



**Mariana Dias da Silva  
Ferreira**

**Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades  
hidráulicas após dano**





**Mariana Dias da Silva  
Ferreira**

**Compósito geotêxtil – geogrelha:  
propriedades hidráulicas após dano**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação Científica da Professora Doutora Maria de Lurdes da Costa Lopes, Professora Catedrática do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto.





## **O júri**

Presidente

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria Isabel Moita Pinto**  
Professora Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes**  
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

**Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes**  
Professora Catedrática, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todos os que contribuíram, de forma direta ou indiretamente, para a realização do presente trabalho, em especial:

À minha orientadora, Professora Doutora Margarida Pinho Lopes, pela orientação, ajuda e disponibilidade durante a elaboração do presente trabalho;

Ao Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e em especial à Professora Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes, e ao Laboratório de Materiais de Construção;

Ao apoio da FCT, projeto de investigação PTDC/ECM/099087/2008 e ao COMPETE, projeto de investigação FCOMP-01-0124-FEDER-009724;

À Ana Rosete e David pelo apoio, disponibilidade e ensinamentos prestados durante a realização dos ensaios laboratoriais;

Aos meus pais, José e Fernanda, que tornaram possível a minha estadia no Porto aquando da elaboração dos ensaios laboratoriais e da realização do presente trabalho, e por todo o apoio incondicional e motivação concedidos por ambos;

Aos meus colegas e amigos pelo apoio prestado durante a elaboração de todo o trabalho, em particular ao Luís Martins, Daniel Pedrosa, Ana Ministro, Lee Almeida, Diana Cunha e Pedro Mendes;

À minha mãe, por toda a paciência e atenção prestadas durante a realização de todo o presente trabalho.



## **Palavras-chave**

Geossintéticos, Drenagem, Filtragem, Ensaio de indução de dano, Danificação durante a instalação (DDI), Abrasão, Ensaio hidráulico, Permeabilidade normal, Permeabilidade no plano, Vias-férreas

## **Resumo**

Neste trabalho estudou-se o efeito de alguns mecanismos de dano num geossintético compósito. O compósito era constituído por um geotêxtil e uma geogrelha sobrepostos, procurando reproduzir algumas possíveis soluções para o reforço, drenagem e filtragem do balastro de vias férreas. Os mecanismos de dano considerados foram a danificação durante a instalação (DDI) e a abrasão. A DDI resulta das operações de colocação e compactação sobre os geossintéticos do agregado a usar nas vias férreas. A abrasão é uma consequência do movimento do agregado sobre o geossintético associado à passagem dos comboios sobre a via. Para simular estes agentes recorreu-se a ensaios laboratoriais: ensaio de dano mecânico e ensaio de abrasão. Neste trabalho foram analisadas amostras obtidas após serem submetidas aos ensaios de indução de dano mecânico, após aos ensaios de indução de dano por abrasão e depois de dano mecânico e abrasão. As alterações induzidas foram avaliadas comparando algumas características e propriedades de amostras intactas (de referência) e amostras submetidas aos ensaios de indução de dano referidos. A caracterização das alterações nos materiais foi realizada através de observações visuais e de ensaios hidráulicos (ensaio de capacidade de escoamento ao longo do plano dos geossintéticos e ensaio de permeabilidade normal ao plano dos mesmos). A permeabilidade no plano e perpendicular ao plano são relevantes para as funções de drenagem e filtragem, respetivamente.

De acordo com os resultados desses ensaios e utilizando os geossintéticos referidos foi possível concluir que, quanto maior o número e a gravidade das danificações induzidas, maior a velocidade com que os materiais eram atravessados por fluxos de água, isto é, maior a sua permeabilidade dos geossintéticos, tanto transversal como longitudinalmente ao seu plano. Comparando os vários tipos de dano induzido, os geossintéticos que inicialmente foram submetidos ao ensaio de dano mecânico foram os que menos influenciaram a permeabilidade no plano, quando comparados com provetes que não sofreram qualquer tipo de danificação. O tipo de dano que menos afetou a permeabilidade normal ao plano foi a abrasão.



**Keywords**

Geosynthetics, Drainage, Filtration, Damage test, Damage during installation (DDI), Abrasion, Hydraulic Testing, Normal permeability, In-plane permeability, Railways

**Abstract**

This work was done to study the effect of some damage mechanisms in composite geosynthetic. The composite material studied was composed by a geotextile and a geogrid overlapping, trying to reproduce some possible solutions to be used in ballasted railways, for reinforcement, filtration and drainage of ballast. The damage mechanisms considered were damage during installation (DDI) and abrasion. DDI results of operations of placement and compaction of the aggregate above the geosynthetics in railways. The abrasion is a consequence of the movement of the aggregate on the geosynthetic associated with the passage of the trains on the railways. To simulate these agents laboratory tests were used: mechanical damage tests and abrasion tests. The samples studied were submitted to mechanical damage, to abrasion and to sequential mechanical damage and abrasion. The changes induced were assessed by comparing some characteristics and properties of intact samples (reference) and after the damaged tests mentioned. Such characterization was evaluated by visual observations and through hydraulic tests (in-plane permeability and normal permeability). The in-plane and the normal permeability are relevant for the drainage and filter functions, respectively.

According to the results obtained with the geosynthetics mentioned it was possible to conclude that the greater the number and severity of damage induced, with greater speeds these products are traversed by flows of water, in other words, higher the permeability of these geosynthetics, both transverse and longitudinally to their plane. The in-plane permeability of the geosynthetics subjected to the mechanical damage test was the least affected, when compared with the behavior of the intact materials. The damage mechanisms less influencing the normal permeability of the geosynthetics tested was the abrasion.



# Índice

ACRÓNIMOS.....	ix
SÍMBOLOS DE GRANDEZAS .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. GEOSSINTÉTICOS .....	3
2.1. Introdução .....	3
2.2. Definição e classificação dos geossintéticos .....	3
2.3. Funções dos Geossintéticos .....	4
2.3.1. Drenagem.....	4
2.4. Propriedades dos Geossintéticos.....	5
2.4.1. Propriedades hidráulicas .....	5
2.4.2. Propriedades relativas à durabilidade .....	5
2.5. Síntese.....	6
3. VIAS FÉRREAS .....	7
3.1. Introdução .....	7
3.2. Constituição das vias-férreas.....	7
3.3. Aplicação dos geossintéticos em vias-férreas.....	9
3.3.1. Função de reforço .....	9
3.3.2. Função de Separação, Filtragem e Drenagem .....	9
3.4. Ensaio Vibrogir .....	10
3.5. Síntese.....	12
4. DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS .....	13
4.1. Introdução .....	13
4.2. Durabilidade.....	13
4.3. Agentes e mecanismos de degradação .....	14
4.4. Abrasão .....	15
4.5. Danificação durante a sua instalação em obra .....	16
4.5.1. Fatores que influenciam a DDI.....	17
4.5.2. Consequências da DDI.....	17
4.5.3. Formas de minimizar a DDI.....	18
4.6. Síntese.....	19
5. ENSAIOS LABORATORIAIS .....	21
5.1. Considerações iniciais.....	21
5.2. Geossintéticos utilizados .....	23
5.2.1. Principais cuidados a ter antes e ao longo de qualquer ensaio.....	24
5.3. Ensaio hidráulicos .....	25
5.3.1. Preparação dos provetes para a realização dos ensaios hidráulicos .....	25
5.3.2. Ensaio de permeabilidade no plano do geossintético.....	25

5.3.3.	Ensaio de permeabilidade normal ao plano do geossintético .....	33
5.4.	Ensaio de indução de dano.....	37
5.4.1.	Ensaio para indução de dano mecânico de geossintéticos.....	37
5.4.2.	Ensaio do dano por abrasão (ensaio do bloco deslizante) .....	40
5.5.	Considerações finais .....	43
6.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	45
6.1.	Considerações Iniciais.....	45
6.2.	Ensaio para indução de dano mecânico.....	45
6.2.1.	Considerações gerais .....	45
6.2.2.	Registo fotográfico .....	46
6.2.3.	Quadro-resumo das patologias encontradas a olho nu .....	48
6.2.4.	Descrição e análise dos danos visualizados.....	49
6.3.	Ensaio para indução de dano por abrasão.....	50
6.3.1.	Considerações gerais .....	50
6.3.2.	Registo fotográfico .....	51
6.3.3.	Quadro-resumo das patologias encontradas a olho nu .....	54
6.3.4.	Descrição e análise dos danos visualizados.....	55
6.4.	Ensaio de indução de dano mecânico + abrasão .....	58
6.4.1.	Considerações gerais .....	58
6.4.2.	Registo fotográfico .....	58
6.4.3.	Quadro-resumo das patologias encontradas a olho nu .....	61
6.4.4.	Descrição e comentário dos danos visualizados .....	62
6.5.	Considerações Finais .....	65
7.	RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS HIDRÁULICOS.....	67
7.1.	Considerações Iniciais.....	67
7.2.	Determinação da permeabilidade na direção do plano dos geossintéticos.....	68
7.2.1.	Considerações Gerais.....	68
7.2.2.	Provetes intactos.....	72
7.2.3.	Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico.....	75
7.2.4.	Provetes anteriormente sujeitos à abrasão.....	79
7.2.5.	Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico e abrasão.....	84
7.3.	Determinação da permeabilidade na direção normal ao plano dos geossintéticos .....	88
7.3.1.	Considerações Gerais.....	88
7.3.2.	Provetes intactos.....	90
7.3.3.	Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico.....	92
7.3.4.	Provetes anteriormente sujeitos à abrasão.....	94
7.3.5.	Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico e abrasão.....	96
7.4.	Considerações finais .....	98
7.4.1.	Determinação da capacidade de escoamento no seu plano.....	98
7.4.2.	Permeabilidade normal ao plano .....	100

8. COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARCIAIS, COMPARAÇÃO COM RESULTADOS JÁ PUBLICADOS.....	103
8.1. Considerações iniciais.....	103
8.2. Coeficientes de Segurança Parciais.....	103
8.2.1. Considerações gerais .....	103
8.2.2. Determinação e análise dos coeficientes de segurança parciais (CS).....	104
8.3. Comparação com resultados já publicados.....	105
8.3.1. Considerações gerais .....	105
8.3.2. Comparação de resultados.....	105
9. CONCLUSÕES, DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	109
9.1. Considerações iniciais.....	109
9.2. Conclusões .....	109
9.2.1. Considerações gerais .....	109
9.2.2. Conclusões relativas aos ensaios laboratoriais .....	109
9.2.3. Conclusões relativas aos coeficientes de segurança parciais.....	111
9.2.4. Conclusões relativas aos parâmetros determinados quando comparados com resultados já publicados .....	111
9.2.5. Nota Final: Relação do presente estudo com a vida prática .....	112
9.3. Desenvolvimentos futuros.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115



# Índice de Figuras

## Capítulo 2. Geossintéticos

Figura 2. 1: Ilustração de um geossintético com a função de drenagem (adaptado de ([2]))..... 4

## Capítulo 3. Vias-férreas

Figura 3. 1: Constituição de uma via-férrea tradicional (adaptado de Aursudkij (2007)) ..... 8

Figura 3. 2: Esquema representativo do equipamento “Vibrogir” (adaptado de Nancey, Imbert, and Robinet (2002) por M. L. Lopes (2009)) ..... 10

## Capítulo 5. Ensaio Laboratoriais

Figura 5. 1: Esquema com os ensaios realizados, a sua sequência e número mínimo de provetes ..... 22

Figura 5. 2: Materiais utilizados: a) GTX; b) GGR ..... 23

Figura 5. 3: Combinação dos dois geossintéticos considerados ..... 23

Figura 5. 4: Preparação dos provetes para a realização dos ensaios hidráulicos – Equipamento que mede a espessura dos provetes enquanto se encontram secos ..... 25

Figura 5. 5: Equipamento utilizado para o ensaio de determinação da capacidade de escoamento no plano de um geossintético..... 26

Figura 5. 6: Ensaio de permeabilidade no plano – Equipamento de bombagem utilizado ..... 27

Figura 5. 7: Ensaio de permeabilidade no plano – quadro elétrico que permite o controlo da tensão exercida no provete ..... 27

Figura 5. 8: Ensaio de permeabilidade no plano – tubo piezométrico a montante do geossintético, descarregador de superfície a jusante e aparelho que permite a medição da espessura do provete ..... 28

Figura 5. 9: Ensaio de permeabilidade no plano – a) Ilustração dos tubos piezométricos e régua que mede os níveis de água; b) Pormenor da ligação dos tubos piezométricos ao equipamento..... 29

Figura 5. 10: Ensaio de permeabilidade no plano – posição das placas de neoprene no equipamento, tendo em conta o provete ..... 30

Figura 5. 11: Ensaio de permeabilidade no plano – descarregador: a) Vista frontal; b) Vista lateral ..... 31

Figura 5. 12: Equipamento utilizado para a elaboração do ensaio de permeabilidade normal ao plano do geossintético..... 33

Figura 5. 13: Ensaio de permeabilidade normal ao plano – a) Tubos piezométricos que permitem controlar o valor de perda de carga da água; b) Sistema móvel e régua graduada que permitem o ajuste das cargas hidráulicas e identificação de perdas de carga..... 34

Figura 5. 14: Ensaio de permeabilidade normal ao plano – Sistema de aperto do equipamento ..... 35

Figura 5. 15: Ensaio de permeabilidade normal ao plano – a) colocação do provete no suporte; b) colocação da grelha metálica..... 36

Figura 5. 16: Equipamento utilizado para o ensaio de Dano mecânico – a) Vista frontal e lateral; b) Vistas laterais ..... 38

Figura 5. 17: Ensaio de dano mecânico – Parte inferior da caixa de danificação preenchida com as duas camadas de óxido de alumínio normalizado .....	39
Figura 5. 18: Ensaio de dano mecânico – caixa pronta a ser posicionada para a realização o ensaio .....	40
Figura 5. 19: Equipamento utilizado para a realização do ensaio de dano por abrasão .....	41
Figura 5. 20: Ensaio de dano por abrasão – Pratos constituintes do abrasímetro: a) prato de baixo (vaivém); b) prato de cima (estacionário) .....	41
Figura 5. 21: Ensaio de dano por abrasão – a) Instalação do geossintético e da lixa P24 na extremidade que não possui esticador do prato de cima; b) Fixação do abrasivo P24 e do geossintético na extremidade com esticador do prato superior; c) Prato superior e prato inferior, com o provete corretamente instalado; d) Colocação da carga no prato superior .....	43

## Capítulo 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

Figura 6. 1: Escala da quantidade de luz a que cada provete esteve sujeito durante o registo fotográfico .....	45
--	----

## Capítulo 7. Resultados, Análise e Discussão dos Ensaios Laboratoriais

Figura 7. 1: Posição de GTX e GGR em relação um ao outro.....	67
Figura 7. 2: Exemplos de curvas de capacidade de escoamento no plano versus tensão normal de compressão (adaptado de NP_EN_ISO_12958 (2005)).....	69
Figura 7. 3: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes intactos .....	73
Figura 7. 4: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes primeiramente solicitados ao ensaio de dano mecânico.....	76
Figura 7. 5: Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ em função da tensão aplicada em provetes inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico e intactos .....	78
Figura 7. 6: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes primeiramente solicitados ao ensaio de abrasão .....	80
Figura 7. 7.: Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ em função da tensão aplicada em provetes inicialmente solicitados ao ensaio de abrasão e intactos .....	83
Figura 7. 8: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes primeiramente solicitados ao ensaio de dano mecânico e abrasão.....	85
Figura 7. 9.: Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ em função da tensão aplicada em provetes inicialmente solicitados aos ensaios de dano mecânico + abrasão e intactos .....	87
Figura 7. 10: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento $V_{20}$ obtidas para cada um dos 5 provetes intactos .....	91
Figura 7. 11: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento $V_{20}$ obtidas para cada um dos 5 provetes primeiramente solicitados ao dano mecânico.....	93
Figura 7. 12: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento $V_{20}$ obtidas para cada um dos 5 provetes primeiramente solicitados à abrasão...	95

Figura 7. 13: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento $V_{20}$ obtidas para cada um dos 5 provetes primeiramente solicitados aos ensaios de dano mecânico e abrasão .....	97
Figura 7. 14: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal, tendo em conta os gradientes hidráulicos aplicados correspondentes a provetes intactos e provetes inicialmente submetidos ao ensaio de dano mecânico e outros solicitados ao ensaio de abrasão .....	99
Figura 7. 15: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada de provetes intactos e inicialmente submetidos ao ensaio de dano mecânico, ao ensaio de abrasão e consecutivamente aos dois ensaios .....	100



# Índice de Tabelas

## Capítulo 5. Ensaios Laboratoriais

Tabela 5. 1: Número total de provetes ensaiados para cada tipo de ensaios hidráulicos .....	23
Tabela 5. 2: Propriedades de GTX e GGR .....	24

## Capítulo 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

Tabela 6. 1: Registo fotográfico de provetes submetidos ao ensaio de indução de dano mecânico .....	47
Tabela 6. 2: Quantificação das principais patologias encontradas nos provetes solicitados aos ensaios de indução de dano mecânico .....	48
Tabela 6. 3: Registo fotográfico dos provetes solicitados ao ensaio de abrasão, tendo em conta o GTX e a GGR em simultâneo .....	52
Tabela 6. 4: Registo fotográfico de provetes sujeitos ao ensaio de abrasão, com referência ao GTX e GGR em separado .....	53
Tabela 6. 5: Registo fotográfico dos provetes 9 e 10 submetidos ao ensaio de abrasão .....	54
Tabela 6. 6: Quantificação das principais patologias encontradas nos provetes solicitados à abrasão .....	54
Tabela 6. 7: Registo fotográfico dos provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico + abrasão, tendo em conta o GTX e a GGR em simultâneo .....	59
Tabela 6. 8: Registo fotográfico de provetes sujeitos ao ensaio de dano mecânico + abrasão, com referência ao GTX e GGR em separado .....	60
Tabela 6. 9: Quantificação das principais patologias encontradas nos provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico + abrasão .....	61

## Capítulo 7. Resultados, Análise e Discussão dos Ensaios Laboratoriais

Tabela 7. 1: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes intactos .....	72
Tabela 7. 2: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes danificados ao ensaio de dano mecânico .....	75
Tabela 7. 3: Relação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico e intactos .....	77
Tabela 7. 4: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes danificados recorrendo ao ensaio de abrasão .....	80
Tabela 7. 5: Relação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre provetes solicitados ao ensaio de abrasão e intactos .....	82
Tabela 7. 6.: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes danificados recorrendo ao ensaio de dano mecânico e de seguida de abrasão .....	84
Tabela 7. 7: Relação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre provetes solicitados aos ensaios de dano mecânico + abrasão e intactos .....	86
Tabela 7. 8: Valores da velocidade de escoamento $V_{20}$ , $VI_{H50}$ e $\Psi_{H50}$ obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes intactos .....	90

## Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

Tabela 7. 9: Valores da velocidade de escoamento $V_{20}$ , $VI_{H50}$ e $\Psi_{H50}$ obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico.....	92
Tabela 7. 10: Valores da velocidade de escoamento $V_{20}$ , $VI_{H50}$ e $\Psi_{H50}$ obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes inicialmente solicitados ao ensaio de abrasão.....	94
Tabela 7. 11: Valores da velocidade de escoamento $V_{20}$ , $VI_{H50}$ e $\Psi_{H50}$ obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes inicialmente solicitados aos ensaios de dano mecânico e abrasão.....	96
Tabela 7. 12: Compilação dos principais parâmetros determinados a partir do ensaio de permeabilidade normal ao plano.....	101

## **Capítulo 8. Coeficientes de Segurança Parciais, Comparação com resultados já publicados**

Tabela 8. 1: Coeficientes de Segurança parciais (CS).....	104
Tabela 8. 2: Comparação dos valores de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ , $VI_{H50}$ e $\Psi_{H50}$ obtidos com os apresentados por Oliveira (2011).....	106

## ACRÓNIMOS

- CEN – Comissão Europeia de Normalização;
- $CS$  – coeficiente de segurança parcial;
- DDI – Danificação durante a instalação em obra;
- FEUP – Faculdade de Engenharia do Porto;
- GCL – geocompósito argiloso;
- GCR – Geocompósito de reforço;
- GGR – geogrelha tecida;
- GTX – geotêxtil;
- IGS – Sociedade Internacional de Geossintéticos
- ISO - International Organization for Standardization
- LGS – Laboratório de Geossintéticos;
- NP – norma portuguesa;
- PP – polipropileno;
- $X_{int}$  – valor de uma propriedade para o material intacto;
- $X_{danif}$  – valor de uma propriedade para o material submetido à danificação;
- $\Delta$  – variação.

## SÍMBOLOS DE GRANDEZAS

- $i$  – gradiente hidráulico (mm/mm);
- $L$  – comprimento do provete (m);
- $k$  - coeficiente de permeabilidade do material (m/s);
- $k_p$  – coeficiente de permeabilidade no plano do geossintético (m/s)
- m.u.a.- massa por unidade de área ( $g/m^2$ );
- $Q$  – caudal ( $m^3/s$ );
- $q_{tensão/gradiente}$  – capacidade de escoamento no plano por unidade de área para uma determinada tensão e gradiente hidráulico ou coeficiente hidráulico ( $m^2/s$ );
- $R_T$  – fator de correção para a temperatura de água (adimensional);
- $S$  – área do escoamento do fluido ou área útil do provete ( $m^2$ );
- $T$  – temperatura da água ( $^{\circ}C$ );
- $t$  – tempo (s);
- $V$  – média do volume de água recolhido ( $m^3$ );
- $VI_{H50}$  – velocidade de escoamento do fluido correspondente à perda de carga hidráulica de 50 milímetros, para uma temperatura de referência de água de  $20^{\circ}C$  (m/s);
- $V_{20}$  – velocidade do escoamento para a temperatura de referência da água de  $20^{\circ}C$  (m/s);

Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

- $W$  – largura do provete (m);
- $\Theta$  – transmissividade (permeabilidade da água no plano dos geossintéticos) ( $m^2/s$ );
- $\Delta h$  – perda de carga hidráulica verificada no escoamento (m);
- $\Delta x$  – espessura do provete (m);
- $\psi$  – permissividade (permeabilidade da água normal ao plano dos geossintéticos) ( $s^{-1}$ );
- $\Psi_{H50}$  – permissividade dos geossintéticos quando a perda de carga hidráulica é de 50 milímetros( $s^{-1}$ ).

# 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos há uma procura da melhoria das condições de circulação e segurança das vias-férreas, assim como da sua manutenção e expansão devido à crescente afluência populacional que tem utilizado este meio de transporte.

Desta forma têm-se desenvolvido estratégias de forma a se poder aumentar a velocidade de circulação e amplitude das cargas transportadas sem comprometer a segurança de circulação, estando esta sempre assegurada. Uma das estratégias é a utilização de geossintéticos, que permite atingir os objetivos referidos atrás proporcionando baixos custos, facilidade e rapidez de instalação, e reduzidos impactos ambientais. Estes materiais também possuem a vantagem de poderem possuir variadíssimas funções, e na maior parte dos casos, simultaneamente.

Em geral, o geossintético é colocado entre camadas granulares, constituintes das vias-férreas, que procuram absorver as solicitações fornecidas pelos carris. Por este motivo pode concluir-se que os geossintéticos colocados em vias-férreas estão expostos a solicitações cíclicas, que provocam movimento dos materiais que estão em contacto com o geossintético e deformações irreversíveis. Para além de solicitações cíclicas e das características dos materiais que contactam diretamente com o geossintético, este é um material sensível a outros tipos de agentes e mecanismos de degradação. Mediante estes pressupostos torna-se fundamental a realização de vários estudos acerca do comportamento dos geossintéticos de forma a prolongar o seu tempo de vida útil, já que, segundo Lu (2008), a verdadeira natureza da deformação e mecanismos de degradação de alguns constituintes das vias-férreas ainda não foi totalmente compreendida. Os agentes e mecanismos de degradação podem estar presentes tanto durante o tempo de serviço do geossintético como durante o seu armazenamento, transporte e colocação em obra. Durante a colocação em obra, esses danos dependem das técnicas construtivas, da preparação do solo que estará em contacto com a face inferior do geossintético e dos equipamentos utilizados durante o espalhamento e compactação do aterro colocado superiormente ao geossintético.

A utilização de geossintéticos não se encontra presente unicamente em vias-férreas. Pode-se encontrar em variadíssimas obras de engenharia civil de acordo com os fins a que é destinado, ou seja, dependendo das funções que se pretenda que estes materiais exerçam. Para o estudo em questão, pretende-se aprofundar o estudo da degradação de geossintéticos com a função de drenagem e filtragem aplicados em vias-férreas, isto é, materiais que permitam a circulação livre de fluido no seu plano e normal ao mesmo proveniente de, por exemplo, águas pluviais e freáticas. Esse estudo da degradação inclui todos os agentes e mecanismos apresentados no parágrafo anterior, com maior evidência da abrasão e da originada durante a instalação dos geossintéticos em obra.

Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

## 2. GEOSINTÉTICOS

### 2.1. Introdução

Hoje em dia, os geossintéticos são materiais com uma relevante aplicação em engenharia civil, nomeadamente, engenharia geotécnica, geoambiental, hidráulica e de transporte [(Oliveira, 2011)]. A sua importância está na sua contribuição para a melhoria das qualidades de diversas obras, podendo exercer sobre as mesmas várias funções simultaneamente.

A elevada magnitude das vantagens dos geossintéticos na construção civil reside no facto de estes materiais constituírem boas soluções para as situações em que a aplicação de soluções tradicionais é mais complicada. O elevado nível de satisfação pela escolha e utilização destes materiais é devido, também, à sua elevada qualidade de fabrico, rapidez, facilidade e simplicidade de aplicação a um custo baixo, sem esquecer os reduzidos impactos ambientais e visuais na paisagem que proporciona. Os baixos impactos ambientais estão presentes uma vez que a aplicação dos geossintéticos permite que se utilize solos que tradicionalmente não seriam considerados adequados, quer como materiais de aterro, quer como materiais de fundação de diversas estruturas [(Pinho-Lopes, 2006)]. A razão do seu sucesso deve-se, também, ao facto de poder evitar ou minimizar a utilização de materiais naturais com baixa ocorrência e o recurso a estruturas de dimensionamento complicado. As pesquisas realizadas ao longo destes anos demonstraram que estes materiais têm a capacidade de reforço de forma a reduzir a taxa de deformações permanentes dos solos [(Perkins, 2004)].

Segundo Pinho-Lopes (2006), os geossintéticos podem aplicar-se em aterros reforçados, muros de suporte, taludes muito inclinados, aterros para a deposição de resíduos perigosos, aterros para a deposição de resíduos domésticos e industriais, estruturas de controlo de erosão e de protecção costeira, e também podem ser encontrados em vias-férreas e em vias rodoviárias. Neste trabalho inclui-se informação publicada pela IGS, a Sociedade Internacional de Geossintéticos. A IGS é uma associação interessada em desenvolver científica e tecnologicamente os geossintéticos, tal como as tecnologias associadas. É uma associação sem fins lucrativos que promove a disseminação de informações técnicas através de um boletim (IGS News) e através de duas revistas científicas (*Geosynthetics International* e *Geotextiles and Geomembranes*).

Ao longo deste capítulo introduz-se a definição de geossintético, referem-se os vários tipos de geossintéticos existentes, assim como as suas funções e principais propriedades.

### 2.2. Definição e classificação dos geossintéticos

Segundo a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), os geossintéticos são materiais poliméricos, naturais ou sintéticos, que estão em contacto com materiais naturais, como solo ou rocha, ou qualquer outro material geotécnico utilizado em aplicações de engenharia civil [(Pinho-Lopes, 2006)].

Os geossintéticos podem ser classificados tendo em conta o seu processo de fabrico, o que leva a que os geossintéticos possuam diferentes estruturas.

De acordo com a IGS-Portugal ([1]) estes podem ser: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompósitos, geocompósitos argilosos (GCL's), geotubos, geocélulas e geoespumas.

## 2.3. Funções dos Geossintéticos

Os geossintéticos podem desempenhar diferentes funções, simultânea ou isoladamente. Segundo a norma NP\_EN\_ISO\_10318 (2010) e Pinho-Lopes (2006), existem sete principais funções que os geossintéticos podem desempenhar: drenagem; filtragem; proteção; reforço; separação; controlo da erosão superficial; barreira de fluidos. Apenas se descrevem as funções relevantes para este trabalho – drenagem e filtragem. Nesta secção recorreu-se à informação disponibilizada pela IGS ([2]) e ([3]), ilustrada na Figura 2. 1..

### 2.3.1. Drenagem

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 [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)]. Assim, o geossintético escoo o fluido através do solo, cuja permeabilidade é menor. Para fluxos mais elevados, foram desenvolvidos geocompósitos drenantes. Também podem ser aplicados geotêxteis e georredes para exercer esta função. Na Figura 2. 1. ilustra-se a função de drenagem de um geossintético.

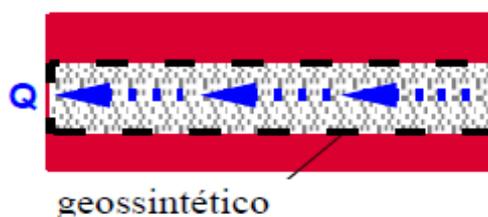


Figura 2. 1: Ilustração de um geossintético com a função de drenagem (adaptado de ([2]))

A drenagem pode ser vertical ou horizontal. Quanto à drenagem vertical, o material apropriado com esta função pode ser aplicado quando são esperados problemas de estabilidade durante as operações de aterro ou quando os assentamentos não podem ser inteiramente completados no tempo de execução disponível antes da construção de alguma infraestrutura sobre o mesmo. Quanto à drenagem horizontal, o material adequado pode ser aplicado para interceptar o fluxo vertical de água que é transportado lateralmente [(T.S. Ingold, 1994)].

Os geossintéticos drenantes funcionam como drenos quando são colocados de forma a permitirem a passagem de fluidos (líquidos ou gás) ao longo do seu plano (Pinho-Lopes & Lopes, 2010) e podem ser utilizados como complemento ou substituição dos materiais granulares tradicionais em obras de engenharia ([3]).

Pinho-Lopes and Lopes (2010) referem alguns cuidados específicos a ter com este tipo de geossintéticos:

- Assegurar a evacuação da água ou gás no plano do geossintético com uma pequena perda de carga;
- Evitar a entrada de partículas sólidas e o seu transporte no interior do dreno;
- O material deve possuir espessura e compressibilidade apropriadas para que cumpra a sua função ao longo do tempo de vida útil da obra. A dimensão das partículas deve ser tal que impeça a passagem das partículas sólidas sem bloqueio ou colmatção.

## 2.4. Propriedades dos Geossintéticos

As propriedades dos geossintéticos estão divididas quatro grupos: físicas, hidráulicas, mecânicas, e referentes à durabilidade [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)]. De seguida apresenta-se uma breve descrição das principais propriedades hidráulicas e relativas à durabilidade, uma vez que estas são as que importam para o presente estudo.

### 2.4.1. Propriedades hidráulicas

Nas propriedades hidráulicas dos geossintéticos podem incluir-se a distribuição e dimensão de aberturas, a permeabilidade à água normal ao plano e a permeabilidade ao longo do seu plano. A permeabilidade ao ar e a capacidade de filtragem dos solos também pertencem às propriedades hidráulicas. O processo de fabrico e o tipo de polímero influenciam as características deste grupo.

#### 2.4.1.1. Distribuição e dimensão das aberturas

A importância da distribuição e dimensão das aberturas está presente no dimensionamento dos filtros. Para caracterizar as aberturas de um geossintético pode-se recorrer à porometria, isto é, representações da distribuição e dimensão das aberturas recorrendo a curvas semelhantes às usadas para representar a distribuição granulométrica de um solo.

#### 2.4.1.2. Permeabilidade à água normal ao plano

A permeabilidade à água normal ao plano dos geossintéticos consiste na facilidade com que ocorre passagem de água através do geossintético perpendicularmente ao seu plano. O seu estudo é importante para a função de filtragem e esta propriedade depende da dimensão e distribuição das aberturas e do fluxo de água a que é submetido, isto é, se o fluxo de água é contínuo ou estacionário.

#### 2.4.1.3. Permeabilidade à água no plano

A permeabilidade à água no plano do geossintético, muitas vezes, apresentada sob a forma de transmissividade é importante para a função de drenagem. Esta propriedade depende da espessura do material, das pressões normais aplicadas ao geossintético e da distribuição e dimensão das aberturas do mesmo. Na secção 5.3.2.1 e 7.2.1. apresenta-se este conceito de forma mais exaustiva.

### 2.4.2. Propriedades relativas à durabilidade

Segundo Pinho-Lopes and Lopes (2010), a durabilidade de um material consiste na capacidade que o material tem em manter determinadas propriedades durante o seu tempo de vida útil. As propriedades relacionadas com a durabilidade dos materiais podem-se dividir em dois grupos: um que se refere à sua resistência durante o seu tempo de vida útil, correntemente designada por “endurance”, e a outro que se refere à sua degradação. O primeiro grupo refere-se à danificação do geossintéticos durante a sua colocação em obra, à sua fluência, à relaxação de tensões, à abrasão e à fluência em compressão. No segundo grupo estão incluídas as radiações ultravioleta, a ação da temperatura, a oxidação, a hidrólise, os agentes químicos e os agentes biológicos.

A danificação durante a sua instalação (DDI) em obra está relacionada com as solicitações dos geossintéticos devidas às operações de colocação, espalhamento e compactação de material de aterro sobre o geossintético. A abrasão resulta de deslocamentos do material granular que se encontra imediatamente acima dos geossintéticos e que contacta diretamente com os mesmos. Esses deslocamentos são consequência desse material granular se encontrar solto e das várias passagens de comboios acima dessas estruturas que transmitem cargas cíclicas e vibrações aos geossintéticos e a toda a estrutura que se encontra acima destes.

## **2.5. Síntese**

A utilização de geossintéticos cresceu, sobretudo, devido ao facto de estes poderem substituir a utilização de materiais naturais que dificultariam as soluções construtivas e com custos mais elevados; além disso, estes materiais podem aplicar-se em variadíssimos tipos de obras de construção. Os geossintéticos mais utilizados na construção civil são geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas e geocompósitos. O que distingue estes geossintéticos é o seu processo de fabrico, que condiciona a sua estrutura. Os polímeros constituintes e os aditivos utilizados podem ainda influenciar muito o seu desempenho.

Os aditivos são utilizados para melhorar as propriedades destes materiais de maneira a que estes suportem melhor algumas ações, nomeadamente durante o processo de fabrico e associadas à durabilidade (em geral de degradação). É necessário ter em atenção que cada geossintético pode ser dimensionado para desempenhar diferentes funções simultaneamente. Nesse caso é essencial ter conhecimento da relação hierárquica entre as funções e das propriedades relevantes dos materiais. Os valores destas propriedades devem ser controlados através de ensaios, respeitando os requisitos de determinadas normas.

## 3. VIAS FÉRREAS

### 3.1. Introdução

A importância das vias-férreas tem levado à sua reabilitação e até mesmo à criação de novas vias. A utilização de geossintéticos tem levado à diminuição de custos, é de fácil instalação e elevada funcionalidade, levando à sua utilização neste tipo de obras [(M. L. Lopes, 2009)].

De acordo com Fischer (2010), a necessidade de reabilitação das vias-férreas é necessária devido à degradação dos seus constituintes por utilização de elevadas velocidades de circulação (e consequentemente vibrações) e peso dos comboios (elevadas cargas variáveis por eixo) ao longo do tempo e devido a agentes ambientais. O correto alinhamento e nível das ferrovias devem estar sempre assegurados [(Anderson & Fair, 2010)]. Estas obras de reabilitação são realizadas assim que os valores correspondentes a defeitos geométricos atingem os valores-limite de tolerância [(Fischer, 2010)].

Segundo M. L. Lopes (2009) os geossintéticos podem contribuir para a diminuição dos assentamentos diferenciais que se desenvolvem sob as cargas de tráfego e para o controlo da contaminação do balastro.

Segundo a mesma autora, as vantagens da aplicação de geossintéticos em vias-férreas são:

- Permitir aumentar os intervalos de manutenção do material da camada de balastro;
- Controlar o fenómeno de contaminação do balastro;
- Permitir reduzir os deslocamentos horizontais e transversais da camada de balastro;
- Reduzir os assentamentos diferenciais na camada de balastro;
- Minorar o impacto ambiental, associado à exploração de pedreiras;
- Reduzir os custos iniciais e de exploração;
- Maior disponibilidade de materiais e maior facilidade e rapidez de aplicação.

### 3.2. Constituição das vias-férreas

De acordo com Montanelli and Recalcati (2003), as vias-férreas são consideradas como sistemas de multi-camadas de um compósito com um solo natural, incluindo o sistema das vias-férreas. O sistema de vias-férreas permite a circulação dos comboios, e o sistema de multi-camadas suporta todas as solicitações a que é sujeito.

As vias-férreas são constituídas por duas partes: a superestrutura e a infraestrutura. Na superestrutura encontram-se os carris, sistema de fixação e as travessas, isto é, os elementos que contactam diretamente com o material circulante, transmitindo à infraestrutura as solicitações provenientes deste. Na infraestrutura estão presentes as camadas de balastro, sub-balastro e a plataforma onde a estrutura é apoiada. É nesta parte onde surgem as maiores patologias associadas ao nivelamento longitudinal e transversal e às características geométricas do traçado em planta. A plataforma é constituída pelo solo de fundação e o solo compactado [(M. L. Lopes, 2009)]. Para se melhor compreender a constituição destas vias, apresenta-se na Figura 3. 1., um esquema representativo de uma via-férrea convencional.

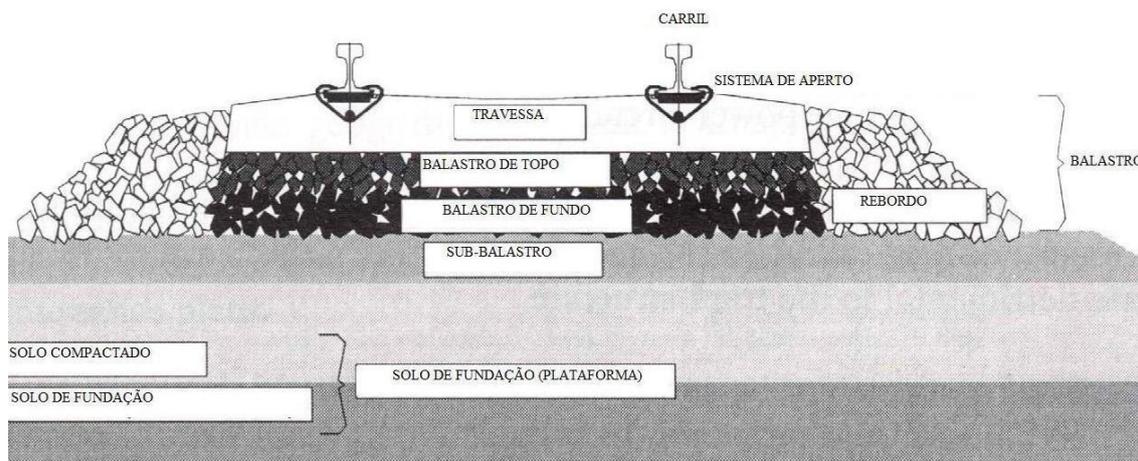


Figura 3. 1: Constituição de uma via-férrea tradicional (adaptado de Aursudkij (2007))

O correto comportamento do balastro é a chave para o bom funcionamento da estrutura de uma via convencional [(Ionescu, 2004)].

