



10

Comportamento a Longo Prazo - Durabilidade

Autores

Maria de Lurdes Lopes

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

lcosta@fe.up.pt

Margarida Pinho Lopes

Universidade de Aveiro

mlopes@ua.pt

José Ricardo Carneiro

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

rcarneir@fe.up.pt

10.1 INTRODUÇÃO

A durabilidade dos geossintéticos pode ser entendida como a capacidade de estes materiais manterem as suas propriedades essenciais ao longo do tempo. O estudo da durabilidade de geossintéticos consiste numa avaliação das alterações no tempo da microestrutura do polímero, nomeadamente na sua estrutura molecular, e da macroestrutura do geossintético, usualmente expressa como mudanças nos valores de propriedades dos materiais (Sprague *et al.*, 1994). Os mesmos autores defendem que uma avaliação direta da durabilidade dos geossintéticos passa por analisar as alterações na microestrutura dos materiais. No entanto, ainda hoje a prática corrente é proceder a avaliações de alterações macroestruturais dos geossintéticos, nomeadamente através da realização de ensaios de laboratório para avaliar propriedades funcionais relevantes para cada aplicação (Pinho-Lopes & Lopes, 2010).

Há um grande número de fatores que condicionam a durabilidade de geossintéticos, que se combinam e podem exibir sinergia. Alguns exemplos incluem: a estrutura física do geossintético, o tipo de polímero base que o constitui, a inclusão de aditivos, o processo de manufatura, o ambiente físico e químico em que o geossintético se encontra, as condições de armazenamento e instalação em obra dos geossintéticos, e as solicitações impostas aos geossintéticos (Pinho-Lopes & Lopes, 2010).

Neste capítulo apresentam-se os principais mecanismos associados à durabilidade de geossintéticos (10.2), os processos de avaliação da durabilidade (10.3), aspetos da durabilidade relevantes para o dimensionamento (10.4) e alguns casos de estudo (10.5).

10.2 MECANISMOS ASSOCIADOS À DURABILIDADE

10.2.1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, no que diz respeito à durabilidade de geossintéticos distinguem-se dois grupos de propriedades: de endurance e relativas à degradação dos geossintéticos (Koerner, 1999). Em geral, a endurance dos geossintéticos é associada à resistência dos materiais, em particular ao longo da sua vida útil. Os agentes e mecanismos correspondentes são: danificação mecânica, incluindo a que ocorre durante o transporte e manuseamento dos produtos e aquela associada aos processos de

instalação em obra; fluência (em tração e em compressão); relaxação de tensões; e abrasão. A degradação de geossintéticos é associada a: oxidação; ação da temperatura; ação da radiação UV; hidrólise; ação de agentes químicos; ação de agentes biológicos. Estes dois grupos são descritos de forma breve nas secções seguintes.

10.2.2 RESISTÊNCIA (ENDURANCE)

10.2.2.1 DANIFICAÇÃO MECÂNICA

A utilização de técnicas construtivas adequadas e de uma boa gestão dos processos construtivos é essencial para que os geossintéticos sejam instalados de forma apropriada e se minimize a danificação mecânica destes materiais.

Transporte e manuseamento dos produtos

Durante o transporte e o manuseamento de geossintéticos podem induzir-se alterações na estrutura dos materiais e induzir danos localizados. A maioria dos produtores de geossintéticos fornece recomendações para o transporte e o manuseamento, específicas para diferentes tipos de produtos e aplicações, e que devem ser seguidas em obra, para minimizar eventuais danificações mecânicas.

Por exemplo, durante o manuseamento de geossintéticos (manual ou com equipamento mecânico) deve evitar-se que os materiais sejam solicitados mecanicamente. A colocação do geossintético no local desejado deve ser realizada desenrolando o material, em vez de o arrastar, para evitar danificação localizada. Os rolos devem ser envoltos em material de proteção, de forma a minimizar a exposição a agentes atmosféricos (suscetíveis de causar degradação) e a proteger os materiais da ação de animais, de vandalismo, entre outros.

Danificação durante a instalação em obra

A danificação durante a instalação em obra 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, por exemplo, em defeitos locais e/ou em alterações das propriedades dos geossintéticos (Pinho-Lopes, 2004). É de salientar que, para algumas aplicações de geossintéticos, as tensões associadas aos processos

de instalação em obra podem ser mais importantes do que as tensões de dimensionamento dos materiais (Koerner, 1999).

O mecanismo e o grau de danificação mecânica induzidos durante os processos de instalação em obra dependem do geossintético (estrutura, polímero constituinte e algumas propriedades físicas e mecânicas), do material de aterro (dimensão das partículas e angulosidade), do solo de fundação (rigidez e resistência), do método de instalação (procedimentos e equipamento utilizado, altura das camadas de solo) e das condições climáticas (Austin, 1998; Watn & Chew, 2002; Hufenus *et al.*, 2005).

Em geral identificam-se seis mecanismos de danificação mecânica associada aos processos de instalação em obra: abrasão, aparecimento de fendas e separação de material (*splitting*), punçoamento, rotura em tensão, corte de fibras, e rasgamento (Watn & Chew, 2002). Note-se que, normalmente, vários mecanismos tendem a ocorrer simultaneamente.

Para diminuir a importância da danificação durante a instalação em obra devem seguir-se boas práticas construtivas. Por exemplo, em aplicações de reforço de solos deve colocar-se o geossintético sobre camadas niveladas e sem raízes ou objetos aguçados, deve assegurar-se que nenhum equipamento circule sobre o geossintético antes que este esteja coberto com uma altura mínima de solo de 0,15 m e a dimensão máxima das partículas do material de aterro deve ser inferior a um quarto da altura da camada de compactação (Richardson, 1998).

Embora as consequências da danificação durante a instalação possam ser minimizadas através da adoção de técnicas e procedimentos construtivos adequados, algum grau de danificação é inevitável e deve ser considerado de forma o mais realista possível aquando do dimensionamento (ver secção 10.4). Além disso, o efeito da danificação durante a instalação em obra deve ser considerado em todas as aplicações de geossintéticos.

10.2.2.2 FLUÊNCIA E ROTURA EM FLUÊNCIA (EM TRAÇÃO)

Quando solicitados em tração os geossintéticos podem sofrer fluência e rotura em fluência. A fluência é a resposta viscoelástica do material polimérico a solicitações estáticas e constantes de tração e que resulta em extensão permanente dependente do tempo (Allen & Bathurst, 1996). Assim, a fluência depende do polímero constituinte, da solicitação aplicada, da temperatura, da estrutura do geossintético e do seu processo de fabrico (Greenwood *et al.*, 2012).

Em geral, distinguem-se três fases de fluência: primária, secundária e terciária. Sob solicitação estática constante os geossintéticos tendem a

sofrer deformação instantânea (que inclui componentes elástica e plástica), seguida de fluência primária. A fluência primária caracteriza-se por ser linear em relação ao logaritmo do tempo; durante esta fase ocorre orientação das cadeias moleculares dos polímeros semi-cristalinos (Müller-Rochholz, 1997). Durante a fluência secundária os geossintéticos exibem razão de deformação constante no tempo e, em geral, atinge-se a configuração ótima na orientação dos polímeros (Müller-Rochholz, 1997), que resulta num aparecimento de anisotropia no material (Kay *et al.*, 2004). A fluência terciária caracteriza-se por um aumento rápido da razão de extensão no tempo e conduz à rotura do material. Note-se que a fluência terciária não é observada para todos os polímeros; as poliolefinas (PE e PP) exibem as três fases de fluência, dependendo da solicitação aplicada, enquanto o polietileno tereftalato (um composto pertencente ao grupo dos poliésteres) exhibe apenas fluência primária e terciária (Greenwood *et al.*, 2012).

