
GGeu	57,36	13,83	-	-	-	-
GGeb	45,91	14,83	-	-	-	-
GGtb	60,14	21,07	-	-	-	-
GTt	68,97	14,89	-	-	-	-
GTnt	50,11	111,94	-	-	-	-
GMI	-	-	20,18	447,42	5,88	7,74
GMr	-	-	16,43	331,5	17,43	10,35

Na perspectiva de avaliar o efeito do material confinante nos resultados dos ensaios laboratoriais de DDI de geossintéticos, Paula (2003) utilizou dois solos granulares naturais

em vez do agregado sintético de óxido de alumínio normalizado (*Corundum*) previsto na EN ISO 10722-1.

Os solos utilizados apresentavam granulometria, dureza e petrografia distintas. Um dos solos era uma brita granítica, com diâmetros máximo e mínimo, respectivamente, 12,5mm e 4,75mm e com uma resistência à abrasão de Los Angeles 28,0%. O outro, era uma brita calcária com diâmetros máximo e mínimo, respectivamente, 19mm e 4,75mm, e com resistência à abrasão de Los Angeles de 19,3%.

Para diminuir o efeito do desgaste e do esmagamento do material, procedeu-se à sua peneiração e eliminação dos passados no peneiro com abertura de malha 4,75mm, após 5 utilizações. O material foi posto de parte após 30 utilizações.

O programa de ensaios realizados por Paula (2003) está indicado na Figura 2.14. Foram realizados ensaios de caracterização mecânica (resistência à tracção) sobre amostras de referência (intactas) e sobre amostras danificadas. O ensaio de caracterização da danificação dos geossintéticos foi o ensaio de tracção, realizado de acordo com a EN ISO 10319.

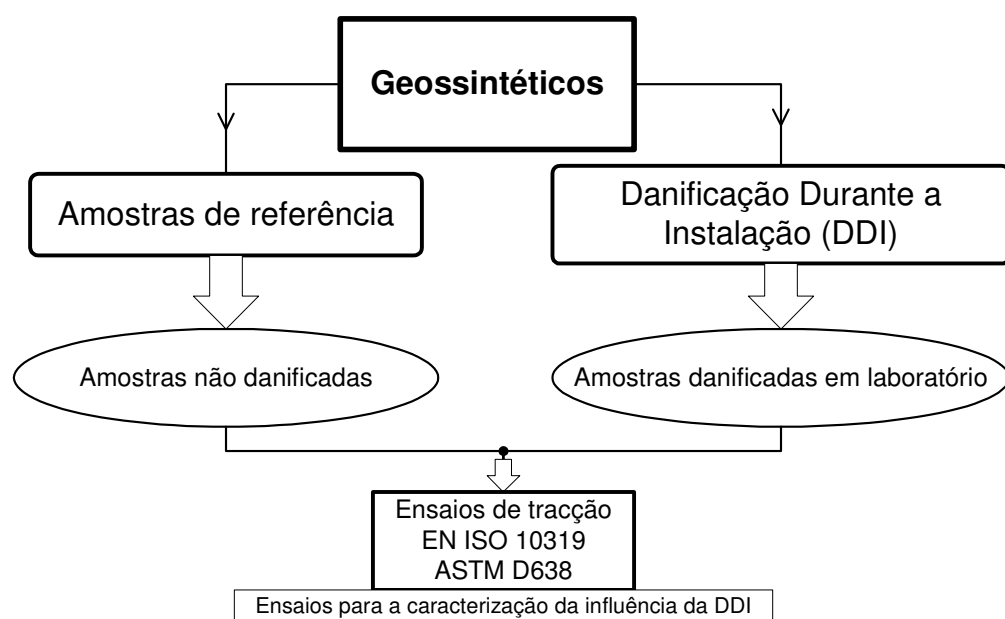


Figura 2.14 - Programa de ensaios (Paula, 2003).

Dos 7 tipos de geossintéticos utilizados no trabalho foram danificados inicialmente 5 provetes de cada tipo com o solo calcário e com o solo granítico. Posteriormente, os provetes danificados e 5 provetes intactos de cada um dos geossintéticos foram ensaiados à tracção-extensão.

Os ensaios foram conduzidos num ambiente com uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de $65\% \pm 2\%$.

2.4.3 - RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 2.15 apresenta a resistência residual dos geossintéticos estudados por Paula (2003), danificados, confinados por brita granítica e brita calcária. Observa-se que a resistência retida nos geossintéticos danificados varia dentro de uma gama larga (64,7% a 99,6%).

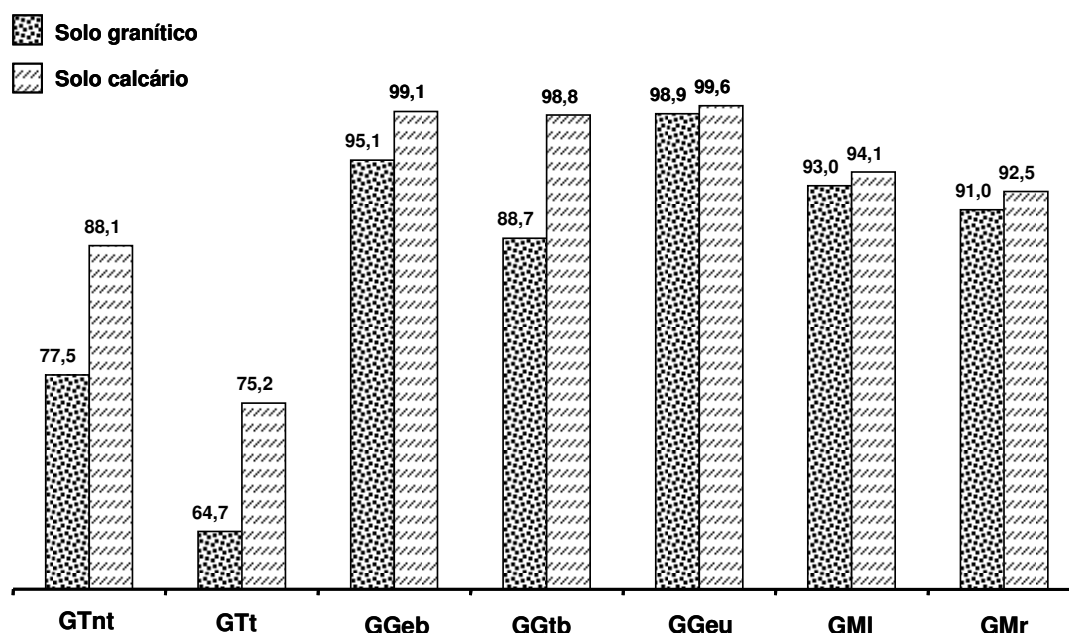


Figura 2.15 - Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório (Paula, 2003).

De uma forma geral, verifica-se que os geossintéticos danificados com solo granítico apresentam valores de resistência retida menores do que quando são danificados com solo calcário.

O coeficiente de variação da resistência à tracção das amostras de geossintéticos de referência e danificadas laboratorialmente é apresentado na Figura 2.16.

Verifica-se, em geral, uma grande dispersão nos valores do coeficiente de variação da resistência à tracção o que, atendendo a que todos os geossintéticos foram danificados

nas mesmas condições, com cada um dos solos confinantes, significa que os diferentes geossintéticos respondem com mecanismos de danificação distintos (Pinho-Lopes e Lopes, 2001).

O coeficiente de variação dos materiais de referência é, genericamente, baixo e inferior ao das amostras danificadas laboratorialmente. Constata-se, de um modo geral, que quando os geossintéticos são danificados com o solo granítico (aquele que conduz a uma maior redução de resistência) se registam os coeficientes de variação mais elevados.

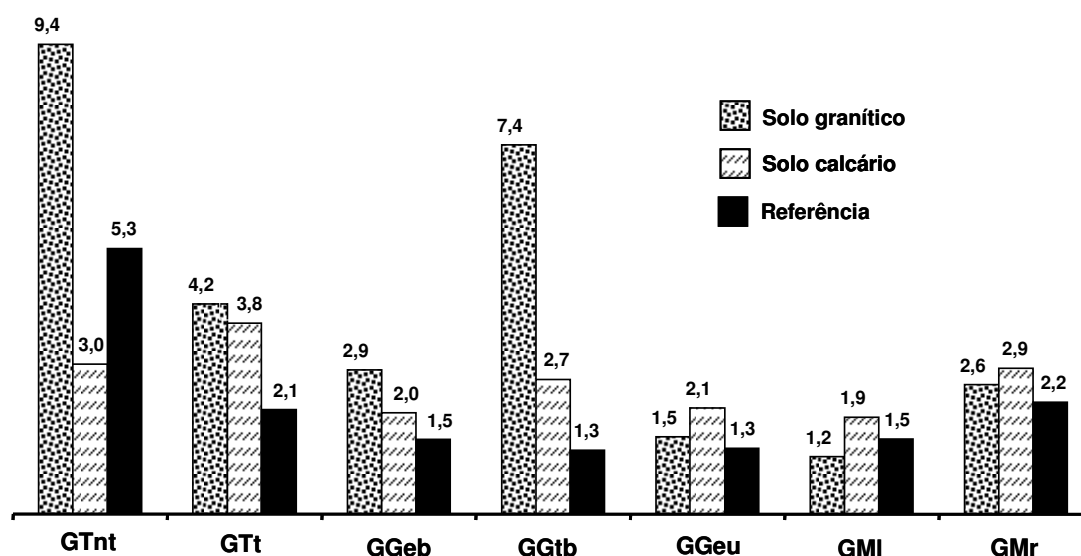


Figura 2.16 - Coeficiente de variação (em%) da resistência à tracção dos geossintéticos (Paula, 2003).

2.4.3.1 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE GEOSSINTÉTICO

Uma vez que o material confinante que induz maior redução de resistência é a brita granítica, o estudo da influência do tipo de geossintético considerará apenas os resultados dos materiais danificados com este material confinante.

Na Figura 2.17 representa-se os valores da resistência retida e do coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das três geogrelhas consideradas no estudo (GGeu, GGeb e GGtb). Concluiu-se que a resistência retida nas geogrelhas danificadas é elevada (Figura 2.17a), sendo a GGtb a que apresenta menor resistência (88,7%), ou seja, maior sensibilidade à DDI. Este facto pode dever-se à maior susceptibilidade à danificação das juntas deste material, uma vez que são tecidas. Nas duas restantes geogrelhas as juntas são integrais, isto é mais rígidas e resistentes. Em resumo, pode-se concluir que a DDI das geogrelhas estudadas por Paula (2003) é pouco determinante na sua resistência à tracção.

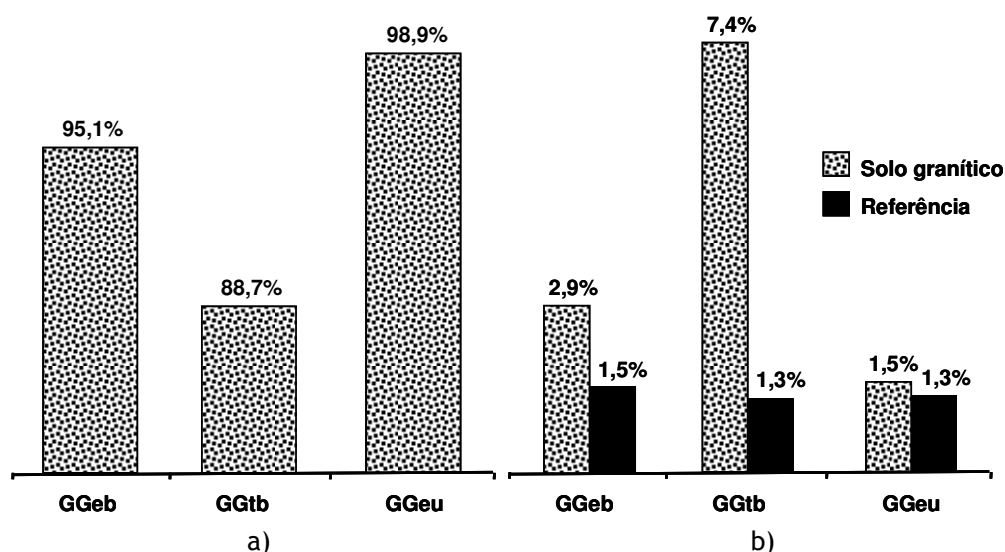


Figura 2.17 - Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).

É nas geogrelhas danificadas que se registam os valores mais elevados do coeficiente de variação para a resistência à tracção (Figura 2.17b), logo, uma maior variação nos resultados obtidos para este parâmetro. Este parâmetro estatístico varia na razão inversa da resistência retida, sendo praticamente coincidente com o do material de referência para a GGeu, geogrelha que evidencia uma resistência retida de 98,9%.

A observação da Figura 2.18 permite a comparação entre as curvas força-extensão das geogrelhas danificadas e as das geogrelhas de referência. Pode-se observar que a danificação provoca pouca variação na rigidez das geogrelhas.

A deformação na rotura da geogrelha uniaxial danificada diminui significativamente, anulando-se o comportamento elasto-plástico da geogrelha intacta, passando a ter um comportamento mais próximo do das outras duas geogrelhas. Como já foi referido anteriormente, a alteração mais significativa na resistência à tracção dá-se na geogrelha tecida (-11,3% no material danificado, quando comparado com o material intacto).

A Figura 2.19 mostra a resistência retida nos dois geotêxteis estudados (GTnt e GTt). Verifica-se que os geotêxteis apresentam valores de resistência retida mais baixos do que as geogrelhas, o que denuncia uma maior sensibilidade das estruturas tecida e não tecida dos geotêxteis à DDI.

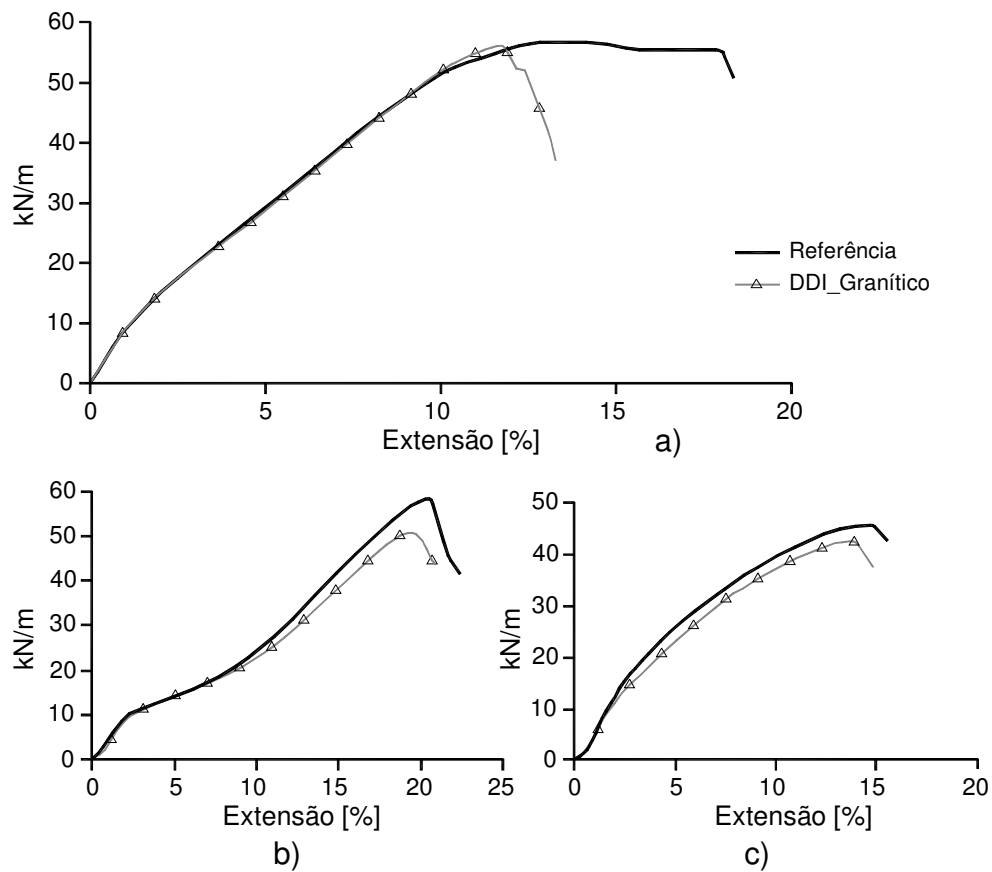


Figura 2.18 - Curvas força-extensão: a) GGeu; b) GGtb; c) Ggeb (Paula, 2003).

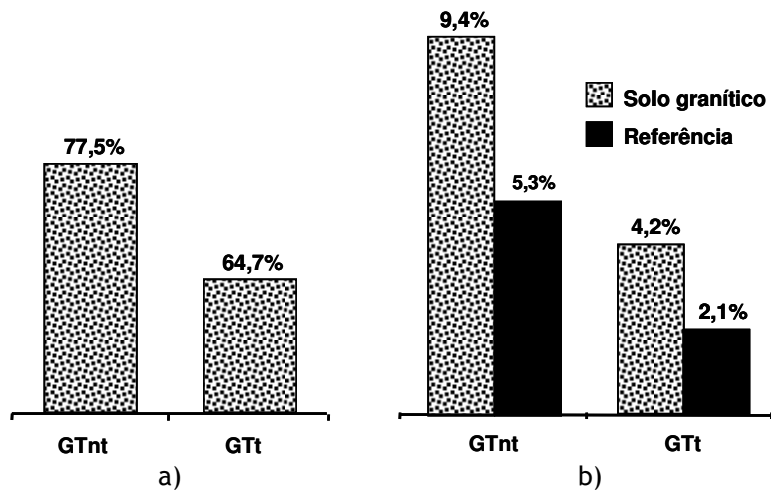


Figura 2.19 - Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).

Tal como no caso das geogrelhas, o coeficiente de variação, nos geotêxteis danificados é mais elevado do que o nos materiais intactos (Figura 2.19b), realçando uma vez mais uma maior gama de variação nos resultados obtidos quando os materiais estão danificados.

Porém, verifica-se que os coeficientes de variação mais elevados foram registados para o geotêxtil não tecido, quer intacto, quer danificado, embora a resistência retida neste material, quando danificado, seja maior do que no geotêxtil tecido em idênticas condições. Assim, é também evidenciado neste parâmetro a influência do processo de fabrico dos geotêxteis na resistência à danificação. Note-se que o processo de fabrico dos geotêxteis não tecidos possibilita uma estrutura mais heterogênea do que o dos geotêxteis tecidos. Assim, não é de estranhar que o coeficiente de variação da resistência à tracção dos primeiros seja mais elevado.

A menor resistência retida no geotêxtil tecido deve-se, por um lado, à estrutura do material (distribuição regular de poros resultante do cruzamento das componentes na direcção de fabrico e perpendicular a esta) e, por outro, à menor massa por unidade de área e espessura deste geotêxtil. Com efeito, a menor massa por unidade de área e espessura facilita a danificação ou, mesmo, rotura de componentes das direcções de fabrico e perpendicular a esta. Estando danificadas, as componentes deixam de poder suportar a mesma solicitação, dando-se a transferência desta para as componentes mais próximas que, progressivamente, se vão danificando ou, mesmo, rompendo. Assim, pode-se dizer que, para resistências nominais idênticas, os geotêxteis tecidos são mais sensíveis à danificação durante a instalação do que os não tecidos.

As curvas força-extensão dos dois geotêxteis intactos e danificados são comparadas na Figura 2.20. Verifica-se que o geotêxtil tecido (Figura 2.20a) apresenta uma pequena redução da rigidez quando danificado, associada à redução da resistência e da deformação na rotura. As médias da resistência e da deformação na rotura do material danificado são, respectivamente, cerca de 35,3% e 26,2% menores do que quando intacto.

O geotêxtil não tecido danificado (Figura 2.20b) torna-se mais deformável, mantendo-se praticamente inalterada a deformação na rotura (diminui cerca de 2,3%), havendo diminuição da sua resistência.

Perante o exposto, torna-se claro que estruturas distintas de geotêxteis reagem à danificação durante a instalação de forma diferente.

A Figura 2.21 representa a resistência retida e o coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das duas geomembranas danificadas com agregado granítico (no caso das geomembranas, a resistência à tracção e a resistência retida no material danificado referem-se à tensão de cedência).

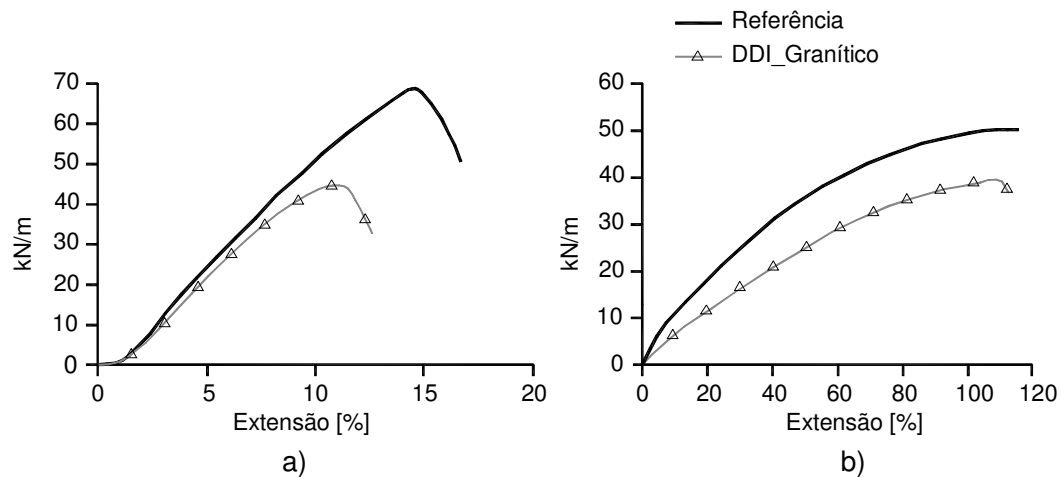


Figura 2.20 - Curvas força-extensão: a) GTt; b) GTnt (Paula, 2003).

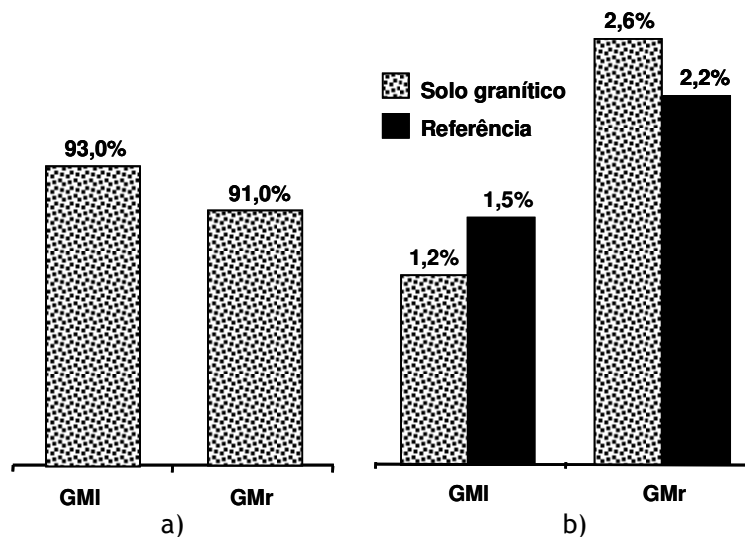


Figura 2.21 - Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).

A resistência retida nos dois materiais danificados é elevada (superior a 90% em ambos - ver Figura 2.21a) havendo, também, uma pequena alteração do coeficiente de variação da resistência à tracção com a danificação (Figura 2.21b). O bom comportamento observado deve-se à estrutura contínua das geomembranas. De facto, ao contrário do que acontece com os geotêxteis e as geogrelhas (em especial, a geogrelha tecida), em que a estrutura dos geossintéticos é formada pela ligação de componentes individuais, que se danificam, propiciando a danificação progressiva dos materiais, as geomembranas são folhas contínuas de polímeros, sem poros visíveis.

Na Figura 2.22 compara-se o comportamento tracção-deformação das geomembranas antes e após a danificação. A inclinação na fase elástica da curva tensão-extensão dos materiais danificados é praticamente coincidente com a dos intactos. Nos materiais danificados, a tensão de cedência diminui e, a partir desse ponto, as curvas são qualitativamente idênticas às dos materiais intactos.

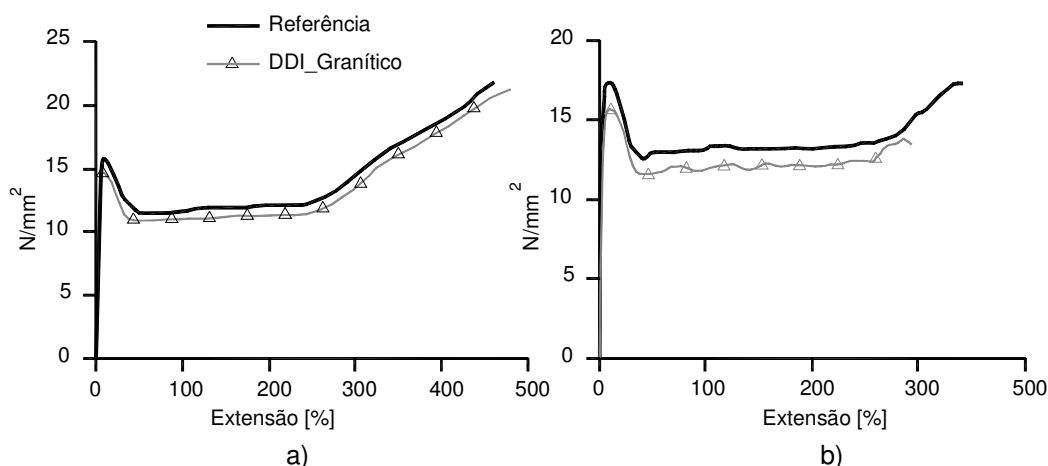


Figura 2.22 - Curvas tensão-extensão: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa (Paula, 2003).

Com base nos resultados apresentados ao longo de 2.4.3.1, concluiu-se que a estrutura do geossintético é responsável pelo grau de sensibilidade do material à danificação durante a instalação. Dos geossintéticos considerados, aqueles que evidenciaram maior susceptibilidade foram os geotêxteis, que apresentaram reduções da resistência à tracção em consequência da danificação da ordem dos 30% a 40%. As geomembranas e as geogrelhas danificadas evidenciaram reduções menores (da ordem dos 10%) para o mesmo parâmetro.

O comportamento tracção - deformação dos três tipos de geossintéticos é distinto entre si, podendo-se observar diferenças nos diagramas apresentados, relativos aos materiais intactos e danificados.

2.4.3.2 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO CONFINANTE

O tipo de material confinante pode ter influência significativa na danificação durante a instalação dos geossintéticos (Lopes e Pinho-Lopes, 2001). Com o objectivo de comprovar

a influência do tipo de solo na danificação dos geossintéticos Paula (2003) utilizou no seu estudo dois solos naturais distintos em dureza, petrografia e granulometria.

A Figura 2.23 apresenta a resistência retida e o coeficiente de variação da resistência à tracção para as três geogrelhas (GGeu, GGeb, GGtb) danificadas com os solos calcário e granítico.

O solo calcário induz reduzida danificação nas geogrelhas, tal como comprova a elevada resistência retida (superior a 98,8) nestes geossintéticos (Figura 2.23a). Quando é utilizado o solo granítico a danificação é mais acentuada, em especial na geogrelha tecida, que apresenta uma resistência retida cerca de 10% menor do que quando o solo é calcário.

O coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das geogrelhas danificadas é baixo, no entanto superior ao obtido para os materiais intactos (Figura 2.23b). No caso da geogrelha tecida danificada com o solo granítico, a variação nos resultados é a maior, apresentando um valor do coeficiente de variação cerca de 5,7 e 2,7 vezes superior ao calculado para o material intacto e danificado com o solo calcário, respectivamente.

