



Universidade de Departamento de Engenharia Civil
Aveiro
Ano 2013

**Luís Miguel dos
Santos Nolasco
Martins**

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



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
Ano 2013

**Luís Miguel dos
Santos Nolasco
Martins**

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

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Dra. Margarida Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação da Dra. Maria de Lurdes Lopes, Professora Catedrática do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



o júri

presidente

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Ricardo da Cunha Carneiro

Investigador Pós-Doc. do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof^a. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof^a. Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes

Professora Catedrática do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos

Aproveito este espaço para agradecer a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, em particular:

- à Professora Doutora Margarida Pinho Lopes, pela orientação, ensinamentos e sugestões valiosas, pela disponibilidade total e apoio prestado durante a realização deste trabalho;
- ao Laboratório de Geossintéticos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e em particular à Professora Doutora Maria de Lurdes Costa Lopes;
- ao apoio da FCT, projeto de investigação PTDC/ECM/099087/2008 e ao COMPETE, projeto de investigação FCOMP-01-0124-FEDER-009724;
- à Ana Rosete e ao David pelos ensinamentos e apoio prestado na realização dos ensaios laboratoriais;
- à minha família por ser suporte de tudo o que faço e pretendo fazer na vida;
- à Rita Baptista pela paciência, compreensão, motivação e carinho que sempre soube manifestar nos momentos mais difíceis;
- aos meus colegas e amigos pelo apoio prestado durante a elaboração de todo o trabalho, em particular ao Quintino Vinevala, Carlos Couto, Manuel Albuquerque, Mariana Ferreira, Cátia Alves, Daniel Pedrosa;

A todos deixo aqui o meu agradecimento sincero.

palavras-chave

Geossintéticos, reforço, vias-férreas, danificação durante a instalação (DDI), abrasão, ensaios de tração.

resumo

A aplicação de geossintéticos em vias-férreas tem-se revelado uma solução atrativa do ponto de vista técnico e económico. A inclusão dos geossintéticos nas estruturas ferroviárias permite: o controlo das deformações impostas pelo aumento de carga por eixos transportadas, o aumento do período de vida útil e a redução de custos de manutenção.

No presente trabalho estudaram-se os efeitos de dois mecanismos de dano relevantes em aplicações de geossintéticos em vias-férreas, abrasão e danificação durante a instalação (também designada por danificação mecânica). Estes mecanismos de dano foram induzidos através de ensaios laboratoriais, isoladamente e de forma sequencial, num geocompósito constituído pela associação de um geotêxtil e uma geogrelha sobrepostos (sem qualquer ligação mecânica). A danificação durante a instalação deriva, essencialmente, das operações de colocação e de compactação do material de aterro na vizinhança do geossintético. A abrasão é uma consequência do movimento do agregado sobre o geossintético associado à passagem dos comboios sobre a via. Os efeitos da abrasão e da danificação mecânica induzidas no comportamento mecânico de curto prazo deste compósito foram avaliados através de ensaios de tração. Com os resultados foram determinados coeficientes de redução e foi avaliada a existência de sinergia entre os dois mecanismos de dano considerados.

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que a danificação mecânica levou a uma redução da resistência à tração, enquanto que após abrasão esta aumentou. Houve ainda reduções na rigidez secante do material, sobretudo após danificação mecânica seguida de abrasão. Os resultados obtidos foram ainda comparados com resultados obtidos com ensaios semelhantes para os dois materiais (geogrelha e geotêxtil) ensaiados separadamente.

keywords

Geosynthetics, reinforcement, railways, installation damage, abrasion, tensile tests.

abstract

The use of geosynthetics in railways has proved to be an attractive solution from a technical and economic point of view. The inclusion of geosynthetics in railways structures allows: controlling the deformations imposed by the increasing axial load, increasing the lifetime of the structure and to reducing maintenance costs.

In this work the effects of two damage mechanisms relevant for railway applications of geosynthetics were analysed, abrasion and installation damage (also named mechanical damage). These damage mechanisms were induced using laboratory tests, isolated and sequentially, on a geocomposite constituted by a geotextile with a geogrid over it (without any mechanical connection). Installation damage mainly results from placing and compacting operations of the filling material in the geosynthetic vicinity. Abrasion is a consequence of the movement of the aggregate over the geosynthetic associated to the trains' passage over the rails. The effects of the mechanical and abrasion damage induced on the short-term mechanical behaviour of the geocomposite were assessed using tensile tests. From the results, reduction factors were calculated and the existence of synergy between the two damage mechanisms analysed was assessed.

From the tests results it was possible to conclude there was a reduction of the tensile strength after mechanical damage, while after abrasion it has increased. There were also reductions of the secant stiffness of the material, particularly relevant after mechanical damage followed by abrasion. The results obtained were also compared with other from similar studies where the two geosynthetics (geotextile and geogrid) were tested separately.

Índice

1	Considerações Iniciais	22
1.1.	Introdução.....	22
1.2.	Estrutura da dissertação	23
2	Introdução aos Geossintéticos	24
2.1	Resenha Histórica.....	24
2.2	Geossintéticos	25
2.2.1	Prefácio.....	25
2.2.2	Geossintéticos e os seus materiais constituintes	25
2.2.3	Funções e aplicações dos geossintéticos	26
2.3	Durabilidade	29
2.3.1	Introdução.....	29
2.3.2	Mecanismos de degradação.....	30
3	Aplicabilidade de geossintéticos em vias-férreas	33
3.1	Vias-Férreas.....	33
3.2	Desempenho dos geossintéticos em vias-férreas	36
3.2.1	Introdução.....	36
3.2.2	Separação, filtragem e drenagem.....	37
3.3	Danificação dos geossintéticos	38
3.3.1	Danificação durante a instalação	39
3.3.2	Abrasão.....	41
4	Estudo laboratorial dos fenómenos de danificação durante a instalação e da abrasão dos geossintéticos	44
4.1	Introdução.....	44
4.2	Geossintéticos utilizados no estudo	44
4.3	Procedimentos dos ensaios.....	46
4.3.1	Ensaio de Tração	46
4.3.2	Ensaio de danificação durante a instalação - DDI	50
4.3.3	Ensaio de Abrasão	54
4.4	Apresentação de resultados.....	57
4.4.1	Introdução.....	57
4.4.2	Geogrelha (GGR).....	58
4.4.3	Geotêxtil não tecido (GTX)	61
4.4.4	Geotêxtil não tecido (GTX) e Geogrelha (GGR).....	63
4.5	Discussão dos Resultados	79
4.5.1	Geogrelha (GGR).....	79
4.5.2	Geotêxtil não tecido (GTX)	80
4.5.3	Geotêxtil não tecido (GTX) e Geogrelha (GGR).....	81
4.6	Conclusões.....	95
5	Desenvolvimentos futuros	100
6	Referências bibliográficas	102

Índice de Figuras

Figura 1 - Corte esquemático da secção longitudinal de uma via-férrea convencional [adaptado de Aursudkij (2007) por Oliveira (2011)].....	33
Figura 2 - Corte transversal esquemático da secção de uma via-férrea convencional longitudinal [adaptado de Aursudkij (2007) por Oliveira (2011)].	34
Figura 4 – Preparação dos provetes GTX+GGR: a) aplicação de cola nas extremidades; b) colagem da tira de tecido na frente do provete; c) colagem da tira de tecido na retaguarda ; d) aspecto final do provete.	50
Figura 5 - Equipamento de simulação da DDI: a) equipamento utilizado; b) material granular utilizado na caixa de danificação; c) caixa de danificação; d) placa de compactação.	Error! Bookmark not defined.
Figura 6 – Equipamento laboratorial para a simulação de abrasão.	54
Figura 7 - Definição das grandezas: a) robustez; b) módulo de rigidez secante.	58
Figura 8 - Curvas força-extensão dos provetes GGR intacto e curva média correspondente, para as garras cilíndricas.....	59
Figura 9 - Curvas força-extensão dos provetes GGR intacto e curva média correspondente, para as garras de cunha de face lisa.	60
Figura 10 - Curvas força-extensão dos provetes GTX intacto e curva média correspondente, para as garras de cunha de face lisa	61
Figura 11 - Curvas força-extensão dos provetes GTX intacto e curva média correspondente, para as garras cilíndricas.....	62
Figura 12 - Curvas força-extensão dos provetes GTX+GGR intacto e curva média correspondente, para as garras cunha de face lisa.	64
Figura 13 – Aspeto do provete GTX+GGR após abrasão.	66
Figura 14 - Curvas força-extensão dos provetes de GTX+GGR submetidos à abrasão e curva média.	67
Figura 15 – Danos induzidos nos provetes de GTX+GGR: a) contusões superficiais no GTX; b) esmagamento e corte nos filamentos da GGR.	69
Figura 16 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR após a realização dos ensaios de referência para a DDI.	70
Figura 17 - Danos induzidos nos provetes de GTX+GGR: a) vista geral; b) corte e esmagamento na GGR); c) contusões e incrustações superficiais no GTX.	72
Figura 18 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR após a realização dos ensaios de DDI.	73
Figura 19 – aspeto do provete GTX+GGR após os danos induzidos por DDI e abrasão.	75
Figura 20 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR após a realização dos ensaios de DDI e abrasão.	76
Figura 21 – Representação das curvas médias força-extensão do GTX+GGR: intacto, após abrasão; após a DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.....	81
Figura 22 - Representação da curva força-extensão do provete mais próximo da curva média do geotêxtil nas situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.	82
Figura 23 – GTX+GGR: a) resistência à tração e extensão residuais (%); b) coeficientes de variação correspondentes (%).	84
Figura 24 - Valores residuais (em %) da resistência à tração e da extensão na rotura relativamente à amostra de referência para a DDI.	86
Figura 25 - Robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%) residuais (em %), relativamente à geogrelha intacta.	90

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Matérias-primas utilizadas para manufaturar diferentes geossintéticos (adaptado de Shukla (2002))	26
Tabela 2 – Funções dos geossintético [IGS-Portugal (2009), com imagens de (Fabrics)].	28
Tabela 3 – Danificação das funções dos geossintéticos durante a instalação em obra (Pinho-Lopes e Lopes (2010)).	32
Tabela 4 - Fatores que influenciam a danificação dos geossintéticos [adaptado Watn e Chew (2002) por Rosete (2010)]	40
Tabela 5 - Descrição dos processos de abrasão [adaptado de Dine <i>et al.</i> (1982) por Pinto (2005)]	42
Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos geossintéticos em estudo na direção de fabrico.	45
Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos da GGR com as garras cilíndricas.	58
Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos da GGR para as pegas de cunha de face lisa.	59
Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos de GTX com pegas de cunha de face lisa.	61
Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos de GTX com pegas cilíndricas.	62
Tabela 11 – Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos de GTX+GGR.	63
Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração do provete intacto GTX+GGR, referentes ao “pico 1” e “pico 2”.	65
Tabela 13 - Resultados do ensaio de tração dos provetes GTX+GGR após abrasão.	66
Tabela 14 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR, após abrasão referentes ao “pico 1” e “pico 2”.	68
Tabela 15 - Resultados do ensaio de tração dos provetes de GTX+GGR após a realização dos ensaios de referencia para a DDI.	69
Tabela 16 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR após ensaio de referência para a DDI referentes ao “pico 1” e ao “pico 2”.	71
Tabela 17 – Resultados do ensaio de tração de GTX+GGR após a realização dos ensaios de DDI.	73
Tabela 18 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR, após DDI referentes ao “pico 1” e “pico 2”.	74
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de tração do conjunto GTX+GGR após DDI e abrasão. .	76
Tabela 20 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR após os danos induzidos por DDI e abrasão referentes ao “pico 1” e “pico 2”.	78
Tabela 21 – Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração das GGR e GGR-T intactas.	79
Tabela 24 - Coeficientes de redução para o composito GTX+GGR.	91
Tabela 26 - Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração da GTX+GGR, GTX1 e GTX2.	92
Tabela 27 - Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração da GTX+GGR, GGR-T e GGR-E.	94

Acrónimos

T_{Nom} - Valor nominal da resistência à tração

T_{max} – Valor máximo da resistência à tração

ϵ_{max} – Extensão para a resistência máxima à tração

$J_{sec(2\%)}$ – Módulo de rigidez secante para a extensão de 2%

$J_{sec(5\%)}$ – Módulo de rigidez secante para a extensão de 5%

$J_{sec(10\%)}$ – Módulo de rigidez para a extensão de 10%

U – Módulo de robustez

B – largura nominal do provete (m)

N_m – número mínimo de elementos a traccionar num metro de largura do produto a ensaiar

N_s – número de elementos a traccionar existentes no provete

V.R. – Valores residuais

PP – Polipropileno

PET – Poliéster

PA – Poliamidas

PS – Poliestireno

PVC - Policloreto de vinilo

PE – Polietilenos

PEAD - Polietileno de alta densidade

PEMBD - Polietileno de muito baixa densidade

CPE - Polietileno clorinado

PECS - Polietileno clorossulfunado

GTX+GGR – Geotêxtil não tecido e geogrelha tecida

GTX– Geotêxtil não tecido

GGR – Geogrelha tecida

INT – Amostra intacta

ABR – Amostra submetida à abrasão

DDI – Danificação durante a instalação

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1.Introdução

Os geossintéticos têm tido uma grande aplicabilidade em áreas da engenharia geotécnica, assim como muros de suporte, terrenos íngremes e aterros em solos moles. No entanto, um campo de aplicação com bastante potencial, como o reforço do balastro em vias-férreas, não tem sido devidamente explorado quando comparado com as outras aplicações [Fernandes *et al.* (2008)].

De acordo com Fernandes *et al.* (2008), o uso de geossintéticos como reforço em vias-férreas tem-se revelado uma solução atrativa do ponto de vista técnico e económico, nomeadamente no controlo das deformações impostas pelo aumento de carga por eixo transportadas, pelo aumento do período de vida útil da estrutura balastrada e pela redução de custos de manutenção.

Nas estruturas ferroviárias a incorporação dos geossintéticos é feita ao nível da infraestrutura podendo esta ser efetuada na interface entre a plataforma e o sub-balastro ou, a mais comum, na interface sub-balastro e balastro. É de salientar que, independentemente da interface em que estes materiais são colocados, estes estão sujeitos a elevados graus de severidade, pelo facto de os materiais granulares aí utilizados possuírem características de maior agressividade e pelo facto de as cargas aqui aplicadas serem de maior magnitude, quando comparadas com outras aplicações correntes, nomeadamente obras rodoviárias [Mendonça-Lopes (2011)].

Um dos principais objectivos do trabalho é avaliar o comportamento mecânico de soluções com combinações de geossintéticos (tipo *sandwich*). No que concerne a obras ferroviárias os geossintéticos ficam submetidos a ações dinâmicas que podem ter grande influência nas suas propriedades, quer durante a construção quer na fase de serviço. Assim, pretende-se avaliar o efeito de solicitações deste tipo no comportamento mecânico das soluções a analisar.

1.2. Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por 5 capítulos, sendo que no primeiro capítulo é feita uma introdução às temáticas que são abordadas no trabalho, assim como são apresentados os objectivos.

No capítulo 2 é feita uma apresentação dos geossintéticos, que inclui um breve resumo da história dos mesmos, bem como referência aos materiais constituintes, funções e aplicações. Ainda no mesmo capítulo é feita referência ao tema da durabilidade dos geossintéticos e os mecanismos de degradação que contribuem para a diminuição do tempo de vida útil dos geossintéticos ou para a alteração dos valores das propriedades destes materiais ao longo desse tempo.

No capítulo 3 é introduzida a temática dos geossintéticos e a sua aplicação em vias-férreas, é apresentada, de forma sucinta, a constituição das vias-férreas, bem como o desempenho e a danificação dos geossintéticos provocado pela instalação em obra e por abrasão quando aplicados em vias-férreas.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo laboratorial realizado para avaliar a durabilidade de geossintéticos relativamente aos fenómenos de DDI e abrasão. Os resultados obtidos são apresentados e analisados, e são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

Por último, o Capítulo 5 é reservado para apresentação de possíveis desenvolvimentos futuros.

2 INTRODUÇÃO AOS GEOSSINTÉTICOS

2.1 Resenha Histórica

O termo geossintético, de acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), aplica-se aos materiais poliméricos, naturais ou sintéticos, que podem ser usados em contacto com materiais naturais ou com qualquer outro material geotécnico utilizado em aplicações de engenharia civil.

A primeira aplicação que é conhecida remonta ao ano de 1930 no Estados Unidos de um geotêxtil tecido de algodão, aplicado em reforço de estradas [Ferreira Gomes (2001)].

A produção destes materiais surge na sequência do aparecimento, na década de 40, dos poliméricos sintéticos (Pinho-Lopes e Lopes (2010)). A primeira aplicação de um geotêxtil de fibras sintéticas data de 1950, na Flórida. Na Europa, a aplicação de geotêxteis tecidos data de 1960, na Holanda, após as grandes inundações de 1953, e de geotêxteis não tecidos em 1969 na França [Ferreira Gomes (2001)].

É após a década de 70 do século XX, que se verifica um grande desenvolvimento com o aparecimento de outros materiais como as geomembranas, geogrelhas, geocompósitos e outros, tendo levado ao termo geossintético já nos anos 80, como uma designação mais genérica, englobando portanto os geotêxteis, as geomembranas e todos os produtos afins [Ferreira Gomes (2001)].

Fischer (2010) faz referência a Bathurst e Raymond (1987) numa pesquisa e desenvolvimento nos anos 80 e 90 no Reino Unido sobre geogrelhas com o intuito de reforçar o balastro em vias-férreas com o objectivo de diminuir as deformações. Resultados dos testes mostraram um aumento da resistência das vias férreas contra os assentamentos. Permitindo assim, concluir que a utilização de geogrelhas no reforço do balastro permite transportar maiores cargas e com menores deformações.

Em Portugal, segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), os geossintéticos começaram a ser aplicados regularmente desde 1980, principalmente em obras hidráulicas e viárias. No entanto, é a partir de meados da década de 90 do século XX, associado à construção da rede nacional de aterros de resíduos urbanos, que é dado o grande impulso, quer na aplicação, quer na procura de conhecimentos acerca dos geossintético.

A procura incessante de informações acerca destes materiais em Portugal levou, à criação em 1999 do Organismo de Normalização Sectorial Português dos ensaios de geossintéticos e, em 2002, à criação da Comissão Portuguesa de Geossintéticos [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.2 Geossintéticos

2.2.1 Prefácio

Como refere Ferreira Gomes (2001), geossintético é um termo composto por “geo + sintético”, que significa “terra + um produto manufaturado pelo homem”. Pode designar-se como um produto plano fabricado a partir de materiais polímeros (sintéticos ou naturais), sendo constituídos por uma grande diversidade de materiais e formas, cada um adequado a um determinado uso ou necessidade. Estas questões são abordadas mais detalhadamente no presente capítulo.

A nível geotécnico, são inúmeras as aplicações deste tipo de produtos [Mendonça-Lopes (2011)]. Pinho-Lopes e Lopes (2010) referem que a aplicação dos geossintéticos surge em obras marítimas, vias de comunicação, obras hidráulicas e obras de engenharia ambiental. A título de exemplo tem-se: obras rodoviárias e ferroviárias, aterros, estruturas de contenção, proteção de taludes, drenagens, etc.

2.2.2 Geossintéticos e os seus materiais constituintes

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), os materiais mais utilizados no fabrico de geossintéticos são os plásticos.

Os plásticos subdividem-se em dois grupos, os termoplásticos e plásticos termoendurecidos. Os termoplásticos podem amolecer e endurecer por aquecimento e arrefecimento, respectivamente. Por sua vez, os plásticos termoendurecidos quando endurecem, partindo do estado fundido, não podem amolecer por ação do calor. Os termoplásticos são os mais utilizados no fabrico de geossintéticos [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Segundo Shukla (2002), os mais comuns são: os poliésteres (PET), o polipropileno (PP), as poliamidas (PA) ou nylons, o poliestireno (PS), o policloreto de vinilo (PVC), os polietilenos (PE), nomeadamente polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de muito baixa densidade (PEMBD), polietileno de média densidade (PEMD), polietileno clorinado (CPE),

polietileno clorossulfonado (PECS). A Tabela 1 relaciona o material polimérico com os respectivos tipos de geossintéticos que os incorporam.

Tabela 1 - Matérias-primas utilizadas para manufaturar diferentes geossintéticos (adaptado de Shukla (2002))

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

Os diferentes tipos de geossintéticos, em particular os vários tipos de estrutura de geossintéticos, resultam essencialmente de distintos processos de fabrico [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].


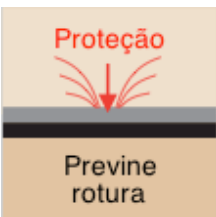



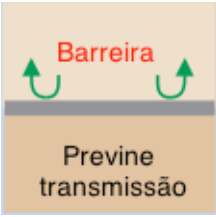
Assim de acordo, com o método de fabrico, a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), classifica os geossintéticos, como: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas e geocompósitos.

2.2.3 Funções e aplicações dos geossintéticos

Nas últimas décadas as soluções com geossintéticos têm desempenhando um papel de grande importância nas obras de infraestrutura civil, substituindo e aprimorando técnicas existentes, de modo a permitir um conjunto de associações e/ou combinações com solos e materiais agregados, promovendo assim soluções construtivas mais leves, esbeltas e eficazes [Pinho-Lopes e Lopes (2010)]. Assim sendo, com a potencialidade e diversidade, definiram-se diversas funções que os geossintéticos podem desempenhar como está representado na

Tabela 2.

Tabela 2 – Funções dos geossintético [IGS-Portugal (2009), com imagens de (Fabrics)].

Função	Descrição	Esquema representativo
Separação	A utilização de geossintéticos previne a mistura de solos adjacentes.	
Proteção	A utilização de geossintéticos é fundamental para que não ocorra danificação local de um determinado elemento ou material.	
Filtragem	A utilização de geossintéticos permite a retenção do solo e a passagem da água.	
Reforço	A utilização de geossintéticos tem como objectivo melhorar as propriedades mecânicas do solo ou outros materiais de construção.	
Drenagem	A utilização de geossintéticos tem como finalidade receber e encaminhar ao longo do plano as águas e/ou outros fluidos.	
Barreira de Fluidos	A utilização de geossintéticos é para evitar a migração de fluidos.	

Devido às suas múltiplas funções, os geossintéticos têm aplicabilidade em muitíssimas obras de engenharia, como estradas, taludes, barragens de terra, canais, túneis, caminhos de ferro, muros de suporte, fundações de edifícios, campos de golfe, campos de futebol, aterros sanitários, cemitérios, aeroportos, e muitas outras. Como vem referenciado em Pinho-Lopes e Lopes (2010), nas últimas décadas a aplicação de geossintéticos em engenharia civil tem vindo a aumentar.

2.3 Durabilidade

2.3.1 Introdução

A durabilidade dos geossintéticos pode ser definida como a capacidade que os materiais possuem de manter determinadas propriedades ao longo do tempo. Para tentar assegurar que os geossintéticos funcionam durante todo o tempo de vida de uma obra, é necessário identificar os principais agentes de degradação (presentes nessa obra) e avaliar qual a resistência dos materiais a esses agentes. A garantia da durabilidade é um requisito fundamental para a aplicação dos geossintéticos.

Greenwood e Friday (2006) referem que muitas estruturas de engenharia civil são projetadas para uma vida útil longa, normalmente 100 anos ou mais. Por isso, é importante para o projetista que os materiais que constituem a estrutura funcionem de forma satisfatória durante esse tempo, sem que seja necessária a substituição de material e com o mínimo de manutenção.

Para garantir que os geossintéticos funcionam durante o período de tempo definido é necessário prever quais as condições a que estes estarão submetidos e de que forma essas condições afectam as suas propriedades [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

A avaliação das propriedades dos geossintéticos e das condições que as influenciam é uma tarefa complicada, por isso deve ser feita com cautela. É da maior importância a avaliação da durabilidade dos geossintéticos para ser possível fornecer aos engenheiros as informações necessárias para que o dimensionamento seja efetuado para um tempo de vida de útil em que o material apresente um determinado grau de confiança.

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), a avaliação dos geossintéticos, passa pelas seguintes fases:

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

Tradicionalmente, a avaliação da durabilidade dos geossintéticos tem sido realizada através dos resultados de ensaios mecânicos e não de avaliação das alterações microestruturais, no entanto são estas últimas que determinam as variações registadas nas propriedades mecânicas [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

2.3.2 Mecanismos de degradação

A durabilidade dos geossintéticos depende muito da composição do polímero-base e dos aditivos incorporados; os agentes e mecanismos de degradação dos geossintéticos podem ocorrer a curto ou a longo prazo [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Paula (2003), citado por Rosete (2010), refere que os fenómenos de degradação que afectam os geossintéticos, podem resultar de:

- Ação interna (alterações na estrutura interna do geossintético);
- Ação externa (agentes mecânicos, químicos, físicos e biológicos);
- Deterioração durante o transporte, manuseamento e colocação em obra.

No que se refere ao envelhecimento causado por **ações internas** note-se que os polímeros sintéticos, devido ao seu processo de fabrico, têm alterações estruturais que podem, com o decorrer do tempo, conduzir a alterações (por exemplo, cristalizações) sem que tal implique, *a priori*, a degradação do geossintéticos [Paula (2003), citado por Rosete (2010)].

As **ações externas**, como vem referenciado em Pinho-Lopes (2006), que podem comprometer a durabilidade dos geossintéticos resultam de tensões mecânicas devidas a cargas estáticas e/ou dinâmicas a atuar continuamente. Os principais efeitos destas tensões nos materiais são a perda de material devido às forças friccionais geradas pelo contacto entre duas superfícies – abrasão; a relaxação de tensões, ou seja, a diminuição da tensão para uma taxa de deformação constante; e o aumento da deformação sob tensão constante, que no limite pode levar à rotura do material – fluência.

Para além dos fatores mecânicos, tem-se também presente os fatores físico-químicos. Entre estes pode referir-se o efeito do calor e temperatura, podendo provocar danos nos geossintéticos de vários modos: acelerando os mecanismos de degradação dos polímeros, causando a dissociação das ligações químicas ao longo da cadeia polimérica, promovendo a formação de radicais livres (que, em contacto com o oxigénio, iniciam a oxidação dos polímeros) ou originando a dilatação ou contração térmica dos materiais [Carneiro (2009)].

Segundo Carneiro (2009), o principal agente atmosférico nocivo aos geossintéticos é a radiação solar, já que os raios UV são os maiores causadores de danos por serem os mais energéticos do espectro solar que atinge a superfície terrestre, apesar de representarem 4% do mesmo.

