

DEGRADAÇÃO DE GEOTÊXTEIS DE POLIPROPILENO EM AMBIENTE MARINHO Degradation of Polypropylene Geotextiles in Marine Environments

JOSÉ RICARDO CARNEIRO ⁽¹⁾, MIGUEL MORAIS ⁽²⁾ e MARIA DE LURDES LOPES ⁽³⁾

⁽¹⁾ Doutor em Engenharia do Ambiente, CONSTRUCT-GEO, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, rcarneir@fe.up.pt

⁽²⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, lmiguel.morais@gmail.com

⁽³⁾ Professora Catedrática, CONSTRUCT-GEO, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, lcosta@fe.up.pt

Resumo

Os geossintéticos podem ser usados para a construção de várias estruturas de proteção costeira, onde podem estar em contacto com alguns agentes capazes de induzir alterações indesejáveis nas suas propriedades a curto e a longo prazo. Neste trabalho, procedeu-se à avaliação da resistência de geotêxteis não-tecidos de polipropileno à degradação em ambiente marinho. Para tal, os materiais foram (1) expostos à ação dos agentes climáticos, (2) imersos no oceano e (3) expostos à ação das marés. Estas exposições foram realizadas no Arquipélago dos Açores (ilhas do Pico e do Faial) e tiveram uma duração máxima de 36 meses. Os danos ocorridos nos geotêxteis (durante as várias exposições) foram avaliados através da monitorização do comportamento à tração dos materiais.

Palavras-chave: Geotêxteis, durabilidade, envelhecimento climático, água do mar, Chimassorb 944.

Abstract

The geosynthetics can be used for the construction of many coastal protection structures, where they can be in contact with some agents capable of causing unwanted changes on their short and long-term properties. This work studies the resistance of nonwoven polypropylene geotextiles against degradation in marine environment. The geotextiles were (1) exposed to weathering, (2) immersed in seawater and (3) exposed to the action of tides. These exposures were carried out in Portugal (Archipelago of the Azores, Pico and Faial Islands) and lasted for 36 months. The damage occurred in the geotextiles (during the degradation tests) was evaluated by monitoring the tensile behavior of the materials.

Keywords: Geotextiles, durability, weathering, seawater, Chimassorb 944.

1. Introdução

Os geossintéticos são materiais poliméricos utilizados na construção de várias estruturas de Engenharia Civil, como por exemplo: aterros de resíduos, estradas, ferrovias, túneis, canais, entre outras.

As possibilidades de aplicação destes materiais em obras marítimas e/ou de proteção costeira são muito variadas, havendo um interesse crescente na sua utilização (Figura 1). As vantagens do uso de geossintéticos incluem o baixo custo de construção e remoção (caso seja necessário), a facilidade de construção, a boa eficiência dos materiais e o baixo impacto ambiental.

