

# PROTOCOLO



INSTITUTO DAS ESTRADAS DE PORTUGAL



FACULDADE DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

*Durabilidade de Geossintéticos Face a Agentes Mecânicos de  
Danificação Durante a Construção  
- Abordagem Laboratorial*

RELATÓRIO DE ACÇÃO

Por:

Maria de Lurdes Costa Lopes

Margarida Pinho Lopes

António Miguel Paula

Novembro de 2003



A acção intitulada *Durabilidade de Geossintéticos Face a Agentes Mecânicos de Danificação Durante a Construção - Abordagem Laboratorial* desenvolveu-se no âmbito do protocolo IEP/FEUP tendo nela colaborado:

pelo

INSTITUTO DAS ESTRADAS DE PORTUGAL

Dr. Armindo dos Santos Nunes

Eng.<sup>a</sup> Ana Isabel Soares Cardoso

pela

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Prof. Maria de Lurdes da Costa Lopes

Eng.<sup>a</sup> Margarida João Fernandes de Pinho Lopes

Eng.<sup>o</sup> António Miguel Verdelho Paula



1	Objectivo e Introdução.....	7
2	Desenvolvimento da Acção .....	8
3	Danificação Durante a Instalação de Geossintéticos .....	9
3.1	Efeito da danificação durante a instalação nas propriedades a curto prazo.....	10
3.2	Indução da danificação durante a instalação de geossintéticos .....	10
4	Plano de Trabalhos .....	11
5	Materiais utilizados .....	12
5.1	Materiais granulares.....	10
5.2	Geossintéticos .....	14
5.2.1	Geogrelhas.....	15
5.2.2	Geotêxteis .....	17
5.2.3	Geomembranas .....	18
6	Indução Laboratorial da Danificação Durante a Instalação de Geossintéticos .....	20
6.1	Equipamento .....	20
7	Caracterização da Danificação Mecânica dos Geossintéticos.....	22
7.1	Ensaio de tracção.....	22
7.1.1	Resultados obtidos.....	23
7.1.2	Influência do tipo de geossintético .....	27
7.1.3	Influência do Tipo de Solo na Danificação.....	32
7.2	Análise Comparativa dos Resultados Obtidos com Ensaio de Campo.....	36
7.2.1	Simulação de Campo <i>Versus</i> Simulação Laboratorial .....	36
7.2.2	Descrição Resumida da Metodologia de Danificação de Campo .....	36
7.2.3	Análise Comparativa dos Resultados .....	38
8	Prosseguimento dos Trabalhos.....	44
9	Conclusões.....	44
	Referências Bibliográficas.....	45



# 1 OBJECTIVO E INTRODUÇÃO

Os geossintéticos são materiais recentes que, associados a novas tecnologias construtivas, são cada vez mais aplicados nos diversos domínios da engenharia civil, particularmente da engenharia rodoviária.

Porém, como é costume acontecer quando novos materiais e tecnologias se revelam adequados e vantajosos do ponto de vista da solução de problemas, assiste-se actualmente a um desfasamento entre a aplicação prática desses materiais e tecnologias e o conhecimento técnico-científico profundo do modo de os caracterizar, quer nos aspectos particulares do seu funcionamento, quer na manutenção das suas propriedades ao longo do tempo.

Uma contribuição para a redução deste desfasamento só é possível através do estudo do funcionamento e das condições de aplicação dos geossintéticos com o objectivo de encontrar metodologias de dimensionamento e condições de aplicação dos materiais convenientemente sustentadas, quer do ponto de vista técnico, quer científico.

Um grande passo nesse sentido foi dado em Portugal através das acções desenvolvidas no âmbito do Protocolo JAE/FEUP designadas: uma por *Concepção do Aterro com Taludes Laterais Reforçados com Geogrelhas do IP3, Lanço Régua-Reconcos* e outra por *Aterro Reforçado com Geogrelhas do IP3, Lanço Régua/Reconcos - Observação do Comportamento em Serviço*. Nestas acções foi possível construir e, pela primeira vez no nosso país, monitorizar um aterro rodoviário reforçado com geogrelhas, e observar o seu comportamento ao longo dos dez primeiros meses de serviço.

Numa segunda fase, procurou-se acoplar uma outra vertente de estudo associada à aplicação de geossintéticos como elemento de reforço de materiais granulares, particularmente, a que se refere à definição *in situ* dos coeficientes de segurança a adoptar para os geossintéticos. Tal foi feito através da realização de uma outra acção desenvolvida no âmbito do Protocolo ICERR/FEUP designada por *Danificação Durante a Construção de Geossintéticos - Estudo dos Coeficientes de Segurança a Adoptar* onde se procurou contribuir para a definição de valores dos coeficientes de segurança a considerar no dimensionamento de geossintéticos em estruturas de reforço de solos, em particular, aos relativos à danificação durante a instalação e à fluência, e aos procedimentos a adoptar durante a aplicação *in situ*. Para tal foram realizados estudos laboratoriais e de campo, envolvendo diferentes tipos de solos e de geossintéticos sujeitos a diferentes energias de compactação.

Para melhor entender os mecanismos associados à danificação que ocorre durante a construção com geossintéticos, promoveu-se uma outra acção, complementar da anteriormente referida, para realizar uma abordagem laboratorial desta questão.

Antes de mais, é importante explicitar que os geossintéticos são materiais sensíveis a reduções de resistência, quer a curto, quer a longo prazo quando sujeitos a diversas acções, tais como: necessidade de realização de ligações do material durante a aplicação, danificação durante a instalação por acção dos equipamentos de construção e deficientes técnicas de colocação, fluência e exposição a agentes físicos, químicos e biológicos. Daí que o dimensionamento adequado de estruturas em que estes materiais intervêm imponha a necessidade de consideração da possibilidade de redução de resistência dos geossintéticos por exposição aos agentes referidos, o que deverá ser feito através da adopção de coeficientes de segurança adequados a cada um deles, atendendo às condições e características específicas da obra.

Até à data o dimensionamento do tipo de estruturas em consideração tem vindo a ser feito adoptando valores de coeficientes de segurança definidos, na maioria dos casos, com reduzido, ou mesmo nenhum suporte técnico-científico.

Com a acção a que se refere este relatório procurou-se contribuir para a melhoria do conhecimento acerca do comportamento global de estruturas reforçadas com geossintéticos, bem como, para o aumento do suporte técnico-científico no que se refere aos valores dos coeficientes de segurança a considerar para os geossintéticos no dimensionamento dessas estruturas, em particular, aos relativos à danificação durante a instalação. Procurou-se atingir este objectivo com base em estudos laboratoriais, envolvendo diferentes tipos de materiais granulares e de geossintéticos.

## **2 DESENVOLVIMENTO DA ACÇÃO**

A sequência de tarefas relativas a esta acção realizadas desde o seu início pode ser resumida da seguinte forma:

1. selecção de geossintéticos de aplicação comum como elementos de reforço de materiais granulares;
2. caracterização mecânica dos geossintéticos não danificados em laboratório (definição da resistência à tracção dos materiais);
3. selecção e caracterização de dois tipos de material granular em que os geossintéticos são confinados (realização de ensaios de identificação);
4. realização de ensaios laboratoriais de danificação de geossintéticos durante a construção, utilizando para cada geossintético em estudo os dois materiais granulares previamente seleccionados;
5. reavaliação em laboratório das características mecânicas referidas em 2 dos geossintéticos danificados.

Nas secções seguintes será feita uma descrição da danificação durante a instalação de geossintéticos e dos seus efeitos nas propriedades mecânicas a curto prazo. As tarefas realizadas serão descritas e, em função dos resultados obtidos, procurar-se-á tirar as conclusões possíveis acerca da influência da danificação dos geossintéticos durante a colocação em obra (induzida em laboratório) no seu comportamento a curto prazo, e daí tirar conclusões em relação à justeza dos valores dos coeficientes empíricos que até à data têm vindo a ser utilizados no dimensionamento de estruturas em que os geossintéticos são aplicados como elementos de reforço. Os resultados obtidos ao longo deste trabalho serão comparados com os resultados correspondentes para a indução em campo dos efeitos da danificação durante a instalação, determinados numa acção de investigação já concluída (Lopes e Pinho Lopes, 2001).

### **3 DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS**

A danificação durante a instalação de geossintéticos resulta essencialmente das operações de colocação e compactação do material de aterro junto aos geossintéticos e das operações de manuseamento destes, podendo resultar em defeitos locais e/ou em alterações das propriedades mecânicas dos geossintéticos.

De facto, as operações de remoção do solo, preparação da superfície, manuseamento e colocação do geossintético, espalhamento e compactação do solo não são suaves e, na maioria dos casos, são realizadas por trabalhadores muito pouco sensíveis à delicadeza destas operações (Greenwood, 1998). Assim, quando os geossintéticos são instalados em obra sofrem danificação mecânica, que, geralmente, é inevitável. Para ultrapassar esta questão é usual escolher um geossintético mais “forte”, em vez de adequar o processo construtivo (Bräu, 1998). Ingold (1994) refere a noção de “sobrevivência” do geossintético, classificando-a como um problema de curto prazo, que pode ser ultrapassado usando geossintéticos suficientemente robustos.

É de notar que este procedimento pode induzir custos significativos na aplicação de geossintéticos, pelo que diversos autores têm procurado avaliar as perdas nas propriedades dos geossintéticos associadas aos processos de instalação em obra. Tal pode ser efectuado recorrendo a:

- a) exumação de amostras de geossintéticos que tenham sido submetidas a condições de instalação (Pinho-Lopes et al., 2002, Lopes e Pinho Lopes, 2001, Fox et al., 1998; Bräu, 1996; Watts e Brady, 1990);
- b) modelação ou simulação em laboratório das condições de instalação (Pinho-Lopes et al., 2002, Pinho Lopes et al., 2000; Elvidge e Raymond, 1999; Bräu, 1996).

Bräu (1998) refere ainda que nos geossintéticos as maiores tensões surgem durante a fase de instalação, que podem resultar em perdas de resistência, efeitos de abrasão, diminuição local da

espessura do material, corte de fibras, abertura e, no pior caso, em desintegração total dos geossintéticos ao longo de uma determinada área.

### ***3.1 Efeito da danificação durante a instalação nas propriedades a curto prazo***

O efeito da danificação durante a instalação nas propriedades dos geossintéticos pode ter consequências várias, incluindo a impossibilidade de os materiais exercerem a função para a qual foram dimensionados. A título de exemplo refira-se que nos Estados Unidos foi já reconhecido que a abrasão e as tensões locais que surgem nos geossintéticos durante a instalação podem danificar significativamente estes materiais, comprometendo a sua capacidade de funcionamento.

No caso de aplicações em que o geossintético funciona como barreira de fluidos, por exemplo, o aparecimento de pequenos cortes poderá não ter efeitos logo após a colocação do material em obra. No entanto, após a entrada em serviço da estrutura, a existência de tensões no geossintético poderá induzir o aumento desses cortes e conseqüentemente dar origem a grandes aberturas. Estes efeitos irão, sem dúvida, fazer com que o material deixe de cumprir a função de barreira de fluidos.

Analisando aplicações em que o geossintético tem a função de filtro e/ou separador verifica-se que a existência de perfurações irá reduzir a eficiência da função. A situação limite de desintegração total do geossintético ao longo de uma determinada área anulará por completo a função do material.

Por outro lado, a redução de resistência induzida nos geossintéticos pela danificação durante a instalação é muito relevante nas aplicações de reforço. De facto, as reduções de resistência passíveis de ocorrer podem mesmo por em causa a estabilidade da obra.

No entanto, de acordo com Greenwood (1998), mesmo com um determinado nível de danificação, a maioria dos geossintéticos pode exercer as suas funções de forma razoável. Nas aplicações dos geossintéticos em reforço de solos a redução de resistência é mais preocupante e deve ser avaliada cuidadosamente.

### ***3.2 Indução da danificação durante a instalação de geossintéticos***

Tal como se referiu, a danificação de geossintéticos durante a instalação (DDI) é um dos factores de redução de resistência mais significativo e decorre, essencialmente, das operações de colocação e compactação do material de aterro junto aos geossintéticos e das operações de manuseamento destes.

Dado que se trata de um fenómeno que ocorre, fundamentalmente, das operações em obra, a DDI de geossintéticos foi em primeiro lugar estudada recorrendo a ensaios de campo, no âmbito da

acção *Danificação Durante a Construção de Geossintéticos - Estudo dos Coeficientes de Segurança a Adoptar*.

Porém, atendendo à morosidade associada aos ensaios de campo e à necessidade de estes serem realizados com os materiais, nomeadamente os solos, que constituirão a estrutura de solo reforçado; e, por outro, a grande variabilidade que está associada aos ensaios de campo (solos usados, equipamento de compactação, energia de compactação, etc.), tem-se procurado definir um ensaio laboratorial que permita avaliar estas questões de forma semelhante. Assim, a comunidade internacional tem procurado definir um procedimento laboratorial simples para a caracterização em laboratório da danificação de geossintéticos durante a instalação. Para tal, a Comissão Técnica (CT) 189 do Comité Europeu de Normalização (CEN), desenvolveu a norma ENV ISO 10722-1.

No decorrer desta acção foi desenvolvido o equipamento para a realização desses ensaios, de acordo com os procedimentos descritos na norma referida. Recorrendo a esse equipamento foram realizados ensaios de danificação durante a instalação sobre vários geossintéticos.

## 4 PLANO DE TRABALHOS

Para caracterizar os efeitos da danificação de geossintéticos durante a instalação nas suas propriedades mecânicas a curto prazo, foi realizada uma campanha de ensaios que está ilustrada na Figura 1.

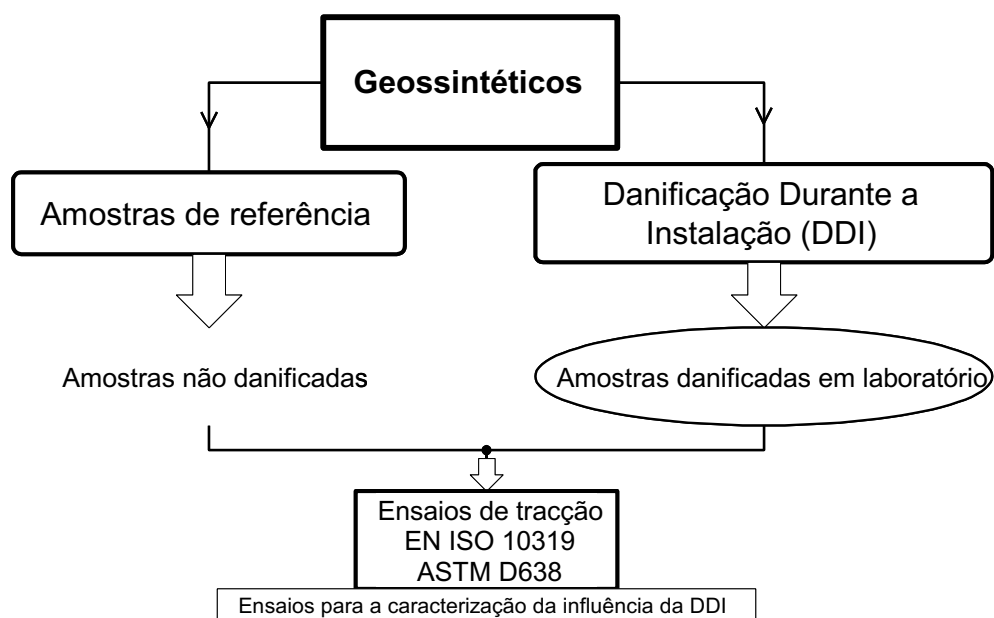


Figura 1 - Representação esquemática do plano de trabalhos realizado.

