

# DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE SEGURANÇA A USAR NO DIMENSIONAMENTO DE GEOTÊXTEIS

## DETERMINATION OF SAFETY FACTORS FOR DESIGNING WITH GEOTEXTILES

Carneiro, José Ricardo; *Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, rcarneir@fe.up.pt*  
Rosete, Ana; *Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, anarosete@fe.up.pt*  
Paula, António Miguel; *Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, mpaula@ipb.pt*  
Pinho-Lopes, Margarida; *Universidade de Aveiro, Portugal, mlopes@ua.pt*  
Almeida, Paulo Joaquim; *Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Portugal, pjalmeid@fc.up.pt*  
Lopes, Maria de Lurdes; *Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, lcosta@fe.up.pt*

### RESUMO

Os geossintéticos podem sofrer alterações de resistência a curto e a longo prazo devido à ação de vários agentes de degradação. Neste trabalho, foram determinados vários coeficientes de segurança a usar no dimensionamento de dois geotêxteis (um tecido e um não-tecido). Para tal, os materiais foram expostos a vários ensaios de degradação: danificação durante a instalação, abrasão, rotura em fluência, imersão em soluções ácidas e alcalinas, hidrólise, termo-oxidação e exposição aos agentes climatéricos. Com base nos resultados obtidos, foram determinados os coeficientes de segurança a usar no dimensionamento dos geotêxteis.

### ABSTRACT

The geosynthetics can suffer short and long-term resistance changes due to the action of many damaging agents. In this work, several safety factors for designing with two geotextiles (a woven and a non-woven) were determined. For that aim, the materials were exposed to various degradation tests: damage during installation, abrasion, creep rupture, immersion in acids and alkalis, thermo-oxidation and exposition to weathering. Based on the obtained results, safety factors were determined for designing with geotextiles.

### 1 - INTRODUÇÃO

Nas suas aplicações, os geossintéticos podem estar expostos a vários agentes de degradação capazes de afetar negativamente o seu desempenho a curto e a longo prazo. Os tipos de degradação mais comuns incluem: a danificação durante a instalação (DDI), a ação de cargas estáticas (fluência), fenómenos de abrasão, ação de espécies químicas existentes nos solos (soluções ácidas e/ou alcalinas, contaminantes químicos), termo-oxidação, ação de agentes atmosféricos (radiação solar e outros agentes climatéricos) e ação de agentes biológicos.

Em muitas aplicações, os geossintéticos têm de desempenhar corretamente as suas funções durante um longo período de tempo (frequentemente várias dezenas de anos). Na impossibilidade de determinar as propriedades a longo prazo dos materiais antes da construção da obra, é necessário prever a degradação que estes irão sofrer ao longo do tempo.

No dimensionamento de estruturas com geossintéticos são normalmente introduzidos alguns coeficientes de segurança parciais para representar o efeito dos agentes e mecanismos de degradação relevantes a que estes estarão submetidos ao longo do tempo de vida útil da estrutura em que se inserem. O número e o tipo de coeficientes de segurança parciais a aplicar variam com os diferentes métodos de dimensionamento e com as condições específicas da obra. Alguns métodos de dimensionamento incluem descrições de como esses coeficientes de segurança parciais podem ser determinados, por exemplo, experimentalmente, com recurso a valores de bases de dados ou interpolando informações obtidas para obras em condições semelhantes. Como exemplos de documentos onde existe informação desse tipo podem referir-se: a ISO/TR 20432, a BS 8006-1 e o WSDOT *Standard Practice* T925. Para aplicações de reforço, o documento ISO/TR 20432 sugere a introdução de quatro coeficientes de segurança parciais, que representam os efeitos da (1) ação de cargas estáticas, (2) danificação mecânica, (3) exposição aos agentes atmosféricos e (4) exposição aos agentes químicos e biológicos.

Nos métodos de dimensionamento atuais, o efeito dos diferentes agentes de degradação é determinado isoladamente (não é considerada a ação simultânea de outros agentes de degradação). O coeficiente de segurança global (a usar no dimensionamento) é obtido através da multiplicação dos vários coeficientes de segurança parciais (cada um destes coeficientes representa a degradação causada por um agente ou tipo de degradação).

No entanto, em situações reais, os geossintéticos dificilmente estarão sob a ação de apenas um agente de degradação. Desta forma, a degradação que ocorre nos materiais será sempre o efeito combinado dos vários agentes de degradação, podendo existir interações (efeitos sinérgicos) entre eles.

Recorrendo a resultados de ensaios laboratoriais em que os agentes referidos atuam, na maior parte dos casos, isoladamente sobre dois geotêxteis, neste trabalho, descreve-se o procedimento de determinação dos coeficientes de segurança parciais correspondentes. É importante notar que as condições impostas correspondem, na sua maioria, a ensaios de durabilidade normalizados. Nalguns casos, essas condições podem ser usadas para estimar o comportamento em obra dos materiais, sem relação estabelecida com a realidade, pelo que não a pretendem representar.

Assim, foram determinados vários coeficientes de segurança parciais, tendo em conta diferentes agentes e/ou tipos de degradação. Para tal, avaliaram-se os efeitos desses agentes e/ou tipos de degradação nas propriedades dos materiais (na maior parte dos casos, na sua resistência à tração). Os coeficientes de segurança parciais determinados correspondem às condições concretas ensaiadas e não podem ser generalizados, nem aplicados diretamente no dimensionamento destes materiais. Para que seja possível aplicar, no dimensionamento, os valores aqui apresentados é essencial, por um lado, avaliar as condições particulares de cada obra e, por outro lado, averiguar até que ponto as condições impostas nos ensaios aqui referidos podem ser representativas das condições reais.