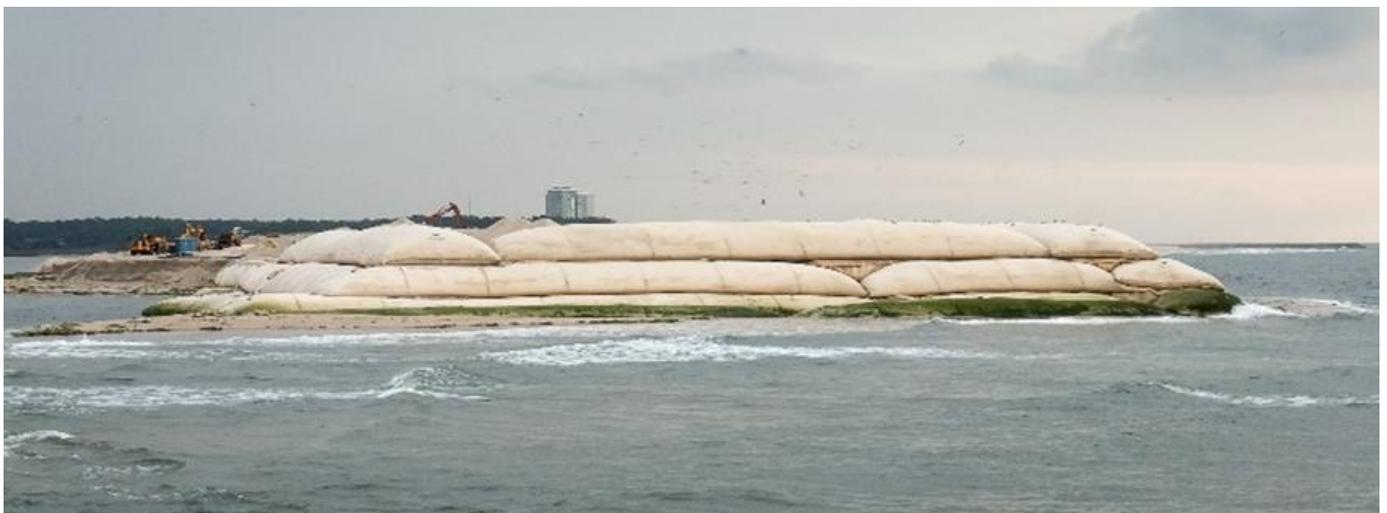


Figura 1. Exemplo da aplicação de geossintéticos em estruturas de proteção costeira.

Em ambientes marinhos os geossintéticos podem estar em contacto com vários agentes de degradação, tais como: luz solar e outros agentes climatéricos, agentes biológicos, água do mar, oxigénio atmosférico ou a ação das ondas, marés e correntes.

O contacto prolongado com estes agentes pode causar danos nos geossintéticos (alterações indesejáveis nas suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas), afetando o seu desempenho e reduzindo o seu tempo de vida útil. Deste modo, e para o bom funcionamento das estruturas onde estão inseridos, é importante que os geossintéticos possuam uma boa resistência à degradação.

Os polímeros usados para o fabrico de geossintéticos são normalmente muito resistentes a várias espécies químicas e à degradação biológica. Contudo, as suas resistências contra a oxidação e a radiação ultravioleta (UV) são normalmente reduzidas (Carneiro, 2009). O processo de oxidação pode ser induzido pela ação da temperatura (termo-oxidação) ou pela radiação UV (foto-oxidação). Na maioria dos casos, os geossintéticos estão expostos à radiação UV apenas durante um curto período de tempo (durante o processo de instalação), sendo subsequentemente cobertos por solos ou por líquidos. Contudo, em algumas aplicações (como por exemplo na aplicação ilustrada na Figura 1) podem estar expostos durante um período de tempo mais prolongado.

Os danos causados pela oxidação e pela radiação UV (por exemplo, diminuição da resistência mecânica) podem ser retardados pela incorporação de aditivos químicos (como antioxidantes ou estabilizantes UV) na composição dos geossintéticos (Carneiro, 2009).

O contacto prolongado dos geossintéticos com líquidos pode causar a extração dos aditivos químicos presentes nos materiais. Nalguns casos, os líquidos podem também reagir com as cadeias poliméricas dos geossintéticos (por exemplo, através de reações de hidrólise) ou serem absorvidos pelas mesmas (podendo ocorrer o intumescimento dos materiais).

A garantia de durabilidade é um requisito fundamental para a aplicação de geossintéticos em Engenharia Civil. O tempo de vida esperado para os geossintéticos varia tipicamente entre um ano e mais de 100 anos (dependendo da aplicação). Nesse período de tempo, os materiais devem desempenhar corretamente as funções para os quais foram instalados. Logo, é importante identificar as condições a que irão estar expostos e prever como essas condições irão afetar as suas propriedades. Essas previsões são normalmente obtidas com base em ensaios laboratoriais, onde os geossintéticos são expostos (frequentemente sob condições de degradação aceleradas) à ação de vários agentes de degradação.

Por vezes (e tal como acontece no presente trabalho), podem também ser realizados ensaios sob condições de degradação reais. Esses ensaios são normalmente muito demorados e, por isso, impraticáveis na maioria dos casos.

Neste trabalho, procedeu-se à avaliação *in situ* da resistência de geotêxteis não-tecidos de polipropileno a agentes de degradação presentes em ambientes marinhos. Os materiais foram expostos à ação dos agentes climatéricos, imersos no oceano e expostos à ação das marés.