A intensidade e a duração destas radiações são os fatores preponderantes da degradação fotoquímica. No entanto, as ações adicionais do oxigénio, das temperaturas elevadas e da humidade facilitam essa degradação do polímero. Assim sendo, os geossintéticos devem ser protegidos da luz solar de modo a minimizar os efeitos desta degradação [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

A degradação biológica deve-se à ação dos microrganismos podendo estes coexistir em condições ambientais distintas, porém, necessitam sempre de uma fonte de carbono para se desenvolverem e podem obtê-la a partir das reações de degradação de materiais orgânicos, tais como os polímeros e os aditivos utilizados em geossintéticos [Elias (2000), citado por Pinho-Lopes e Lopes (2010)]. No entanto, Carneiro (2009) refere que a degradação

microbiológica tem uma influência muito reduzida para a maioria das aplicações dos geossintéticos e tipicamente não é um problema para as formulações dos plásticos modernos.

No que diz respeito à degradação química, segundo Paula (2003), esta surge quando o polímero constituinte do geossintético apresenta reatividade ao oxigénio, iões metálicos, ácidos, bases, solventes e água, o que pode provocar a quebra de ligações químicas e, conseqüentemente, a perda das propriedades mecânicas do material. A suscetibilidade dos geossintéticos a estas ações depende, naturalmente, do tipo de polímero que constitui o geossintético.

Durante as **operações de transporte, manuseamento e colocação em obra** surgem danificações essencialmente das operações de colocação e compactação do material de aterro junto aos geossintéticos e das operações de manuseamento destes, podendo resultar, por exemplo, em defeitos locais (rasgões, perfurações) e/ou alteração das propriedades dos geossintéticos, quer a longo como a curto prazo [Pinho-Lopes e Lopes (2010)]. Sendo um dos aspectos abordados no presente trabalho, este tema é referenciado na secção 4.1 de forma mais detalhada. Na Tabela 3 apresentam-se algumas das conseqüências dos danos induzidos durante os processos de colocação em obra dos geossintéticos.

Tabela 3 – Danificação das funções dos geossintéticos durante a instalação em obra (Pinho-Lopes e Lopes (2010)).

Funções dos geossintéticos	Consequência dos danos induzidos
Reforço	Redução da resistência
Filtração e/ou separação	Perfuração que leva a uma redução da eficácia da função
Barreira de fluídos	Pequenos cortes levam a grandes aberturas, deixando assim o geossintético de cumprir a sua função.

3 APLICABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS EM VIAS-FÉRREAS

3.1 Vias-Férreas

A generalidade das vias-férreas é constituída por dois grandes grupos de elementos, a infraestrutura e a superestrutura. A parte da superestrutura engloba os carris, as travessas e os sistemas de fixação e ligação. A infraestrutura abrange as camadas de balastro, sub-balastro, a plataforma onde a estrutura é apoiada, onde se podem incluir ainda as obras de arte, os passeios e valetas [Tan (2002), citado por Rosete (2010)].

Na Figura 1 e na Figura 2 apresenta-se a constituição de uma via-férrea convencional.

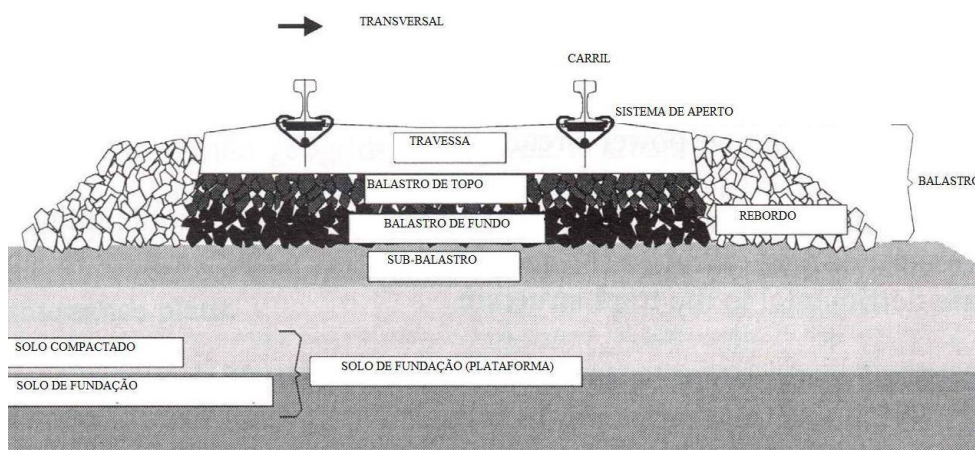


Figura 1 - Corte esquemático da secção longitudinal de uma via-férrea convencional [adaptado de Aursudkij (2007) por Oliveira (2011)].

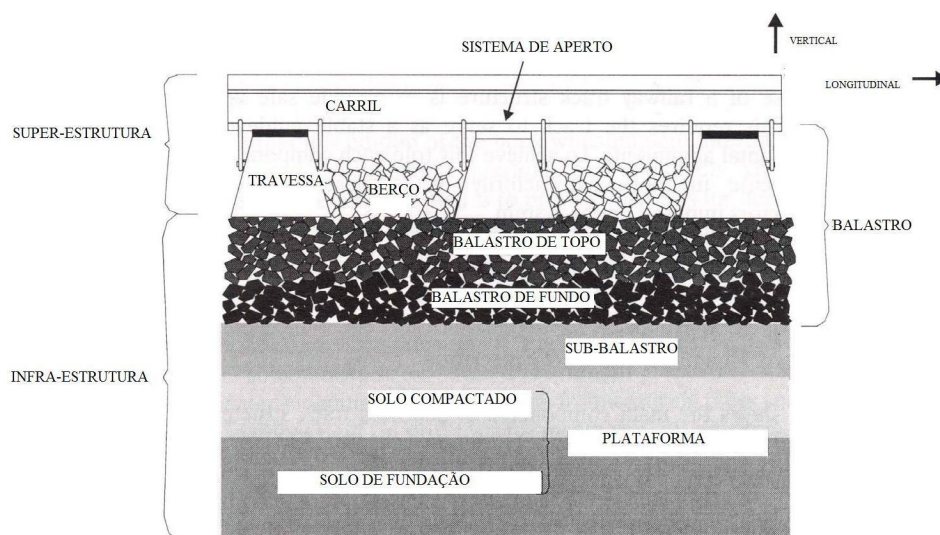


Figura 2 - Corte transversal esquemático da seção de uma via-férrea convencional longitudinal [adaptado de Aursudkij (2007) por Oliveira (2011)].

Segundo Indraratna *et al.* (2011), os carris são elementos longitudinais em aço que têm a função de guiar, suportar as rodas das carruagens e transferir as cargas produzidas pelo tráfego para as travessas. Os carris devem ser elementos firmes o suficiente para que não ocorram deformações excessivas.

A camada de balastro é constituída por material granular, com uma espessura variável geralmente entre os 25 e os 30 cm, sendo o desempenho das suas funções de especial importância para o correto funcionamento de toda a estrutura [Lopes (2009)].

De acordo com Tan (2002), o balastro deve realizar na perfeição as seguintes funções:

1. Providenciar uma plataforma de carga estável e de suporte uniforme às travessas;
2. Transmitir a carga elevada presente no interface das travessas com o balastro, para a plataforma com um nível de carga reduzido e aceitável;
3. Providenciar uma estabilidade aceitável das travessas quando sujeitas a solicitações verticais, longitudinais e laterais, produzidas pelo típico movimento das carruagens;
4. Providenciar um grau necessário de elasticidade e resiliência dinâmica em toda a via;
5. Providenciar resistência adequada no que diz respeito ao esmagamento, abrasão, degradação bioquímica e mecânica, agentes atmosféricos;

6. Garantir o mínimo de deformações plásticas para a estrutura da via, durante os típicos ciclos de carregamento;
7. Providenciar permeabilidade necessária para a drenagem.

Assim, de modo a se verificarem as funções anteriormente enunciadas, os materiais que constituem o balastro têm de ser duros, duráveis, angulares, livres de poeira e sujidade, e ter espaços vazios relativamente grandes. Uma vez que o balastro é constituído por material granular, o seu comportamento está bem documentado na literatura relativa a este tipo de materiais [Lim (2004), citado por Mendonça-Lopes (2011)].

Segundo Indraratna *et al.* (2011), o sub-balastro é composto usualmente por uma mistura bem graduada de cascalho e areia. A camada do sub-balastro deve ser dimensionada para garantir essencialmente a interpenetração de grãos do balastro para a plataforma e a migração dos finos da plataforma para a camada do balastro.

Ao cumprir as funções referidas, o sub-balastro vai permitir a redução da espessura necessária de balastro, que se traduz numa maior economia já que o material do sub-balastro é mais barato [Pinto (2005)]

Além das funções já representadas, segundo Tan (2002), o sub-balastro deve garantir as seguintes funções:

1. Reduzir os esforços induzidos pelo tráfego na base do balastro, para um nível aceitável no topo da camada da plataforma.
2. Aumentar a proteção contra a ação do gelo na plataforma;
3. Prevenir o desgaste da plataforma pelo balastro e evitar o bombeamento de lama quando na presença de água;
4. Prevenir a drenagem da água proveniente da plataforma.

A plataforma é a base sobre o qual a estrutura de via férrea é construída. Esta camada pode ser constituída por solo natural existente no local ou por solos colocados com esse propósito. A plataforma deve ter rigidez adequada e capacidade de carga para resistir a tensões induzidas pelo tráfego no sub-balastro [Indraratna *et al.* (2011)].

Segundo Pinto (2005), as funções que a plataforma deve desempenhar para garantir condições de segurança, comodidade e economia são as seguintes:

- Fornecer uma superfície regular, com inclinação transversal, no sentido do escoamento das águas para o exterior da plataforma;
- Oferecer as características de resistência necessárias para suportar as cargas que lhe são impostas;
- Sob a ação destas cargas (cíclicas), oferecer resistência às deformações permanentes.

3.2 Desempenho dos geossintéticos em vias-férreas

3.2.1 Introdução

As linhas férreas têm sido alvo de importantes mudanças, devido ao aumento das velocidades de circulação e das cargas por eixo transportadas. Para fazer face a esta nova realidade começou-se a aplicar geossintéticos, que acabaram por se tornar numa aplicação comum em obras ferroviárias, quer em casos de reabilitação, quer de construção nova. O seu uso não se limita ao reforço, sendo certo que outras funções, como sejam a drenagem, separação entre as camadas da subestrutura e filtragem, são fulcrais para a conservação da integridade da via, com a conseqüente redução nos custos de manutenção.

Lopes (2009) refere que entre a literatura da especialidade as vantagens de aplicação de geossintéticos às vias-férreas que reúnem o maior consenso são as seguintes:

- Permite o aumento dos intervalos de manutenção do material da camada de balastro;
- Controla o fenómeno de contaminação do balastro;
- Permite a redução dos deslocamentos horizontais e transversais da camada de balastro;
- Reduz os assentamentos diferenciais na camada de balastro;
- Minora o impacto ambiental, associado à exploração de pedreiras;
- Reduz os custos iniciais e de exploração;

- Maior disponibilidade de materiais e maior facilidade e rapidez de aplicação.

3.2.2 Separação, filtragem e drenagem

Para o cumprimento das funções de separação, filtragem e drenagem usam-se, na maior parte dos casos, os geotêxteis, podendo ainda recorrer-se aos geocompósitos drenantes. Dentro destes, é analisada a influência do tipo de estrutura face ao solo de fundação e o seu comportamento a longo prazo [Mendonça-Lopes (2011)].

Indraratna *et al.* (2011) referem vários estudos de diferentes autores que apontam na mesma direção, nomeadamente que ao final de algum tempo de estudo os geotêxteis mantêm as suas propriedades iniciais quase intactas. Estes autores citam Selig e Waters (1994) que examinaram geotêxteis após estarem 3 anos ao serviço nas vias-férreas da *British Rail*, e estes encontravam-se em condições razoáveis. Ashpiz *et al.* (2002) investigaram a durabilidade de geotêxteis usados na via-férrea de St. Petersburgo – Moscovo e em 5 anos de serviço registaram 0,2% a 0,3% de dano superficial e a capacidade resistente manteve-se entre 74% a 72% da capacidade resistente inicial. Nancey *et al.* (2002) reportaram resultados similares no que diz respeito à durabilidade dos geotêxteis testados a uma frequência de 50 Hz e com um carregamento de 20 toneladas efetuado pelas rodas excêntricas no “vibrogir”, que está representado na Figura 3. Após 200h de carregamento cíclico, notou-se que a capacidade de vazão, permeabilidade, resistência de perfuração do geotêxtil não são quase afetados pelo tráfego simulado.

O equipamento em causa permite uma aproximação realista dos fenómenos de degradação verificados *in situ* pois permite a reprodução das condições locais de aplicação [Mendonça-Lopes (2011)].

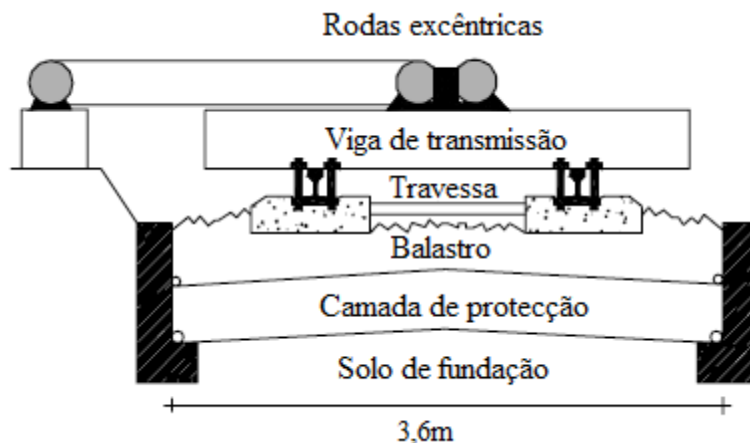


Figura 3 - Esquema representativo do dispositivo à escala real de um “Vibrogir” [adaptado de Nancey *et al.* (2002) por Mendonça-Lopes (2011)].

Outros estudos no “Vibrogir”, de Faure e Imbert (1996), citados por Lopes (2009), tentaram avaliar o desempenho de geotêxteis relativamente à função de filtragem. Nos estudos levados a cabo por aqueles autores foram utilizados geotêxteis não tecidos, agulhados e termoligados, e também geotêxteis tecidos (com uma massa por unidade de área variável entre 280 e 420g/m²), sendo estes colocados na interface entre a plataforma e o sub-balastro. Destes estudos, resultaram as seguintes conclusões:

- Os geotêxteis não tecidos termoligados agiram como membranas impermeáveis, consequência da colmatação das suas aberturas;
- Os geotêxteis tecidos sofreram danos severos, nomeadamente o corte de alguns filamentos, o que permitiu o bombeamento de partículas para o balastro;
- Os geotêxteis não tecidos agulhados mantiveram a sua permeabilidade independentemente do tipo de solo de fundação ensaiado.

3.3 Danificação dos geossintéticos

A utilização dos geossintéticos nas vias-férreas acarreta preocupações ao nível da sua danificação. Como foi referido anteriormente, esta danificação pode estar relacionada com a sua colocação em obra, pelo facto de estar em contacto com potenciais agentes agressores,

assim como maquinaria de construção, ou pelo efeito abrasivo provocado pela intensidade das cargas aplicadas e natureza cíclica.

No presente capítulo são abordados de forma mais pormenorizada a danificação durante a instalação e os danos associados ao comportamento mecânico do balastro, ou seja, a abrasão.

3.3.1 Danificação durante a instalação

A danificação durante a instalação de geossintéticos deriva, essencialmente, das operações de colocação e de compactação do material de aterro na vizinhança do geossintético, assim como das operações de transporte e manuseio dos mesmos [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Koerner (1999), citado por Carneiro (2009), faz referência às tensões causadas pelas operações de instalação podem ser mais severas do que aquelas a que os geossintéticos irão estar sujeitos durante a fase de operação.

Assim, segundo Shukla (2002), torna-se imprescindível o estudo deste fenómeno de modo a estabelecerem-se, eventuais, coeficientes de redução das propriedades resistentes dos geossintéticos, que traduzam, convenientemente, os efeitos da danificação durante a instalação.

Tabela 4 - Fatores que influenciam a danificação dos geossintéticos [adaptado Watn e Chew (2002) por Rosete (2010)]

Solo de fundação	Rigidez Resistência
Material de aterro	Dimensão das partículas (granulometria) Angulosidade
Procedimentos construtivos e equipamento de compactação/espalhamento	Tensões induzidas durante a instalação Espessura da camada de aterro Peso do equipamento de compactação Vibração provocada pela compactação
Condições climáticas	Temperatura Água
Características dos geossintéticos	Tipo de polímero Tipo de fibras e dimensão Processo de fabrico Espessura Massa por unidade de área

A danificação que os geossintéticos sofrem durante a instalação (DDI) pode ser avaliada *in situ* (através da construção de aterros experimentais sob condições reais) ou através de simulações laboratoriais. A norma EN ISO 10722: 2007 descreve um método laboratorial de um ensaio de controlo de qualidade para indução de dano mecânico.

Watn e Chew (2002), citados por Pinho-Lopes e Lopes (2010), fazem referência ao mecanismo e ao nível de danificação que resultam de uma série de fatores relacionados com as características do geossintético e com condições fronteira, externas ao geossintético. Estes mecanismos de degradação podem ser divididos em: abrasão, fendilhação e separação de material, punçoamento, rotura em tensão, corte de fibras e rasgamento. No presente trabalho foi dada mais atenção à abrasão, na secção 3.3.2, enquanto consequência da ação do balastro em contacto com o geossintético.

Segundo Christopher e Elias (1998), citados por Rosete (2010), as consequências dos efeitos da DDI em geossintéticos em aplicações de reforço são bastante importantes, pois a redução da resistência destes materiais pode comprometer o seu funcionamento, podendo levar à rotura da estrutura. Em relação às funções de separação e/ou filtração, as perfurações e cortes resultantes da danificação mecânica vão reduzir significativamente a eficácia dos geossintéticos a longo prazo, e para funções de barreira, o efeito do punçoamento a curto

prazo e os cortes podem conduzir a penetrações a longo prazo, deixando de exercer a sua função principal.

Borges (1995), citado por Tavares (2009), sugere a elaboração de um plano para colocação em obra, no intuito de diminuir ao máximo os riscos associados anteriormente descritos, deve contemplar:

1. Preparação do terreno;
2. Planta das faixas;
3. Ordem de colocação das faixas, impondo o sentido de colocação;
4. Indicação do método de ligação (por costuras, grampeamentos, colagem ou sobreposição);
5. Indicação de eventuais cortes para ajustamento às condições locais.

3.3.2 Abrasão

A abrasão pode ser definida como o desgaste de um material devido a forças geradas pelo contacto entre duas superfícies. Normalmente a resistência à abrasão é avaliada de acordo com a perda percentual de massa ou resistência/extensão residual de acordo com ensaios sob condições especiais [Shukla (2002)].

Watn e Chew (2002), citados por Pinho-Lopes e Lopes (2010), referem que este mecanismo de danificação pode ocorrer em todos os tipos de geossintéticos, como consequência das solicitações associadas a instalação em obra, os geotêxteis não tecidos agulhados são mais sensíveis a este tipo de dano, já que a sua superfície sofre abrasão mais facilmente. É de salientar que o contacto com partículas pequenas do aterro pode ser significativo, pois a capacidade de abrasão é mais influenciada pela angulosidade das partículas do que a sua dimensão.

Dine *et al.* (1982), citados por Pinto (2005), referem que nas aplicações ferroviárias, o geossintético sofre desgaste maioritariamente provocado pelas partículas de balastro com que contacta, sendo que por ação das cargas cíclicas ou dinâmica de estruturas tende a ter pequenos mas continuados deslocamentos e descrevem os processos de abrasão observados, sendo os que mais frequentemente se obtêm apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos processos de abrasão [adaptado de Dine *et al.* (1982) por Pinto (2005)]

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

Segundo Pinho-Lopes e Lopes (2010), as principais consequências da abrasão são a redução de espessura, que podem ter como consequência uma diminuição local da resistência do geossintético, e a alteração das propriedades hidráulicas do material, nomeadamente enquanto filtro. Assim, sempre que a abrasão é muito significativa pode mesmo haver destruição total de uma determinada área do geossintético [Mendonça-Lopes (2011)].

4 ESTUDO LABORATORIAL DOS FENÓMENOS DE DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO E DA ABRASÃO DOS GEOSSINTÉTICOS

4.1 Introdução

O presente capítulo apresenta o estudo laboratorial realizado e os resultados obtidos. O trabalho desenvolvido pretendeu simular em laboratório os fenómenos de danificação durante a instalação (DDI) e da abrasão dos geossintéticos. Pretendeu-se assim contribuir para o estudo da influência dos efeitos da DDI e da abrasão na durabilidade dos geossintéticos em aplicações ferroviárias, através da caracterização do comportamento mecânico de curto prazo de alguns destes materiais e da determinação de coeficientes de redução a aplicar no seu dimensionamento.

Os ensaios de DDI e de abrasão foram realizados nos equipamentos do Laboratório de Geossintéticos (LGS) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e foram efetuados de acordo com os procedimentos descritos nas normas atualmente em vigor:

- NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998);
- EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007).

Para a caracterização dos efeitos dos referidos fenómenos nos geossintéticos foram realizados ensaios de tração de acordo com as especificações da norma EN ISO 10319:2008 – Geosynthetics. Wide-width tensile test (ISO 10319:2008).

4.2 Geossintéticos utilizados no estudo

No trabalho experimental realizado utilizaram-se dois materiais com estrutura distinta, tal como se pode verificar na Figura 4. Esses materiais são um geotêxtil não-tecido (GTX) em polipropileno (PP) cuja massa por unidade de área (m.u.a.) é de 1000g/m²; e uma geogrelha tecida (GGR) composta por fibras de poliéster (PET) de elevada resistência dispostas segundo uma malha horizontal e cobertas com uma camada polimérica de proteção.

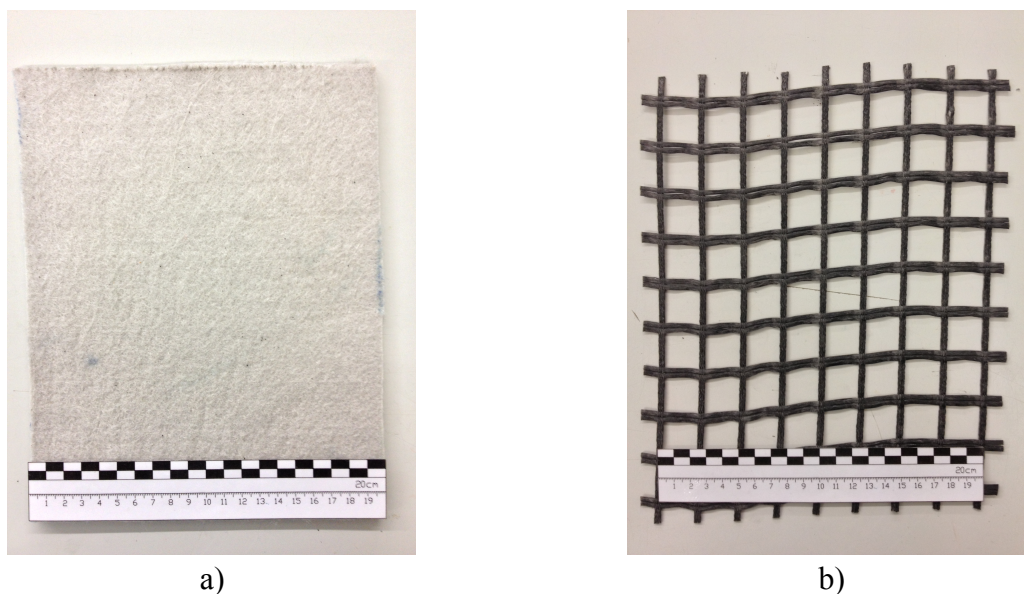


Figura 4 - Materiais utilizados no estudo: a) Geotêxtil não-tecido (GTX-N); b) Geogrelha Tecida (GGR-T).

Na Tabela 6 são apresentados os valores nominais (fornecidos pelo fabricante) da resistência à tração dos materiais, na direção de fabrico, e das respectivas extensões para a força máxima.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos geossintéticos em estudo na direção de fabrico.

Geossintético	Resistência à tração, T_{max} (kN/m)	Extensão (ϵ) para T_{max} (%)
GTX	55	105
GGR	55	10,5

Neste trabalho os dois geossintéticos foram estudados para uma única combinação, em que a GGR encontra-se na parte superior do GTX (Figura 5) e na direção de fabrico.



Figura 5 – Geocompósito GTX+GGR.

4.3 Procedimentos dos ensaios

4.3.1 Ensaio de Tração

Os procedimentos a seguir no ensaio de tração de geossintéticos encontram-se descritos na norma EN ISO 10319:2008 – Geosynthetics. Wide-width tensile test (ISO 10319:2008).

De uma forma genérica, este ensaio consiste em fixar um provete ao longo de toda a sua largura nas garras do equipamento de ensaio de tração, ao qual é aplicada uma determinada força longitudinal, com uma dada velocidade de extensão, até que ocorra a sua rotura. As propriedades de tração do provete são determinadas através de escalas existentes nos equipamentos e a velocidade de ensaio é constante, de modo a perfazer uma taxa de deformação de $20\pm 5\%$ por minuto para todos os geotêxteis e produtos relacionados.

Como está referenciado na norma, antes de iniciar o ensaio devem ser preparados 5 provetes, para cada direção, do geossintético a ensaiar. A forma de preparação dos provetes deve ser adequada à sua estrutura, no entanto, cada provete deve ter uma largura nominal de $200\pm 1\text{mm}$ e comprimento suficiente para assegurar 100mm entre as garras.

No que diz respeito à informação sobre a extensão, são efetuadas medições da deformação por meio de um extensómetro que segue o movimento de dois pontos de referência definidos no provete. Estes pontos de referência estão situados no eixo de simetria do provete, paralelo à carga aplicada, e devem estar separados por uma distância de 60mm (30mm para cada lado do centro de simetria do provete). Para geogrelhas esta distância pode ser adaptada de forma a incluir pelo menos uma fiada de nós.