Segundo Aursudkij (2007), os carris não são mais do que um par de vigas de aço laminado, dispostas longitudinalmente, que contactam diretamente com as rodas das carruagens. Estes elementos têm como funções guiar os comboios na direção desejada, e transferir a carga do tráfego para as travessas que estão ligadas aos carris por sistemas de fixação. Desta forma, as travessas transferem a carga dos carris para o balastro, e restringem a circulação ferroviária através da ancoragem da superestrutura.

O balastro pode ser definido como um material selecionado, britado colocado na parte superior da infraestrutura em que as travessas são incorporadas para suportar os carris. Geralmente é composto por partículas de rochas de alta resistência [(B. Indraratna, Salim, & Rujikiatkamjorn, 2011)]. De acordo com M. L. Lopes (2009), o balastro é constituído por material granular, com uma espessura variável geralmente entre os 25 e os 30 cm, que tem como principais funções:

- Suportar os componentes que constituem a superestrutura, mantendo-os nas suas respetivas posições, ao mesmo tempo que garante a degradação das cargas que lhe são transmitidas pelas travessas;
- Drenar as águas chegadas à plataforma para valas ou drenos laterais, e garantir a proteção contra os efeitos do gelo;
- Garantir resiliência e absorção de energia, para que se dê o eficaz amortecimento das vibrações produzidas pela passagem dos comboios;
- Permitir, através de operações de manutenção, a correção, tanto longitudinal como transversal, da geometria da via;
- Garantir a estabilidade longitudinal e transversal da via.

Segundo a mesma autora, o sub-balastro é a camada a seguir inferiormente ao balastro, que contacta diretamente com a plataforma. As suas principais funções são:

- Degradar as cargas para níveis de tensão compatíveis com a capacidade de carga da fundação;
- Fornecer proteção contra os efeitos do gelo/ degelo na plataforma;
- Prevenir a interpenetração do balastro na plataforma (função de separação) e evitar, na presença de água, o fenómeno de bombeamento de lama, sob a ação das cargas do tráfego;
- Prevenir a subida de finos a partir da plataforma (função de filtro);
- Criar uma fronteira de menor permeabilidade, com inclinação transversal, capaz de garantir o escoamento lateral das águas da plataforma.

A plataforma, sendo a última componente da infraestrutura, é onde vai assentar toda a restante estrutura. A camada do solo compactado deve ser convenientemente preparada e regularizada para que apresente as características necessárias ao armamento da via.

No passado, o principal foco da atenção dos estudiosos dos constituintes das vias-férreas era a superestrutura, dando-se mais importância à infraestrutura mais tarde. No entanto, verificou-se que a infraestrutura é igualmente importante: a superestrutura assegura as suas funções de guiar os comboios com segurança e a infraestrutura certifica que a superestrutura funciona nas suas melhores condições [(Aursudkij, McDowell, & Collop, 2009)].

### **3.3. Aplicação dos geossintéticos em vias-férreas**

Os geossintéticos podem ser colocados ou entre o sub-balastro e o balastro, ou entre o solo compactado e o sub-balastro.

De acordo com M. L. Lopes (2009), para realizar a sua aplicação, é necessário compreender que os geossintéticos são submetidos a determinadas especificidades como as cargas cíclicas a que estas estruturas estão sujeitas, a granulometria e a forma do material que contacta diretamente com os geossintéticos (balastro) e o caráter abrasivo a que o geossintético está sujeito.

Os geossintéticos, nas vias-férreas, podem desempenhar funções de reforço, separação, filtragem e drenagem.

#### **3.3.1. Função de reforço**

A adição de geossintéticos com a função de reforço aperfeiçoa as qualidades da infraestrutura, melhorando o comportamento do balastro e reduzindo as perturbações do tráfego. Segundo M. L. Lopes (2009) deve ser utilizado um geossintético com a função de reforço quando há falta de capacidade de carga da fundação, levando à ocorrência de elevados assentamentos verticais, com a penetração das camadas granulares na base da plataforma, ou quando há um inadequado dimensionamento da espessura das camadas de balastro e sub-balastro, podendo ocorrer elevados assentamentos verticais. Podem ser utilizados geogrelhas, geocélulas e geocompósitos para exercerem a função de reforço.

#### **3.3.2. Função de Separação, Filtragem e Drenagem**

Segundo Oliveira (2011), a função de separação é utilizada de forma a não permitir a mistura de diferentes camadas, com diferentes granulometrias e propriedades. A passagem de comboios leva à introdução de movimentos oscilatórios e conseqüentemente à ascensão dinâmica dos materiais mais finos do subleito. Com

a ascensão referida e após a mistura destes materiais mais finos com as camadas granulares de balastro há redução da capacidade de amortecimento das cargas, e da capacidade de drenagem. Para exercer a função de separação podem ser utilizados geotêxteis.

De acordo com Oliveira (2011), a função de filtragem tem como finalidade atuar como um filtro, permitindo a percolação da água e restringindo a passagem de partículas sólidas. A sua aplicação é necessária quando há a hipótese de, por aumento dos níveis de carga resultantes da passagem de comboios, a água afluir do subleito para as camadas granulares arrastando partículas de solo mais finas. Os geotêxteis podem desempenhar esta função.

Segundo o mesmo autor, geossintéticos com a função de drenagem contribuem para evitar a deterioração devido à ação da água, proveniente tanto da precipitação como da ascensão por bombeamento. Geossintéticos com esta função devem ser instalados em pontos relevantes da estrutura, de forma transversal à via, e devem evitar a acumulação de água. O geossintético escolhido deve apresentar uma elevada capacidade de descarga e ser resistente a danos mecânicos.

### 3.4. Ensaio Vibrogir

Segundo M. L. Lopes (2009), o Vibrogir é um equipamento que simula as cargas resultantes do tráfego ferroviário. Na Figura 3. 2. encontra-se um esquema representativo do equipamento “Vibrogir”.

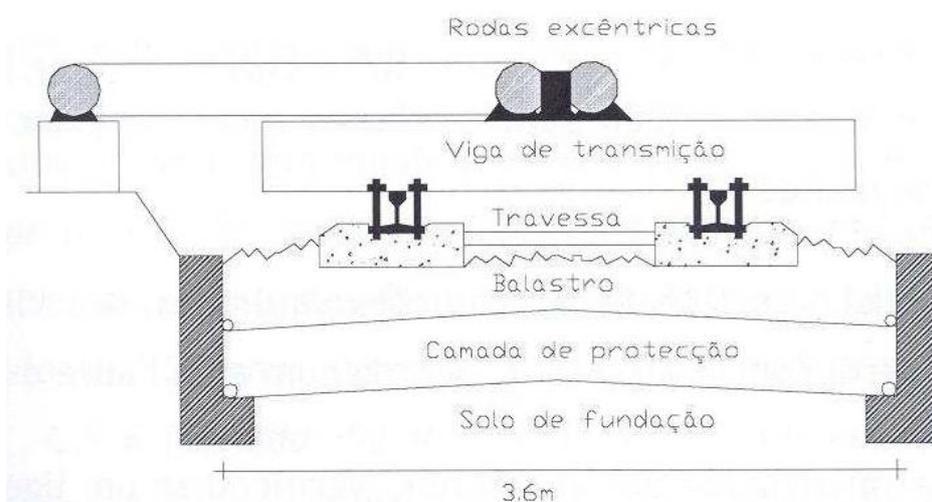


Figura 3. 2: Esquema representativo do equipamento “Vibrogir” (adaptado de Nancey, Imbert, and Robinet (2002) por M. L. Lopes (2009))

Neste ensaio aplica-se uma carga de 20 toneladas a uma frequência de 50 Hz a uma travessa de via-férrea. Segundo a mesma autora e Nancey et al. (2002), pode-se considerar que 10 horas de solicitação no "Vibrogir" correspondem aproximadamente a um tráfego diário de 100 000 toneladas.

Utilizando geotêxteis, com massa por unidade de área (m.u.a.) entre 280 e 420 g/m<sup>2</sup>, colocados entre o solo de fundação e o sub-balastro Nancey et al. (2002) retiraram as seguintes conclusões (apresentadas por M. L. Lopes (2009)):

- Os geotêxteis tecidos mostram zonas danificadas com corte de fibras;

- Os geotêxteis não tecidos termoligados ensaiados mostram-se praticamente impermeáveis nos testes com solicitações dinâmicas (à semelhança dos ensaios em pequena escala);
- Todos os geotêxteis não tecidos agulhados mantiveram a mesma permeabilidade normal;
- Independentemente do tipo de solo de fundação considerado (argila, argilo-arenoso e margas), todos apresentavam um grau de compactação de 95%;
- Após 200 horas de utilização do equipamento, o nível de contaminação do sub-balastro estava limitado à altura de 3-4cm para os geotêxteis não tecidos agulhados; com recurso a ensaios de azul de metileno para determinação da percentagem de partículas contaminantes no sub-balastro, constatou-se que nos agulhados de 320 e 400g/m<sup>2</sup> a percentagem de partículas contaminantes era de 18 e 10%, respetivamente; os valores verificados para os termoligados eram inferiores, de 4 a 8%, no entanto são uma consequência da sua total colmatação, transformando-se numa barreira impermeável.

De acordo com M. L. Lopes (2009) citando Nancey et al. (2002), utilizando o mesmo equipamento, mas geotêxteis com especificações conforme as de Raymond (1999) para caminhos de ferro Norte Americanos, no contexto dos caminhos de ferro Franceses e Europeus, os autores consideraram uma duração de carregamento, que variou entre 20h (em condições secas e saturadas), e 80, 120, e 200h para condições secas. As principais conclusões que se retiraram foram as seguintes:

- Às 20h, para condições saturadas, era visível uma grande quantidade de finos (esta conclusão está de acordo com a de Faure and Imbert (1996);
- Relativamente à permeabilidade normal dos geotêxteis, verificou-se um ligeiro decréscimo, para níveis aceitáveis, não se tendo verificado a ocorrência de colmatação;
- A transmissividade do geotêxtil sofreu um pequeno decréscimo inicial, mantendo-se na restante duração do carregamento com um valor sensivelmente constante.

De acordo com M. L. Lopes (2009), as principais conclusões que se pode retirar relativamente ao desempenho de geotêxteis nas funções de separação e filtragem/drenagem em vias-férreas são:

- Os níveis de contaminação, para solos de fundação granulares, estão relacionados com a razão dimensão das partículas de solo/dimensão característica dos poros do geotêxtil;
- As elevadas taxas de dissipação de pressões intersticiais estão associados elevados níveis de contaminação;
- Os solos de fundação com coesão e elevada percentagem de finos apresentam maior potencial para a contaminação das camadas subjacentes;
- Os geotêxteis não tecidos agulhados são, de entre os analisados, os que melhor desempenho a longo prazo apresentam em termos de controlo da contaminação;
- Uma maior m.u.a. e espessura dos geotêxteis não tecidos garantem um melhor desempenho no controlo do fenómeno de contaminação do balastro e sobrevivência a fenómenos de danificação;

- Condições deficientes de drenagem têm, inevitavelmente, associadas elevados níveis de contaminação.

### **3.5. Síntese**

Para a escolha do geossintético a aplicar em vias-férreas tem que se ter em atenção, não só as funções para o qual este deve ser dimensionado mas também as propriedades dos materiais adjacentes (balastro, sub-balastro e/ou camada de fundação), como por exemplo a sua granulometria, e as ações cíclicas a que estes materiais podem vir a ser submetidos. Este estudo é necessário para averiguar a viabilidade do uso de determinado geossintético, de forma a avaliar a necessidade e funcionalidade da sua aplicabilidade, tendo em conta o tempo de vida útil desejado.

Como é fácil de compreender, a durabilidade não depende só e unicamente da constituição e comportamento do balastro e sub-balastro e do carregamento cíclico a que é submetido ao longo do tempo. A sua durabilidade varia, também, de acordo com a constituição da plataforma, a existência de mecanismos e agentes com que o material pode estar em contacto possíveis de acelerar a sua degradação, e até com os processos e condições de instalação dos geossintéticos na obra.

## **4. DURABILIDADE DOS GEOSINTÉTICOS**

### **4.1. Introdução**

Como se referiu atrás, a durabilidade dos geossintéticos, para além da constituição e comportamento das camadas que se encontram sub e sobrejacente, e a todo o material e carregamentos que se encontram acima do geossintético, depende, também de outros agentes e mecanismos que podem acelerar a sua degradação ao longo do tempo e dos processos e cuidados a ter na instalação dos geossintéticos em obra.

Neste capítulo faz-se uma breve descrição destes agentes, mecanismos e processos nocivos, capazes de alterar as propriedades dos geossintéticos e reduzir o seu tempo de vida útil. Os vários agentes e mecanismos podem atuar de forma simultânea, podendo englobar efeitos associados à aplicação em obra dos geossintéticos. Após uma descrição mais detalhada dos aspetos relativos à durabilidade dos geossintéticos, nas secções seguintes descrevem-se os agentes e mecanismos que afetam a durabilidade dos geossintéticos.

### **4.2. Durabilidade**

Segundo Brown and Greenwood (2002) citados por Pinho-Lopes and Lopes (2010), a durabilidade cobre todos os aspetos 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 aspetos relativos a ações dinâmicas. Quando se dimensiona um geossintético tem que se ter em atenção as condições que podem afetar as propriedades deste material durante o seu tempo de vida útil de forma a assegurar a sua durabilidade durante esse tempo. Sendo assim, a necessidade de substituição e manutenção deste material é reduzida. Por outras palavras, é sempre necessário assegurar a durabilidade destes materiais. Para isso recorre-se à adoção de critérios de sobrevivência para que seja assegurada a resistência dos geossintéticos aos processos de degradação que vão ocorrendo ao longo do tempo.

Segundo Pinho-Lopes and Lopes (2010) a avaliação da durabilidade passa pelas seguintes fases:

- Identificar a aplicação dos materiais e as funções associadas;
- Identificar as propriedades funcionais dos geossintéticos;
- Analisar quais os agentes de degradação que, ao longo do tempo de vida útil do geossintético, podem conduzir a alterações dessas propriedades;
- Realizar ensaios de durabilidade, sob condições reais ou através de simulações, podendo ainda recorrer-se a ensaios acelerados, caso sejam válidos;
- Avaliar os efeitos sinérgicos entre os diferentes agentes e mecanismos de degradação relevantes para a aplicação em causa;
- Definir os valores para os coeficientes de segurança parciais a aplicar no dimensionamento dos geossintéticos, de forma a garantir um determinado grau de confiança na estimativa do tempo de vida útil destes materiais, ou de valores das suas propriedades no fim do tempo de vida útil previamente estabelecido.

### 4.3. Agentes e mecanismos de degradação

A durabilidade de um geossintético depende muito da composição do polímero-base e dos aditivos presentes no geossintético. Tendo em atenção que os polímeros são cadeias moleculares, e de acordo com Pinho-Lopes and Lopes (2010), estas podem ser atacadas por oxidação, por agentes químicos, cargas aplicadas ou por agentes biológicos. Estes agentes levam à diminuição da resistência do material.

O calor e a temperatura aceleram o efeito da maioria dos agentes de degradação, podendo conduzir, também, à expansão térmica e, quando a temperatura é muito elevada, pode levar à decomposição dos polímeros [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

Segundo Crawford (1998) citado por Pinho-Lopes and Lopes (2010), pode ocorrer, também, a oxidação de plásticos que pode ser causada pelo contacto com ácidos oxidantes, exposição a radiação UV, temperaturas elevadas, ou exposição aos agentes atmosféricos. Esta é acelerada quando o geossintético está sujeito a elevadas temperaturas (termo-oxidação), luz (foto-oxidação), radiação de ionização (rádio-oxidação), agentes gasosos e líquidos e à presença de metais de transição.

A foto-oxidação está presente devido ao seu possível contacto com radiações UV, levando à deterioração das propriedades químicas do material, como por exemplo fragilização, descoloração e perda de transparência.

Alguns agentes químicos, como vários líquidos e gases químicos, podem entrar em contacto com o geossintético podendo conduzir à sua dilatação e redução de rigidez e resistência. Podem provocar lixiviação e levar à inatividade de alguns dos seus constituintes, como por exemplo aditivos, deixando os geossintéticos mais vulneráveis aos agentes de degradação [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

Também pode ocorrer fenómenos como a hidrólise. De acordo com Pinho-Lopes and Lopes (2010) a água, principal agente deste tipo de degradação, ataca os grupos laterais das cadeias moleculares e as cadeias principais levando à rotura das cadeias. Há diminuição das propriedades mecânicas dos polímeros [(M. L. C. Lopes, 1992) e (Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

Quanto aos agentes biológicos, como por exemplo os microrganismos, estes podem ser encontrados em condições ambientais distintas. Apenas aparecem se houver alguma fonte de carbono [(Elias, 2000) e (Pinho-Lopes & Lopes, 2010)]. Estes agentes podem ser fungos, bactérias, cogumelos parasitas, algas e leveduras. Também são agentes biológicos animais como roedores e térmitas. Estes provocam perfurações e aberturas do material dando origem a concentração de tensões.

O maior problema que surge na presença de fogo é o calor que pode ser produzido [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

As tensões e as ações mecânicas exercidas sobre os geossintéticos também podem degradar o material. Estão presentes quando os geossintéticos são sujeitos à fadiga, fluência, relaxação de tensões, rigidificação e abrasão devido a cargas estáticas, dinâmicas, de abrasão ou desgaste. A fendilhação de tração devida a agentes ambientais resulta da conjugação de ações mecânicas com a presença de determinados fluidos que, atuando de forma isolada, não teriam grandes consequências para os materiais [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

Mais à frente (em 4.4.) algumas questões relativas à abrasão são detalhadas, devido à sua importância para este trabalho.

Quando o geossintético está submetido a cargas estáticas que provocam deformações, ou seja, à fluência, pode danificar-se podendo resultar na sua rotura.

Nas cargas dinâmicas ainda se incluem a fadiga, cargas iminentes e o desgaste. A fadiga ocorre devido ao facto de o geossintético ser submetido a cargas cíclicas durante um período de tempo significativo. Em geral estas cargas são menores do que a resistência do material.

Quanto à aplicação em vias-férreas, ao longo do tempo de vida útil dos geossintéticos e segundo alguns ensaios laboratoriais, quanto maior for a profundidade a que estes materiais são colocados, menor é o seu contacto com as tensões cíclicas verticais. Relativamente às tensões cíclicas horizontais, estas encontram-se maioritariamente presentes quando existem imperfeições no alinhamento da superestrutura, isto é, nos constituintes que contactam diretamente com o material circulante [(F. B. Indraratna, Nimbalkar, Christie, Rujikiatkamjorn, & Vinod, 2010)].

#### **4.4. Abrasão**

De acordo com Pinho-Lopes and Lopes (2010), a abrasão consiste na perda de material de uma superfície devido a forças friccionais, resultando do contacto entre duas superfícies.

É o resultado de ações cíclicas em que existe movimento relativo entre o geossintético e o solo que está em contacto com este, sendo este solo o material abrasivo. Este mecanismo pode ocorrer, por exemplo, na aplicação de geossintéticos em revestimentos de canais, proteção costeira em que existe movimento de sedimentos junto ao geossintético, deposição de resíduos sobre os geossintéticos instalados em aterros de resíduos e em aplicações em vias-férreas ou rodoviárias.

Segundo Shukla (2002) citado por Rosete (2010), a resistência à abrasão é avaliada de acordo com a perda percentual de massa ou resistência/extensão residual conforme ensaios sob condições especiais. Pinto (2005) e Rosete (2010) referem que este mecanismo é importante em aplicações ferroviárias sobretudo, quando se aplicam sob as camadas de balastro, uma vez que as partículas do balastro por ação das cargas cíclicas tendem a ter pequenos mas continuados deslocamentos.

A resistência à abrasão é a resistência ao desgaste resultante de ações mecânicas na superfície do material. Segundo Pinho-Lopes and Lopes (2010) os principais fatores envolvidos na rotura por desgaste são o aparecimento de cortes, a fadiga e o atrito.

Existem três tipos de desgaste: desgaste abrasivo, desgaste de fadiga e desgaste de abrasão (Brown and Greenwood (2002) citados por Pinho-Lopes and Lopes (2010)), sendo o de maior importância para este trabalho o desgaste abrasivo, já que os geossintéticos são aplicados sob as camadas do balastro e os materiais estão sob esta ação durante todo o tempo e vida útil.

Os principais processos de abrasão ocorridos nos geotêxteis tecidos são a desagregação superficial, a separação e corte, enquanto nos geotêxteis não tecidos são verificados a desagregação superficial, achatamento, e corte [(Van Dine, 1982) e (Rosete, 2010)]. O desgaste abrasivo é provocado por asperezas aguçadas que cortam o plástico [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

A profundidade de colocação do geotêxtil também vai influenciar a abrasão sofrida. Quanto maior for a profundidade de colocação, menor será a danificação sofrida por abrasão, devido às menores tensões a que o material está sujeito [(Pinto, 2005) e (Rosete, 2010)].

De acordo com Van Dine (1982), citado por Pinto (2005) e Rosete (2010), existem vários processos de abrasão:

- Alinhamento: em que filamentos de geotêxteis, previamente não alinhados, tendem a ficar alinhados numa direção preferencial;
- Nódulos: em que filamentos individuais são parcialmente desagregados da estrutura, formando pequenos nódulos;
- Corte: em que filamentos individuais são primeiramente quebrados e depois cortados na direção transversal do filamento;
- Achatamento: em que a espessura de filamentos individuais é reduzida, enquanto a sua largura é aumentada, produzindo achatamento;
- Desagregação superficial: em que os filamentos superficiais são total, ou parcialmente, desagregados da estrutura que compõe o geotêxtil;
- Perfuração: em que os filamentos individuais sofrem desgaste por vários processos, desenvolvendo-se uma abertura no geotêxtil;
- Separação: onde os filamentos individuais separam-se da estrutura e que está limitada a geotêxteis não tecidos.

Deve-se ter em atenção os processos de abrasão descritos podem surgir de forma simultânea ou isoladamente. Antes da colocação do geossintético no local é importante estudar, através de ensaios, todos os agentes e mecanismos relevantes e eventuais efeitos sinérgicos entre eles, de forma a avaliar as condições de degradação que o material pode sofrer ao longo do tempo.

#### **4.5. Danificação durante a sua instalação em obra**

A danificação durante a instalação em obra (DDI) dos geossintéticos pode incluir, para além das suas condições de instalação, as operações de armazenamento e transporte associadas.

A fase de transporte, armazenamento e instalação em obra é importante para que o geossintético mantenha a sua funcionalidade ao longo do tempo.

Segundo Koerner (1998), as ações decorrentes dos processos de DDI são mais significativas do que as solicitações de serviço, consideradas no dimensionamento [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

Braeu (1998) refere que em alguns casos as maiores tensões a que um geossintético está sujeito surgem durante a fase de instalação, podendo originar perdas de resistência, abrasão, diminuição de espessura, cortes nas fibras, abertura, ou desintegração total dos geossintéticos ao longo de uma determinada área [(Pinho-Lopes & Lopes, 2010)].

Desta forma, a danificação durante a instalação em obra (DDI) pode ocorrer devido a operações como remoção do solo, preparação da superfície, manuseamento e colocação do geossintético, espalhamento e compactação do material confinante, ou por outras razões, como por exemplo, a sua colocação ser realizada por trabalhadores inexperientes. Também é necessário ter em atenção ao seu manuseamento durante o transporte e armazenamento. Os maus procedimentos durante estas fases podem resultar em defeitos locais, alteração das propriedades ou até, por vezes, perda de funcionalidade.

#### 4.5.1. Fatores que influenciam a DDI

De uma forma geral, para evitar a DDI, deve-se escolher um geossintético mais robusto ou de maior espessura e adequar as técnicas de instalação do mesmo e de construção utilizadas durante a obra [Pinho-Lopes (2006)].

De acordo com Pinho-Lopes and Lopes (2010) os fatores que influenciam a DDI dependem, sobretudo de:

- Tipo de geossintético: de acordo com Allen and Bathurst (1994), os que possuem menor massa por unidade de área (m.u.a.) possuem menor resistência do que os materiais com maior m.u.a..
- Material em contacto com o geossintético: em relação à influência do tipo de solo, há que ter em atenção a distribuição granulométrica do material de aterro, a angulosidade que a superfície das partículas de solo apresenta e a dureza das mesmas.
- Condições de instalação em obra: dependem do tipo e peso do equipamento para espalhar o solo e para a sua compactação, da espessura inicial da camada de solo e da altura de queda do material granular. A danificação do geossintético é maior quanto mais pesados e maior tempo permanecerem os equipamentos acima do material de aterro, quanto menor for a espessura da camada de aterro inicial e quanto maior for a altura de queda do material de aterro, isto é, quanto maior for o impacto no contacto do material de aterro com o geossintético.

#### 4.5.2. Consequências da DDI

A danificação resultante das obras de instalação dos geossintéticos é sobretudo mecânica. Segundo Pinho-Lopes and Lopes (2010), durante a sua instalação em obra podem ocorrer fenómenos de abrasão, aparecimento de fendas e separação de material (“splitting”), punçoamento, rotura em tensão, corte de fibras e até rasgamento de geossintéticos.

##### 4.5.2.1. Abrasão

Segundo Watn and Chew (2002) citados por Pinho-Lopes and Lopes (2010) a abrasão pode ocorrer com qualquer tipo de geossintéticos, sendo os geotêxteis não tecidos agulhados mais sensíveis a este mecanismo. Também a angulosidade e tamanho das partículas do solo que se encontra em contacto com o geossintético tem elevada importância, sendo mais gravoso nos casos em que o solo possui maior angulosidade e menor tamanho. O mecanismo em causa, durante a instalação em obra do geossintético ocorre aquando o espalhamento e compactação do aterro que se encontra superiormente ao geossintético, devido não só às características do solo mas também à circulação e tipo de equipamentos utilizados. Também pode-se desenvolver ao longo do tempo, em serviço, devido às cargas cíclicas provocadas pela circulação em vias-férreas. Da abrasão resultam redução de espessura do geossintético, alteração das propriedades hidráulicas do material, podendo ocorrer destruição total de uma determinada área do geossintético.

##### 4.5.2.2. Aparecimento de fendas e separação de material (“splitting”)

Este fenómeno ocorre quando há contacto entre partículas angulosas e de faces cortantes que constituem o material de aterro com o geossintético enquanto são submetidos a cargas devidas à circulação de equipamentos de construção. De acordo com Watn and Chew (2002) citados Pinho-Lopes and Lopes (2010),

Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

os geossintéticos mais sensíveis a este fenómeno são as geogrelhas extrudidas. Este mecanismo pode levar à redução das propriedades mecânicas devido ao aparecimento de fendas no material e a sua separação.

#### **4.5.2.3. Punçoamento**

O punçoamento ocorre quando materiais de aterro com faces cortantes são vertidos diretamente sobre o geossintéticos ou quando se compactam camadas finas de material de aterro com equipamento de compactação pesado. É mais gravoso em materiais como geotêxteis, geomembranas e em barras de geogrelhas podendo provocar cavidades e até aberturas em toda a espessura do geossintético.

#### **4.5.2.4. Rotura em tensão**

A rotura em tensão pode acontecer quando o material é submetido a cargas e deformações excessivas na fase de serviço, ou durante a sua instalação em obra devido à circulação de equipamento pesado sobre as camadas finas de material que cobre o geossintético, colocado sobre o material mole. O geossintético deforma-se em conjunto com a camada de fundação, e se este material não for suficientemente flexível pode romper.

#### **4.5.2.5. Corte de fibras**

O corte de fibras aparece quando o material que se encontra em contacto com o geossintético tem faces cortantes e esta assenta numa camada mais rígida.

De acordo com Watn and Chew (2002) citados por Pinho-Lopes and Lopes (2010) este dano ocorre sobretudo em geotêxteis tecidos, em geogrelhas e fitas de reforço.

#### **4.5.2.6. Rasgamento**

O rasgamento dá-se quando, em fase de instalação em obra, já existe alguma danificação inicial devida, por exemplo, ao corte de fibras ou rotura em tensão. Segundo Watn and Chew (2002) citados por Pinho-Lopes and Lopes (2010), os materiais mais sensíveis são os geotêxteis não tecidos submetidos a concentrações de tensões por ação de partículas de faces cortantes do material de aterro.

### **4.5.3. Formas de minimizar a DDI**

#### **4.5.3.1. Armazenamento**

Os geossintéticos, antes da sua utilização, devem ser armazenados em locais cobertos de forma a não entrarem em contacto com as radiações ultra-violeta e com os agentes atmosféricos, como a água. Devem estar em locais secos de forma a evitar que a água altere as suas propriedades funcionais e não contribua para o desenvolvimento de outros danos associados à humidade. Também não devem estar sujeitos a temperaturas elevadas. Esses locais também devem ser fechados e limpos para não permitir a interação entre o material e agentes biológicos, como fungos, bactérias e até de animais roedores, e agentes químicos, tendo em atenção, também, que os geossintéticos podem sofrer oxidação. A superfície que contacta diretamente com estes materiais, durante o seu armazenamento, deve ser plana e lisa, e estar limpa de forma a evitar a formação de perfurações e aberturas que podem dar origem a concentrações de tensões.

#### **4.5.3.2. Transporte**

Durante o seu transporte, os geossintéticos devem continuar a ser assentes numa superfície semelhante à utilizada durante o seu armazenamento, já descrita. Devem ser cobertos por uma lona de forma a evitar o contacto destes materiais com os agentes atmosféricos. Não devem ser transportados em dias de precipitação de forma a evitar o contacto da água com os geossintéticos quando não se encontram protegidos por plásticos. As cintas utilizadas para garantir a segurança dos geossintéticos (para permitir a estabilidade destes durante a viagem) e da lona devem ser ajustadas de forma a não danificar estes materiais, isto é, de forma a não provocarem concentrações de tensões.

#### **4.5.3.3. Colocação**

Segundo T. S. Ingold and Miller (1988) citados por Pinho-Lopes and Lopes (2010), não deve circular tráfego sobre os geossintéticos enquanto não existir uma camada adequada de aterro acima destes materiais, que lhes confira proteção. Os equipamentos ou partes destes, como baldes e lâminas, não podem entrar diretamente em contacto com os geossintéticos.

De acordo com Pinho-Lopes and Lopes (2010) é importante que os cadernos de encargos das obras que incluem geossintéticos possuam descrições e instruções detalhadas referidas à instalação destes materiais.

De seguida apresentam-se algumas dessas instruções:

- A superfície sobre a qual os geossintéticos são instalados deve ser lisa e plana, sem lixos, raízes ou materiais pontiagudos. Desta forma, o primeiro trabalho a efetuar será preparar esta superfície;
- De seguida o geossintético é desenrolado de maneira a que não seja pisado pelos trabalhadores;
- Realizam-se as ligações entre troços de materiais de forma adequada, sendo estas executadas por sobreposição, costura ou outro processo;
- O material confinante é colocado sobre o geossintético de forma a que a espessura do aterro não seja inferior a 150 mm, para que se possa permitir a passagem de tráfego;
- Deve-se fazer a compactação do material de aterro de forma adequada.

### **4.6. Síntese**

Existem mecanismos ou agentes que podem não levar, de forma direta, à degradação do geossintético, mas podem contribuir para a sua deterioração quando combinados com outros agentes. São exemplos o calor e a humidade, possivelmente provenientes das condições atmosféricas ou presença de fogo nas proximidades. Estes dois agentes são capazes de levar à decomposição dos polímeros, tornando-os mais vulneráveis à ação de outros agentes ou mecanismos de degradação como por exemplo a oxidação e hidrólise. As tensões e ações mecânicas estão relacionadas com o carregamento a que o geossintético é submetido ao longo do tempo, podendo ser cargas estáticas, dinâmicas, de abrasão ou desgaste. Desta forma, o comportamento do geossintético reflete, para além do tipo de carregamento, o estado e tipo de tensões a que esteve submetido: fadiga, fluência, relaxação de tensões, rigidificação e abrasão.

Também é necessário ter em atenção o comportamento do balastro ao longo do tempo para se poder aumentar os intervalos de tempo entre os seus períodos de manutenção. O balastro deve ser de boa qualidade,

e durante esses períodos de intervenção, deve ser limpo de forma a remover-se os resíduos existentes ou nalguns casos ser substituído [(Lim, 2004)].

É necessário ter em consideração a importância da abrasão ao longo deste trabalho. Esta importância é devida ao facto de todos os constituintes das vias-férreas serem sujeitos a cargas cíclicas durante todo o seu tempo de vida útil, que levam à separação, corte ou achatamento das fibras.

Muitas vezes a ação de degradação dos agentes e mecanismos apresentados anteriormente só vem agravar o estado de deterioração apresentado pelos geossintéticos após as ações de armazenamento, transporte e colocação na obra, uma vez que durante estas três fases estes materiais podem sofrer perda de resistência, diminuição de espessura, cortes nas fibras e até aberturas. Quando se escolhe o geossintético a utilizar, é necessário ter em consideração as características dos materiais que se encontram em contacto com o geossintético, todas as ações a que pode ser submetido durante a sua fase de serviço, e durante a sua instalação tendo em atenção a possível inexperiência, falta de cuidados dos trabalhadores e má utilização e escolha de equipamentos de construção, mesmo sendo óbvio que é necessário aplicar as práticas de instalação dos geossintéticos em obra mais corretas.

A abrasão também pode ocorrer durante a fase de instalação do geossintético na obra, durante o espalhamento e compactação do material de aterro que se encontra superiormente ao material, funcionando as partículas desse aterro que se encontram em contacto com o geossintético como o material abrasivo. Da abrasão durante a instalação em obra do material podem resultar redução de espessura do geossintético, alteração das propriedades hidráulicas do material e até destruição total de uma determinada área do geossintético. É necessário ter em atenção que os geossintéticos podem-se degradar devido a outros mecanismos levando ao aparecimento de falhas, separação do material, aberturas ao longo de toda a espessura do geossintético e até cortes nas fibras. Por isso é necessário prever a sinergia que pode existir dos agentes de degradação, não só durante a fase de serviço, mas também durante a fase de armazenamento, transporte e colocação em obra do geossintético, e o resultado de todas essas intervenções nas propriedades funcionais do geossintético ao longo do tempo. Este estudo é realizado durante a fase de dimensionamento e escolha do geossintético a utilizar, de maneira a possuir um tempo de vida útil mais prolongado.

## 5. ENSAIOS LABORATORIAIS

### 5.1. Considerações iniciais

No presente capítulo são apresentados todos os procedimentos utilizados ao longo dos estudos práticos elaborados, para atingir os objetivos da dissertação.

Pretendia-se estudar a influência no comportamento dos geossintéticos, quanto à sua capacidade de drenagem de água, de fenómenos de abrasão ou devidos à instalação dos mesmos em obra e combinação dos dois.

Para realizar este estudo, recorreu-se aos equipamentos do Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Nos ensaios, utilizaram-se sobretudo, os procedimentos experimentais que se encontram descritos nas seguintes normas:

- NP EN ISO 12958:2005 – “Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano”;
- ISO/FDIS 11058 – “Geotextiles and geotextile-related products – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load”;
- ISO/FDIS 10722:2007 – “Geosynthetics – Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material”;
- NP EN ISO 13427:2006 – “Geotêxteis e produtos relacionados – Simulação do dano por abrasão (ensaio do bloco deslizante)”.

De modo a compreender-se melhor a sequência dos ensaios realizados e o número de provetes utilizados, na Figura 5. 1. apresenta-se um esquema do plano de ensaios realizado. Na Figura 5. 1. indica-se o número mínimo de provetes a ensaiar, em alguns casos foram repetidos alguns ensaios para aumentar a representatividade estatística dos mesmos. As razões para as diferenças observadas podem estar relacionadas com algumas características dos provetes, mas também com as condições de ensaio. Na Tabela 5. 1. encontra-se o número total de provetes ensaiados.

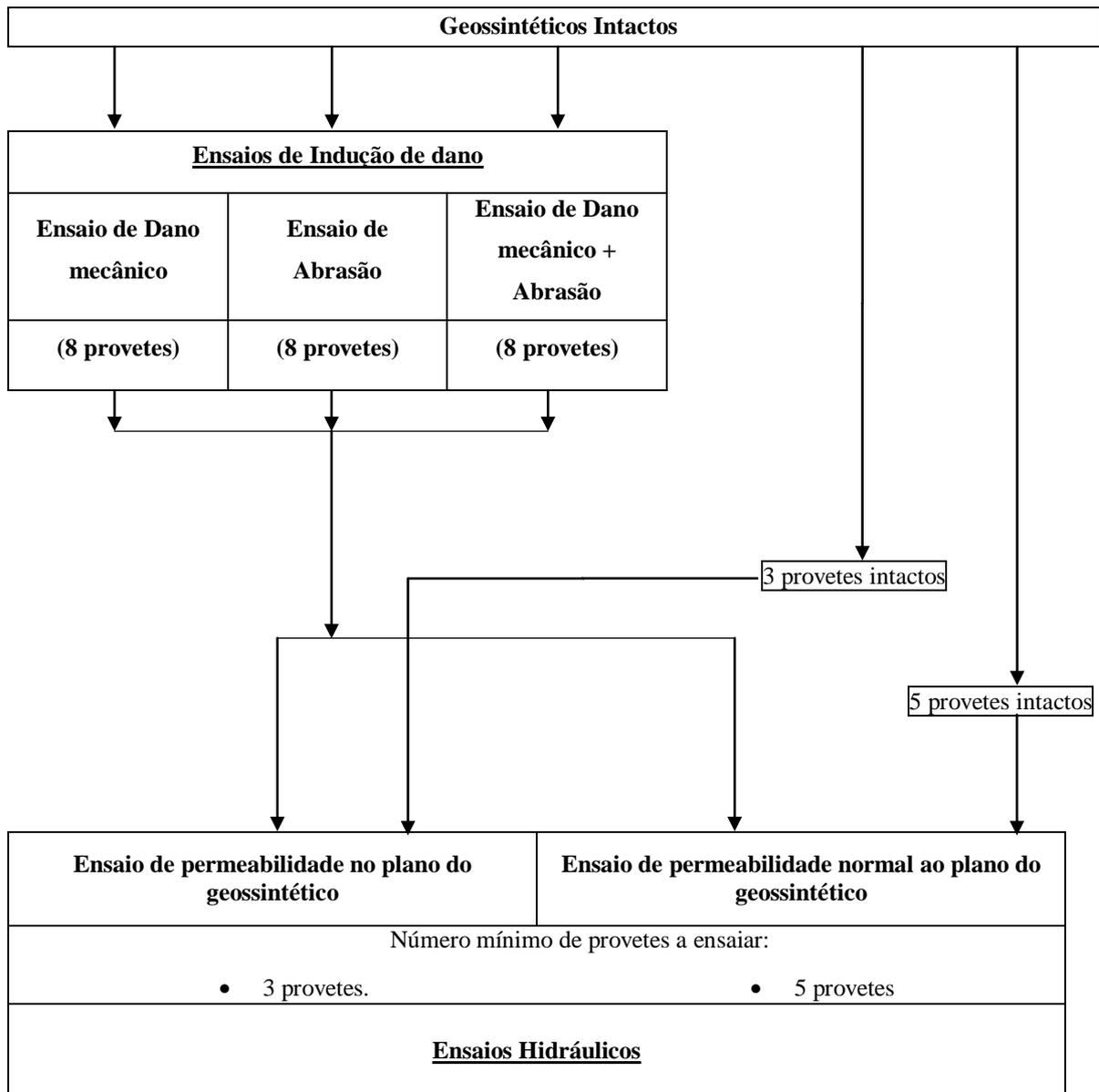


Figura 5. 1: Esquema com os ensaios realizados, a sua sequência e número mínimo de provetes

Como referido, repetiram-se alguns ensaios. Esta necessidade foi devida, também, por nem todos os provetes danificados, mesmo após serem solicitados ao mesmo ensaio de indução de dano, apresentarem danos com a mesma gravidade. Esta questão é mais detalhada no capítulo 6. Na Tabela 5. 1. encontra-se indicado o número total de provetes ensaiados para tipo de ensaio hidráulico.