2. Programa Experimental

2.1. Geotêxteis

Foram estudados quatro geotêxteis não-tecidos agulhados de polipropileno (PP) (designados por B0, B2, B4 e P2) com diferentes composições químicas (diferentes quantidades de Chimassorb 944 e de negro de carbono). As fibras usadas no fabrico dos geotêxteis possuíam um comprimento de 75 mm e uma massa linear de 8 denier. As principais características dos geotêxteis podem ser encontradas no Quadro 1.

Quadro 1. Principais características dos geotêxteis.

Geotêxtil	%C944 (m/m)	%NC ⁽¹⁾ (m/m)	%PP (m/m)	MUA ⁽²⁾ (g.m ⁻²)	t ⁽³⁾ (mm)
B0	0	0	100	283	3,21
B2	0,2	0	99,8	272	3,16
B4	0,4	0	99,6	263	3,17
P2	0,2	1,1	98,7	284	3,03

⁽¹⁾ negro de carbono; ⁽²⁾ massa por unidade de área; ⁽³⁾ espessura.

O Chimassorb 944 (C944) (Figura 2) é um estabilizante UV da família das HALS (*hindered amine light stabilisers*). Por sua vez, o negro de carbono é um pigmento (de cor preta) que também pode atuar como estabilizante UV.

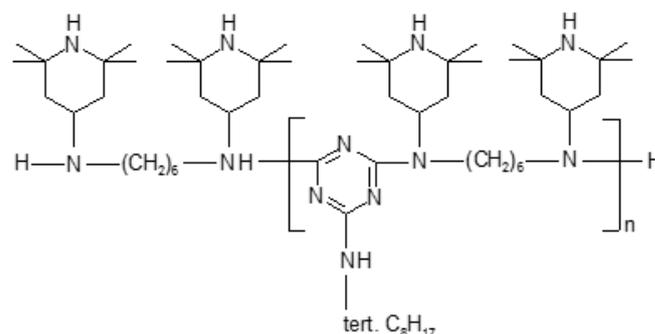


Figura 2. Fórmula de estrutura do Chimassorb 944.

No presente artigo serão apenas apresentados os resultados obtidos para o geotêxtil B4. Resultados adicionais podem ser encontrados em Morais *et al.* (2012), Carneiro *et al.* (2012) e Carneiro *et al.* (2016).

Os processos de amostragem e preparação de provetes (para os ensaios de caracterização e degradação) foram realizados de acordo com a norma EN ISO 9862.

Os provetes (direção de fabrico) foram recolhidos de posições dispersas por toda a largura e comprimento do geotêxtil (fornecido sob a forma de 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 locais do rolo (cortados em diagonais, abrangendo diferentes zonas na largura e comprimento do rolo).

2.2. Ensaios de durabilidade

O geotêxtil foi exposto *in situ* a 3 ensaios de degradação: (1) exposição ao envelhecimento climatérico (junto ao mar), (2) imersão em água do mar e (3) exposição à ação das marés.



Figura 3. Geotêxteis expostos à ação das marés: (a) preia-mar; (b) baixa-mar; (c) entre preia-mar e baixa-mar (Morais *et al.*, 2012).

Estes ensaios foram realizados no Arquipélago dos Açores (ilhas do Pico e Faial) e tiveram uma duração máxima de 36 meses (recolha de amostras para caracterização ao fim de 6, 12, 24 e 36 meses de exposição).

O geotêxtil foi exposto a envelhecimento climatérico na ilha do Pico (latitude de 38°25'N, longitude de 28°24'W, altitude de 24 m - exposição junto ao mar). As amostras foram colocadas em suportes orientados para sul com inclinação de 30°. Carneiro (2009) realizou um estudo semelhante para o geotêxtil B4, mas não em ambiente marinho.

A imersão do geotêxtil em água do mar (aproximadamente 4 m de profundidade) foi realizada no Porto da Horta (ilha do Faial) (latitude de 38°31'N, longitude de 28°37'W). Em relação à ação das marés, as amostras do geotêxtil foram colocadas no paramento inclinado do lado norte da Marina da Horta (ilha do Faial) (latitude de 38°32'N, longitude de 28°37'W) com orientação para su-sudeste (160°) e com uma inclinação de 32.5°. As amostras ficavam totalmente imersas em preia-mar (expostas à ação da água do mar) (Figura 3.a) e totalmente emersas em baixa-mar (expostas à radiação UV e a outros agentes climatéricos) (Figura 3.b).

