

RESISTÊNCIA DE GEOSSINTÉTICOS À DANIFICAÇÃO MECÂNICA E ABRASÃO

FILIPA RAQUEL COSTA ESCÓRCIO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes da Costa Lopes

Co-Orientador: Doutor José Ricardo da Cunha Carneiro

FEVEREIRO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2015/2016 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais, Teófilo e Fátima
À minha irmã, Patrícia

*Põe quanto és no mínimo que fazes.
Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive.
Fernando Pessoa*

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho, não posso deixar de manifestar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram direta, ou indiretamente, para que este se realizasse, e em particular:

- À minha orientadora Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, pelos ensinamentos transmitidos;
- Ao meu co-orientador Doutor José Ricardo Carneiro, pela ajuda e dedicação, pela disponibilidade permanente e apoio demonstrados,
- Ao mestre Paulo Peixoto Pereira e ao Francisco por todo o auxílio prestado, pela amizade e toda a disponibilidade;
- Aos meus amigos que me acompanharam neste percurso e que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho;
- Ao Gonçalo pelo carinho, pela compreensão, pelo incentivo e apoio permanentes,
- Aos meus pais pelo amor, apoio, compreensão e encorajamento que sempre demonstraram mesmo à distância;
- À minha irmã pelo amor, pelo incentivo, por estar sempre presente e nunca me faltar em todos estes anos.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os geossintéticos são materiais cada vez mais usados em obras de Engenharia Civil. Por esse motivo, é importante estudar o seu comportamento nas suas diversas aplicações. Uma das questões mais relevantes que se coloca sobre estes materiais está relacionada com o seu desempenho a curto e a longo prazo. Os geossintéticos podem sofrer processos de danificação durante a sua instalação em obra que podem afetar as suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas.

Neste trabalho, foi estudada a resistência de quatro geossintéticos (dois geotêxteis não-tecidos, um geotêxtil tecido e uma geogrelha tecida) face a dois mecanismos de degradação: danificação mecânica sobre carga repetida e abrasão. Numa primeira fase, os materiais foram expostos isoladamente aos mecanismos de degradação (exposição individual) e, em seguida, foram expostos sucessivamente à danificação mecânica sobre carga repetida e à abrasão.

A avaliação dos danos ocorridos nos geossintéticos (durante os ensaios de degradação) foi efetuada por análise visual, por ensaios de tração e por ensaios de punçoamento estático. Para os geotêxteis não-tecidos, foram também realizados ensaios de determinação da permeabilidade à água normal ao plano. Com base nas alterações das propriedades mecânicas dos materiais, foram calculados coeficientes de redução. Os coeficientes de redução obtidos na exposição sucessiva à danificação mecânica sob carga repetida e abrasão foram comparados com os coeficientes de redução determinados pelo método tradicional para o efeito combinado destes dois mecanismos de degradação (determinação isolada dos coeficientes de redução para cada mecanismo e posterior multiplicação).

De um modo geral, os mecanismos de degradação provocaram danos visíveis nos geossintéticos (por exemplo: corte de fibras ou filamentos, enrolamento de fibras ou a desagregação da camada superficial dos materiais). Estes danos foram acompanhados por uma redução da resistência à tração e ao punçoamento dos geossintéticos. Para os geotêxteis não-tecidos, ocorreram também algumas alterações relevantes no comportamento hidráulico (permeabilidade à água normal ao plano) dos materiais. Para os geotêxteis, e contrariamente ao que ocorreu para a geogrelha, a exposição isolada à danificação mecânica sob carga repetida foi mais danosa (maior redução das propriedades mecânicas) do que a exposição isolada à abrasão. Por fim, os coeficientes de redução obtidos na exposição sucessiva à danificação mecânica sob carga repetida e abrasão foram, em muitos casos, superiores aos obtidos pela metodologia tradicional.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxtil, Geogrelha, Danificação mecânica, Abrasão, Coeficientes de redução.

ABSTRACT

Nowadays, the behavior of geosynthetics is an important concern because they play an important role in Civil Engineering. For this reason, it is important to study their behavior in the different applications. One of the most relevant questions that arises on the study of geosynthetics is about their short and long-term performance. Geosynthetics can suffer damage during the installation process that may affect their properties throughout their service life.

This work studies the resistance of four geosynthetics (two non-woven geotextiles, a woven geotextile and a woven geogrid) against two degradation mechanisms: mechanical damage under repeated loading and abrasion. First, the materials were exposed separately to the degradation mechanisms (single exposure). Then, they were successively exposed to mechanical damage under repeated loading and abrasion.

The assessment of the damage that occurred in the geosynthetics (during the degradation tests) was performed by visual analysis, by tensile tests and by static puncture tests. For the non-woven geotextiles, tests were also carried out to determinate their water permeability characteristics normal to the plane. Based on the changes occurred in the mechanical properties of the materials, reduction coefficients were calculated. The reduction factors obtained in the successive exposure to mechanical damage under repeated loading and abrasion were compared with the reduction factors determined by the traditional methodology for the combined effect of both degradation mechanisms (determination of the reduction factors for each degradation mechanism in isolation and subsequent multiplication).

In general, the degradation mechanisms caused visible damage in the geosynthetics (for example, cuts of fibers or filaments, fiber agglomeration or breakdown of the surface layer of the material). This damage has been followed by a reduction in the tensile strength and static puncture resistance of the geosynthetics. For the non-woven geotextiles, there were also some significant changes in their hydraulic behavior (water permeability characteristics normal to the plane). For the geotextiles, and contrarily to what happened for the geogrid, the isolated exposure to mechanical damage under repeated loading was more damaging (higher reductions of the mechanical properties) than the isolated exposure to abrasion. In most cases, the reduction factors obtained in the successive exposure to mechanical damage under repeated loading and abrasion were higher than those obtained by the traditional methodology.

KEYWORDS: Geotextile, Geogrid, Mechanical damage, Abrasion, Reduction factors.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
2. GEOSSINTÉTICOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. HISTÓRIA	3
2.3. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS	5
2.4. MATERIAIS CONSTITUINTES	7
2.5. PROCESSOS DE FABRICO	8
2.5.1. GEOTÊXTEIS	9
2.5.2. GEOGRELHAS	10
2.6. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS	10
2.6.1. PROPRIEDADES FÍSICAS	11
2.6.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	11
2.6.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS	12
2.7. FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS	13
2.8. PRINCIPAIS APLICAÇÕES	14
2.9. DURABILIDADE	15
2.10. COEFICIENTES DE REDUÇÃO	16
2.10.1. MÉTODO ADOTADO	16
2.10.2. ALGUNS ESTUDOS	17
3. MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO MECÂNICA	19
3.1. INTRODUÇÃO	19
3.2. DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO	19
3.2.1. TIPO DE DANOS	19
3.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A DDI	20
3.2.3. FORMAS DE MINIMIZAR OS EFEITOS DA DDI	22
3.2.4. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DA DDI – EM ATERRO EXPERIMENTAL	23
3.2.5. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DA DDI – EM LABORATÓRIO	24
3.2.6. ALGUNS ESTUDOS	26

3.3.	ABRASÃO	27
3.3.1.	ABRASÃO.....	27
3.3.2.	DANOS PROVOCADOS.....	27
3.3.3.	MÉTODOS DE SIMULAÇÃO – EM LABORATÓRIO	28
3.3.4.	ALGUNS ESTUDOS.....	29
3.4.	SINERGIA ENTRE AGENTES DE DEGRADAÇÃO	29
3.4.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	29
3.4.2.	ALGUNS ESTUDOS.....	30
4.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
4.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	31
4.2.	GEOSSINTÉTICOS	322
4.3.	ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO	333
4.3.1.	ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA SOB CARGA REPETIDA.....	333
4.3.2.	ENSAIO DE ABRASÃO	366
4.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	388
4.4.1.	MASSA POR UNIDADE DE ÁREA.....	399
4.4.2.	ENSAIO DE ESPESSURA	399
4.4.3.	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	40
4.4.4.	ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO.....	433
4.4.5.	ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO	455
4.5.	DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE REDUÇÃO	49
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	51
5.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	51
5.2.	GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO G200.....	511
5.2.1.	ANÁLISE VISUAL	511
5.2.2.	TRAÇÃO.....	522
5.2.3.	PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	54
5.2.4.	PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO	55
5.3.	GEOTÊXTIL NÃO TECIDO G400	57
5.3.1.	ANÁLISE VISUAL	57
5.3.2.	TRAÇÃO.....	58
5.3.3.	PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	59
5.3.4.	PERMEABILIDADE Á ÁGUA NORMAL AO PLANO	61

5.4.	GEOTÊXTIL TECIDO GT200	622
5.4.1.	ANÁLISE VISUAL	622
5.4.2.	TRAÇÃO	633
5.4.3.	PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	65
5.5.	GEOGRELHA GG300	666
5.5.1.	ANÁLISE VISUAL	666
5.5.2.	TRAÇÃO	67
5.6.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	688
5.6.1.	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RESIDUAL	688
5.6.2.	RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO RESIDUAL	69
5.6.3.	PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO	700
5.6.4.	COEFICIENTES DE REDUÇÃO PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	711
5.6.5.	COEFICIENTES DE REDUÇÃO PARA A RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	733
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	777
6.1.	CONCLUSÕES	777
6.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	788
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

ÍNDICES DAS FIGURAS

Fig. 2.1 – Classificação dos geossintéticos.	5
Fig. 2.2 – Exemplos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido com tira e monofilamento; b) geotêxtil tecido com multifilamento e monofilamento; c) geotêxtil não-tecido mecanicamente ligado (agulhado); d) geotêxtil não-tecido termicamente ligado	5
Fig. 2.3 – Exemplos de geogrelhas: a) geogrelha uniaxial de uniões integrais; b) geogrelha biaxial de uniões integrais; c) geogrelha de uniões tecidas; d) geogrelha de uniões fundidas; e) geogrelha com uniões efetuadas por laser.	6
Fig. 2.4 – Exemplos de geomembranas: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa.....	6
Fig. 2.5 – Exemplos de geocompósitos: a) geocompósito de drenagem; b) geocompósito bentonítico .	7
Fig. 2.6 – Processo de fabrico dos geotêxteis tricotados.....	10
Fig. 2.7 – Funções dos geossintéticos: a) drenagem; b) filtragem; c) proteção; d) reforço; e) separação; f) controlo de erosão superficial; g) barreira de fluídos.	13
Fig. 2.8 – Principais aplicações dos geossintéticos: – a) reservatórios e barragens; b) canais; c) depósitos resíduos líquidos; d) depósitos de resíduos sólidos; e) obras rodoviárias; f) obras ferroviárias; g) tuneis e estruturas subterrâneas; h) fundações; i) drenagem; j) controlo de erosão.	15
Fig. 3.1 – Medidas a considerar na instalação de geossintéticos: a) Preparação da superfície; b) desenrolar do geossintético; c) zona de união dos troços de geossintéticos; d) colocação do material confinante; e) espalhar o material confinante; f) compactação do material confinante	23
Fig. 3.2 – Secção de aterros experimentais.	24
Fig. 3.3 – Equipamento do ensaio de simulação de queda de blocos e de material rochoso.	25
Fig. 3.4 – Equipamento do ensaio de queda de pirâmide.....	26
Fig. 3.5 – Equipamento de simulação do processo de abrasão com rodas abrasivas a) Aspeto do equipamento; b) Rodas abrasivas.	29
Fig. 4.1 – Materiais utilizados: a) geotêxtil G200; b) Geotêxtil G400; c) geotêxtil GT200; d) geogrelha GG300.....	32
Fig. 4.2 – Principais constituintes do equipamento de danificação.....	34
Fig. 4.3 – Equipamento utilizado no ensaio de danificação mecânica sob carga repetida: a) caixa antes da introdução do corindo; b) caixa inferior meia cheia; c) caixa inferior totalmente cheia; d) caixa com o provete colocado; e) equipamento durante o ensaio; f) tampa de compactação; g) corindo branco. .	36
Fig. 4.4 – Identificação dos constituintes do equipamento de abrasão).	37
Fig. 4.5 – Equipamento utilizado no ensaio de abrasão: a) Plataforma superior com o provete colocado; b) plataforma inferior com o abrasivo colocado; c) esticador; d) aspeto geral do equipamento utilizado.	38
Fig.4.6 – Equipamento utilizado na determinação da MUA.	39
Fig. 4.7 – Modo de determinação da espessura.....	39
Fig. 4.8 – Ensaio de tração: a) garras de compressão hidráulica; b) célula de carga; c) alvos; d) provete com as marcações a vermelho para colocar os alvos.	41
Fig. 4.9 – Ensaio de tração: a) provete montado com alvos durante o ensaio; b) provete após ocorrer a rotura.	42
Fig. 4.10 – Equipamento utilizado no ensaio de punçoamento estático: a) vista geral; b) sistema de aperto (dois anéis); c) suporte vertical; d) pilão.	44
Fig. 4.11 – Provete GT200 usado no ensaio de punçoamento estático: a) moldes utilizados; b) método de <i>Sandwich</i>	44
Fig.4.12 – Ensaio de permeabilidade à água normal ao plano: a) provete; b) local de colocação do provete; c) grelha d) régua para marcação da perda de carga; e) tubos em acrílico para observação da carga hidráulica; f) vista geral do equipamento.	47

Fig. 4.13 – Curvas quadráticas obtidas para as amostras intactas do geotêxtil G200 no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano.	49
Figura 5.1 – Geotêxtil G200: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após abrasão (provete em contraluz); e) Após DM + Abrasão; f) Após DM + Abrasão (provete em contraluz).	52
Fig. 5.2 – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para a geotêxtil G200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	54
Fig. 5.3 – Curvas força-deformação obtidas no ensaio de punçoamento estático para o geotêxtil G200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	55
Fig. 5.4 – Curvas médias obtidas no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200.	56
Fig. 5.5 – Geotêxtil G400: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após DM + Abrasão.	58
Fig. 5.6. – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para o geotêxtil G400 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	59
Fig. 5.7 – Curvas força-deformação obtidas no ensaio de punçoamento estático para o geotêxtil G400 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	61
Fig. 5.8 – Curvas médias obtidas no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G400.	62
Fig. 5.9 – Geotêxtil tecido GT200: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após DM + Abrasão.	63
Fig. 5.10 – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para a geotêxtil GT200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	64
Fig. 5.11 – Curvas força-deformação obtidas no ensaio de punçoamento estático para o geotêxtil GT200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	66
Fig. 5.12 – Geogrelha GG300: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após DM + Abrasão. ...	67
Fig. 5.13 – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para a geogrelha GG300 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).	68
Fig. 5.14 – Resistência à tração residual dos geossintéticos após os ensaios de degradação	69
Fig. 5.15 – Resistência ao punçoamento residual dos geossintéticos após os ensaios de degradação. .	70
Fig. 5.16 – Velocidade de escoamento para a perda de carga de 50 mm (VI_{H50}) dos geotêxteis G200 e G400.	71
Fig. 5.17– Comparação dos dois métodos de cálculo dos coeficientes de segurança.	73
Fig. 5.18 – Comparação dos dois métodos de cálculo dos coeficientes de redução.	75

ÍNDICES DE QUADROS

Quadro 2.1 – Polímeros utilizados como matérias-primas no fabrico de geossintéticos.	8
Quadro 2.2 – Densidade relativa de alguns polímeros	11
Quadro 3.1 – Fatores que influenciam a danificação durante a instalação	21
Quadro 3.2 – Principais danos causados devido ao processo de abrasã.....	28
Quadro 4.1 – Plano de trabalho.....	31
Quadro 4.2 - Principais características dos geossintéticos	33
Quadro 4.3 – Resumo das normas utilizadas	38
Quadro 4.4 – Resultados das medições da espessura do geotêxtil G200	40
Quadro 4.5 – Capacidade máxima das células de carga usadas no ensaio de tração.	41
Quadro 4.6 – Resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil G200 (amostra de referência).	42
Quadro 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil G200 (amostras de referência).	45
Quadro 4.8 – Excerto da tabela preenchida durante o ensaio de determinação da permeabilidade à água normal ao plano.....	47
Quadro 4.9 – Velocidades de escoamento obtidas no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200 (amostra de referência).....	48
Quadro 4.10 – Parâmetros das curvas de regressão quadrática obtidas em casa provete.....	49
Quadro 5.1 – Resultados médios do ensaio de tração–extensão do geotêxtil G200	53
Quadro 5.2 – Resultados médios do ensaio de punçoamento estático do geotêxtil G200	54
Quadro 5.3 – Resultados médios do ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200.....	55
Quadro 5.4 – Resultados médios obtidos no ensaio de tração para o geotêxtil G400.....	58
Quadro 5.5 – Resultados médios no ensaio de punçoamento estático do G400	60
Quadro 5.6 – Resultados médios do ensaio de permeabilidade à água normal ao plano para o geotêxtil G400.....	61
Quadro 5.7 – Resultados do ensaio de tração obtidos para o geotêxtil GT200.....	64
Quadro 5.8 – Resultados médios obtidos para nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GT200	65
Quadro 5.9 – Resultados médios obtidos no ensaio de tração da geogrelha GG300.	67
Quadro 5.10 – Coeficientes de redução para a resistência à tração dos geossintéticos em estudo.	72
Quadro 5.11 – Coeficientes de redução para a resistência ao punçoamento dos geossintéticos em estudo.	74

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Área

Ab - Abrasão

ASTM – *The American Society for Testing Materials*

B – Largura do provete

c – Constante (ensaio de tração)

CEN - Comissão europeia de normalização

CPE – Polietileno clorinado

cv – Coeficiente de variação

DEC - Departamento de Engenharia Civil

D_{FM} – Distância entre alvos na força máxima lida no aparelho

Di – Distância inicial entre alvos

DDI - Danificação durante a instalação

DM – Danificação mecânica

E_{FM} -Extensão na força máxima

F – Fator de segurança a usar no dimensionamento

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fig. – Figura

F_M – Força máxima

F_P – Força máxima de punçoamento

F_{PDanificado} – Resistência ao punçoamento das amostras danificadas

F_{PReferência} – Resistência ao punçoamento da amostra referência

H – Carga hidráulica

LGS - Laboratório de Geossintéticos

m - Massa

MUA - Massa por unidade de área

PA - Poliamida

PE - Polietileno

PEAD - Polietileno de alta densidade

PECS - Polietilenos clorossulfonados

PEMD – Polietileno de média densidade

PET – Polietileno tereftalato

PP - Polipropileno

PVC - Policloreto de vinilo

R_{Ab} – Resistência (à tração ou ao punçoamento) das amostras danificadas por abrasão

R_{DM} – Resistência (à tração ou ao punçoamento) das amostras danificadas por danificação mecânica

R_{Ab+DM} – Resistência (à tração ou ao punçoamento) das amostras danificadas por abrasão e danificação mecânica (exposição sucessiva)

R_{Referência} – Resistência (à tração ou ao punçoamento) da amostra de referência

R_{RT} - Resistência à tração residual das amostras danificadas

R_{RP} - Resistência ao punçoamento residual

R_T – Fator corretivo da temperatura

RF – Coeficiente de redução

RF_{AB} - Coeficiente de redução para o efeito da abrasão

RF_{DM} - Coeficiente de redução da DM

RF_{DM+AB} - Coeficiente de redução para o efeito da exposição sucessiva à danificação mecânica e abrasão

$RF_{DM+AB\ TRAD}$ – Coeficiente de redução para o efeito combinado da danificação mecânica e abrasão obtido pela metodologia tradicional

RF_A – Coeficiente de redução das amostras danificadas por agentes atmosféricos

RF_{QB} – Coeficiente de redução das amostras danificadas por agentes químicos ou biológicos

RF_F – Coeficiente de redução das amostras danificadas por cargas estáticas

s – Desvio Padrão

SHW – *Specification for Highways*

t – Tempo

T - Resistência à tração

T – Temperatura (ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geossintético)

T_D – Resistência a usar no dimensionamento

$T_{Referência}$ – Resistência à tração da amostra de referência

$T_{Intactos}$ – Resistência à tração das amostras danificadas

V_{20} – Velocidade de escoamento

VI_{H50} – Velocidade de escoamento para uma perda de carga de 50 mm

$\bar{x}$ – Média

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os geossintéticos são materiais cada vez mais usados em obras de engenharia civil, maioritariamente em obras geotécnicas. Apesar de nos últimos anos terem sido realizados vários trabalhos sobre o seu comportamento, continua a ser importante continuar a realizar estudos sobre estes materiais.

O principal objetivo desta dissertação foi analisar a resistência de diferentes geossintéticos face a dois mecanismos de degradação, nomeadamente a danificação mecânica sobre carga repetida e a abrasão. Numa primeira fase, os materiais foram sujeitos à ação de cada mecanismo isoladamente, e numa segunda fase, foram expostos à danificação mecânica sobre carga repetida seguida de abrasão (exposição sucessiva). Os danos ocorridos nos geossintéticos (durante os ensaios de degradação) foram avaliados através de ensaios físicos, mecânicos e hidráulicos. Tendo isto em conta, um dos objetivos desta dissertação foi também a comparação de coeficientes de redução (RF) obtidos para o efeito da danificação mecânica sob carga repetida e abrasão através de duas metodologias: (1) exposição sucessiva aos dois agentes de degradação (obtendo-se os RFs diretamente) e (2) a metodologia tradicional (obtenção dos RFs individualmente para cada agente de degradação e posterior multiplicação).

Atualmente, uma das questões mais importantes que se coloca sobre os geossintéticos relaciona-se com a sua resistência à degradação. No dimensionamento dos materiais são normalmente introduzidos coeficientes de redução para compensar alterações de propriedades (normalmente perdas de resistência) que ocorrem devido à ação de agentes de degradação.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, fazendo-se no presente capítulo uma breve introdução ao tema e aos seus objetivos.

No capítulo 2 aborda-se em termos gerais alguns aspetos dos geossintéticos, nomeadamente a história, o que são, para que servem, os diferentes processos de fabrico, funções e algumas aplicações em Engenharia Civil.

No capítulo 3 explica-se o que acontece durante o processo de instalação em obra, e faz-se uma introdução aos vários mecanismos de danificação mecânica, com especial ênfase na danificação mecânica sob carga repetida e na abrasão.

O capítulo 4 resume as principais características dos materiais utilizados, inclui toda a descrição do trabalho incluindo os ensaios de massa por unidade de área (MUA), espessura, tração, punçoamento estático e permeabilidade à água normal ao plano.

No capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos em laboratório, também são apresentados os resultados dos coeficientes de redução e é estabelecida uma comparação com os mesmos. Por fim, no capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões e são propostos possíveis desenvolvimentos futuros.

2

GEOSSINTÉTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Já no tempo dos babilónios eram usados materiais para estabilizar e reforçar os solos. Contudo, apenas no século XX é que apareceu o conceito de geossintético. De acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), um geossintético é um material polimérico plano, de origem sintética ou natural, colocado à superfície ou no interior de materiais naturais ou geotécnicos. Podem desempenhar funções de separação, filtragem, drenagem, reforço, controlo de erosão, proteção e estanqueidade (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Ao longo do tempo, os geossintéticos têm sido cada vez mais utilizados em Engenharia Civil devido ao facto de permitirem construções mais rápidas, mais económicas, menos dependentes das condições meteorológicas, com menos movimentos de terra e com possibilidade de serem efetuadas em zonas com solos de pior qualidade e com menos manutenção.

Apesar de serem materiais cada vez mais usados em Engenharia Civil, a durabilidade dos geossintéticos tem sido uma das maiores limitações à sua aplicação generalizada. Para minimizar o impacto dos vários tipos de degradação dos geossintéticos, no dimensionamento dos materiais são normalmente introduzidos coeficientes de redução para compensar as alterações de propriedades que estes sofrem ao longo do tempo.

Neste capítulo serão abordados os conceitos gerais sobre geossintéticos, nomeadamente a sua história, classificação, propriedades, funções e aplicações.

2.2. HISTÓRIA

O melhoramento de solos com recurso a fibras e telas data de há milhares de anos. Os babilónios utilizavam materiais fibrosos nas suas construções, os chineses utilizavam madeira, raízes e bambu. Na Idade Média, além destes materiais, também se usavam peles de animais (Lopes, 2005).

Já no séc. XX, devido a preocupações de ordem económica e ambiental, apareceram novas técnicas e novos materiais. Assim, surgiram os geotêxteis, cuja designação resultou do facto de serem usados sobretudo na geotecnia e de serem feitos com fibras têxteis.

Em 1926 na Carolina do Sul, Estados Unidos, uma tela de algodão foi utilizada como base de uma estrada. Em 1935 os resultados desta experiência foram publicados (Mills et al, 1935). A estrada ficou em boas condições até à degradação da tela. Este projeto foi, sem dúvida, pioneiro na utilização destes materiais como reforço e como separação.

Na década de 50, e com o aparecimento dos polímeros sintéticos, os geossintéticos começaram a ser sistematicamente aplicados em Engenharia Civil. Na década de 60 surgem os geotêxteis não-tecidos termicamente ligados. Contudo, o grande passo para estes materiais serem usados na construção apenas foi dado nos anos 70 com o aparecimento dos geotêxteis não-tecidos agulhados. Na década de 80 surgiram materiais com estruturas distintas, como por exemplo: georredes, geogrelhas, geomembranas ou geocompósitos. Segundo Koerner (1986), as razões que impulsionaram o grande e rápido progresso dos geossintéticos foram:

- São fabricados em ambientes controlados;
- Podem ser instalados de forma rápida e eficaz;
- Podem evitar o recurso a matérias-primas (possibilidade de serem utilizados materiais reciclados);
- Evitam o recurso a estruturas com difícil dimensionamento;
- A sua utilização é mais económica do que recorrer a soluções mais tradicionais;
- Tornam possível a construção em solos que normalmente não seriam considerados adequados;
- São introduzidos a preços competitivos no mercado;
- Cada vez mais a sua utilização está a ser imposta regulamentarmente.

O termo geossintético foi introduzido por J. E. Fluet Jr. para designar os novos produtos com aplicação em obras de carácter geotécnico. Mas só em 1994, no “Congresso Internacional de Geotêxteis, Geomembranas e Produtos Afins”, realizado em Singapura, a “Sociedade Internacional de Geotêxteis e Produtos Afins” aclamou universalmente o termo geossintético ao adotar a denominação de “Sociedade Internacional de Geossintéticos”. Desde então o termo geossintético é usado para designar materiais fabricados com produtos sintéticos ou não (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), em Portugal, desde 1980 que os geossintéticos estão a ser empregues em Engenharia Civil, com especial destaque na área de obras hidráulicas e viárias. Mas só a partir de 1990, devido à construção da rede nacional de aterros de resíduos urbanos, é que foi dado o grande impulso na utilização destes materiais, bem como na procura de conhecimentos. Criou-se, em 1999, o Organismo de Normalização Sectorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, a Comissão Portuguesa de Geossintéticos (IGS Portugal).

A comunidade científica, desde cedo, acompanhou a expansão dos geossintéticos, pelo que desde 1977 que se realizam congressos e conferências sobre este tema. Desde 1982 que têm ocorrido a cada 4 anos, as Conferências Internacionais de Geossintéticos: Las Vegas 1982, Viena 1986, Haia 1990, Singapura 1994, Atlanta 1998, Nice 2002, Yokohama 2006, Brasil 2010 e Berlim 2014.

A primeira Conferência Europeia de Geossintéticos (EuroGeo) foi em Maastricht em 1996 e tem-se repetido a cada 4 anos. Da mesma forma surgiu a Conferência Asiática de Geossintéticos (GeoAsia) realizada pela primeira vez em 1997 em Bangalore, Índia, e tem-se também realizado de 4 em 4 anos. Em 2008, em Cancun, surgiu a GeoAmericas (Conferência Americana de Geossintéticos), tendo vindo a realizar-se também periodicamente de 4 em 4 anos. Em 2009, realizou-se a primeira Conferência Africana de Geossintéticos (GeoAfrica) na cidade do Cabo. Em 2005, realizou-se o 1º Seminário Português sobre Geossintéticos, na cidade do Porto, tendo posteriormente ocorrido mais três edições (Lisboa 2007, Coimbra 2009 e Aveiro 2011).