## 2 - DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

### 2.1 - Geotêxteis

Foram estudados dois geotêxteis de polipropileno (disponíveis no mercado): um tecido (com 320 g.m<sup>-2</sup>) e um não-tecido agulhado (com 800 g.m<sup>-2</sup>) (Quadro 1). De acordo com os produtores, ambos os materiais estavam protegidos contra a degradação química (tipo e quantidade de estabilizantes não revelados).

Quadro 1 – Principais Características dos Geotêxteis (Amostras Intactas)

Geotêxtil	GT	GNT
Estrutura	Tecido	Não-tecido (agulhado)
Massa por unidade de área (g.m <sup>-2</sup> )	320	800
Resistência à tração <sup>1</sup> (kN.m <sup>-1</sup> )	77,5 (1,4)	43,3 (2,2)
Extensão na força máxima <sup>1</sup> (%)	13,0 (4,8)	89,3 (4,8)

<sup>1</sup>Determinado de acordo com a NP EN ISO 10319 (5 provetes, direção de fabrico)  
(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

A amostragem e preparação dos provetes foram realizadas de acordo com a norma NP EN ISO 9862. Os provetes foram cortados dispersos por toda a largura do rolo, excluindo os bordos laterais (pelo menos, 100 mm de cada lado do rolo foram desprezados). Os provetes para um mesmo ensaio foram recolhidos em diferentes pontos do rolo (cortados em diagonais, apanhando diferentes zonas no comprimento e na largura do rolo). Não foram recolhidos provetes em zonas sujas, com vincos, com orifícios ou com outros defeitos de origem acidental ocorridos após o fabrico dos materiais.

### 2.2 - Ensaio de degradação

#### 2.2.1 - Ensaio de danificação durante a instalação.

A DDI dos geotêxteis foi avaliada por ensaios laboratoriais (simulação das ações de danificação). Para o geotêxtil tecido, foram também realizados ensaios de campo (onde se procedeu à instalação, seguida de remoção dos materiais).

Os ensaios de DDI laboratoriais foram realizados de acordo com a norma EN ISO 10722 (exceção para a carga máxima aplicada: 900 kPa). Os geotêxteis foram colocados entre duas camadas de um material granular (*corundum*) e foram submetidos a uma carga cíclica entre 5 e 900 kPa com uma frequência de 1 Hz, durante 200 ciclos. As partículas de *corundum* (um agregado sintético de óxido de alumínio) tinham dimensões entre os 5 e os 10 mm. O equipamento usado para simular a DDI dos geotêxteis encontra-se detalhadamente descrito em Lopes e Lopes (2003) (Figura 1).

Em relação aos ensaios de campo (aterros temporários), o geotêxtil tecido foi instalado entre camadas de solo compactadas de acordo com os procedimentos comuns em aplicações de reforço de solos. Sobre a fundação (competente, livre de raízes e sem materiais contundentes) foi vertido, espalhado, nivelado e compactado o solo. Sobre esta camada de solo foi colocado o geotêxtil, sem dobras. Em seguida, foram vertidas, espalhadas, niveladas e compactadas duas camadas de solo de 0,20 m de espessura sobre o

geotêxtil. Não foi permitido o tráfego de equipamentos de construção sobre o material antes de sobre ele existir uma camada de solo com, pelo menos, 0,15 m de espessura. Terminada a construção do aterro, o solo foi cuidadosamente removido e o geotêxtil recuperado (Pinho-Lopes, 2004).



Figura 1 – Equipamento (Protótipo) Usado para Simular a DDI de Geotêxteis:  
(a) Vista Geral; (b) Caixa de Danificação e Placa de Carregamento Durante o Ensaio

Foram usados dois solos, um “tout-venant” (Solo 1) e um solo residual de granito (Solo 2) (Quadro 2); a dimensão máxima das partículas era de 50,80 mm no Solo 1 e de 5,00 mm no Solo 2. Nos aterros com o Solo 1 foram utilizadas duas energias de compactação: 90% do Proctor normal (EC1) e 98% do Proctor normal (EC2). Com o Solo 2 foi construído um aterro com a energia de compactação EC2. No total, foram construídos três aterros temporários.

Quadro 2 – Caracterização Laboratorial do Solo 1 e do Solo 2

Solo	% < 0,074 mm	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>Max</sub> (mm)	C <sub>U</sub>	C <sub>C</sub>
1	5,18	0,22	2,68	11,78	19,15	50,80	87,81	1,71
2	21,53	0,07	0,17	0,38	0,68	5,00	9,64	0,58

D<sub>x</sub> – diâmetro equivalente a x% de passados; D<sub>Max</sub> – diâmetro máximo;  
C<sub>U</sub> – coeficiente de uniformidade; C<sub>C</sub> – coeficiente de curvatura

### 2.2.2 - Ensaio de abrasão

Os ensaios de abrasão foram efetuados de acordo com norma a EN ISO 13427. Neste método de ensaio, os geotêxteis são colocados numa plataforma fixa e são friccionados por um abrasivo (superfície P100). O abrasivo (instalado numa placa deslizante) é movido ao longo de um eixo horizontal com um movimento uniaxial, sob condições controladas de pressão (6 kPa). O ensaio termina ao fim de 750 ciclos (cada ciclo corresponde a uma passagem dupla do abrasivo pelo material).

A Figura 2 ilustra o equipamento utilizado nos ensaios de abrasão; estes ensaios foram apenas realizados para o geotêxtil não-tecido (amostras intactas e após DDI em laboratório).