Como se pode verificar o plano de trabalhos consistiu em:

1. caracterizar o comportamento mecânico a curto prazo dos geossintéticos intactos, usados como referência;

2. proceder à danificação de geossintéticos durante a instalação, através de ensaios laboratoriais;
3. caracterizar o comportamento mecânico a curto prazo dos geossintéticos após danificação;
4. comparar e avaliar os resultados obtidos.

Para os materiais em contacto com os geossintéticos escolheram-se materiais naturais, de granulometrias idênticas, mas com diferentes petrografias. Desta forma, foi possível avaliar a influência do tipo de material granular na danificação dos geossintéticos durante a instalação. Foi também avaliada a influência do tipo de geossintético, através da consideração de diferentes materiais.

Dos 7 tipos de geossintéticos utilizados no trabalho foram danificados inicialmente 5 provetes de cada um com o material granular 1 e com o material granular 2 [(7x5)x2]. Posteriormente, os provetes danificados e 5 provetes intactos de cada um dos geossintéticos (5x7) foram ensaiados à tracção-extensão. Ao todo, realizaram-se 70 ensaios de danificação e 105 ensaios de tracção-extensão.

Nas secções seguintes é feita uma descrição das diferentes fases dos trabalhos.

## **5 MATERIAIS UTILIZADOS**

Os materiais utilizados nesta acção de investigação, nomeadamente os materiais granulares e os geossintéticos, serão descritos de seguida.

### ***5.1 Materiais granulares***

Em obra, o material de aterro ao ser colocado em contacto com o geossintético e posteriormente espalhado, nivelado e compactado desempenha um papel fundamental na danificação dos geossintéticos.

Na simulação laboratorial da danificação de geossintéticos durante a instalação o material granular indicado na ENV ISO 10722-1, enquanto ensaio de conformidade, é um material sintético de óxido de alumínio normalizado. Porém, não tendo como objectivo verificar a conformidade dos geossintéticos, mas sim quantificar a influência de certos parâmetros nos efeitos da DDI, nomeadamente do tipo de material em contacto com os geossintéticos, optou-se por seleccionar dois materiais naturais de granulometria uniforme, com a mesma gama de diâmetros do material granular sintético proposto na ENV ISO 10722-1. A **Figura 2** mostra o aspecto dos dois materiais granulares utilizados neste trabalho.



a)

b)

Figura 2 - Material granular: a) granítico; b) calcário.

Estes materiais apresentam curvas granulométricas (Figura 3), desgaste e petrografia distintas. Um deles é granítico, com partículas de dimensões que variam entre 12,50mm e 2,00mm (Figuras 2a e 3) e com uma perda por desgaste no ensaio de Los Angeles de 28,0%; o outro é calcário, com partículas de dimensões que variam entre 19,00mm e os 4,75mm (Figuras 2b e 3) e com uma perda por desgaste no ensaio de Los Angeles de 19,3%.

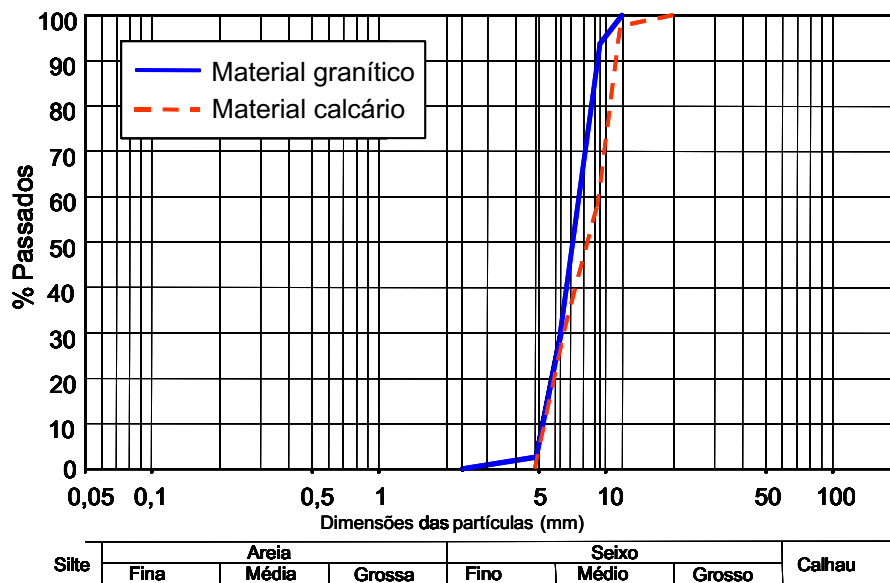


Figura 3 - Curvas granulométricas dos materiais granulares.

O Quadro 1 indica algumas características dos materiais granulares utilizados, nomeadamente, o diâmetro máximo,  $D_{máx}$ , mínimo,  $D_{mín}$ , os diâmetros  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{60}$ , o coeficiente de uniformidade,  $C_u$  e o coeficiente de curvatura,  $C_c$ .

Os coeficientes têm a seguinte definição:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2)$$

Quadro 1: Características dos materiais granulares.

Materiais granulares	D <sub>min</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>30</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>máx</sub>	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
	(mm)							
Granítico	2,00	5,20	6,30	7,10	7,75	12,5	1,49	0,98
Calcário	4,75	5,30	6,60	8,70	9,60	19	1,81	0,86

Ambos os materiais apresentam valores do coeficiente de uniformidade próximos da unidade e do coeficiente de curvatura inferiores à unidade, o que indica tratar-se de materiais de granulometria uniforme. As diferenças fundamentais entre eles têm a ver com a natureza petrográfica e com a resistência ao desgaste no ensaio de Los Angeles.

Para diminuir o efeito do desgaste e do esmagamento do material granular nos resultados dos ensaios de danificação, após 5 utilizações procedeu-se à sua peneiração, seguida da rejeição do material passado no peneiro com abertura de malha 4,75mm. Ao fim de 30 utilizações, o material foi posto de parte.

## 5.2 Geossintéticos

Um dos objectivos deste trabalho é a avaliação da influência do tipo e da estrutura dos geossintéticos na danificação destes materiais durante a instalação. Assim foram seleccionados geossintéticos com estruturas diferentes (**Figura 4**), nomeadamente: geogrelhas extrudidas (uniaxial e biaxial), geogrelha tecida biaxial, geotêxteis (tecido e não tecido agulhado), geomembranas (lisa e rugosa).

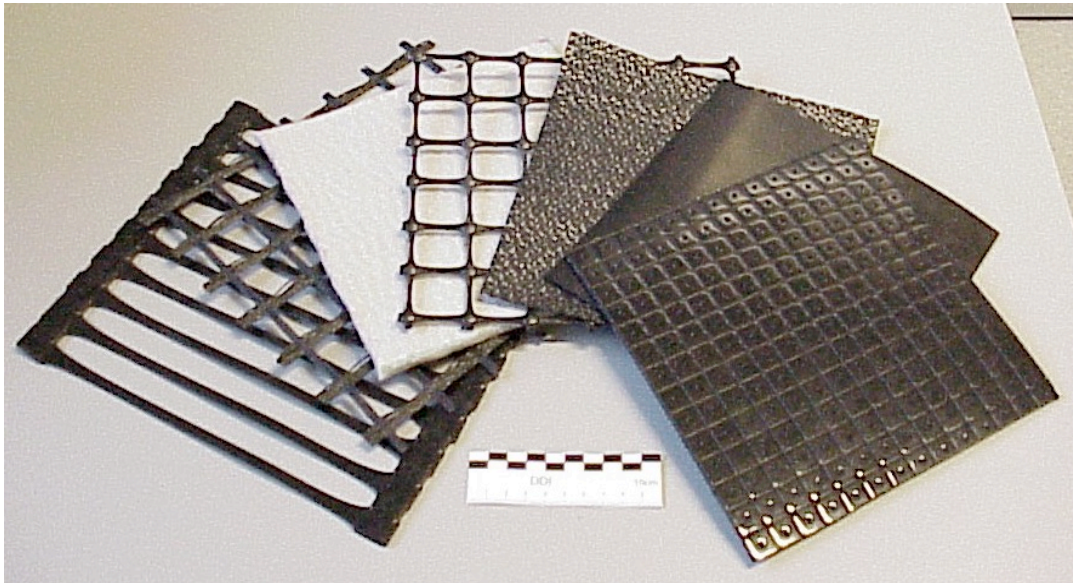
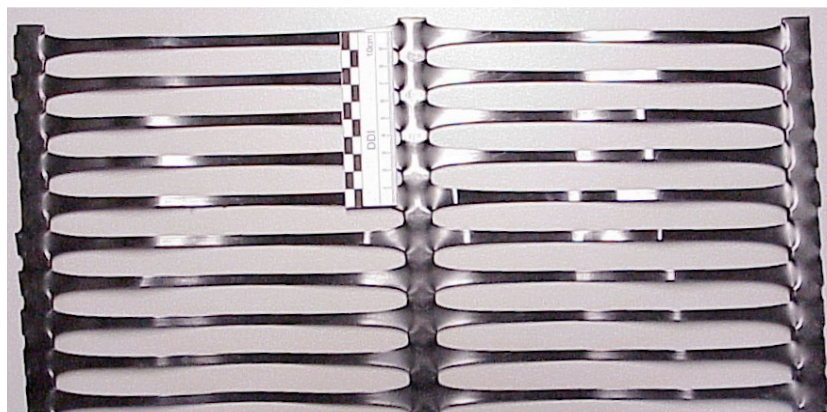


Figura 4 - Geossintéticos usados neste estudo.

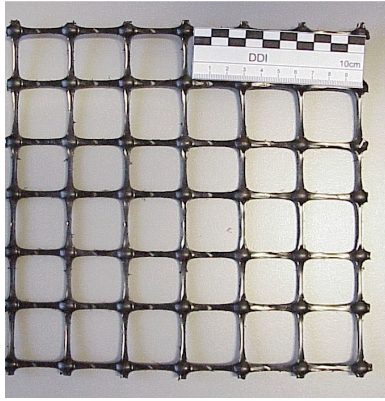
Os valores dos parâmetros mecânicos indicados ao longo das secções seguintes são definidos na direcção de fabrico dos geossintéticos, uma vez que a influência da danificação durante a construção no comportamento dos materiais foi estudada apenas nessa direcção por, normalmente, coincidir em obra com a direcção de actuação das maiores acções.

### 5.2.1 Geogrelhas

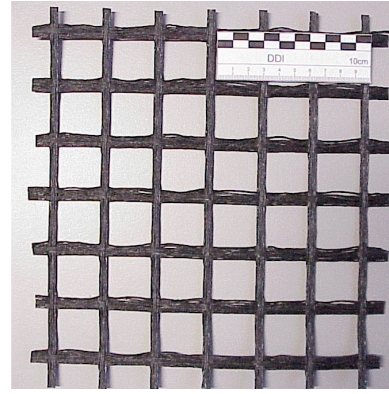
No estudo utilizaram-se três tipos de geogrelhas (**Figura 5**) uma extrudada uniaxial em polietileno de alta densidade (GGeu), outra extrudada biaxial em polipropileno (GGeb) e finalmente uma tecida biaxial em polietileno (GGtb).



a)



b)



c)

Figura 5 - Geogrelhas: a) extrudada uniaxial (GGeu); b) extrudada biaxial (GGeb); c) tecida biaxial (GGtb).

As geogrelhas foram ensaiadas à tracção-extensão a curto prazo, de acordo com a EN ISO 10319, estando indicados no Quadro 2 os valores médios obtidos para a resistência à tracção e para a extensão na rotura. A Figura 6 mostra as curvas tracção-extensão das amostras de referência das geogrelhas ensaiadas.

Quadro 2: Resistência à tracção e extensão na rotura das geogrelhas.

Geogrelhas	Resistência à Tracção (kN/m)	Extensão na Rotura (%)
GGeu	57,36	13,83
GGeb	45,91	14,83
GGtb	66,05	21,07

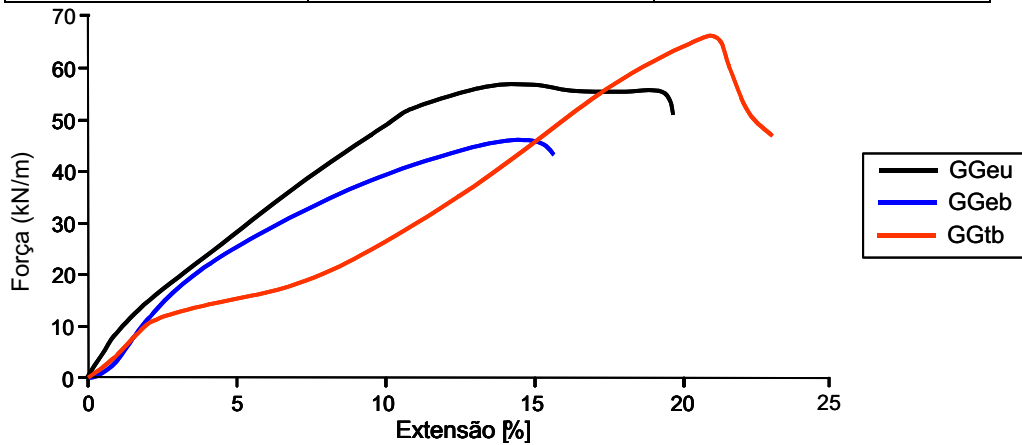


Figura 6 - Curvas tracção-extensão das geogrelhas.

As Figuras 7 e 8 e os Quadros 3 e 4 mostram, respectivamente, as características geométricas das geogrelhas extrudadas uniaxial e biaxial.

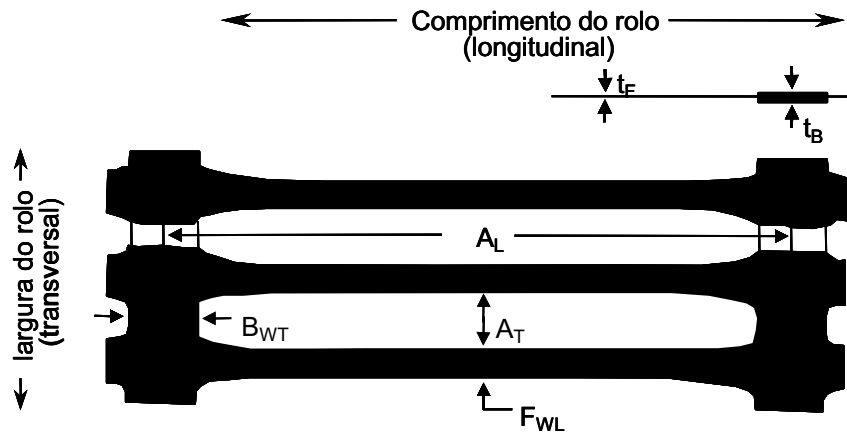


Figura 7 - Geometria da geogrelha uniaxial.