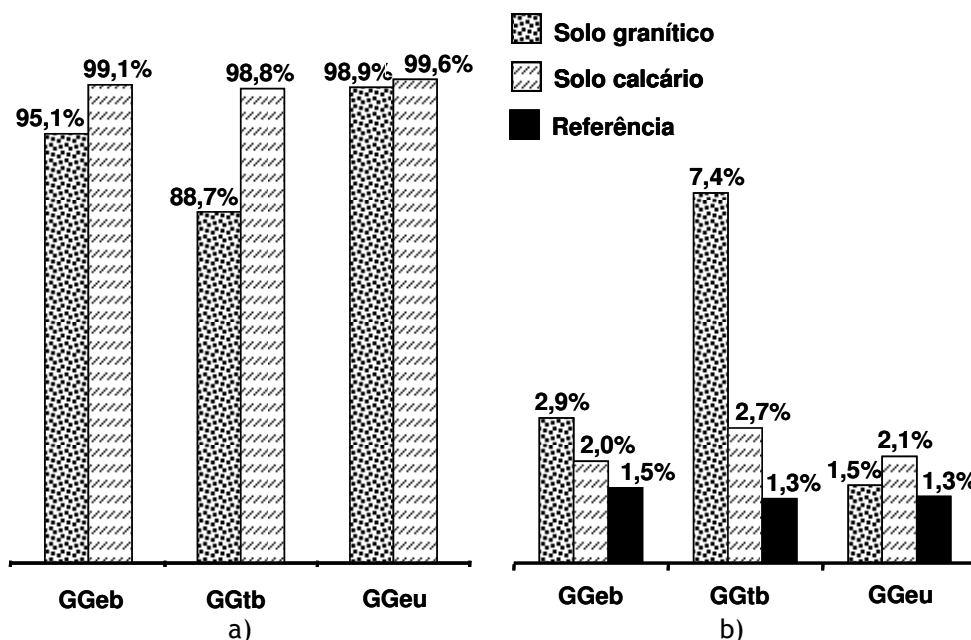


Figura 2.23 - Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).

A Figura 2.24 mostra as curvas força-extensão das geogrelhas intactas e danificadas com os solos calcário e granítico. Constata-se que, em geral, o comportamento tracção-

deformação dos materiais danificados com o solo calcário se encontra entre os observados para as geogrelhas intactas e danificadas com o solo granítico. Ambos os solos induzem redução da extensão na rotura da geogrelha extrudida uniaxial. A menor danificação provocada pelo solo calcário resulta, fundamentalmente, da dureza deste ser significativamente menor do que a do solo granítico.

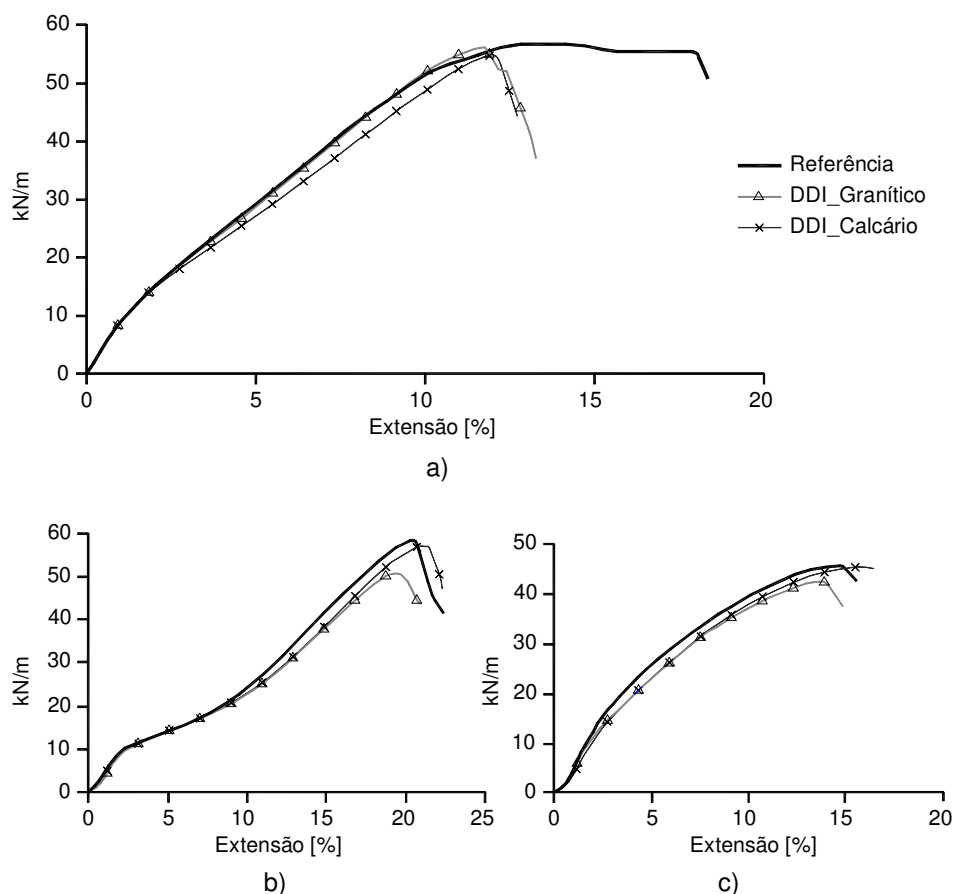


Figura 2.24 - Curvas força-extensão: a) GGeu; b) GGtb; c) Ggeb (Paula, 2003).

Tal como para as geogrelhas, a danificação induzida pelo solo calcário nos geotêxteis é menor do que a provocada pelo solo granítico (ver Figura 2.25a). As resistências retidas nos geotêxteis tecido e não tecido são, respectivamente, 75,2% e 88,1%, isto é, cerca de 12% e 14% superior, respectivamente para o tecido e o não tecido do que quando o solo envolvente é granítico.

Os maiores coeficientes de variação (Figura 2.25b) da resistência à tracção dos geotêxteis ocorrem quando estes foram danificados com o solo granítico.

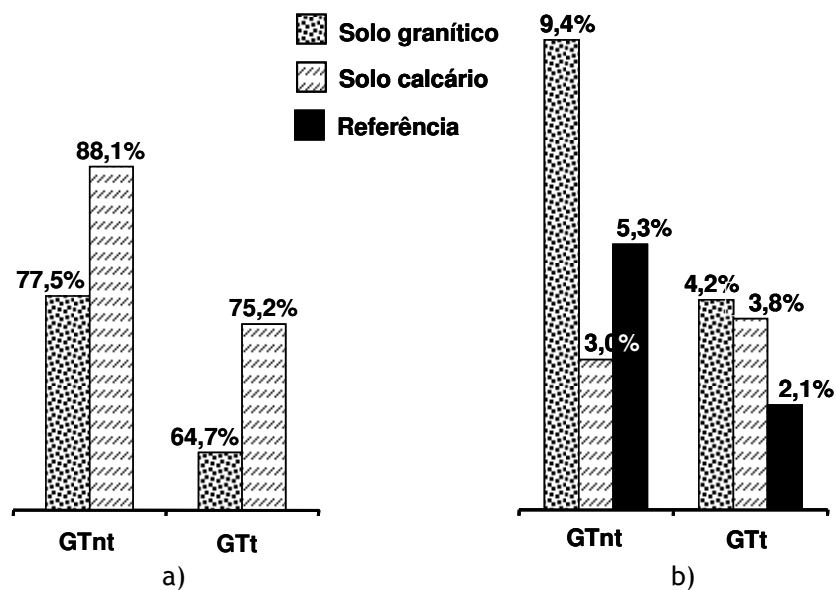


Figura 2.25 - Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).

Do mesmo modo que para as geogrelhas, observa-se que o comportamento tracção-deformação dos geotêxteis danificados com o solo calcário se encontra entre os correspondentes aos materiais intactos e danificados com o solo granítico (Figura 2.26).

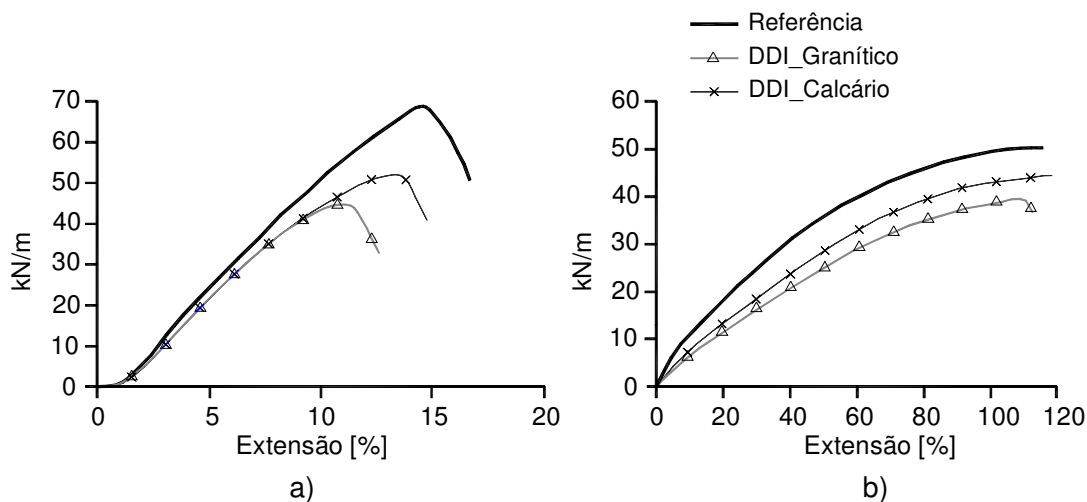


Figura 2.26 - Curvas força-extensão: a) GTt; b) GTnt (Paula, 2003).

Seja qual for o solo indutor da danificação, observa-se a manutenção da deformação na rotura do geotêxtil não tecido. No caso do geotêxtil tecido danificado com o solo calcário verifica-se a redução da deformação na rotura, embora de menos significado do que quando o solo é granítico.

Nas geomembranas, as diferenças causadas pela danificação dos solos granítico e calcário são mínimas (1,1% e 1,5%, respectivamente para a lisa e para a rugosa) (Figura 2.27). O coeficiente de variação apresenta valores baixos.

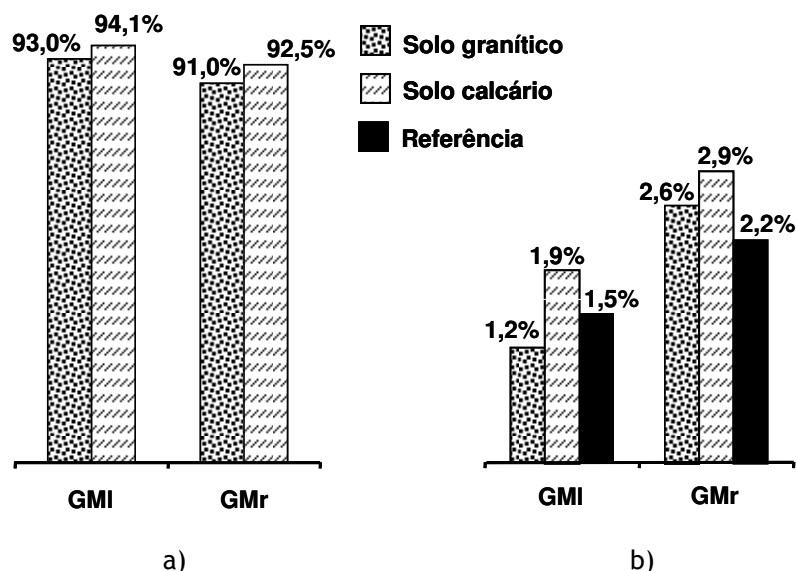


Figura 2.27 - Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação (Paula, 2003).

O comportamento tracção-deformação das geomembranas denota a pouca influência do tipo de solo na danificação durante a construção destes materiais (Figura 2.28), sendo as curvas correspondentes ao comportamento do material danificado praticamente coincidentes.

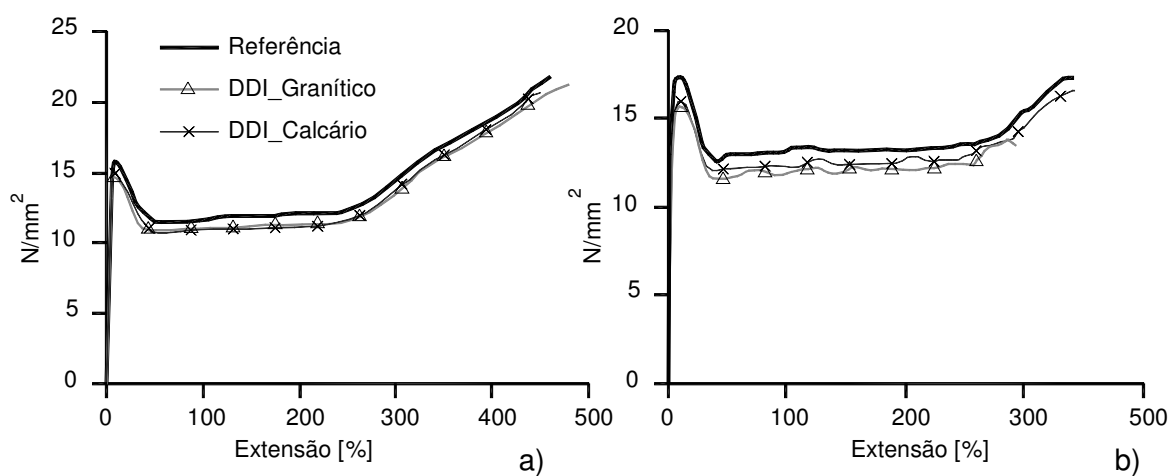


Figura 2.28 - Curvas tensão-extensão: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa (Paula, 2003).

O estudo da influência do tipo de solo, nomeadamente, da sua dureza, na danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório, realça a menor agressividade do solo com menor dureza (solo calcário). Para ambos os solos mantém-se a influência da estrutura dos geossintético analisada em 2.4.3.1.

O comportamento tracção-deformação dos geotêxteis e das geogrelhas danificadas com o solo calcário está entre o observado nos materiais intactos e nos materiais danificados com o solo granítico. O comportamento das geomembranas danificadas não apresenta alterações dignas de nota, seja qual for o solo confinante.

2.4.4 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS POR PAULA (2003) COM OS DE OUTROS AUTORES

O trabalho experimental desenvolvido por Paula (2003) seguiu os procedimentos descritos na EN ISO 10772-1, com a excepção do referente ao tipo de material granular confinante dos geossintéticos. Assim, o autor entendeu de interesse comparar os resultados obtidos no seu estudo com o geotêxtil tecido (GTt), a geogrelha tecida biaxial (GGtb) e a geogrelha extrudida biaxial (GGeb) e os publicados por Pinho-Lopes et al. (2000), Lopes e Pinho-Lopes (2001), Pinho-Lopes e Lopes (2001) e Pinho-Lopes et al. (2002), utilizando os mesmos geossintéticos e agregado sintético (*Corundum*), tal como prescrito na Norma Europeia, enquanto norma de ensaio de conformidade.

A análise comparativa foi feita considerando os resultados obtidos quando o solo confinante é granítico, não só por apresentar uma curva granulométrica idêntica à do material granular sintético, com 100% e 0% de passados, respectivamente, nos peneiros de 10mm e de 5mm de abertura mas, fundamentalmente, por ser este que provocava maior grau de danificação durante a instalação aos geossintéticos.

A Figura 2.29a) compara as resistências retidas nos três geossintéticos considerados confinados pelo agregado sintético e pelo solo natural granítico.

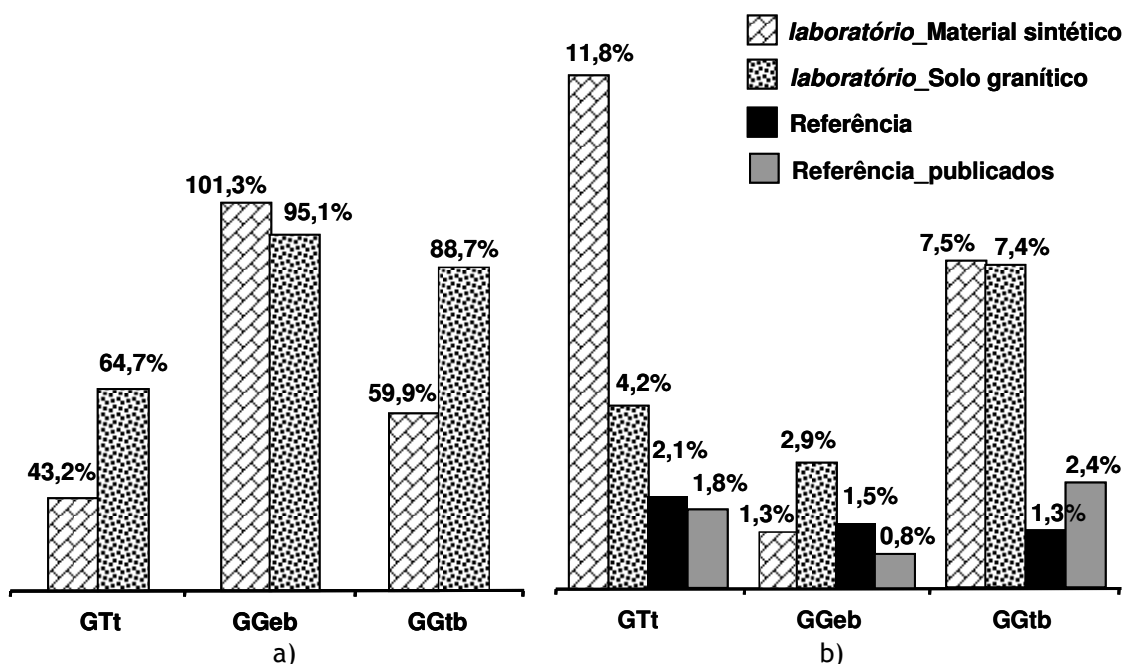


Figura 2.29 - Geossintéticos: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação (Paula, 2003).

A partir da análise da figura pode-se referir que:

- Os materiais danificados com o agregado sintético geralmente apresentam menor resistência retida, por conseguinte, este material é mais agressivo do que o solo granítico;
- A maior perda de resistência regista-se no geotêxtil tecido, onde a resistência retida passa de 64,7%, quando o solo confinante é granítico, para 43,2%, quando o material granular envolvente é sintético.
- A resistência retida da geogrelha tecida biaxial diminui de 88,7%, quando danificada com o solo granítico, para 59,9% quando danificada com o agregado sintético;
- A geogrelha extrudida biaxial confinada pelo material granular sintético apresenta uma resistência retida superior a 100%, ou seja, o valor da resistência à tracção após danificação é superior à do material intacto, facto que pode ser explicado, em parte, pela reorientação de fibras dos geossintéticos durante o processo de danificação (Lopes e Pinho-Lopes, 2001).
- Os geossintéticos com estruturas mais deformáveis (geotêxtil e geogrelha tecidos) traduzem a maior agressividade do material granular sintético através da apresentação de menores resistências retidas. Porém, é para estes geossintéticos e material confinante que se observam os valores mais elevados do coeficiente de variação da

resistência à tracção (Figura 2.29b), denunciando a maior gama de valores da resistência obtidos nos ensaios de controlo da danificação.

2.5 - PRINCIPAIS CONCLUSÕES DO ESTUDO DE PAULA (2003)

Paula (2003) estudou a danificação laboratorial de geossintéticos durante a instalação, de modo a quantificar a influência, quer do tipo de solo, quer da estrutura do geossintético.

O mesmo autor realizou uma análise comparativa da danificação durante a instalação de três dos geossintéticos estudados com resultados dos mesmos materiais danificados em laboratório confinados por material granular sintético.

A caracterização da danificação causada ao material foi avaliada através do comportamento mecânico a curto prazo dos geossintéticos.

Com base nos resultados do estudo efectuado é possível concluir que:

- A estrutura do geossintético é um parâmetro fundamental na resposta às acções mecânicas a que este está sujeito durante a instalação em obra;
- Assim, dos geossintéticos considerados, aqueles que revelaram maior susceptibilidade à danificação durante a instalação foram os geotêxteis, em particular os tecidos;
- A dureza do solo confinante influencia o grau de danificação induzida aos geossintéticos, aumentando a danificação com a dureza do solo;
- A danificação durante a instalação altera o comportamento tracção-deformação do geossintético, tanto mais quanto maior for a danificação induzida pelo solo;
- Dos geossintéticos considerados no estudo, aqueles que revelaram menor perda de resistência à tracção foram as geomembranas. Porém, é de realçar que, sendo a função destes geossintéticos a barreira a fluidos, propriedades relacionadas com a integridade do material, como as resistências ao punçoamento e ao rasgamento, assumem mais relevo do que a resistência à tracção;
- A danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório é maior quando o material confinante é o material granular sintético.

CAPÍTULO 3

FILTRAGEM COM GEOSSINTÉTICOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo procede-se ao estudo da função de filtragem exercida pelos materiais geossintéticos e das propriedades com as quais esta está relacionada, principalmente, a permeabilidade normal ao plano.

O desempenho de um material geossintético como filtro consiste na retenção das partículas de solo, ou de outro tipo de materiais granulares, quando sujeitas a forças hidrodinâmicas, ao mesmo tempo que permite a passagem dos fluidos percolantes (Pinho-Lopes, 2004). Dito de outro modo, um geossintético funciona como filtro quando se estabelece um equilíbrio no sistema solo-geossintético que se traduz no livre fluxo do fluido que o tende a atravessar e na retenção das partículas que este tende a arrastar no seu movimento. Pode-se dizer que os geossintéticos adquirem um carácter dual no sentido em que, em funcionamento como filtro, tanto podem servir para evitar o arrastamento de partículas em suspensão nos fluidos percolantes, como podem ser inseridos em meios terrosos, permitindo a passagem de água mas impedindo a passagem de partículas sólidas (Pinho-Lopes, 2004). Note-se, portanto, no compromisso que deve existir para que um material desempenhe correctamente a sua função como filtro: deve possuir aberturas suficientes para permitir a percolação dos fluidos mas, em simultâneo,

estas devem ter dimensões susceptíveis de reter as partículas sólidas que tentam atravessar o material filtrante.

A categoria das propriedades dos geossintéticos que está relacionada de forma mais directa com a função de filtragem é a das propriedades hidráulicas. De facto, estas propriedades dos geossintéticos influenciam a sua capacidade de desempenharem funções de filtragem e de drenagem (Ingold, 1994). Note-se, no entanto que, nem todos os tipos de materiais geossintéticos podem ou devem ser usados como filtros. Na realidade, materiais como geogrelhas não são susceptíveis de serem utilizados como filtros ou como materiais drenantes, pelo que o estudo das propriedades hidráulicas recai, principalmente, sobre materiais geotêxteis e geocompósitos apropriados para a drenagem de fluidos.

3.2 - APLICAÇÕES DE GEOTÊXTEIS COMO FILTROS

As aplicações mais usuais de geotêxteis como sistemas de filtragem e/ou de drenagem estão representadas esquematicamente nas Figuras 3.1 a 3.7.



Figura 3.1 - Geotêxtil utilizado como filtro, envolvendo: a) um dreno de gravilha; b) um tubo de drenagem (Ingold, 1994).

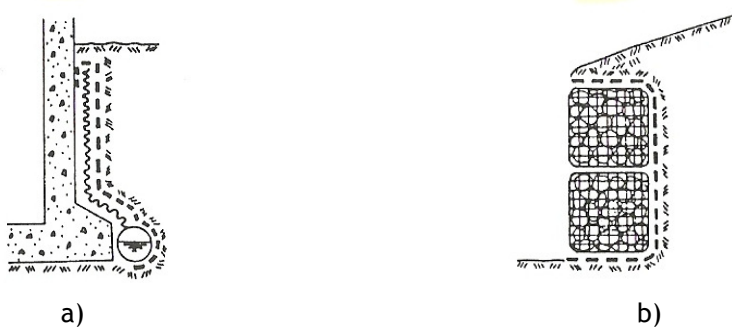


Figura 3.2 - Geotêxtil utilizado como filtro, no tardo de muro: a) num sistema de drenagem; b) de gabiões (Ingold, 1994).

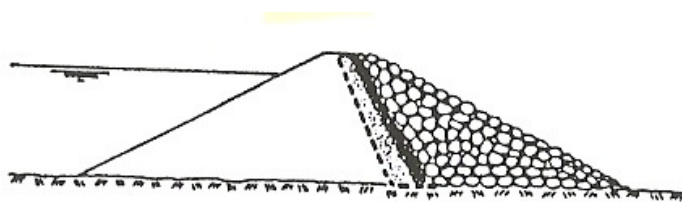


Figura 3.3 - Geotêxtil utilizado como filtro, entre duas zonas distintas de uma barragem de terra com enrocamento (Ingold, 1994).

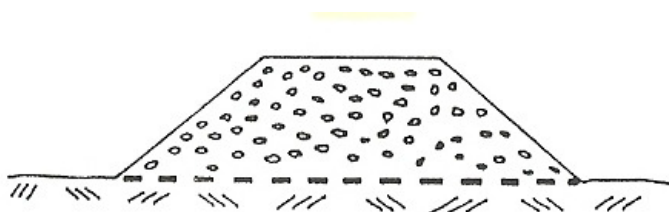


Figura 3.4 - Geotêxtil utilizado como filtro, na base de um aterro construído sobre solo em processo de consolidação (Ingold, 1994).

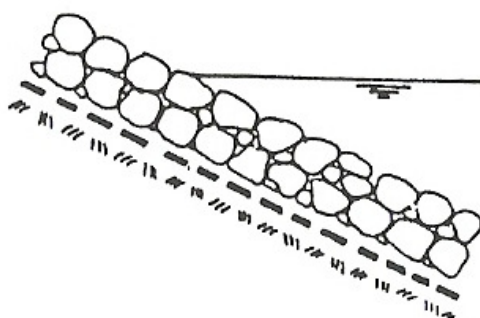


Figura 3.5 - Geotêxtil utilizado como filtro, na margem de rio ou canal (Ingold, 1994).

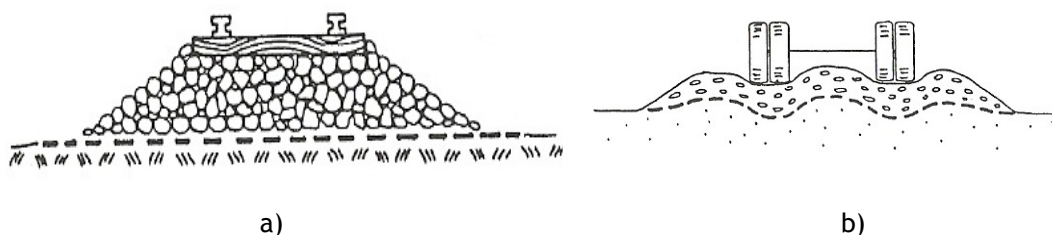


Figura 3.6 - Geotêxtil utilizado como filtro em função secundária: a) sob o balastro de linhas de caminho de ferro; b) sob o leito de estradas provisórias (Ingold, 1994).

No esquema da Figura 3.7 está representado um sistema de cobertura de um aterro de resíduos sólidos. Tradicionalmente, como se pode observar, é composto por uma camada de solo de regularização, seguida de um sistema de drenagem de biogás, ao qual se sucede a combinação de dois elementos de reduzida permeabilidade, um geocompósito

bentonítico e/ou uma geomembrana. Estes elementos são utilizados com o fim de impedir, ou reduzir ao máximo, a entrada de água para o corpo do aterro. Assim, de modo a permitir uma maior eficácia no cumprimento deste papel, é utilizada uma camada drenante constituída por um geocompósito ou por uma associação de material granular com um geotêxtil, como filtro. Desta forma, a drenagem da água superficial torna-se mais fácil e rápida fazendo com que, por um lado, os efeitos nefastos causados pelo peso excessivo de água sobre a estrutura de contenção sejam mitigados e, por outro, que o tempo de contacto entre a água e superfície do aterro seja o menor possível. O papel do material de filtragem utilizado sobre a camada drenante é o de evitar a colmatação desta pelas partículas finas da camada de protecção e cobertura, arrastadas pela percolação da água (Lopes, 2002).

