

Resistência de um geocompósito de reforço à danificação durante a instalação e à abrasão

FILIPA DANIELA FERNANDES CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutor Maria de Lurdes da Costa Lopes

Co-Orientador: Doutor José Ricardo da Cunha Carneiro

JUNHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

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 - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

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

"Isn't it funny how day by day nothing changes, but when you look back, everything is different?"

C. S. Lewis

AGRADECIMENTOS

No final desta etapa manifesto os meus profundos e sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para que este trabalho 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 disponibilidade, paciência, dedicação e apoio demonstrados,
- Aos meus amigos que me acompanharam neste percurso e que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho,
- Aos meus pais, pelo amor, carinho, pelos sacrifícios, pela compreensão e encorajamento demonstrado todos estes anos.

RESUMO

A aplicação de geossintéticos em obras de engenharia civil tem vindo a aumentar ao longo dos últimos anos. Por esse motivo, as questões relativas à sua durabilidade têm vindo a ganhar cada vez mais importância. A investigação desenvolvida nos últimos anos permitiu compreender melhor o comportamento destes materiais e as estruturas onde são aplicados. Embora a durabilidade esteja relacionada com a longevidade, as propriedades dos geossintéticos podem também ser alteradas pelo seu manuseamento e processos de instalação, pelo é que importante a avaliação desses efeitos.

Este trabalho estuda os efeitos dos processos de instalação e dos fenómenos de abrasão nas propriedades mecânicas de um geocompósito de reforço. O geocompósito era constituído por um geotêxtil não-tecido e por filamentos de poliéster.

O geocompósito de reforço foi submetido aos agentes de degradação (simulações laboratoriais), primeiro de forma isolada (exposição única) e depois de forma sucessiva (exposição dupla). Dado o geocompósito possuir dois lados com características diferentes (com ou sem filamentos), os processos de degradação foram considerados para ambos os lados.

Os danos ocorridos no geocompósito de reforço foram caracterizados por análise visual e por ensaios mecânicos de tração-extensão e rasgamento (as propriedades mecânicas foram determinadas em ambas as direções de produção). As propriedades obtidas para as amostras danificadas foram comparadas com as propriedades das amostras intactas. Deste modo, foi possível avaliar o grau de danificação do geocompósito.

De um modo geral, os processos de danificação provocaram o corte, emaranhamento e enrugamento de filamentos, formação de aglomerados de fibras e filamentos e rompimento de costuras. A diminuição da resistência à tração e ao rasgamento foi mais pronunciada na exposição sucessiva do geocompósito à danificação durante a instalação e à abrasão. Quando danificado de forma isolada, a danificação durante a instalação foi, na maioria dos casos, mais gravosa do que a abrasão. No geral, o geocompósito de reforço foi mais afetado pelos processos de degradação quando ensaiado no lado com filamentos. A maior diminuição das propriedades mecânicas ocorreu no lado com filamentos para a direção de fabrico.

PALAVRAS-CHAVE: Geossintético, Geocompósito de reforço, Danificação durante a instalação, Abrasão, Resistência mecânica

ABSTRACT

The application of geosynthetics in civil engineering works has been increasing over the past few years. For this reason, the issues concerning their durability have been gaining more and more importance. The research developed in recent years allows a better understanding of the behavior of these materials and structures where they are applied. Although durability is related to longevity, the properties of the geosynthetics can also be altered by their handling and installation processes, therefore it is important the evaluation of these effects.

This paper studies the effects of the installation processes and abrasion on the mechanical properties of a reinforcement geocomposite. The geocomposite was formed by a non-woven geotextile and polyester filaments.

The reinforcement geocomposite was submitted to the degradation agents (laboratory simulations), first in isolation (single exposure) and then successively (double exposure). Since the geocomposite had two sides with different characteristics (with or without filaments), the degradation processes were considered for both sides.

The damages occurred in the geocomposite were characterized by visual analysis and by tensile and tearing tests (the mechanical properties were determined in both directions of production). The properties obtained for damaged samples were compared with the properties obtained for intact samples. This way, it was possible to assess the degree of degradation of the geocomposite.

In general, the degradation processes caused the cut, tangling and wrinkling of the filaments, formation of agglomerates of fibers and filaments and rupture of seams. The decreases in resistance (tensile and tearing) were more pronounced in the successive exposure of the geocomposite to damage during installation and abrasion. When damaged in isolation, damage during installation was, in most cases, more damaging than abrasion. In general, the reinforcement geocomposite was more affected by the degradation processes when tested on the side with filaments. The largest decrease of the mechanical properties occurred in the side with filaments in the machine direction.

KEYWORDS: Geosynthetic, Reinforcement geocomposite, Damage during installation, Abrasion, Mechanical strength

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
 2. GEOSSINTÉTICOS	 3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.2 HISTÓRIA	3
2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES	4
2.4 TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS	5
2.4.1 GEOCOMPÓSITOS	7
2.4.2 GEOCOMPÓSITO EM ESTUDO	8
2.5 PROCESSOS DE FABRICO	9
2.5.1 GEOTÊXTEIS	10
2.5.2 GEOGRELHAS	11
2.5.3 GEORREDES	11
2.5.4 GEOMEMBRANAS	11
2.6 PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS	12
2.6.1 PROPRIEDADES FÍSICAS	12
2.6.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	13
2.6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS	13
2.6.4 PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE	14
2.7 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS	14
2.7.1 SEPARAÇÃO	14
2.7.2 BARREIRA DE FLUIDOS	15
2.7.3 FILTRAGEM	15
2.7.4 DRENAGEM	16
2.7.5 REFORÇO	16

2.7.6	PROTEÇÃO	17
2.7.7	CONTROLO DA EROSÃO.....	17

3. DANIFICAÇÃO DO GEOCOMPÓSITO DE REFORÇO POR DDI E ABRASÃO 19

3.1	INTRODUÇÃO.....	19
3.2	DANOS PROVOCADOS PELA DDI	20
3.3	FATORES QUE INFLUENCIAM A DDI.....	22
3.3.1	FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE GEOSSINTÉTICOS	22
3.3.2	FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE SOLO	23
3.3.3	INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO	23
3.4	MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO	23
3.5	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA DDI	25
3.5.1	AVALIAÇÃO IN-SITU DA DDI – ATERROS TEMPORÁRIOS.....	25
3.5.2	SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA DDI	26
3.5.3	DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL DA DDI	27
3.6	DANOS PROVOCADOS PELA ABRASÃO.....	30
3.7	MÉTODO DE SIMULAÇÃO LABORATORIAL	31

4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO 37

4.1	INTRODUÇÃO.....	37
4.2	ENSAIO DE ESPESSURA	37
4.2.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	37
4.2.2	RESULTADOS DO ENSAIO DOS PROVETES INTACTOS.....	39
4.3	MASSA POR UNIDADE DE ÁREA	39
4.3.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	39
4.3.2	RESULTADOS DO ENSAIO DOS PROVETES INTACTOS.....	40
4.4	ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	41
4.4.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	41
4.4.2	RESULTADOS OBTIDOS NAS COLAGENS TESTE	43
4.4.3	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO EM PROVETES INTACTOS	45
4.5	ENSAIO DE RASGAMENTO	48
4.5.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO	48
4.5.2	RESULTADOS OBTIDOS NAS COLAGENS DE TESTE	49

4.5.3	RESULTADOS OBTIDOS.....	51
4.6	RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	53
4.6.1	DESCRIÇÃO DO ENSAIO.....	53
4.6.2	RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TESTE	54
5.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	55
5.1	INTRODUÇÃO	55
5.2	ANÁLISE VISUAL.....	57
5.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO	60
5.3.1	PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO	60
5.3.2	PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO.....	62
5.3.3	PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DE FABRICO	64
5.3.4	PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DE FABRICO	66
5.3.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	68
5.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RASGAMENTO	69
5.4.1	PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO	69
5.4.2	PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO.....	69
5.4.3	PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DE FABRICO .	70
5.4.4	PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR DE FABRICO	71
5.4.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
6.1	CONCLUSÕES	73
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	74
	BIBLIOGRAFIA	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1: Classificação dos geossintéticos segundo a sua estrutura	5
Fig. 2.2: Alguns exemplos de geossintéticos: a) geotêxteis, b) geogrelha, c) georrede, d) geomembrana, e) geocompósito de drenagem, f) geocompósito de reforço	6
Fig. 2.3: Exemplos de geocompósitos a) geocompósito de reforço, b) geocompósito de drenagem, c) geocompósito de barreira de fluidos	8
Fig. 2.4: Geocompósito de reforço em estudo – RockPec 40/40.....	9
Fig. 2.5: Geocompósito de reforço em estudo a) DF- direção de fabrico,	9
Fig. 2.6: a) Representação esquemática da função de separação; b) exemplo de uso de um geossintético separador	15
Fig. 2.7: a) Representação esquemática da função de barreira de fluidos; b) exemplo de uso de um geossintético como barreira de fluidos.....	15
Fig. 2.8: a) Representação esquemática da função de filtragem; b) exemplo de uso de um geossintético como filtro.....	16
Fig. 2.9: a) Representação esquemática da função de drenagem; b) exemplo do uso de um geossintético drenante	16
Fig. 2.10: a) Representação esquemática da função de reforço; b) Exemplo de uso de um geossintético de reforço	17
Fig. 2.11: a) Representação esquemática da função de proteção; b) exemplo de uso de um geossintético de proteção	17
Fig. 2.12: a) Representação esquemática da função de controlo de erosão; b) exemplo de uso de um geossintético de controlo de erosão.....	17
Fig. 3.1: Geogrelha extrudida de PE com evidente aparecimento de fendas e separação de material	20
Fig. 3.2: Mecanismo de danificação por punçoamento	20
Fig. 3.3: Mecanismo de danificação por rotura em tensão	21
Fig. 3.4: Passos base para a colocação dos geossintéticos em obra	24
Fig. 3.5: Seção de aterros experimentais de acordo com a BS 8006.....	26
Fig. 3.6: Pirâmide invertida.....	27
Fig. 3.7: Partes constituintes do equipamento de simulação da DDI: a) Aspeto geral do equipamento de DDI, b) Representação Esquemática da caixa de danificação: 1- base rígida, 2- caixa de danificação, 3- sentido de aplicação da carga, 4-placa de carregamento 5- geossintético, 6- corundum c) Caixa de danificação, d) placa de compactação, e) Placa de carregamento, f) agregado sintético (corundum)	28
Fig. 3.8: Enchimento e compactação da caixa inferior com <i>corundum</i> : a) Colocação da 1ª camada, b) compactação da 1ª camada, c) colocação da 2ª camada, d) compactação da 2ª camada	29
Fig. 3.9: a) Colocação do provete, b) colocação da parte superior da caixa, c) Enchimento com <i>corundum</i>	30

Fig. 3.10: a) Equipamento de simulação laboratorial de abrasão com plataforma rotativa, b) funcionamento do equipamento	32
Fig. 3.11: a) Representação esquemática do aparelho de simulação da abrasão, b) equipamento de simulação do dano por abrasão	33
Fig. 3.12: a) prato superior com provete montado, b) fixação na garra oposta ao esticador, c) fixação na garra do lado do esticador (esticador não ajustado), d) provete após ajuste do esticador	34
Fig. 3.13: a) abrasivo P100 fixado ao prato inferior, b) pormenor das garras de fixação do prato inferior	34
Fig. 3.14: a) prato superior colocado em cima do prato inferior, b) equipamento preparado para o ensaio	35
Fig. 4.1: Equipamento para medição da espessura de geossintéticos: a) equipamento fechado, b) equipamento com peso instalado durante a medição da espessura do geocompósito	38
Fig. 4.2: Ensaio de massa por unidade de área. a) medição de um provete com craveira,	40
Fig. 4.3: Equipamento usados nos ensaios de tração-extensão	41
Fig. 4.4: Disposição dos pontos de referência nos provetes de tração-extensão.....	42
Fig. 4.5: Garras disponíveis no LGS da FEUP: a) garras cilíndricas, b) garras hidráulicas, c) garras pneumáticas, d) garras em cunha.	43
Fig. 4.6: Colagem tipo dos provetes do GRC a usar no ensaio de tração-extensão. a) provete sem cola, b) e e) provete com cola, c) e f) colocação do varão, d) e g) colagem do varão, h) colocação de pesos para melhor eficiência na colagem.	44
Fig. 4.7: Curvas força-extensão individuais de 10 provetes, na direção de fabrico.....	46
Fig. 4.8: Curvas força-extensão individuais de 10 provete, na direção perpendicular de fabrico.....	47
Fig. 4.9: Representação esquemática do provete de rasgamento	48
Fig. 4.10: Ensaio de rasgamento do GCR: a) início do ensaio, b) e c) durante o ensaio, d) final do ensaio	48
Fig. 4.11: Provetes de teste depois de ensaiados ao rasgamento: a) colagem tipo <i>sandwich</i> com cola castanha, b) colagem tipo <i>sandwich</i> com cola amarela (com fuga de filamentos), c) colagem de dobra e sem arame com cola amarela (com fuga de filamentos) d) enrugamento do geotêxtil	50
Fig. 4.12: Colagem tipo dos provetes usados no ensaio de rasgamento: a) provete antes da colagem, b) provete com a primeira camada de cola, c) provete colado, depois de 24 horas de secagem da primeira camada de cola	51
Fig. 4.13: Curvas de rasgamento individuais para os provetes ensaiados na direção de fabrico	52
Fig. 4.14: Curvas de rasgamento individuais para os provetes ensaiados na direção perpendicular à de fabrico.	53
Fig. 4.15: Provetes de teste de punção estático	54
Fig. 4.16: Provetes de teste depois de ensaiados ao punção estático: a) e b) provete sem colagem, c) provete com colagem em <i>sandwich</i> com cola amarela, d) provete colado em <i>sandwich</i> com cola castanha (circulo vermelho – fuga de filamentos).	54

Fig. 5.1: Provete com aglomerados de material	56
Fig. 5.2: Provete após danificação: a) DDI, DF, CF; b) DDI, DF, SF; c) ABR, DF, CF; d) ABR, DF, SF e) DDI+ABR, DF, CF; f) DDI+ABR, DF, SF; g) DDI, DPF, CF; h) DDI, DPF, SF; i) ABR, DPF, CF; j) ABR, DPF, SF k) DDI+ABR, DPF, CF; l) DDI+ABR, DPF, SF	59
Fig. 5.3: Provete com filamento cortado após ensaio de DDI, na DF, lado CF	60
Fig. 5.4: Provete após ensaio de ABR, na DF, lado CF	61
Fig. 5.5: a) Provete após danificação de DDI+ABR, na DF, lado CF, b) buraco no geotêxtil	62
Fig. 5.6: Provete após ensaio de DDI, na DF, lado SF	63
Fig. 5.7: a) Provete após ensaio de ABR, na DF lado SF, b) rompimento de costura	63
Fig. 5.8: Provete após ensaio de DDI + ABR, na DF, lado SF	64
Fig. 5.9: a) Provete após ensaio de DDI, na DPF, lado CF, b) Sujidade	65
Fig. 5.10: a) Provete após ensaio de abrasão, na DPF, lado CF b) provete após ensaio DDI+ABR, na DPF, lado CF	65
Fig. 5.11: Provete após ensaio de DDI, na DPF, no lado SF	67
Fig. 5.12: Provete após ensaio de abrasão, na DPF, no lado SF	67
Fig. 5.13: Provete após ensaio de DDI + ABR, na DPF, no lado SF	68
Fig. 5.14: Representação gráfica das resistências de tração residuais	68
Fig. 5.16: Representação gráfica das resistências de rasgamento residuais	72
Fig. 6.1: Representação gráfica dos fatores de redução: a) RF's resultantes dos ensaios de tração- extensão, b) RF's resultantes dos ensaios de rasgamento	74

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Matérias-primas utilizadas no fabricos de geossintéticos	5
Quadro 2.2: Propriedades dos geossintéticos	12
Quadro 2.3: Propriedades dos geossintéticos	12
Quadro 3.1: Fatores que influenciam a danificação durante a construção	22
Quadro 3.2: Processos de abrasão.....	31
Quadro 4.1: Normas associadas a cada ensaio	37
Quadro 4.2: Resultados obtidos na determinação da espessura de 10 provetes do GCR	39
Quadro 4.3: Resultados obtidos no ensaio de massa por unidade de área do GRC.....	40
Quadro 4.4: Análise visual dos provetes de teste na direção de fabrico (DF) e na direção perpendicular à de fabrico (DPF), depois de realizado o ensaio de tração-extensão	45
Quadro 4.5: Resultados obtidos para força máxima, resistência à tração e extensão da força máxima no ensaio de 10 provetes intactos na direção de fabrico.....	46
Quadro 4.6: Resultados obtidos para força máxima, resistência à tração e extensão da força máxima no ensaio de 10 provetes intactos na direção perpendicular à de fabrico.....	47
Quadro 4.7: Análise visual dos provetes de teste, depois de realizado o ensaio de rasgamento	49
Quadro 4.8: Resultados obtidos no ensaio de rasgamento na direção de fabrico	51
Quadro 4.9: Resultados obtidos no ensaio de rasgamento na direção perpendicular à de fabrico	52
Quadro 5.1: Resumo dos ensaios de danificação realizados com GCR.....	55
Quadro 5.2: Análise visual do GRC depois de danificado	58
Quadro 5.3: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DF, lado CF	60
Quadro 5.4: Fatores de redução obtidos para a DF, no lado CF.....	62
Quadro 5.5: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DF, lado SF	62
Quadro 5.6: Fatores de redução de tração obtidos para a DF, no lado SF.....	64
Quadro 5.7: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DPF, lado CF.....	64
Quadro 5.8: Fatores de redução obtidos para a DPF, no lado CF	66
Quadro 5.9: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DPF, lado SF	66
Quadro 5.10: Fatores de redução obtidos para a DPF, no lado SF	68
Quadro 5.11: Resultados do ensaio de rasgamento obtidos para a DF, lado CF	69
Quadro 5.12: Resultados do ensaio de rasgamento obtidos para a DF, lado SF	69

Quadro 5.13: Resultados do ensaio de rasgamento obtidos para a DPF, lado CF	70
Quadro 5.14: Resultados do ensaio de rasgamento obtidos para a DPF, lado SF	71

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A - Área

ABR - Abrasão

CEN - Comissão europeia de normalização

CF - Com filamentos

CPE - Polietilenos clorinados

DDI - Danificação durante a instalação

DF - Direção de fabrico

DPF - Direção perpendicular à de fabrico

EFM - Extensão na força máxima

EF_{MÁX} - Extensão na força máxima

F_{MÁX} - Força máxima

GCR - Geocompósito de reforço

M - Massa

MUA - Massa por unidade de área

PA - Poliamidas

PE - Polietilenos

PEAD - Polietileno de alta densidade

PECS - Polietilenos clorossulfonados

PET - Poliéster

PP - Polipropileno

PVC - Policloreto de vinilo

RF - Fator de redução

RF_{ABR} - Fator de redução parcial da abrasão

RF_{DDI} - Fator de redução parcial da DDI

RF_{DDI+ABR} - Fator de redução obtido a partir da sobreposição dos efeitos da DDI e da abrasão

RF_{DDI+ABR TRAD} - Fator de redução obtido através da multiplicação dos fatores de redução parciais da DDI e da abrasão

RR - Resistência ao rasgamento

RR_{dan} - Resistência ao rasgamento o GCR danificado

RR_{int} - Resistência ao rasgamento do GCR intacto

RRR - Resistência ao rasgamentos residual

RT - Resistência à tração

RTdan - Resistência à tração do GCR danificado

RTint - Resistência á tração do GCR intacto

RTR - Resistência à tração residual

SF - Sem filamentos

σ - Desvio padrão

DEC - Departamento de Engenharia Civil

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

LGS - Laboratório de Geossintéticos

Fig. - Figura

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os geossintéticos têm vindo cada vez mais a serem utilizados em obras de engenharia civil. Estes materiais podem ser empregues numa variedade de estruturas, como por exemplo: taludes muito inclinados, aterros para deposição de resíduos perigosos, estruturas de controlo de erosão, proteção costeira, entre outras. O crescimento da aplicação destes materiais está relacionado com inúmeras razões:

- Rápida e fácil aplicação;
- Podem evitar a utilização de materiais naturais com baixa ocorrência;
- Permitem a utilização de solos que, de outra forma, não seriam adequados;
- Evitam o recurso a estruturas de dimensionamento complicado;
- Estão disponíveis numa grande variedade de materiais e formas;
- Apresentam um custo muito competitivo em relação aos materiais tradicionais.

Uma das questões que se coloca, atualmente, relativamente a estes materiais está relacionada com a sua durabilidade. De facto, desde o início da aplicação dos geossintéticos que houve grande preocupação em manter a confiança da indústria de construção, minimizando o risco de mau funcionamento dos mesmos, através da adoção de coeficientes de segurança. De maneira a garantir que estes materiais funcionem durante todo o período de vida útil é necessário perceber a que condições estarão sujeitos. Assim, os geossintéticos podem sofrer diminuição das propriedades a curto ou a longo prazo. Agentes químicos, físicos, biológicos e danificação durante a instalação são alguns fatores que podem afetar os geossintéticos, pelo que uma das questões presentes em estruturas onde estes materiais são aplicados prende-se com a sua possível perda de resistência.

Nos últimos 30 anos a indústria dos geossintéticos tem sofrido muito desenvolvimento pelo que, atualmente existem vários tipos de geossintéticos: geotêxteis (tecidos e não-tecidos), georredes, geocélulas, geogrelhas, geocompósitos, geomembranas, entre outros. Estes materiais são capazes de exercer diversas funções, nomeadamente: separação, reforço, filtragem drenagem, proteção, controlo de erosão e barreira de fluidos. No estudo desenvolvido neste trabalho foi utilizado um geocompósito de reforço, que pode ser usado em diversas situações, como por exemplo estabilização de taludes, vias-férreas, muros, entre outras. Além do reforço este geocompósito pode também desempenhar funções de separação e filtragem.

Neste trabalho foram estudados dois processos de danificação que podem afetar o comportamento dos geossintéticos: danificação durante a instalação e abrasão. Os efeitos provocados pelos procedimentos de instalação dos geossintéticos em obra podem implicar reduções imediatas, e em alguns casos bastante significativas, nas propriedades destes materiais. Os efeitos da abrasão na redução das propriedades dos geossintéticos também devem ser tidos em conta.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência de um geocompósito de reforço ao processo de instalação em obra e ao fenómeno de abrasão. Para tal, numa primeira fase, o material foi exposto de forma isolada a cada um dos tipos de degradação (simulações laboratoriais em ambos os casos). Em seguida, foi exposto sucessivamente aos dois processos de danificação. Os danos ocorridos no geocompósito de reforço foram depois avaliados por ensaios de tração-extensão e rasgamento. As alterações nas propriedades mecânicas foram quantificadas tendo como referência as propriedades do material intacto, comparando-se depois as alterações das propriedades para os dois tipos de danificação induzidos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Neste trabalho dá-se especial atenção à avaliação laboratorial das danificações já referidas. Assim, esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, correspondendo o presente capítulo a uma breve introdução ao tema.

No capítulo 2 é feita uma introdução aos geossintéticos. Descrevem-se os materiais constituintes, os vários tipos de geossintéticos existentes e os respetivos processos de fabrico. Abordam-se também as funções destes materiais e faz-se, ainda, uma descrição do geocompósito em estudo.

No capítulo 3 são descritos os danos provocados pelas danificações em estudo e os procedimentos usados na respetiva simulação laboratorial de cada danificação. Referem-se também os fatores que influenciam a danificação durante a instalação e apresentam-se algumas medidas de minimização.

O capítulo 4 descreve os diferentes ensaios de caracterização efetuados. Assim, são descritas as metodologias dos ensaios de espessura, massa por unidade de área, tração-extensão, rasgamento e punçoamento estático e apresentados os resultados obtidos para os provetes do geocompósito de reforço intactos.

No capítulo 5 apresenta-se e discute-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais relativos aos provetes do geocompósito de reforço danificados.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, tal como possíveis desenvolvimentos futuros.

2 GEOSSINTÉTICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Atualmente os geossintéticos são muito usados na engenharia civil. O uso destes materiais prende-se com as suas vantagens técnicas e económicas. O seu baixo custo e a facilidade instalação contribuíram para o aumento da sua utilização ao longo das últimas décadas. Estes materiais começaram a ser aplicados de forma sistemática na década de 50, do século XX, após o aparecimento dos polímeros sintéticos na década anterior. Desde então sofreram um desenvolvimento rápido, tornando-se assim materiais usados frequentemente na resolução de problemas de engenharia civil, nomeadamente na parte geotécnica e de vias de comunicação [1].

Segundo a Sociedade Internacional de Geossintéticos, o termo geossintético corresponde a um material polimérico (sintético ou natural) usado, em aplicações de engenharia civil, em contacto com solo, rocha e/ou outro material de natureza geotécnica, exercendo funções de drenagem, reforço, proteção, filtragem, separação, controlo de erosão superficial e barreira de fluidos [2].

Estes produtos são, quase exclusivamente, poliméricos, uma vez que os produtos baseados em fibras naturais (lã, seda, algodão, juta, etc.) têm sido cada vez menos utilizados, pois são constituídos por materiais biodegradáveis e não possuem propriedades adequadas a um grande número de aplicações [1].

A classificação dos geossintéticos baseia-se essencialmente nas diferenças estruturais, decorrentes dos diferentes processos de fabrico. Assim, podem ser divididos em dois grupos: permeáveis e impermeáveis. Do primeiro grupo fazem parte os geotêxteis e produtos relacionados (como por exemplo georredes, geogrelhas e geocélulas). Os geossintéticos impermeáveis dizem respeito às barreiras geossintéticas, que podem ser poliméricas, argilosas e betuminosas.

Este capítulo resume algumas informações básicas acerca dos geossintéticos, nomeadamente a sua história, constituição, propriedades e funções.

2.2 HISTÓRIA

A aplicação de produtos de reforço do solo data de há milhares de anos. Koerner [3] afirma ser razoável considerar que as primeiras tentativas de reforço de solos pantanosos foram feitas usando troncos e ramos de árvores. Segundo Shukla [4], o uso de esteiras de junco na construção de estradas por partes dos romanos, constitui um dos exemplos mais antigos do uso de materiais de reforço de solos.

A primeira experiência em reforçar solos de estradas com telas remonta a 1926, e foi realizada na Carolina do Sul, Estados Unidos, onde foi usada uma tela de algodão como base de uma estrada. A estrada manteve-se em boas condições até a tela de algodão ter-se degradado. Este projeto tornou-se um precursor do uso de geossintéticos para a separação e reforço de solos [3].

Apesar do sucesso no caso da Carolina do Sul, os geossintéticos apenas começaram a ser usados de forma sistemática partir da década 50, no século XX, depois do aparecimento dos polímeros sintéticos e do desenvolvimento de técnicas de fabrico de geotêxteis. Na década de 60 surgiram os primeiros geotêxteis não-tecidos termicamente ligados, mas o estabelecimento decisivo dos

geossintéticos como material de construção aconteceu apenas na década de 70 com o surgir dos geotêxteis não-tecidos agulhados [1]. O sucesso dos geossintéticos levou a um grande e rápido desenvolvimento da sua indústria de produção, levando ao aparecimento, na década de 80, de produtos de variadas formas estruturais, como por exemplo as geomembranas, georredes, geogrelhas, entre outros [1]. Em 1983 o termo “geossintético” foi adotado para designar indiferenciadamente todos os novos produtos com aplicação em obras de engenharia geotécnica [1] [4].

O desenvolvimento de forma exponencial dos geossintéticos encontra-se relacionado com as suas vantagens técnicas e económicas [1] [4]. Por um lado, os empreiteiros pretendem uma construção rápida, pouco dependente das condições meteorológicas, com poucos movimentos de terra e o emprego de solos de pior qualidade. Por outro lado, os projetistas pretendem fiabilidade, facilidade de colocação e capacidade de mitigação dos defeitos locais do solo. Existem ainda os donos de obra que esperam o menor custo de construção e manutenção [1].

2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

No fabrico dos geossintéticos utilizam-se dois tipos de matérias-primas: naturais e sintéticas. As matérias-primas naturais podem ser de origem vegetal, animal e mineral, enquanto as sintéticas são orgânicas ou inorgânicas [1].

Os materiais orgânicos sintéticos (plásticos) são os mais usados no fabrico dos geossintéticos. Dentro destes, os termoplásticos são os mais utilizados, devido à sua capacidade de amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento (respetivamente), ao contrário dos termoendurecidos, que quando endurecem não podem voltar a amolecer sobre ação do calor. Quimicamente os termoplásticos são compostos poliméricos, cujo monómero base é muitas vezes uma molécula constituída por átomos de carbono e hidrogénio. Tal como já foi referido, as fibras naturais não se adequam a muitas aplicações devido ao seu carácter biodegradável, sendo que podem ter origem mineral, vegetal ou animal.

A palavra *polímero* tem origem do grego *poly* que significa muito e *meros* que significa partes. Assim, um polímero consiste num material formado por muitas partes, designadas de monómeros, ligadas entre si [3]. O comportamento dos polímeros é influenciado por determinados fatores, como por exemplo o peso molecular e a cristalinidade.

O peso molecular é o produto entre o peso molecular de um monómero e o seu grau de polimerização (número de vezes que o monómero se repete na cadeia molecular). O comportamento do polímero é influenciado pelo peso molecular pois o seu aumento leva a um aumento da elongação, da resistência à tração, ao impacto, à fendilhação e ao calor e leva à diminuição da fluência e trabalhabilidade do material [3].

A cristalinidade é outra propriedade importante para o comportamento dos polímeros, e pode apresentar-se em vários graus. Os materiais poliméricos podem ser cristalinos, semicristalinos ou amorfos. O aumento da cristalinidade de um polímero leva ao aumento da rigidez, da resistência química, ao calor e à tração. No entanto, leva à diminuição da permeabilidade, da deformação na rotura, da flexibilidade e da resistência ao impacto e à fendilhação [1] [3].