Tabela 5. 1: Número total de provetes ensaiados para cada tipo de ensaios hidráulicos

<b>Ensaio Hidráulico</b>	
<b>Permeabilidade no plano do geossintético</b>	<b>Permeabilidade normal ao plano do geossintético</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 provetes intactos;</li> <li>• 4 provetes após ensaio de dano mecânico;</li> <li>• 3 provetes após ensaio de abrasão;</li> <li>• 4 provetes após ensaio de dano mecânico + abrasão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 9 provetes intactos;</li> <li>• 6 provetes após ensaio de dano mecânico;</li> <li>• 7 provetes após ensaio de abrasão;</li> <li>• 5 provetes após ensaio de dano mecânico + abrasão.</li> </ul>

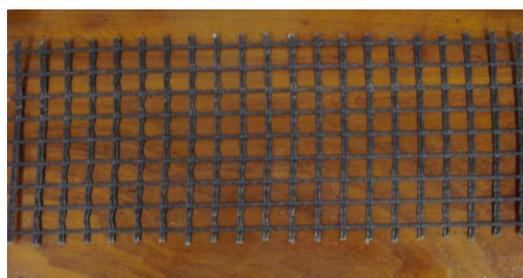
Nos subcapítulos seguintes apresentam-se todas as etapas necessárias para a realização dos ensaios efetuados. Inicialmente apresenta-se e descreve-se o procedimento dos ensaios hidráulicos, seguindo-se o procedimento dos ensaios de indução de dano.

## 5.2. Geossintéticos utilizados

Neste trabalho utilizaram-se dois materiais diferentes (Figura 5. 2.) simultaneamente, sobrepondo diretamente um ao outro: um geotêxtil (GTX) e uma geogrelha tecida (GGR).



a)



b)

Figura 5. 2: Materiais utilizados: a) GTX; b) GGR

Desta forma, este estudo foi realizado para uma única combinação, em que a geogrelha (GGR) se encontrava superiormente ao geotêxtil (GTX) (Figura 5. 3.) na direção de fabrico dos geossintéticos.



Figura 5. 3: Combinação dos dois geossintéticos considerados

O geotêxtil (GTX) observado na Figura 5. 2. a) é constituído por filamentos contínuos de polipropileno (PP). De acordo com a ficha técnica do produtor, este material pode ter funções de proteção e drenagem.

A geogrelha (GGR) que se encontra na Figura 5. 2. b) é biaxial e é constituída por fibras de poliéster e um revestimento polimérico de proteção. De acordo com o produtor, este material tem sobretudo funções de estabilização do subleito e de base de aplicações de reforço.

Na Tabela 5. 2. apresentam-se os valores nominais das principais propriedades do GTX e da GGR.

Tabela 5. 2: Propriedades de GTX e GGR

Propriedades	Geossintéticos		Unidades	Normas
	GTX	GGR		
Massa por unidade de área	1000	-	g/m <sup>2</sup>	EN ISO 9864
Resistência à tração	55	58	kN/m	EN ISO 10319
Extensão na rotura	105	10,5	%	EN ISO 10319
Resistência à deformação de 2 %	-	10	kN/m	EN ISO 10319
Resistência à deformação de 3 %	-	13	kN/m	EN ISO 10319
Resistência à deformação de 5 %	-	17	kN/m	EN ISO 10319
Resistência à deformação de 10 %	14	-	kN/m	EN ISO 10319
Capacidade de escoamento no plano (20 kPa)	$11 \times 10^{-6}$	-	m <sup>2</sup> /s	EN ISO 12958
Capacidade de escoamento no plano (100 kPa)	$4,1 \times 10^{-6}$	-	m <sup>2</sup> /s	EN ISO 12958
Capacidade de escoamento normal ao plano ( $\Delta h = 50$ mm)	8	-	l/m <sup>2</sup> s (mm/s)	EN ISO 11058

### 5.2.1. Principais cuidados a ter antes e ao longo de qualquer ensaio

A seguir apresentam-se alguns cuidados que se devem ter com os provetes antes e durante qualquer ensaio de acordo com as normas referidas em 5.1.:

- Os provetes devem ser manuseados o mínimo possível e não devem ser dobrados para evitar alterações na sua estrutura. Devem ser mantidos numa posição plana e sem qualquer carga;
- Devem apresentar-se limpos, sem quaisquer depósitos na sua superfície e sem danos visíveis ou marcas de terem sido dobrados.

### 5.3. Ensaio hidráulicos

Neste subcapítulo apresenta-se o procedimento de cada ensaio hidráulico realizado, assim como a descrição dos equipamentos e aparelhos utilizados, materiais, algumas características da água que se utilizou, e a descrição dos provetes a ensaiar fazendo referência ao aspeto visual geral dos mesmos. Procurou apresentar-se alguns cuidados a ter durante a realização dos ensaios. Os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos descritos nas normas em vigor (referidas em 5.1.).

Visto que o procedimento para a preparação dos provetes é igual para os dois ensaios, o mesmo é apresentado inicialmente. De seguida apresenta-se o procedimento do ensaio de permeabilidade no plano do geossintético, e depois o procedimento do ensaio de permeabilidade normal ao plano do geossintético.

#### 5.3.1. Preparação dos provetes para a realização dos ensaios hidráulicos

Antes de efetuar qualquer operação, deve-se medir a espessura de cada provete a ensaiar, secos, solicitados a uma pressão de 2 kPa. Para isso utilizou-se o equipamento que se encontra no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da FEUP (Figura 5. 4.).



Figura 5. 4: Preparação dos provetes para a realização dos ensaios hidráulicos – Equipamento que mede a espessura dos provetes enquanto se encontram secos

Também se retirou o valor da massa de cada provete recorrendo a uma balança com uma precisão de 1%. De seguida colocou-se os provetes imersos em água durante um período mínimo de 12 horas. Desta forma são eliminadas acumulações de ar que possam perturbar o escoamento da água através do geossintético e adulterar os resultados dos ensaios [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005) e (ISO/FDIS\_11058, 2009)].

#### 5.3.2. Ensaio de permeabilidade no plano do geossintético

##### 5.3.2.1. Introdução

A permeabilidade no plano de um geossintético consiste na capacidade de escoamento deste material ser atravessado por água ao longo do seu plano. De acordo com a norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005) a capacidade de escoamento no plano é definida como a velocidade de escoamento por unidade de largura do provete, para um determinado gradiente hidráulico e tensão de confinamento.

Desta forma, para a função de drenagem, a permeabilidade no plano do geossintético é uma característica importante, podendo ser definida por transmissividade quando se refere apenas às condições de escoamento em regime laminar, e equivale à capacidade de escoamento para um gradiente hidráulico unitário [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. O termo capacidade de escoamento é utilizado quando as condições de escoamento dão-se em regime não laminar [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. A capacidade de escoamento no plano pode possuir a terminologia de coeficiente hidráulico, possuindo, as duas expressões exatamente a mesma definição. A transmissividade pode ser obtida multiplicando-se o coeficiente de permeabilidade no plano ( $k_p$ , em m/s) pela espessura do geossintético (mm) [(Silva, 2010)]. De acordo com Oliveira (2011), o coeficiente de permeabilidade no plano não é mais do que um valor representativo da velocidade com que a água atravessa uma amostra de um geossintético.

O presente ensaio permite o estudo da capacidade de escoamento no plano de um geossintético. Para a realização deste ensaio recorreu-se à norma NP EN ISO 12958:2005 – “Geotêxteis e produtos relacionados – Determinação da capacidade de escoamento no seu plano”. Neste ensaio fazem-se medições do escoamento de água no plano do geossintético sob diferentes valores de tensão normal de compressão, gradientes hidráulicos e superfícies de contacto definidas [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)].

### 5.3.2.2. Equipamento e aparelhos utilizados

Na Figura 5. 5. ilustra-se o equipamento utilizado.



Figura 5. 5: Equipamento utilizado para o ensaio de determinação da capacidade de escoamento no plano de um geossintético

O equipamento possui dois reservatórios, um superior, que permite a alimentação ao sistema, e um inferior, que recolhe a água que atravessa o provete a ensaiar. O facto de os reservatórios se encontrarem a diferentes alturas leva a que a água circule do reservatório superior para o inferior por gravidade. No reservatório inferior existe uma bomba que permite o transporte de água do reservatório inferior para o superior. O controlo dessa bomba (Figura 5. 6.) é importante para que se mantenha um equilíbrio do circuito da água e não haja água a transbordar nem avarias na bomba [(Silva, 2010)].



Figura 5. 6: Ensaio de permeabilidade no plano – Equipamento de bombagem utilizado

Os constituintes mais importantes deste equipamento são uma prensa mecânica, um prato de carga e uma célula de carga.

A prensa mecânica é acionada por um motor elétrico de velocidade variável. Durante o ensaio é necessário aplicar tensões normais de compressão (tensões de confinamento) com o auxílio de um prato de carga, que se encontra associado uma célula de carga. O prato de carga possui uma largura de 0,2 m e um comprimento de 0,3 m. A célula de carga que se encontra no equipamento é limitada por uma força de 20 kN, força suficiente para a realização dos ensaios, uma vez que a força máxima utilizada durante a elaboração dos ensaios, segundo a norma, é de 12 kN. A alteração e controlo dos valores de tensão normal de compressão aplicados ao provete podem ser efetuados pelo operador, com recurso a um quadro elétrico (Figura 5. 7.).



Figura 5. 7: Ensaio de permeabilidade no plano – quadro elétrico que permite o controlo da tensão exercida no provete

Outros constituintes importantes deste equipamento são um tubo piezométrico a montante e outro a jusante do geossintético, e um descarregador de superfície a jusante. Também existe um aparelho que permite a medição da espessura do provete em qualquer altura do ensaio, enquanto este é submetido a diferentes tensões de confinamento e gradientes hidráulicos (Figura 5. 8.).



Figura 5. 8: Ensaio de permeabilidade no plano – tubo piezométrico a montante do geossintético, descarregador de superfície a jusante e aparelho que permite a medição da espessura do provete

O equipamento tem de ser estanque. Se a placa ou membrana de pressão aplicar a menor tensão normal de compressão (2 kPa ou 0,12 kN), sem o provete estar colocado, e se estiver instalado o gradiente hidráulico mais elevado (1,0 mm/mm), a fuga não deve ser superior a 0,2 ml/s [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. Segundo a norma, o equipamento deve ser capaz de manter o provete sujeito à tensão normal de compressão proposta, sem deformação que possa influenciar os resultados do ensaio.

À volta do prato de carga, nas suas imediações, existe uma ranhura que possui uma membrana de borracha. A existência da membrana de borracha (sob pressão) impede a existência de percolação da água entre o prato de carga e as paredes laterais do equipamento, e evita inundações na zona superior do prato de carga [(Silva, 2010)].

O controlo dos níveis de água a montante e a jusante é possível devido à existência de dois tubos piezométricos, que medem cargas hidráulicas. Um dos tubos elabora a medição anteriormente referida a montante do provete, e o outro a jusante. A entrada da água nos tubos piezométricos é realizada através de orifícios na lateral do equipamento, que se encontram à mesma cota. Desta forma é possível definir a perda de carga existente, através das diferenças de altura de água existente nos tubos, medidas numa régua que se encontra fixada ao equipamento [(Silva, 2010)]. A referida régua e tubos piezométricos encontram-se ilustrados na Figura 5. 9..

É necessário ter em atenção que os equipamentos necessários para a elaboração das medições do presente ensaio respeitam as características enunciadas na norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005). Utilizou-se uma balança com 1% de precisão, um termómetro com precisão de 0,2°C e o cronómetro possuía uma precisão de 0,1 s.



Figura 5. 9: Ensaio de permeabilidade no plano – a) Ilustração dos tubos piezométricos e régua que mede os níveis de água; b) Pormenor da ligação dos tubos piezométricos ao equipamento

### 5.3.2.3. Materiais

Durante a realização do ensaio, as superfícies de contacto com os provetes devem ser em espuma de borracha de células fechadas. Para provetes com espessuras até 10 mm, como é o caso, deve ser colocada em cada uma das suas faces uma placa de espuma de borracha de espessura nominal de 10 mm [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. Sendo assim, nos ensaios realizados, utilizou-se uma placa de espuma de borracha inferior e outra superiormente ao provete, ambas mantendo-se diretamente em contacto com o mesmo. As placas de espuma de borracha utilizadas foram placas de neoprene. Eram utilizadas as mesmas placas de neoprene uma vez por dia visto que era importante esperar que adquirissem as mesmas características, incluindo geométricas, que possuíam antes da realização do primeiro ensaio. Visto que em média ensaiaram-se 3 provetes por dia, as mesmas eram usadas de 3 em 3 ensaios. O facto de não se ter o cuidado referido anteriormente, pode influenciar os resultados finais. É necessário ter em atenção que nem todas as placas possuíam exatamente a mesma espessura, comprimento e largura entre as mesmas, apesar de, segundo a norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005), a largura das placas referidas anteriormente deve ser igual à da placa de carga, para todas as placas. Para além disso, os seus comprimentos deveriam ser normalmente os mesmos da placa de carga, mas para evitar obstruções na entrada e saída do provete, devido à compressão da espuma, pode-se reduzir o comprimento das placas em 0,4 vezes a sua espessura nominal [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. Na realidade, sucedeu-se que as placas possuíam aproximadamente o mesmo comprimento e largura definidos pela norma, mas umas tinham mais ou menos um ou dois milímetros das medidas previstas na norma, e entre as placas em questão.

### 5.3.2.4. Provetes

Como foi referido atrás, em cada ensaio devem ser utilizados 3 provetes com as seguintes dimensões: 0,3 m na direção do escoamento e 0,2 m na direção perpendicular. A preparação dos provetes para a realização do ensaio encontra-se em 5.3.1..

### 5.3.2.5. Água

A água a utilizar no ensaio não deve ser continuamente reciclada e deve ser filtrada quando forem visíveis a olho nu partículas em suspensão. As partículas em suspensão podem-se acumular sobre ou no interior do provete, reduzindo consequentemente o escoamento [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. O valor da temperatura da água deve ser registado aquando das leituras da massa do volume de água recolhido, da espessura do provete e das placas de neoprene.

### 5.3.2.6. Preparação do ensaio

Neste trabalho os provetes a ensaiar foram sempre colocados entre duas placas de neoprene, uma vez que a sua espessura é inferior a 10 mm. A espessura das placas de neoprene foi avaliada da mesma forma, enquanto se encontravam secas, e foram saturadas durante um período de tempo mínimo de 12 horas antes da realização do ensaio. Durante a preparação do ensaio, deve colocar-se uma placa de neoprene inferiormente ao provete e outra superiormente, como se ilustra na Figura 5. 10.. As placas possuem uma espessura de, aproximadamente 10 mm, de maneira a respeitar o procedimento indicado na norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005).

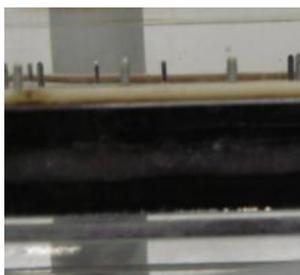


Figura 5. 10: Ensaio de permeabilidade no plano – posição das placas de neoprene no equipamento, tendo em conta o provete

Depois de saturados todos os elementos (placas de neoprene e provete), retira-se temporariamente a peça do descarregador que se situa a jusante no equipamento e procede-se à colocação do provete e das respetivas placas de neoprene no equipamento. Inicialmente começa-se por se colocar a placa de neoprene inferior, alinhada com o prato de carga. De seguida insere-se o provete sobre a primeira placa, fazendo coincidir as extremidades do provete com as extremidades da placa de neoprene, com o objetivo de evitar a obstrução da entrada e da saída de água do provete. Deve-se verificar o contacto entre as paredes laterais do equipamento e o provete e placas, de forma a evitar a criação de caminhos preferenciais de percolação. Instala-se a placa de neoprene superior e volta-se a colocar a peça do descarregador de água. Desce-se lentamente a placa de carga, com a finalidade de não deslocar a membrana de estanqueidade, por atrito com as paredes de estrutura. Na Figura 5. 11. é possível observar o descarregador de água.

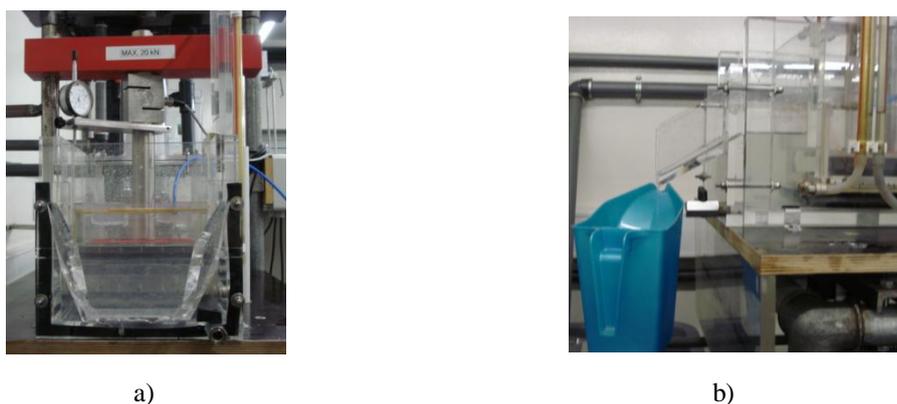


Figura 5. 11: Ensaio de permeabilidade no plano – descarregador: a) Vista frontal; b) Vista lateral

De seguida aplica-se uma tensão de 2 kPa (que para a dimensão dos provetes em causa corresponde a uma força de 0,12 kN) ao provete através do quadro elétrico e enche-se o reservatório de entrada de modo a que se produza um escoamento que percorra o provete e as placas e remova o ar [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. Nesta fase é importante avaliar a espessura do conjunto (provetes e placas de neoprene) sob a tensão referida (2 kPa).

Para garantir que o ensaio é realizado adequadamente deve procurar-se eliminar os caminhos preferenciais. Estes podem ocorrer devido à falta de estanquidade do equipamento onde vai ser colocado e ensaiado o provete e/ou à largura das placas de neoprene ser inferior (mesmo que ligeiramente) à do provete e da placa de carga.

### 5.3.2.7. Procedimento do ensaio laboratorial

Segundo a norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005), em cada ensaio, o comportamento do geossintético é estudado para três valores diferentes de tensão: 20 kPa, 100 kPa e 200 kPa, e, para cada um destes valores da tensão, devem ser usados dois valores de gradiente hidráulico: 0,1 mm/mm e 1,0 mm/mm. Para cada tensão e valor de gradiente hidráulico deve medir-se a massa do volume de água que atravessa o geossintético segundo o seu plano, a temperatura da mesma e o valor da espessura do somatório do provete com as placas de neoprene. De acordo com a norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005), o volume de água recolhido deve ser no mínimo 0,5 litros, e para materiais de elevado escoamento o tempo de recolha deve ser no mínimo 5 segundos. Deve-se ter em atenção que a norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005) também afirma para produtos com bastante baixa capacidade de escoamento, como é o caso, o tempo de recolha deve ser limitado a 600 segundos (10 minutos). Neste trabalho, para cada gradiente hidráulico foram realizadas três leituras, espaçadas de 10 minutos, uma vez que de uma forma geral os provetes eram materiais com bastante baixa capacidade de escoamento. Em escassos casos foram efetuadas leituras de 60 ou 300 segundos, uma vez que apresentavam um comportamento de um material com elevado escoamento.

De seguida apresentam-se as operações a realizar durante o procedimento do ensaio de forma mais pormenorizada. Depois de se aplicar uma tensão de 2 kPa e se verificar a inexistência de fugas e caminhos preferenciais da água, altera-se a tensão normal para o valor de 20 kPa e mantém-se esta tensão durante 360 segundos. No equipamento de ensaio enche-se o reservatório de água a montante do provete até atingir a cota

necessária para atingir o gradiente hidráulico desejado. Para um gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm essa cota é de 4 cm. A cota da água a jusante deve ser de 1 cm. De seguida é necessário manter o escoamento durante 120 segundos para que se possa estabilizar [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. Retira-se o valor da espessura do somatório do provete com as placas de neoprene. Recolhe-se a água, respeitando os períodos de tempo referidos anteriormente. Imediatamente a seguir à recolha da água, a sua massa é avaliada, com 1% de precisão, e a sua temperatura é medida, com precisão de 0,2°C. Nos ensaios realizados nesta fase foi novamente registado o valor da espessura do somatório do provete com as placas. Estes procedimentos são repetidos duas vezes, de forma a perfazer um total de três leituras de massa de água e temperatura, e posteriormente, determina-se um valor médio do volume de água recolhido. De seguida, ainda para a mesma tensão, altera-se o gradiente hidráulico para 1,0 mm/mm [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. Com este objetivo altera-se a cota da água no tubo piezométrico a montante do provete para 31 cm. Após estabilizar a água nesta cota, ou seja, após 120 segundos, podem realizar-se mais 3 leituras da massa do volume de água e temperatura.

Depois da realização destas três leituras abre-se a válvula de fundo do reservatório de montante de modo a que o nível de água desça novamente para a cota 4,0 cm, com o objetivo de se atingir o gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm. Altera-se a tensão para 100 kPa (6 kN) através do quadro elétrico. De acordo com a norma NP\_EN\_ISO\_12958 (2005), repete-se todo o procedimento para uma tensão de 100 kPa e de 200 kPa. Após se ensaiar o primeiro provete, repete-se a sequência das operações descritas anteriormente para os restantes provetes.

### **5.3.2.8. Outros cuidados a ter**

Note-se que a tensão aplicada no provete tem tendência a diminuir ao longo do tempo. Nesses casos é necessário repor a tensão antes de recolher a água para medir a sua massa. Esta diminuição é provocada pela adaptação do provete e das placas de neoprene à tensão normal instalada, conseqüente compressão e diminuição da espessura do provete e das placas.

Neste trabalho foi ainda necessário ter em atenção a largura da GGR. Esta deve ter, exatamente a mesma medida da largura do provete de GTX e da célula de carga, uma vez que, durante os ensaios, verificou-se que quando esta possuía uma largura ligeiramente superior à do GTX e da célula de carga, havia grande probabilidade de existirem fugas entre a GGR e a placa de neoprene superior ou entre a GGR e o GTX. Essas fugas ocorriam entre o provete de GTX+GGR e as placas de neoprene, e não ao longo das paredes laterais do equipamento e eram conseqüência da possível existência de espaços vazios nessas zonas devido à largura superior da GGR e esta não se situar completamente “esticada” segundo a direção da largura da célula de carga acima do GTX. Todas as fugas referidas são facilmente detetáveis quando se aplica a menor tensão normal de compressão (2 kPa) e/ou o maior gradiente hidráulico (1,0 mm/mm). Para os restantes valores de tensão normal e gradiente hidráulico este tipo de fugas é menos óbvio, sendo necessário prevenir a sua ocorrência.

Ao longo de todos os ensaios, no instante imediatamente antes da recolha de água e logo após cada recolha efetuou-se leituras da espessura do somatório das placas de neoprene e do provete.

### 5.3.3. Ensaio de permeabilidade normal ao plano do geossintético

#### 5.3.3.1. Introdução

O presente ensaio permite estudar a capacidade de escoamento do geossintético perpendicular ao seu plano. Por outras palavras, permite o estudo das velocidades da água que atravessa perpendicularmente o geossintético quando este é submetido a diferentes cargas hidráulicas ou perdas de carga.

O procedimento deste ensaio está presente na norma ISO/FDIS 11058 – “Geotextiles and geotextile-related – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load”. A norma ISO/FDIS\_11058 (2009) especifica dois métodos de ensaio: o método de carga constante e o método de carga variável. Neste trabalho foi utilizado o método de carga constante. Este método consiste, sobretudo, em estudar o comportamento de um geossintético quando este é atravessado por um fluxo de água unidirecional, com valores distintos e conhecidos de cargas hidráulicas constantes, segundo a direção normal ao plano do provete [(Oliveira, 2011)].

#### 5.3.3.2. Equipamento e aparelhos utilizados

O equipamento possui na sua constituição dois reservatórios que se situam a diferentes cotas em relação um ao outro, permitindo que a água circule do reservatório superior para o inferior por gravidade. Durante o circuito da água entre o reservatório superior e o inferior, esta atravessa o geossintético perpendicularmente ao plano do mesmo. Na Figura 5. 12. apresenta-se o equipamento usado para a elaboração do ensaio.



Figura 5. 12: Equipamento utilizado para a elaboração do ensaio de permeabilidade normal ao plano do geossintético

Também neste ensaio a água, após realizar o trajeto do reservatório superior para o inferior, é encaminhada novamente para o reservatório superior com o auxílio de um equipamento de bombagem. Sendo assim, o reservatório superior possui sempre água no seu interior, para que seja possível a realização de novos ensaios. Para que seja possível o controlo dos valores de perda de carga da água utilizam-se os tubos piezométricos que se apresentam na Figura 5. 13. a) e em que é medida a carga hidráulica a montante e a jusante do provete. Para possibilitar a alteração pelo operador dos valores de carga referidos anteriormente, é utilizado o sistema

movível ilustrado na Figura 5. 13. b). Este aparelho é constituído por duas escalas graduadas com intervalos de 5 mm para proporcionar uma medida precisa das cargas hidráulicas e das perdas de carga verificadas.

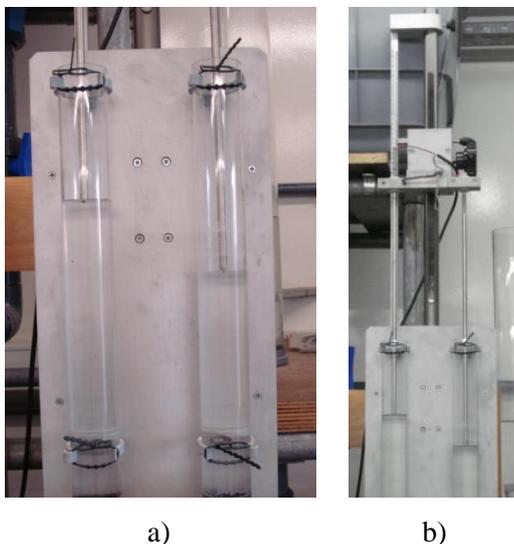


Figura 5. 13: Ensaio de permeabilidade normal ao plano – a) Tubos piezométricos que permitem controlar o valor de perda de carga da água; b) Sistema móvel e réguas graduadas que permitem o ajuste das cargas hidráulicas e identificação de perdas de carga

Para permitir a colocação e retirada do provete no equipamento, existe um o sistema de aperto do equipamento (Figura 5. 14.).

Superiormente ao provete, deve ser colocada uma grelha metálica que contacta diretamente com o geossintético. Esta grelha metálica possui o bordo em borracha na zona de contacto entre o geossintético e a base metálica. A sua principal função é assegurar que o provete seja atravessado pelo fluxo de água, sem que haja fugas de água para fora do alcance do provete. Com a introdução dessa grelha, apesar de o provete possuir um diâmetro de 131 mm, apenas a área do provete correspondente a 86 mm de diâmetro fica em contacto com o fluxo de água [(Oliveira, 2011)]. A presente grelha encontra-se ilustrada na Figura 5. 15., alínea b).



Figura 5. 14: Ensaio de permeabilidade normal ao plano – Sistema de aperto do equipamento

Os equipamentos necessários para as medições respeitam as características enunciadas na norma ISO/FDIS\_11058 (2009): balança com 1% de precisão, termómetro com precisão de 0,2°C e cronómetro com precisão de 0,1 s.

#### **5.3.3.3. Provetes**

De acordo com a norma ISO/FDIS\_11058 (2009), para cada tipo de geossintéticos com características distintas, sejam elas físicas, estruturais, ou mecânicas, é necessário ensaiar cinco provetes circulares com diâmetro de 131 mm. Estes devem ser preparados seguindo o procedimento descrito na secção 5.3.1..

#### **5.3.3.4. Água**

Quanto à água utilizada durante o ensaio, esta não deve ser continuamente reciclada [(ISO/FDIS\_11058, 2009)] e deve ser filtrada quando forem visíveis a olho nu partículas em suspensão. As partículas em suspensão podem-se acumular sobre ou no interior do provete, reduzindo consequentemente o escoamento.

#### **5.3.3.5. Preparação do ensaio**

Visto que durante o ensaio não podem existir bolhas de ar no sistema, aquando da preparação do equipamento a utilizar é necessário encher os reservatórios com água e esperar que a mesma repouse. Existe uma outra operação referida na norma ISO/FDIS\_11058 (2009) para verificar a existência ou não de bolhas de ar ao longo de todo o circuito da água no equipamento. Esta operação deve ser realizada após a instalação do provete no equipamento e consiste em provocar uma perda de carga de 50 mm entre montante e jusante do provete, cortar a entrada de água a montante do provete e esperar que se instale o equilíbrio do desnível hidráulico durante um período máximo de tempo de 5 minutos. O desnível hidráulico é controlado pelos tubos piezométricos. Só se deve iniciar o ensaio quando este equilíbrio for conseguido. Se não for conseguido, este procedimento tem que ser repetido e este fenómeno tem que ser anotado no relatório de ensaio.

Quando se coloca o provete no equipamento, é necessário ter alguns cuidados: após a colocação do provete deve introduzir-se a grelha metálica que contacta diretamente com o geossintético, de forma a comprimir a

zona do bordo do provete (Figura 5. 15.). Por fim é introduzido o sistema de aperto do equipamento, por enroscamento.

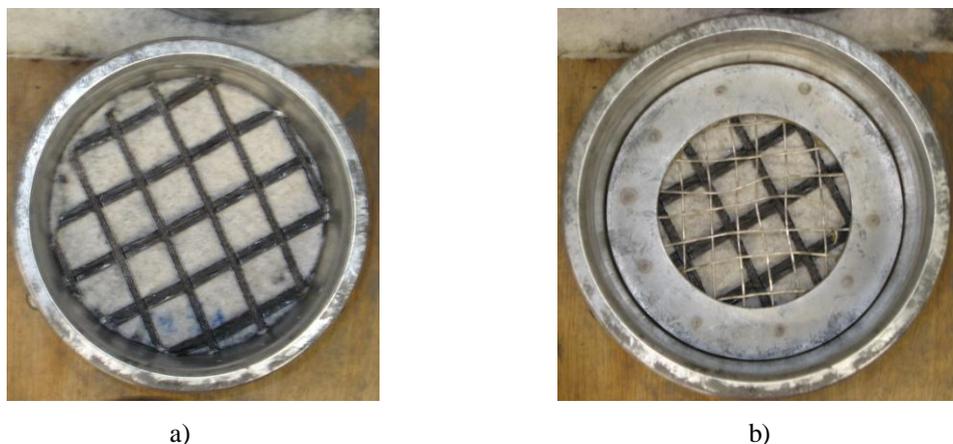


Figura 5. 15: Ensaio de permeabilidade normal ao plano – a) colocação do provete no suporte; b) colocação da grelha metálica

Após a verificação da inexistência de bolhas de ar e a realização de todas as operações descritas pode iniciar-se o ensaio.

#### **5.3.3.6. Procedimento do ensaio laboratorial**

Durante o ensaio a água atravessa o provete perpendicularmente ao seu plano, até atingir um equilíbrio do fluxo, sob valores de perdas de carga da água conhecidos. Estes valores são, primeiramente, de 70 mm, sendo os seguintes 80%, 60%; 40% e 20% daquele [ISO/FDIS\_11058 (2009)]. Os valores de perda de carga a considerar são, e sempre com a ordem que se segue: 70 mm, 56 mm, 42 mm, 28 mm e 14 mm. Segundo a norma ISO/FDIS\_11058 (2009), o ensaio deve ser efetuado por ordem decrescente de perdas de carga, isto é, da velocidade mais alta para a mais baixa. Para cada perda de carga são efetuadas três leituras da massa do volume de água que atravessa o provete, do tempo verificado desde o início da recolha de água até ao seu final e da temperatura da água recolhida. De acordo com a norma ISO/FDIS\_11058 (2009) este tempo deve ser no mínimo 30 segundos e o volume de água deve ser no mínimo 1000 cm<sup>3</sup>. Deve-se ter em atenção que só se deve começar a efetuar as leituras depois de garantida a estabilidade do fluxo de água.

De seguida apresentam-se as operações a realizar durante o procedimento do ensaio de forma mais pormenorizada, tendo em conta o que se encontra referido na norma ISO/FDIS\_11058 (2009).

Para registar a primeira leitura, para a primeira perda de carga (70 mm), começa-se por ajustar o fluxo de água que correspondente com a ajuda do sistema móvel e dos tubos piezométricos. De seguida, espera-se que o regime de escoamento fique estável e aguardam-se 30 segundos com o fim de se verificar se há alterações no regime do escoamento após esse tempo. Se não houver alterações no regime do escoamento, este último passo garante a estabilidade do fluxo de água e pode-se recolher a água durante um intervalo mínimo de 30 segundos. Após essa recolha efetua-se a primeira leitura. Retira-se o valor da massa do volume de água recolhido, o tempo de recolha de água e a temperatura dessa água. Logo a seguir pode-se efetuar a

segunda e a terceira leitura, ainda com o valor de perda de carga de 70 mm. Depois altera-se o valor de perda de carga com o auxílio do sistema móvel e dos tubos piezométricos, garante-se a estabilidade do fluxo de água e repete-se todo o procedimento para todos os valores da perda de carga. Nalguns casos teve que se recolher água durante 60 ou 90 segundos uma vez que o volume recolhido de água durante os 30 segundos referidos anteriormente era inferior a 1000 cm<sup>3</sup>.

## **5.4. Ensaio de indução de dano**

No presente subcapítulo apresenta-se o procedimento realizado aquando cada ensaio de indução de dano, assim como a descrição dos equipamentos e aparelhos utilizados, materiais e descrição dos provetes a ensaiar fazendo referência ao aspeto visual geral dos mesmos. Teve-se sempre atenção em apresentar alguns cuidados a ter durante a realização dos ensaios ao longo das referidas apresentações e descrições. Os ensaios de indução de dano foram realizados antes dos ensaios hidráulicos, uma vez que os provetes danificados resultantes deste tipo de ensaios foram seguidamente submetidos aos ensaios hidráulicos, de forma a ir ao encontro dos objetivos do trabalho.

Inicialmente começa-se por referir o procedimento do ensaio de indução de dano durante a instalação dos geossintéticos em obra (dano mecânico), e de seguida apresenta-se o procedimento do ensaio de indução de dano por abrasão.

Note-se que inicialmente a norma “EN ISO 10722-1:1997 – Geotextiles and geotextile-related products – Procedure for damage during installation. Part 1: Installation in granular materials”, definida para simular em laboratório o dano mecânico ocorrido durante a instalação em obra dos geossintéticos, o ensaio tinha associado a sigla DDI. Atualmente este ensaio designa-se de “indução de dano mecânico”, como se descreve na secção 5.4.1.1. Sendo assim, a partir desta secção e até ao fim da presente dissertação, não se irá utilizar o termo “DDI” mas sim “dano mecânico”.

### **5.4.1. Ensaio para indução de dano mecânico de geossintéticos**

#### **5.4.1.1. Introdução**

O ensaio de indução de dano mecânico por cargas repetidas permite induzir em laboratório danos mecânicos por solicitação que tenta replicar o efeito de instalação em obra. Por essa razão, neste trabalho este ensaio é designado por ensaio laboratorial de indução de danificação durante a instalação em obra (dano mecânico).

Para a realização deste ensaio recorreu-se à norma – ISO/FDIS 10722:2007 – “Geosynthetics – Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material”. O ensaio consiste essencialmente em colocar um provete de geossintético entre duas camadas de um agregado sintético e submetê-los a um período de carregamento dinâmico. O geossintético é então removido do aparelho de ensaio, é examinado de forma a detetar-se visualmente algum dano e, em seguida, submetido a ensaios de caracterização (mecânicos ou hidráulicos). Como já referido, neste trabalho fez-se a caracterização de propriedades hidráulicas.

#### 5.4.1.2. Equipamento e aparelhos utilizados

O equipamento é constituído por um mecanismo de carga, por uma caixa de danificação e por uma placa de carregamento [(ISO/FDIS\_10722, 2007) e (P. M. Lopes, 2011)].

O mecanismo de carga consiste num mecanismo que produz uma pressão sinusoidal na placa de carregamento, entre  $500 \pm 10$  kPa e  $5 \pm 0,5$  kPa, a uma frequência de 1 Hz. A caixa de danificação é uma caixa metálica e rígida, com dimensões interiores de  $0,3 \times 0,3 \times 0,15$  m<sup>3</sup> e é preenchida com óxido de alumínio normalizado e o geossintético. A caixa é constituída por duas partes independentes (0,075 m de altura) fixas por encaixe. Deve-se ter em atenção que a caixa deve ser colocada sobre uma base rígida cuja deformação deve ser inferior a 1 mm. Outro constituinte do equipamento necessário para a realização do presente ensaio é uma placa de carregamento que transmite cargas ao conjunto sem sofrer flexão. A placa de carregamento é em aço e possui 0,1 m de largura e 0,2 m de comprimento [(P. M. Lopes, 2011)].

Na Figura 5. 16. encontra-se o equipamento utilizado.



a)



b)

Figura 5. 16: Equipamento utilizado para o ensaio de Dano mecânico – a) Vista frontal e lateral; b) Vistas laterais

#### 5.4.1.3. Materiais

O agregado referido em 5.4.1.1. é um material granular sintético: óxido de alumínio normalizado. com partículas de dimensões entre 5 e 10 mm. Este material tem que ser peneirado, com peneiro de 5 mm após ser utilizado 3 vezes e tem que ser rejeitado após 20 utilizações.

#### 5.4.1.4. Provetes

Os provetes a ensaiar devem possuir dimensões de 0,5 m×0,25 m. Neste trabalho apenas se ensaiaram provetes segundo a direção de fabrico dos geossintéticos. O número de provetes foi ajustado ao número de ensaios a realizar posteriormente (Tabela 5. 1.).

De acordo com a norma ISO/FDIS\_10722 (2007) devem ser preparados 5 provetes com 1,0 m de comprimento e 0,5 m de largura, devendo, cada um deles ser cortado em dois provetes com 1,0 m de comprimento e 0,25 m de largura (um para ser usado no ensaio de indução de dano e outro para o ensaio de referência). Os provetes de referência são obtidos por aplicação de uma tensão de 500 kPa durante 60 segundos quando colocados na metade inferior da caixa preenchida com óxido de alumínio normalizado, com a ajuda da placa de carregamento. Apesar disso, no presente trabalho não se utilizaram provetes de referência, apenas provetes intactos.

#### 5.4.1.5. Procedimento do ensaio

Em primeiro lugar começa-se por encher a parte inferior da caixa com óxido de alumínio normalizado, formando duas camadas com a mesma altura, de 37,5 mm, de forma a que as duas camadas sobrepostas possuam uma altura total de 75 mm, como mostra a Figura 5. 17..