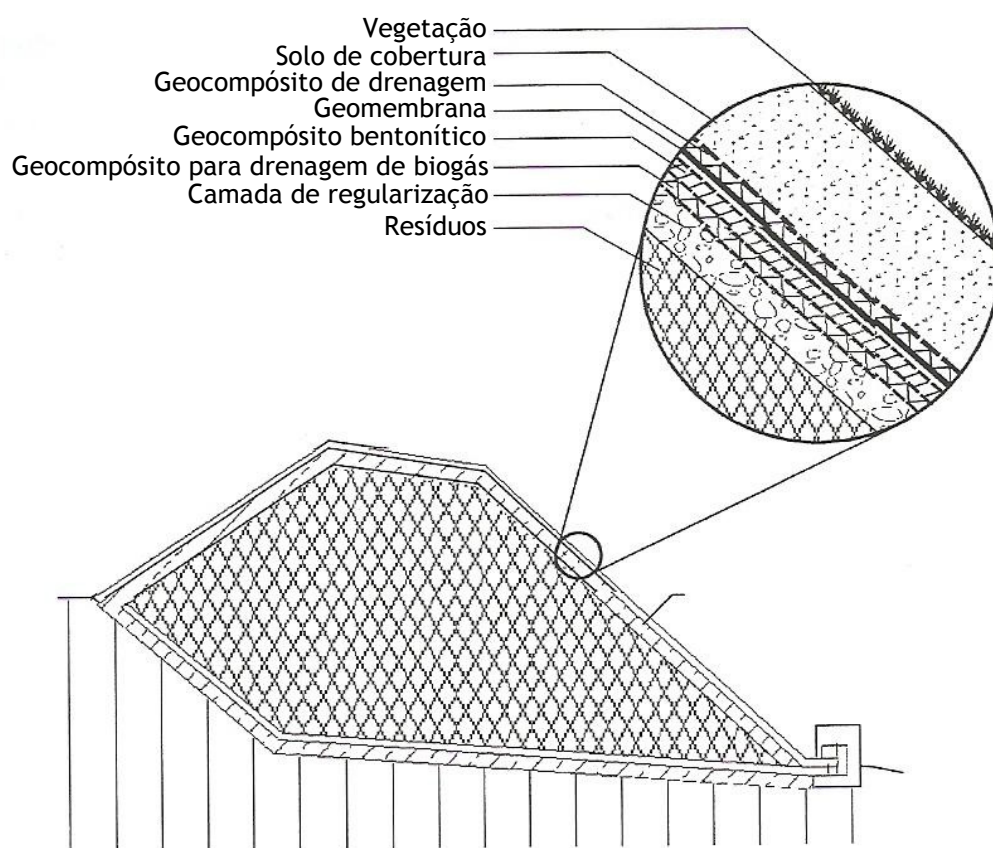


Figura 3.7 - Geotêxtil utilizado como filtro num sistema de drenagem na cobertura de um aterro sanitário (Zanzinger e Gartung, 2002).

3.3 - PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS ASSOCIADAS À FUNÇÃO DE FILTRAGEM

As propriedades hidráulicas dos geotêxteis são muito influenciadas por duas características físicas dos materiais: a espessura e a porosidade que eles possuem, esta, inerente ao processo de fabrico (Ingold, 1994 e Pinho-Lopes, 2004). No que diz respeito ao tamanho e à distribuição dos poros dos geotêxteis, pode-se afirmar que aqueles são mais variáveis no caso dos geotêxteis não tecidos do que no dos geotêxteis tecidos devido, precisamente, à concepção e ao modo de fabrico dos materiais. Este aspecto reflecte-se, inegavelmente, no desempenho hidráulico dos diferentes geotêxteis.

A determinação das características hidráulicas dos materiais geossintéticos passa, normalmente, pela avaliação da sua porosidade e da sua permeabilidade. A informação relativa à porosidade dos geossintéticos e, em particular, dos geotêxteis é conseguida através da determinação da distribuição e dimensão das aberturas. No que concerne à permeabilidade, esta é determinada com o recurso a ensaios laboratoriais específicos para o caso do fluxo no plano do material e do fluxo perpendicular ao plano do material.

3.3.1 - POROSIDADE

Os métodos de avaliação da porosidade dos geotêxteis são bastante variados, desde processos de injeção de mercúrio através dos materiais, até processos de visualização com o recurso a microscopia, passando por diversos métodos de peneiração, por via seca, por via húmida e peneiração hidrodinâmica (Shukla, 2002).

O método utilizado no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) é um método de peneiração por via húmida, cujos procedimentos estão de acordo com a NP EN ISO 12956: 2006 “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da dimensão característica da abertura”.

O conceito que está na base dos métodos que recorrem à peneiração é o mesmo em que se baseia a análise granulométrica de materiais granulares. Nesta, as partículas de solo passam através de uma série de peneiros, avaliando-se a quantidade de material granular que fica retido em cada um deles. De modo semelhante, nos métodos em que se recorre à peneiração para determinar a dimensão e a distribuição dos poros de um geotêxtil, faz-se a peneiração de um material granular de composição conhecida, em que o geotêxtil desempenha o papel de peneiro (Figura 3.8). Por fim, o material granular que passa

através do geotêxtil é peneirado, de modo a ser determinada a sua composição granulométrica.

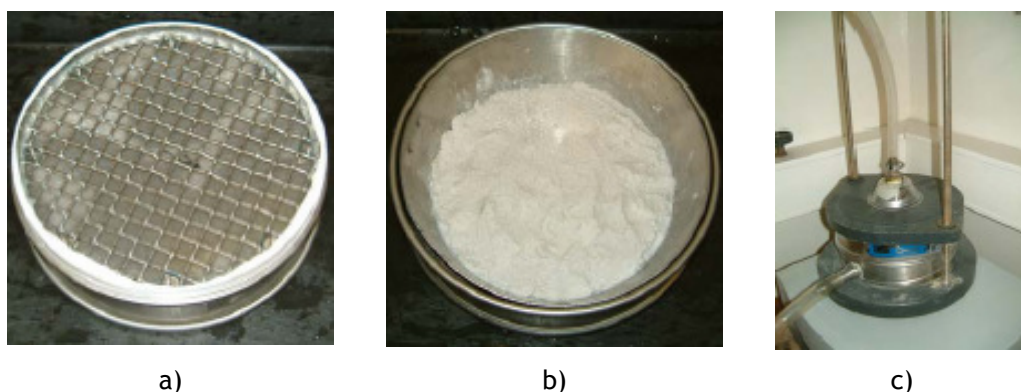


Figura 3.8 - Ensaio de determinação da dimensão da abertura, no LGS:
a) Provete colocado no equipamento; b) Solo colocado sobre o provete;
c) Peneiração por via húmida (Pinto, 2005).

Esta metodologia de ensaio permite a determinação da dimensão equivalente de abertura dos poros (DEA) e a dimensão aparente de abertura dos poros (DAA) dos geotêxteis. A notação habitual para estas grandezas é a de O_{95} para a DEA e de O_n para a DAA, em que n pode assumir os valores de 50 e 90, por exemplo (Shukla, 2002). Estas grandezas são determinadas a partir da curva granulométrica do material passado através do geotêxtil, conforme o exemplo indicado na Figura 3.9.

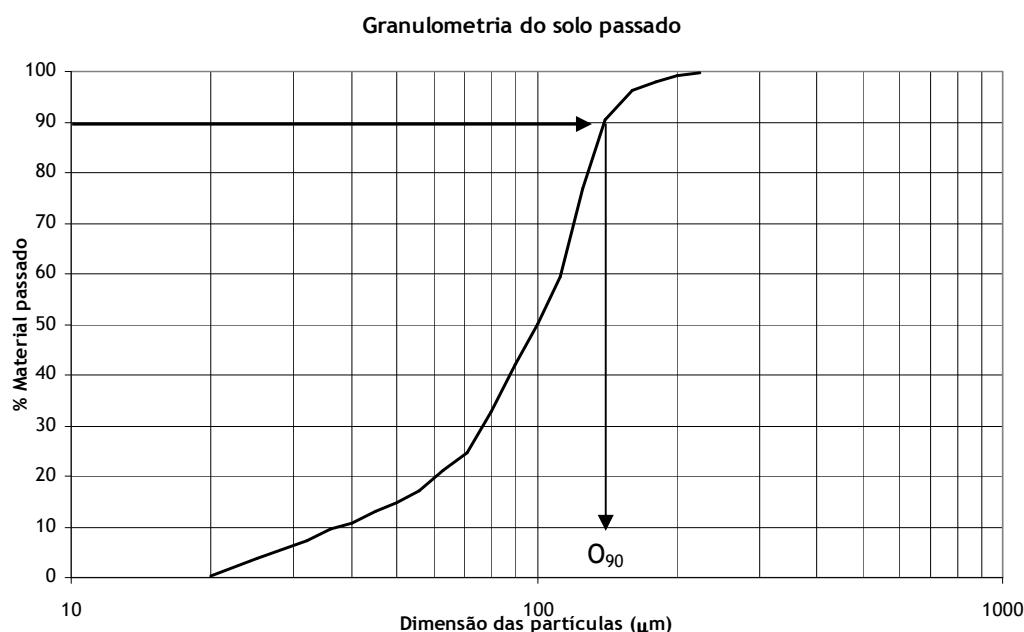


Figura 3.9 - Determinação de O_{90} a partir da curva granulométrica do solo passado através de um geotêxtil.

Note-se que a grandeza O_{90} pode ser entendida da seguinte forma: se um geotêxtil apresenta um valor de $120\mu\text{m}$ para O_{90} , então 90% dos poros do geotêxtil têm dimensões menores do que $120\mu\text{m}$.

3.3.2 - PERMEABILIDADE

A avaliação da permeabilidade dos materiais geossintéticos e, em particular, dos geotêxteis pode ser efectuada ao longo do próprio plano do material e na direcção perpendicular a este, como se pode observar nas Figuras 3.10 e 3.11.

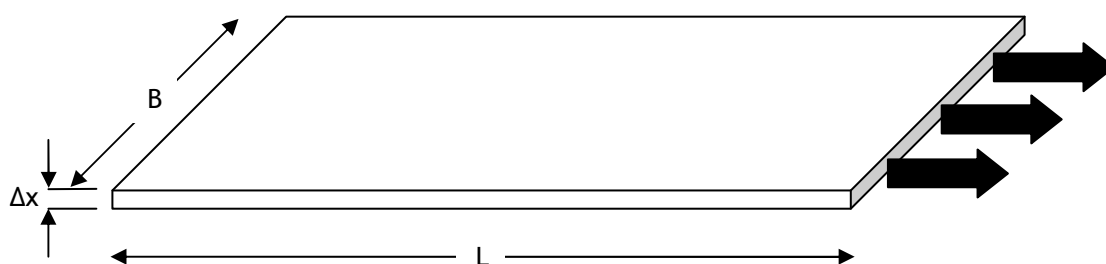


Figura 3.10 - Permeabilidade no plano do material (adaptado de Shukla, 2002).

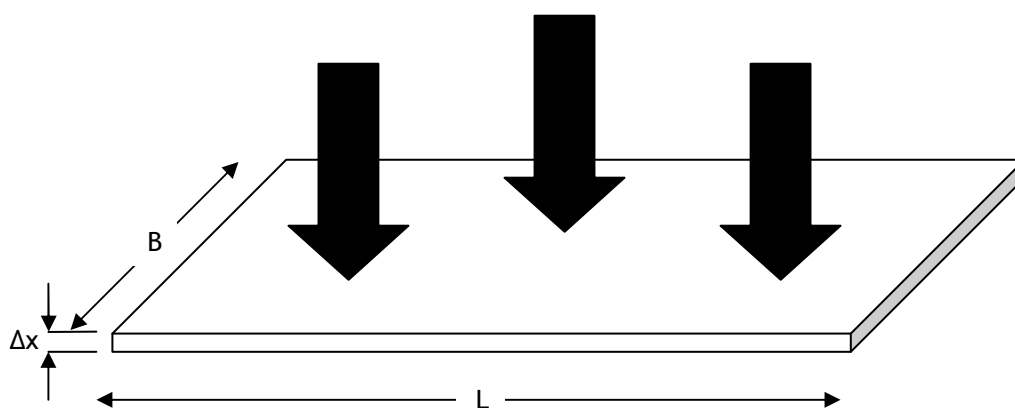


Figura 3.11 - Permeabilidade no plano perpendicular ao do material (adaptado de Shukla, 2002).

Os métodos de ensaio preconizados na normalização concebida para a determinação da permeabilidade dos geotêxteis baseiam-se na equação de Darcy (3.1), que traduz as características de um escoamento laminar:

$$v = k.i \quad (3.1)$$

em que v é a velocidade do escoamento (m/s), k é o coeficiente de permeabilidade do material (m/s) e i é o gradiente hidráulico (m/m).

No entanto, a equação de Darcy pode tomar outra forma, multiplicando-se ambos os membros da igualdade pela secção, ou área:

$$Q = k.i.S \quad (3.2)$$

em que Q é o caudal (m³/s) e S representa a área de atravessamento do fluido (m²).

Na realidade, assume-se que os fluxos que se verificam nos geotêxteis, quer no plano do material, quer na direcção perpendicular a esta, pertencem àquela categoria de escoamentos. De outro modo, se fossem considerados escoamentos turbulentos, a expressão deixava de ser válida e aplicável no estudo da permeabilidade dos geossintéticos. Há, contudo, casos em que o regime de escoamento nos ensaios laboratoriais adquire características de um fluxo turbulento. Nestes casos, assume-se que o princípio de Darcy se verifica quando, de facto, isso não acontece, fazendo com que as características de permeabilidade determinadas laboratorialmente resultem subestimadas (Ingold, 1994).

3.3.2.1 - PERMEABILIDADE NO PLANO DO MATERIAL

A determinação da permeabilidade no plano dos geotêxteis, no LGS, é realizada de acordo com o procedimento normalizado da NP EN ISO 12958: 2005 “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da capacidade de escoamento no seu plano”.

Neste laboratório foi desenvolvido um equipamento de ensaio que permite a quantificação do fluxo de água que ocorre ao longo do plano do geotêxtil, através da sua espessura. Na Figura 3.12 pode-se observar o aspecto geral do equipamento do LGS. Este equipamento foi concebido tendo em conta o objectivo do ensaio, no que concerne às grandezas a determinar, e, também, todo um conjunto de particularidades associadas à normalização dos procedimentos. Assim, a concepção do equipamento baseou-se em esquemas como os que são apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14.

De um modo muito sucinto, a determinação da permeabilidade de um geotêxtil, no plano do material, consiste na medição do volume de água, que atravessa, longitudinalmente, o núcleo de um provete com as dimensões de 0,20m de largura e de 0,30m de

comprimento, num determinado período de tempo, quando sujeito a uma determinada pressão de confinamento e para um determinado valor de gradiente hidráulico. Usualmente, os valores para a pressão de normal de confinamento são de 20kPa, 100kPa e 200kPa, ao passo que os valores para o gradiente hidráulico são de 0,1mm/mm e 1,0mm/mm.



Figura 3.12 - Vista geral do equipamento do LGS, de ensaio da permeabilidade no plano do material.

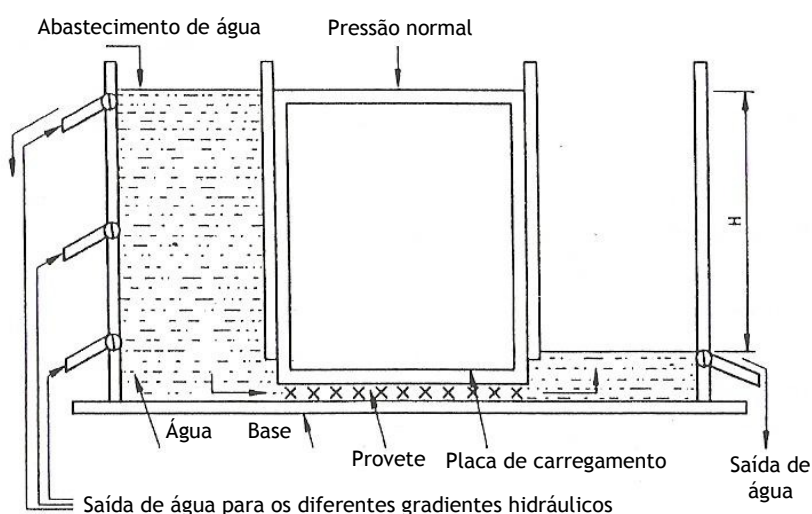


Figura 3.13 - Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade no plano do material (adaptado de Ingold, 1994).

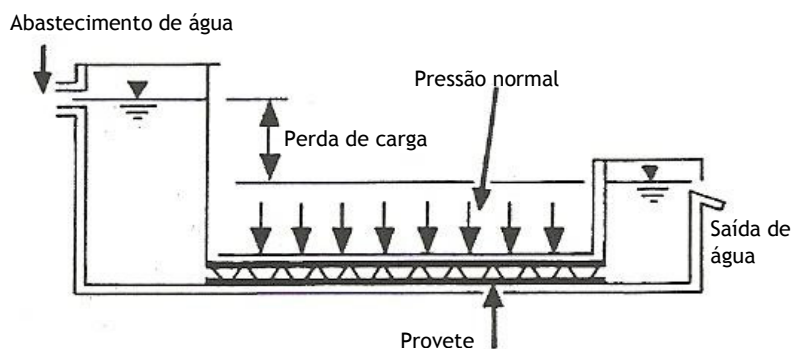


Figura 3.14 - Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade no plano do material (adaptado de Shukla, 2002).

Durante a realização do ensaio são aplicadas, sobre os geotêxteis ou sobre os geocompósitos drenantes os diversos níveis de pressão de confinamento, por ordem crescente. Para cada nível de pressão de confinamento é estabelecido um fluxo de água em consonância com cada um dos valores dos gradientes hidráulicos pretendidos, isto é, 0,1mm/mm e 1,0mm/mm. Deste modo, para cada provete, para cada nível de pressão de confinamento e para cada valor de gradiente hidráulico, é quantificado o volume de água que é possível recolher num determinado intervalo de tempo. Nestas condições, é determinado um coeficiente hidráulico, $q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$ (m^2/s), definido como a capacidade de escoamento no plano, calculado de acordo com a expressão:

$$q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}} = \frac{V \cdot R_T}{B \cdot t} \quad (3.3)$$

em que V é o volume de água recolhido (m^3), R_T é um factor correctivo da temperatura da água, B é a largura do provete (m) (ver Figura 3.10) e t é o intervalo de tempo em que se procede à recolha da água (s).

No final, depois de estarem determinados todos os valores de $q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$, podem ser elaborados diagramas como o que se apresenta na Figura 3.15. Neste gráfico pode-se verificar que está condensada toda a informação referida no parágrafo anterior. Note-se que se pode apresentar este tipo de representação gráfica, quer para cada um dos provetes ensaiados, quer para a média dos resultados obtidos.

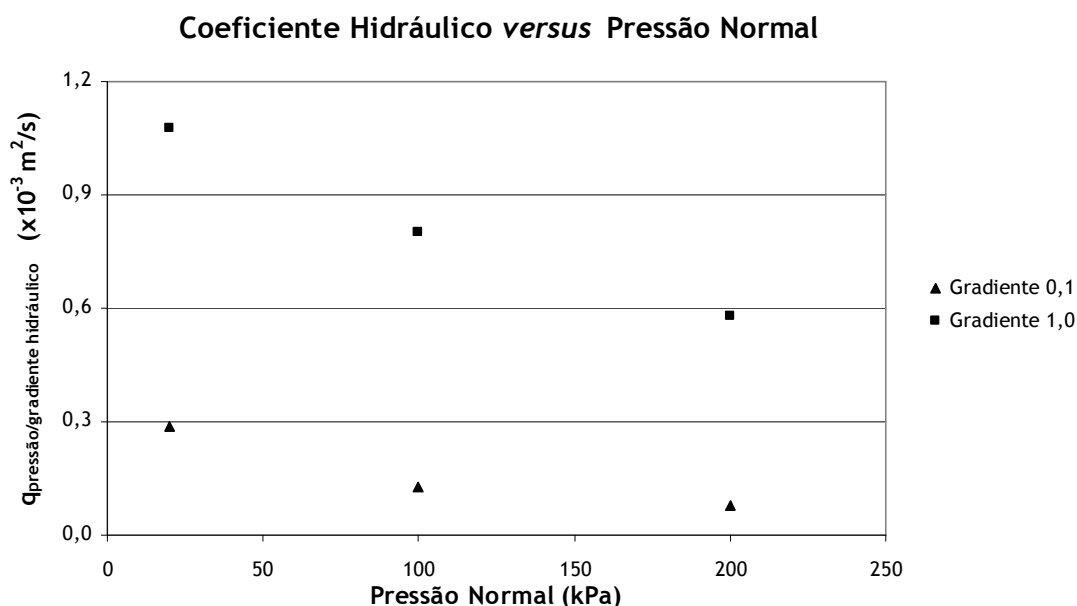


Figura 3.15 - Relação Pressão Normal - $q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$

De referir, neste ponto, que o valor da espessura dos geotêxteis varia no decorrer do ensaio. De facto, nos ensaios que visam a determinação das características hidráulicas, os materiais ficam sujeitos a diversos níveis de pressão, quer pela aplicação mecânica de forças, quer pela pressão da própria coluna de água. Uma vez que os geotêxteis, principalmente os geotêxteis não tecidos, apresentam uma certa flexibilidade e compressibilidade, é natural que se tornem mais ou menos compactos e mais ou menos espessos durante as diferentes fases dos ensaios laboratoriais (Ingold, 1994). É, portanto, por isso, que se consideram grandezas independentes da espessura dos materiais, como o coeficiente atrás referido, $q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$. A característica ou propriedade dos geotêxteis e dos geocompósitos drenantes que define a capacidade de vazão de um material ao longo do seu plano é a designada transmissividade hidráulica, notada como θ (m^2/s). Esta é obtida dividindo o valor de $q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}$ pelo valor do gradiente hidráulico, i , como se pode inferir da análise da Expressão (3.4):

$$\theta = \frac{q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}}}{i} \quad (3.4)$$

Além disso, se se quiser conhecer o valor do coeficiente de permeabilidade no plano do material ensaiado, k_p (m/s), este pode ser obtido dividindo o valor da transmissividade, θ , pela espessura do provete, Δx (m), conforme a Expressão (3.5):

$$k_p = \frac{\theta}{\Delta x} \quad (3.5)$$

De seguida, apresenta-se a dedução das expressões atrás referidas. Em primeiro lugar, por uma questão de simplicidade, vai-se admitir que:

$$q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}} = \frac{V}{B.t} \quad (3.6)$$

isto é, por uma questão de simplicidade na dedução, não se vai entrar com o factor correctivo da temperatura da água, R_T , nas expressões.

Uma vez que, com as grandezas já definidas atrás:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.7)$$

vem que,

$$q_{\text{pressão/gradiente hidráulico}} = \frac{Q}{B} \quad (3.8)$$

No escoamento da água ao longo do plano dos geossintéticos, de acordo com o que é apresentado na Figura 3.10, a Expressão (3.2) resulta:

$$Q = k_p \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot S \quad (3.9)$$

em que Δh é a perda de carga verificada no escoamento (m) e L é o comprimento do provete (m).

A área de atravessamento da água, através do provete, S , de acordo com a Figura 3.10 pode vir como:

$$S = \Delta x \cdot B \quad (3.10)$$

e, conseqüentemente,

$$Q = k_p \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot (\Delta x \cdot B) \quad (3.11)$$

$$\frac{Q}{B} = k_p \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot \Delta x \quad (3.12)$$

$$\frac{Q}{B} = k_p \cdot \Delta x \cdot i \quad (3.13)$$

Definindo transmissividade hidráulica como o produto do coeficiente de permeabilidade do material, k_p , pela espessura do mesmo, Δx , vem:

$$\frac{Q}{B} = \theta \cdot i \quad (3.14)$$

$$\theta = \frac{Q}{B \cdot i} \quad (3.15)$$

Fazendo a analogia da Expressão (3.8) com a Expressão (3.15) vem que:

$$\theta = \frac{q_{\text{pressão / gradiente hidráulico}}}{i} \quad (3.4)$$

e

$$k_p = \frac{\theta}{\Delta x} \quad (3.5)$$

3.3.2.2 - PERMEABILIDADE NO PLANO NORMAL AO DO MATERIAL

No LGS, a determinação da permeabilidade na direcção perpendicular ao plano dos geotêxteis é realizada de acordo com os procedimentos constantes da NP EN ISO 11058: 2003 “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento”.

Foi desenvolvido, neste laboratório, um equipamento protótipo para a realização deste tipo de ensaios, o qual se apresentará, de forma pormenorizada, mais à frente (Figura 3.16).

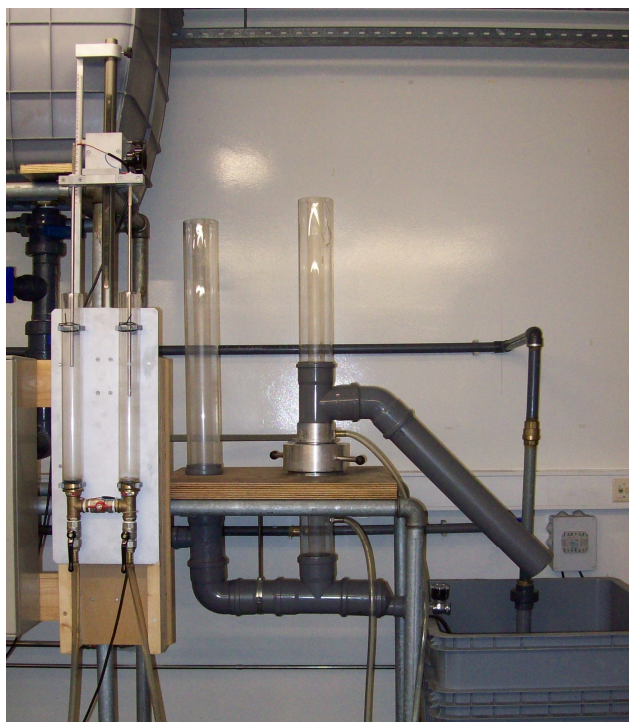


Figura 3.16 - Equipamento de ensaio da permeabilidade no plano normal ao do material existente no LGS.

Tal como na concepção do equipamento para a realização de ensaios de avaliação da permeabilidade no plano do material, no caso deste equipamento, também foram seguidas indicações presentes em publicações e nos próprios documentos normativos. Observe-se, nesse sentido, as Figuras 3.17 e 3.18, onde se apresentam dois esquemas distintos para possíveis equipamentos de ensaio.

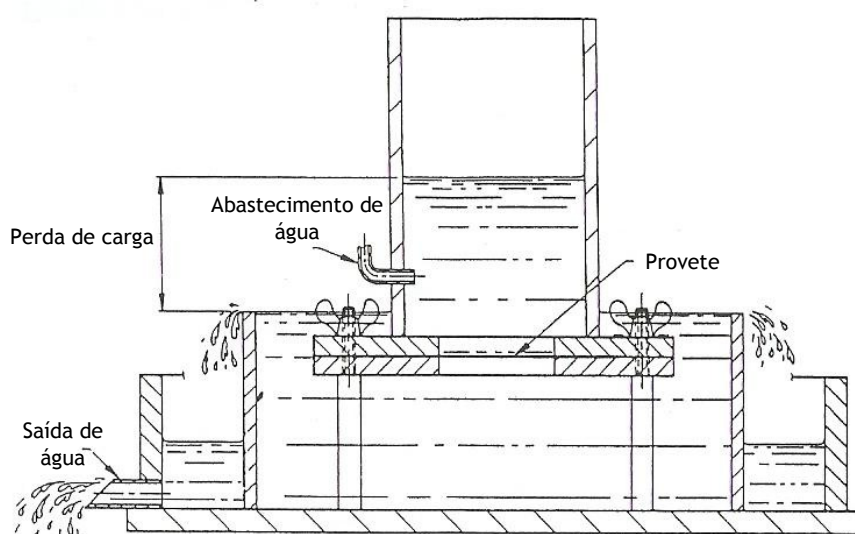


Figura 3.17 - Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade normal ao plano do material (adaptado de Ingold, 1994).

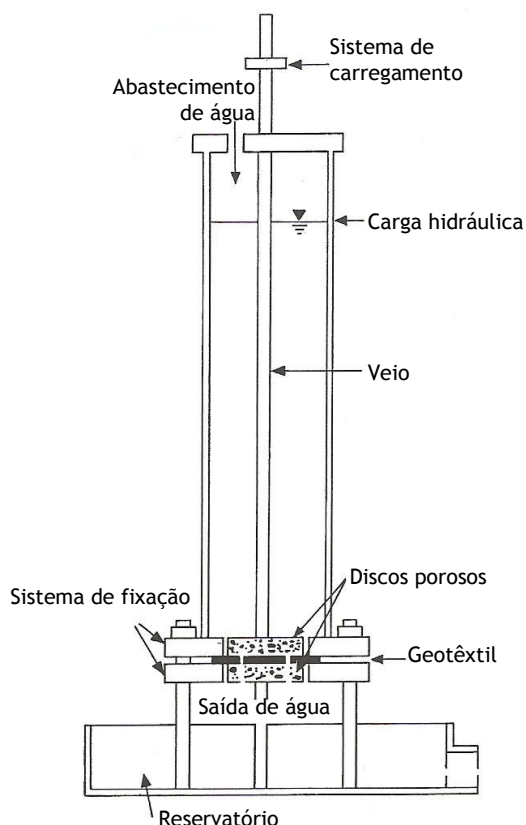


Figura 3.18 - Esquema de equipamento de ensaio da permeabilidade normal ao plano do material (adaptado de Shukla, 2002).