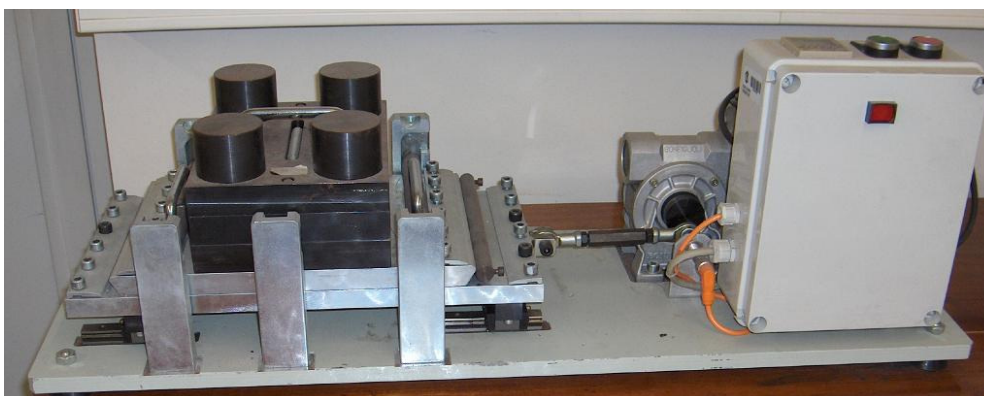


Figura 2 – Equipamento (Protótipo) Usado nos Ensaio de Abrasão

### 2.2.3 - Ensaio de rotura em fluência

Os ensaios de rotura em fluência foram realizados de acordo com a norma EN ISO 13431. Neste ensaio, os geotêxteis foram submetidos a uma carga estática constante, a temperatura e humidade constantes; a carga foi mantida até à rotura dos materiais. O tempo decorrido entre a aplicação da carga e a rotura foi registado. Foram realizados ensaios de rotura em fluência para níveis de carga distintos entre 50% e 90% da resistência à tração dos geotêxteis.

O equipamento usado nos ensaios de rotura em fluência encontra-se ilustrado na Figura 3; estes ensaios foram apenas realizados para o geotêxtil tecido (amostras intactas e após DDI em campo).

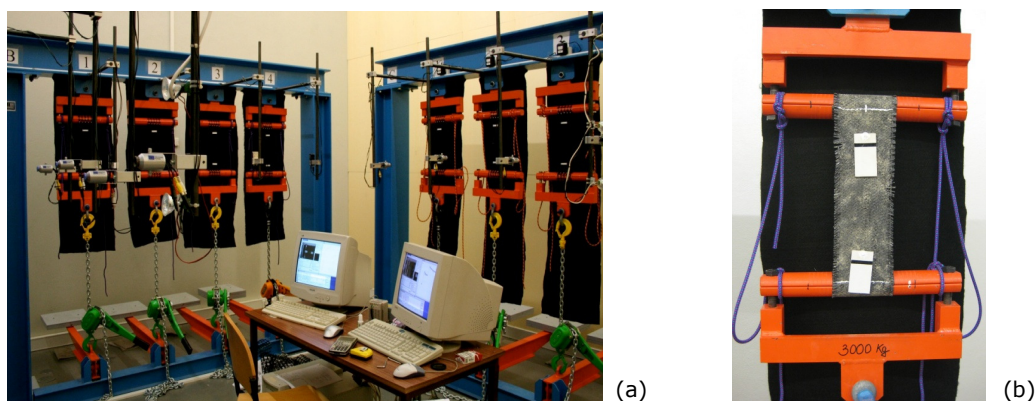


Figura 3 – Equipamento (Protótipo) Usado nos Ensaio de Rotura em Fluência:  
(a) Vista Geral dos Pórticos; (b) Provete Durante o Ensaio

### 2.2.4 - Ensaio de imersão em líquidos

A resistência dos geotêxteis aos líquidos foi avaliada de acordo com as normas EN 14030 e EN 12447. A norma EN 14030 descreve métodos para avaliar a resistência dos materiais a soluções ácidas (método A) e alcalinas (método B). Por sua vez, a norma EN 12447 refere um método para determinar a resistência dos geotêxteis à hidrólise. As condições experimentais dos ensaios de imersão podem ser encontradas no Quadro 3. Estes ensaios foram realizados num banho termostatizado (marca *GFL*, modelo 1003).

Quadro 3 – Condições Experimentais dos Ensaio de Imersão

Ensaio de imersão	Agente de degradação	Condições do ensaio
Meio ácido (EN 14030 – Método A)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (0,025 mol.L <sup>-1</sup> ) (pH ≈ 1,6)	60 °C, 3 dias
Meio alcalino (EN 14030 – Método B)	Ca(OH) <sub>2</sub> (2,5 g.L <sup>-1</sup> )* (pH ≈ 12,4)	60 °C, 3 dias
Hidrólise (EN 12447)	H <sub>2</sub> O (pH ≈ 7)	95 °C, 28 dias

\*Solução saturada (solubilidade do Ca(OH)<sub>2</sub> (25 °C) ≈ 0,87 g.L<sup>-1</sup>)

### 2.2.5 - Ensaio de termo-oxidação

Os ensaios de termo-oxidação foram efetuados segundo a norma NP EN ISO 13438. De acordo com esta norma, a resistência à termo-oxidação dos geotêxteis de polipropileno deve ser avaliada pela exposição dos materiais à temperatura de 110 °C durante 14 dias (método A1 – para todas as aplicações, exceto a de reforço) ou 28 dias (método A2 – para as aplicações de reforço). Estes ensaios foram realizados num forno (marca *Heraeus Instruments*, modelo T6120) com uma atmosfera normal de oxigénio (21% de O<sub>2</sub>).