Os polímeros de base normalmente usados no fabrico dos geossintéticos incluem poliésteres (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), polietilenos clorinados (CPE), polietilenos

clorossulfonados (PECS), poliamidas (PA), policloreto de vinilo (PVC), etc. No quadro 2.1 encontram-se algumas das matérias-primas usadas para fabricar os diferentes tipos de geossintéticos [4]:

Quadro 2.1: Matérias-primas utilizadas no fabrico de geossintéticos

GEOSSINTÉTICOS	MATÉRIAS-PRIMAS
Geotêxteis	PP, PET, PA, PE
Geogrelhas	PE, PET, PP
Georredes	PE
Geomembranas	PE, PVC, CPE, PECS

O polímero mais utilizado nos geossintéticos é o PP, seguido do PET, sendo as poliamidas as menos usadas e as para-aramidas apenas usadas quando é necessária resistência muito elevada à fluência e ao aquecimento prolongado [5]. No fabrico dos geotêxteis os polímeros usados são, na sua maioria, o PP e o PET. Já no caso das geogrelhas o PE é o mais utilizado, sendo que as georredes e geomembranas são constituídas, geralmente, por PE [3].

2.4 TIPOS DE GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos apresentam diversos tipos de estruturas. Assim este grupo de materiais pode ser dividido em geomembranas, geotêxteis, produtos relacionados (como por exemplo geogrelhas, georredes, geocélulas, entre outros) e geocompósitos (Fig. 2.1).

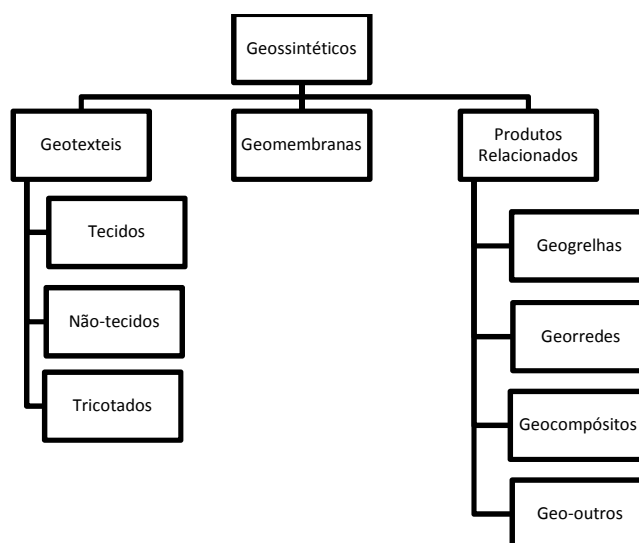


Fig. 2.1: Classificação dos geossintéticos

De seguida faz-se uma breve descrição dos principais tipos de geossintéticos, apresentando-se na Fig. 2.2, alguns exemplos. Uma vez que o objeto de estudo deste trabalho é um geocompósito, faz-se, também, uma descrição mais detalhada dos diferentes tipos de geocompósitos.

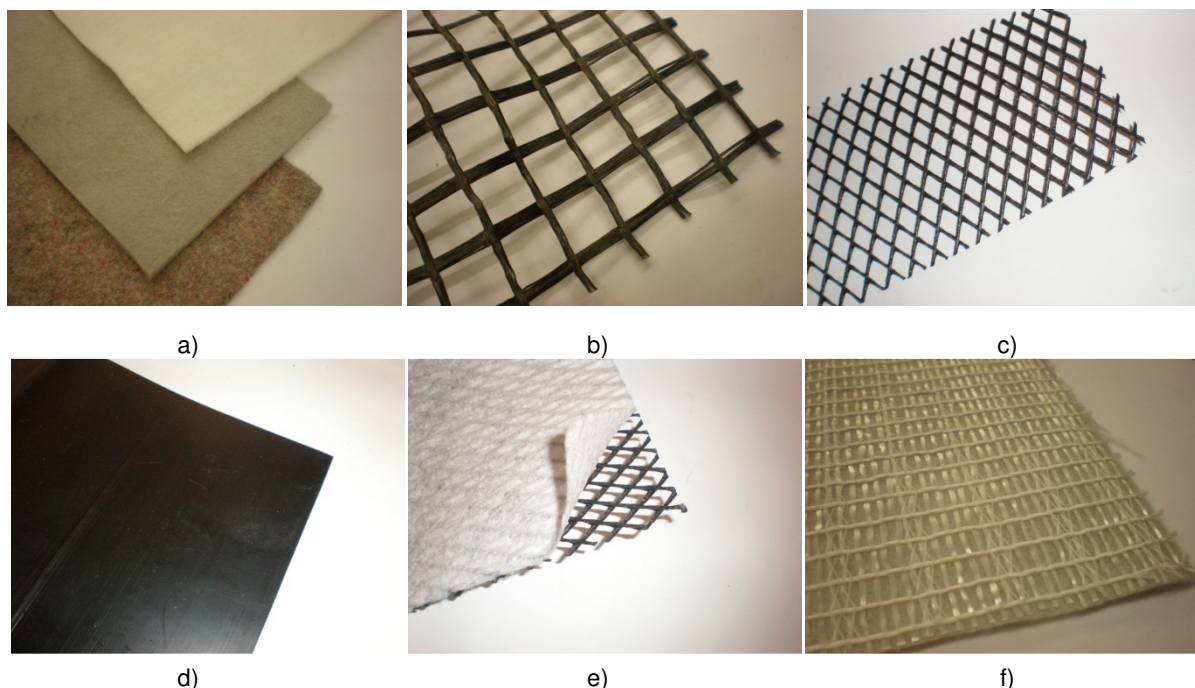


Fig. 2.2: Alguns exemplos de geossintéticos: a) geotêxteis, b) geogrelha, c) georrede, d) geomembrana, e) geocompósito de drenagem, f) geocompósito de reforço

Geotêxteis: são, geralmente, produtos poliméricos permeáveis em forma de malha flexível e dependendo, do processo de fabrico, os geotêxteis podem dividir-se em tecidos, não-tecidos e tricotados [1] [4].

Geogrelhas: consistem numa malha polimérica plana formada pela interseção de elementos denominados de barras [4]. As aberturas entre os elementos transversais e longitudinais são um ponto importante a ter em conta nas geogrelhas, uma vez que estas devem permitir um intertravamento com as partículas do solo circundante. A resistência dos cruzamentos é, também, um fator com grande importância, uma vez que é através destes elementos que se transmitem cargas de uma barra para outra. Atualmente, no mercado, existem vários tipos de geogrelhas, nomeadamente, as extrudidas, as tecidas e as soldadas a laser [1].

Georredes: são malhas formadas por conjuntos paralelos integrados de barras sobrepostas em variados ângulos para drenagem biaxial ou triaxial de líquidos ou gases. As georredes são frequentemente combinadas com geotêxteis num ou dois lados, dando origem a materiais geocompósitos [3].

Geomembranas: estes materiais são membranas contínuas com baixa permeabilidade e podem ser usadas para controlar a migração de fluidos. Os materiais normalmente utilizados são de origem asfáltica, polimérica ou uma combinação dos dois [1].

Geocompósitos: são associações de diferentes materiais, que incluem pelo menos um geossintético. A filosofia por trás destes materiais é a combinação das melhores características de diferentes elementos de maneira a resolver problemas específicos de uma maneira ótima. Deste modo, os geocompósitos servem para o cumprimento de uma ou várias funções, de forma mais eficiente do que ocorreria se os materiais constituintes fossem usados de maneira separada. Podem assim cumprir função de separação, reforço, filtragem, drenagem e barreira de fluidos, sendo a seleção para cada função determinada por vários fatores, como o custo, disponibilidade, especificações, entre outros [1] [3] [4].

2.4.1 GEOCOMPÓSITOS

Os geocompósitos são, geralmente, designados como um tipo de geossintético. No entanto, poderá haver associação de um geossintético com outros tipos de materiais, como por exemplo: fibras de aço, fibras de vidro, entre outros. Existe um número ilimitado de combinações que podem ser realizadas, o que muitas vezes tem vantagens a nível económico e de desempenho. De seguida apresentam-se alguns tipos de associações de materiais de que são compostos alguns dos geocompósitos mais utilizados:

- *Geocompósito Geotêxtil-Georrede*: O geotêxtil pode ser ligado à georrede de um lado ou de ambos, assegurando a função de separação e drenagem. Quando o geotêxtil é colocado nos dois lados a função de drenagem melhora consideravelmente. O líquido entra no geocompósito através do geotêxtil e viaja através da georrede até ao destino final. Este tipo de geocompósito pode ser usado em obras de carácter ambiental, tal como sistemas de recolha e filtragem dos líquidos poluentes em estruturas de drenagem de aterros sanitários [3] [6].

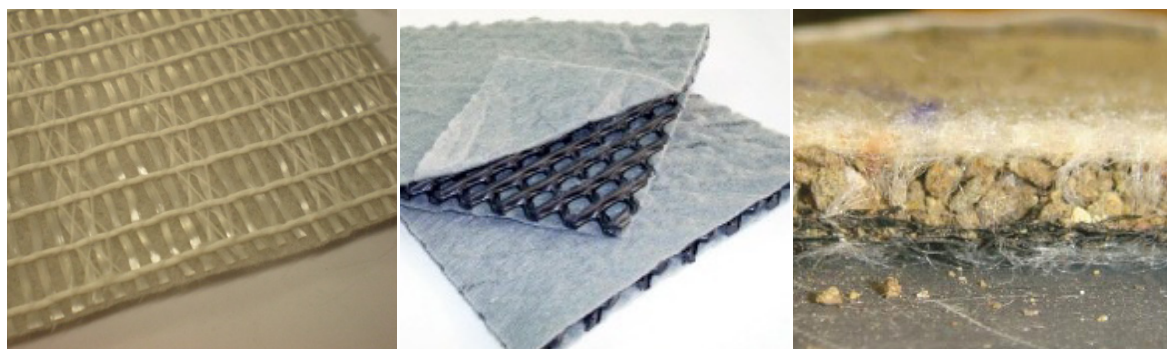
- *Geocompósito Geotêxtil-Geomembrana*: Juntar um geotêxtil com uma geomembrana proporciona um melhoramento da resistência ao punçoamento, à propagação de rasgos, e aumenta o atrito entre as duas faces diminuindo o risco de deslizamento. O geotêxtil atua como um material drenante, desempenhando as funções de transmissividade de líquidos e fluidos contaminantes [3] [6].

- *Geocompósito Geomembrana-Geogrelha*: estes geocompósitos podem ser usados na função de reforço, onde além de um aumento da resistência à tração, se promove também a função de separação entre camadas, impedindo a mistura de materiais [6].

- *Geocompósito Geotêxtil-Núcleo Polimérico*: na forma de películas plásticas quase rígidas, estes núcleos podem ser extrudidos ou deformados de forma a poderem conduzir grandes quantidades de água dentro da estrutura, podendo nestes casos os núcleos serem revestidos de geotêxteis que agem como filtros e separadores. Apesar de muito completo, este geocompósito eliminou os tradicionais drenos de areia, que funcionavam como um meio rápido de consolidação de solos saturados. Os núcleos poliméricos com forma de painéis podem ter protuberâncias ou cavidades, que associados com o geotêxtil formam excelentes drenos, podendo ainda ser associada uma geomembrana dando origem a uma barreira contra o vapor [2] [3].

- *Outros tipos de geocompósitos*: fios de aço, fibras de poliéster ou outros materiais podem ser cosidos aos geotêxteis resultando num geocompósito com grande resistência à tração e quando usados como substrato aumentam a capacidade de suporte dos aterros. Também geotêxteis com orifícios para hastes de aço são usados para a estabilização de taludes, agindo como reforço da estrutura, e como filtros [1] [3].

Os geocompósitos podem atingir um alto desempenho no exercício das várias funções dos geossintéticos referidas anteriormente: separação, reforço, drenagem e barreira de fluidos, filtragem, proteção e controlo de erosão superficial. Para que estas funções sejam cumpridas é necessário que cada geocompósito tenha determinadas características. Assim, em seguida referem-se alguns dos principais tipos de geocompósitos, tendo em conta as suas funções.



a)

b)

c)

Fig. 2.3: Exemplos de geocompósitos a) geocompósito de reforço, b) geocompósito de drenagem (retirado [8]), c) geocompósito de barreira de fluidos (retirado de [7])

Geocompósitos de separação: quando a função de um geocompósito corresponde à separação, normalmente a sua aplicação principal será o controlo de erosão [3]. Embora se possam usar geotêxteis bastante porosos, foram desenvolvidos geocompósitos especiais para lidar com problemas de erosão criados pela circulação de água. Assim, estes sistemas poderão ser permanentes ou temporários, ou seja, até crescer a vegetação na zona. Os sistemas temporários são total ou parcialmente degradáveis, tornando-se sacrificiais depois da vegetação crescer completamente. O grupo dos permanentes pode ser de origem polimérica, tornando-se emaranhados na vegetação quando esta cresce, funcionando depois como um reforço das raízes ou podem ser blocos de betão, enrocamentos de pedra ou até gabiões [3].

Geocompósitos de reforço: embora os geotêxteis convencionais possam ser muito resistentes, o uso de fibras poliméricas com outros materiais pode resultar numa melhoria significativa devido aos efeitos sinérgicos, sendo muitas vezes uma solução mais económica. Os geotêxteis podem ser reforçados com um número ilimitado de materiais, passando por fibras de origem polimérica, fibras de vidro, fibras de aramida, até fibras de aço [1] [3].

Geocompósitos de drenagem: geralmente o elemento filtrante destes geocompósitos são geotêxteis não-tecidos. Rad *et al*, citado por [9], afirma que a transmissividade hidráulica destes materiais decresce com a utilização de geotêxteis mais densos/espessos, provavelmente devido ao potencial de intrusão desenvolvido de forma mais intensa pelos geotêxteis. O processo de fabrico destes geocompósitos consiste em produzir todos componentes separadamente e unir esses materiais, o que poderá consistir numa ligação térmica ou por costura [1].

Geocompósitos de barreira de fluidos: estes geocompósitos são também denominados de barreiras geossintéticas argilosas, e são constituídos por associações de uma camada de bentonite com geossintéticos, geralmente geotêxteis ou geomembranas, sendo a ligação entre materiais realizada por cola, costura ou agulhagem.

2.4.2 GEOCOMPÓSITO EM ESTUDO

O objecto de estudo desta dissertação foi um geocompósito de reforço, com o nome comercial de RockPec 40/40 (fabricado pela TenCate). É um material constituído por um geotêxtil não-tecido reforçado por filamentos de poliéster de alta tenacidade, tal como mostra a Fig. 2.4. Segundo as informações do fabricante, o geocompósito possuía a mesma resistência à tração (40 kN/m) em ambas as direções [10].

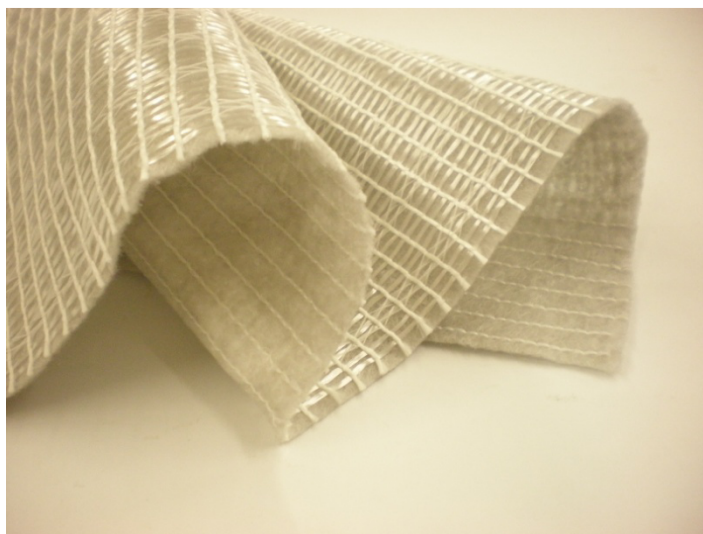
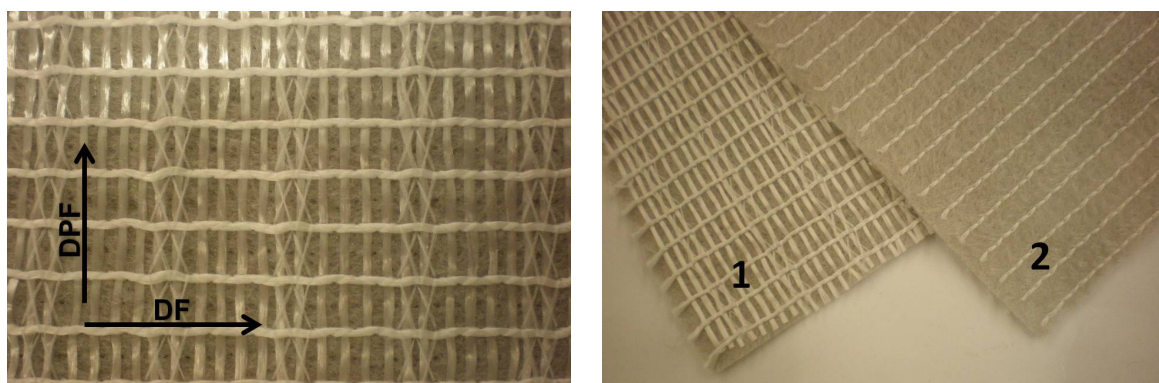


Fig. 2.4: Geocompósito de reforço em estudo – RockPec 40/40

O GCR apresentava dois lados com características muito diferentes. Um dos lados apresentava filamentos de PET dispostos perpendicularmente entre si (lado com filamentos). Na direção de fabrico esses filamentos encontravam-se associados criando cordões espessos, enquanto na direção perpendicular à de fabrico os cordões de filamentos eram mais finos, em maior número e dispostos de maneira menos espaçada, como mostra a Fig. 2.5. O outro lado do GCR (lado sem filamentos) era constituído apenas por geotêxtil não-tecido, podendo ser observadas as costuras que seguravam os filamentos de PET ao geotêxtil não-tecido.



a) b)
Fig. 2.5: Geocompósito de reforço em estudo a) DF- direção de fabrico, DPF – direção perpendicular à de fabrico, b) 1 - Lado com filamentos, 2- Lado sem filamentos

2.5 PROCESSOS DE FABRICO

Os processos de fabrico dos diferentes geossintéticos são muito variados e determinantes para a definição da sua estrutura e das suas propriedades. No entanto, em todos os processos de fabrico existem normalmente três passos em comum:

- Produção da mistura polimérica (polímero com aditivos)
- Produção de componentes
- Conversão dos componentes no geossintético

A primeira fase constitui a produção do polímero através da polimerização e inclusão de aditivos, sendo o produto final deste passo um plástico. Esta fase poderá, ou não, ser realizada pelo fabricante [1].

Os componentes dos geossintéticos que são obtidos por extrusão ou fiação líquida do polímero podem ter várias formas, sendo as mais comuns o filamento contínuo circular, tira plana contínua e folha. O filamento contínuo pode ser torcido, alinhado paralelamente ou cortado em pequenos troços, da mesma forma que as tiras podem ser usadas isoladamente ou torcidas [1].

Nos processos de extrusão ou fiação líquida, o polímero é introduzido num recipiente, juntamente com os aditivos, onde ficam a pressão e temperatura controladas, provocando a fusão e mistura dos elementos sólidos e a expulsão do oxigénio. De seguida a massa líquida atravessa um sistema de bombas rotativas que controla a quantidade de mistura polimérica que passa, expelindo-a através de uma placa perfurada. As fibras e os filamentos são, depois, arrefecidos ao ar ou em água. No caso das tiras ou películas, o processo é semelhante, mas a mistura é forçada a sair por fendas. As tiras podem ser obtidas diretamente ou através do corte de películas. Finalmente, as tiras e filamentos são sujeitos a estiramento e solidificação, sendo a cadeia molecular progressivamente orientada na direção de estiramento para criar uma estrutura cristalina [1] [4].

2.5.1 GEOTÊXTEIS

Os componentes mais usados no processo de fabrico dos geotêxteis tecidos são as fitas, os fios de tiras, multifilamentos e monofilamentos. Normalmente estes elementos apresentam-se numa malha com distribuição de poros regular, uma vez que os componentes são entrelaçados perpendicularmente. Este tipo de geotêxteis é fabricado com recurso a processos tradicionais de tecelagem – teares. Shukla [4] afirma que a estrutura dos geotêxteis tecidos tem grande influência nas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas dos materiais. Ingold [11] refere que as propriedades dos geotêxteis são muito afetadas pelos elementos usados na tecelagem, o material do qual são feitos esses elementos, e o tipo de entrelaçagem usado.

Para o fabrico de geotêxteis não-tecidos, usam-se, geralmente, monofilamentos. O processo de fabrico consiste normalmente em depositar as fibras, em trama solta, num tapete, que depois serão ligadas. A ligação pode dar-se mecanicamente, termicamente ou quimicamente [4].

A ligação mecânica consiste em fazer passar a trama solta sob milhares de agulhas, com farpas, que penetram na mesma arrastando consigo alguns filamentos, entrelaçando-os uns nos outros [1].

A ligação térmica é conseguida por aquecimento da malha. Se o geotêxtil for constituído apenas por um tipo de polímero, normalmente recorre-se à calandragem a temperaturas elevadas. Se, caso contrário, o geotêxtil for composto por mais do que um tipo de polímero, usa-se a fusão parcial dos componentes, com pontos de fusão diferentes, permitindo, assim, a ligação nos pontos de contacto, dando origem a geotêxteis não-tecidos termicamente ligados. Este processo está limitado pela espessura do material, uma vez que, se a temperatura for muito alta pode levar ao sobreaquecimento do geotêxtil e fundição das fibras, mas se for baixa, pode não ser suficiente para uma adequada ligação [1].

A ligação química é obtida através da impregnação da trama com um meio cimentício, como uma resina ou outro derivado celulósico. Depois da aplicação destes produtos, os materiais passam por um período de cura ou calandragem, para se dar a ligação entre elementos. Em vários casos, este tipo de ligação complementa uma ligação feita por agulhagem [1] [4] [11].

Os geotêxteis tricotados são fabricados por entrelaçagem dos fios em forma de estrutura plana, para criar uma estrutura estável. Como são bastante deformáveis, não devem ser usados para reforço, mas sim para suporte ou como substrato para elementos mais robustos e menos extensíveis. Por vezes acrescentam-se na malha destes geotêxteis elementos mais resistentes para diminuir a sua deformação. [1] [11].

2.5.2 GEOGRELHAS

O fabrico das geogrelhas extrudidas consiste em perfurar, de forma regular, uma folha de polímero aditivado, que depois é aquecida e estirada, permitindo que as aberturas se alonguem, ficando as cadeias moleculares orientadas na direção do estiramento. Este processo permite obter uma maior resistência à tração e rigidez da grelha na direção de estiramento. As grelhas extrudidas podem ser uniaxiais ou biaxiais, dependendo se sofreram estiramento numa ou nas duas direções [1] [4].

As geogrelhas tecidas recorrem a equipamentos da indústria têxtil para a sua produção, em que a estrutura básica é feita através de tecelagem das barras, usando fibras de grande tenacidade. Posteriormente, as barras serão tricotadas ou entrelaçadas nos cruzamentos, sendo no final todo o conjunto protegido por um revestimento para garantir estabilidade estrutural e proteger as geogrelhas durante a instalação. Este revestimento pode ser de PVC, látex, betuminoso ou outros produtos [3]. Como alternativa à tricotagem ou tecelagem pode também recorrer-se a ligações térmicas, que consistem na fusão dos pontos de filamentos entre barras [1].

A geogrelhas soldadas a *laser* são muito recentes no mercado. As uniões são realizadas por fusão a *laser*, tendo as barras maior rigidez do que as usadas no fabrico de geogrelhas tecidas ou com ligação térmica [1].

2.5.3 GEORREDES

As georredes são geralmente fabricadas pela extrusão de um polímero fundido através de aberturas existentes em moldes rotativos, dando origem a malhas ou redes apertadas de barras. Posteriormente, essas redes são abertas, atingindo assim a sua configuração final. Segundo Koerner [3], o ângulo entre barras situa-se entre os 70° e os 110°.

2.5.4 GEOMEMBRANAS

As geomembranas podem ser fabricadas por três processos diferentes: extrusão, calandragem e espalhamento superficial. A extrusão consiste na produção de uma folha não reforçada por extrusão de um polímero fundido juntamente com os aditivos necessários. Se, após a extrusão, a folha for coberta com um geotêxtil obtém-se uma geomembrana reforçada.

A calandragem é a passagem do material por cilindros aquecidos de rotação contrária, podendo, este processo, vir na sequência da extrusão. Serve, também, para fabricar geomembranas com múltiplas camadas.

Mais recentemente, surgiu o processo de espalhamento superficial, que baseia-se em espalhar o material sobre um geotêxtil ou uma folha de papel. No primeiro caso diz-se que as geomembranas são reforçadas, no segundo a folha de papel é retirada no final do processo [1].

2.6 PROPRIEDADES DOS GEOSSINTÉTICOS

As propriedades dos geossintéticos podem ser divididas em físicas, hidráulicas, mecânicas e relativas à durabilidade, tal como mostra o Quadro 2.2. A distribuição e dimensão das partículas é uma propriedade física, no entanto, como afeta as propriedades hidráulicas, alguns autores consideram como sendo uma propriedade hidráulica.

Quadro 2.2: Propriedades dos geossintéticos

PROPRIEDADES FÍSICAS	Densidade relativa dos polímeros
	Massa por unidade de área
	Espessura
	Distribuição e dimensão das partículas
PROPRIEDADE HIDRÁULICAS	Permeabilidade à água normal ao plano
	Transmissividade
PROPRIEDADE MECÂNICAS	Comportamento à tração
	Resistência ao punçoamento
	Resistência ao rasgamento
	Atrito entre interfaces
PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE	Resistência durante o tempo de vida útil
	Resistência aos agentes de degradação

2.6.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

A densidade relativa é a razão entre o peso volúmico dos elementos que constituem o geossintético e o peso volúmico da água a 4° C. É um indicador do tipo de polímero utilizado, pelo que, é usado para identificação das geomembranas e controlo de qualidade [11]. O Quadro 2.3 apresenta alguns valores típicos para a densidade relativa de alguns polímeros.

Quadro 2.3: Propriedades dos geossintéticos (retirado de [4])

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 dos geossintéticos tem influência direta no seu comportamento mecânico e hidráulico. Geralmente, quanto mais espesso for o geossintético, maior a sua massa por unidade de área, logo maiores valores das propriedades mecânicas, tais como a resistência à tração e rasgamento.

No que toca às propriedades hidráulicas, a espessura dos geotêxteis e das georredes afeta diretamente a sua transmissividade [1] [11].

A massa por unidade de área é uma grandeza utilizada para avaliar o controlo de qualidade durante o fabrico dos geossintéticos. Esta grandeza serve como um indicador das propriedades de resistência (ao punçoamento, tração, etc.) e também, para avaliar o custo dos geossintéticos [1] [11]. O comportamento à tração dos geossintéticos está dependente de vários fatores como os polímeros constituintes, a própria estrutura do geossintético, o processo de fabrico, tipo de ligação, entre outros [1].

A distribuição e dimensão das aberturas são características fundamentais para o dimensionamento dos geossintéticos como filtro [1]. Esta propriedade está diretamente relacionada com o processo de fabrico dos geossintéticos. Alguns materiais, como as georredes e geogrelhas, apresentam aberturas de tamanho uniforme, bastando caracterizar o tamanho de uma abertura para caracterizar as aberturas desses materiais. No entanto, no caso dos geotêxteis nomeadamente, os não-tecidos, a gama de dimensões das aberturas é mais alargada e com distribuição pouco regular [1] [11].

2.6.2 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS

A permeabilidade à água normal ao plano refere-se à habilidade da água passar através do geossintético perpendicularmente ao seu plano. É uma característica relevante para funções de filtragem [1]. Por sua vez, a transmissividade apresenta-se com uma propriedade importante para as funções de drenagem. Esta propriedade caracteriza as condições de escoamento no plano dos geossintéticos [1].

2.6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Segundo Lopes e Lopes [1] o comportamento à tração dos geossintéticos é afetado pelo polímero constituinte dos mesmos, pelo processo de fabrico e ainda pelo tipo de ligação utilizado. A resposta dos geossintéticos a este tipo de ação pode ser caracterizada por uma curva que relaciona a força por unidade de largura com a extensão. A partir desta curva obtém-se a resistência à tração. Verifica-se que, geralmente, geotêxteis tecidos apresentam valores altos de extensibilidade e resistência mais baixa, enquanto as geogrelhas possuem resistência altas e extensibilidade baixa [1].

A resistência ao punçoamento dos geossintéticos permite avaliar a resistência destes materiais a solicitações induzidas pelas partículas dos agregados. Devido a ações concentradas a que os geossintéticos possam estar sujeitos em obra, poderão surgir descontinuidades nestes materiais. Estas descontinuidades têm origem no mecanismo de perfuração, punçoamento, ou rebentamento.

O rasgamento é definido com uma rotura progressiva resultante de ações localizadas ou distribuídas [1]. Os ensaios de rasgamento tem como objetivo avaliar a tendência de propagação de um rasgo depois de este já ter sido iniciado [11].

Quando os materiais atuam como reforços, o atrito entre interfaces é muito importante, pois inclui a transferência de tensões entre o geossintético e o material de aterro. Esta transferência de tensões é função da rugosidade do geossintético, da dimensão das aberturas, da dimensão das partículas do material de aterro e da capacidade de deformação do material [1] [11].

2.6.4 PROPRIEDADES RELATIVAS À DURABILIDADE

Segundo Koerner [3], a resistência durante o tempo de vida útil, referido como *endurance*, diz respeito ao comportamento das estruturas durante a sua vida útil. Inclui-se neste caso a danificação durante a instalação, fluência, relaxação de tensões, abrasão e fluência em compressão [1].