Para as geogrelhas, os provetes devem ter pelo menos 200mm de largura e comprimento suficiente para assegurar 100mm entre garras e devem conter, pelo menos, uma fiada de nós ou elementos transversais entre garras. Para os materiais nos quais a distância entre elementos na direção de ensaio é inferior a 75mm, os provetes devem conter pelo menos 5 elementos de tração completos na direção da largura; se a distância entre elementos na direção de ensaio for igual ou superior a 75mm, os provetes devem conter no mínimo dois elementos de tração completos na direção da largura.

Neste trabalho como os provetes são constituídos pela sobreposição da geogrelha ao geotêxtil (GTX+GGR), as suas dimensões e a distância entre os pontos de referência foram definidas considerando o que se encontra estipulado para as geogrelhas.

De acordo com a norma, todos os provetes devem ser acondicionados e os ensaios devem ser conduzidos nas condições definidas na norma ISO 554: Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications ($65\pm 5\%$ de humidade relativa e $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura).

Após os provetes estarem preparados, estes devem ser colocados centralmente nas garras do equipamento e deve ser garantido que o comprimento do provete fica paralelo à direção de aplicação da força. Consoante o tipo de extensómetro, a marcação dos pontos de referência no provete deve ser realizada antes ou após a colocação do provete nas garras do equipamento.

Ter em atenção, antes do ensaio iniciar, para a necessidade de ajustar a distância entre as garras do equipamento para obter um comprimento de provete de $100\pm 3\text{mm}$ e a velocidade de extensão a aplicar ao provete durante o ensaio deve ser de $20\pm 5\%$ por minuto.

Seguidamente, após a inserção dos provetes nas garras, procede-se à montagem do extensómetro e ao ajuste do equipamento, podendo assim iniciar-se o ensaio, aplicando no provete uma força de tração crescente até que ocorra a rotura do mesmo. Assim que for atingida a rotura do provete, o equipamento deve ser parado, e a força de tração máxima deve ser registada (com uma precisão de 0,2 % de toda a escala de leitura), assim como a extensão correspondente (com uma precisão até à primeira casa decimal).

A decisão de não validar os resultados de uma rotura deve ser baseada nas observações do provete durante o ensaio, na variabilidade do comportamento do material ensaiado e na presença ou não de deslizamento, quer nos pontos de referência de medição da extensão, quer nas garras que suportam o provete, conforme está descrito na norma EN ISO 10319:2008. O resultado correspondente deve ser rejeitado e ensaiado outro provete, se for identificada alguma irregularidade na curva força-extensão devida ao extensómetro. A norma refere ainda que, na ausência de algum critério, qualquer rotura que ocorra até 5mm das garras, que resulte num valor abaixo de 50% dos valores médios de todas as outras roturas, deve ser rejeitada.

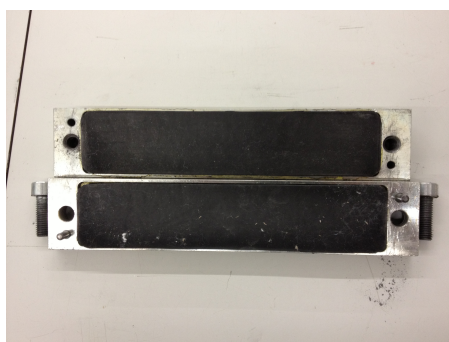
De acordo com o especificado na norma EN ISO 10319:2008, procedeu-se nos ensaios do geotêxtil à marcação dos pontos de referência para a medição da extensão. Porém, no caso da geogrelha, devido à configuração e ao modo de fixação dos alvos, usados na medição da extensão, e das dimensões das aberturas da geogrelha (inferior a 75mm), foi necessário efetuar alguns ajustes na marcação dos pontos de referência. Deste modo, a separação entre

alvos não foi de 60mm, mas sim cerca de 50mm, compreendendo, deste modo, três fiadas de nós.

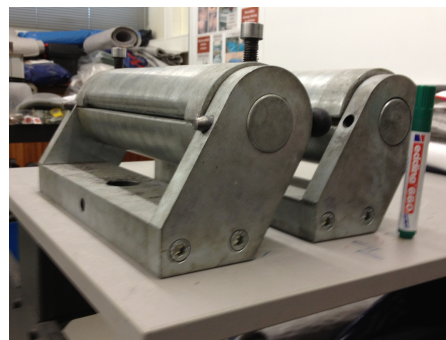
No que diz respeito à medição da extensão, foi feita com o auxílio de um vídeo-extensómetro, que mede a distância entre os pontos de referência anteriormente mencionados.

Dada a necessidade de evitar escorregamentos dos materiais a ensaiar nas garras, realizou-se uma série de ensaios experimentais com provetes intactos.

Deste modo, no caso do geotêxtil, e no caso da geogrelha, foram realizados ensaios experimentais em provetes intactos com as garras de cunha com face lisa, Figura 6a, e garras cilíndricas, Figura 6b. Os resultados obtidos são detalhados nas secções 4.4.2 e 4.4.3 , respetivamente.



a)



b)



c)

Figura 6 - Garras utilizadas nos ensaios de tração: a) garras de cunha de face lisa em borracha; b) garras cilíndricas; c) garras de cunha de face rugosa.

Nos ensaios de tração com provetes constituídos por GTX+GGR, teve-se em consideração a metodologia utilizada por Rosete (2010), em que, para evitar escorregamentos, se efetua a dobragem das zonas a colar e posteriormente se introduzem dois varões de 6mm de diâmetro, um em cada uma das extremidades do provete, ficando com o aspeto como se pode ver na Figura 7. Em primeiro lugar recorreu-se às pegas de cunha de face rugosa, Figura 6c. Neste

caso observou-se escorregamento dos provetes na zona das pegas, devido à má fixação dos mesmos nas garras, relacionada com a sua elevada espessura (cerca de 15mm).

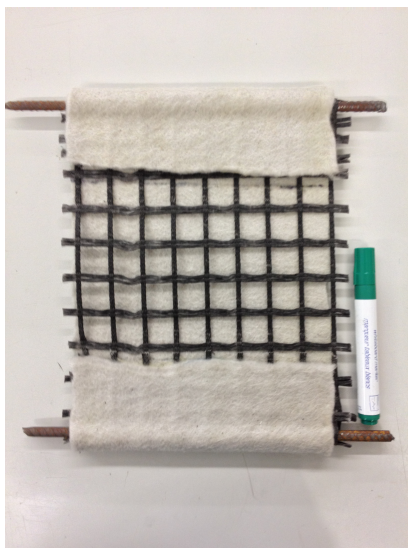


Figura 7 - Aspecto final do provete após colagem dos varões de 6mm.

Dado o insucesso da tentativa referida, optou-se pela realização de ensaios usando as garras em cunha com face aderente em borracha e com um processo de colagens diferente. Neste foi aplicada uma tira de outro material em ambas as extremidades do provete, para evitar o escorregamento das garras do provete composto por GTX+GGR, como é ilustrado na Figura 8. Nestes ensaios a base aderente permitiu evitar o deslizamento do provete, e por isso optou-se por usar estas garras nos restantes ensaios.

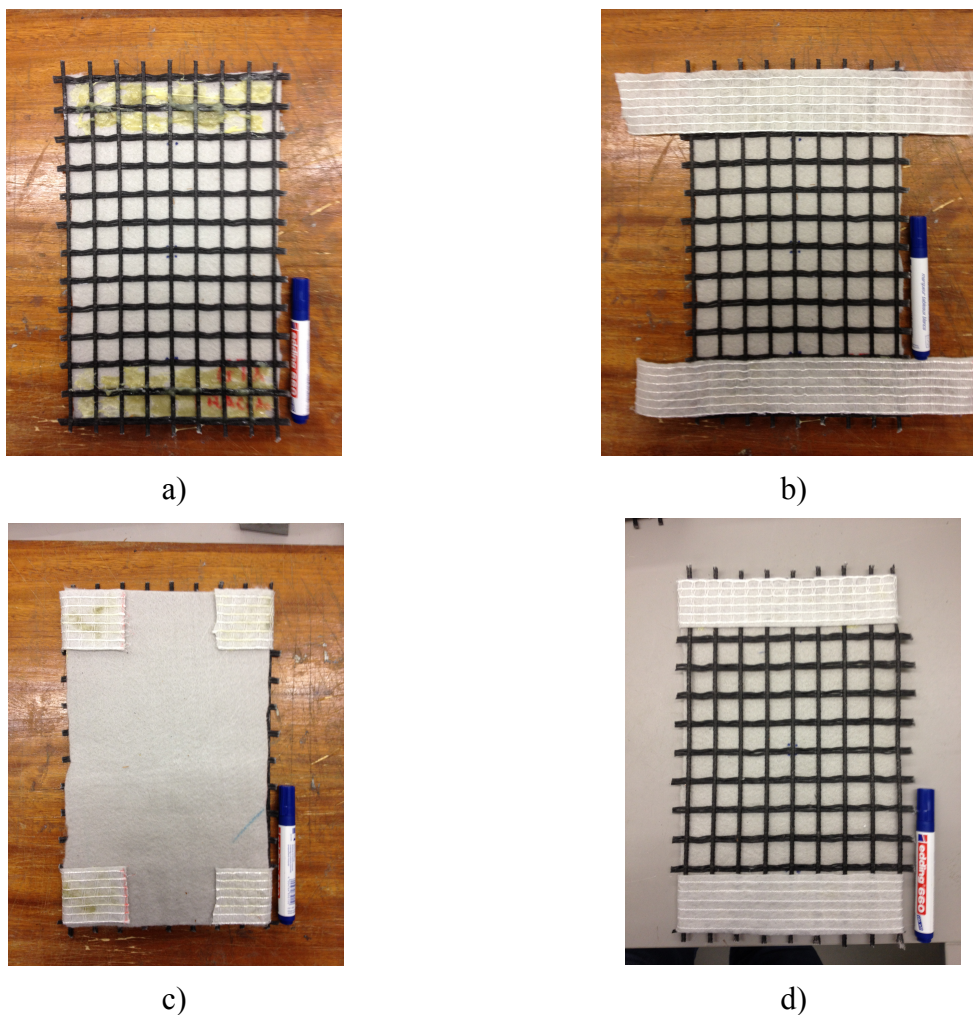


Figura 8 – Preparação dos provetes GTX+GGR: a) aplicação de cola nas extremidades; b) colagem da tira de tecido na frente do provete; c) colagem da tira na retaguarda; d) aspeto final do provete.

4.3.2 Ensaio de danificação durante a instalação – DDI

Os procedimentos para a simulação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos encontram-se descritos na norma EN ISO 10722:2007 – Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading. Damage caused by granular material (ISO 10722:2007).

Na Figura 9 apresenta-se o aspeto geral do equipamento utilizado para a simulação laboratorial da danificação de geossintéticos. Este equipamento é constituído, fundamentalmente, por:

- Mecanismo de aplicação da carga –elemento pneumático, que na sua extremidade possui uma placa de carregamento, e que pode ser controlada de modo a produzir uma pressão sinusoidal, entre $900\pm 10\text{kPa}$ e $5\pm 0,5\text{kPa}$, a uma frequência de 1Hz;
- Caixa de danificação – tem como principal função conter o material granular e o geossintético a danificar. Consiste numa caixa metálica e rígida, que tem como dimensões internas $300\times 300\text{mm}^2$ (em planta). A caixa é composta por duas partes, com uma altura de 75mm cada, que são fixadas por encaixe. A caixa deve ser colocada sobre uma base rígida cuja deformação seja inferior a 1mm, quando a carga de ensaio é aplicada diretamente na base, ou deve ser fixada rigidamente ao pistão hidráulico da máquina de compressão;
- Placa de carregamento – deve possuir uma rigidez adequada para que possa transmitir as cargas ao agregado, sem sofrer flexão. É realizada em aço, deve ter as dimensões de $100\times 200\text{mm}^2$.

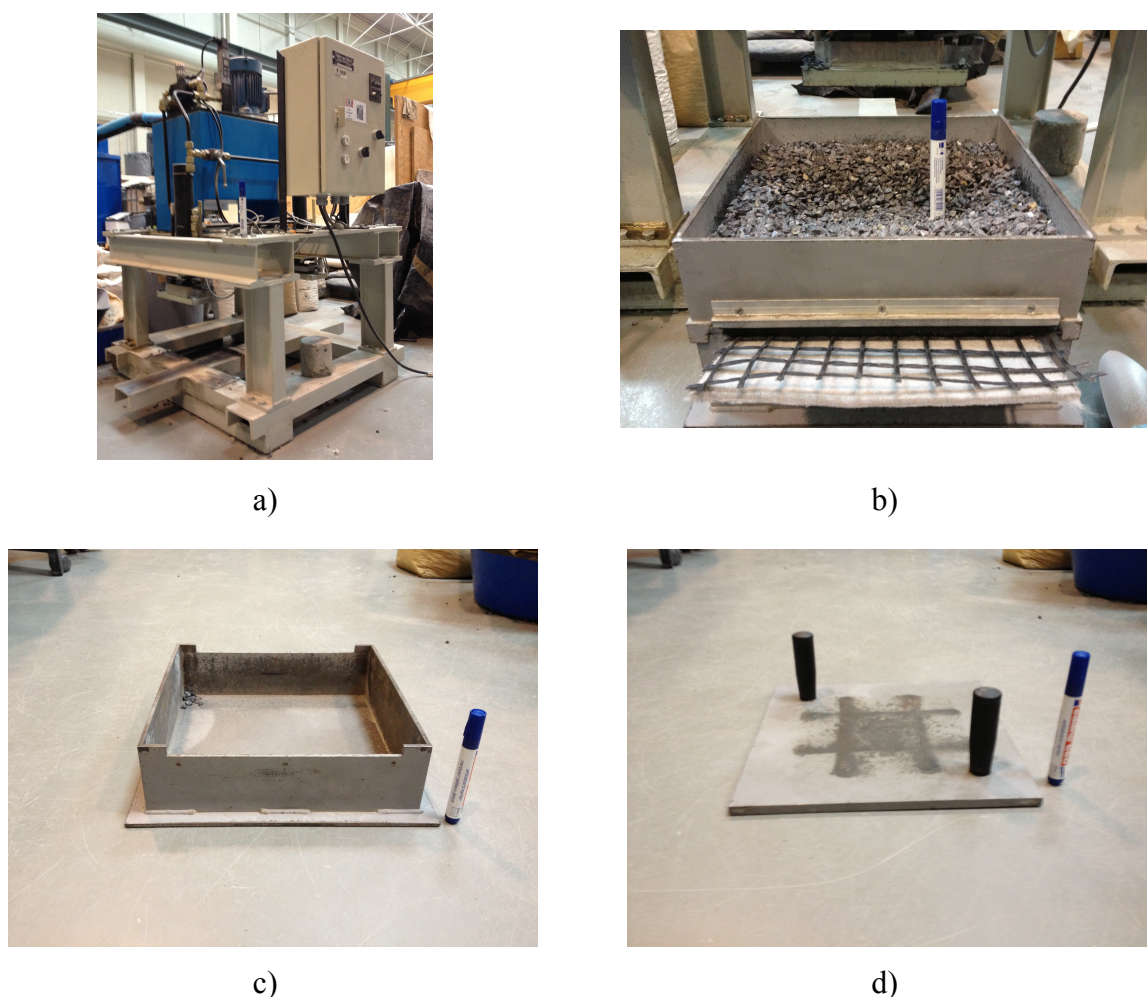


Figura 9 - Equipamento de simulação da DDI: a) equipamento utilizado; b) agregado (*corundum*) utilizado na caixa de danificação; c) caixa de danificação; d) placa de compactação.

Com o que está estabelecido na norma referida, antes de iniciar o ensaio devem ser preparados 5 provetes com 1,0m de comprimento e 0,5m de largura, devendo cada um destes, posteriormente ser cortado em dois provetes com 1,0m de comprimento e 0,25m de largura (um para ser usado no ensaio de danificação e o outro para ser utilizado no ensaio de referência). Os provetes de referência diferem dos provetes intactos, pois são sujeitos diretamente, pelo actuador hidráulico, a uma pressão de 500kPa durante 60s (nos ensaios realizados, para viabilizar a comparação com resultados de outros autores, utilizou-se uma pressão de 900kPa).

Todos os provetes devem ser acondicionados e os ensaios devem ser conduzidos nas condições definidas na norma ISO 554: Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications (65±5% de humidade relativa e 20±2°C temperatura).

O procedimento deste ensaio, de acordo com a norma, consiste em encher a caixa inferior com um agregado sintético, segundo duas camadas de igual altura, perfazendo uma altura total de 75mm. Cada uma dessas camadas é compactada com uma placa metálica rígida colocada sobre toda a área da caixa, aplicando-lhe uma tensão de 200 ± 2 kPa durante 60 segundos.

Esta norma especifica que o material granular a utilizar seja um agregado sintético de óxido de alumínio normalizado (*corundum*), tendo partículas de dimensões entre 5mm e 10mm. O mesmo material deve ser peneirado, por via húmida (no entanto neste trabalho recorreu-se à via seca), com o peneiro de 5mm, após 3 utilizações, e rejeitado ao fim de 20 utilizações.

Após o enchimento e a compactação do agregado na caixa inferior referido, o provete a ensaiar é colocado sobre a camada do agregado, tendo sempre a atenção de alinhar o centro do provete com o centro da caixa. Neste trabalho ensaiou-se o conjunto GTX+GGR, em que o GTX ficou em contacto com o agregado (na caixa inferior) e a GGR ficou na parte superior. Seguidamente a caixa superior é encaixada sobre a caixa inferior, verificando-se que o provete do geossintético fica sem rugas e sem tensão, sendo posteriormente cheia de agregado solto até à altura de 75mm. A caixa é colocada sob a placa de carga, de forma a ficar centrada com a mesma sendo aplicada uma tensão de $5 \pm 0,5$ kPa. O carregamento é feito pela aplicação de uma tensão cíclica que varia entre $5 \pm 0,5$ kPa e 500 ± 10 kPa, com uma frequência de 1Hz e durante 200 ciclos.

No final do ensaio o material granular e o provete são removidos cuidadosamente para que não ocorra danificação adicional. Segue-se a observação visual da danificação existente no provete e o ensaio de referência do mesmo, para avaliar as alterações sofridas nas propriedades de referência. O procedimento descrito deve ser repetido para todos os provetes inicialmente ensaiar.

Relativamente ao valor da carga cíclica a aplicar optou-se por fazer variar este valor entre 5 ± 5 kPa e 900 ± 10 kPa de modo a permitir a comparação dos resultados obtidos com outros trabalhos desenvolvidos no mesmo âmbito, tendo-se sempre presente que os resultados obtidos com esta carga são mais conservativos do que os obtidos com a carga especificada na norma. Esta opção corresponde a uma versão anterior da norma de ensaio referida (ENV ISO 109722-1:1997).

Além disso, no presente trabalho, tendo em conta a área necessária para realizar os ensaios de referência (ensaios de tração), as dimensões adotadas para os provetes foram: 500mm de comprimento e 250mm de largura

4.3.3 Ensaio de Abrasão

Os procedimentos do ensaio laboratorial de abrasão encontram-se descritos na norma NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998).

O presente ensaio consiste na colocação de um provete numa plataforma fixa onde este é friccionado por um abrasivo com características de superfície P100. Neste trabalho o provete é formado por GTX+GGR com a GGR colocada na parte inferior, em contacto com o abrasivo.

O abrasivo é movido ao longo de um eixo horizontal com um movimento uniaxial, sob condições controladas de pressão e ação abrasiva. A resistência à abrasão é expressa como a percentagem da perda das propriedades de tração do provete. Deste modo, na Figura 10 apresenta-se o equipamento utilizado para a simulação da abrasão dos geossintéticos.



Figura 10 – Equipamento laboratorial para a simulação de abrasão.

Os provetes a ensaiar devem ser cortados com as dimensões de $430 \times 200 \text{mm}^2$, de acordo com a EN 963:1995 (Geotextiles and geotextile-related products. Sampling and preparation of test specimens.), e os respectivos abrasivos com as dimensões de $220 \times 385 \text{mm}^2$. A maior dimensão nos provetes de geossintético corresponde à direção na qual se pretende simular a abrasão.

Na placa que provoca o efeito abrasivo (placa inferior) insere-se a película abrasiva P100 e posteriormente apertam-se os parafusos do sistema de fixação situada nos topos da plataforma, como se pode ver na Figura 11, até que a película P100 fique fixa, tendo sempre atenção para que esta não apresente rugas.



Figura 11 - Película abrasiva P100: a) vista em pormenor; b) aplicação na placa inferior do equipamento de simulação da abrasão.

A placa superior do equipamento, é constituída por uma zona de aperto de parafusos que permite a fixação do provete à placa que se encontra estacionária, e também por um esticador que consiste em dois parafusos com o objectivo de eliminar folgas entre o provete e a placa e que, durante o ensaio, a placa superior não se desloque relativamente ao provete, enquanto este adere à película abrasiva.

No trabalho desenvolvido, sentiu-se a necessidade de fazer alguns ajustes para simular de forma eficaz o efeito abrasivo no conjunto geotêxtil e geogrelha.

Assim sendo, para a amostra conjunta de geotêxtil e geogrelha, adotou-se o procedimento descrito por Rosete (2010), para um geotêxtil, em que, para evitar o deslocamento relativo entre o provete e a placa superior, entre a placa e o provete se interpôs uma película abrasiva com características de superfície P24 (Figura 12a).

Na extremidade fixou-se o abrasivo P24 sem esticador, mas com o auxílio de fita adesiva (Figura 12b). Posteriormente colocou-se o provete na mesma extremidade alinhado sob as garras e apertaram-se os parafusos. Para o compósito estudado, composto pela associação de geotêxtil e geogrelha, torna-se quase impossível a utilização de todos os parafusos de aperto

(Figura 12c). Após o provete, ter sido alinhado e fixado pelo contacto com o abrasivo, do lado oposto procedeu-se da mesma forma, apertando os parafusos alternadamente para evitar eventuais folgas, tendo atenção para não provocar esmagamento nos filamentos da geogrelha.



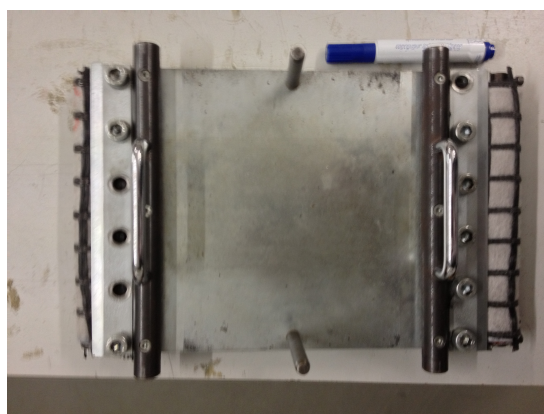
a)



b)



c)



d)

Figura 12 - Montagem do provete de geotêxtil no ensaio laboratorial de abrasão, após fixação à placa superior com abrasivo P24: a) película abrasiva P24; b) alinhamento do P24 na extremidade sem esticador; c) provete e abrasivo P24 fixos na extremidade sem esticador (não se aplicou a totalidade dos parafusos); d) vista geral do provete e abrasivos P24 fixos em ambas as extremidades.

Em seguida, a placa superior é posicionada corretamente nos apoios verticais do equipamento e posteriormente alinhada com a placa inferior. A placa superior é carregada com três níveis de peso de modo a que a pressão sobre o geossintético seja de 6kPa.

O equipamento deve trabalhar a uma frequência máxima de 90 ciclos por minuto e durante 750 ciclos, ou até à rotura do provete.

Deve ter-se em atenção se no decorrer do ensaio o provete ou o material abrasivo deslizam nas garras. Nesse caso o provete deve ser desprezado e ensaiado outro, após serem efetuados os devidos ajustes. O abrasivo deve ser substituído após cada ensaio.

Após o término do ensaio, retira-se cuidadosamente o provete do equipamento, sem que se provoque qualquer tipo de danificação adicional. Na outra face do provete, oposta à que foi submetida à abrasão, marca-se e corta-se a forma do provete para posteriormente ser ensaiado no ensaio de tração (ensaio de controlo).

4.4 Apresentação de resultados

4.4.1 Introdução

Nestas secções são apresentados os resultados dos ensaios de tração efetuados aos geossintéticos em análise. Os resultados dizem apenas respeito às propriedades mecânicas na direção de fabrico dos geossintéticos. A sua discussão e comparação ficam reservadas para a secção 4.5.

Assim sendo, para o conjunto GTX+GGR são apresentados os resultados de tração: em provetes intactos, de referência, após ensaios isolados de DDI e Abrasão, e após combinação (sobreposição) destes dois últimos. Dado que durante este trabalho se realizaram ensaios de tração de provetes do geotêxtil e da geogrelha isolados, para caracterização das pegadas a utilizar, esses resultados são também incluídos.

Os resultados apresentados incluem os valores obtidos nos ensaios de tração, nomeadamente a resistência à tração máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e extensão para a força máxima ($\epsilon_{m\acute{a}x}$), e os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação (C.V.) respetivos. Com os valores obtidos traçou-se a curva força-extensão de cada provete e uma curva aproximada (polinomial de grau 5) até ao instante da rotura, a partir da qual foi determinada a robustez (U), ou seja, a energia despendida até à rotura do provete, e o módulo de rigidez secante para os valores de extensão de 2%, 5% e 10% (J_{sec}). A definição destas grandezas está também ilustrada na Figura 13.

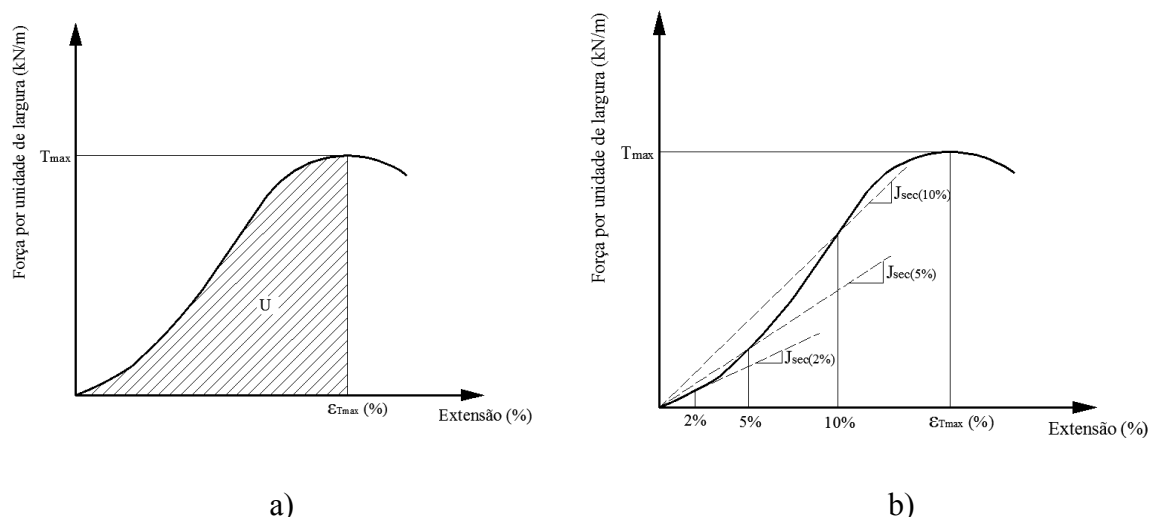


Figura 13 - Definição das grandezas: a) robustez; b) módulo de rigidez secante [Mendonça-Lopes (2011)].