### 2.2.6 - Ensaio de envelhecimento climatérico

Os geotêxteis foram expostos a agentes climatéricos artificiais (radiação ultravioleta (UV) e chuva) num simulador laboratorial: o QUV (marca *Q-Panel Lab Products*, modelo QUV/spray). A radiação UV presente na luz solar foi simulada através de lâmpadas fluorescentes do tipo UVA-340. Por sua vez, a chuva (água à temperatura ambiente) foi simulada pela projeção de jatos de água contra a superfície dos materiais. Os geotêxteis foram expostos no QUV durante 362 horas (composição do ciclo climatérico no Quadro 4).

Quadro 4 – Composição do Ciclo Climatérico Usado no QUV

Passo 1: Exposição à radiação UV (5 horas, 50 °C)

Passo 2: Chuva (10 minutos, 5 L.min<sup>-1</sup>, choque térmico)

(retorno ao passo 1)

Nas 362 horas totais do ensaio, os geotêxteis foram expostos a cerca de 70 ciclos climáticos (cada ciclo possui a duração de 5 horas e 10 minutos). A irradiância durante o passo de exposição UV (350 horas no total) foi de 0, 68 W.m<sup>-2</sup> aos 340 nm. A radiação UV incidente total (entre os 290 e os 400 nm) foi de 50 MJ.m<sup>-2</sup> (valor definido na norma NP EN 12224). Com a exceção da duração do passo de chuva, o ensaio climático seguiu as indicações da norma NP EN 12224 (de acordo com a norma, o passo de chuva deve ter a duração de 60 minutos; tal não foi possível, devido a questões técnicas no abastecimento de água com as características exigidas pelo QUV).

### 2.3 - Avaliação dos danos sofridos pelos geotêxteis

Os danos sofridos pelos geotêxteis nos ensaios de DDI e abrasão foram avaliados através de ensaios de tração-extensão de acordo com a norma NP EN ISO 10319; as extensões foram medidas com recurso a um vídeo-extensómetro. Os danos ocorridos durante os ensaios de imersão em líquidos, termo-oxidação e envelhecimento climático foram avaliados por ensaios de tração-extensão segundo as normas NP EN ISO 13934-1 (geotêxtil tecido) ou NP EN 29073-3 (geotêxtil não-tecido); a avaliação desses danos seguiu as indicações da norma NP EN 12226. As condições experimentais dos ensaios de tração-extensão estão resumidas no Quadro 5.

Quadro 5 – Condições Experimentais dos Ensaios de Tração-extensão

Norma	NP EN ISO 10319	NP EN ISO 13934-1 NP EN 29073-3
Largura <sub>Proвете</sub>	200 mm	50 mm
Comprimento* <sub>Proвете</sub>	100 mm	200 mm
N <sub>Provetes</sub>	5	5
Velocidade	20 mm.min <sup>-1</sup>	100 mm.min <sup>-1</sup>

\*Entre garras

Os parâmetros mecânicos determinados nos ensaios de tração-extensão (valores na direção de fabrico) incluíram a resistência à tração (RT) e extensão na força máxima (E<sub>FM</sub>). A resistência à tração residual (RTR, em %) foi obtida pelo quociente entre a resistência à tração das amostras expostas (aos ensaios de degradação) e a resistência à tração de amostras de referência (não danificadas).

### 2.4 - Determinação de coeficientes de segurança parciais

No dimensionamento de estruturas com geotêxteis são frequentemente usados coeficientes de segurança parciais para representar o efeito dos diferentes agentes de degradação nas propriedades dos materiais. Cada coeficiente de segurança (CS) parcial representa normalmente uma redução de resistência devida à ação de um, ou mais, agentes de degradação.

Os coeficientes de segurança parciais para o efeito da DDI, abrasão, imersão em líquidos, termo-oxidação e envelhecimento climático foram determinados pela seguinte expressão:

$$CS = \frac{RT_{Intacto}}{RT_{Danificado}} \quad [1]$$

Em que,  $RT_{Intacto}$  e  $RT_{Danificado}$  representam, respetivamente, a resistência à tração dos materiais, antes e depois dos diferentes ensaios de degradação.

Os coeficientes de segurança parciais a aplicar considerando o efeito da rotura em fluência ( $CS_{FLU}$ ) foram obtidos através da Expressão 2, onde,  $F_{1\ minuto}$  é a carga de rotura ao fim de 1 minuto e  $F_{30\ anos}$  é a carga de rotura após 30 anos.

$$CS_{FLU} = \frac{F_{1\ minuto}}{F_{30\ anos}} \quad [2]$$

## 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 - Geotêxtil tecido

#### 3.1.1 - Danificação durante a instalação

Os ensaios de DDI (em laboratório e em campo) provocaram alterações significativas nas propriedades mecânicas (resistência à tração e extensão na força máxima) do geotêxtil tecido (Quadro 6).

Quadro 6 – Propriedades Mecânicas do Geotêxtil Tecido, Antes e Após os Ensaios de DDI

Ensaio	RT (kN.m <sup>-1</sup> )	E <sub>FM</sub> (%)
Intacto	77,5 (1,4)	13,0 (0,6)
DDI Laboratório (EN ISO 10722)	33,5 (3,9)	9,7 (2,7)
DDI Campo: Solo 1 – EC1	43,7 (3,7)	8,8 (1,2)
DDI Campo: Solo 1 – EC2	26,4 (1,3)	7,1 (0,6)
DDI Campo: Solo 2 – EC2	70,2 (0,7)	11,7 (0,7)

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

A resistência à tração e extensão na força máxima do geotêxtil tecido diminuíram depois dos ensaios de DDI. Esta diminuição foi mais acentuada nos ensaios de campo com o Solo 1 e EC2 (resistência à tração residual de 34,1%). No ensaio em laboratório, a resistência à tração diminuiu para menos de metade do valor original (resistência à tração residual de 43,2%).