2.3. TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS

Existem vários tipos de geossintéticos, que são normalmente classificados de acordo com o seu processo de fabrico. A Fig. 2.2 ilustra um exemplo de classificação dos materiais. Os geossintéticos podem ser classificados como geotêxteis, geomembranas ou produtos relacionados (como por exemplo: geogrelhas, georredes, geocompósitos, etc.).

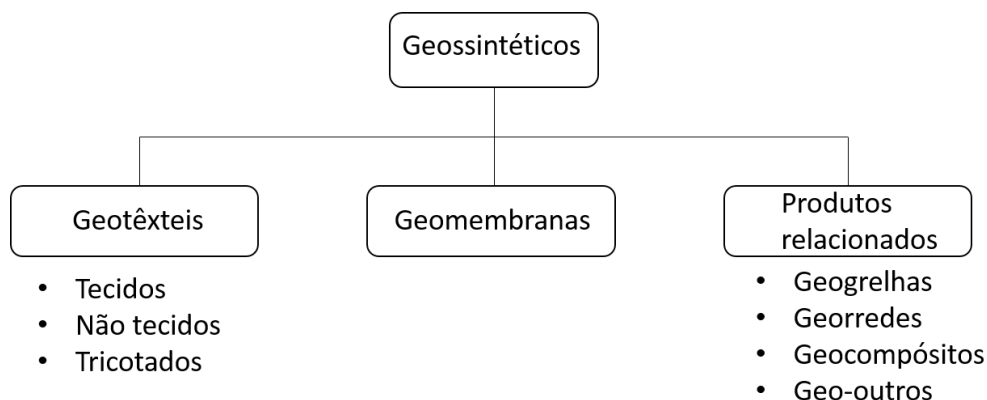


Fig. 2.1 – Classificação dos geossintéticos.

De seguida aborda-se os diferentes tipos de geossintéticos, de acordo com Shukla (2002), Pinho-Lopes e Lopes (2010) e Lopes (1998). Dado na parte experimental do trabalho serem usados geotêxteis e geogrelhas, será feita uma descrição mais detalhada relativamente a estes materiais.

Geotêxteis: normalmente aparecem em forma de mantas flexíveis, podendo desempenhar várias funções como: proteção, reforço, separação, filtragem ou drenagem. Na Fig. 2.2 ilustram-se alguns exemplos de geotêxteis. De acordo com o seu processo de fabrico, podem ser classificados em:

- Não-tecidos;
- Tecidos;
- Tricotados.

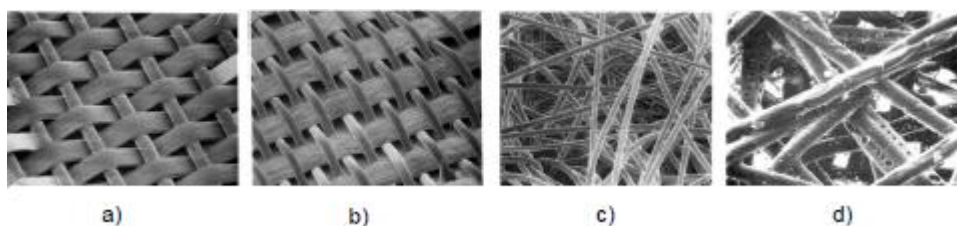


Fig. 2.2 – Exemplos de geotêxteis: a) geotêxtil tecido com tira e monofilamento; b) geotêxtil tecido com multifilamento e monofilamento; c) geotêxtil não-tecido mecanicamente ligado (agulhado); d) geotêxtil não-tecido termicamente ligado (Lopes, 1998).

Geogrelhas: são malhas abertas constituídas por estruturas poliméricas planas. A malha é formada por elementos cruzados entre si, designados por barras (Fig. 2.3). A ligação entre as barras pode ser por extrusão, tricotagem ou por soldadura a *laser*. As aberturas nas geogrelhas permitem o intertravamento com o solo circundante. Como normalmente as geogrelhas são usadas como reforço, a força da união

entre barras é importante, porque é através destas uniões que as cargas são transmitidas barra a barra. De acordo com a orientação da estiragem podem ser:

- Uniaxiais – quando no processo de fabrico as aberturas são feitas apenas numa direção; possuem maior resistência à tração na direção longitudinal do que na transversal.
- Biaxiais – quando no processo de fabrico as aberturas são feitas em ambas as direções. Possuem igual resistência à tração em ambas as direções (longitudinal e transversal).

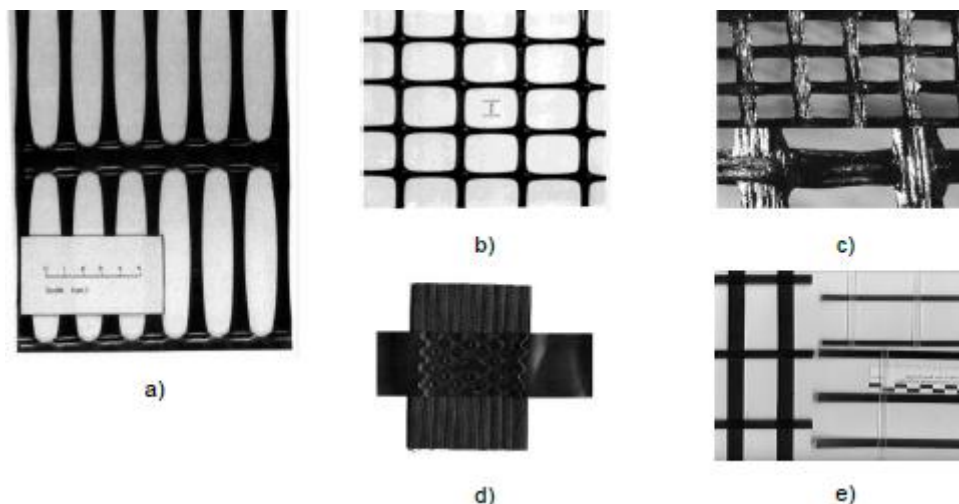


Fig. 2.3 – Exemplos de geogrelhas: a) geogrelha uniaxial de uniões integrais; b) geogrelha biaxial de uniões integrais; c) geogrelha de uniões tecidas; d) geogrelha de uniões fundidas; e) geogrelha com uniões efetuadas por laser (Lopes, 1998).

Georredes: são materiais poliméricos planos com uma malha regular, onde as barras formam ângulos entre 60° a 75°. São muito semelhantes às geogrelhas, apenas diferem na função que desempenham.

Geomembranas: são membranas contínuas compostas por materiais de baixa permeabilidade que podem apresentar uma superfície lisa ou rugosa (Fig. 2.4). A sua principal função é a de contenção de fluídos (líquidos ou gases). Os materiais mais usados são de origem polimérica, asfáltica, ou uma combinação dos dois.

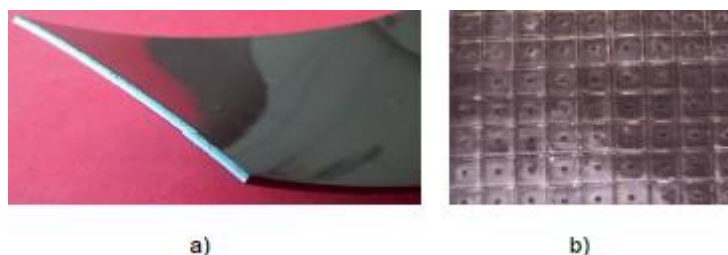


Fig. 2.4 – Exemplos de geomembranas: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa (Lopes, 1998).

Geocompósitos: são associações de diferentes materiais que incluem pelo menos um geossintético. Normalmente podem desempenhar mais do que uma função, de forma mais eficiente do que os seus constituintes de forma separada. Segundo Koerner (1998), a maior parte das combinações que se obtém com os geocompósitos é para obter as melhores características dos dois materiais que o

constituem de modo a conseguir chegar à solução de um determinado problema. Na Fig. 2.5 apresentam-se alguns exemplos de geocompósitos.

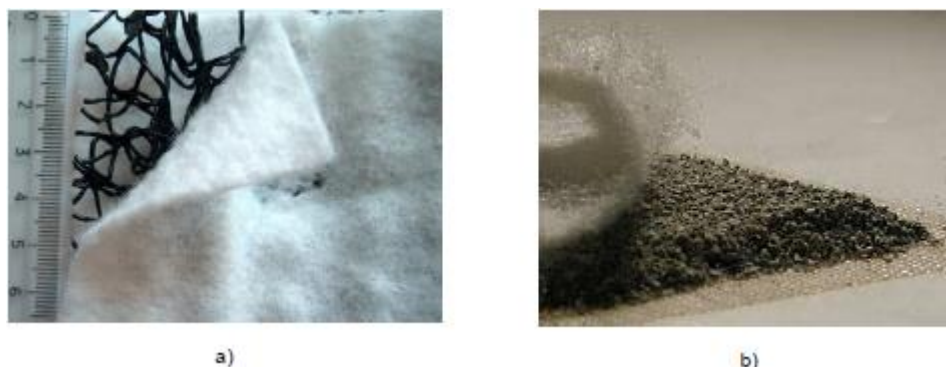


Fig. 2.5 – Exemplos de geocompósitos: a) geocompósito de drenagem; b) geocompósito bentonítico (Lopes, 1998).

2.4. MATERIAIS CONSTITUINTES

Os geossintéticos podem ser fabricados com matérias-primas naturais ou sintéticas. As naturais podem ser de origem vegetal (juta, algodão) ou animal (lã ou seda). Por sua vez, as sintéticas podem ser orgânicas ou inorgânicas. A maior limitação das fibras naturais é o facto de serem biodegradáveis, o que lhes impede de terem muitas aplicações, pelo que são pouco usadas. Por outro lado, os materiais orgânicos sintéticos são os mais utilizados e são vulgarmente designados por plásticos (Lopes, 1998).

Os plásticos podem ser classificados como termoplásticos ou termoendurecidos. A principal diferença consiste no facto de os termoplásticos poderem amolecer ou endurecer de acordo com a temperatura a que estão sujeitos. Por outro lado, os termoendurecidos quando endurecem não podem voltar a amolecer por ação do calor. Os materiais mais utilizados são os termoplásticos em que as suas propriedades dependem da sua estrutura, aditivos usados e o processo em que são formados (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Os termoplásticos são constituídos por polímeros que por sua vez são constituídos por monómeros. Os monómeros ao se juntarem através de processos químicos, formam longas cadeias moleculares (este processo designa-se por polimerização). Caso no processo de fabrico se adicionem diferentes aditivos químicos, a partir de um mesmo monómero é possível obter termoplásticos com propriedades diferentes (Lopes, 1992).

A cristalinidade é uma característica importante nos termoplásticos, visto ser alusiva ao tipo de estrutura. De acordo com o tipo de estrutura, um termoplástico pode ser classificado como cristalino, semicristalino ou amorfo. Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), à medida que a cristalinidade de um polímero aumenta, a rigidez, a resistência ao calor, a resistência à tração e a resistência química também aumentam. Por outro lado, a permeabilidade, a deformação na rotura, a flexibilidade, a resistência ao impacto e a resistência à fendilhação diminuem.

No processo de fabrico de geossintéticos, de acordo com Shukla (2002), podem ser usados diferentes tipos de polímeros como por exemplo:

- PP – polipropileno;
- PE – polietileno;

- PEMD – polietileno de média densidade;
- PEAD – polietileno de alta densidade;
- PET – polietileno tereftalato;
- PA – poliamida;
- PVC – policloreto de vinilo.
- PECS – polietileno clorossulfonado;
- CPE – polietileno clorinado;

O Quadro 2.1 resume as diferentes matérias-primas utilizadas no fabrico de geossintéticos.

Quadro 2.1 – Polímeros utilizados como matérias-primas no fabrico de geossintéticos (Shukla, 2002).

Geossintéticos	Matérias-primas
Geotêxteis	PP, PET, PA, PE
Geogrelhas	PEAD, PET, PP
Georredes	PEMD, PEAD
Geomembranas	PE, PVC, CPE, PECS

2.5. PROCESSOS DE FABRICO

Os diferentes tipos de geossintéticos resultam de diferentes processos de fabrico. De forma simples, o processo de fabrico pode ser dividido em três passos:

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

A primeira fase consiste na formação da mistura polimérica (polímero base mais aditivos). Os aditivos melhoram as propriedades do produto final e facilitam a transformação da mistura polimérica nos componentes dos geossintéticos.

A segunda fase consiste na produção dos componentes. Estes podem ser obtidos por extrusão ou fiação líquida do polímero, podendo apresentar formas muito variadas, onde se destacam o filamento contínuo circular, a tira plana contínua e a folha ou película. Estes componentes ainda podem ser trabalhados e originar formas mais complexas. Nos processos de extrusão ou fiação líquida, o polímero é introduzido num recipiente juntamente com o aditivo, ficando a temperatura e pressão controladas. O objetivo é provocar a fusão dos constituintes sólidos, a sua mistura e a expulsão do oxigénio.

Na terceira fase, a mistura líquida é expelida através de uma placa perfurada com orifícios de diâmetro conhecido; os filamentos formados são depois arrefecidos ao ar ou em água. O processo de fabrico das

tiras e das películas apesar de ser semelhante, a mistura polimérica é obrigada a sair através de fendas e as tiras são produzidas diretamente obtidas através do corte das películas. De seguida, estes componentes sofrem processos de estiramento e solidificação (Carneiro (2009) e Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

2.5.1. GEOTÊXTEIS

A maioria dos geotêxteis são feitos a partir de polipropileno ou poliésteres. A principal razão para este facto é o preço baixo do polipropileno (Shukla, 2002). Abaixo descrevem-se os processos de fabrico de uma forma mais detalhada para os diferentes tipos de geotêxteis (Carneiro (2009) e Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

Tecidos: São manufacturados através de processos de tecelagem tradicionais, recorrendo a teares mecânicos. As fitas, tiras, multifilamentos ou monofilamentos são os componentes mais usados no fabrico destes materiais. Daqui resultam estruturas com uma distribuição regular de poros e com espessura entre 1 a 2 mm.

Não-tecidos: os monofilamentos são os componentes mais utilizados. A manufatura consiste na deposição contínua de fibras ou filamentos num tapete, para que se forme uma malha solta que será ligada. Essa malha pode ser ligada através de processos químicos, térmicos ou mecânicos.

- **Ligação mecânica:** usualmente denominada por agulhagem, é feita através da passagem de milhares de agulhas, com farpas, que se movimentam continuamente. As farpas penetram na malha e entrelaçam os componentes.
- **Ligação térmica:** realizada através do aquecimento da malha. Se o geotêxtil for formado por componentes com a mesma composição química, a ligação é obtida através de processos de calandragem a temperaturas elevadas. A temperatura apenas pode ser aplicada em determinados pontos de modo a evitar que a malha se transforme numa folha de plástico. Se o geotêxtil for formado por componentes com composições químicas diferentes (diferentes polímeros com diferentes pontos de fusão), então haverá mais pontos de ligação, para que os diferentes polímeros se liguem. Para que este processo ocorra com a eficácia desejada, estes geotêxteis apenas podem apresentar entre 0,5 a 1 mm de espessura. Caso contrário poderão haver dificuldades na ligação se o geotêxtil for mais espesso.
- **Ligação química:** efetuada com recurso a um meio cimentício (por exemplo: cola, resina); após este processo o geotêxtil passa por uma fase de cura ou por operações de calandragem. A ligação química e a fase de cura permitem que os constituintes do geotêxtil se unam. Resultam, normalmente, deste processo geotêxteis com 0,5 a 3 mm.

Tricotados: são manufacturados através da entrelaçagem de fios de forma a ser formada uma estrutura plana (Fig. 2.6). São pouco utilizados, por se deformarem muito quando há aplicação de cargas.

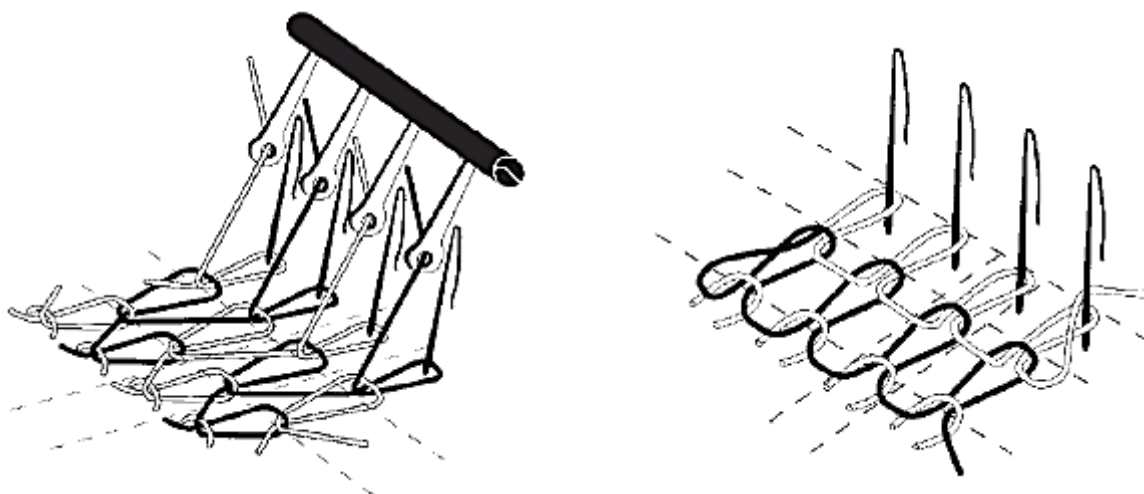


Fig. 2.6 – Processo de fabrico dos geotêxteis tricotados (adaptado de Anand, 2000).

2.5.2. GEOGRELHAS

Consoante o seu processo de fabrico, as geogrelhas podem ser:

- Extrudidas;
- Tecidas;
- Soldadas.

O processo de fabrico das geogrelhas uniaxiais extrudidas consiste em perfurar uma folha de plástico, com 4 a 6 mm, de forma regular. Posteriormente, essa folha é aquecida e estirada na direção de fabrico, de forma a permitir que as aberturas se alonguem, acompanhadas pela orientação das cadeiras moleculares na direção do estiramento. Desta forma, é introduzido um aumento da resistência à tração e da rigidez da geogrelha na direção em causa. Para obter uma geogrelha biaxial, será necessário repetir o procedimento de aquecimento e estiramento na direção transversal (Koerner (1998) e Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

As geogrelhas tecidas são produzidas através dos equipamentos da indústria têxtil. O processo consiste na união de fibras suficientes para formar barras longitudinais e transversais, separadas por aberturas. A união das barras é feita através de tricotagem ou entrelaçagem e, posteriormente, o conjunto é protegido com um revestimento que lhe confere estabilidade dimensional e protege dos danos causados durante o processo de instalação em obra (Koerner 1998). O revestimento pode ser em PVC, látex, betuminoso, etc. As uniões também podem ser efetuadas através de ligações térmicas a partir da fusão dos pontos de cruzamento das barras (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Finalmente, as geogrelhas soldadas a *laser*, são manufaturadas através da união de barras PET ou PP a *laser*. Estas normalmente têm maior rigidez que as geogrelhas tecidas e com ligações térmicas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

2.6. PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

As propriedades dos materiais podem ser divididas em físicas, hidráulicas, mecânicas e relativas à durabilidade. Abaixo será feita a descrição de cada uma delas.

2.6.1. PROPRIEDADES FÍSICAS:

As propriedades físicas são a densidade relativa dos polímeros, a massa por unidade de área, a espessura e a distribuição e dimensão das partículas.

A densidade relativa define-se como a razão entre o peso volúmico dos elementos que constituem o geossintéticos e o peso volúmico da água a 4°C. Esta propriedade é importante para materiais que se pretende que fiquem imersos pois se forem constituídos por polímeros em que a densidade relativa seja inferior a 1,00 isto poderá significar que os materiais possam flutuar. No quadro 2.2 estão resumidos os valores da densidade relativa para alguns tipos de polímeros.

Quadro 2.2 – Densidade relativa de alguns polímeros (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

Polímero	Densidade relativa
PVC	1,69
PET	1,22 – 1,38
PA	1,05 – 1,14
PE	0,90 – 0,96
PP	0,91

A espessura tem influência direta no comportamento hidráulico e mecânico dos geossintéticos. Através da espessura é possível avaliar a compressibilidade dos materiais, na medida em que alguns materiais quando submetidos a uma dada pressão constante podem colapsar enquanto que outros não (são compressíveis).

A massa por unidade de área (muitas vezes denominada de gramagem) fornece indicações sobre o custo dos geossintéticos e é um indicador da resistência à tração e da resistência ao punçoamento dos materiais. Segundo Koerner (1998), para a maioria dos geotêxteis os valores da massa por unidade de área variam entre 150 e 750 g.m⁻². Para as geogrelhas os valores variam entre 200 e 1000 g.m⁻².

A distribuição e dimensão das aberturas são características fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtros. Nas geogrelhas e georedes, o tamanho das aberturas é uniforme, pelo que basta medir o tamanho de uma delas para saber a dimensão da abertura. No caso dos geotêxteis tecidos e não-tecidos, o material possui não apenas um tamanho, mas um intervalo de tamanhos.

2.6.2. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

As propriedades hidráulicas são mais afetadas pelo processo de fabrico dos geossintéticos do que pelo tipo de polímero. Estas consistem na permeabilidade à água normal ao plano e na transmissividade. A sua descrição será de acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010).

A permeabilidade à água normal ao plano é a capacidade que o material tem de ser atravessado por água numa direção perpendicular ao seu plano, onde o fluxo de água pode ocorrer em regime estacionário (independentemente do tempo) ou em regime não estacionário. Em regime estacionário o fluxo e a altura da água são constantes, por outro lado quando em regime não estacionário a altura de água decresce. Esta propriedade depende da estrutura das aberturas (distribuição e dimensão) e é das propriedades mais importantes para geotêxteis com função de filtro.

A transmissividade é uma propriedade muito importante para os geossintéticos com a função de drenagem. É calculada como o quociente entre o volume de água que atravessa o geossintético, pelo que depende da espessura e da distribuição e dimensão das aberturas do material.

2.6.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são das características mais importantes dos geossintéticos, em especial para os que desempenham a função de reforço. Durante a sua vida, um geossintético está sujeito a solicitações mecânicas, que podem ser esforços de tração ou compressão, punçoamento e rasgamento. No presente trabalho, apenas será abordado o comportamento à tração e ao punçoamento porque foram as únicas propriedades mecânicas avaliadas.

O comportamento à tração depende do polímero constituinte, da estrutura, do processo de fabrico e do tipo de ligação. A resposta dos geossintéticos quando sujeitos a tração é caracterizada pela curva que relaciona a força por unidade de largura com a extensão. A partir da curva obtém o valor da força máxima por unidade de largura, a extensão na força máxima e o módulo de rigidez. É de notar que os geotêxteis tecidos apresentam valores mais baixos para a extensibilidade ou seja, rigidez mais elevada.

A resistência ao punçoamento está associada à função de separação e pretende avaliar a resistência destes materiais a solicitações induzidas pelas partículas dos agregados a separar. Quando os geossintéticos são aplicados em obras geotécnicas, ou mesmo durante a sua colocação em obra, podem ocorrer descontinuidades devido a ações de cargas concentradas. Estas ações podem originar perfurações (golpes), punçoamento (efeito de compressão) ou rebentamento.

2.6.4. PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE:

A durabilidade pode ser entendida como a capacidade que o material tem em manter determinadas propriedades ao longo de toda a sua vida útil (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

De acordo com Koerner (1998), é possível fazer a distinção entre propriedades relativas à durabilidade dos geossintéticos: (1) devido à sua resistência durante o tempo de vida útil (*endurance*) ou (2) devido à sua degradação. Na primeira inclui-se a danificação durante a instalação, a fluência, a relaxação de tensões, a abrasão e a fluência em compressão. Na degradação inclui-se a resistência às radiações ultravioleta, à ação da temperatura, à oxidação, à hidrólise, aos agentes químicos e aos agentes biológicos. Apesar de todas estas propriedades serem importantes quando se caracteriza o material, neste trabalho apenas serão avaliadas a danificação mecânica sob carga repetida (simulação laboratorial da danificação durante a instalação) e a abrasão.

A danificação durante a instalação em obra está relacionada com as solicitações a que os geossintéticos são submetidos durante a sua instalação devido às operações de colocação, espalhamento e compactação do material de aterro. Muitas vezes, as tensões devidas às operações de instalação podem ser mais gravosas do que aquelas a que o material está sujeito durante a fase de operação ou às consideradas em dimensionamento (Koerner, 1998).

A abrasão é outro fenómeno que pode conduzir à diminuição de resistência de um geossintético. Este mecanismo de degradação define-se como o desgaste imposto por outros materiais em contacto com os geossintéticos, nomeadamente agregados sujeitos a cargas cíclicas de pequena amplitude (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

2.7. FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos apresentam grande diversidade nas funções que desempenham. Cada tipo de geossintético, dependendo das características que possui, irá desempenhar funções distintas. A norma EN ISO 10318:2005 refere que a drenagem, filtragem, proteção, reforço, separação, controlo de erosão superficial e barreira de fluídos são as sete principais funções que os geossintéticos podem desempenhar (Fig. 2.7a a 2.7g). Em seguida faz-se uma breve descrição de cada uma das funções que os geossintéticos podem desempenhar, de acordo com a norma EN ISO 10318:2005 e com Pinho-Lopes e Lopes (2010)

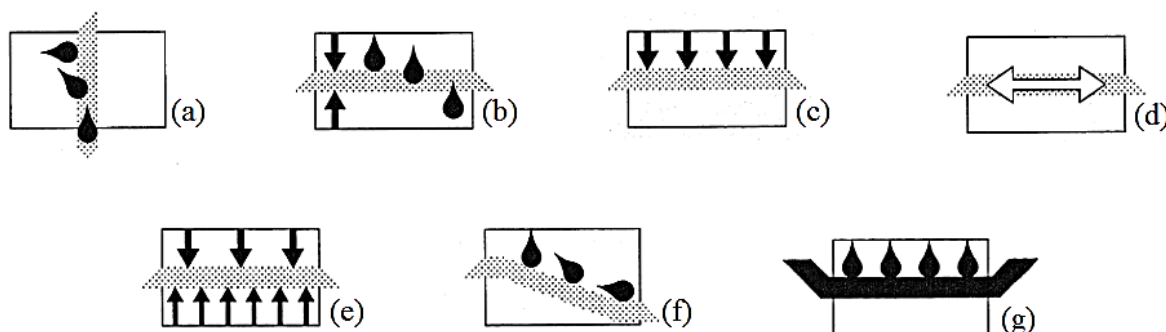


Fig. 2.7 – Funções dos geossintéticos de acordo com a EN ISO 10318: a) drenagem; b) filtragem; c) proteção; d) reforço; e) separação; f) controlo de erosão superficial; g) barreira de fluídos.

Drenagem: consiste na recolha de águas pluviais, águas freáticas e/ou outros fluidos ao longo do plano de um geotêxtil ou de um produto relacionado. Diz-se que os geossintéticos funcionam como drenos quando permitem a passagem de fluídos no plano do geossintético com uma pequena perda de carga. É importante que também evitem a entrada de partículas sólidas sem bloqueio ou colmatagem.

Filtragem: consiste no equilíbrio do sistema solo-geossintético que permite o fluxo livre do fluido, evitando o atravessamento e o arrastamento de partículas sólidas, perpendicularmente ao plano do geossintético. O material deve apresentar aberturas adequadas e flexibilidade necessária ao bom ajustamento à superfície do maciço. Também deve impedir a migração de partículas para os vazios que de outro modo seriam criados para entre o solo e o geossintético. A função de filtro pode ser desempenhada por geossintéticos que pretendam evitar o arrastamento de partículas em suspensão em fluidos percolantes ou, então, no interior de maciços terrosos, permitindo a passagem de água mas impedindo a passagem de partículas sólidas.

Proteção: O geossintético desempenha a função de proteção quando colocado entre dois materiais de forma a absorver e distribuir as tensões e deformações transmitidas ao material a ser protegido. Os geossintéticos com esta função devem apresentar propriedades mecânicas e espessuras adequadas, bem como a continuidade do material deve ser assegurada.

Reforço: esta função é utilizada quando alguns materiais não têm capacidade de resistir a esforços de tração, pelo que se recorre a geossintéticos que possuam esta capacidade. Esta função melhora a capacidade mecânica de solos, permitindo que o solo suporte esforços de corte superiores aos que normalmente suportaria. Quando os geossintéticos desempenham a função de reforço devem apresentar resistência das interfaces solo-reforço adequada pois é através desta que são criadas as interações necessárias entre o solo e o material de reforço.