No que se refere às propriedades relativas à resistência aos agentes de degradação destacam-se a resistência à radiação ultravioleta, à ação da temperatura, à oxidação, à hidrólise e aos agentes químicos e biológicos [1] [3].

2.7 FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

A palavra geossintético encontra-se associada a uma grande quantidade de materiais, pelo que estes produtos são aplicáveis em diversas situações.

Um só geossintético pode desempenhar várias funções simultaneamente, pelo que é necessário hierarquizar as funções de forma a proceder ao correto dimensionamento do geossintético para que este desempenhe todas as funções para que foi escolhido.

A norma EN ISO 10318:2005 (Geossintéticos termos e definições) destaca sete funções principais que os geossintéticos poderão desempenhar:

- Separação
- Barreira de fluidos
- Filtragem
- Drenagem
- Reforço
- Proteção
- Controlo contra a erosão

2.7.1 SEPARAÇÃO

Se o geossintético previne a mistura entre duas camadas adjacentes de solos com diferentes propriedades durante a construção e em serviço diz-se que este exerce a função de separação. Esta função 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, não permitindo que se misturem ou interpenetrem, sob ação das cargas aplicadas [1].

Quando se coloca um material grosseiro em contacto com um solo fino podem ocorrer duas situações diferentes: pode haver tentativa do solo fino de entrar nos espaços vazios do agregado grosso, destruindo a capacidade de drenagem do mesmo ou o solo grosso pode penetrar no material fino alterando a capacidade resistente do agregado grosso. Quando isto acontece tem-se uma situação chamada de agregado sacrificial, que ocorre frequentemente sem o uso de um geossintético de separação [3].

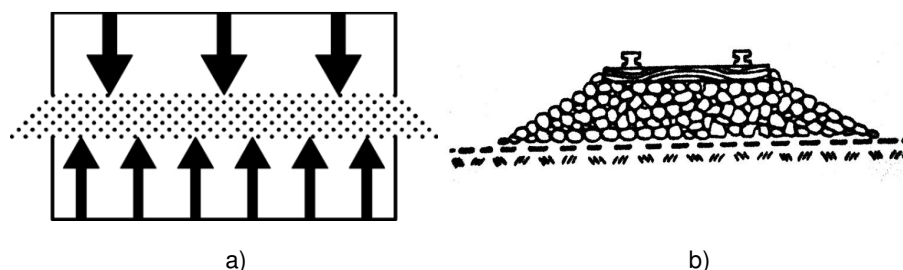


Fig. 2.6: a) Representação esquemática da função de separação, adaptado da norma EN ISO 10318:2005; b) exemplo de uso de um geossintético separador, adaptado de [11]

2.7.2 BARREIRA DE FLUIDOS

A função de barreira de fluidos consiste em evitar a migração de fluidos. Quando um geossintético exerce esta função é necessário garantir a sua continuidade (garantir que não existem cortes e furos) durante o transporte, manuseamento e instalação do mesmo. Deve também possuir resistência a potenciais agentes químicos que existam nos fluidos. Uma vez que os geossintéticos são colocados em obra em faixas de largura constante, a ligação entre essas faixas é também muito importante pois deve garantir a estanquidade [1] [4].

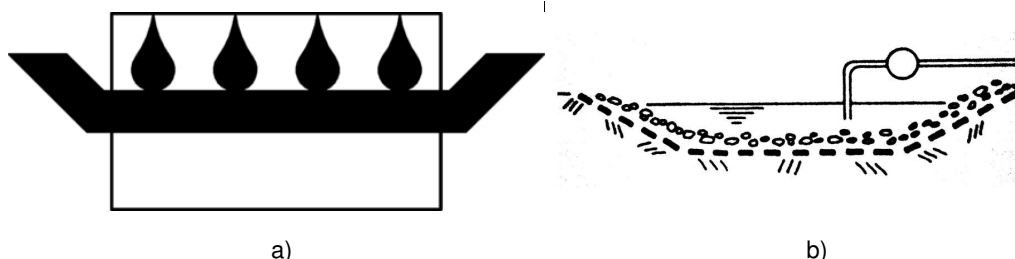


Fig. 2.7: a) Representação esquemática da função de barreira de fluidos, adaptado da norma EN ISO 10318:2005; b) exemplo de uso de um geossintético como barreira de fluidos, adaptado de [11]

2.7.3 FILTRAGEM

A filtragem consiste, num equilíbrio entre o sistema solo-geossintético que permita o fluxo livre de fluidos para o interior ou através do geossintético, retendo simultaneamente o solo. Para esta função ser exequível o geossintético deve apresentar características hidráulicas e dimensão de aberturas adequadas, e deve ter flexibilidade suficiente para um bom ajustamento à superfície do solo a proteger, impedindo a migração de partículas para os vazios, que, de outra forma, seriam criados entre o solo e o geossintético [1].

A função de filtro pode ser desempenhada para evitar arrastamento de partículas em suspensão em fluidos e ainda no interior dos maciços para permitir a passagem da água retendo as partículas sólidas [4]. Esta função é uma das mais importantes, uma vez que, se o geossintético estiver corretamente dimensionado esta opção pode ser a solução para diversos problemas relacionados com o fluxo de fluidos, como por exemplo nas obras de estabilização e proteção de taludes em que os geossintéticos são usados como filtros entre os solos dos aterros e os dispositivos de proteção de taludes. Para o correto desempenho desta função é necessário ter em atenção para que o geossintético não colmate durante o tempo de vida da obra [1].

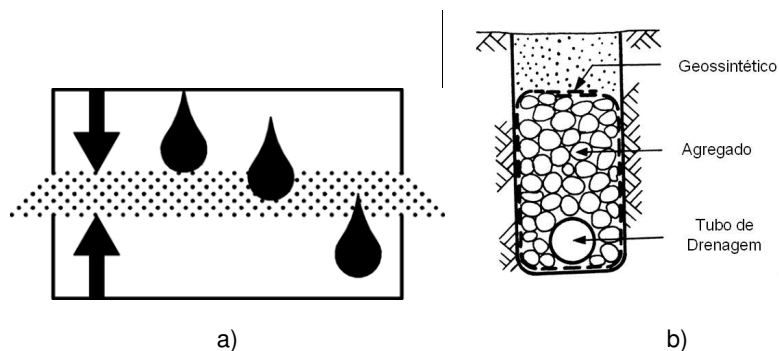


Fig. 2.8: a) Representação esquemática da função de filtragem, adaptado da norma EN ISO 10318:2005; b) exemplo de uso de um geossintético como filtro, adaptado de [4].

2.7.4 DRENAGEM

Se o geossintético permite a circulação livre de um fluido no seu plano diz-se que tem a função de drenagem. A um drenante exige-se que assegure a evacuação da água ou gás no seu plano, com uma pequena perda de carga, e ainda que evite a entrada de partículas para o seu interior.

Um dreno deverá ter espessura e compressibilidade adequadas de forma a garantir a sua função ao longo da vida útil da obra. A dimensão das aberturas deve impedir a passagem de partículas sem colmatção [1] [4] [11].

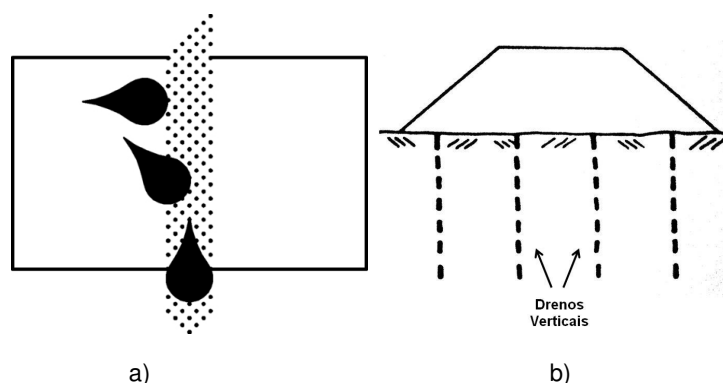


Fig. 2.9: a) Representação esquemática da função de drenagem, adaptado da norma ISO 10318:2005; b) exemplo do uso de um geossintético drenante, adaptado de [4].

2.7.5 REFORÇO

A introdução de um geossintético com função de reforço tem o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas do solo, permitindo assim, que o solo suporte esforços ao corte e à tração superiores àqueles que suportaria se não estivesse reforçado. Sendo os geossintéticos materiais resistentes à tração estes podem ser incorporados em materiais que não possuam esta característica.

A função de reforço pode ser exercida quando o geossintético é colocado no interior de maciços para suportar tensões de tração ou quando é colocado entre duas camadas de solo sujeitas a pressões diferentes equilibrando a diferença de pressões – ação mecânica de membrana [1] [4].

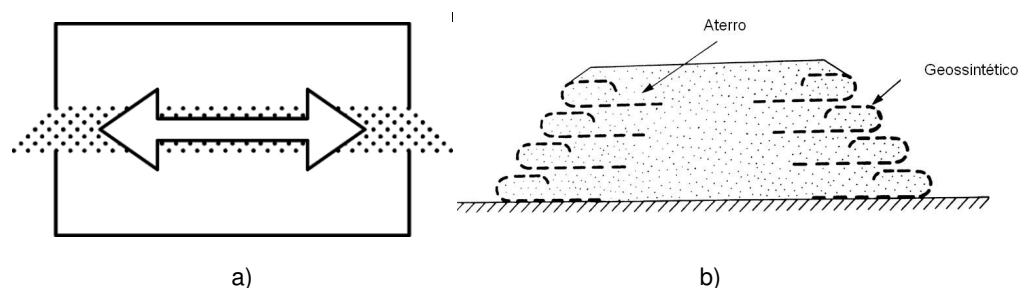


Fig. 2.10: a) Representação esquemática da função de reforço, adaptado da norma EN ISO 10318:2005; b) Exemplo de uso de um geossintético de reforço, adaptado de [4]

2.7.6 PROTEÇÃO

A função de proteção consiste em evitar ou limitar a danificação local de um elemento ou material através da utilização de um geossintético [1]. Assim, é colocado um geossintético entre dois materiais para absorver e distribuir tensões e deformações evitando que um deles seja danificado pela ação de cargas concentradas e deformações impostas pelo outro [11].

Para que seja possível exercer esta função é necessário que a espessura do geossintético seja adequada e garantir a sua continuidade.

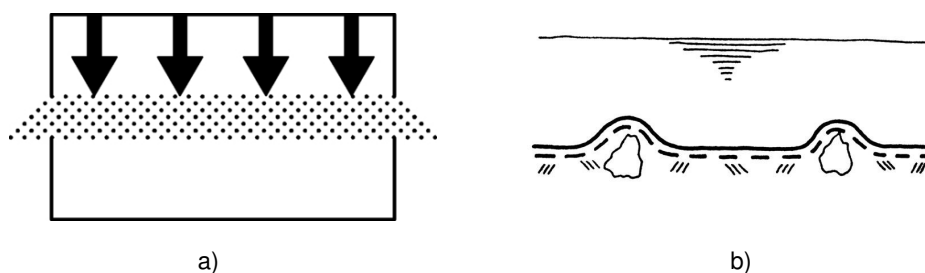


Fig. 2.11: a) Representação esquemática da função de proteção, adaptado da norma EN ISO 10318:2005; b) exemplo de uso de um geossintético de proteção, adaptado de [11]

2.7.7 CONTROLO DA EROSÃO

A função de *controlo da erosão* consiste em utilizar um geossintético para evitar ou limitar movimentos do solo, ou de outras partículas, na superfície de, por exemplo, um talude. Desta forma, os geossintéticos são colocados sobre os maciços, protegendo-os da ação dos agentes atmosféricos [1].

Este tipo de aplicação tem vindo a ganhar importância, principalmente em aplicações de proteção de taludes e proteção costeira, podendo, esta função, ser desempenhada temporária ou permanentemente.

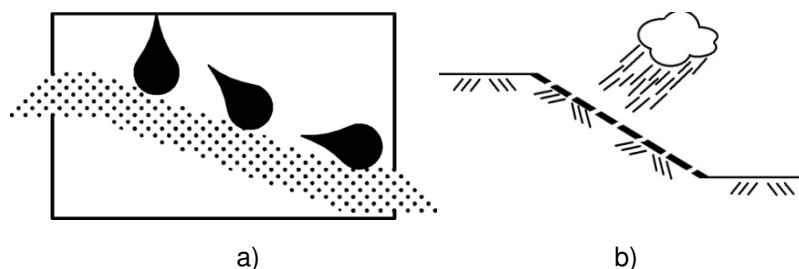


Fig. 2.12: a) Representação esquemática da função de controlo de erosão, adaptado da norma EN ISO 10318:2005; b) exemplo de uso de um geossintético de controlo de erosão, adaptado de [11].

3

DANIFICAÇÃO DO GEOCOMPÓSITO DE REFORÇO POR DDI E ABRASÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Desde há muito tempo que os geossintéticos têm sido aplicados com sucesso na engenharia civil, resolvendo diversos problemas. No entanto, estes materiais poderão não conseguir desempenhar da melhor forma as suas funções devido a danos que podem ocorrer durante a instalação.

Segundo Koerner [3] é um facto reconhecido que os processos de instalação dos geossintéticos em obra podem danificar estes materiais, comprometendo o seu correto funcionamento. Em alguns casos, as ações a que os materiais são submetidos durante a instalação são, inclusive, maiores do que aquelas para os quais foram dimensionados.

A danificação durante a instalação (DDI) dos geossintéticos tem origem, principalmente, de ações mecânicas ocorridas entre os geossintéticos e os materiais que os rodeiam ou provenientes dos processos construtivos. Este tipo de danificação resulta, na maior parte dos casos, de operações de colocação e compactação dos solos e manuseamento dos geossintéticos. A maioria das obras, onde são usados geossintéticos, tem grandes dimensões, envolvendo operações de remoção do solo, preparação da superfície, colocação do geossintético, espalhamento e compactação dos materiais “agressivos”. Estas operações são muitas vezes realizadas por trabalhadores não qualificados e pouco conscientes da sensibilidade dos geossintéticos. Todos estes fatores contribuem para a danificação precoce dos materiais.

A abrasão corresponde ao desgaste sofrido pelos geossintéticos devido ao contacto com outra superfície ou com outros materiais, como por exemplo agregados, sujeitos a uma carga cíclica de pequena amplitude [1] [12]. Este tipo de danificação pode ocorrer em variadas situações: proteção costeira em que existe movimento de sedimentos junto aos geossintéticos, revestimento de canais, aplicações em linhas férreas, estradas provisórias, entre outras [1]. As ações de abrasão ganham particular relevância em obras ferroviárias, principalmente nos geossintéticos aplicados sob as camadas de balastro. As partículas de balastro tendem a ter pequenos deslocamentos contínuos devido à ação de cargas cíclicas [13]. Desde os anos 80, do século XX, que a abrasão tem vindo ser notada, pelo que se tem vindo a desenvolver equipamentos que permitam a simulação laboratorial deste fenómeno.

Watn e Chew [12] referem que a abrasão pode ocorrer em todos os tipos de geossintéticos, no entanto, os geotêxteis não-tecidos agulhados são os mais sensíveis a este mecanismo de danificação. A abrasão devida ao contacto com material de aterro de pequenas dimensões poderá ser significativa. No entanto, a dimensão das partículas tem menor influência que a angulosidade das mesmas.

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes. A primeira aborda os danos provocados pela DDI nos geossintéticos e quais as consequências e métodos de minimização. Explica-se o método usado para a danificação do geossintético em estudo, o equipamento usado no ensaio laboratorial e ainda as formas de minimizar e avaliar esta danificação. Na segunda parte são referidos os danos

provocados pela abrasão nos geossintéticos e é explicado o ensaio de simulação laboratorial e o equipamento usado para tal.

3.2 DANOS PROVOCADOS PELA DDI

Os danos físicos provocados pela DDI nos geossintéticos incluem o aparecimento de fendas e separação de material, ações de punçoamento, rotura em tensão, corte de fibras, rasgamento e abrasão. As consequências deste mecanismo de danificação podem ser várias, dividindo-se em alterações do aspeto visual e efeitos a curto ou a longo prazo.

O nível de danificação obtido depende de uma série de fatores relacionados, não só com o geossintético, mas também com condições de fronteira externas aos geossintéticos, tais como os equipamentos de construção usados, os materiais colocados por cima do geossintético e os procedimentos usados.

Watn e Chew [12] referem que o aparecimento de fendas e separação ocorre, mais frequentemente, em geogrelhas extrudidas. O material de aterro, por norma, é constituído por elementos angulosos, que ao entrarem em contacto com o geossintético, pode levar ao aparecimento de fendas e à sua separação, como mostra a Fig. 3.1. Este fenómeno é agravado pela circulação dos equipamentos de construção, levando à fragilização local do material e redução das suas propriedades [1].

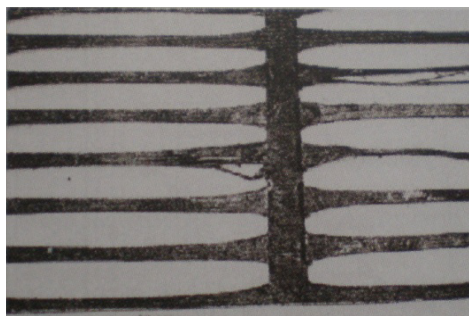


Fig. 3.1: Geogrelha extrudida de PE com evidente aparecimento de fendas e separação de material (retirado de [1], por [12])

O punçoamento é um mecanismo que, geralmente, ocorre em materiais contínuos, como os geotêxteis ou as geomembranas. Tal como no caso anterior, está relacionado com as características dos materiais de aterro, nomeadamente, com os solos constituídos por partículas angulosas e ocorre quando estes são vertidos diretamente sobre o geossintético ou o equipamento de compactação é demasiado pesado. Este processo pode diminuir de forma drástica o desempenho dos geossintéticos, principalmente se a função a cumprir for de separação, proteção ou filtragem [1]. A Fig. 3.2 mostra o processo de danificação por punçoamento.

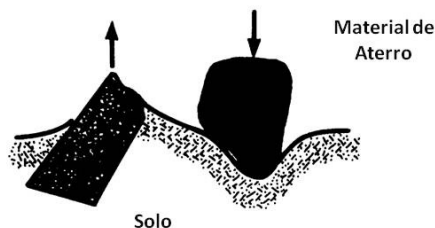


Fig. 3.2: Mecanismo de danificação por punçoamento, (adaptado de [4])

O mecanismo de rotura e, tensão ocorre quando são exercidas no geossintético cargas e deformações excessivas. Pode ocorrer durante a instalação ou já na fase de serviço. Durante a instalação pode dar-se o contacto do geossintético com material de aterro de grandes dimensões, levando a deformações excessivas, ou a circulação de equipamento demasiado pesado em cima de camadas pequenas de material de aterro, o que deforma o geossintético, que, se não for suficientemente flexível pode ocorrer rotura. O desenvolvimento de tensões ou deformações excessivas pode ocorrer, também durante a fase de serviço da obra. Se, por exemplo, a camada de fundação não tiver sido devidamente preparada, existem, depressões e saliências, que levam à concentração de cargas sobre certos pontos dos geossintéticos, como mostra a figura 3.3 [1]. Depois de um geossintético sofrer danificação por rotura em tensão deixa de ser capaz de cumprir as funções de separação, filtragem, reforço e proteção [12].

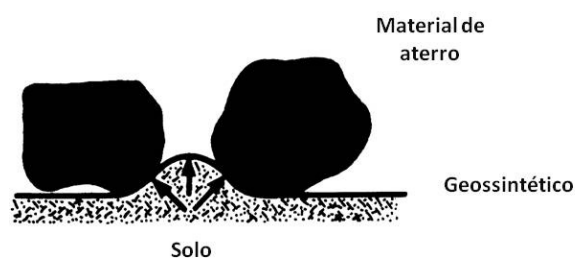


Fig. 3.3: Mecanismo de danificação por rotura em tensão, (adaptado de [4])

O corte de fibras verifica-se quando o material que está em contacto com o geossintético tem faces cortantes e o substrato é bastante rígido. Para materiais que apresentem menor resistência ao esforço transversal esta danificação pode ter consequências bastante significativas [1].

A danificação dos geossintéticos através de rasgamento ocorre quando existem ações de rasgamento a atuar numa zona do geossintético em que já tenha ocorrido outro tipo de danificação, como o corte de fibras ou rotura em tensão. A presença destas últimas danificações leva à propagação de rasgos causados pelo aumento de tensão entre os elementos constituintes (fibras, filamentos, etc.) circundantes às zonas danificadas [1].

Um dos danos que pode ser provocado durante a instalação é, também, a abrasão, que será abordada de forma mais detalhada mais à frente neste capítulo. Como já se referiu, a danificação dos geossintéticos pode comprometer a capacidade destes materiais em realizarem as funções para as quais foram instalados. Relativamente à função de filtragem, a ocorrência de cortes de fibras e perfurações podem reduzir significativamente a eficácia do material. No caso dos geossintéticos de reforço, o seu mau funcionamento pode comprometer a estabilidade da estrutura. [1].

Existem diferentes classificações para avaliar os danos sofridos, no entanto este processo é muito subjetivo porque depende da pessoa que está a avaliar, além de que não se pode estabelecer uma relação direta entre os danos observados e as propriedades mecânicas dos geossintéticos. Um ponto importante é, então, comparar as propriedades dos geossintéticos, antes e após o processo de danificação, de modo a avaliar as variações a curto e longo prazo.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A DDI

A danificação durante a instalação está dependente de vários fatores, que, segundo Austin [14] podem ser divididos em três grupos: fatores relacionados com o tipo de geossintético, com o material em contacto com o geossintético e com as condições de instalação em obra, como mostra o Quadro 3.1. Christopher e Elias [15] afirmam que materiais de aterro mais grosseiros e de partículas angulosas, colocados em camadas finas e compactadas com equipamentos pesados, produzem efeitos muito extremos nos processos de instalação dos geossintéticos. De entre os fatores que mais afetam a DDI, estes autores salientam a angulosidade e dimensão média das partículas do material de aterro, a massa por unidade de área e espessura dos geossintéticos.

Quadro 3.1: Fatores que influenciam a danificação durante a construção [14]

FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE GEOSSINTÉTICO
Tipo de geossintético
Processo de fabrico e forma do produto
Tipo de polímero
Polímero 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

3.3.1 FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE GEOSSINTÉTICOS

Num estudo com diferentes tipos de geossintéticos, Allen e Bathurst [16] verificaram que geossintéticos com menores valores de massa por unidade de área (MUA) sofreram reduções da resistência mais significativas, quando submetido à DDI, comparados com outros que tinham uma MUA maior. Por sua vez, os geotêxteis tecidos foram os que tendencialmente apresentaram menor resistência à DDI [16].

Tal como é referido no Quadro 3.1, o tipo de polímero também influencia a resistência à danificação por parte dos materiais. Os geossintéticos fabricados em PET sofrem maior redução de resistência do que os geossintéticos em PP e PEAD, com igual MUA e mesmas condições de instalação, devendo-se este facto à menor capacidade de extensão e ao menor diâmetro das fibras de PET, relativamente às fibras de PP e PEAD [16].

Segundo Christopher e Elias [15], citado por Lopes [1], depois da realização de ensaios de investigação em geossintéticos de reforço, os geotêxteis tecidos (constituídos por tiras) são os mais sensíveis à DDI e que o efeito desta danificação diminui com o aumento da MUA. Os autores concluíram, também, que em geogrelhas extrudidas em PEAD, menores espessuras e MUA estão associadas a maiores danificações e consequentes reduções de resistência.

3.3.2 FATORES RELACIONADOS COM O TIPO DE SOLO

O grau de danificação induzido pelo tipo de solo depende de vários fatores, como a distribuição granulométrica do material de aterro, a superfície das partículas de solo e a dureza das partículas de solo.

Relativamente à distribuição granulométrica dos solos, estudos realizados por Christopher e Elias [15] mostraram que solos com granulometria maior produzem maiores danificações nos materiais. No entanto, o uso de solos bem graduados leva a um efeito apelidado de “efeito colchão” induzindo, estes solos, menor danificação do que aqueles uniformes [1] [15]. Materiais de aterro com partículas muito angulosas são particularmente agressivos para os geossintéticos, podendo dar origem ao aparecimento de cortes, aberturas, fendas, etc. [1]. No que respeita à dureza das partículas dos solos, com facilidade se entende, que quanto mais duras, maior a danificação que provocam no material.

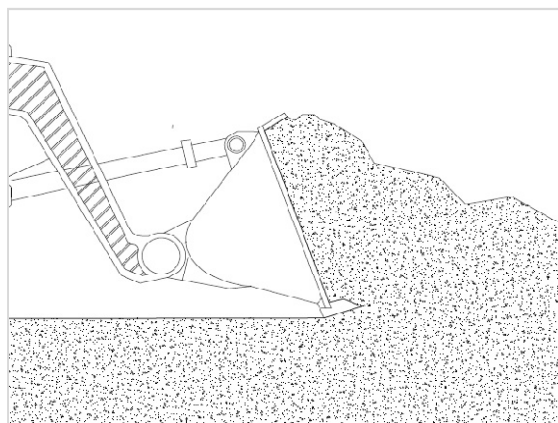
3.3.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE INSTALAÇÃO

As condições de instalação provocam danificações que estão dependentes de fatores como o tipo e peso do equipamento de compactação, a espessura inicial da camada de solo e a altura de queda do material granular. A utilização de equipamentos pesados na compactação de camadas de pequena espessura leva ao grau de danificação mais gravoso. A uma maior altura de queda do material associam-se maiores impactos no contacto do material de aterro com o geossintético, podendo levar ao aparecimento de deformações e/ou fendas no geossintético [1].

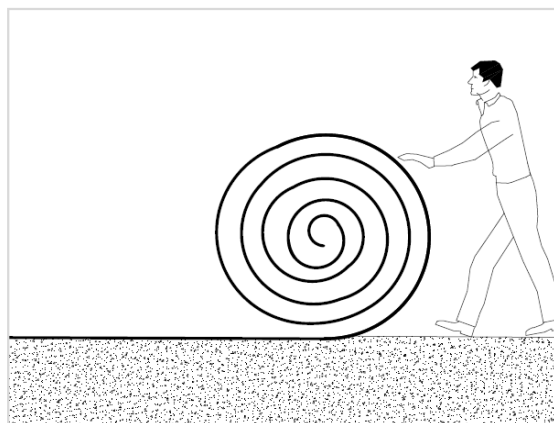
3.4 MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO

Para se obter um desempenho ótimo por parte dos geossintéticos, as suas operações de colocação devem obedecer a determinados requisitos, uma vez que técnicas construtivas deficientes causam danificações muito evidentes. Cada obra tem as suas especificações, no entanto existem alguns passos básicos que se devem ser seguidos para se obterem melhores resultados.

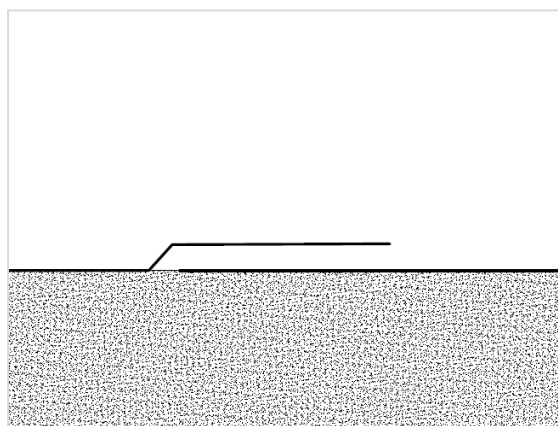
Em primeiro lugar, é necessário assegurar que a superfície sobre a qual serão instalados os geossintéticos é lisa e plana, removendo os detritos, raízes e materiais pontiagudos (Fig. 3.4a) Deve ser também um pouco inclinada, para facilitar a drenagem da água da chuva. De seguida desenrola-se o geossintético (Fig. 3.4b), que chega ao local na forma de faixas em rolos, pelo que ao colocar o material se deve ter em atenção que as faixas devem-se sobrepor, pelo menos, 0,5 m, como mostra a Fig. 3.4c. A ligação entre faixas dos geossintéticos deve vir especificada no caderno de encargos. Depois de colocado o geossintético pode então colocar-se o material confinante, garantindo que não passa tráfego de construção antes da colocação de uma camada de, pelo menos, 150mm de material (Fig. 3.4d). Pode, agora, espalhar-se o material (Fig. 3.4e) e depois compacta-se o mesmo, atendendo às características pretendidas como mostra a Fig.3.5 f) [1] [3] [17].



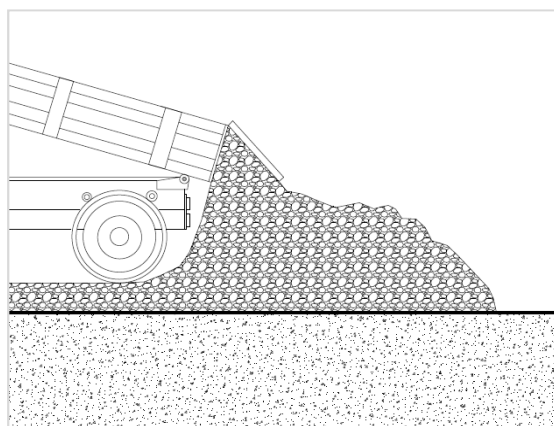
a)



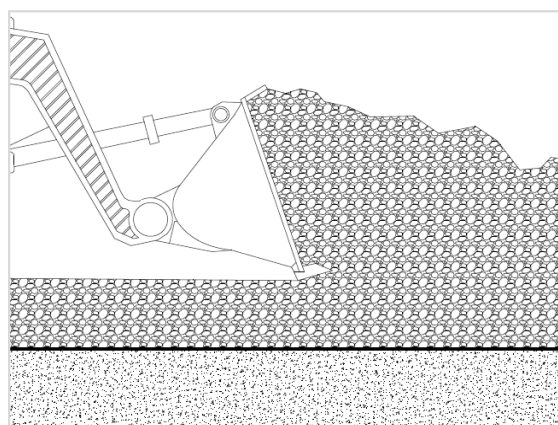
b)



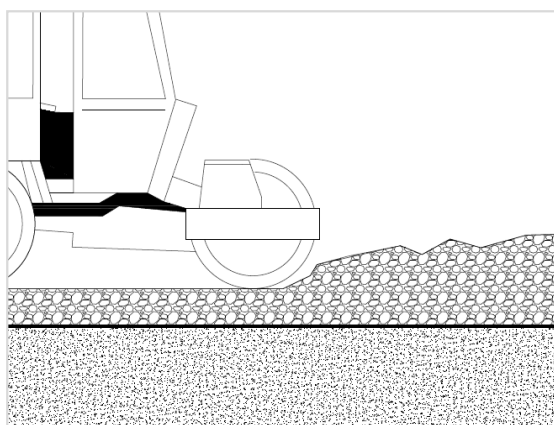
c)



d)



e)



f)

Fig. 3.4: Passos base para a colocação dos geossintéticos em obra

Para prevenir que os geossintéticos sejam danificados durante a sua instalação, Shukla [4] apresenta alguns conselhos relativos a:

- Cuidado;
- Seleção do geossintético;
- Proteção antes da instalação;
- Preparação do local de instalação;
- Instalação do geossintético;
- Corte dos geossintéticos no local de instalação;
- Proteção durante a construção;
- Correção do dano;
- Ancoragem;
- Pré-tensão;
- Manutenção.