Nos ensaios de campo, o Solo 1 causou maior danificação ao geotêxtil tecido do que o Solo 2 (com a EC2, resistências à tração residuais de 34,1% e 90,6%, respetivamente). A maior "agressividade" do Solo 1 pode ser explicada pelo facto deste solo ( $D_{50} = 11,78$  mm) ser constituído por partículas maiores do que o Solo 2 ( $D_{50} = 0,38$  mm).

Tal como esperado, a energia de compactação usada nos ensaios de campo influenciou o comportamento mecânico do geotêxtil tecido. De facto, com a energia de compactação mais elevada (EC2), as reduções ocorridas na resistência à tração e extensão na força máxima foram maiores (com o Solo 1, resistências à tração residuais de 56,4% e 34,1% para a EC1 e EC2, respetivamente).

O Quadro 7 resume os valores obtidos para a resistência à tração residual do geotêxtil tecido depois dos diferentes ensaios de DDI. Com base nas diminuições observadas na resistência à tração, são também apresentados os coeficientes de segurança parciais para os efeitos do processo de instalação ( $CS_{DDI}$ ).

Quadro 7 – RTR e CS Parciais Obtidos nos Ensaios de DDI do Geotêxtil Tecido

Ensaio	RTR (%)	$CS_{DDI}$
DDI Laboratório (EN ISO 10722)	43,2	2,31
DDI Campo: Solo 1 – EC1	56,4	1,77
DDI Campo: Solo 1 – EC2	34,1	2,94
DDI Campo: Solo 2 – EC2	90,6	1,10

### 3.1.2 - Rotura em fluência

Os resultados dos ensaios de rotura em fluência obtidos para o geotêxtil tecido (antes e após os ensaios de campo de DDI) estão representados na Figura 4. Estes resultados permitem inferir o tempo de vida do material sob a ação de carga constante, recorrendo a extrapolações. No entanto, estas devem ser feitas com cautela e com informação relevante, devendo-se evitar extrapolações superiores a duas ordens de grandeza. Por esta razão, as extrapolações foram feitas apenas para 30 anos de vida do geossintético.

As curvas de rotura em fluência dos materiais danificados em campo possuíam menor inclinação do que a curva de fluência do material intacto. Aliás, as curvas correspondentes às amostras intacta e danificadas tendem a aproximar-se. Isto indica que o efeito da rotura em fluência é maior na amostra intacta do que nas amostras danificadas. Entre as amostras danificadas, esse efeito é menor na amostra com maior danificação a curto prazo ( submetida a DDI com Solo 1 e EC2); é também nesta amostra que se observa uma maior dispersão de resultados.

Os resultados obtidos indicam que, ao fim de 30 anos de serviço sob carga constante, o material intacto sofreria rotura e a carga correspondente seria, aproximadamente, 49,5% da sua resistência à tração. Os coeficientes de segurança parciais para a rotura em fluência e DDI foram obtidos considerando a sinergia entre os dois mecanismos (exposição sucessiva aos dois tipos de degradação) (Quadro 8).