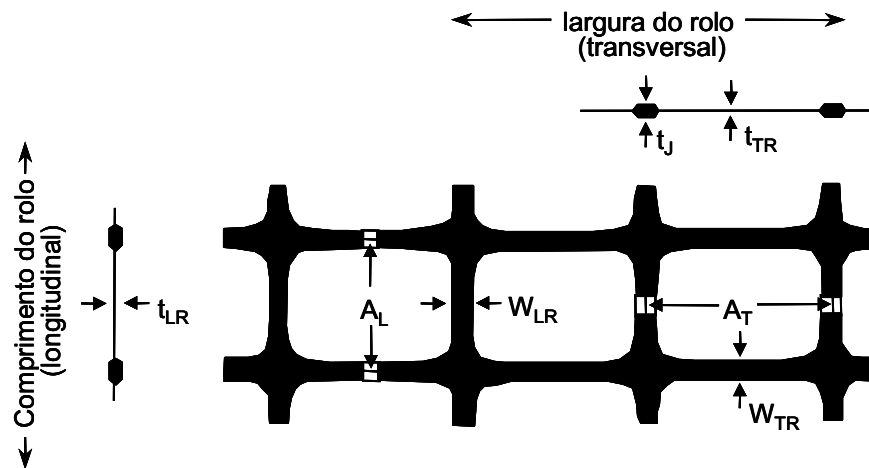


Figura 8 - Geometria da geogrelha biaxial.

Quadro 3: Características geométricas da geogrelha extrudada uniaxial (GGeu).

	$A_L$	$A_T$	$B_{WT}$	$F_{WL}$	$t_B$	$t_F$
	(mm)					
GGeu	235	16	16	6	2,5-2,7	0,9

Quadro 4: Características geométricas da geogrelha extrudada biaxial (GGeb).

	$A_L$	$A_T$	$W_{LR}$	$W_{TR}$	$t_J$	$t_{LR}$	$t_{TR}$
	(mm)						
GGeb	33	33	2,2	2,5	5,8	2,2	1,4

## 5.2.2 Geotêxteis

Para o estudo seleccionaram-se dois tipos de geotêxteis (ver Figura 9a e b). Um geotêxtil não tecido em polipropileno (GTnt), com massa por unidade de área de 800g/m<sup>2</sup> e com valores médios de resistência à tracção e de extensão na rotura a curto prazo, respectivamente de 50,11kN/m e

111,94% e um geotêxtil tecido em polipropileno (GTt), com massa por unidade de área de 320g/m<sup>2</sup> e valores médios de resistência à tracção e de extensão na rotura a curto prazo, respectivamente de 68,97kN/m e 14,89%.

A **Figura 9c** mostra as curvas tracção-extensão das amostras de referência, obtidas de acordo com os procedimentos prescritos na EN ISO 10319, dos dois geotêxteis considerados.

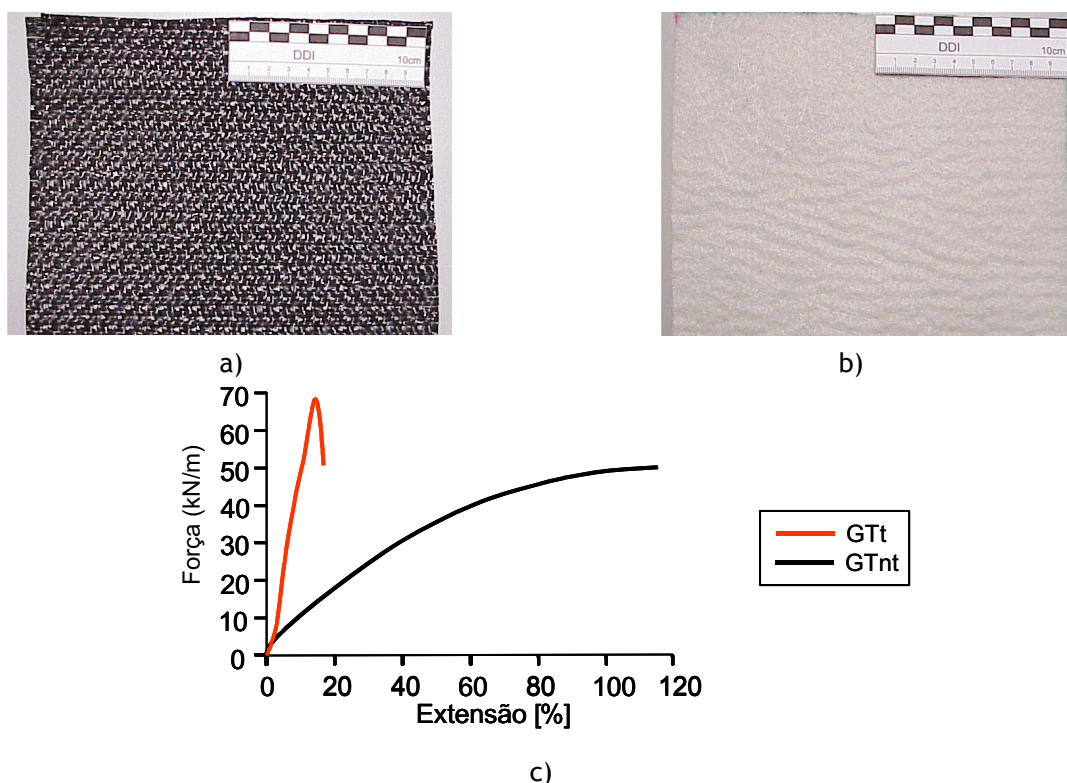


Figura 9 - Geotêxteis: a) tecido (GTt); b) não tecido agulhado (GTnt); c) curvas tracção-extensão.

### 5.2.3 Geomembranas

As geomembranas utilizadas ao longo do trabalho (ver **Figura 10a e b**) são em polietileno de alta densidade, uma lisa (GML) com 1,5mm de espessura e outra rugosa (pitonada) (GMr) com 2mm de espessura.

As geomembranas foram ensaiadas à tracção-extensão, de acordo com a norma ASTM D638, obtendo-se para a resistência à tracção e para a extensão na rotura valores médios de 20,18N/mm<sup>2</sup> e 447,42%, para geomembrana lisa, e de 16,43N/mm<sup>2</sup> e 331,5%, para a geomembrana rugosa.

Na **Figura 10c**, apresentam-se as curvas de tensão-extensão das duas geomembranas. Como se pode constatar da figura, o comportamento tensão-extensão das geomembranas é um pouco distinto do observado para os geotêxteis e para as geogrelhas (ver **Figuras 6 e 9c**). Com efeito, ao contrário do que acontece para estes últimos geossintéticos, nas geomembranas observa-se um pico indicativo da cedência do material para extensões relativamente reduzidas, após a cedência a tensão diminui com um aumento ligeiro da extensão, seguindo-se a extensão do material sob tensão constante

(fase plástica do material). Finalmente, dá-se endurecimento do material, aumentando a tensão e a extensão até à rotura.

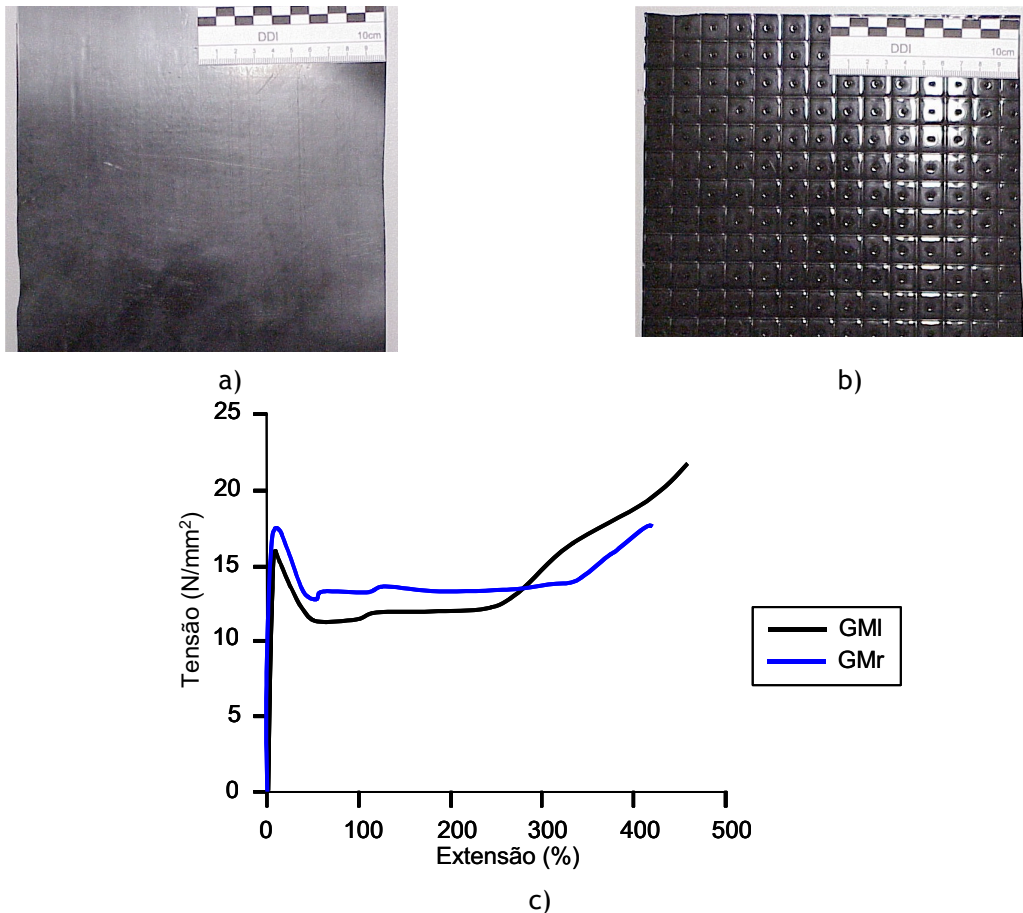


Figura 10 - Geomembranas: a) lisa (GMI); b) rugosa (GMr); c) curvas tensão-extensão.

Assim, nas geomembranas há que distinguir dois parâmetros de resistência fundamentais, a tensão de cedência do material que surge para extensões relativamente baixas e a tensão de rotura que ocorre para grandes extensões (superiores a 300%).

Aquando da aplicação destes materiais em obras de engenharia, importa considerar a tensão para pequenas extensões - tensão de cedência - uma vez que as grandes extensões de rotura das geomembranas e as deformações admissíveis nas estruturas são incompatíveis.

Pela razão apresentada, no caso das geomembranas definiu-se, para além da tensão e extensão na rotura a tensão e a extensão na cedência, sendo os valores médios destes últimos parâmetros, respectivamente, 15,88N/mm<sup>2</sup> e 7,74%, para a geomembrana lisa, e 17,43 N/mm<sup>2</sup> e 10,35%, para a geomembrana rugosa.

## 6 INDUÇÃO LABORATORIAL DA DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO DE GEOSINTÉTICOS

Os procedimentos do ensaio laboratorial de danificação durante a instalação (DDI) de geossintéticos encontram-se descritos na ENV ISO 10722-1 (Geotextiles and geotextile-related products - Procedure for simulating damage during installation - Part 1: Installation in granular materials).

De acordo com a norma referida, o provete de geossintético é colocado entre duas camadas de um agregado e submetido a uma carga dinâmica durante um determinado intervalo de tempo. Em seguida, o provete é retirado do equipamento de ensaio, é examinado, para que se detecte alguma danificação visual, e é submetido a um ensaio de referência, mecânico ou hidráulico, para se avaliarem as alterações nas propriedades mecânicas ou hidráulicas, respectivamente. O resultado é expresso pela resistência retida que traduz a variação (em percentagem) do valor da propriedade de referência, devendo ser também incluída no relatório do ensaio a descrição da danificação visual observada.

### 6.1 Equipamento

Seguindo as indicações da ENV ISO 10722-1, o equipamento de ensaio deve ser uma máquina de compressão que possa ser controlada de forma a produzir na placa de carregamento uma carga sinusoidal variando entre  $900 \pm 10\text{kPa}$  e  $5 \pm 5\text{kPa}$ , com uma frequência de 1Hz.

A caixa de danificação deve ser metálica e rígida, fabricada em aço, com dimensões internas mínimas de 300mm por 300mm em planta. Deve consistir de duas partes com 75mm de altura cada. Essas duas partes que constituem a caixa de danificação devem ser aparafusadas ou fixas por encaixe durante o ensaio. A parte inferior da caixa deve ser montada sobre uma base rígida.

A placa de carregamento deve ter as dimensões: 100mm por 200mm. Deve ser construída em aço ou alumínio e ter rigidez adequada para que possa transmitir ao agregado as cargas, sem se deformar.

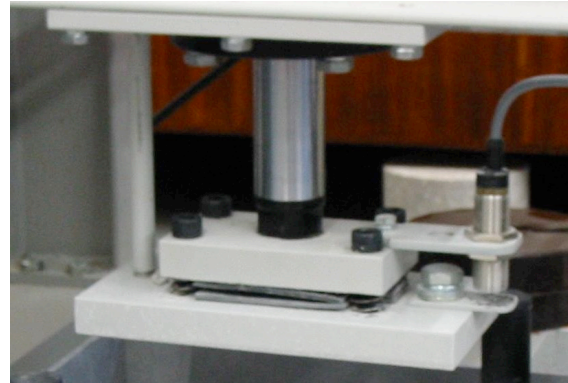
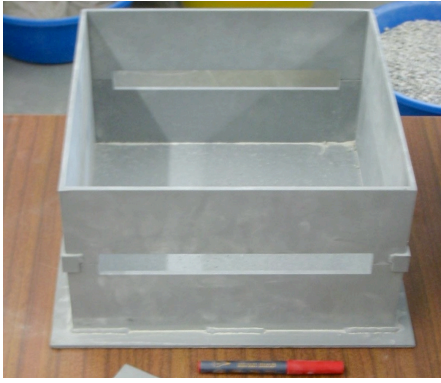
O equipamento, desenvolvido na FEUP, para a realização de ensaios laboratoriais de DDI de geossintéticos ( **Figura 11**) teve como base as orientações contidas na ENV ISO 10722-1 e destina-se a realizar uma acção de compressão cíclica em que se submete uma amostra a um conjunto de ciclos de carga, entre uma carga mínima (pré-definida) e uma carga máxima programável. O tempo de ciclo pode ser ajustável, pelo utilizador, sendo no entanto afectado pelas características de rigidez da amostra. A solução implementada compreende uma estrutura metálica de suporte, um sistema hidráulico de accionamento com dois actuadores, e um quadro eléctrico para realizar o comando de todo o sistema.



Figura 11 - Aspecto geral do equipamento de ensaio laboratorial de danificação de geossintéticos (ENV ISO 10722-1) - vistas gerais da estrutura de suporte sem e com caixa de danificação posicionada.

A caixa de danificação (que contém o material e o geossintético a danificar) é constituída por placas de aço com 5mm de espessura e está dividida em duas partes. As dimensões interiores de cada uma delas são 300mm x 300mm em planta e altura de 75mm, o que conduz a uma altura total de 150mm (ver **Figura 12a**). As duas partes são fixas por encaixe e por aplicação da carga. Para realizar o ensaio a caixa deve ser colocada sobre uma base rígida.

A placa de carregamento (ver **Figura 12b**), fabricada em aço, tem dimensões de 100mm x 200mm e uma espessura de 15mm. Este elemento foi concebido de forma a não se deformar por aplicação das cargas de ensaio.



a) b)  
Figura 12 - a) Caixa de danificação; b) placa de carregamento.