Separação: consiste na introdução de uma barreira sintética flexível entre dois materiais com granulometrias distintas para que o funcionamento e a integridade dos dois materiais se mantenham intactos ou sejam melhorados. Quando se introduz um material grosseiro num solo fino pode ocorrer entrada do solo fino nos vazios do solo grosseiro, arruinando a capacidade de drenagem deste ao longo do tempo. Outra situação que pode ocorrer é a penetração das partículas do solo mais grosseiro no material subjacente, alterando a sua capacidade resistente. A colocação um geossintético a separar estes dois materiais evita a ocorrência de qualquer uma das duas situações descritas anteriormente.

Controlo de erosão superficial: consiste na colocação de geossintéticos sobre maciços com o objetivo de os proteger de agentes atmosféricos, tráfego, entre outros. Esta função pode ser permanente ou provisória. No caso de ser provisória, consiste na colocação de um geossintético biodegradável que irá se degradar e possibilitar com que a vegetação cresça.

Barreira de fluídos: consiste em evitar a migração de fluidos. Para que tal aconteça, é necessário garantir a continuidade do material e garantir que seja resistente às diferentes ações a que estará sujeito. As zonas de união de geossintéticos devem ser estanques.

2.8. PRINCIPAIS APLICAÇÕES

Os geossintéticos podem ser aplicados em várias obras de engenharia civil, como por exemplo em vias de comunicação, aterros de resíduos, aterros, barragens, etc. A norma EN ISO 10318:2005 refere as principais aplicações dos geossintéticos (Fig. 2.8):

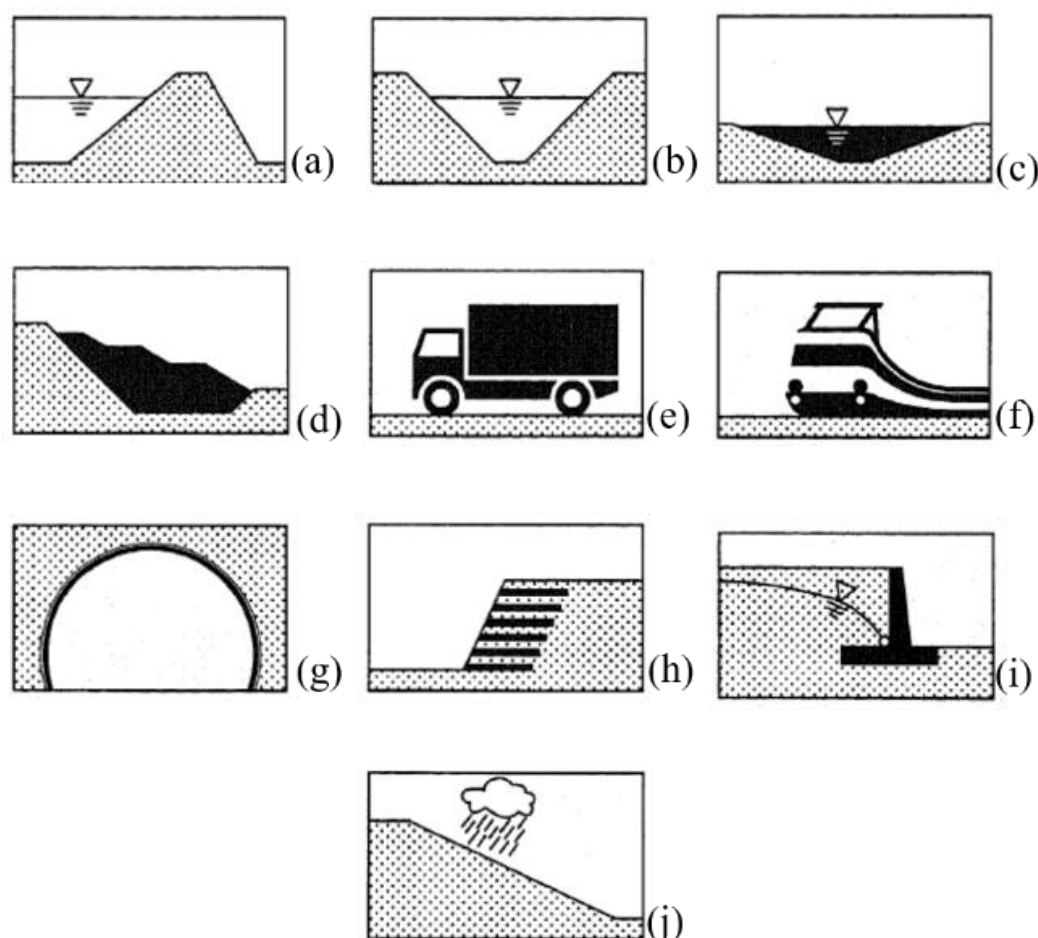


Fig. 2.8 – Principais aplicações dos geossintéticos de acordo com a EN ISO 10318 – a) reservatórios e barragens; b) canais; c) depósitos resíduos líquidos; d) depósitos de resíduos sólidos; e) obras rodoviárias; f) obras ferroviárias; g) tuneis e estruturas subterrâneas; h) fundações; i) drenagem; j) controlo de erosão.

2.9. DURABILIDADE

A durabilidade refere-se à preservação das características dos materiais ao longo do tempo. De acordo com Brown e Greenwood (2002), a durabilidade dos plásticos cobre todos os aspetos referentes a alterações irreversíveis nas propriedades dos materiais durante o seu tempo de vida útil, incluindo todos os agentes ambientais que contribuem para a degradação, bem como todos os aspetos relativos a ações mecânicas.

De acordo com a ISO TR 13434:2008, quando se utilizam geossintéticos em obras de Engenharia Civil, pretende-se que estes materiais desempenhem a sua função ao longo do período de vida da obra. Assim, recorre-se a coeficientes de redução (a utilizar no dimensionamento) para fornecer mais confiança aos engenheiros que fazem o dimensionamento destes materiais. Com o recurso aos coeficientes de redução, pretende-se que os materiais desempenhem corretamente as suas funções (mantendo, para tal, os valores mínimos de propriedades relevantes) durante o tempo de serviço das estruturas em que são incluídos.

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), a avaliação da durabilidade dos geossintéticos 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 coeficientes de redução 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 dos valores das suas propriedades no fim do tempo de vida útil previamente estabelecido. A questão do dimensionamento será abordado no ponto seguinte.

Para avaliar as alterações na macroestrutura dos geossintéticos, recorre-se a ensaios que caracterizem as suas propriedades, como por exemplo os ensaios de espessura, tração, punçoamento estático ou determinação da permeabilidade à água normal ao plano. Segundo Shukla (2002), a durabilidade dos geossintéticos pode ser expressa em termos de redução de resistência. Em aplicações de engenharia onde a resistência mecânica é fundamental para a estabilidade da estrutura, a durabilidade é fundamental.

2.10. COEFICIENTES DE REDUÇÃO

2.10.1. MÉTODO ADOTADO

O período de vida útil de estruturas em engenharia civil é tipicamente entre 50 a 100 anos. Assim, a durabilidade dos geossintéticos é das questões mais importantes sobre estes materiais, pelo que se recorre a coeficientes de segurança para dar mais confiança de que os geossintéticos desempenham as suas funções durante o período de vida útil das estruturas onde são implementados. Os coeficientes de redução são obtidos através da interpolação de informações sobre o comportamento, dos materiais, obtido em testes onde os processos de danificação são acelerados ou através de bases de dados.

A ISO TR 20432:2007 aconselha, para aplicações de reforço, a utilização de quatro fatores de segurança parciais (RF), em que cada um representa a perda de resistência devida a ações diferentes, tais como a ação de danificação mecânica (RF_{DM}), cargas estáticas (RF_F), exposição a agentes atmosféricos (RF_A) e exposição a agentes químicos ou biológicos (RF_{QB}). A resistência a utilizar no dimensionamento (T_D) pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$T_D = \frac{1}{F} \times \frac{T}{RF_{DM} \times RF_F \times RF_A \times RF_Q} \quad (3.1)$$

Em que, F é um fator de segurança a utilizar no dimensionamento e T é a resistência à tração obtida em laboratório.

Os coeficientes de redução a utilizar devem ser adaptados à situação onde vão ser implementados. Nesta dissertação apenas se consideraram a danificação mecânica sob carga repetida e a abrasão (ações de degradação estudadas). Para efeitos de dimensionamento, por exemplo de uma via férrea, o efeito destes agentes de degradação é normalmente determinado isoladamente. Porém neste trabalho, também foi considerada a sua ação conjunta. É necessário referir que os RF calculados nesta dissertação não podem ser usados no dimensionamento, porque foram obtidos para as condições específicas deste caso. Normalmente, tenta-se verificar se as condições de obra são equivalentes às condições de laboratório (Carneiro *et al.*, 2012).

A degradação que ocorre nos geossintéticos é o efeito combinado de vários agentes de degradação. Desta forma, é importante estudar a existência de efeitos sinérgicos entre eles.

2.10.2. ALGUNS ESTUDOS

Hufenus et al (2005) realizou um estudo em que avaliou a resistência à tração de 38 geossintéticos expostos à danificação mecânica com solos diferentes (incluindo o corindo). Nesse estudo, calcularam os coeficientes de redução para a utilização do corindo como solo confinante e chegaram à conclusão que estes seriam conservativos na maior parte dos casos.

Pinho-Lopes e Lopes (2015) fizeram um estudo a três geossintéticos (um geotêxtil, um geocompósito e uma geogrelha), onde pretendiam avaliar a sinergia entre o mecanismo de simulação de danificação mecânica sob carga repetida e simulação da abrasão. Para estes materiais calcularam os diferentes coeficientes de redução (RF) para a resistência à tração, porometria e permeabilidade à água normal ao plano. Concluíram que para o geocompósito e para a geogrelha na análise da resistência à tração a abordagem da metodologia tradicional estava do lado da segurança. Por outro lado, relativamente à permeabilidade à água normal ao plano do geocompósito e do geotêxtil, a abordagem da metodologia tradicional resultou em estimativas que traduziu soluções que não estavam do lado da segurança.

Carneiro, *et al.* (2012) efetuaram um estudo em que se analisaram a resistência à tração de dois geotêxteis quando expostos a mecanismos de degradação mecânica e química (exposição individual). Ao calcular coeficientes de redução, concluíram que obtiveram valores mais elevados para os geotêxteis que foram expostos à danificação mecânica.

Carneiro, *et al.* (2014a), realizaram um estudo em que expuseram um geotêxtil não tecido e um tecido a mecanismos de degradação química e mecânica (exposição isolada e exposição sucessiva). Após avaliar a resistência à tração, calcularam os coeficientes de redução para esta propriedade e concluíram que a metodologia tradicional (exposição isolada) não estava do lado da segurança, na medida em que os coeficientes de redução obtidos para esta metodologia foram inferiores aos obtidos pela metodologia em que os mecanismos de degradação atuaram sucessivamente.

Carneiro, *et al.* (2014b), realizaram uma investigação em que se expôs um geotêxtil não-tecido de polipropileno com mais do que um agente de degradação químico (exposição isolada e exposição sucessiva). Após a avaliação da resistência à tração, calcularam coeficientes de redução e concluíram que na maior parte dos casos, a metodologia tradicional não estava do lado da segurança.

3

MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO MECÂNICA

3.1. INTRODUÇÃO

Os geossintéticos, apesar de serem aplicados desde há muito tempo em obras de engenharia civil, podem nem sempre conseguir desempenhar da melhor forma as funções para quais foram instalados. Esta falha pode ser devido ao facto de poderem ocorrer danos durante a sua instalação em obra ou devido à sua degradação ao longo do tempo. Segundo Koerner (1998), é um facto que este tipo de danos condiciona o comportamento dos geossintéticos durante o seu tempo de vida útil. Muitas vezes, as ações ocorridas durante o processo de instalação em obra são mais significativas do que as solicitações durante o período de serviço.

Este capítulo encontra-se dividido em três partes, a primeira referente à danificação durante a instalação, a segunda referente à degradação devido à abrasão e a última referente ao sinergismo entre os dois mecanismos de degradação.

3.2. DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO

A danificação durante a instalação (DDI) resulta do contacto do geossintético com os materiais que o rodeiam nomeadamente no manuseamento e colocação do geossintético, espalhamento e compactação do material confinante. Muitas vezes estas operações são executadas por trabalhadores com pouca sensibilidade ao cuidado que este tipo de operações exige.

Segundo Ingold (1994), para contornar este problema recorre-se a geossintéticos mais robustos, que irão aguentar mais danos no processo de instalação. Esta escolha deve ser tomada tendo em conta que optar por um geossintético mais robusto acarreta custos mais elevados.

3.2.1. TIPO DE DANOS

O processo de instalação em obra pode causar vários tipos de danos, tais como o aparecimento de fendas e separação do material, punçoamento, abrasão, rotura em tensão, rasgamento e o corte de fibras. É importante destacar que os mecanismos de danificação durante a instalação dependem das condições a que o geossintético é submetido, como por exemplo o material confinante, o equipamento de construção, os procedimentos utilizados e as condições climáticas (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

O aparecimento de fendas é causado pelo contacto direto de partículas angulosas com o geossintético, que através do movimento dos equipamentos de construção podem causar fendas ou a sua separação. De acordo com Watn e Chew (2002), este tipo de danos ocorre mais frequentemente em geogrelhas extrudidas.

O punçoamento devido à danificação durante a instalação acontece quando materiais do aterro com faces cortantes são vertidos diretamente no geossintético ou durante a compactação de camadas finas do aterro com equipamentos pesados. Este tipo de danos é típico de materiais contínuos como os geotêxteis e as geomembranas. De acordo com Watn e Chew (2002), ocorre geralmente em geotêxteis com função de separação ou filtração em revestimentos costeiros ou estruturas viárias.

O corte de fibras sucede quando o material do aterro tem faces cortantes e quando o geossintético está sobre uma camada mais rígida. Conforme Watn e Chew (2002), os materiais mais sensíveis a este tipo de problema são os geotêxteis tecidos, as geogrelhas e as fitas de reforço.

A rotura em tensão surge quando o geossintético é submetido a cargas e deformações excessivas quando o material do aterro é de grandes dimensões ou devido à circulação de equipamentos de construção pesados sobre camadas finas de material do aterro, sobrepostas ao geossintético. Nesta última situação, o geossintético deforma-se juntamente com o solo de fundação, mas quando o geossintético não tem flexibilidade suficiente, ocorre a sua rotura devido à deformação excessiva. Se o geossintético for colocado sobre uma camada com má preparação, ou seja com irregularidades, tais como depressões, saliências, troncos ou cepos, também pode ocorrer a rotura em tensão. Segundo Watn e Chew (2002), quando ocorre a rotura em tensão do geossintético, este deixa de desempenhar a sua função, quer seja de separação, quer seja de reforço.

O rasgamento verifica-se quando existem forças de rasgamento a atuar no geossintético onde exista alguma danificação inicial devido ao corte de fibras ou rotura em tensão. Esta situação acontece porque nessas zonas existe concentração de tensões nos constituintes (fibras, filamentos, membranas, etc.) em redor das zonas danificadas.

Também pode ocorrer abrasão na instalação dos geossintéticos. Este tipo de degradação mecânica vai ser discutido mais detalhadamente à frente neste capítulo.

É importante fazer uma comparação das propriedades dos geossintéticos antes e após o processo de danificação com o objetivo de perceber qual a sua alteração. No processo de instalação em obra é habitual ocorrer mais do que um tipo de danos ao longo de todo o material.

3.2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A DDI

Austin (1998) propôs que se dividisse os fatores que influenciam a DDI em tipo de geossintético, material em contacto com o geossintético e condições de instalação em obra. Christopher e Elias (1998) afirmam que os fatores que mais afetam a danificação durante a instalação são os materiais de aterro mais grosseiros e de partículas angulosas que são colocados em camadas finas e compactadas com equipamentos pesados. Estes autores também referem que a dimensão média das partículas do material do aterro, a massa por unidade de área e a espessura também afetam a DDI.

O Quadro 3.1 é adaptado de Austin (1998) e enumera os fatores que influenciam a DDI de acordo com a divisão feita por este autor.

Quadro 3.1 – Fatores que influenciam a danificação durante a instalação (Austin 1998)

Fatores relacionados com o tipo de geossintético
Tipo de geossintético
Processo de fabrico e forma do produto
Tipo de polímero
Polímetro de reforço/revestimento
Fatores relacionados com o tipo de solo
Dimensão máxima das partículas
Granulometria
Dureza
Angularidade
Fatores relacionados com as condições de instalação
Tamanho e tipo de equipamento
Cuidados na instalação e na operação do equipamento
Variação da espessura da camada de solo não compactada e na diversidade do aterro
Resistência e consistência do conjunto

De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), que cita Allen e Bathurst (1994), após a realização de um estudo com vários tipos de geossintéticos, concluiu-se que a massa por unidade de área (MUA) influencia a resistência mecânica dos geossintéticos, ou seja, os geossintéticos com maior MUA perdem menos resistência. Estes autores também referem que geotêxteis tecidos tendem a apresentar maiores reduções de resistência que os não-tecidos quando submetidos à DDI. Allen e Bathurst (1994) fizeram um estudo onde concluíram que os geossintéticos de PET sofrem maior redução de resistência do que os geossintéticos de PP e PEAD, com igual MUA e quando sujeitos às mesmas condições de danificação. Isto pode ser explicado pelo facto destes materiais apresentarem menor capacidade de extensão devido ao menor diâmetro das fibras/filamentos de PET em relação aos de PP e PEAD.

Pinho-Lopes e Lopes (2010) cita também Christopher e Elias (1998) que concluíram que: (1) os geotêxteis tecidos constituídos por tiras são mais sensíveis à DDI, (2) o efeito da DDI diminui quando se aumenta a MUA dos geossintéticos, (3) para que os geossintéticos sobrevivam à DDI devem apresentar uma MUA de, pelo menos, 270 g.m⁻².

Para a influência do tipo de solo no grau de danificação durante a instalação, Pinho-Lopes e Lopes (2010) referem três fatores: a distribuição granulométrica do material do aterro, a superfície das partículas de solo (maior ou menor angularidade) e a dureza das partículas de solo.

Relativamente ao tipo de solo, Christopher e Elias (1998) referem que para geogrelhas extrudidas de PEAD a danificação e a redução de resistência à tração aumentam de forma logarítmica com a dimensão máxima da partícula dos materiais de aterro e que para granulometrias mais extensas o grau de danificação é mais baixo, o que se deve ao facto de as partículas finas fazerem efeito colchão. Quanto à angulosidade das partículas, quanto maior for este fator, maior o grau de danificação.

A influência das condições de instalação depende de fatores como o tipo e peso do equipamento usado para espalhar o solo e para a sua compactação, espessura inicial da camada de solo e altura de queda do material granular. Quanto maior a queda do material do aterro, maior o seu impacto no contacto com o geossintético e quanto mais pesado o equipamento utilizado durante a construção do aterro, mais gravesos serão os efeitos da DDI (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

3.2.3. FORMAS DE MINIMIZAR OS EFEITOS DA DDI

Para que os geossintéticos apresentem um bom desempenho é necessário seguir alguns procedimentos durante a fase construtiva. Embora cada obra tenha as suas especificidades, existem certos cuidados que podem ser aplicados a todo o tipo de obras de forma a minimizar os efeitos dos danos provocados durante a instalação em obra.

Primeiro deve-se certificar que a superfície onde vão ser instalados os geossintéticos é lisa, sem obstáculos ou irregularidades (lixo, raízes ou materiais pontiagudos, etc.). Para tal, é necessário fazer a preparação da superfície tal como se pode ver na Fig. 3.1a. De seguida, deve-se desenrolar o geossintético (normalmente chega à obra em forma de rolo) sem ser pisado pelos trabalhadores (Fig. 3.1b). É de salientar que as zonas de união dos troços de geossintético devem ser sobrepostas de acordo com o que se encontra no caderno de encargos (Fig. 3.1c). Depois de colocado o geossintético, pode-se colocar o material confinante garantindo que não passa tráfego de construção antes da colocação de uma camada de 150 mm de material confinante (Fig. 3.1d). Por fim, pode-se espalhar o material como mostra a Fig. 3.1e e iniciar a compactação (Fig. 3.1f), que deve ser realizada de forma adequada às características do material. (Pinho-Lopes e Lopes, 2010).

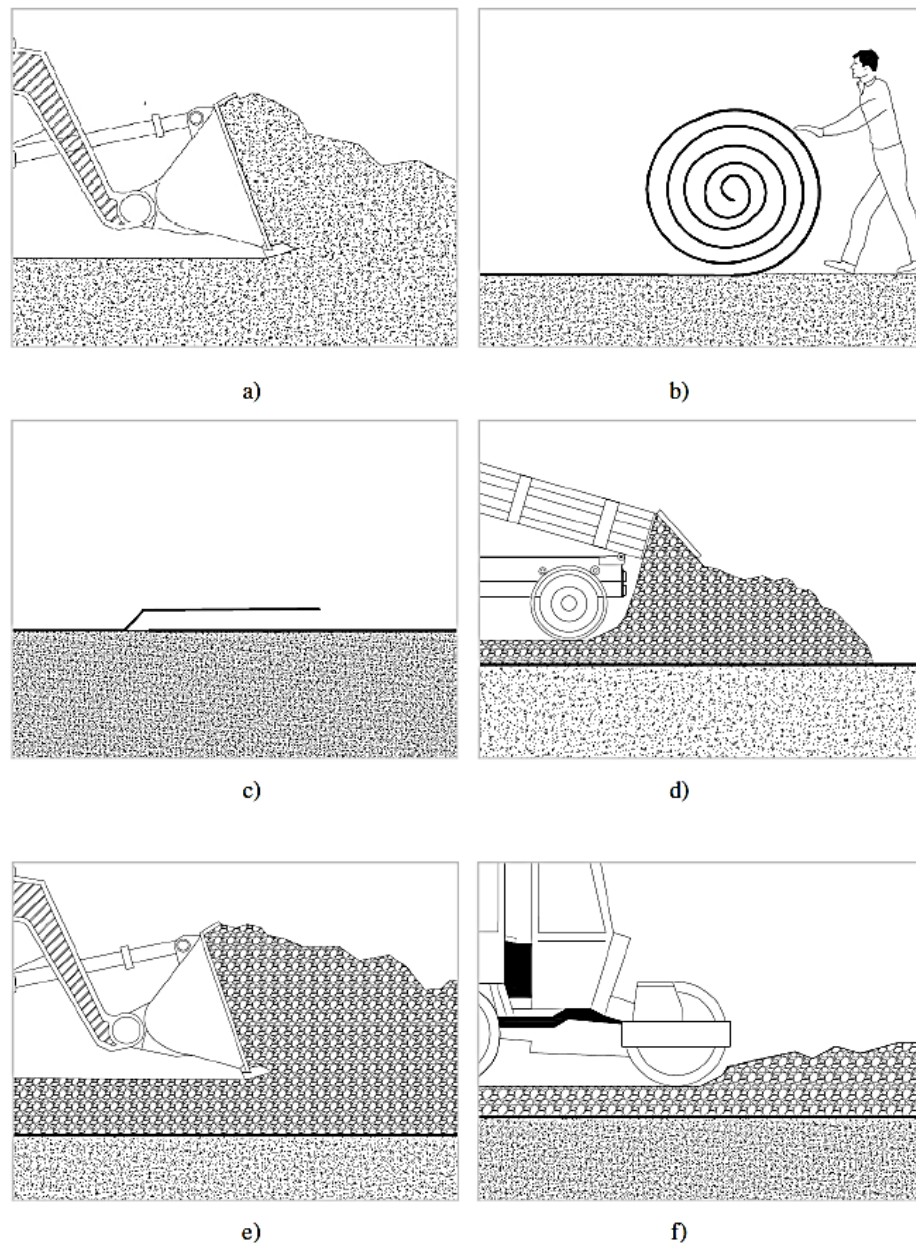


Fig. 3.1 – Medidas a considerar na instalação de geossintéticos: a) Preparação da superfície; b) desenrolar do geossintético; c) zona de união dos troços de geossintéticos; d) colocação do material confinante; e) espalhar o material confinante; f) compactação do material confinante (Carvalho 2014).

Segundo Shukla (2002), uma forma dos geossintéticos manterem uma posição correta antes da introdução do material confinante no aterro é ancorar o geossintético ao solo pelas pontas sem exercer demasiada força. Outra solução seria aplicar uma pré-tensão ao geossintético que além de facilitar a instalação do geossintético, ainda poderá ser uma mais-valia no desempenho do geossintético ao longo da sua vida-útil.

3.2.4. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DA DDI – EM ATERRO EXPERIMENTAL

Para se fazer uma correta avaliação dos danos que a DDI causa nos geossintéticos, deveria recorrer-se a ensaios de campo. Esta abordagem não é muito utilizada devido aos seus elevados custos, mas

também devido ao facto de apenas permitir a quantificação dos efeitos da DDI em fase de obra. Na verdade, a realização deste tipo de ensaios não tem procedimentos normalizados, pelo que usualmente se recorre à construção de aterros experimentais que devem ser executados de modo a minimizar os efeitos da DDI e sem causar danos adicionais.

Vários autores tentaram criar procedimentos para a realização de ensaios de campo tais como Watts e Brady (1990) que tentaram recriar condições reais de compactação e, também, a possibilidade de serem repetidas. Estes autores referem que primeiro é preciso definir um grau de compactação do material de aterro, mas que para avaliar os efeitos da compactação excessiva podem ser realizados ensaios onde o material seja compactado até à “nega”

Austin (1998) apresentou uma metodologia para este tipo de ensaios que se encontra detalhada na BS 8006. A construção destes aterros experimentais é dispendiosa pois necessita de três níveis de compactação, tais como:

- Compactação normal: o número de passagens é especificado na SHW (*Specification for Highways Work*) para a espessura da camada compactada a usar;
- Sobrecompactação: em que o número de passagens é o dobro do referente à compactação normal;
- Compactação de duas camadas: execução da primeira camada com compactação normal, sobre o reforço e sobre este conjunto é colocada outra camada compactada.

A Fig. 3.2 traduz a metodologia apresentada por Austin (1998).

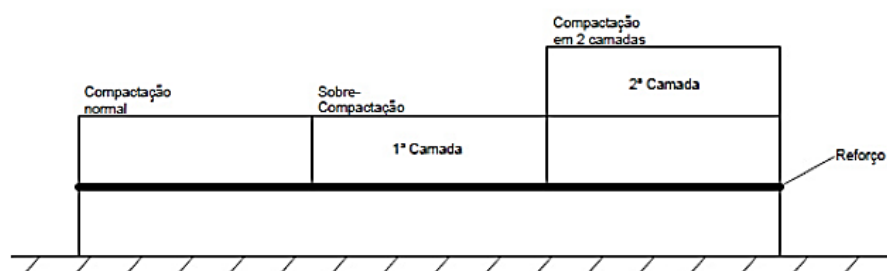


Fig. 3.2 – Seção de aterros experimentais de acordo com Austin (1998).

Neste tipo de análise, a seleção das amostras de onde são retirados os provetes e a definição da dimensão dos provetes a ensaiar é um dos aspetos fundamentais. De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), é comum escolher as amostras com base na danificação visual aparente. No entanto, as áreas mais afetadas mecanicamente podem não ser as que aparentam estar mais degradadas visualmente.

3.2.5. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DA DDI – EM LABORATÓRIO

Como a realização de ensaios de campo em aterros experimentais é muito dispendiosa, recorre-se a ensaios de laboratório que permitam simular os danos que ocorrem durante a instalação dos geossintéticos.

Bräu (1998) afirma que os ensaios de laboratório devem ser calibrados de acordo com os resultados dos ensaios de campo. Este autor também afirma que os ensaios de laboratório devem ter em conta as diferentes condições de instalação possíveis e as exigências correspondentes às diferentes aplicações de geossintéticos. Assim, conclui-se que os ensaios laboratoriais devem:

- Simular a passagem dos equipamentos de construção, sobre o solo abaixo do geossintético;

- Permitir as deformações relativas entre o solo e o geossintético;
- Permitir a existência de cargas pontuais elevadas com baixas frequências, sempre que seja relevante;
- Incluir cargas concentradas elevadas com frequências baixas e com elevadas deformações (geossintético instalado em solo mole);
- Incluir cargas com frequências elevadas e deformações relativas reduzidas (caso de geossintéticos instalados sobre camadas rígidas).