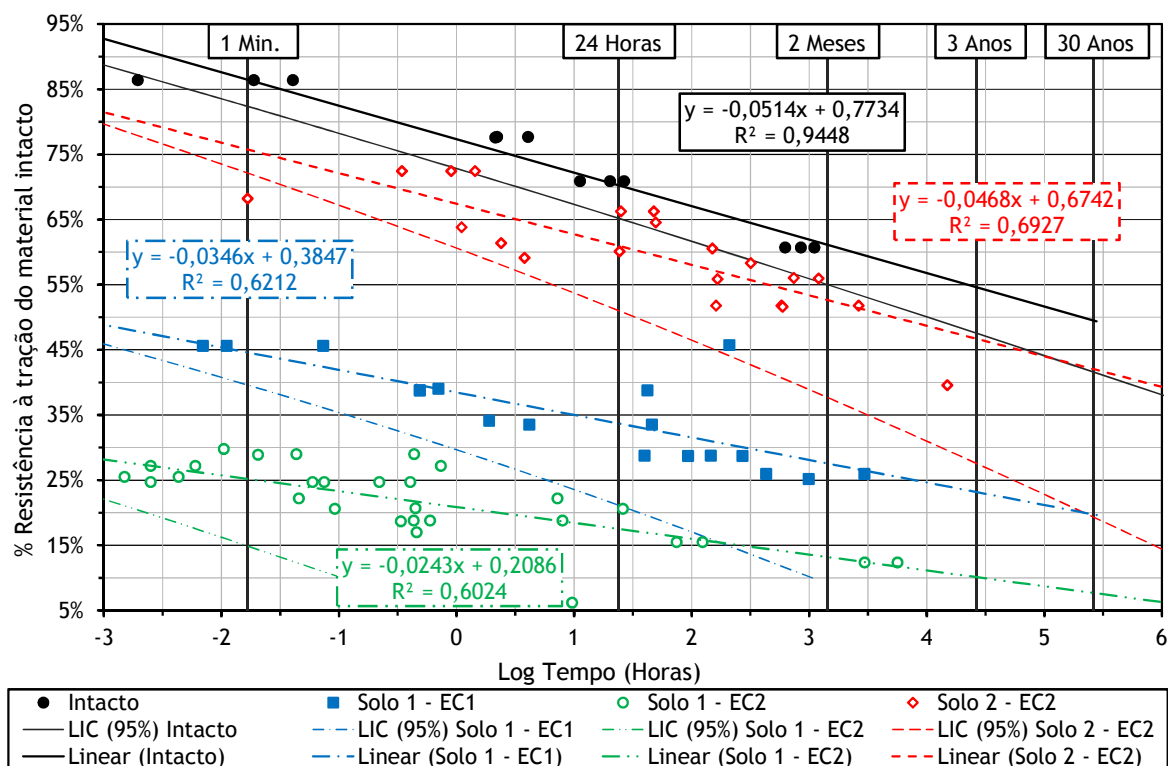


Figura 4 – Resultados Obtidos nos Ensaios de Rotura em Fluência do Geotêxtil Tecido (LIC (95%) – Limites de Confiança de 95%)

Quadro 8 – CS Parciais para a DDI e Rotura em Fluência, Considerando a Sinergia

$CS_{FLU}$ (Intacto)	$CS_{DDI+FLU}$ (Solo 1 – EC1)	$CS_{DDI+FLU}$ (Solo 1 – EC2)	$CS_{DDI+FLU}$ (Solo 2 – EC2)
1,75	4,49	11,25	2,06

Os coeficientes de segurança parciais variaram entre 1,75 (contabilizando apenas os efeitos da rotura em fluência na amostra intacta) e 11,25 (contabilizando os efeitos da DDI em campo com Solo 1 e EC2 e os efeitos da fluência). No Quadro 9 estão resumidos os valores dos coeficientes de segurança parciais para a rotura em fluência e DDI determinados pela metodologia tradicional (determinação dos dois efeitos em separado e posterior sobreposição); estes coeficientes foram determinados multiplicando os coeficientes de segurança parciais obtidos para a DDI ( $CS_{DDI}$ ) (ponto 3.1.1) e para a rotura em fluência ( $CS_{FLU}$ ).

Quadro 9 – CS Parciais para a DDI e Rotura em Fluência – Metodologia Tradicional

$CS_{DDI+FLU, TRAD}$ (Solo 1 – EC1)	$CS_{DDI+FLU, TRAD}$ (Solo 1 – EC2)	$CS_{DDI+FLU, TRAD}$ (Solo 2 – EC2)
3,10	5,14	1,92

Os coeficientes de segurança parciais obtidos pela abordagem tradicional são diferentes dos encontrados pela nova abordagem (tendo em conta a sinergia entre a DDI e rotura em fluência) (Pinho-Lopes, 2004). De facto, os coeficientes de segurança parciais obtidos pelo método tradicional foram inferiores, estando compreendidos entre 1,92 e 5,14 (este último corresponde às amostras em que os efeitos da DDI foram mais significativos – Solo 1 e EC2).

A abordagem tradicional é pouco conservativa, uma vez que conduz a menores coeficientes de segurança parciais para todas as amostras danificadas. O coeficiente de segurança parcial obtido para a amostra danificada em campo com o Solo 1 e EC2 foi cerca de 54% menor quando calculado pelo método tradicional; a redução foi aproximadamente de 31% e 7% nas amostras danificadas com o Solo 1 e a EC1 e com o Solo 2 e a EC2, respetivamente.

### 3.1.3 - Agentes químicos e atmosféricos

De um modo geral, as exposições aos agentes químicos e atmosféricos não causaram grandes alterações na resistência à tração do geotêxtil tecido (a maior exceção ocorreu na exposição no QUV). Os valores obtidos para a resistência à tração residual do geotêxtil tecido após os ensaios de imersão em líquidos,

termo-oxidação e envelhecimento climatérico estão resumidos no Quadro 10; são também apresentados os coeficientes de segurança parciais para os efeitos dos diferentes agentes de degradação.

Quadro 10 – RTR e CS Parciais Obtidos nas Exposições do Geotêxtil Tecido a Agentes Químicos e Atmosféricos

Ensaio	RTR (%)	CS
Meio ácido (EN 14030 – Método A)	98,1	1,02
Meio alcalino (EN 14030 – Método B)	94,3	1,06
Hidrólise (EN 12447)	98,5	1,02
Termo-oxidação (14 dias) (NP EN ISO 13438)	104	1,00*
Termo-oxidação (28 dias) (NP EN ISO 13438)	103	1,00*
Envelhecimento climatérico (NP EN 12224)	90,6	1,10

\*Considerou-se 1,00

Os coeficientes de segurança parciais obtidos para a imersão em líquidos (EN 14030 e EN 12247) foram muito próximos da unidade (maior exceção para a imersão em meio alcalino). A exposição a 110 °C (14 e 28 dias) não provocou alterações na resistência à tração do geotêxtil tecido.

A exposição aos agentes climatéricos (em condições muito idênticas às definidas na norma NP EN 12224) originou uma ligeira diminuição da resistência à tração do geotêxtil tecido (resistência à tração residual de 90,6%); o coeficiente de segurança parcial obtido foi de 1,10.

### 3.2 - Geotêxtil não-tecido

#### 3.2.1 - Danificação durante a instalação e abrasão

As amostras do geotêxtil não-tecido sujeitas ao ensaio de DDI (em laboratório) possuíam partículas finas incrustadas na sua estrutura (partículas derivadas da fragmentação do *corundum*). Por sua vez, o ensaio de abrasão causou a desagregação da camada superficial do material e a reorientação dos filamentos na direção do movimento da placa deslizante (onde está instalado o abrasivo). A exposição sucessiva à DDI e à abrasão originou o corte e alinhamento de filamentos existentes na superfície do geotêxtil (formando aglomerados de fibras perpendicularmente à direção do movimento do abrasivo). A Figura 5 compara o aspeto das amostras danificadas do geotêxtil não-tecido.