Figura 5. 17: Ensaio de dano mecânico – Parte inferior da caixa de danificação preenchida com as duas camadas de óxido de alumínio normalizado

Cada uma destas camadas deve ser compactada com uma placa metálica rígida que é colocada sobre toda a área da parte inferior da caixa de danificação a que é aplicada uma tensão de  $200 \pm 2$  kPa durante 60 segundos. De seguida coloca-se o provete sobre a camada do material granular, de forma a que o centro do provete e o centro da caixa fiquem alinhados. A parte superior da caixa deve ser posicionada tendo o cuidado de não formar rugas ou provocar tensão no provete. Enche-se a parte superior dessa caixa com o material granular solto até uma altura de 75 mm. Se possível, o último enchimento atrás descrito deve ser elaborado de modo a que o material granular na zona onde a carga é aplicada durante o ensaio forneça uma zona menos rígida, com o objetivo de possibilitar maior rearranjo das partículas e consequentemente ajuste da placa de carregamento à camada em causa. Sendo assim, fica diminuída a possibilidade da aplicação de cargas estáticas no provete pela placa de carregamento [(P. M. Lopes, 2011)]. Na Figura 5. 18. ilustra-se a caixa pronta a ser posicionada para a realização o ensaio.



Figura 5. 18: Ensaio de dano mecânico – caixa pronta a ser posicionada para a realização o ensaio

A caixa (no seu conjunto) é posicionada no pórtico de ensaio, centrada com a placa de carregamento e aplica-se uma tensão cíclica que varia entre  $5\pm 0,5$  kPa e  $500\pm 10$  kPa, durante 200 ciclos, com uma frequência de 1 Hz.

No fim remove-se da caixa de danificação o material granular e o provete com cuidado, de forma a que o provete não sofra danificações adicionais. Após recolhido todo o material granular, pode-se repetir este procedimento para todos os outros provetes em análise.

Por último foi realizada uma observação visual do provete, de maneira a detetar danificações visíveis a olho nu sofridas pelo geossintético. Segundo a norma ISO/FDIS\_10722 (2007), elabora-se uma inspeção visual da danificação existente no provete e o ensaio de referência do mesmo, para estudar as alterações sofridas nas propriedades de referência.

## 5.4.2. Ensaio do dano por abrasão (ensaio do bloco deslizante)

### 5.4.2.1. Introdução

Os procedimentos para a elaboração deste ensaio encontram-se na norma NP EN ISO 13427:2006 – “Geotêxteis e produtos relacionados – Simulação do dano por abrasão (ensaio do bloco deslizante)”. Este ensaio consiste em colocar um provete numa plataforma fixa para ser friccionado por um abrasivo com características específicas. O abrasivo move-se ao longo de um eixo horizontal com um movimento uniaxial, sob condições controladas de pressão e ação abrasiva [(NP\_EN\_ISO\_13427, 2006)].

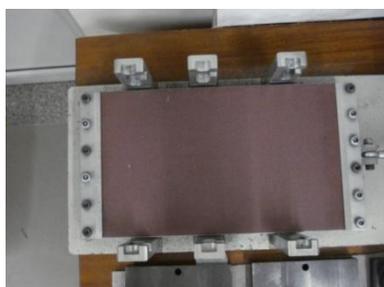
### 5.4.2.2. Equipamento e aparelhos utilizados

O equipamento utilizado no presente ensaio encontra-se na Figura 5. 19..

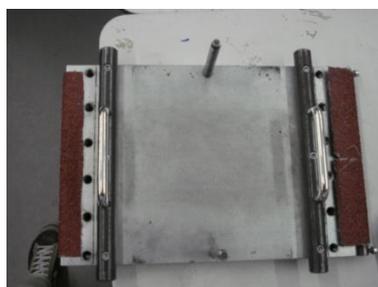


Figura 5. 19: Equipamento utilizado para a realização do ensaio de dano por abrasão

De acordo com a norma NP\_EN\_ISO\_13427 (2006) o equipamento consiste num abrasímetro constituído por dois pratos paralelos, um indicador e pesos. Os dois pratos são paralelos e macios com medidas 500x200 (mm<sup>2</sup>); um deles possui um movimento vaivém (o de baixo). De acordo com a norma NP\_EN\_ISO\_13427 (2006), durante o ensaio, o prato de cima é mantido estacionário e bem equilibrado de forma a que uma carga vertical possa ser mantida por meio de pesos e é rigidamente suportado por uma alavanca para proporcionar um movimento livre na direção perpendicular do prato vaivém. Também possui na sua constituição um indicador para a contagem do número de ciclos (1 ciclo = 1 passagem dupla) e pesos (três pesos) para se poder aplicar carga vertical ao provete. Segundo a norma NP\_EN\_ISO\_13427 (2006) o comprimento do movimento deve ser de (25±1) mm e a frequência do prato vaivém deve ser ajustável a um máximo de 90 passagens duplas por minuto. Ambos os pratos possuem garras e parafusos nas suas extremidades (Figura 5. 20.).



a)



b)

Figura 5. 20: Ensaio de dano por abrasão – Pratos constituintes do abrasímetro: a) prato de baixo (vaivém); b) prato de cima (estacionário)

#### 5.4.2.3. Materiais

Para a realização dos ensaios deve ser utilizado um abrasivo de classe P100. Além disso, neste trabalho para se solicitar o conjunto dos dois geossintético em estudo à abrasão foi necessário colocar película abrasiva P24 no prato de cima, para evitar o deslocamento relativo entre o provete e o prato superior e, desta forma, simular com maior eficácia o fenómeno de abrasão.

#### **5.4.2.4. Provetes**

Cada um dos provetes possui dimensões aproximadas de 200x430 (mm<sup>2</sup>) [(NP\_EN\_ISO\_13427, 2006)].

De acordo com a norma NP\_EN\_ISO\_13427 (2006) são necessários 5 provetes. Caso o material a ensaiar possua características diferentes nas duas faces (por exemplo características físicas, ou como consequência do processo de fabrico), o ensaio só fica completo se efetuado separadamente em cada face, perfazendo um total de 10 provetes. Neste trabalho apenas se realizaram ensaios em que se a GGR se encontrava diretamente sobreposta ao GTX.

#### **5.4.2.5. Procedimento do ensaio**

Em primeiro começou-se por instalar o abrasivo no prato de baixo de forma a ficar e permanecer durante o ensaio bem esticado com a ajuda de garras e parafusos. De seguida colocou-se o provete a ensaiar no prato estacionário (de cima), prendendo-se o geossintético com as garras existentes em cada extremidade do prato e aparafusou-se essas garras. Inicialmente prende-se o geossintético e a lixa P24 na extremidade que não possui esticador com a ajuda de uma garra e parafusos, conforme a Figura 5. 21. a).

No início do ensaio cortou-se um pouco o comprimento do GTX para que fosse possível encaixá-lo no prato de cima e poder ser preso com a ajuda das garras e aparafusado às mesmas. Houve o cuidado de o provete não adquirir um comprimento muito inferior para que este, durante a realização do ensaio, não se desprendesse das garras nem se movesse em relação às mesmas e ao prato superior e influenciasse o resultado final do ensaio.

De seguida fixa-se a lixa P24 e o provete no lado oposto do prato superior com a ajuda, novamente da garra e dos parafusos. Aperta-se os parafusos do esticador de forma a garantir que ambos fiquem bem esticados, sem folgas (Figura 5. 21. b)).

Posteriormente baixa-se o prato superior até ao prato inferior após se verificar que o meio abrasivo e o provete encontram-se adequadamente alinhados [(NP\_EN\_ISO\_13427, 2006)] (Figura 5. 21. c)).

Carrega-se o prato superior com uma carga de (6±0,01) kg, incluindo o prato superior (Figura 5. 21. d)). Liga-se o aparelho de forma a que trabalhe com uma frequência, no máximo, de 90 ciclos por minuto [(NP\_EN\_ISO\_13427, 2006)].

O equipamento deve movimentar-se durante 750 ciclos, ou até à rotura do provete. Durante os ensaios efetuados com o GTX combinada com a GGR, o equipamento funcionou até atingir os 750 ciclos, uma vez que nunca houve rotura total dos provetes.

Após a realização do ensaio retira-se o provete com cuidado de forma a evitar a ocorrência de danificação adicional, e submete-se o provete a outro tipo de ensaios para se avaliar a alteração das suas propriedades. O abrasivo é substituído após cada ensaio.

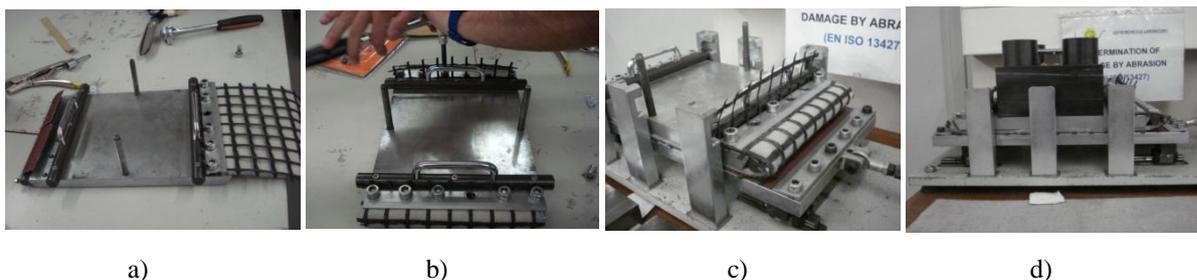


Figura 5. 21: Ensaio de dano por abrasão – a) Instalação do geossintético e da lixa P24 na extremidade que não possui esticador do prato de cima; b) Fixação do abrasivo P24 e do geossintético na extremidade com esticador do prato superior; c) Prato superior e prato inferior, com o provete corretamente instalado; d) Colocação da carga no prato superior

Caso o provete ou o material abrasivo deslizem das garras, deve-se desprezar o provete e ensaiar outro provete após serem efetuadas as correções necessárias. O mesmo também se realizou para o material abrasivo P100 instalado no prato de baixo. Quando se visualizava o movimento deste material abrasivo, devido ao facto de não estar bem fixo, o abrasivo em causa era substituído e repetia-se o ensaio. Desta forma, deve-se ter em atenção, também, que as garras utilizadas, tanto nas extremidades o prato de cima como nas do prato de baixo devem possuir rugosidade suficiente para evitar o deslizamento do provete ou do material abrasivo durante o ensaio.

### 5.5. Considerações finais

No presente capítulo apresentaram-se os ensaios que realizados neste trabalho, incluindo os procedimentos respetivos. Nos capítulos seguintes apresentam-se os resultados obtidos e faz-se a sua discussão.





Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

comprimento de 16,1 centímetros, como fator de escala. Para os provetes 6, 7, 8, 9 e 10 foi utilizada uma régua para o efeito anunciado anteriormente.

Foram submetidos 10 provetes ao presente ensaio, em vez de serem apenas 8 provetes uma vez que foi necessário realizar mais dois ensaios para além dos 8 realizados inicialmente. Esta necessidade foi devida ao facto de ter sido necessário fazer algumas repetições de ensaios.

### 6.2.2. Registo fotográfico

Nesta secção apresenta-se o registo fotográfico onde se ilustram as danificações encontradas nos geossintéticos após os mesmos serem sujeitos ao ensaio de dano mecânico. Apresenta-se o aspeto geral e o aspeto da zona mais danificada de cada provete, assim como os danos visíveis a olho nu presentes no GTX e na GGR. Este registo fotográfico encontra-se resumido na Tabela 6. 1..

6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

Tabela 6. 1: Registo fotográfico de provetes submetidos ao ensaio de indução de dano mecânico

Provete	GTX				GGR		
	Aspetto geral	Aspetto da zona mais danificada	Mudança de tonalidade	Aparecimento de pontos negros ou pretos	Corte de fibras da GGR	Alteração da tonalidade da GGR	Inclusão de partículas de óxido de alumínio normalizado
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							



Tamanho dos pontos negros

- A – Muito grandes (diâmetros superiores a 8 mm);
- B – Grandes (diâmetros entre 6 a 8 mm);
- C – Intermédios (diâmetros entre 4 a 6 mm);
- D – Pequenos (diâmetros entre 2 a 4 mm);
- E – Muito pequenos (diâmetros inferiores a 2 mm).

Intensidade da tonalidade dos pontos negros

- A – muito escuro;
- B – escuro;
- C – intermédio;
- D – claro;
- E – muito claro.

Número de cortes de fibras da GGR

- A – mais de 50 cortes;
- B – 30 a 50 cortes;
- C – 20 a 30 cortes;
- D – 10 a 20 cortes;
- E – 0 a 10 cortes.

#### 6.2.4. Descrição e análise dos danos visualizados

De seguida apresenta-se uma descrição das patologias verificadas nos provetes incluindo uma possível justificação dos danos encontrados.

Através do registo fotográfico pode-se observar que após todos os provetes serem submetidos ao ensaio de indução de dano mecânico ficaram com uma configuração muito semelhante, tanto no seu aspeto geral como na zona mais danificada, quer no GTX quer na GGR. Todos sofreram o mesmo tipo de danificações como mudança de tonalidade, surgindo, por vezes, o aparecimento de pontos negros no GTX. A zona mais danificada está presente apenas na zona central do provete.

Inicialmente começa-se por descrever e comentar os resultados observados no GTX e de seguida as diferenças adquiridas pela GGR após o ensaio.

A diferença de tonalidade observada no GTX apenas se verifica na zona central do provete, adquirindo uma coloração mais escura. A coloração escura encontra-se distribuída de forma uniforme na zona central de cada provete, aparecendo, nalguns casos zonas pontuais ainda mais negras sobrepostas à tonalidade escura descrita anteriormente, que se apresentava uniforme. A tonalidade escura distribuída uniformemente pelo GTX é devida a alguma desagregação das partículas de óxido de alumínio normalizado que ocorreu durante a realização do ensaio que, com diâmetros muito reduzidos, por vezes microscópicos, se agregaram na estrutura do GTX. É necessário ter em atenção que as partículas de óxido de alumínio possuem uma cor

escura. O facto de o GTX não ter sido submetido a uma mudança de coloração tão brusca nas zonas onde se encontrava a GGR sobreposta sustenta esta premissa, adquirindo, por vezes o contorno da GGR. As tonalidades descritas anteriormente, onde se encontra presente o contorno da GGR, verificam-se em todos os provetes, sendo mais notórias nos provetes 1, 2, 5, 6, 9 e 10. O aparecimento de pontos negros no GTX é consequência do seu contacto direto com a GGR durante a realização do ensaio, aquando da degradação da GGR, quando esta é submetida a esmagamento devido à aplicação de cargas cíclicas. A camada protetora da GGR, durante todo o ensaio degrada-se e desintegra-se das restantes fibras tecidas da GGR, migrando, depois de estar danificada, sob a forma de partículas independentes entre si, para o GTX. Tem que se ter em atenção que a camada protetora da GGR é preta. Estas afirmações são sustentadas pelo facto de os pontos negros se situarem apenas nas zonas do GTX que possuíam a GGR sobreposta. Estes pontos negros estão presentes em todos os provetes, mas não com o mesmo número de pontos em cada provete, e apresentam-se com diferentes tamanhos e intensidades de tonalidade. Na Tabela 6. 2. é possível observar uma quantificação de todos estes parâmetros presentes em cada provete.

Na GGR também se pode verificar que houve uma mudança de tonalidade. Neste caso adquiriu uma cor esbranquiçada em apenas algumas zonas pontuais da mesma. Esta diferença de tonalidade resultou do movimento das partículas de óxido de alumínio normalizado quando solicitado a cargas cíclicas. O movimento das partículas e o seu contacto direto com a GGR levou ao corte de algumas fibras da GGR por torção ou esmagamento. Esses cortes levaram a alterações na GGR, como a que se verificou visualmente, a aquisição de uma cor esbranquiçada, sendo essa cor mais intensa nas zonas onde houve maior número de fibras que sofreram corte. A aquisição da cor esbranquiçada é devida ao facto de a camada de proteção que a GGR possui ser preta, como já foi referido, e as fibras da GGR serem brancas, e de haver corte dessa camada de proteção. Os cortes da GGR devidos ao esmagamento e torção são notoriamente visíveis nos provetes 1, 2, 3, 8, 9 e 10. Os cortes devidos apenas ao esmagamento são observáveis nos provetes 4 e 7 e os cortes presentes no provete 6 apenas foram devidas à torção. Para além dos danos observados anteriormente na GGR, também se verificou a inclusão de partículas de óxido de alumínio normalizado nesse geossintético, devido ao movimento das partículas durante a aplicação de cargas cíclicas repetidas, movimento já referido anteriormente, e contato direto entre os dois materiais (partículas de óxido de alumínio normalizado e GGR). Nos provetes 4, 5, 6, 7 e 8 visualiza-se que apenas houve inclusão de partículas de pequenas dimensões.

Através da análise do quadro resumo (Tabela 6. 2.), através da coloração de cada célula, é possível verificar que os provetes 1, 2 e 3 foram os que mais sofreram danificação do GTX e da GGR, mas também é preciso ter em atenção que a GGR pertencente ao provete 4 também sofreu uma danificação gravosa. Pode-se verificar, também que os provetes que se apresentaram com menos danos foram os provetes 8 e 10, tanto do GTX como da GGR.

### **6.3. Ensaio para indução de dano por abrasão**

#### **6.3.1. Considerações gerais**

Após a conclusão da realização do ensaio de abrasão verificou-se que em todos os provetes o GTX e a GGR ficaram ligados, e para não comprometer ensaios futuros (ensaios hidráulicos) para os quais os presentes

## 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

provetes foram a seguir utilizados, decidiu-se fazer uma avaliação dos danos causados nos provetes evitando a separação dos geossintéticos. Esta ação levou a uma acrescida dificuldade na análise das danificações no GTX, mas não eliminando a sua possibilidade. Sendo assim, a descrição e análise dos danos presentes nos provetes foi efetuada de forma semelhante à utilizada nos geossintéticos sujeitos ao ensaio anteriormente apresentado.

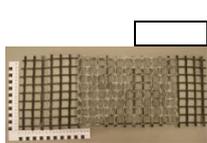
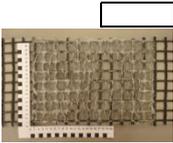
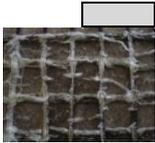
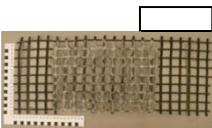
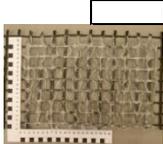
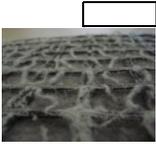
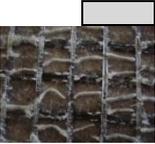
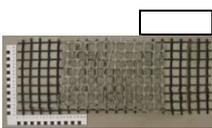
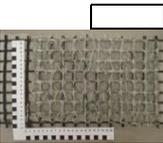
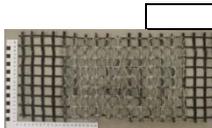
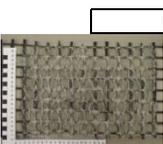
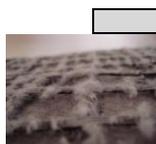
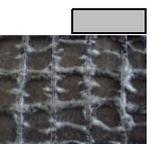
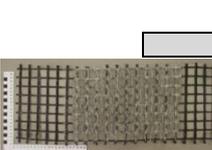
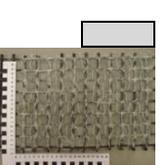
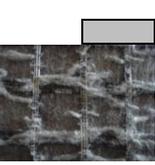
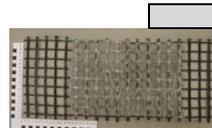
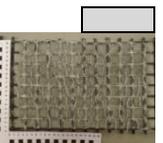
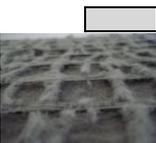
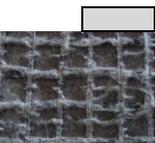
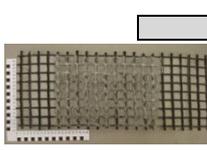
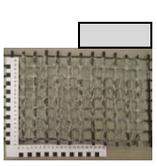
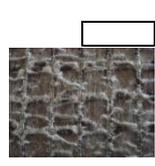
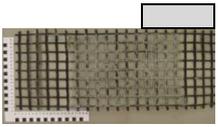
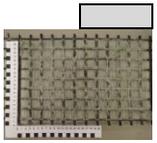
Com o objetivo de facilitar a demonstração do tamanho dos provetes e de algumas anomalias visíveis, recorreu-se à utilização de uma régua.

Os provetes 9 e 10 não foram submetidos a um registo fotográfico tão rigoroso uma vez que este registo foi elaborado mais tardiamente. A solicitação de mais dois provetes intactos à abrasão foi necessária uma vez que houve ensaios hidráulicos que se repetiram, visto que, aquando da realização de ensaios hidráulicos com provetes com este tipo de danificação houve dois ensaios que possuíram um comportamento diferente dos restantes provetes.

### 6.3.2. Registo fotográfico

De seguida encontra-se o registo fotográfico dos danos causados pelo ensaio de abrasão. Devido à complexidade do presente registo, houve a necessidade de se elaborar três tabelas que vão de encontro com o objetivo proposto. Na Tabela 6. 3. visualizam-se as patologias presentes nos dois geossintéticos, tendo em conta o aspeto geral de GTX+GGR e o da zona mais danificada do conjunto, e outros danos. Na Tabela 6. 4. encontra-se o registo fotográfico, de forma a visualizar-se com melhor detalhe as danificações presentes no GTX e na GGR. Na Tabela 6. 3. e na Tabela 6. 4. apenas se apresenta o registo fotográfico dos provetes 1 a 8, visto que, para uma melhor organização do presente registo, optou-se por elaborar uma tabela à parte onde incluía o registo referente aos provetes 9 e 10, Tabela 6. 5.. Efetuou-se este procedimento uma vez que o registo fotográfico dos provetes 9 e 10 foi elaborado de forma menos exaustiva.

Tabela 6. 3: Registo fotográfico dos provetes solicitados ao ensaio de abrasão, tendo em conta o GTX e a GGR em simultâneo

Provete	Aspetto geral	Aspetto da zona mais danificada	Desagregação das fibras do GTX e da GGR	
			Vista transversal	Vista de frente
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

Tabela 6. 4: Registo fotográfico de provetes sujeitos ao ensaio de abrasão, com referência ao GTX e GGR em separado

Provete	GTX			GGR		Aquisição de posição espacial diferente das fibras
	Alteração da tonalidade		Cortes de fibras	Alteração da tonalidade	Separação de fibras perpendiculares	
	Extremidades	Na zona central				
1						<p>Não houve mudança da posição de fibras que se encontravam inicialmente perpendiculares</p> <p>Não houve mudança da posição de fibras que se encontravam inicialmente perpendiculares</p>
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						



## 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

- A – desprezável;
- B – quase desprezável;
- C – aquisição de tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta;
- D – aquisição de tonalidade escura, incluindo as zonas que possuem GGR sobreposta, ou diferença de tonalidades pouco significativa.

### Desagregação e formação de nódulos cilíndricos (definição de nódulos cilíndricos apresentada em 6.3.4.)

- A – pequenas dimensões e em reduzido número (nódulos cilíndricos com seções transversais com diâmetros inferiores a 2 mm, e na parte que esteve diretamente em contacto com a lixa P100 predominam GTX e GGR intactos e não os nódulos);
- B – pequenas dimensões e em elevado número;
- C – grandes dimensões e em reduzido número;
- D – grandes dimensões e em elevado número (nódulos cilíndricos com seções transversais com diâmetros superiores a 4 mm, e na parte que esteve diretamente em contacto com a lixa P100 predominam os nódulos cilíndricos e não GTX e GGR intactos).

### Tonalidade da GGR

- A – maioritariamente esbranquiçada;
- B – maioritariamente preta.

### N.º de cortes de fibras

- A – elevado número de cortes;
- C – reduzido número de cortes.

### Separação de alinhamentos perpendiculares

- A - excessivos alinhamentos perpendiculares desagregados (mais de 10 separações);
- B - muitos alinhamentos perpendiculares desagregados (entre 6 a 8 separações);
- C - alguns alinhamentos perpendiculares desagregados (entre 4 a 6 separações);
- D - poucos alinhamentos perpendiculares desagregados (entre 2 a 4 separações);
- E – inexistência ou muito poucos alinhamentos perpendiculares desagregados (menos de 2 separações).

### Mudança de posição espacial

- A – Sim;
- B – Não.

## 6.3.4. Descrição e análise dos danos visualizados

Todos os provetes solicitados unicamente à abrasão apresentaram um aspeto visual, tanto do provete em geral, como das zonas mais danificadas, semelhante. As patologias encontradas em todos os provetes submetidos apenas a este ensaio são semelhantes. Por esta razão, de seguida descreve-se e justifica-se os

danos causados de uma forma geral para todos os provetes, fazendo referência a danos visualmente detetáveis exclusivos de alguns provetes.

Como se referiu em 6.3.1., não se separou os geossintéticos como no ensaio anterior, mas, ainda assim foi possível fazer uma descrição e analisar os danos resultantes em cada um dos geossintéticos, em separado. Inicialmente começa-se por descrever e justificar as causas das danificações observadas no GTX, seguindo-se na GGR.

A ligação entre o GTX e a GGR deveu-se ao facto de, durante o ensaio, algumas fibras do GTX se desagregarem do mesmo e se sobreponem à GGR. O mesmo aconteceu às fibras da GGR, isto é, também se desagregaram da GGR, e houve mistura das fibras dos dois geossintéticos que se desagregaram, levando à formação dos nódulos cilíndricos apresentados no registo fotográfico. Segundo Van Dine (1982), citado por Pinto (2005) e Rosete (2010), dá-se a designação de nódulos visto que resultaram da desagregação parcial de filamentos individuais da estrutura. É necessário ter em atenção que os nódulos cilíndricos formados pela junção das fibras dos dois diferentes geossintéticos não se desagregaram completamente do provete, continuando a manter-se ligados à combinação dos dois geossintéticos. Esta patologia verificou-se em todos os provetes.

Ao longo do GTX verificou-se mudança de coloração. Quanto a esta patologia, podem-se apresentar cinco tipos de colorações diferentes, uma vez que no mesmo GTX a zona central do geossintético (zona mais afetada) pode adquirir uma tonalidade e as extremidades do mesmo GTX pode adquirir outra tonalidade, diferente da encontrada na sua zona central que é a zona mais afetada. De seguida apresentam-se esses cinco tipos:

- Aquisição de uma tonalidade mais escura ao longo de todo o GTX, incluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Este tipo está presente nos provetes 3 e 7.
- Ao longo de todo o GTX verificou-se que este adquiriu uma tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Nestas últimas zonas pode-se observar uma tonalidade mais clara (provetes 2, 4, 5 e 8).
- Nas extremidades do GTX observa-se uma tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Aí pode-se verificar uma tonalidade mais clara. Na zona central do GTX pode-se verificar que adquiriu uma tonalidade escura, incluindo a zona do geotêxtil que possui GGR sobreposta, não sendo possível detetar a olho nú os contornos da GGR (proвете 1).
- Nas extremidades do GTX pode-se verificar que este adquiriu uma tonalidade escura, incluindo a zona do GTX que possui GGR sobreposta, não sendo possível detetar a olho nú os contornos da GGR. Na zona central do GTX observa-se uma tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Nessas zonas pode-se verificar uma tonalidade mais clara (proвете 6).
- Todo o GTX adquiriu uma tonalidade um pouco mais escura, quase desprezável, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta de uma forma geral: adquiriu uma tonalidade ainda mais escura do que nas restantes zonas do GTX. A diferença de tonalidades das zonas do GTX que possui a GGR sobreposta e das zonas que não possui é pouco significativa (provetes 9 e 10).

## 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

A aquisição de tonalidade escura no GTX é devida ao corte, degradação e desintegração da camada superficial de proteção da GGR, que é preta, e consequente agregação de algumas partículas dessa camada de proteção da GGR no GTX. O corte das fibras da GGR é o resultado do contacto direto da GGR com a lixa P100, durante o constante movimento vaivém da lixa. Este resultado é mais gravoso quanto mais escura for a tonalidade do GTX, incluindo as zonas que possuem GGR sobreposta, uma vez que neste caso, as partículas escuras constituintes da camada protetora que reveste a GGR se espalharam de forma uniforme ao longo do GTX. A existência dos cinco tipos observados anteriormente pode-se dever ao facto de o conjunto de geossintéticos se encontrar mais ou menos esticados no prato de cima, apesar de em todos eles ter-se tido sempre o cuidado de estes permanecerem sempre bem esticados durante o ensaio, rejeitando-se os provetes que não permaneciam bem esticados ao longo de todo o ensaio. Também é necessário ter em atenção que podem existir zonas pontuais mais frágeis do que outras ao longo da área de contato com a lixa.

Na GGR pode-se verificar que houve múltiplos cortes das suas fibras e desagregação da sua camada de proteção ao longo deste geossintético, isto é, tanto nas suas extremidades como na zona central em todos os provetes. A razão para este fenómeno se suceder já foi explicado anteriormente, ou seja, foi devido ao permanente contacto da GGR com a lixa P100 ao longo de todo o ensaio e constante movimento da lixa em relação aos geossintéticos. Não esquecer que durante todo o tempo de realização dos ensaios deste tipo, a lixa P100 e os geossintéticos permaneceram sempre bem esticados para que o resultado dos ensaios se aproximasse das danificações provocadas por abrasão nas vias-férreas, ou seja, que o estado final dos geossintéticos se aproximasse o máximo possível da realidade, após serem submetidos à abrasão.

Para além dos cortes das fibras e da camada protetora da GGR que se descreveram anteriormente, não se pode esquecer da existência de cortes das fibras do GTX. Essas fibras sobrepuseram-se à GGR, levando a que as fibras desagregadas dos dois geossintéticos ganhassem a forma final de nódulos cilíndricos. Através do registo fotográfico pode-se verificar que os provetes possuem nódulos cilíndricos com diferentes áreas da secção transversal, isto é, possuem uns nódulos cilíndricos com diferentes diâmetros. A origem desta diferença reside no movimento relativo existente entre os geossintéticos e a lixa, uma vez que nem sempre é possível garantir que os dois geossintéticos permaneçam sempre esticados da mesma forma ao longo de toda a área do provete e na possível existência de zonas pontuais nos provetes onde os materiais apresentam maior fragilidade relativamente a todas as outras zonas, tanto se todas pertencerem à área de um mesmo provete ou de provete para provete. Quanto maior o número de nódulos cilíndricos formados ou quanto maior forem as suas áreas transversais, maior foi o número de fibras dos geossintéticos e da camada de proteção da GGR que sofreram corte. A desagregação das fibras dos dois geossintéticos e da camada protetora da GGR, e sobreposição das mesmas na GGR levou a que esta adquirisse uma cor esbranquiçada ao longo de toda a sua área, e encontra-se visível em todos os provetes, principalmente nos provetes 3, 4, 5, 6 e 7.

O movimento da lixa em relação à GGR que foi referido anteriormente, e o seu contato direto com esse geossintético provocou, também, a desagregação de barras de fibras de GGR que se encontravam inicialmente perpendiculares umas às outras e ligadas. Esta patologia encontra-se em todos os provetes, sendo menos visível no provete 8, e principalmente nos provetes 9 e 10, pois nestes dois últimos provetes não houve sequer separação de fibras perpendiculares da GGR. Deve-se ter em atenção que onde se mais deteta esta patologia houve mudança de posição espacial das fibras da GGR, fenómeno que leva a pensar que

quanto maior a degradação da ligação entre barras de fibras que se encontram perpendiculares entre si, maior a probabilidade de haver mudança de posição espacial dessas mesmas barras de fibras. Esta premissa é apoiada pela observação dos provetes 1, 3 e 4, os únicos provetes que possuem fibras da GGR que sofreram mudança de posição espacial e onde houve maior número de barras de fibras perpendiculares entre si que se desuniram. Este fenómeno é consequência de a GGR ser uma geogrelha tecida, e por isso as ligações entre barras de fibras de GGR serem, também, tecidas.

## **6.4. Ensaio de indução de dano mecânico + abrasão**

### **6.4.1. Considerações gerais**

Visto que após o ensaio de indução de dano mecânico, os mesmos provetes foram submetido ao ensaio de abrasão, após o último ensaio o GTX e a GGR ficaram ligados. Para não comprometer os ensaios hidráulicos decidiu-se fazer uma avaliação dos danos causados nos provetes não separando os geossintéticos. Desta forma, a descrição e análise dos danos presentes nos provetes foi efetuada de forma semelhante à utilizada nos geossintéticos sujeitos aos outros ensaios.

Ao longo do registo fotográfico foi utilizada uma régua, com o objetivo de facilitar a demonstração do tamanho dos provetes e de algumas anomalias presentes.

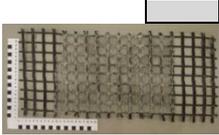
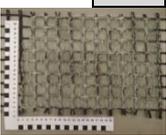
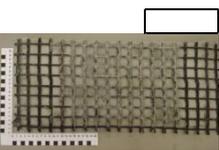
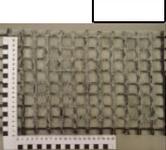
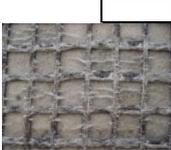
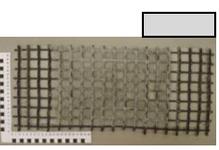
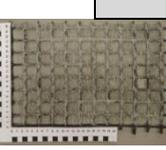
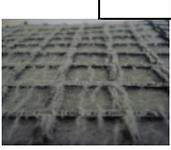
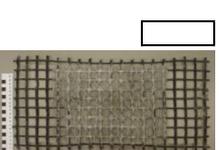
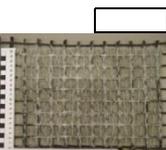
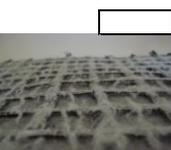
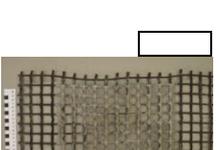
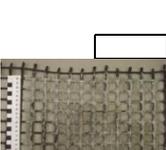
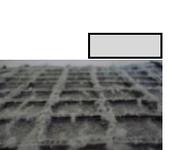
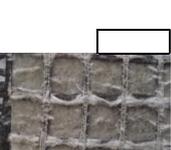
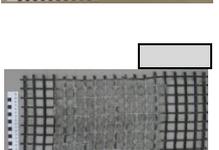
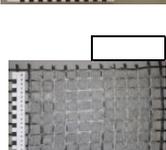
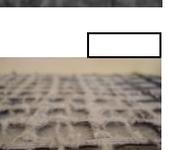
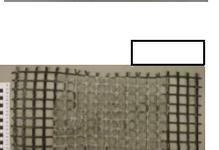
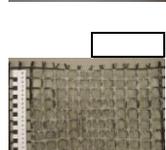
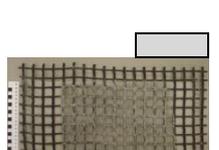
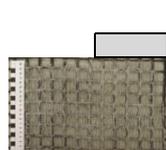
O provete 9 não foi submetido a um registo fotográfico tão rigoroso uma vez que este registo foi elaborado mais tardiamente. Desta forma, a principal preocupação após a realização da combinação dos ensaios ao dano mecânico e abrasão baseava-se na solicitação do provete 9 a ensaios hidráulicos, desvalorizando-se um pouco o seu estudo quanto à visualização pormenorizada dos danos causados.

### **6.4.2. Registo fotográfico**

De seguida apresenta-se o registo fotográfico dos provetes submetidos ao ensaio de dano mecânico e posteriormente ao ensaio de abrasão. Nesse registo é possível visualizar os danos presentes nos geossintéticos após serem submetidos aos dois ensaios. Na Tabela 6. 7. é possível visualizar-se o registo fotográfico de GTX+GGR, de forma a ilustrar-se o aspeto geral e da zona danificada dos mesmos, assim como outros danos encontrados que se considerou-se interessante apresentar quando os mesmos se encontram a ser analisados simultaneamente (GTX+GGR). Na Tabela 6. 8. encontra-se o registo das patologias presentes no GTX e na GGR, mas tendo em consideração cada um dos geossintéticos em separado. Para a apresentação do presente registo foi necessário criar mais do que uma tabela para a apresentação das danificações presentes a olho nu devido ao seu elevado tamanho, facilitando a visualização dos danos.

6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

Tabela 6. 7: Registo fotográfico dos provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico + abrasão, tendo em conta o GTX e a GGR em simultâneo

Provete	Aspetto da zona		Desagregação de fibras	
	Aspetto geral	mais danificada	Vista transversal	Vista de frente
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Compósito geotêxtil – georelha: propriedades hidráulicas após dano

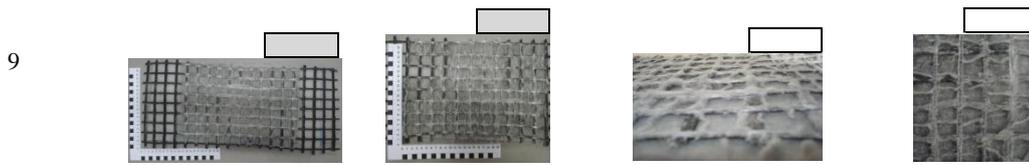


Tabela 6. 8: Registo fotográfico de provetes sujeitos ao ensaio de dano mecânico + abrasão, com referência ao GTX e GGR em separado

Provete	GTX		Corte das fibras	GGR		Aquisição de posição espacial diferente
	Alteração da tonalidade Na zona central	Extremidades		Alteração da tonalidade	Separação de fibras perpendiculares	
1						Não houve mudança da posição de fibras que se encontravam inicialmente perpendiculares
2						
3						Não houve mudança da posição de fibras que se encontravam inicialmente perpendiculares
4						
5						Não houve mudança da posição de fibras que se encontravam inicialmente perpendiculares
6						
7						



Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

- E – escura, incluindo as zonas que possuem GGR sobreposta, ou diferença de tonalidades pouco significativa.

#### Desagregação e formação de nódulos cilíndricos

- A – pequenas dimensões e em reduzido número (nódulos cilíndricos com seções transversais com diâmetros inferiores a 2 mm, e na parte que esteve diretamente em contacto com a lixa P100 predominam GTX e GGR intactos e não os nódulos);
- B – pequenas dimensões e em elevado número;
- C – grandes dimensões e em reduzido número;
- D – grandes dimensões e em elevado número (nódulos cilíndricos com seções transversais com diâmetros superiores a 4 mm, e na parte que esteve diretamente em contacto com a lixa P100 predominam os nódulos cilíndricos e não GTX e GGR intactos).

#### Aparecimento de manchas

- A – Sim;
- B – Não

#### Tonalidade da GGR

- A – maioritariamente esbranquiçada;
- B – maioritariamente preta.

#### N.º de cortes de fibras

- A – elevado número de cortes;
- C – reduzido número de cortes.

#### Separação de alinhamentos perpendiculares

- A - excessivos alinhamentos perpendiculares desagregados (mais de 10 separações);
- B - muitos alinhamentos perpendiculares desagregados (entre 6 a 8 separações);
- C - alguns alinhamentos perpendiculares desagregados (entre 4 a 6 separações);
- D - poucos alinhamentos perpendiculares desagregados (entre 2 a 4 separações);
- E – inexistência ou muito poucos alinhamentos perpendiculares desagregados (menos de 2 separações).

#### Mudança de posição espacial

- A – Sim;
- B – Não.