De forma muito resumida, a determinação da permeabilidade normal ao plano é efectuada fazendo-se passar água através de um provete de geotêxtil, procedendo-se à regulação do fluxo tendo em vista a verificação de determinados valores de perdas de carga da água. A água que atravessa o material geossintético é recolhida, avaliando-se o seu volume e registando-se o intervalo de tempo em que o escoamento se processou. Os valores das perdas de carga usualmente utilizados são de 70mm, 56mm, 42mm, 28mm e 14mm. Assim, para cada provete de geotêxtil e para cada valor de perda de carga, é avaliado o escoamento, a partir dos registos do volume de água passada e do tempo verificado. Com estes valores é calculada a velocidade de escoamento para a temperatura de 20 °C, V_{20} (m/s), à custa da Expressão 3.16:

$$V_{20} = \frac{V \cdot R_T}{S \cdot t} \quad (3.16)$$

em que V (m/s), R_T , S (m²) e t (s) são grandezas definidas atrás.

Depois de determinados todos os valores de V_{20} , isto é, um para cada um dos valores da perda de carga, é possível obter diagramas como o que se apresenta na Figura 3.19. Aqui, tal como no caso dos diagramas elaborados para a permeabilidade no plano do material, podem ser representados graficamente os resultados individuais de cada uma das amostras ensaiadas ou, pelo contrário, representar a média obtida para uma série de provetes.

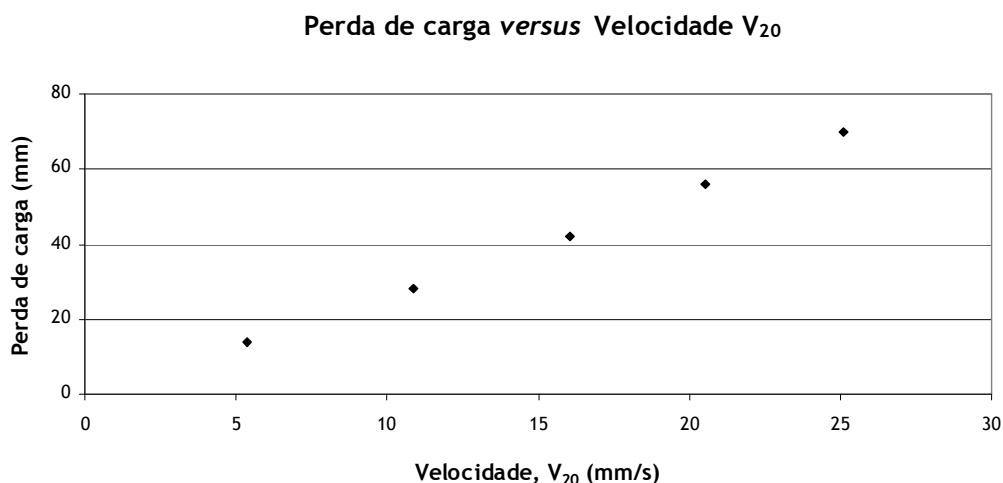


Figura 3.19 - Relação V_{20} - perda de carga.

No entanto, o resultado final do ensaio de permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis é o designado índice de velocidade para uma perda de carga de 50mm, VI_{H50} . Este valor é obtido, conforme se verá à frente, através de interpolação gráfica ou matemática, da curva quadrática que melhor aproxima os pares ordenados (velocidade; perda de carga) definidos anteriormente. O sentido desta operação é o de encontrar o valor da velocidade do escoamento para uma perda de carga de 50mm.

Conforme se referiu atrás, a espessura dos geotêxteis varia durante a realização dos ensaios, graças à variação da pressão da água sobre a sua superfície. É, portanto, por isso, que é necessária a utilização de grandezas independentes do valor da espessura dos materiais. A análise da Expressão (3.16) ilustra este aspecto. A propriedade hidráulica dos geotêxteis que está associada à permeabilidade normal ao plano do material é designada como permissividade, sendo notada como ψ (s^{-1}). A permissividade é obtida através da divisão do valor da velocidade V_{20} ou VI_{H50} pela perda de carga, Δh (m), como se pode ver na seguinte expressão:

$$\psi = \frac{V_{20}}{\Delta h} \quad (3.17)$$

Por outro lado, se se quiser conhecer o valor do coeficiente de permeabilidade, k_n (m/s), terá que se multiplicar o valor da permissividade pela espessura do material, Δx (m), como se pode observar na Expressão (3.18).

$$k_n = \psi \cdot \Delta x \quad (3.18)$$

Em seguida apresenta-se a dedução das expressões utilizadas no estudo da permeabilidade normal ao plano. De novo, por uma questão de simplicidade, admite-se que:

$$V_{20} = \frac{V}{S \cdot t} \quad (3.19)$$

isto é, o valor de V_{20} fica determinado a menos do factor correctivo da temperatura, R_T .

Pela conjugação da Expressão (3.7) com a Expressão (3.19) vem que,

$$V_{20} = \frac{Q}{S} \quad (3.20)$$

De acordo com o esquema apresentado na Figura 3.11, a Expressão (3.2) resulta:

$$Q = k_n \cdot \frac{\Delta h}{\Delta x} \cdot S \quad (3.21)$$

em que Δh (m) é a perda de carga verificada no escoamento e Δx (m) é a espessura do provete. A Expressão (3.21) pode ser escrita como:

$$\frac{Q}{S} = k_n \cdot \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (3.22)$$

Definindo permissividade hidráulica como o quociente entre o coeficiente de permeabilidade do material, k_n , e a espessura do mesmo, Δx , vem:

$$\frac{Q}{S} = \psi \cdot \Delta h \quad (3.23)$$

Conjugando a Expressão (3.23) com a Expressão (3.20) resultam as seguintes expressões:

$$\psi = \frac{V_{20}}{\Delta h} \quad (3.17)$$

e

$$k_n = \psi \cdot \Delta x \quad (3.18)$$

A pressão de confinamento exercida sobre os geotêxteis tem diferentes efeitos consoante as características dos materiais ensaiados. Na realidade, os geotêxteis tecidos não vêm a sua permeabilidade muito afectada pelo nível de pressão que lhes é imposta mas, no que concerne à sua própria estrutura, esta tem um papel determinante na avaliação daquela propriedade. Pelo contrário, os geotêxteis não tecidos, em particular os agulhados, apresentam uma importante redução na sua permeabilidade, quer no plano, quer na direcção perpendicular a este. Este facto foi atestado por um estudo de Giroud (1980), cujos resultados podem ser observados na Figura 3.20. A análise dos diagramas permite concluir que, das duas propriedades hidráulicas estudadas, a transmissividade é a mais afectada pela pressão exercida sobre os geotêxteis.

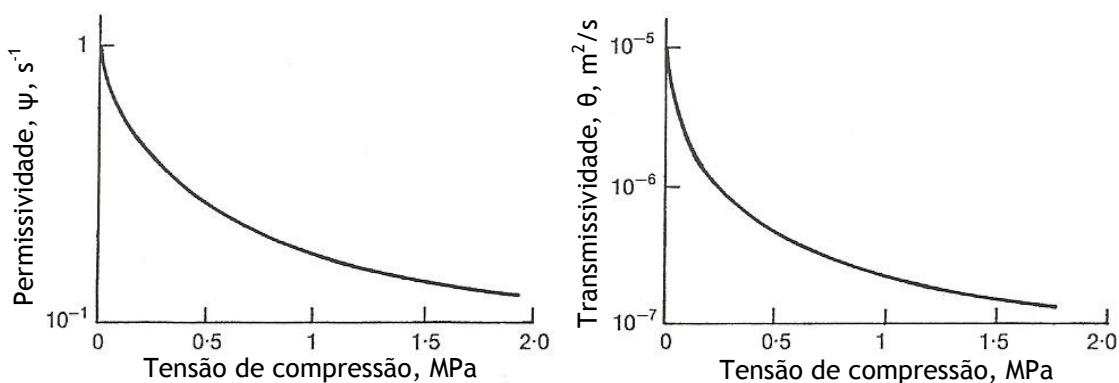


Figura 3.20 - Efeito da compressão na permissividade e na transmissividade (adaptado de Giroud, 1980 e Shukla, 2002).

A determinação destas grandezas, apesar de normalizada, não deixa de ser alvo de críticas. De facto, a avaliação laboratorial da permeabilidade de determinado geotêxtil, fazendo passar água através do material, não representa a permeabilidade que o material tem que demonstrar, quando colocado em obra, sujeito a solicitações e em condições reais (Ingold, 1994). Assim, quando em serviço, o material está em contacto

com o solo, podendo ocorrer migração de partículas sólidas, o que pode provocar a colmatção do geossintético e a consequente diminuição da permeabilidade. Do mesmo modo, a pressão causada pelo peso das terras sobrejacentes ao geossintético pode levar à redução da sua permeabilidade, assim como a existência, no solo, de elevados níveis de actividade biológica. Por fim, se os fluidos percolantes tiverem elevadas concentrações em sais, estes poderão precipitar formando sólidos no interior do material de filtragem, diminuindo, em muito, a sua permeabilidade. Neste sentido, foram desenvolvidos equipamentos que permitem avaliar o desempenho hidráulico, a longo prazo, de geotêxteis fazendo passar água não apenas através de um geotêxtil mas de um sistema solo-geotêxtil (Shukla, 2002). Um dos ensaios concebidos para este efeito - desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers - permite avaliar a possibilidade de colmatção dos geotêxteis através da comparação entre o gradiente hidráulico verificado numa franja constituída pelo conjunto solo-geotêxtil e o que se verifica numa franja imediatamente sobrejacente a este.

3.4 - DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO DO MATERIAL

A concepção e o desenvolvimento do equipamento laboratorial para a avaliação da permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos do LGS da FEUP estiveram de acordo com o preconizado na NP EN ISO 11058 (2003).

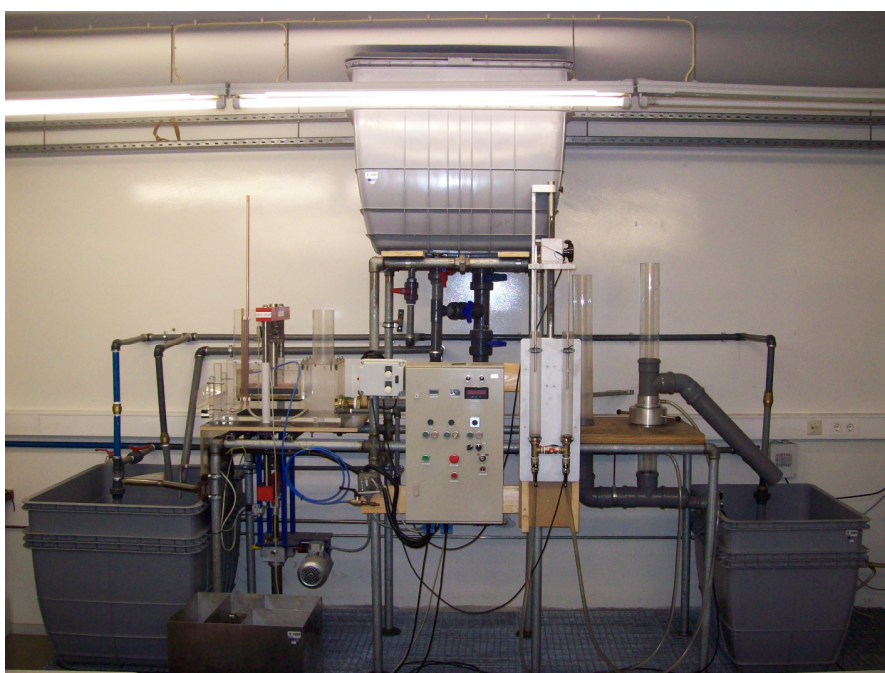


Figura 3.21 - Equipamento laboratorial do LGS para determinação da permeabilidade dos geossintéticos.

A construção deste equipamento consistiu, na verdade, na adaptação e alargamento do âmbito de utilização de equipamento já existente no LGS. De facto, em 2004, foi concebido o equipamento para avaliação da permeabilidade no plano dos geotêxteis de modo a permitir acrescentar e instalar meios de ensaio da permeabilidade normal ao plano dos materiais. Na Figura 3.21 pode ser observada a totalidade do equipamento de ensaio das propriedades relativas à permeabilidade dos geossintéticos. Note-se, nessa imagem, a disposição, à esquerda, do equipamento de ensaio inicialmente construído e, à direita, do equipamento para ensaio da permeabilidade normal ao plano do material.

3.4.1 - EQUIPAMENTO DE ENSAIO DA PERMEABILIDADE NORMAL AO PLANO DO MATERIAL

Foram apresentados, no ponto anterior, dois esquemas para equipamentos de ensaio sugeridos na literatura da especialidade. Na Figura 3.22 é apresentado um dos esquemas sugeridos na NP EN ISO 11058, o qual foi adoptado para a concepção do equipamento do LGS. Trata-se de um sistema em que o provete é colocado na posição horizontal apresentando, portanto, o fluxo que o atravessa, a direcção vertical.

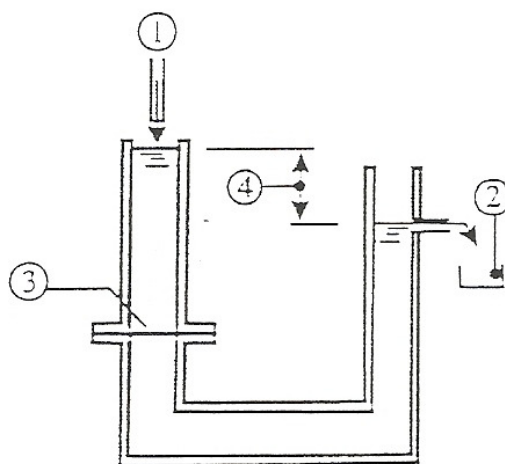


Figura 3.22 - Esquema de equipamento para determinação da permeabilidade normal ao plano de geossintéticos: 1) Entrada de fluxo; 2) Fluxo recolhido; 3) Provete; 4) Perda de carga (NP EN ISO 11058, 2003).

O equipamento de ensaio consiste num circuito de água entre dois reservatórios colocados a diferentes cotas, para que a água flua por gravidade, do reservatório colocado superiormente, para o reservatório que se encontra ao nível do solo, atravessando o provete de geotêxtil (Figura 3.23). O abastecimento do reservatório

superior é feito com água da rede pública que serve o sistema de distribuição da FEUP. O abastecimento deste reservatório é efectuado com, pelo menos, 12 horas de antecedência relativamente ao início dos ensaios.



Figura 3.23 - Equipamento de ensaio da permeabilidade normal ao plano do material: vista geral, com os reservatórios superior e inferior.

O circuito possui um sistema de bombagem de água de modo a permitir que, no final de um ciclo de ensaios, o reservatório superior seja reabastecido, possibilitando a realização de novos ensaios (Figura 3.24). A existência deste equipamento hidromecânico permite, também, a eliminação da água utilizada e que deve ser rejeitada.



Figura 3.24 - Equipamento hidromecânico de bombagem.

A parte do circuito hidráulico em que se processa o ensaio, propriamente dito, é constituída por troços de tubos em policloreto de vinilo (PVC) e em acrílico, com um diâmetro exterior de 90mm. A utilização de acrílico em parte do circuito permite a observação do fluxo e vai de encontro ao que está preconizado na norma de ensaio, no que concerne à utilização de tubos em materiais transparentes (Figura 3.25).



Figura 3.25 - Partes transparentes do circuito: a) Inferior; b) Superior.

O equipamento contempla, também, uma plataforma em madeira (Figura 3.26) que, para além de conferir rigidez ao circuito, permite dispor-se de uma área de trabalho para pousar materiais, proceder à preparação dos provetes, servindo, também, como área de apoio durante as diversas fases dos ensaios.

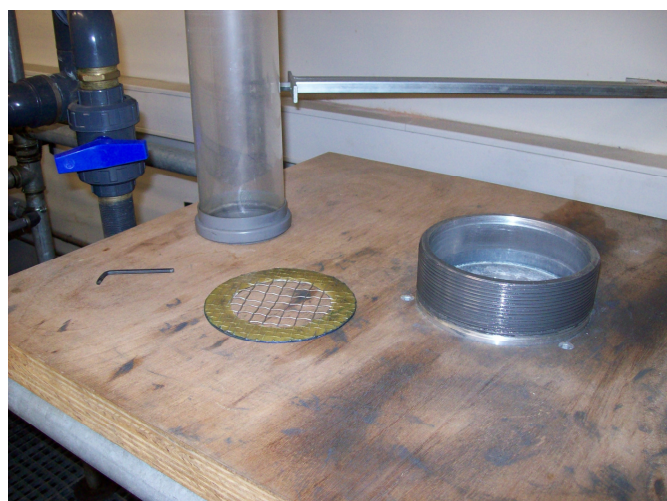


Figura 3.26 - Plataforma em madeira.

O circuito hidráulico está dividido em dois, por forma a possibilitar a colocação dos provetes de geotêxteis. Junto da plataforma de trabalho atrás referida, existe um

sistema enroscado metálico, em aço inox, que permite acomodar o provete a ensaiar (Figura 3.27a). O sistema para acomodação do provete de geotêxtil (Figura 3.27b) está concebido para receber amostras com 130mm de diâmetro, ao passo que a área exposta, isto é, a área efectivamente sujeita ao fluxo de água corresponde a um círculo com 85mm de diâmetro.



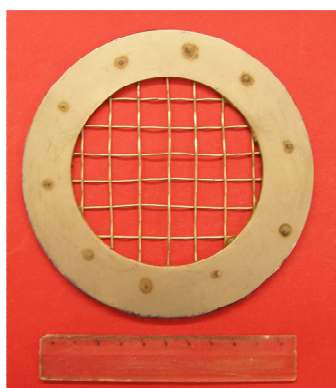
a)



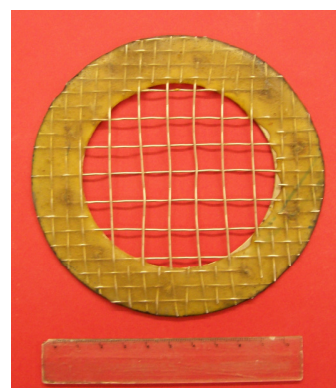
b)

Figura 3.27 - Sistema para colocação dos provetes: a) Vista exterior; b) Vista interior.

O mecanismo para colocação das amostras trabalha como um sistema macho-fêmea, em que uma das partes desliza para o interior da outra, premindo o bordo do provete. Esta peça foi concebida de modo a exercer uma pressão sobre o bordo do provete capaz de garantir que o fluxo apenas se processa na parte exposta do mesmo, não permitindo a existência de escoamentos paralelos. Além disso, sobre o provete, é colocada uma grelha metálica, constituída por uma malha de barras com 1mm de diâmetro, formando aberturas com 1cm de lado, como a que se pode observar na Figura 3.28. O bordo desta grelha está revestido com borracha, na parte que entra em contacto com o material a ensaiar, o que permite, ainda, aumentar a estanqueidade do bordo do provete.



a)



b)

Figura 3.28 - Grelha metálica: a) Face superior; b) Face inferior.

O ensaio de geotêxteis à permeabilidade normal ao plano do material recorre à avaliação desta propriedade sob diversos níveis de carga hidráulica. Assim, o equipamento de ensaio do LGS dispõe de dois tubos piezométricos, um a montante e outro a jusante do provete, de modo a permitir a avaliação deste parâmetro (Figura 3.29).

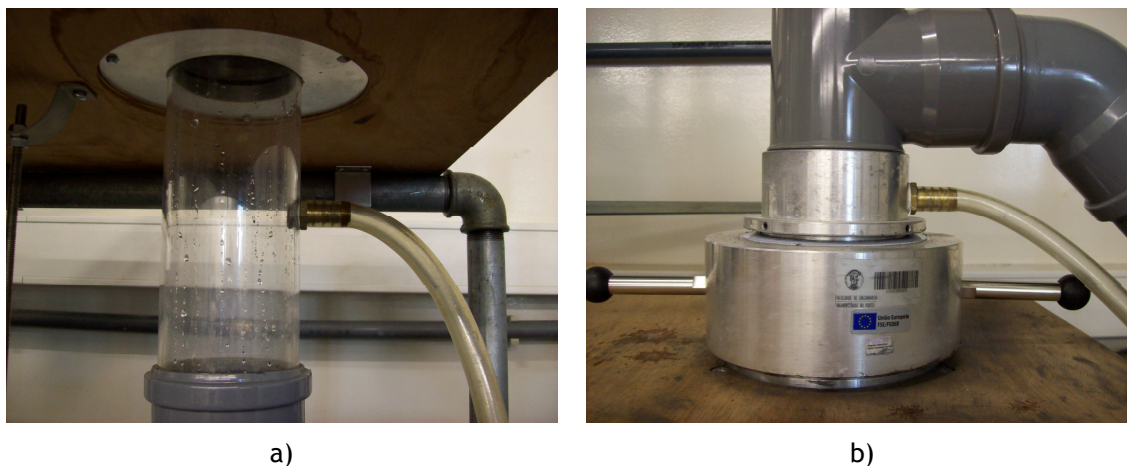


Figura 3.29 - Tubos piezométricos: a) Montante do provete; b) Jusante do provete.

Os tubos piezométricos encontram-se ligados a tubos em acrílico que permitem uma fácil observação da carga hidráulica existente em cada instante do ensaio (Figura 3.30). A estes tubos está associado um sistema detector de água, movível, que permite ajustar o equipamento às diferentes condições e fases dos ensaios (Figura 3.31). Este sistema possui duas escalas graduadas com intervalos de 5mm (Figura 3.31c) o que possibilita a identificação das cargas hidráulicas e, consequentemente, das perdas de carga verificadas. Este conjunto de aparelhos permite identificar o nível da água, quer a montante, quer a jusante do provete.



Figura 3.30 - Tubos em acrílico para observação da carga hidráulica.

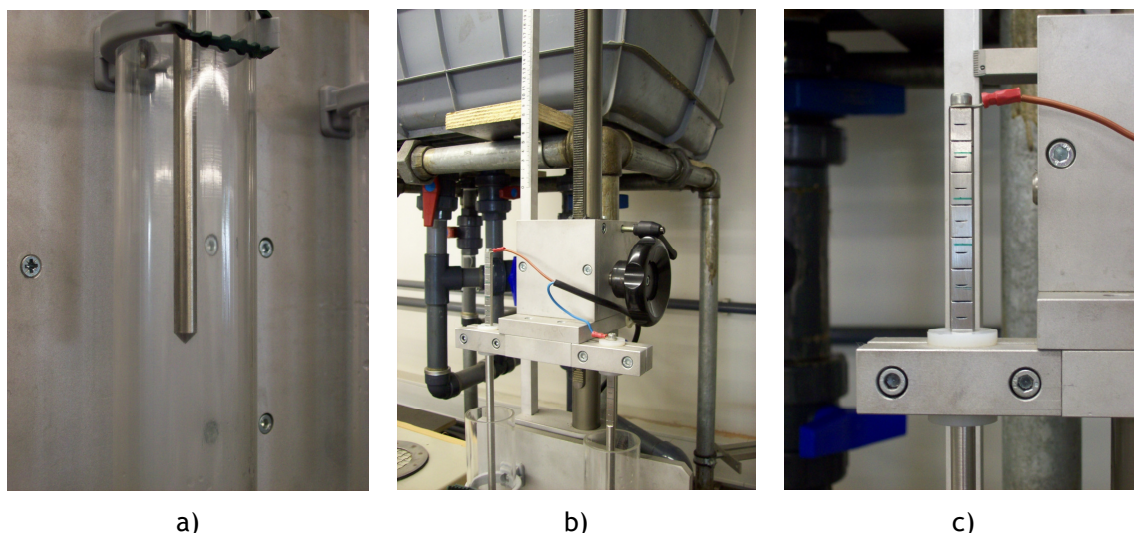


Figura 3.31 - Sistema detector de água: a) Sensor; b) Sistema de ajuste; c) Escala graduada.

No plano do desenvolvimento do equipamento estava previsto que o mecanismo detector do nível da água funcionasse por alarme, isto é, através de um sensor que produzisse um sinal luminoso, indicativo do nível de água. No entanto, não foi possível concluir esse trabalho, procedendo-se ao controlo dos níveis de água através da observação directa. A verificação das diversas perdas de carga impostas durante a realização dos ensaios é conseguida através do ajuste da escala graduada referida atrás. Na realidade, a diferença entre o nível de água a montante e a jusante do provete (verificada através do contacto da água com as pontas inferiores dos sensores) traduz-se num intervalo da escala graduada (definido pelos extremos superiores dos sensores), conforme se pode ver na Figura 3.32. A observação directa consiste em verificar o contacto entre o menisco da superfície da água contida nos tubos em acrílico com a ponta inferior do sensor.

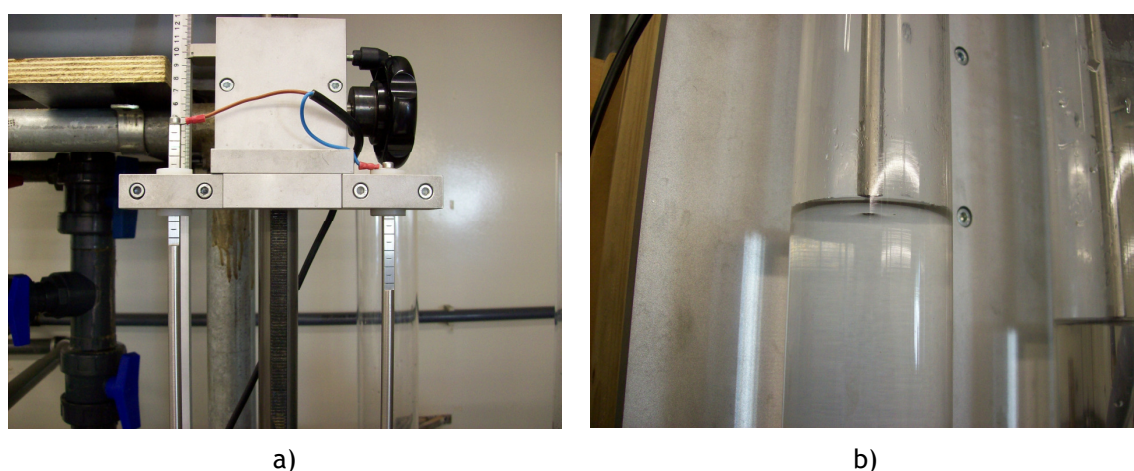
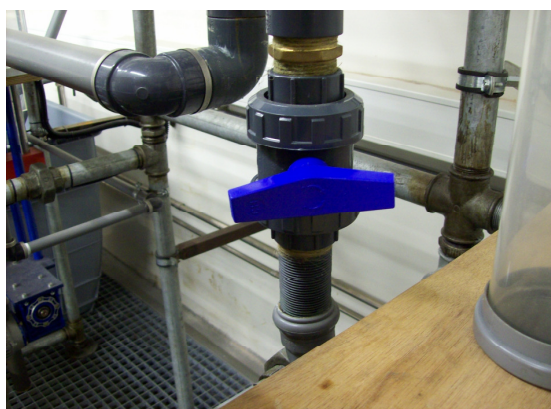


Figura 3.32 - Verificação da perda de carga: a) Contacto entre água e sensor; b) Intervalo na escala graduada.

A diferença entre os valores da carga hidráulica a montante e a jusante do provete fornece o valor da perda de carga causada pela presença do geotêxtil no escoamento da água. Os níveis de água são controlados através de duas válvulas que se encontram a montante do sistema de fixação do provete, uma, que controla o abastecimento de água ao equipamento e, outra, de menor dimensão, que permite a descarga de fundo do sistema (Figura 3.33). Note-se que, enquanto que a primeira é utilizada para realizar grandes ajustes no regime de escoamento, a segunda é indicada para regular o fluxo de uma forma mais apurada.



a)



b)

Figura 3.33 - Válvulas para ajuste do escoamento: a) de grandes dimensões; b) de pequenas dimensões.

Por fim, existe o sistema de descarga que permite a recolha da água passada através do provete nas condições de carga hidráulica especificadas (Figura 3.34).



Figura 3.34 - Sistema de descarga.