Shukla [4] afirma que no passado muitas falhas na construção estiveram relacionadas com perda de resistência devido à exposição dos geossintéticos à radiação ultravioleta, falta de comprimento de sobreposição entre faixas e grandes tensões durante a instalação.

Os geossintéticos devem ser protegidos durante a construção. Tendo em conta que estes materiais são sensíveis a diversos agentes de degradação, deve ter-se cuidados especiais. Evitar que estes fiquem sujeitos à degradação ultravioleta, não permitir o contacto com agentes químicos, usar pequenas alturas de queda dos materiais e compactar corretamente os solos são algumas das ações que se deve ter para evitar danos nos geossintéticos. Se, após colocação, for notado algum tipo de dano o mais seguro será retirar a secção danificada e substituí-la [4].

De forma a manter a posição correta do geossintético antes da colocação do material confinante, este, deve estar ancorado ao solo pelas pontas, tendo cuidado para não exercer demasiada pressão. Alguns procedimentos, tais como a aplicação de uma pré-tensão, podem melhorar o desempenho do geossintético em algumas funções, tais como no reforço, uma vez que colocando o geossintético pré-tenso, o solo confinante fica comprimido, dando origem a ações de confinamento [4].

3.5 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DA DDI

Os efeitos da DDI nas propriedades dos geossintéticos devem ser considerados através da especificação de valores mínimos para as propriedades dos materiais, para que estes sobrevivam às operações de instalação. As consequências dos procedimentos de instalação podem ser avaliadas recorrendo à exumação de amostras de geossintéticos que tenham sido submetidas a condições de instalação ou através da simulação em laboratório das condições de instalação. Nos dois procedimentos referidos os geossintéticos são submetidos a ensaios de modo a avaliar a alteração induzida pela danificação das propriedades de referência.

3.5.1 AVALIAÇÃO IN-SITU DA DDI – ATERROS TEMPORÁRIOS

A avaliação dos efeitos da DDI nos geossintéticos através da exumação de materiais instalados em obras reais é uma metodologia ideal para avaliar os efeitos dos processos construtivos nos materiais [1]. Assim estes aterros devem ser feitos tendo em conta as boas práticas construtivas, a exumação das amostras não deve induzir danificação adicional às mesmas, pelo que deve ser feita com todo o cuidado. Além do custo elevado, este método apenas permite a quantificação dos efeitos da DDI em fase de obra, pelo que não é muito utilizado no dimensionamento dos geossintéticos.

A construção destes aterros deve ter em conta as boas práticas construtivas, seguindo, por exemplo, as medidas de minimização dos efeitos da DDI [1].

Austin [14] apresenta uma metodologia para realizar ensaio de DDI em campo, que se encontra detalhada na BS 8006, que é um código para solos reforçados ou aterros. Esta metodologia é dispendiosa e implica muita logística, uma vez que, segundo o autor, na construção deste aterro experimental o geossintético é submetido a três níveis de compactação.

A BS 8006 tem por base a SHW (*Specification for Highways Work*) [18]. Estes níveis correspondem a:

- Compactação normal: o número de passagens é o especificado na SHW para a espessura da camada a compactar.
- Sobre-compactação: o número de passagens é o dobro do referente à compactação normal.
- Compactação e duas camadas: execução da primeira camada com compactação normal, sobre o reforço, e sobre este conjunto é colocada outra camada e compactada.

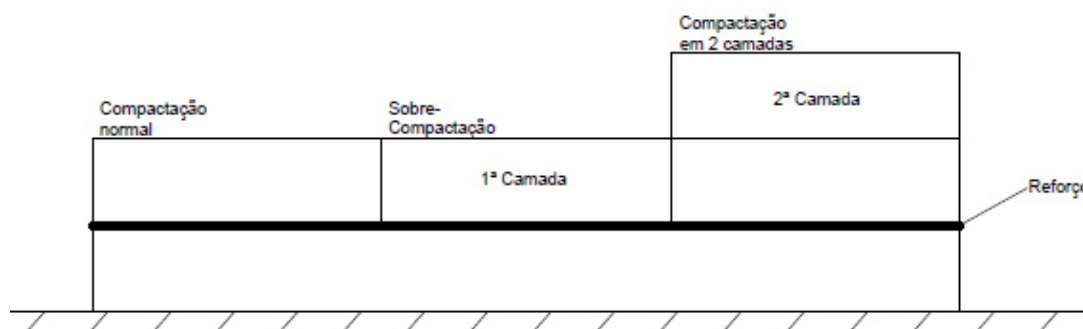


Fig. 3.5: Seção de aterros experimentais de acordo com a BS 8006

Quando se analisam resultados de campanhas de ensaios é necessário ter em atenção os critérios usados para preparar os provetes. A seleção dos provetes deve ser cuidada e aleatória, uma vez que ao escolher provetes de zonas mais ou menos afetadas os resultados nem sempre são significativos. Por esta razão, Austin [14] sugere uma marcação das zonas onde se retiram os provetes antes da indução da danificação.

Watts e Brady [19] apresentaram um procedimento em que tentavam atingir a possibilidade de recriar condições reais e repetir procedimentos. Estes autores referem que primeiro é necessário definir o grau de compactação do material de aterro, mas que para avaliar os efeitos da compactação excessiva podem ser realizados ensaios em que o material é compactado até à “nega” [1]. Os autores definiram também um procedimento para a recuperação dos geossintéticos que se encontram entre o material de aterro, sem produzir danificação adicional.

3.5.2 SIMULAÇÃO LABORATORIAL DA DDI

A realização de aterros experimentais e consequente exumação de amostras produz resultados muito aproximados das condições reais de danificação dos geossintéticos. No entanto, é muito trabalhosa e dispendiosa, pelo que o ideal será recorrer a ensaios laboratoriais que permitam simular os danos que ocorrem durante a instalação dos geossintéticos.

Bräu [20] defende que os ensaios de laboratório devem ser calibrados usando os resultados obtidos nos ensaios de campo. Afirma, também, que os ensaios laboratoriais devem ter em conta as

diferentes condições de instalação possíveis. Desta forma os ensaios de simulação laboratorial devem simular a passagem de equipamentos sobre o solo abaixo dos geossintéticos, permitir a existência de cargas pontuais elevadas e permitir deslocamentos relativos entre o solo e o geossintético.

Para simular as condições em obra foram desenvolvidas algumas metodologias de ensaio. Por exemplo, para simular a queda de material de aterro no geossintético, existe o ensaio de queda de pirâmide (proposto pela comissão europeia de normalização (CEN)). Este ensaio é semelhante ao ensaio de punçoamento dinâmico (EN ISO 13433:2006), no entanto, o provete de geossintético é colocado entre duas camadas de material de aterro e o objecto que cai sobre o geossintético tem forma de pirâmide invertida, como mostra a Fig. 3.6.



Fig. 3.6: Pirâmide invertida (retirada de [1])

A metodologia de ensaio utilizada neste trabalho para simulação dos efeitos dos procedimentos da DDI, foi desenvolvida pelo CEN, com o objetivo de uniformizar e simplificar os procedimentos de ensaio. Tem como princípio de ensaio a colocação do provete entre duas camadas de um agregado sintético e sujeitá-lo a uma carga dinâmica durante um determinado período de tempo. Depois disso, o provete de geossintético é removido do equipamento de ensaio, avaliando-se os danos visíveis, sendo o provete danificado depois sujeito a testes mecânicos ou hidráulicos, de forma a avaliar as alterações das propriedades mecânicas ou hidráulicas respetivamente. Para determinar estas alterações das propriedades comparam-se os resultados obtidos nos testes feitos nos provetes danificados com os resultados obtidos da mesma forma nos provetes intactos.

3.5.3 DESCRIÇÃO SIMULAÇÃO DA DDI EM LABORATÓRIO

Os procedimentos usados para a realização dos ensaios laboratoriais de DDI neste trabalho encontram-se descritos na EN ISO 10722:2007 (*Geosynthetics test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading –Damage caused by granular material*).

Na Fig. 3.7 apresenta-se o aspeto geral do equipamento usado na realização do ensaio de DDI que é composto pelas seguintes partes:

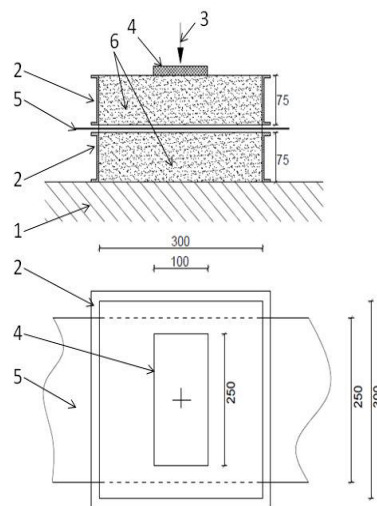
- *Mecanismo de aplicação de carga*: é controlado de forma a produzir uma pressão sinusoidal entre 500 ± 10 kPa e $5 \pm 0,5$ kPa na placa de carregamento a uma frequência de 1Hz.
- *Caixa de danificação*: caixa em metal contendo o agregado sintético e o geossintético. Possui dimensões de 300 mm x 300 mm e é composta por duas partes, tendo cada uma delas 75 mm de profundidade. As duas partes da caixa são encaixadas, perfazendo uma altura total da caixa

de 150 mm. Esta caixa é colocada sobre uma base rígida que não deforma aquando da aplicação da carga de ensaio diretamente na base.

- *Placa de carregamento*: construída em aço inoxidável e com dimensões de 100 mm x 200 mm. Possui rigidez adequada, permitindo a transmissão de cargas ao agregado sem formação de forças de flexão.



a)



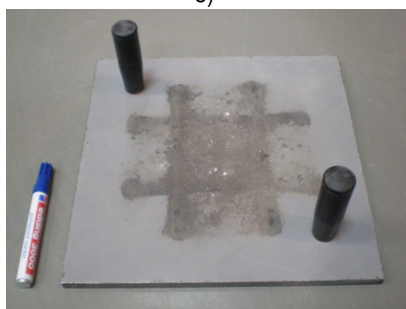
b)



c)



d)



e)



f)

Fig. 3.7: Partes constituintes do equipamento de simulação da DDI: a) Aspeto geral do equipamento de DDI, b) Representação Esquemática da caixa de danificação, adaptado da norma ISO 10722:2007: 1- base rígida, 2- caixa de danificação, 3- sentido de aplicação da carga, 4-placa de carregamento 5- geossintético, 6- corundum c) Caixa de danificação, d) placa de compactação, e) Placa de carregamento, f) agregado sintético (*corundum*)

O agregado utilizado no ensaio de DDI foi sintético, um óxido de alumínio, designado por *corundum*, Fig. 3.7f. As dimensões deste material eram tais que 100% do mesmo passou através do

peneiro 10 mm e 0% através do peneiro de 5 mm de abertura. O agregado foi, assim, peneirado no peneiro de abertura de 5 mm no primeiro uso. Após 3 utilizações era peneirado de novo, sendo o material que passasse através do mesmo peneiro rejeitado. O mesmo agregado era utilizado 20 vezes e depois descartado.

Tal como refere a norma, para a realização do ensaio, começou-se por encher a metade inferior da caixa com agregado sintético, colocando-se duas camadas de igual altura. Cada uma delas foi compactada com uma placa metálica colocada sobre toda a área da caixa de danificação, onde foi aplicada uma tensão de 200 ± 2 kPa durante 60 segundos. O topo da segunda camada de agregado estava nivelado com o topo da parte inferior da caixa (Fig. 3.8).

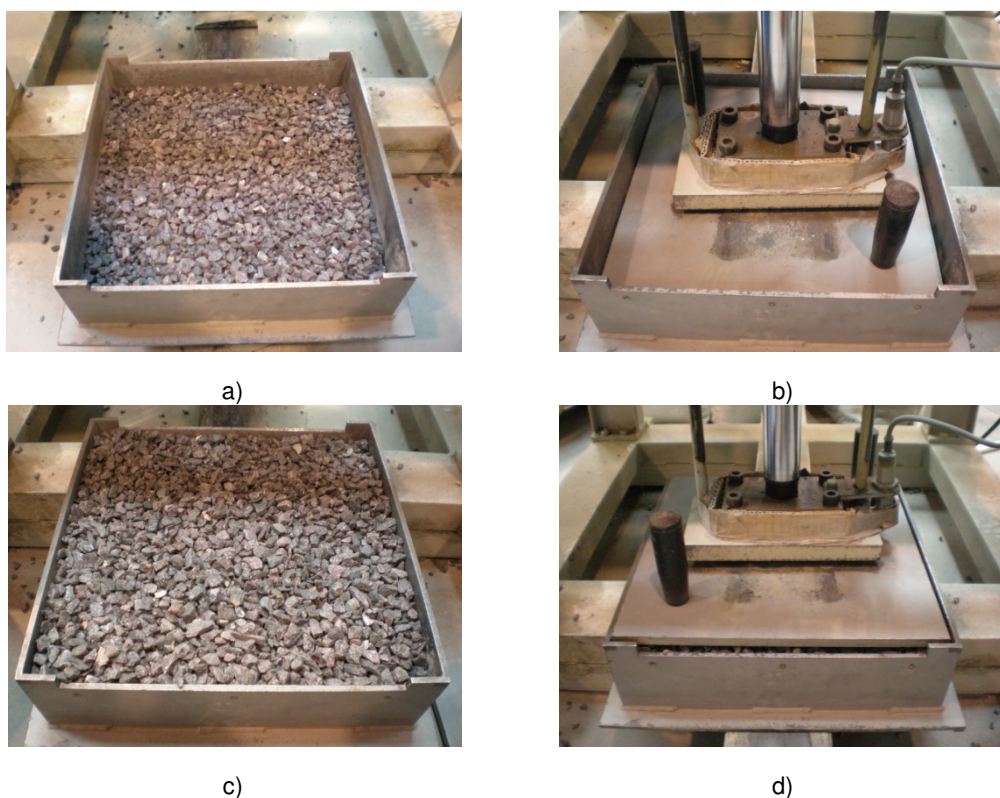


Fig. 3.8: Enchimento e compactação da caixa inferior com *corundum*: a) Colocação da 1ª camada, b) compactação da 1ª camada, c) colocação da 2ª camada, d) compactação da 2ª camada

Colocou-se o provete no topo da parte inferior da caixa. Este deve estar centrado com a caixa. Posicionou-se então a parte superior da caixa, fixada por encaixe e encheu-se, depois, com agregado (Fig. 3.9).

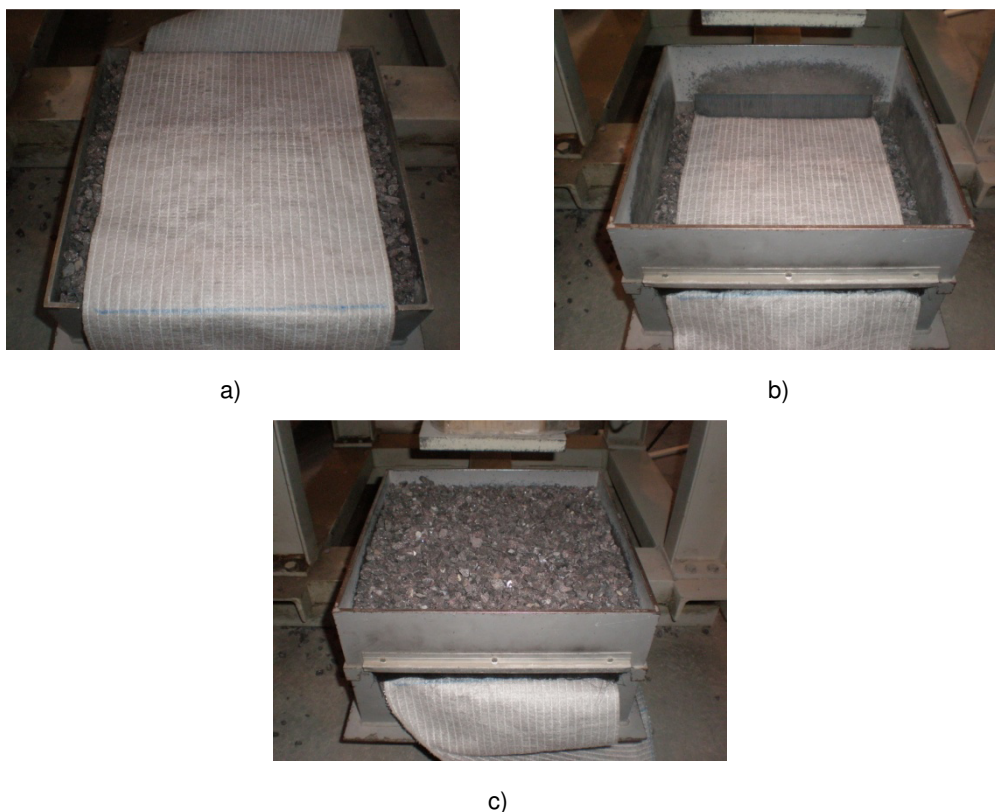


Fig. 3.9: a) Colocação do provete, b) colocação da parte superior da caixa, c) Enchimento com *corundum*

De seguida foi colocada a caixa sob a placa de carregamento, centrada com a mesma e aplicou-se uma tensão de $5 \pm 0,5$ kPa. Depois, foi aplicada uma carga cíclica entre 5 ± 5 kPa e 500 ± 10 kPa, com uma frequência de 1 Hz durante 200 ciclos.

Para finalizar, retirou-se o provete da caixa de danificação com cuidado para não provocar danificação adicional, e procedeu-se a uma análise visual e respetivos ensaios de caracterização para avaliação da alteração das propriedades.

3.6 DANOS PROVOCADOS PELA ABRASÃO

As principais consequências da abrasão passam pela redução da espessura e consequente diminuição local da resistência do geossintético. A alteração das propriedades hidráulicas também pode ser um efeito da abrasão.

Pinto [13] estudou a influência da abrasão pelos materiais constituintes das linhas férreas em dois geotêxteis não-tecidos (um com baixa MUA e outro alta MUA). Os processos de abrasão manifestaram-se essencialmente nas propriedades hidráulicas, consequência da reorientação dos filamentos superficiais que compõem a estrutura dos geotêxteis, diminuindo a dimensão aparente dos poros. O autor verificou que a resistência à tração não se alterou no geotêxtil com menor MUA, verificando-se um aumento de 27% no de maior MUA. No primeiro, a abrasão apenas teve efeito na camada superficial do material, verificando-se a presença de nódulos pontuais e desagregação superficial. No segundo caso, o aumento da resistência foi explicada pela reorientação de alguns filamentos.

Van Dine *et al.* [21] realizaram alguns ensaios laboratoriais numa variedade de geotêxteis com diferentes MUAs e verificaram que ocorreu principalmente desagregação superficial e corte. Ocorreu

ainda separação de material e achatamento dos geossintéticos. Os efeitos da abrasão foram categorizados por Van Dine *et al* [21] depois da inspeção visual e microscópica dos geotêxteis, como mostra o Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Efeitos de abrasão (adaptado de Van Dine *et al* [21])

EFEITOS DA 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 (limitado a geotêxteis não-tecidos)

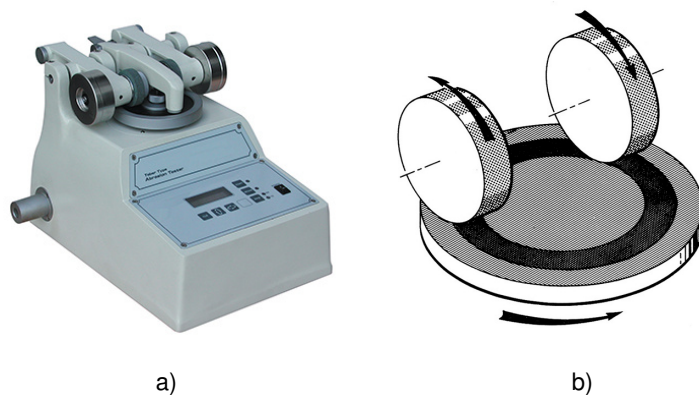
Hausmann e Ring [22] realizaram estudos em geotêxteis colocados a diferentes profundidades de balastros. Com o objetivo de analisarem o efeito da abrasão na resistência à tração dos geotêxteis, exumaram as amostras que tinham sido submetidas à passagem de milhões de toneladas de tráfego ferroviário. Os resultados mostraram que a perda de resistência está relacionada com a MUA dos geotêxteis e com o volume de tráfego circulante. Apesar de durante a exumação de amostras se ter verificado a presença de material fino, devido às perfurações nos geotêxteis, a função de separação continuou a ser desempenhada de forma satisfatória.

Raymond [23] avaliou um grande número de geossintéticos colocados nas ferrovias do Canadá e dos Estados Unidos da América, chegando à conclusão que maiores profundidades de instalação dão origem a menores tensões, pelo que os geossintéticos são menos danificados. Koerner [3] sugere uma profundidade mínima de colocação dos geossintéticos de 40 cm para vias ferroviárias. Se esta profundidade for considerada demasiado grande para determinada obra, deve, então, usar-se um geossintético com grande resistência à abrasão. Raymond [23] recomenda o uso de um geossintético com tratamento de resina.

3.7 Método de Simulação Laboratorial

Um dos primeiros equipamentos de simulação laboratorial da abrasão foi uma plataforma rotativa. Inventado nos anos 30, do século XX, este aparelho foi, inicialmente, desenvolvido para a

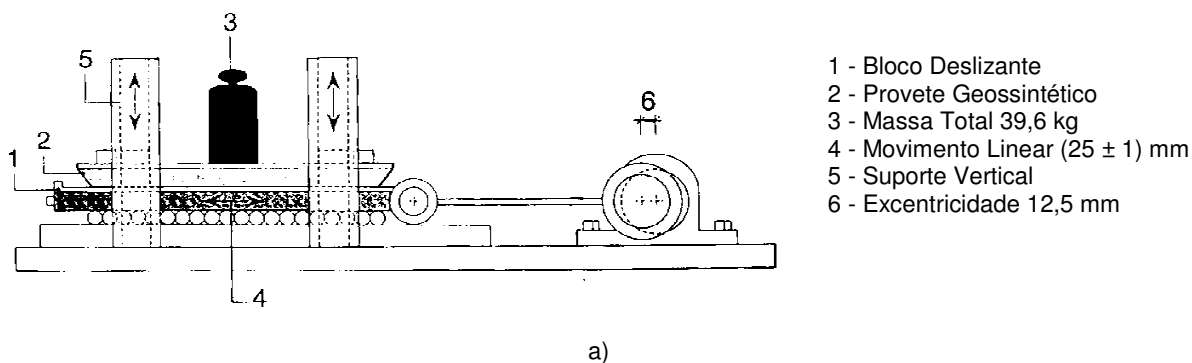
indústria têxtil, e posteriormente adaptado para a simulação da abrasão em geotêxteis com aplicações ferroviárias. Este equipamento é composto por uma plataforma rotativa, num eixo vertical fixo, e por duas rodas abrasivas de 1000 gramas de massa (Fig. 3.10a)) [24].

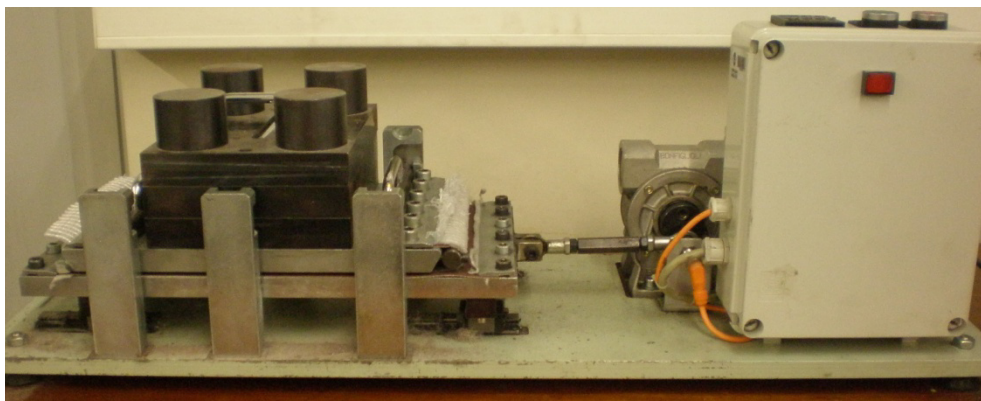


Neste ensaio a simulação é obtida pelo atrito produzido entre o provete e duas rodas abrasivas com rotação de 70 r.p.m (rotações por minuto). Este equipamento foi adaptado para geotêxteis com baixa resistência à tração, pelo que o tipo de abrasão desenvolvido não é representativo noutras condições [19].

O procedimento para a realização dos ensaios laboratoriais de abrasão, usado neste trabalho, teve como base a norma EN ISO 13427:1998 (geotêxteis e produtos relacionados: simulação do dano por abrasão – ensaio do bloco deslizante). Esta norma define o princípio do ensaio como a fricção entre o provete e um abrasivo (com superfície de características específicas). O abrasivo é movido ao longo de um eixo horizontal com movimento uniaxial em condições controladas de pressão e ações abrasivas.

O equipamento usado para a realização dos ensaios de abrasão denomina-se abrasímetro e encontra-se ilustrado na Fig. 3.11. É constituído por dois pratos paralelos, tendo, o prato inferior, um movimento vaivém de 25 mm. O segundo prato, o superior, é sustentado por um suporte vertical (número 5 da Fig. 3.11) e mantido estacionário durante o ensaio, uma vez que a carga vertical aplicada aos provetes é obtida usando três pesos, com uma massa de 39,6 kg. O equipamento possui também um contador para a contagem do número de ciclos.





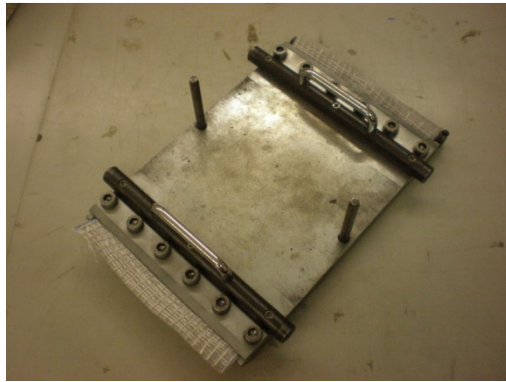
b)

Fig. 3.11: a) Representação esquemática do aparelho de simulação da abrasão (retirado da norma EN ISO 13427:1998), b) equipamento de simulação do dano por abrasão

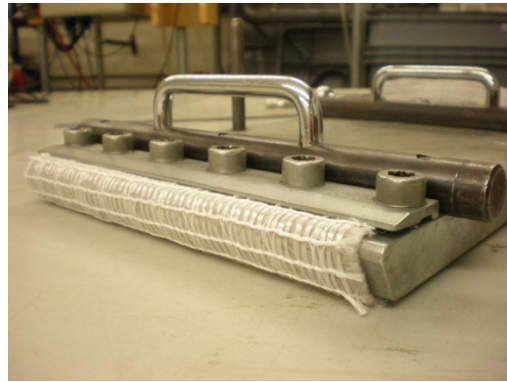
Segundo a EN ISO 13427:1998, a resistência à abrasão deve ser determinada pela perda das propriedades de tração, em percentagem. Para isso, a norma refere que deve ser usado o ensaio de tração-extensão através do método da tira estreita (EN ISO 13934-1). No entanto, neste trabalho, os ensaios de tração foram realizados pela norma NP EN ISO 10319:2005 (método de tira larga). Usou-se o método da tira larga, em detrimento do método da tira estreita, para diminuir o efeito de *necking*, ou seja, para diminuir a contração lateral, e também uniformizar a forma de ensaiar à tração todos os provetes realizados (íntactos e danificados)

O primeiro passo para a realização do ensaio de abrasão passou por colocar o provete no prato superior e prendê-lo em cada extremidade do prato, com as garras existentes (Fig. 3.12a). Para que o provete não sofresse deslocações ou se soltasse durante o ensaio, fixou-se um abrasivo P24 no prato superior, cuja aderência ao geocompósito é muito maior do que a do abrasivo usado na placa inferior, P100. De notar que abrasivo P24 apenas serviu para efeitos de fixação e nunca para abrasão. Neste passo começou-se por fixar o provete e o abrasivo do lado oposto ao esticador, como mostra a Fig. 3.12 b).