Quando as deformações de fluência levam à rotura do geossintético ocorre rotura em fluência. Sob solicitação estática constante, à medida que o material sofre fluência, a tensão aplicada ao geossintético atinge um valor suficientemente elevado para provocar o aparecimento de microfendilhação no material, embora esta não se propague de forma catastrófica. Consequentemente, a tensão aplicada na secção intacta do material aumenta um pouco, o que, por sua vez, implica um crescimento estável da microfendilhação; assim, durante um período de tempo irá ocorrer um aumento da tensão aplicada ao provete, devido ao efeito combinado da fluência e do constante aparecimento de microfendas. Por fim, atinge-se um estado em que a tensão localizada na zona fendilhada tem um valor que a secção transversal restante não consegue suportar. Nesse momento a fendilhação propaga-se rapidamente em toda a largura do provete, havendo rotura do material (Crawford, 1998).

Note-se que durante o período de solicitação estática constante, a resistência de um geossintético tende a diminuir drasticamente durante um período relativamente curto antes da rotura (ignorando o efeito de agentes ambientais ou danificação durante a instalação em obra). Em aplicações em que a resistência à tração do geossintético é uma das propriedades funcionais principais é necessário garantir que não ocorrerá rotura em fluência durante o seu tempo de vida útil.

10.2.2.3 RELAXAÇÃO DE TENSÕES

O fenômeno de relaxação de tensões é homólogo da fluência e é também uma consequência do comportamento viscoelástico dos geossintéticos. Durante a relaxação de tensões há diminuição gradual das tensões no tempo quando o geossintético está submetido a extensão constante (Sawicki, 2000). Parte da deformação dos polímeros submetidos a forças de tração está associada com o escorregamento entre elementos das cadeias moleculares que constituem os polímeros; caso estes movimentos internos estejam relacionados com um alívio de tensões sob deformação constante, estes movimentos dão origem à relaxação de tensões (Kay *et al.*, 2004).

A relaxação de tensões ocorre, por exemplo, em obras em que o geossintético está pré-esforçado e a sua deformação está restringida; nesse caso, o geossintético mantém a sua configuração e comprimento originais, não sofrendo deformações, e a tensão de pré-esforço diminui com o tempo. Isto faz com que a capacidade do geossintético de resistir a solicitações súbitas diminua (Greenwood *et al.*, 2012).

É comum admitir que a relaxação de tensões e a fluência de geossintéticos estão interligados (pois resultam da natureza viscoelástica dos geossintéticos). O módulo de rigidez dos geossintéticos, avaliado através de ensaios à tração, depende da razão de extensão aplicada ao material (i.e., da velocidade de ensaio). Por essa razão, acredita-se que se conseguem prever os resultados de um dos ensaios, por exemplo, de ensaios de relaxação de tensões, usando resultados do outro módulo em função da razão de extensão (Soong & Lord, 1998).

10.2.2.4 FLUÊNCIA EM COMPRESSÃO

Para alguns produtos, nomeadamente quando desempenham a função de drenagem, as deformações sob compressão normal ao plano dos geossintéticos podem comprometer o seu desempenho. Essa deformação, usualmente expressa como uma redução de espessura, associada à aplicação de tensão normal ao plano do geossintético constante no tempo, é designada por fluência em compressão. Por exemplo, para geocompósitos de drenagem é necessário garantir que ao longo do tempo de vida útil da obra a compressão do núcleo de drenagem não compromete o desempenho do material.

Em alguns materiais a fluência em compressão pode ainda resultar no colapso do núcleo de drenagem. A tendência para sofrer colapso depende da estrutura física do núcleo de drenagem (Greenwood *et al.*, 2012).

10.2.2.5 ABRASÃO E DESGASTE

Os plásticos, e conseqüentemente os geossintéticos, sofrem desgaste. Este mecanismo é extremamente complexo e muito dependente da natureza da aplicação e das propriedades do geossintético (Crawford, 1998). Em geral, distinguem-se três mecanismos de desgaste (Pinho-Lopes & Lopes, 2010): desgaste abrasivo, provocado por asperezas aguçadas que cortam o plástico; desgaste de fadiga, causado pela separação das partículas de plástico, devido a solicitações dinâmicas localizadas; desgaste por adesão, que resulta da transferência de plástico para outra superfície, devido às forças de adesão entre as duas superfícies.

A abrasão (designação mais comum para o desgaste abrasivo de geossintéticos) pode ser definida como o desgaste de um material devido a forças de atrito geradas pelo contacto entre duas superfícies (Brown & Greenwood, 2002). No caso de geossintéticos, muitas vezes a abrasão é causada pelo contacto com agregados sujeitos a solicitações cíclicas de pequena amplitude, tal como ocorre em vias férreas ou em projetos de controlo de erosão costeira. Em geral para este tipo de aplicações, considera-se que, embora os geossintéticos sejam suscetíveis a fadiga mecânica, a abrasão é a principal causa de degradação dos materiais (Shukla, 2016).

O dano mecânico associado à abrasão é muitas vezes comparado ao efeito dos processos de instalação em obra. No entanto, em geral os geossintéticos sofrem abrasão ao longo de toda a sua vida útil, enquanto os processos de instalação em obra têm um período de atuação bastante curto (quando comparado com o tempo de vida útil da maioria das aplicações de geossintéticos).

10.2.2.6 SOLICITAÇÃO DINÂMICA

Em algumas aplicações, tal como em vias rodoviárias e em vias férreas, para além de solicitações estáticas, os geossintéticos são submetidos a solicitações dinâmicas devidas ao tráfego. A solicitação dinâmica de compressão tende a provocar danificação mecânica dos geossintéticos (Greenwood *et al.*, 2012).

A alteração de propriedades associada a solicitações dinâmicas é muitas vezes designada por fadiga e é expressa como a fratura de um material após carregamento cíclico (inferior à resistência do material) durante um período de tempo significativo (Ram, 1997). A fadiga dos plásticos depende (Crawford, 1998): da irregularidade da distribuição da estrutura molecular; da natureza da solicitação; da natureza da deformação com o tempo; da

velocidade de deformação; da existência de microfissuras, de defeitos internos e de tensões residuais localizadas.

Algumas solicitações dinâmicas ou cíclicas, em particular força e frequência elevadas, podem conduzir ao amolecimento térmico dos materiais plásticos devido a um aumento de temperatura, traduzido na histerese na curva tensão-extensão, e que pode causar rotura prematura (Ram, 1997). Um dos plásticos com melhor resistência a cargas dinâmicas é o PP (Crawford, 1998).

10.2.3 DEGRADAÇÃO

Os principais agentes de degradação dos geossintéticos incluem os líquidos (como substâncias ácidas ou alcalinas, água do mar ou lixiviados), temperaturas elevadas, oxigénio, radiação solar (principalmente a radiação UV) e outros agentes atmosféricos e agentes biológicos. Nas secções seguintes procede-se à descrição dos principais agentes e/ou mecanismos de degradação dos geossintéticos.

10.2.3.1 AÇÃO DE LÍQUIDOS

Os líquidos podem induzir a degradação dos geossintéticos de diferentes formas: absorção de líquidos, extração de aditivos (como estabilizantes) ou ocorrência de reações químicas (como a hidrólise). De um modo geral, e à temperatura ambiente, os polímeros normalmente usados no fabrico de geossintéticos possuem uma boa resistência à ação dos líquidos.

A absorção de líquidos provoca frequentemente um aumento das dimensões (intumescimento) e uma perda de rigidez dos materiais poliméricos. Desde que não ocorram alterações químicas e morfológicas muito significativas, os danos causados pela absorção de líquidos podem ser reversíveis (através da remoção dos líquidos). Em alguns casos, a absorção de líquidos pode originar alterações irreversíveis na estrutura dos materiais poliméricos (por exemplo, através da ocorrência de reações de hidrólise).