## 7 CARACTERIZAÇÃO DA DANIFICAÇÃO MECÂNICA DOS GEOSINTÉTICOS

Tal como já foi referido, a caracterização dos efeitos da danificação mecânica induzida nos geossintéticos estudados através de ensaios laboratoriais de danificação durante a instalação, foi realizada recorrendo a ensaios para avaliação das propriedades mecânicas a curto prazo destes materiais, ou seja, a ensaios de tracção.

De realçar, que este relatório se refere à caracterização da danificação dos geossintéticos a curto prazo, não só porque esta é, por si só, um bom indicador da danificação destes materiais, mas também devido a morosidade dos ensaios de longo prazo (fluência) dos geossintéticos, quer intactos, quer danificados.

### 7.1 Ensaios de tracção

Para determinar a resistência à tracção dos geossintéticos foram realizados ensaios de acordo com os procedimentos descritos na EN ISO 10319 (*Geotextiles - Wide-width tensile test*), em amostras de geossintéticos com 200mm de largura. Para cada material estudado foram ensaiados à tracção 5 provetes, registando-se o valor da força máxima medida e a correspondente extensão.

No caso das geomembranas, os ensaios de tracção foram realizados de acordo com a norma ASTM D638.

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

Na **Figura 13**, apresenta-se o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de tracção-extensão dos diferentes geossintéticos.



Figura 13 - Equipamento de ensaio de tracção.

Nas secções seguintes são apresentados os resultados dos ensaios de tracção dos geossintéticos intactos (de referência) e danificados em laboratório. Os resultados são apresentados em termos de valores médios da força de tracção e da extensão na rotura, indicando-se os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação. É também apresentado o comportamento tracção-extensão médio de cada geossintético, quer intacto, quer danificado.

### 7.1.1 Resultados obtidos

Nos Quadros 5, 6 e 7 apresentam-se os resultados dos ensaios de tracção obtidos para os diferentes geossintéticos não danificados (de referência) (Quadro 5) e danificados com os materiais granítico (Quadro 6) e calcário (Quadro 7).

Para uma melhor visualização das diferenças no comportamento a curto prazo dos geossintéticos, os resultados indicados nos Quadros 5 a 7, são também apresentados em termos de resistência retida pelos geossintéticos danificados, isto é, em termos de percentagem da resistência à tracção do material intacto (Quadro 8).

Quadro 5: Resultados de ensaios de tracção das amostras de referência.

ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319)		Amostras de referência					
		Força máxima			Extensão para a força máxima (%)		
Material		Média (kN/m)	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
GTnt	Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m <sup>2</sup> )	50,11	2,66	5,3	111,94	1,85	1,7
GTt	Geotêxtil Tecido em PP (320g/m <sup>2</sup> )	68,97	1,44	2,1	14,89	0,27	1,8
GGeb	Geogrelha Extrudida Biaxial em PP	45,91	0,68	1,5	14,83	0,94	6,3
GGtb	Geogrelha Tecida Biaxial em PET	66,05	3,76	5,7	21,07	1,29	6,1
GGeu	Geogrelha Extrudida Uniaxial em PEAD	57,36	0,76	1,3	13,83	1,58	11,4
ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638)		Tensão de cedência			Extensão na cedência		

Material					%		
		Média (N/mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
GML	Geomembrana Lisa	15,88	0,24	1,5	7,74	0,01	0,1
GMr	Geomembrana Rugosa	17,43	0,39	2,2	10,35	0,77	7,4

Quadro 6: Resultados de ensaios de tracção das amostras danificadas (material granítico).

ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319)		Amostras danificadas – Material granítico					
		Força máxima			Extensão para a força máxima (%)		
Material		Média (kN/m)	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
GTnt	Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m <sup>2</sup> )	38,85	3,65	9,4	109,33	6,99	6,4
GTt	Geotêxtil Tecido em PP (320g/m <sup>2</sup> )	44,63	1,86	4,2	10,99	0,67	6,1
GGeb	Geogrelha Extrudida Biaxial em PP	43,67	1,26	2,9	15,57	1,58	10,1
GGtb	Geogrelha Tecida Biaxial em PET	53,35	3,94	7,4	21,07	1,74	8,3
GGeu	Geogrelha Extrudida Uniaxial em PEAD	56,74	0,88	1,5	11,77	0,27	2,3
ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638)		Tensão de cedência			Extensão na cedência (%)		
Material		Média (N/mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
GMI	Geomembrana Lisa	14,77	0,17	1,2	7,75	0,01	0,1
GMr	Geomembrana Rugosa	15,87	0,41	2,6	10,24	0,46	4,5

Quadro 7: Resultados de ensaios de tracção das amostras danificadas (material calcário).

ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319)		Amostras danificadas - Material calcário					
		Força máxima			Extensão para a força máxima (%)		
Material		Média (kN/m)	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)
GTnt	Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m <sup>2</sup> )	44,16	1,34	3,0	111,32	6,78	6,0
GTt	Geotêxtil Tecido em PP (320g/m <sup>2</sup> )	51,88	1,98	3,8	13,29	0,37	2,8
GGeb	Geogrelha Extrudida Biaxial em PP	45,51	0,92	2,0	16,54	0,97	5,9
GGtb	Geogrelha Tecida Biaxial em PET	59,43	1,6	2,7	22,49	1,61	7,2
GGeu	Geogrelha Extrudida Uniaxial em PEAD	57,13	1,21	2,1	13,12	1,85	14,1
ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638)		Tensão de cedência			Extensão na cedência (%)		
Material		Média (N/mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão	Coef. variação (%)	Média	Desvio padrão	Coef. variação (%)

GMI	Geomembrana Lisa	14,95	0,29	1,9	8,07	0,71	8,8
GMr	Geomembrana Rugosa	16,13	0,47	2,9	10,46	0,68	6,5

Quadro 8: Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório.

ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319)		Resistência nominal em kN/m	Resistência retida (em %) das amostras danificadas em laboratório	
			Material granítico	Material calcário
Material		DM/DTM		
GTnt	Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m <sup>2</sup> )	50	77,53	88,13
GTt	Geotêxtil Tecido em PP (320g/m <sup>2</sup> )	65/65	64,71	75,22
GGeb	Geogrelha Extrudida Biaxial em PP	40/40	95,12	99,13
GGtb	Geogrelha Tecida Biaxial em PET	55/55	80,77	89,98
GGeu	Geogrelha Extrudida Uniaxial em PEAD	55	98,92	99,60
ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638)			Material granítico	Material calcário
Material		N/mm <sup>2</sup>		
GMI	Geomembrana Lisa	21	93,01	94,14
GMr	Geomembrana Rugosa	28	91,05	92,54

A Figura 14 representa graficamente a informação constante no Quadro 8. Assim, verifica-se que a resistência retida nos geossintéticos danificados varia dentro de uma gama larga (64,7% a 99,6%).

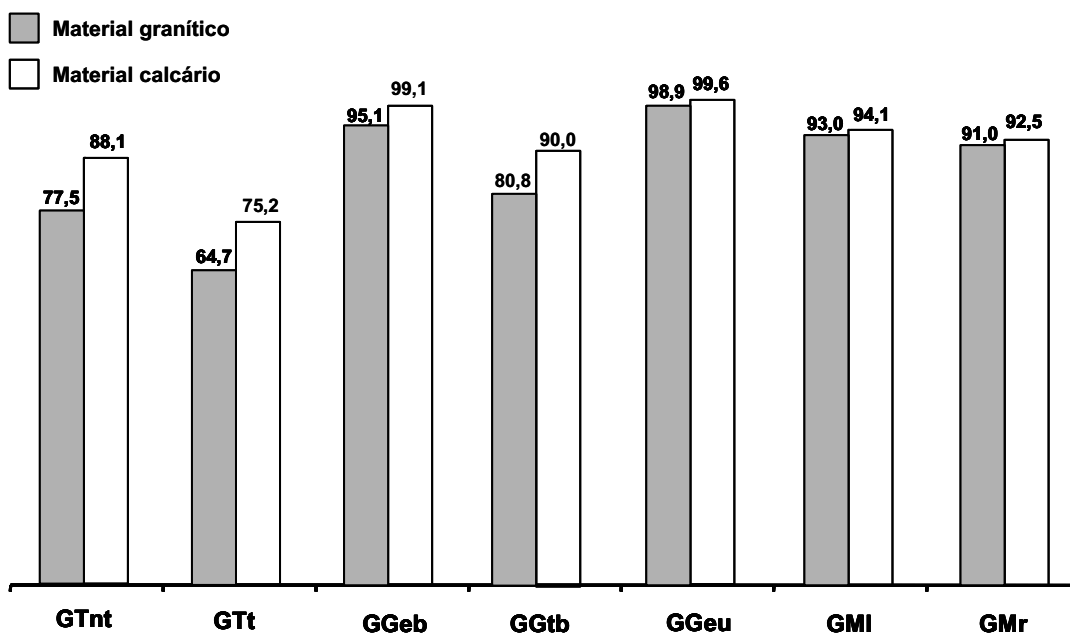


Figura 14 - Resistência retida (em %) nos geossintéticos danificados em laboratório.

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

No Quadro 9 e na Figura 15 é apresentado o coeficiente de variação da resistência à tracção das amostras de geossintéticos de referência e danificadas laboratorialmente.

Quadro 9: Coeficiente de variação da resistência à tracção de amostras de referência e danificadas em laboratório.

ENSAIOS DE TRACÇÃO (EN ISO 10319)		Resistência nominal em kN/m	Coeficiente de variação da resistência à tracção (em %)		
			Referência	Material granítico	Material calcário
Material		DM/DTM			
GTnt	Geotêxtil não Tecido em PP (800g/m <sup>2</sup> )	50	5,3	9,4	3,0
GTt	Geotêxtil Tecido em PP (320g/m <sup>2</sup> )	65/65	2,1	4,2	3,8
GGeb	Geogrelha Extrudida Biaxial em PP	40/40	1,5	2,9	2,0
GGtb	Geogrelha Tecida Biaxial em PET	55/55	5,7	7,4	2,7
GGeu	Geogrelha Extrudida Uniaxial em PEAD	55	1,3	1,5	2,1
ENSAIOS DE TRACÇÃO (ASTM D638)				Material granítico	Material calcário
Material		N/mm <sup>2</sup>			
GMI	Geomembrana Lisa	21	1,5	1,2	1,9
GMr	Geomembrana Rugosa	28	2,2	2,6	2,9

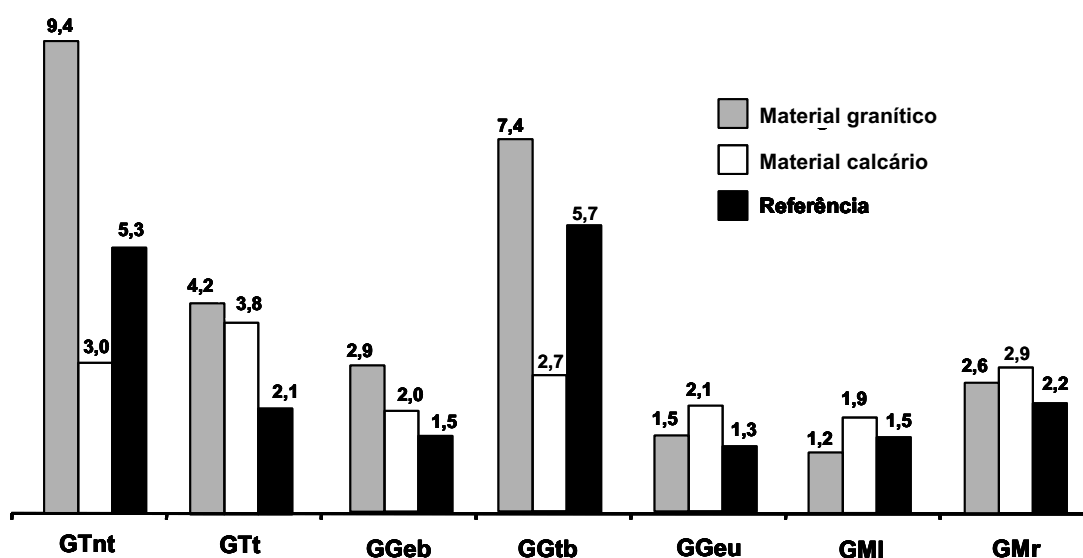


Figura 15 - Coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção dos geossintéticos.

Constata-se, em geral, uma grande dispersão nos valores do coeficiente de variação da resistência à tracção, o que atendendo a que todos os geossintéticos foram danificados nas mesmas condições, com cada um dos materiais granulares confinantes, significa que os diferentes geossintéticos respondem com mecanismos de danificação distintos.

O coeficiente de variação dos materiais de referência é, genericamente baixo e inferior ao das amostras danificadas laboratorialmente (**Figura 15**). Verifica-se, de um modo geral, que quando os geossintéticos são danificados com o material granítico (aquele que conduz a uma maior redução de resistência) se registam os coeficientes de variação mais elevados.

Nas secções seguintes procurar-se-á realçar a influência de alguns factores, tais como, o tipo e estrutura do geossintético e o tipo de material confinante na danificação durante a instalação dos geossintéticos.

### 7.1.2 Influência do tipo de geossintético

No estudo da influência do tipo e da estrutura do geossintético na danificação durante a instalação induzida em laboratório, optou-se por considerar apenas os resultados dos ensaios de danificação efectuados com o material granítico, uma vez que, como se verá mais adiante, é com este tipo de solo que ocorrem os danos mais gravesos.

#### 7.1.2.1 Geogrelhas

Na **Figura 16** estão representados os valores da resistência retida e do coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das três geogrelhas consideradas no estudo (GGeu, GGeb e GGtb).

Verifica-se que resistência retida nas geogrelhas danificadas é elevada (**Figura 16a**). A geogrelha tecida (GGtb) é a que apresenta menor resistência (80,8%), isto é, maior sensibilidade à danificação durante a instalação. Porém, apesar disso, o coeficiente de segurança parcial, para atender à danificação durante a instalação é de apenas 1,19. Para as geogrelhas extrudidas biaxial (GGeb) e uniaxial (GGeu) o coeficiente de segurança parcial é ainda mais baixo; 1,05 e 1,01, respectivamente. Em resumo, pode-se concluir que a danificação durante a instalação das geogrelhas estudadas é pouco determinante na sua resistência à tracção a curto prazo.

É nas geogrelhas danificadas que se registam os valores mais elevados do coeficiente de variação para resistência à tracção (**Figura 16b**), logo maior variação nos resultados obtidos para este parâmetro. Este coeficiente varia na razão inversa da resistência retida, sendo praticamente coincidente com o do material de referência para a GGeu, geogrelha que evidencia uma resistência retida de 98,9%.