4.4.2 Geogrelha (GGR)

Os ensaios de tração seguiram os procedimentos enunciados na secção 4.3.1. nesta secção incluem-se os resultados obtidos com duas pegas distintas: cilíndricas e cunha de face lisa.

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos no ensaio de tração da GGR intacta (isolada) com as garras cilíndricas, em provetes com 7 barras na largura. A geogrelha (GGR) caracteriza-se por ter, em média, 32 barras por metro de largura. Os valores do módulo de rigidez secante (para os valores de extensão de 2%, 5% e 10%) foram calculados a partir da curva aproximada de cada provete (polinómio de grau 5 definido até ao instante da rotura). Na Figura 14 apresentam-se as curvas força-extensão obtidas

Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos da GGR com as garras cilíndricas.

GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec}(2\%)$	$J_{sec}(5\%)$	$J_{sec}(10\%)$	U
	(KN/m)	(%)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)	
Provete 1	50,60	9,28	522,17	429,55	----- (*)	123,50
Provete 2	53,87	10,11	418,66	337,23	269,45	205,93
Provete 3	54,00	9,53	545,28	608,06	----- (*)	231,76
Provete 4	51,49	8,96	349,63	383,43	----- (*)	175,04
Provete 5	55,59	10,08	549,06	425,08	554,57	214,89
Média	53,11	9,59	476,96	436,67	412,01	190,22
Desvio Padrão	2,03	0,50	88,77	102,82	201,61	42,61
Coef. Variação %	3,82	5,22	18,61	23,55	48,93	22,40

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

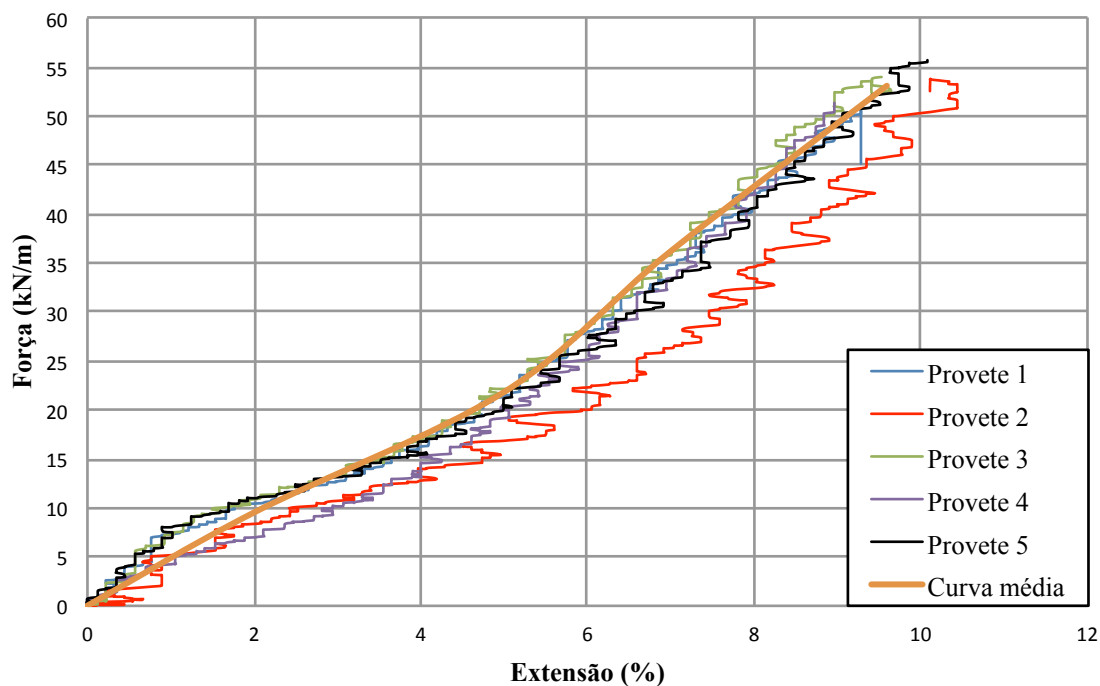


Figura 14 - Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha, GGR, intacta e curva média correspondente, para as garras cilíndricas.

A Tabela 8 e a Figura 15 correspondem aos resultados obtidos para a GGR com as pegas de cunha de face lisa, e as curvas força-extensão referentes aos provetes e a curva média, respetivamente.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos da GGR para as pegas de cunha de face lisa.

GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec(2\%)}$	$J_{sec(5\%)}$	$J_{sec(10\%)}$	U
	(KN/m)	(%)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)
Provete 1	28,20	0,23	339,26	40,43	----- (*)	0,21
Provete 2	26,97	5,35	504,01	488,87	----- (*)	65,66
Provete 3	33,75	6,61	604,92	464,55	----- (*)	99,13
Média	29,64	4,06	482,73	331,28	----- (*)	55,00
Desvio Padrão	3,62	3,38	134,10	252,18	----- (*)	50,32
Coef. Variação %	12,20	83,16	27,78	76,12	----- (*)	91,48

(*) A rotura ocorreu para uma extensão inferior a 10%.

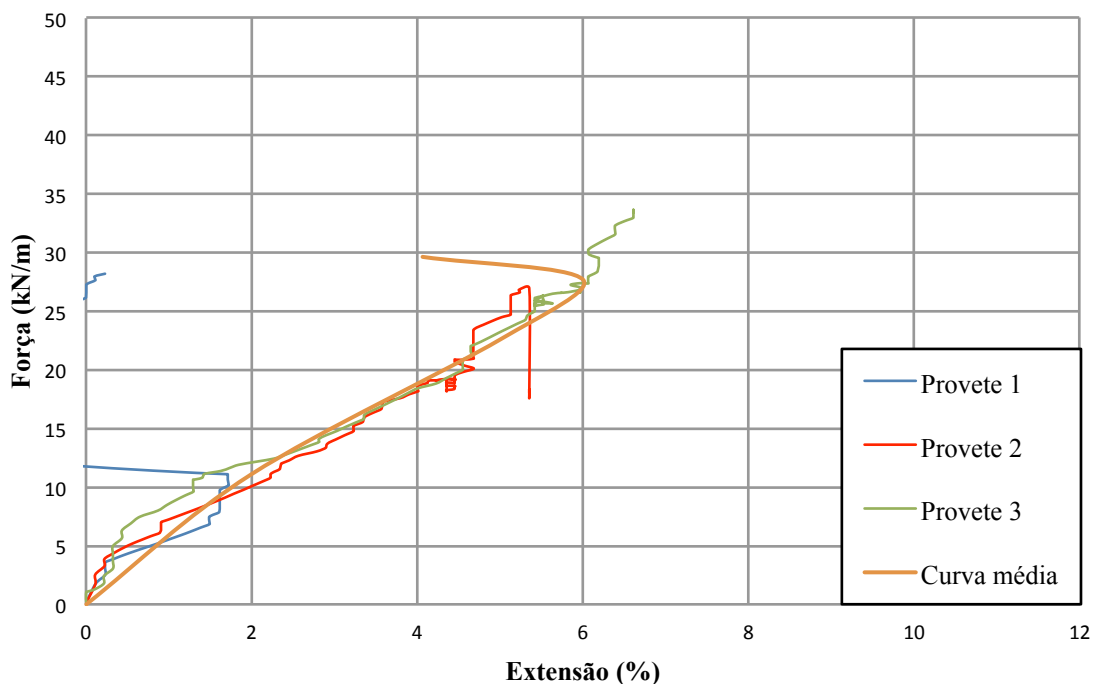


Figura 15 - Curvas força-extensão dos provetes da geogrelha, GGR, intacta e curva média correspondente, para as garras de cunha de face lisa.

É de observar que o ensaio dos provetes intactos de GGR com as pegas de cunha de face lisa, em que os resultados estão apresentados na Tabela 8, são inúteis para a análise de resultados, daí advém o facto de ter-se realizado apenas três ensaios. O escorregamento na pega de cunha de face lisa foi bastante forte excluindo qualquer comparação com os resultados fornecidos pelo fabricante.

Deste modo, as pegas que melhor se adequam à GGR no ensaio de tração são as pegas cilíndricas. Como se pode observar na Tabela 7 os resultados obtidos são idênticos ao esperado. O valor médio da resistência à tração medido é de 53,11kN/m, inferior ao valor nominal (55kN/m). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 9,59% que é inferior ao valor disponibilizado pelo fabricante (10,5%). Os coeficientes de variação obtidos são de 3,82% e 5,22% para a resistência à tração e extensão na rotura, respectivamente.

A rigidez secante, $J_{sec(2\%)}$, $J_{sec(5\%)}$, $J_{sec(10\%)}$, tem como valores médios 476,96kN/m, 436,67kN/m, 412,01kN/m, respetivamente. Os coeficientes de variação são de 18,61%, 23,55%, 48,93%, para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente.

4.4.3 Geotêxtil não tecido (GTX)

Os ensaios de tração, em provetes intactos, seguiram os procedimentos enunciados na secção 4.3.1. Nesta secção apresentam-se os resultados dos provetes intactos, ensaiados com pegas cilíndricas e com pegas de cunha de face lisa.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil GTX isolado e intacto que correspondem à utilização das pegas de cunha face lisa. Na Figura 16 são apresentadas as curvas força-extensão referentes aos provetes e a curva média correspondente.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos de GTX com pegas de cunha de face lisa.

GTX	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec(2\%)}$	$J_{sec(5\%)}$	$J_{sec(10\%)}$	U
	(kN/m)	(%)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
Provete 1	57,98	87,01	349,33	247,03	175,31	3436,81
Provete 2	60,74	80,09	266,92	190,46	197,87	3334,07
Provete 3	68,79	96,10	360,91	232,63	206,73	4667,85
Provete 4	67,89	79,78	239,21	304,68	237,81	3742,91
Provete 5	58,42	66,51	552,07	298,81	208,77	2592,51
Média	62,76	81,90	353,69	254,72	167,72	3554,83
Desvio Padrão	5,21	10,87	122,54	47,74	85,09	752,15
C.V. (%)	8,30	13,27	34,65	18,74	50,74	21,16

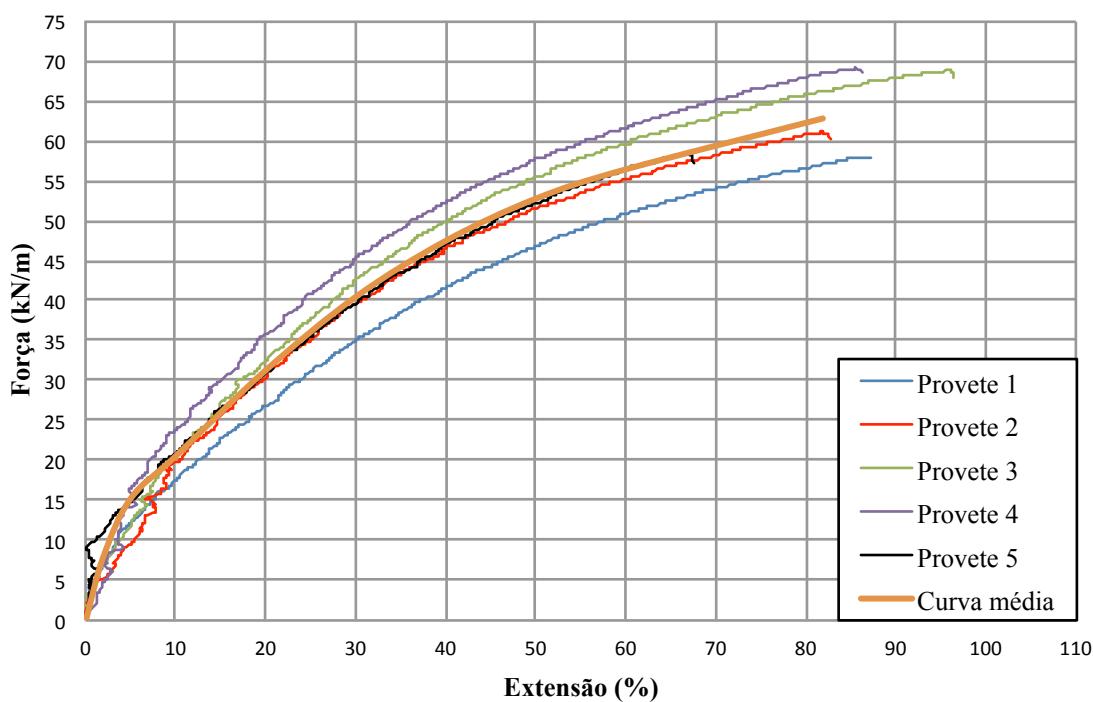


Figura 16 - Curvas força-extensão dos provetes GTX intacto e curva média correspondente, para as garras de cunha de face lisa.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados que correspondem à utilização das pegas cilíndricas nos ensaios de tração do GTX intacto. Na Figura 17 são apresentadas as curvas força-extensão referentes aos provetes e a curva média correspondente.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos de GTX com pegas cilíndricas.

GTX	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec(2\%)}$	$J_{sec(5\%)}$	$J_{sec(10\%)}$	U
	(kN/m)	(%)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
Provete 1	45,89	64,15	15,53	12,30	42,29	1332,60
Provete 2	51,59	66,11	60,39	90,31	80,54	1713,43
Provete 3	51,70	66,44	71,74	84,76	76,53	1792,41
Média	49,72	65,57	49,22	62,45	66,45	1631,51
Desvio Padrão	3,32	1,24	29,72	43,53	21,03	138,47
Coef. Variação %	6,68	1,89	60,38	69,69	31,64	8,49

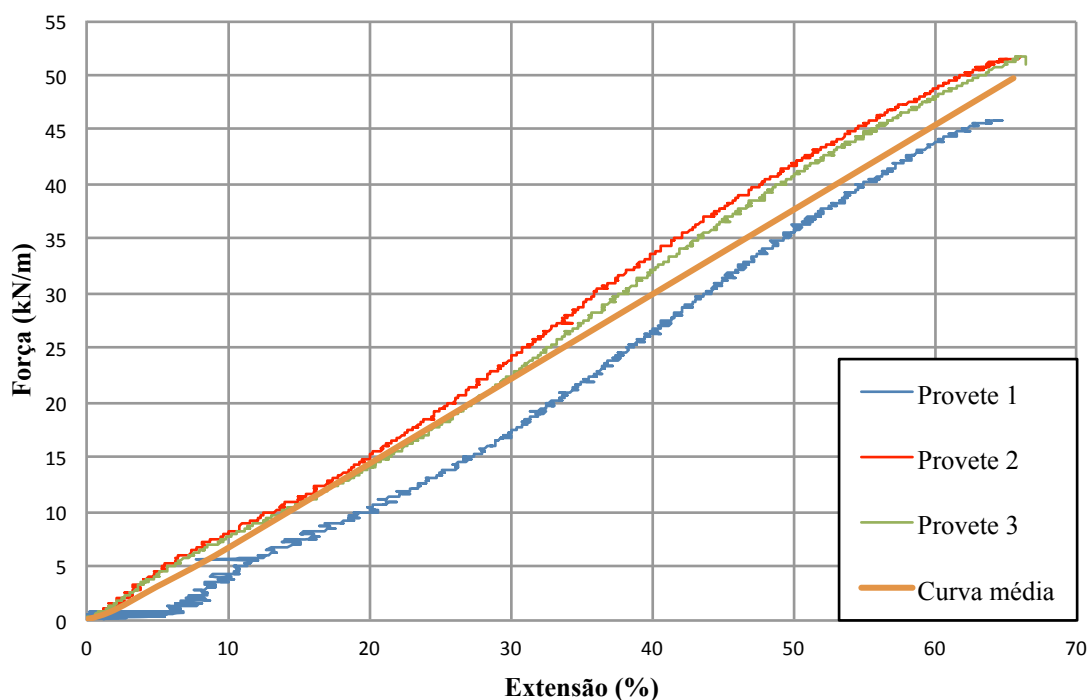


Figura 17 - Curvas força-extensão dos provetes GTX intacto e curva média correspondente, para as garras cilíndricas.

Da análise dos dois cenários destaca-se pela positiva a utilização das pegas de cunha de face lisa ao invés das pegas cilíndricas, que demonstra não ser a pega eficaz para o ensaio dos provetes GTX, facto comprovado pelos resultados apresentados na Figura 17 e na Tabela 10. Da Figura 17 percebe-se que quando ensaiados com as garras cilíndricas os provetes sofrem extensão significativa, em grande parte devida ao excesso de material nas pegas, acabando mesmo por atingir o limite de extensão da máquina sem que aconteça a rotura do provete.

Assim sendo, a garra selecionada foi a de cunha de face lisa. Os resultados correspondentes estão de acordo com o esperado (próximo do apresentado pelo fabricante). Na Tabela 9 o valor médio da resistência à tração medido é de 62,76kN/m, superior ao valor nominal (55kN/m). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 65,57% que é inferior ao valor disponibilizado pelo fabricante (105%). Os coeficientes de variação obtidos são de 8,30% e 13,27% para a resistência à tração e extensão na rotura, respectivamente.

A rigidez secante, $J_{sec(2\%)}$, $J_{sec(5\%)}$, $J_{sec(10\%)}$, tem como valores médios 353,69kN/m, 254,72kN/m, 167,72kN/m, respetivamente. Os coeficientes de variação são de 13,27%, 34,75%, 18,74%, para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente.

4.4.4 Geotêxtil não tecido (GTX) e Geogrelha (GGR)

4.4.4.1 Provetes Intactos

Os ensaios de tração dos provetes intactos seguiram os procedimentos descritos no ponto 4.3.1.

Na Tabela 11 são apresentados os valores obtidos no ensaio de tração da GGR e da GTX em conjunto. Relativamente ao comprimento dos provetes este foi estabelecido pelo número de barras entre garras, que para o presente ensaio optou-se por usar 9 barras que correspondem a um comprimento de cerca de 250mm entre as pegas e com uma largura de 200mm.

Na Figura 18 são apresentadas as curvas força-extensão referentes aos provetes intactos e a curva média correspondente.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de tração dos provetes intactos de GTX+GGR.

GTX+GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec(2\%)}$	$J_{sec(5\%)}$	$J_{sec(10\%)}$	U
	(kN/m)	(%)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
Provete 1	50,80	79,16	450,73	397,29	264,63	2686,84
Provete 2	44,67	81,00	720,86	486,95	320,81	3192,73
Provete 3	48,55	79,11	428,34	355,72	228,08	2579,37
Provete 4	50,02	89,89	498,30	360,11	263,62	3194,89
Provete 5	57,23	102,78	471,79	359,02	229,91	3192,73
Média	50,26	87,74	514,00	391,82	261,41	2913,46
Desvio Padrão	4,56	10,19	118,49	55,82	37,57	326,68
C.V. (%)	9,07	11,62	23,05	14,25	14,37	11,21

O valor médio da resistência à tração medido é de 50,26kN/m, inferior ao valor apresentado pelo produtor para cada um dos geossintéticos isolados (55kN/m). Tal facto poderá estar relacionado com algum escorregamento nas pegas durante o ensaio. A extensão na rotura apresenta um valor médio de 87,74 % que é inferior ao valor disponibilizado pelo fabricante para o geotêxtil (105%). Os coeficientes de variação obtidos são de 9,07 e 11,62% para a resistência à tração e extensão na rotura, respetivamente.

A rigidez secante, $J_{sec (2\%)}$, $J_{sec (5\%)}$, $J_{sec (10\%)}$, tem como valores médios 514,00kN/m, 391,82kN/m e 261,41kN/m, respetivamente. Os coeficientes de variação são de 23,05%, 14,25%, 14,37%, para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente.

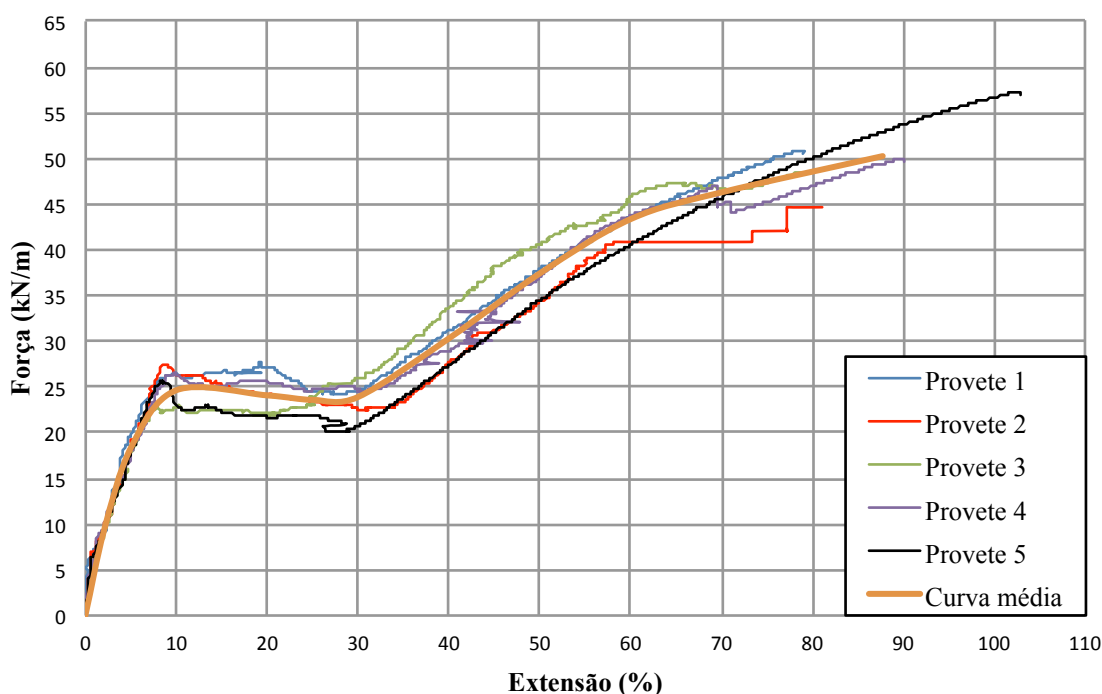


Figura 18 - Curvas força-extensão dos provetes GTX+GGR intacto e curva média correspondente, para as garras cunha de face lisa.

Na Figura 18 pode-se verificar que todas as curvas força-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante. O gráfico apresenta um primeiro pico, “pico 1”, em que o valor médio da força mobilizada é de 25,54kN/m (Tabela 12). Este ponto deve corresponder à cedência da geogrelha por aplicação de força de tração, embora corresponda a um valor inferior à resistência nominal da mesma, 55kN/m. Tal facto advém de um possível escorregamento da geogrelha nas pegas escolhidas para a realização deste ensaio. Uma vez atingido este pico, os filamentos da geogrelha destacaram-se do material geotêxtil e, por conseguinte, ocorreu um decréscimo da força de tração mobilizada, voltando a aumentar à

medida que se mobilizava, progressivamente, a resistência à tração do geotêxtil. Quando o geotêxtil atinge a sua capacidade resistente, “pico 2”, o provete rompe e o ensaio termina, excetuando o gráfico do provete 5, todos têm o ponto máximo idêntico.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração do provete intacto GTX+GGR, referentes ao “pico 1” e “pico 2”.

GTX+GGR	Pico 1			Pico 2		
	T_{max1} (kN/m)	ϵ_{max1} (%)	U_1 (kN/m)	T_{max2} (kN/m)	ϵ_{max2} (%)	U_2 (kN/m)
Provete 1	26,60	9,79	162,58	50,80	79,16	2686,84
Provete 2	27,51	8,72	143,01	44,67	81,00	3192,73
Provete 3	22,91	10,33	148,97	48,55	79,11	2579,37
Provete 4	26,58	9,89	152,35	50,02	89,89	3194,89
Provete 5	25,54	8,35	95,94	57,23	102,78	3635,09
Média	25,83	9,42	140,57	50,26	87,74	3024,05
Desvio Padrão	1,77	0,84	25,94	4,56	10,19	487,85
C.V. (%)	6,86	8,93	18,45	9,07	11,62	16,13

Em termos da força de tração máxima, o valor correspondente ao “pico 1” ($T_{max1}=25,83\text{kN/m}$) é 48,6% inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{max2}=50,26\text{kN/m}$), embora apresentem coeficientes de variação semelhantes, 6,86% e 9,07% para o “pico 1” e “pico 2”, respectivamente. A extensão para a força máxima correspondente ao “pico 1” é 9,42%, que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2” que é de 87,74%.

4.4.4.2 Provetes submetidos a abrasão

Os ensaios de simulação da abrasão em provetes intactos seguiram os procedimentos descritos na secção 4.3.3.

A simulação da abrasão induziu danos no conjunto GTX+GGR como se observa na Figura 19. No que diz respeito à geogrelha, houve deterioração dos filamentos em ambas as direções, como é o caso do destacamento da camada superficial que reveste as fibras de poliéster da GGR, e diminuição da secção resistente. Os efeitos verificados no GTX foram a desagregação parcial da camada superficial, não havendo o destacamento dos filamentos da estrutura do geotêxtil, os filamentos, previamente não alinhados, tendem a reorientar-se na direção do movimento placa deslizante. Os efeitos descritos estão de acordo com os processos de abrasão observados por Van Dine et al. (1982) apresentados na Tabela 5 (secção 3.2.2).