3.4.2 - METODOLOGIA DE ENSAIO - MÉTODO DE CARGA CONSTANTE

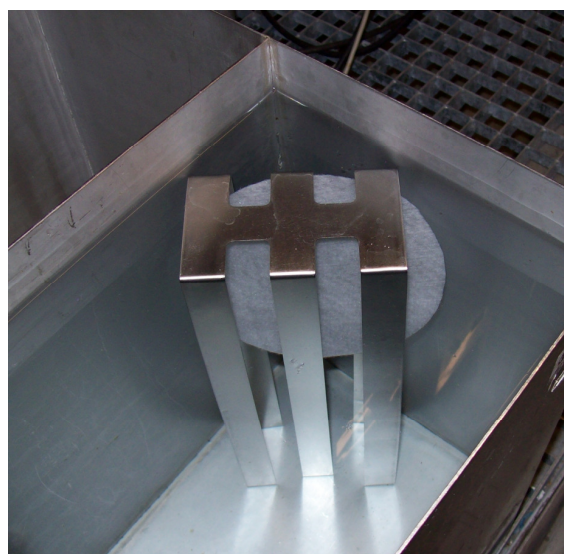
Cada ensaio de avaliação da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis é constituído por uma série de 5 provetes. O processo de amostragem, de manuseamento e de preparação dos provetes é executado de acordo com o preconizado na NP EN ISO 9862 (2007).

Os provetes a ensaiar são cortados com uma forma circular, adaptada ao equipamento laboratorial, com um diâmetro de 130 mm, conforme se pode observar na Figura 3.35a).

Os provetes são imersos em água durante, pelo menos, 12 horas para saturação do material, com a finalidade de serem eliminadas todas as bolhas de ar que pudessem interferir no escoamento da água através do geotêxtil (Figura 3.35b). Este aspecto é bastante importante em alguns tipos de geotêxteis, uma vez que estes podem exibir resistência à molhagem.



a)



b)

Figura 3.35 - Provette: a) Após o corte; b) Em saturação em água.

Cada provete é colocado no equipamento de ensaio como ilustra a Figura 3.36a). Sobre o provete é colocada uma grelha metálica, caracterizada no ponto anterior (Figura 3.36b). A finalidade deste elemento é a de garantir que o escoamento da água se processe apenas pela parte central do provete de geotêxtil e, simultaneamente, sustentar o material que, durante a realização do ensaio fica sujeito a diferentes níveis de pressão hidráulica. Em seguida, é colocado o sistema de aperto do provete, ao qual está acoplado um tubo piezométrico e o sistema de descarga de água (Figuras 3.36 c) e d).

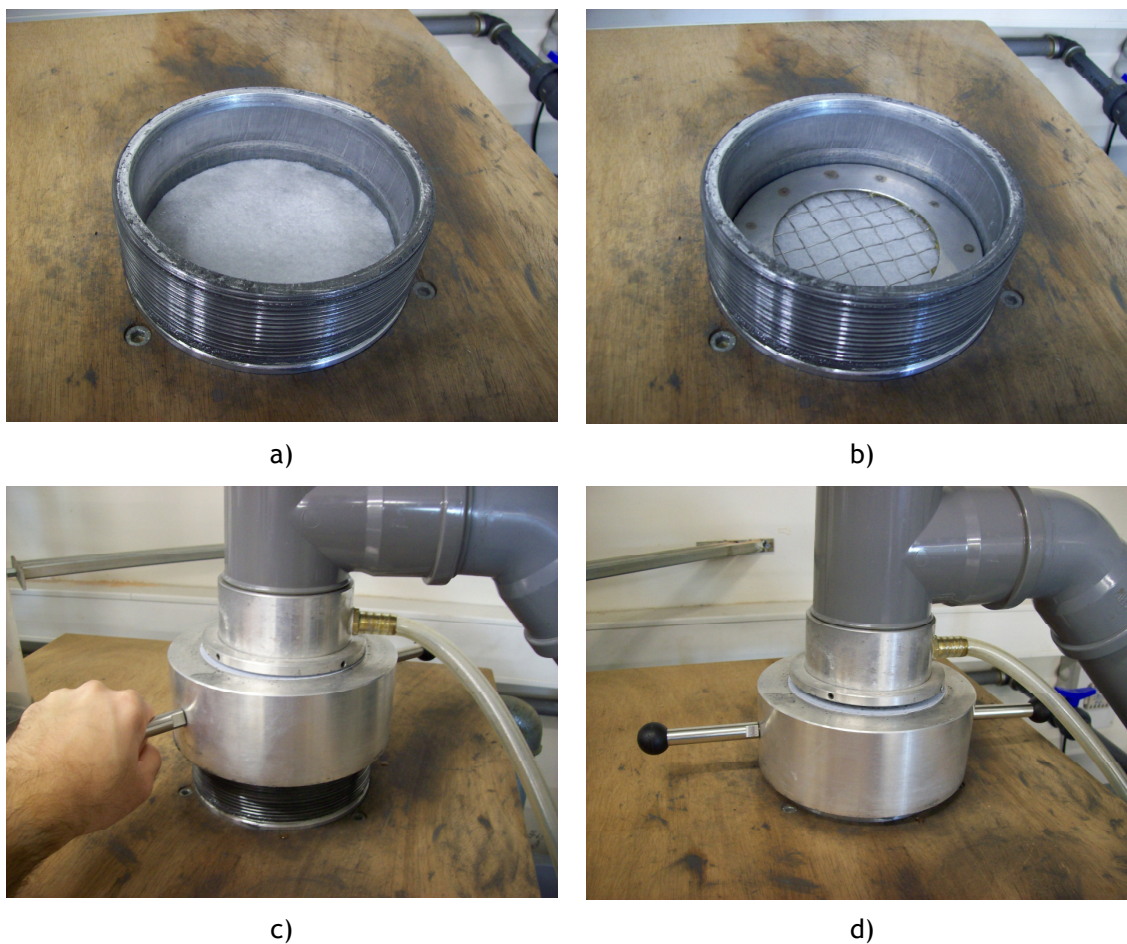


Figura 3.36 - Provete: a) Colocação; b) Colocação da grelha; c) Aperto do sistema; d) Processo de colocação concluído.

Antes de se proceder ao ensaio, propriamente dito, é feito um teste que consiste em estabelecer uma perda de carga hidráulica de 50mm entre uma posição a montante e uma posição a jusante do provete e avaliar, após o corte do abastecimento de água ao equipamento, o tempo que decorre até os níveis de água a montante e a jusante, se igualarem (Figura 3.37). Se este intervalo de tempo for superior a 5 minutos, deve-se averiguar se existem bolhas de ar no interior do material geossintético e repetir o procedimento. A perda de carga é avaliada através da observação do nível de água existente nos tubos de acrílico que se encontram ligados aos dois tubos piezométricos já referidos.

O ensaio começa com a avaliação da velocidade da água para a perda de carga máxima induzida no regime de escoamento passando, sucessivamente, para valores inferiores, como 80%, 60%, 40% e 20% do valor máximo definido inicialmente. No LGS, procede-se à caracterização do escoamento para perdas de carga hidráulica de 70mm, 56mm, 42mm, 28mm e 14mm (Figura 3.38). Os regimes de escoamento da água, com a imposição das

perdas de carga referidas, são controlados através da manipulação das válvulas representadas na Figura 3.33.



a)



b)

Figura 3.37 - Teste inicial: a) Perda de carga de 50mm; b) Igualdade nas cargas hidráulicas.



Figura 3.38 - Perda de carga máxima (70mm).

Em cada fase do ensaio, isto é, para cada nível de perda de carga, é necessário que o regime de escoamento permaneça estável durante, pelo menos, 30 segundos. Após a garantia da estabilidade do escoamento, procede-se à recolha da água que passa através do provete, num determinado período (Figura 3.39). Segundo a NP EN ISO 11058 (2003), o volume mínimo de água recolhido para cada leitura deve ser de 1 litro e o tempo de recolha não deve ser inferior a 30 segundos.



a)



b)

Figura 3.39 - Quantificação da água passada através do provete:
a) Recolha de água; b) Pesagem.

No LGS, avalia-se a massa de água recolhida, em gramas, e o tempo de recolha, em segundos sendo, também, necessária a medição da temperatura da água, em °C. Estes valores são registados num documento digital, em formato Excel, em tabelas como a que se apresenta no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 -Tabela a preencher no decorrer do ensaio de cada provete.

	Perda de carga (mm)	Massa de água recolhida (g)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Factor correctivo R_T	Velocidade V_{20} (mm/s)
PROVETE 1	70					
	56					
	42					
	28					
	14					

O documento Excel tem células que permitem o cálculo automático de algumas grandezas. Com efeito, o valor da Velocidade V_{20} , é calculado automaticamente de acordo com a Expressão (3.16) devidamente adaptada para

$$V_{20} = \frac{M \cdot R_T}{S \cdot t} \cdot 1000 \quad (3.24)$$

em que M é a massa da água recolhida (g) e S tem o valor de 5.674 mm^2 . A expressão vem afectada do factor 1.000 para que o valor da velocidade resulte em mm/s.

O factor correctivo da temperatura, R_T , é calculado com o recurso à seguinte expressão:

$$R_T = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (3.25)$$

na qual, T é o valor da temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Com os resultados obtidos, o documento Excel elabora uma representação gráfica como a da Figura 3.19, anteriormente apresentada.

No entanto, o objectivo deste procedimento laboratorial é a determinação do índice de velocidade VI_{H50} , isto é, a velocidade do escoamento para uma perda de carga de 50mm. Para isso, é necessário ajustar, aos pares ordenados (velocidade; perda de carga), uma curva polinomial de 2.º grau que passe na origem. De novo, esse trabalho pode ser executado pelo documento Excel, conforme está exemplificado na Figura 3.40. Assim, a partir da equação quadrática, procedendo à substituição de valores, é possível encontrar o valor de V_{20} correspondente à perda de carga de 50mm.

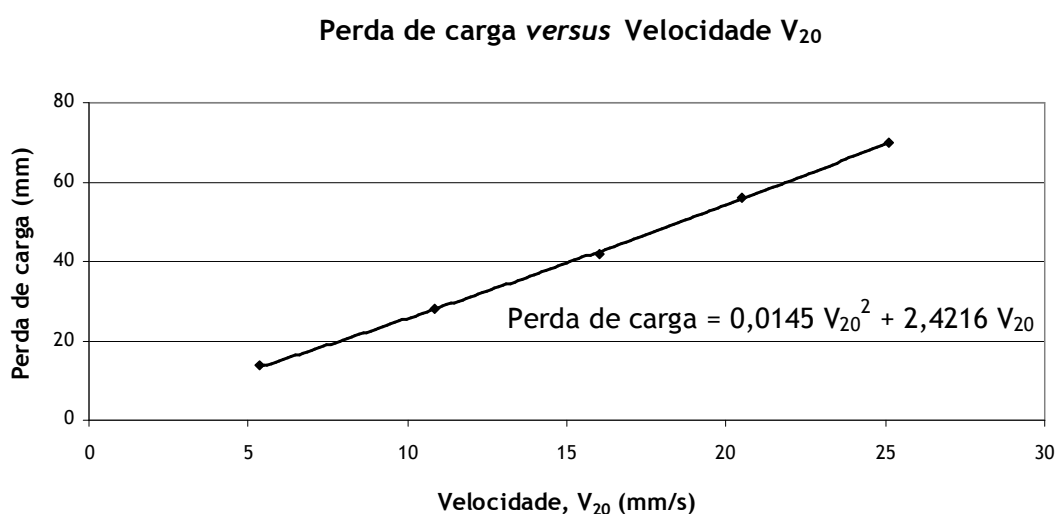


Figura 3.40 - Curva quadrática ajustada aos resultados obtidos.

O conjunto de operações descrito nos parágrafos anteriores é repetido para a totalidade dos 5 provetes obtendo-se, no final, um conjunto de valores susceptíveis de serem representados graficamente como os que constam na Figura 3.41.

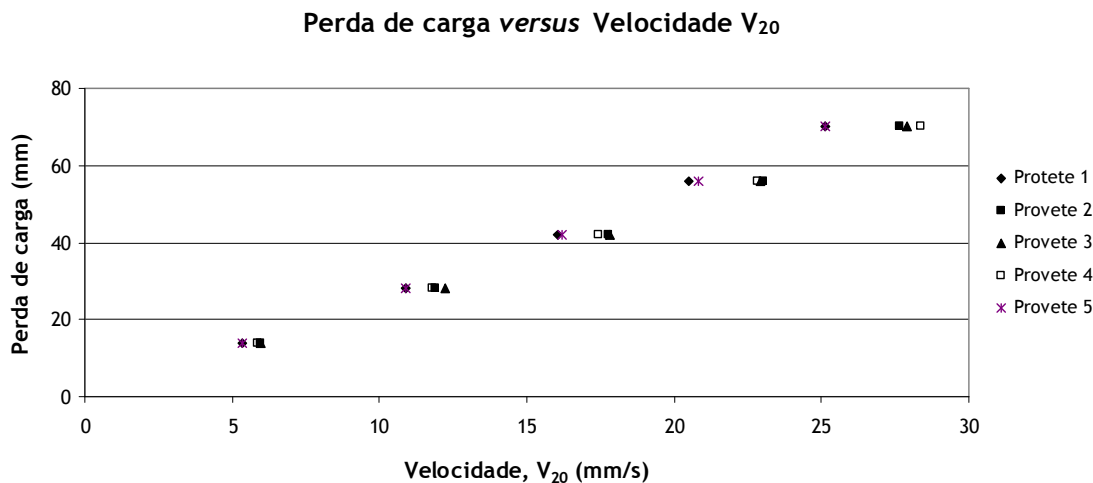


Figura 3.41 - Relação V_{20} - perda de carga para um ensaio (série de 5 provetes).

Em seguida, é necessário ajustar uma curva quadrática a cada conjunto de valores obtido para cada um dos provetes. Deste modo, é possível determinar o índice de velocidade $V_{I_{H50}}$ para cada um dos provetes e, por fim, determinar o valor médio e os respectivos parâmetros estatísticos de desvio-padrão e coeficiente de variação.

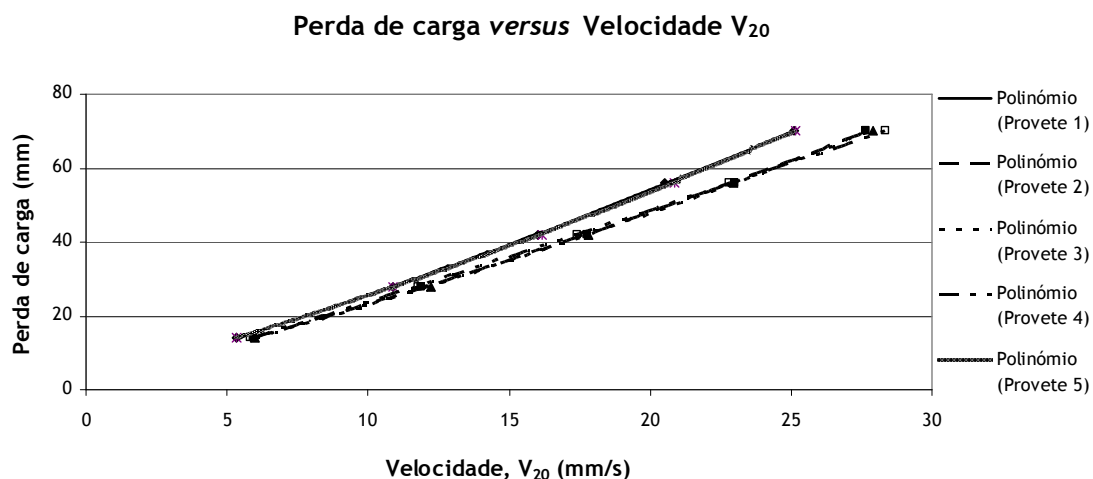
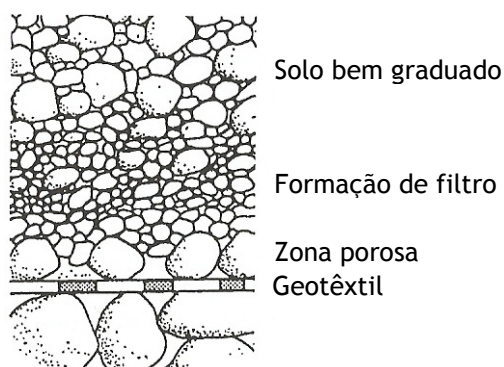


Figura 3.42 - Curvas quadráticas ajustadas aos resultados obtidos num ensaio (série de 5 provetes).

3.5 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA DDI NA FUNÇÃO DE FILTRAGEM

Quando um geotêxtil é colocado em contacto com um solo, de modo a exercer a função de filtragem e/ou separação, surge uma descontinuidade entre a estrutura da camada de solo e a do próprio geossintético. Este facto permite que parte das partículas do solo tendam a migrar para e através do geotêxtil devido à percolação dos fluidos. Para que o geotêxtil realize de forma cabal a sua função como filtro, é necessário que se estabeleça, tão cedo quanto possível, um equilíbrio na interface solo/geossintético, por forma a que a migração das partículas não ocorra indefinidamente. Normalmente, o intervalo de tempo necessário para o estabelecimento dessa situação de equilíbrio varia de entre dois a quatro meses (Shukla, 2002).

O equilíbrio que se referiu no parágrafo anterior caracteriza-se pela estratificação da camada de solo imediatamente subjacente à manta de geotêxtil. Este processo depende das características do solo e do regime de percolação, assim como do tamanho e da distribuição dos poros do geotêxtil. Note-se que esta estratificação é diferente consoante se utilizam solos com partículas de dimensão uniforme, solos finos ou solos com uma granulometria extensa sendo, o último caso, a situação ideal. No caso de o solo ser bem graduado, estabelecem-se três zonas distintas: uma, de solo que não sofreu alteração na sua composição e estrutura, outra, de solo que funciona como filtro e, por fim, uma camada mais porosa, junto da folha de geotêxtil. A zona de solo que funciona como filtro caracteriza-se por apresentar, na sua composição, maior concentração de partículas finas com o aumento da distância ao geotêxtil. Na Figura 3.43 está patente um esquema que ilustra a descrição anterior.



*Figura 3.43 - Filtro na interface solo-geotêxtil
(adaptado de Ingold, 1994).*

Shukla (2002) refere que, uma vez estabelecido o equilíbrio, é o próprio solo que funciona como sistema de filtragem. Resta, por isso, para o geotêxtil, o papel de garantir que a estrutura adquirida pelo solo se mantenha inalterada.

3.5.1 - DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE FILTRAGEM COM GEOTÊXTEIS

O dimensionamento de um filtro com o recurso a materiais geossintéticos tem em conta, sempre, um conjunto de considerações que se podem agrupar em três tipos distintos: as que se prendem com os requisitos de dimensionamento, propriamente ditos; as que estão relacionadas com a resistência dos materiais geossintéticos à danificação que lhes pode ser infligida; e, por último, as que se referem à durabilidade dos geossintéticos.

No que concerne aos critérios e requisitos de dimensionamento dos geossintéticos para o desempenho da função de filtragem, há dois aspectos fundamentais a considerar: a permeabilidade e a porosidade dos materiais. A permeabilidade deve ser tal que permita a passagem dos fluidos que percolam no solo enquanto que a porosidade deve favorecer a retenção de partículas provenientes do mesmo. Assim, num processo de dimensionamento de um filtro, é necessário respeitar uma série de critérios de modo a que a escolha final do material conduza ao seu correcto desempenho.

Em primeiro lugar, pode-se mencionar o critério de permeabilidade, relativo ao facto de o geotêxtil dever permitir o fácil escoamento dos fluidos, como já foi citado. Em seguida, pode-se referir a capacidade que o material deve ter para prevenir o arrastamento de partículas do solo, facto que se traduz no critério de retenção. Por fim, existe o critério de colmatação, relativo ao efeito de deposição de partículas sólidas no próprio interior do geossintético.

De notar que o critério de permeabilidade impõe um limite inferior nas características de porosidade de um geotêxtil, nomeadamente, no tamanho dos poros, ao passo que, com o critério de retenção é imposto um limite superior para o tamanho das aberturas. Estes dois critérios são, aparentemente, contraditórios. O correcto dimensionamento passa, portanto, pelo estabelecimento de um compromisso entre estas exigências antagónicas.

Os critérios de dimensionamento utilizados actualmente foram desenvolvidos por diversos autores que se basearam nos processos de dimensionamento de filtros constituídos por materiais granulares. O procedimento habitual de dimensionamento passa pela comparação da permeabilidade do solo com a dos geotêxteis tendo em conta um

determinado critério de permeabilidade. Do mesmo modo, compara-se a granulometria do solo com a abertura dos poros dos geotêxteis de acordo com um critério de retenção.

Um critério de permeabilidade usualmente aplicado no dimensionamento de filtros com geotêxteis é o seguinte (Shukla, 2002):

$$k_n \geq \alpha.k_s \quad (3.26)$$

em que k_n e k_s representam os coeficientes de permeabilidade do geotêxtil e do solo, respectivamente, sendo α uma constante que pode assumir valores entre 0,1 e 100.

Shukla (2002) refere dois exemplos em que foi utilizado este critério: um, em que foi aplicado um valor de 10 para a constante α , num caso em que se verificou que a colmatção do geossintético causava a diminuição da permeabilidade em cerca de uma ordem de grandeza; outro, em que α tomou o valor de 0,1, tendo-se assumido que um geotêxtil com 10% da permeabilidade do solo ainda possuía maior capacidade de escoamento do que o próprio solo.

No que diz respeito ao critério de retenção, de uma forma muito sucinta, este pode ser expresso da seguinte forma (Shukla, 2002):

$$O_i \leq \beta.D_j \quad (3.27)$$

onde β é um parâmetro adimensional associado ao tipo/uniformidade do solo, O_i diz respeito à abertura dos poros dos geotêxteis e D_j é relativo à dimensão das partículas do solo. As gamas de valores de 1 a 6, de 1 a 3 e de 1 a 2 são típicas para as relações O_{95}/D_{50} , O_{95}/D_{85} e O_{90}/D_{90} , respectivamente (Shukla, 2002).

O critério de colmatção pode ser utilizado nos casos em que se proceda à realização de ensaios como o que foi desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers. Na verdade, dividindo o gradiente hidráulico verificado nos 25mm inferiores de solo (e geotêxtil) pelo gradiente estabelecido nos 50mm de solo sobrejacente, o resultado deve ser igual ou inferior a 3,0 para que este critério seja respeitado.

3.5.2 - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA DDI

Para que o material dimensionado de acordo com os critérios apresentados no ponto anterior tenha um desempenho que vá de encontro ao esperado, é necessário que consiga resistir a determinados tipos de acções. Com efeito, se a vida útil do material terminar antes do que foi previsto em projecto, a partir desse momento, ele deixa de cumprir a finalidade para que foi idealizado. Assim, é necessário que os geotêxteis apresentem características de durabilidade em conformidade com as especificidades e com os tempos de vida das obras em que forem integrados. Além disso, estes materiais devem ser suficientemente robustos para sobreviver a possíveis danificações induzidas durante o período de aplicação em obra. Para isso, é necessário que apresentem características mecânicas capazes de lhes proporcionar resistência às acções de danificação provocadas pela deposição de materiais e pela passagem de equipamentos pesados sobre as mantas de geotêxteis, pelo inadequado manuseamento destas, *etc.*

Existem várias formas para mitigar os efeitos da danificação durante a instalação. Na verdade, se forem escolhidos processos construtivos menos violentos, se for utilizado material granular com melhores características, se houver sensibilidade por parte dos operadores e se forem seleccionados materiais mais robustos, há maior garantia de que os efeitos da danificação se farão sentir em menor grau.

Apesar disso, conforme se referiu no Capítulo 2, a ocorrência de danos nos geossintéticos, durante a fase de construção, é inevitável. No caso específico da utilização de materiais como filtros, o aparecimento de aberturas e de perfurações e, mesmo, a deposição de materiais finos sobre a superfície dos geotêxteis, podem alterar a dimensão dos poros e as propriedades hidráulicas de permeabilidade.

Estes aspectos têm sido estudados por diversos autores e comissões, de modo a serem considerados nos processos de dimensionamento de filtros com materiais geotêxteis. Foram produzidas especificações como a M288-06-UL (2006), elaborada pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), que neste caso particular, tem em linha de conta as propriedades físicas dos geotêxteis, a granulometria do material de aterro e a severidade das condições de instalação dos materiais em obra. Com este documento é possível, mediante uma classificação ditada por aqueles dois aspectos, definir as características que o geotêxtil a usar deve possuir no que diz respeito, por exemplo, à resistência à tracção, ao rasgamento e ao punçoamento, assim como no que concerne à permissividade e à dimensão dos poros. No entanto, a concepção desta

especificação assenta num conhecimento empírico, baseado na análise de um conjunto de casos bem sucedidos, em que os materiais desempenharam bem o seu papel de filtro.

De modo semelhante, na Alemanha, foi produzida uma especificação para auxiliar os projectistas na selecção de materiais a serem utilizados como filtros. No caso deste sistema de classificação a finalidade é definir a classe de robustez do geotêxtil em conformidade com o tipo de material a usar, com as características dos materiais de aterro e com as condições de aplicação em obra.

Além da produção deste tipo de documentos, têm sido desenvolvidos estudos experimentais que atestam a necessidade e a pertinência da avaliação dos efeitos da danificação induzida sobre os materiais, particularmente no que se refere às propriedades hidráulicas. Na realidade, os estudos experimentais sobre os efeitos da danificação mecânica permitem a observação das alterações produzidas nos geossintéticos que, inevitavelmente, modificam as suas características de índole hidráulica. Neste ponto, refira-se a aplicação dos critérios de dimensionamento para filtros, expostos atrás, e a alteração que o material geossintético sofre devido à danificação. De facto, as características que servem de base para o dimensionamento, como a abertura dos poros e a permeabilidade, vêem-se modificadas pelos processos de danificação mecânica. Basta pensar, por exemplo, no aumento do tamanho dos poros e na alteração da permeabilidade de um geotêxtil causados pelo aparecimento de perfurações. Do mesmo modo, pense-se na alteração da permeabilidade de um geotêxtil provocada pela deposição e inclusão de partículas sólidas na matriz do material.

Em resumo, poder-se-ia afirmar que se está perante duas formas distintas de abordar o problema. Por um lado, pode-se actuar respeitando um determinado conjunto de requisitos mínimos para a resistência dos materiais, de modo a cumprirem a sua função, apesar dos eventuais danos sofridos durante a sua instalação em obra. De modo distinto, pode-se partir do dimensionamento de material intacto e avaliar de que modo as suas características hidráulicas se vêem afectadas pelo processo de danificação mecânica. Esta segunda via, experimental, seguida neste trabalho, é importante para o apuramento das informações encontradas na primeira, de utilização de recomendações e especificações.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PAPEL DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS

4.1 - INTRODUÇÃO

O efeito da danificação durante a instalação (DDI) nas propriedades mecânicas dos geossintéticos tem sido um tema investigado por diversos autores (nomeadamente, Paula (2003) e Pinho-Lopes (2004)). Porém, para além das propriedades mecânicas dos geossintéticos a DDI pode afectar outras propriedades, em particular as propriedades hidráulicas.

Ao contrário do que tem vindo a acontecer em relação às propriedades mecânicas dos geossintéticos, o efeito da DDI nas propriedades hidráulicas destes materiais tem sido alvo de relativamente pouco estudo. Por isso, considerou-se do maior interesse desenvolver investigação no sentido de avaliar a influência da DDI nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos, nomeadamente, na permeabilidade normal ao plano.

De referir que nem todos os geossintéticos podem exercer funções hidráulicas, isto é, de filtragem e drenagem e que a permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos é uma

das propriedades mais relevantes para os materiais a serem utilizados como filtros. A função de filtragem é desempenhada, apenas, por geotêxteis e, na maioria dos casos, por geotêxteis não tecidos. Por este motivo, optou-se por, neste trabalho, considerar apenas este tipo de materiais.

Ao longo do estudo avalia-se a variação da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis intactos e danificados durante a instalação simulada laboratorialmente. Procura-se, ainda, avaliar a influência de algumas características dos geotêxteis no comportamento em estudo, nomeadamente: da massa por unidade de área (MUA); da espessura e do processo de fabrico.

O papel do material granular de confinamento usado nos ensaios de DDI na alteração do valor da permeabilidade normal dos geotêxteis é, também, estudado.