2.3. Avaliação dos danos sofridos

Os danos ocorridos no geotêxtil B4 (durante os ensaios de durabilidade) foram avaliados por inspeção visual e através de ensaios mecânicos de tração (de acordo com a norma EN 29073-3) (Figura 4). As condições experimentais dos ensaios de tração estão resumidas no Quadro 2.

Quadro 2. Condições experimentais dos ensaios de tração.

Largura <small>Provete</small>	Comprimento <small>Provete</small> ⁽¹⁾	n	Velocidade
50 mm	200 mm	5	100 mm.min ⁻¹

⁽¹⁾ comprimento entre garras.

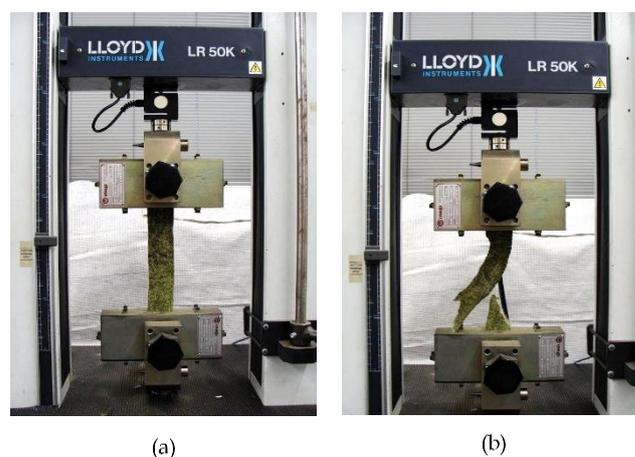


Figura 4. Ensaio de tração (EN 29073-3): (a) início do ensaio; (b) fim do ensaio (Morais *et al.*, 2012).

Os parâmetros mecânicos determinados (valores na direção de fabrico) incluíram a resistência à tração (T , em kN.m⁻¹) e a extensão na força máxima (E_{FM} , em %). Alguns resultados são apresentados em termos de resistência à tração residual (RTR, em %), obtida de acordo com a seguinte equação,

$$RTR = T_{EXPOSTO} / T_{REFERÊNCIA} \times 100 \quad [1]$$

em que, $T_{REFERÊNCIA}$ e $T_{EXPOSTO}$ representam, respetivamente, a resistência à tração do geotêxtil antes e após a exposição aos agentes de degradação.

3. Resultados e Discussão

3.1. Exposição aos agentes climáticos

O geotêxtil B4 adquiriu uma coloração cinzenta (a sua cor original era branca) durante a exposição ao envelhecimento climático. Esta alteração de cor deveu-se à acumulação de resíduos (poeiras, sujidade) entre as suas fibras.

A exposição aos agentes climáticos causou alterações nas propriedades físicas do geotêxtil B4. De facto, ocorreu um aumento da massa por unidade de área depois da exposição aos agentes climáticos (Carneiro *et al.*, 2016). Por exemplo, após 24 meses de exposição, o geotêxtil B4 tinha uma massa por unidade de área de 316 g.m⁻² (aumento de 53 g.m⁻² em relação ao valor inicial: 263 g.m⁻²). No final dos 36 meses de exposição, a massa por unidade de área era de 287 g.m⁻², um aumento de 24 g.m⁻² em relação ao valor inicial.

O aumento ocorrido na massa por unidade de área não resultou, como é óbvio, de um ganho de massa polimérica, mas sim devido à acumulação de resíduos na estrutura do geotêxtil B4.

De forma idêntica ao que ocorreu para a massa por unidade de área, a espessura do geotêxtil B4 também aumentou após a exposição aos agentes climáticos: incrementos de 0,28, 0,15 e 0,05 mm depois de 12, 24 e 36 meses, respetivamente (Carneiro *et al.*, 2016). Estes aumentos na espessura podem ser igualmente explicados pela acumulação de resíduos na estrutura não-tecida (a espessura é determinada aplicando pressão e os resíduos existentes na estrutura não-tecida tornaram o geotêxtil menos compressível).