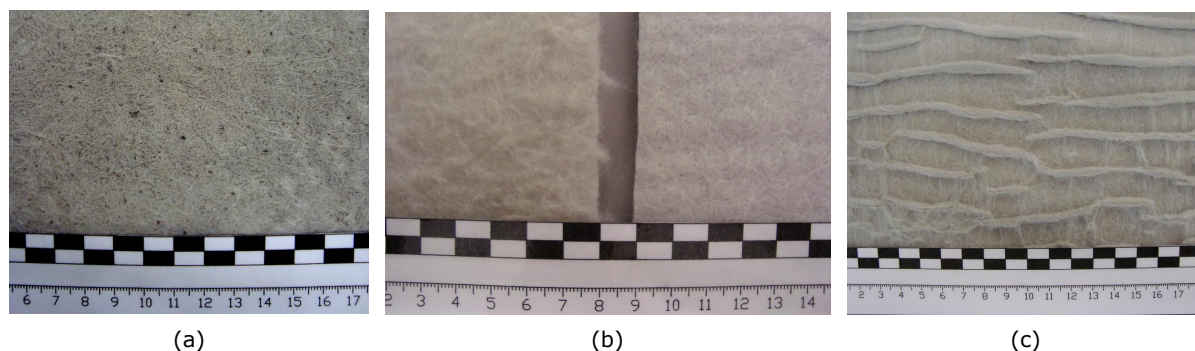


Figura 5 – Aspeto das Amostras Danificadas do Geotêxtil Não-tecido (Rosete, 2010): (a) DDI em Laboratório; (b) Abrasão (à Esquerda) e Intacto (à Direita); (c) DDI em Laboratório e Abrasão (Exposição Sucessiva)

Os ensaios de DDI (em laboratório), de abrasão e de exposição sucessiva à DDI e à abrasão provocaram alterações relevantes nas propriedades mecânicas (resistência à tração e extensão na força máxima) do geotêxtil não-tecido (Quadro 11).

Quadro 11 – Propriedades Mecânicas do Geotêxtil Não-tecido, Antes e Após os Ensaio de DDI e Abrasão

Ensaio	RT (kN.m <sup>-1</sup> )	E <sub>FM</sub> (%)
Intacto	43,3 (2,2)	89,3 (4,8)
DDI Laboratório (EN ISO 10722)	33,7 (3,3)	84,6 (6,6)
Abrasão (EN ISO 13427)	40,8 (5,3)	113,2 (6,0)
DDI + Abrasão	30,4 (1,4)	96,9 (7,8)

(entre parêntesis encontram-se os desvios padrão obtidos)

A simulação laboratorial do processo de instalação provocou uma diminuição da resistência à tração e da extensão na força máxima do geotêxtil não-tecido (diminuições de 22,2% e 5,3%, respetivamente). Por sua vez, os ensaios de abrasão causaram uma pequena diminuição da resistência à tração (resistência à tração residual de 94,2%) e um aumento da extensão na força máxima (aumento de 26,8%).

A exposição sucessiva aos ensaios de DDI e abrasão originou uma diminuição significativa da resistência à tração (redução de 29,8%) e um ligeiro aumento da extensão na força máxima (aumento de 8,5%) do geotêxtil não-tecido. O Quadro 12 resume as resistências à tração residuais do geotêxtil não-tecido após os ensaios de DDI, abrasão e exposição sucessiva à DDI e abrasão; são também incluídos os respetivos coeficientes de segurança parciais.

Quadro 12 – RTR e CS Parciais Obtidos nos Ensaios de DDI e Abrasão do Geotêxtil Não-tecido

Ensaio	RTR (%)	CS
DDI Laboratório (EN ISO 10722)	77,8	1,28
Abrasão (EN ISO 13427)	94,2	1,06
DDI + Abrasão	70,2	1,42

O coeficiente de segurança parcial mais elevado foi obtido para as amostras expostas sucessivamente à DDI e à abrasão (coeficiente de segurança de 1,42). Os efeitos isolados da DDI e da abrasão resultaram em coeficientes de segurança parciais de 1,28 e de 1,06, respetivamente.

Pela metodologia tradicional (considera o efeito isolado dos vários agentes de degradação), o coeficiente de segurança parcial para representar o efeito da DDI e da abrasão pode ser encontrado multiplicando os coeficientes de segurança parciais obtidos, individualmente, para a DDI (1,28) e para a abrasão (1,06). O coeficiente de segurança obtido dessa forma (1,36) é ligeiramente menor do que o obtido pela exposição sucessiva aos dois agentes de degradação (1,42). Este resultado realça a importância de se considerarem efeitos sinérgicos na degradação que ocorre nos geotêxteis.

### 3.2.2 - Agentes químicos e atmosféricos

Os ensaios de imersão em líquidos, de termo-oxidação e de envelhecimento climatérico não provocaram a diminuição da resistência à tração do geotêxtil não-tecido. Desta forma, os coeficientes de segurança parciais obtidos para o efeito destes agentes de degradação foram de 1,00 (Quadro 13).