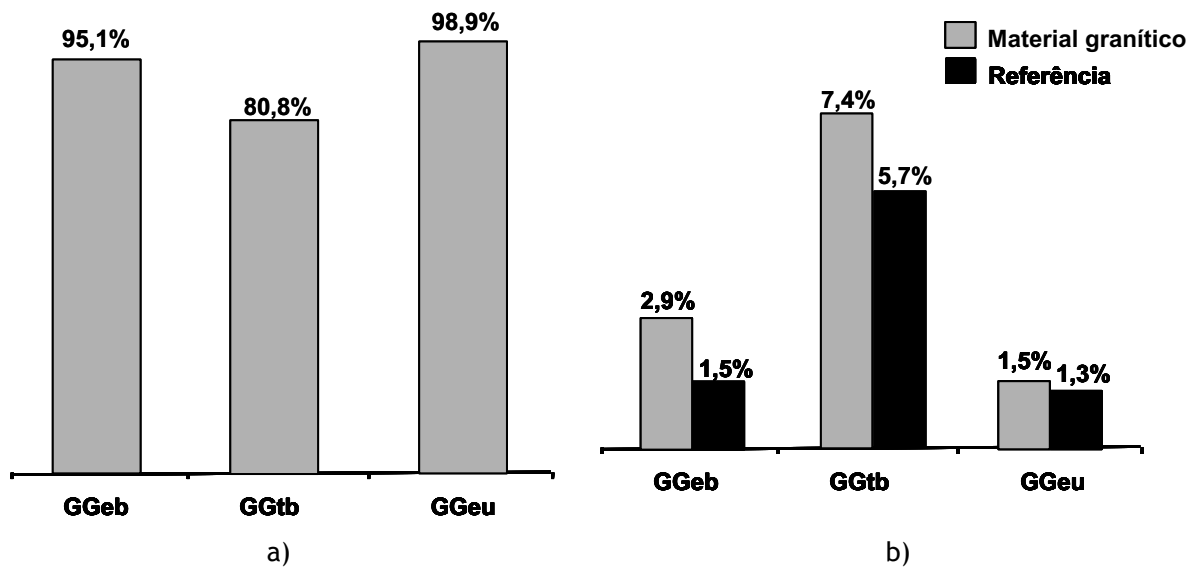


Figura 16 - Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

A **Figura 17** compara as curvas de tracção-extensão das geogrelhas danificadas com as das geogrelhas de referência. Pode-se observar que a danificação provoca pouca variação na rigidez das geogrelhas.

A extensão na rotura da geogrelha uniaxial danificada diminui significativamente (anulando-se o comportamento elásto-plástico da geogrelha intacta), passando o material a ter um comportamento mais próximo do das outras duas geogrelhas. Como já foi referido anteriormente, a alteração mais significativa na resistência à tracção dá-se na geogrelha tecida danificada (-19,2% do que a do material intacto), provavelmente devido à maior susceptibilidade à danificação das juntas deste material. Com efeito, enquanto nesta geogrelha as juntas são tecidas, nas outras duas geogrelhas as juntas são integrais, isto é mais rígidas e resistentes.

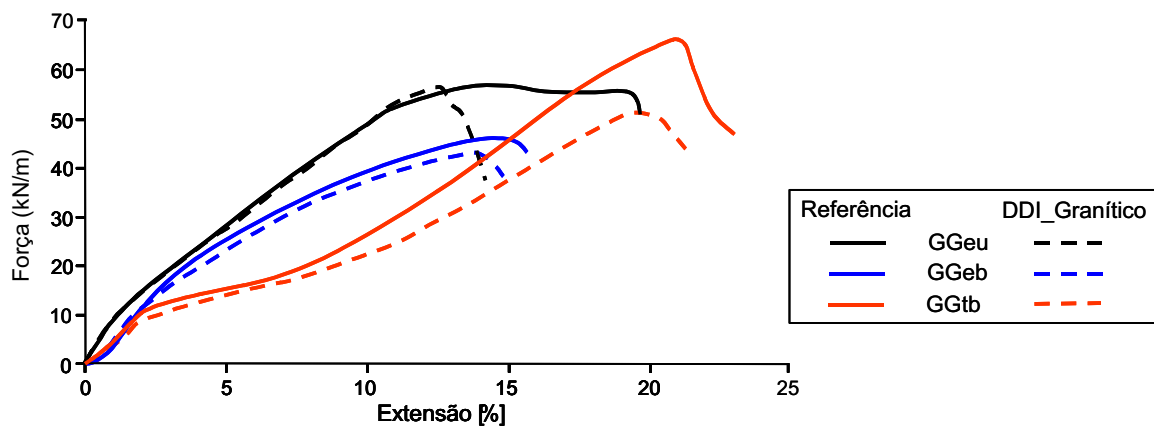


Figura 17 - Curvas tracção-extensão das geogrelhas.

### 7.1.2.2 Geotêxteis

Apresenta-se na **Figura 18a** a resistência retida nos dois geotêxteis estudados; geotêxtil não tecido (GTnt) e geotêxtil tecido (GTt) em PP. Verifica-se que os geotêxteis apresentam valores de

resistência retida mais baixos do que as geogrelhas, o que denuncia uma maior sensibilidade das estruturas tecida e não tecida dos geotêxteis à danificação durante a instalação. O coeficiente de segurança parcial a aplicar à resistência do material intacto para atender à danificação durante a instalação é da ordem de 1,3 para o geotêxtil não tecido e de 1,5 para o geotêxtil tecido.

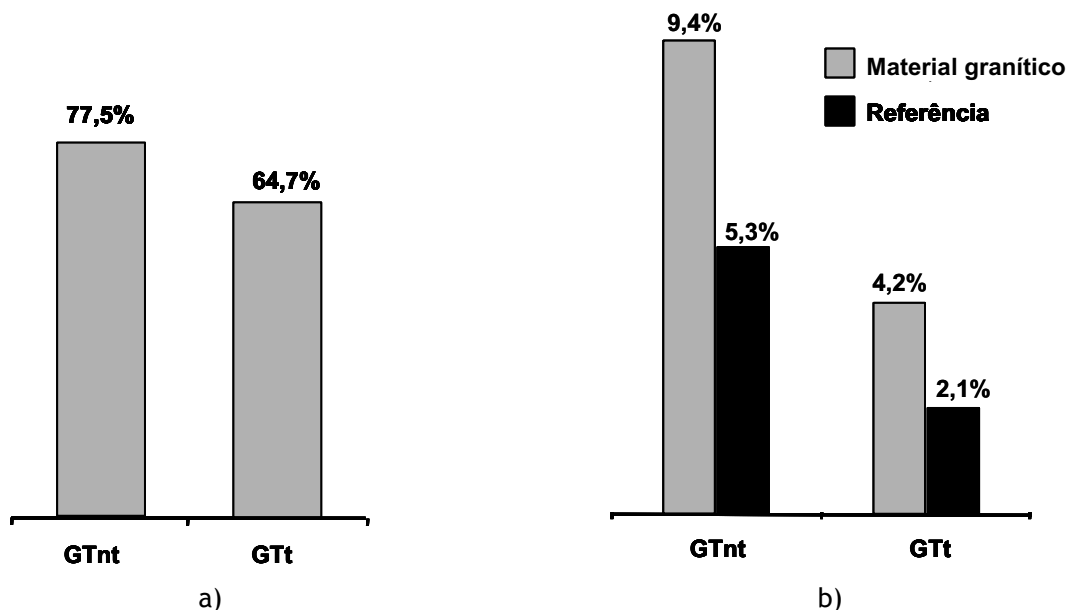


Figura 18 - Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

Tal como no caso das geogrelhas, o coeficiente de variação dos geotêxteis danificados é mais elevado do que o dos materiais intactos (Figura 18b), realçando, uma vez mais, uma maior gama de variação nos resultados obtidos quando os materiais estão danificados.

Porém, os maiores coeficientes de variação mais elevados referem-se ao geotêxtil não tecido (intacto e danificado), embora a resistência retida neste material danificado seja maior do que no geotêxtil tecido em idênticas condições. Assim, verifica-se que este parâmetro expressa também a influência do processo de fabrico dos geotêxteis, uma vez que este origina uma estrutura mais heterogénea para os geotêxteis não tecidos, não sendo, por isso, de estranhar que estes geossintéticos apresentem um coeficiente de variação da resistência à tracção mais elevado do que os geotêxteis tecidos.

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

As curvas tracção-extensão dos dois geotêxteis intactos e danificados são comparadas na **Figura 19**. Verifica-se que o geotêxtil tecido apresenta uma pequena redução da rigidez quando danificado, associada à redução da resistência e extensão na rotura. As médias da resistência e da extensão na rotura do material danificado são, respectivamente, cerca de 35,3% e 26,2% menores do que quando intacto.

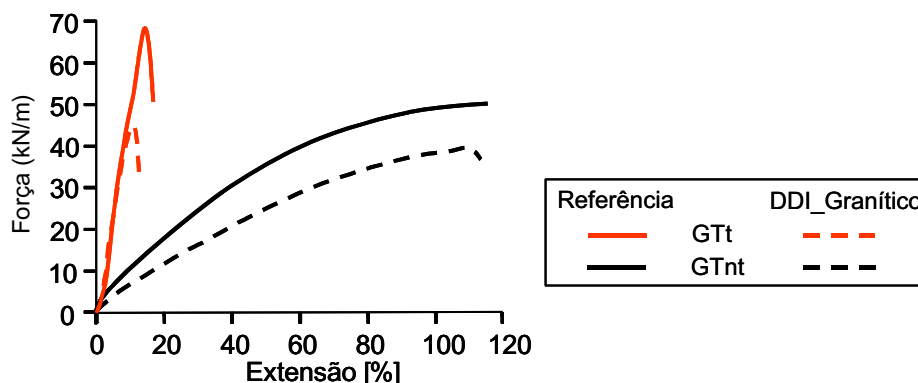


Figura 19 - Curvas tracção-extensão dos geotêxteis.

O geotêxtil não tecido danificado torna-se mais deformável, mantendo-se praticamente inalterada a extensão na rotura (diminui cerca de 2,3%) e diminuindo a resistência.

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

### 7.1.2.3 Geomembranas

A **Figura 20**, representa a resistência retida e o coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das duas geomembranas danificadas com agregado granítico.

Como foi mencionado atrás, no caso das geomembranas a resistência à tracção e a resistência retida no material danificado referem-se à tensão de cedência.

A resistência retida nos dois materiais danificados é elevada (superior a 90% em ambos - ver **Figura 20a**), sendo reduzida a alteração do coeficiente de variação da resistência à tracção com a danificação (**Figura 20b**). O bom comportamento observado deve-se à estrutura contínua das geomembranas. De facto, ao contrário do que acontece com os geotêxteis e as geogrelhas (em especial, a geogrelha tecida), em que a estrutura dos geossintéticos é formada pela ligação de componentes individuais, que se danificam, propiciando a danificação progressiva dos materiais, as geomembranas são folhas contínuas de polímeros, sem poros visíveis.

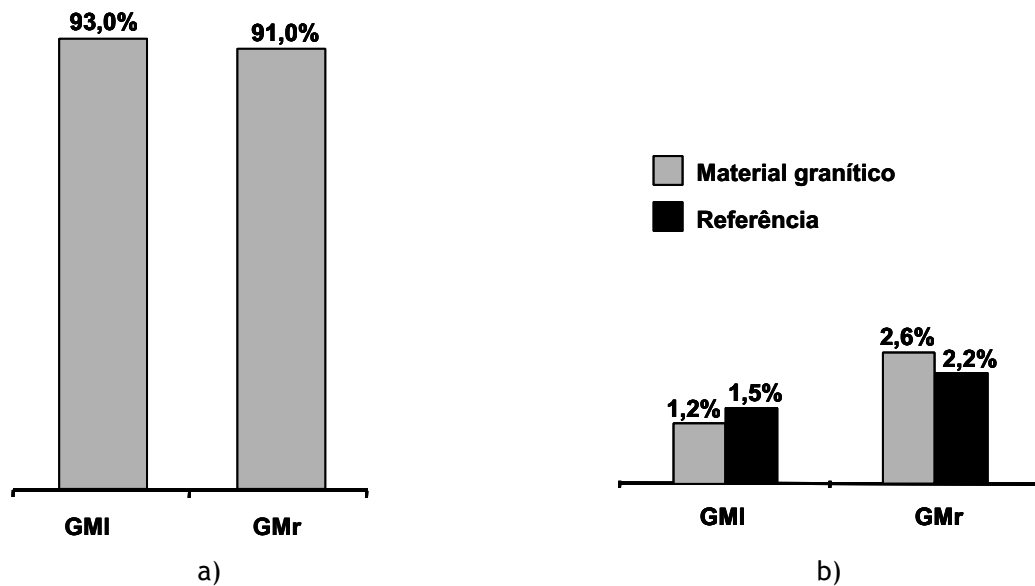


Figura 20 - Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

A **Figura 21** mostra o comportamento tensão-extensão das geomembranas antes e depois da danificação.

Verifica-se que a inclinação na fase elástica da curva tensão-extensão dos materiais danificados é praticamente coincidente com a dos intactos, a tensão de cedência diminui, após a cedência as curvas são qualitativamente idênticas às dos materiais intactos.

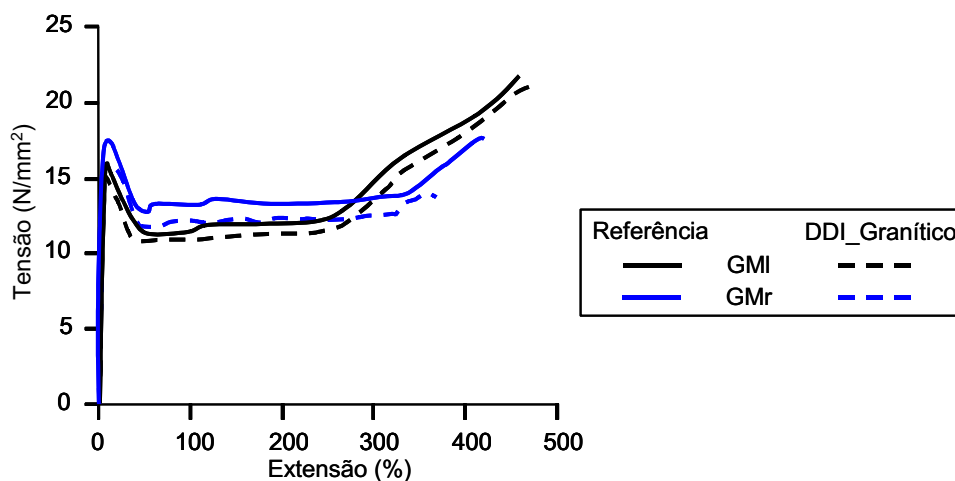


Figura 21 - Curvas tensão-extensão das geomembranas.

#### 7.1.2.4 Nota Final

Com base nas análises efectuadas ao longo de 7.1.2 constata-se que a estrutura do geossintético é responsável pelo grau de sensibilidade do material à danificação durante a instalação. Dos geossintéticos considerados aqueles que evidenciaram maior susceptibilidade a esta acção foram os geotêxteis, que apresentaram reduções da resistência à tracção em consequência da

danificação da ordem dos 30% a 40%. As geomembranas e as geogrelhas danificadas evidenciaram reduções menores (da ordem dos 10%) do mesmo parâmetro.

O comportamento tracção-extensão dos três tipos de geossintéticos é distinto entre si. Para cada tipo de geossintético observam-se diferenças nas curvas tracção-extensão dos materiais intactos e danificados (ver **Figuras 17, 19 e 21**).

### 7.1.3 Influência do Tipo de Material Confinante na Danificação

O tipo de material de aterro pode ter influência significativa na danificação durante a instalação dos geossintéticos (Lopes e Pinho-Lopes, 2001). Com o objectivo de avaliar a influência do tipo de material confinante dos geossintéticos na danificação destes utilizaram-se dois materiais granulares naturais distintos em petrografia e resistência ao desgaste.