A exposição aos agentes climáticos provocou alterações relevantes na resistência à tração do geotêxtil B4 (Quadro 3). De facto, após 12 meses de exposição, a resistência à tração estava reduzida a 69,2% do seu valor inicial (os primeiros 6 meses de exposição aos agentes climáticos não induziram uma diminuição da resistência à tração – resistência à tração residual de 103,0%).

O aumento do tempo de exposição deu origem a reduções mais pronunciadas na resistência à tração (resistências à tração residuais de 55,6% e 40,6% após 24 e 36 meses de exposição, respetivamente). Tal como a resistência à tração, a extensão na força máxima também sofreu uma redução após a exposição aos agentes climáticos (maiores diminuições para os tempos de exposição mais elevados).

A deterioração das propriedades mecânicas do geotêxtil B4 durante a exposição ao envelhecimento climático pode ser principalmente atribuída à ação da radiação UV. De facto, o efeito danoso da radiação UV na durabilidade de materiais de PP é bem conhecido (Carneiro, 2009). Outros agentes (tais como a chuva, humidade ou variações de temperatura) podem também ter contribuído para o processo de degradação do geotêxtil B4, mas de forma menos significativa.

Quadro 3. Evolução das propriedades de tração do geotêxtil B4 durante a exposição aos agentes climáticos.

Tempo de exposição (meses)	T (kN.m ⁻¹)	E _{FM} (%)	RTR (%)
0	13,3 (12,0%)	75,8 (8,0%)	-
6	13,7 (10,9%)	50,8 (3,0%)	103,0
12	9,2 (10,9%)	44,0 (6,6%)	69,2
24	7,4 (16,2%)	41,1 (5,6%)	55,6
36	5,4 (14,8%)	34,0 (5,9%)	40,6

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

A presença do estabilizante UV C944 foi incapaz de evitar a ocorrência de degradação (redução da resistência à tração) no geotêxtil B4 durante a exposição aos agentes climáticos. Contudo, e apesar de não ter evitado a ocorrência de danos, a presença de 0,4% de C944 promoveu um aumento muito significativo da resistência das fibras de PP contra a ação dos agentes climáticos, retardando a degradação. De facto, na ausência de C944, o geotêxtil estaria totalmente destruído (resistência à tração nula) depois de 12 meses de exposição (Morais *et al.*, 2012).

3.2. Imersão em água do mar

Contrariamente à exposição ao envelhecimento climático, a imersão em água do mar não causou alterações relevantes na cor do geotêxtil B4. No entanto, promoveu a acumulação de areia na sua estrutura não-tecida.

A resistência à tração do geotêxtil B4 não sofreu alterações muito relevantes durante os 36 meses de imersão em água do mar (resistências à tração residuais entre os 104,5% e os 113,5%) (Quadro 4).

Contrariamente à resistência à tração, a extensão na força máxima sofreu uma pequena diminuição (redução idêntica após os diferentes períodos de exposição). A redução da extensão na força máxima poderá ser devida à areia acumulada na estrutura não-tecida do geotêxtil B4, o que deu origem a um aumento da sua rigidez. De um modo geral, o geotêxtil B4 apresentou uma boa resistência à água do mar. De facto, os 36 meses de exposição não provocaram alterações muito pronunciadas no comportamento à tração do geotêxtil B4.

Quadro 4. Evolução das propriedades de tração do geotêxtil B4 durante a imersão em água do mar.

Tempo de exposição (meses)	T (kN.m ⁻¹)	E _{FM} (%)	RTR (%)
0	13,3 (12,0%)	75,8 (8,0%)	-
6	15,1 (2,0%)	64,3 (7,3%)	113,5
12	14,5 (10,3%)	60,7 (5,8%)	109,0
24	13,9 (15,1%)	61,4 (6,8%)	104,5
36	14,2 (9,2%)	59,9 (3,2%)	106,8

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

3.3. Exposição à ação das marés

Tal como a exposição ao envelhecimento climatérico, a ação das marés também promoveu alterações na cor do geotêxtil B4. Este adquiriu tons verdes, cinzentos e castanhos devido à fixação e crescimento de algas na sua superfície e devido à acumulação de resíduos na sua estrutura não-tecida (Figura 5).