Depois, fixou-se o provete na outra garra, com cuidado para não deixar demasiada folga (Fig. 3.12c), e tendo em atenção que o provete estivesse corretamente alinhado. Uma vez fixo o provete em ambas as garras, apertou-se o esticador, não criando tensões no provete. O esticador é um conjunto de uma barra de metal e dois parafusos e tem o objetivo de esticar o provete para eliminação de folgas (Fig. 3.12d).



a)



b)



c)



d)

Fig. 3.12: a) prato superior com provete montado, b) fixação na garra oposta ao esticador, c) fixação na garra do lado do esticador (esticador não ajustado), d) provete após ajuste do esticador

Depois de fixado o provete ao prato superior, fixou-se o abrasivo P100, com dimensões de 220 mm x 385 mm, ao prato inferior, que possui movimento de vaivém (Fig. 3.13a). Esta fixação foi feita através das garras existentes no prato.



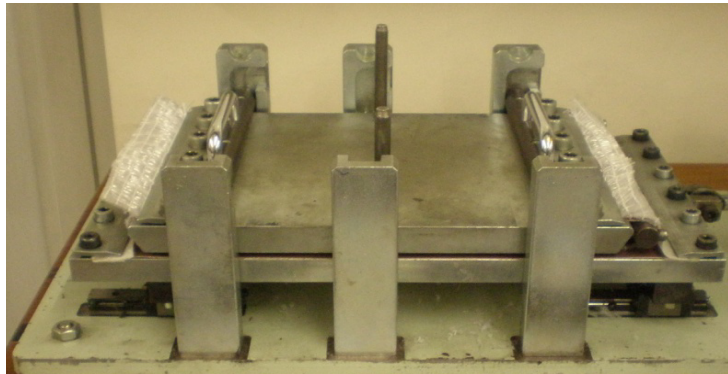
a)



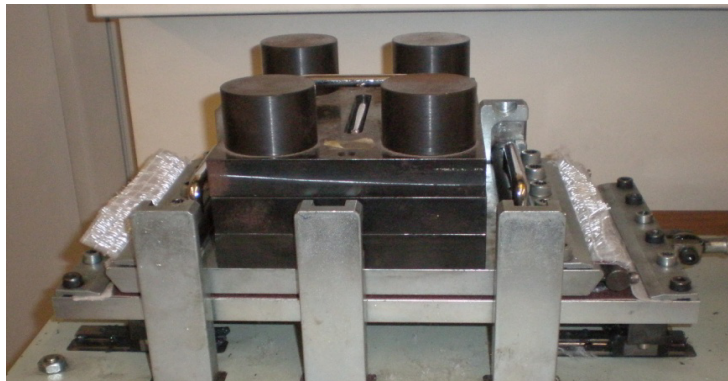
b)

Fig. 3.13: a) abrasivo P100 fixado ao prato inferior, b) pormenor das garras de fixação do prato inferior

Colocou-se o prato superior em cima do inferior (Fig. 3.14a), assegurando que o abrasivo e o provete estão alinhados. Posicionou-se, então, os três módulos de peso, como mostra a Fig. 3.14b para aplicação da carga vertical de 6 kPa.



a)



b)

Fig. 3.14: a) prato superior colocado em cima do prato inferior, b) equipamento preparado para o ensaio

Depois de tudo montado, ligou-se o aparelho, a funcionar a uma frequência de 90 ciclos por minuto durante 750 ciclos. Repetiu-se todo o procedimento para cada provete, descartando-se o abrasivo usado a cada ensaio realizado.

Se o provete, ou o material abrasivo, deslizar das garras durante o ensaio, deve rejeitar-se o provete e ensaiar outro. No final do ensaio o provete deve ser removido cuidadosamente evitando danificações adicionais.

4

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Tal como já foi referido, o geocompósito de reforço (GRC) objeto desta dissertação foi submetido a ensaios de danificação, nomeadamente, danificação durante a instalação e abrasão, de forma a poder avaliar a perda, ou não, de resistência do mesmo quando submetido a este tipo de danificações. Desta forma, foi necessário avaliar algumas propriedades do material antes e depois dos ensaios de danificação de modo a caracterizar o seu comportamento.

Para a caracterização do GCR, foram realizados ensaios de espessura, massa por unidade de área, tração-extensão, rasgamento e punçoamento estático. Todos os ensaios realizados tiveram como base a respetiva norma associada, tal como indica o Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Normas associadas a cada ensaio

ENSAIO	NORMA
ESPESSURA	NP EN ISO 9863-1:2006
MASSA POR UNIDADE DE ÁREA	NP EN ISO 9864:2006
TRAÇÃO - EXTENSÃO	NP EN ISO 10319:2005
RASGAMENTO	ASTM D4533-11
PUNÇOAMENTO ESTÁTICO	NP EN ISO 12236:2008

Neste capítulo encontram-se descritos os vários ensaios, tal como os procedimentos adotados e os resultados obtidos para os provetes intactos (não sujeitos a degradação). Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geossintéticos (LGS) da FEUP.

4.2 ENSAIO DE ESPESSURA

4.2.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

A espessura do GCR foi determinada segundo a norma NP EN ISO 9863-1:2006 (Geossintéticos: Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples), na qual é descrito um método para determinação da espessura de geossintéticos sujeitos a pressões especificadas (2 kPa, 20 kPa e 200 kPa). Esta norma define, também, a pressão à qual a espessura nominal é determinada (2 kPa). O método apresentado nesta norma é aplicável a todos os geossintéticos.

Segundo a norma referida, espessura define-se como a distância entre o prato de referência, no qual é colocado o provete, e a face de contacto de um calcador, paralelo ao prato, que aplica uma dada pressão ao provete. Para cada pressão especificada, o resultado do ensaio é a média dos valores

obtidos em 10 provetes. As diferentes pressões a aplicar aos geossintéticos são conseguidas através da colocação de diferentes pesos num êmbolo móvel que permite subir ou descer o calcador.

Neste trabalho foi usado um medidor de espessura da marca *Karl Schroder KG*. Este equipamento é constituído por um calcador circular removível, um prato de referência e um defletómetro. O calcador circular removível tem uma superfície lisa, podendo exercer pressões de 2 kPa, 20 kPa e 200 kPa com uma tolerância de $\pm 0,5\%$ normal ao plano do provete. O calcador está apoiado em, pelo menos, três pontos uniformemente distribuídos na sua superfície, de forma a garantir o seu paralelismo com o prato de referência. O prato de referência tem uma superfície lisa e dimensões mínimas de 1,75 vezes o diâmetro do calcador. O defletómetro permite determinar a distância entre o prato de referência e o calcador, com uma exatidão de 0,01 mm.

Os provetes a usar na determinação da espessura devem ter dimensões mínimas de 1,75 vezes o diâmetro da superfície do calcador. Neste caso, foram usados 10 provetes quadrados com 10 cm de lado para determinar a espessura.

Para a determinação da espessura do GCR colocou-se um provete entre o prato de referência e o calcador. Depois, baixou-se lentamente o calcador aplicando-se uma pressão de 2 kPa ao provete e registou-se a leitura no defletómetro após 30 s. De seguida, libertou-se a pressão, levantando-se o disco e removeu-se o provete, repetindo este procedimento para os 10 provetes.

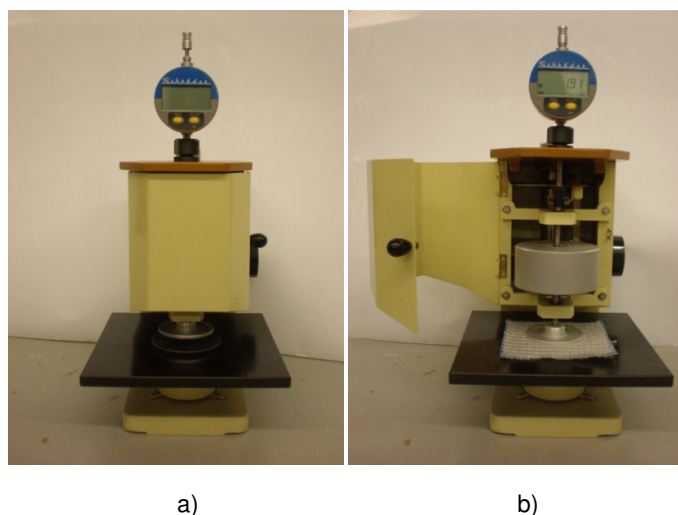


Fig. 4.1: Equipamento para medição da espessura de geossintéticos: a) equipamento fechado, b) equipamento com peso instalado durante a medição da espessura do geocompósito

4.2.2 RESULTADOS DO ENSAIO DOS PROVETES INTACTOS

No Quadro 4.2, são apresentados os resultados dos ensaios de espessura obtidos para o geocompósito de reforço.

Quadro 4.2: Resultados obtidos na determinação da espessura de 10 provetes do GCR

PROVETE	ESPESSURA (mm) 2 kPa
1	2,42
2	3,31
3	2,31
4	2,82
5	2,12
6	2,38
7	2,31
8	2,06
9	2,36
10	2,11
MÉDIA (mm)	2,42
DESVIO PADRÃO (mm)	0,38
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	15,7

O geocompósito apresentou uma espessura média de 2,42 mm, com coeficiente de variação de 15,7%. Analisando os valores das espessuras individuais de cada provete, verificou-se que esta variou entre 2,06 mm e 3,31 mm.

4.3 MASSA POR UNIDADE DE ÁREA

4.3.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio para a determinação de massa por unidade de área foi realizado usando o método especificado na norma NP EN ISO 9864:2006 (Geossintéticos – Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados), que pode ser aplicado a todos os geotêxteis e produtos relacionados. Segundo a norma referida, a massa por unidade de área pode ser calculada por pesagem de provetes com dimensões conhecidas.

A norma em questão refere que devem ser cortados, no mínimo, 10 provetes com um tamanho de 100 cm², quadrados ou circulares, de maneira que estes sejam representativos do material a ensaiar, podendo a área dos provetes ser maior, caso isso não se verifique.

Neste trabalho, foram cortados 10 provetes quadrangulares com dimensões de 10 cm x 10 cm, que, posteriormente, foram medidos com uma craveira (precisão de 0,02 mm) e pesados numa balança analítica, da marca *AND* e modelo *HF 300G* (precisão de 0,001 g), como representado na Fig. 4.2. No final a massa por unidade de área (g/m²) de cada provete (MUA) foi calculada pela seguinte expressão:

$$MUA = \frac{m \times 10000}{A} \quad (5.1)$$

em que m corresponde à massa do provete em gramas e A à área do provete em cm^2 .

O resultado final corresponde à média dos valores individuais de massa por unidade de área obtidos para 10 provetes, apresentando-se os respetivos desvio padrão e coeficiente de variação.



Fig. 4.2: Ensaio de massa por unidade de área. a) medição de um provete com craveira, b) pesagem de um provete com balança analítica

4.3.2 RESULTADOS DO ENSAIO DOS PROVETES ÍNTECTOS

No quadro abaixo apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de massa por unidade de área. O geocompósito apresentou uma massa por unidade de área de 351 g/m^2 , à qual se encontra associado um desvio padrão de 22 g/m^2 (coeficiente de variação de 6,2%).

Quadro 4.3: Resultados obtidos no ensaio de massa por unidade de área do GRC

PROVETE	LADO 1 (cm)	LADO 2 (cm)	ÁREA (cm^2)	MASSA (g)	ρ_A (g/m^2)
1	10,170	9,825	99,92	3,538	354
2	10,085	10,210	102,97	3,460	336
3	9,850	10,075	99,25	3,415	344
4	10,240	10,160	105,05	3,979	382
5	10,080	10,055	101,35	3,571	352
6	9,835	9,945	97,81	3,707	379
7	10,020	10,265	102,86	3,796	369
8	9,945	9,900	98,56	3,277	333
9	10,460	10,005	105,65	3,700	353
10	10,205	9,820	100,21	3,117	311
ρ_A MÉDIO (g/m^2)				351	
DESVIO PADRÃO (g/m^2)				22	
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)				6,2	

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

4.4.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio para caracterizar o comportamento à tração do geocompósito foi realizado de acordo com a norma NP EN ISO 10319:2005 (Geotêxteis – Ensaio de tração em tiras largas), na qual é descrito um método para determinação das propriedades de tração de geotêxteis e produtos relacionados. É um método que pode ser aplicado à maioria dos geotêxteis e também a outros tipos de geossintéticos, como por exemplo aos geocompósitos. Este ensaio permite obter vários parâmetros, tais como, a resistência à tração, a extensão na força máxima, a robustez e a rigidez secante.

O princípio deste método corresponde à fixação de um provete ao longo de toda a sua largura às garras do equipamento, sendo depois aplicada uma força longitudinal até que ocorra a rotura. A diferença deste método comparativamente a outros métodos de medição das propriedades de tração, como o método da tira estreita (NP EN 29073-3 ou NP EN ISO 13934-1), está relacionada com o facto da largura dos provetes ser maior do que o comprimento. Esta diferença tem a ver com o facto de alguns geossintéticos, quando submetidos à ação de cargas, terem a tendência de sofrer contração lateral na zona central do provete. O facto de terem maior largura faz com que tenham um comportamento mais próximo do esperado em campo.

Os ensaios de tração-extensão foram realizados num equipamento de ensaio universal da marca *Lloyd Instruments*, modelo *LR50K*. Este equipamento está dotado de um sistema de registo da força aplicada e correspondente extensão (Fig. 4.3). O computador ligado à máquina de tração está dotado de um *software* que controla o equipamento e regista os resultados do ensaio. Além disso, é também no computador que se define a velocidade do ensaio, 20 mm/min.



Fig. 4.3: Equipamento usados nos ensaios de tração-extensão

Para a realização deste tipo de ensaios podem ser usadas vários tipos de garras, dependendo das características dos materiais a ensaiar. Estas devem evitar a danificação e deslizamento dos geossintéticos. Para monitorizar quaisquer deslizamentos, podem desenhar-se duas linhas ao longo da toda a largura do provete junto às garras. A maioria dos materiais podem ser ensaiados com garras compressivas (hidráulicas, em cunha ou pneumáticas). No entanto, para materiais em que estas garras originem deslizamentos ou danos podem, em alternativa, ser usadas garras cilíndricas.

A extensão sofrida pelos provetes foi medida através de um vídeo-extensómetro, aparelho capaz de medir a distância entre dois pontos de referência no provete. Estes pontos estão afastados entre si de 60 mm, 30 mm acima e 30 mm abaixo do centro do provete, como mostra a Fig. 4.4. A extensão do provete é, assim, definida através da medição da distância entre o centro dos pontos de referência, durante o ensaio. Alternativamente, a extensão pode também ser medida através da distância entre garras, caso os resultados obtidos entre este método e o método do vídeo-extensómetro não sejam discrepantes.

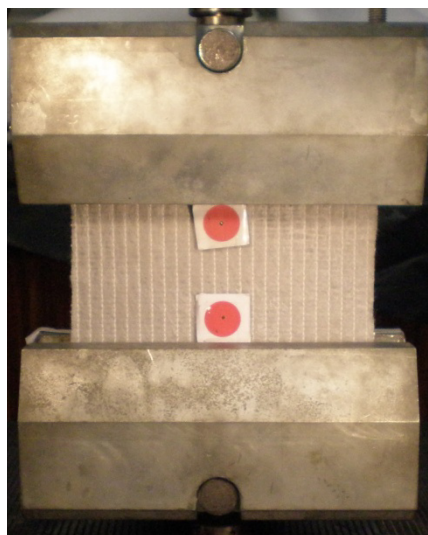


Fig. 4.4: Disposição dos pontos de referência nos provetes de tração-extensão

O primeiro passo para a realização deste ensaio foi montar os provetes nas garras, deixando uma distância de 100 mm entre elas. Os provetes foram montados e centrados nas garras, tendo em conta que o comprimento do provete é paralelo à direção de aplicação da força. Como a medição da extensão foi feita usando um vídeo-extensómetro, fixaram-se os pontos de referência e montou-se o extensómetro. Com tudo montado iniciou-se o ensaio de tração-extensão, continuando-se até à rotura do provete. Registou-se continuamente a força e a extensão correspondente.

Os resultados de um ensaio de tração, geralmente, incluem a média da força máxima, e da extensão na força máxima do conjunto de provetes ensaiados (segundo a norma são no mínimo 5 provetes) e o respetivo desvio padrão e coeficiente de variação.

No LGS da FEUP, existem 4 tipos de garras disponíveis: hidráulicas, cilíndricas, em cunha e pneumáticas (Fig. 4.5). De entre as garras referidas, apenas as cilíndricas ou em cunha poderiam ser utilizadas para a realização dos ensaios de tração-extensão, uma vez que as pegas hidráulicas e as pneumáticas não teriam força de compressão suficiente para segurarem nos provetes do GRC sem que houvesse escorregamentos dos provetes ou fuga de filamentos. Devido ao facto do GRC ser composto por diferentes componentes foi, ainda, necessário fazer algumas operações com os provetes, como colagens e introdução de varões de aço.

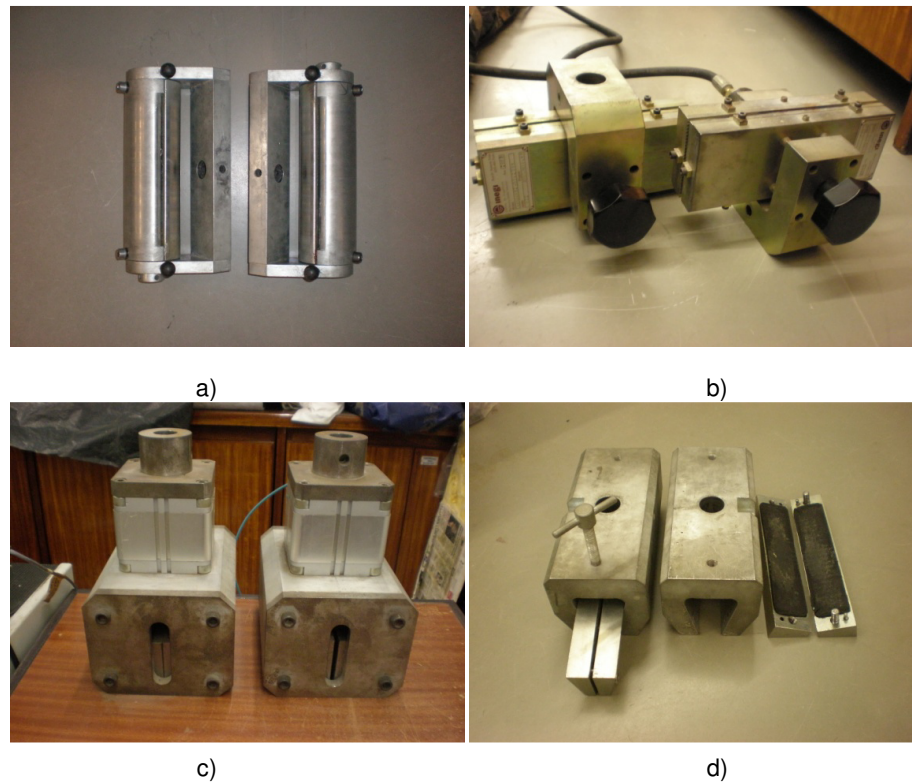


Fig. 4.5: Garras disponíveis no LGS da FEUP: a) garras cilíndricas, b) garras hidráulicas, c) garras pneumáticas, d) garras em cunha.

4.4.2 RESULTADOS OBTIDOS NAS COLAGENS TESTE

Como o geocompósito é formado por dois elementos de texturas diferentes (filamentos de PET e geotêxtil não-tecido) surgiram algumas dificuldades em ensaiar este material à tração (escorregamento dos filamentos de PET nas garras). Desta forma, foi necessário recorrer a colagens com introdução de varões de aço para evitar as fugas desses filamentos. As colagens permitiram uma maior adesão dos filamentos ao geotêxtil não-tecido e os varões impediram o deslizamento do provete das garras. Para otimização do processo de preparação dos provetes (previamente ao ensaio de tração-extensão), foram realizados alguns ensaios de teste, com diferentes tipos de provetes e diferentes tipos de garras. A Fig. 4.6 exemplifica a realização de uma colagem deste tipo num provete de GRC.

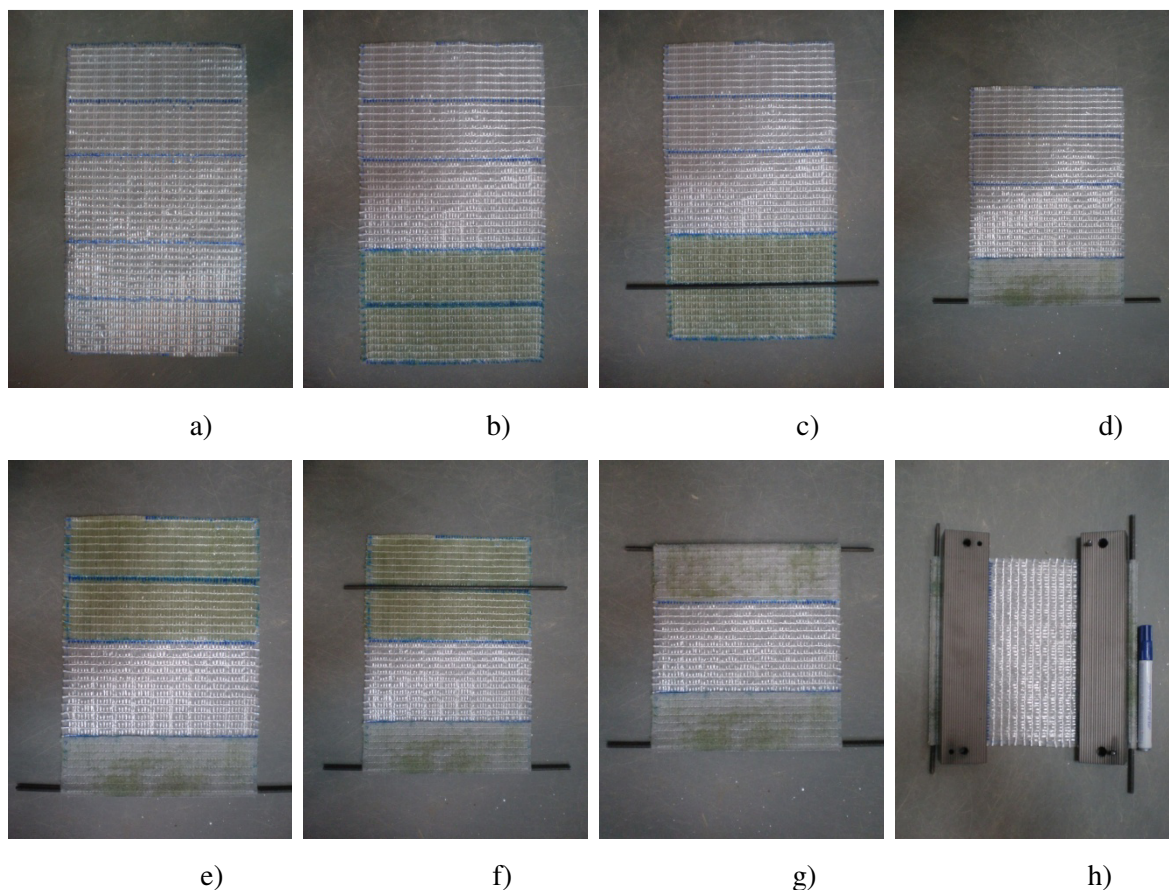


Fig. 4.6: Colagem tipo dos provetes do GRC a usar no ensaio de tração-extensão. a) provete sem cola, b) e e) provete com cola, c) e f) colocação do varão, d) e g) colagem do varão, h) colocação de pesos para melhor eficiência na colagem.

O Quadro 4.4 mostra as várias opções experimentadas para as colagens dos provetes a serem utilizados na caracterização do material. Para a realização das colagens foram usados dois tipos diferentes de cola, referidos neste trabalho como “cola amarela” e “cola castanha”. A primeira cola é da marca *UHU* e corresponde a uma cola de contacto forte, enquanto a segunda é da marca *Scotch - WeldTM* (adesivo universal 847).

Quadro 4.4: Análise visual dos provetes de teste na direção de fabrico (DF) e na direção perpendicular à de fabrico (DPF), depois de realizado o ensaio de tração-extensão

TIPO DE PROVETE	COLAGEM	COLA	GARRAS	DIREÇÃO	ANÁLISE VISUAL
1	Não	---	Cunha	DF/DPF	Com fugas de filamentos
2	Sim	Amarela	Cunha	DF/DPF	Sem fuga de filamentos
3	Sim	Castanha	Cunha	DF/DPF	Sem fuga de filamentos
4	Sim – duas aplicações, espaçadas de 24H	Amarela	Cunha	DF/DPF	Sem fuga de filamentos
5	Sim – duas aplicações, espaçadas de 24H	Castanha	Cunha	DF/DPF	Sem fuga de filamentos
6	Não	---	Cilíndricas	DF	Sem fuga de filamentos
7	Não	---	Cilíndricas	DPF	Com fuga de filamentos

Tendo em conta os resultados obtidos nas colagens, decidiu-se que os provetes iriam apenas ter uma camada de cola, por esta ser a situação mais económica, uma vez que origina um menor consumo de cola. Tanto usando a “cola amarela” como a “cola castanha” não houve fuga de filamentos pelo que se optou por usar a “cola amarela” para todos os provetes, pois esta tem um custo mais baixo.

4.4.3 RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TRAÇÃO-EXTENSÃO EM PROVETES INTACTOS

Os Quadros 4.5 e 4.6 resumem os resultados obtidos nos ensaios de tração-extensão do geocompósito (provetes intactos) na direção de fabrico e na direção perpendicular à de fabrico, respetivamente. Observou-se que as curvas “força de tração-extensão” possuíam dois momentos de rotura, o primeiro correspondente à rotura dos filamentos de PET e o segundo relativo à rotura do geotêxtil não-tecido. Em todos os casos a força máxima de tração ocorreu quando a rotura dos filamentos, o que pode não acontecer nos provetes danificados.

Quadro 4.5: Resultados obtidos para força máxima, resistência à tração e extensão da força máxima no ensaio de 10 provetes intactos na direção de fabrico.

	MOMENTO DE ROTURA DOS FILAMENTOS		MOMENTO DE ROTURA DO GEOTÊXTIL		GCR
	F _{MÁX} (N)	E _{FM} (%)	F _{MÁX} (N)	E _{FM} (%)	RT (kN/m)
1	8880	20	3638	105	44,4
2	8312	26	3250	86	41,6
3	9351	24	3049	74	46,8
4	8789	22	2971	48	43,9
5	8460	22	3078	86	42,3
6	8188	24	2960	55	40,9
7	7779	24	3211	73	38,9
8	9223	22	3431	77	46,1
9	9189	23	2878	74	45,9
10	8757	23	2868	82	43,8
MÉDIA	8693	23	3133	76	43,5
DESVIO PADRÃO	505	2	251	16	2,5
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	5,8	6,8	8,0	21,1	5,8

F_{MÁX}- força máxima, E_{F_{MÁX}}- extensão na força máxima, T- resistência à tração

No momento da rotura dos filamentos obteve-se uma força máxima de 8693 N com a correspondente extensão de 23 %. Para a rotura do geotêxtil a força máxima foi de 3133 N para uma extensão de 76 %. O geocompósito apresentou uma resistência à tração de 43,5 kN/m e uma extensão na força máxima de 23%. As curvas “força de tração-extensão” individuais dos provetes ensaiados na direção de fabrico, encontram-se representadas na Fig. 4.7.

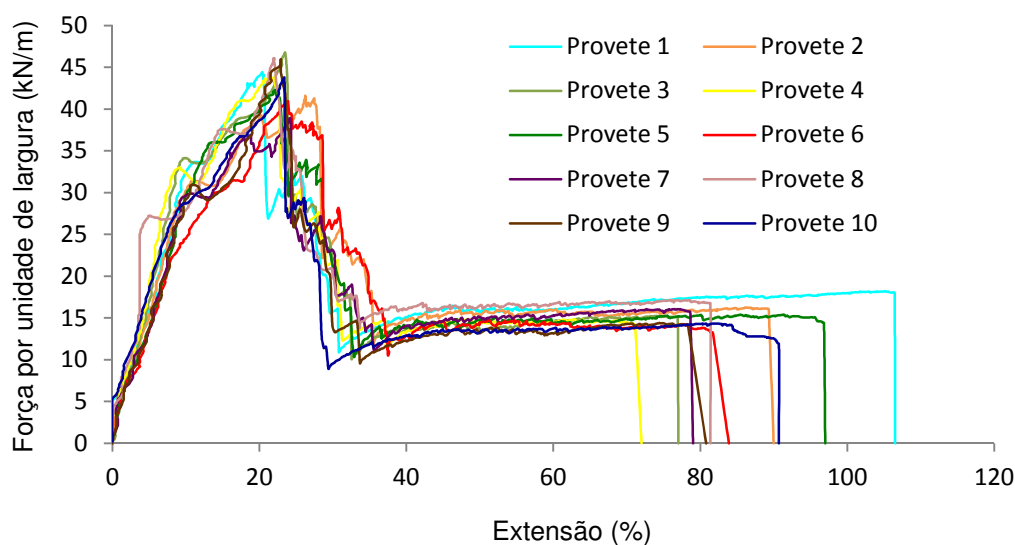


Fig. 4.7: Curvas força-extensão individuais de 10 provetes, na direção de fabrico

Quadro 4.6: Resultados obtidos para força máxima, resistência à tração e extensão da força máxima no ensaio de 10 provetes intactos na direção perpendicular à de fabrico

	MOMENTO DE ROTURA DOS FILAMENTOS		MOMENTO DE ROTURA DO GEOTÊXTIL		GCR
	FMÁX (N)	EFM (%)	FMÁX (N)	EFM (%)	RT (kN/m)
1	8582	8	3287	77	42,9
2	9267	10	3487	98	46,3
3	9036	11	3455	95	45,2
5	8910	7	3192	76	44,5
5	8562	9	3088	77	42,8
6	9140	10	3116	93	45,7
7	9187	9	3352	96	45,9
8	9141	7	3180	100	45,7
9	9182	8	3027	75	45,9
10	9025	12	3067	95	45,1
MÉDIA	9003	9	3225	88	45,0
DESVIO PADRÃO	248	2	163	11	1,2
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	2,8	18,9	5,1	11,9	2,8

$F_{MÁX}$ - força máxima, $EF_{MÁX}$ - extensão na força máxima, T- resistência à tração

Na direção perpendicular à de fabrico, observou-se uma força máxima de 9003 N no momento de rotura dos filamentos; a extensão correspondente foi de 9%. No momento de rotura do geotêxtil obteve-se uma força máxima de 3225 N com correspondente extensão de 88%. O GRC apresentou uma resistência à tração de 45,0 kN/m na direção perpendicular à de fabrico e uma extensão de 9%. Na Fig. 4.8 encontram-se representadas as curvas individuais “força de tração-extensão” dos provetes ensaiados na direção perpendicular à de fabrico.