### 6.4.4. Descrição e comentário dos danos visualizados

Inicialmente solicitou-se provetes intactos ao ensaio de dano mecânico e de seguida realizou-se o ensaio de abrasão com esses provetes, isto é, após serem submetidos ao ensaio de dano mecânico. Desta forma as patologias encontradas nos provetes submetidos aos dois ensaios são semelhantes às encontradas nos provetes que foram solicitados aos dois ensaios em separado. Pode-se visualizar através do registo

## 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

fotográfico que os geossintéticos se encontraram unidos após os dois ensaios através da desagregação, principalmente das fibras do GTX, mas também das fibras da GGR e da sua camada superficial protetora, e sobreposição das fibras do GTX na GGR. A origem deste fenómeno já foi apresentada anteriormente, em 6.3.4, ou seja, devido ao movimento da lixa em relação aos geossintéticos durante o ensaio de abrasão e existência de zonas pontuais com maior fragilidade nos mesmos. Sendo assim pode-se concluir que os provetes possuem um aspeto geral e a zona mais danificada semelhante ao resultante nos provetes sujeitos apenas ao ensaio de abrasão. Também pode-se verificar que por vezes no GTX surgem manchas ainda mais escuras do que a tonalidade final desse mesmo geossintético devidas ao ensaio de dano mecânico. É o caso do provete 2. Essas manchas não são mais do que pontos negros que se formaram aquando o ensaio de dano mecânico, de grandes dimensões e intensidade de tonalidade elevada. Em todos os provetes também se observa que houve desagregação das fibras do GTX e também da GGR e da sua camada protetora, sobreposição dessas fibras do GTX em relação à GGR, mas algumas fibras deste último geossintético também se desagregaram e misturaram-se com as fibras que se encontram sobrepostas à GGR, levando à constituição de nódulos cilíndricos devido ao movimento da lixa em relação aos provetes durante o ensaio de abrasão. A quantidade e tamanho da secção transversal dos nódulos cilíndricos está associada ao movimento referido, uma vez que nem sempre é possível garantir que os dois geossintéticos permaneçam sempre esticados da mesma forma ao longo de toda a área do provete. Também deve-se ter em atenção que num mesmo provete pode existir zonas pontuais ao longo de toda a área do provete onde os geossintéticos podem apresentar maior fragilidade. Quanto maior o número de nódulos cilíndricos formados ou quanto maior forem as suas áreas transversais, maior foi o número de fibras dos geossintéticos que sofreram corte e maior foi a degradação da camada de proteção da GGR.

Uma vez mais a análise foi efetuada não separando os geossintéticos, o que dificultou um pouco a análise, como já foi referido. Esta caracterização é importante visto que só observando numa fase só um geossintético e a seguir o outro se compreende e avalia melhor as patologias resultantes dos dois ensaios realizados consecutivamente. Ambas as fases referidas atrás foram elaboradas após se avaliar o provete com os dois geossintéticos, como um todo. De seguida referem-se as patologias encontradas no GTX e na GGR em separado, começando pela descrição e análise dos danos visíveis no GTX.

O GTX, após os dois ensaios, para além do corte de algumas das suas fibras como já foi anunciado, também sofreu alteração da sua tonalidade.

Tal como aconteceu durante os ensaios de abrasão, surgiram diferentes tipos de tonalidades no GTX após os dois ensaios. Este processo aconteceu visto que a tonalidade no GTX devido ao ensaio de abrasão sobrepôs-se à tonalidade causada pelo ensaio de dano mecânico. Exclui-se o provete 2 do GTX, uma vez que neste é possível observar pontos negros originados durante o ensaio de dano mecânico, com um tamanho e intensidade de tonalidade intensos, de maneira que foi possível a sua observação mesmo depois do ensaio de abrasão. Devido ao tamanho e intensidade de tonalidade desses pontos negros, estes foram designados por manchas escuras. Na generalidade, a alteração de tonalidade do GTX após o ensaio de dano mecânico não foi relevante quando comparada com a mesma depois de realizado o ensaio de abrasão em todos os provetes. Exposto isto, e para uma melhor compreensão das diferentes tonalidades encontradas nos GTX, de seguida referem-se os quatro tipos de tonalidades observados após a realização dos dois ensaios:

- Ao longo de todo o provete, o GTX apresenta-se com uma tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Nas zonas referidas imediatamente anterior verificou-se que se mantiveram com uma tonalidade esbranquiçada, ou um pouco mais clara do que as restantes zonas do GTX (provetes 1, 4 e 6).
- Fora da parte central do GTX, ou seja, nas suas extremidades verificou-se que o GTX adquiriu uma tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Pode-se verificar que essas zonas permaneceram mais claras; por vezes não se observa a sua mudança de tonalidade em relação à sua tonalidade antes de ser submetida aos ensaios, ou esta é desprezável. Na zona central do GTX, as zonas que possuem GGR sobreposta adquiriram uma tonalidade mais escura. Nas zonas que não possuem a GGR sobreposta têm uma tonalidade mais clara (provetes 2, 3 e 5).
- Fora da parte central do GTX, ou seja, nas suas extremidades verificou-se que o GTX adquiriu uma tonalidade escura, excluindo as zonas que possuem GGR sobreposta. Estas permaneceram mais claras e por vezes não se observa a sua mudança de tonalidade em relação à existente antes de ser submetida aos ensaios, ou esta é desprezável. A zona central do GTX adquiriu uma tonalidade escura, incluindo nos locais que se encontravam sobrepostos pela GGR (provetes 7 e 8).
- Ao longo de toda a área do GTX, este adquiriu uma tonalidade escura, incluindo as zonas onde possui GGR sobreposta. É o caso do provete 9.

A explicação para haver aquisição de uma tonalidade um pouco mais escura resultante dos ensaios de dano mecânico encontra-se em 6.2.4. Durante os ensaios de abrasão, o GTX foi adquirindo uma tonalidade mais escura ainda do que a que resultou após os ensaios de dano mecânico, o que levou a que houvesse sobreposição da tonalidade resultante dos ensaios de abrasão em relação à resultante dos ensaios de dano mecânico. A explicação para uma mudança de tonalidade mais escura do GTX devido à abrasão encontra-se em 6.3.4..

Houve cortes das fibras dos dois geossintéticos e da camada de proteção da GGR. Estes cortes sucederam-se durante o ensaio de dano mecânico e durante o ensaio de abrasão, apesar do maior número de cortes resultar do ensaio de abrasão. Em alguns casos, para além da formação de cortes durante o ensaio de abrasão, os cortes com origem na realização do ensaio de dano mecânico podem-se ter agravado durante a execução do ensaio de abrasão. Os cortes da camada superficial da GGR e das fibras dos dois geossintéticos deram-se por esmagamento e sobretudo por abrasão em todos os provetes. Na generalidade, os que surgiram durante os ensaios de dano mecânico não eram possíveis de observar após a execução dos dois tipos ensaios visto que, durante o ensaio de abrasão houve formação de nódulos cilíndricos que se sobrepueram à GGR e à maior parte das fibras danificadas durante o ensaio de dano mecânico. O corte da camada de proteção da GGR e das fibras dos geossintéticos e sua sobreposição em relação à GGR levou a que a GGR adquirisse uma tonalidade esbranquiçada em todos os provetes, de forma relativamente uniforme em toda a área de cada provete. A GGR dos vários provetes não apresentou sempre a mesma tonalidade esbranquiçada nem esta cor se observa de forma uniforme ao longo de toda a área de cada provete. O tom esbranquiçado resultante do corte das fibras dos geossintéticos devido aos dois ensaios (é necessário ter em atenção que no ensaio de dano mecânico

## 6. Apresentação dos resultados dos ensaios de indução de dano

apenas houve corte das fibras e da camada superficial da GGR) e consequente formação de nódulos cilíndricos sobrepostos à GGR que predominou nos provetes solicitados ao ensaio de abrasão levou a que não fosse detetável visualmente inclusão de partículas de óxido de alumínio normalizado durante o ensaio de dano mecânico na GGR dos provetes.

Outra patologia observada na GGR dos provetes reside na quebra das ligações entre barras de fibras da GGR que se encontravam inicialmente perpendiculares umas às outras. Este dano surge devido ao movimento vaivém da lixa em relação à GGR e por estes se encontrarem em contacto direto. Esta patologia pode-se observar sobretudo nos provetes 1, 3, 5, 6, 7 e 9. Nos provetes 1, 3, 6, 7 e 9 verifica-se que há mudança de posição espacial das fibras da GGR após o ensaio de abrasão. Este fenómeno sustenta o que foi referido em 6.3.4, ou seja, quanto maior for a quebra de ligações entre barras de fibras da GGR que se encontram perpendiculares entre si, maior a probabilidade de haver mudança de posição espacial dessas barras de fibras.

### 6.5. Considerações Finais

Nesta secção faz-se um resumo da observação visual realizada neste trabalho.

Quanto aos provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico, pode-se observar pela Tabela 6. 2., que o provete mais danificado foi o provete 1, sendo os provetes 8 e 10 os que menos ficaram danificados. Esta conclusão é visivelmente fácil de verificar visto que o provete 1 é o que possui maior número de células vermelhas, sendo esta a cor observada em todas as células correspondente a este provete. Os provetes 8 e 10 não possuem qualquer célula a vermelho. O provete 8 possui duas células verdes, cada uma com uma tonalidade diferente e o provete 10 possui duas células verdes, com a mesma intensidade, sendo verdes claras (verde que representa maior grau de danificação quando comparado com o verde escuro). Esta razão pode ser devida ao facto da pequena alteração que o óxido de alumínio normalizado sofreu à medida que eram elaborados os ensaios. Isto porque para a realização de todos os ensaios se utilizou o mesmo óxido de alumínio normalizado, mesmo tendo o cuidado de peneirar o mesmo após cada três utilizações. Estas alterações podem estar relacionadas com a possível perda de tamanho do óxido de alumínio normalizado à medida que eram realizados os ensaios. Não esquecer que a tonalidade verde mais escuro corresponde a um provete com grau de danificação praticamente inexistente, e uma tonalidade verde clara representa um provete com um pequeno grau de danificação. Na Tabela 6. 2. pode-se observar, também, que para o provete 8 e em termos das alterações registadas este ensaio foi tão danoso para o GTX como para a GGR, visto que, de uma forma geral, ambas possuem o número de células vermelhas, verdes, amarelas e laranjas relativamente semelhante. No provete 10 o ensaio foi mais danoso para o GTX do que para a GGR, pois, as células relativas ao GTX são cor de laranja ou amarelas, e as células que representam a GGR são maioritariamente verdes, apesar de existir uma célula com cor laranja.

Nos provetes resultantes do ensaio de abrasão pode-se verificar através da Tabela 6. 6., que o mais danificado foi o provete 3, visto que apresenta todas as células com a cor vermelha, sendo os menos danificados os provetes 9 e 10, que apresentam o maior número de células verdes. Este fenómeno pode ter origem na forma como estavam esticados os provetes e do grau de fragilidade dos mesmos. Em todos os ensaios os provetes apresentavam-se bem esticados, tendo sempre o cuidado de rejeitar os provetes que não permaneciam bem

esticados ao longo do ensaio. Apesar disso é possível que cada provete tivesse permanecido durante o ensaio esticado no abrasímetro com diferentes forças de tração. Por exemplo, tendo em conta esta premissa e os resultados da Tabela 6. 6., pode ter ocorrido o provete 3 ter ficado mais bem esticado e os provetes 9 e 10 menos esticados durante o ensaio. Outro condicionante que se deve ter em conta é a lixa com que os geossintéticos estiveram em contacto direto, que era sempre igual em todos os ensaios e era substituída após cada ensaio. Também esta permanecia sempre esticada durante todos os ensaios. Apesar do que foi referido anteriormente, é necessário não esquecer que ao longo de um mesmo provete, ou de provete para provete podem existir zonas pontuais onde os geossintéticos podem possuir maior fragilidade, levando a que esta degradação seja mais gravosa em algumas zonas. Através da Tabela 6. 6., pode-se verificar, também que o geossintético mais danificado pela abrasão foi o GTX.

Por último apresentou-se o registo fotográfico, descrição e comentários dos provetes sujeitos aos ensaios de dano mecânico + abrasão. Através da Tabela 6. 9. pode-se concluir que, em termos dos parâmetros observados, os provetes mais danificados foram os provetes 6 e 9, uma vez que são os que possuem maior número de células vermelhas e menor número de células verdes. Nos provetes 3 e 6, pode-se verificar que foram os casos em que a GGR ficou mais danificada porque apresenta todas as células referentes à GGR com a cor vermelha. Os provetes onde se observou menos danificação dos geossintéticos foram nos provetes 2 e 4. A origem dos resultados obtidos e a diferença de quantificação dos resultados ao longo de todos os provetes pode estar em fenómenos já apresentados, como o comportamento do óxido de alumínio normalizado durante os ensaios de dano mecânico, a força de tração aplicada aos geossintéticos durante os ensaios de abrasão e no grau de fragilidade dos geossintéticos. De uma forma geral, após cada provete ser submetido aos dois ensaios, a GGR foi o geossintético que se encontra mais danificado.

Como facilmente se pode concluir, de uma forma geral, para as condições ensaiadas, estes geossintéticos sofreram maiores alterações observáveis visualmente sendo submetidos aos ensaios de dano mecânico e abrasão consecutivamente.

## 7. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS HIDRÁULICOS

### 7.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos após os ensaios hidráulicos realizados, a análise e discussão dos mesmos. Os ensaios hidráulicos que foram feitos são os que se seguem:

- Determinação da capacidade de escoamento no plano dos geossintéticos;
- Determinação da permeabilidade na direção normal ao plano do geossintéticos.

É necessário ter em consideração que em todos eles se elaborou o estudo do GTX e da GGR em conjunto, situando-se a GGR imediatamente acima do GTX, permitindo o estudo do comportamento dos geossintéticos combinados, trabalhando em simultâneo, como se fosse um único geossintético (Figura 7. 1.).



Figura 7. 1: Posição de GTX e GGR em relação um ao outro

Inicialmente começou-se por efetuar o estudo enquanto os geossintéticos ainda não tinham sofrido qualquer tipo de danos (provetes intactos). De seguida efetuou-se o estudo após ensaios laboratoriais de simulação da danificação durante a sua instalação em obra (ensaio de dano mecânico); provetes submetidos a abrasão; provetes submetidos a ensaios de indução de dano mecânico e de abrasão consecutivamente. Assim, neste capítulo apresentam-se os resultados do estudo do comportamento hidráulico dos geossintéticos (GTX e GGR em conjunto) resultantes dos ensaios de dano mecânico, abrasão, e a combinação dos dois anteriores.

Depois de determinados os parâmetros que permitem o estudo do comportamento hidráulico dos materiais em questão comparou-se com os valores presentes nas tabelas técnicas dos respetivos materiais. Só foi possível fazer referência às propriedades do GTX. Em alguns casos houve a necessidade de aumentar o número de provetes ensaiados. Isto porque houve alguns provetes que adquiriram um comportamento muito diferente em relação aos que sofreram o mesmo tipo de danificação. Esse comportamento distinto pode ter sido devido a questões ligadas aos materiais (ligeiras diferenças de espessura entre os mesmos, com características físicas e mecânicas semelhantes, e não exatamente iguais) ou à realização dos ensaios.

Começa-se por apresentar as análises e discussões dos resultados referentes ao ensaio de permeabilidade longitudinalmente ao plano dos geossintéticos, seguindo-se as que se referem aos ensaios de permeabilidade normal ao plano.

## **7.2. Determinação da permeabilidade na direção do plano dos geossintéticos**

### **7.2.1. Considerações Gerais**

Com o ensaio de determinação da permeabilidade no plano, pretendeu-se estudar o comportamento hidráulico da combinação do GTX com a GGR e avaliar a influência do dano mecânico, da abrasão e dano mecânico + abrasão nessas propriedades hidráulicas.

Com os resultados deste ensaio (descrito em 5.3.1. e em 5.3.2.) é possível calcular a capacidade de escoamento no plano,  $q_{tensão/gradiente}$ , para cada gradiente hidráulico e tensão normal, correspondente à temperatura de 20°C. O valor correspondente à capacidade de escoamento no plano pode possuir a terminologia de coeficiente hidráulico [(Silva, 2010)]. Para tornar possível este cálculo, recorre-se à equação (7.1.).

$$q_{tensão/gradiente} = \frac{V \times R_T}{W \times t} \quad (7.1.)$$

Em que:

- $q_{tensão/gradiente}$  - é a capacidade de escoamento no plano por unidade de área para uma determinada tensão e gradiente ou coeficiente hidráulico ( $m^2s^{-1}$ );
- $V$  - média do volume de água recolhido ( $m^3$ );
- $R_T$  - fator de correção para a temperatura da água de 20°C (adimensional);
- $W$  - largura do provete (m);
- $t$  - tempo (s).

Os valores resultantes do ensaio podem ser indicados num gráfico onde se relaciona diretamente a capacidade de escoamento com a tensão normal para os dois gradientes utilizados. A Figura 7. 2. ilustra o exemplo incluído na norma de ensaio.

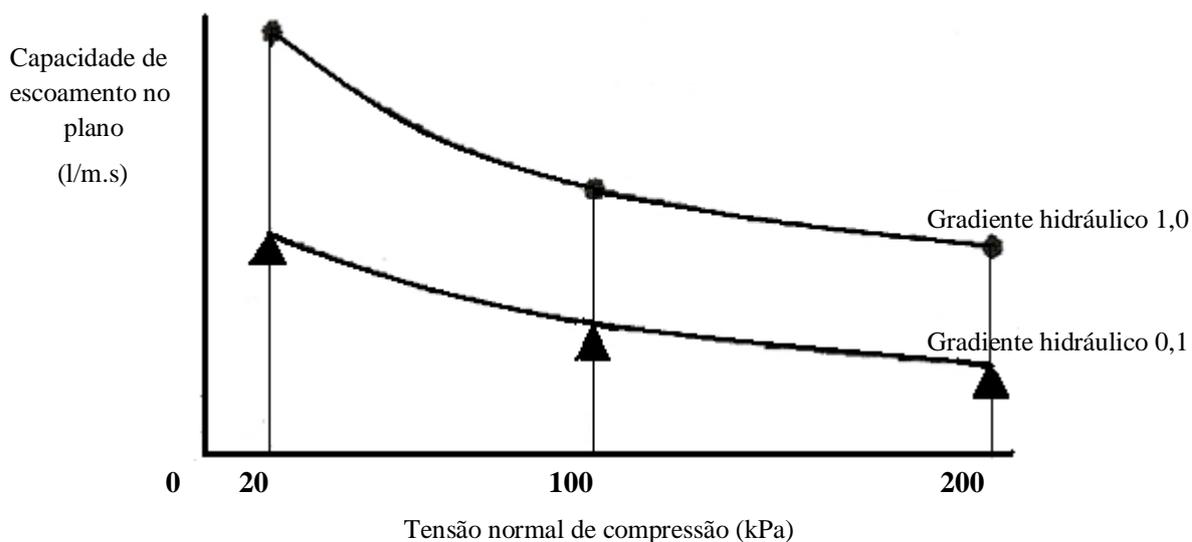


Figura 7. 2: Exemplos de curvas de capacidade de escoamento no plano versus tensão normal de compressão (adaptado de NP\_EN\_ISO\_12958 (2005))

Na norma do ensaio é ainda introduzido o conceito de transmissividade, que se refere às condições de escoamento para um gradiente hidráulico unitário em regime laminar [(NP\_EN\_ISO\_12958, 2005)]. De acordo com a norma, é preferível utilizar-se o termo capacidade de escoamento uma vez que o escoamento pode ocorrer em regime não laminar. Apesar disso, este termo é muito utilizado para caracterizar a capacidade de drenagem dos geossintéticos, por largura dos mesmos, mantendo um gradiente hidráulico unitário e um fluxo de escoamento laminar no seu interior, segundo o seu plano. A transmissividade pode ser definida como sendo, também, a capacidade de vazão de um geossintético na direção do seu plano [(Silva, 2010)]. Este valor pode ser obtido a partir da equação (7.2.).

$$\theta = \frac{q_{\text{tensão/gradiente}}}{i} \quad (7.2.)$$

Em que:

- $\theta$ : transmissividade (l/(ms) ou  $m^2/s$ );
- $i$ : valor do gradiente hidráulico (mm/mm).

Também é possível determinar a velocidade do fluxo de água que atravessa o geossintético longitudinalmente ao seu plano (equação (7.3.)).

$$k_p = \frac{\theta}{\Delta x} \quad (7.3.)$$

Onde:

- $k_p$  – coeficiente de permeabilidade no plano do geossintético (m/s);
- $\Delta x$  – espessura do provete (m).

Oliveira (2011), de forma a melhor se compreender as expressões apresentadas que permitem determinar a capacidade de escoamento no plano por unidade de área para uma determinada tensão e gradiente hidráulico e a transmissividade, apresentou a dedução das expressões correspondentes. Essa apresentação é aqui reproduzida.

Com o fim de tornar o seu cálculo mais simples, despreza-se a influência da temperatura na viscosidade da água e o fator corretivo associado à temperatura,  $R_T$ , resultando na equação (7.4.).

$$q_{\text{tensão/gradiente}} = \frac{V}{W \times t} \quad (7.4.)$$

Tendo em conta que, sendo  $Q$  o caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ):

$$Q = \frac{V}{t} \quad (7.5.)$$

Vem:

$$q_{\text{tensão/gradiente}} = \frac{Q}{W} \quad (7.6.)$$

Segundo a lei de Darcy:

$$Q = k \times i \times S \quad (7.7.)$$

Onde:

- $k$  – coeficiente de permeabilidade do material ( $\text{m/s}$ );
- $S$  – área do escoamento do fluido ( $\text{m}^2$ ).

Resulta:

$$Q = k_p \times \frac{\Delta h}{L} \times S \quad (7.8.)$$

Onde:

- $\Delta h$  - perda de carga verificada no escoamento (m);
- $L$  - comprimento do provete (m).

Sabendo que a área do escoamento do fluido é determinada através da equação (7.9.):

$$S = \Delta x \times W \quad (7.9.)$$

Sendo assim, a expressão do caudal,  $Q$ , vem:

$$Q = k_p \times \frac{\Delta h}{L} \times \Delta x \times W \quad (7.10.)$$

$$\downarrow$$

$$\frac{Q}{W} = k_p \times \frac{\Delta h}{L} \times \Delta x \quad (7.11.)$$

$$\downarrow$$

$$\frac{Q}{W} = k_p \times i \times \Delta x \quad (7.12.)$$

Sendo a transmissividade,  $\theta$ , o produto do coeficiente de permeabilidade do geossintético,  $k_p$ , pela espessura do mesmo,  $\Delta x$ , compreende-se que:

$$\frac{Q}{W} = \theta \times i \quad (7.13.)$$

$$\downarrow$$

$$\theta = \frac{Q}{W \times i} \quad (7.14.)$$

Tendo em conta todas as expressões anteriormente apresentadas, conclui-se que:

$$q_{\text{tensão/gradiente}} = \frac{V}{W \times t} \quad (7.15.)$$

É necessário ter em atenção que aquando do tratamento de dados, no presente trabalho, teve-se sempre em consideração o efeito da temperatura.

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados obtidos correspondendo a 3 provetes intactos, 3 provetes anteriormente sujeitos ao ensaio de dano mecânico, outros 3 solicitados à abrasão, e 3 primeiramente solicitados à combinação de dano mecânico e abrasão.

### 7.2.2. Provetes intactos

Na Tabela 7. 1. apresentam-se os diferentes valores que o coeficiente hidráulico tomou para os 3 provetes intactos quando sujeitos a diferentes tensões e gradientes hidráulicos.

Tabela 7. 1: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes intactos

	Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}} (\text{m}^2/\text{s})$					
	$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Provete 1	1,91E-04	9,67E-04	1,67E-04	2,95E-04	1,77E-04	1,15E-04
Provete 2	1,51E-04	1,26E-03	5,98E-05	1,48E-04	6,63E-05	6,23E-05
Provete 3	1,06E-04	5,59E-04	9,20E-05	1,43E-04	9,27E-05	9,02E-05
<b>Valor Médio</b>	<b>1,49E-04</b>	<b>9,28E-04</b>	<b>1,06E-04</b>	<b>1,95E-04</b>	<b>1,12E-04</b>	<b>8,90E-05</b>
Desvio-padrão	4,23E-05	3,51E-04	5,52E-05	8,63E-05	5,78E-05	2,62E-05
Coeficiente de variação (%)	28,31	37,87	51,89	44,26	51,60	29,40

Na Tabela 7. 1. pode-se observar os valores médios correspondentes a cada tensão e gradiente aplicados durante a realização do ensaio, valores que vão ser utilizados para comparar e compreender o comportamento de provetes constituídos pelo mesmo material, mas danificados.

Na Figura 7. 3. apresenta-se a variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada ao longo da realização do ensaio para os provetes intactos.

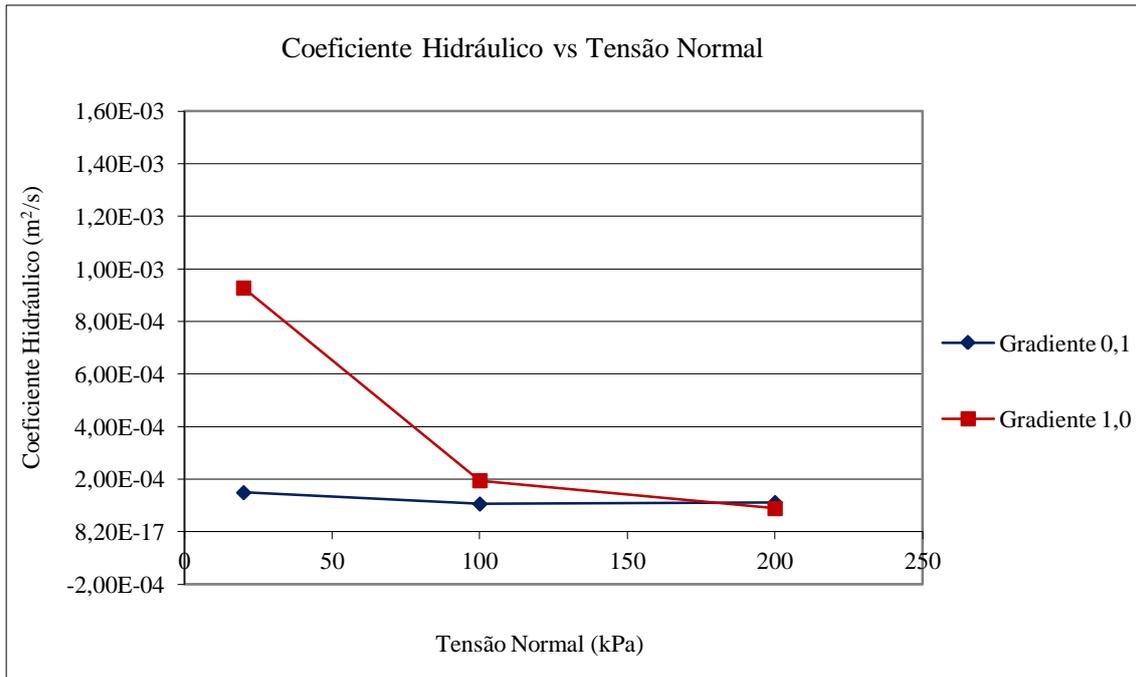


Figura 7. 3: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes intactos

### 7.2.2.1. Valores de $q_{\text{tensão/gradiente}}$

De acordo com as propriedades nominais dos materiais (Tabela 5. 2.) o valor do coeficiente hidráulico do GTX para uma tensão de 20 kPa é  $11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Como se pode observar através da Tabela 7. 1., o valor do coeficiente hidráulico do conjunto GTX+GGR mais reduzido para uma tensão de 20 kPa, determinado durante o presente ensaio, foi de  $1,49 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , superior a  $11 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . O valor nominal do coeficiente hidráulico do GTX para uma tensão de 100 kPa é de  $4,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . De acordo com a Tabela 7. 1. o valor mais próximo de  $4,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  é  $1,06 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Neste trabalho não se avaliou a permeabilidade no plano do GTX isolado, para se verificar se os valores medidos em laboratório estariam em consonância com os apresentados nas fichas técnicas do material. No entanto, pode atribuir-se a diferença entre os valores nominais do GTX e os medidos para o conjunto GTX+GGR à existência de alguns locais onde há aumento da espessura do conjunto, e noutros (nas aberturas da geogrelha) criação de zonas que permitem a passagem de água.

Como se pode observar através da Tabela 7. 1., o coeficiente hidráulico adota valores mais reduzidos quanto maior for a tensão de confinamento. Em geral, para a mesma tensão de confinamento, o valor do coeficiente hidráulico é menor quanto menor for o gradiente hidráulico instalado. A exceção observada correspondeu a uma tensão de confinamento de 200 kPa. Este fenómeno pode ter sido devido ao facto de inicialmente ter sido feita uma leitura para um gradiente menor e mais tarde para o maior gradiente, levando a que, durante o tempo em que se ensaiou os provetes para a tensão de 200 kPa e para o menor gradiente houvesse um “rearranjo” dos geossintéticos entre ambos e as placas de neoprene, e compactação de todos eles, diminuindo a quantidade e tamanho de espaços vazios existentes e consequentemente os caminhos que a água poderia percorrer entre eles. É necessário ter em atenção que esta diferença apenas surgiu quando a tensão era de 200

kPa uma vez que foi o valor da maior tensão aplicada nos provetes ao longo de todo o ensaio, tornando mais difícil e moroso o “rearranjo” referido anteriormente. O maior coeficiente hidráulico verificou-se quando a tensão era de 20 kPa e o gradiente hidráulico de 1,0 mm/mm, o que faz sentido, uma vez que para aquando a tensão de 20 kPa era instalada a menor tensão de confinamento ao provete, existindo maior número de espaços vazios entre os geossintéticos e entre as placas, assim como se verificava no interior de cada geossintético. Visto que, para 20 kPa, estava a ser aplicada a menor tensão possível ao conjunto ao longo do ensaio, mais facilmente havia caminhos livres entre os dois geossintéticos, entre as placas e ao longo do perímetro dos mesmos e das paredes laterais do equipamento que possibilitavam a passagem de água. Durante a realização de todos os ensaios houve sempre o cuidado de verificar a existência, ou não, de caminhos livres por onde a água pudesse circular sem ser através dos geossintéticos, de forma a fornecer resultados inválidos aquando o tratamento de dados. O coeficiente hidráulico assumiu valores superiores, também, quanto maior fosse o valor do gradiente hidráulico instalado, o que é natural uma vez que o desnível da água a montante e a jusante do provete é maior, fornecendo maiores pressões a montante do provete e consequentemente maiores velocidades da água aquando a sua passagem pelos geossintéticos.

Como se pode verificar na Tabela 7. 1., por vezes surgiram coeficientes de variação elevados, nomeadamente quando a tensão era de 100 kPa. Estes valores podem ser consequência do facto de não terem sido utilizadas as mesmas placas de neoprene para cada um dos 3 provetes, e de nem todas possuírem exatamente a mesma espessura. A placa de neoprene que possuía a menor espessura, a mesma era de 7,93 mm. A placa de neoprene que continha a maior espessura, esta era de 9,65 mm. Também se considera que a espessura dos provetes pode levar a que o coeficiente de variação assumia valores mais elevados, uma vez que os 3 provetes não possuíam todos exatamente a mesma espessura. Garantir que todos os provetes tivessem exatamente o mesmo comprimento e largura não foi fácil, possibilitando a existência por vezes, de certos provetes com comprimento ou largura com mais ou menos 1 ou 2 mm do que os restantes.

Foram ensaiados 6 provetes intactos uma vez que nem sempre era possível garantir a inexistência de fugas de água entre os dois geossintéticos, entre as placas e os geossintéticos e entre todos eles e as paredes laterais do equipamento. Quando se verificava a existência de caminhos livres sem ser no interior dos geossintéticos, desprezavam-se os resultados respetivos. No tratamento de resultados apenas se efetuou o estudo tendo em conta o número mínimo de provetes exigidos pela norma.

Para o ensaio em causa, o coeficiente hidráulico, em média, assumiu o maior valor,  $9,28 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , quando a tensão era de 20 kPa e o gradiente de 1,0 mm/mm, e o menor valor,  $8,90 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , quando a tensão era de 200 kPa e o gradiente de 1,0 mm/mm.

Como já foi referido, e como se pode visualizar com maior facilidade na Figura 7. 3. em geral, para menores tensões de confinamento e maiores gradientes hidráulicos o valor do coeficiente hidráulico é maior. Este fenómeno é mais visível quanto menor for a tensão aplicada ao provete, tendo maior importância quando a tensão de confinamento é menor que 100 kPa, como se pode observar pela Figura 7. 3..

### 7.2.3. Provete anteriormente sujeitos ao dano mecânico

Os provetes inicialmente foram solicitados ao ensaio de dano mecânico, só depois foram submetidos ao ensaio de permeabilidade longitudinalmente ao seu plano. Os 3 provetes com as quais se realizou este ensaio correspondem, pela ordem indicada de seguida: provetes 6, 10 e 8 da Tabela 6. 1. do capítulo anterior.

Na Tabela 7. 2. apresentam-se os diferentes valores que o coeficiente hidráulico tomou para os 3 provetes inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico quando sujeitos a diferentes tensões e gradientes hidráulicos.

Tabela 7. 2: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes danificados ao ensaio de dano mecânico

	Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}} \text{ (m}^2/\text{s)}$					
	$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Provete 1	4,51E-04	2,35E-03	1,42E-04	2,87E-04	8,15E-05	9,48E-05
Provete 2	1,27E-04	1,10E-03	1,48E-04	2,79E-04	1,51E-04	1,02E-04
Provete 3	1,46E-04	1,02E-03	5,53E-05	2,18E-04	8,54E-05	9,75E-05
<b>Valor Médio</b>	<b>2,42E-04</b>	<b>1,49E-03</b>	<b>1,15E-04</b>	<b>2,61E-04</b>	<b>1,06E-04</b>	<b>9,81E-05</b>
Desvio-padrão	1,82E-04	7,50E-04	5,19E-05	3,77E-05	3,90E-05	3,70E-06
Coefficiente de variação (%)	75,23	50,33	45,07	14,46	36,83	3,77

A variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada ao longo da realização do presente ensaio é apresentada na Figura 7. 4..

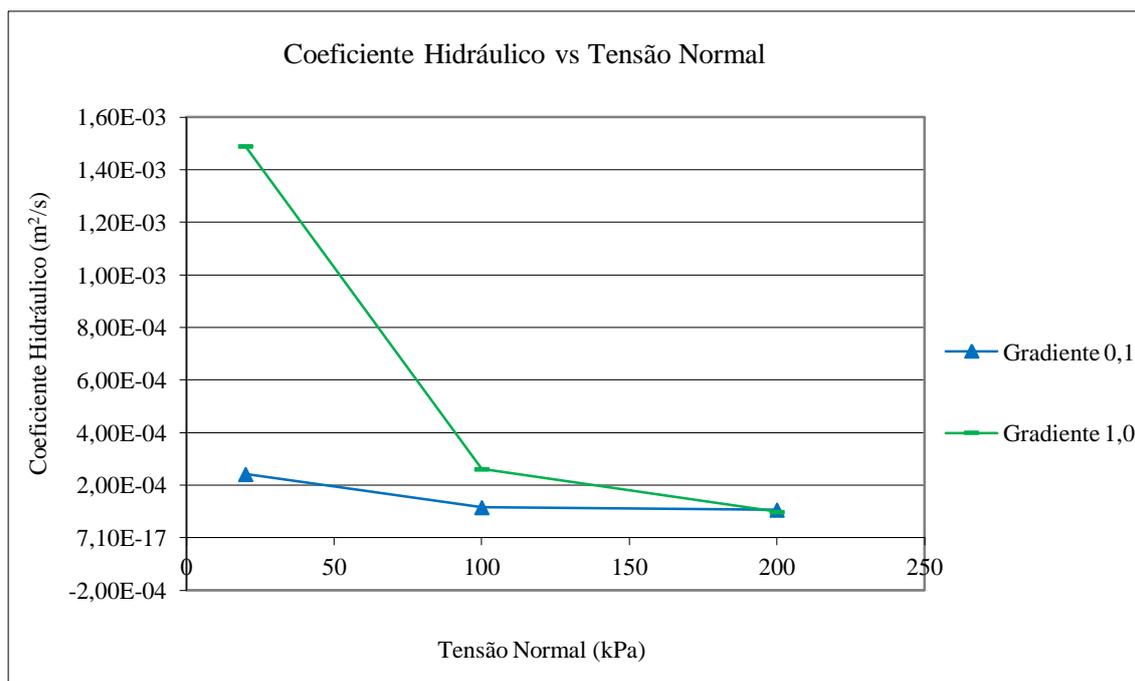


Figura 7. 4: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes primeiramente solicitados ao ensaio de dano mecânico

### 7.2.3.1. Valores de $q_{\text{tensão/gradiente}}$

Os valores resultantes do tratamento de dados de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  para diferentes tensões de confinamento e gradientes hidráulicos, quando foram ensaiados provetes primeiramente solicitados ao ensaio de dano mecânico encontram-se na Tabela 7. 2.. A variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes, tendo em consideração os gradientes hidráulicos para os quais se realizou o ensaio (0,1 e 1,0 mm/mm) pode-se observar na Figura 7. 4..

De acordo com a Tabela 7. 2., e tal como se sucedeu com os provetes intactos, o coeficiente hidráulico possui valores superiores quanto menor for a tensão normal instalada no provete e quanto maior for o gradiente hidráulico. As razões destes fenómenos encontram-se explicadas em 7.2.2.1.. Por outras palavras, é devido à maior capacidade de circulação da água possibilitada pela existência de maior número e tamanho de caminhos livres, e é devido à existência de maiores pressões da água que atravessa os provetes provenientes do maior desnível de água fornecido, respetivamente. É necessário ter em atenção que, como se sucedeu para provetes intactos, houve um caso em que não se verificou que o coeficiente hidráulico era maior quanto maior fosse o gradiente hidráulico: quando a tensão de confinamento era de 200 kPa. A explicação para esta exceção também já foi explicada em 7.2.2.1., e é devido à existência de um maior “rearranjo” dos geossintéticos entre si e entre os mesmos e as placas de neoprene, reduzindo o número e tamanho de espaços vazios existentes entre os diferentes materiais e no interior do geossintéticos.

O maior valor encontrado para a média dos coeficientes hidráulicos dos 3 provetes foi de  $1,49 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , e verificou-se quando a tensão normal era de 20 kPa e o gradiente hidráulico era de 1,0 mm/mm, tal como aconteceu quando os ensaios recorrendo a provetes intactos.

## 7. Resultados, Análise e Discussão dos Ensaios Laboratoriais

A média dos coeficientes hidráulicos para provetes primeiramente solicitados ao ensaio de dano mecânico foi menor quando foi aplicada a tensão de 200 kPa e o gradiente hidráulico de 1,0 mm/mm, tomando o valor de  $9,81 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . O mesmo se observou durante o ensaio de provetes intactos.

Também se pode observar, através da Tabela 7. 2., a existência de elevados coeficientes de variação. A sua existência, tal como se sucedeu aquando os ensaios com provetes intactos, pode ter sido devida à existência de caminhos livres, por onde a água podia circular, entre os dois geossintéticos, ou entre as placas e os geossintéticos, ou entre o conjunto geossintéticos + placas de neoprene e as paredes laterais do equipamento. Pode ter sido devido ao facto de nem todos os provetes possuírem exatamente a mesma espessura, e por vezes, ser difícil de assegurar que todos eles tinham o mesmo comprimento e largura. Todos estes fatores apresentados que influenciam a percentagem do coeficiente de variação já foram explicados mais exaustivamente em 7.2.2.1.. Mas para além de todos estes fatores, para os provetes que foram submetidos primeiramente ao ensaio de dano mecânico, existe um outro que é de maior importância do que os restantes. Após se submeter todos os provetes ao ensaio de dano mecânico, nem em todos eles se observaram danificações com o mesmo grau de gravidade, resultando uns provetes mais danificados do que outros. Com o objetivo de se diminuir a percentagem do coeficiente de variação, ainda se ensaiou mais um provete com o tipo de danificação em causa, mas este não foi incluído uma vez que não se considerou válido, visto que apresentou um comportamento muito distinto dos restantes, de forma a não se poder considerar que possuía um comportamento típico de geossintéticos com o tipo de danificação em causa.