#### 7.1.3.1 Geogrelhas

A **Figura 22** apresenta a resistência retida e o coeficiente de variação da resistência à tracção para as três geogrelhas (GGeu, GGeb, GGtb) danificadas com os materiais granulares calcário e granítico.

O material calcário induz reduzida danificação nas geogrelhas, tal como comprova a elevada resistência retida (superior a 90%) nestes geossintéticos (**Figura 22a**). Quando é utilizado o material granítico a danificação é mais acentuada, em especial na geogrelha tecida, que apresenta uma resistência retida cerca de 10% menor do que quando o material confinante é calcário.

O coeficiente de variação (em %) da resistência à tracção das geogrelhas extrudidas danificadas é baixo, no entanto superior ao obtido para os materiais intactos (**Figura 22b**). Para a geogrelha tecida danificada a variação do valor do coeficiente de variação é menos consistente, uma vez que é cerca de 1,3 e 0,5 vezes o do material intacto, respectivamente quando a danificação se dá em contacto com os materiais granítico e calcário.

A **Figura 23** mostra as curvas tracção-extensão das geogrelhas intactas e danificadas com os materiais calcário e granítico.

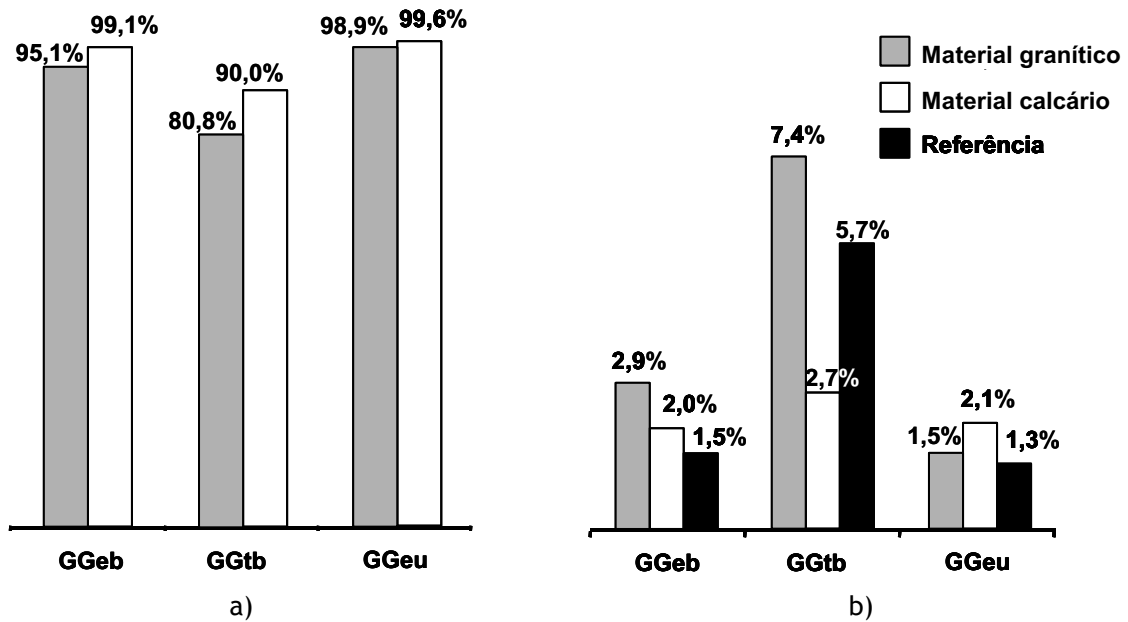


Figura 22 - Geogrelhas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

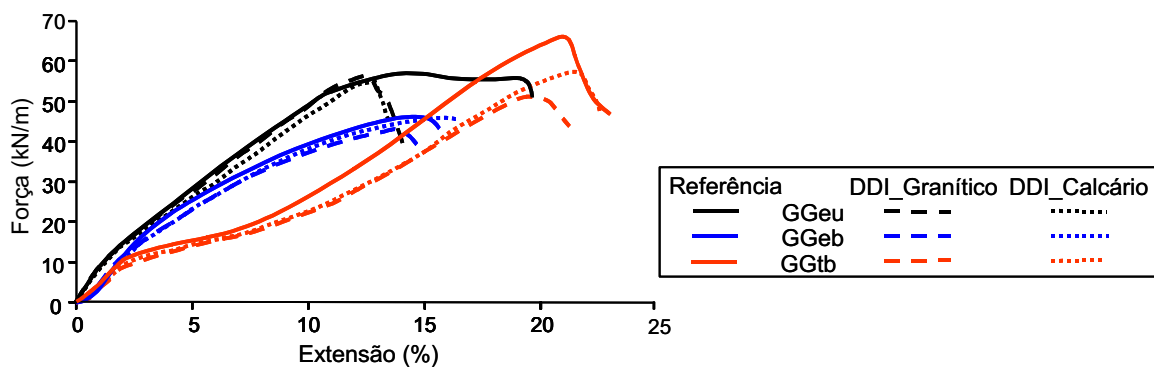


Figura 23 - Curvas tracção-extensão das geogrelhas.

Constata-se que, em geral, o comportamento tracção-extensão das geogrelhas danificadas com o material calcário se encontra entre os observados quando intactas e danificadas com o material granítico. Ambos os materiais granulares induzem redução da deformação na rotura da geogrelha extrudida uniaxial. A menor danificação provocada pelo material calcário resulta, fundamentalmente, da menor angulosidade das partículas que o constituem (em relação às do material granítico) decorrente da natureza petrográfica.

### 7.1.3.2 Geotêxteis

Tal como para as geogrelhas a danificação induzida pelo material calcário nos geotêxteis é menor do que a provocada pelo material granítico (ver Figura 24a). As resistências retidas nos geotêxteis tecido e não tecido são, respectivamente, 75,2% e 88,1%, isto é cerca de 12% e 14% superior, do que quando o material envolvente é granítico.

A resistência à tracção dos geotêxteis danificados com o material granítico apresentam maiores coeficientes de variação (em %) (Figura 24b) do que quando danificados com o material calcário ou intactos.

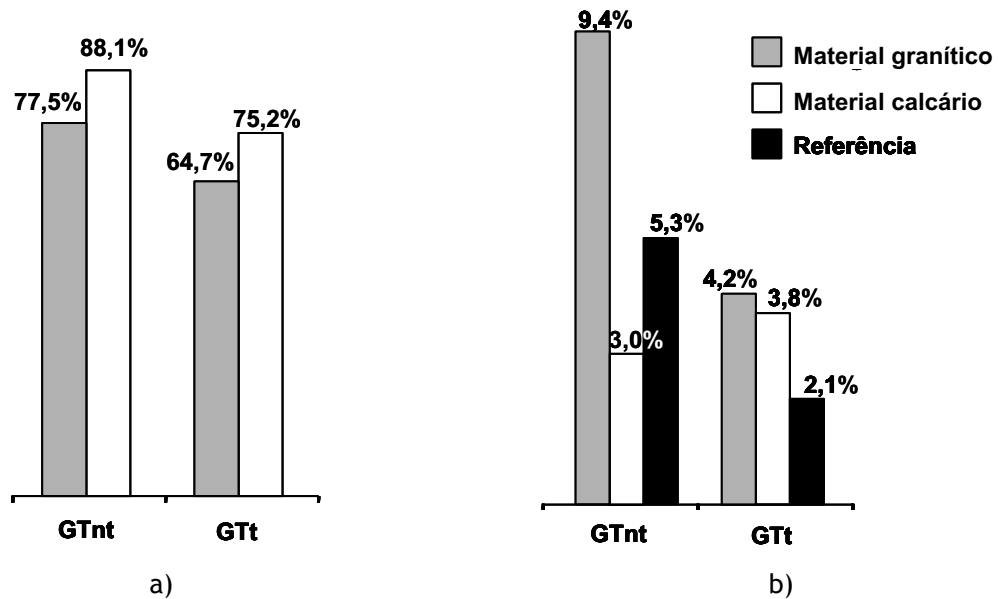


Figura 24 - Geotêxteis: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

Do mesmo modo que para as geogrelhas, observa-se que o comportamento tracção-extensão dos geotêxteis danificados com o material calcário se encontra entre os correspondentes aos geossintéticos intactos e danificados com o material granítico (Figura 25).

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

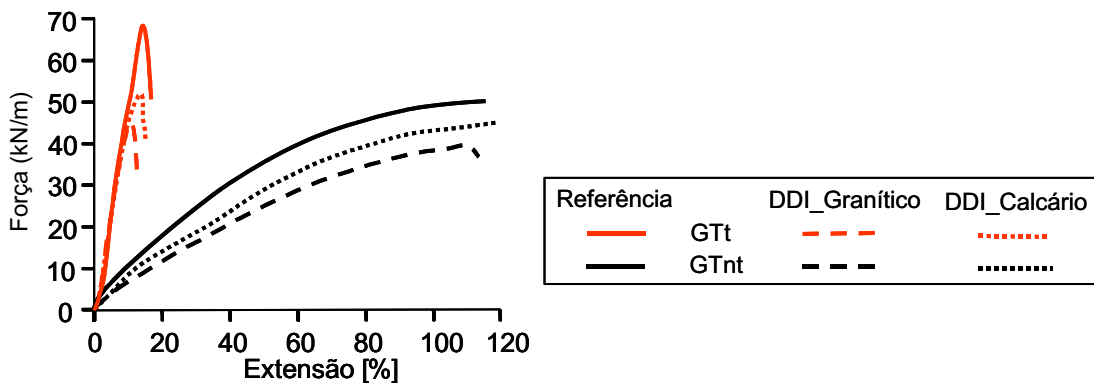


Figura 25 - Curvas tracção-extensão dos geotêxteis.

### 7.1.3.3 Geomembranas

Nas geomembranas as diferenças causadas pela danificação dos materiais granulares granítico e calcário são mínimas (1,1% e 1,5%, respectivamente para a lisa e para a rugosa) (Figura 26). O coeficiente de variação apresenta valores baixos para ambos os materiais granulares.

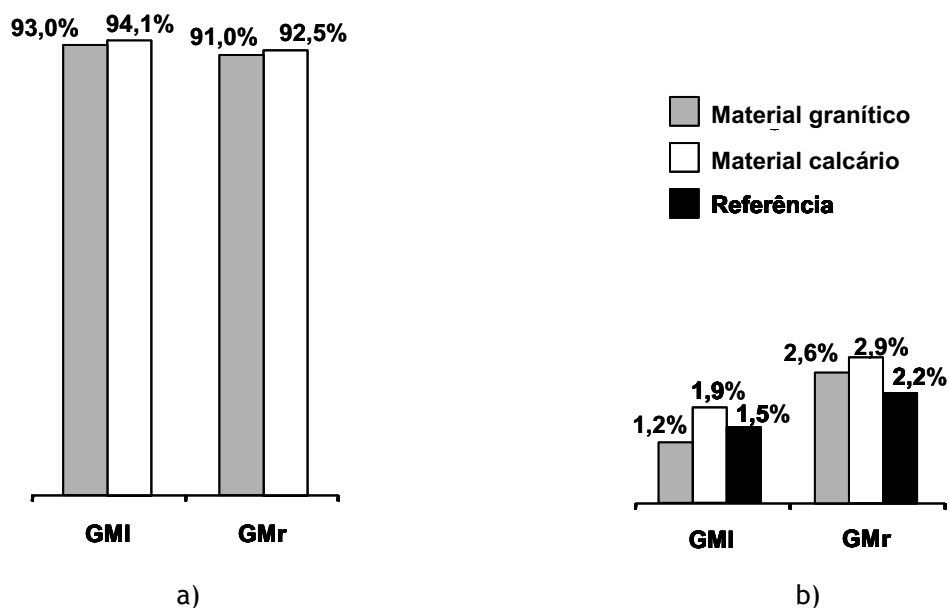


Figura 26: Geomembranas: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

O comportamento tracção-extensão das geomembranas denota a pouca influência do tipo de material confinante na danificação durante a construção destes materiais (Figura 27), sendo as curvas correspondentes ao comportamento do material danificado praticamente coincidentes.

Importa realçar que a principal função das geomembranas é actuar como barreira a fluidos, função que não exige como propriedade fundamental a resistência à tracção, mas sim as relacionadas com a integridade do material, como as resistências ao rasgamento e ao punçoamento. Assim, para este geossintético, em particular, o estudo exaustivo da susceptibilidade à danificação durante a instalação deverá envolver a avaliação das resistências retidas ao punçoamento e ao rasgamento. Porém, não sendo as geomembranas um geossintético correntemente usado em obras de estradas considerou-se que tais estudos saem fora dos objectivos do presente trabalho, razão pela qual não foram desenvolvidos.

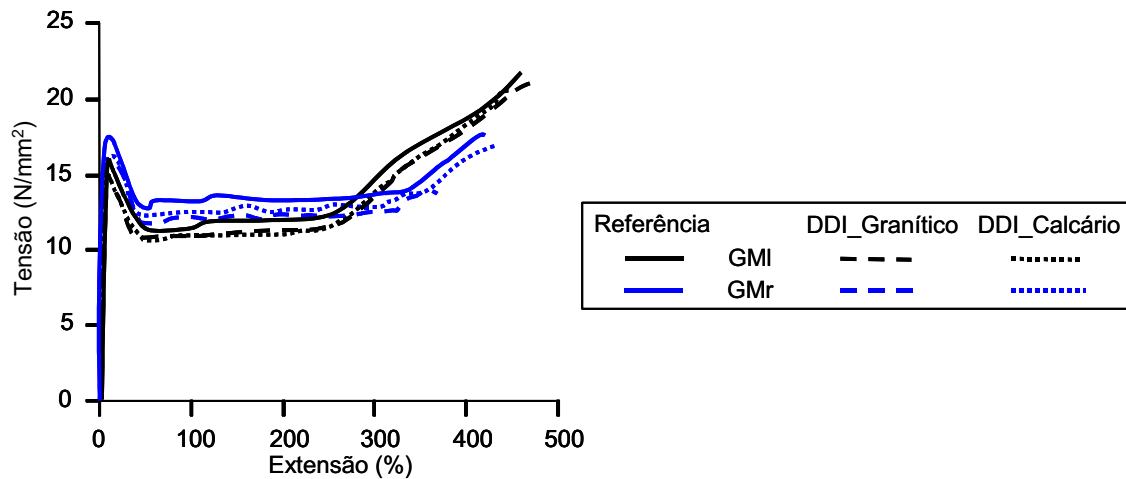


Figura 27 - Curvas tensão-extensão: a) geomembrana lisa; b) geomembrana rugosa.

#### 7.1.3.4 Nota Final

O estudo da influência do tipo de material granular na danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório realça a menor agressividade do material calcário decorrente da menor angulosidade das suas partículas constituintes. Para ambos os materiais granulares mantém-se a influência da estrutura do geossintético constatada em 7.1.2.

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

## 7.2 Análise Comparativa dos Resultados Obtidos com Ensaios de Campo

### 7.2.1 Simulação de Campo Versus Simulação Laboratorial

Considerando os mesmos geossintéticos e seguindo procedimentos laboratoriais de controlo da danificação durante a instalação idênticos aos utilizados no presente trabalho, Lopes e Pinho-Lopes (2001) procederam à simulação da danificação durante a instalação dos geossintéticos *in situ*, através da construção de aterros experimentais com dois materiais granulares reais, utilizando técnicas correntes de compactação e de controlo da mesma. São os resultados do estudo publicado pelas autoras que serão comparados de seguida com os do presente estudo.