4.2 - MATERIAIS UTILIZADOS

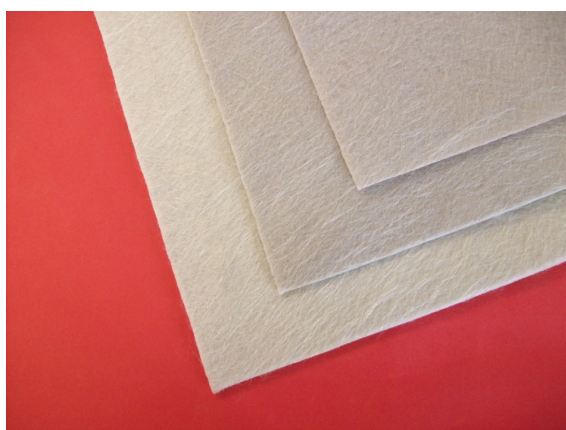
4.2.1 - GEOTÊXTEIS

Ao longo do estudo foram utilizados cinco geotêxteis não tecidos, fabricados com fibras de polipropileno (PP), com diferentes características no que concerne ao processo de fabrico, à MUA, à espessura e à resistência à tracção e correspondente deformação na rotura. Com vista à avaliação da influência do processo de fabrico seleccionaram-se três geotêxteis produzidos através de ligação mecânica das fibras de polipropileno (agulhados) e dois fabricados com o recurso a ligação térmica (termossoldados).

Foram escolhidos dois geotêxteis não tecidos agulhados com diferentes valores de espessura e de MUA (designados por GT1a e GT2a). Os valores da MUA dos dois geotêxteis não tecidos termossoldados, designados neste trabalho por GT1ts e GT2ts, eram semelhantes aos valores do mesmo parâmetro do GT1a e do GT2a, respectivamente. Por fim, escolheu-se um geotêxtil não tecido agulhado de elevada espessura e MUA (GT3a). Nas Figuras 4.1 e 4.2 podem ser observadas imagens dos materiais seleccionados.

Nos ensaios de caracterização dos geotêxteis seleccionados foram usados todos os procedimentos previstos e descritos na normalização em vigor. Assim, a avaliação da espessura foi feita de acordo com a norma NP EN ISO 9863-1: 2006 “Geossintéticos. Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples”, ao

passo que a determinação da MUA foi definida com base na norma NP EN ISO 9864: 2006 “Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados”. A avaliação da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis seguiu a norma NP EN ISO 11058 (2003), cuja metodologia está resumidamente descrita no ponto 4 do Capítulo 3. A determinação da resistência à tracção e do valor da deformação para a força máxima foi feita de acordo com a norma NP EN 29073-3: 1993 “Têxteis - Métodos de ensaio para tecidos não tecidos. Parte 3: Determinação da resistência à tracção e do alongamento” e não com base na norma NP EN ISO 10319 (2005), como é corrente. Esta opção deveu-se ao facto de o valor da resistência à tracção do GT3a, definido de acordo com o método da tira larga, ultrapassar os limites de fiabilidade do equipamento laboratorial disponível, o que impediria uma análise comparativa fiável do comportamento dos geotêxteis.

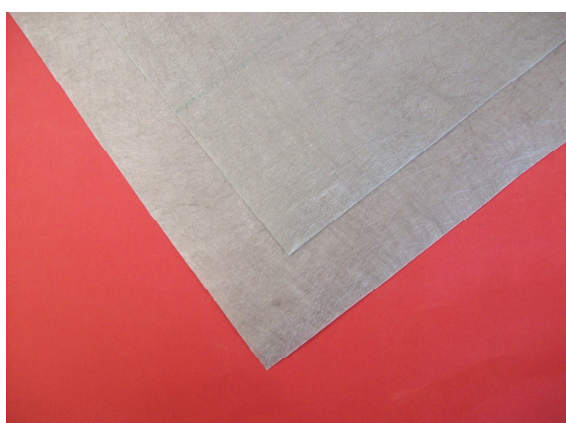


a)

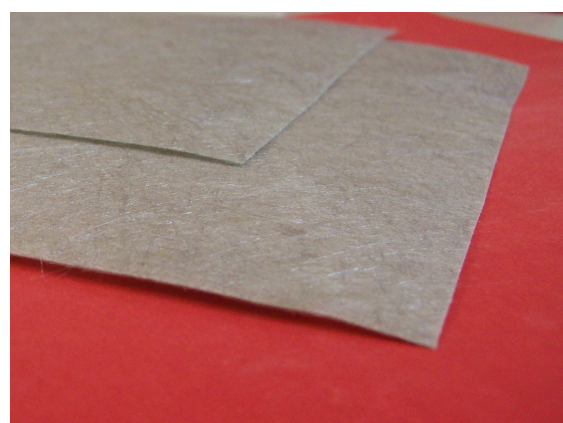


b)

Figura 4.1- Geotêxteis não tecidos agulhados: a) e b) GT1a, GT2a e GT3a, de cima para baixo.



a)



b)

Figura 4.2- Geotêxteis não tecidos termossoldados: a) e b) GT1ts, GT2ts, de cima para baixo.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram imagens dos equipamentos disponíveis no LGS para a medição da espessura e da massa por unidade de área dos geotêxteis, enquanto que o Quadro 4.1 apresenta os valores médios desses parâmetros e os correspondentes desvios-padrão e coeficientes de variação.

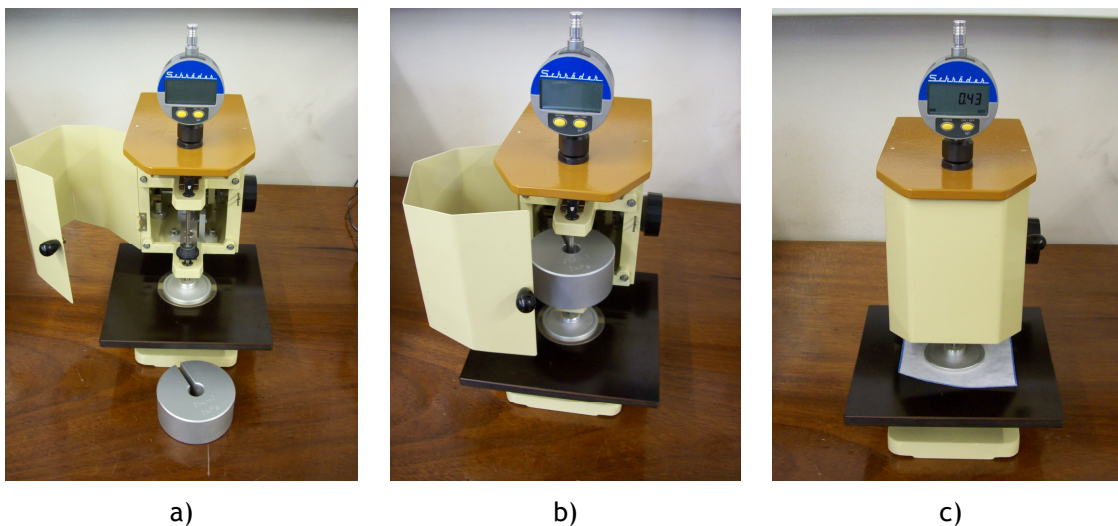


Figura 4.3 - Medição da espessura: a) Equipamento; b) Colocação de peso; c) Ensaio de um provete.



Figura 4.4 - Avaliação da massa por unidade de área.

Quadro 4.1 - Valores da espessura e da massa por unidade de área dos geotêxteis.

Geotêxteis não tecidos em PP		Espessura			Massa por unidade de área		
		Média (mm)	Desvio- -padrão (mm)	Coefficiente de variação (%)	Média (g/m ²)	Desvio- -padrão (g/m ²)	Coefficiente de variação (%)
Aglilhado	GT1a	1,77	0,20	11,4	187	27,5	14,7
	GT2a	2,55	0,25	9,65	286	22,9	8,0
	GT3a	6,23	0,34	5,53	729	28,3	3,9
Termossoldado	GT1ts	0,58	0,03	4,84	192	7,2	3,7
	GT2ts	0,75	0,03	3,38	300	17,2	5,7

No Quadro 4.2 encontram-se os valores médios da resistência à tracção e da extensão para a força máxima (na direcção de fabrico), bem como da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis em análise.

Quadro 4.2 - Valores médios da resistência à tracção, da extensão para a força máxima e da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis.

Geotêxteis não tecidos em PP		Tracção-extensão		Permeabilidade normal ao plano
		Força máxima (kN/m)	Extensão para a força máxima (%)	VI _{H50} (mm/s)
Aglilhado	GT1a	17,189	77,67	97,86
	GT2a	19,965	80,75	75,71
	GT3a	52,363	103,65	19,92
Termossoldado	GT1ts	9,555	27,92	25,03
	GT2ts	16,947	30,74	15,11

As Figuras 4.5 a 4.7 mostram as curvas força-extensão, respectivamente, dos geotêxteis agulhados, GT1a e GT2a, dos geotêxteis termossoldados, GT1ts e GT2ts, e do geotêxtil agulhado GT3a.

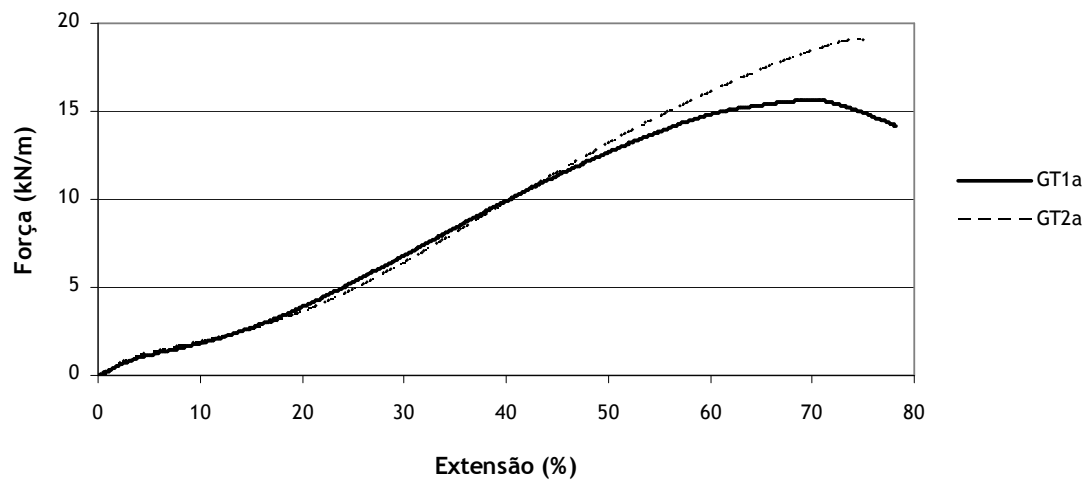


Figura 4.5 - Curvas força-extensão dos geotêxteis GT1a e GT2a.

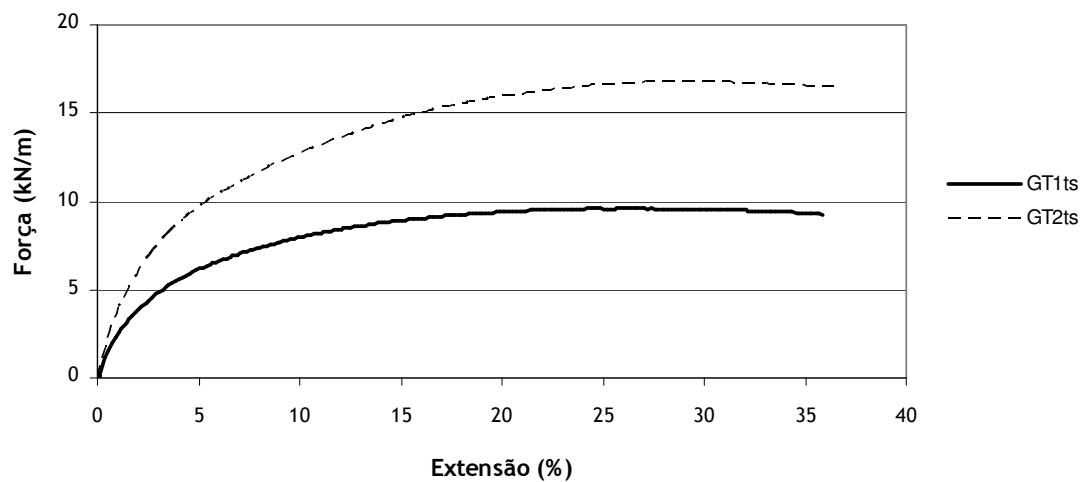


Figura 4.6 - Curvas força-extensão dos geotêxteis GT1ts e GT2ts.

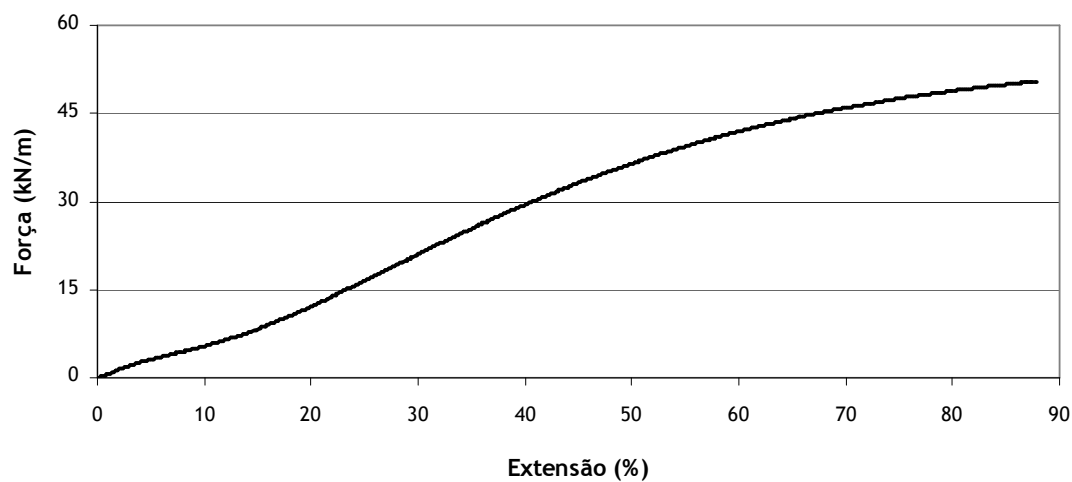


Figura 4.7 - Curva força-extensão do geotêxtil GT3a.

De referir que os valores das propriedades dos geotêxteis definidas ao longo de 4.2.1 correspondem aos valores dessas propriedades para os materiais intactos.

4.2.2 - MATERIAIS GRANULARES

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação (DDI) dos geossintéticos exige o confinamento destes materiais com solos. De acordo com a norma EN ISO 10722 (2007) o material confinante designa-se por *Corundum* (Figura 2.9) e é um agregado sintético de óxido de alumínio. Porém, sendo este um material sintético, a tentativa de aproximação à realidade tem levado alguns autores a utilizar materiais granulares naturais nos ensaios laboratoriais de danificação. Por exemplo, Paula (2003) usou no seu estudo dois tipos de materiais granulares, uma brita granítica e uma brita calcária, materiais estes muitas vezes utilizados em obras de terra.

No presente estudo, para além do *Corundum*, foram considerados dois materiais granulares naturais de confinamento com características semelhantes aos dos usados por Paula (2003), nomeadamente no que se refere à natureza e às dimensões máximas e mínimas das partículas.

Assim, consideraram-se dois tipos de britas - uma granítica (Figura 4.8a) e uma calcária (Figura 4.8b) - com dimensões de partículas entre os 5 mm (dimensão mínima) e os 10 mm (dimensão máxima).

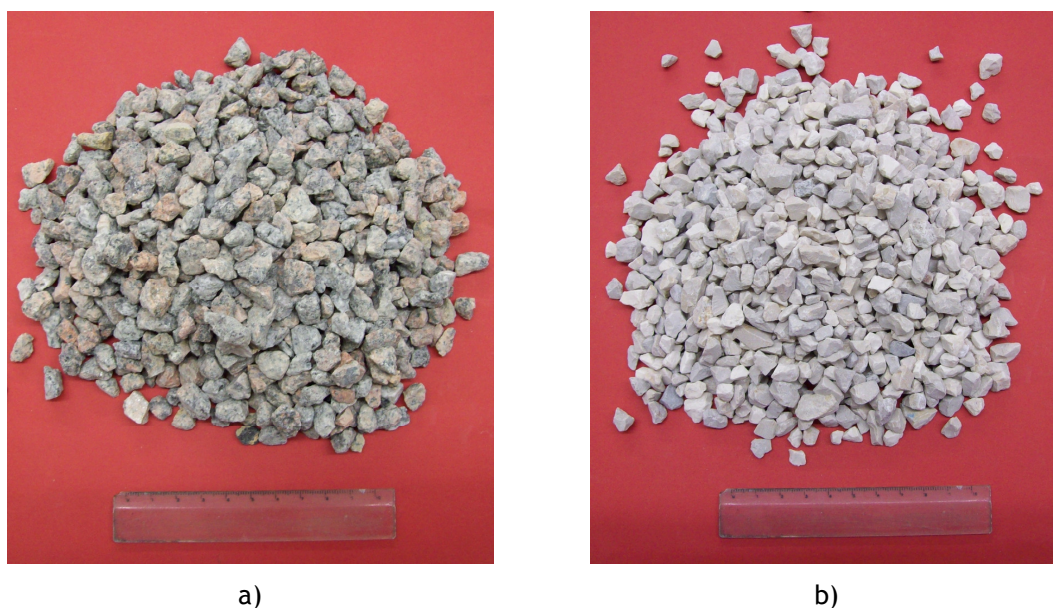


Figura 4.8 - Materiais granulares utilizados: a) Brita granítica; b) Brita calcária.

Para manter a uniformidade nos procedimentos e nos critérios, cada um dos materiais granulares era peneirado no peneiro de abertura de 5mm após cada cinco utilizações, sendo rejeitada a fracção de partículas passadas durante essa operação. Todos os materiais eram rejeitados após cada série de vinte e cinco utilizações, conforme indicado na norma EN ISO 10722 (2007).

4.3 - PROGRAMA DE ENSAIOS

Como já foi referido em 4.2.1, os materiais intactos (de referência) foram caracterizados através das seguintes propriedades: espessura, MUA, resistência à tracção e extensão para a força máxima (apenas na direcção de fabrico do geotêxtil) e permeabilidade normal ao plano do material.

Em seguida, a danificação durante a instalação foi induzida nos geotêxteis através da realização de ensaios laboratoriais. Por fim, a influência dessa danificação na resistência à tracção e na permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis foi avaliada através da realização de ensaios tracção-extensão e de permeabilidade normal ao plano dos materiais danificados.

A Figura 4.9 resume o programa de ensaios realizado.

A danificação laboratorial dos geotêxteis com *Corundum* foi realizada num número de provetes mais elevado do que a danificação levada a cabo com as britas granítica e calcária, uma vez que no primeiro caso se avaliou o efeito da DDI na resistência à tracção e na permeabilidade normal ao plano. No caso da danificação com os materiais naturais apenas foi estudado o efeito da DDI na permeabilidade normal ao plano.

Note-se que, à partida, poderia parecer de interesse avaliar o papel da DDI na espessura e na massa por unidade de área dos geotêxteis. No entanto, o processo de danificação provoca alterações morfológicas nos provetes e proporciona a inclusão de partículas de material granular na sua estrutura, o que, na maior parte das situações, torna impossível o desenvolvimento do estudo em questão.

Em termos totais, foram realizados 5 ensaios (com 10 provetes cada) de determinação da espessura dos geotêxteis e 5 ensaios (com 10 provetes cada) para avaliação das suas MUA. A danificação laboratorial dos materiais foi efectuada em 100 provetes de geotêxteis. Foram realizados 10 ensaios de tracção-extensão (com 5 provetes cada), 5 com os

geotêxteis intactos e 5 com estes materiais danificados com corundum. Finalmente, efectuaram-se 20 ensaios (com 5 provetes cada) para definição da permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis, 5 com os materiais intactos e 15 com os geotêxteis danificados (5 com *Corundum*, 5 com brita granítica e 5 com brita calcária).

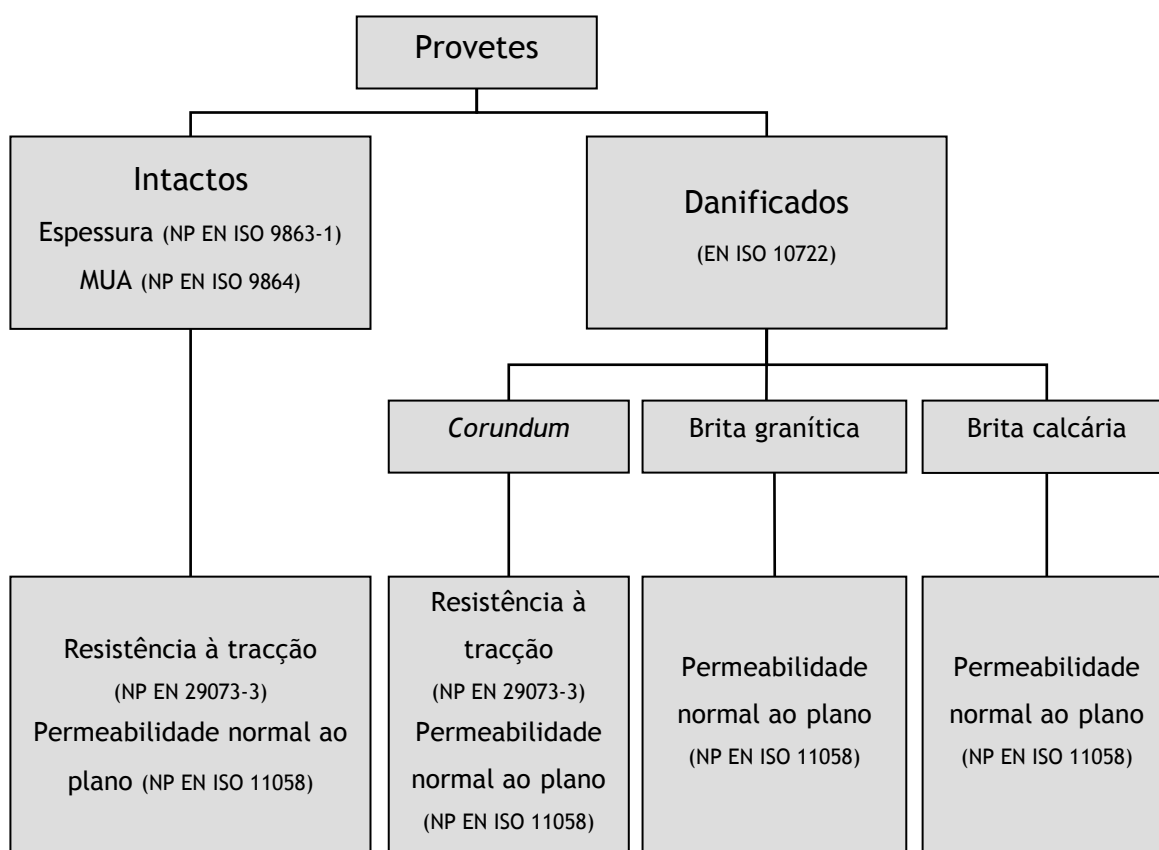


Figura 4.9 - Programa de ensaios.

4.4 - INFLUÊNCIA DA DDI NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS GEOTÊXTEIS

Conforme foi referido anteriormente, o recurso aos ensaios de DDI permite avaliar a modificação no desempenho dos materiais geossintéticos, mediante a quantificação de determinadas propriedades, antes e após a indução de acções de danificação. De entre as propriedades que se podem avaliar encontram-se a resistência à tracção e a extensão para a força máxima.

No presente trabalho a avaliação do efeito da DDI laboratorial na resistência à tracção e na extensão para a força máxima foi levada a cabo nos geotêxteis danificados com *Corundum* como material confinante.

O Quadro 4.3 resume os valores médios da força máxima e da extensão na força máxima dos geotêxteis intactos, bem como os correspondentes desvios-padrão e coeficientes de variação.

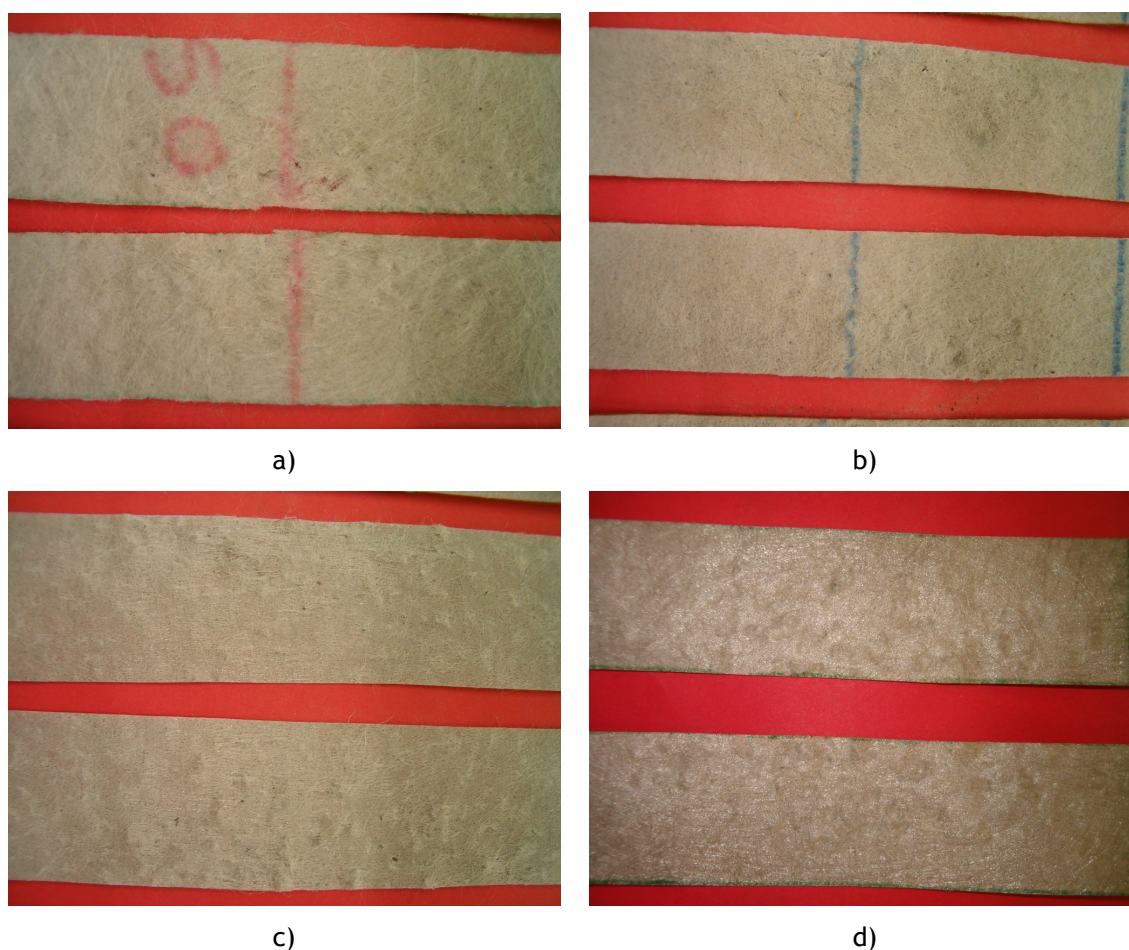
Quadro 4.3 - Resultados dos ensaios tracção - extensão dos geotêxteis intactos.

Geotêxteis não tecidos em PP (intactos)		Força máxima			Extensão na força máxima		
		Média (kN/m)	Desvio- -padrão (kN/m)	Coeficiente de variação (%)	Média (%)	Desvio- -padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
Agulhado	GT1a	17,19	3,61	21,0	77,67	10,53	13,7
	GT2a	19,96	1,79	8,9	80,75	7,85	9,7
	GT3a	52,36	2,77	5,3	103,65	12,68	12,2
Termossoldado	GT1ts	9,56	0,91	9,6	27,92	6,81	24,4
	GT2ts	16,95	2,17	12,8	30,74	5,73	18,7

Com base na informação constante no Quadro 4.3 verifica-se que, embora os geotêxteis GT1a e GT2a tenham MUA semelhantes, respectivamente, às dos geotêxteis GT1ts e GT2ts as forças de tracção máximas são muito díspares, em especial no caso do GT1a e do GT1ts. Esta constatação evidencia a influência que o processo de fabrico dos geotêxteis tem no valor da propriedade em causa.

Outro aspecto relacionado com o processo de fabrico dos geotêxteis que merece referência é a extensão para a força máxima. Com efeito, verifica-se que os geotêxteis termossoldados apresentam, em termos médios, deformabilidade bastante inferior à dos materiais agulhados.

A Figura 4.10 mostra o aspecto dos geotêxteis após a danificação com *Corundum* e o Quadro 4.4 resume os valores médios da força máxima e da extensão na força máxima dos geotêxteis danificados com *Corundum* como material confinante, bem como os correspondentes desvios-padrão e coeficientes de variação.