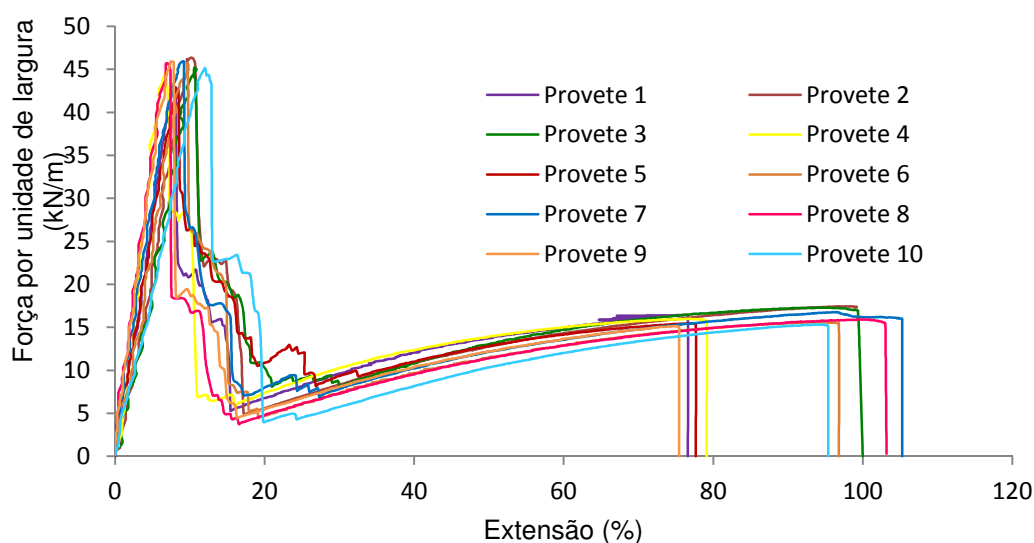


Fig. 4.8: Curvas força-extensão individuais de 10 provete, na direção perpendicular de fabrico

4.5 ENSAIO DE RASGAMENTO

4.5.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

O ensaio de rasgamento aplicado ao GRC foi feito segundo a norma ASTM D4533-11 (*Standard test method for trapezoid tearing strenght of geotextiles*). Este ensaio serve para medir a força necessária à propagação de um rasgo, previamente feito num provete de geossintético, neste caso o geocompósito. Os provetes usados são de forma retangular, tendo marcado um trapezoide isósceles, como mostra a Fig. 4.9, possuindo, ainda, um pequeno corte de 15 mm.

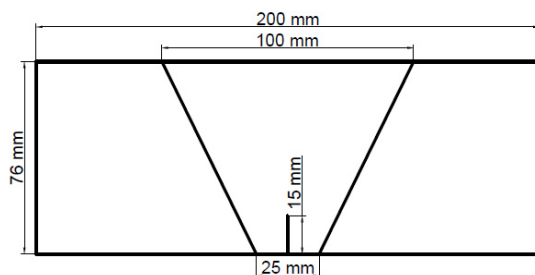


Fig. 4.9: Representação esquemática do provete de rasgamento

O ensaio de rasgamento foi realizado no mesmo equipamento que o ensaio de tração-extensão. O primeiro passo consistiu em prender as partes não paralelas do trapezoide nas garras, que são paralelas e, inicialmente, estão distanciadas de 25 mm. Em seguida, o equipamento foi configurado para operar a uma velocidade constante de 300 mm/min e iniciou-se o ensaio. A separação das garras ocorreu de forma constante durante o ensaio fazendo com que o rasgo aumentasse de tamanho. O desenvolvimento da força de rasgamento e o respetivo deslocamento entre garras foram registados no programa de computador. A Fig. 4.10 mostra o procedimento seguido no ensaio de rasgamento.

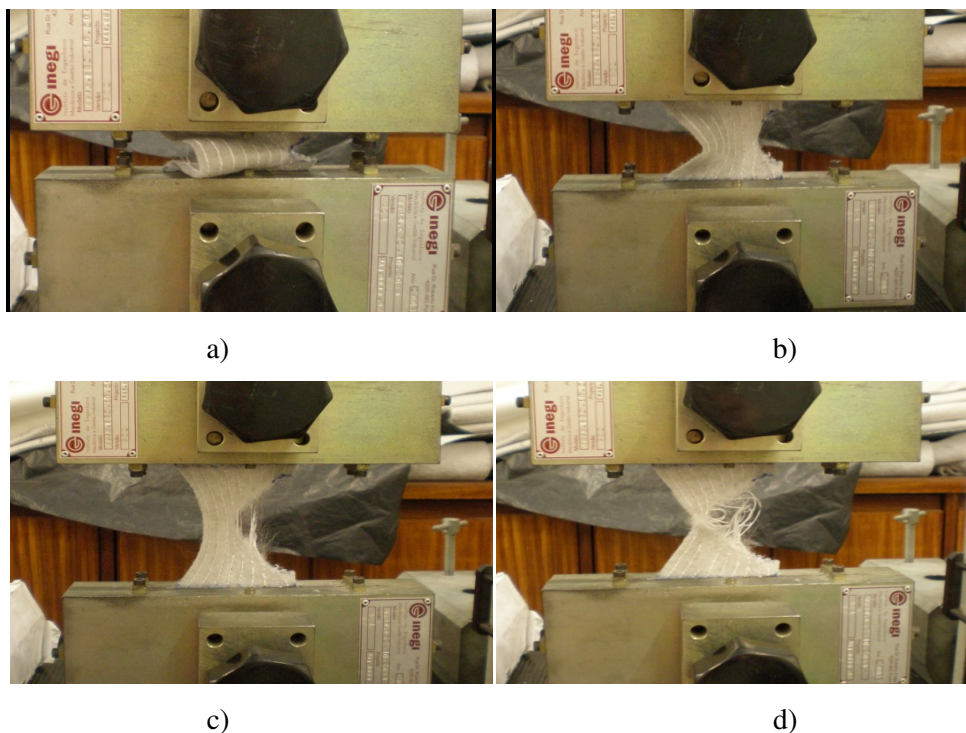


Fig. 4.10: Ensaio de rasgamento do GCR: a) início do ensaio, b) e c) durante o ensaio, d) final do ensaio

A norma refere que devem ser rejeitados os resultados dos provetes que, eventualmente, sofram escorregamento nas garras durante a realização dos ensaios e todos os resultados que se desviem mais de 25% da média dos valores dos provetes ensaiados. O resultado final de um ensaio de rasgamento corresponde ao valor médio da resistência ao rasgamento (força máxima registada para todos os provetes ensaiados), acompanhado dos respetivos desvio padrão e coeficiente de variação.

Tal como no ensaio de tração-extensão, foi necessário uma preparação prévia dos provetes (com recurso a colagens) para evitar a fuga dos filamentos de PET. Deste modo, e para perceber a melhor forma de realizar os ensaios de rasgamento com o novo material foram feitos alguns ensaios de teste com diferentes tipos de colagens.

4.5.2 RESULTADOS OBTIDOS NAS COLAGENS DE TESTE

Uma das colagens testadas foi a tipo *sandwich* em que se cortou um provete de rasgamento de GCR e na zona das pegas colaram-se dos dois lados um geotêxtil não-tecido, como mostra a Fig. 4.11a). Foi, também, feito outro tipo de colagem, através do corte de um provete de GRC maior, de forma a poder ser dobrado na zona das pegas, colocando-se um arame, de forma impedir a fuga dos filamentos. Por último, tentou-se apenas dobrar o provete (sem colocação do arame), mas colocando duas camadas de cola espaçadas por um período de 24 horas.

O Quadro 4.7 mostra os fenómenos observados durante a realização dos vários ensaios teste de rasgamento com os diferentes tipos de colagem.

Quadro 4.7: Análise visual dos provetes de teste, depois de realizado o ensaio de rasgamento

TIPO DE PROVETE	COLA	GARRAS	DIREÇÃO	ANÁLISE VISUAL
Tipo <i>Sandwich</i>	Amarela	Cunha	DF	Com fuga de filamentos
Tipo <i>Sandwich</i>	Castanha	Cunha	DF	Sem fuga de filamentos
Dobrado e com arame	Amarela	Cunha	DF	Com fuga de filamentos e enrugamento do geotêxtil
Dobrado e com arame	Amarela (com duas camadas de cola, colocadas com 24H de intervalo)	Cunha	DF	Com fuga de filamentos e enrugamento do geotêxtil
Dobrado e sem arame	Amarela	Cunha	DF	Com fuga de filamentos
Dobrado e sem arame	Amarela (com duas camadas de cola, colocadas com 24H de intervalo)	Cunha	DF/DPF	Sem fuga de filamentos
Dobrado e sem arame	Amarela (com duas camadas de cola, colocadas com 24H de intervalo)	Hidráulicas	DF/DPF	Sem fuga de filamentos

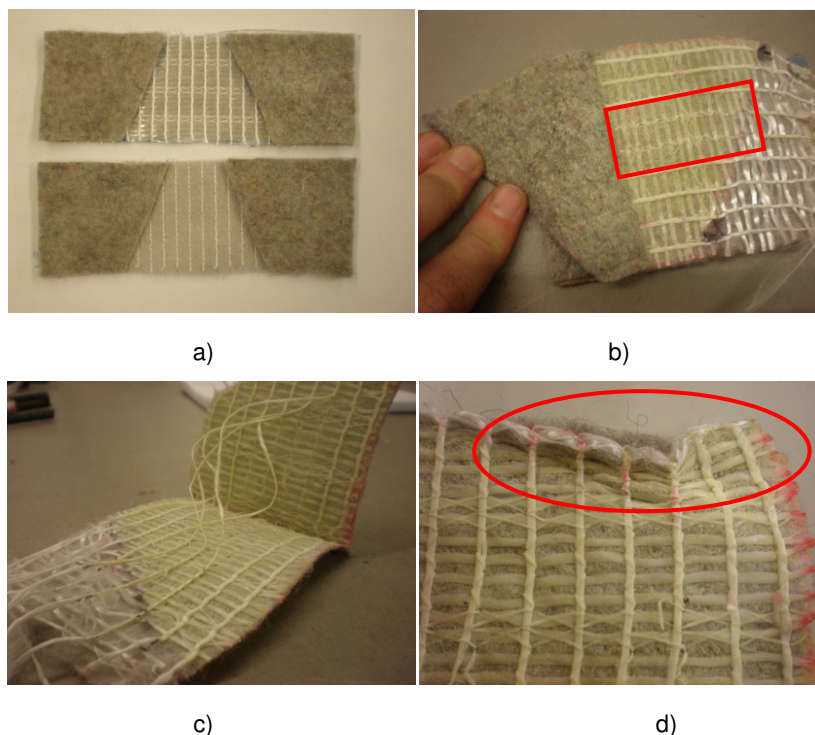
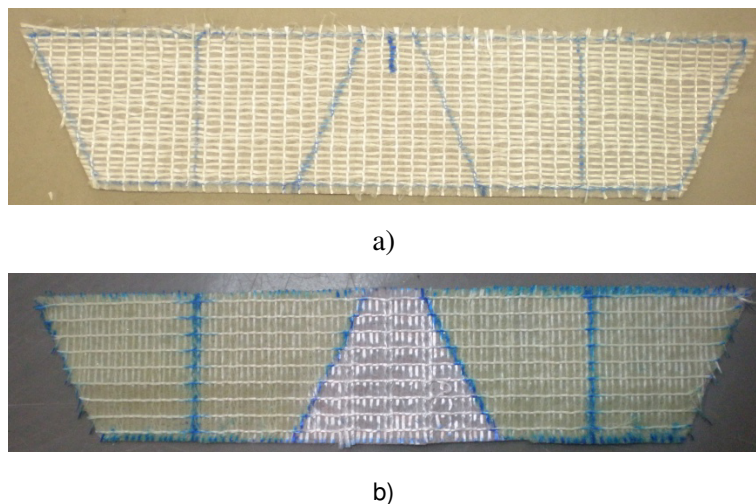
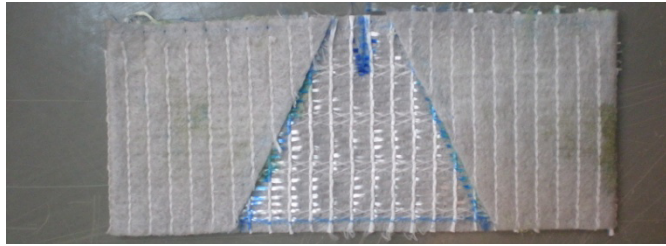


Fig. 4.11: Provetes de teste depois de ensaiados ao rasgamento: a) colagem tipo *sandwich* com cola castanha, b) colagem tipo *sandwich* com cola amarela (com fuga de filamentos), c) colagem de dobra e sem arame com cola amarela (com fuga de filamentos) d) enrugamento do geotêxtil

A Fig. 4.11 apresenta alguns fenómenos observados nos provetes de teste ensaiados ao rasgamento. Como se pode verificar, notou-se nalguns dos casos a ocorrência de fugas de filamentos (Fig. 4.11b) e enrugamento do geotêxtil devido à força exercida pelos filamentos de PET (Fig. 5.11d). Tendo em conta estes resultados, verificou-se que a colagem com dobra e duas camadas de cola, colocadas com 24 horas de intervalo, foi a que produziu bons resultados, pelo que foi usada para todos os ensaios, quer de provetes intactos, quer de danificados. As colas usadas neste ensaio foram iguais às usadas no ensaio de tração, pelo que mais uma vez se optou pela opção mais económica, a cola amarela. Na realização dos ensaios optou-se por ensaiar os provetes com garras hidráulicas. Estas garras permitem que a montagem dos provetes seja mais simples e rápida, acelerando a realização dos ensaios. O método usado para as colagens dos provetes danificados e intactos encontra-se ilustrado na Fig. 4.12.





c)

Fig. 4.12: Colagem tipo dos provetes usados no ensaio de rasgamento: a) provete antes da colagem, b) provete com a primeira camada de cola, c) provete colado, depois de 24 horas de secagem da primeira camada de cola

4.5.3 RESULTADOS OBTIDOS

Nos Quadros 4.8 e 4.9 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de rasgamento para os provetes intactos na direção de fabrico e na direção perpendicular à de fabrico.

Quadro 4.8: Resultados obtidos no ensaio de rasgamento na direção de fabrico

PROVETE	RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO (N)	DESVIO AO VALOR MÉDIO (%)
1	930	-3,6
2	938	-2,8
3	1101	14,1
4	1065	10,3
5	958	-0,8
6	1047	8,5
7	737	-23,6
8	949	-1,6
9	1073	11,2
10	852	-11,7
VALOR MÉDIO (N)	965	-
DESVIO PADRÃO (N)	113	-
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	12	-

Quadro 4.9: Resultados obtidos no ensaio de rasgamento na direção perpendicular à de fabrico

PROVETE	RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO (N)	DESVIO AO VALOR MÉDIO (%)
1	859	1,5
2	780	10,5
3	813	6,7
4	955	-9,5
5	938	-7,6
6	831	4,7
7	935	-7,2
8	762	12,6
9	850	2,5
10	995	-14,1
VALOR MÉDIO (N)	872	-
DESVIO PADRÃO (N)	79	-
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (N)	9	-

A resistência ao rasgamento do GCR na direção de fabrico foi de 965 N, com um desvio padrão de 113 N e coeficiente de variação de 12%. Já na direção perpendicular à de fabrico verificou-se que o valor médio da força de rasgamento foi de 872 N, o desvio padrão de 79 N, apresentando um coeficiente de variação de 9%.

Nas Fig. 4.13 e 4.14, apresentam-se as curvas de rasgamento de cada provete, nas direções de fabrico e perpendicular à de fabrico.

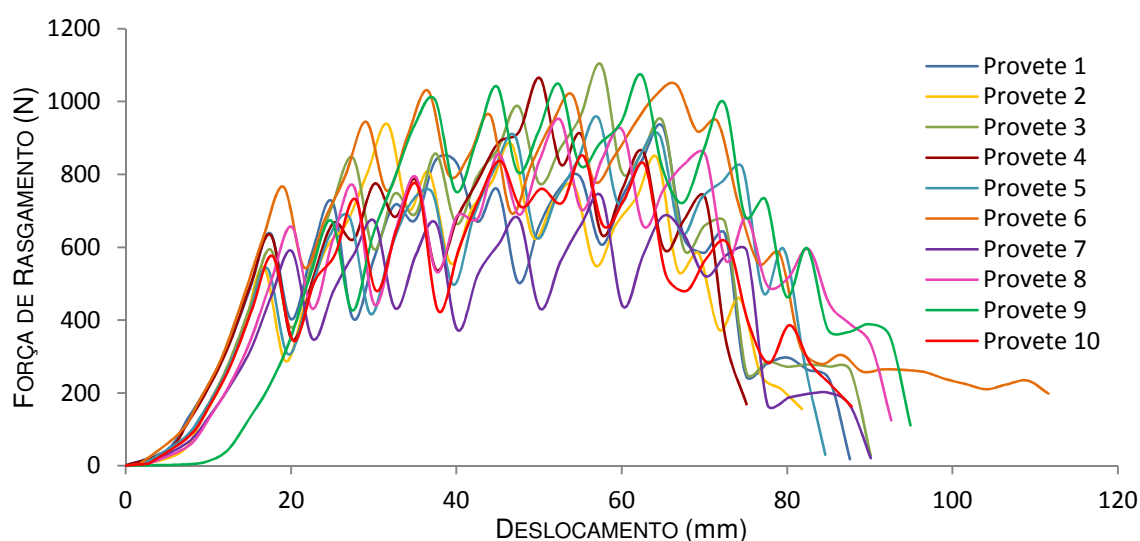


Fig. 4.13: Curvas de rasgamento individuais para os provetes ensaiados na direção de fabrico

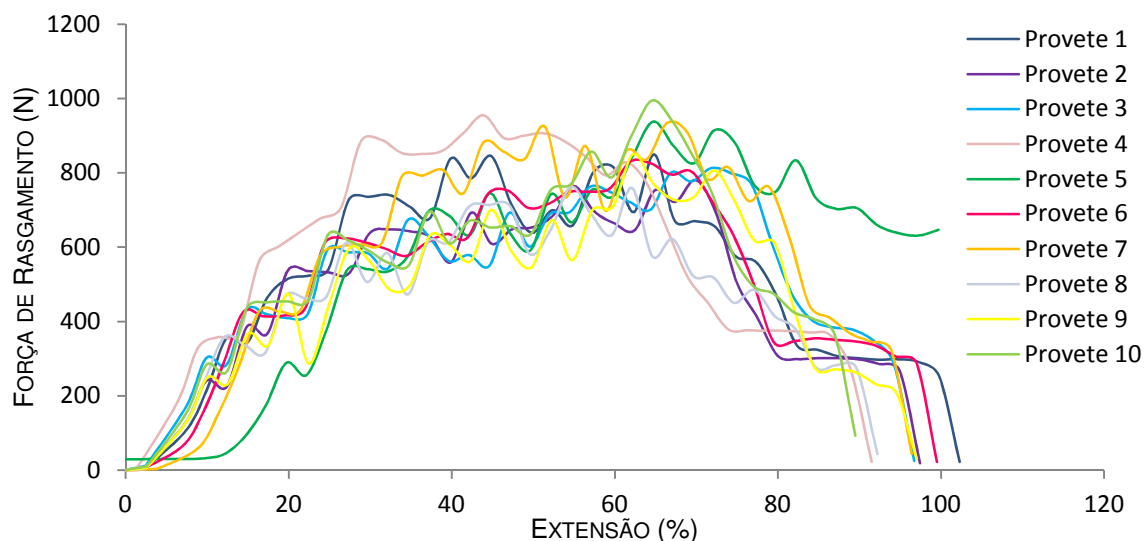


Fig. 4.14: Curvas de rasgamento individuais para os provetes ensaiados na direção perpendicular à de fabrico.

4.6 RESISTÊNCIA AO PUNÇOAMENTO ESTÁTICO

4.6.1 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

As ações de punçoamento, geralmente, estão associadas à função de separação, uma vez que permitem avaliar a resistência dos geossintéticos a solicitações induzidas pelas partículas dos agregados a separar. Existem diferentes tipos de ensaios para avaliar este parâmetro, o ensaio de punçoamento estático e o dinâmico [1]. Neste trabalho, tentou-se usar o ensaio de punçoamento estático, no entanto acabou por não se conseguir devido às características do material.

O ensaio de punçoamento estático foi realizado segundo a norma NP EN ISO 12236:2008 (Geossintéticos – Ensaio de punçoamento estático (Ensaio CBR)). O método descrito nesta norma envolve a medição da força necessária para fazer passar um pilão de aço inoxidável através de um geossintético. Este ensaio pode ser aplicado à maioria dos geossintéticos, exceto aqueles com abertura maior do que 10 mm.

O princípio deste ensaio tem por base o avanço de um pilão, à velocidade constante de (50 ± 10) mm/min, através do centro de um provete e perpendicular ao mesmo, registando-se a força e o deslocamento em cada momento. A norma refere que devem ser ensaiados 5 provetes. Depois de ensaiar estes provetes, se o coeficiente de variação da força de punçoamento for maior do que 5%, é necessário ensaiar mais 5 provetes, considerando, no final, os resultados dos 10 provetes.

Mais uma vez, e tal como nos ensaios anteriores, foram realizados alguns ensaios de teste para perceber qual a melhor opção para realizar ensaios de punçoamento estático com o GRC. A Fig. 4.15 mostra os dois tipos de provetes ensaiados.

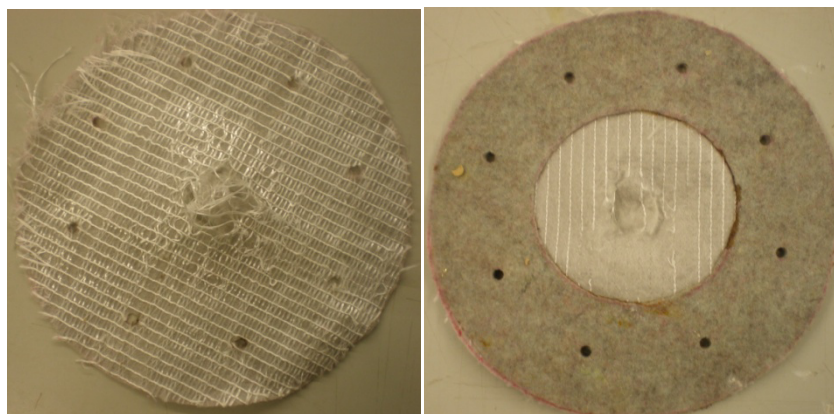


Fig. 4.15: Provete de teste de punção estático

4.6.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TESTE

Ensaaiaram-se dois tipos de provetes: (1) provetes simples, sem qualquer tipo de colagem e (2) provetes com colagem de um geotêxtil não-tecido em *sandwich* na zona das garras (foram realizadas colagens com os dois tipos de cola). Em ambos os casos ocorreram fugas dos filamentos de PET, fazendo com que os resultados obtidos referentes à força e ao deslocamento não correspondessem à realidade (Fig. 4.16). Para esta fuga contribuiu o facto de ser necessário efetuar orifícios nos provetes (cortando os filamentos) para a fixação dos mesmos nas garras.

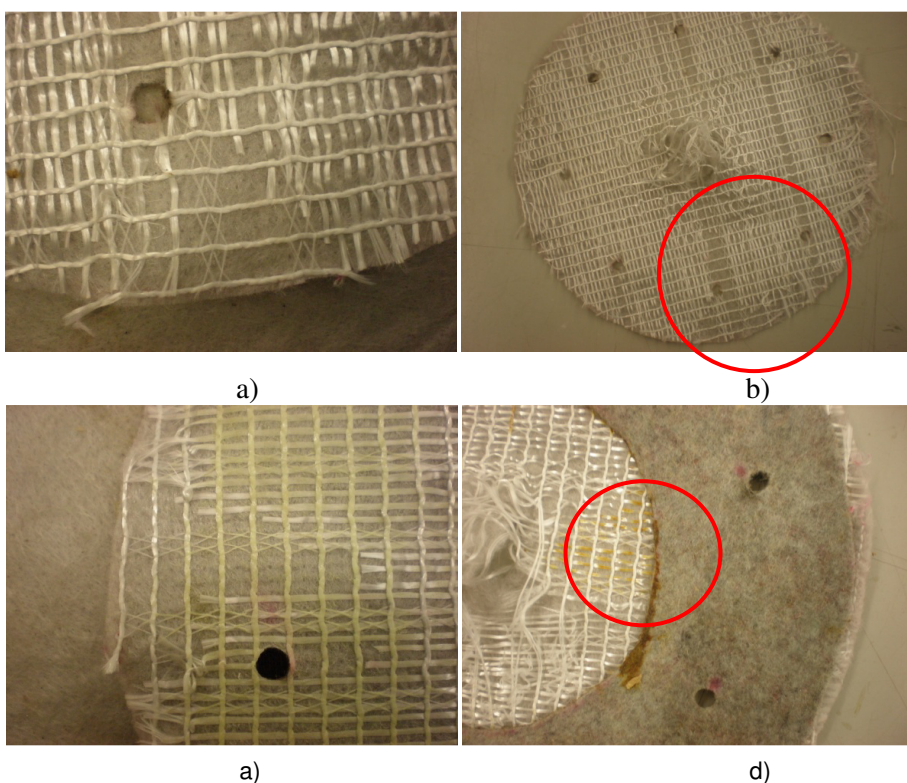


Fig. 4.16: Provete de teste depois de ensaiados ao punção estático: a) e b) provete sem colagem, c) provete com colagem em *sandwich* com cola amarela, d) provete colado em *sandwich* com cola castanha (circulo vermelho – fuga de filamentos).

Tendo em conta tudo o que foi referido atrás, não foram realizados ensaios de punção estático, nem nos provetes intactos, nem nos provetes danificados.

5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Tal como já foi referido, os provetes do GCR foram submetidos a vários ensaios, quer de danificação, quer de caracterização de forma a avaliar a variação de resistência dos mesmos. Assim, este capítulo trata da apresentação e discussão dos resultados obtidos, de forma a perceber as alterações que ocorreram no GCR depois dos processos de danificação.

Para danificar os provetes realizaram-se ensaios de DDI e de abrasão (ABR), que foram descritos no capítulo 3. Alguns provetes foram submetidos apenas à DDI ou apenas à abrasão, enquanto parte dos provetes foram submetidos à DDI e de seguida à ABR, de maneira a avaliar-se a existência, ou não, de efeitos sinérgicos entre estas danificações. Dado o GCR possuir dois lados com características diferentes, lado com filamentos (CF) e lado sem filamentos (SF), foi necessário realizar ensaios de danificação em ambos os lados, tendo em atenção que quando se realizavam sucessivamente ensaios de DDI e abrasão a danificação era induzida sempre ao mesmo lado. Os ensaios de danificação foram realizados nas duas direções do GCR, direção de fabrico (DF) e direção perpendicular à de fabrico (DPF). O Quadro 5.1 resume os ensaios realizados tendo em conta os lados e direções do GCR.

Quadro 5.1: Resumo dos ensaios de danificação realizados com GCR

ENSAIOS	DF		DPF	
	CF	SF	CF	SF
DDI	5	5	5	5
ABR	5	5	5	5
DDI + ABR	5	5	5	5

Os ensaios de espessura e MUA não se realizaram nos provetes danificados. Devido às danificações induzidas, em algumas situações, o GCR sofreu rearranjos na disposição dos seus componentes, com formação de aglomerados de material (Fig. 5.1), tornando-o muito heterogéneo. Deste modo, na realização dos ensaios de espessura, os resultados iriam estar muito dependentes do local onde fosse efetuada a medição. Assim, os resultados poderiam traduzir um aumento ou diminuição da espessura do GCR, se a medição fosse realizada em cima ou fora da zona dos aglomerados, respetivamente (a dispersão de resultados seria muito elevada). A formação de aglomerados implicou a movimentação de material de um local para outro nos provetes do GCR, pelo que, excluindo estes aglomerados (que não contribuem para resistência do GCR) existirá diminuição da espessura.



Fig. 5.1: Provete com aglomerados de material

A determinação de MUA também não foi realizada, uma vez que, apesar de haver formação de aglomerados de material, não se perderam componentes do GCR. Assim, a MUA não deverá ter sofrido alterações significativas após danificação do GCR.

Com o intuito de avaliar a alteração de resistência do GCR depois dos ensaios de danificação, foi calculada a resistência à tração residual (RTR) de cada conjunto de provetes. A RTR corresponde à percentagem de resistência que o material apresenta (depois de danificado) relativamente à sua resistência original. É calculada pela seguinte expressão:

$$RTR = \frac{RT_{dan}}{RT_{int}} \times 100 \quad (5.1)$$

Na qual:

- RT_{dan} é a resistência à tração do GCR danificado;
- RT_{int} é a resistência à tração do GCR intacto.

Para os provetes sujeitos ao rasgamento foi também calculada a resistência ao rasgamento residual (RRR). O princípio de cálculo é o mesmo, no entanto as resistências envolvidas são as de rasgamento, como mostra a expressão 5.2.

$$RRR = \frac{RR_{dan}}{RR_{int}} \times 100 \quad (5.2)$$

Na qual:

- RR_{dan} é a resistência ao rasgamento do GCR danificado;
- RR_{int} é a resistência ao rasgamento do GCR intacto.