O contacto prolongado com líquidos pode promover a extração dos aditivos existentes nos materiais poliméricos. Os aditivos podem ser removidos por lixiviação (pela ação da água ou de outro líquido em contacto com os materiais) ou por volatilização (no caso dos aditivos serem voláteis). A remoção de alguns tipos de aditivos (tais como antioxidantes ou estabilizantes UV) pode desproteger os geossintéticos contra a ação de outros agentes de degradação.

Em determinadas situações, os líquidos podem reagir com as cadeias poliméricas, causando alterações na estrutura dos materiais. Para além das reações com as cadeias poliméricas, os líquidos podem também reagir com

alguns estabilizantes (podendo neutralizar a sua função) ou pigmentos (alterando a aparência dos materiais poliméricos).

A hidrólise (reação química entre as moléculas de água e as cadeias poliméricas) pode ocorrer essencialmente nos geossintéticos fabricados a partir de poliésteres ou de poliamidas. De um modo geral, a hidrólise é relativamente lenta à temperatura ambiente, podendo ser acelerada pelo aumento da temperatura. Os poliésteres são normalmente mais afetados em meio alcalino do que em meio ácido (não devem ser utilizados materiais de poliéster em meios com um pH elevado). Pelo contrário, meios com pH baixo são mais danosos para algumas poliamidas. A Figura 10.1 ilustra a reação de hidrólise do polietileno tereftalato.

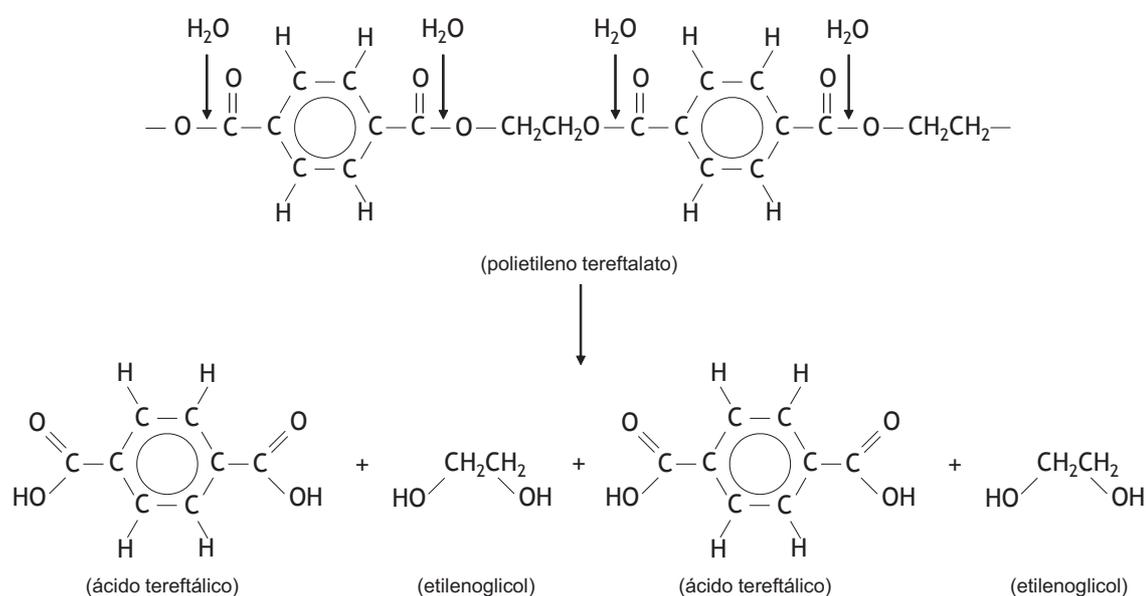


Figura 10.1 – Reação de despolimerização do polietileno tereftalato por hidrólise (Carneiro, 2009)

10.2.3.2 AÇÃO DA TEMPERATURA

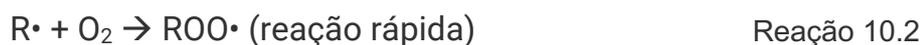
A ação da temperatura pode causar danos nos geossintéticos de diferentes formas: acelerando os mecanismos de degradação dos polímeros (o aumento da temperatura resulta normalmente num aumento da velocidade das reações químicas), provocando a dissociação de ligações ao longo da cadeia polimérica, promovendo a formação de radicais livres (que, em contacto com o oxigénio, podem promover a oxidação dos polímeros) ou originando a dilatação ou contração térmica dos materiais. De um modo geral, a ação da temperatura não constitui um problema na maioria das aplicações dos geossintéticos (as temperaturas a que os materiais estão expostos não são suficientemente elevadas para induzirem danos significativos).

10.2.3.3 OXIDAÇÃO

O oxigénio é um dos principais responsáveis pela degradação de muitos materiais poliméricos, incluindo os geossintéticos. A oxidação é um fenómeno bastante complexo que ocorre por um mecanismo de reação em cadeia constituído por 3 passos fundamentais: iniciação, propagação e terminação. O passo de iniciação é causado tipicamente por fatores como a temperatura (termo-oxidação) ou como a radiação UV (foto-oxidação) e consiste na formação de um radical livre ($R\cdot$) (Reação 10.1). A contaminação com resíduos metálicos ou o *stress* mecânico também podem provocar a formação de radicais livres.



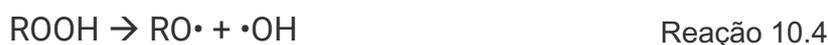
O oxigénio atmosférico reage prontamente com o radical livre formado ($R\cdot$), dando origem a um radical peróxido muito reativo ($ROO\cdot$) (Reação 10.2).



O radical peróxido ($ROO\cdot$) formado vai extrair um átomo de hidrogénio ao polímero circundante (RH), dando origem a um hidropéroxido ($ROOH$) e a outro radical livre ($R\cdot$) (Reação 10.3).



O radical livre $R\cdot$ reage novamente de acordo com a Reação 10.2, aumentando desta forma o grau de degradação. O hidropéroxido $ROOH$ é muito instável, podendo ser facilmente convertido nos radicais $RO\cdot$, $ROO\cdot$ e $\cdot OH$ (Reações 10.4 e 10.5).



Os radicais livres formados ($RO\cdot$, $ROO\cdot$ e $\cdot OH$) podem extrair átomos de hidrogénio às cadeias poliméricas vizinhas e aumentar assim a extensão da degradação. O mecanismo de oxidação (autocatalítico) irá continuar até que todos os radicais livres formados sejam convertidos em compostos não

reativos (por exemplo, pela ação de compostos antioxidantes). Desta forma, mesmo em pequenas quantidades, os radicais livres podem provocar uma extensa degradação nos geossintéticos (podendo originar a falha prematura dos materiais).

10.2.3.4 AGENTES ATMOSFÉRICOS

Os geossintéticos expostos ao ar livre são tipicamente degradados pela ação da radiação solar em combinação com o oxigénio atmosférico, a temperatura e a humidade. Existem ainda outros agentes que podem causar danos nos geossintéticos, como por exemplo os microrganismos, o ozono, os poluentes atmosféricos e a existência de *stress* mecânico.

A radiação solar que atinge a superfície da Terra possui comprimentos de onda compreendidos entre 295 e 3000 nm, podendo ser dividida em três regiões: radiação UV (entre 295 e 400 nm), radiação visível (entre 400 e 780 nm) e radiação infravermelha (entre 780 e 3000 nm) (Figura 10.2).