*Figura 4.10 - Aspecto dos geotêxteis após a DDI com Corundum como material confinante:
a) GT1a; b) GT2a; c) GT1ts; d) Gt2ts.*

A observação das imagens da Figura 4.10 permite verificar que, os materiais que aparecem mais danificados são os que possuem menor MUA, GT1a e GT1ts. De outro modo, se se referir o processo de fabrico, os que apresentam maiores danos são os geotêxteis agulhados, neste caso, GT1a e GT2a.

Com base nos valores indicados nos Quadros 4.3 e 4.4 calcula-se a resistência residual para cada um dos geotêxteis ensaiados. A resistência residual exprime-se em percentagem (%) e obtém-se através do quociente entre o valor da resistência à tracção dos materiais intactos (valor de referência) e o valor do mesmo parâmetro dos materiais danificados.

A Figura 4.11 apresenta os valores das resistências residuais dos geotêxteis após danificação durante a instalação.

Quadro 4.4 - Resultados dos ensaios tracção - extensão dos geotêxteis danificados com Corundum.

Geotêxteis não tecidos em PP (danificados com <i>Corundum</i>)		Força máxima			Extensão na força máxima		
		Média (kN/m)	Desvio- -padrão (kN/m)	Coeficiente de variação (%)	Média (%)	Desvio- -padrão (%)	Coeficiente de variação (%)
Aglilhado	GT1a	5,85	2,15	36,8	38,03	5,01	13,2
	GT2a	10,21	1,25	12,2	48,57	7,26	15,0
	GT3a	43,27	2,77	6,4	72,98	9,42	12,9
Termossoldado	GT1ts	4,17	1,08	26,0	6,02	1,19	19,7
	GT2ts	10,00	1,20	11,9	9,41	1,34	14,2

A análise da figura permite concluir que, independentemente do processo de fabrico do geotêxtil, a resistência residual aumenta com o aumento da MUA do material. No que se refere ao processo de fabrico, verifica-se que geotêxteis com MUA semelhante (GT1a e GT1ts, GT2a e GT2ts) apresentam resistência residual maior quando são termossoldados do que quando são agulhados. Estas constatações, de facto, confirmam o que foi dito atrás sobre o nível dos danos observados nas amostras ensaiadas à DDI.

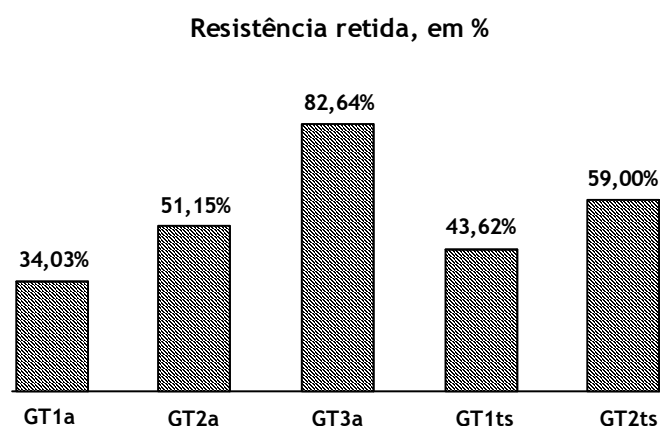


Figura 4.11 - Diagrama representativo da resistência residual dos provetes danificados durante a instalação com Corundum.

Os valores dos coeficientes de variação da resistência à tracção dos geotêxteis intactos e danificados estão ilustrados na Figura 4.12.

Coeficiente de variação da resistência à tracção

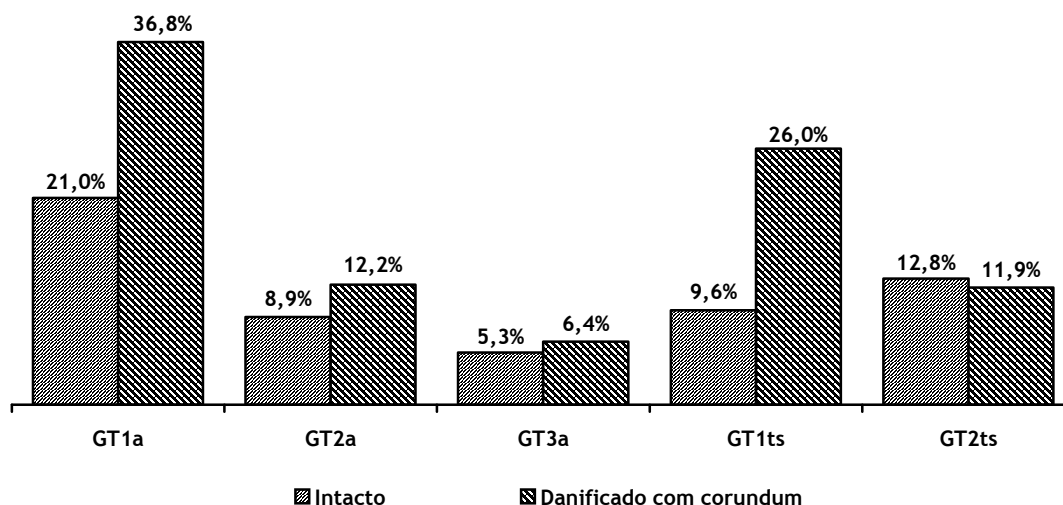


Figura 4.12 - Valores dos coeficientes de variação da resistência à tracção dos geotêxteis intactos e danificados durante a instalação com Corundum.

Verifica-se que os maiores coeficientes de variação, quer para os materiais intactos, quer danificados, ocorre para o geotêxtil agulhado com menor MUA (GT1a). Este facto evidencia a maior variabilidade dos resultados para este material, provavelmente associada à sua heterogeneidade.

Nos geotêxteis com menor MUA (GT1a e GT1ts) observa-se um aumento significativo do coeficiente de variação quando o material está danificado. À medida que aumenta a MUA dos geotêxteis os valores dos coeficientes de variação diminuem, aproximando-se do mesmo valor para o geotêxtil de maior MUA (GT3a) intacto e danificado.

4.5 - INFLUÊNCIA DA DDI NAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS GEOTÊXTEIS

4.5.1 - INTRODUÇÃO

O objectivo fundamental do presente trabalho foi a avaliação da influência da DDI induzida laboratorialmente nas propriedades hidráulicas dos geotêxteis.

Como já foi referido atrás, diversos autores têm vindo a estudar o efeito da DDI nas propriedades mecânicas dos geossintéticos (por exemplo, Paula (2003) e Pinho-Lopes (2004)). A importância dos estudos do papel da DDI nas propriedades dos geossintéticos está associada à inevitabilidade de ocorrência de danificação dos materiais durante os processos de construção e da sua colocação em obra. Por esta razão e no sentido de alargar o âmbito do estudo desta temática optou-se por, neste trabalho, avaliar o efeito da DDI na permeabilidade normal ao plano de geotêxteis, uma vez que esta é uma das propriedades mais relevantes para o exercício adequado da função de filtro por estes materiais.

Tal como já foi dito em 4.3, para o desenvolvimento da investigação avaliou-se a permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis intactos com vista à definição dos valores de referência. Em seguida, os geotêxteis foram danificados em laboratório com três materiais de confinamento: *Corundum*, brita granítica e brita calcária. Por fim, foi avaliada a permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis danificados com cada um dos três materiais de confinamento e definidos os valores residuais da propriedade para cada uma das situações.

4.5.2 - APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

4.5.2.1 - AMOSTRAS INTACTAS

A definição da permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos (índice de velocidade - $V_{I_{H50}}$) é feita a partir dos valores das velocidades V_{20} (em mm/s) para as perdas de carga de: 70mm, 56mm, 42mm, 28mm e 14mm. Definidos os cinco pares ordenados (velocidade V_{20} ; perda de carga), aproxima-se um polinómio de 2.º grau que passe na origem do sistema de eixos, sendo o índice de velocidade ($V_{I_{H50}}$) a velocidade correspondente à perda de carga de 50mm.

As Figuras 4.13 a 4.17 mostram os valores médios das velocidades V_{20} para as perdas de carga de 70mm, 56mm, 42mm, 28mm e 14mm definidos para os geotêxteis intactos GT1a, GT2a, GT3a, GT1ts e GT2ts, respectivamente.

No caso do geotêxtil agulhado com menor MUA, GT1a, os valores médios da permeabilidade normal ao plano do material variam entre 35,42mm/s para a perda de carga de 14mm e 123,88mm/s para a perda de carga de 70mm.

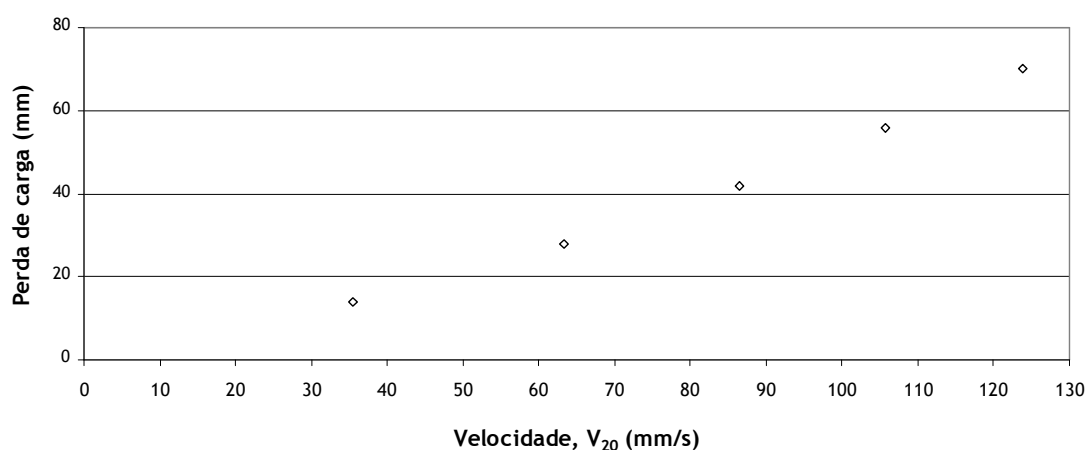


Figura 4.13 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1a intacto.

No que diz respeito ao geotêxtil agulhado com o valor intermédio de MUA, GT2a, os valores médios da velocidade V_{20} oscilam entre o valor mínimo de 26,11mm/s para a perda de carga de 14mm e 95,78mm/s para a perda de carga de 70mm.

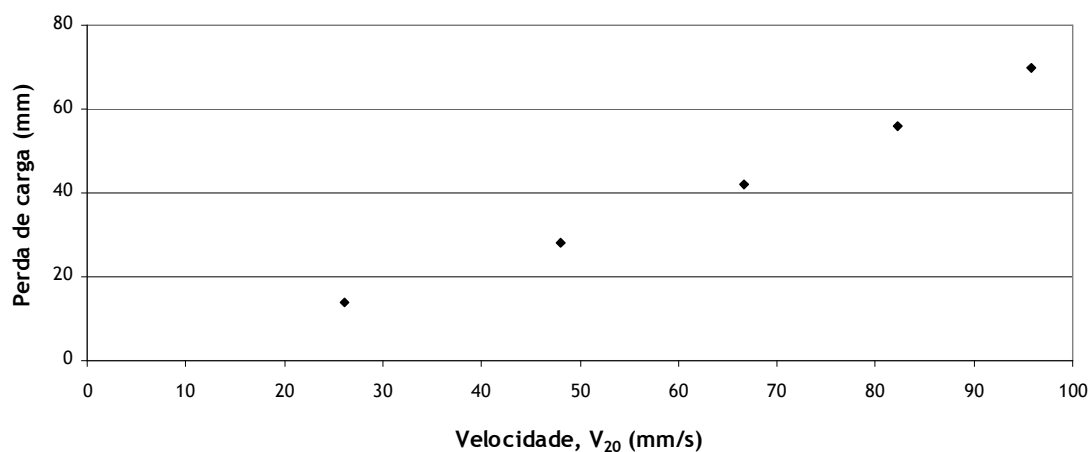


Figura 4.14 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2a intacto.

Já no que concerne ao geotêxtil de maior MUA, GT3a, os valores médios da velocidade V_{20} denotam uma grande diferença no desempenho deste material, no sentido da diminuição da permeabilidade, uma vez que aqueles se encontram entre um valor mínimo de 5,70mm/s para a perda de carga de 14mm e 26,83mm/s para a perda de carga de 70mm.

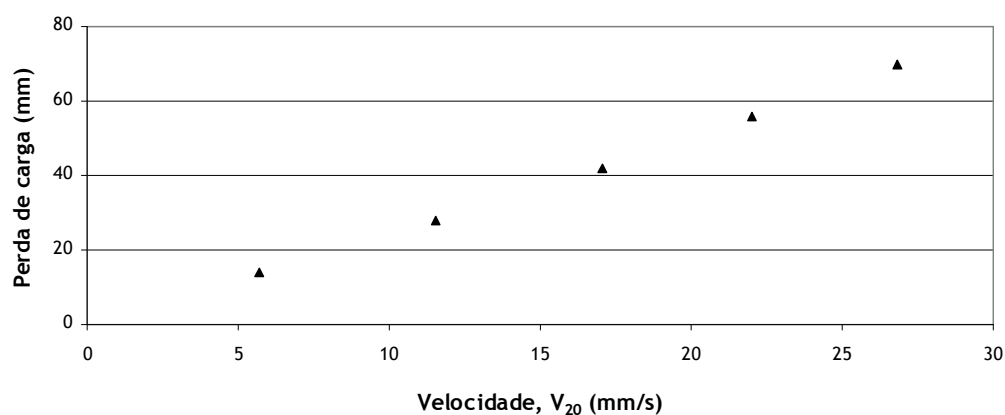


Figura 4.15 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT3a intacto.

Para os materiais termossoldados, volta-se a verificar a diminuição da permeabilidade com o aumento da MUA, tal como no caso dos geotêxteis agulhados. Assim, para o material termossoldado de menor MUA, GT1ts, o valor médio da velocidade V_{20} verificado para a perda de carga de 14mm foi de 8,81mm/s, tendo-se atingido um valor de 32,47mm/s no caso da perda de carga de 70mm.

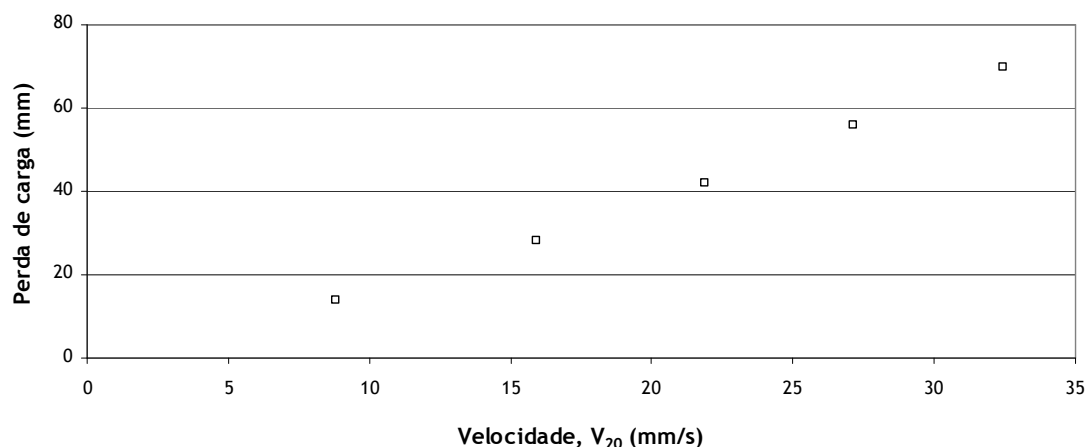


Figura 4.16 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1ts intacto.

Por fim, no caso do material termossoldado com MUA superior, GT2ts, os valores médios da velocidade V_{20} variaram entre 4,70mm/s para a perda de carga de 14mm e 20,19mm/s para a de 70mm.

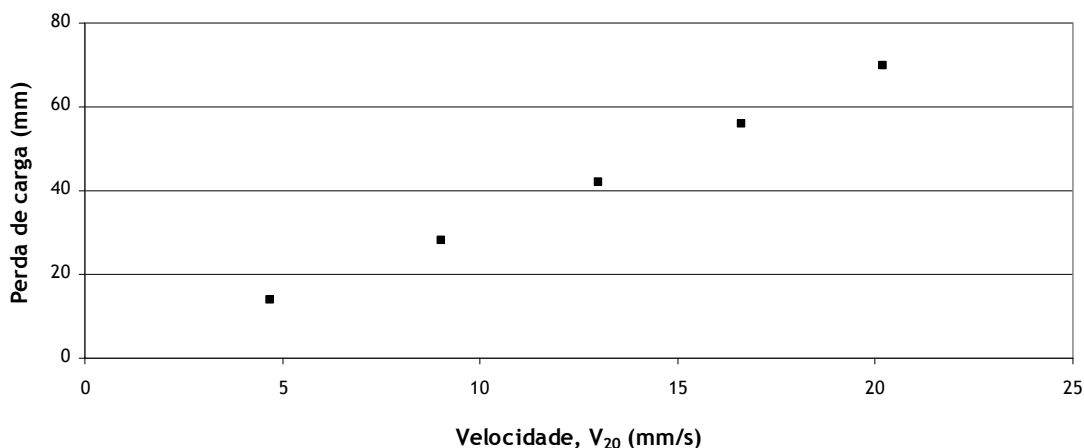


Figura 4.17 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2ts intacto.

De notar que, na prática, o valor de VI_{H50} do material é a média dos valores do parâmetro determinado para cada um dos cinco provetes que constituem um ensaio.

O Quadro 4.5 resume os valores médios do índice de velocidade (VI_{H50}) e correspondentes desvios-padrão e coeficientes de variação determinados para os geotêxteis intactos em estudo.

Quadro 4.5 - Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis intactos.

Geotêxteis não tecidos em PP (intactos)		Permeabilidade normal ao plano		
		Determinação do Índice de velocidade (VI_{H50})		
		Média (mm/s)	Desvio-padrão (mm/s)	Coeficiente de variação (%)
Agulhado	GT1a	97,86	3,66	3,7
	GT2a	75,71	3,80	5,0
	GT3a	19,92	1,07	5,4
Termossoldado	GT1ts	25,03	4,90	19,6
	GT2ts	15,11	1,92	12,7

Com base na informação constante no Quadro 4.5 e na observação das Figuras 4.18 e 4.19 que representam, respectivamente, as relações velocidade média V_{20} - perda de carga para os três geotêxteis agulhados e para os dois geotêxteis termossoldados em estudo,

pode-se concluir que a permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis diminui com o aumento da MUA, isto é, a maior densidade de filamentos conduz a uma maior resistência à passagem da água.

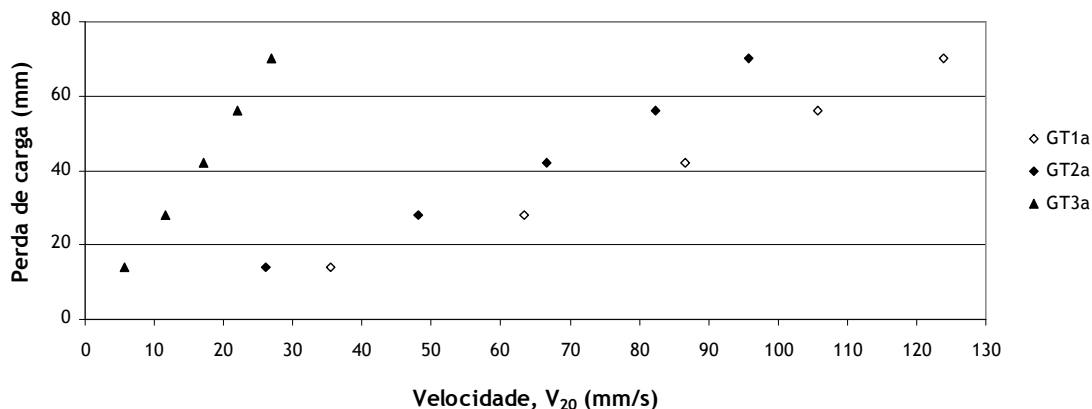


Figura 4.18 - Relação V_{20} - perda de carga para os geotêxteis agulhados intactos.

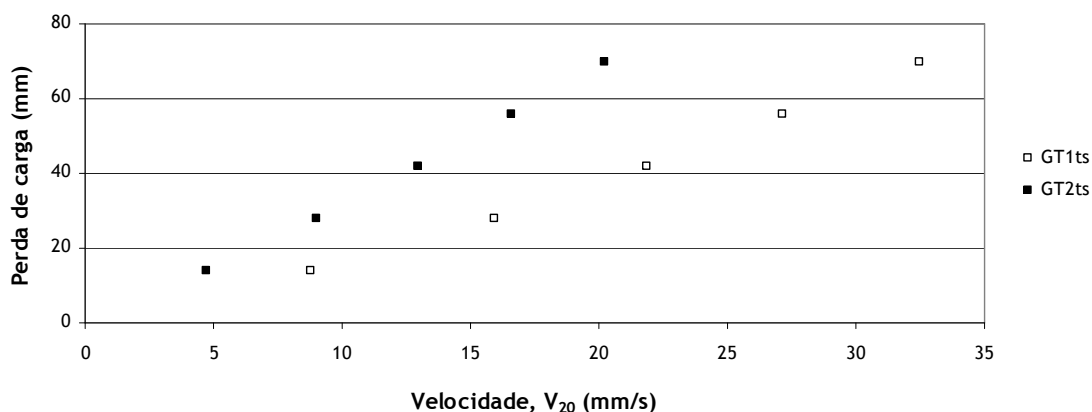


Figura 4.19 - Relação V_{20} - perda de carga para os geotêxteis termossoldados intactos.

No que se refere à influência do processo de fabrico, o Quadro 4.5 e a Figura 4.20, onde se representam as relações velocidade média V_{20} - perda de carga para os geotêxteis agulhados GT1a e GT2a e para os geotêxteis termossoldados GT1ts e GT2ts mostram que, independentemente da MUA dos geotêxteis, os termossoldados apresentam uma permeabilidade normal ao plano muito inferior à dos agulhados, facto que resulta da maior obstrução à passagem da água associada às zonas de ligação dos filamentos por fusão. A diferença entre os valores da permeabilidade acentua-se ainda mais quando se comparam geotêxteis com MUA semelhante (GT1a *versus* GT1ts e GT1ts *versus* GT2ts).

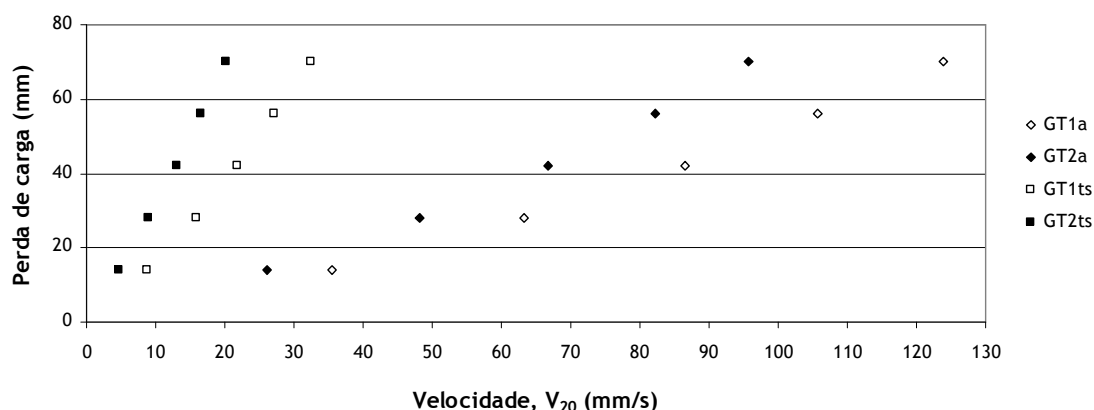


Figura 4.20 - Relação V_{20} - perda de carga para os geotêxteis agulhados (GT1a e GT2a) e termossoldados (GT1ts e Gt2ts) intactos.

4.5.2.2 - AMOSTRAS DANIFICADAS LABORATORIALMENTE

No fim do processo de danificação com material granular confinante a superfície dos geotêxteis apresenta grande quantidade de pequenas partículas resultantes do esmagamento do material confinante durante o ensaio. Porém, com o manuseamento dos provetes e a sua imersão em água (procedimento exigido pela NP EN ISO 11058), as partículas soltas libertam-se da superfície do geotêxtil, restando apenas as mais fortemente incrustadas nessa superfície. Assim, se por um lado seria interessante avaliar até que ponto essa situação real interferiria no valor da permeabilidade normal dos geotêxteis (muito provavelmente diminuindo-a devido à colmatagem dos poros dos geotêxteis pelas partículas sólidas existentes na superfície), por outro, os procedimentos de ensaio seguidos não o permitem. Nesta base, os resultados obtidos no presente estudo deverão ser encarados, à partida, como mais optimistas do que numa situação real.

Os Quadros 4.6 a 4.8 resumem os valores médios do índice de velocidade (VI_{H50}) e correspondentes desvios-padrão e coeficientes de variação determinados, respectivamente, para os geotêxteis danificados laboratorialmente com os seguintes materiais confinantes: *Corundum*, brita granítica e brita calcária.

As Figuras 4.21 a 4.25 apresentam as relações velocidade média V_{20} - perda de carga, respectivamente, para os geotêxteis GT1a, GT2a, Gt3a, GT1ts e GT2ts intactos e danificados com os três materiais granulares confinantes considerados.

Quadro 4.6 - Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis danificados com Corundum.

Geotêxteis não tecidos em PP (danificados com Corundum)		Permeabilidade normal ao plano Determinação do Índice de velocidade (VI_{H50})		
		Média (mm/s)	Desvio-padrão (mm/s)	Coefficiente de variação (%)
Aglilhado	GT1a	81,90	16,08	19,6
	GT2a	54,99	7,49	13,6
	GT3a	17,61	1,13	6,4
Termossoldado	GT1ts	47,00	9,69	20,6
	GT2ts	18,90	4,59	24,3

Quadro 4.7 - Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis danificados com brita granítica.

Geotêxteis não tecidos em PP (danificados com brita granítica)		Permeabilidade normal ao plano Determinação do Índice de velocidade (VI_{H50})		
		Média (mm/s)	Desvio-padrão (mm/s)	Coefficiente de variação (%)
Aglilhado	GT1a	102,67	19,34	18,8
	GT2a	62,77	10,44	16,6
	GT3a	16,71	2,74	16,4
Termossoldado	GT1ts	46,19	8,13	17,6
	GT2ts	19,44	6,75	34,7

Quadro 4.8 - Permeabilidade normal ao plano para os geotêxteis danificados com brita calcária.

Geotêxteis não tecidos em PP (danificados com brita calcária)		Permeabilidade normal ao plano Determinação do Índice de velocidade ($V_{I_{H50}}$)		
		Média (mm/s)	Desvio-padrão (mm/s)	Coefficiente de variação (%)
Agulhado	GT1a	87,26	11,6	13,3
	GT2a	47,61	4,36	9,2
	GT3a	19,99	2,23	11,1
Termossoldado	GT1ts	54,83	7,60	13,9
	GT2ts	18,31	4,62	25,2

A observação da Figura 4.21 permite verificar que o material geotêxtil GT1a viu a sua permeabilidade baixar no caso da DDI realizada com *Corundum* e com brita calcária ao passo que a danificação com brita granítica provocou aumento no valor desta propriedade.

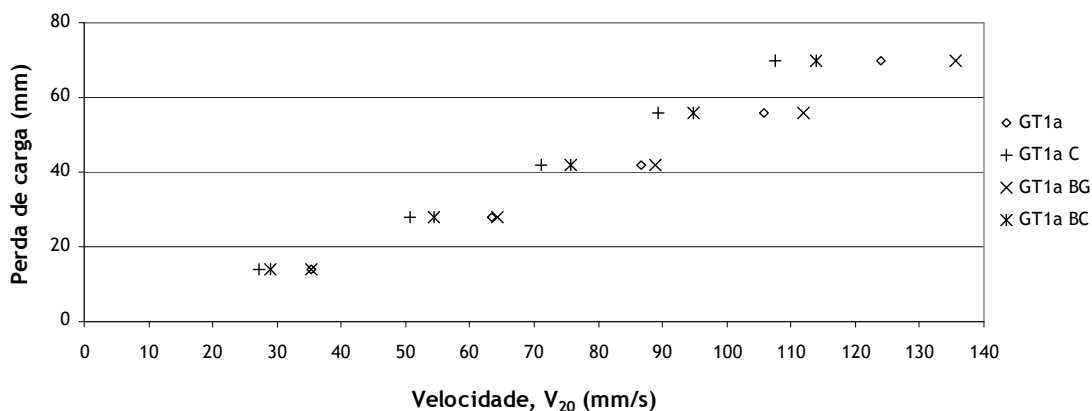


Figura 4.21 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1a intacto e danificado com *Corundum* (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).