Na impossibilidade de determinar as propriedades dos geossintéticos a longo prazo, é necessário prever a degradação que estes sofrem com o passar dos anos. Assim, no dimensionamento de estruturas com estes materiais são introduzidos fatores de segurança (RF) parciais para representar os efeitos dos diferentes agentes de degradação a que os geossintéticos estarão sujeitos ao longo do tempo de vida útil da estrutura onde estão inseridos. Alguns métodos de dimensionamento incluem descrições de como esses coeficientes de segurança parciais podem ser determinados, por exemplo, experimentalmente, com recurso a valores de bases de dados ou interpolando informações obtidas para obras em condições semelhantes. Como exemplos de documentos onde existe informação desse tipo podem referir-se: a ISO/TR 20432, a BS 8006-1 e o WSDOT Standard Practice T925 [25]. Neste trabalho os fatores redução parciais para o efeito da DDI e abrasão foram determinados pela seguinte expressão:

$$RF = \frac{R_{int}}{R_{dan}} \quad (5.3)$$

Na qual:

- R_{dan} é a resistência do GCR danificado;
- R_{int} é a resistência do GCR intacto.

Os RF's calculados tiveram como base os resultados obtidos nos ensaios de tração-extensão e de rasgamento. Assim, na expressão 5.3 as resistências, quer a do GCR intacto quer a do danificado, foram substituídas pelos valores obtidos nos ensaios referidos.

Atualmente, os métodos existentes para o dimensionamento de estruturas de geossintéticos consideram os efeitos dos agentes de degradação isoladamente, não sendo considerada a ação simultânea dos agentes de degradação. Assim, o fator de redução é obtido através da multiplicação dos RF's dos diferentes agentes de degradação. Uma vez que neste caso apenas se submeteu o GCR a dois tipos de danificação, então o fator de redução será dado pela multiplicação do fator de redução da DDI pelo da abrasão, tal como mostra a expressão 5.4.

$$RF_{DDI+ABR\ TRAD} = RF_{DDI} \times RF_{ABR} \quad (5.4)$$

Na qual:

- RF_{DDI} é o fator de redução da DDI;
- RF_{ABR} é o fator de redução da abrasão.

Na realidade, os geossintéticos dificilmente estarão sujeitos a apenas um agente de degradação. Assim, a degradação que ocorre nos materiais será sempre o efeito combinado de vários agentes de degradação (podendo existir efeitos sinérgicos entre eles). Desta forma, compara-se, aqui, o RF obtido pela multiplicação dos fatores de redução parciais da DDI e da abrasão ($RF_{DDI+ABR\ TRAD}$) com o fator de redução calculado partir da degradação do GCR pela sobreposição dos dois tipos de danificação ($RF_{DDI+ABR}$).

Os RFs calculados apenas se aplicam a este caso específico, uma vez que foram determinados para condições específicas de ensaio, não podendo ser usados para o dimensionamento. Antes da aplicação de um RF deve verificar-se se as condições de obra e as condições do laboratório são equivalentes.

Neste capítulo apresentam-se, então, os resultados obtidos nos ensaios de tração-extensão e nos ensaios de rasgamento dos provetes danificados, e relacionam-se os vários resultados de maneira a perceber as diferenças entre os tipos de danificações, e qual (ou quais) afetam o GCR.

5.2 ANÁLISE VISUAL

Depois de danificado o GCR, e antes da realização dos ensaios de caracterização, procedeu-se à análise visual dos provetes. Esta análise permitiu a avaliação do grau de danificação induzido e ainda a identificação dos mecanismos de danificação ocorridos.

Os danos observados incluíram sujidade, corte, enrugamento e diminuição da espessura dos filamentos, rompimento de costuras, furos e formação de aglomerados no geotêxtil, diminuição da largura do GCR e desgaste do geotêxtil.

A sujidade presente no GCR teve origem no ensaio de DDI, uma vez que este é realizado com *corundum*. O último durante o ensaio acaba por lascar e libertar partículas de pó que se depositam nos provetes do GCR.

Devido às ações dos ensaios de danificação, os filamentos do GCR sofreram alguns danos. O corte foi total (Fig. 5.2e) ou parcial. Ocorreu, também, enrugamento dos filamentos, deixando-os um pouco mais soltos do que estavam antes de serem submetidos aos ensaios de danificação (Fig. 5.2a). Devido às forças de atrito formadas entre o GCR e o abrasivo do ensaio de abrasão os filamentos foram emaranhados, tal como mostram as Fig. 5.2c e 5.2i. O abrasivo em contacto com o GCR provocou, também, diminuição da espessura dos filamentos, principalmente quando o ensaio decorreu na direção dos filamentos.

Devido ao ensaio de abrasão, formaram-se aglomerados de fibras do geotêxtil, como ilustra a Fig. 5.2f. Estes aglomerados aconteceram devido aos movimentos vaivém que se deram no ensaio de abrasão. Tanto o ensaio da DDI, como o ensaio de abrasão, foram responsáveis pelo desgaste observado no geotêxtil verificado nas Fig. 5.2b e Fig. 5.2d, por exemplo. Este desgaste aconteceu devido ao movimento relativo entre o GCR e o *corundum* e o abrasivo, respetivamente. Os furos no geotêxtil mostraram ser comuns nos provetes que sofreram os dois tipos de danificação, uma após outra.

O Quadro 5.2 mostra os resultados obtidos, que serão, mais à frente relacionados com os resultados dos ensaios de caracterização.

Quadro 5.2: Análise visual do GRC depois de danificado

			Sujidade	Corte de filamentos	Enrugamento de filamentos	Diminuição de espessura dos filamentos	Emaranhamento de filamentos	Rompimento de costuras	Furos no geotêxtil	Diminuição da largura do GCR	Desgaste do geotêxtil	Formação de aglomerados de geotêxtil
DDI	DF	CF	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-
		SF	X	-	X	-	-	X	-	-	X	-
	DPF	CF	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-
		SF	X	-	X	-	-	-	-	-	X	-
ABR	DF	CF	-	-	X	X	-	X	-	X	-	-
		SF	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X
	DPF	CF	-	X	-	X	X	X	-	-	-	-
		SF	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X
DDI + ABR	DF	CF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-
		SF	X	X	-	-	-	X	X	X	X	X
	DPF	CF	X	X	X	-	-	X	-	X	-	-
		SF	X	-	-	-	-	-	-	-	X	X

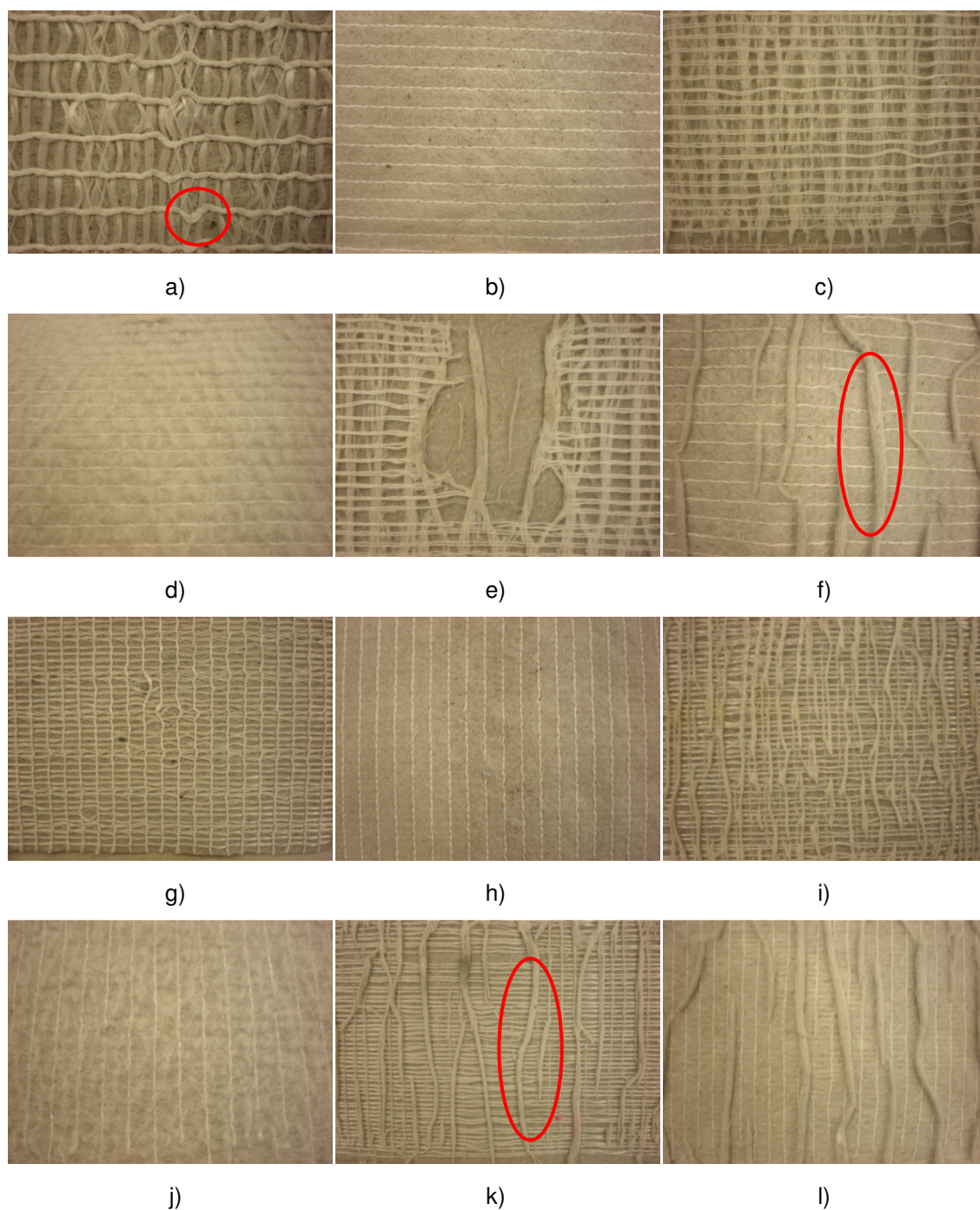


Fig. 5.2: Provetes após danificação: a) DDI, DF, CF; b) DDI, DF, SF; c) ABR, DF, CF; d) ABR, DF, SF e) DDI+ABR, DF, CF; f) DDI+ABR, DF, SF; g) DDI, DPF, CF; h) DDI, DPF, SF; i) ABR, DPF, CF; j) ABR, DPF, SF k) DDI+ABR, DPF, CF; l) DDI+ABR, DPF, SF

5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO-EXTENSÃO

5.3.1 PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO

O Quadro 5.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração-extensão dos provetes danificados no lado com filamentos e na direção de fabrico. Foram também calculadas as resistências à tração residuais de cada provete, também apresentadas no quadro.

Quadro 5.3: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DF, lado CF

	RT (σ) (kN/m)	EFM (σ) (%)	RTR (%)
Referência	43,5 (2,5)	23,1 (1,6)	-
DDI	23,3 (1,8)	9,2 (1,8)	53,6
ABR	16,9 (0,5)	94,0 (11,7)	38,9
DDI+ABR	7,2 (1,5)	30,5 (15,4)	16,6

RT – Resistência à tração, EFM – Extensão na força máxima, σ -desvio padrão

Depois de ensaiado à DDI, o GCR apresentou uma resistência residual de 53,6%. Tal como foi indicado no Quadro 5.2, e ilustra a Fig. 5.3, alguns filamentos de PET foram cortados durante o ensaio, pelo que deixaram de contribuir para a resistência do geocompósito. Isto explica a perda de resistência dos provetes ensaiados à DDI,



Fig. 5.3: Proвете com filamento cortado após ensaio de DDI, na DF, lado CF

Após o ensaio de abrasão, os filamentos dos provetes apresentavam-se todos emaranhados, enrugados e menos espessos. Isto aconteceu porque o abrasivo esteve em contacto direto com os filamentos de PET, o que fez com que os filamentos da direção de fabrico fossem sofrendo abrasão e ficassem mais finos. Os filamentos da direção perpendicular à de fabrico ficaram emaranhados e separados do geotêxtil, uma vez que também se verificou rompimento das costuras que ligam os filamentos ao geotêxtil (Fig. 5.4).



Fig. 5.4: Provete após ensaio de ABR, na DF, lado CF

As razões referidas anteriormente explicam o porquê da perda de resistência ter sido maior no GCR que sofreu abrasão do que naquele que sofreu DDI. Como o abrasivo esteve em contacto direto com os filamentos, formaram-se forças de atrito, levando a que os filamentos fossem arrastados no movimento vaivém do ensaio de abrasão, ficando mais finos. Apesar do ensaio da DDI ter movimento de compressão, este não implicou o arrasto de filamentos, pelo que, neste caso, foi mais suave para o GCR.

Como explicado anteriormente, o GCR apresenta dois momentos de rotura, correspondentes à rotura dos filamentos de PET e à rotura do geotêxtil não-tecido. Na análise dos provetes intactos, no capítulo 4 verificou-se que os filamentos de PET sofriam rotura quando sujeitos a um maior esforço do que o geotêxtil não-tecido. Quando se submeteu os provetes do GCR ao ensaio de abrasão na direção de fabrico, ensaiando-se o lado com filamentos, verificou-se que neste caso a resistência necessária para romper os filamentos de PET foi muito menor do que a necessário para romper o geotêxtil não-tecido. Isto mostra que abrasão provocou danos muito grandes nos filamentos de PET, fazendo com perdessem grande parte da sua resistência.

O quadro 5.3 mostra que a danificação mais gravosa ocorreu quando se submeteu o GCR à DDI e posteriormente à abrasão. Isto aconteceu porque depois de danificado no ensaio de DDI, o GCR encontrava-se já com alguns danos: filamentos cortados e enrugados e desgaste de geotêxtil (Quadro 5.2). Estes danos tornaram o GCR mais suscetível a ser danificado no ensaio de abrasão, uma vez que este já não apresentava a resistência total (RTR de 53,6%). Assim, quando é sujeito à abrasão, o GCR perdeu ainda mais resistência do que a que já tinha perdido no ensaio de DDI.

A Fig. 5.5 mostra o estado físico do provete depois de submetido aos dois tipos de danificação. A maioria dos filamentos rompeu e o geotêxtil também se desgastou, havendo em alguns casos formação de buracos (Fig. 5.5b). Tal como aconteceu nos provetes submetidos apenas à abrasão, o geotêxtil não-tecido, neste caso constituiu o elemento mais resistente.



Fig. 5.5: a) Provete após danificação de DDI+ABR, na DF, lado CF, b) buraco no geotêxtil

No Quadro 5.4 podem observar-se os valores dos fatores de redução calculados. O fator de redução calculado através do produto dos fatores de redução parciais da DDI e da abrasão ($RF_{DDI+ABR\ TRAD}$) foi menor que o fator de segurança calculado diretamente a partir da resistência residual dos provetes submetidos à DDI e à abrasão. Isto mostrou que a forma tradicional de cálculo não está a ser conservativa para este caso, pelo que, se fosse necessário fazer um dimensionamento a partir destes valores para este material, seria prudente usar o $RF_{DDI+ABR}$.

Quadro 5.4: Fatores de redução obtidos para a DF, no lado CF

RF_{DDI}	RF_{ABR}	$RF_{DDI+ABR}$	$RF_{DDI+ABR\ TRAD}$
1,87	2,57	6,04	4,81

5.3.2 PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO

O Quadro 5.5 apresenta os resultados obtidos no ensaio à tração-extensão dos provetes danificados na direção de fabrico, lado sem filamentos. Apresenta ainda os valores das resistências residuais de tração de cada conjunto de provetes.

Quadro 5.5: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DF, lado SF

	RT (σ) (kN/m)	EFM (σ) (%)	RTR (%)
Referência	43,5 (2,5)	23,1 (1,6)	-
DDI	24,7 (2,3)	9,3 (0,8)	56,7
ABR	36,7 (1,3)	21,1 (2,2)	84,5
DDI+ABR	23,3 (2,3)	9,9 (1,8)	53,6

RT – Resistência à tração, EFM – Extensão na força máxima, σ – desvio padrão

Os provetes submetidos à DDI apresentaram uma resistência residual de 56,7%. Esta RTR foi muito parecida com a verificada nos provetes ensaiados no lado com filamentos (53,6%). Isto aconteceu porque no ensaio de DDI o provete encontrava-se no meio de duas camadas de *corundum* e foi aplicada uma força no centro. Essa força levou a que o *corundum* exercesse pressão nos dois lados do provete e portanto os danos observados foram muito parecidos. No Quadro 5.2 pode observar-se

essas parecenças: os dois tipos de provetes apresentaram filamentos cortados e desgaste do geotêxtil e enrugamento dos filamentos. A Fig. 5.6 ilustra o estado de um provete depois de submetido à DDI.

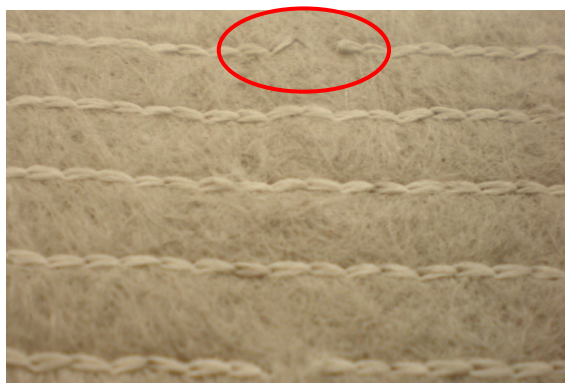
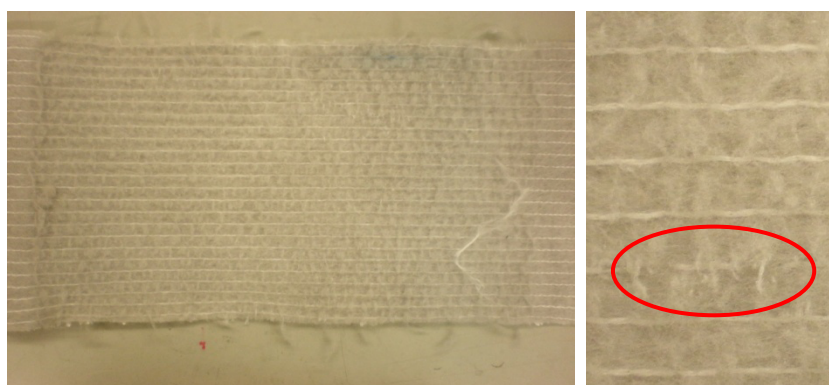


Fig. 5.6: Provete após ensaio de DDI, na DF, lado SF

Após sofrerem abrasão, os provetes apresentaram uma perda de resistência de 15,5%. Esta perda não foi tão grande como a verificada em 5.3.1 (61,1%), uma vez que neste caso o abrasivo não esteve em contacto direto com os filamentos de PET. O geotêxtil foi o elemento do GCR mais danificado, pois o abrasivo atuou diretamente nele, dando origem aos danos ilustrado na Fig. 5.7: desgaste do geotêxtil, rompimento de costuras, diminuição da largura do provete.



a) b)
Fig. 5.7: a) Provete após ensaio de ABR, na DF lado SF, b) rompimento de costura

Para o lado sem filamentos (DF), o ensaio de DDI teve efeitos mais graves no GCR do que o ensaio de abrasão. No ensaio de DDI, na prática foram danificados os dois lados do GCR (CF e SF), enquanto no ensaio de abrasão apenas se danificou o lado sem filamentos, o que, de certa forma, protegeu os filamentos (elementos mais resistentes).

Também neste caso os provetes submetidos à DDI e à abrasão foram aqueles que sofreram uma maior perda de resistência. No entanto, verificou-se que a RTR dos provetes submetidos à DDI foi muito próxima da RTR dos submetidos à DDI+ABR, o que significa que o ensaio de abrasão, neste caso, não provocou grandes danos adicionais. Tal como mostra a Fig. 5.8, os provetes depois de sofrerem as duas danificações apresentavam desgaste do geotêxtil e formação de aglomerados desse material. Também é possível observar que algumas costuras romperam-se o que significa que os filamentos de PET já não estavam juntos ao geotêxtil.



Fig. 5.8: Provete após ensaio de DDI + ABR, na DF, lado SF

Comparativamente ao ponto 5.3.1 (lado CF, DF), em que se danificou o lado com filamentos na mesma direção, percebe-se que a perda foi muito maior nesse caso. Os filamentos são os elementos mais resistentes do GCR e, quando danificados, ocorre uma redução da resistência do GCR. No primeiro caso apresentado os filamentos sofreram mais danos do que no segundo caso, pois no último estes estavam protegidos pelo geotêxtil durante o ensaio de abrasão (no ensaio de DDI os danos foram similares).

Pelo Quadro 5.6 pode-se verificar que o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ foi um pouco maior que o $RF_{DDI+ABR}$, o que significa, que, neste caso, o cálculo da forma analítica está a ser conservativo. Estes valores demonstram que num possível dimensionamento, ao utilizar o valor 2,08, estar-se-ia a sobredimensionar, o que levaria a maiores custos de obra. Apesar dos fatores económicos, o dimensionamento pelo $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ traria segurança.

Quadro 5.6: Fatores de redução de tração obtidos para a DF, no lado SF

RF_{DDI}	RF_{ABR}	$RF_{DDI+ABR}$	$RF_{DDI+ABR\ TRAD}$
1,76	1,18	1,87	2,08

5.3.3 PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DE FABRICO

Os provetes danificados no lado com filamentos da direção perpendicular à de fabrico apresentaram os resultados presentes no Quadro 5.7.

Quadro 5.7: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DPF, lado CF

	RT (σ) (kN/m)	EFM (σ) (%)	RTR (%)
Referência	45,0(1,2)	8,9 (1,7)	-
DDI	17,9 (1,7)	6,6 (1,7)	39,7
ABR	39,1 (1,5)	7,7 (2,24)	86,8
DDI+ABR	11,7 (2,0)	6,1 (2,18)	26,0

RT – Resistência à tração, EFM – Extensão na força máxima, σ -desvio padrão

Neste caso a RTR dos provetes submetidos a DDI foi de 39,7%, 14,2% mais baixa do que a obtida nos provetes ensaiados da mesma forma mas na direção de fabrico. Isto aconteceu porque os filamentos da direção perpendicular à de fabrico são menos espessos, e portanto mais facilmente danificáveis. Também durante a DDI, devido a ações de punçoamento por parte do *corundum*, alguns filamentos sofreram algum enrugamento, o que fez com que durante o ensaio de tração-extensão não fossem solicitados ao mesmo tempo, diminuindo assim a resistência à tração do GCR. Assim, como mostra a Fig. 5.9, os provetes sujeitos à DDI no lado com filamentos na direção perpendicular à de fabrico apresentavam sujidade, corte e enrugamentos dos filamentos de PET.

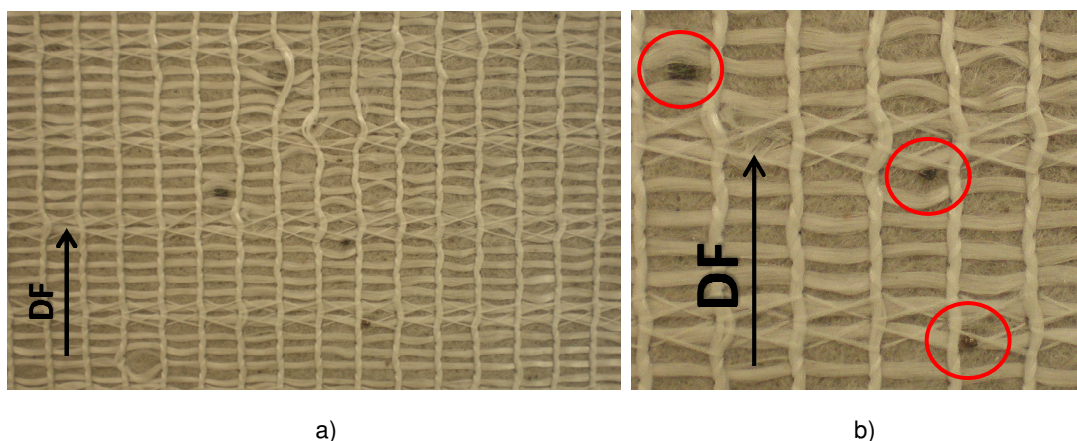


Fig. 5.9: a) Provete após ensaio de DDI, na DPF, lado CF, b) Sujidade

Nos provetes submetidos à abrasão, a resistência à tração residual foi de 86,8%. Esta perda de resistência não foi tão grande como no caso dos provetes ensaiados do mesmo lado na outra direção. Neste caso, os filamentos PET que concedem resistência ao GCR são os mais finos, como mostra a Fig. 5.10 e encontram-se entre o geotêxtil e os filamentos da direção de fabrico (mais espessos). Assim, durante o ensaio de abrasão, os filamentos na direção perpendicular à de fabrico encontravam-se protegidos da ação do abrasivo, pelo que não foram muito danificados. A Fig. 5.10 mostra que os filamentos PET da direção de fabrico foram bastante danificados, ao contrário dos da direção perpendicular.

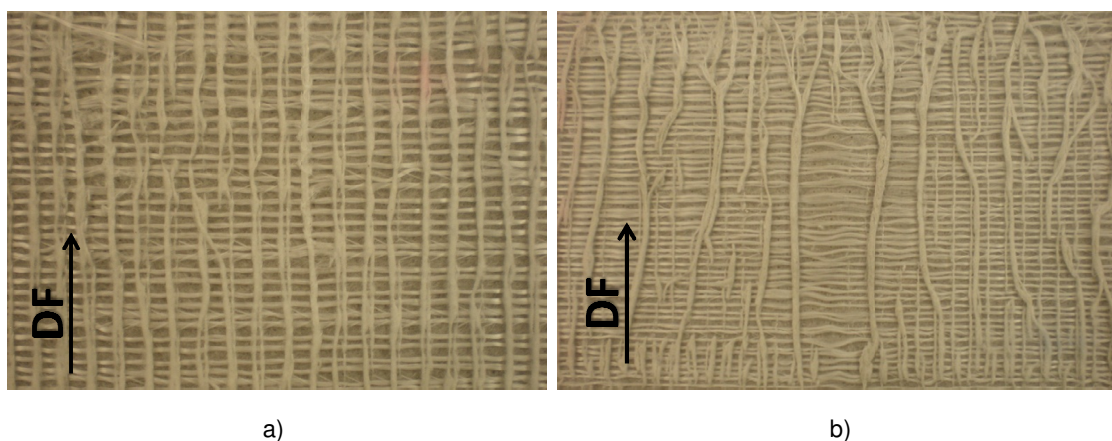


Fig. 5.10: a) Provete após ensaio de abrasão, na DPF, lado CF b) provete após ensaio DDI+ABR, na DPF, lado CF

Relativamente aos provetes que sofreram DDI e posteriormente abrasão, estes apresentavam sujidade, costuras rotas, aglomerados de material e enrugamento dos filamentos de PET (Fig.5.10). Todos estes danos levaram a uma resistência de tração residual de 26,0% por parte do GCR. Comparando os provetes sujeitos às mesmas danificações na direção de fabrico, estes últimos

apresentaram uma resistência residual de 16,6%. Esta diferença pode ser explicada pela posição dos filamentos PET. Como já foi referido, os filamentos PET que conferem resistência neste caso (DPF, CF) encontravam-se protegidos durante a abrasão, sendo que a DDI foi mais gravosa, devido à espessura dos filamentos, como já foi referido.

No Quadro 5.8 apresentam-se os fatores de redução calculados a partir dos ensaios dos resultados dos ensaios de tração. Como se verifica, tal como no homólogo na direção de fabrico, o fator de segurança calculado a partir dos fatores de redução parciais não está a ser conservativo ($RF_{DDI+ABR\ TRAD} < RF_{DDI+ABR}$). Assim, num possível dimensionamento, seria mais prudente usar o RF calculado a partir da resistência GCR.

Quadro 5.8: Fatores de redução obtidos para a DPF, no lado CF

RF_{DDI}	RF_{ABR}	$RF_{DDI+ABR}$	$RF_{DDI+ABR\ TRAD}$
2,52	1,15	3,84	2,90

Neste caso, tal como no homólogo na direção de fabrico, o fator de segurança calculado a partir dos fatores parciais não está a ser conservativo ($RF_{DDI+ABR\ TRAD} < RF_{DDI+ABR}$). Assim, num possível dimensionamento, seria mais prudente usar o RF calculado a partir da resistência GCR.

5.3.4 PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DE FABRICO

O quadro seguinte apresenta os resultados obtidos para o lado sem filamentos na direção perpendicular à de fabrico.