### 7.2.2 Descrição Resumida da Metodologia de Danificação de Campo

Era objectivo fundamental do estudo desenvolvido por Lopes e Pinho-Lopes (2001) avaliar a influência do tipo de solo e da energia utilizada na compactação dos mesmos na danificação real

dos geossintéticos durante a instalação. Para tal, realizaram aterros experimentais sobre panos de geossintéticos, utilizando dois tipos de solo distintos (Solos 1 e 2 da **Figura 28**), um deles tipo tout-venant de granito (Solo 1) e o outro um solo residual do granito (Solo 2).

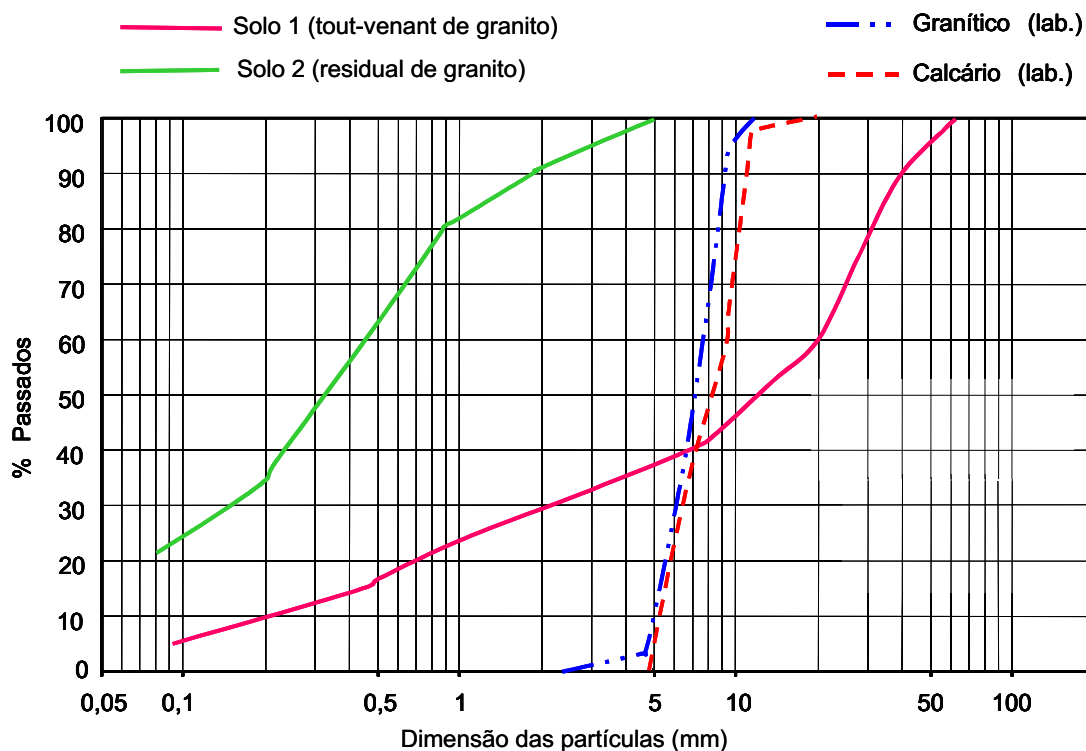


Figura 28 - Curvas granulométricas dos materiais confinantes dos geossintéticos utilizados nos ensaios de danificação de campo e de laboratório.

As características principais dos materiais granulares estão indicadas no Quadro 10. As energias de compactação aplicadas a cada um dos materiais granulares foram de 90% e 98%.

Quadro 10: Caracterização laboratorial dos Solos 1 e 2.

Materiais	Granulometria	Limites			W <sub>n</sub> (%)	EA (%)	Proctor	
	(%<0,074mm)	LL	LP	NP			γ <sub>dmax</sub>	W <sub>opt</sub>
							g/cm <sup>3</sup>	(%)
Solo 1	5,18	NP	NP	NP	-	57,40	2,11	7,80
Solo 2	21,53	NP	NP	NP	8,70	25,50	1,92	11,30

Os procedimentos de execução dos aterros provisórios seguiram uma boa prática de instalação e, portanto, inevitáveis em qualquer obra em que materiais deste tipo sejam utilizados. Uma descrição mais detalhada dos procedimentos adotados pode ser encontrada em Lopes e Pinho Lopes (2001).

### 7.2.3 Análise Comparativa dos Resultados

A análise comparativa da danificação de campo e laboratorial induzida aos geossintéticos vai ser feita, como até aqui, em termos de resistência à tracção retida. Para facilitar a comparação, do ponto de vista granulométrico, dos materiais granulares utilizados, na **Figura 28** apresentam-se, para além dos materiais granulares aplicados nos estudos de danificação campo os considerados nos estudos de danificação laboratorial.

A **Figura 29** apresenta a resistência à tracção retida nos três geossintéticos em consideração após a danificação de campo e laboratorial.

Observa-se uma grande variedade de valores para a resistência retida nos geossintéticos danificados em campo e no laboratório. De facto, registam-se valores para o parâmetro em causa variáveis entre 34% e 99%.

Com o objectivo de facilitar, quer a apresentação, quer a análise dos resultados obtidos, optou-se por apresentar em separado o comportamento à danificação de cada geossintético considerado.

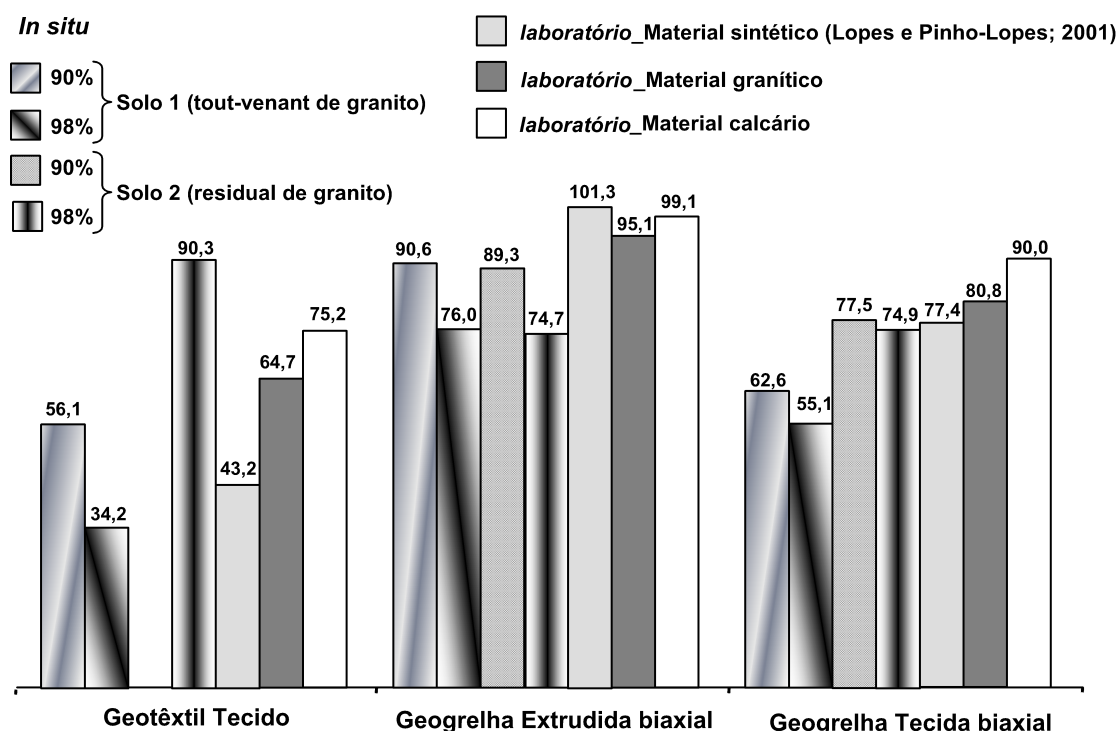


Figura 29 - Resistência retida (em %) dos geossintéticos danificados no campo e em laboratório.

#### 7.2.3.1 Geotêxtil tecido (GTt)

A **Figura 30** apresenta a resistência à tracção retida no geotêxtil tecido danificado no campo e em laboratório (em %) e o coeficiente de variação (em %) dessa resistência. De referir que por

motivos incontornáveis (desaparecimento do material armazenado no estaleiro) não foi possível danificar o geotêxtil no campo com o Solo 2 para o grau de compactação de 90%.

Verifica-se que a danificação *in situ* provocada pelo solo residual do granito (Solo 2) no geotêxtil tecido é significativamente menor do que a provocada pelos outros materiais granulares utilizados, mesmo para o grau de compactação mais elevado (98%). A principal razão para o comportamento observado tem a ver com a dimensão dos grãos do solo. Com efeito, a dimensão máxima dos grãos do Solo 2 é de cerca de 5mm, enquanto que o Solo 1 contém cerca de 60% de partículas maiores do que este valor e os materiais granulares usados em laboratório são constituídos praticamente na totalidade por grãos com dimensão superior a 5mm. Por isso, não é de estranhar a menor agressividade do solo residual ao geossintético. Assim, para materiais com as características granulométricas do Solo 2 constata-se que os resultados dos ensaios laboratoriais fornecem valores muito conservativos. Os valores laboratoriais mais próximos dos registados *in situ* foram obtidos com o material calcário (cerca de 17% do lado da segurança).

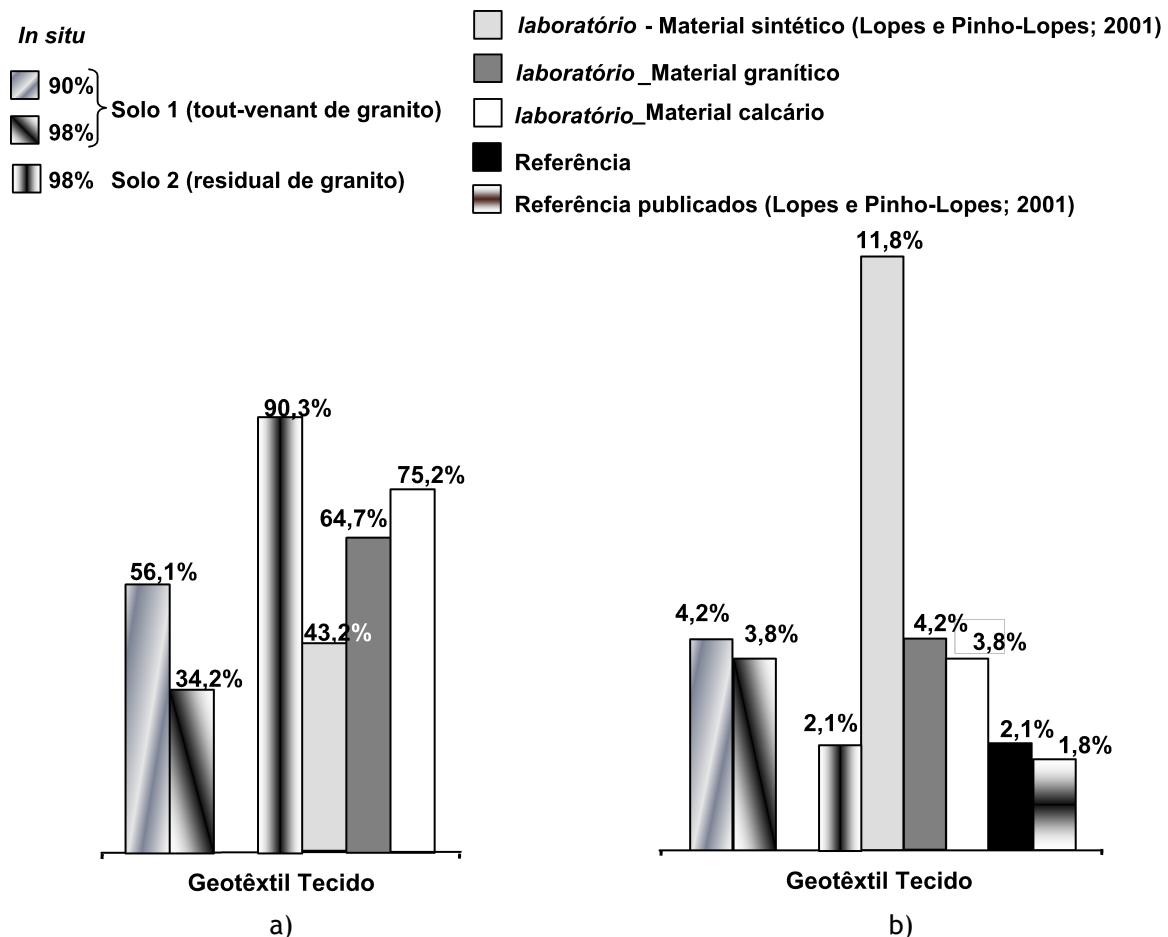


Figura 30 - Geotêxtil tecido: a) resistência retida; b) Coeficiente de variação.

Quando o material de aterro apresenta uma percentagem de partículas grossas significativa, tal como o Solo 1, a fiabilidade dos ensaios laboratoriais na previsão da danificação causada no geotêxtil tecido pelo tout-venant tem a ver com o grau de compactação. Com efeito, embora para os valores do grau de compactação considerados os ensaios laboratoriais forneçam valores do lado

da insegurança para a danificação durante a instalação do geotêxtil, o grau de insegurança aumenta com o aumento do grau de compactação. Assim, verifica-se que mesmo utilizando o material granítico nos ensaios laboratoriais (aquele que origina valores mais próximas dos observados nos ensaios de campo) os valores calculados para a danificação do geotêxtil durante a instalação estão cerca de 15% e 89% do lado da insegurança, respectivamente para os graus de compactação de 90% e 98%.

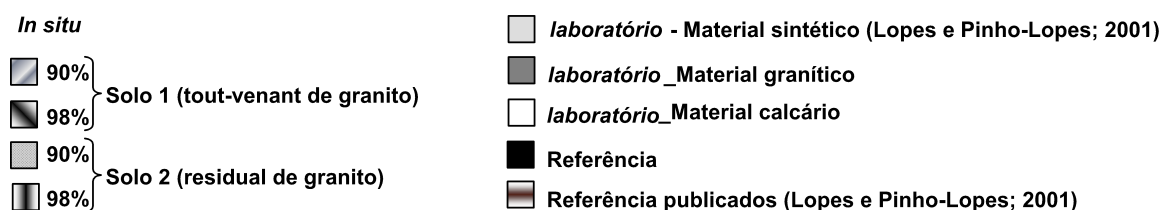
O coeficiente de variação da resistência à tracção (**Figura 30b**) do geotêxtil danificado *in situ* com o tout-venant (Solo 1) é maior do que quando é danificado em laboratório com o solo residual do granito.

Em resumo, constata-se que a danificação induzida no geotêxtil tecido quando o material de aterro apresenta características granulométricas e litológicas semelhantes às do Solo 2 pode ter correspondência com os resultados laboratoriais desde que se utilize o material calcário nestes ensaios. Porém, o mesmo não se verifica quando o material de aterro apresenta características granulométricas e litológicas idênticas às do Solo 1, em especial quando o grau de compactação exigido é elevado.