De acordo com Pinho-Lopes e Lopes (2010), existem metodologias para simular a DDI em obras em que o geossintético será implementado em linhas de água. Nestas simulam-se a queda de blocos de material rochoso sobre o geossintético (Fig. 3.3). Este ensaio foi desenvolvido pelo *Federal Waterways Engineering and Research Institute* (BAW). Também existe outra metodologia onde se simula a queda do material de aterro designado por queda de pirâmide (*pyramid drop test*). Este ensaio é muito semelhante ao ensaio de punção dinâmico, onde as únicas diferenças são que o geossintético situa-se entre duas camadas de material de aterro e que a forma do objeto que cai sobre este é também diferente (Fig. 3.4).

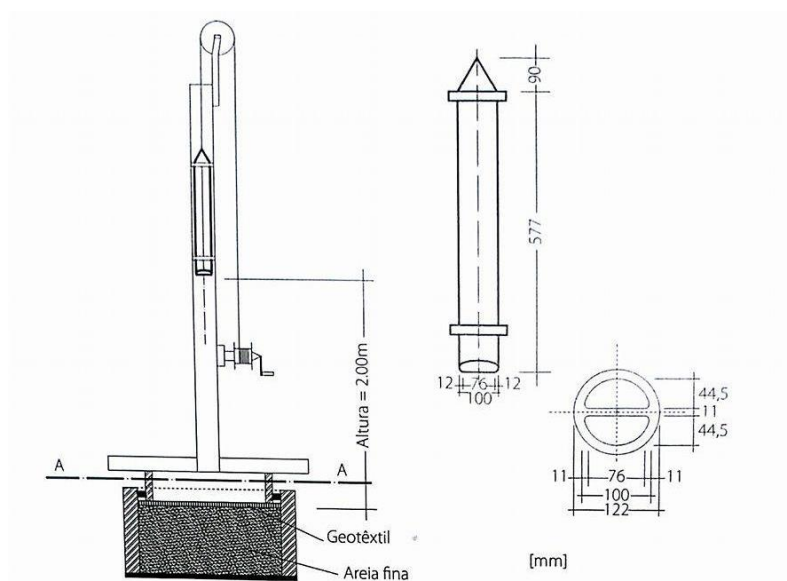


Fig. 3.3 – Equipamento do ensaio de simulação de queda de blocos e de material rochoso. (retirado de Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

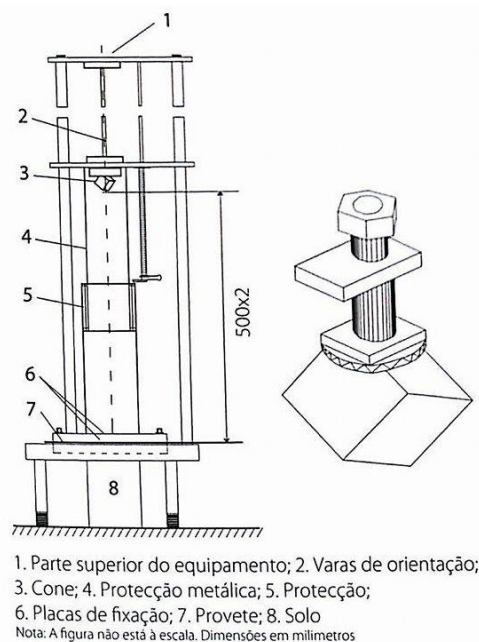


Fig. 3.4 – Equipamento do ensaio de queda de pirâmide (retirado de Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

No presente trabalho, os ensaios de danificação mecânica foram realizados de acordo com a norma EN ISO 10722:2007, utilizando um equipamento do Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para esse efeito. No capítulo 4 encontra-se uma descrição detalhada do equipamento e procedimento utilizados.

3.2.6. Alguns estudos

Paula (2003) realizou ensaios de danificação durante a instalação em laboratório com solos diferentes a diferentes geossintéticos. Demonstrou que o tipo de solo utilizado influencia o grau de danificação provocado nos geossintéticos.

Estácio (2005) realizou um estudo onde analisou o efeito da abrasão (isolada), a danificação durante a instalação (isolada), a abrasão e a danificação durante a instalação (exposição sucessiva). Concluiu que o efeito da simulação da danificação durante a instalação foi bastante severa, provocando cortes e perfurações nos geotêxteis, e que a sua ação é tanto mais gravosa quanto menor for a MUA destes materiais.

Moreira (2009) analisou a influência que a danificação durante a instalação tem nas propriedades hidráulicas de geotêxteis com processos de fabrico diferentes, nomeadamente na permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil. Realizou os ensaios de danificação durante a instalação com solos diferentes (corindo, brita granítica e brita calcária). Concluiu que a MUA, o tipo de solo utilizado e o processo de fabrico têm influência nos resultados.

Pinho-Lopes e Lopes (2013) realizaram um estudo onde testaram a resistência à tração de seis geossintéticos com processos de fabrico diferentes. Neste estudo, expuseram os geossintéticos à danificação mecânica (em laboratório e em campo). Estes autores concluíram que o tipo de solo e o processo de fabrico influenciam o grau de danificação.

Mais recentemente, Carvalho (2014) desenvolveu um estudo sobre a durabilidade de um geocompósito quando exposto a diferentes tipos de degradação mecânica (danificação mecânica sob

carga repetida e abrasão). Este autor concluiu que quando os dois mecanismos de degradação atuaram isoladamente, a ação da DM foi mais agressiva na medida em que provocou maiores perdas de propriedades no geocompósito.

Pinho-Lopes e Lopes (2015) elaboraram um estudo a três geossintéticos (um geotêxtil, um geocompósito e uma geogrelha), onde pretendiam avaliar a sinergia entre o mecanismo a danificação mecânica sob carga repetida e a abrasão. Analisaram a MUA, a espessura, a permeabilidade à água normal ao plano, porometria e resistência à tração como já foi referido na secção 2.10.2. Estes autores concluíram que o processo de fabrico dos geossintéticos influencia a forma de como estes são afetados pela degradação. Quando os dois mecanismos de danificação atuaram de forma isolada, a DM foi o mecanismo de degradação que mais afetou o valor de VI_{H50} (velocidade de escoamento para a perda de carga de 50 mm) tanto do geotêxtil como do geocompósito.

3.3. ABRASÃO

3.3.1. ABRASÃO

A abrasão é provocada pelo contacto entre o geossintético com um material abrasivo ou com um solo, desde que existam cargas cíclicas que impliquem movimento relativo entre os dois materiais. Segundo Brown e Greenwood (2002), a abrasão pode ser definida como a perda de material de uma superfície devido a forças friccionais e é resultado do contacto entre duas superfícies. Desta forma, a abrasão pode ser definida como a resistência ao desgaste provocado por ações mecânicas na superfície do material. Os autores também afirmam que o desgaste abrasivo é provocado pelas asperezas que cortam o plástico.

Segundo Crawford (1998), o desgaste dos plásticos é muito complexo e depende da natureza da aplicação e das propriedades do material. No caso dos geotêxteis colocados em vias férreas a avaliação dos danos provocados pela abrasão é de extrema importância, visto ser esta a ação predominante durante a vida útil destes materiais. Este tipo de danificação pode ocorrer, por exemplo em geossintéticos utilizados 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, aplicações em linhas férreas e estradas provisórias.

Watn e Chew (2002) referem que a abrasão pode ocorrer em qualquer geossintético, embora os mais sensíveis a este mecanismos são os geotêxteis não-tecidos agulhados devido ao facto da sua superfície sofrer abrasão mais facilmente. A abrasão devida ao contacto entre o geossintético e as partículas do material de aterro de pequenas dimensões pode ser significativa, se as partículas apesar da sua pequena dimensão forem angulosas.

A perda de espessura dos geossintéticos devido a este mecanismo de degradação, pode traduzir-se na diminuição da sua resistência. Fazer uma análise da abrasão a que os geotêxteis estão sujeitos é particularmente importante para os que desempenham a função de filtro, onde grande parte do material pode ser destruído devido a este mecanismo de degradação.

3.3.2. DANOS PROVOCADOS

Como já foi referido anteriormente, a danificação devido ao processo de abrasão provoca a perda de espessura e a diminuição da resistência dos geossintéticos. O Quadro 3.2 mostra outros danos provocados por este mecanismo de degradação, além dos já referidos, de acordo com Van Dine *et al.* (1982).

Quadro 3.2 – Principais danos causados devido ao processo de abrasão (Van Dine *et al.*, 1982)

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

Raymond (1982) analisou um grande número de geossintéticos colocados em ferrovias no Canadá e nos Estados Unidos da América. O estudo revelou que os geossintéticos colocados a profundidades maiores são menos danificados pela abrasão, porque estão sujeitos a menos tensões. Hausmann e Ring (1990) realizaram estudos com geotêxteis colocados a diferentes distâncias da camada de balastros. Ao estudar as amostras que tinham sido submetidas à passagem de toneladas de tráfego, puderam estudar o efeito da abrasão na resistência à tração dos geotêxteis. Concluíram que a perda de resistência está diretamente relacionada com a MUA dos geotêxteis e com o volume do tráfego circulante. Após a exumação das amostras, apesar de se ter encontrado finos, a sua função de separação permaneceu satisfatória (Estácio 2005).

3.3.3. MÉTODOS DE SIMULAÇÃO – EM LABORATÓRIO

Um dos primeiros equipamentos utilizados na simulação da abrasão em laboratório foi o “*rotary platform*” (ASTM D1175:1980). Este equipamento foi desenvolvido pela indústria têxtil e só posteriormente é que foi adaptado à simulação do processo de abrasão. Este ensaio consiste na rotação de duas rodas abrasivas com um peso de 1 kg à velocidade de 70 r.p.m.¹ sobre um geotêxtil, onde em seguida se comparava o valor da sua resistência à tração com o valor de referência (não danificado) (Fig. 3.5).

No presente trabalho, os ensaios de danificação mecânica foram realizados de acordo com a norma EN ISO 13427:2006, utilizando um equipamento do LGS da FEUP para esse efeito. No capítulo 4 encontra-se uma descrição detalhada do equipamento e procedimento utilizados.

¹ r.p.m. – rotações por minuto.

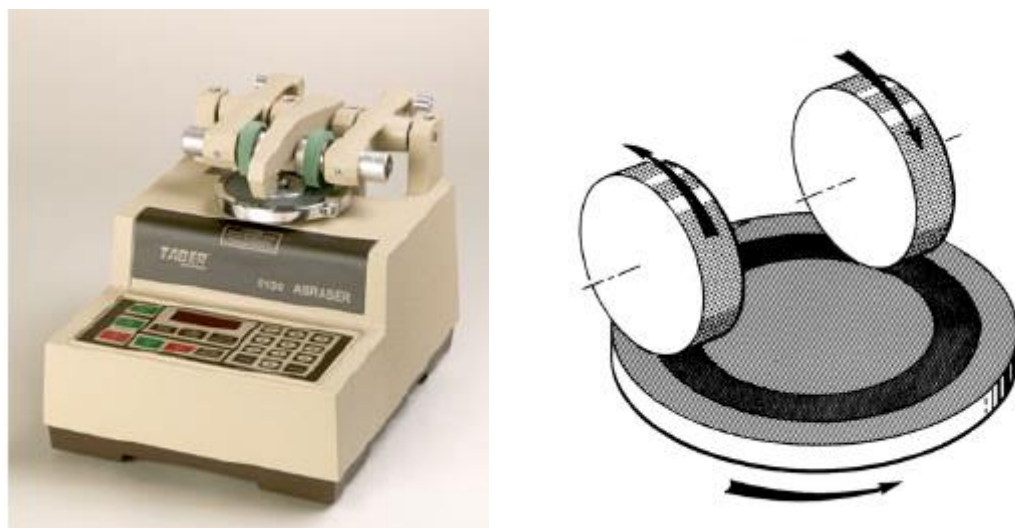


Fig. 3.5 – Equipamento de simulação do processo de abrasão com rodas abrasivas a) Aspecto do equipamento; b) Rodas abrasivas (Estácio 2005).

3.3.4. ALGUNS ESTUDOS

Na investigação desenvolvida por Estácio (2005), referida no ponto 3.2.6, concluiu-se que o efeito da abrasão, isolada, manifestou-se essencialmente nas propriedades hidráulicas dos geotêxteis, o pode ser resultado de uma reorganização dos filamentos que constituem os materiais estudados.

Também em 2007, Huang *et al.* e Tzeng *et al.* desenvolveram estudos sobre o fenómeno de abrasão e sobre as suas aplicações.

No estudo realizado por Carvalho (2014), referido no ponto 3.2.6, em que se realizaram ensaios de degradação mecânica a um geocompósito em que um dos lados continha filamentos e o outro continha um geotêxtil não-tecido, este autor concluiu que a ação da abrasão foi visualmente mais danosa no lado do geocompósito com filamentos.

No estudo feito por Pinho-Lopes e Lopes (2015), referido no ponto 3.2.6, estes autores concluíram que os materiais mais afetados pelo efeito da abrasão foram a geogrelha e o geocompósito na análise da resistência à tração. Também concluíram que a abrasão foi mecanismo que mais degradou os geossintéticos visualmente.

3.4. SINERGIA ENTRE AGENTES DE DEGRADAÇÃO

3.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os agentes de degradação que afetam a durabilidade dos geossintéticos podem atuar isoladamente, ou podem atuar em simultâneo. O efeito da ação simultânea de vários agentes de degradação pode ser muito diferente do efeito dos mesmos mecanismos a atuar isoladamente.

É importante fazer uma avaliação do comportamento destes materiais quando sujeitos a vários agentes de degradação. Normalmente, recorre-se a ensaios laboratoriais que aceleraram o processo de degradação dos geossintéticos para assim se efetuar a análise do comportamento destes materiais.

3.4.2. ALGUNS ESTUDOS

Estácio (2005), no estudo referido anteriormente nos pontos 3.2.6 e 3.3.1, concluiu que o efeito da simulação da danificação durante a instalação (isolada) foi o mecanismo de degradação que mais afetou a durabilidade dos materiais, em especial no geotêxtil com menor MUA. A exposição sucessiva, num dos materiais, apenas afetou as propriedades hidráulicas. No outro material, os danos não foram diferentes do que se passou quando a exposição foi isolada. Assim, conclui-se que os efeitos dos danos causados aos materiais dependem das propriedades e características de cada material e não só dos mecanismos de degradação utilizados.

Mais recentemente, Carvalho (2014) realizou um estudo onde expôs um geocompósito à danificação mecânica sob carga repetida e à abrasão. Concluiu que quando os mecanismos atuaram sucessivamente, o seu efeito foi muito mais intenso do que quando os mecanismos de degradação atuaram isoladamente.

No estudo realizado por Pinho-Lopes e Lopes (2015), referido na secção 3.2.6, estes autores concluíram que quando a danificação mecânica sob carga repetida e a abrasão atuaram sucessivamente, os danos causados nas propriedades dos materiais estudados foram superiores aos danos da exposição isolada.

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os ensaios de degradação realizados em condições reais permitem fazer melhores estudos. No entanto, devido à falta de meios e também ao tempo necessário para a sua realização, muitas vezes não são exequíveis. Por essa razão, utilizam-se ensaios de laboratório com o objetivo de obter uma estimativa do comportamento dos materiais ao longo da sua vida.

Um dos objetivos deste trabalho foi compreender o comportamento de diferentes geossintéticos sujeitos a mecanismos de danificação mecânica, tais como a abrasão e/ou danificação sob a ação de carga repetida. Este capítulo apresenta os materiais escolhidos para a realização dos ensaios, bem como a descrição do programa experimental. O Quadro 4.1 resume o número de ensaios realizados durante esta investigação.

Quadro 4.1 – Plano de trabalho.

Geossintético	Tipo	Tração-extensão	Punçoamento estático	Permeabilidade à água normal ao plano
G200	Intactos	5	5	5
	DM	5	5	5
	Abrasão	5	5	5
	DM + Abrasão	5	5	5
G400	Intactos	5	5	5
	DM	5	5	5
	Abrasão	5	5	5
	DM + Abrasão	5	5	5
GT200	Intactos	5	5	-
	DM	5	5	-
	Abrasão	5	5	-
	DM + Abrasão	5	5	-
GG300	Intactos	5	-	-
	DM	5	-	-
	Abrasão	5	-	-
	DM + Abrasão	5	-	-

4.2. GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos usados na realização deste trabalho laboratorial foram dois geotêxteis não-tecidos, um geotêxtil tecido de elevada permeabilidade e uma geogrelha. A cada material foi atribuída uma designação de acordo com o tipo de material e a sua massa por unidade de área.

Como se pode observar na Fig. 4.1a e Fig. 4.1b, os geotêxteis não-tecidos apresentam cor e textura idênticas, são ambos constituídos por fibras de polipropileno e possuem diferentes massas por unidade de área (207 e 399 g.m⁻²). Assim sendo, as suas designações ao longo de todo o trabalho serão G200 (geotêxtil com MUA 207 g.m⁻²) e G400 (geotêxtil com MUA 399 g.m⁻²).

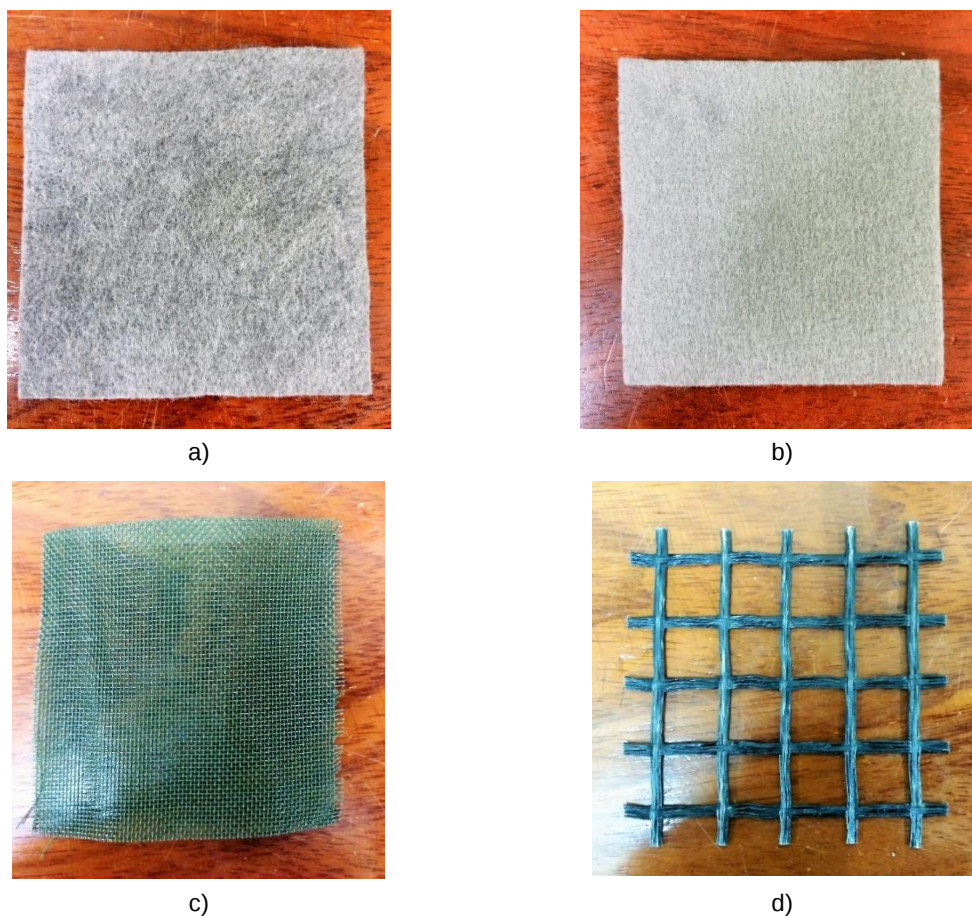


Fig. 4.1 – Materiais utilizados: a) geotêxtil G200; b) Geotêxtil G400; c) geotêxtil GT200; d) geogrelha GG300.

O geotêxtil tecido de elevada permeabilidade apresenta uma coloração verde e é composto por filamentos de polietileno de alta densidade. A sua massa por unidade de área é 204 g.m⁻², pelo que a sua designação ao longo do trabalho será GT200.

A geogrelha, por sua vez, é constituída por filamentos de poliéster com revestimento de coloração preta e possui uma massa por unidade de área de 292 g/m², pelo que lhe será atribuída a designação de GG300. A geogrelha possui uma malha quadrada, contendo, no mínimo, 46 barras por metro em cada uma das direções.

No Quadro 4.2 estão representadas as principais características dos geossintéticos utilizados no trabalho.

Quadro 4.2 - Principais características dos geossintéticos

Designação	Tipo	Cor	Polímero	MUA (g.m ⁻²)	Espessura (mm)
G200	Geotêxtil não-tecido	Cinzentos	Polipropileno	207 (15)	1,65 (0,37)
G400	Geotêxtil não-tecido	Cinzentos	Polipropileno	399 (23)	2,93 (0,18)
GT200	Geotêxtil tecido	Verde	PEAD	204 (2)	0,85 (0,02)
GG300	Geogrelha	Preto	Poliéster	292 (15)	1,69 (0,05)

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

4.3. ENSAIOS DE DANIFICAÇÃO

4.3.1. ENSAIO DE DANIFICAÇÃO MECÂNICA SOB CARGA REPETIDA

A metodologia utilizada na realização deste ensaio encontra-se descrita na EN ISO 10722:2007. O princípio do ensaio consiste em colocar um provete de geossintético entre duas camadas de um agregado sintético, sujeito a uma carga dinâmica durante um determinado período de tempo.

A Fig. 4.2 ilustra os principais constituintes do equipamento de danificação mecânica sob carga repetida. De seguida, serão enumerados alguns desses componentes:

- Caixa de danificação – Caixa de metal contendo o agregado bem como o geossintético, com (300 x 300) mm, dividida em duas partes, cada uma com 75 mm de profundidade. As duas partes da caixa perfazem uma altura de 150 mm.
- Mecanismo para aplicação da carga – é controlado de forma a produzir uma pressão entre (5 ± 0,5) kPa e (500 ± 10) kPa na placa de carregamento, com uma frequência de 1 Hz.
- Placa de carregamento – placa com (100 x 200) mm de dimensão, é feita de aço inoxidável e tem uma rigidez adequada para transmitir a carga ao agregado sem sofrer danificação.
- Agregado sintético – no caso do nosso ensaio foi usado corindo branco que é um material de dureza 9 na escala de Mohs. O corindo é um mineral constituído por óxido de alumínio, isento de ferro, e é normalmente utilizado como um abrasivo reciclável devido à sua forma angular e, também, devido à sua durabilidade (Fig. 4.3g)

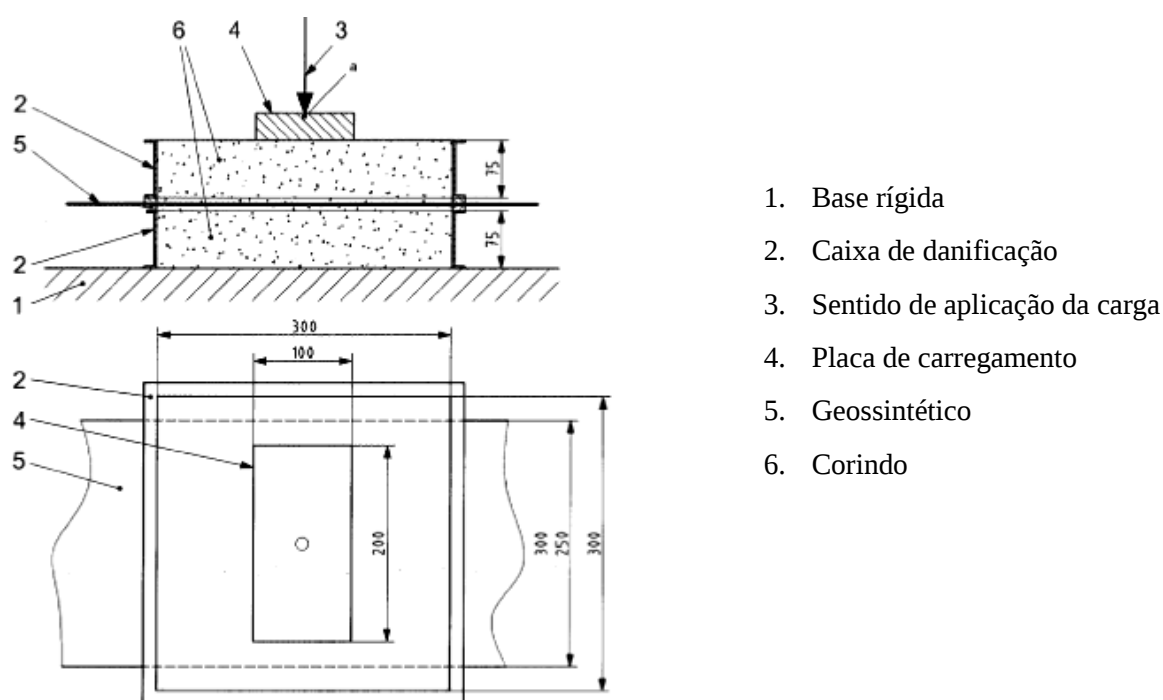


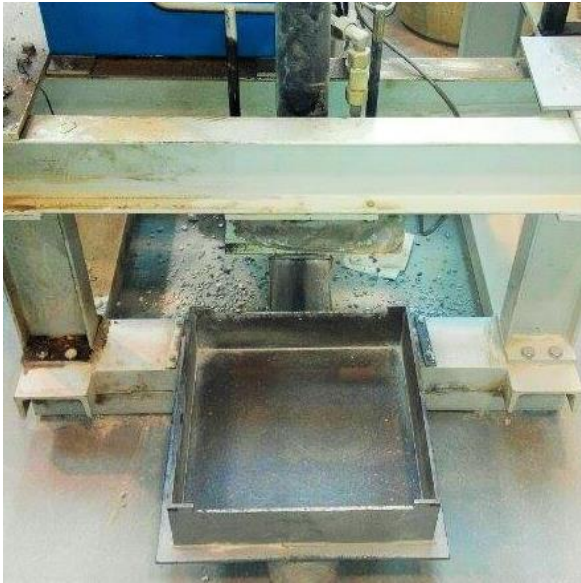
Fig. 4.2 – Principais constituintes do equipamento de danificação (retirado de EN ISO 10722, 2007).

Para a realização deste ensaio, primeiro, encheu-se metade da caixa inferior com o agregado e compactou-se com a ajuda da tampa de compactação (Fig. 4.3f) durante 60 segundos com uma tensão de (200 ± 2) kPa. De seguida, encheu-se o restante espaço na caixa até ao topo e compactou-se, novamente, durante 60 segundos com a mesma tensão do passo anterior.

Posteriormente, colocou-se o provete centrado no topo da caixa inferior (Fig. 4.3d), colocou-se a caixa superior e encheu-se com agregado até ao limite máximo, como se pode ver na Fig. 4.3e. Durante o ensaio, a placa de carregamento exerceu uma carga dinâmica entre $(5 \pm 0,5)$ kPa e (500 ± 10) kPa com uma frequência de 1 Hz durante 200 ciclos.

Para finalizar, retirou-se o provete de modo a não lhe causar danos adicionais e procedeu-se à sua análise visual e aos respetivos ensaios de caracterização.

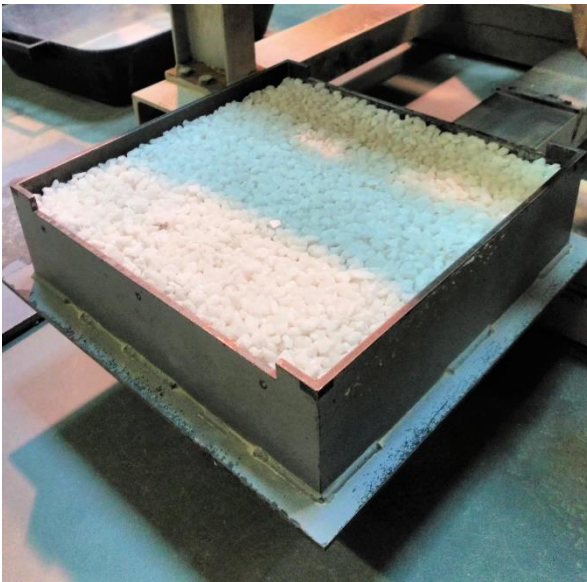
O número máximo de utilizações do corindo foi de 20, tendo sido peneirado entre cada 3 utilizações de modo a manter a sua granulometria (5-10 mm).