No caso do geotêxtil GT2a, todos os processos de DDI conduziram à diminuição da permeabilidade, sendo o caso de maior variação o da danificação com o recurso ao material granular sintético, conforme se pode concluir da observação da Figura 4.22.

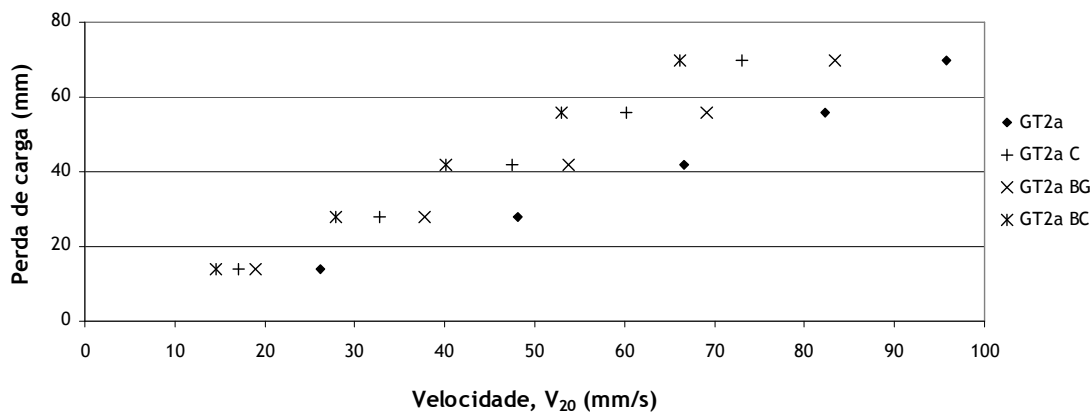


Figura 4.22 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2a intacto e danificado com Corundum (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).

A observação da Figura 4.23 permite verificar que o desempenho do geotêxtil GT3a é bastante mais uniforme do que o dos restantes materiais estudados, no que concerne à permeabilidade normal ao plano. De notar que a DDI com material granular calcário conduz a resultados praticamente coincidentes com os valores de referência. Quanto aos restantes, a DDI provoca, sempre, a diminuição do valor desta propriedade.

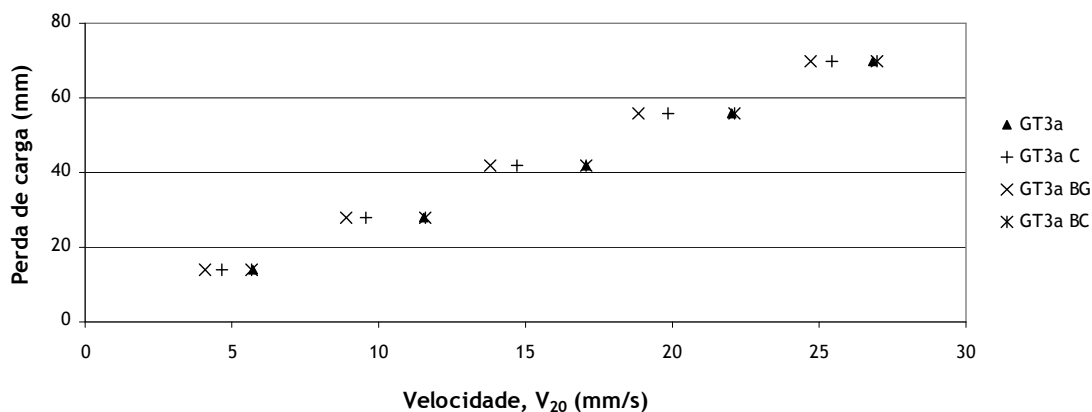


Figura 4.23 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT3a intacto e danificado com Corundum (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).

A Figura 4.24 permite observar a maior variação registada nos valores da permeabilidade para a totalidade dos materiais estudados. Este fenómeno ocorre para o geotêxtil GT1ts, sendo o caso de maior variação o que se refere à DDI com brita calcária. Os restantes dois casos apresentam valores semelhantes entre si, mas bastante afastados dos de referência.

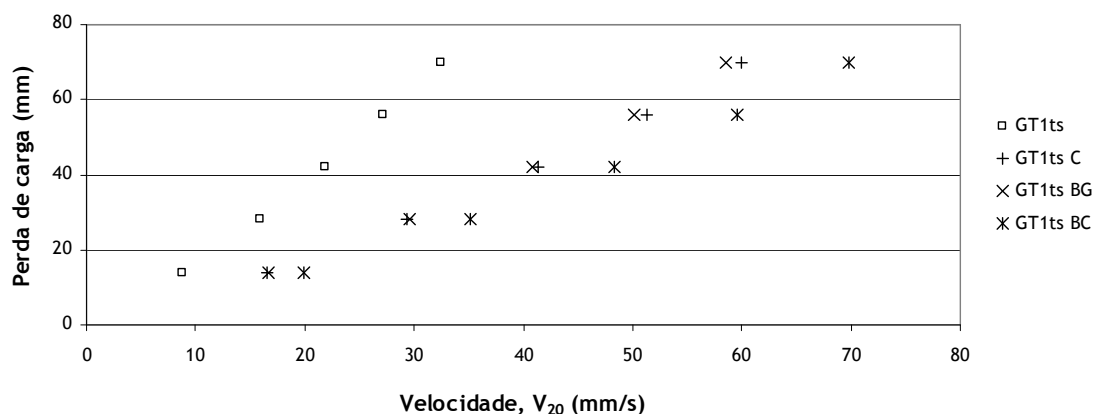


Figura 4.24 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT1ts intacto e danificado com Corundum (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).

No caso do geotêxtil GT2ts, cujos resultados para a permeabilidade podem ser observados na Figura 4.25, também ocorre sempre um aumento da permeabilidade para os materiais sujeitos a DDI, sendo o caso de maior variação o que resultou do ensaio de provetes danificados com brita granítica.

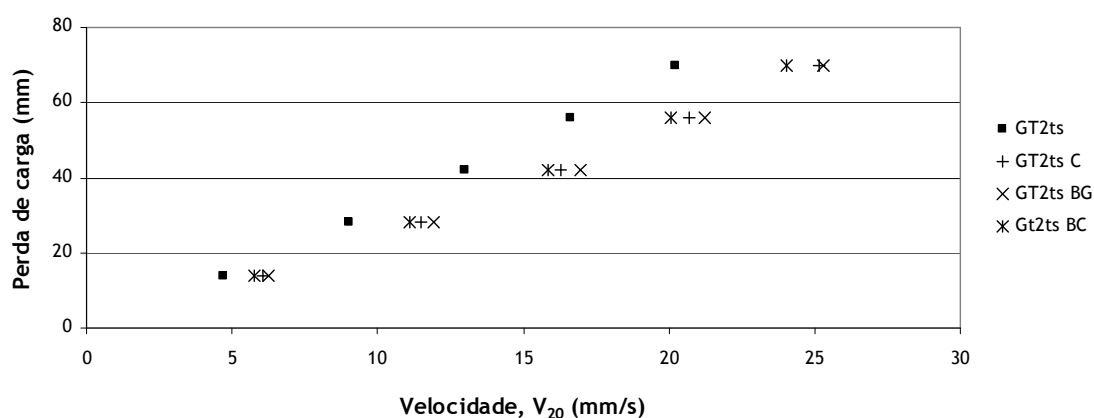


Figura 4.25 - Relação V_{20} - perda de carga para o geotêxtil GT2ts intacto e danificado com Corundum (C), brita granítica (BG) e brita calcária (BC).

4.5.3 - ANÁLISE DE RESULTADOS

No ponto 4.4 deste capítulo foi definido o conceito de resistência residual devido à DDI. Este conceito está associado à acção da DDI nas propriedades mecânicas dos geossintéticos.

No que se refere à influência da DDI na permeabilidade normal dos geossintéticos não tem sentido a mesma designação uma vez que está em causa uma propriedade hidráulica. Porém, optou-se por introduzir um conceito definido com base no mesmo princípio, isto é, o valor resultante (em %) do quociente entre o índice de velocidade do material danificado e o índice de velocidade do material intacto (valor de referência), que se designará por alteração percentual no índice de velocidade VI_{H50} .

No Quadro 4.9 e na Figura 4.26 estão indicados os valores das alterações percentuais no índice de velocidade VI_{H50} , para os geotêxteis estudados nas três situações de danificação consideradas (*Corundum*, brita granítica e brita calcária).

A Figura 4.27 apresenta os mesmos resultados, mas de um modo distinto. Neste caso, calculou-se a diferença entre o valor do índice de velocidade dos materiais danificado e intacto, dividindo essa diferença pelo valor do parâmetro do material intacto. Esta representação facilita a percepção das alterações nos valores da permeabilidade dos geotêxteis devido à danificação, uma vez que os valores situados abaixo da linha correspondente ao valor de referência correspondem a uma redução do parâmetro, enquanto que os valores situados acima da mesma linha indicam um aumento da permeabilidade.

Quadro 4.9 - Alteração percentual no Índice de velocidade VI_{H50} para os geotêxteis danificados.

Geotêxteis não tecidos em PP		Alteração no Índice de velocidade VI_{H50} dos provetes danificados (%)		
		Corundum	Brita granítica	Brita calcária
Aglilhado	GT1a	83,69	104,92 ^(*)	89,17
	GT2a	72,63	82,91	62,88
	GT3a	88,40	83,89	100,35 ^(*)
Termossoldado	GT1ts	187,77 ^(*)	184,54 ^(*)	219,06 ^(*)
	GT2ts	125,08 ^(*)	128,66 ^(*)	121,18 ^(*)

(*) Após a danificação, a grandeza Índice de velocidade VI_{H50} aumentou.

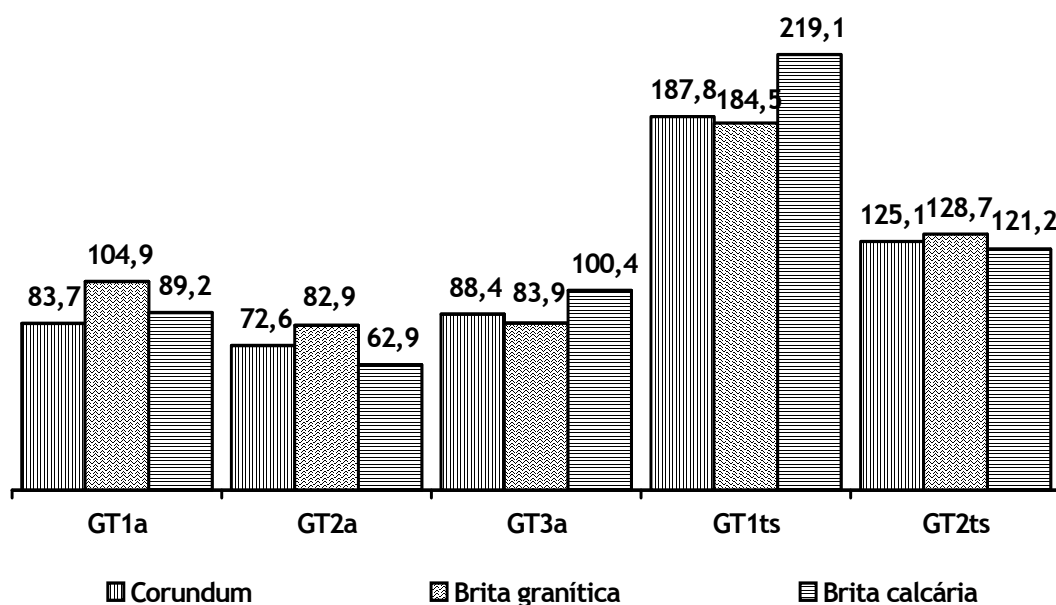


Figura 4.26 - Alteração nos valores do índice de velocidade VI_{H50} dos geotêxteis danificados.

Observa-se que, seja qual for o tipo de material granular confinante, os geotêxteis termossoldados apresentam maior permeabilidade após a danificação. Este aumento está associado à maior sensibilidade dos geotêxteis termossoldados à ocorrência de cortes e buracos durante as ações de danificação, devido à sua estrutura mais rígida decorrente do processo de fabrico, o que facilita a passagem da água.

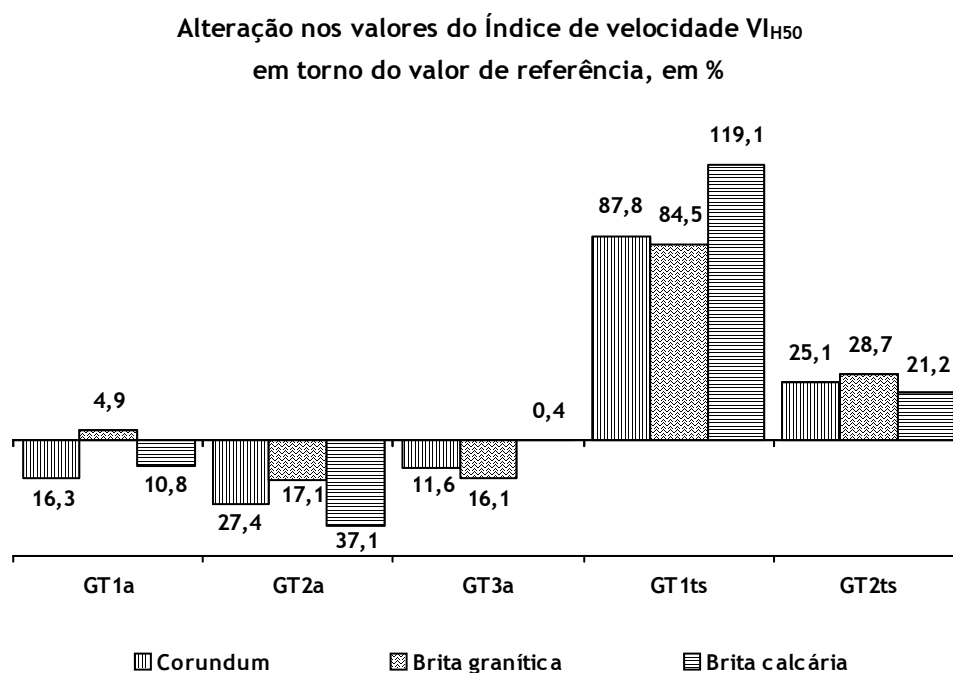


Figura 4.27 - Variação do índice de velocidade VI_{H50} dos geotêxteis danificados em relação ao valor de referência.

Os geotêxteis agulhados, sendo mais compressíveis e adaptáveis às irregularidades das superfícies que contactam exibem, em geral redução da permeabilidade após a danificação durante a instalação. Por outro lado, a estrutura mais “fofa” dos geotêxteis agulhados capta com maior facilidade as partículas finas resultantes da quebra e esmagamento do material granular confinante utilizado durante a danificação, podendo essas partículas vir a colmatar os poros dos geotêxteis, tendo como consequência a redução da permeabilidade dos mesmos, depois de danificados.

A MUA tem influência determinante no aumento da permeabilidade dos geotêxteis termossoldados danificados. Com efeito, o aumento da permeabilidade do geotêxtil GT2ts (com maior MUA) é muito menor (valor máximo e mínimo, respectivamente, 28,7% e 21,2%) do que o que ocorre no geotêxtil GT1ts (com menor MUA) (valor máximo e mínimo, respectivamente, 119,1% e 84,5%). Este comportamento resulta da menor influência da DDI nos geotêxteis com maior MUA.

No caso dos geotêxteis danificados agulhados o papel da MUA não é tão claro como no caso dos termossoldados, provavelmente devido à maior compressibilidade destes materiais dentro de determinadas gamas de MUA. Com efeito, os geotêxteis GT1a (com MUA de 187g/m^2) e GT3a (com MUA de 729g/m^2) sendo, respectivamente, os geotêxteis agulhados com menor e maior densidade de filamentos estudados apresentam gamas de variação da permeabilidade semelhantes. Porém, o geotêxtil GT2a (com MUA de 286g/m^2) evidencia uma redução da permeabilidade, nos provetes danificados, superior aos dois geotêxteis referidos anteriormente. O comportamento observado para o GT2a deve-se, provavelmente, à maior compressibilidade deste quando comparada com a dos GT1a e do GT3a e, ainda à sua maior capacidade de reter partículas granulares finas que poderão induzir colmatação dos seus poros.

Com base nos resultados do presente estudo não é possível tirar conclusões acerca da influência, na permeabilidade dos geotêxteis considerados, do tipo de material granular de confinamento usado nos ensaios de DDI. De referir que, em relação ao papel na resistência à tracção dos geossintéticos estudados por Paula (2003), o autor concluiu que a DDI laboratorial com *Corundum* era mais agressiva do que quando o material confinante era brita granítica.

A Figura 4.28 mostra os coeficientes de variação dos valores do índice de velocidade dos geotêxteis estudados intactos e após DDI com *Corundum*, brita granítica e brita calcária como materiais granulares de confinamento.

A figura evidencia uma grande variabilidade nos valores do índice de velocidade (VI_{H50}) dos geotêxteis danificados, independentemente do tipo de material granular utilizado.

Observa-se que os coeficientes de variação do parâmetro em análise são maiores nos geotêxteis termossoldados do que nos geotêxteis agulhados e, em geral, são maiores no caso dos materiais danificados com *Corundum* e com brita granítica.

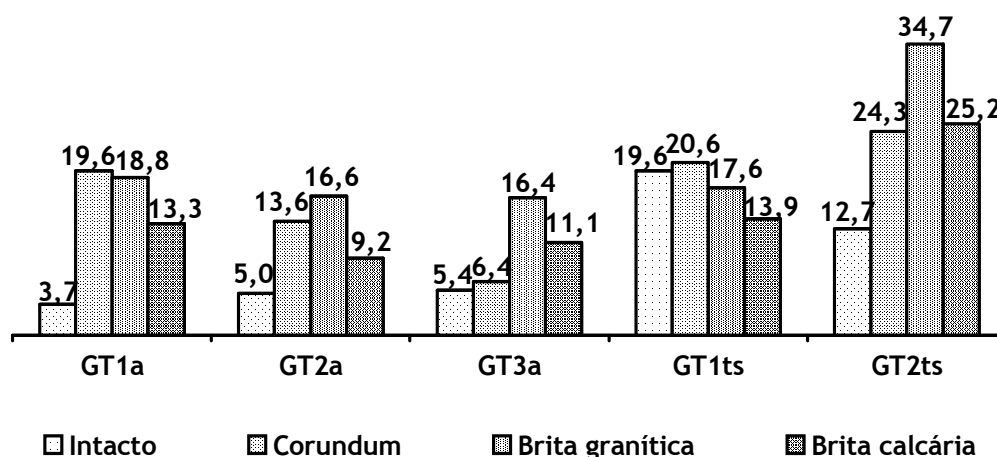


Figura 4.28 - Coeficientes de variação dos valores do índice de velocidade VI_{H50} .

4.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do presente capítulo avaliou-se a influência da DDI laboratorial na permeabilidade normal ao plano de cinco geotêxteis não tecidos em PP, três agulhados e dois geotêxteis termossoldados, utilizando três tipos de materiais granulares confinantes: *Corundum*, brita granítica e brita calcária.

Os geotêxteis intactos foram caracterizados do ponto de vista da espessura, da massa por unidade de área, do comportamento tracção-extensão e da permeabilidade normal ao plano do material.

A influência da DDI laboratorial com *Corundum* na resistência à tracção e na extensão para a força máxima dos geotêxteis permitiu concluir que o processo de fabrico tem influência determinante nos valores residuais dos parâmetros em análise e que esses valores aumentam com o aumento da MUA dos geotêxteis.

No que se refere ao papel da DDI laboratorial na permeabilidade normal ao plano dos geotêxteis observou-se, uma vez mais, a influência significativa do processo de fabrico dos geotêxteis e da MUA no caso dos geotêxteis termossoldados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tentou ser um alargamento do âmbito de estudo da danificação durante a instalação (DDI) em obra de materiais geossintéticos. O caminho mais usual, ao tratar-se da DDI passa por avaliar o seu efeito na resistência mecânica dos materiais poliméricos. Neste estudo, tentou-se transpor a metodologia de DDI na avaliação do seu efeito nas propriedades hidráulicas de geotêxteis, principalmente, no que concerne à permeabilidade normal ao plano do material.

Na realização dos ensaios foi usado um equipamento protótipo, desenvolvido no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

A utilização deste equipamento permitiu a reflexão, ainda que não tenha sido referida neste texto, sobre os limites que o próprio equipamento impõe na realização dos ensaios. De facto, constatou-se que, para determinados materiais e para determinados valores de perdas de carga existem dificuldades na realização do procedimento normalizado. Em certos casos, de materiais extremamente permeáveis, chega a ser inviável a realização dos ensaios. Além disso, constata-se que, muitas vezes, o regime de escoamento é turbulento, o que torna pouco fiáveis os resultados obtidos.

Ainda no que concerne ao funcionamento do equipamento de ensaio, não foi possível completar o sistema de verificação do nível da carga hidráulica com os recurso a sensores eléctricos.

Refira-se, também, que não houve uma caracterização rigorosa dos solos de confinamento utilizados nos procedimentos laboratoriais de DDI, ficando esta, apenas, pela designação da dimensão mínima e máxima das partículas e pela identificação da sua categoria petrográfica.

Outro aspecto é o da importância de, no futuro, fazer-se estudos semelhantes para outras propriedades hidráulicas dos geossintéticos, como a permeabilidade no plano do material e a dimensão da abertura dos poros.

Refira-se, também, a impossibilidade de concluir tão pormenorizadamente sobre os efeitos da DDI na permeabilidade dos geotêxteis, quando se compara este trabalho com o de Paula (2003). Com efeito, este autor conseguiu obter resultados cuja sistematização se tornou muito completa e interessante. Contudo, pode-se dizer que, mediante os resultados obtidos, se pôde confirmar a conclusão retirada pelo autor sobre a influência da massa por unidade de área na resistência à danificação mecânica.

Por fim, um aspecto que podia ter sido interessante durante a análise de resultados, seria o da comparação dos valores obtidos com os da literatura da especialidade. Contudo, esse trabalho não foi realizado para este estudo.

BIBLIOGRAFIA

AUSTIN, R. A. (1998). "Installation effects on geosynthetics", Seminar volume on Installation Damage in Geosynthetics, November 1998, ERA Technology, Leatherhead, U. K., p. 3.2.1-3.2.10.

BROWN, R. P. e GREENWOOD, J. H. (2002). "Practical guide to the assessment of the useful life of plastics, Rapra Technology Limited, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK, 180p.

EN ISO 10319 (1993). "Geotextiles - Wide-width tensile test".

EN ISO 10722 (2007). "Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material".

EN ISO 10722-1 (1998). "Geotextiles and geotextile-related products - Porcedure for simulating damage during installation - Part 1: Installation in granular materials".

GERALDES, A. M. P. (2008). "Caracterização da interação solo-geossintético e geossintético-geossintético aplicados em taludes rodoviários através de ensaios de corte em plano inclinado", dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Especialização em Vias de Comunicação na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 78p.

GIROUD, J.P. (1986). "From geotextiles to geosynthetics: a revolution in geotechnical engineering". Proc. 3rd Int. Conf. on Geotextiles, Vienna, Vol.1, p. 1-18.

GIROUD, J. P. (1980). "Introduction to geotextiles and their applications", Proceedings of the 1st Canadian Symposium on Geotextiles, p. 3-31.

IGS-Portugal (2009). "Normas CEN", documento sobre normalização de ensaios de geossintéticos produzido pela Comissão Portuguesa de Geossintéticos.

INGOLD, T. S. (1994). "Geotextiles and Geomembranes Manual", Elsevier advanced Technology, First edition, 610 p.

ISO 554 (1976). "Standard atmospheres for conditioning and/or testing - Specifications".

JEWELL, R.A. (1996). "Soil reinforcement with geotextiles". Special Publication 123 CIRIA, 332p.

KHAY, M. (1998). "Geotextile damage at installation: French experience and laboratory test results with the experimental European standard", Seminar volume on Installation Damage in Geosynthetics, November 1998, ERA Technology, Leatherhead, U. K., p. 2.2.1-2.2.15.

KOERNER, R. M. (1999). "Designing with geosynthetics", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, Fourth edition, 761p.

LADEIRA, M. A. S. A. (1995). "Estudo dos fenómenos de interacção solo - geossintético através de ensaios de arranque", Dissertação de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

LOPES, M. G. (2000). "A utilização de geossintéticos nos sistemas de confinamento de aterros de resíduos", Seminário sobre Aspectos Geotécnicos do Projecto e Construção de Aterros de Resíduos, LNEC, Lisboa.

LOPES, M. L. (1998). "Aplicação de geossintéticos em engenharia civil", Texto de apoio à disciplina com o mesmo título, FEUP.

LOPES, M. L. C. e PINHO-LOPES, M. J. F. (2001). "Danificação Durante a Construção de Geossintéticos - Estudo dos Coeficientes de Segurança a Adoptar", Relatório da acção de investigação desenvolvida no âmbito do protocolo ICERR/FEUP, Porto, 78p.

M288-06-UL (2006). “Standard Specification for Geotextile Specification for Highway Applications”, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

NP EN 933-1 (2000). “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração”.

NP EN 1097-2 (2002). “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação”.

NP EN ISO 9862 (2007). “Geossintéticos. Amostragem e preparação de provetes” (versão portuguesa da norma EN ISO 9862: 2005).

NP EN ISO 9863-1 (2006). “Geossintéticos. Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples” (versão portuguesa da norma EN ISO 9863-1: 2005).

NP EN ISO 9864 (2006). “Geossintéticos - Determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados” (versão portuguesa da norma EN ISO 9864: 2005).

NP EN ISO 10318 (aguarda publicação). “Geossintéticos. Termos e definições” (versão portuguesa da norma EN ISO 10318: 2005).

NP EN ISO 10319 (2005). “Geotêxteis. Ensaio de tracção em tiras largas” (versão portuguesa da norma EN ISO 10319:1996).

NP EN ISO 11058 (2003). “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem confinamento” (versão portuguesa da norma EN ISO 11058: 1999).

NP EN ISO 12956 (2006). “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da dimensão característica da abertura” (versão portuguesa da norma EN ISO 12956: 1999).

NP EN ISO 12958 (2005). “Geotêxteis e produtos relacionados - Determinação da capacidade de escoamento no seu plano” (versão portuguesa da norma EN ISO 12958: 1999).

NP EN 29073-3 (1993). “Têxteis - Métodos de ensaio para tecidos não tecidos. Parte 3: Determinação da resistência à tracção e do alongamento” (versão portuguesa da norma EN 29073: 1992).

PAULA, A. M. V. (2003). “Danificação durante a instalação - avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos”, Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 155p.

PINHO-LOPES, M. J. F. (2004). “Estudo de coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos”, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 693p.

PINHO-LOPES, M. J. F. e LOPES, M. L. C. (2001). “Efeito no comportamento mecânico dos geossintéticos da danificação sofrida durante a instalação - resultados iniciais”, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia - Geotecnia n.º 93, Lisboa, p. 81-99

PINHO-LOPES, M. J. F.; RECKER, C.; LOPES, M. L. C. e MÜLLER-ROCHHOLZ, J. (2002). “Experimental analysis of the combined effect of installation damage and creep of geosynthetics - new results”, Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Volume 4, p. 1539-1544.

PINHO-LOPES, M. J. F.; RECKER, C.; MÜLLER-ROCHHOLZ, J. e LOPES, M. L. C. (2000). “Installation damage and creep of geosynthetics and their combined effect - experimental analysis”, Proceedings of the EUROGEO 2000, 2nd European Geosynthetics Conference, Bologna, Italy, Volume 2, p. 895-897.

PINTO, A. E. S. (2005) “Aplicação de geossintéticos em linhas-férreas - Estudo laboratorial dos fenómenos de abrasão e danificação durante a instalação nos materiais”, Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 168p.

SHUKLA, S. K. (2002). “Fundamentals of geosynthetics”, Capítulo 1 do livro “Geosynthetics and their applications”, Thomas Telford Publishing, London E14 4JD, p. 1-54.

WATN, A. e CHEW, S. -H. (2002). “Geosynthetic damage - from laboratory to field”, Keynote Lecture, Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Volume 4, p. 1203-1226.

ZANZINGER, H. e GARTUNG, E. (2002). “Landfills”, Capítulo 11 do livro “Geosynthetics and their applications”, Thomas Telford Publishing, London E14 4JD, p. 259-280.