Quadro 5.9: Resultados do ensaio de tração obtidos para a DPF, lado SF

	RT (σ) (kN/m)	EFM (σ) (%)	RTR (%)
Referência	45,0 (1,2)	8,9 (1,7)	-
DDI	25,5 (1,0)	7,9 (1,0)	56,6
ABR	41,3 (1,6)	8,3 (1,6)	91,8
DDI+ABR	16,2 (1,2)	7,7 (1,8)	35,9

RT – Resistência à tração, EFM – Extensão na força máxima, σ -desvio padrão

Como se verifica no quadro acima, depois de terem sofrido DDI, os provetes apresentaram uma RTR de 56,6%. Os provetes (lado SF) que sofreram DDI na direção de fabrico apresentaram um valor de RTR muito similar ao obtido na DPF (RTR de 56,6%). Percebe-se, então, que apesar dos filamentos na direção perpendicular à de fabrico serem menos espessos do que os da direção de fabrico, e portanto mais fáceis de danificar, estes também se encontram presentes em maior número. Desta forma, se durante a danificação se romper um filamento da direção perpendicular a consequência para a resistência do GCR não é tão grande quanto seria se se rompesse um filamento da direção de fabrico. Como estes filamentos de PET são de mais fácil danificação, as danificações ocorridas, nomeadamente o corte, ocorrem em maior número, ao contrário do que acontece aos filamentos da direção de fabrico. Assim, um maior número de cortes na direção perpendicular de fabrico acabou por se equiparar a menos cortes na direção de fabrico, em termos de resistência. A Fig. 5.11 mostra o estado de um provete depois do ensaio de DDI:

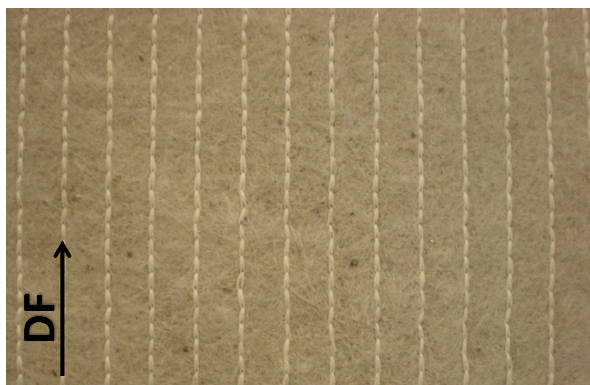


Fig. 5.11: Provete após ensaio de DDI, na DPF, no lado SF

Nos provetes que sofreram abrasão verificou-se que a perda de resistência foi apenas de 8,2%. Isto aconteceu porque o abrasivo esteve em contacto direto apenas com o geotêxtil, não danificando os filamentos PET. Assim, a perda de resistência que se verificou foi devido aos danos ocorridos no geotêxtil. Por esta razão, a resistência à abrasão verificada no lado com filamentos na mesma direção foi menor (RTR de 86,8%). A Fig. 5.12 mostra um provete depois de submetido ao ensaio de abrasão.



Fig. 5.12: Provete após ensaio de abrasão, na DPF, no lado SF

Quando se submeteu o GCR à DDI e posteriormente à abrasão verificou-se uma grande perda de resistência (64,1%). Esta perda de resistência foi mais acentuada do que seria de esperar analisando os valores das resistências à tração residuais das danificações individuais. Isto aconteceu devido ao facto da DDI ter enfraquecido o GCR, de maneira que quando este foi submetido à abrasão já estava mais fraco e suscetível às danificações do abrasivo.

Pelo Quadro 5.10 pode-se verificar que o $RF_{DDI+ABR}$ foi mais elevado do que RF_{DDI} e o RF_{ABR} . Também se nota que, mais uma vez, o $RF_{DDI+ABR \text{ TRAD}}$ foi inferior ao $RF_{DDI+ABR}$, mostrando não ser conservativo.

Apesar da grande perda de resistência verificada neste caso, esta foi menor do que a verificada no lado com filamentos, quando se submeteu o GCR à DDI e depois à abrasão. Mais uma vez, a razão para isso acontecer passou pelo facto do abrasivo estar em contacto direto com os filamentos no lado com filamentos durante o ensaio de abrasão. Apesar de protegidos, os filamentos da direção perpendicular acabaram por sofrer algumas danificações. Também o ensaio da DDI teve consequências mais graves no lado com filamentos.

Quadro 5.10: Fatores de redução obtidos para a DPF, no lado SF

RF_{DDI}	RF_{ABR}	$RF_{DDI+ABR}$	$RF_{DDI+ABR\ TRAD}$
1,77	1,09	2,78	1,93



Fig. 5.13: Provete após ensaio de DDI + ABR, na DPF, no lado SF

5.3.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 5.14 resume comparativamente os dados obtidos para os provetes danificados ensaiados à tração. Pela figura pode verificar-se que os provetes ensaiados na direção de fabrico e no lado com filamentos foram os que sofreram maiores danos e consequentemente maior perda de resistência. Observa-se também que a DDI, comparativamente com a abrasão, foi a que produziu maiores perdas de resistência, à exceção no caso em que o provete foi danificado no lado com filamentos, na direção de fabrico. No entanto, quando as duas danificações atuam em simultâneo dão origem a perdas de resistência ainda maiores do que apenas o ensaio de DDI.

Em todos os casos, exceto na direção de fabrico e lado sem filamentos, o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ foi menor do que o $RF_{DDI+ABR}$, pelo que, num possível dimensionamento se deverá ser prudente com a utilização do primeiro valor.

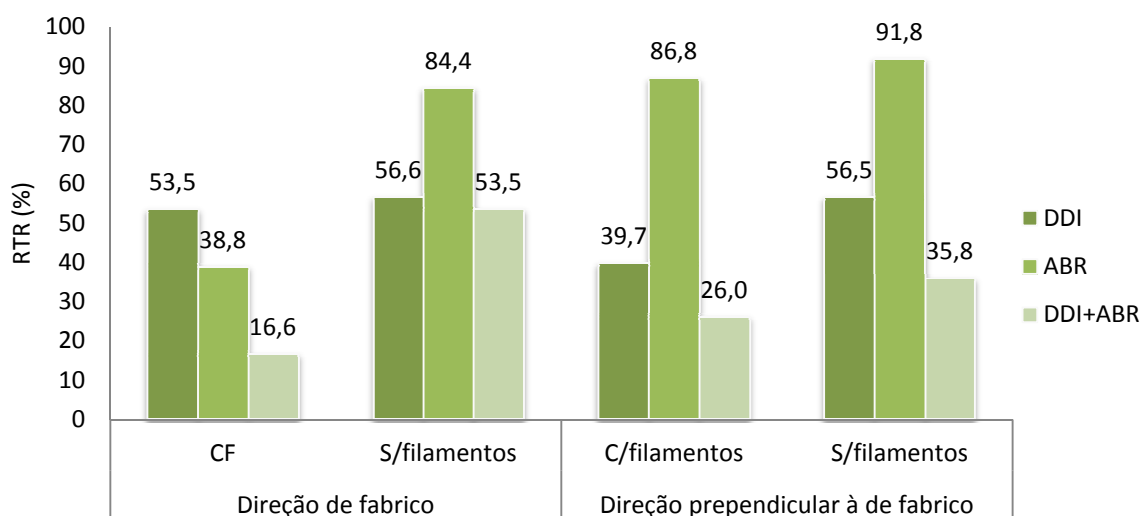


Fig. 5.14: Representação gráfica das resistências de tração residuais

5.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RASGAMENTO

5.4.1 PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO

No Quadro 5.11 encontram-se os resultados obtidos nos provetes ensaiados na direção de fabrico e no lado com filamentos.

Quadro 5.11: Resultados do ensaio de rasgamento obtidos para a DF, lado CF

	RR (σ) (N)	RRR (%)	RF _{DDI+ABR}	RF _{DDI+ABR TRAD}
Referência	965 (113)	-	-	-
DDI	494 (72)	51,1	1,96	-
ABR	541 (59)	56,0	1,78	-
DDI+ABR	239 (118)	24,8	4,03	3,49

RR – Resistência ao rasgamento, σ - desvio padrão

Pelos valores do quadro acima, verifica-se que o ensaio de DDI causou uma, ligeiramente, maior diminuição da resistência ao rasgamento do GCR do que o ensaio de abrasão, ao contrário do que ocorreu para a resistência à tração (ponto 5.3.1).

A maior diminuição da resistência ao rasgamento ocorreu nos provetes ensaiados primeiramente à DDI e depois à abrasão. Depois da exposição sucessiva a estes dois processos de danificação, o GCR apresentava uma RRR de apenas 24,8%. Os motivos que explicam a diminuição da resistência ao rasgamento do GCR após os processos de DDI, abrasão e exposição sucessiva à DDI e abrasão são os mesmos apresentados anteriormente para explicar a diminuição da resistência à tração (ponto 5.3.1).

O RF_{DDI+ABR TRAD} (3,49) foi menor do que o RF_{DDI+ABR} (4,03), o que significa que as estruturas dimensionadas usando o primeiro valor estariam subdimensionadas. Assim, seria prudente que num possível dimensionamento fosse usado o RF_{DDI+ABR}, uma vez que desta forma se considera os danos.

5.4.2 PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO DE FABRICO

No Quadro 5.12 encontram-se os valores obtidos depois do ensaio de rasgamento dos provetes de GCR danificados no lado sem filamentos, na direção de fabrico.

Quadro 5.12: Resultados do ensaio de rasgamento obtidos para a DF, lado SF

	RR (σ) (N)	RRR (%)	RF _{DDI+ABR}	RF _{DDI+ABR TRAD}
Referência	965 (113)	-	-	-
DDI	520 (116)	53,9	1,86	-
ABR	882 (87)	91,4	1,09	-
DDI+ABR	420 (72)	43,4	2,30	2,03

RR – Resistência ao rasgamento, σ - desvio padrão

No lado sem filamentos, a abrasão provocou menores perdas de resistência do que a DDI. No entanto, e ao contrário do que aconteceu no lado com filamentos, esta situação é idêntica ao que aconteceu no ensaio de tração na mesma direção e no mesmo lado. Isto aconteceu pois o geotêxtil não-tecido foi o elemento mais danificado no ensaio de abrasão protegendo os filamentos de PET, pelo que a perda de resistência verificada correspondeu à danificação do geotêxtil. Já na DDI, e como referido anteriormente, quer o lado com filamentos, quer o lado sem filamentos foram afetados.

Mais uma vez, os provetes submetidos à DDI e posteriormente à abrasão foram os que apresentaram menor resistência ao rasgamento residual. No entanto, estes provetes manifestaram maior resistência ao rasgamento residual do que os danificados no lado com filamentos. Tendo em conta que os valores de resistência ao rasgamento residual dos provetes submetidos a DDI foram muito semelhantes (lado CF – 51,1% e lado SF – 53,9%), o ensaio de abrasão contribuiu preponderantemente para a diferença dos valores da resistência de rasgamento observada entre os dois lados. Quando ensaiado à abrasão no lado sem filamentos, o geotêxtil protegeu os filamentos do contacto com o abrasivo, o que levou a uma menor perda de resistência, comparativamente ao lado com filamentos.

Novamente se verificou que o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ (2,03) foi menor que o RF_{DDIABR} (2,30) pelo que não está a ser conservativo, e não seria prudente usar o primeiro valor num possível dimensionamento.

5.4.3 PROVETES DANIFICADOS NO LADO COM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR À DE FABRICO

O quadro seguinte apresenta os resultados obtidos para o lado com filamentos na direção perpendicular à de fabrico.

Quadro 5.13: Resultados de rasgamento obtidos para a DPF, lado CF

	RR (σ) (N)	RRR (%)	RF	$RF_{DDI+ABR\ TRAD}$
Referência	850 (88)	-	-	-
DDI	399 (75)	46,9	1,87	-
ABR	870 (63)	102,0	1,00*	-
DDI+ABR	370 (68)	43,5	2,30	2,08

RT – Resistência ao rasgamento, σ - desvio padrão; * considerou-se 1,00

Os provetes ensaiados à DDI apresentaram uma resistência de rasgamento residual de 46,9%. A perda de resistência destes provetes ocorreu devido ao GCR ter sido danificado por ação do *corundum*, sofrendo corte e diminuição da espessura dos filamentos, rompimento de costuras e diminuição da largura do provete.

Neste caso, verificou-se que, depois de danificados os provetes de GCR à abrasão, não houve perda de resistência. Como já foi referido, os filamentos de PET na direção perpendicular à de fabrico encontram-se entre o geotêxtil não-tecido e os filamentos da direção de fabrico, pelo que estiveram protegidos da ação do abrasivo.

Verificou-se que os provetes danificados à DDI e posteriormente à abrasão apresentaram uma resistência ao rasgamento residual de 43,5%. Tal como nos provetes ensaiados à tração danificados da mesma forma, os provetes já se encontravam danificados pela DDI tornando-os mais suscetíveis à danificação por abrasão.

O $RF_{DDI+ABR}$ (2,30) foi maior do que o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ (2,08) o que, mais uma vez, se verifica que num possível dimensionamento o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ não estaria do lado da segurança, podendo levar a falhas prematuras no cumprimento das funções por parte do geossintético.

5.4.4 PROVETES DANIFICADOS NO LADO SEM FILAMENTOS E NA DIREÇÃO PERPENDICULAR DE FABRICO

No Quadro 5.14 encontram-se os valores obtidos depois de ensaiados os provetes na direção perpendicular à de fabrico e quando danificados no lado sem filamentos.

Quadro 5.14: Resultados de rasgamento obtidos para a DPF, lado SF

	RR (σ) (N)	RRR(%)	RF	$RF_{DDI+ABR\ TRAD}$
Referência	850 (88)	-	-	-
DDI	454 (69)	53,4	1,87	-
ABR	781 (81)	91,9	1,09	-
DDI+ABR	294 (89)	34,6	2,89	2,03

RR – Resistência ao rasgamento, σ - desvio padrão

O GCR sofreu maior perda de resistência durante o ensaio de DDI do que durante o ensaio de abrasão. Os filamentos de PET não se encontravam em contacto direto com o abrasivo pelo que a perda resistência foi pequena, ao contrário do que aconteceu durante o ensaio de DDI em que o *corundum* se encontrava nos dois lados dos GCR, danificando quer o geotêxtil, quer os filamentos de PET. São os filamentos PET que conferem maior resistência ao GCR. Assim, como estes filamentos foram pouco danificados pelo abrasivo, verificou-se, apenas, uma pequena perda de resistência (8,1%).

Os provetes submetidos à DDI e posteriormente à abrasão apresentaram um valor de RRR de 34,6%. Isto aconteceu porque os provetes encontravam-se já danificados quando foram sujeitos ao ensaio de abrasão, o que fez com que os danos já existentes se agravassem e surgissem novos, como é o caso de desgaste e formação de aglomerados de geotêxtil.

Neste caso, o $RF_{DDI+ABR}$ (2,89) foi maior do que o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ (2,03) o que significa que num possível dimensionamento, a utilização do último não se encontraria do lado da segurança.

5.4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A Fig. 5.14 resume comparativamente os dados obtidos para os provete danificados e ensaiados ao rasgamento. Tal como nos provetes ensaiados à tração, verificou-se que os provetes ensaiados na direção de fabrico e no lado com filamentos foram os que sofreram maiores danos e consequentemente maior perda de resistência.

Em todos os casos, o $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ foi menor do que o $RF_{DDI+ABR}$, pelo que, num possível dimensionamento se deverá ser prudente com a utilização do primeiro valor.

Também nos ensaios de rasgamento, a DDI provocou maiores perdas de resistência do que a abrasão, e quando as duas danificações atuaram em simultâneo deram origem a resistências ao

rasgamento bastante baixas.

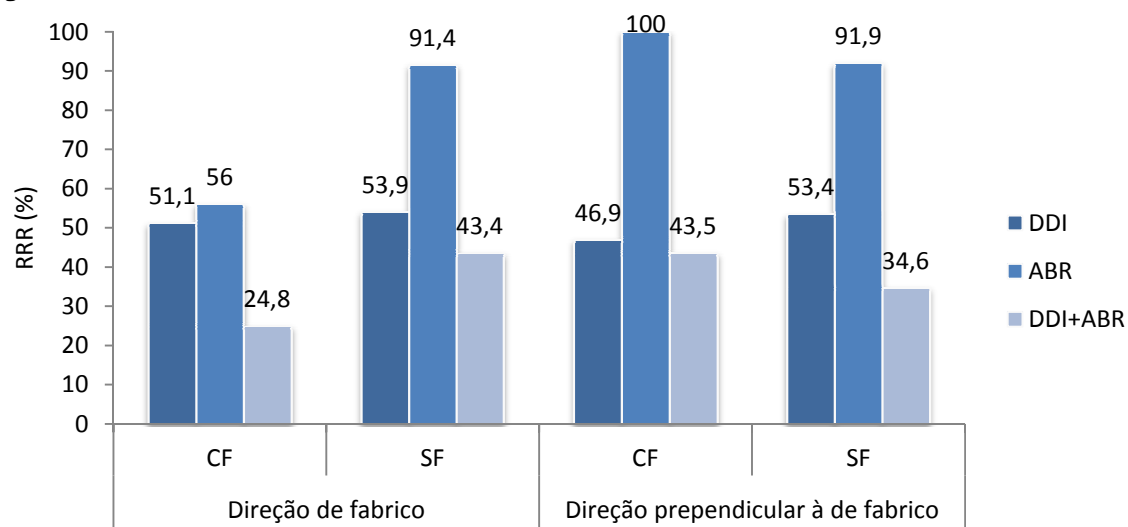


Fig. 5.15: Representação gráfica das resistências de rasgamento residuais

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

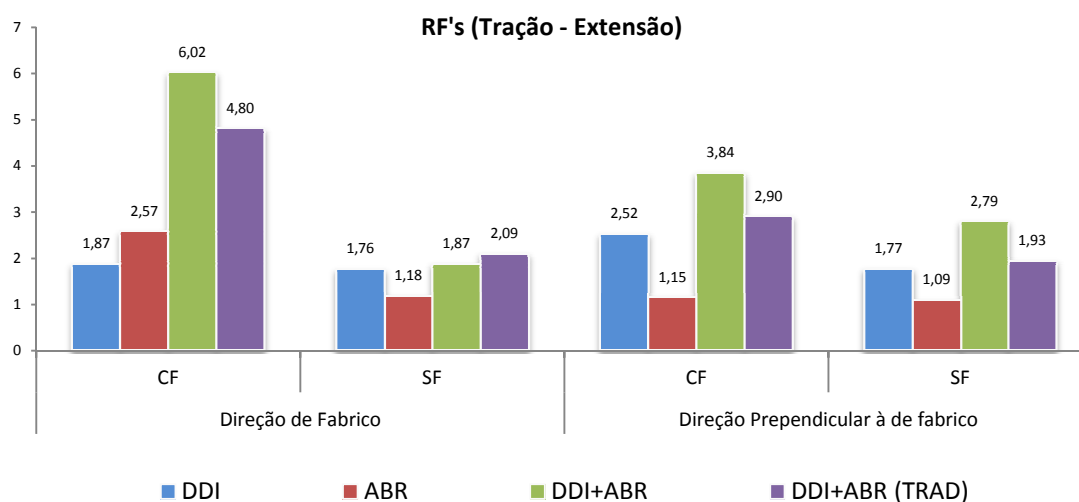
Neste trabalho avaliaram-se os efeitos resultantes do processo de instalação e da abrasão (simulações laboratoriais) num geocompósito de reforço. O material foi exposto aos dois agentes de danificação de forma isolada e depois de forma sucessiva. A caracterização dos danos induzidos foi realizada por inspeção visual e análise do comportamento à tração-extensão e rasgamento. Para a quantificação dos efeitos das danificações, os resultados dos provetes danificados foram comparados com os resultados obtidos para provetes de referência (intactos). Com os resultados obtidos, foram calculados fatores de redução para o material em estudo, com o objetivo de avaliar a existência de sinergias entre os fenómenos de danificação, ou seja, verificar se o efeito da ação simultânea da DDI e da abrasão era diferente da soma dos efeitos de cada um dos mecanismos de danificação, atuando isoladamente.

As ações de danificação foram bastante severas para o geocompósito, deixando-o com sujidade, provocando cortes, enrugamento e emaranhamento de filamentos de PET, rompimento das costuras, furos e desgaste no geotêxtil, entre outros. Estes danos resultaram das ações exercidas pelo *corundum* e pelo abrasivo nos ensaios de DDI e abrasão, respetivamente.

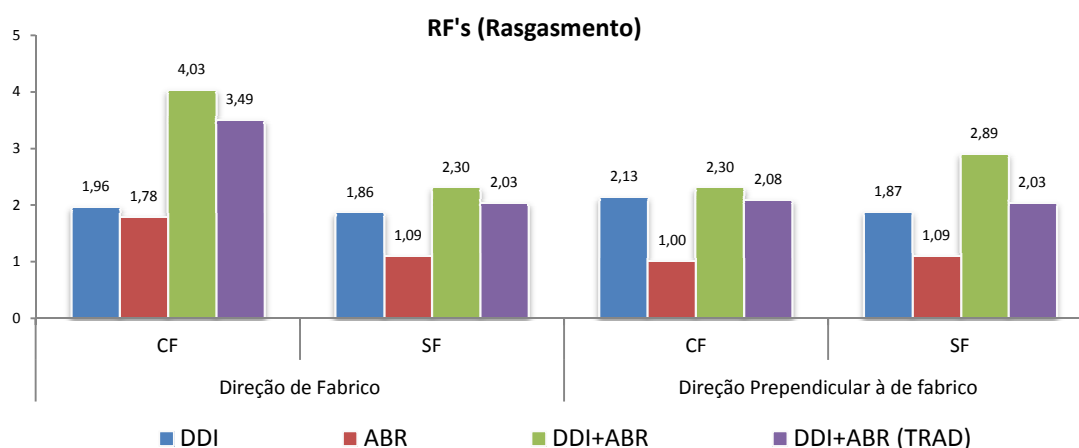
Comparando os lados do GCR, com e sem filamentos, verificou-se que o primeiro foi o que apresentou maiores perdas de resistência. Quando se ensaiou o GCR à DDI, as diferenças apresentadas não foram muito significativas, uma vez que durante o ensaio de DDI o *corundum* encontrava-se nos dois lados do provete, fazendo com que ambos os lados fossem danificados. Contudo, no ensaio de abrasão, o abrasivo provocou mais danos no lado com filamentos.

Analisando os dois tipos de danificação isoladamente, verificou-se que a DDI foi quase sempre mais agressiva do que a abrasão (maior diminuição das propriedades mecânicas). Isto aconteceu, pois em todas as situações, exceto na direção de fabrico e lado com filamentos, os filamentos de PET encontravam-se protegidos da ação direta do abrasivo não tendo sofrido danificações muito graves.

Tal como mostra a Fig. 6.1, os $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ obtidos foram, quase sempre, menores do que os $RF_{DDI+ABR}$. Nestes casos, a soma dos efeitos individuais de cada danificação não foi igual ao efeito da ação simultânea da DDI e abrasão. Isto mostrou que num possível dimensionamento, os $RF_{DDI+ABR\ TRAD}$ não estariam do lado segurança.



a)



b)

Fig. 6.1: Representação gráfica dos fatores de redução: a) RF's resultantes dos ensaios de tração-extensão, b) RF's resultantes dos ensaios de rasgamento

A maior perda de resistência ocorreu quando o GCR foi exposto sucessivamente à DDI e depois à abrasão, na direção de fabrico, no lado com filamentos. Os filamentos (elemento mais resistente do GCR) foram parcialmente danificados pelo ensaio de DDI, enfraquecendo-os para o subsequente ensaio de abrasão.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Da mesma forma que o GCR foi submetido à degradação por DDI e abrasão, seria interessante utilizarem-se outros agentes de degradação, como por exemplo biológicos ou químicos, e analisarem-se as variações de resistência à tração e rasgamento que estes induzem nos geossintéticos. Tendo em conta o trabalho desenvolvido, poderia comparar-se os resultados obtidos nos provetes sujeitos à DDI e abrasão, com os resultados dos provetes sujeitos aos agentes de degradação referidos em cima.

Relativamente ao geocompósito, objeto de estudo desta dissertação, seria relevante continuar os ensaios laboratoriais, de forma a se obter resultados mais fiáveis. Tendo em conta que GCR é constituído por diferentes elementos, que não se degradarão sempre de igual forma, um maior número de amostras levaria a uma média dos resultados mais próxima do real (valor utilizado para a quantificação das resistências residuais).

Seria interessante desenvolver um estudo a longo prazo, como por exemplo, a realização de ensaios de fluência no mesmo material. Este estudo a longo prazo poderia ser relacionado com o trabalho desenvolvido a curto prazo, ou seja, danificar o GCR da mesma forma (DDI, abrasão e exposição sucessiva à DDI e abrasão).

Poder-se-ia também realizar o ensaio de DDI com outros tipos de solo, que não o *corundum*, de forma a compreender os efeitos da utilização de diferentes tipos de solos (angulosos, com muitas partículas finas, com muitas partículas grossas, bem graduados). Desta forma, poder-se-ia definir pares de solo-GCR ideais.

Embora mais dispendioso, uma opção para avaliar os efeitos da DDI seria a realização de aterros experimentais. Na realização dos aterros dever-se-ia cumprir todas as recomendações de instalação dos geossintéticos de maneira minimizar os danos. Os provetes instalados nesses aterros seriam ensaiados à tração-extensão e ao rasgamento, de forma a poderem comparar-se os efeitos com os obtidos nos ensaios laboratoriais

Os ensaios de degradação realizados seguiram as recomendações das normas. No entanto, e como complemento para entender melhor como é que as condições de colocação e de serviço dos geossintéticos em obra afetam estes materiais, poderiam ser adotadas condições de ensaio mais drásticas. Assim, para a realização do ensaio de DDI, poderiam ser utilizados agregados com diferentes características, poder-se-ia aumentar a frequência dos ciclos carga-descarga e ainda se poderia modificar a energia de compactação do ensaio. No ensaio de abrasão, além da variação do número de ciclos, poderiam, ainda, ser utilizados abrasivos de superfície mais ou menos rugosa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lopes, M. P.; Lopes, M. L. “*Durabilidade de Geossintéticos*”. FEUP Edições, Porto, 2010.
- [2] <http://www.igs.org/>, abril de 2014.
- [3] Koerner, R.M. “*Designing With Geosynthetics*”. Prentice-Hall, 4ª edição, Nova Jérсия, 1998.
- [4] Shukla, S.K. “*Geosynthetics and Their Applications*”. Thomas Telford Publishing, Londres, Reino Unido, 2002.
- [5] Miraftab, M. “*Handbook of Technical Textiles. Chapter2 – Technical fibers*”. A. R. Horrocks and S. C. Anand. , Inglaterra, 2000.
- [6] <http://pt.shvoong.com/exact-sciences/engineering/1717446-principais-funções-dos-geossintéticos-6>, junho de 2014
- [7] Barbedo, D. “*Consideração da Natureza do Fluido Percolante no Dimensionamento de Fundações de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, IST, 2013.
- [8] <http://www.archiexpo.com/prod/juta/three-dimensional-geogrids-72301-925676.html>, Maio de 2014
- [9] Silva, C.A. “*Ensaio de Transmissividade em Geocompostos para Drenagem*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 2007.
- [10] <http://www.tencate.com/emea/geosynthetics/products/tencate-geocomposites/tencate-polyfelt-rock-pec/default.aspx>, maio de 2014
- [11] Ingold, T. S. “*The Geotextiles and Geomembranes Manual*”. 1ª edição, Elsevier Advanced Technology, Oxford, Reino Unido, 1994.
- [12] Watn, A. e Chew, S.H. “*Geosynthetic Damage - from Laboratory to Field*”. Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Vol. 4, 2002, Nice, França, pp. 1203-1226.
- [13] Pinto, A. “*Aplicação de Geossintéticos em Linhas Férreas – Estudo Laboratorial dos Fenómenos de Danificação Durante a Instalação e Abrasão nos Materiais*”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 2005.
- [14] Austin, R. A. “*Installation Effects on Geosynthetics*”. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, 1998, Leatherhead, Reino Unido, pp. 3.2.1 - 3.2.10.
- [15] Christopher, B. R. e Elias, V. “*Evaluation of Installation Damage in Geosynthetics: a US Perspective*”. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, 1998, Leatherhead, Reino Unido, pp. 1.2.1 – 1.2.12.
- [16] Allen, T. M. e Bathurst, R.J. “*Characterization of Geosynthetics Load-Strain Behavior After Installation Damage*”, Geosynthetics International, vol. 1, nº 2, 1994, pp. 181 -199
- [17] Ingold, T. e Miller, K. S. “*Geotextiles Handbook*”. Thomas Telford LTDA, Londres, Inglaterra, 1998.
- [18] <http://www.dft.gov.uk/ha/standards/ghost/mchw/vol1/index.htm>, junho 2014.
- [19] Watts, G.R.A. e Brady, K. C. “*Site Damage Trials on Geotextiles*”, Proceedings of 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 1990, Holanda, pp.603-607.

- [20] Braü G. “Experience with damage during installations in Germany – Field and laboratory testing”. Seminar volume on installation damage in geosynthetics, 1998, Leatherhead, Reino Unido., pp. 41- 44.
- [21] Van Dine, D.; Williams, S.E. e Raymond, G.P. “*An Evaluation of Abrasion Tests for Geotextiles*”. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, 1982, Las Vegas, EUA, pp. 811- 816..
- [22] Hausmann M.R. e Ring G. J. “Abrasion of geotextiles in railway track applications”. Proceedings of 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, 1990, Holanda, pp.193-196.
- [23] Raymond, G. P. “*Geotextiles for Railroad Bed Rehabilitation*”. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, EUA, 1982, pp.479-484.
- [24] <http://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser>, Junho de 2014.
- [25] Carneiro, J. R.; Rosete, A.; Paula, A. M.; Pinho-Lopes, M.; Almeida, P. J.; Lopes, M. L. “*Determinação de coeficientes de segurança a usar no dimensionamento de geotêxteis*”. Atas de VI Luso-Brasileiro de Geotecnia, Lisboa, 2012,10p.

NORMAS E ESPECIFICAÇÕES REFERIDAS

ASTM D4533-11: *Standart test method for trapezoid tearing strenght of geotextiles*

BS 8006 -1: *Code of practice for strengthened/reinforced soils*

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

EN ISO 10318:2005: Geossintéticos – termos e definições

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

EN ISO 12236:2008: Geossintéticos – Ensaio de punçoamento estático (Ensaio CBR)

EN ISO 13422:2006: *Geosynthetics – Dynamic perforation test*

EN ISO 13427:1998: Geotêxteis e produtos relacionados: simulação do dano por abrasão – ensaio do bloco deslizante

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

NP EN 29073-3:1992: *Textiles – Test methods for nonwovens – Part 3: Determination of tensile strength and elongation.*

NP EN ISO 10319:2005: Geotêxteis – Ensaio de tração em tiras largas

NP EN ISO 13934-1:2013: *Textiles. Tensile properties of fabrics. Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method*

NP EN ISO 9863-1:2006: Geossintéticos: Determinação da espessura a pressões especificadas. Parte 1: Camadas simples

NP EN ISO 9864:2006: Geossintéticos – Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados

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