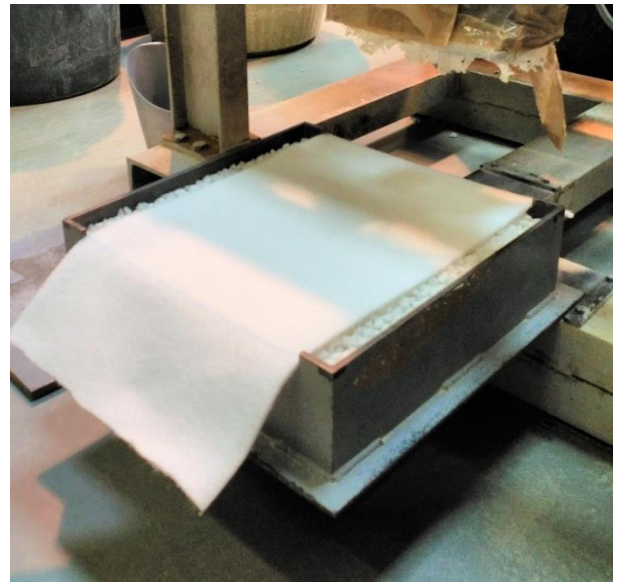
a)



b)



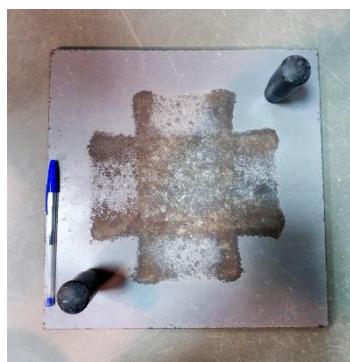
c)



d)



e)



f)



g)

Fig. 4.3 – Equipamento utilizado no ensaio de danificação mecânica sob carga repetida: a) caixa antes da introdução do corindo; b) caixa inferior meia cheia; c) caixa inferior totalmente cheia; d) caixa com o provete colocado; e) equipamento durante o ensaio; f) tampa de compactação; g) corindo branco.

4.3.2. ENSAIO DE ABRASÃO

O ensaio de abrasão foi realizado com base na norma NP EN ISO 13427:2006. É um ensaio que pode ser aplicado a geotêxteis tecidos, geotêxteis não-tecidos e a produtos relacionados.

O princípio do ensaio consiste em montar um provete numa placa fixa e friccioná-lo com um abrasivo com características específicas. O esquema do equipamento e as suas principais características encontram-se na Fig. 4.4.

Em termos gerais, o equipamento é composto por duas plataformas, uma inferior e outra superior. A plataforma superior contém um esticador (Fig. 4.5c) apenas num dos lados que permite esticar os provetes, de modo a não ficarem com folga. Por sua vez, a plataforma inferior desempenha um movimento de vaivém de (25 ± 1) mm em torno de um eixo horizontal, sob condições controladas de pressão. A plataforma superior é mantida imóvel durante o ensaio, estando sujeita a uma pressão de 6 kPa. O equipamento funciona com uma frequência de 90 ciclos por minuto durante 750 ciclos (número total de ciclos do ensaio). O abrasivo usado no ensaio possui uma superfície P100 e tem dimensões de (220 x 385) mm.

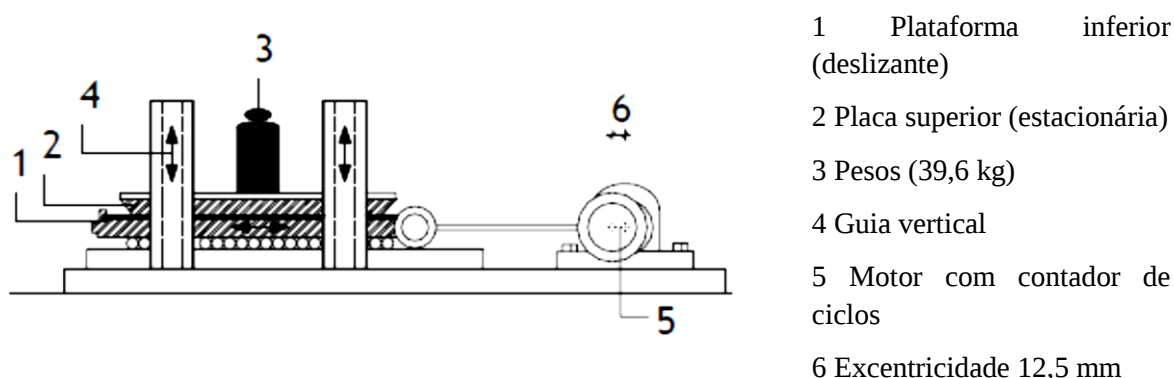


Fig. 4.4 – Identificação dos constituintes do equipamento de abrasão (EN 13427, 2006).

Primeiro, colocou-se o provete na plataforma superior, começando pela zona que não tinha esticador. Para os geotêxteis não-tecidos, foi colocado um abrasivo entre os provetes e a plataforma superior. A aderência dos provetes a esse abrasivo era maior do que à do abrasivo utilizado na placa inferior. A introdução de um abrasivo na plataforma superior foi necessário para impedir a deformação dos provetes nas extremidades e não provoca abrasão. A deformação que ocorre nos provetes (na ausência do abrasivo) impossibilita o bom funcionamento do ensaio, dado a inexistência de movimento relativo entre a plataforma inferior (abrasivo) e os provetes (Fig. 4.5a). Para o geotêxtil tecido e para a geogrelha tal não foi necessário devido ao facto destes materiais serem menos deformáveis.

Posto isto, e como mostra a Fig. 4.5b fixou-se o abrasivo na plataforma inferior. Logo de seguida, colocou-se a plataforma superior em cima da inferior e colocaram-se os pesos (que aplicam a pressão de 6 kPa) em cima das duas plataformas.

Por fim, iniciou-se o ensaio (Fig. 4.5d) e esperou-se pela conclusão de todos os ciclos. No final do ensaio, o provete foi removido cuidadosamente de modo a não sofrer danos adicionais. Repetiu-se o procedimento para todos os provetes, colocando um abrasivo novo no início de cada ensaio.



a)



b)



c)



d)

Fig. 4.5 – Equipamento utilizado no ensaio de abrasão: a) Plataforma superior com o provete colocado; b) plataforma inferior com o abrasivo colocado; c) esticador; d) aspeto geral do equipamento utilizado.

4.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para avaliar os danos sofridos pelos geossintéticos realizaram-se ensaios de caracterização, tais como os ensaios de espessura, tração, punçoamento estático e permeabilidade à água normal ao plano. O Quadro 4.3 resume todas as normas segundo as quais os ensaios foram realizados.

Quadro 4.3 – Resumo das normas utilizadas

Ensaio	Norma
Massa por unidade de Área	NP EN ISO 9864:2006
Espessura	NP EN ISO 9863-1:2006
Tração	NP EN ISO 10319:2005
Punçoamento estático	NP EN ISO 12236:2008
Permeabilidade à água normal ao plano	NP EN ISO 11058:2003

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos para as amostras intactas do geotêxtil G200, de modo a exemplificar o tratamento de dados realizado em cada um dos ensaios de caracterização.

4.4.1. MASSA POR UNIDADE DE ÁREA

O ensaio de massa por unidade de área foi realizado de acordo com a norma NP EN ISO 9864:2006 (Fig. 4.6). Foram cortados 10 provetes quadrados com cerca de 100 cm² e determinaram-se as respectivas massas. As dimensões dos provetes foram medidas com uma craveira (precisão de 0,05 mm) e a massa foi determinada numa balança com precisão de 0,001g.

A MUA foi obtida através da equação:

$$MUA = \frac{m \cdot 10000}{A} \quad (4.1)$$

Onde, m é a massa do provete em gramas e A é a área do provete em cm².

O ensaio de massa por unidade de área foi apenas usado para caracterizar os geossintéticos antes dos ensaios de degradação.



Fig.4.6 – Equipamento utilizado na determinação da MUA.

4.4.2. ENSAIO DE ESPESSURA

Este ensaio foi realizado com recurso ao método especificado na norma NP EN ISO 9863:2006. No presente trabalho foi apenas determinada a espessura nominal (espessura obtida pela aplicação de uma pressão de 2 kPa).

A espessura é definida pela distância entre o prato de referência (onde se coloca o provete) e a face de contato de um calcador circular que exerce uma determinada pressão (Fig. 4.7).

No quadro 4.4 apresentam-se os resultados obtidos para o geotêxtil G200.



Fig. 4.7 – Modo de determinação da espessura.

Quadro 4.4 – Resultados das medições da espessura do geotêxtil G200

Provete	Espessura (mm)
1	1,79
2	1,45
3	1,51
4	1,38
5	1,89
6	1,80
7	1,94
8	1,91
9	1,82
10	1,98
Média	1,75
Desvio Padrão	0,22
Coefficiente de Variação	12,5%

4.4.3. ENSAIO DE TRAÇÃO

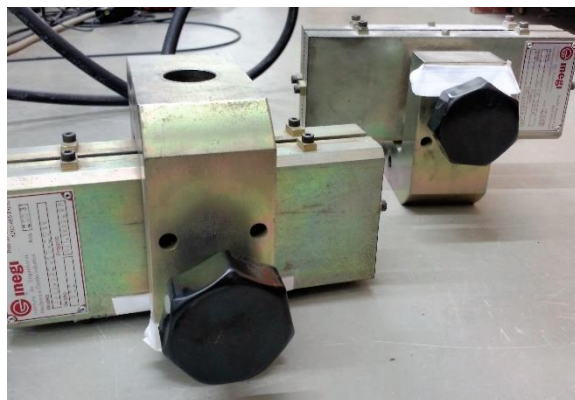
Os procedimentos essenciais para a realização deste ensaio estão presentes na norma NP EN ISO 10319:2005. A maioria dos geossintéticos podem ser ensaiados de acordo com este método, sendo por vezes necessário recorrer a algumas modificações técnicas. Em termos gerais, este ensaio consiste na fixação de um provete através das garras em toda a sua largura com posterior aplicação de uma força longitudinal até que ocorra a rotura do provete.

O ensaio foi realizado com o recurso a uma máquina de ensaio universal da marca *Lloyd Instruments*, modelo LR50K, controlada por um computador que contém um *software* onde se definem os parâmetros de ensaio, tais como a velocidade de ensaio (20 mm/min). Para a obtenção da extensão, o *software* recorre a um vídeo-extensómetro que é responsável pela leitura da distância entre dois alvos colocados nos provetes a uma distância de 60 mm entre si.

Os provetes foram fixados com garras de compressão hidráulica (Fig. 4.8a). Para a medição da força, e dependendo do geossintético, foram usadas diferentes células de carga (Fig. 4.8b) (Quadro 4.5). Os alvos usados para a medição da extensão foram círculos vermelhos (o *software* do vídeo-extensómetro tem a capacidade de detetar apenas a cor vermelha) (Fig. 4.8c). Os alvos foram colocados 30 cm acima e 30 cm abaixo do centro de simetria do provete (Fig. 4.8d).

Quadro 4.5 – Capacidade máxima das células de carga usadas no ensaio de tração.

Geossintético	Células de carga (kN)
G200	5
G400	10
GT200	10
GG300	50



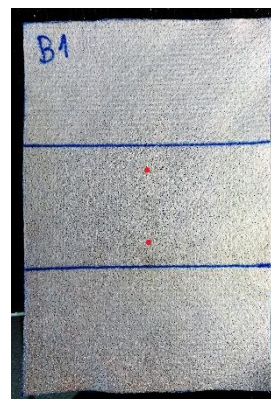
a)



b)



c)



d)

Fig. 4.8 – Ensaio de tração: a) garras de compressão hidráulica; b) célula de carga; c) alvos; d) provete com as marcações a vermelho para colocar os alvos.

Relativamente ao método utilizado, primeiro, cortaram-se 5 provetes na direção de fabrico com 300 mm de comprimento e 200 mm de largura. De seguida, ajustou-se a distância entre garras para um comprimento de 100 mm e colocou-se o provete centrado nas mesmas. No caso do geotêxtil tecido de elevada permeabilidade, foi necessário fazer uma dobra nas extremidades do material para evitar o seu escorregamento. Como o ensaio foi realizado com o auxílio do vídeo-extensómetro, foi necessário a colocação dos alvos, como mostra a Fig. 4.9.



Fig. 4.9 – Ensaio de tração: a) provete montado com alvos durante o ensaio; b) provete após ocorrer a rotura.

Os resultados obtidos no ensaio de tração da amostra de referência (intacta) do geotêxtil G200 encontram-se resumidos no Quadro 4.6. Em seguida, faz-se a descrição do processo de tratamento de dados.

No caso dos geotêxteis, a resistência à tração (T) foi obtida através da equação 4.3. Por sua vez, para a geogrelha, o valor de T foi determinado usando a equação 4.4.

Quadro 4.6 – Resultados obtidos no ensaio de tração do geotêxtil G200 (amostra de referência).

Proвете	F (N)	T (kN/m)	EFM (%)
1	2285	11,43	74,4
2	2578	12,89	73,3
3	2743	13,72	85,1
4	2566	12,83	86,3
5	2286	11,43	72,7
Média	2543	12,72	78,3
Desvio padrão	201	1,00	6,7
Coeficiente de variação	7,9%	7,9%	8,6%

Na equação 4.2, B corresponde à largura dos provetes (em metros). Nas equações 4.3 e 4.4, F corresponde à força máxima obtida durante o ensaio. A equação 4.4 foi apenas usada para calcular a resistência à tração da geogrelha. Os provetes deste material possuíam 5 barras de largura, sendo o valor $\frac{46}{5}$ referente ao número mínimo de barras existente num metro de material (46) a dividir pelo número de barras do provete.

$$c = 1/B \quad (4.2)$$

$$T = \frac{F \times c}{1000} \quad (4.3)$$

$$T = \frac{F \times \frac{46}{5}}{1000} \quad (4.4)$$

O tratamento de dados incluiu também a determinação da resistência à tração residual (R_{RT}). Este parâmetro foi obtido através da equação 4.5, onde $T_{\text{Danificado}}$ representa a resistência à tração das amostras danificadas, e $T_{\text{Referência}}$ a resistência à tração das amostras intactas.

$$R_{RT} = \frac{T_{\text{Danificado}}}{T_{\text{Referência}}} \times 100 \quad (4.5)$$

4.4.4. ENSAIO DE PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

O ensaio de punçoamento estático foi realizado de acordo com a norma NP EN ISO 12236:2008 (Fig. 4.10a). Este método de ensaio aplica-se a todo o tipo de geossintéticos, excetuando aqueles com aberturas superiores a 10 mm. O princípio do ensaio consiste na fixação de um provete entre dois anéis (sistema de aperto), que posteriormente é atravessado por um pilão a uma velocidade de 50 mm/min.

O ensaio de punçoamento estático foi realizado também na máquina universal de ensaio *Lloyd Instruments LR 50K*, embora com outros acessórios, nomeadamente:

- Sistema de aperto: anéis com diâmetro interno de $(150 \pm 0,5)$ mm, como mostra a Fig.4.10b;
- Suporte vertical para colocação do provete (Fig. 4.10c);
- Pilão em aço inoxidável com diâmetro de $(50 \pm 0,5)$ mm e com rebordo arredondado, representado na Fig. 4.10d.



a)



b)



Fig. 4.10 – Equipamento utilizado no ensaio de punção estático: a) vista geral; b) sistema de aperto (dois anéis); c) suporte vertical; d) pilão.

Os provetes usados no ensaio de punção estático (5 provetes testados em cada ensaio) possuíam uma forma circular e tinham um diâmetro útil de 150 mm. Dado o geotêxtil tecido (GT200) ser pouco espesso foi necessário colar na zona das garras moldes feitos com um geotêxtil não-tecido (tipo *sandwich*), de modo a permitir uma melhor eficiência do sistema de aperto e evitar o escorregamento dos provetes durante o ensaio. A Figura 4.11 ilustra um provete do geotêxtil GT200.



Fig. 4.11 – Proвете GT200 usado no ensaio de punção estático: a) moldes utilizados; b) método de *Sandwich*.

Os valores da resistência ao punção (força máxima) (F_p) e do respetivo deslocamento (DF_p) obtidos para a amostra de referência do geotêxtil G200 encontram-se resumidos no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático do geotêxtil G200 (amostras de referência).

Provete	F _P (N)	DF _P (mm)
1	2062	59,1
2	1760	56,9
3	2078	57,5
4	2271	52,6
5	2362	61,5
Média	2107	57,5
Desvio Padrão	232	3,3
Coeficiente de Variação	11,0%	5,7%

Para as amostras danificadas, foi também determinada a resistência ao punçoamento residual (R_{RP}). Este parâmetro foi obtido de acordo com a equação 4.6, onde $F_{PDanificado}$ corresponde à resistência ao punçoamento das amostras danificadas e $F_{PReferência}$ corresponde à resistência ao punçoamento das amostras intactas.

$$R_{RP} = \frac{F_{PDanificado}}{F_{PReferência}} \times 100 \quad (4.6)$$

4.4.5. ENSAIO DE PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO

A norma em vigor para a determinação da permeabilidade à água normal ao plano dos geotêxteis é a NP EN ISO 11058:2003. De uma forma geral, o princípio deste ensaio consiste na medição da quantidade de água que passa através de um provete sob uma série de cargas hidráulicas constantes durante um determinado intervalo de tempo. Este ensaio foi realizado apenas para os geotêxteis G200 e G400. É importante referir que a permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil GT200 excede o limite máximo do equipamento, pelo que não foram efetuados ensaios com este material. No caso da geogrelha, não foram realizados ensaios dado não serem aplicáveis a este tipo de geossintéticos.

O equipamento usado no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano consiste num circuito de água entre dois reservatórios colocados a cotas diferentes, permitindo que a água desça devido à força da gravidade do reservatório colocado a cota mais alta para o colocado a cota mais baixa. O reabastecimento do reservatório colocado a cota superior é feito através de um sistema de bombagem, de forma a permitir que o fluxo de água não seja interrompido durante os ensaios. O procedimento adotado no ensaio de avaliação da permeabilidade normal ao plano será descrito abaixo de forma detalhada.

Primeiro, cortaram-se 5 provetes circulares com 130 mm de diâmetro, tal como ilustrado na Fig. 4.12a. Os provetes foram colocados a saturar em água durante, pelo menos, 24h para garantir a remoção do ar existente na sua estrutura.

Terminado o período de saturação, colocou-se um provete no equipamento (ver Fig. 4.12b) e sobre este colocou-se a grelha representada na Fig. 4.12c (para evitar a deslocação do provete durante o ensaio). Com auxílio da régua (Fig. 4.12d) estabeleceu-se uma perda de carga de 70 mm e abriu-se a

válvula para permitir o escoamento de água até o nível de água dos tubos de acrílicos (Fig. 4.12e) coincidirem com os marcadores da régua.

A água que passa no provete é transportada para o tanque inferior através do tubo de descarga (Fig. 4.12f). Durante um determinado período de tempo, é recolhida a água que atravessa o provete e, em seguida, procede-se à determinação da sua massa (com uma precisão de 0,01 s) e regista-se o tempo de recolha. A temperatura da água foi determinada com um termómetro com precisão de 0,1 °C.

O procedimento anterior foi repetido para outras perdas de carga (56 mm, 42 mm, 28 mm e 14 mm), mantendo sempre o mesmo provete. Por fim, retirou-se o provete e ensaiaram-se os quatro provetes restantes.



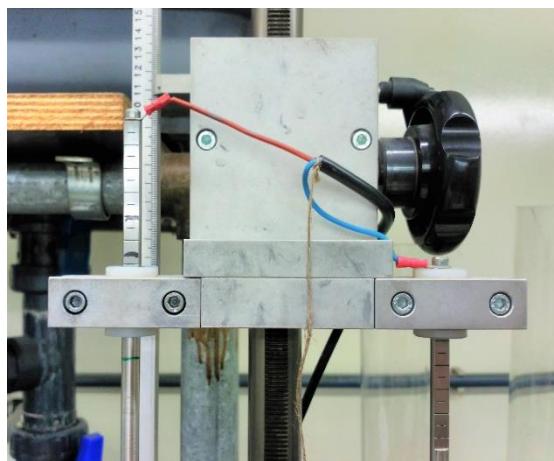
a)



b)



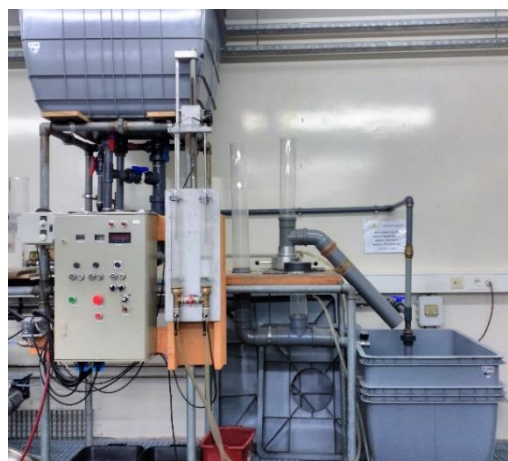
c)



d)



e)



f)

Fig.4.12 – Ensaio de permeabilidade à água normal ao plano: a) provete; b) local de colocação do provete; c) grelha d) régua para marcação da perda de carga; e) tubos em acrílico para observação da carga hidráulica; f) vista geral do equipamento.

Os dados registados durante o ensaio (tempo de recolha, massa de água recolhida e temperatura da água) permitiram determinar os valores das velocidades de escoamento (V_{20}) para as várias perdas de carga. O Quadro 4.8 mostra um exemplo da forma como foram registados os dados.

Quadro 4.8 – Excerto da tabela preenchida durante o ensaio de determinação da permeabilidade à água normal ao plano

	Perda de carga (mm)	Massa de água (g)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Factor correctivo, RT	Velocidade, V_{20} (mm/s)	Média dos V_{20} (mm/s)	Desvio-padrão (mm/s)	CV (%)
PROVETE 1	70								
Área do provete (mm ²)	56								
5476	42								
	28								
	14								

O valor da velocidade de escoamento, V_{20} , obteve-se através da expressão 4.7 e o valor de R_T através da expressão 4.8.

$$V_{20} = \frac{m \times R_T}{S \times t} \times 1000 \quad (4.7)$$

$$R_T = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \times T + 0,00022 \times T^2} \quad (4.8)$$

Nas quais:

- m é a massa da água recolhida, em g
- S é a área do provete, em mm^2
- t é o intervalo de tempo em que se processou a recolha da água, em s
- R_T é o fator corretivo da temperatura
- T é a temperatura, em $^{\circ}\text{C}$

A perda de carga hidráulica (H) e a velocidade de escoamento (V_{20}) são relacionados através da seguinte equação:

$$H = a(V_{20}) + b(V_{20})^2 \quad (4.9)$$

Através da representação gráfica da perda de carga em função da velocidade de escoamento determinou-se, por interpolação gráfica, a velocidade de escoamento para uma perda de 50 mm (VI_{H50}) (as curvas de regressão quadrática foram ajustadas de modo a passarem na origem).

As velocidades de escoamento obtidas para a amostra de referência do geotêxtil G200 estão resumidas no Quadro 4.9. Na Fig. 4.13 estão representadas as curvas quadráticas obtidas para uma perda de carga (mm) em função de V_{20} (mm.s^{-1}).

Quadro 4.9 – Velocidades de escoamento obtidas no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200 (amostra de referência)

Provete	$V_{20} H14$ (mm.s^{-1})	$V_{20} H28$ (mm.s^{-1})	$V_{20} H42$ (mm.s^{-1})	$V_{20} H56$ (mm.s^{-1})	$V_{20} H70$ (mm.s^{-1})
1	20,8	43,7	56,9	75,4	87,3
2	24,2	42,0	58,8	76,0	86,6
3	21,5	42,0	57,5	71,6	82,2
4	17,7	32,7	47,7	61,9	69,2
5	20,8	38,9	55,7	71,2	91,4
Média	21,0	39,9	55,3	71,2	83,3
Desvio Padrão	2,3	4,4	4,4	5,6	8,6
Coef. Variação	11,0%	10,9%	8,0%	7,9%	10,3%

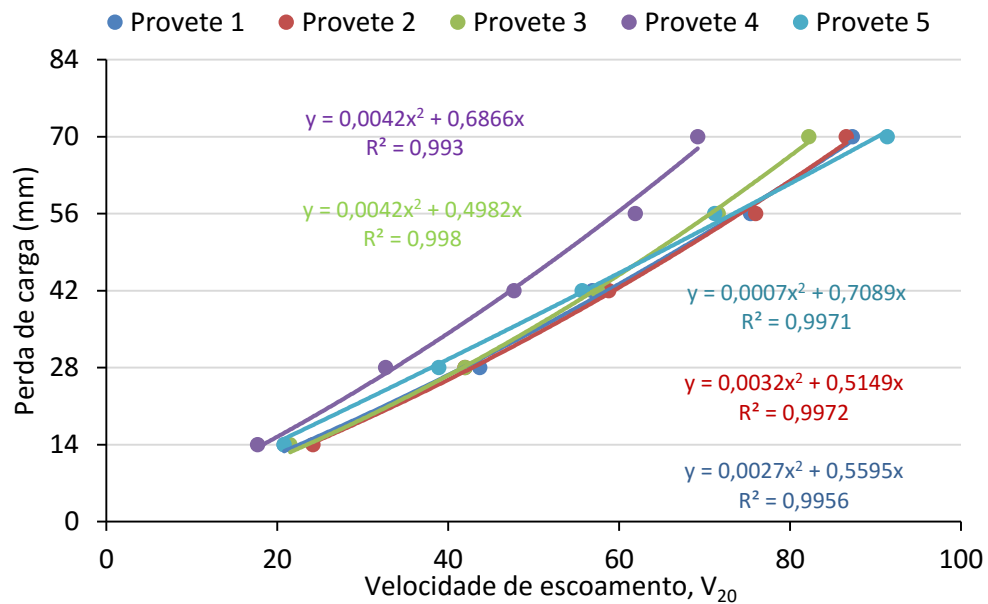


Fig. 4.13 – Curvas quadráticas obtidas para as amostras intactas do geotêxtil G200 no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano.

No Quadro 4.10 estão resumidos os parâmetros das curvas de regressão quadrática obtidos para cada provete, bem como o valor obtido para o VI_{H50} .

Quadro 4.10 – Parâmetros das curvas de regressão quadrática obtidas em casa provete.

Provete	a	b	R^2	VI_{H50}
1	0,0027	0,5595	0,996	67,4
2	0,0032	0,5149	0,997	68,2
3	0,0042	0,4982	0,998	64,9
4	0,0042	0,6866	0,993	54,6
5	0,0007	0,7089	0,997	66,2
Média	-	-	-	64,3
Desvio padrão	-	-	-	5,5
Coefficiente de Variação	-	-	-	8,6%

4.5. DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE REDUÇÃO

Tal como referido no capítulo 2, os coeficientes de redução são utilizados como forma de compensar a degradação que os materiais irão sofrer ao longo do tempo.