Quadro 13 – RTR e CS Parciais Obtidos nas Exposições do Geotêxtil Não-tecido a Agentes Químicos e Atmosféricos

Ensaio	RTR (%)	CS
Meio ácido (EN 14030 – Método A)	102	1,00*
Meio alcalino (EN 14030 – Método B)	104	1,00*
Hidrólise (EN 12447)	100	1,00*
Termo-oxidação (14 dias) (NP EN ISO 13438)	102	1,00*
Termo-oxidação (28 dias) (NP EN ISO 13438)	101	1,00*
Envelhecimento climatérico (NP EN 12224)	103	1,00*

\*Considerou-se 1,00

## 4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram determinados coeficientes de segurança parciais para usar no dimensionamento de dois geotêxteis, tendo em conta a ação de vários agentes ou tipos de degradação: DDI, abrasão, rotura em fluência, degradação química (imersão em soluções ácidas e alcalinas, hidrólise e termo-oxidação) e a ação de agentes climatéricos. É importante relembrar que estes coeficientes de segurança não podem ser generalizados. De facto, os coeficientes de segurança determinados não são válidos para outros materiais (mesmo com estruturas e propriedades idênticas, poderão ter diferentes composições químicas), nem em todas as condições de aplicação. Os coeficientes de segurança a utilizar em projeto deverão ser avaliados caso a caso, analisando as condições específicas de cada obra.

Os coeficientes de segurança parciais relativos aos efeitos da degradação química e agentes climatéricos foram muito próximos da unidade. Desta forma, ambos os geotêxteis mostraram ter uma boa resistência à ação destes agentes, estando certamente protegidos (por aditivos químicos, como estabilizantes UV e antioxidantes) contra este tipo de degradação. De facto, na ausência de estabilização química adequada, os geotêxteis de polipropileno apresentam uma baixa resistência à termo-oxidação e ao envelhecimento climatérico (Carneiro, 2009).

No geotêxtil tecido, os coeficientes de segurança parciais mais elevados foram obtidos para os efeitos da DDI ( $CS_{DDI}$  de 2,31) e da rotura em fluência ( $CS_{FLU}$  de 1,75). No caso do geotêxtil não-tecido, a DDI foi a responsável pelo coeficiente de segurança parcial mais elevado (não foram efetuados ensaios de rotura em fluência para este material).

Tal como se mostrou para o geotêxtil tecido (para a DDI e rotura em fluência) e não-tecido (para a DDI e a abrasão), podem existir efeitos sinérgicos entre os agentes de degradação. Desta forma, os métodos de dimensionamento dos geossintéticos podem ser melhorados pela introdução de coeficientes de segurança que contabilizem as interações que ocorrem entre os diferentes agentes de degradação; este é um tema que carece de investigação.

## AGRADECIMENTOS

Fundação para a Ciência e a Tecnologia (projeto de investigação PTDC/ECM/099087/2008) e COMPETE (projeto de investigação FCOMP-01-0124-FEDER-009724).

## REFERÊNCIAS

- BS 8006-1 (2010). Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- Carneiro, J.R.C. (2009). Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – a importância da incorporação de aditivos químicos, *Dissertação de Doutoramento em Engenharia do Ambiente*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, LXVIII-534p.
- EN 12447 (2001). Geotextiles and geotextile-related products. Screening test method for determining the resistance to hydrolysis in water.
- EN 14030 (2001). Geotextiles and geotextile-related products. Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquid.
- EN ISO 10722 (2007). Geosynthetics. Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material.
- EN ISO 13427 (1998). Geotextiles and geotextile-related products. Abrasion damage simulation (sliding block test).
- EN ISO 13431 (1999). Geotextiles and geotextile-related products. Determination of tensile creep and creep rupture behaviour.
- ISO/TR 20432 (2007). Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement.
- Lopes, M.P. e Lopes, M.L. (2003). Um equipamento para a realização de ensaios laboratoriais de danificação durante a instalação de geossintéticos. *Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, n.º 98, pp. 7-24.
- NP EN 12224 (2007). Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência ao envelhecimento devido ao clima (versão Portuguesa da norma EN 12224:2000).
- NP EN 12226 (2005). Geotêxteis e produtos relacionados. Ensaios gerais para avaliação após os ensaios de durabilidade (versão Portuguesa da norma EN 12226:2000).
- NP EN 29073-3 (1993). Têxteis. Métodos de ensaio para tecidos não-tecidos. Parte 3: Determinação da resistência à tracção e do alongamento (versão Portuguesa da norma EN 29073-3:1992).
- NP EN ISO 9862 (2007). Geossintéticos. Amostragem e preparação de provetes (versão Portuguesa da norma EN ISO 9862:2005).
- NP EN ISO 10319 (2005). Geotêxteis. Ensaio de tracção em tiras largas (versão Portuguesa da norma EN ISO 10319:1996).
- NP EN ISO 13438 (2006). Geotêxteis e produtos relacionados. Determinação da resistência à oxidação (versão Portuguesa da norma EN ISO 13438:2004).
- NP EN ISO 13934-1 (2001). Têxteis. Propriedades de tracção dos tecidos. Parte 1: Determinação da força máxima e do alongamento à força máxima pelo método da tira (versão Portuguesa da norma EN ISO 13934-1:1999).
- Pinho-Lopes, M.J.F. (2004). Estudo de coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos, *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, LXXII-694p.
- Rosete, A.J.C.P. (2010). Durabilidade de geossintéticos em obras ferroviárias – abrasão e DDI, *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil*, Universidade de Aveiro, Aveiro, X-114p.
- WSDOT Standard Practice T925 (2009). Standard practice for determination of long-term strength for geosynthetic reinforcement. Washington State Department of Transportation Materials Manual, acedido em janeiro de 2012 em [www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-01/Materials.pdf](http://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M46-01/Materials.pdf).