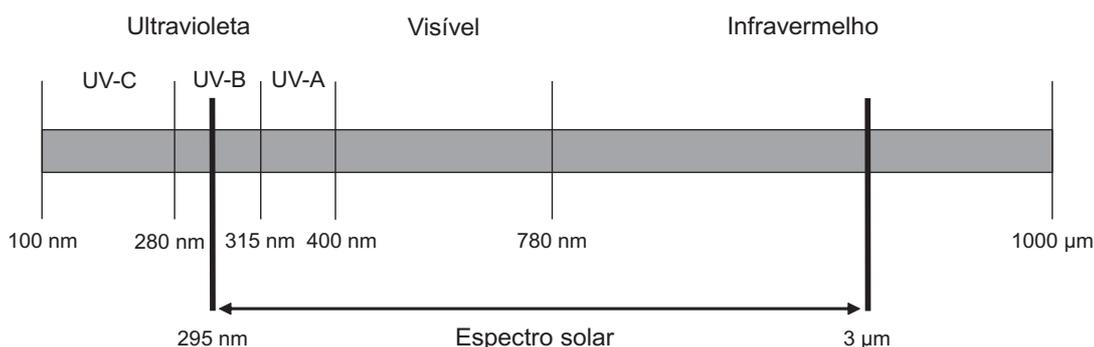


Figura 10.2 – Espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra (Carneiro, 2009)

A região UV representa apenas cerca de 4% do espectro solar que atinge a superfície terrestre, mas é a zona mais energética e, por isso, aquela que pode provocar mais danos nos materiais poliméricos (a energia é tanto maior, quanto menor o comprimento de onda). A região UV pode ser subdividida em três zonas: UV-A (entre 315 e 400 nm), UV-B (entre 280 e 315 nm) e UV-C (entre 100 e 280 nm, apenas encontrada fora da atmosfera terrestre). A energia fornecida pela radiação UV pode provocar a formação de radicais livres que, em combinação com o oxigénio atmosférico, podem provocar a foto-oxidação dos polímeros.

O modo mais simples de proteger os geossintéticos contra os danos provocados pela radiação UV é evitar expor os materiais à radiação solar. No entanto, a eliminação de toda a exposição é, na maioria dos casos, impossível. Em algumas aplicações, os geossintéticos podem mesmo estar expostos durante um longo período de tempo. A degradação causada pela

radiação UV é normalmente retardada pela incorporação de aditivos químicos (antioxidantes, estabilizantes UV ou pigmentos) na composição dos geossintéticos.

A temperatura dos materiais expostos à radiação solar é normalmente superior à temperatura atmosférica, variando essa temperatura com a cor desses materiais. Nas mesmas condições de exposição, a temperatura de um material preto é superior à temperatura de um material branco. Assim, materiais de diferentes cores poderão ter comportamentos distintos quando expostos ao ar livre, não só por possuírem diferentes pigmentos de cor, mas também porque os processos foto-oxidativos não irão ocorrer à mesma temperatura.

A água (proveniente da chuva, orvalho, granizo ou neve) pode também contribuir para acelerar o processo de degradação dos materiais poliméricos expostos ao ar livre. Esta pode promover a ocorrência de reações de hidrólise, pode ser absorvida ou pode remover alguns aditivos dos materiais poliméricos. A existência de humidade pode promover o crescimento de fungos, algas ou bactérias nos materiais expostos ao ar livre. No entanto, estes organismos tipicamente não causam danos significativos nos geossintéticos.

A camada de ozono protege a superfície terrestre da radiação UV-B e UV-C (absorve toda a radiação UV com comprimento de onda inferior a 295 nm). No entanto, o ozono é um poderoso oxidante que pode reagir com alguns polímeros. Alguns poluentes atmosféricos podem acelerar o processo de oxidação dos materiais poliméricos.

A existência de *stress* mecânico pode também acelerar a degradação dos materiais poliméricos expostos aos agentes atmosféricos. As fontes mais comuns de *stress* mecânico nos materiais expostos ao ar livre incluem a absorção de água, as variações de temperatura e o vento.

10.2.3.5 MICRORGANISMOS

A degradação microbiológica tem uma influência muito reduzida para a maioria das aplicações dos geossintéticos e tipicamente não é um problema para os plásticos modernos. Este tipo de degradação é favorecido em ambientes húmidos com temperatura estável em torno dos 30° C. A luz visível pode favorecer o crescimento de alguns tipos de microrganismos, mas a maioria deles são destruídos pela ação da radiação UV.

10.2.3.6 OUTROS AGENTES DE DEGRADAÇÃO

Para além dos agentes de degradação referidos nas secções anteriores, existem ainda outros agentes ou mecanismos que podem causar danos nos geossintéticos, tais como: ataques por animais, raízes, radioatividade ou fogo.

Animais e raízes: os geossintéticos podem estar em contacto com vários animais (por exemplo, roedores ou térmitas) ou com raízes de plantas. Os animais podem provocar danos locais nos geossintéticos (tais como furos), fragilizando-os. As raízes de plantas podem penetrar na estrutura de alguns geossintéticos, obstruindo-os.

Radioatividade: o contacto com resíduos radioativos pode causar danos nos geossintéticos, tais como a quebra de cadeias poliméricas ou a promoção de reações químicas indesejáveis. Koerner (1999) refere que não devem ser utilizadas geomembranas na contenção de resíduos com elevada radioatividade (por exemplo, resíduos oriundos de estações nucleares).

Fogo: os geossintéticos podem facilmente arder e/ou serem danificados pelo calor gerado pelo fogo. No entanto, a ocorrência de fogo em estruturas com geossintéticos é pouco provável.

10.2.4 INTERAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES AGENTES

A fendilhação de tração devida a agentes ambientais (em inglês, *environmental stress cracking*) em plásticos é o melhor exemplo de rotura sinérgica de polímeros, pois é necessária a presença simultânea de dois agentes de degradação (Brown & Greenwood, 2002). A fendilhação de tração devida a agentes ambientais é promovida pela maioria dos líquidos orgânicos, mas também por líquidos que geralmente não são considerados quimicamente agressivos. Assim, em alguns plásticos, quando em contacto com algumas substâncias e submetidos a tensões, pode haver aparecimento de fendilhação frágil (Crawford, 1998). Essas tensões podem ocorrer durante o período de serviço, terem origem interna ou externa (devido a solicitações exteriores ao plástico), ou serem tensões residuais do processo de manufatura.

A fendilhação de tração devida a agentes ambientais afeta sobretudo geomembranas quando submetidas a ações mecânicas e na presença de líquidos. A absorção de líquidos provoca o aumento das dimensões dos geossintéticos, originando a separação das cadeias poliméricas. Na presença

de tensões mecânicas (menores que a resistência mecânica dos materiais) podem ocorrer roturas frágeis dos geossintéticos (fissuração).

10.3 PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE

10.3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a comunidade científica, as comissões técnicas de normalização (na área dos geossintéticos) e a indústria dos geossintéticos têm vindo a desenvolver métodos para avaliar a durabilidade dos geossintéticos. A resistência destes materiais aos agentes e/ou mecanismos que podem afetar a sua durabilidade pode ser avaliada *in situ* (sob condições naturais) ou em laboratório (sob condições padrão, controladas e normalmente aceleradas). A aceleração das condições a que os geossintéticos estão expostos é normalmente conseguida através do aumento da temperatura ou através do aumento da intensidade (concentração) do agente ou mecanismo que afeta a durabilidade.

Os danos sofridos pelos materiais (nos diferentes ensaios de avaliação da durabilidade) são frequentemente quantificados através da determinação (antes e depois desses ensaios) de diversas características e/ou propriedades dos geossintéticos. Posteriormente, os resultados obtidos para as amostras expostas são comparados com resultados obtidos para amostras de referência (intactas).

Na Comissão Europeia de Normalização (CEN), a normalização na área dos geossintéticos é tratada pela comissão técnica (TC) 189. Entre os organismos de normalização internacionais, inclui-se a Organização Internacional de Normalização (ISO), sendo a comissão técnica 221 responsável pelos geossintéticos. Existem também normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*) desenvolvidas nos Estados Unidos da América. A comissão técnica D35 da ASTM é responsável pela normalização na área dos geossintéticos.