Através da observação da Figura 7. 4. foi possível observar, que para valores inferiores da tensão normal aplicada nos provetes de 100 kPa, a diferença de valores dos coeficientes de variação para os diferentes gradientes hidráulicos tomou valores significativamente muito diferentes, reduzindo essa diferença à medida que eram aplicadas tensões maiores.

### 7.2.3.2. Influência do dano mecânico na permeabilidade longitudinal ao plano

Para uma melhor compreensão da influência das patologias devidas ao ensaio de dano mecânico no comportamento dos provetes quanto à permeabilidade longitudinalmente aos planos dos mesmos, foram elaborados a Tabela 7. 3. e a Figura 7. 5..

Tabela 7. 3: Relação de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  entre provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico e intactos

		Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )					
		$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Intactos	Valor Médio	1,49E-04	9,28E-04	1,06E-04	1,95E-04	1,12E-04	8,90E-05
	Desvio-padrão	4,23E-05	3,51E-04	5,52E-05	8,63E-05	5,78E-05	2,62E-05
	Coeficiente de variação (%)	28,31	37,87	51,89	44,26	51,6	29,4
Dano mecânico	Valor Médio	2,42E-04	1,49E-03	1,15E-04	2,61E-04	1,06E-04	9,81E-05
	Desvio-padrão	1,82E-04	7,50E-04	5,19E-05	3,77E-05	3,90E-05	3,70E-06
	Coeficiente de variação (%)	75,23	50,33	45,07	14,46	36,83	3,77
Diferença de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico e Intactos		9,30E-05	5,62E-04	9,00E-06	6,60E-05	-6,00E-06	9,10E-06
Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico e Intactos (%)		62,42	60,56	8,49	33,85	-5,36	10,22

De acordo com a Tabela 7. 3. é visível a diferença de permeabilidade existente entre provetes intactos e provetes com danos devido ao ensaio de dano mecânico. Como se pode observar através da tabela, os coeficientes hidráulicos possuem valores mais elevados quando os provetes foram inicialmente submetidos ao ensaio de dano mecânico. Quer isto dizer que a velocidade de escoamento no interior dos geossintéticos é maior quanto maiores forem os danos presentes nos mesmos devidos à sua colocação em obra. Apenas se excetua quando a tensão é de 200 kPa e o gradiente é o mais reduzido, de 0,1 mm/mm. A maior variação de coeficiente hidráulico registou-se quando os provetes eram solicitados a uma tensão de confinamento de 20 kPa e é de 62,42%. Com este fenómeno pode concluir-se que, para os materiais e condições consideradas, a influência dos danos provocados durante o ensaio de dano mecânico tem maior influência no comportamento hidráulico dos geossintéticos segundo o seu plano quando são submetidos a menores tensões de confinamento.

A Figura 7. 5. permite observar e comparar a variação do coeficiente hidráulico em função dos diferentes valores da tensão de confinamento, tendo em conta os dois gradientes hidráulicos.

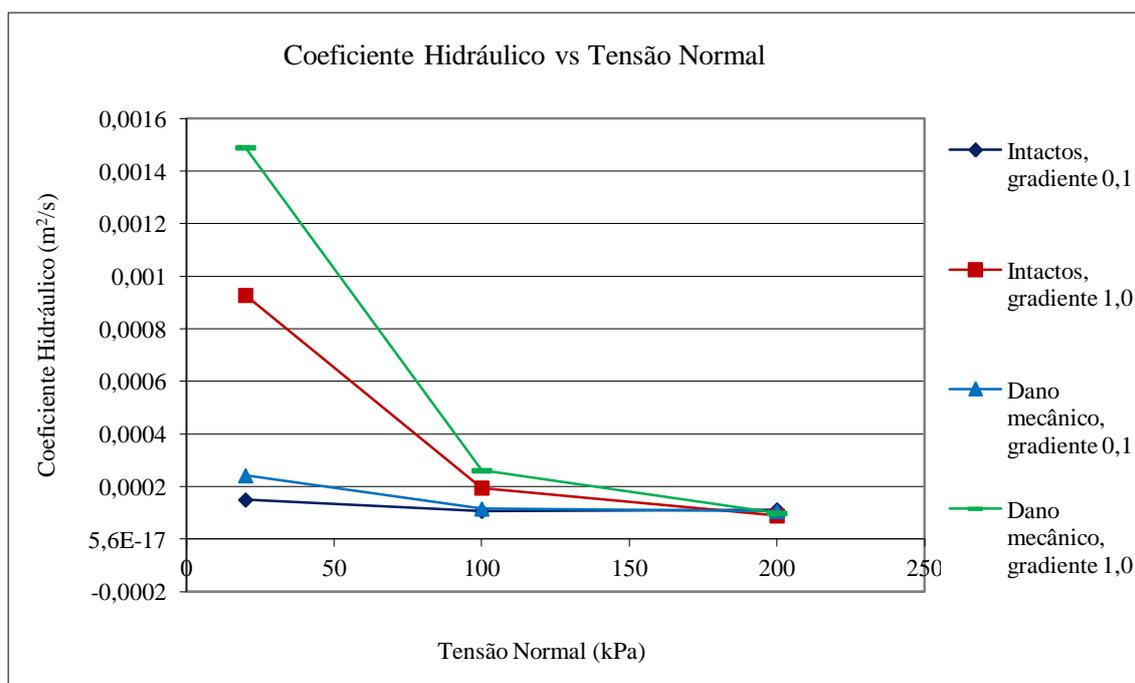


Figura 7. 5: Variação de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  em função da tensão aplicada em provetes inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico e intactos

Também na Figura 7. 5. se observa que para menores tensões de confinamento existem maiores diferenças dos valores dos coeficientes hidráulicos para tensões mais reduzidas, sendo os coeficientes hidráulicos correspondentes a provetes com danificações devidas ao ensaio de dano mecânico superiores aos referentes a provetes intactos.

De seguida, apresenta-se uma possível explicação para o aumento dos coeficientes hidráulicos e, por isso, aumento da permeabilidade dos geossintéticos segundo os seus planos quando foram solicitados ao ensaio hidráulico provetes com danificações devidas ao ensaio de dano mecânico.

Ao longo do ensaio de dano mecânico os provetes foram submetidos a cargas cíclicas de compressão que podem ter causado redução da espessura dos mesmos, e embora possam ter sido sujeitos à diminuição de tamanho ou até ao fecho de caminhos livres existentes no interior dos provetes, levou também a cortes de fibras dos geossintéticos, com diferentes dimensões. Isto porque os mesmos encontravam-se diretamente em contacto com um material granular em que o seu movimento pode ter provocado esses mesmos cortes. A obtenção desses cortes levou a um crescente número e tamanho dos caminhos por onde a água pode circular. Apesar disso, o movimento das partículas do agregado usado no ensaio de dano mecânico (óxido de alumínio normalizado), devido à aplicação das cargas cíclicas durante o mesmo levou a que determinadas partículas do material granular se alojassem nos geossintéticos. Essas partículas podem ter levado ao fecho total ou parcial de caminhos que inicialmente se encontravam livres, que a água poderia percorrer. Apesar da obstrução ou diminuição de determinados caminhos livres existentes anteriormente ou da possível redução da espessura dos provetes, é importante referir que a criação de caminhos livres devido a cortes de fibras dos geossintéticos foi muito mais significativa, levando a que o coeficiente hidráulico fosse superior recorrendo à solicitação de provetes com danos devidos ao ensaio de dano mecânico. Os cortes de fibras dos geossintéticos podem ter tido um efeito muito mais relevante, visto que depois do ensaio de indução de dano mecânico e antes de serem solicitados aos ensaios hidráulicos, os provetes foram colocados a saturar e o contacto com a água pode ter provocado o desprendimento das partículas de agregado que tinham ficado presas na estrutura dos geossintéticos.

Por outras palavras, é provável que os provetes que inicialmente foram submetidos ao ensaio de dano mecânico possuam maior capacidade de escoamento em relação aos provetes intactos devido aos cortes que a ação do material granular e da aplicação das cargas cíclicas provocaram aquando a solicitação desses provetes ao ensaio de dano mecânico.

### 7.2.4. Provetes anteriormente sujeitos à abrasão

Nesta secção incluem-se os resultados obtidos com provetes anteriormente solicitados ao ensaio de abrasão. Os 3 provetes com os quais se realizou este ensaio correspondem aos provetes 6, 7 e 8 que se apresentam na Tabela 6. 3. e na Tabela 6. 4..

Na Tabela 7. 4. incluem-se os diferentes valores do coeficiente hidráulico para os 3 provetes inicialmente solicitados à abrasão, quando sujeitos a diferentes tensões e gradientes hidráulicos.

Tabela 7. 4: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes danificados recorrendo ao ensaio de abrasão

	Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )					
	$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Provete 1	9,07E-04	3,87E-03	1,55E-04	5,03E-04	1,02E-04	1,15E-04
Provete 2	2,73E-04	1,74E-03	1,04E-04	3,00E-04	8,45E-05	7,66E-05
Provete 3	6,94E-04	3,09E-03	1,33E-04	4,62E-04	4,99E-05	8,67E-05
Valor Médio	6,25E-04	2,90E-03	1,31E-04	4,21E-04	7,89E-05	9,29E-05
Desvio-padrão	3,23E-04	1,08E-03	2,55E-05	1,07E-04	2,66E-05	2,01E-05
Coeficiente de variação (%)	51,64	37,08	19,53	25,48	33,73	21,63

Na Figura 7. 6. apresenta-se a variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada ao longo da realização do presente ensaio.

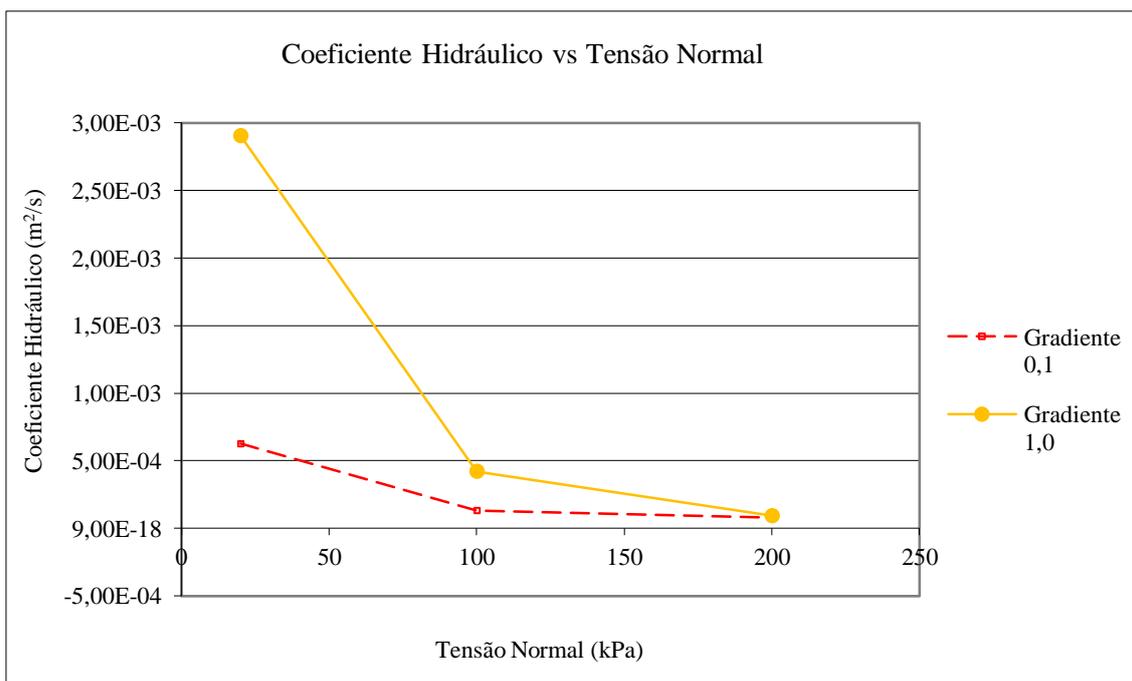


Figura 7. 6: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes primeiramente solicitados ao ensaio de abrasão

#### 7.2.4.1. Valores de $q_{\text{tensão/gradiente}}$

Os valores resultantes do cálculo de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  para as diferentes tensões de 20 kPa, 100 kPa e 200 kPa, e para os dois gradientes hidráulicos 0,1 mm/mm e 1,0 mm/mm encontram-se tabelados na Tabela 7. 4.. Na

Figura 7. 6. é possível observar a variação do valor do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada ao provete, tendo em conta os dois gradientes hidráulicos distintos.

Como se pode observar na Tabela 7. 4., quanto maior a tensão de confinamento aplicada aos provetes, menor o valor do coeficiente hidráulico. Para maiores gradientes hidráulicos, maiores são os valores do coeficiente hidráulico. As premissas atrás descritas verificaram-se para todos os casos, não existindo nenhuma exceção, ao contrário do que se tinha verificado para provetes com outro tipo de danificação.

A explicação para o facto de resultarem valores do coeficiente hidráulico maiores, quanto maior for o gradiente hidráulico e menor for a tensão aplicada encontra-se descrita em 7.2.2.1..

De acordo com a Tabela 7. 4., verifica-se que a média dos coeficientes hidráulicos toma o valor mais reduzido de  $7,89 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  quando são aplicados uma tensão de 200 kPa e o gradiente de 0,1 mm/mm. O maior valor da média dos coeficientes hidráulicos corresponde à tensão de 20 kPa e ao gradiente de 1,0 mm/mm, sendo de  $2,90 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

De acordo com a Tabela 7. 4. é possível observar, também, os valores que o coeficiente de variação assumiu para as distintas médias apresentadas do coeficiente hidráulico. É possível verificar que para menores tensões verificam-se maiores percentagens do coeficiente de variação. As consequências deste fenómeno apresentam-se em 7.2.2.1.. Também é necessário ter em atenção que depois de ensaiados à abrasão, o grau de dano induzido nos vários provetes não é o mesmo, levando a uma variabilidade de resultados e consequente aumento do coeficiente de variação. Mesmo assim, as percentagens dos coeficientes de variação presentes na Tabela 7. 4. não se consideraram muito elevadas, de maneira a que não se achou necessário repetir algum ensaio com provetes com este tipo de danificação.

Na Figura 7. 6. é possível visualizar-se a variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada aos provetes, tendo em conta o gradiente hidráulico instalado. Verifica-se que para tensões até 100 kPa, a diferença de valores dos coeficientes hidráulicos para os dois gradientes hidráulicos tomou valores significativamente muito diferentes, reduzindo essa diferença à medida que eram aplicadas tensões superiores.

### **7.2.4.2. Influência da abrasão na permeabilidade longitudinal ao plano**

De maneira a melhor se compreender da influência das patologias devidas ao ensaio de abrasão no comportamento dos provetes quanto à permeabilidade longitudinal aos planos dos mesmos, foram elaborados a Tabela 7. 5. e a Figura 7. 7..

Tabela 7. 5: Relação de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  entre provetes solicitados ao ensaio de abrasão e intactos

		Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )					
		$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Intactos	Valor Médio	1,49E-04	9,28E-04	1,06E-04	1,95E-04	1,12E-04	8,90E-05
	Desvio-padrão	4,23E-05	3,51E-04	5,52E-05	8,63E-05	5,78E-05	2,62E-05
	Coeficiente de variação (%)	28,31	37,87	51,89	44,26	51,6	29,4
Abrasão	Valor Médio	6,25E-04	2,90E-03	1,31E-04	4,21E-04	7,89E-05	9,29E-05
	Desvio-padrão	3,23E-04	1,08E-03	2,55E-05	1,07E-04	2,66E-05	2,01E-05
	Coeficiente de variação (%)	51,64	37,08	19,53	25,48	33,73	21,63
Diferença de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Abrasão e Intactos		4,76E-04	1,97E-03	2,50E-05	2,26E-04	-3,31E-05	3,90E-06
Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Abrasão e Intactos (%)		319,46	212,50	23,58	115,90	-29,55	4,38
Diferença de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Abrasão e Dano mecânico		3,83E-04	1,41E-03	1,60E-05	1,60E-04	-2,71E-05	-5,20E-06
Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Abrasão e Dano mecânico (%)		158,26	94,63	13,91	61,30	-25,57	-5,30

Tal como se sucedeu para provetes submetidos a dano mecânico, também para provetes submetidos abrasão se observou maiores valores para o coeficiente hidráulico, excetuando o caso em que a tensão de confinamento era de 200 kPa e o gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm. A maior variação de valores do coeficiente hidráulico (319,46% e 212,50%) quando se solicitou ao presente ensaio provetes com danificações devidas ao ensaio de abrasão e quando se submeteu provetes intactos verifica-se quando se aplicam menores tensões de confinamento.

Com estas premissas se deduz que os provetes GTX+GGR inicialmente submetidos ao ensaio de abrasão são atravessados por água a velocidades superiores do que se esses provetes nunca tivessem sofrido qualquer tipo de danificações. Logo, para as condições ensaiadas, após a abrasão, este compósito GTX+GGR tornou-se mais permeável. Pela diferença e variação dos valores que o coeficiente hidráulico toma, presentes na Tabela 7. 5., verifica-se que para menores tensões de confinamento, os efeitos dos danos presentes nos provetes quando são submetidos ao ensaio de abrasão são superiores do que quando os mesmos são solicitados ao ensaio de dano mecânico. Isto porque a diferença e a variação de coeficientes hidráulicos para provetes inicialmente submetidos ao ensaio de abrasão e para provetes intactos é maior do que a diferença e variação de coeficientes hidráulicos tendo em conta provetes com danos devidos ao ensaio de dano mecânico e provetes intactos. Em geral a abrasão induz aumentos na capacidade de escoamento que variam entre 319% e 4%, havendo uma diminuição da mesma de cerca de 30% (tensão de confinamento de 100 kPa e gradiente hidráulico de 0,1). Após o dano mecânico esses aumentos variam entre 158% e 13% e para uma tensão de confinamento de 100 kPa houve uma redução da capacidade de escoamento de cerca de 25% e 5% para gradientes hidráulicos de 0,1 e 1,0, respetivamente.

Na Figura 7. 7. pode-se observar e comparar a variação do coeficiente hidráulico em função dos diferentes valores da tensão de confinamento, tendo em conta os dois gradientes hidráulicos para provetes com danificações devidas ao ensaio de abrasão e provetes intactos.

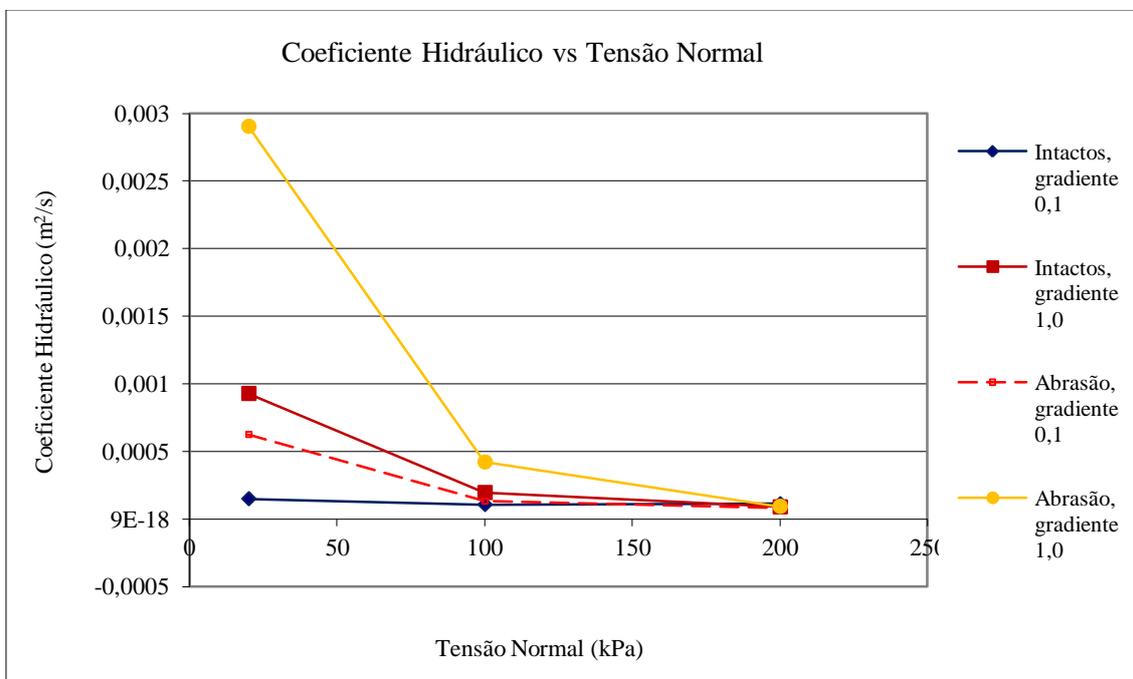


Figura 7. 7.: Variação de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  em função da tensão aplicada em provetes inicialmente solicitados ao ensaio de abrasão e intactos

Na Figura 7. 7. observa-se que para o gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm, a curva que representa os provetes intactos e a que se refere aos provetes danificados através do ensaio de abrasão, quando a tensão é superior a 100 kPa, encontram-se relativamente próximas, não se verificando o mesmo para menores valores de tensão de confinamento. Para o gradiente de 1,0 mm/mm observa-se que para provetes anteriormente submetidos à abrasão, os coeficientes hidráulicos possuem valores muito elevados quando comparados com os valores para os provetes intactos, independentemente da tensão de confinamento aplicada.

De seguida apresenta-se uma possível explicação para este fenómeno. Durante o ensaio de abrasão existe corte e desagregação superficial das fibras dos geossintéticos que contactam diretamente com o abrasivo (lixa P100). A desagregação superficial das fibras é parcial uma vez que após o ensaio de abrasão e durante o ensaio hidráulico essas fibras continuam solidarizadas com o provete, isto é, não se desintegram completamente do provete mas levam à formação de nódulos com a geometria de cilindros, ou seja, nódulos cilíndricos. Com os cortes das fibras atrás descritas, há formação ou até desobstrução de caminhos livres por onde a água pode circular no interior dos geossintéticos, principalmente ao longo da área dos geossintéticos que contactam com as suas imediações. Também a criação de nódulos cilíndricos constituídos pelas fibras parcialmente desintegradas pode conduzir à existência de novos caminhos que a água pode percorrer. Os nódulos cilíndricos, por vezes com elevados diâmetros de secção transversal (Tabela 6. 3. e Tabela 6. 7., capítulo 6), também são atravessados por fluxos de água. Independentemente do tamanho dos nódulos

cilíndricos, nem todos eles possuem a mesma densidade de fibras ao longo da sua constituição, levando a que a água atravessa mais facilmente, e por isso com maior velocidade, uns nódulos cilíndricos do que outros. Quanto menor a densidade de fibras dos geossintéticos existentes nos nódulos cilíndricos, mais facilmente os mesmos são atravessados por fluxos de água, e por isso a água circula com maior velocidade através deles. Também é nas imediações destes nódulos, nos geossintéticos, onde há maior número e/ou tamanho de cortes, havendo, por isso, nessas zonas, maior capacidade de escoamento da água. Com isto se pode deduzir que os valores tão elevados do coeficiente hidráulico são devidos, essencialmente, à existência de cortes e consequente formação de nódulos cilíndricos. Através da presença de nódulos cilíndricos com menores densidades e maiores cortes nos geossintéticos, maior é a criação e/ou desobstrução de novos caminhos por onde a água pode circular, tornando o valor do coeficiente hidráulico maior, assim como a velocidade do fluxo de água que atravessa os mesmos.

### 7.2.5. Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico e abrasão

Para avaliar o comportamento hidráulico no plano do conjunto GTX+GGR após dano mecânico e abrasão sequenciais foram realizados os respetivos ensaios. Estes provetes correspondem, respetivamente, aos provetes 6, 9 e 8 que se apresentam na Tabela 6. 7. e na Tabela 6. 8..

Os diferentes valores que o coeficiente hidráulico tomou para os 3 provetes inicialmente solicitados aos ensaios de dano mecânico + abrasão, quando submetidos a várias tensões e gradientes hidráulicos apresentam-se na Tabela 7. 6..

Tabela 7. 6.: Valores dos coeficientes hidráulicos em função da tensão e gradientes hidráulicos dos 3 provetes danificados recorrendo ao ensaio de dano mecânico e de seguida de abrasão

	Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )					
	$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Provete 1	1,57E-03	5,72E-03	2,06E-04	6,41E-04	9,64E-05	1,81E-04
Provete 2	1,54E-03	6,58E-03	2,04E-04	7,52E-04	1,23E-04	1,46E-04
Provete 3	5,58E-04	2,37E-03	1,37E-04	3,61E-04	8,81E-05	9,06E-05
<b>Valor Médio</b>	<b>1,22E-03</b>	<b>4,89E-03</b>	<b>1,82E-04</b>	<b>5,85E-04</b>	<b>1,02E-04</b>	<b>1,39E-04</b>
Desvio-padrão	5,77E-04	2,22E-03	3,93E-05	2,02E-04	1,82E-05	4,54E-05
Coefficiente de variação (%)	47,14	45,44	21,55	34,48	17,78	32,64

Na Figura 7. 8. inclui-se a variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada ao longo da realização do presente ensaio.

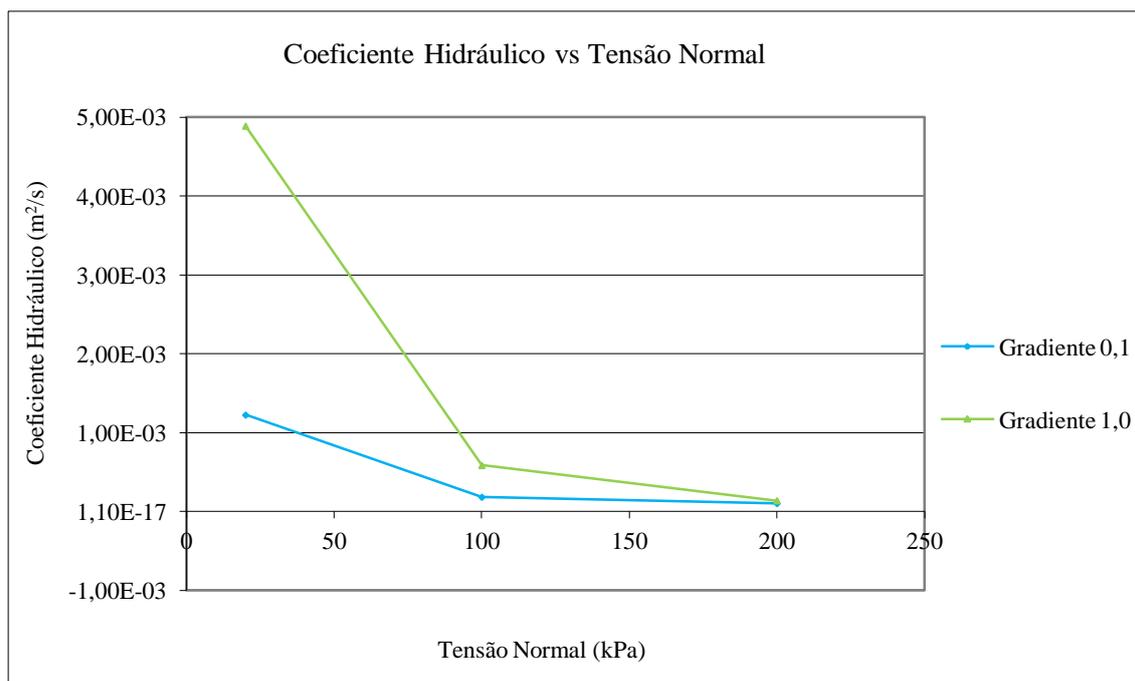


Figura 7. 8: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada nos provetes primeiramente solicitados ao ensaio de dano mecânico e abrasão

#### 7.2.5.1. Valores de $q_{\text{tensão/gradiente}}$

De acordo com a Tabela 7. 6., pode-se observar que após dano mecânico e abrasão o coeficiente hidráulico é maior para menores tensões de confinamento e para maiores gradientes hidráulicos. O coeficiente hidráulico possui o valor mais elevado quando submetido à tensão de 20kPa e ao gradiente hidráulico de 1,0 mm/mm:  $4,89 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . O menor valor do coeficiente hidráulico foi atingido quando se instalou uma tensão de 200 kPa e o gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm:  $1,02 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Na Tabela 7. 6. também se pode observar os diferentes coeficientes de variação que se encontraram para cada média de valores de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$ . É possível observar que as percentagens mais elevadas correspondem à média do coeficiente de variação quando os provetes eram solicitados a uma tensão de 20 kPa. A explicação para este fenómeno encontra-se em 7.2.2.1. e deve-se, também, ao facto de as danificações não se encontrarem nos provetes com a mesma gravidade.

Na Figura 7. 8., onde se pode observar a variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aplicada aos provetes, tendo em conta o gradiente hidráulico instalado, verifica-se que para tensões até 100 kPa, a diferença de valores dos coeficientes de variação para os dois gradientes hidráulicos tomou valores significativamente muito diferentes, reduzindo essa diferença à medida que eram aplicadas tensões superiores.

### 7.2.5.2. Influência do dano mecânico + abrasão na permeabilidade longitudinal ao plano

Para melhor se perceber a influência das patologias devidas consecutivamente ao ensaio de dano mecânico e à abrasão no comportamento dos provetes quanto à capacidade de escoamento no plano dos mesmos, apresentam-se a Tabela 7. 7. e a Figura 7. 9..

Tabela 7. 7: Relação de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  entre provetes solicitados aos ensaios de dano mecânico + abrasão e intactos

		Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )					
		$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$
Intactos	Valor Médio	1,49E-04	9,28E-04	1,06E-04	1,95E-04	1,12E-04	8,90E-05
	Desvio-padrão	4,23E-05	3,51E-04	5,52E-05	8,63E-05	5,78E-05	2,62E-05
	Coeficiente de variação (%)	28,31	37,87	51,89	44,26	51,6	29,4
Dano mecânico + abrasão	Valor Médio	1,22E-03	4,89E-03	1,82E-04	5,85E-04	1,02E-04	1,39E-04
	Desvio-padrão	5,77E-04	2,22E-03	3,93E-05	2,02E-04	1,82E-05	4,54E-05
	Coeficiente de variação (%)	47,14	45,44	21,55	34,48	17,78	32,64
Diferença de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico + Abrasão e Intactos		1,08E-03	3,96E-03	7,63E-05	3,90E-04	-9,5E-06	5,01E-05
Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico + Abrasão e Intactos (%)		722,00	426,80	72,02	199,93	-8,48	56,33
Diferença de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico + Abrasão e Dano mecânico		9,83E-04	3,40E-03	6,73E-05	3,24E-04	-3,5E-06	4,10E-05
Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico + Abrasão e Dano mecânico (%)		406,10	228,10	58,56	124,08	-3,30	41,83
Diferença de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico + Abrasão e Abrasão		6,00E-04	1,99E-03	5,13E-05	1,64E-04	2,36E-05	4,62E-05
Variação de $q_{\text{tensão/gradiente}}$ entre Dano mecânico + Abrasão e Abrasão (%)		95,96	68,58	39,19	38,92	29,91	49,77

De acordo com a Tabela 7. 7. pode-se verificar que, quando se submete provetes ao ensaio hidráulico em causa depois de terem sofrido danificações devidas aos ensaios de dano mecânico e de abrasão, os mesmos possuem coeficientes hidráulicos superiores aos referentes a provetes intactos. Excetua-se o caso em que se encontra aplicada ao provete uma tensão de 200 kPa e o gradiente de 0,1 mm/mm, apesar desta diferença ser reduzida. Esta diferença é de  $9,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  e corresponde a uma variação de -8,48%, como se pode observar na Tabela 7. 7..

Por outras palavras, em geral, as danificações causadas pelos dois agentes considerados levam a que o fluxo de água existente no interior dos geossintéticos se dê a uma velocidade superior à que ocorre sem qualquer tipo de danificação.

Tendo em conta a diferença e variação em percentagem de valores determinados, apresentados na Tabela 7.7., pode-se concluir que, os provetes que foram submetidos aos ensaios de dano mecânico + abrasão foram os geossintéticos que geralmente apresentaram valores de coeficiente hidráulico mais elevados relativamente a todos os outros provetes que sofreram outro qualquer tipo de danificação. O fenómeno apresentado anteriormente já seria de esperar, visto que os provetes danificados recorrendo ao ensaio de dano mecânico e de abrasão consecutivamente são os que apresentam maiores danificações. Este facto apenas não se verifica quando se compara a média dos valores do coeficiente hidráulico de provetes danificados devido ao ensaio de dano mecânico, para a tensão de 200 kPa e gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm, pela razão que já foi apresentada.

Para se melhor entender a diferença da variação dos valores do coeficiente hidráulico em função da tensão normal aos provetes tendo em conta os gradientes hidráulicos, quando se ensaiou provetes intactos e provetes inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico + abrasão, apresenta-se a Figura 7.9..

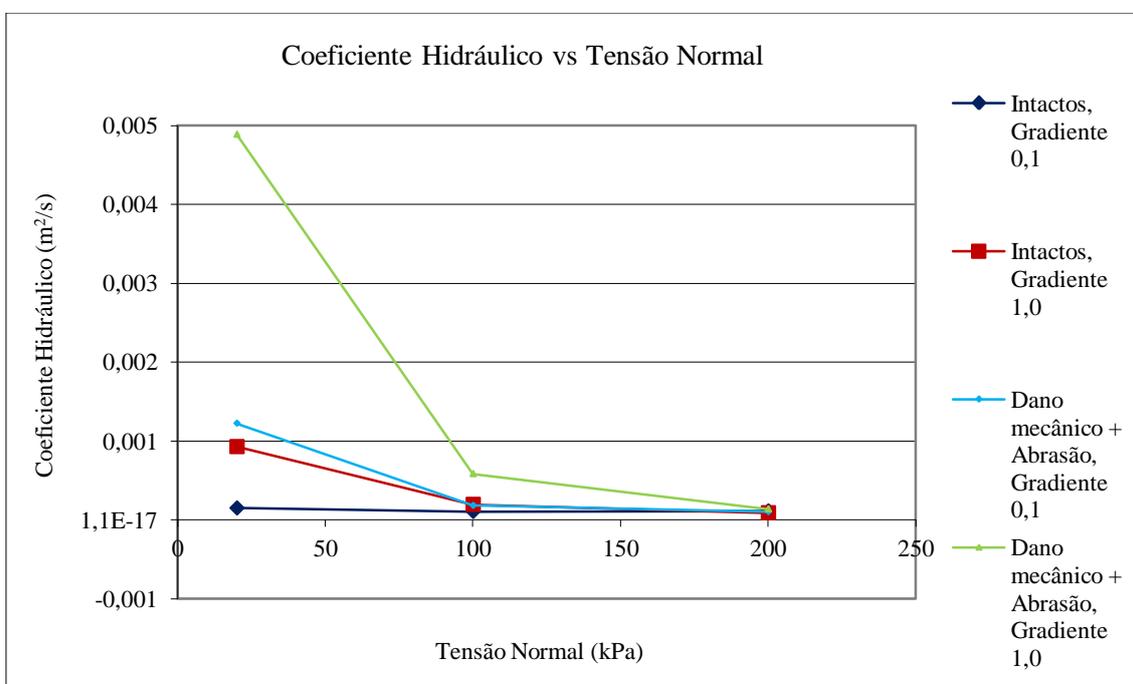


Figura 7.9.: Variação de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$  em função da tensão aplicada em provetes inicialmente solicitados aos ensaios de dano mecânico + abrasão e intactos

De acordo com a Figura 7.9., pode-se verificar que os valores do coeficiente hidráulico referente a provetes inicialmente submetidos aos ensaios de dano mecânico + abrasão são sempre superiores aos coeficientes hidráulicos determinados tendo em conta provetes intactos, como já seria de esperar. Quanto menor a tensão normal aplicada aos provetes, e quanto maior o gradiente hidráulico, maior é a diferença de valores dos coeficientes hidráulicos. Quer isto dizer que quanto mais reduzidos forem os valores do gradiente hidráulico e quanto maior for a tensão aplicada nos geossintéticos, menor é a permeabilidade dos mesmos.

Também se pode visualizar que a curva que representa os provetes inicialmente sujeitos aos ensaios de dano mecânico e abrasão consecutivamente, quando o gradiente hidráulico é de 0,1 mm/mm, encontra-se acima da

curva que representa o comportamento dos provetes intactos quando estes estão sujeitos a um gradiente de 1,0 mm/mm. Apenas na Figura 7. 9. se observa este facto, ou seja, quando se estuda o comportamento hidráulico em causa tendo em conta provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico e de abrasão consecutivamente. Este comportamento reflete a elevada importância dos efeitos dos danos causados pelos ensaios de dano mecânico e abrasão consecutivamente nos geossintéticos, quando comparados com os efeitos dos danos devidos aos outros tipos de indução de dano.

De seguida apresentam-se possíveis razões para que os mesmos possuam os coeficientes hidráulicos apresentados. Deve-se ter em atenção que os provetes em causa foram inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico e só seguidamente ao ensaio de abrasão. Os geossintéticos, após o ensaio de dano mecânico e antes de serem submetidos ao ensaio de abrasão possuem a constituição e as propriedades dos provetes que apenas possuem danificações devidas ao ensaio de dano mecânico. A explicação para a existência de aumento de permeabilidade de provetes solicitados apenas ao ensaio de dano mecânico encontra-se em 7.2.3.2.. Após o ensaio de abrasão, os geossintéticos adquirem, para além das danificações devidas ao ensaio de dano mecânico, danificações devidas à abrasão, que se encontram explicadas de forma aprofundada em 7.2.4.2.. De uma forma sucinta, para além do corte de fibras devidas ao ensaio de dano mecânico, os mesmos provetes adquirem ainda mais cortes, e mais graves devido ao ensaio de abrasão. Desta forma se pode concluir que o aumento da permeabilidade de provetes com danificações provocadas pelo ensaio de dano mecânico e pelo ensaio de abrasão consecutivamente é devido aos cortes das fibras dos geossintéticos que surgem durante os dois ensaios, e devido, também, à formação dos nódulos cilíndricos ao longo do ensaio de abrasão. Quanto menos densos forem esses nódulos cilíndricos, quanto maior for o número de cortes provocados pelos dois ensaios, e quanto menos partículas de óxido de alumínio normalizado se encontrarem alojadas nos geossintéticos, maiores são os valores dos coeficientes hidráulicos, isto é, mais permeáveis são os provetes.

### **7.3. Determinação da permeabilidade na direção normal ao plano dos geossintéticos**

#### **7.3.1. Considerações Gerais**

Como foi referido no capítulo 5. a capacidade de escoamento do geossintético perpendicular ao seu plano foi determinada recorrendo à norma ISO/FDIS 11058 – “Geotextiles and geotextile-related products – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load”. Pretende-se estudar o comportamento hidráulico da combinação de GTX com a GGR, e avaliar a influência das danificações provocadas durante a instalação em obra, resultantes também da abrasão e dos ensaios dano mecânico + abrasão na permeabilidade normal ao plano do conjunto.