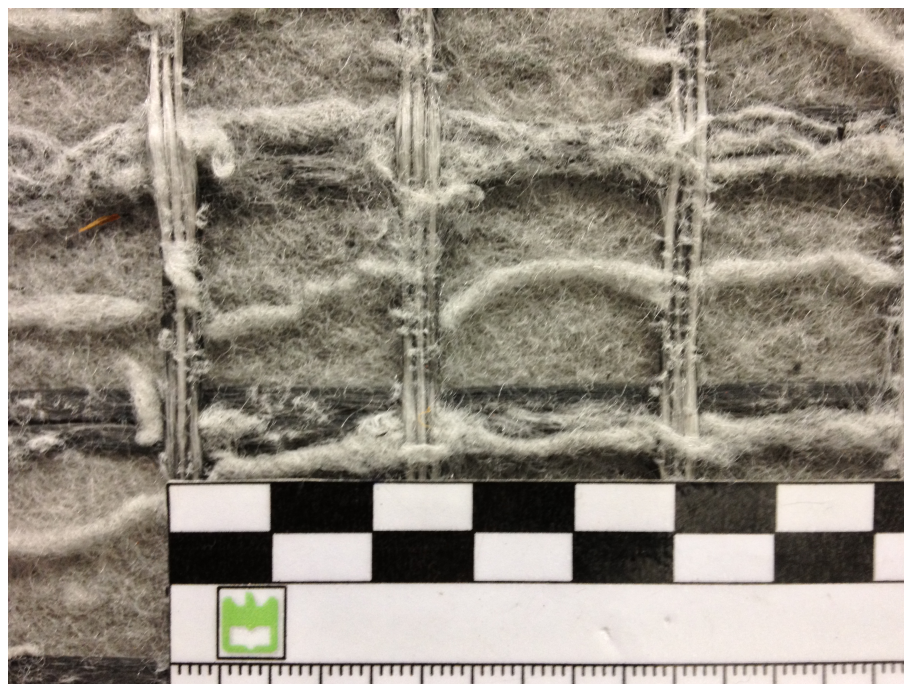


Figura 19 – Aspeto do provete GTX+GGR após abrasão.

Os resultados dos ensaios de tração após abrasão encontram-se resumidos na Tabela 13; na Figura 20 são apresentadas as curvas força-extensão dos provetes e a curva média correspondente.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de tração dos provetes GTX+GGR após abrasão.

GTX+GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec} (2\%)$	$J_{sec} (5\%)$	$J_{sec} (10\%)$	U
	(kN/m)	(%)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
Provete 1	57,80	93,98	395,13	296,16	233,41	3451,03
Provete 2	57,27	87,27	463,72	340,01	279,77	3157,35
Provete 3	54,36	87,09	319,72	230,51	152,82	2367,23
Provete 4	55,82	84,06	287,15	230,02	201,24	2703,96
Provete 5	53,59	83,11	410,95	295,54	232,49	3474,42
Média	55,77	87,10	375,34	278,45	219,95	3030,80
Desvio Padrão	1,81	4,26	71,31	47,54	46,83	483,88
C.V. (%)	3,25	4,89	19,00	17,07	21,29	15,97

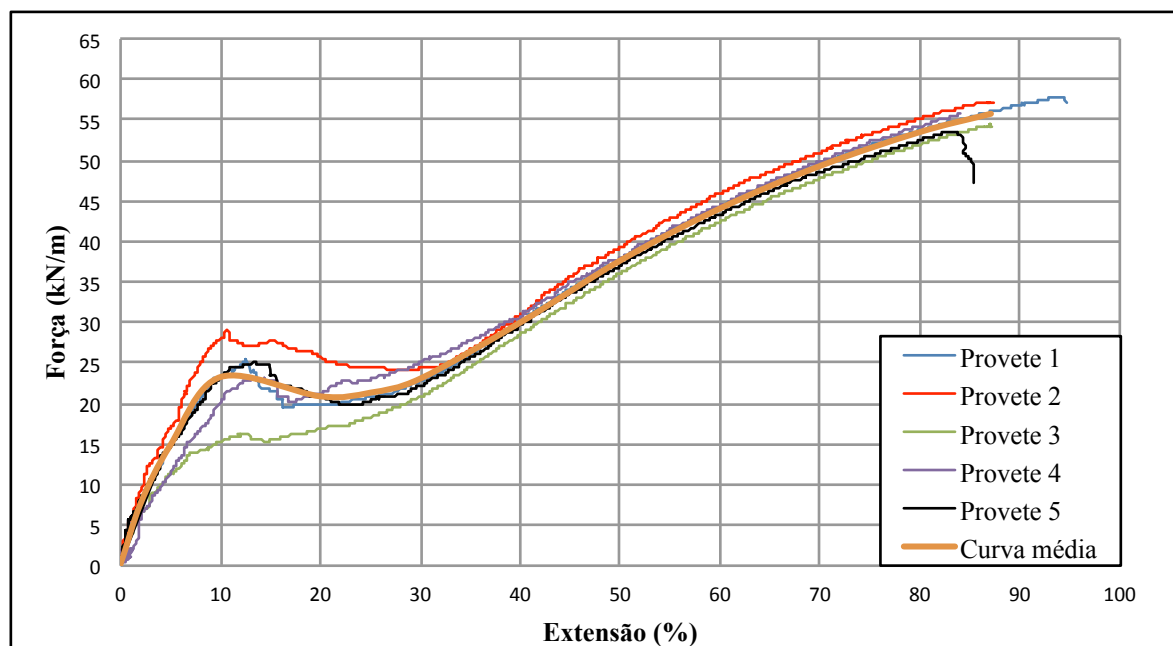


Figura 20 - Curvas força-extensão dos provetes de GTX+GGR submetidos à abrasão e curva média.

O valor médio da força de tração máxima é de 55,77kN/m, superior ao valor obtido para os provetes intactos do conjunto GTX+GGR (50,52kN/m). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 87,1%. Os coeficientes de variação obtidos são de 3,25% e 4,89% para a resistência à tração e extensão na rotura, respetivamente.

A rigidez secante, $J_{sec(2\%)}$, $J_{sec(5\%)}$, $J_{sec(10\%)}$, tem como valores médios 375,34kN/m, 278,45kN/m e 219,95kN/m respetivamente. Os coeficientes de variação são de 19,00%, 17,09%, 21,29%, para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente.

É de notar que na Figura 20 o primeiro pico (“pico1”) da curva média representa a rotura da GGR, sendo 7,9% inferior quando comparada com a curva média do provete intacto, consequência do dano obtido por abrasão (Tabela 14), tendo associado um coeficiente de variação de 19,87%. A extensão para a força máxima no “pico 1” adota um valor médio de 12,56% com um coeficiente de variação de 8,76%.

O valor médio da força de tração máxima correspondente ao “pico 1” ($T_{max1}=23,80\text{kN/m}$) é 57,32% inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{max2}=55,77\text{kN/m}$), embora apresentem coeficientes de variação díspares, 19,87% e 3,25% para o “pico 1” e “pico 2”, respetivamente. A extensão correspondente ao “pico 1” é 12,56%, que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2” que é de 87,10%.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR, após abrasão referentes ao “pico 1” e “pico 2”.

GTX+GGR	Pico 1			Pico 2		
	T_{max1} (kN/m)	ϵ_{max1} (%)	U_1 (kN/m)	T_{max2} (kN/m)	ϵ_{max2} (%)	U_2 (kN/m)
Provete 1	25,39	12,64	175,31	57,80	93,98	3451,03
Provete 2	28,96	10,70	178,19	57,27	87,27	3157,35
Provete 3	16,17	12,68	102,55	54,36	87,09	2367,23
Provete 4	23,31	13,41	181,79	55,82	84,06	2703,96
Provete 5	25,14	13,36	206,14	53,59	83,11	3474,42
Média	23,80	12,56	168,80	55,77	87,10	3030,80
Desvio Padrão	4,73	1,10	38,99	1,81	4,26	483,88
C.V. (%)	19,87	8,76	23,10	3,25	4,89	15,97

4.4.4.3 Provetes de referência para a DDI

Os ensaios de referência para a DDI em provetes intactos seguiram os procedimentos descritos no ponto 4.3.2.

Na Figura 21a, é possível observar que os danos induzidos na GTX+GGR não são severos, pelo facto do GTX, apresentar uma massa por unidade de área significativa (1000g/m^2), sendo os tipos de danos maioritariamente contusões superficiais. No que diz respeito à GGR os danos observados na Figura 21b são na maioria esmagamento e pequenos cortes nos filamentos que compõem a geogrelha.

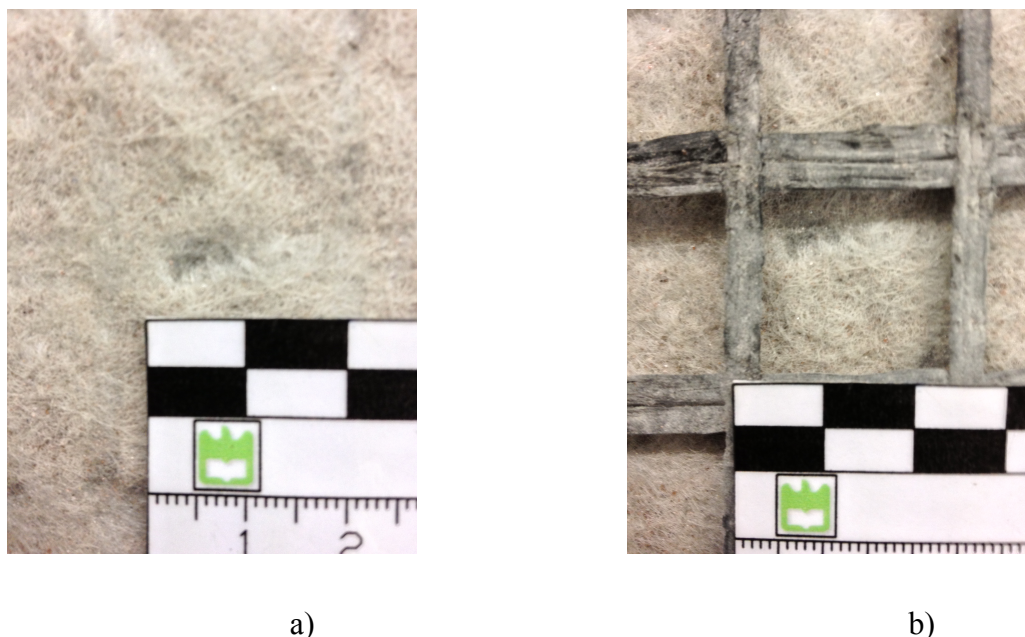


Figura 21 – Danos induzidos nos provetes de GTX+GGR: a) contusões superficiais no GTX; b) esmagamento e corte nos filamentos da GGR.

Na Tabela 15 apresentam-se os resultados dos ensaios de tração nos provetes de GTX+GGR, após a realização dos ensaios de referência para a DDI. As curvas força-extensão dos provetes e a curva média correspondente, encontram-se na Figura 22.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de tração dos provetes de GTX+GGR após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

GTX+GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec(2\%)}$	$J_{sec(5\%)}$	$J_{sec(10\%)}$	U
	(KN/m)	(%)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)
Provete 1	46,39	75,84	358,52	272,47	158,28	1976,00
Provete 2	55,74	92,76	472,63	339,69	212,33	3164,29
Provete 3	44,02	70,58	440,87	330,73	236,95	1553,44
Provete 4	40,01	61,79	457,53	325,96	285,46	1236,22
Provete 5	45,28	89,83	381,50	259,81	112,42	2144,69
Média	46,29	78,16	422,21	305,73	201,09	2014,93
Desvio Padrão	5,81	13,04	49,63	36,75	67,50	734,63
Coef. Variação %	12,54	16,68	11,75	12,02	33,57	36,46

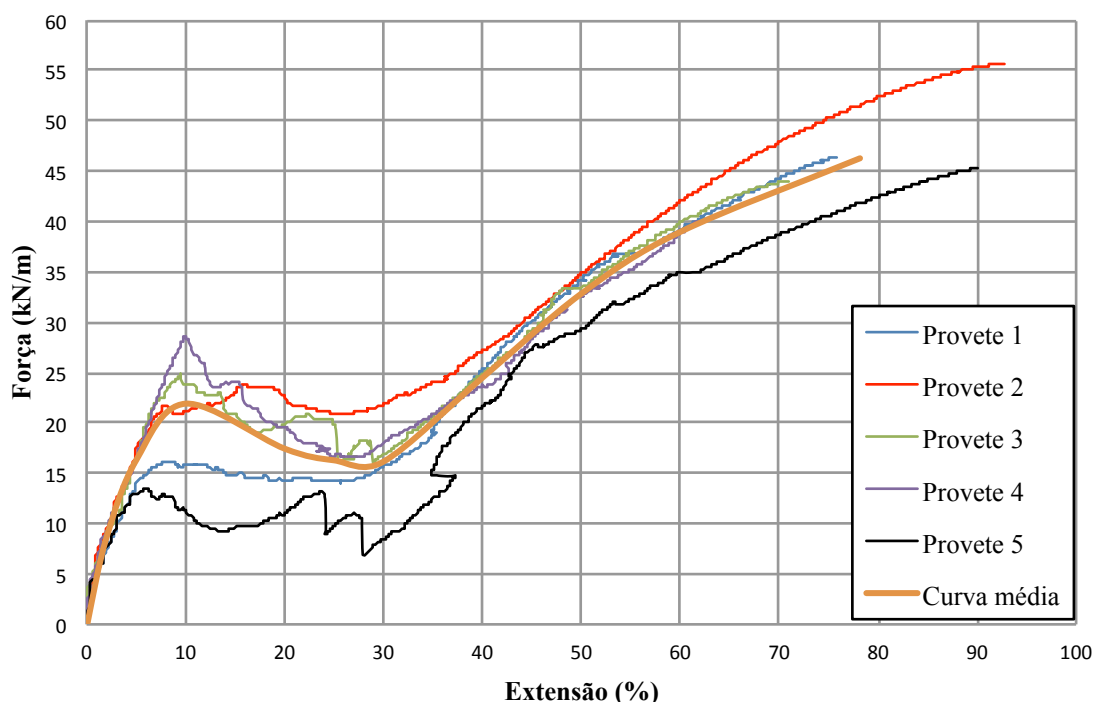


Figura 22 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR após a realização dos ensaios de referência para a DDI.

O valor médio da resistência à tração após os ensaios de referência para a DDI é de 46,29kN/m, inferior ao valor do obtido para os provetes intactos do conjunto GTX+GGR (50,52kN/m). A extensão na rotura apresenta um valor médio de 78,16%. Os coeficientes de variação obtidos são de 12,54% e 16,68% para a resistência à tração e extensão na rotura, respetivamente.

A rigidez secante, $J_{sec (2\%)}$, $J_{sec (5\%)}$, $J_{sec (10\%)}$, tem como valores médios 422,21kN/m, 305,73kN/m e 201,09kN/m respetivamente. Os coeficientes de variação são de 11,75%, 12,02%, 33,57%, para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente. A robustez apresenta um valor médio de 2014,93kN/m que é inferior à robustez das amostras intactas correspondentes ($U=2913,46\text{kN/m}$) e cujo coeficiente de variação é de 36,46%.

Neste ensaio as curvas forças-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante, exceptuando o provete 5 que tende a afastar-se do resto das curvas, tal facto possivelmente advém de um escorregamento nas pegas, não permitindo que o provete mobilize a sua resistência da melhor forma.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR após ensaio de referência para a DDI referentes ao “pico 1” e ao “pico 2”.

GTX+GGR	Pico 1			Pico 2		
	T_{max1}	ϵ_{max1}	U_1	T_{max2}	ϵ_{max2}	U_2
	(KN/m)	(%)	(KN/m)	(KN/m)	(%)	(KN/m)
Provete 1	16,22	8,17	80,19	46,39	75,84	1976,00
Provete 2	21,21	7,57	81,56	55,74	92,76	3164,29
Provete 3	24,79	9,49	114,66	44,02	70,58	1553,44
Provete 4	28,63	9,91	141,80	40,01	61,79	1236,22
Provete 5	13,02	5,20	28,62	45,28	89,83	2144,69
Média	20,77	8,07	89,37	46,29	78,16	2014,93
Desvio Padrão	6,30	1,86	42,50	5,81	13,04	734,63
C.V. (%)	30,35	23,10	47,55	12,54	16,68	36,46

O valor médio da força de tração máxima no “pico 1” é de 20,77kN/m, refletindo uma redução de 19,58% da resistência dos provetes intactos 25,83kN/m, tendo associado um coeficiente de variação de 30,35%. A extensão para a força máxima no “pico 1” adota um valor médio de 8,07% com um coeficiente de variação de 23,10%.

Na Tabela 16 o “pico 1” apresenta um valor médio da força de tração máxima ($T_{max1}=20,77\text{kN/m}$) sendo 55,13% inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{max2}=46,29\text{kN/m}$), embora apresentem coeficientes de variação muito díspares, 30,35% e 12,54% para o “pico 1” e “pico 2”, respectivamente. A extensão correspondente ao “pico 1” é 8,07% que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2” que é de 78,16%.

4.4.4.4 Provetes submetidos à DDI

Os ensaios de simulação de DDI em provetes intactos seguiram os procedimentos descritos no ponto 4.3.2.

Após os ensaios de DDI foi verificada (Figura 23) a existência de contusões superficiais e a incrustação de partículas finas no geotêxtil, resultantes da fragmentação das partículas de *corundum* durante o ensaio. No que diz respeito à geogrelha observou-se o corte e esmagamento em ambas as direções dos filamentos, que a compõem (Figura 23).

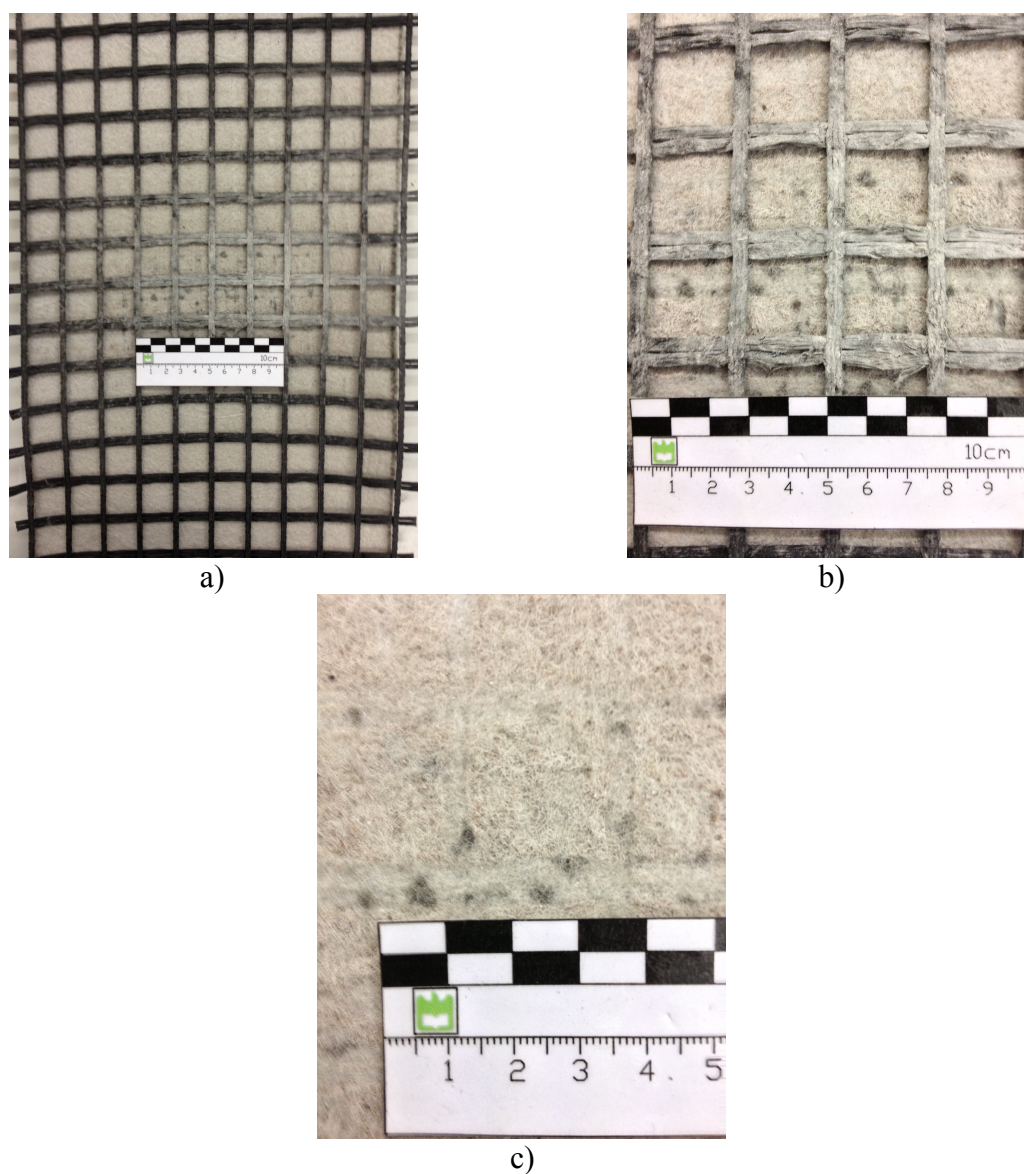


Figura 23 - Danos induzidos nos provetes de GTX+GRR: a) vista geral; b) corte e esmagamento na GRR; c) contusões e incrustações superficiais no GTX.

Os resultados dos ensaios do GTX+GRR após DDI são resumidos na Tabela 17. Na Figura 24 incluem-se as curvas força-extensão dos provetes, após DDI, e respectiva curva média.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de tração de GTX+GGR após a realização dos ensaios de DDI.

GTX+GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec}(2\%)$	$J_{sec}(5\%)$	$J_{sec}(10\%)$	U
	(KN/m)	(%)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)	(KN/m)
Proвете 1	46,34	64,27	498,76	382,18	297,63	1904,64
Proвете 2	52,41	80,19	419,71	325,96	305,39	2470,80
Proвете 3	49,67	79,21	256,57	171,54	94,62	2846,86
Proвете 4	45,77	87,18	335,46	273,93	228,58	2401,47
Proвете 5	40,60	65,72	369,83	281,41	219,90	1567,09
Média	46,96	75,31	376,07	287,00	229,22	2238,17
Desvio Padrão	4,45	9,92	90,73	77,64	84,69	503,21
C.V. (%)	9,48	13,17	24,13	27,05	36,94	22,48

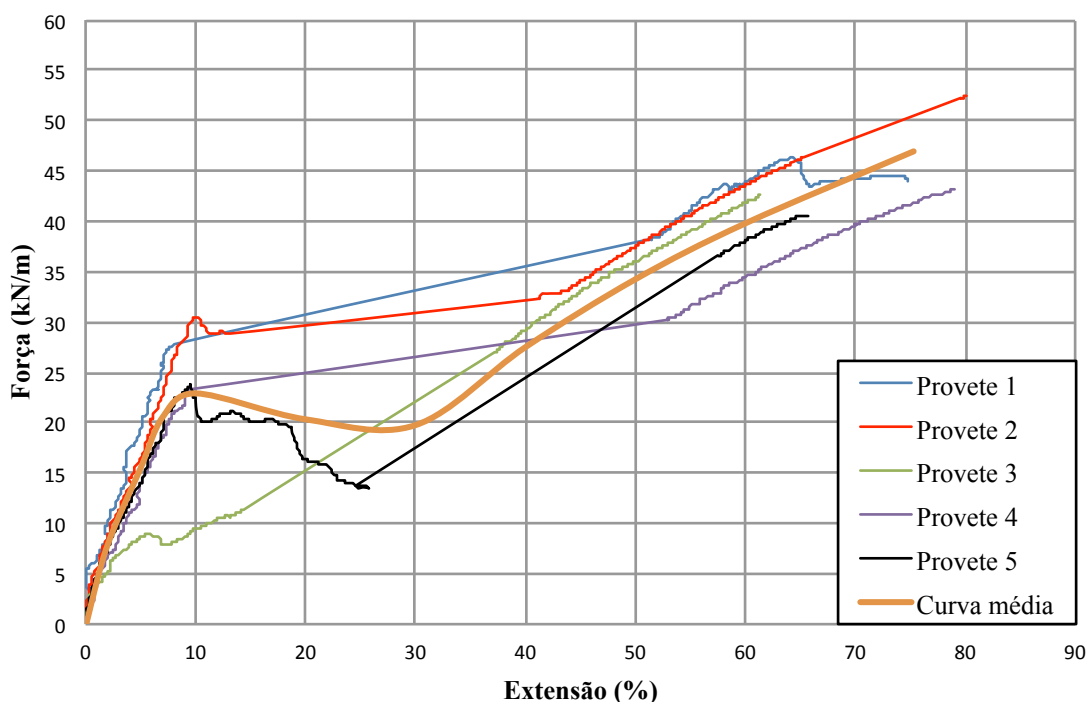


Figura 24 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR após a realização dos ensaios de DDI.

Os provetes submetidos à DDI apresentam uma resistência à tração média de 46,96kN/m e o coeficiente de variação correspondente é de 9,48%. A resistência à tração sofreu um aumento ligeiro de 1,42% face à resistência à tração evidenciada pelos provetes de referência para a DDI, mas quando comparada com o material intacto sofre uma redução de 6,56%.

A extensão para a força máxima de tração medida das amostras danificadas é de 75,31%, ligeiramente inferior à extensão manifestada pelos provetes de referência para a DDI, tendo associado um coeficiente de variação de 7,9%.

A rigidez secante, $J_{sec (2\%)}$, $J_{sec (5\%)}$, $J_{sec (10\%)}$, tem como valores médios 376,07kN/m, 287,00kN/m e 229,22kN/m respetivamente. Os coeficientes de variação são de 24,13%, 27,05%, 36,94%, para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente. A robustez apresenta um valor médio de 2238,17kN/m que é superior à robustez das amostras de referência para a DDI ($U=2014,93\text{kN/m}$) e cujo coeficiente de variação é de 22,48%.

As curvas força-extensão seguem o mesmo desenvolvimento, embora apresentem forças e extensões de rotura que se afastam umas das outras. No percurso das curvas força-extensão são visíveis pequenas perturbações que estão relacionadas com eventuais deslocamentos sofridos pelos alvos, influenciados pela deterioração da GGR, que possibilita algum deslocamento dos alvos.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR, após DDI referentes ao “pico 1” e “pico 2”.