Para além das comissões responsáveis pela normalização na área dos geossintéticos, existem outras comissões CEN, ISO ou ASTM que desenvolveram metodologias que também podem ser importantes para avaliar a resistência dos geossintéticos à degradação. Como exemplos, pode referir-se a ISO TC 61 (Plásticos), a comissão D13 da ASTM (Têxteis), a comissão D20 da ASTM (Plásticos) ou a comissão G03 da ASTM (Envelhecimento climatérico e durabilidade). Nos pontos seguintes são

apresentados os métodos existentes para avaliar a resistência dos geossintéticos aos diferentes agentes e/ou mecanismos de degradação.

10.3.2 DANIFICAÇÃO DURANTE A INSTALAÇÃO EM OBRA

A danificação durante a instalação em obra está relacionada com as solicitações a que os geossintéticos são submetidos durante a sua instalação, nomeadamente, devido às operações de colocação, espalhamento e compactação de material de aterro sobre o geossintético.

A CEN TC 189 desenvolveu uma norma de ensaio para simular em laboratório a danificação mecânica, geralmente associada aos processos de instalação em obra, devido ao contacto com materiais granulares - norma EN ISO 10722. Atualmente existem ainda outros procedimentos disponíveis para realizar ensaios da danificação durante a instalação de geossintéticos, tais como BS 8006-1 (anexo D), ASTM D5818 e SINTEF (2012). O método de ensaio descrito na norma BS 8006-1 inclui colocar o geossintético sob uma série de materiais de aterro compactados e a recuperação do geossintético para caracterização através de ensaios, nomeadamente avaliando a resistência à tração e a rigidez, para quantificar as alterações nessas propriedades devido à danificação induzida. Seja qual for o procedimento usado para induzir a danificação mecânica associada aos processos de instalação, as condições impostas devem reproduzir o melhor possível as condições esperadas em obra.

10.3.3 FLUÊNCIA E ROTURA EM FLUÊNCIA

A fluência e a rotura em fluência dos geossintéticos são avaliadas em ensaios laboratoriais em que o geossintético está isolado, i.e., não é confinado em solo. Em geral, a fluência e a rotura em fluência de um geossintético são avaliadas seguindo a norma EN ISO 13431 (desenvolvida pela CEN TC 189). Nestes ensaios a extensão do material ao longo do tempo é registada, sob a ação de uma carga constante, com temperatura de ensaio constante. Na norma ASTM D5262 (ASTM D35) é apresentado um procedimento equivalente. Em alguns casos podem ser realizados ensaios acelerados, nomeadamente por elevação da temperatura (ASTM D6992).

10.3.4 RELAXAÇÃO DE TENSÕES

A relaxação de tensões está relacionada com a diminuição de tensão nos geossintéticos submetidos a deformação constante. A rotura pode ocorrer por ação de solicitações alternadas (por exemplo, o tráfego numa via de circulação). Sabe-se que a estrutura do geossintético é mais sensível à relaxação do que o próprio polímero.

A execução de ensaios de relaxação de tensões implica longos períodos de tempo (tal como a fluência) e muito equipamento bastante dispendioso. Por esta razão estes ensaios são muito pouco realizados, não havendo sequer um procedimento normalizado.

10.3.5 ABRASÃO

Em geral a abrasão é definida como o desgaste do geossintético imposto por outros materiais em contacto com este, nomeadamente, agregados sujeitos a cargas cíclicas de pequena amplitude. A resistência à abrasão de um geossintético pode ser determinada recorrendo à norma EN ISO 13427 (CEN TC 189); a norma ASTM equivalente é a ASTM D4886 (ASTM D35). Para aplicações de geossintéticos em obras de proteção costeira, em que o movimento de sedimentos é de *rip-rap*, por exemplo, o BAW (*German Federal Waterways Engineering and Research Institute*) desenvolveu um outro procedimento de ensaio (referido em RPG, 1994) em que a abrasão é induzida num tambor rotativo.

10.3.6 RESISTÊNCIA À AÇÃO DOS LÍQUIDOS

Os métodos existentes para a avaliação da resistência dos geossintéticos à ação dos líquidos envolvem ensaios de imersão. Os efeitos dos ensaios de imersão podem ser físicos (absorção do líquido, com consequente dilatação dos materiais, ou perda de aditivos) ou químicos (reação química com o líquido de imersão).

A CEN TC 189 desenvolveu vários métodos para determinar a resistência dos geossintéticos à ação de líquidos: EN 14030 (resistência a soluções ácidas e alcalinas), EN 12447 (resistência à hidrólise), EN 14414 (avaliação da resistência química de geossintéticos para uso em aterros de resíduos – resistência a ácidos, bases, solvatação, dilatação, lixiviados sintéticos e lixiviados reais) e EN 14415 (barreiras geossintéticas: resistência à lixiviação).

A ISO TC 221 desenvolveu um método (ISO/TR 12960) para determinar a resistência de geotêxteis (e produtos relacionados) a líquidos. Os métodos desenvolvidos pela comissão D35 da ASTM para avaliar a resistência de geossintéticos a líquidos incluem: ASTM D5322 (procedimentos de imersão em laboratório), ASTM D5747 (para geomembranas), ASTM D6213 (para geogrelhas), ASTM D6388 (para georredes), ASTM D6389 (para geotêxteis) e ASTM D5496 (procedimentos de imersão em campo).

Por fim, outras normas, como a ASTM D543 (comissão D20 da ASTM) ou a ISO 175 (ISO TC 61), podem também ser usadas para determinar a resistência de alguns geossintéticos (como as geomembranas) a líquidos.

10.3.7 RESISTÊNCIA ÀS ALTERAÇÕES DE TEMPERATURA

As variações de temperatura podem provocar a expansão ou a contração de muitos materiais poliméricos. A CEN TC 189 possui um método para a avaliação da resistência das barreiras geossintéticas a ciclos de gelo-degelo (CEN/TS 14418). Por sua vez, a comissão D35 da ASTM desenvolveu um método para avaliar o efeito da temperatura na estabilidade dos geossintéticos: ASTM D4594.

A comissão D20 da ASTM desenvolveu metodologias para avaliar as alterações causadas pela temperatura nas dimensões dos plásticos (ASTM D1042 e ASTM D1204), enquanto a comissão D13 da ASTM possui métodos para avaliar o encolhimento de fios e de fibras: ASTM D2102 (fibras) e ASTM D2259 (fios). As alterações ocorridas nas dimensões de plásticos expostos a aquecimento podem também ser avaliadas de acordo com a ISO 11501 (método desenvolvido pela ISO TC 61). A CEN indica um método idêntico: EN ISO 11501 (CEN TC 249).

10.3.8 RESISTÊNCIA À TERMO-OXIDAÇÃO

A resistência dos geossintéticos à termo-oxidação pode ser avaliada de acordo com a norma EN ISO 13438 (CEN TC 189). Esta norma inclui dois métodos, designados por A e B. O método A usa como fator de aceleração o aumento da temperatura e é aplicável a geossintéticos de PE, PP, PA e aramida. Por sua vez, no método B (aplicável a materiais de álcool polivinílico - PVAL) os fatores de aceleração incluem o aumento da temperatura e o aumento do teor de oxigênio.

A resistência de barreiras geossintéticas à oxidação pode ser determinada de acordo com a norma EN 14575 (CEN TC 189). A comissão D35 da ASTM

também possui métodos para avaliar a resistência dos geossintéticos à oxidação: ASTM D5721 (método do forno para geomembranas de poliolefinas) e a ASTM D5885 (determinação do tempo de indução da oxidação a pressão elevada para geossintéticos de poliolefinas).

10.3.9 RESISTÊNCIA AO ENVELHECIMENTO CLIMATÉRICO EM LABORATÓRIO

A resistência dos geossintéticos ao envelhecimento climatérico pode ser avaliada por ensaios laboratoriais (usando fontes de luz artificiais e temperaturas elevadas) ou através da exposição dos materiais em campo sob condições de degradação naturais. Estes últimos são normalmente muito longos (vários meses ou alguns anos), sendo inexecutáveis na maioria dos casos (o que levou à necessidade de desenvolver métodos laboratoriais acelerados).