Este ensaio permitiu a determinação de  $V_{I_{H50}}$ , sendo este parâmetro o valor da velocidade,  $V_{20}$ , correspondente à perda de carga de 50 mm, para uma temperatura de referência da água de 20°C. Os resultados deste ensaio também permitem determinar a permissividade ( $\psi$ , em  $s^{-1}$ ) do conjunto ensaiado. Este valor é obtido a partir do cociente entre a velocidade de escoamento  $V_{20}$  (em mm/s) e a perda de carga hidráulica  $\Delta h$  (em mm) [(ISO/FDIS\_11058, 2009)].

## 7. Resultados, Análise e Discussão dos Ensaios Laboratoriais

O valor de  $V_{20}$  é calculado tendo em consideração a massa de água recolhida, o tempo de recolha e o registo da temperatura da água durante a elaboração dos ensaios, respeitando a equação (7.16.):

$$V_{20} = \frac{V \times R_T}{S \times t} \quad (7.16.)$$

Em que:

- $V_{20}$  – velocidade de escoamento para a temperatura de 20°C (m/s);
- $V$  - volume de água (m<sup>3</sup>);
- $S$  - área útil do provete (m<sup>2</sup>);
- $t$  - tempo medido até se atingir o volume  $V$  (s);
- $R_T$  - fator de correção para uma determinada temperatura da água (adimensional).

O valor do fator de correção é importante na medida em que, durante a elaboração dos ensaios é quase impossível que a água possua a temperatura de 20°C, podendo ter uma temperatura abaixo ou acima deste valor, temperatura utilizada para estudar a velocidade de escoamento dos geossintéticos. Desta forma, este valor é determinado através da equação (7.17.).

$$R = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \times T + 0,00022 \times T^2} \quad (7.17.)$$

Em que:

- $R$  – fator de correção;
- $T$  – temperatura da água (°C).

A determinação de  $VI_{H50}$  foi possível ajustando aos pares ordenados (velocidade; perda de carga), uma curva polinomial de 2.º grau que passe na origem. A partir da curva quadrática em causa e da respetiva equação que a define, encontrou-se o valor de  $VI_{H50}$ , isto é, o valor de  $V_{20}$  correspondente à perda de carga de 50 mm.

Como já foi referido, também se pode calcular a permissividade dos materiais, tendo em conta  $VI_{H50}$  e a perda de carga  $\Delta h$  (Equação (7.18.)).

$$\psi = \frac{VI_{H50}}{\Delta h} \quad (7.18.)$$

Em que:

- $\psi$  - permissividade dos geossintéticos combinados (s<sup>-1</sup>);

Compósito geotêxtil – georelha: propriedades hidráulicas após dano

- $VI_{H50}$  - velocidade,  $V_{20}$ , correspondente à perda de carga de 50mm (mm/s);
- $\Delta h$  - perda de carga hidráulica (mm), que para  $V_{20} = VI_{H50}$  possui o valor de 50mm.

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados obtidos a partir de 5 provetes intactos, e de provetes danificados, sendo 5 deles sujeitos apenas ao ensaio de dano mecânico, outros 5 apenas à abrasão, e 5 provetes sujeitos à combinação dos dois tipos de danificações.

### 7.3.2. Provetes intactos

Na Tabela 7. 8. incluem-se os valores de  $V_{20}$  obtidos para cada um dos 5 provetes intactos, bem como a  $VI_{H50}$ , e a permissividade correspondentes.

Tabela 7. 8: Valores da velocidade de escoamento  $V_{20}$ ,  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$  obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes intactos

Perda de Carga (mm)		Velocidade, $V_{20}$ (mm/s)					$VI_{H50}$ (mm/s)	$\Psi_{H50}$ ( $s^{-1}$ )
		14	28	42	56	70		
Provetes	1	3,376	7,315	10,887	14,289	16,975	12,648	0,253
	2	3,001	6,135	9,167	11,649	13,960	10,489	0,210
	3	4,0197	7,393	11,309	15,299	17,544	13,256	0,265
	4	3,605	7,817	10,999	15,485	18,217	13,403	0,268
	5	3,596	7,800	10,934	15,427	18,426	13,405	0,268
Média		3,520	7,292	10,659	14,430	17,024	12,64	0,253
Desvio Padrão		0,372	0,686	0,850	1,629	1,806	1,24	0,025
Coeficiente de Variação (%)		10,56	9,41	7,98	11,29	10,61	9,83	9,83

Na Figura 7. 10. apresentam-se as curvas polinomiais de 2º grau de cada provete assim como as equações que as definem, usadas para a determinação de  $VI_{H50}$ .

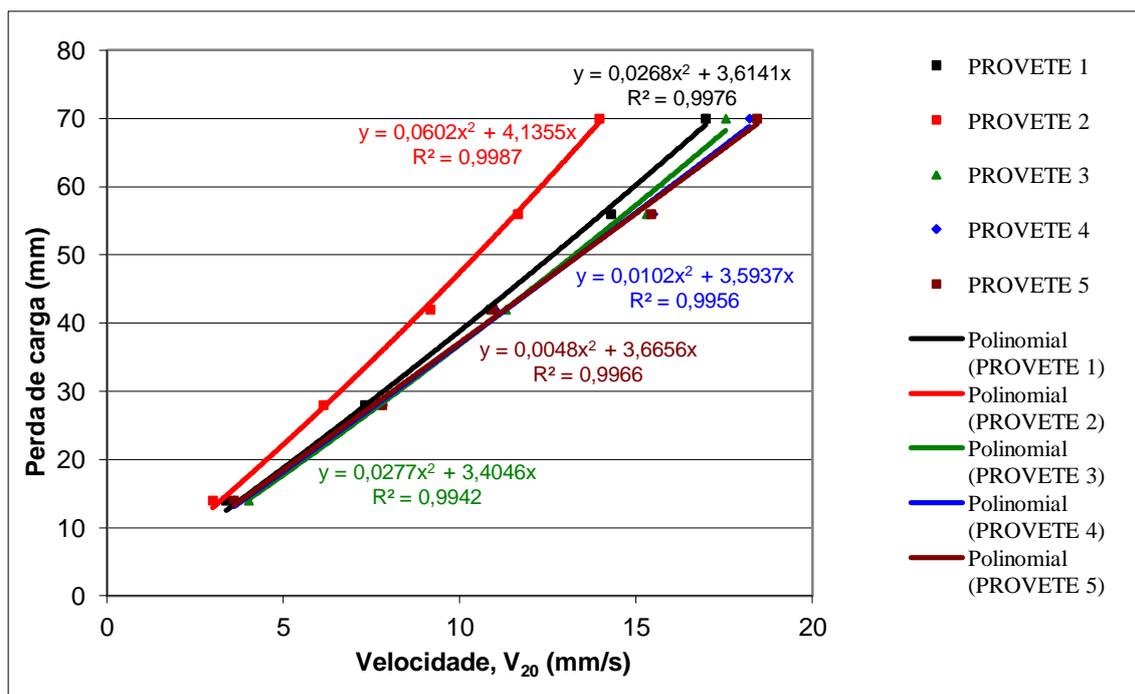


Figura 7. 10: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento  $V_{20}$  obtidas para cada um dos 5 provetes intactos

### 7.3.2.1. Valores de $VI_{H50}$ e de $\Psi_{H50}$

A metodologia utilizada com o objetivo de calcular os parâmetros em questão encontra-se descrita em 7.3.1. e em 7.3.2..

Na Tabela 7. 8. visualiza-se os valores calculados de  $VI_{H50}$  e de  $\Psi_{H50}$  e na Figura 7. 10. estão presentes as curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento  $V_{20}$  obtidas para cada um dos 5 provetes intactos.

Na Tabela 7. 8. pode-se verificar que nos provetes intactos a média da velocidade de escoamento da água à temperatura de 20°C, com uma perda de carga de 50 mm é de, aproximadamente 12,64 mm/s. Os provetes possuem, em média, uma permissividade quando a perda de carga é de 50 mm de, aproximadamente,  $0,25 \text{ s}^{-1}$ . Na Figura 7. 10. verifica-se que à medida que aumenta a perda de carga instalada no sistema, o valor da velocidade de escoamento da água, a 20°C também aumenta proporcionalmente. Pode-se observar, também, que a curva que representa o comportamento do provete 2 se afastou um pouco das restantes, estando as curvas que representam o comportamento dos provetes 1, 3, 4 e 5 muito próximas e com configurações semelhantes, ou seja, possuem um comportamento semelhante face ao ensaio de permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos.

Segundo as propriedades nominais dos material (Tabela 5. 2.), o valor de  $VI_{H50}$  é de 8 mm/s para o GTX. Na Tabela 7. 8. pode-se observar que o valor de  $VI_{H50}$ , determinado durante o presente ensaio, foi de 12,64 mm/s, valor superior a 8 mm/s. A discrepância existente entre os valores presentes na Tabela 5. 2., isto é, presentes na ficha técnica do GTX e o valor presente na Tabela 7. 8., é devida, sobretudo, à existência de alguns locais onde há aumento da espessura do conjunto GTX+GGR, e noutros (nas aberturas da geogrelha)

à criação de zonas que permitem a passagem de água. É também por este motivo que os valores de  $VI_{H50}$  determinados depois da realização destes ensaios são sempre valores superiores aos tabelados na ficha técnica de GTX.

Também deve-se ter em consideração a validade dos resultados determinados, mais propriamente a média dos valores calculados, ou seja, a média de  $VI_{H50}$  e de  $\Psi_{H50}$ . Deste modo determinou-se o valor do coeficiente de variação que corresponde à média de  $VI_{H50}$  e de  $\Psi_{H50}$ . Visto que o valor de coeficiente de variação para ambos os parâmetros é de 9,83%, pode-se concluir que o resultado obtido para cada um dos 5 provetes intactos possui uma variação aceitável, concluindo-se que a representatividade estatística dos resultados encontrados tendo em conta o tratamento de dados efetuado a partir dos 5 provetes em estudo é adequada.

É necessário ter em atenção que se realizaram mais ensaios com este tipo de provetes, mas devido ao comportamento dos mesmos se desviar bastante do observado para os restantes provetes, consideraram-se sem interesse para o estudo em causa e foram rejeitados. O número de provetes ensaiados, no total com as presentes características hidráulicas é indicado na Tabela 5. 1.. A ocorrência da discrepância do comportamento dos mesmos é devida ao facto de os provetes não possuírem exatamente a mesma espessura e, apesar dos provetes que possuem o mesmo tipo de danificação, estes danos não terem danos igualmente graves em todos os provetes.

### 7.3.3. Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico

Após serem solicitados ao ensaio de dano mecânico, os provetes foram submetidos ao ensaio de permeabilidade normal ao plano. Os 5 provetes com os quais se realizou este ensaio correspondem, pela ordem indicada de seguida, aos provetes: 9, 2, 3, 4 e 5 que se encontram na Tabela 6. 1..

Na Tabela 7. 9. encontram-se os valores de  $V_{20}$  obtidos para cada um dos 5 provetes inicialmente sujeitos ao ensaio de dano mecânico, bem como a  $VI_{H50}$ , e a permissividade correspondentes.

Tabela 7. 9: Valores da velocidade de escoamento  $V_{20}$ ,  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$  obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico

Perda de Carga (mm)		Velocidade, $V_{20}$ (mm/s)					$VI_{H50}$ (mm/s)	$\Psi_{H50}$ ( $s^{-1}$ )
		14	28	42	56	70		
Provetes	1	5,613	11,759	16,693	22,181	26,209	19,690	0,394
	2	4,077	9,230	14,264	18,951	24,040	16,827	0,337
	3	5,809	12,081	19,433	24,724	28,779	21,783	0,436
	4	4,131	9,552	14,330	19,599	22,893	16,906	0,338
	5	3,352	6,690	9,745	12,537	15,410	11,375	0,228
Média		4,596	9,862	14,893	19,598	23,466	17,32	0,346
Desvio Padrão		1,065	2,184	3,573	4,561	5,033	3,91	0,078
Coeficiente de Variação (%)		23,18	22,15	23,99	23,27	21,45	22,61	22,61

Depois de concluído o preenchimento de parte da Tabela 7. 9., foi possível traçar a curva polinomial e deduzir as equações que nos permite determinar o valor de  $VI_{H50}$ . Na Figura 7. 11., apresentam-se as curvas respetivas a cada provete assim como as equações que as definem.

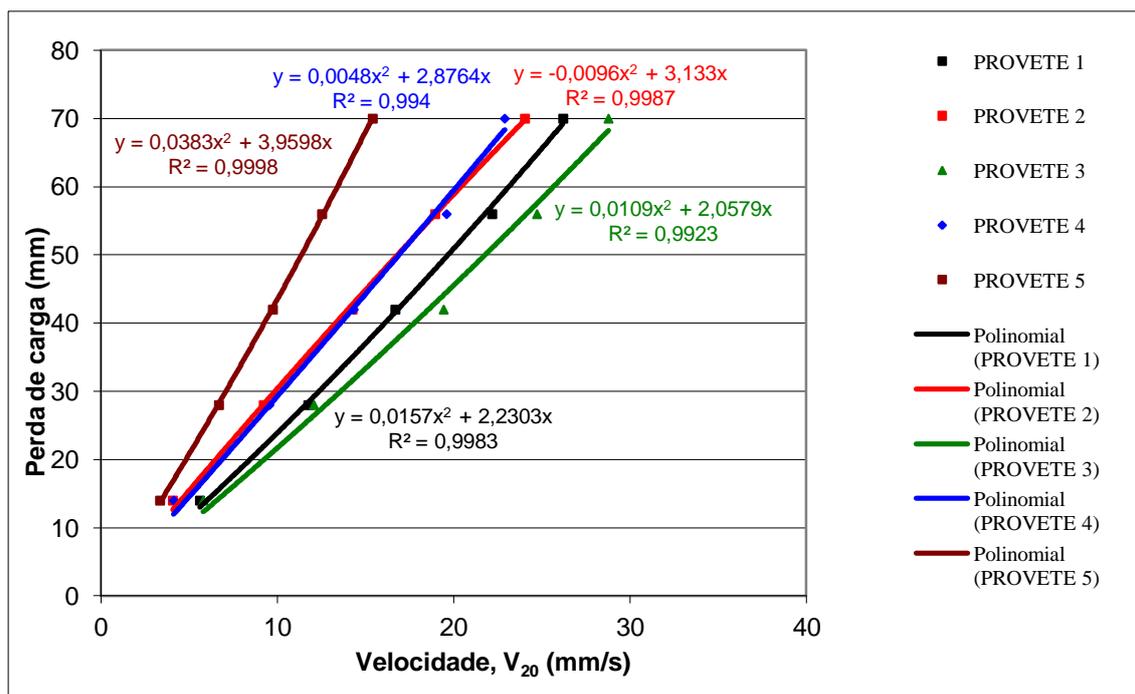


Figura 7. 11: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento  $V_{20}$  obtidas para cada um dos 5 provetes primeiramente solicitados ao dano mecânico

Desta forma, já é possível determinar os valores de  $VI_{H50}$ , e conseqüentemente do valor de permissividade para cada provete. Esses valores apresentam-se na Tabela 7. 9..

### 7.3.3.1. Valores de $VI_{H50}$ e de $\Psi_{H50}$

Como se pode observar na Tabela 7. 9., a média de  $VI_{H50}$  é de, aproximadamente 17,32 mm/s para provetes com danos mecânicos. Estes provetes possuem, em média, uma permissividade de, aproximadamente,  $0,35 \text{ s}^{-1}$ . É necessário ter em atenção que o coeficiente de variação correspondente é de 22,61% (Tabela 7. 9.), percentagem um pouco elevada. A existência de um coeficiente de variação elevado deveu-se sobretudo ao provete 5. Isto porque, pela Figura 7. 11. pode-se verificar a curva do provete 5 se afastou um pouco das restantes. Esse afastamento pode-se dever à heterogeneidade do dano induzido no provete 5 quando comparado com os restantes. Apesar desse facto, todas as curvas possuem uma forma semelhante e encontram-se relativamente próximas, o que indica que os provetes reagiram qualitativamente da mesma forma ao ensaio de permeabilidade normal ao plano.

Também na Figura 7. 11. se pode observar que à medida que aumenta o valor da perda de carga, o valor de velocidade de escoamento à temperatura de 20°C também aumenta proporcionalmente.

### 7.3.3.2. Influência do dano mecânico na permeabilidade normal ao plano

Como foi referido atrás, para provetes com dano mecânico,  $VI_{H50}$  é de 17,32 mm/s e a permissividade é de  $0,35 \text{ s}^{-1}$ . Quando os provetes eram intactos a velocidade de escoamento  $VI_{H50}$  era de 12,64 mm/s e a permissividade  $\Psi_{H50}$  de  $0,25 \text{ s}^{-1}$ . O valor da velocidade de escoamento é maior em provetes que possuem

danos devidos ao ensaio de dano mecânico do que em provetes que não sofreram qualquer tipo de danificação antes da sua submissão aos ensaios hidráulicos. A velocidade de escoamento aumentou 37%, ou seja, 4,68 mm/s após o dano. Assim pode-se verificar que há um aumento significativo da velocidade de escoamento normal ao plano dos geossintéticos após serem solicitados ao ensaio de dano mecânico.

Este aumento pode ser justificado por haver cortes de algumas fibras dos geossintéticos aquando a realização dos ensaios de dano mecânico devido ao movimento das partículas de óxido de alumínio normalizado e possível redução da espessura dos provetes quando sofrem compressões sucessivas devido às cargas cíclicas instaladas nos mesmos. Estes dois fenómenos levam a que os caminhos que a água percorre dentro dos geossintéticos sejam em maior número devido aos cortes das fibras e mais curtos devido à possível diminuição de espessura. Durante o ensaio de dano mecânico algumas partículas do material granular que contacta diretamente os geossintéticos podem ser alojadas nos mesmos, preenchendo algum desses espaços vazios, e podendo, até fechar alguns caminhos que água poderia percorrer. Apesar disso, antes de serem solicitados aos ensaios hidráulicos, os provetes foram colocados a saturar e o contacto com a água pode ter provocado separação entre as partículas e os geossintéticos.

Como já foi referido, a velocidade de escoamento dos geossintéticos em estudo é consideravelmente superior após possuírem danificações devido à submissão dos provetes ao ensaio de dano mecânico.

#### 7.3.4. Provetes anteriormente sujeitos à abrasão

Antes da submissão das amostras aos ensaios hidráulicos, os provetes foram submetidos à abrasão. Os 5 provetes com os quais se realizou este ensaio correspondem, respetivamente, aos provetes 1, 9, 3, 4 e 10 que se apresentam na Tabela 6. 3., Tabela 6. 4. e na Tabela 6. 5..

Sendo assim, tem que se ter em consideração o valor da velocidade de escoamento  $V_{I_{H50}}$  e o valor da sua respetiva permissividade, valores que se encontram na Tabela 7. 10. e na Figura 7. 12., como foi efetuado para os provetes anteriormente solicitados ao presente ensaio.

Tabela 7. 10: Valores da velocidade de escoamento  $V_{20}$ ,  $V_{I_{H50}}$  e  $\Psi_{H50}$  obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes inicialmente solicitados ao ensaio de abrasão

Perda de Carga (mm)		Velocidade, $V_{20}$ (mm/s)					$V_{I_{H50}}$ (mm/s)	$\Psi_{H50}$ (s <sup>-1</sup> )
		14	28	42	56	70		
Provetes	1	5,062	10,513	16,052	21,589	27,180	19,135	0,383
	2	4,316	8,482	12,300	16,159	19,137	14,397	0,288
	3	3,291	6,368	10,044	13,061	16,228	11,679	0,234
	4	4,706	8,353	12,352	18,792	22,640	15,804	0,316
	5	5,401	11,874	17,564	22,169	26,726	20,035	0,401
Média		4,555	9,118	13,662	18,354	22,382	16,21	0,324
Desvio Padrão		0,814	2,127	3,066	3,809	4,753	3,43	0,0687
Coeficiente de Variação (%)		17,87	23,33	22,44	20,76	21,23	21,18	21,18

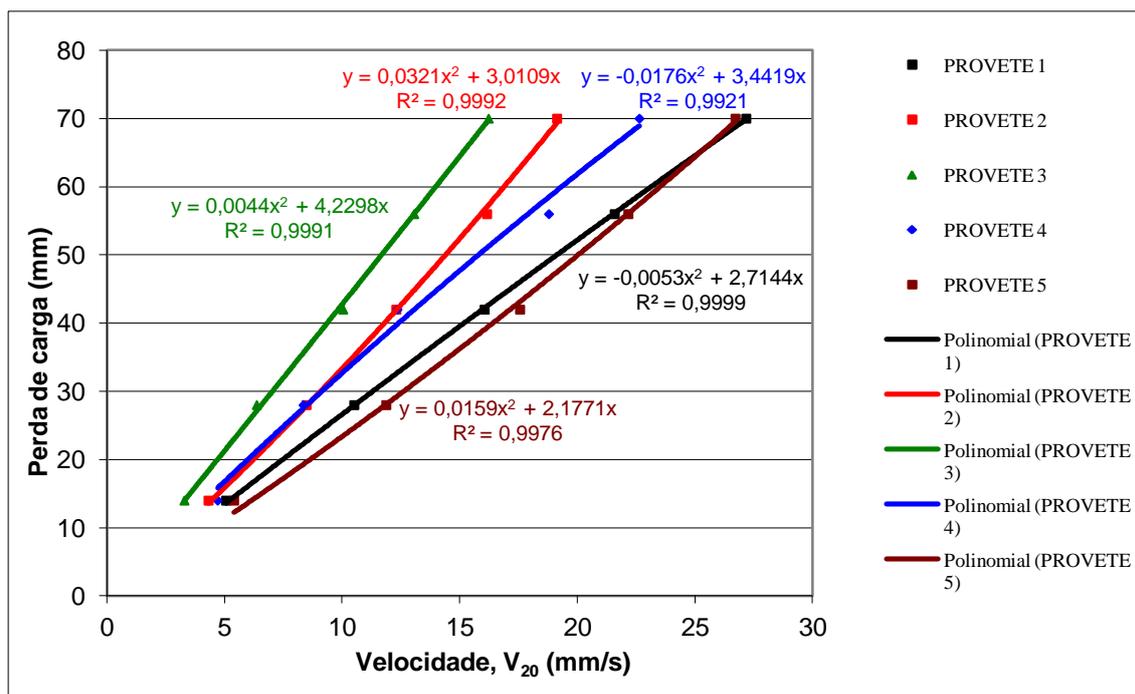


Figura 7. 12: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento  $V_{20}$  obtidas para cada um dos 5 provetes primeiramente solicitados à abrasão

#### 7.3.4.1. Valores de $VI_{H50}$ e de $\Psi_{H50}$

Através da Tabela 7. 10. verifica-se que a média da  $VI_{H50}$  é de, aproximadamente 16,21 mm/s. Estes provetes possuem, em média, uma permissividade de,  $0,32 \text{ s}^{-1}$ . O coeficiente de variação respetivo é de 21,18%, valor um pouco elevado e reflete o comportamento dos provetes 4 e 5, ligeiramente diferente dos restantes.

Segundo as curvas representadas na Figura 7. 12., verifica-se, também, um aumento da velocidade de escoamento da água a  $20^\circ\text{C}$  à medida que se aumenta o valor da perda de carga.

#### 7.3.4.2. Influência da abrasão na permeabilidade normal ao plano

O estudo da influência da abrasão no comportamento hidráulico dos geossintéticos quando estes são sujeitos a fluxos de água perpendiculares ao plano dos mesmos é realizado, sobretudo, tendo em conta a média dos valores de  $VI_{H50}$  e respetivo valor da  $\Psi_{H50}$ . Após os geossintéticos serem solicitados à abrasão, estes materiais possuem uma velocidade de escoamento  $VI_{H50}$  de, 16,21 mm/s e a permissividade  $\Psi_{H50}$  de  $0,32 \text{ s}^{-1}$ . Quando os provetes eram intactos a velocidade de escoamento  $VI_{H50}$  era de 12,64 mm/s e a permissividade  $\Psi_{H50}$  de  $0,25 \text{ s}^{-1}$ . Os provetes que possuem danos devidos à abrasão possuem maior valor de velocidade escoamento do que os provetes que não sofreram qualquer tipo de danificação antes da sua submissão aos ensaios hidráulicos. Também o valor médio da permissividade quando a perda de carga é de 50 mm é maior se os provetes possuírem danificações devidas à abrasão em relação aos provetes intactos. Sabendo que a variação de velocidades de escoamento entre provetes inicialmente ensaiados à abrasão e provetes intactos é de 28,24%, sendo a diferença de 3,57 mm/s, e que o valor maior se refere a provetes primeiramente ensaiados à

abrasão, pode-se verificar que há um aumento significativo da velocidade de escoamento normal ao plano dos geossintéticos após serem solicitados ao ensaio de abrasão.

O aumento da velocidade de escoamento de água quando os geossintéticos são atravessados perpendicularmente por diferentes fluxos em relação à verificada velocidade em provetes intactos é devida ao facto de, aquando do ensaio de abrasão, haver cortes de fibras, tanto do GTX como da GGR, levando à possível criação de caminhos livres que podem ser percorridos pela água. Para este tipo de provetes verifica-se que a  $VI_{H50}$  é inferior à relativa a provetes que apenas foram solicitados ao ensaio de dano mecânico uma vez que, durante o ensaio de abrasão, quando ocorre corte de fibras do GTX e da GGR, houve formação de nódulos (com a forma de cilindros) constituídos por estes dois materiais que sofreram cortes. É necessário ter em atenção que estes mesmos nódulos cilíndricos apenas se encontram na superfície da parte dos geossintéticos que menos possuem danificações, nunca perdendo totalmente o contacto direto com os anteriores. É possível que os nódulos cilíndricos atrás descritos ofereçam resistência à passagem de água pelos provetes perpendicularmente ao plano destes, razão pela qual a velocidade de escoamento é maior em provetes solicitados ao dano mecânico e não à abrasão.

### 7.3.5. Provetes anteriormente sujeitos ao dano mecânico e abrasão

Os provetes que se utilizaram para fazer os restantes ensaios à permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos foram inicialmente ensaiados ao dano mecânico e seguidamente submetidos aos ensaios de abrasão. Estas amostras já foram apresentadas no capítulo anterior na Tabela 6. 7. e na Tabela 6. 8., e correspondem aos provetes 1, 2, 3, 4 e 5, respetivamente. Como anteriormente foi elaborado, começou-se por adquirir o valor da velocidade do escoamento para a temperatura da água a 20°C, para diferentes valores de perda de carga, correspondente a cada provete. Estes valores apresentam-se na Tabela 7. 11.. Após a elaboração das curvas polinomiais e determinação das respetivas equações que se encontram na Figura 7. 13., foi possível determinar os valores de  $VI_{H50}$ , e de  $\Psi_{H50}$ , que estão incluídos na Tabela 7. 11..

Tabela 7. 11: Valores da velocidade de escoamento  $V_{20}$ ,  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$  obtidos para cada perda de carga, em cada um dos 5 provetes inicialmente solicitados aos ensaios de dano mecânico e abrasão

Perda de Carga (mm)		Velocidade, $V_{20}$ (mm/s)					$VI_{H50}$ (mm/s)	$\Psi_{H50}$ (s <sup>-1</sup> )
		14	28	42	56	70		
Provetes	1	5,447	10,811	15,844	24,038	28,951	20,132	0,403
	2	6,068	12,459	18,505	25,568	30,237	22,160	0,443
	3	5,402	10,199	15,087	19,369	24,128	17,649	0,353
	4	5,285	10,167	14,672	19,573	24,345	17,609	0,352
	5	5,500	10,345	15,345	19,855	24,308	17,942	0,359
Média		5,540	10,796	15,891	21,681	26,394	19,10	0,382
Desvio Padrão		0,305	0,964	1,522	2,907	2,958	2,01	0,040
Coeficiente de Variação (%)		5,51	8,93	9,58	13,41	11,21	10,50	10,50

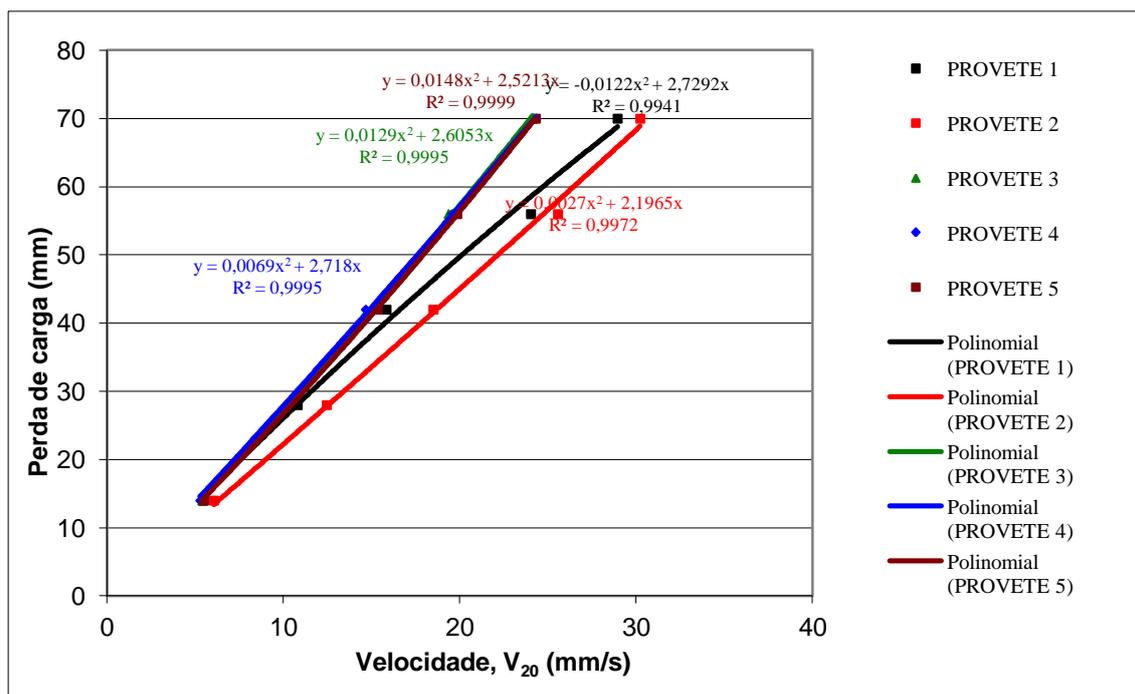


Figura 7. 13: Representação das curvas polinomiais que definem a relação entre cada perda de carga e velocidades de escoamento  $V_{20}$  obtidas para cada um dos 5 provetes primeiramente solicitados aos ensaios de dano mecânico e abrasão

### 7.3.5.1. Valores de $VI_{H50}$ e de $\Psi_{H50}$

Na Figura 7. 13. pode-se verificar que as curvas polinomiais que representam os diferentes provetes possuem a mesma configuração e encontram-se relativamente próximas entre si, levando a que o coeficiente de variação possuísse um valor reduzido (10,50%), o que foi considerado aceitável e indica que os resultados e cálculos posteriores possuem representatividade estatística considerada adequada. O valor da velocidade de escoamento quando a temperatura é de 20°C e para a perda de carga de 50 mm,  $VI_{H50}$ , é de 19,10 mm/s, sendo a permissividade correspondente,  $\Psi_{H50}$ , de 0,38 s<sup>-1</sup>, de acordo com a Tabela 7. 11..

Através da Figura 7. 13., pode-se observar que à medida de se aumenta o valor da perda de carga, a velocidade de escoamento da água a 20°C também aumenta de forma proporcional.

### 7.3.5.2. Influência dos danos causados por dano mecânico e abrasão em conjunto na permeabilidade normal ao plano

Para se entender a influência dos danos induzidos no comportamento hidráulico avaliado, teve-se em atenção a média dos valores de  $VI_{H50}$  e de  $\Psi_{H50}$ . Visto que a média destes valores corresponde a 19,10 mm/s e 0,38 s<sup>-1</sup> respetivamente, facilmente se conclui que a média de velocidade de escoamento diminuiu 6,46 mm/s, ou seja houve uma variação de 51,11% quando comparada com a média de  $VI_{H50}$  observada nos provetes intactos. Os provetes em questão foram os que mais sofreram maiores danos, uma vez que todos foram submetidos ao ensaio de dano mecânico e seguidamente de abrasão, antes de serem solicitados ao ensaio hidráulico em causa. Os mesmos são os que possuem maior velocidade de escoamento, quer relativamente aos provetes

intactos, quer em relação a todos os outros provetes danificados. Também o valor de  $\Psi_{H50}$  é superior em relação às resultantes de todos os outros provetes ensaiados, porque a permissividade depende diretamente da velocidade de escoamento e lhe é proporcional. O aumento da velocidade de escoamento e da permissividade em provetes com este tipo de danificações pode ser devido a diferentes razões, que já foram explicadas anteriormente em 7.3.3.2. e em 7.3.4.2..

## **7.4. Considerações finais**

Para melhor se compreender o comportamento hidráulico dos geossintéticos quando estes possuem diferentes tipos de danificações, optou-se por referir determinadas considerações, tendo em conta o tipo de ensaio hidráulico em causa em separado.

### **7.4.1. Determinação da capacidade de escoamento no seu plano**

A capacidade de escoamento do geocompósito GTX+GGR foi avaliada através do coeficiente hidráulico,  $q_{\text{tensão/gradiente}}$ , que é maior quanto maior for a velocidade de escoamento do fluxo de água que atravessa os geossintéticos segundo os seus planos. Por outras palavras, quanto maior for o valor do coeficiente hidráulico, mais permeáveis são os materiais que a água atravessa.

Para melhor se resumir a análise realizada, considerou-se interessante apresentar-se as figuras Figura 7. 14. e Figura 7. 15. que possibilitam visualizar e comparar a variação do coeficiente hidráulico de provetes solicitados aos diferentes tipos de danificação.

Na Figura 7. 14. apresenta-se a variação do coeficiente hidráulico em função da tensão de confinamento tendo em conta os dois gradientes hidráulicos encontrados para provetes que inicialmente foram sujeitos ao ensaio de dano mecânico e para outros que foram primeiramente solicitados à abrasão. Elaborou-se este gráfico para melhor se compreender a diferença da variação do coeficiente hidráulico entre provetes que possuem danificações devidas ao ensaio de dano mecânico e provetes que sofreram abrasão.

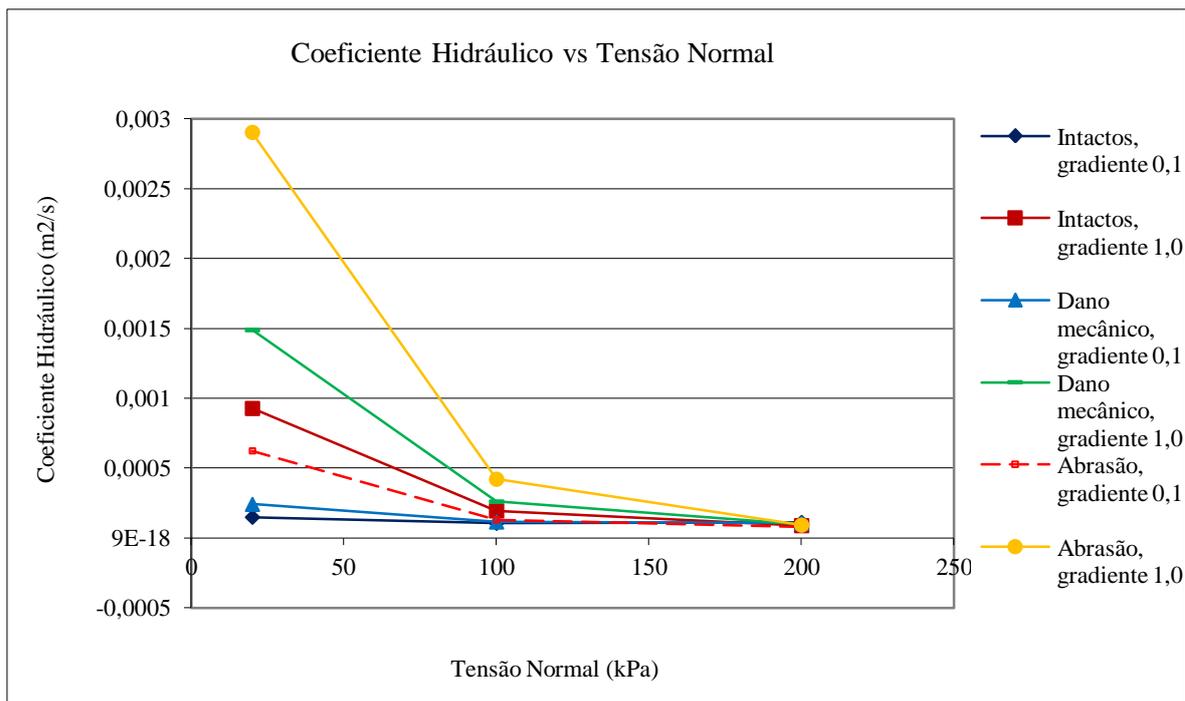


Figura 7. 14: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão normal, tendo em conta os gradientes hidráulicos aplicados correspondentes a provetes intactos e provetes inicialmente submetidos ao ensaio de dano mecânico e outros solicitados ao ensaio de abrasão

A partir da Figura 7. 14. conclui-se que para elevadas tensões de confinamento e gradientes hidráulicos reduzidos, os valores do coeficiente hidráulico são semelhantes. Para tensões de confinamento menores, provetes inicialmente solicitados à abrasão possuem valores mais elevados de coeficiente hidráulico. O mesmo acontece para gradientes mais elevados, sendo notada maior diferença para tensões mais pequenas.

Desta forma, pode-se concluir que, de uma forma geral, para estes geossintéticos e para um mesmo gradiente hidráulico, as danificações devidas à abrasão influenciam mais o comportamento hidráulico dos mesmos do que as danificações devidas ao dano mecânico quando são atravessados por fluxos de água longitudinalmente ao plano dos geossintéticos. Este fenómeno também é visível nas tabelas Tabela 7. 3. e Tabela 7. 5. uma vez que em geral, os valores do coeficiente hidráulico referentes a provetes inicialmente solicitados à abrasão são os que mais se afastam dos valores dos provetes intactos. O facto atrás descrito é fácil de entender visto que os provetes que foram submetidos ao ensaio de dano mecânico, para além de sofrerem cortes, alojaram partículas de óxido de alumínio que condicionaram a passagem de água, obstruindo caminhos que inicialmente se encontravam livres, por onde fluxos de água poderiam circular, mesmo apesar de alguns dessas partículas serem extraídas dos geossintéticos aquando a saturação das amostras para posterior realização dos ensaios hidráulicos. Os provetes solicitados à abrasão, apenas sofreram corte de fibras, não havendo obstrução de caminhos livres por onde a água podia circular.

Na Figura 7. 15. é possível observar a variação dos valores de coeficiente hidráulico tendo em conta os provetes que possuem danificações sujeitas aos ensaios de dano mecânico, de abrasão e à combinação dos dois.