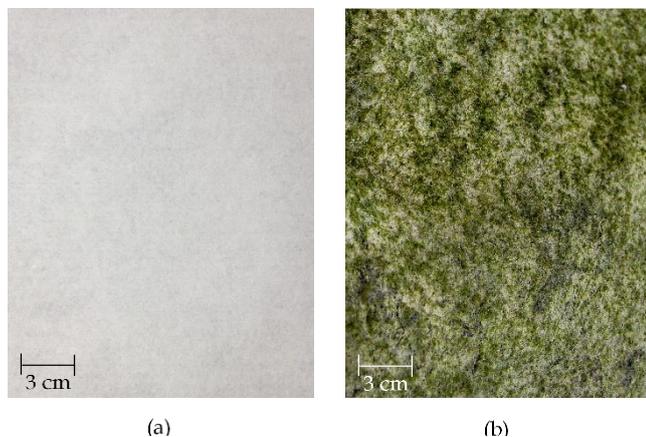


Figura 5. Geotêxtil B4 antes (a) e após 12 meses de exposição à ação das marés (b).

À semelhança do ocorrido na exposição ao envelhecimento climatérico, a exposição à ação das marés também provocou um aumento da massa por unidade de área, mas muito mais pronunciado (Carneiro *et al.*, 2016). De facto, após 36 meses de exposição, o geotêxtil B4 possuía uma massa por unidade de área de 687 g.m^{-2} (um aumento de 424 g.m^{-2} em relação à sua massa por unidade de área inicial).

O aumento da massa por unidade de área do geotêxtil B4 pode ser explicado pela acumulação de resíduos na sua estrutura não-tecida e pela fixação e crescimento de algas (que cobriram por completo a sua superfície). Tal como a massa por unidade de área, a espessura também sofreu um aumento depois da exposição à ação das marés (o aumento provocado pela ação das marés foi maior que o causado pelos agentes climatéricos). Depois de 12, 24 e 36 meses de exposição, verificaram-se aumentos de espessura de 0,44 mm, 0,53 mm e 0,59 mm, respetivamente (Carneiro *et al.*, 2016). Estes aumentos ocorreram devido às algas e aos resíduos existentes na estrutura do geotêxtil B4. As algas e os resíduos provocaram também um aumento da rigidez do material (aumento facilmente perceptível ao tacto). A resistência à tração do geotêxtil B4 sofreu um aumento considerável depois da exposição à ação das marés (Quadro 5).

Quadro 5. Evolução das propriedades de tração do geotêxtil B4 durante a exposição à ação das marés.

Tempo de exposição (meses)	T (kN.m ⁻¹)	E _{FM} (%)	RTR (%)
0	13,3 (12,0%)	75,8 (8,0%)	-
6	17,6 (8,0%)	59,5 (7,6%)	132,3
12	20,6 (7,3%)	69,6 (8,6%)	154,9
24	19,6 (10,2%)	63,4 (8,7%)	147,4
36	16,0 (6,2%)	61,1 (8,0%)	120,3

(entre parêntesis encontram-se os coeficientes de variação obtidos)

De facto, após apenas 6 meses de exposição, a resistência à tração residual era de 132,3%. Com o aumento do tempo de exposição para 12 meses a resistência à tração sofreu um novo aumento (resistência à tração residual de 154,9%). No fim dos 36 meses de exposição, o geotêxtil B4 ainda possuía uma resistência à tração superior ao valor inicial (resistência à tração residual de 120,3%).

O aumento da resistência à tração pode ser explicado pela presença, em grandes quantidades, de algas e resíduos no geotêxtil B4. O crescimento de algas promoveu a formação de novas ligações na estrutura não-tecida (ligações entre as algas e as fibras) e os resíduos acumulados originaram um aumento da rigidez.

Contrariamente à resistência à tração, a extensão na força máxima não sofreu um aumento depois da exposição à ação das marés. Pelo contrário, ocorreu até uma diminuição desta propriedade (após 36 meses de exposição, redução de 75,8% para 61,1%).