GTX+GGR	Pico 1			Pico 2		
	T_{max1} (kN/m)	ϵ_{max1} (%)	U_1 (kN/m)	T_{max2} (kN/m)	ϵ_{max2} (%)	U_2 (kN/m)
Provete 1	30,59	12,10	244,43	46,34	64,27	1904,64
Provete 2	30,58	10,02	178,31	52,41	80,19	2470,80
Provete 3	8,96	5,99	29,47	49,67	79,21	2846,86
Provete 4	23,64	9,70	129,68	45,77	87,18	2401,47
Provete 5	23,72	9,46	133,64	40,60	65,72	1567,09
Média	23,50	9,46	143,11	46,96	75,31	2238,17
Desvio Padrão	8,83	2,20	78,56	4,45	9,92	503,21
C.V. (%)	37,59	23,26	54,90	9,48	13,17	22,48

O valor médio da força de tração máxima no “pico 1” é de 23,50kN/m, tendo associado um coeficiente de variação de 37,59%. Há um aumento de 11,61% deste valor relativamente ao obtido para os provetes de referência da DDI (20,77kN/m); quando comparado com os provetes intactos verifica-se uma redução de 9,02%. A extensão para a força máxima no “pico 1” adota um valor médio de 9,46% com um coeficiente de variação de 23,26%.

Na Tabela 18 o “pico 1” apresenta um valor médio da força de tração máxima ($T_{max1}=23,50\text{kN/m}$) sendo 49,95% inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{max2}=46,96\text{kN/m}$), embora apresentem coeficientes de variação muito díspares, 37,59% e 9,48% para o “pico 1” e “pico 2”, respetivamente. A extensão correspondente ao “pico 1” é 8,07% que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2”, 78,16%.

4.4.4.5 Provetes submetidos a DDI e abrasão

Os efeitos observados após abrasão das amostras previamente submetidas a DDI estão de acordo com os observados por Van Dine et al. (1982), apresentados na Tabela 5 (secção 3.3.2), e incluem o alinhamento de filamentos, a desagregação superficial do geotêxtil, e o corte de filamentos superficiais. Na Figura 25 é possível verificar a reorientação dos filamentos, desagregados da estrutura do geotêxtil, na direção do movimento, assim como a geogrelha que se encontra bastante deteriorada apresentando danos semelhantes aos observados após o ensaio de abrasão dos provetes intactos (destacamento da camada superficial que reveste as fibras de poliéster, a desagregação das barras transversais).

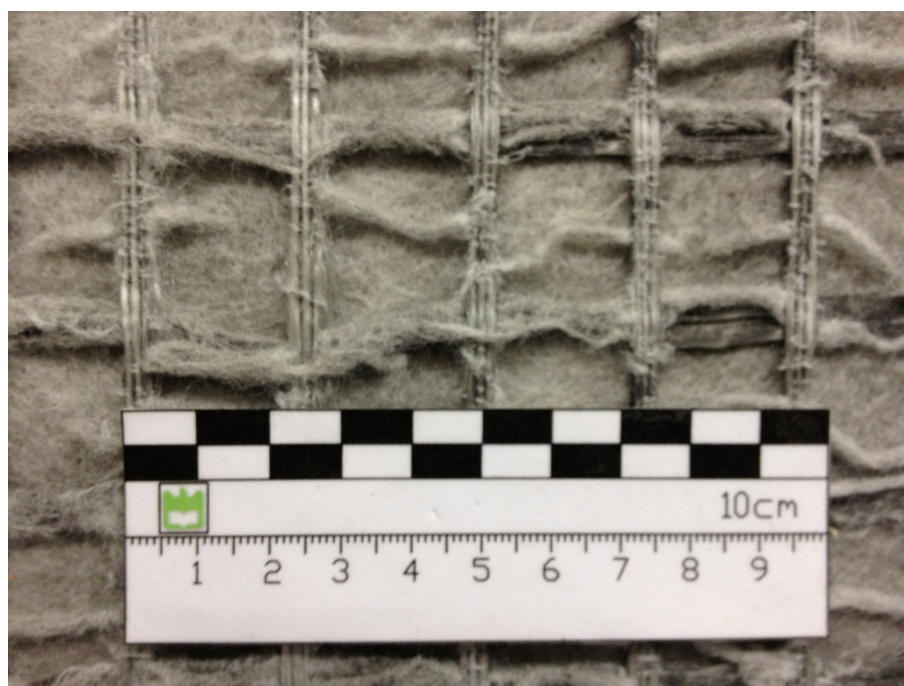


Figura 25 – Aspeto do provete GTX+GGR após os danos induzidos por DDI e abrasão.

Os resultados dos ensaios de tração do conjunto GTX+GGR após DDI e abrasão são resumidos na Tabela 19. Na Figura 26 incluem-se as curvas força-extensão dos provetes, após DDI e abrasão, e respectiva curva média.

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de tração do conjunto GTX+GGR após DDI e abrasão.

GTX+GGR	T_{max}	ϵ_{max}	$J_{sec}(2\%)$	$J_{sec}(5\%)$	$J_{sec}(10\%)$	U
	(kN/m)	(%)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
Provete 1	53,94	92,69	337,52	244,02	192,95	3098,86
Provete 2	55,51	88,89	365,26	257,22	201,80	3041,25
Provete 3	49,55	86,77	323,27	219,87	101,80	2627,99
Provete 4	55,91	100,11	271,31	223,98	142,36	3522,89
Provete 5	50,71	101,47	282,91	202,21	155,32	5981,60
Média	53,12	93,99	316,05	229,46	158,70	3654,52
Desvio Padrão	2,86	6,58	38,84	21,49	40,26	1338,96
Coef. Variação %	5,38	7,00	12,29	9,37	25,37	36,64

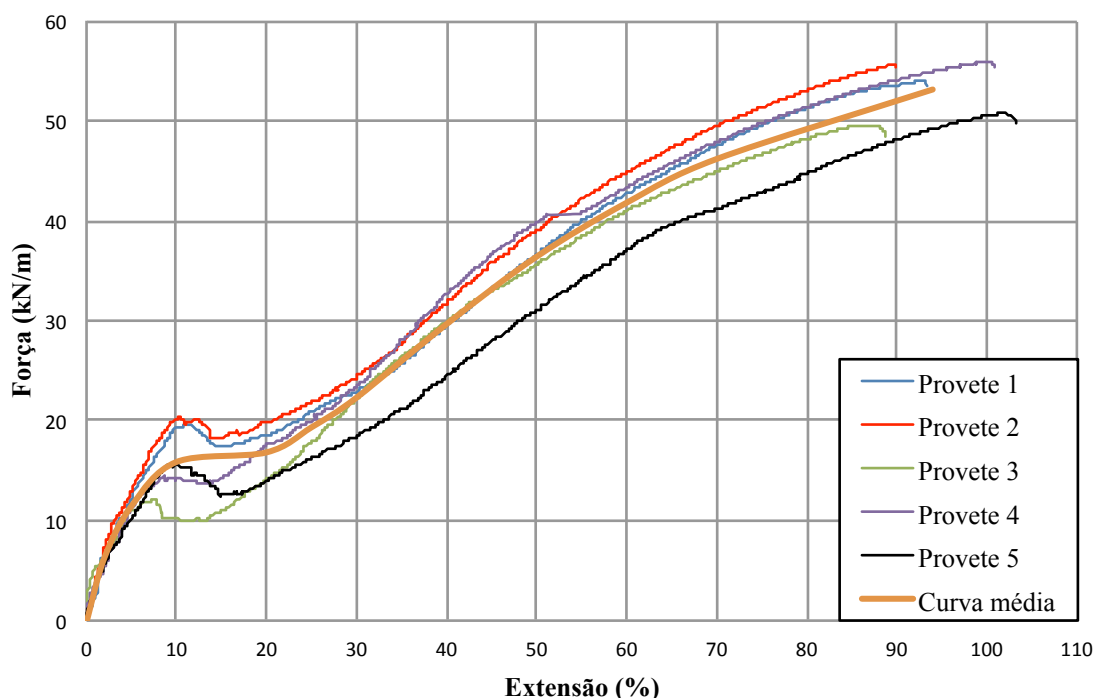


Figura 26 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR após a realização dos ensaios de DDI e abrasão.

O efeito conjunto da DDI e abrasão na resistência à tração do provete traduziu-se numa resistência à tração média de 53,12kN/m. Este valor é inferior ao obtido para o material submetido à abrasão (46,29kN/m) e é superior ao correspondente para os provetes intactos (50,26kN/m). Este facto pode estar relacionado com o geotêxtil e a geogrelha estarem mais danificados. Na sequência dos danos induzidos houve alguma ligação entre os constituintes dos geossintéticos que, dessa forma, passaram a funcionar como um só, conseguindo dessa forma mobilizar maior resistência no conjunto. O coeficiente de variação para a resistência à tração destas amostras (5,38%) é um pouco inferior ao das amostras intactas (8,26%).

A extensão para a força máxima de tração medida das amostras danificadas é de 93,99%, ligeiramente superior ao valor do material intacto (87,74%), e o coeficiente de variação associado é de 7,0%.

A robustez média é 3654,52kN/m, é superior ao valor das amostras intactas (2913,46N/m), e o coeficiente de variação associado é de 36,64%.

O módulo de rigidez secante das amostras danificadas tem o valor médio de 316,05kN/m, 229,46kN/m e 158,70kN/m, para as extensões de 2%, 5% e 10%, e os coeficientes de variação são 12,29%, 9,37% e 40,26%, respetivamente. O coeficiente de variação associado a $J_{\text{sec}}(10\%)$ é bastante elevado. De facto, o afastamento verificado nas curvas força-extensão dos diferentes provetes demonstra bem a diferença de valores obtidos para a rigidez das amostras, e os elevados coeficiente de variação obtidos, como se pode verificar de forma contundente na Figura 27 onde estão representadas as curvas força-extensão até extensões de 10%.

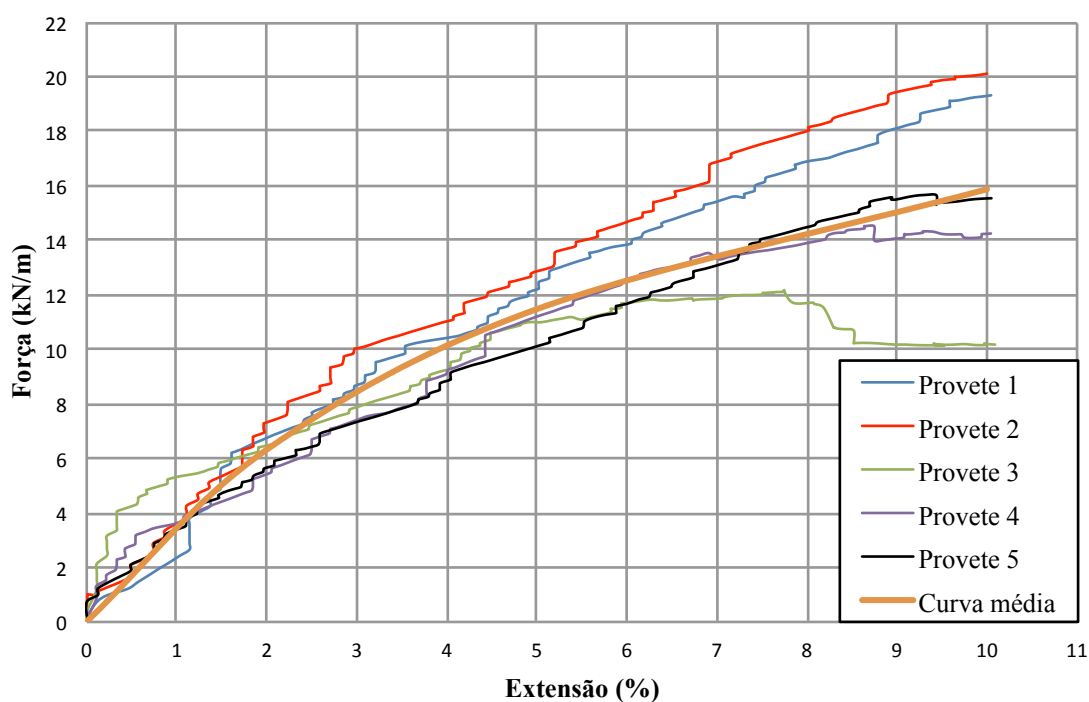


Figura 27 - Curvas força-extensão e curva média dos provetes GTX+GGR, até extensões de 10%, após a realização dos ensaios de DDI e abrasão.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de tração do provete GTX+GGR após os danos induzidos por DDI e abrasão referentes ao “pico 1” e “pico 2”.

GTX+GGR	Pico 1			Pico 2		
	T_{max1} (KN/m)	ϵ_{max1} (%)	U_1 (KN/m)	T_{max2} (KN/m)	ϵ_{max2} (%)	U_2 (KN/m)
Provete 1	19,59	11,30	110,72	53,94	92,69	3098,86
Provete 2	20,32	10,25	104,09	55,51	88,89	3041,25
Provete 3	12,13	7,74	46,91	49,55	86,77	2627,99
Provete 4	14,51	8,75	63,45	55,91	100,11	3522,89
Provete 5	15,66	9,31	72,93	50,71	101,47	5981,60
Média	16,44	9,47	79,62	53,12	93,99	3654,52
Desvio Padrão	3,46	1,37	27,12	2,86	6,58	1338,96
C.V(%)	21,05	14,47	34,06	5,38	7,00	36,64

Na Tabela 20 o valor médio da força de tração máxima no “pico 1” é de 16,44kN/m, com um coeficiente de variação de 21,05%. Aquele valor da força reflete uma redução de 36,35% em relação aos provetes de referência da DDI (25,83kN/m). A extensão para a força máxima no “pico 1” adota um valor médio de 9,47% com um coeficiente de variação de 14,47%.

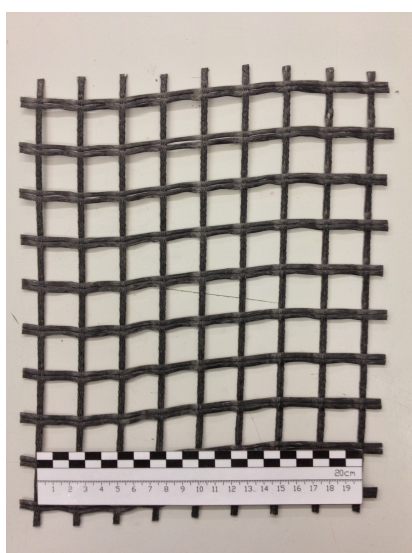
O “pico 1” apresenta um valor médio da força de tração máxima ($T_{max1}=16,44\text{kN/m}$) 69,05% inferior ao valor médio apresentado no “pico 2” ($T_{max2}=53,12\text{kN/m}$), embora apresentem coeficientes de variação distintos, 21,05% e 5,38% para o “pico 1” e “pico 2”, respectivamente. A extensão correspondente ao “pico 1” é 9,47% que contrasta com o valor apresentado pelo “pico 2” que é de 93,99%.

4.5 Discussão dos Resultados

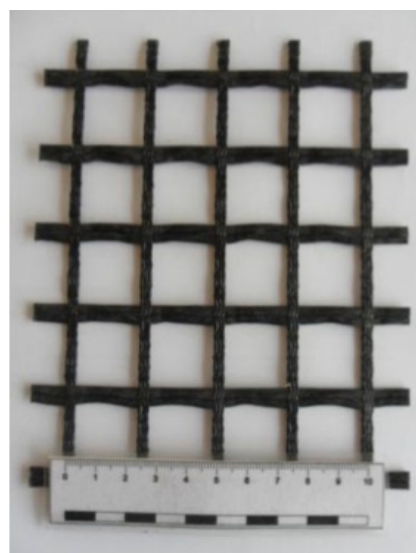
4.5.1 Geogrelha (GGR)

O objectivo da abordagem à GGR isolada, seria obter a pega ideal a utilizar nos ensaios, parâmetro que foi discutido na secção 4.4.2. Assim sendo, na presente secção foi efetuado um enquadramento do material GGR utilizado no presente estudo laboratorial face aos materiais similares utilizado nos trabalhos desenvolvidos por Mendonça-Lopes (2011).

Mendonça-Lopes (2011) utilizou uma geogrelha tecida igual à utilizada no presente estudo. Para distinguir os resultados obtidos, a denominação atribuída aos resultados obtidos por esse autor será GGR-T.



a)



b)

Figura 28 – Geogrelhas: a) GGR utilizada no presente estudo; b) GGR-T utilizada por Mendonça-Lopes (2011).

Na Tabela 21 apresentam-se os resultados obtidos para a amostra intacta nos ensaios laboratoriais de tração para a GGR e para a GGR-T.

Tabela 21 – Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração das GGR e GGR-T intactas.

Tipo de Amostra	Valor médio de força na rotura (kN/m)		Coeficiente de Variação (%)	
	GGR	GGR-T	GGR	GGR-T
Intacta	53,11	44,39	2,03	1,6

Da Tabela 21 pode-se constatar que as amostras que são objecto de comparação da presente secção apresentam, para a situação intacta, resistência à tração semelhante, sendo porém superior a manifestada pela GGR ($T_{Nom}=55\text{kN/m}$) utilizada no presente estudo, quando comparada com a GGR-T ($T_{Nom}=55\text{kN/m}$). No que diz respeito ao coeficiente de variação, verifica-se a mesma situação, a GGR utilizada no presente estudo apresenta um coeficiente de variação superior às demais.

Dado que se trata do mesmo material, bem como das mesmas pegas cilíndricas, a diferença manifestada nos resultados do valor médio de força na rotura dos provetes GCR e GGR-T poderá ser imputada a múltiplos factores. Deste modo, o utilizador é parte importante do processo, no entanto bastante falível (erro humano), um eventual envelhecimento do material poderá influenciar o resultado final, assim como as amostras serem de diferentes zonas do rol o, provocando alguma heterogeneidade do material.

4.5.2 Geotêxtil não tecido (GTX)

O objectivo da abordagem ao GTX isolado era definir a pega ideal a utilizar nos ensaios, parâmetro que foi discutido na secção 4.4.3.

De seguida, foi efetuado um enquadramento do material GTX utilizado no presente estudo laboratorial face aos materiais similares utilizados nos trabalhos desenvolvidos por Mendonça-Lopes (2011).

Mendonça-Lopes (2011) utilizou um geotêxtil não tecido em polipropileno igual ao utilizado no presente estudo, com m.u.a de 1000g/m^2 aqui denominado GTX1.

Na Tabela 22, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração para as amostras intactas, o GTX ensaiado no âmbito do presente trabalho e o GTX1 levado a cabo por Mendonça-Lopes (2011).

Tabela 22 – Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração do geotêxtil GTX e GTX1.

Tipo de Amostra	Valor médio de força na rotura (kN/m)		Coeficiente de Variação (%)	
	GTX	GTX1	GTX	GTX1
Intacta	62,76	68,38	5,21	4,08

Da Tabela 22 pode-se constatar que para as amostras intactas, os valores obtidos para o GTX e para o GTX1 são semelhantes.

As diferenças observadas podem ser atribuídas ao utilizador que possa ter cometido algum erro durante a realização do ensaio, ou eventualmente o envelhecimento do material tenha alguma influência na diferença de valores, sendo que o material e as pegas utilizadas foram iguais para ambos os ensaios, não exercendo qualquer tipo de influência.

4.5.3 Geotêxtil não tecido (GTX) e Geogrelha (GGR)

4.5.3.1 Ensaio Laboratoriais

Na Figura 29 são apresentadas as curvas força-extensão médias determinadas para a GTX+GGR intacta e após os ensaios de indução de dano em laboratório (DDI, referência para a DDI, abrasão, DDI e abrasão).

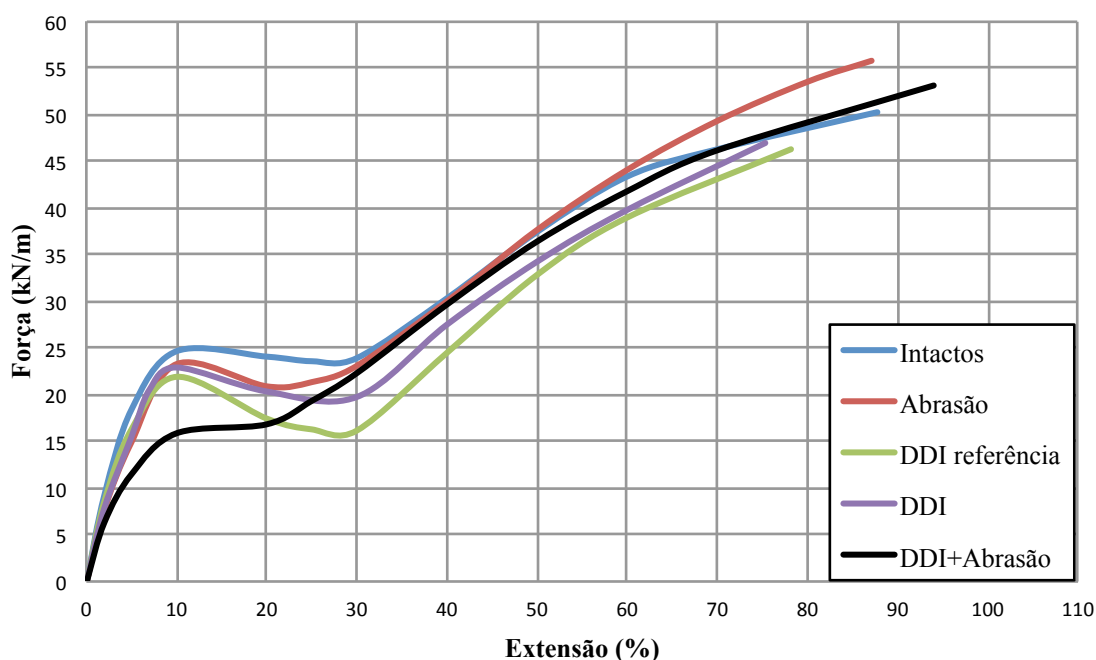


Figura 29 – Representação das curvas médias força-extensão do composto GTX+GGR: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão .

Após os diferentes tipos de dano induzidos, qualitativamente, as curvas médias força-extensão apresentam um desenvolvimento semelhante. Ao longo de todo o traçado, as curvas apresentam pequenas diferenças, com exceção do momento da rotura que varia de ensaio para ensaio e do provete submetido a DDI+abrasão em que não existe “pico 1” na sua curva média força-extensão.

Deste modo, a amostra intacta é a que evidencia maior força de tração máxima no “pico 1”. No que diz respeito ao “pico 2” a amostra submetida a DDI+Abrasão é que regista uma maior

força e extensão na rotura ao invés da amostra submetida à DDI. Da Figura 29 pode ainda verificar-se a existência de dois grupos de resultados no que diz respeito ao pico 2: 1) amostra intacta, submetida à abrasão e submetida a DDI+Abrasão, que apresentam extensões muito semelhantes embora diferentes forças de rotura (para a amostra submetida à abrasão é superior à obtida para as amostras intacta e submetida a DDI+Abrasão); 2) amostras que foram sujeitas à DDI e à DDI de referência, que mais uma vez apresentam extensões semelhantes embora diferentes forças de rotura.

Após a rotura de um dos provetes considerados, a curva média deixa de ter significado, desse modo as curvas médias deixam de ser representativas do comportamento dos provetes reais. Para tentar ultrapassar essa limitação, e para complementar a informação da Figura 29, na Figura 30 ilustram-se as curvas dos provetes que melhor se aproximam da curva média respectiva. Quando comparada com as curvas médias força-extensão a tendência observada para os resultados é a mesma, a amostra intacta é a que evidencia maior força de tração máxima no “pico 1” e a amostra submetida a DDI+Abrasão regista a maior força de tração máxima no “pico 2”, assim como as conclusões que se retiraram anteriormente, ajustam-se perfeitamente à Figura 30.