Os simuladores climatéricos são utilizados para tentar reproduzir num curto intervalo de tempo (alguns dias ou semanas) os danos ocorridos a longo prazo (meses ou anos) em geossintéticos expostos ao ar livre. Os equipamentos laboratoriais devem ser capazes de simular fielmente e rapidamente a degradação sofrida pelos materiais quando expostos sob condições naturais.

Os simuladores climatéricos permitem normalmente a exposição dos geossintéticos a radiação UV artificial, à chuva e à humidade. A chuva e a humidade são normalmente simuladas através da pulverização com água ou através da condensação de água na superfície dos materiais. De um modo geral, os métodos artificiais de envelhecimento climatérico intercalam períodos de luz e de escuridão (para simular os ciclos diários de radiação solar), bem como períodos de seco e de molhado.

Os equipamentos disponíveis para a simulação do envelhecimento climatérico são geralmente classificados de acordo com as fontes de luz usadas. Os equipamentos mais comuns incluem os simuladores de arco de carbono, de arco de xénon e de lâmpadas fluorescentes.

Relativamente aos métodos para exposição laboratorial dos geossintéticos ao envelhecimento climatérico, a CEN TC 189 desenvolveu a norma EN 12224. Esta metodologia usa um simulador com lâmpadas fluorescentes e consiste na exposição dos geossintéticos a um ciclo climatérico contendo um passo de exposição, à temperatura de 50° C, à radiação UV (radiação UV incidente total de 50 MJ.m⁻²) e um passo de pulverização com água (para simulação do efeito da chuva).

A exposição de geossintéticos ao envelhecimento climatérico pode também ser realizada pelos métodos descritos nas normas ASTM D4355 (método

para geotêxteis usando um simulador de arco de xénon) e ASTM D7238 (método para geomembranas utilizando um simulador com lâmpadas fluorescentes). Os dois métodos anteriores foram desenvolvidos pela comissão D35 da ASTM. Existem ainda outros métodos (com origem na ISO e na ASTM) que podem ser adotados para a avaliação da resistência de geossintéticos ao envelhecimento climático. A comissão D20 da ASTM desenvolveu um método (ASTM D5208) para a exposição de plásticos em laboratório (simulador com lâmpadas fluorescentes). Por sua vez, a comissão G03 da ASTM desenvolveu métodos para a exposição de materiais não metálicos ao envelhecimento climático: ASTM G151 (práticas gerais de exposição), ASTM G152 e ASTM G153 (simulador de arco de carbono em ambos os métodos), ASTM G154 (simulador com lâmpadas fluorescentes) e ASTM G155 (simulador de arco de xénon). Por fim, a ISO TC 61 possui métodos para expor plásticos ao envelhecimento climático: ISO 4892-1 (guia geral de métodos de exposição em laboratório), ISO 4892-2 (simulador de arco de xénon), ISO 4892-3 (simulador com lâmpadas fluorescentes) e ISO 4892-4 (simulador de arco de carbono).

As principais vantagens dos métodos laboratoriais de envelhecimento climático englobam: condições de ensaio controláveis e reproduzíveis (as condições de exposição ao ar livre são muito variáveis e não podem ser controladas), ambiente limpo e obtenção de resultados num intervalo de tempo relativamente pequeno. A maior desvantagem destes métodos consiste na dificuldade em extrapolar a informação obtida em laboratório para a degradação que ocorre em condições de degradação reais (a obtenção de uma boa relação entre a degradação acelerada em laboratório e a degradação ao ar livre é, em muitos casos, complicada).

10.3.10 RESISTÊNCIA AO ENVELHECIMENTO CLIMÁTICO EM CAMPO

Os métodos laboratoriais de envelhecimento climático são importantes para tentar reproduzir num curto intervalo de tempo os danos que ocorrem nos geossintéticos durante meses ou anos de exposição ao ar livre. No entanto, ao ar livre existem alguns agentes de degradação (como o vento ou poluentes atmosféricos) difíceis de simular em laboratório. Além disso, os mecanismos de degradação que ocorrem nos simuladores laboratoriais (sob condições aceleradas) podem não ser os mesmos que ocorrem ao ar livre. Assim, e sempre que a obtenção de resultados não for urgente, é preferível

avaliar a resistência dos geossintéticos aos agentes climáticos sob condições de degradação naturais.

As condições climáticas variam substancialmente com o local geográfico, de ano para ano e durante as diferentes estações do ano. Para uma melhor interpretação dos resultados que são obtidos sob condições de degradação naturais, é importante a monitorização contínua de alguns parâmetros meteorológicos do local de exposição, tais como: a temperatura atmosférica (e a temperatura dos geossintéticos), a radiação solar incidente, a humidade, a precipitação ou a velocidade do vento. Desta forma, é possível comparar os resultados obtidos num determinado local geográfico com os resultados obtidos (para os mesmos materiais) noutros locais ou, até mesmo, em simuladores laboratoriais.

A CEN TC 189 e a ISO TC 221 não desenvolveram nenhuma metodologia para a avaliação da resistência de geossintéticos ao envelhecimento climático sob condições naturais. O único método desenvolvido especificamente para geossintéticos teve origem na comissão D35 da ASTM – norma ASTM D5970 (para geotêxteis). No entanto, existem outros métodos (com origem na ISO e na ASTM) que podem ser aplicados aos geossintéticos. A ISO TC 61 elaborou métodos para expor materiais poliméricos ao envelhecimento climático ao ar livre: a ISO 887-1 (guia de métodos de exposição), a ISO 887-2 (métodos de exposição direta e de exposição debaixo de vidro) e a ISO 887-3 (método de exposição com concentração de luz). A comissão G03 da ASTM também possui alguns métodos para a mesma finalidade: ASTM G7 (método de exposição direta), a ASTM G24 (método de exposição debaixo de vidro) e a ASTM G90 (método de exposição com concentração de luz). Por fim, a comissão D20 da ASTM também desenvolveu uma metodologia para exposição de materiais ao envelhecimento climático (ASTM D1435).

10.3.11 RESISTÊNCIA A MICRORGANISMOS

O ataque por parte dos microrganismos aos plásticos não pode ser acelerado de forma muito substancial. O aumento da temperatura (utilizado para acelerar muitos processos de degradação dos geossintéticos) não pode ser usado para acelerar a degradação biológica, dado provocar a destruição dos microrganismos. A degradação microbiológica pode apenas ser acelerada pela manutenção de condições ótimas de luz, de temperatura e de humidade para a atividade dos microrganismos.

A norma EN 12225 (CEN TC 189) descreve um método laboratorial para a avaliação da resistência dos geossintéticos à degradação biológica. A comissão D35 da ASTM desenvolveu um método para a avaliação do grau de colmatação dos geotêxteis (usados em funções de filtragem ou drenagem)

causado pelo crescimento biológico: ASTM D1987. Para além dos métodos elaborados pelas comissões técnicas de geossintéticos, existem ainda outros métodos que podem ser adaptados aos geossintéticos. A comissão G03 da ASTM elaborou alguns métodos para determinar a resistência de materiais aos microrganismos: ASTM G21 (determinação da resistência de polímeros sintéticos aos fungos), ASTM G29 (determinação da resistência dos plásticos a algas) e ASTM G160 (determinação da resistência de materiais não metálicos à degradação microbiológica). Por sua vez, a ISO 846 (ISO TC 61) descreve um método para avaliar a resistência dos plásticos aos microrganismos.

10.3.12 RESISTÊNCIA A OUTROS AGENTES DE DEGRADAÇÃO

A especificação técnica CEN/TS 14416 (CEN TC 189) descreve uma metodologia para avaliar a resistência das barreiras geossintéticas às raízes. Não existem métodos específicos para simular o ataque por animais aos geossintéticos.