Durante a exposição à ação das marés, o geotêxtil B4 esteve em contacto durante um elevado período de tempo (quando esteve emerso) com a radiação solar e com outros agentes climatéricos.

Os resultados apresentados anteriormente no subponto 3.1 mostraram que a ação dos agentes climatéricos provocou uma redução significativa na resistência à tração do geotêxtil B4 (resistência à tração residual de 40,6% após 36 meses de exposição). Assim, seria de esperar que a ação das marés também tivesse provocado alguma diminuição na resistência à tração (devido aos períodos de emersão).

No entanto, essa diminuição não ocorreu (pelo contrário, houve até um aumento pronunciado da resistência à tração). Isto pode ser explicado pelo facto da superfície do geotêxtil B4 ter sido coberta por algas, protegendo-o da exposição direta à radiação solar e a outros agentes climatéricos.

Os resíduos existentes na estrutura não-tecida (preenchendo os espaços livres entre as fibras de PP) podem também ter retardado o processo de degradação, dado impedirem a radiação solar de atingir as fibras de PP.

4. Conclusões

As exposições *in situ* a agentes de degradação presentes em ambientes marinhos provocaram alterações relevantes nas propriedades mecânicas (resistência à tração e extensão na força máxima) de um geotêxtil não-tecido. No entanto, essas alterações não foram iguais para as diferentes exposições.

A exposição aos agentes climatéricos originou uma redução relevante na resistência à tração do geotêxtil B4 (diminuição para menos de metade após os 36 meses de exposição). A redução da resistência à tração foi tanto maior quanto maior o tempo de exposição.

Contrariamente ao envelhecimento climatérico, a imersão em água do mar não causou uma diminuição da resistência à tração do geotêxtil B4. Por sua vez, a exposição à ação das marés provocou um aumento pronunciado da resistência à tração. Todos os ensaios de durabilidade causaram reduções (com maior ou menor relevo) na extensão na força máxima.

A deterioração das propriedades mecânicas do geotêxtil B4 durante a exposição aos agentes climatéricos pode ser principalmente atribuída à ação nefasta da radiação UV. A degradação promovida pela radiação UV não ocorreu (pelo menos, de forma muito significativa) durante a exposição à ação das marés (períodos de emersão) porque a presença de uma grande quantidade de algas e resíduos impediram a radiação solar de atingir a estrutura não-tecida, protegendo o geotêxtil contra a fotodegradação. As algas e os resíduos acumulados na estrutura não-tecida do geotêxtil B4 foram também responsáveis pelo aumento ocorrido na resistência à tração depois da exposição à ação das marés. Por fim, o geotêxtil B4 apresentou uma resistência relativamente alta contra a ação da água do mar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à “Carvalhos Lda.” (Lousã) pela cedência dos geotêxteis, à “Portos dos Açores, S.A.” (Horta) pela cedência do espaço para expor os geotêxteis à ação das marés e à “FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia” pelo apoio financeiro. J. R. Carneiro agradece à FCT a bolsa de Pós-Doutoramento com a referência SFRH/BPD/88730/2012 (bolsa apoiada por financiamento POPH/POCH/FSE).

Referências

- Carneiro, J.R.C. (2009). *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental – a importância da incorporação de aditivos químicos*, Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, LXVIII-534p.
- Carneiro, J.R., Morais, L.M. e Lopes, M.L. (2012). *Ageing of geotextiles in marine environments*. Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress, CD-ROM, vol. 3, pp. 26-30.
- Carneiro, J.R., Morais, M. e Lopes, M.L. (2016). *Durability of a polypropylene geotextile in marine environments: 3 years data*, Proceedings of the 6th European Geosynthetics Congress, CD-ROM, pp. 585-592.
- EN 29073-3 (1992). *Textiles – Test method for nonwovens. Part 3: determination of tensile strength and elongation*.
- EN ISO 9862 (2005). *Geosynthetics – Sample and preparation of test specimens*.
- Morais, L.M., Carneiro, J.R. e Lopes, M.L. (2012). *Durabilidade de geotêxteis em ambientes costeiros e marítimos*, Atas do VI Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, CD-ROM, 8p.