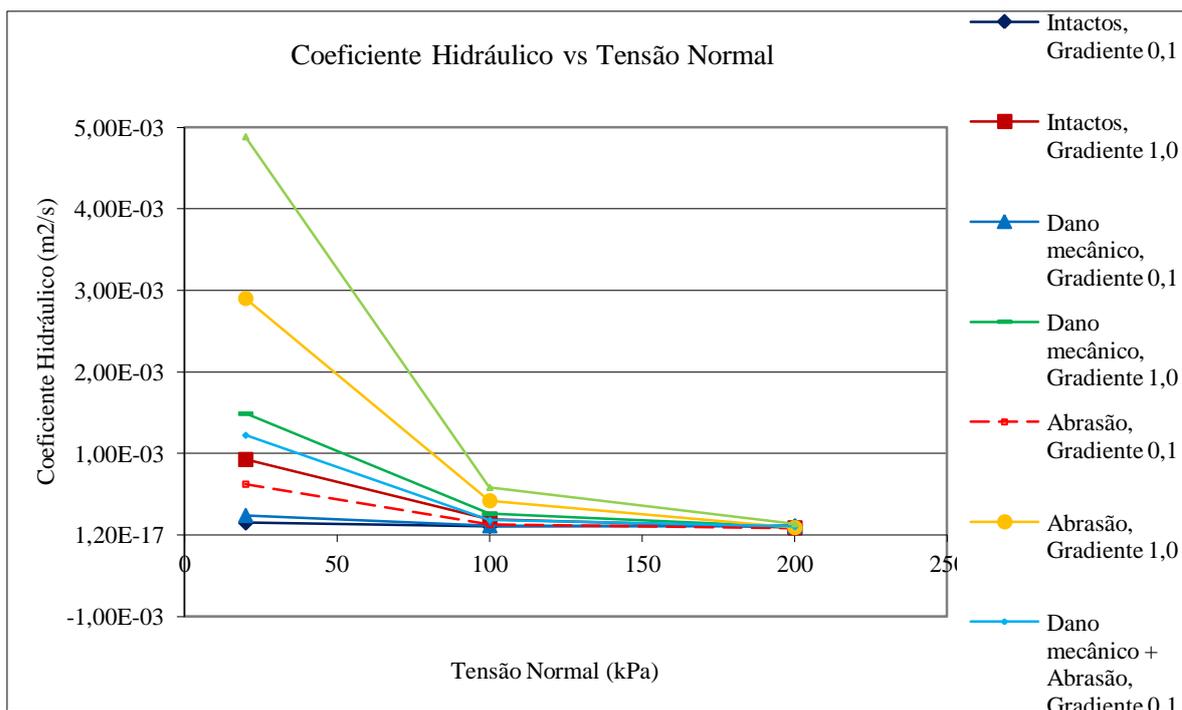


Figura 7. 15: Variação do coeficiente hidráulico em função da tensão aplicada de provetes intactos e inicialmente submetidos ao ensaio de dano mecânico, ao ensaio de abrasão e consecutivamente aos dois ensaios

Como se pode observar através da Figura 7. 15. e na Tabela 7. 7., os coeficientes hidráulicos correspondentes a provetes com danificações devidas aos ensaios de dano mecânico + abrasão são geralmente superiores aos valores encontrados para provetes com outros tipos de danificação, sendo esta diferença mais relevante para menores tensões de confinamento e para gradientes hidráulicos mais elevados. Apesar disso, pode-se observar que a variação do coeficiente hidráulico para provetes com dano mecânico + abrasão, para o gradiente de 0,1 mm/mm e para valores de tensão elevados, não se afasta de forma tão notória da variação do coeficiente hidráulico com os outros tipos de danificação, para os mesmos valores de tensão e gradiente.

Desta forma se pode concluir que provetes que são submetidos aos ensaios de dano mecânico e abrasão consecutivamente são os que apresentam maiores coeficientes hidráulicos. Este facto já seria de esperar visto que são os provetes que apresentam maiores danificações. Como os provetes que possuem danificações devido à abrasão são os que a seguir apresentam, de uma forma geral, maior permeabilidade, pode-se concluir que é sobretudo devido ao ensaio de abrasão que provetes que sofreram os dois ensaios são os que possuem os valores de coeficiente hidráulico maiores.

Geralmente as danificações devidas ao ensaio de dano mecânico são as que menos influenciam o comportamento hidráulico no plano dos provetes, ou seja, de todos os provetes danificados são os menos permeáveis. Para além disso são os que mais se aproximam do comportamento hidráulico de provetes intactos, de forma geral.

#### 7.4.2. Permeabilidade normal ao plano

Na Tabela 7. 12. faz-se uma síntese dos resultados dos ensaios de permeabilidade normal ao plano.

Tabela 7. 12: Compilação dos principais parâmetros determinados a partir do ensaio de permeabilidade normal ao plano

Tipo de provetes	Velocidade escoamento a (50 mm)		Permissividade
	$VI_{H50}$ (mm/s)		$\Psi_{H50}$ (s <sup>-1</sup> )
Intactos	Média	12,64	0,25
	Coeficiente de Variação (%)	9,83	9,83
Dano mecânico	Média	17,32	0,35
	Coeficiente de Variação (%)	22,61	22,61
Abrasão	Média	16,21	0,32
	Coeficiente de Variação (%)	21,18	21,18
Dano mecânico + Abrasão	Média	19,1	0,38
	Coeficiente de Variação (%)	10,5	10,5

De acordo com a Tabela 7. 12. verifica-se que quanto maior for o grau de degradação dos geossintéticos, maior é a permeabilidade dos geossintéticos perpendicularmente ao plano dos mesmos. Esta premissa é apoiada pelo facto de os provetes que possuem menor permeabilidade são os provetes intactos e os que possuem maior permeabilidade são os provetes que foram danificados recorrendo ao ensaio de dano mecânico e de abrasão em conjunto, tornando-se, por isso, os provetes mais degradados.

Comparando os dois tipos de dano isoladamente, verifica-se que os provetes após dano mecânico são os que possuem maior  $VI_{H50}$  e maior permissividade. Estes valores são de 17,32 mm/s e de 0,35 s<sup>-1</sup> respetivamente.

Para os provetes que sofreram abrasão, os parâmetros  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$  tomam os valores de 16,21 mm/s e 0,32 s<sup>-1</sup>.

Comparando apenas os parâmetros de  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$  determinados para os provetes inicialmente submetidos ao ensaio de dano mecânico com os parâmetros calculados depois da realização do ensaio hidráulico recorrendo a provetes inicialmente ensaiados à abrasão, pode-se verificar que geossintéticos que possuem danificações devido à sua colocação em obra foram atravessados pela água com velocidades mais elevadas do que geossintéticos que apenas foram submetidos à abrasão. Por outras palavras, neste caso após dano mecânico o geocompósito GTX+GGR tornou-se mais permeável segundo o plano perpendicular dos mesmos, quando comparado com o comportamento após abrasão.

Pela mesma tabela, e como já foi referido, os geossintéticos que são submetidos a danificações durante a sua colocação em obra e posteriormente à abrasão, são os que possuem maior permeabilidade normal ao seu plano uma vez que apresentam maiores valores de  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$ . Os parâmetros adquirem estes valores uma vez que estes 5 provetes correspondem ao grupo de provetes que mais danificações possuem.

Os provetes intactos são os que possuem menores valores para os parâmetros  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$ .

Também é interessante o facto de, visualmente, os provetes ensaiados apenas recorrendo ao ensaio de abrasão possuírem um aspeto visual mais danificado mas um comportamento hidráulico mais semelhante ao dos provetes intactos quando submetidos ao ensaio de permeabilidade normal ao plano quando comparados com provetes que foram submetidos apenas ao ensaio de dano mecânico.



## **8. COEFICIENTES DE SEGURANÇA PARCIAIS, COMPARAÇÃO COM RESULTADOS JÁ PUBLICADOS**

### **8.1. Considerações iniciais**

As secções que se encontram no presente capítulo foram elaboradas tendo em consideração todos os ensaios efetuados e análise dos resultados do tratamento de dados que se apresentam ao longo dos capítulos 5., 6. e 7.. Começa-se por apresentar a definição, importância na vida prática, determinação e análise dos coeficientes de segurança parciais tendo em conta o estudo elaborado, seguindo-se a comparação dos resultados do presente trabalho com outros resultados já publicados.

### **8.2. Coeficientes de Segurança Parciais**

#### **8.2.1. Considerações gerais**

Durante a fase de escolha e dimensionamento do geossintético a instalar na obra, neste caso nas vias férreas, segundo Pinho-Lopes (2006) deve-se definir o tempo útil da estrutura, o ambiente em que o geossintético é instalado e as condições a que está submetido, tanto antes e durante a obra, assim como ao longo do tempo de serviço da estrutura. A partir dessa informação identificam-se os efeitos dos agentes e mecanismos de degradação e estuda-se a influência dos mesmos nas propriedades dos geossintéticos. Pode-se contabilizar esses efeitos através da aplicação de coeficientes de segurança parciais, que segundo Pinho-Lopes (2006) têm como objetivo contabilizar variações estatísticas na redução prevista. Em geral esta abordagem faz-se para propriedades mecânicas. Neste trabalho pretende-se analisar o que acontece com as propriedades hidráulicas de um geossintético compósito. De acordo com Oliveira (2011) considera-se que o valor de cálculo das propriedades dos geossintéticos pode ser definido como o valor último dessa propriedade afetado por coeficientes de segurança parciais. Segundo o mesmo autor, a estes coeficientes pode ser dada a designação de coeficientes de redução visto que em geral traduzem a redução das propriedades mecânicas por ação de vários agentes. Esta definição de coeficientes de redução foi introduzida nos métodos de dimensionamento para propriedades mecânicas, que tendem a diminuir com os danos. Apesar disso, tem que se ter em atenção que no presente trabalho pretende-se avaliar a variação das propriedades hidráulicas dos geossintéticos. Visto que as propriedades hidráulicas tendem a aumentar com os danos induzidos, a utilização da abordagem e/ou designação de coeficientes de redução pode não ser a mais indicada. Por este motivo optou-se por designar os presentes coeficientes por coeficientes de segurança parciais.

No presente trabalho os agentes e mecanismos de degradação considerados foram simulados através de ensaios de indução de dano mecânico, abrasão e dano mecânico + abrasão.

De seguida apresenta-se a metodologia que permite determinar esses coeficientes, assim como a apresentação e análise dos mesmos.

### 8.2.1.1. Formulação geral dos coeficientes de segurança parciais

O coeficiente de segurança parcial ( $CS$ ) é determinado através da comparação dos valores de uma dada propriedade para o material intacto ( $X_{intacto}$ ) e para o material após ser submetido à danificação ( $X_{danificado}$ ), como se encontra na equação (8. 1).

$$CS = \frac{X_{intacto}}{X_{danificado}} \quad (8. 1)$$

### 8.2.2. Determinação e análise dos coeficientes de segurança parciais ( $CS$ )

Na presente secção apresentam-se os diferentes coeficientes determinados para cada um dos parâmetros calculados a partir dos ensaios hidráulicos, através da equação (8. 1) tendo em conta os 3 tipos de danificação: dano mecânico, abrasão e dano mecânico + abrasão. Esses valores encontram-se na Tabela 8. 1..

Tabela 8. 1: Coeficientes de Segurança parciais ( $CS$ )

	Ensaio de danificação a que foram anteriormente solicitados	Ensaio de Capacidade de escoamento no plano							Ensaio de Permeabilidade normal ao plano	
		CS a aplicar a coeficientes hidráulicos							CS a aplicar a $VI_{H50}$ e $\Psi_{H50}$	
		20 kPa		100 kPa		200 kPa		Média	$VI_{H50}$	$\Psi_{H50}$
		i = 0,1	i = 1,0	i = 0,1	i = 1,0	i = 0,1	i = 1,0			
GTX + GGR	Dano mecânico	0,62	0,62	0,92	0,75	1,06	0,91	0,81	0,73	0,73
	Abrasão	0,24	0,32	0,81	0,46	1,42	0,96	0,70	0,78	0,78
	Dano mecânico + abrasão	0,12	0,19	0,58	0,33	1,10	0,64	0,49	0,66	0,66

Como se pode observar através da Tabela 8. 1., os coeficientes mais afastados da unidade a aplicar nos cálculos aquando o dimensionamento dos geossintéticos correspondem aos provetes que foram solicitados aos ensaios de dano mecânico + abrasão. Apenas se excetua o caso em que a tensão normal é de 200 kPa e o gradiente hidráulico é de 0,1 mm/mm, durante o ensaio de capacidade de escoamento no plano. Este facto já era de esperar visto que os provetes solicitados ao ensaio de dano mecânico e seguidamente ao ensaio de abrasão são os mais degradados após a realização dos ensaios de danificação. Quer isto dizer que estes provetes são os que possuem as propriedades hidráulicas mais distintas quando comparados com as propriedades dos provetes intactos. Algumas possíveis razões para essas diferenças foram já apresentadas anteriormente.

Os coeficientes a aplicar, tendo em conta apenas o ensaio de determinação da capacidade de escoamento no plano dos geossintéticos, e que apenas sofrem danificações durante a realização da obra ou devido à abrasão, em média são mais próximos da unidade quando apenas foram solicitados ao ensaio de dano mecânico. Só no

caso em que a tensão normal é de 200 kPa e o gradiente é de 1,0 mm/mm, provetes inicialmente solicitados à abrasão apresentam um  $CS$  mais próximo da unidade quando comparado com o coeficiente referente ao ensaio de dano de mecânico.

Tendo em conta o ensaio de determinação da permeabilidade normal ao plano, os coeficientes mais próximos da unidade correspondem aos provetes que foram apenas solicitados à abrasão. Quer isto dizer que a mudança das propriedades hidráulicas que ocorre durante o ensaio de dano mecânico é maior do que a mudança das mesmas propriedades devidas ao ensaio de abrasão tendo em consideração que são atravessados por fluxos de água normais ao plano dos provetes.

### **8.3. Comparação com resultados já publicados**

#### **8.3.1. Considerações gerais**

Na presente secção pretende-se comparar os resultados obtidos durante este trabalho com os resultados já publicados, determinados por outro autor.

Oliveira (2011) efetuou ensaios hidráulicos de determinação da capacidade de escoamento no seu plano e o ensaio de determinação da permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos utilizando provetes intactos e danificados, sendo os últimos sujeitos aos ensaios de dano mecânico e abrasão e combinação dos dois ensaios de danificação.

O autor utilizou dois materiais com diferente estrutura: um geotêxtil, GTX (o mesmo que foi estudado neste trabalho), e um geocompósito de reforço, GCR. Desta forma, apenas se irá comparar o comportamento de GTX estudado pelo autor com o comportamento de GTX+GGR, apresentado no presente trabalho.

#### **8.3.2. Comparação de resultados**

De seguida apresenta-se a Tabela 8. 2. onde se encontram resumidos os resultados disponíveis tendo em conta os parâmetros  $q_{tensão/gradiente}$ ,  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$ .

Tabela 8. 2: Comparação dos valores de  $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ,  $VI_{H50}$  e  $\Psi_{H50}$  obtidos com os apresentados por Oliveira (2011)

Autores		Média dos valores determinados									
		Coeficiente Hidráulico $q_{\text{tensão/gradiente}}$ ( $m^2/s$ )								$VI_{H50}$ (mm/s)	$\Psi_{H50}$ ( $s^{-1}$ )
		$q_{20/0,1}$	$q_{20/1,0}$	$q_{100/0,1}$	$q_{100/1,0}$	$q_{200/0,1}$	$q_{200/1,0}$	Média			
atual	GTX + GGR	Intactos	1,49E-04	9,28E-04	1,06E-04	1,95E-04	1,12E-04	8,90E-05	2,63E-04	12,64	0,253
		Dano mecânico	2,42E-04	1,49E-03	1,15E-04	2,61E-04	1,06E-04	9,81E-05	3,85E-04	17,32	0,346
		Abrasão	6,25E-04	2,90E-03	1,31E-04	4,21E-04	7,89E-05	9,29E-05	7,08E-04	16,21	0,324
		Dano mecânico + Abrasão	1,22E-03	4,89E-03	1,82E-04	5,85E-04	1,02E-04	1,39E-04	1,19E-03	19,1	0,382
(Oliveira)	GTX	Intactos	1,50E-06	1,14E-05	7,34E-07	3,90E-06	4,55E-07	2,19E-06	3,36E-06	11,58	0,232
		Dano mecânico	4,80E-06	3,27E-05	8,11E-07	3,45E-06	8,66E-07	1,29E-06	7,32E-06	11,47	0,229
		Abrasão	3,59E-06	2,41E-05	1,39E-06	6,63E-06	9,95E-07	2,35E-06	6,51E-06	8,57	0,171
		Dano mecânico + Abrasão	4,08E-06	3,63E-05	1,62E-06	8,89E-06	1,16E-06	3,15E-06	9,20E-06	9,19	0,184
<b>Varição de valores determinados no presente trabalho e de outro autor (%)</b>											
	Intactos	9833,3	8040,4	14341,4	4900,0	24515,4	3963,9	10932,4	9,2	9,1	
	Dano mecânico	4941,7	4456,6	14080,0	7465,2	12140,2	7504,7	8431,4	51,0	51,1	
	Abrasão	17309,5	11933,2	9324,5	6249,9	7829,6	3853,2	9416,6	89,1	89,5	
	Dano mecânico + Abrasão	29802,0	13371,1	11134,6	6480,4	8693,1	4312,7	12299,0	107,8	107,6	

De acordo com a Tabela 8. 2. pode-se verificar que a variação dos diferentes parâmetros é significativa. Esta discrepância de valores já era de esperar visto que Oliveira (2011) efetuou o estudo apenas do GTX e no presente trabalho realizou-se o estudo de GTX+GGR. Sendo assim, as variações apresentadas na Tabela 8. 2. podem permitir a análise da influência da GGR no comportamento hidráulico do conjunto, desprezando o efeito do operador nos ensaios. Pode-se concluir que à partida a GGR facilita o escoamento de água, sendo os geossintéticos atravessados por fluxos de água longitudinalmente ao plano ou perpendicularmente ao plano dos mesmos. Por outras palavras, é possível que a presença de GGR faça aumentar a permeabilidade no plano e normal ao plano.

Também se observa que em média a variação dos parâmetros assume percentagens superiores quando os provetes tinham danos devidos aos ensaios de dano mecânico + abrasão. Quanto à permeabilidade no plano, a variação é menor para provetes inicialmente induzidos ao ensaio de dano mecânico, e no que respeita à permeabilidade normal ao plano, a variação dos resultados dos provetes intactos é drasticamente inferior quando comparada com as dos provetes danificados.

#### 8. Coeficientes de Segurança Parciais, Comparação com resultados já publicados

Pode-se verificar que os provetes ensaiados por Oliveira (2011), constituídos apenas por GTX, após os ensaios hidráulicos possuem valores mais próximos aos descritos na tabela técnica do material, valores que também se encontram na Tabela 5. 2., o que já seria de esperar.



## 9. CONCLUSÕES, DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 9.1. Considerações iniciais

No presente capítulo apresentam-se as principais conclusões que foram possíveis de retirar através de todo o presente estudo e ainda se apresentam propostas de trabalhos que seriam interessantes de efetuar posteriormente à dissertação em questão, tendo em conta todo o trabalho elaborado durante a mesma.

### 9.2. Conclusões

#### 9.2.1. Considerações gerais

Na presente secção encontram-se resumidas as conclusões mais relevantes do presente trabalho. Inicialmente começa-se por referir as conclusões relativas aos ensaios laboratoriais, seguindo as que se referem aos coeficientes de segurança parciais e o que se concluiu após se ter comparado os resultados deste trabalho com os resultados obtidos por outro autor. Por último apresenta-se uma nota final com informação que se deve ter em consideração ao longo das análises e conclusões dos resultados provenientes dos ensaios laboratoriais.

#### 9.2.2. Conclusões relativas aos ensaios laboratoriais

##### 9.2.2.1. Ensaios de indução de dano

Como se pode observar ao longo do capítulo 6., os geossintéticos foram ensaiados para 3 tipos de danificação, e para cada um desses tipos, apesar dos provetes possuírem o mesmo tipo de danificações, as mesmas não tinham o mesmo tipo de gravidade e por isso, as mesmas propriedades mecânicas e hidráulicas. No caso de provetes sujeitos ao ensaio de dano mecânico observou-se que nem todos os provetes tinham a mesma tonalidade nem a mesma quantidade e tamanho de pontos negros. Este fenómeno foi consequência, essencialmente, de uns provetes, durante o ensaio de dano mecânico, alojarem mais partículas de óxido de alumínio normalizado do que outros. Quando se ensaiaram provetes à abrasão também se observou, por exemplo, que todos os provetes não adquiriram nódulos com a geometria de cilindros com a mesma secção transversal nem com o mesmo comprimento. Após os ensaios de danificação observou-se que os geossintéticos que foram solicitados ao mesmo ensaio possuem os mesmos danos, mas sempre com distintas predominâncias dos mesmos, constituindo danos com diferentes gravidades, o que leva a que os provetes adquiram propriedades mecânicas e hidráulicas semelhantes e não iguais de provete para provete. O acontecimento atrás descrito constitui a principal razão que justifica o facto de provetes que foram inicialmente submetidos ao mesmo ensaio de danificação possuírem, por vezes, comportamentos ligeiramente diferentes aquando a realização dos ensaios hidráulicos.

### **9.2.2.2. Ensaios hidráulicos**

#### **Permeabilidade no plano**

Quanto mais danificados se encontrarem os provetes, maiores são os valores dos coeficientes hidráulicos. Pode-se considerar que, em geral, os provetes ficaram mais danificados após os ensaios de indução de dano mecânico + abrasão e menos danificados após o ensaio de indução de dano mecânico isolado. Os provetes que apresentam mais danos são os mais permeáveis uma vez que são atravessados por água com maiores velocidades.

Para além dos danos presentes nos geossintéticos, a velocidade de escoamento da água é maior quanto menor for a tensão normal aplicada aos mesmos e quanto maior for o gradiente hidráulico.

#### **Permeabilidade normal ao plano**

Os provetes que foram sujeitos aos ensaios de dano mecânico + abrasão, isto é, os provetes mais danificados, foram os que exibiram maiores velocidades de escoamento quando os geossintéticos são atravessados perpendicularmente aos seus planos por água. São os mais danificados visto que são os que apresentam maior número de cortes e mais gravosos. Também foi possível verificar que, dos provetes danificados, os que foram unicamente solicitados ao ensaio de abrasão foram atravessados com velocidades mais reduzidas. Tanto durante o ensaio de dano mecânico como durante o ensaio de abrasão surgiram cortes das fibras dos geossintéticos que criaram caminhos livres por onde a água podia circular, mas durante o ensaio de abrasão também se formaram nódulos com a geometria de cilindros. O facto de a permeabilidade dos geossintéticos ser maior quando são atravessados perpendicularmente ao seu plano enquanto possuem danos devidos ao ensaio de dano mecânico e não de abrasão é devido unicamente à existência dos nódulos com a geometria de cilindros, que oferecem resistência ao escoamento de água quando esta atravessa os provetes segundo ao plano normal dos mesmos.

Os geossintéticos que foram sujeitos aos ensaios de dano mecânico + abrasão são os mais permeáveis. Como já foi referido, estes provetes são os que procuram simular o comportamento dos geossintéticos que possuem danificações devidas, não só, à sua colocação em obra e que surgiram durante a realização das vias-férreas, mas também de danificações que aparecem durante o tempo de vida útil dos geossintéticos devido à passagem dos comboios.

#### **Comparação dos resultados observados tendo em conta os ensaios hidráulicos**

Tendo em conta os provetes danificados, durante o ensaio de determinação da capacidade de escoamento longitudinalmente ao plano dos geossintéticos, os provetes que possuíram um comportamento mais semelhante aos provetes intactos foram os que apenas se encontraram sujeitos ao ensaio de dano mecânico. Durante o ensaio de determinação da permeabilidade normal ao plano, os que mostraram ter um comportamento mais semelhante aos provetes intactos foram os que possuíram danos devidos unicamente ao ensaio de abrasão. Este fenómeno pode ser devido unicamente ao facto de os nódulos cilíndricos formados aquando os ensaios de abrasão serem pouco permeáveis quando são atravessados perpendicularmente ao plano dos mesmos, oferecendo, até, resistência ao escoamento, e serem muito permeáveis quando são atravessados por fluxos de água segundo o plano dos mesmos. Isto porque as fibras presentes nos nódulos cilíndricos possuem uma posição espacial que produzem o efeito atrás descrito, possuindo elevados

comprimentos e reduzidas alturas, formando espaços vazios essencialmente segundo o comprimento dos provetes.

Após se realizar os dois tipos de ensaios hidráulicos, verificou-se que os geossintéticos cujas propriedades hidráulicas foram mais afetadas eram os que apresentavam danificações devidas aos ensaios de dano mecânico + abrasão, o que já era de esperar, uma vez que são os que constituem os geossintéticos mais degradados, ou seja, são os que sofreram maior alteração da configuração espacial da distribuição dos elementos que os constituem.

Com isto se conclui que, neste caso e para as condições ensaiadas, quanto mais danificações tiverem os geossintéticos, maior é a permeabilidade dos mesmos.

### 9.2.3. Conclusões relativas aos coeficientes de segurança parciais

Como se pode observar a partir da Tabela 8. 1. e de acordo com a respetiva análise, para qualquer ensaio hidráulico, os provetes sujeitos aos ensaios de dano mecânico e abrasão consecutivamente, em geral, são os que apresentam coeficientes de segurança mais afastados da unidade, refletindo assim, maior variação das propriedades hidráulicas dos provetes, quando comparadas com as propriedades dos provetes intactos.

Quando os provetes foram submetidos ao ensaio de determinação da capacidade de escoamento no plano, os geossintéticos inicialmente solicitados ao ensaio de dano mecânico são os que apresentam uma média de coeficientes mais próxima da unidade. Quer isto dizer que foram os provetes que possuíam as propriedades hidráulicas estudadas no presente ensaio que mais se aproximavam das propriedades correspondentes dos provetes intactos. Também é necessário ter em atenção que para a tensão de 200 kPa e gradiente hidráulico de 0,1 mm/mm, observou-se que todos os coeficientes de segurança são superiores à unidade, o que indica que a velocidade do fluxo de água que circulou no interior dos provetes intactos foi superior à velocidade da mesma no interior dos provetes danificados.

Os provetes danificados que possuíam um comportamento hidráulico normal ao plano mais próximo do dos provetes intactos foram os provetes solicitados à abrasão. Isto porque são os que possuem o coeficiente de segurança parcial mais próximo da unidade, ou seja, possuem os valores das propriedades hidráulicas estudadas durante o ensaio de determinação da permeabilidade normal ao plano mais próximos dos valores das propriedades dos provetes intactos.

### 9.2.4. Conclusões relativas aos parâmetros determinados quando comparados com resultados já publicados

Na Tabela 8. 2. apresentaram-se os resultados dos ensaios hidráulicos determinados por Oliveira (2011) para o GTX. Como no presente trabalho foi elaborado o estudo do comportamento de GTX combinado com GGR, e admitindo que os ensaios foram efetuados exatamente da mesma maneira, através de comparação de valores foi possível entender a provável influência da GGR no comportamento hidráulico do GTX quando estes são atravessados por fluxos de água longitudinalmente ou perpendicularmente ao plano dos mesmos.

Foi possível concluir que, em geral, quando o GTX se encontra combinado com a GGR, o conjunto possui maior permeabilidade do que o GTX isolado. Quer isto dizer que quando os dois geossintéticos trabalham em

Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano simultâneo tornam-se mais permeáveis, concluindo-se que a GGR facilita o escoamento. Também se concluiu que quanto mais danificados se encontrarem os provetes, maior é a influência da GGR no comportamento hidráulico.

### 9.2.5. Nota Final: Relação do presente estudo com a vida prática

Deve-se ter em atenção que depois de efetuadas todas as análises e conclusões dos resultados dos ensaios houve uma preocupação em se interpretar os fenómenos visíveis de forma a tentar analisar a sua relevância na vida prática. Na realidade, o que se sucede aos geossintéticos nas vias-férreas pode não ser exatamente como se descreve ao longo da presente dissertação. Isto porque, na obra e ao longo da vida útil dos geossintéticos, os mesmos podem ser sujeitos a cargas e a estar em contato com materiais ligeiramente diferentes do que foi utilizado e como foi realizado durante os ensaios laboratoriais. Também podem estar em contato com mais agentes ou mecanismos de degradação que não se teve em conta aquando a realização dos ensaios.

Sendo assim, poder-se-á afirmar que as conclusões que se efetuaram quanto ao comportamento dos geossintéticos na vida prática, ao longo da presente dissertação, apenas são validas para as condições ensaiadas. Seria necessário comparar estes resultados com os obtidos da avaliação de materiais sob condições reais para poder tirar alguma conclusão.

## 9.3. Desenvolvimentos futuros

O principal objetivo do presente trabalho era compreender melhor a influência das danificações que os geossintéticos experimentam associadas à sua colocação em obra e durante o tempo de vida útil dos geossintéticos no seu comportamento hidráulico, nomeadamente, enquanto são atravessados por fluxos de água, longitudinal e perpendicularmente ao plano dos mesmos. O estudo da permeabilidade longitudinal ao plano dos geossintéticos é importante para a função de drenagem e o estudo da permeabilidade perpendicular ao plano dos mesmos é importante para a função de filtragem. Sendo assim foram submetidos aos ensaios de danificação: dano mecânico, abrasão e dano mecânico + abrasão; e seguidamente aos ensaios hidráulicos de determinação da capacidade de escoamento no plano dos geossintéticos e de determinação da permeabilidade normal ao plano dos geossintéticos.

Como trabalho futuro, seria importante efetuar a análise dos geossintéticos estudados, intactos e danificados, quanto à sua dimensão característica da abertura, relevante para o dimensionamento dos geossintéticos associado à função de filtragem.

Durante o presente trabalho, apenas se efetuou o estudo dos geossintéticos segundo a direção de fabrico. Para posterior análise e comparação com os resultados obtidos, também seria interessante realizar os mesmos ensaios com os mesmos geossintéticos e nas mesmas condições, mas segundo a direção normal à de fabrico dos mesmos.

No presente trabalho apenas se elaborou o estudo do comportamento hidráulico com a GGR sobreposta ao GTX. Para se poder concluir qual a melhor posição dos geossintéticos GTX e GGR em relação um ao outro para que, em conjunto executem com maior sucesso a função de drenagem e/ou filtragem, seria oportuno

efetuarem-se os mesmos ensaios e nas mesmas condições mas, desta vez, considerando o GTX sobreposto à GGR.

Seria interessante efetuar o mesmo estudo do presente trabalho mas utilizando outros tipos de geossintéticos, por exemplo, com outro tipo de estrutura ou processo de fabrico, ou que possuam outros polímeros na sua constituição, solicitando os mesmos aos ensaios hidráulicos realizados, usando provetes intactos e danificados, recorrendo aos ensaios de danificação efetuados neste trabalho. Após esse estudo, seria possível fazer uma análise e comparações dos resultados de forma a compreender quais os geossintéticos ou conjuntos de geossintéticos cujas propriedades hidráulicas são menos afetadas pelos agentes considerados.

Durante o ensaio laboratorial de dano mecânico, de acordo com a norma utiliza-se como material granular óxido de alumínio normalizado. Também seria interessante efetuar ensaios de dano mecânico e de seguida estudar o comportamento hidráulico desses provetes alterando o material granular. Tendo em consideração os vários materiais granulares a que os geossintéticos se encontram em contacto direto durante a sua colocação em obra e ao longo da vida da mesma, podia-se elaborar ensaios de dano mecânico com materiais granulares distintos de óxido de alumínio normalizado que se utilizassem nas vias-férreas na vida prática.

Seria interessante estudar a correspondência da lixa P100, a utilizada durante os ensaios de abrasão, com a realidade, isto é, analisar se a lixa P100 provoca danificações geralmente semelhantes às que os geossintéticos (neste caso GTX+GGR) sofrem na vida prática. Visto que os geossintéticos podem estar em contato direto, na obra, com diferentes materiais granulares, podia-se realizar, também, ensaios recorrendo a lixas com outras características e propriedades ou seja, lixas mais ou menos abrasivas do que a lixa utilizada nos ensaios que permitiram efetuar o presente trabalho. De seguida seguia-se o estudo do comportamento hidráulico dos provetes solicitados aos ensaios de abrasão referidos anteriormente.

Após a realização dos ensaios hidráulicos com provetes constituídos pelos mesmos geossintéticos mas sujeitos a ensaios de danificação em que se utilizaram diferentes materiais, e após a determinação dos parâmetros provenientes desses ensaios hidráulicos, seria possível escolher os materiais a utilizar na vida prática, nas vias-férreas, para que os geossintéticos realizassem com maior eficácia a função de drenagem ou de filtragem.

Utilizando provetes constituídos pelos mesmos geossintéticos, e solicitados aos ensaios de danificação sempre recorrendo aos mesmos materiais, pode-se elaborar ensaios hidráulicos mas utilizando água que possui minerais, dissolvidos ou não, minerais constituídos por diferentes substâncias, tamanhos, e quantidades presentes na mesma, por exemplo. Este estudo seria oportuno visto que antes de atingir os geossintéticos, a água contacta com outros materiais e produtos, podendo conter resíduos e/ou materiais em suspensão que ao longo do tempo se podem agregar no interior dos geossintéticos. Para além disso, também pode ser proveniente de chuvas ácidas. Com esse estudo, seria possível estudar a influência das partículas constituintes de águas ricas em minerais ou outros produtos no comportamento hidráulico dos geossintéticos e avaliar as propriedades hidráulicas dos materiais nessas condições.

Na realidade, as danificações que surgem após os ensaios de danificação nos provetes não são exatamente iguais às danificações que os geossintéticos experimentam depois de serem instalados nas vias-férreas, ao longo da vida da obra assim como ao longo da vida útil dos geossintéticos. Sendo assim, aquando o estudo do

Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano

comportamento hidráulico dos provetes, esses não assumem comportamentos exatamente iguais aos que os geossintéticos possuem nas vias-férreas, na vida prática, quando são submetidos aos mesmos tipos de danificação. Isto leva a que haja um grau de incerteza quanto à análise dos resultados provenientes dos diferentes ensaios e previsão com o que se sucede na vida prática. Para baixar o grau de incerteza, seria necessário efetuar ensaios laboratoriais e ensaios de campo, utilizando geossintéticos e materiais com as mesmas propriedades e características de forma a encontrar relações entre eles, recorrendo, por exemplo à determinação de coeficientes parciais. Conhecendo essas relações, seria possível compreender o comportamento dos geossintéticos na vida prática, em vias-férreas, de forma rigorosa, através de apenas ensaios laboratoriais. Outra opção que se poderia adotar, seria procurar alterar os equipamentos que permitem a realização dos ensaios laboratoriais de modo a fornecerem os resultados dos ensaios laboratoriais o mais próximo possível do que se sucede na vida prática.

Também seria importante elaborar estudos que vão de encontro com a manutenção dos geossintéticos instalados nas vias-férreas. Sendo assim ficaria garantido que os geossintéticos executam as suas funções de maneira bem-sucedida, aumentando, assim os seus tempos de vida útil e reduzindo o número de vezes que é necessário proceder à substituição dos mesmos durante a vida útil das vias-férreas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. (2011). Classificação dos geossintéticos. 2. Retrieved from <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Classificacao%20dos%20Geossinteticos.pdf> website:
- [2]. (2011). Funções dos Geossintéticos. 2. Retrieved from <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Funcoes%20dos%20Geossinteticos%20C3%A9ticos.pdf> website:
- [3]. (2011). Geossintéticos em Drenagem e Filtragem. Retrieved from <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Geossinteticos%20em%20Drenagem%20e%20Filtragem.pdf> website:
- Allen, T. M., & Bathurst, R. J. (1994). *Characterization of geosynthetic load-strain behaviour after installation damage*.
- Anderson, W. F., & Fair, P. (2010). Behavior of Railroad Ballast under Monotonic and Cyclic Loading. Retrieved from
- Aursudkij, B. (2007). *A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance*. University of Nottingham.
- Aursudkij, B., McDowell, G. R., & Collop, A. C. (2009). Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility. Retrieved from
- Braeu, G. (1998). *Experience with damage during installations in Germany Actual German regulations due to damage during installation*
- Brown, R. P., & Greenwood, J. H. (2002). Practical guide to the assessment of the useful life of plastics.
- Crawford, R. J. (1998). *Plastics Engineering*.
- Elias, V. (2000). *Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes*.
- Faure, Y. H., & Imbert, B. (1996). *Use of geotextiles to prevent fine material from polluting railway subgrades*.
- Fischer, S. (2010). Stabilisation of railway tracks with under the ballast built-in geogrid layers. Retrieved from
- Indraratna, B., Salim, W., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track*.
- Indraratna, F. B., Nimbalkar, S., Christie, D., Rujikiatkamjorn, C., & Vinod, J. (2010). Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track with and without Geosynthetics.
- Ingold, T. S. (1994). *Geotiles and Geomembranes Manual*.
- Ingold, T. S., & Miller, K. S. (1988). *Geotextiles handbook*.
- Ionescu, D. (2004). *Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast*. University of Wollongong.
- ISO/FDIS 10722:2007 - Geosynthetics - Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material; (2007).
- ISO/FDIS 11058 - Geotextiles and geotextile-related products - Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load (2009).
- Koerner, R. M. (1998). *Designing with geosynthetics*.
- Lim, W. L. (2004). *Mechanics of Railway Ballast Behaviour*. University of Nottingham.
- Lopes, M. L. (2009). Utilização de Geossintéticos em Estruturas de Vias Férreas. Retrieved from
- Lopes, M. L. C. (1992). *Muros reforçados com Geossintéticos*.
- Lopes, P. M. (2011). *Efeito do balastro nas propriedades de geossintéticos em vias-férreas*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

- Compósito geotêxtil – geogrelha: propriedades hidráulicas após dano  
Lu, M. (2008). *Discrete Element Modelling of Railway Ballast*. University of Nottingham.
- Montanelli, F., & Recalcati, P. (2003). Geogrid Reinforced Railways Embankments: Design Concepts and Experimental Tests Results. Retrieved from
- Nancey, A., Imbert, B., & Robinet, A. (2002). *Thick and abrasion resistant geotextile for use under ballast in railways structure*.
- NP EN ISO 10318:2010 - Geossintéticos Termos e Definições (2010).  
NP EN ISO 12958:2005 - Getêxteis e produtos relacionados - Determinação da capacidade de escoamento no seu plano (2005).  
NP EN ISO 13427:2006 - Geotêxteis e produtos relacionados - Simulação do dano por abrasão (ensaio do bloco deslizante) (2006).
- Oliveira, F. F. (2011). *Comportamento Hidráulico de Geossintéticos em Vias-férreas*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Perkins, S. W. (2004). Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements. Retrieved from
- Pinho-Lopes, M. (2006). *Estudo de Coeficientes de Segurança a Aplicar a Estruturas de Controlo de Erosão e de Estabilização de Maciços com Geossintéticos*.
- Pinho-Lopes, M., & Lopes, M. L. (2010). *A Durabilidade dos Geossintéticos*.
- Pinto, A. E. S. (2005). *Aplicação de Geossintéticos em Linhas-Férreas: Estudo Laboratorial dos Fenómenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão nos Materiais*.
- Raymond, G. P. (1999). *Railway rehabilitation geotextiles*.
- Rosete. (2010). *Durabilidade de Geossintéticos em Obras Ferroviárias - Abrasão e DDI*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Shukla, S. K. (2002). *Geosynthetics and their applications*.
- Silva, A. S. (2010). *Danificação durante a instalação em obra de geossintéticos*. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Van Dine, D., Williams, S.E. e Raymond, G.P. (1982). *An Evaluation of Abrasion Tests for Geotextiles*.
- Watn, m. A., & Chew, S. H. (2002). Geosynthetic damage - from laboratory to field