As equações 4.10, 4.11 e 4.12 permitem calcular os coeficientes de redução parciais para o efeito dos agentes de degradação, em que $R_{Referência}$ corresponde ao valor da resistência (à tração ou ao

punçoamento) da amostra de referência e R_{DM} corresponde ao valor da resistência (à tração ou ao punçoamento) da amostra danificada por danificação mecânica (exposição individual), R_{AB} corresponde ao valor da resistência (à tração ou ao punçoamento) da amostra danificada por abrasão (exposição individual), R_{DM+AB} corresponde ao valor da resistência (à tração ou ao punçoamento) da amostra danificada por danificação mecânica e à abrasão (exposição sucessiva).

$$RF_{DM} = \frac{R_{Referência}}{R_{DM}} \quad (4.10)$$

$$RF_{AB} = \frac{R_{Referência}}{R_{AB}} \quad (4.11)$$

$$RF_{DM+AB} = \frac{R_{Referência}}{R_{DM+AB}} \quad (4.12)$$

Pela metodologia tradicional, o coeficiente de redução para o efeito combinado da DM e da abrasão ($RF_{DM+AB \text{ TRAD}}$) pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$RF_{DM+AB \text{ TRAD}} = RF_{DM} \times RF_{AB} \quad (4.13)$$

Os coeficientes de redução obtidos pela metodologia tradicional (determinação dos coeficientes de redução separadamente e posterior multiplicação dos mesmos) para o efeito da DM e da abrasão serão comparados com os coeficientes de redução obtidos na exposição sucessiva à DM e à abrasão.

Estes coeficientes não podem ser usados no dimensionamento porque correspondem apenas às condições ensaiadas e não podem ser generalizados. Para poderem ser aplicados no dimensionamento, seria necessário avaliar as condições particulares de cada obra e averiguar até que ponto as condições impostas nos ensaios podem traduzir as condições reais.

5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No capítulo anterior foram descritos os ensaios de danificação e caracterização realizados com os materiais em estudo. Os ensaios de danificação foram realizados com o objetivo de compreender a degradação sofrida pelos materiais quando sujeitos a agentes de degradação mecânica e avaliar a existência de efeitos sinérgicos entre os agentes de danificação. Neste capítulo, serão apresentados os resultados de cada ensaio para cada geossintético e será feita a sua respetiva análise.

5.2. GEOTÊXTIL NÃO-TECIDO G200

5.2.1. ANÁLISE VISUAL

Depois da realização dos ensaios de danificação, o geotêxtil G200 possuía alguns danos provocados pela ação dos agentes de degradação. Após o ensaio de danificação mecânica sob carga repetida, os provetes apresentavam sujidade, algumas fibras cortadas, diminuição pontual de espessura e pequenos furos (Figura 5.1b). A sujidade presente foi causada pelo contacto direto dos provetes com o corindo. O corindo durante o ensaio de DM partiu-se, libertando pó e partículas que se depositaram no geotêxtil e foram responsáveis pela mancha branca presente na Fig. 5.1b.

Por outro lado, depois do ensaio de abrasão o material apresentava danos mais visíveis (Fig. 5.1c). Como já foi referido no capítulo anterior, este agente de degradação atua apenas na superfície de contacto do material com o abrasivo, tendo sido nesse local onde ocorreu a danificação. O processo de abrasão causou a libertação e arrastamento de fibras e alterações na textura do material (Fig. 5.1c). Esta alteração deveu-se à libertação de fibras na superfície do material, o que provocou um falso aumento de espessura. Este falso aumento de espessura deveu-se ao destacamento de fibras que ocorreu durante o ensaio. Caso a espessura fosse determinada (pela EN ISO 9863-1:2006), obter-se-ia um valor superior ao original. Contudo, na verdade, ocorreu uma diminuição da quantidade de fibras que contribuíam para a resistência do geotêxtil. Tal facto pode ser observado na Fig. 5.1d, onde é possível verificar a existência de zonas com alguma transparência, o que reflete a diminuição de espessura.

Na Fig. 5.1c é também visível alguns aglomerados de fibras rasgadas, provocados pelo movimento de vaivém da plataforma inferior. Este movimento possibilita que as fibras soltas se juntem e formem esses aglomerados. O ensaio de abrasão provocou uma diminuição de cerca de 6% na largura dos provetes.

Por último, quando combinados o ensaio de DM e de abrasão, os danos foram ainda mais acentuados (Fig. 5.1e). Os provetes apresentavam corte de fibras, que muitas vezes levou à formação de grandes furos ou até mesmo rasgões. Também apresentavam aglomerados de fibras e diminuição da espessura, como se pode observar na Fig. 5.1f, onde as transparências ainda são mais evidentes. A ação dos dois agentes de danificação causou uma diminuição da largura ainda mais acentuada (aproximadamente 9%).

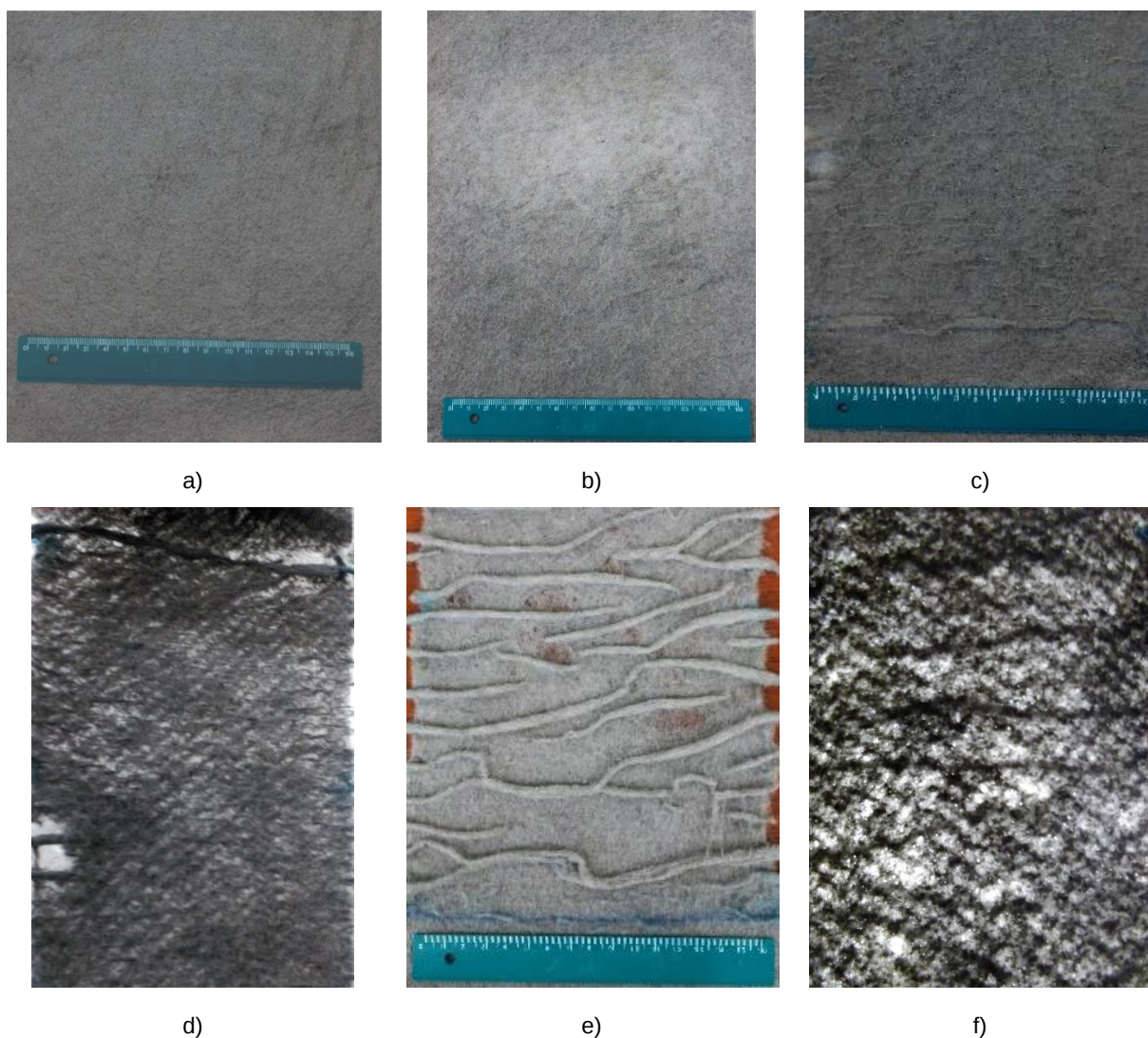


Figura 5.1 – Geotêxtil G200: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após abrasão (proвете em contraluz); e) Após DM + Abrasão; f) Após DM + Abrasão (proвете em contraluz).

5.2.2. TRAÇÃO-EXTENSÃO

O Quadro 5.1 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaio de tração-extensão do geotêxtil G200.

Quadro 5.1 – Resultados médios do ensaio de tração-extensão do geotêxtil G200

	T (kN/m)	E _{FM} (%)	R _{RT} (%)
Intacto	12,46 (1,00)	78,4 (6,7)	-
DM	7,86 (1,37)	53,2 (6,3)	63,1
Abrasão	10,43 (1,44)	74,3 (3,3)	83,7
DM + Abrasão	3,71 (1,54)	54,7 (8,4)	29,8

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

A partir do Quadro 5.1 que apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração para o geotêxtil G200, faz-se a seguinte análise:

- Os valores obtidos para a resistência à tração após os ensaios de degradação foram inferiores aos obtidos para as amostras intactas (não degradadas). De facto, a ação da DM (resistência à tração residual de 63,1%) foi mais danosa do que a ação da abrasão (resistência à tração residual de 83,7%). Este resultado mostra que os cortes de fibras e/ou furos ocorridos no ensaio de DM provocaram uma maior redução de resistência do que o destacamento de fibras no ensaio de abrasão. A ação simultânea dos dois mecanismos de degradação causou uma redução ainda maior da resistência à tração (resistência à tração residual de 29,8%).
- Ao analisar os valores obtidos para a extensão na força máxima nas amostras intactas e nas danificadas por DM e abrasão (exposições isoladas) verifica-se que maiores valores de resistência à tração correspondem a maiores valores de extensão na força máxima. Por outro lado, na situação onde os dois mecanismos de degradação atuaram sucessivamente, isto já não acontece devido ao facto do material conter danos que possibilitaram com que este se deformasse mais (54,7%), quando sujeito a forças menores (3,71 kN/m).
- A E_{FM} diminuiu após os ensaios de degradação. A menor diminuição ocorreu após o ensaio de abrasão ao contrário do que aconteceu na DM e na DM seguida pela abrasão (exposição sucessiva), onde as diminuições de E_{FM} foram maiores e semelhantes.

Na Fig. 5.2, estão representadas, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-extensão obtidas nos ensaios de tração (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados). Apesar de não corresponderem aos valores médios das várias situações de degradação, é evidente a diminuição da resistência à tração quando os dois agentes de degradação atuaram sucessivamente. Nesta figura é possível verificar uma diminuição de rigidez entre as amostras intactas e as amostras danificadas.

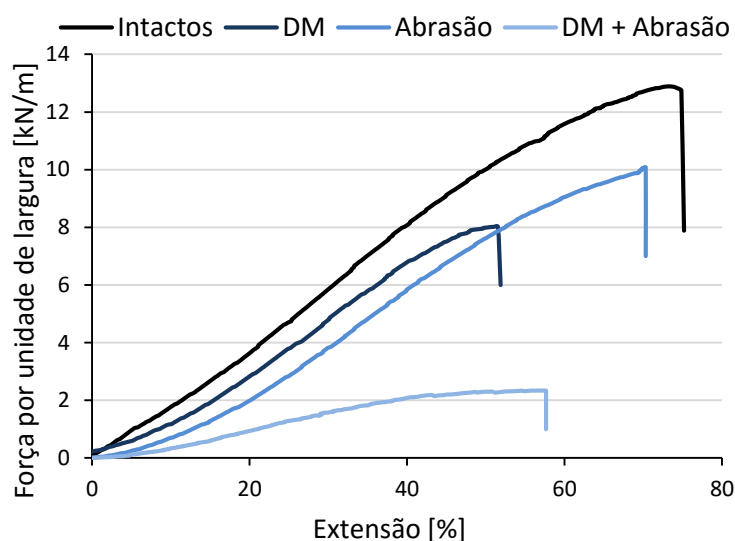


Fig. 5.2 – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para a geotêxtil G200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

5.2.3. PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

No Quadro 5.2 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil G200, antes e depois dos ensaios de degradação

Quadro 5.2 – Resultados médios do ensaio de punçoamento estático do geotêxtil G200

	F_P (N)	DF_P (mm)	R_{RP} (%)
Intacto	2107 (232)	57,5 (3,3)	-
DM	1419 (153)	43,2 (6,7)	67,3
Abrasão	1965 (150)	62,9 (1,9)	93,3
DM + Abrasão	594 (277)	48,2 (4,8)	28,2

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

O Quadro 5.2 resume os resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático para o geotêxtil G200, através deste faz-se a seguinte análise:

- As amostras com maior resistência ao punçoamento foram as intactas, embora no caso da danificação por abrasão, a rotura tenha ocorrido para um valor muito próximo ao das amostras intactas (resistência ao punçoamento residual superior a 90%).
- No caso da DM o material atinge a cedência a forças de punçoamento mais baixas (resistência ao punçoamento residual de 67,3%) do que quando é danificado por abrasão (resistência ao punçoamento residual de 93,3%). Quando os dois mecanismos de degradação atuam sucessivamente, os valores da resistência ao punçoamento ainda diminuem mais (resistência ao punçoamento residual de 28,2%).
- O deslocamento na força máxima de punçoamento dos provetes danificados por abrasão (62,9 mm) foi muito semelhante ao valor da amostra intacta (57,5 mm). Esses valores estão em

conformidade com o facto dos valores da força terem sido muito próximos. Por outro lado, no caso da exposição sucessiva à DM e à abrasão, o valor do deslocamento (48,2 mm) foi superior do que na exposição individual à DM (43,2 mm) e inferior ao da abrasão (62,9 mm).

Na Fig. 5.3 estão representadas, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punção estático (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados). Nestas é perceptível que as maiores quebras de resistência ocorreram na situação da danificação por DM e na situação onde os dois mecanismos de degradação atuaram sucessivamente.

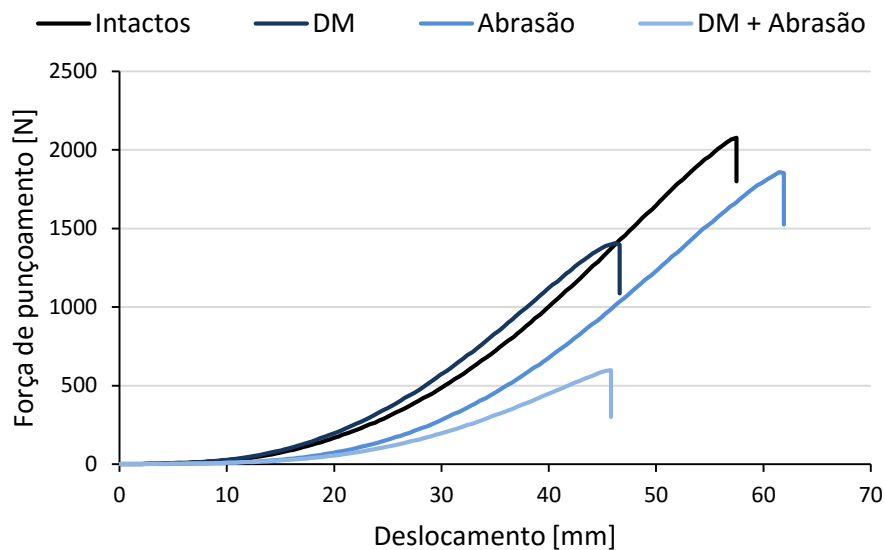


Fig. 5.3 – Curvas força-deformação obtidas no ensaio de punção estático para o geotêxtil G200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

5.2.4. PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO

Nesta última subsecção apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200, antes e depois dos ensaios de danificação mecânica. O Quadro 5.3 resume os valores obtidos para as velocidades de escoamento (V_{20}) às diferentes perdas de carga (H).

Quadro 5.3 – Resultados médios do ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200.

H [mm]	V_{20} [mm.s ⁻¹]					$V_{I_{H50}}$ [mm.s ⁻¹]
	14	28	42	56	70	
Intactos	21,0 (2,3)	39,9 (4,4)	55,3 (4,4)	71,2 (5,6)	83,3 (8,6)	64,3 (5,6)
DM	21,4 (2,3)	39,6 (3,2)	57,3 (5,5)	72,8 (6,1)	85,3 (8,4)	65,7 (6,0)
Abrasão	25,1 (1,5)	48,6 (7,9)	67,1 (8,9)	82,6 (9,3)	101,5 (11,3)	77,2 (9,2)
DM + Abrasão	46,8 (7,7)	82,7 (9,9)	114,1 (8,2)	143,9 (5,8)	165,3 (7,1)	129,7 (6,5)

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

O Quadro 5.3 resume apresenta os resultados obtidos da velocidade de escoamento para diferentes perdas de carga, obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200, através da sua análise é possível referir que:

- No caso dos danificados por DM, a velocidade de escoamento não aumentou muito em relação aos intactos. O que significa que apesar do geotêxtil G200 apresentar danos, estes não causaram alterações relevantes no ensaio de permeabilidade. O que está de acordo com o tipo de danos descrito na análise visual das amostras danificadas
- Por outro lado, no caso dos danificados por abrasão ocorreu um aumento da velocidade de escoamento devido à diminuição da espessura que este ensaio provocou no material.
- Na situação onde os dois mecanismos ocorreram sucessivamente, o aumento da velocidade de escoamento foi ainda mais evidente. De facto, de acordo com a análise visual, nesta situação, as amostras danificadas apresentaram maiores danos do que nas restantes situações.
- Para as amostras intactas e para as amostras danificadas por DM os valores de VI_{H50} foram muito semelhantes, rondaram sempre os 65 mm.s^{-1} ; quando as amostras foram expostas à abrasão, o valor de VI_{H50} foi superior à DM (77 mm.s^{-1}); quando as amostras foram sujeitas à exposição sucessiva dos mecanismos de degradação mecânica o valor de VI_{H50} ainda foi mais elevado (129 mm.s^{-1}).

A Fig. 5.4 representa o gráfico dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200, dando uma maior percepção da diferença presente entre as amostras intactas e as amostras danificadas. É clara a grande diferença existente nas situações onde os mecanismos de degradação atuam isoladamente, com a situação onde estes atuam sucessivamente.

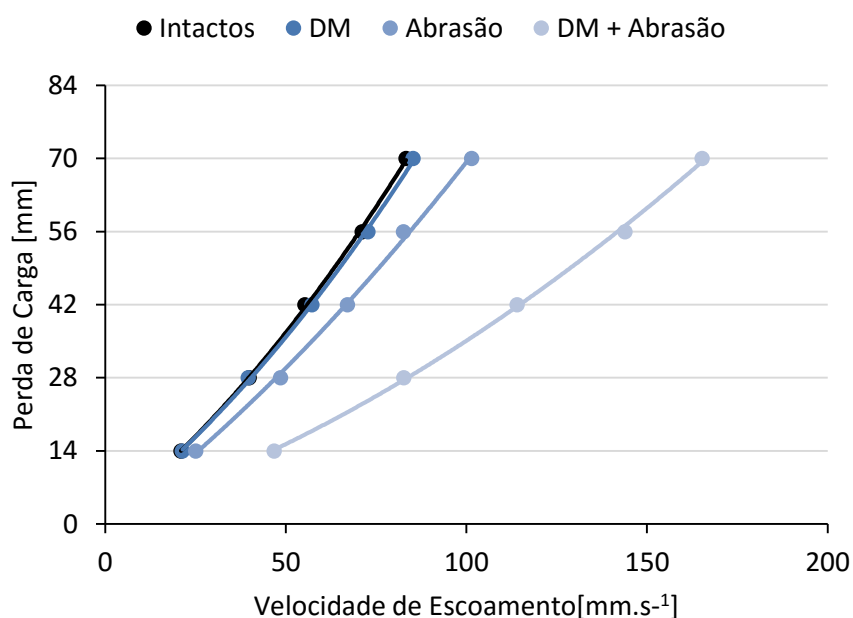


Fig. 5.4 – Curvas médias obtidas no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G200.

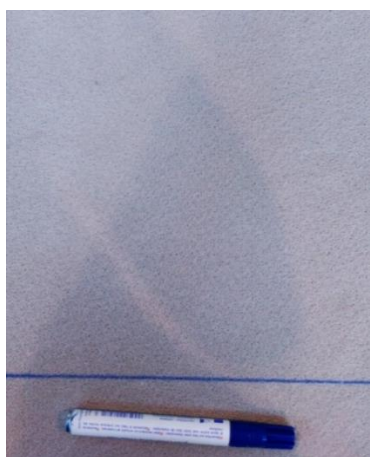
5.3. GEOTÊXTIL NÃO TECIDO G400

5.3.1. ANÁLISE VISUAL

Tal como no geotêxtil G200, as ações de danificação também causaram danos visíveis no geotêxtil G400. Posteriormente ao ensaio de DM, o material apresentou alguma sujidade na zona de contato direto com o corindo, diminuição pontual da espessura devido à aplicação da carga cíclica e filamentos cortados (Fig. 5.5b).

O movimento de vaivém realizado pelo ensaio de abrasão provocou uma libertação de filamentos na camada superficial do geotêxtil G400 (na Fig. 5.5c é perceptível a mudança de textura no material). Quando os dois mecanismos de danificação atuaram sucessivamente, essa camada de filamentos soltos transformou-se em aglomerados de material semelhantes a rolos (Fig. 5.5d). O geotêxtil ficou com uma superfície mais lisa e com menor espessura (Fig. 5.5d)

No caso deste material, comparativamente com os danos visíveis sofridos pelo geotêxtil G200 nas mesmas condições, a principal diferença foi a ausência de furos e de cortes. O geotêxtil G400 é um material que tem maior espessura e massa por unidade de área do que o geotêxtil G200. Como tal, é um material mais opaco, o que faz com que tenha mais filamentos a contribuir para a sua resistência e quando sujeito a qualquer um dos tipos de degradação em estudo apresenta ser um material mais resiliente.



a)



b)

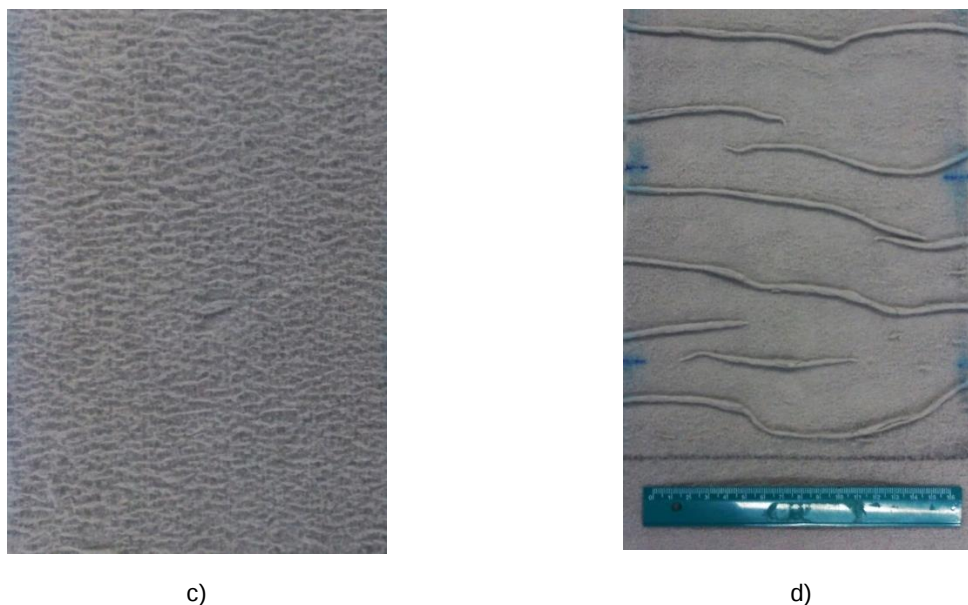


Fig. 5.5 – Geotêxtil G400: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após DM + Abrasão.

5.3.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

A partir do Quadro 5.4 será feita a análise da resistência à tração, da extensão na força máxima e da resistência à tração residual das amostras do geotêxtil G400 antes e após a exposição aos dois mecanismos de degradação mecânica.

Quadro 5.4 – Resultados médios obtidos no ensaio de tração para o geotêxtil G400

	T (kN/m)	EF _M (%)	R _{RT} (%)	R _{RT} (%) G200
Intactos	23,89 (0,6)	82,1 (3,6)	-	-
DM	21,54 (1,6)	67,3 (2,7)	90,1	63,1
Abrasão	22,76 (0,8)	82,5 (8,1)	95,3	83,7
DM + Abrasão	18,70 (1,2)	60,9 (5,4)	78,3	29,8

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

Através do Quadro 5.4, pode-se referir que:

- Os valores da resistência à tração foram muito próximos para as amostras intactas e para as amostras danificadas por abrasão (resistência à tração residual de 95,3%). Em relação à extensão na força máxima, os valores também foram muito próximos (82,1% e 82,5%, respetivamente)
- Após a DM o material apresentou um valor de resistência à tração relativamente próximo do valor obtido para as amostras intactas (resistência à tração residual de 90,1%), mas o valor da sua extensão na força máxima foi inferior (67,3%).

- A situação onde o material perdeu mais resistência à tração foi após a combinação do ensaio de DM com o ensaio de abrasão (resistência à tração residual de 78,3%), o que já seria de esperar após a análise visual das amostras.
- Ao comparar os valores de resistência à tração residual do geotêxtil G400 com os resultados do geotêxtil G200, é possível verificar que estes dois materiais reagem de forma semelhante na medida em que ambos são mais afetados pela ação simultânea dos dois mecanismos de degradação e menos afetados pela abrasão.

Na Fig. 5.6 estão representadas, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-extensão obtidas nos ensaios de tração (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados). Nesta é possível observar que em nenhuma situação houve um decréscimo tão acentuado como aconteceu no geotêxtil G400 da resistência à tração. Nesta, também, é possível observar um aumento de rigidez entre os intactos e as amostras danificadas ao contrário do que aconteceu com o geotêxtil G200.

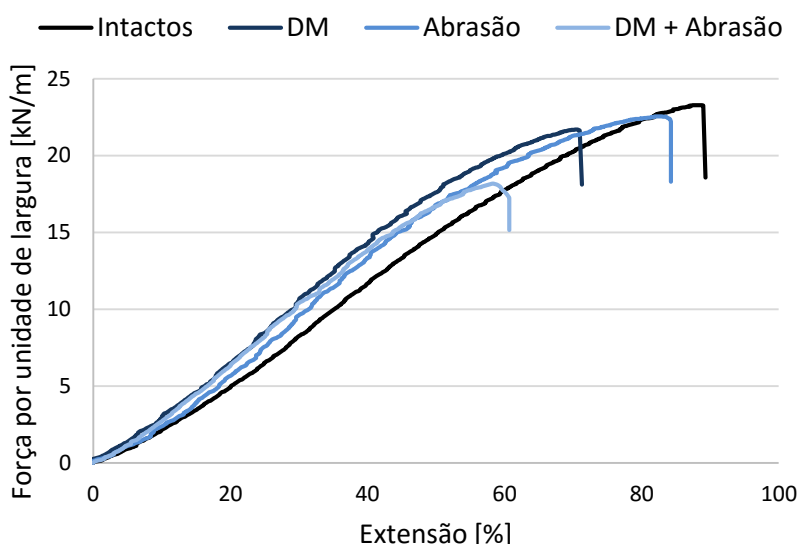


Fig. 5.6. – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para o geotêxtil G400 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

5.3.3. PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Os resultados médios do ensaio de punçoamento estático do geotêxtil G400 para as amostras de referência (intactas) e para as amostras danificadas estão representados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Resultados médios no ensaio de punçoamento estático do G400

	F _P (N)	DF _P (mm)	R _{RP} (%)
Intactos	4617 (165)	62,7 (2,0)	-
DM	4067 (133)	55,2 (3,6)	88,1
Abrasão	4511 (252)	62,8 (2,0)	97,7
DM + Abrasão	4093 (191)	57,8 (7,0)	88,7

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

Através da análise do Quadro 5.5 conclui-se que:

- Em qualquer uma das situações de danificação, os resultados da força de punçoamento foram inferiores aos resultados obtidos para as amostras intactas, embora no caso da danificação por abrasão essa diferença seja muito pequena (resistência ao punçoamento residual de 97,7%).
- Para a situação onde atuam os dois mecanismos de danificação, os valores da força de punçoamento foram muito semelhantes aos valores da força de punçoamento após a ação isolada da DM. Isto mostra que o passo de abrasão (após a DM) teve uma contribuição reduzida para a diminuição da resistência ao punçoamento.
- Comparando os resultados da resistência ao punçoamento residual deste geotêxtil com o geotêxtil G200, os valores da mesma foram mais elevados. Tal facto sugere que este material foi menos afetado pelos mecanismos de degradação. Em todos os casos, a resistência ao punçoamento residual foi superior a 85%.