Atualmente não existem quaisquer métodos específicos para determinar a resistência dos geossintéticos à radioatividade ou ao fogo.

A norma EN 14576 (CEN TC 189) descreve um método para determinar a resistência das barreiras geossintéticas à fendilhação de tração devida a agentes ambientais. A comissão D35 da ASTM desenvolveu um método (ASTM D5397) para a avaliação da resistência das geomembranas de poliolefinas à fissuração por tensão. Para além dos métodos desenvolvidos pelas comissões técnicas dos geossintéticos, existem ainda outros métodos que também podem ser utilizados: ISO 22088 (norma dividida em 6 partes com origem na ISO TC 61) e ASTM D1693 (comissão D20 da ASTM).

10.4 ASPETOS DA DURABILIDADE RELEVANTES PARA O DIMENSIONAMENTO

10.4.1 INTRODUÇÃO

Uma das abordagens mais comuns no dimensionamento de geossintéticos é o dimensionamento funcional, em que se definem as propriedades mais relevantes para a função (ou funções) que cada geossintético desempenha. O dimensionamento deve incluir uma avaliação da durabilidade, de forma a

garantir que durante toda a vida útil do geossintético as propriedades funcionais mantêm os valores mínimos necessários para que os geossintéticos desempenhem adequadamente essa(s) função(ões). Nas secções seguintes apresentam-se algumas das funções e propriedades relevantes e os coeficientes de redução utilizados no dimensionamento de geossintéticos.

10.4.2 FUNÇÕES E PROPRIEDADES RELEVANTES

Um geossintético pode ter uma ou mais propriedades críticas para o desempenho da função desejada, por exemplo, a resistência à tração ou a permeabilidade no plano. No dimensionamento é comum distinguir dois valores para cada uma dessas propriedades: valor disponível (associado ao geossintético selecionado ou a selecionar) e valor requerido (valor mínimo necessário para que o geossintético desempenhe adequadamente a sua função). No entanto, estes dois valores de uma dada propriedade funcional podem variar no tempo. Por um lado, em face dos vários agentes e mecanismos que afetam a durabilidade dos geossintéticos e relevantes para cada projeto, é de esperar que o valor disponível da propriedade do material varie com o tempo. Por outro lado, em face da variação das solicitações durante o tempo de vida útil do geossintético, também é expectável que o valor requerido da propriedade seja afetado por uma série de eventos (ISO/TS 13434). Assim, no dimensionamento é necessário garantir que ao fim do tempo de vida útil do geossintético o valor disponível da propriedade funcional em análise é adequado relativamente ao valor requerido dessa mesma propriedade. A Figura 10.3 representa esquematicamente uma possível variação dos valores disponível e requerido de uma propriedade funcional de um geossintético.

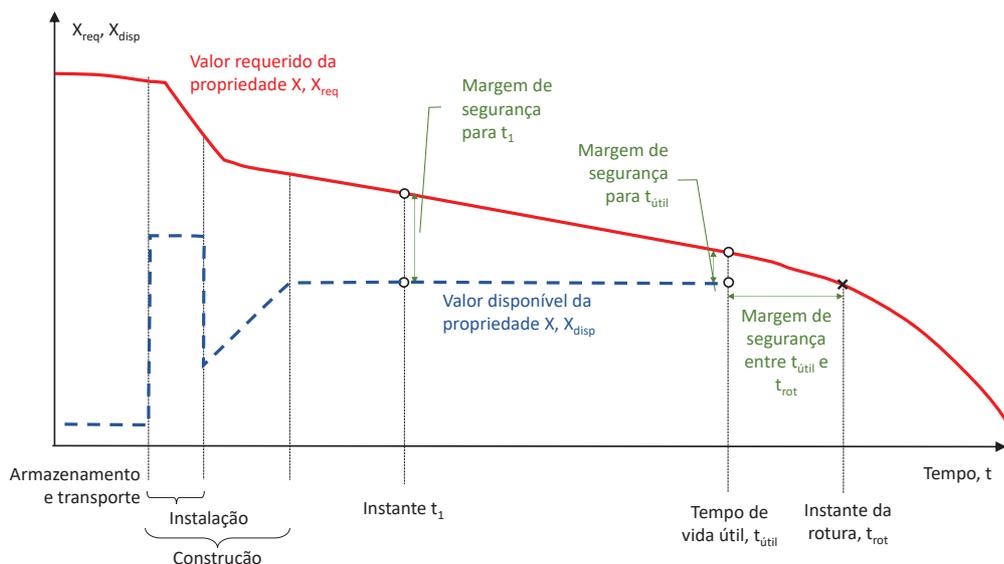


Figura 10.3 – Variação no tempo dos valores disponível e requerido de uma propriedade funcional de um geossintético, durante o armazenamento e transporte, construção, colocação do material de aterro e serviço (adaptado de ISO/TS 13434)

A título de exemplo, no Quadro 10.1 listam-se as propriedades identificadas como mais relevantes para algumas funções de geossintéticos, de acordo com normas europeias (EN 13249 a EN 13257 e EN 13265). Note-se que no Quadro 10.1 não foi incluída a função de barreira.

Quadro 10.1 – Propriedades relevantes para as principais funções dos geossintéticos (geotêxteis e produtos relacionados), adaptado das normas de propriedades requeridas EN 13249 a EN 13257 e EN 13265

Característica do material	Método de ensaio	Função				
		Separação	Filtragem	Drenagem	Reforço	Proteção
Comportamento mecânico - curto prazo						
Resistência à tração	EN ISO 10319	+	+	+	+	+
Deformação para a força máxima	EN ISO 10319	+	+	+	+	+
Rigidez para extensão de 2%, 5% e 10%	EN ISO 10319	-	-	-	+	-
Resistência à tração de costuras e juntas	EN ISO 10321	0	0	0	0	0
Ensaio do punçoamento estático (ensaio CBR)	EN ISO 12236	+	+	-	+	-
Ensaio de perfuração dinâmica (ensaio com queda de cone)	EN ISO 13433	+	+	-	+	+
Resistência à compressão (curto prazo)	EN ISO 25619-2	-	-	0	-	-
Características de proteção	EN 13719	-	-	-	-	+
	EN 14575	-	-	-	-	+
Interface solo-geossintético						
Atrito na interface	EN ISO 12957-1 EN ISO 12957-2	0	0	0	0	0

Característica do material	Método de ensaio	Função				
Resistência a longo prazo						
Fluência em tração	EN ISO 13431	-	-	-	+	-
Fluência em compressão	EN ISO 25619-1	-	-	+	-	-
Abrasão	EN ISO 13427	0	0	-	0	-
Efeitos de instalação						
Dano mecânico	EN ISO 10722	0	0	0	0	0
Comportamento hidráulico						
Dimensão característica da abertura	EN ISO 12956	+	+	-	-	-
Permeabilidade à água normal ao plano (índice de velocidade)	EN ISO 11058	+	+	-	0	-
Permeabilidade à água no plano (mole/mole)	EN ISO 12958	-	-	0	-	-
Permeabilidade à água no plano (mole/rígido ou rígido/rígido)	EN ISO 12958	-	-	0	-	-
Durabilidade	Anexo B (EN 13249 a EN 13257 e EN 13265)	+	+	+	+	+

+ Relevante para a função | 0 Relevante para a função em algumas aplicações | - Não relevante para a função

Dependendo da função (ou funções) que um geossintético desempenha num dado projeto, alguns aspetos da durabilidade serão mais relevantes que outros. Adicionalmente, a vida útil dos geossintéticos pode variar muito. Por exemplo, o tempo de vida útil de geossintéticos utilizados para acelerar o processo de consolidação de solos (nomeadamente drenos verticais pré-fabricados) em geral varia de 1 a 3 anos; no caso de sistemas de impermeabilização, de drenagem e de proteção em aterros de resíduos, o tempo de vida útil dos geossintéticos excede os 100 anos. Assim, para cada projeto, consoante a função que um dado geossintético desempenha e o seu tempo de vida útil, é necessário fazer uma avaliação de quais os agentes e mecanismos relevantes e se poderá haver interação entre eles. No Quadro 10.2 apresenta-se um resumo dos principais agentes e mecanismos de degradação relevantes para as principais funções dos geossintéticos. No entanto, as condições específicas de cada projeto devem ser analisadas com detalhe, para que todos os agentes e mecanismos relevantes para um dado projeto e que afetam a durabilidade dos geossintéticos sejam tidos em conta adequadamente.