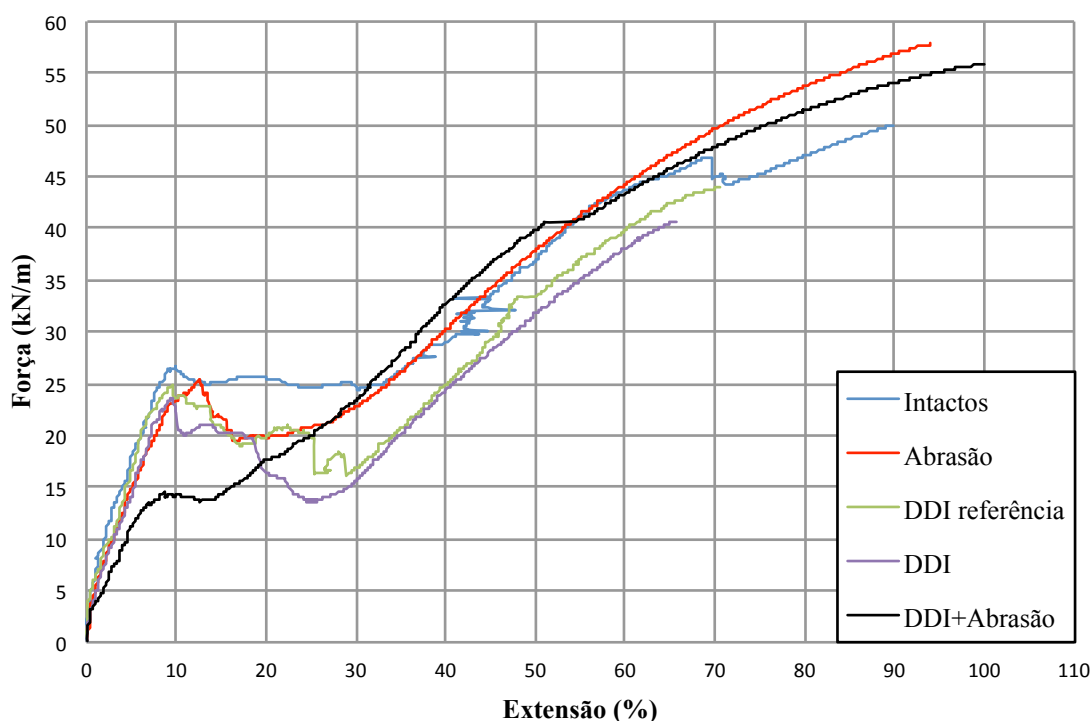
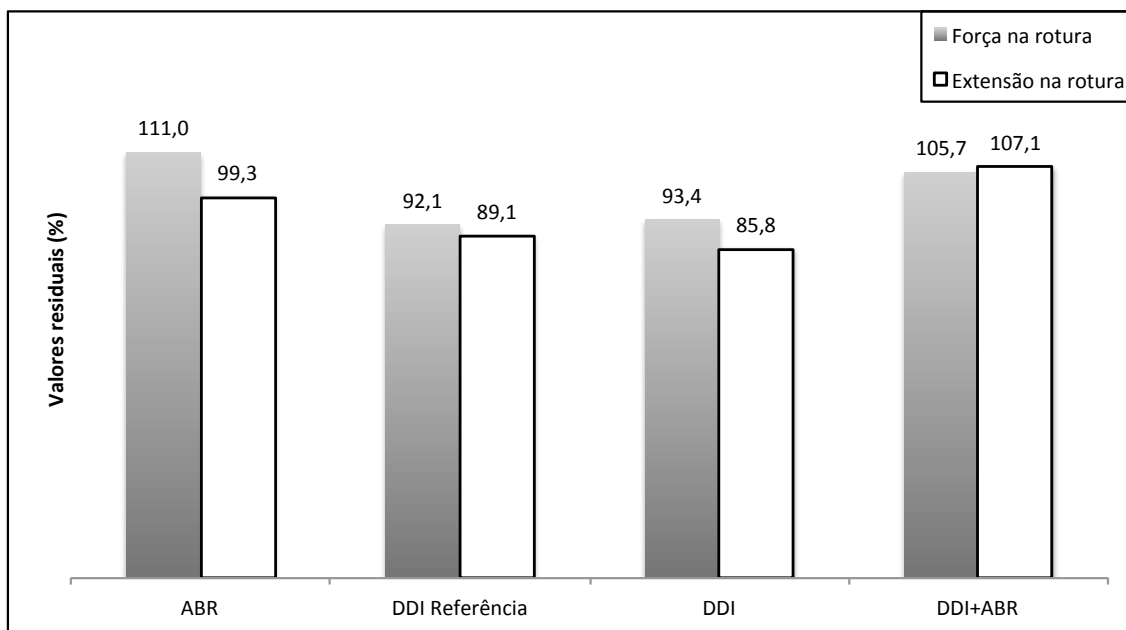


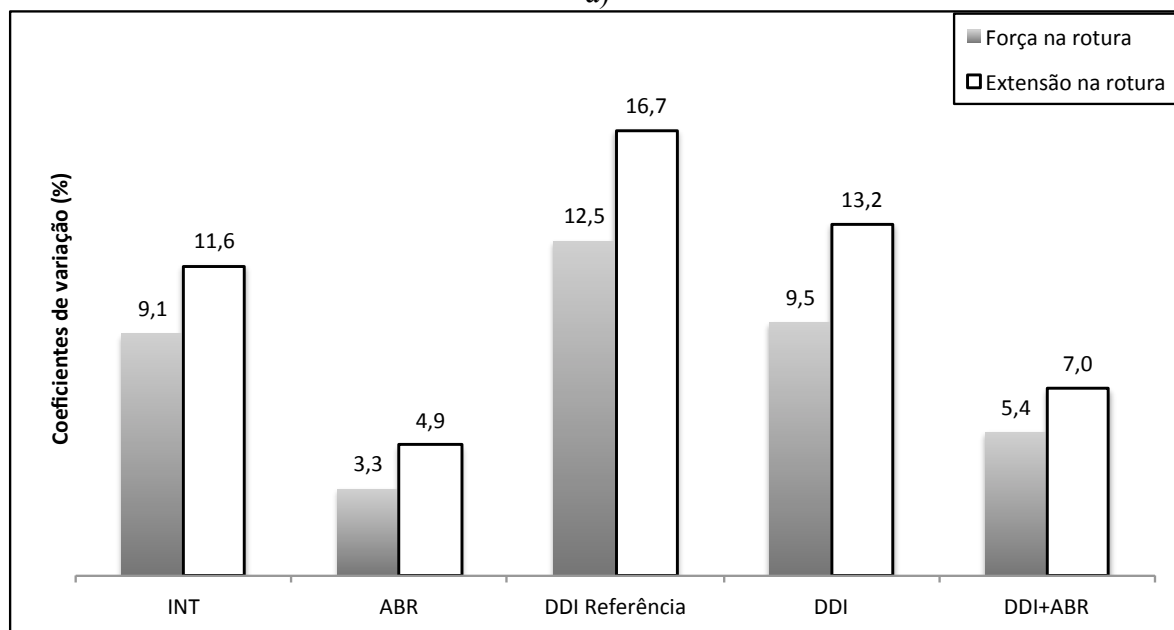
Figura 30 - Representação da curva força-extensão do provete mais próximo da curva média correspondente do compósito GTX+GGR nas situações: intacto; após abrasão; após DDI de referência; após DDI; após DDI seguida de abrasão.

Na Figura 31 apresentam-se os valores residuais da resistência à tração e extensão do provete GTX+GGR para o “pico 2”, após DDI (DDI), após DDI de referência (DDI referência), abrasão (ABR) e DDI mais abrasão (DDI+ABR) em relação às amostras intactas, e os respectivos coeficientes de variação. A determinação destes valores residuais (em percentagem) efetuou-se de acordo com a Equação 1: quociente entre o valor da resistência à tração da amostra que se pretende analisar e o valor da resistência à tração da amostra de referência.

$$V. R. = \frac{T_{Max} \text{ da amostra em análise}}{T_{Max} \text{ da amostra de referência}} \times 100 \quad (1)$$



a)



b)

Figura 31 – GTX+GGR no “pico 2”: a) resistência à tração e extensão residuais (%); b) coeficientes de variação correspondentes (%).

Os valores da resistência à tração residual das amostras após abrasão, após DDI de referência, após DDI e após a combinação dos referidos fenómenos (DDI+Abrasão) são bastante elevados. Para o GTX+GGR após abrasão e após DDI+Abrasão a resistência à tração residual é superior a 100%, o que significa que o valor da resistência à tração do GTX+GGR é superior ao valor correspondente para o material intacto. Note-se, como referido na secção 4.4.4.5, que o geotêxtil e a geogrelha ao estarem mais danificados vão funcionar como um só,

pois estão mais ligados um ao outro, conseguindo dessa forma mobilizar maior resistência. Na Figura 32b, é possível observar a degradação acentuada do GTX+GGR, em que os filamentos desagregados da estrutura do geotêxtil se misturam com as fibras detoradas de poliéster provenientes da geogrelha. Os resultados indicam que, no que se refere à resistência à tração, a DDI parece ser o mecanismo de dano mais condicionante e que há sinergia positiva entre a abrasão e a DDI.



a)



b)

Figura 32 - Danos após DDI+Abrasão nos provetes de GTX+GGR: a) vista geral durante o ensaio de tração; b) pormenor da degradação acentuada.

Durante o ensaio de DDI, o contacto com as partículas de balastro originou contusões, que se traduzem em adelgaçamentos pontuais da espessura do material geotêxtil, acompanhadas de algum desgaste superficial. No que diz respeito à geogrelha observa-se o corte e esmagamento em ambas as direções dos filamentos que a compõem, refletindo-se numa perda de resistência à tração pequena: 7,90% no caso da DDI de referência e 6,57% após DDI.

Relativamente às extensões para a força máxima continua a ter-se dois grupos, neste caso no primeiro grupo a maior diminuição corresponde às amostras após DDI (cerca de 14,17%) e após DDI de referência a diminuição do valor médio da extensão é de 10,92%. No segundo grupo, as extensões para a força máxima das amostras sujeitas a abrasão e DDI+Abrasão têm valores superiores, 99,27% e 107,12%, respetivamente.

Os coeficientes de variação para a resistência à tração são relativamente baixos: o coeficiente mais elevado foi obtido para as amostras submetidas ao ensaio de referência da DDI (12,54%). No caso dos coeficientes de variação referentes à extensão para a força máxima, a

dispersão dos resultados das amostras após os danos simulados é mais elevada o que se reflete nos valores correspondentes do coeficiente de variação (o valor mais elevado é de 16,68%).

Contudo, a norma EN ISO 10722:2007 especifica que os resultados das amostras submetida à DDI devem ser comparados não com as amostras intactas mas sim com as amostras, que no presente trabalho se definem como sendo as amostras de referência para a DDI (que derivam da indução de um certo nível de dano em amostras intactas). Deste modo, na Figura 33 apresentam-se os valores residuais da resistência à tração e da extensão na rotura após DDI e após DDI+ABR relativamente às amostras de referência para a DDI.

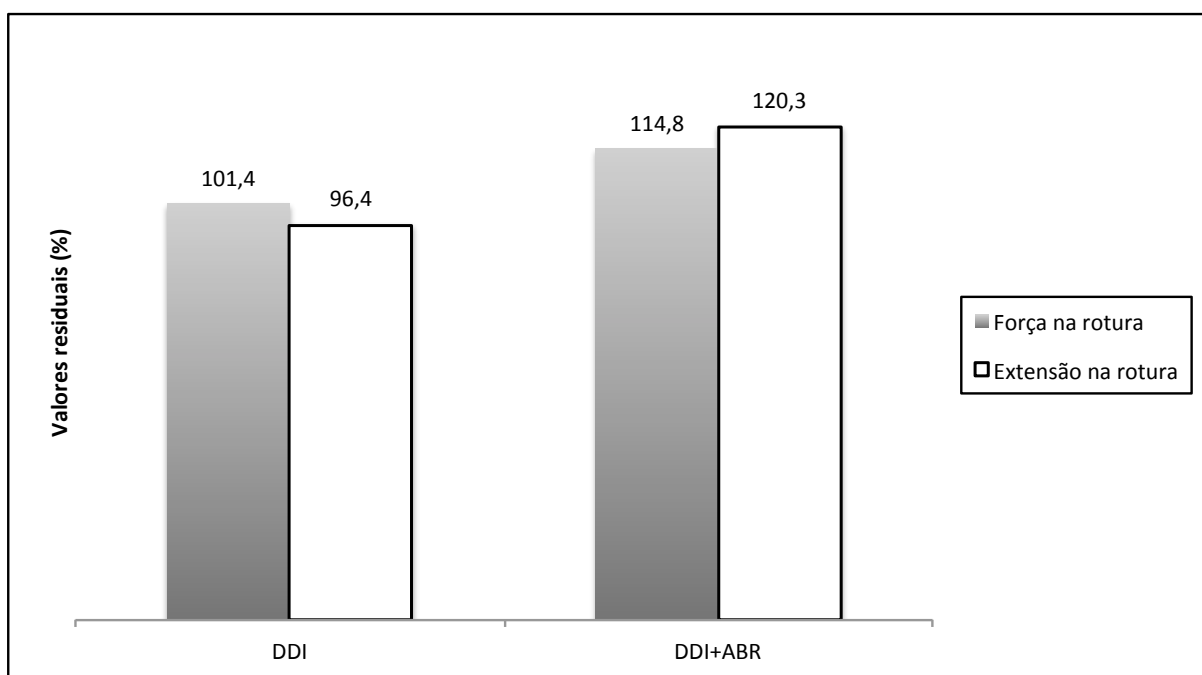
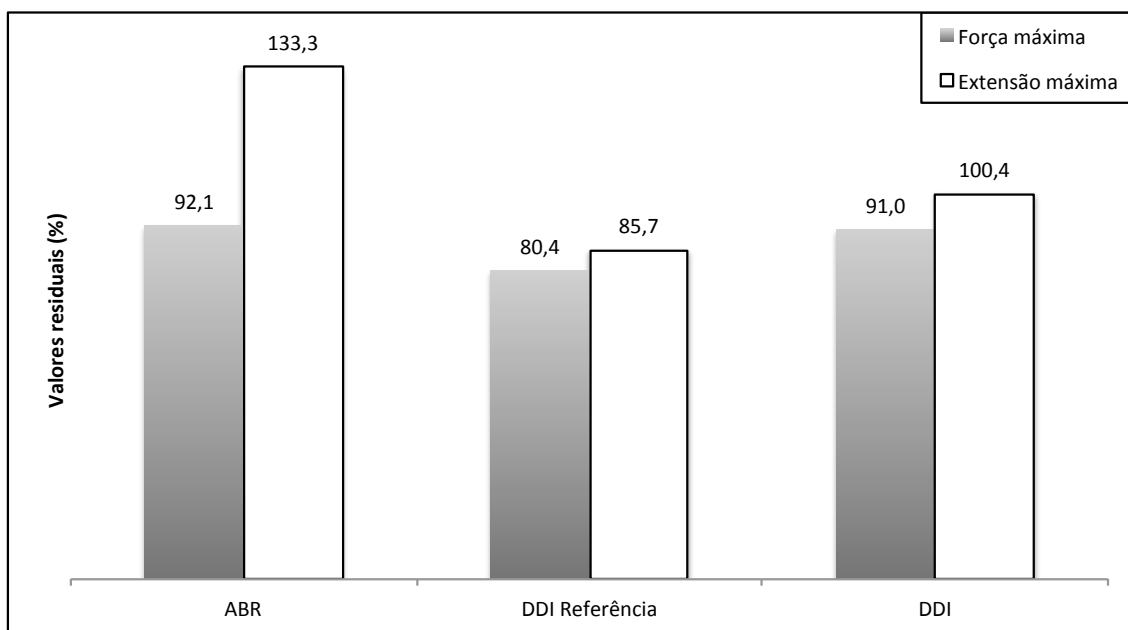


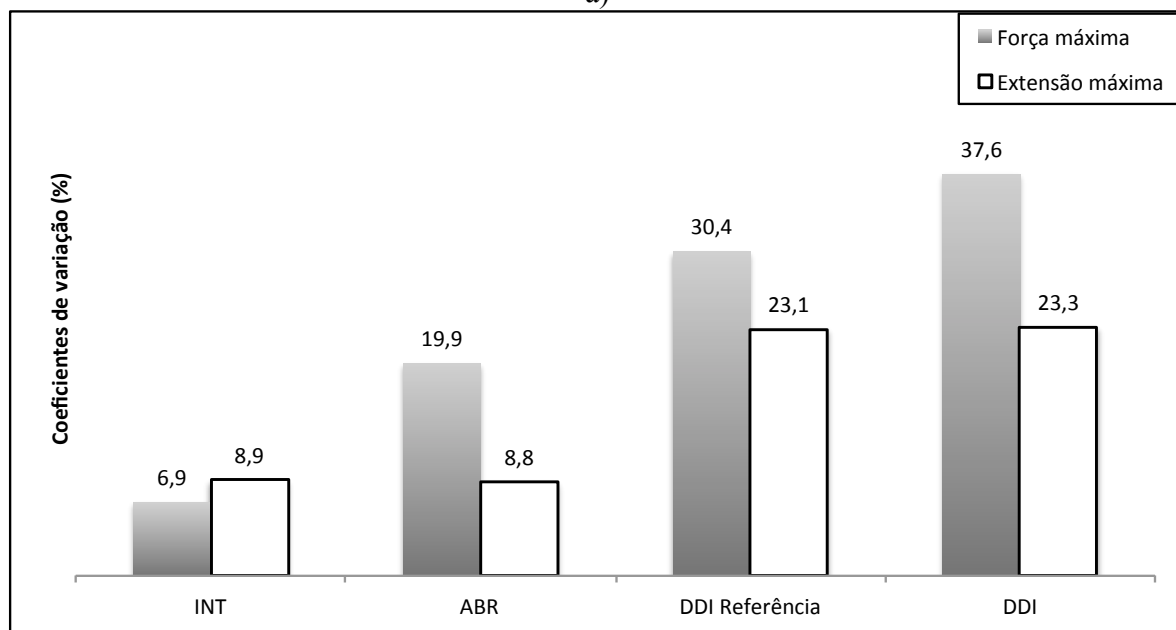
Figura 33 - Valores residuais (em %) da resistência à tração e da extensão na rotura após DDI e DDI+ABR relativamente à amostra de referência para a DDI.

Verifica-se na Figura 33 que os valores residuais relativamente aos valores para as amostras de referência da DDI, quer da resistência à tração quer da extensão para a força máxima são menos conservativos do que os obtidos por comparação com as amostras intactas.

Feita a análise ao “pico 2”, a Figura 34 representa os valores residuais da resistência à tração e extensão do provete GTX+GGR para o “pico 1” após DDI (DDI), após DDI de referência (DDI referência) e abrasão (ABR) em relação às amostras intactas. Nesta análise não são representados os valores residuais provenientes do ensaio DDI seguido de abrasão (DDI+ABR), por não se considerar que exista um “pico 1”.



a)



b)

Figura 34 - GTX+GGR no “pico 1”: a) resistência à tração e extensão residuais (%); b) coeficientes de variação correspondentes (%).

Os valores da resistência à tração residual das amostras no “pico 1”, após abrasão, após DDI de referência e após DDI são elevados, no entanto são inferiores quando comparado com os valores homólogos do “pico 2”.

Ao contrário do que se verificou anteriormente, os provetes representados na Figura 34 não excedem os 100 %, ou seja, o valor da resistência à tração do GTX+GGR é inferior ao valor

correspondente para o material intacto, dessa forma as amostras após abrasão, após DDI de referência e após DDI sofreram uma perda de resistência à tração de 7,9%, 19,6% e 9%, respectivamente.

Relativamente às extensões para a força máxima no “pico 1”, a amostra após DDI de referência sofreu uma diminuição de 14,3%, enquanto que as amostras após abrasão e após DDI têm valores superiores, 133,3 % e 100,4%, respectivamente. Note-se que, as extensões são superiores à força máxima em todos os provetes, acontecimento que não se regista no “pico2”.

Os coeficientes de variação no “pico 1” para a resistência à tração têm um valor relativamente considerável, o que explica a dispersão dos resultados das amostras: o coeficiente mais elevado foi obtido para as amostras submetidas ao ensaio de DDI (37,6%), superior ao valor registado no “pico 2” (12,54%). No caso dos coeficientes de variação referentes à extensão para a força máxima no “pico 1” o valor mais elevado é de 23, 3% referente à DDI, também superior ao valor registado no “pico 2” (16,68%).

Como anteriormente foi referido, a norma EN ISO 10722:2007 especifica que os resultados das amostras submetida à DDI devem ser comparados não com as amostras intactas mas sim com as amostras, que no presente trabalho se definem como sendo as amostras de referência para a DDI (que derivam da indução de um certo nível de dano em amostras intactas). Deste modo, na Figura 33 apresentam-se os valores residuais da resistência à tração e da extensão no “pico 1” após DDI relativamente às amostras de referência para a DDI.

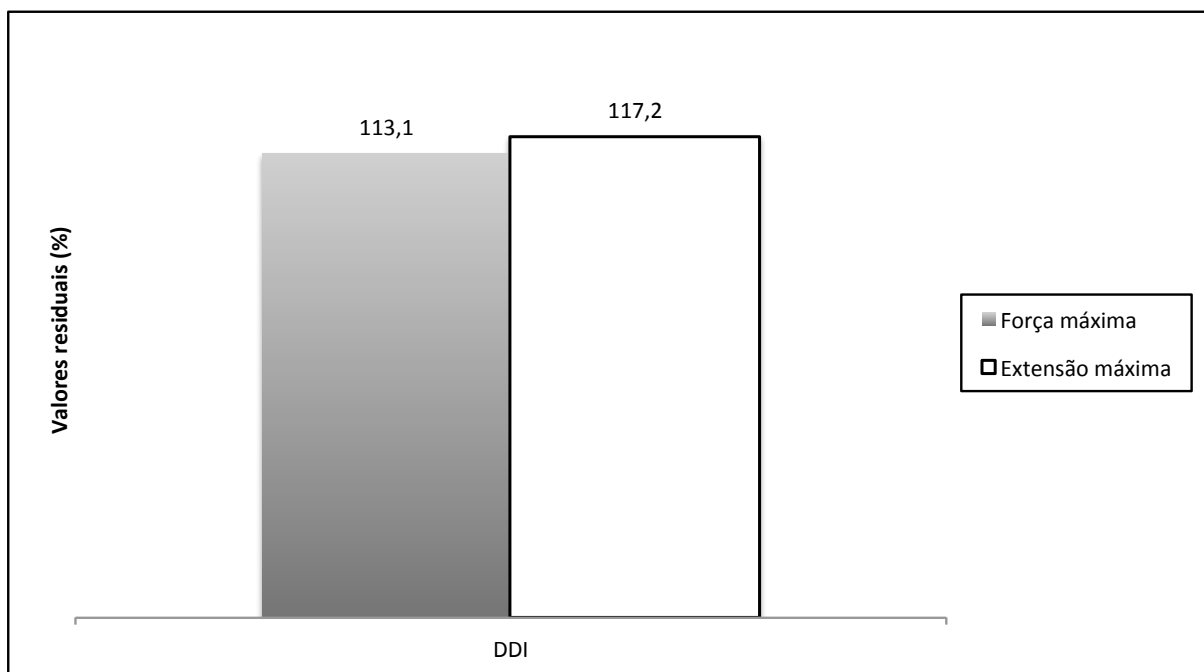


Figura 35 - Valores residuais (em %) da resistência à tração e da extensão no “pico 1” após DDI e DDI+ABR relativamente à amostra de referência para a DDI

Verifica-se na Figura 35 que os valores residuais no “pico 1” relativamente aos valores para as amostras de referência da DDI, estão de acordo com o que se registou para o “pico 2”, quer da resistência à tração quer da extensão para a força máxima são menos conservativos do que os obtidos por comparação com as amostras intactas.

Na Figura 36 encontram-se os os valores residuais (em %) da robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%), relativamente ao GTX+GGR intacto.

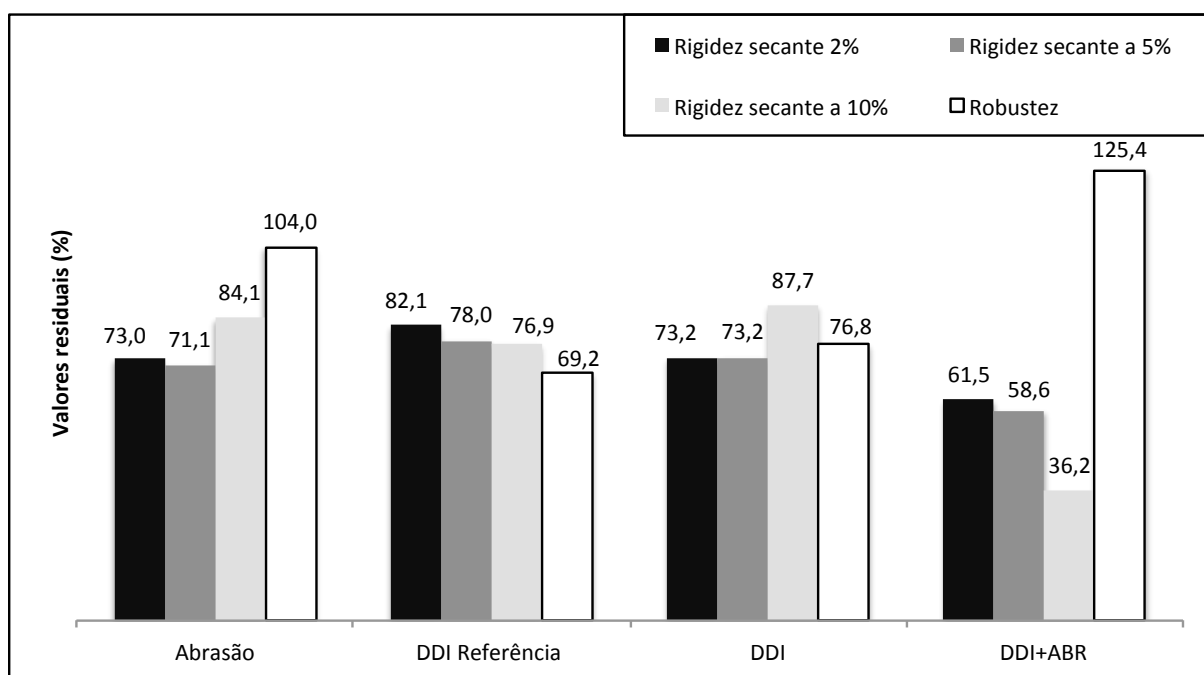


Figura 36 - Robustez e módulo de rigidez secante (2%, 5% e 10%) residuais (em %), relativamente às amostras intactas de GTX+GGR.

Verifica-se que a maior redução da robustez ocorre nas amostras após DDI de referência e após DDI, sendo de 30,84% e 23,18%, respetivamente. Nas amostras submetidas ao ensaio de abrasão, o valor da robustez apresenta um acréscimo de 4,03%, e para as amostras após DDI+Abrasão o acréscimo é de 25,44% (em relação às amostras intactas).

No que diz respeito à rigidez das amostras, para as três extensões apresentadas, os seus valores decrescem face aos valores homólogos da amostra intacta. O maior decréscimo dos valores residuais do módulo rigidez secante ocorreu nas amostras após DDI+Abrasão, que apresentam uma redução de 38,51%, 41,44% e 63,83% para as extensões de 2%, 5% e 10%, respetivamente. Após abrasão, os decréscimos são de 26,98% para $\epsilon=2\%$, 28,93% para $\epsilon=5\%$ e 15,86% para $\epsilon=10\%$. Após DDI de referência são de 17,86%, 21,97% e 23,07% para $\epsilon=2\%$, $\epsilon=5\%$ e $\epsilon=10\%$, respetivamente. Após DDI são de 26,83%, 26,75% e 12,31% para $\epsilon=2\%$, $\epsilon=5\%$ e $\epsilon=10\%$, respetivamente. Note-se que, de acordo com a literatura, para alguns materiais, as variações no módulo de rigidez são mais representativas da sua resposta após dano mecânico do que as observadas para a resistência à tração.

Os coeficientes de redução determinados para o geotêxtil, após os diferentes tipos de danos simulados, encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Coeficientes de redução para o compósito GTX+GGR.

CR_{ABR}	CR_{DDI}		$CR_{DDI+ABR}$	$CR_{DDI} \times CR_{ABR}^{(\#)}$	
0,90	1,09 ^(*)	0,99 ^(**)	1,07	0,98 ^(*)	0,89 ^(**)

Nota: o valor mínimo admissível para esta grandeza é 1.

([#]) Sobreposição dos efeitos da DDI e da abrasão de acordo com a abordagem tradicional, considerados independentes

(**) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tração dos provetes intactos

(***) Valor tendo em consideração o valor da resistência à tração dos provetes de referência da DDI

Os coeficientes de redução obtidos são bastante próximos da unidade, de onde se conclui que os efeitos dos mecanismos de degradação simulados laboratorialmente são pouco determinantes na resistência à tração a curto prazo da GTX+GGR, nesta tabela também se apresentam os valores dos coeficientes de redução para a DDI relativamente às amostras intactas e às amostras de referência de onde se pode verificar que, como seria de esperar, o coeficiente de redução é mais elevado se a análise for efectuada relativamente à amostra intacta.