Na Fig. 5.7 estão representadas, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punçoamento estático (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados). Após a análise do gráfico deste geotêxtil chega-se à conclusão que no geotêxtil G400 não ocorreu nenhuma quebra acentuada de resistência ao punçoamento, ao contrário do que aconteceu no geotêxtil G200.

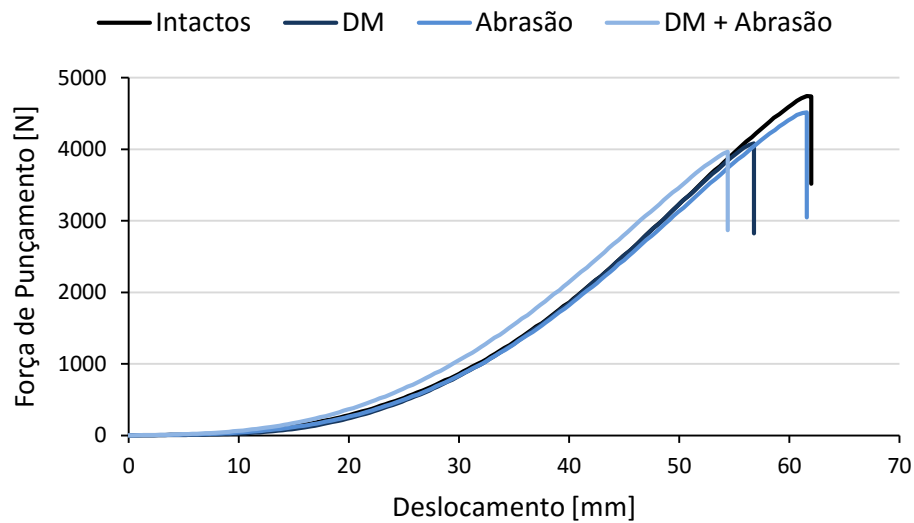


Fig. 5.7 – Curvas força-deformação obtidas no ensaio de punçoamento estático para o geotêxtil G400 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

5.3.4. PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO

Nesta secção faz-se a análise dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G400.

Quadro 5.6 – Resultados médios do ensaio de permeabilidade à água normal ao plano para o geotêxtil G400.

H [mm]	V ₂₀ [mm.s ⁻¹]					V _{IH50} [mm.s ⁻¹]
	14	28	42	56	70	
Intactos	10,2 (1,1)	19,9 (2,4)	29,5 (2,4)	37,0 (3,0)	43,7 (3,6)	33,4 (2,9)
DM	8,7 (3,0)	17,2 (4,5)	24,5 (5,9)	32,7 (7,9)	39,2 (9,7)	29,1 (7,3)
Abrasão	9,9 (2,1)	19,3 (4,1)	27,3 (5,8)	35,0 (7,6)	41,1 (7,9)	31,5 (6,5)
DM + Abrasão	8,9 (0,9)	17,3 (1,1)	25,4 (1,8)	33,8 (1,1)	39,5 (2,5)	29,7 (1,3)

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

O Quadro 5.6 apresenta os resultados obtidos da velocidade de escoamento para diferentes perdas de carga obtidos no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G400. Através do mesmo faz-se a seguinte análise:

- Os resultados obtidos para a velocidade de escoamento foram muito semelhantes nas quatro situações de degradação, contudo os resultados dos valores de velocidade de escoamento mais elevados tenham sido obtidas para as amostras intactas.

- Embora sejam muito próximos, comparando os provetes sujeitos a DM com os provetes danificados por abrasão, os primeiros obtiveram valores mais baixos de velocidade de escoamento.
- Para perdas de carga inferiores a 42 mm, os valores da velocidade de escoamento para as amostras danificadas pela DM foi inferior à velocidade de escoamento das amostras danificadas por abrasão, e para perdas de carga superiores a 42 mm a situação inverteu-se.
- Os valores de VI_{H50} foram muito semelhantes, rondaram sempre os 30 mm.s^{-1} ; o valor mais baixo ($29,1 \text{ mm.s}^{-1}$) foi no caso da DM e o mais elevado foi nas amostras intactas ($33,4 \text{ mm.s}^{-1}$).
- Ao comparar os resultados obtidos neste geotêxtil com os obtidos no geotêxtil G200, os resultados foram muito diferentes. Como já seria de esperar o G200, foi o geotêxtil em que os valores da velocidade de escoamento foram mais elevados.

A Fig. 5.8 ilustra as curvas médias que representam a perda de carga em função da velocidade de escoamento obtidas nos ensaios de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G400. É possível verificar que as curvas são todas muito próximas, o que realça o que foi dito nos pontos anteriores.

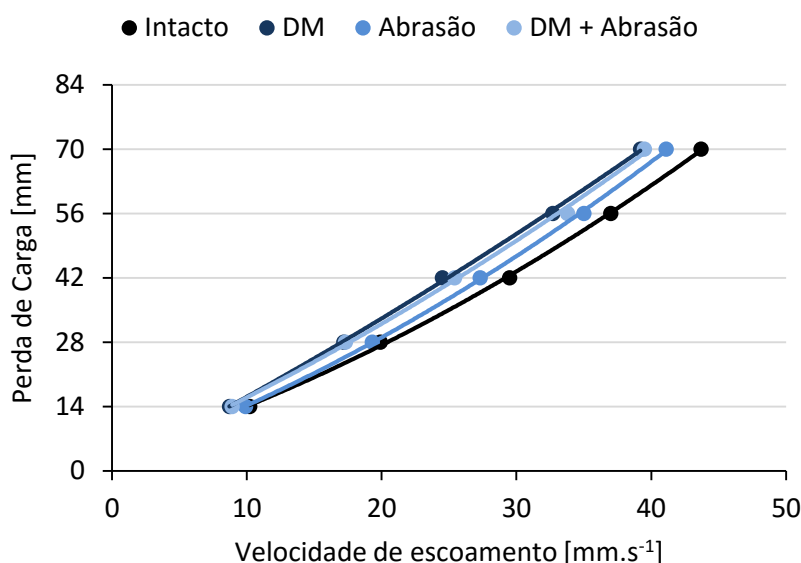


Fig. 5.8 – Curvas médias obtidas no ensaio de permeabilidade à água normal ao plano do geotêxtil G400.

5.4. GEOTÊXTEL TECIDO GT200

5.4.1. ANÁLISE VISUAL

O geotêxtil tecido foi, visualmente, o material que mais degradação sofreu quando sujeito à ação isolada do ensaio de DM. Após este ensaio, o material apresentou furos, corte de filamentos e sujidade (Figura 5.9b). A formação de furos e o corte de filamentos são os danos que mais contribuem para a

diminuição da resistência do material, pelo que se espera uma significativa diminuição da resistência à tração e ao punçoamento.

Após o ensaio de abrasão, o material não apresentou sinais de desgaste, apenas uma diminuição pouco significativa de espessura. Comparando o material intacto (Fig. 5.9a) com o material após este ensaio (Fig. 5.9c), não houve grandes diferenças.

Quando os dois mecanismos de danificação atuaram sucessivamente, o material apresentou sinais de danificação mais evidentes (Fig. 5.9d). Nestas condições, o material apresentou corte de filamentos, furos de maior dimensão e diminuição da espessura.

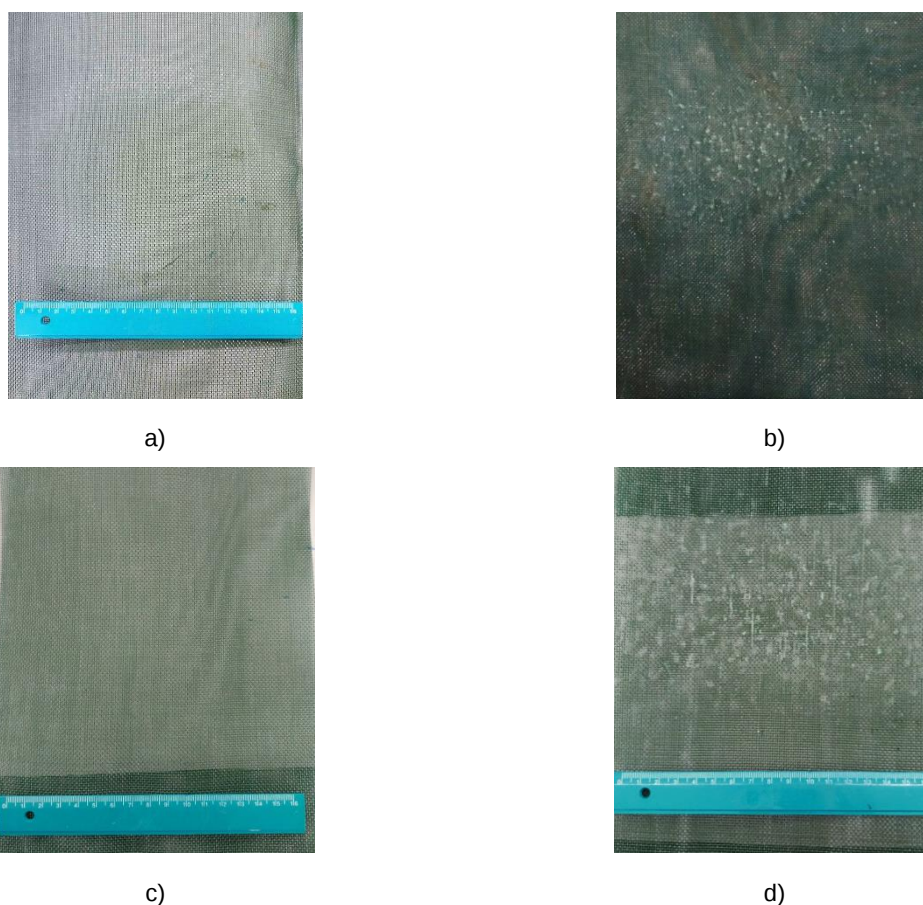


Fig. 5.9 – Geotêxtil tecido GT200: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após DM + Abrasão.

5.4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

No Quadro 5.7 representam-se os resultados médios obtidos no ensaio de tração para as amostras do geotêxtil GT200, quando sujeito a diferentes mecanismos de degradação. Neste quadro apresentam-se os valores da resistência à tração, da extensão na força máxima e da resistência à tração residual.

Quadro 5.7 – Resultados do ensaio de tração obtidos para o geotêxtil GT200

	T (kN/m)	E _{FM} (%)	R _{RT} (%)
Intacto	26,59 (0,74)	52,8 (4,9)	-
DM	12,60 (0,54)	20,1 (2,6)	47,4
Abrasão	23,21 (1,15)	33,1 (4,6)	87,3
DM + Abrasão	10,62 (0,95)	16,1 (2,5)	39,9

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

Através da análise do Quadro 5.7 compreende-se que:

- A situação mais gravosa, quando estava apenas um mecanismo de danificação a atuar, foi provocada pela ação da DM. A resistência à tração após o ensaio de abrasão foi muito próxima do resultado obtido para as amostras intactas, o que significa que este tipo de degradação provocou pouca danificação ao material.
- As situações mais gravosas foram para a exposição sucessiva e para a DM (isolada). Para a exposição sucessiva o valor de R_{RT} foi 39,9% e na situação da DM (isolada) o valor de R_{RT} foi de 47,4%.
- O valor da extensão na força máxima decresceu à medida que a resistência à tração decresceu, o que já seria de esperar visto que como os materiais já estão danificados a sua capacidade de se deformar diminuiu.

Na Fig. 5.10 representam-se, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-extensão obtidas nos ensaios de tração (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados). Nesta é possível ter uma maior noção da diminuição da resistência à tração na DM e na DM seguida de abrasão, o que reforça o que foi dito anteriormente após a análise do Quadro 5.8.

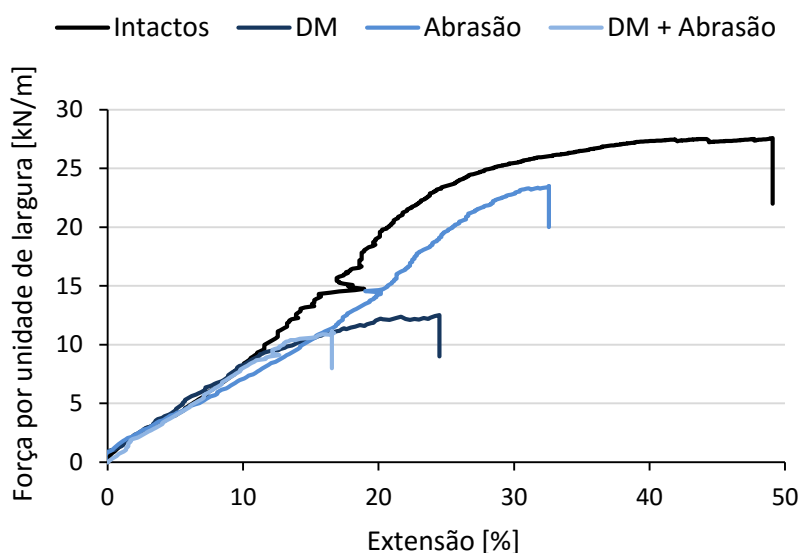


Fig. 5.10 – Curvas força-extensão obtidas no ensaio de tração para a geotêxtil GT200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

5.4.3. PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

Nesta secção faz-se a análise dos resultados médios dos ensaios de punçoamento estáticos obtidos para o geotêxtil GT200. O Quadro 5.8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de punçoamento estático para o geotêxtil GT200.

Quadro 5.8 – Resultados médios obtidos para nos ensaios de punçoamento estático do geotêxtil GT200

	F _P (N)	DF _P (mm)	R _{RP} (%)
Intacto	4216 (97)	44,7 (3,1)	-
DM	1545 (175)	31,2 (2,4)	36,6
Abrasão	3962 (211)	46,2 (3,8)	94,0
DM + Abrasão	1038 (190)	26,2 (1,8)	24,6

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

Para o ensaio de punçoamento estático, faz-se a seguinte análise:

- À semelhança do que aconteceu na resistência à tração, os valores mais baixos foram obtidos para os provetes danificados pela ação da DM seguida de abrasão. Tal facto deveu-se à rotura de filamentos que ocorreu durante este processo de danificação.
- Os resultados obtidos para as amostras danificadas pela abrasão (3962 N) e os resultados obtidos para as amostras intactas (4216 N) foram próximos, o que mostra que a danificação provocada pela abrasão causou apenas uma pequena diminuição da resistência ao punçoamento. A resistência ao punçoamento residual obtida no caso da abrasão (94%) foi um valor muito próximo de 100%, enquanto nos restantes casos o valor da resistência ao punçoamento residual foi abaixo de 40%.
- Os maiores valores de deslocamento foram obtidos quando as amostras foram danificadas por abrasão e nas amostras intactas. A diferença nestes dois valores pode ser desprezada por serem valores tão próximos. No caso da DM seguida por abrasão, o deslocamento atingiu o valor mais baixo (26,2 mm) e na DM (exposição isolada) o deslocamento foi de 31,2 mm.

Na Fig. 5.11 estão representadas, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de punçoamento estático (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

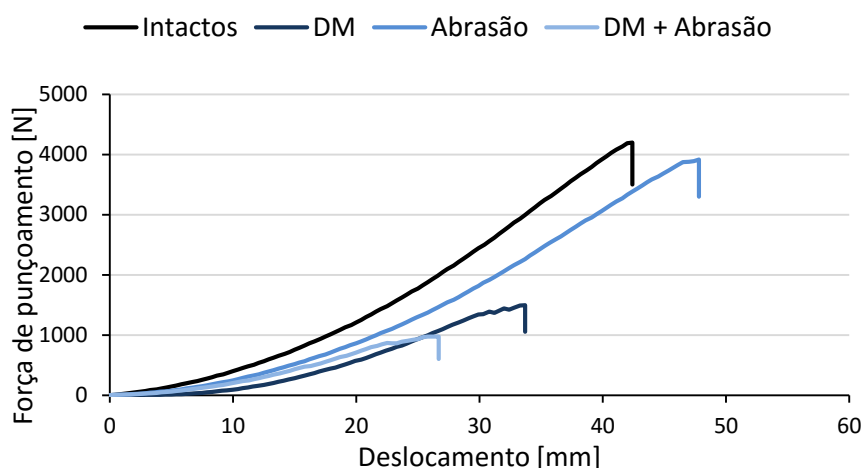


Fig. 5.11 – Curvas força-deformação obtidas no ensaio de punção estático para o geotêxtil GT200 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

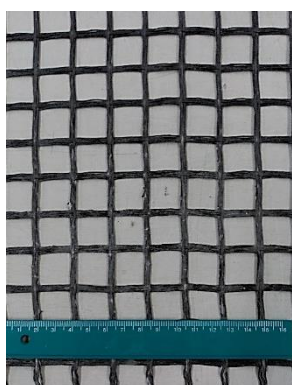
5.5. GEOGRELHA GG300

5.5.1. ANÁLISE VISUAL

A geogrelha não apresentava grandes danos visuais após o ensaio de DM. Na Fig. 5.12b é visível que esta apenas possuía algumas marcações brancas devido ao contacto com o corindo. Este contacto fez com que houvesse perda do revestimento dos filamentos da geogrelha e com que apresentasse alguma sujidade.

Por outro lado, dos ensaios isolados, o mais danoso foi o ensaio de abrasão. Este provocou a destruição do revestimento dos filamentos em ambas as direções do material e quebra de ligações entre filamentos (em especial na direção perpendicular à de fabrico).

Na exposição sucessiva aos dois mecanismos de degradação mecânica, a geogrelha apresentou um nível de danos muito semelhante à ação do ensaio de abrasão (isolado) (Fig. 5.12c). Na verdade, concluiu-se que como o efeito da abrasão é muito mais danoso do que a ação da DM, os danos provocados pela DM foram praticamente indetetáveis (Fig. 5.12d).



a)



b)



Fig. 5.12 – Geogrelha GG300: a) Intacto; b) Após DM; c) Após abrasão; d) Após DM + Abrasão.

5.5.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Nesta secção apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de tração-extensão para a geogrelha GG300 nas amostras de referência (intactas) e nas amostras danificadas. O Quadro 5.9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração da geogrelha.

Quadro 5.9 – Resultados médios obtidos no ensaio de tração da geogrelha GG300.

	T (kN/m)	E _{FM} (%)	R _{RT} (%)
Intacto	46,14 (2,81)	10,4 (1,0)	-
DM	38,92 (2,01)	10,5 (0,8)	84,4
Abrasão	15,31 (4,69)	9,6 (2,1)	33,2
DM + Abrasão	14,92 (1,84)	9,6 (1,4)	32,3

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

Com o Quadro 5.9 faz-se a seguinte análise:

- Ao contrário dos outros materiais, a geogrelha GG300 foi mais afetada pela ação da abrasão do que pela DM.
- Os resultados obtidos para os dois mecanismos a atuar sucessivamente (resistência à tração residual foi de 32,3%) e para a ação da abrasão a atuar isoladamente (resistência à tração residual foi de 33,2%) foram muito semelhantes. Concluiu-se que a ação da abrasão é tão destrutiva que é como se atuasse sozinha em ambas as situações.
- A ação da DM isolada causou uma perda de resistência à tração de 15,6%, um valor relativamente reduzido comparativamente com a perda de resistência à tração causada pela abrasão (66,8%).
- Os valores da extensão na força máxima foram todos muito próximos, antes e depois da ação dos mecanismos de degradação mecânica (cerca de 10%).

Na Fig. 5.13 estão representadas, para as amostras danificadas e para a amostra de referência, as curvas força-extensão obtidas nos ensaios de tração (curvas dos provetes individuais com

resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados). Nelas é possível observar a grande diminuição de rigidez da geogrelha após a abrasão e após a DM seguida pela abrasão, o que entra em concordância com os danos observados durante a análise visual.

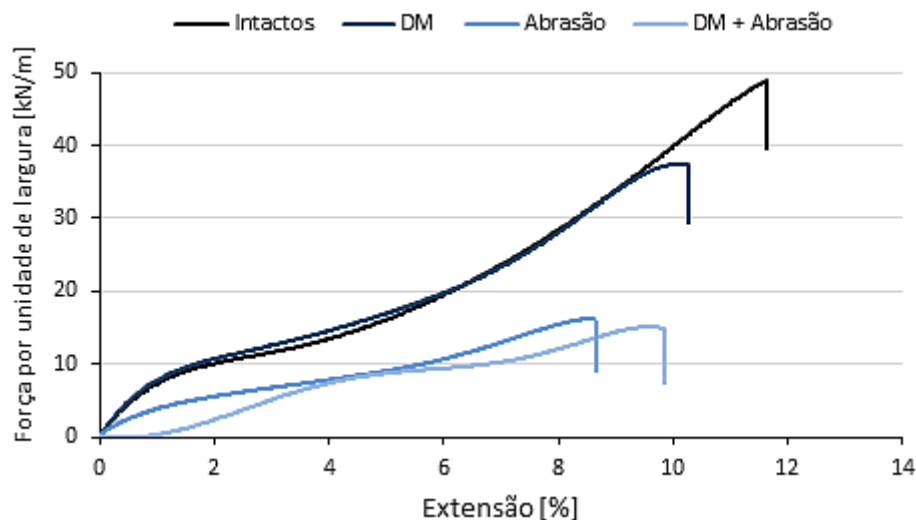


Fig. 5.13 – Curvas força-estiramento obtidas no ensaio de tração para a geogrelha GG300 (curvas dos provetes individuais com resultados mais próximos da média dos resultados de todos os provetes ensaiados).

5.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste subcapítulo faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos para os diferentes geossintéticos. São, também, apresentados os coeficientes de redução obtidos (tendo em conta as alterações da resistência à tração e da resistência ao punção) para as várias situações de degradação.

5.6.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO RESIDUAL

Na Fig. 5.14 apresentam-se os resultados da resistência à tração residual dos geossintéticos após os vários ensaios de degradação.

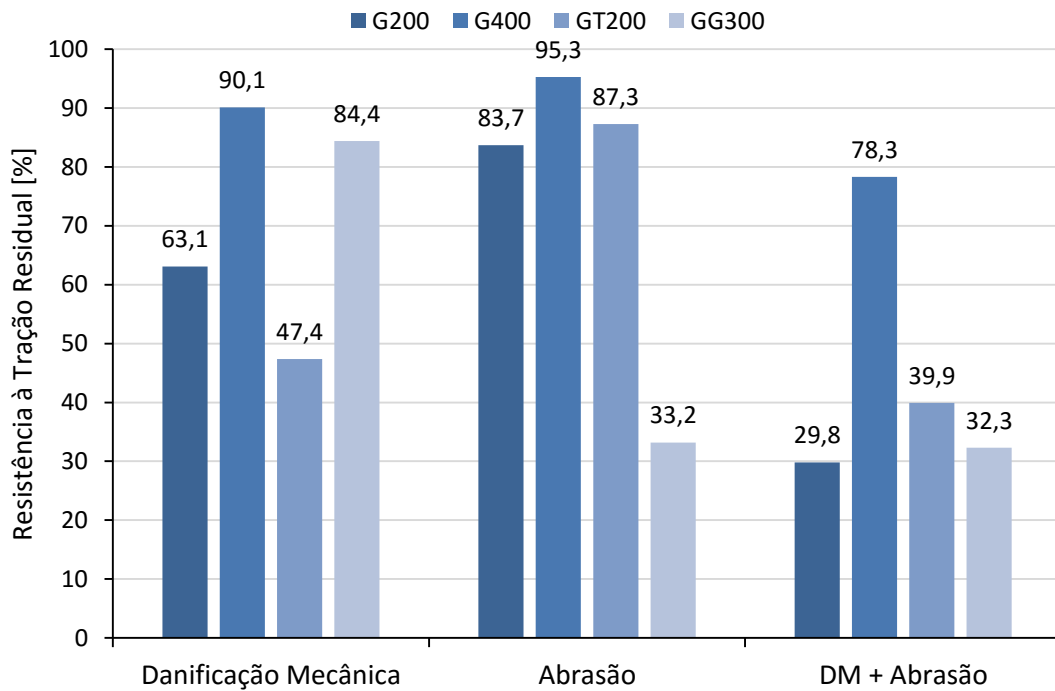


Fig. 5.14 – Resistência à tração residual dos geossintéticos após os ensaios de degradação.

A análise da Fig. 5.14 permite concluir que :

- Entre os geotêxteis não-tecidos, o geotêxtil G200 foi o mais danificado (maior redução da resistência à tração) em todos os mecanismos de degradação. Desta forma, a MUA e a espessura tiveram um efeito relevante na resistência dos materiais à degradação.
- Para os geotêxteis G200, G400 e GT200, a abrasão foi o mecanismo de degradação que menos influência teve na resistência à tração dos materiais. Por outro lado, para a geogrelha GG300, a abrasão provocou uma maior diminuição da resistência à tração do que a DM.
- A exposição sucessiva à DM e à abrasão originou uma redução da resistência à tração maior do que as exposições individuais aos agentes de degradação.

O geotêxtil G400 foi o material com maior resistência aos ensaios de degradação, apresentando sempre valores de resistência à tração residual superiores a 75%.

5.6.2. RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO RESIDUAL

A Fig. 5.15 resume os valores da resistência ao punçoamento residual dos geossintéticos após os ensaios de degradação.

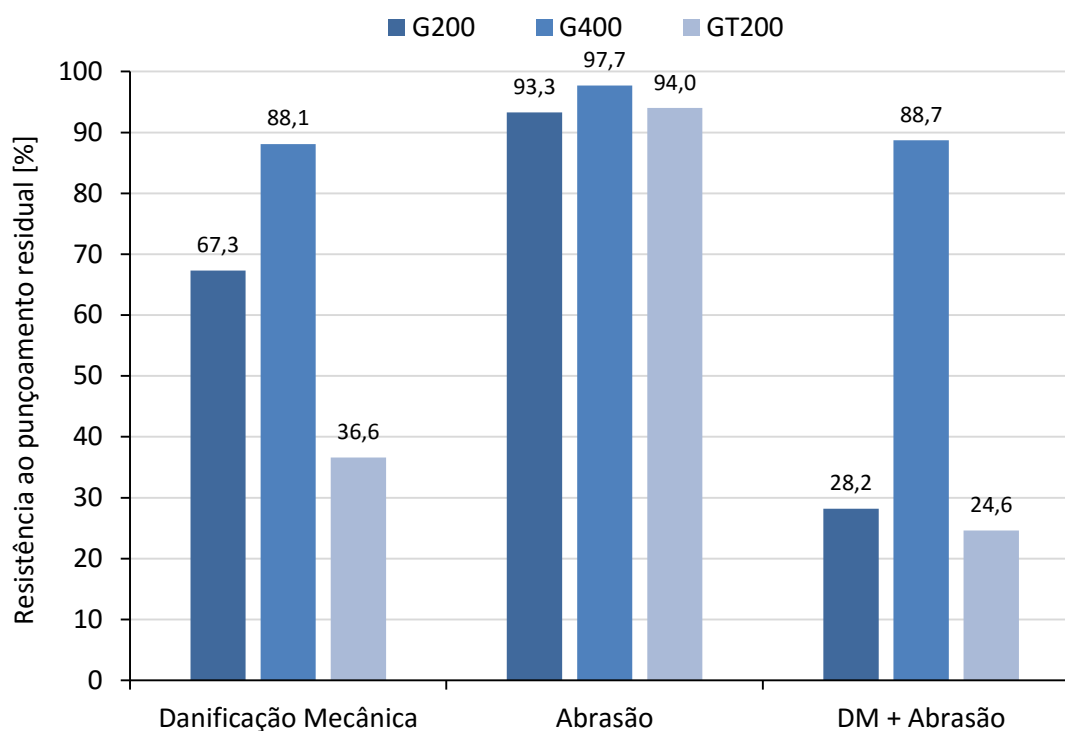


Fig. 5.15 – Resistência ao punçoamento residual dos geossintéticos após os ensaios de degradação.