### 7.2.3.2 Geogrelha extrudida biaxial (GGeb)

A danificação *in situ* da geogrelha extrudida é mais gravosa do que a registada em laboratório, seja qual for, neste último caso, o material confinante utilizado (**Figura 31a**). A diferença entre os resultados de campo e os laboratoriais aumenta com o grau de compactação do material de aterro. Os valores laboratoriais mais próximos dos de campo são obtidos quando o material confinante é o granítico, mesmo assim cerca de 5% e 25% mais optimistas, respectivamente para graus de compactação de 90% e de 98%.

De referir que a estrutura da geogrelha extrudida faz com que a influência do grau de compactação do material de aterro na danificação do geossintético diminua. De facto, para esta geogrelha a redução da resistência retida quando o grau de compactação do tout-venant passa de 90% a 98% é de cerca de 16%, enquanto que no geotêxtil tecido essa redução é de 39%.



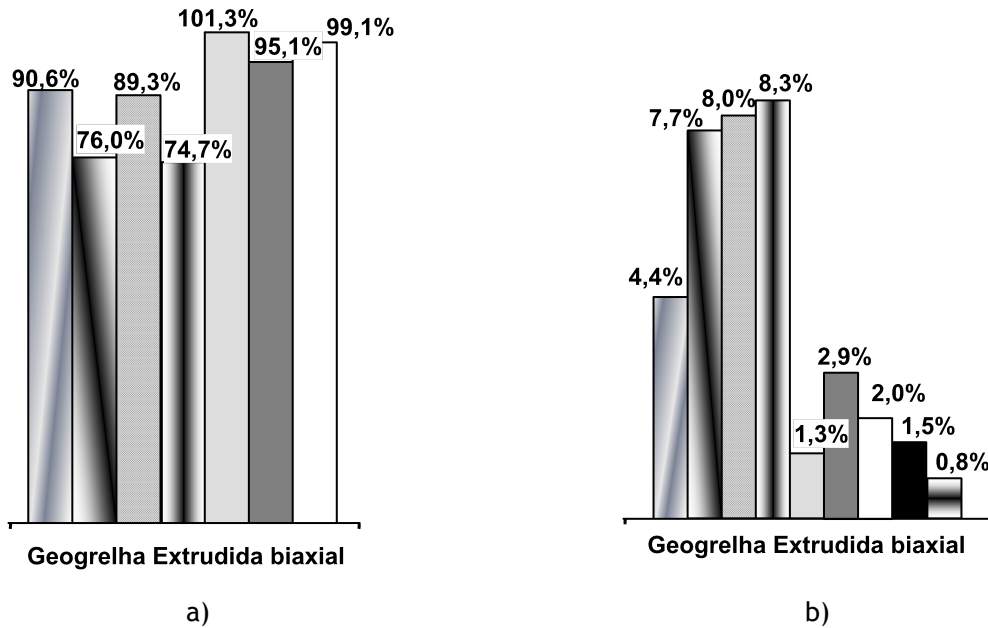


Figura 31 - Geogrelha extrudida biaxial; a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

Os coeficientes de variação da resistência à tracção da geogrelha danificada no campo são mais elevados do que os obtidos quando o geossintético é danificado em laboratório (Figura 31b), reflectindo a maior gama de variação de resistência à tracção dos provetes danificados no campo.

### 7.2.3.3 Geogrelha tecida biaxial (GGtb)

Os resultados da danificação no campo da geogrelha tecida mostram que a utilização do material granular calcário na simulação laboratorial da danificação conduz a resultados optimistas acerca do comportamento do geossintético (Figura 32a).

Enquanto que para a geogrelha extrudida o aumento da energia de compactação, independentemente do material de aterro, provocou uma redução de cerca de 16% da resistência retida, para a geogrelha tecida a influência do aumento da energia de compactação é ligeiramente menor (12% de redução de resistência para o Solo 1) e depende do tipo de material de aterro (3,5% de redução de resistência para o Solo 2).



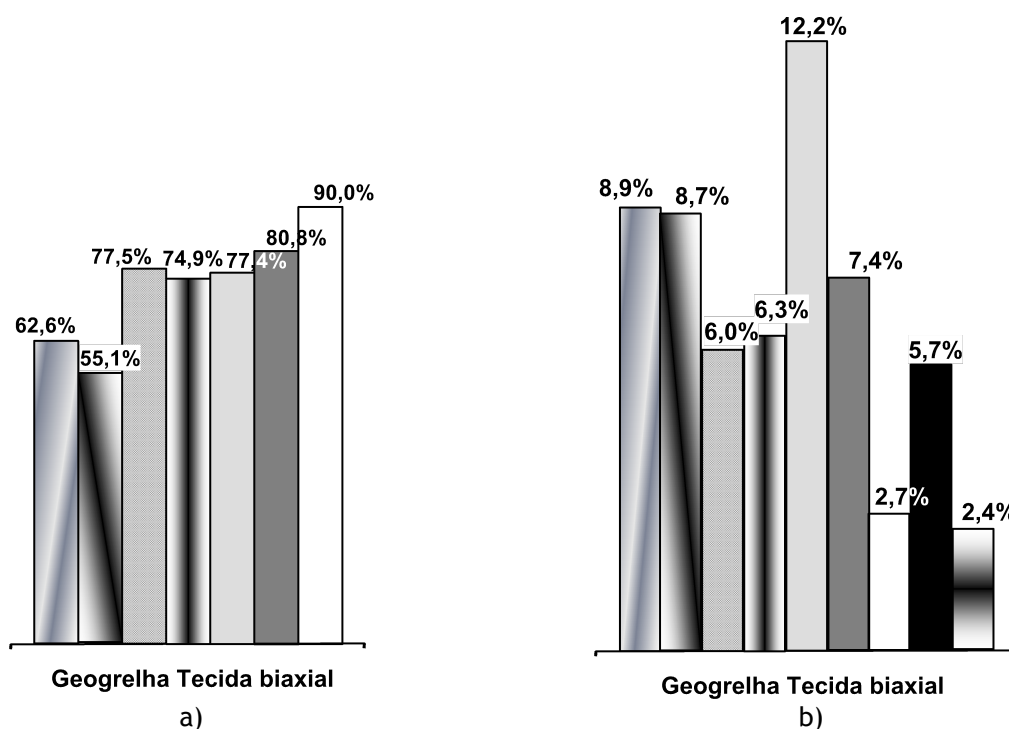


Figura 32 - Geogrelha tecida biaxial: a) resistência retida; b) coeficiente de variação.

Os valores do coeficiente de variação da resistência à tracção podem ser considerados da mesma ordem de grandeza para a geogrelha tecida danificada no campo e em laboratório com o solo granítico (Figura 32b). A danificação laboratorial com o solo calcário conduz a um valor do coeficiente de variação da resistência menor.

#### 7.2.3.4 Nota Final

Ao longo de 7.2.3 compararam-se os resultados da danificação laboratorial de três geossintéticos considerados no presente trabalho com os publicados relativos à danificação no campo, dos mesmos geossintéticos, com dois tipos de solo e dois graus de compactação.

Apesar da grande variedade de valores da resistência retida nos geossintéticos danificados nas diferentes situações, é convergente que dos três geossintéticos considerados aquele que apresenta maior sensibilidade à danificação, independentemente das condições em que é danificado, é o geotêxtil tecido.

A danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório é maior quando o material confinante é o granítico.

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação do geotêxtil tecido conduz a valores conservativos quando o material de aterro é o solo residual do granito e do lado da insegurança quando o material de aterro é tout-venant de granito.

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação da geogrelha extrudida fornece valores otimistas, tanto mais otimistas quanto maior é o grau de compactação do material de aterro. Os valores mais próximos são obtidos quando o material confinante usado em laboratório é o granítico e o grau de compactação dos materiais de aterro é de 90%.

Ao contrário do que acontece para o geotêxtil, a danificação *in situ* da geogrelha extrudida é pouco sensível ao tipo de material de aterro.

A simulação laboratorial da danificação durante a instalação da geogrelha tecida com o material granular calcário conduz a valores otimistas.

A influência do grau de compactação do material de aterro na danificação durante a instalação dos geossintéticos depende da estrutura destes, sendo muito significativa para o geotêxtil tecido e pouco importante para a geogrelha tecida quando confinada pelo solo residual do granito (Solo 2).

Com base nos resultados do presente estudo e nos apresentados por Lopes e Pinho-Lopes (2001) torna-se claro que os coeficientes de segurança a adoptar no dimensionamento para atender à danificação dos geossintéticos durante a instalação dependem significativamente do tipo de geossintético a aplicar.

O Quadro 11 apresenta (apenas a título orientador) os valores do coeficiente de segurança relativos à danificação dos geossintéticos durante a instalação definidos com base nos resultados dos estudos mencionados.

Quadro 11: Valores do coeficiente de segurança à danificação durante a instalação.

Tipo de Geossintético	Coeficientes de segurança		
	Solo 1 ou Solo 2	Solo 2	Solo 1
Geogrelha extrudida biaxial	[1,15; 1,35[ *	-	-
Geogrelha tecida biaxial	-	1,35	[1,6; 1,8[ *
Geotêxtil tecido	-	1,1	[1,8; 2,9[ *

\* Limite inferior - grau de compactação de 90%  
Limite superior - grau de compactação de 98%

O estudo comparativo efectuado realça a importância do desenvolvimento de investigação no sentido de definir o material granular confinante a utilizar nos ensaios de laboratório que melhor simule a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais, uma vez que é impraticável, por razões económicas e de tempo, executar aterros experimentais para definição do coeficiente de segurança parcial a aplicar ao geossintético no dimensionamento da estrutura onde ele se insere.

## 8 PROSSEGUIMENTO DOS TRABALHOS

Os trabalhos prosseguirão no sentido da caracterização da influência da danificação noutras propriedades dos geossintéticos: 1) no comportamento a longo prazo dos geossintéticos procurando-se realizar os ensaios de rotura em fluência das amostras dos geossintéticos danificados em campo; e 2) na interacção solo-geossintético dos materiais danificados.

## 9 CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se laboratorialmente a danificação de geossintéticos durante a instalação, de modo a quantificar a influência, quer do tipo de material confinante, quer da estrutura do geossintético.

Posteriormente, realizou-se uma análise comparativa da danificação durante a instalação de três dos geossintéticos estudados com base em resultados de ensaios de campo e de laboratório.

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

Com base nos resultados obtidos é possível formular as seguintes conclusões:

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

- ao contrário do que acontece com os outros geossintéticos, a danificação *in situ* da geogrelha extrudida é pouco sensível ao tipo de material de aterro;

- a influência do grau de compactação do material de aterro na danificação durante a instalação dos geossintéticos depende da estrutura destes, sendo muito significativa para o geotêxtil tecido e pouco importante quando sobre a geogrelha tecida é colocado e compactado o solo residual do granito;

- no caso do geotêxtil tecido os resultados laboratoriais, seja qual for o material granular confinante, são conservativos quando o material de aterro é o solo residual do granito; pelo contrário, quando o material de aterro é o tout-venant de granito os resultados laboratoriais são otimistas, à excepção de quando o grau de compactação é de 90%;

- para as geogrelhas os resultados laboratoriais são otimistas, com os dois materiais naturais;

- os coeficientes de segurança a adoptar no dimensionamento para atender à danificação dos geossintéticos durante a instalação dependem significativamente do tipo de geossintético a aplicar;

- com base nos resultados dos estudos realizados no âmbito do protocolo IEP-FEUP foram encontrados coeficientes de segurança em relação à danificação dos geossintéticos durante a instalação variáveis entre 1,15 e 1,35 para a geogrelha extrudida biaxial, entre 1,35 e 1,8 para a geogrelha tecida biaxial e, entre 1,1 e 2,9 para o geotêxtil tecido;

- o estudo comparativo efectuado realça a importância do desenvolvimento de investigação no sentido de definir o material granular confinante a utilizar nos ensaios de laboratório que melhor simule a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais, uma vez que é impraticável, por razões económicas e de tempo, executar aterros experimentais para definição do coeficiente de segurança parcial a aplicar ao geossintético no dimensionamento da estrutura onde ele se insere.

### ***Referências Bibliográficas***

ALLEN, T.M., BATHURST, R.J. (1996) "Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage", Geosynthetics International, Vol. 3, No 3, pp. 407-439.

ASTM D638, Geomembranes tensile test.

BRÄU, G. (1996) "Damage of geosynthetics during installation - experience from real sites and research works", Geosynthetics: Applications, Design and Construction, First European Geosynthetics Conference, Eurogeo 1, pp. 145- 150, Maastricht, The Netherlands.

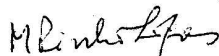
- BRÄU, G. (1998). "Experience with damage during installations in Germany - Field and laboratory testing". Seminar in Installation Damage in Geosynthetics, November 1998, ERA Technology, U.K., pp. 2.1.1 a 2.1.15.
- ELVIDGE, C.B., RAYMOND, G.P. (1999) "Laboratory survivability of nonwoven geotextiles on open graded crushed aggregate", Geosynthetics International, Vol. 6, No 2, pp. 93-117.
- EN ISO 10319, Geotextiles - Wide-width tensile test.
- EN ISO 13431, Geotextiles and geotextile-related products - Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.
- ENV ISO 10722-1, Geotextiles and geotextile-related products - Procedure for simulating damage during installation Part 1: Installation in granular materials.
- FOX, P.J., TRIPLETT, E.J., KIM, R.H., OLSTA, J.T. (1998) "Field study of installation damage for geosynthetic clay liners", Geosynthetics International, Vol. 5, No 5, pp. 491-520.
- GREENWOOD, J.H. (1998) "The nature of mechanical damage". Seminar volume on installation damage on geosynthetics, 1.1.1-1.1.15, Leatherhead, Surrey, UK.
- INGOLD, T.S., (1994) "Geotextiles and Geomembranes Manual", Elsevier Advanced Technology, 1st edition, 515p.
- M. LURDES COSTA LOPES e MARGARIDA PINHO LOPES (2001). "Danificação Durante a Construção de Geossintéticos - Estudo dos coeficientes de Segurança a Adoptar", Relatório da acção de investigação desenvolvida no âmbito do protocolo ICERR/FEUP, 78p., Porto.
- M. PINHO-LOPES; C. RECKER; M. L. LOPES; J. MÜLLER-ROCHHOLZ (2002). "Experimental analysis of the combined effect of installation damage and creep of geosynthetics - new results", Proceedings of the 7th Int. Conf. on Geosynthetics, Vol. 4, pp. 1539-1544, Nice, France.
- PINHO LOPES, M., RECKER, C., MÜLLER-ROCHHOLZ, J., LOPES, M.L. (2000) "Installation damage and creep of geosynthetics and their combined effect - experimental analysis" Proceedings of Eurogeo 2000, Vol. 2 , pp. 895-897, Bologna, Italy.
- WATTS, G.R.A., BRADY, K.C. (1990) "Site damage trials on geotextiles", Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, ed. Den Hoedt G. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 603-607.

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

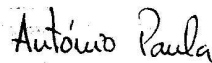
21 de Novembro de 2003



Maria de Lurdes Costa Lopes  
Prof. Associada da FEUP



Margarida J. F. Pinho Lopes  
Assistente da UA  
Aluna de Doutoramento da FEUP



(António M. Verdelho Paula)  
Assistente do IPB  
Investigador na FEUP

VISTO



Nelson Pereira Martins  
Chefe da Divisão de Apoio Técnico e Engenharia Rodoviária de Coimbra  
Engenheiro Civil, Assessor Principal do IEP