Note-se na Tabela 23 a ação combinada da DDI e abrasão ($CR_{DDI+ABR}$), em que os provetes do GTX+GGR foram submetidos a estes fenómenos sequencialmente, conduz a um coeficiente de redução superior ao coeficiente obtido considerando a sobreposição dos fenómenos assumidos independentes ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$). Tradicionalmente, esta sobreposição de efeitos é considerada através do produto dos coeficientes de redução para cada um dos mecanismos isolado. Como se verifica, caso a referência seja o comportamento das amostras intactas, o coeficiente de redução (0,98) é inferior ao obtido combinando os efeitos de DDI+ABR (1,07). Estes resultados indicam haver sinergia entre os mecanismos, sendo o seu efeito combinado mais gravoso do que o esperado utilizando a abordagem tradicional. Assim, a utilização da abordagem tradicional para o dimensionamento vai contra a segurança. Caso se considerem os valores após a DDI de referência os resultados obtidos pela sobreposição dos efeitos são claramente mais gravosos e contra a segurança (0,89).

4.5.3.2 Comparação com os materiais utilizados noutros estudos

Nesta secção é feita a comparação do comportamento de resistência à tração do conjunto GTX+GGR do presente trabalho, com os materiais separados GTX e GGR utilizados nos trabalhos desenvolvidos por Mendonça-Lopes (2011), ou seja, numa primeira parte é feita a comparação do conjunto GTX+GGR com o GTX isolado, e numa segunda parte é feita a comparação do mesmo conjunto GTX+GGR com a GGR isolada.

Na Tabela 24 comparam-se os resultados obtidos para o conjunto GTX+GGR para a força máxima de resistência à tração no “pico 2” (rotura), no âmbito do presente trabalho e com os resultados obtidos para o GTX isolado levado a cabo por Mendonça-Lopes (2011), designado por GTX1.

Na Figura 37, apresentam-se os valores residuais da resistência à tração para as amostras após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão, dos geossintéticos em análise.

Tabela 24 - Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração da GTX+GGR, GTX1.

Tipo de Amostra	Valor médio de força na rotura (kN/m)		Coeficiente de Variação (%)	
	GTX+GGR	GTX1	GTX+GGR	GTX1
Intacta	50,26	68,38	4,56	4,08
Após abrasão	55,77	59,69	1,81	5,22
Após DDI	46,96	62,08	4,45	6,50
Após DDI+abrasão	53,12	55,57	2,86	7,63

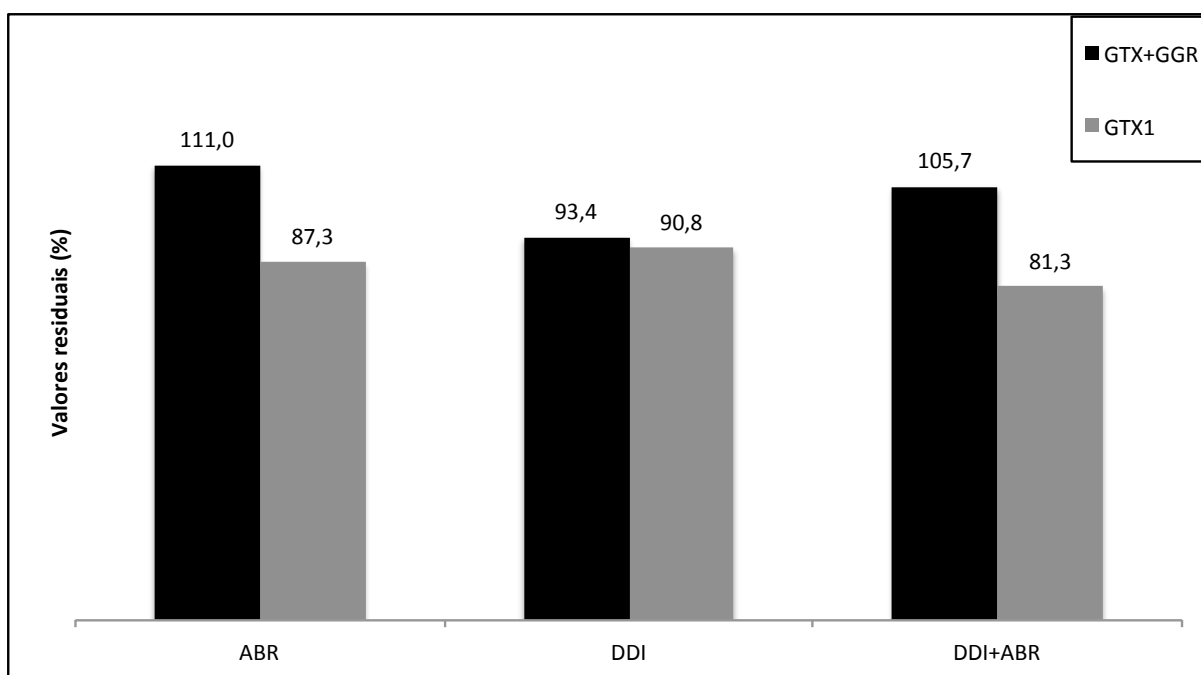


Figura 37 - Valores residuais (em %) da resistência à tração dos geossintéticos para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.

Na Tabela 24 constata-se que o GTX1 é o material que apresenta maior resistência à força máxima de tração no “pico 2” (rotura). A menor resistência à tração observada para o material GTX+GGR poderá estar relacionada com alguma incapacidade de mobilizar a sua resistência devido a algum escorregamento que possa ter ocorrido na zona das pegas.

Da Figura 37 verifica-se que após abrasão e DDI+abrasão, o GTX+GGR apresenta um aumento da sua resistência, tal facto poderá ocorrer por influência da presença da GGR. Remetendo para o trabalho experimental realizado por Pinto (2005), em que aborda a mesma questão, pode ter ocorrido uma reorientação de alguns filamentos e/ou facto da camada superficial ser parcialmente destacada, o que provoca que alguns dos filamentos entrem em tração somente quando já existiu alguma deformação prévia do geotêxtil. Relativamente ao geotêxtil ensaiado por Mendonça-Lopes (2011), GTX1, este apresenta uma redução de 12,7%, fruto da desagregação superficial parcial dos filamentos, sem que estes sofressem destacamento.

No que diz respeito aos provetes submetidos ao ensaio de DDI, o GTX+GGR e GTX1 foram ensaiados para mesma tensão, no entanto o material de confinamento usado é distinto. Deste modo o material utilizado no presente trabalho foi *corundum*, ao passo que Mendonça-Lopes (2011) utilizou material granular, de origem granítica, de dimensão compreendida entre os 16mm e 63mm. Desta forma, para efeitos conclusivos apenas se considera os resultados provenientes dos provetes GTX+GGR e GTX1, devido ao que foi enunciado anteriormente.

Relativamente ao GTX+GGR quando comparado com o GTX1, existe um factor comum nos diversos ensaios, uma redução da resistência à tração dos materiais. No que concerne aos resultados após abrasão a redução verificada da resistência, surge possivelmente pelo facto de o GTX1 não possuir a GGR que se encontra em contacto com a película abrasiva e desse modo evita um maior dano ao GTX.

Para estes dois provetes, após DDI verifica-se a mesma tendência semelhante, a redução da resistência à tração do GTX1 comparativamente ao GTX+GGR. Desta forma o resultado está diretamente relacionado com a composição do balastro, logo a maior dimensão das partículas em contacto com o GTX1 conferem um maior dano e conseqüentemente uma maior redução de resistência.

Na Tabela 25 comparam-se os resultados obtidos para o conjunto GTX+GGR para a força máxima de resistência à tração no “pico 1” (corresponde à rotura da geogrelha), no âmbito do presente trabalho e com os resultados obtidos para a GGR isolada levado a cabo por Mendonça-Lopes (2011).

Na Figura 38 apresentam-se os valores residuais da resistência à tração para as amostras após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão, dos geossintéticos em análise.

Tabela 25 - Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais de tração da GTX+GGR, GGR-T.

Tipo de Amostra	Valor médio de força na rotura (kN/m)		Coeficiente de Variação (%)	
	GTX+GGR	GGR-T	GTX+GGR	GGR-T
Intacta	25,83	44,39	1,77	1,60
Após abrasão	23,80	11,15	4,73	18,37
Após DDI	23,50	25,17	8,83	13,56
Após DDI+abrasão	16,44	5,94	3,46	24,04

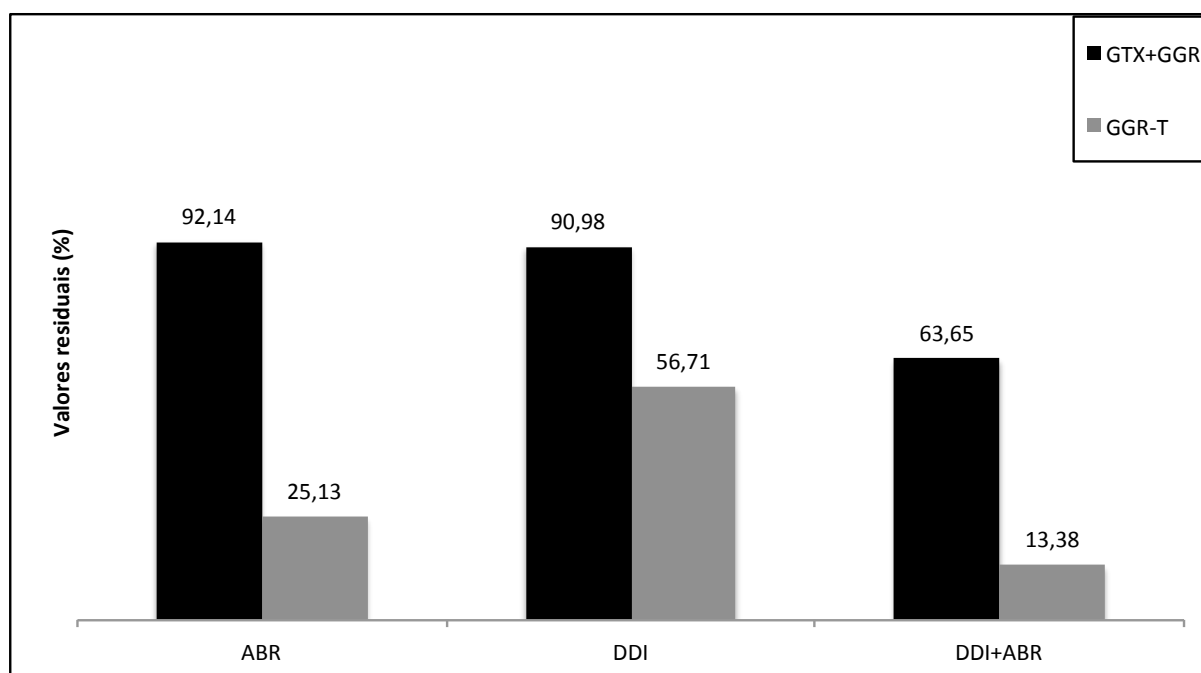


Figura 38 - Valores residuais (em %) da resistência à tração dos geossintéticos para as condições após abrasão, após DDI e após DDI+abrasão.

Da Tabela 25 constata-se que as amostras intactas de GGR-T apresentam força máxima de tração no “pico 1” superior ao material compósito ensaiado no presente trabalho.

Da Figura 38 verifica-se uma maior perda da resistência para todos os ensaios realizados da geogrelha GGR-T. No que concerne ao GTX+GGR, os valores da redução da resistência deveriam ser semelhantes ao que se verifica na GGR-T, pelo facto de ambos possuírem o mesmo tipo de geogrelha, no entanto essa situação não se verifica. A causa mais provável para o sucedido, será a influência GTX ao trabalhar em conjunto com a GGR, modifica o comportamento do conjunto.

No que diz respeito aos ensaios de DDI, é de notar que estes foram realizados em condições distintas. De facto, no que concerne à DDI e à combinação desta com a abrasão, o GTX+GGR foram solicitadas pelo *corundum* e uma tensão máxima aplicada de 900kPa, enquanto que a GGR-T, ensaiada por Mendonça-Lopes (2011) esteve em contacto com balastro e uma tensão máxima de 900kPa, respectivamente. Este materiais de confinamento são bastante distintos na dimensão dos agregados, de facto o *corundum* tem partículas cujas dimensões variam entre 5 e 10mm, enquanto o balastro tem partículas com dimensões entre 16mm e 63mm.

4.6 Conclusões

No presente estudo pretendeu-se avaliar os efeitos resultantes da danificação durante a instalação (DDI), os efeitos da abrasão e os efeitos simultâneos da DDI e da abrasão no geossintético compósito constituído pela associação GTX+GGR, pretendeu-se também avaliar quais as pegas a utilizar para caracterizar os geossintéticos isolados GTX e GGR através de ensaios de tração. Os danos induzidos foram caracterizados analisando o comportamento mecânico de curto prazo dos materiais, tendo como referência os valores obtidos para o material intacto. Adicionalmente, e de acordo com o especificado na norma EN ISO 10722:2007, foram ainda utilizados resultados do ensaio de referência para a DDI. Com os resultados obtidos foi ainda possível determinar os coeficientes de redução a aplicar no dimensionamento dos geossintéticos estudados, que representam os mecanismos estudados. Foi ainda avaliada a existência de sinergia entre a abrasão e a DDI induzidas em laboratório.

Neste trabalho fez-se ainda uma comparação com os resultados obtidos por Mendonça-Lopes (2011), que realizou o um programa experimental semelhante ao do presente trabalho sobre o geossintéticos isolados (geotêxtil e geogrelha). Nos ensaios laboratoriais de DDI o material granular usado por Mendonça-Lopes (2011) foi um balastro, de origem granítica, de dimensão compreendida entre os 16mm e 63mm.

Com base nos resultados obtidos, podem-se interferir as seguintes conclusões:

- Dos ensaios efectuados ao GTX isolado foi possível concluir que é preferível recorrer ás as garras de cunha de face lisa em vez das pegas cilíndricas, devido à grande

- deformabilidade do material. No que diz respeito à GGR, a conclusão é a inversa, já que o escorregamento dos provetes é minimizado nas garras cilíndricas.
- Nos ensaios de tração efectuados sobre amostras intactas é de notar que, no caso do geotêxtil (GTX-N), a resistência à tração é cerca de 14,1% superior à especificada pelo fabricante. Porém, no caso da geogrelha (GGR) os valores obtidos são inferiores aos do fabricante. Os ensaios realizados ao compósito constituído pela associação GTX+GGR revelaram que a resistência à tração do conjunto é inferior à de cada um dos materiais considerado isolado. Tais diferenças de valores poderão, porventura, estar relacionadas com as condições em que se processa o ensaio em causa, nomeadamente a utilização das garras de cunha de face lisa. Em relação à extensão para a força máxima, verifica-se que os valores medidos para o GTX, a GGR e o conjunto GTX+GGR, são inferiores aos apresentados pelos fabricantes para o GTX e para a GGR;
 - A abrasão provoca danos no conjunto GTX+GGR; através da inspeção visual realizada pode verificar-se que estes foram essencialmente o destacamento da camada superficial que reveste as fibras de poliéster para a GGR, a desagregação parcial da camada superficial e a reorientação dos filamentos numa direção preferencial (do ensaio), ocorrem na GTX, e estão de acordo com os processos de abrasão descritos por, Van Dine et al. (1982) apresentados na Tabela 5;
 - Após abrasão, a resistência à tração do GTX+GGR regista um aumento de 11%. Em relação à extensão para a força máxima, verifica-se uma redução insignificante do seu valor, cerca de 0,7%. O aumento verificado deve-se provavelmente ao facto de a indução da abrasão ter feito com que fossem criadas algumas ligações entre elementos constituintes do geotêxtil e da geogrelha, que passam a funcionar como um só, conseguindo dessa forma mobilizar maior resistência;
 - O efeito do ensaio de referência para a DDI provoca alterações significativas no comportamento mecânico de curto prazo, nomeadamente nos valores de pico, do conjunto geocompósito. No GTX+GGR a danificação de referência induzida laboratorialmente provocou uma redução da sua resistência em cerca de 7,9%, em relação aos valores determinados para o material intacto.

- No GTX+GGR verifica-se que o efeito da DDI, no seu comportamento mecânico de curto prazo, provoca alterações bastantes distintas nos parâmetros de pico (resistência à tração e extensão correspondente), na rigidez secante e na robustez dos materiais. Deste modo, os danos induzidos pela DDI, provocam uma redução na sua resistência em cerca de 6% e um acréscimo em cerca de 1% quando comparado com as amostras intactas e com as amostras de referência para a DDI, respectivamente.
- Após os ensaios sequenciais de DDI e abrasão, o aspecto do GTX+GGR, apesar de os danos serem visualmente idênticos, o grau de danificação das fibras de poliéster da GGR é mais elevado, dessa forma vai ser mais condicionante do que a danificação do geotêxtil de base (GTX), pois os seus danos não foram tão severos;
- A norma EN ISO 10722:2007 especifica que os resultados após o ensaio laboratorial de indução de dano mecânico devem ser comparados com os referentes às amostras de referência. Verifica-se que, ao comparar os resultados obtidos nas amostras após DDI com os das amostras de referência, a perda de resistência é inferior à manifestada quando tal comparação é efectuada relativamente às amostras intactas;
- Os coeficientes de redução para a resistência à tração obtidos evidenciam as variações resistência à tração do compósito considerado neste estudo. Os valores obtidos para o GTX+GGR são próximos da unidade, o que evidencia a elevada sobrevivência do conjunto em relação aos agentes considerados. Para o mesmo material verifica-se que a consideração da sobreposição dos fenómenos assumidos independentes ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$) gera um coeficiente de redução semelhante ao da ação combinada dos efeitos da DDI e abrasão ($CR_{DDI+ABR}$), no entanto verifica-se que a consideração da sobreposição dos fenómenos assumidos independentes ($CR_{DDI} \times CR_{ABR}$) gera um coeficiente de redução que é inferior (contra a segurança), ao da conjugação dos efeitos da DDI com a abrasão ($CR_{DDI+ABR}$);
- A robustez residual do compósito GGR+GTX apresenta valores muito distintos, refletindo as variações obtidas em termos de resistência à tração e respectiva extensão, para os diferentes tipos de danos induzidos. Deste modo, a maior redução do valor da robustez foi verificada no geossintético submetido ao efeito da DDI de referência. No entanto, a variabilidade observada é, em geral, superior à obtida para as restantes grandezas;

- No que diz respeito à rigidez verifica-se que após a indução dos fenómenos de DDI e abrasão (isolados e combinados) houve reduções, pois nestes materiais, houve uma diminuição do declive das curvas força-extensão.

5 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O trabalho apresentado pretende contribuir para o estudo da influência dos danos mecânicos na durabilidade do geocompósito GTX+GGR em aplicações ferroviárias.

No que concerne a obras ferroviárias os geossintéticos ficam submetidos a ações dinâmicas que podem ter grande influência nas suas propriedades, quer durante a construção quer na fase de serviço. Deste modo, a avaliação dos fenómenos de abrasão e de danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos, revela-se uma temática de extrema importância, de modo a garantir, em dimensionamento, o correto funcionamento destes materiais geossintéticos face às funções que lhes são exigidas na aplicação em causa.

Os resultados apresentados realçam a importância da realização de mais estudos sobre os factores que influenciam o efeito da danificação durante a instalação de geossintéticos, nomeadamente o tipo de geossintético, o tipo de material confinante e a metodologia de instalação dos geossintético.

De forma a prosseguir com o presente trabalho no futuro, será necessário:

- Para posterior análise e comparação com os resultados obtidos, realizar os mesmos ensaios com os mesmos geossintéticos e nas mesmas condições, mas segundo a direção normal à de fabrico dos mesmos;
- Elaborar o estudo do comportamento mecânico para os mesmos ensaios e nas mesmas condições, no entanto, desta vez, considerando o GTX sobreposto à GGR, para se poder concluir qual a melhor posição dos geossintéticos em relação um ao outro para que, em conjunto executem com maior sucesso as funções mecânicas (proteção, reforço);
- A realização de ensaios de abrasão, com lixas mais ou menos abrasivas do que a utilizada no presente trabalho (P100), tem o intuito de replicar o que acontece na vida prática. Visto que os geossintéticos podem estar em contato direto, na obra, com diferentes materiais granulares;
- A realização de ensaios de DDI com uma caixa de maior dimensão em altura de modo a que o material de confinamento seja colocado o mais naturalmente possível, de forma a eliminar eventuais efeitos de escala nos ensaios realizados neste trabalho;

- O desenvolvimento de ensaios laboratoriais que reproduzam, realisticamente, as condições verificadas “*in situ*” (carregamento e espessura das camadas de confinamento), para geossintéticos aplicados em vias-férreas;
- Elaborar estudos que vão de encontro com a manutenção dos geossintéticos instalados nas vias-férreas. Dessa forma, o tempo de vida útil destas estruturas aumentam, bem como o seu desempenho funcional;
- O estudo do comportamento dos geossintéticos tendo em vista a sua incorporação em obras de reabilitação e de reforço de vias-férreas, ou seja, a elaboração de ensaios de DDI com balastro reutilizado, cuja agressividade será, porventura, mais elevada do que a do balastro novo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ashpiz, E.S.; Diederich, R.; C.Koslowki- The use of spunbonded geotextile in railway track renewal St. Petersburg - Moscow: Proceedings of 7th Int. Conference on Geosynthetics. Nice, France, 2002.

Aursudkij, B. - A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance. The University of Nottingham. (2007).

Bathurst, R. J; Raymond, G. P. - Geogrid reinforcement of ballasted track. Transportation Research Record. Vol. 1153 (1987), p. 8 – 14.

Borges, J.L. - Aterros sobre Solos Moles Reforçados com Geossintéticos. Porto: FEUP, 1995.

Carneiro, J.R.C. - Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental- A importância da incorporação de aditivos químicos. Porto: Universidade do Porto, 2009. 534 f.

Christopher, B.R.; Elias, V.- Evaluation of installation damage in geosynthetics: a US perspective: Seminar Volume on Installation Damage in Geosynthetics. ERA Technology, Leatherhead, U.K., 1998.

Dine, D. Van; Williams, S. E.; Raymond, G.P.- An Evaluation of Abrasion Tests for Geotextiles: Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas, USA, 1982.

Elias, V. - Corrosion/degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes. 2000.

Fabrics, Geo - High-performance geosynthetics. [Consult. Disponível em WWW:<URL:<http://www.geofabrics.com/%3E>. consultado a 20 de Novembro de 2011

Faure, Y.H.; Imbert, B.- Use of geotextiles to prevent fine material from polluting railway subgrade: Geosynthetics: Applications, Design and Construction. Balkema, Rotterdam, 1996.

Fernandes, G.; Palmeira, E. M.; Gomes, R. C. - Performance of geosynthetic-reinforced alternative sub-ballast material in a railway track. *Geosynthetics International*. ISSN 1072-6349-1751-7613. Vol. 15, n.º 5 (2008), p. 311-321.

Ferreira Gomes, L.M- *Geotêxteis e suas aplicações: A indústria têxtil nos caminhos da inovação*. Covilhã, 2001.

Fischer, S. - *Stabilisation of railway tracks with under the ballast built-in geogrid layers*. Gyor: Szecgenyi Istvan University, 2010.

Greenwood, J.H.; Friday, A.- *How to predict hundred year lifetimes for geosynthetics: 8th International Conference on Geosynthetics*. Yokohama, Japan, 2006.

IGS-Portugal - Functions / Funções. [Consult. Disponível em WWW:<URL:<http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/%3E>. Consultado a 28 de Novembro de 2011 às 23:45h

Indraratna, B.; Salim, W. ; Rujikiatkamjorn, C. - *Advanced Rail Geotechnolgy - Ballast Track*. CRC Press/Balkema, 2011. ISBN 978-0-415-66957-3.

Koerner, R.M. - *Designing with Geosynthetics*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.

Lim, W.L. - *Mechanics of Railway Ballast Behaviour*. University of Nottingham, 2004. 215 f.

Lopes, M.L. - *Utilização de Geossintéticos em Estruturas de Vias-Férreas.: Seminário Português sobre os Geossintéticos Palestra CD-ROM ISEN - 978-989-96466-0-5*. 2009.

Mendonça-Lopes, P. M. - *Efeito do balastro nas propriedades de geossintéticos em vias-férreas*. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011. 119 f.

Nancey, A.; Imbert, B.; Robinet, A.- Thick and abrasion resistant geotextile for use under the ballast in railways structure: Proceedings of 7th Int. Conf. on Geosynthetics. Nice, France, 2002.

Oliveira, F. F. A. - Comportamento hidráulico de geossintéticos em vias-férreas. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2011. 133 f.

Paula, A. M. V. - Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos. Porto: Universidade do Porto, 2003. 115 f.

Pinho-Lopes, M. ; Lopes, M. L. - Durabilidade dos Geossintéticos. FEUP edições, 2010. ISBN 978-872-752-120-3.

Pinho-Lopes, M. J.F. - Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos. Porto: Universidade do Porto, 2006. 693 f.

Pinto, A.E.S. - Aplicação de geossintéticos em linhas-férreas estudo laboratorial dos fenómenos de danificação durante a instalação e abrasão nos materiais. Porto: Universidade do porto, 2005. 165 f.

Rosete, A.J.C. - Durabilidade de Geossintéticos em Obras Ferroviárias - Abrasão e DDI. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2010. 111 f.

Selig, E.T.; Waters, J.M. - Track Tecnology and Substrucutre Managent. London, 1994.

Shukla, S. K. - Geosynthetics and their applications. Sanjay Kumar Shukla
Thomas Telford. 2002.

Tan, S.A.H- Railway tracks. Chapter on Fundamental of geosynthetics. Thomas Telford
Edited by S.K.Shukla, 2002.

Tavares, P. J. F. - Reforço de Substruras de Vias Férreas com Geossintéticos. Porto: Universidade do Porto, 2009. 63 f.

Watn, A.; Chew, S.H.- Geosynthetic damage - from laboratory to field: Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics. Nice, France, 2002.

Documentos Normativos:

NP EN ISO 13427:2006 – Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998).

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

EN ISO 10319:2008 – Geosynthetics. Wide-width tensile test (ISO 10319:2008).

ISO 554 - Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications (65±5% de humidade relativa e 20±2°C temperatura).

ENV ISO 109722-1:1997

EN 963:1995 - Geotextiles and geotextile-related products. Sampling and preparation of test specimens.