A análise da Fig 5.15 permite concluir que:

- A DM provocou uma maior diminuição da resistência ao punçoamento do que a abrasão (resistências ao punçoamento residuais superiores a 90% em todos os casos).
- A exposição sucessiva dos geotêxteis G200 e GT200 aos dois mecanismos de degradação provocou uma grande diminuição da resistência ao punçoamento dos materiais (resistências ao punçoamento residuais inferiores a 30%).
- O geotêxtil G400 apresentou valores de resistência ao punçoamento residual superiores a 80% depois dos vários ensaios de degradação.

5.6.3. PERMEABILIDADE À ÁGUA NORMAL AO PLANO

Na Fig. 5.16 são apresentados os resultados dos valores de VI_{H50} obtidos para os geotêxteis G200 e G400, através desta é possível ter uma maior percepção das diferenças entre estes dois geotêxteis em termos de valor de VI_{H50} .

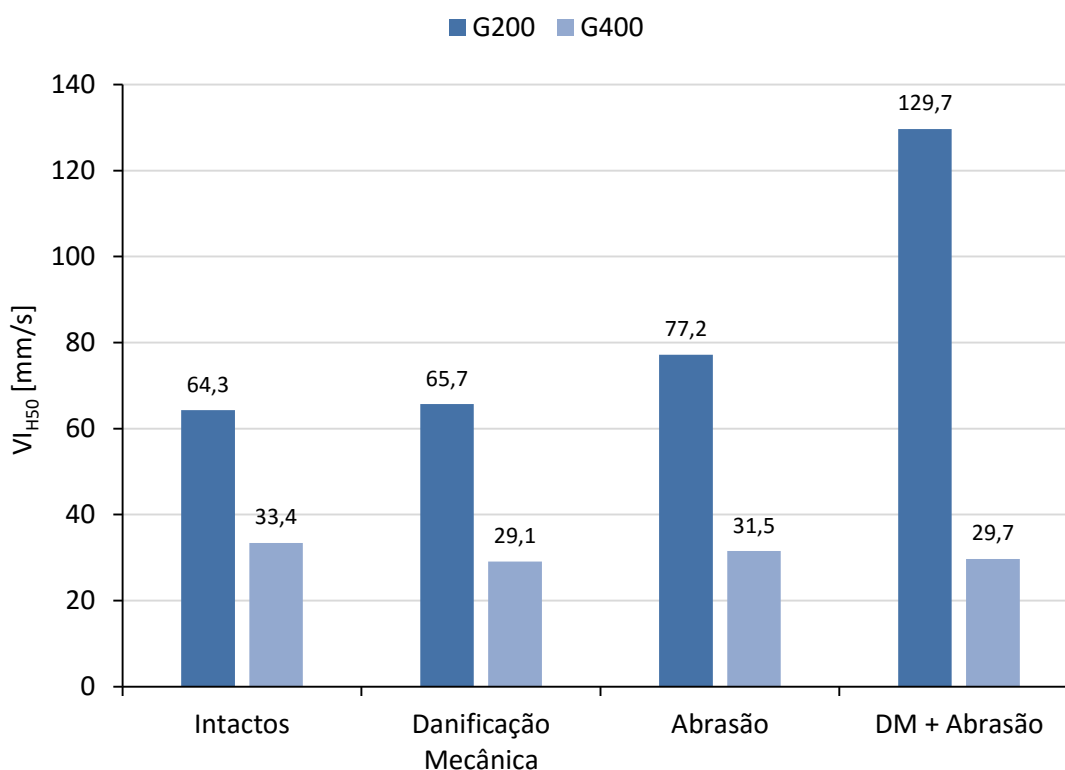


Fig. 5.16 – Velocidade de escoamento para a perda de carga de 50 mm (VI_{H50}) dos geotêxteis G200 e G400.

Ao fazer a análise da Fig. 5.16 pode-se concluir que:

- Os valores de VI_{H50} do geotêxtil G400 foram muito semelhantes tanto para as amostras danificadas como para as amostras intactas, o que significa que os danos ocorridos nos ensaios de degradação não causaram alterações muito relevantes nesta propriedade hidráulica.
- Quando o geotêxtil G200 sofreu DM o valor de VI_{H50} , também, não sofreu grandes alterações.
- Por outro lado, quando o geotêxtil G200 sofreu danificação provocada pela abrasão (isolada) passou de 64,3 mm.s⁻¹ para 77,2 mm.s⁻¹. Após a exposição sucessiva aos dois mecanismos de degradação, o valor de VI_{H50} foi muito mais elevado (aproximadamente o dobro do valor obtido para as amostras intactas).

5.6.4. COEFICIENTES DE REDUÇÃO PARA A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

No Quadro 5.10 estão resumidos os coeficientes de redução obtidos para a resistência à tração (coeficientes calculados de acordo com as expressões 14, 15 e 16 do capítulo 4).

Quadro 5.10 – Coeficientes de redução para a resistência à tração dos geossintéticos em estudo.

	DM	Abrasão	DM + Abrasão
G200	1,58	1,19	3,36
G400	1,11	1,05	1,28
GT200	2,11	1,15	2,50
GG300	1,19	3,01	3,09

Através da análise do Quadro 5.10 conclui-se que:

- Para os geotêxteis G200, G400 e GT200, os coeficientes de redução mais baixos foram obtidos após a danificação por abrasão (próximos de 1,00).
- No geotêxtil G200, o valor do coeficiente de redução quase duplicou quando os mecanismos de degradação atuaram em conjunto (3,36) comparativamente à ação individual da DM (1,58).
- Os menores valores obtidos para os coeficientes de redução foram obtidos para o geotêxtil G400.
- No geotêxtil GT200, os valores dos coeficientes de redução obtidos para a ação individual da DM e para a ação combinada da DM e abrasão foram muito próximos e bastante superiores a 1,00.
- Na geogrelha GG300, o coeficiente de redução quando sofreu efeito da DM (isolada) foi muito próximo de 1,00 (1,19), o que resulta do facto deste tipo de degradação causar uma perda de resistência à tração mais reduzida neste material.
- Os coeficientes de redução obtidos quando a geogrelha foi sujeita apenas à abrasão e quando exposta sucessivamente à DM e abrasão foram muito próximos (3,01 e 3,09).

Através da Fig. 5.17 é possível estabelecer a comparação entre os coeficientes de segurança obtidos para o efeito combinado da DM e abrasão pela metodologia tradicional (determinação dos coeficientes individualmente para cada agentes e posterior multiplicação dos mesmos) e pela exposição sucessiva aos dois agentes de degradação.

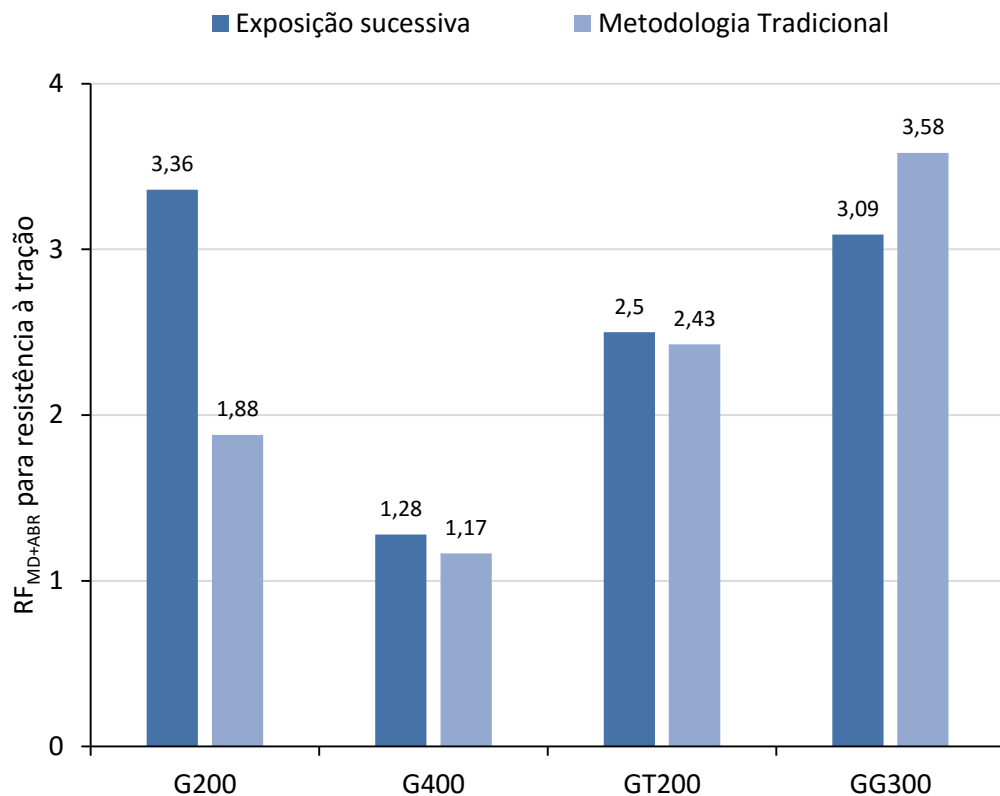


Fig. 5.17– Comparação dos dois métodos de cálculo dos coeficientes de segurança.

A análise da Fig. 5.17 permite concluir que:

- Para o geotêxtil G200, a metodologia tradicional está longe da segurança, dado que o coeficiente de redução obtido na exposição sucessiva aos mecanismos de degradação (3,36) foi muito superior ao obtido pela metodologia tradicional (1,88).
- Para o geotêxtil G400 e para o geotêxtil GT200, apesar da metodologia tradicional não estar do lado da segurança, os coeficientes de redução não foram muito distantes (coeficientes ligeiramente inferiores).
- Na geogrelha GG300, e ao contrários dos geossintéticos anteriores, o coeficiente de redução obtido pela metodologia tradicional foi superior ao da exposição sucessiva aos dois agentes de degradação, estando neste caso do lado da segurança.

5.6.5. COEFICIENTES DE REDUÇÃO PARA A RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

No Quadro 5.11 encontram-se os valores dos coeficientes de redução obtidos para o ensaio de punçoamento estático.

Quadro 5.11 – Coeficientes de redução para a resistência ao punçoamento dos geossintéticos em estudo.

	DM	Abrasão	DM + Abrasão
G200	1,48	1,07	3,55
G400	1,14	1,02	1,13
GT200	2,73	1,06	4,06

Através da análise do Quadro 5.11 conclui-se que:

- Para os três geotêxteis, os valores dos coeficientes de redução mais baixos foram para a situação em que estiveram expostos apenas à abrasão (mecanismo que menos danificação causou nos materiais).
- No geotêxtil G200, o valor do coeficiente de redução passou para mais do dobro do valor de quando os mecanismos de degradação atuaram em conjunto (3,55) comparativamente ao valor obtido para a ação isolada da DM (1,48).
- No caso do geotêxtil G400, os valores dos coeficientes de redução foram todos próximos de 1,00 (o material sofreu apenas pequenas reduções da resistência ao punçoamento em todos os ensaios de degradação)
- No geotêxtil GT200, o valor do coeficiente de redução para ação isolada da DM foi elevado (2,73), embora menor que o coeficiente de redução obtido para a ação simultânea da DM e abrasão (4,06).

Através da Fig. 5.18 é possível estabelecer a comparação entre os coeficientes de redução obtidos para a resistência ao punçoamento pelo efeito combinado da DM e abrasão pela metodologia tradicional e entre a exposição sucessiva aos estes dois mecanismos de degradação.

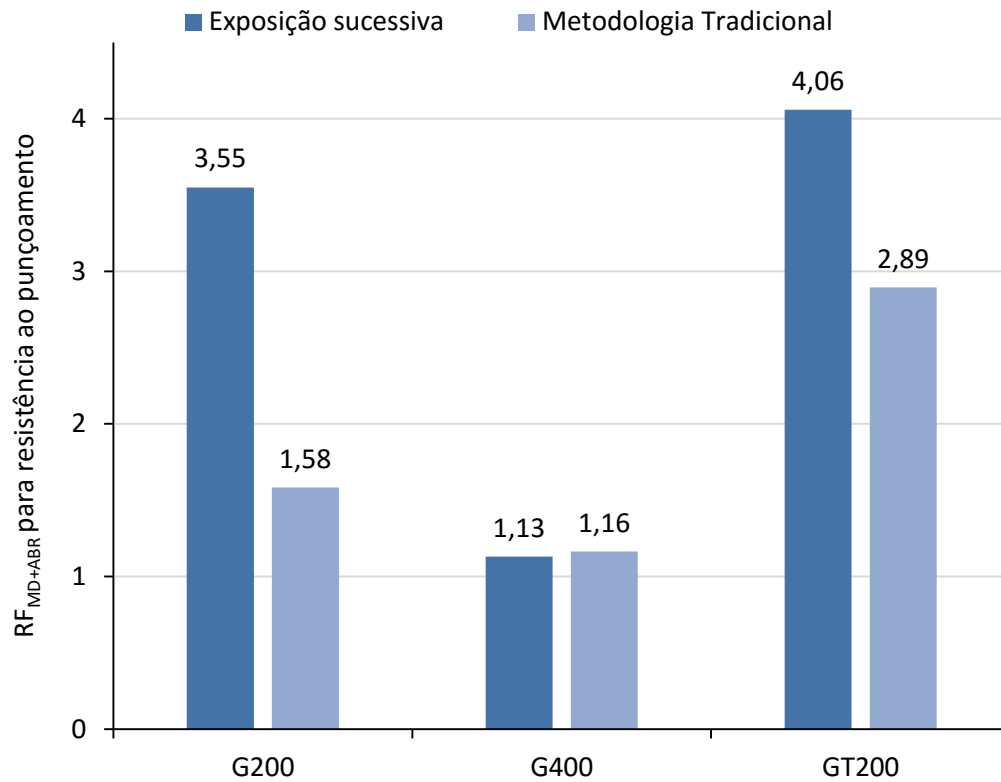


Fig. 5.18 – Comparação dos dois métodos de cálculo dos coeficientes de redução.

Ao fazer a análise da Fig. 5.18, relativa aos coeficientes de segurança obtidos para a resistência ao punçoamento, pode-se concluir que:

- Para os geotêxteis G200 e GT200, a metodologia tradicional não está do lado da segurança, uma vez que os coeficientes de redução obtidos foram inferiores aos obtidos na exposição sucessiva aos dois agentes de degradação.
- No caso do geotêxtil G400, ambas as metodologias deram origem a coeficientes de redução muito próximos.

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho consistiu na exposição de vários geossintéticos a diferentes mecanismos de degradação mecânica. Inicialmente, os materiais foram expostos isoladamente à danificação mecânica sob carga repetida e à abrasão. Posteriormente, foram expostos sucessivamente aos dois agentes de degradação, sendo primeiro expostos à danificação mecânica sob carga repetida e depois sujeitos ao mecanismo de abrasão. A caracterização dos danos ocorridos foi realizada por inspeção visual, por ensaios de tração, por ensaios de punçoamento estático e, quando aplicável, por ensaios de determinação da permeabilidade à água normal ao plano.

Comparando os resultados obtidos para os geotêxteis não-tecidos G200 e G400, foi possível concluir que a danificação ocorrida no geotêxtil G200 foi maior na medida em que as reduções de resistência à tração e da resistência ao punçoamento foram maiores no geotêxtil G200 do que no geotêxtil G400. Como são materiais com o mesmo processo de fabrico (ambos do mesmo produtor), onde as principais diferenças são a espessura e a massa por unidade de área, concluiu-se que estas propriedades tiveram uma grande influência na resistência dos materiais à degradação. Este facto corrobora os resultados obtidos por Allen e Bathurst (1994) e por Pinho-Lopes e Lopes (2015).

Ao comparar os resultados obtidos no geotêxtil G200 com os resultados obtidos para o geotêxtil GT200, apesar destes materiais terem a mesma MUA, estes geotêxteis têm processos de fabrico diferentes, o que influenciou a forma de como estes materiais reagiram aos mecanismos de degradação. Na verdade, o geotêxtil G200 obteve valores mais elevados de resistência do que o GT200.

Quando os geotêxteis G200, G400 e GT200 foram expostos aos mecanismos de degradação de forma isolada, o mecanismo que mais os degradou, tanto para a resistência à tração como para a resistência ao punçoamento, foi a ação da danificação mecânica sob carga repetida. Ao contrário dos restantes materiais, a geogrelha GG300 quando sujeita aos mecanismos de degradação a atuar de forma isolada, apresentou maiores reduções de resistência quando exposta à abrasão.

Para o geotêxtil G200, o mecanismo de degradação que provocou um maior aumento do valor de VI_{H50} foi a abrasão (aumento de cerca de 20%). Por outro lado, no geotêxtil G400 o valor desta propriedade não sofreu grande alteração, na verdade, tanto as amostras intactas como as amostras danificadas, apresentaram valores muito semelhantes.

A ação sucessiva dos dois mecanismos de degradação mecânica originou maiores alterações nas propriedades dos geossintéticos do que quando expostos às suas ações isoladas. A geogrelha GG300 foi na única exceção visto que a sua perda de propriedades foi muito semelhante quando exposta à abrasão (exposição isolada) e quando exposta à ação sucessiva dos dois mecanismos de degradação, o

que deve ao facto de o ensaio de abrasão ser tão destrutivo que os efeitos da DM desapareceu, visto que há destruição total dos filamentos e das ligações entre filamentos.

Em suma, o geossintético menos afetado pelos dois mecanismos de degradação foi o geotêxtil G400. Assim, concluiu-se que este geossintético é o material mais resiliente na medida em que sofreu menos alterações das suas propriedades quando exposto aos mecanismos de degradação.

Em relação à análise dos coeficientes de redução para a resistência à tração e para a resistência ao punçoamento, chegou-se à conclusão que para os geotêxteis a metodologia tradicional não está do lado da segurança, visto que apresentou valores de coeficientes de redução mais baixos do que os coeficientes de redução na exposição sucessiva. Por outro lado, na geogrelha GG300 a metodologia tradicional foi conservativa na medida em que apresentou valores mais elevados de coeficientes de redução do que a exposição sucessiva. Apesar deste trabalho apenas incidir numa análise experimental, o facto da metodologia tradicional não estar do lado da segurança pode ser um problema, dado que na realidade os geossintéticos dificilmente estarão expostos a um único agente de degradação.

No estudo realizado por Pinho-Lopes e Lopes (2015), estes autores concluíram que para a análise da resistência à tração, a metodologia tradicional foi conservativa para a geogrelha o que está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho. Por outro lado, para o geotêxtil, a metodologia tradicional e a metodologia de exposição sucessiva dos dois mecanismos de degradação, os valores dos coeficientes de redução (obtidos a partir dos resultados da resistência à tração) foram muito próximos. Este resultado não está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho o que pode ser devido ao facto de que no estudo feito por Pinho-Lopes e Lopes, ser usado um geotêxtil com uma MUA muito superior à MUA dos geotêxteis utilizados neste trabalho.

No estudo realizado por Carvalho (2014), este autor realizou ensaios de degradação mecânica a um geocompósito com função de reforço. Este autor obteve resultados (obtidos através do ensaio de resistência à tração) para o lado do geocompósito com filamentos semelhantes (entre 1 e 2) aos valores obtidos neste trabalho para os dois geotêxteis não tecidos (G200 e G400).

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste trabalho realizaram-se apenas 5 ensaios para cada propriedade, o que corresponde a um número muito reduzido de amostras, pelo que seria interessante realizar mais ensaios o que possibilitaria obter resultados finais mais fiáveis. Seria também interessante efetuar um estudo das propriedades a longo prazo, como por exemplo expor os geossintéticos à danificação mecânica e à fluência.

Outro estudo também pertinente seria avaliar a sinergia existente entre a danificação mecânica sob carga repetida e a abrasão, mas no ensaio de danificação mecânica sob carga repetida utilizar outro tipo de solo. De facto, poderia ser importante usar solos naturais que possibilitem uma melhor adequação ao que se passa na realidade ou recorrer ao uso de resíduos de construção e demolição (RCD) que podem ser utilizados como material de aterro.

Para o ensaio de danificação mecânica sob carga repetida, seria interessante fazer variar as condições do ensaio, como o número total de ciclos de carga/descarga ou mudar a energia de compactação. Em relação ao estudo do fenómeno da abrasão, pode ser interessante mudar a superfície rugosa do abrasivo ou fazer variar o número de ciclos.

Neste estudo foi feita uma análise da alteração das propriedades de alguns geossintéticos quando expostos a mecanismos de degradação mecânica. Seria interessante fazer uma análise das propriedades

analisadas neste trabalho quando os mesmos materiais fossem expostos a mecanismos de degradação mecânica e a outro tipo de degradação, como por exemplo degradação biológica e química.

No presente trabalho fez-se um estudo para dois geotêxteis não-tecidos sujeitos aos mesmos tipos de degradação, onde apenas diferiram na espessura e na MUA. Também seria pertinente fazer uma análise a mais do que um tipo de geotêxtil tecido e a mais do que uma geogrelha para estabelecer uma comparação entre a alteração de propriedades para materiais do mesmo tipo.

Para estabelecer uma relação entre os ensaios de laboratório com a realidade, também seria importante fazer ensaios *in situ*, como por exemplo a danificação mecânica em aterros experimentais que iriam possibilitar obter valores das alterações nas propriedades dos materiais mais próximas do que se passa em obra durante a instalação de geossintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, T. M. e Bathurst, R.J. “*Characterization of Geosynthetics Load-Strain Behavior After Installation Damage*”, Geosynthetics International, vol. 1, nº 2, 181 -199
- Anand, S. C., 2000, “Technical fabric structures – 2. Knitted fabrics” Capítulo no livro “*Handbook of Technical Textiles*” Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 95-129.
- Austin, R. A. 1998 “*Installation Effects on Geosynthetics*”. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Reino Unido, pp. 3.2.1 - 3.2.10.
- Austin, R. A. 1998. “*Installation Effects on Geosynthetics*”. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Reino Unido, pp. 3.2.1 - 3.2.10.
- Braü, G. 1998. “*Experience with damage during installations in Germany – Field and laboratory testing*”. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, Leatherhead, Reino Unido, 41- 44.
- Brown, R. P., Greenwood, J. H.. 2002. *Practical Guide to the Assessment of the Useful Life of Plastics*. Reino Unido: Rapra Technology Limited.
- Carneiro, J. R., 2009. “*Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – A importância da incorporação de aditivos químicos*”. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto.
- Carneiro, J. R., Rosete, A., Paula, A. M., Pinho-Lopes, M., Almeida, P. J., Lopes, M. L. 2012. “*Determinação de coeficientes de segurança a usar no dimensionamento de geotêxteis*”. Atas de VI Luso-Brasileiro de Geotecnia, CD-ROM, Lisboa, 10p.
- Carneiro, J. R., Paula, A. M., Pinho-Lopes, M., Almeida, P. J., 2014a. “*Resistance of geotextiles against mechanical and chemical degradation*”. Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, Pen-Drive, Berlim, Alemanha, 8p.
- Carneiro, J. R., Almeida, P. J., Lopes, M. L. 2014b. “*Some synergisms in the degradation o polypropylene geotextiles*”. Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics, Pen-Drive, Australia, 754-761.
- Carvalho, F. 2014. “*Resistência de Um Geocompósito de Reforço à Danificação Durante a Instalação E à Abrasão.*”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto.
- Christopher, B. R., Elias, V., 1998. “*Evaluation of Installation Damage in Geosynthetics: A US Perspective.*” In Seminar Volume on Installation Damage in Geosynthetics, Leatherhead, Reino Unido, 1.2.1–1.2.12
- Comissão Portuguesa de Geossintéticos. IGS Portugal. Consultado em 15 Fevereiro 2016. Disponível em: <http://www.spgeotecnia.pt/igs/>
- Crawford, R.J. 1998. *Plastics Engineering*. 3ª edição. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Estácio, A 2005 “*Aplicação de Geossintéticos Em Linhas-Férreas Abrasão Nos Materiais*”. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto.
- GeoAmerica 2016. 3ª Conferência dos Geossintéticos América. Miami, EUA. Consultado em 21 Fevereiro 2016. Disponível em: <http://www.geoamericas2016.org/>

- Hausmann, M.R. e Ring, G. J. 1990. “*Abrasion of geotextiles in railway track applications*”. Proceedings of 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Holanda, 193-196.
- Huang, C. C., Tzeng, Y. S., e Liao, C. J. 2007. “*Laboratory Tests for Simulating Abrasion Damage of a Woven Geotextile*.” Geotextiles and Geomembranes 25 (4-5): 293–301.
- Huang, C. C., e Liao C. C. 2007. “*Abrasion Damage of Geogrids Induced by Turbid Flow*.” Geotextiles and Geomembranes 25 (2): 128–138.
- Hufenus, R., Rüegger, R., Flum D., e Sterba, I. J. 2005. “*Strength Reduction Factors due to Installation Damage of Reinforcing Geosynthetics*.” Geotextiles and Geomembranes 23 (5): 401–424.
- Ingold, T. e Miller, K. S. 1998. “*Geotextiles Handbook*”. Thomas Telford LTDA, Londres, Inglaterra.
- Koerner, Robert M. 1998. “*Designing with Geosynthetics*”. Editado por Pearson Prentice Hall. 5^a ed. Estados Unidos da América.
- Lopes, M.L. 1992. “*Muros Reforçados Com Geossintéticos*.” Tese de Doutorado, Universidade do Porto.
- Lopes, M. L. 2005. “*Apontamentos de Apoio às Aulas da disciplina de Aplicação de geossintéticos a obras de engenharia civil*” FEUP.
- Mills, W. K. e Beckham, W. H. 1935. “*Cotton-Fabric-Reinforced Roads*” 115. Engineering News-Record, 453–455.
- Paula, A.. 2003. Dissertação de Mestrado. “*Danificação Durante a Instalação Avaliação Laboratorial Da Influência No Comportamento Dos Geossintéticos*”. Universidade do Porto.
- Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. 2010. “*A Durabilidade Dos Geossintéticos*”. 1^a ed. Porto: FEUP edições.
- Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. 2014. “*Tensile properties of geosynthetics after installation damage*”. Environmental Geotechnics, Vol. 1, 161-178.
- Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. L. 2015. “*Synergisms between Laboratory Mechanical and Abrasion Damage on Mechanical and Hydraulic Properties of Geosynthetics*.” Transportation Geotechnics: 50-63.
- Raymond, G. P. 1982. “*Geotextiles for Railroad Bed Rehabilitation*.” Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, 479–484, Las Vegas, EUA.
- Sociedade Internacional dos Geossintéticos. IGS Internacional. Consultado em 15 Fevereiro 2016. Disponível em: <http://www.geosyntheticssociety.org/>
- Shukla, S.K. 2002 “*Geosynthetics and Their Applications*”. Thomas Telford Publishing, Londres, Reino Unido
- Standards for Highways online resources. Consultado em 15 de Janeiro de 2016. Disponível em: <http://www.dft.gov.uk/ha/standards/ghost/mchw/vol1/index.htm>.
- Van Dine, D., Williams, S. E. e Raymond, G.P. 1982. “*An Evaluation of Abrasion Tests for Geotextiles*”. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, EUA, 811-816.
- Vieira, C. S. e Lopes M. L. 2013. “*Effects of the Loading Rate and Cyclic Loading on the Strength and Deformation Properties of a Geosynthetic*.” Construction and Building Materials 49: 758–765.

Watn, A. e Chew, S.H. 2002. “*Geosynthetic Damage - from Laboratory to Field*”. Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Vol. 4, Nice, França, pp. 1203-1226.

NORMAS E ESPECIFICAÇÕES:

BS 8006-2:2011: Code of practice for strengthened/reinforced soils. Soil nail design.

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

ISO/TR 20432:2007: Guideline for determination of long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.

ISO/TR 20432:2007: Guideline for determination of long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.

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

NP EN ISO 9864:2006 – Geossintéticos – Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados (versão Portuguesa da norma EN ISO 9864:2005).

NP EN ISO 10319:2005 – Geotêxteis – Ensaio de tração em tiras largas (versão Portuguesa da norma EN ISO 10319:1996).

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

NP EN ISO 12236:2008 – Geossintéticos – Ensaio de punçoamento estático (ensaio CBR) (versão Portuguesa da norma EN ISO 12236:2006).

WSDOT Standard Practice T925: Washington State Department of transportation. Standard practice for determination of long-term strength of geosynthetics. State Materials Laboratory, Tumwater, WA, 2006.