Quadro 10.2 – Relevância dos principais mecanismos que afetam a durabilidade dos geossintéticos para as principais funções dos geossintéticos (adaptado de Greenwood *et al.*, 2016)

		Função					
		Separação	Filtragem	Drenagem	Reforço	Proteção	Barreira
Mecanismo	Danificação durante a instalação	+	+	+	+	+	+
	Fluência em tração	-	-	-	+	-	-
	Fluência em compressão	-	-	+	-	-	-
	Oxidação (PP, PE) [#]	0	0	0	+	0	+
	Hidrólise (PET) [#]	0	0	+	+	0	-
	Agentes atmosféricos	+	+	+	+	+	+

+ Relevante para a função | 0 Relevante para a função em algumas aplicações | - Não relevante para a função
[#] Apenas relevante para geossintéticos com os polímeros base indicados

10.4.3 COEFICIENTES DE REDUÇÃO/MULTIPLICAÇÃO PARA CADA APLICAÇÃO

Em geral, no dimensionamento de geossintéticos os vários agentes e mecanismos que afetam a durabilidade são representados por coeficientes de redução parciais. Assim, cada coeficiente de redução representa a variação prevista para uma dada propriedade de um geossintético para o tempo de vida útil do projeto e para as condições de serviço. Quando não existe informação específica para um dado projeto pode recorrer-se a valores genéricos. No entanto, esses valores são demasiado conservativos.

O valor de uma dada propriedade do geossintético é dividido pelo coeficiente de redução para um dado agente ou mecanismo de degradação. Por essa razão, o valor mínimo dos coeficientes de redução é 1 (o que corresponde a uma propriedade que não é afetada pelo agente ou mecanismo de degradação em causa).

Os coeficientes de redução são considerados independentes e pretendem representar a redução esperada numa dada propriedade ao longo do tempo de vida útil do geossintético para as condições específicas do projeto. Assim, quando há vários coeficientes de redução (representando cada um deles um agente ou mecanismo de degradação), os seus valores são multiplicados.

No Quadro 10.3 resumem-se os principais métodos utilizados para ter em conta aspetos relativos à durabilidade de geossintéticos no dimensionamento, agrupados por mecanismo que afeta a durabilidade dos geossintéticos. Em geral, aplicam-se coeficientes de redução relevantes para as várias propriedades analisadas e que podem incluir coeficiente de redução para ter em conta:

- danificação durante a instalação em obra (CR_{DDI});
- rotura em fluência (CR_{RFL});
- agentes atmosféricos (CR_{ATM});
- agentes químicos e biológicos (CR_{QeB});
- fluência em compressão (CR_{FC}).

Dependendo do país, do método e do código/norma utilizados, o número de coeficientes de redução a aplicar a uma dada propriedade pode variar, bem como os agentes e mecanismos de degradação que representam. Dado que esta abordagem é mais comum para aplicações de reforço, na secção seguinte inclui-se informação mais detalhada para essa função.

10.4.3.1 REFORÇO

No caso de geossintéticos a desempenhar a função de reforço é necessário garantir que a resistência dos materiais se mantém acima do valor mínimo durante o período de vida útil. Os principais mecanismos que afetam a durabilidade dos reforços geossintéticos são: danificação durante a instalação em obra; rotura em fluência; exposição a agentes químicos e atmosféricos. O valor de cálculo da resistência do reforço (T_d) pode ser obtido pela Equação 10.1 (ou semelhante), em que um valor característico da resistência à tração do geossintético (T_{car}) é afetado por coeficientes de redução para a danificação durante a instalação em obra (CR_{DDI}), para a rotura em fluência (CR_{RFL}), para os agentes atmosféricos (CR_{ATM}), e para os agentes químicos e biológicos (CR_{QeB}), e por um coeficiente de segurança parcial (f_s) que representa a incerteza na extrapolação da resistência do geossintético para o fim da vida útil. Em geral, o valor característico da resistência à tração corresponde ao intervalo de confiança de 95% (embora em alguns países se utilize o valor médio da resistência à tração do geossintético subtraído por duas vezes o seu desvio padrão).

$$T_d = \frac{T_{car}}{CR_{DDI} \times CR_{RFL} \times CR_{ATM} \times CR_{QeB} \times f_s} \quad \text{Equação 10.1}$$

Quadro 10.3 – Principais métodos utilizados para incluir aspetos relativos à durabilidade de geossintéticos no seu dimensionamento, agrupados por mecanismos que afetam a durabilidade dos geossintéticos (adaptado de Greenwood et al., 2016)

		Propriedade						
		Dimensão das aberturas	Permeabilidade	Transmissividade	Resistência mecânica	Extensão	Resistência ao punçoamento	
Mecanismo	Oxidação	PP, PE [#]	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar
	Hidrólise	PET [#]	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar	Aprovar e aplicar CR _{QeB} / rejeitar
	Agentes atmosféricos		Limitar tempo de exposição	Limitar tempo de exposição	Limitar tempo de exposição	Limitar tempo de exposição ou aplicar CR _{ATM}	Limitar tempo de exposição ou aplicar CR _{ATM}	Limitar tempo de exposição ou aplicar CR _{ATM}
	Fluência em tração		Aumentar o valor se aplicável *	Aumentar o valor se aplicável *	Verificar se é necessário aplicar CR _{RFL}	Aplicar CR _{RFL}	Aplicar CR _{RFL}	Aplicar CR _{RFL}
	Fluência em compressão		Aplicar CR _{FC}	Aplicar CR _{FC}	Aplicar CR _{FC}	NA	NA	NA
	Danificação durante a instalação		Aumentar o valor se aplicável *	Aumentar o valor se aplicável *	Aprovar e aplicar CR _{DDI} / rejeitar	Aplicar CR _{DDI}	Aplicar CR _{DDI}	Aplicar CR _{DDI}

Relevante apenas para geossintéticos com os polímeros listados | * A dimensão das aberturas ou a permeabilidade pode aumentar em resultado de fluência ou de danificação durante a instalação neste caso deve aplicar-se um coeficiente de redução >1, se relevante | NA Não aplicável

É de salientar que dependendo do código ou norma utilizados no dimensionamento poderá ser necessário considerar outros coeficientes de redução. No Quadro 10.4 apresenta-se um resumo de alguns dos coeficientes de redução mais comuns e a correspondência entre designações utilizadas em diferentes documentos. Estes coeficientes de redução devem ser determinados a partir de resultados específicos para as condições de cada projeto.

Quadro 10.4 – Correspondência entre coeficientes de redução propostos na ISO/TR 20432, e nos seus equivalentes na Holanda, Alemanha e Reino Unido (adaptado de Greenwood et al., 2016)

Agente e mecanismo	ISO/TR 20432	Holanda e Alemanha	Reino Unido BS 8006-1
Variabilidade da resistência inicial			f_{m111}
Reforços metálicos			f_{m112}
Rotura em fluência	RF_{CR}	A ₁	f_{m113}
Danificação durante a instalação	RF_{ID}	A ₂	f_{m211} curto prazo f_{m212} longo prazo
Juntas e uniões		A ₃	
Agentes atmosféricos	RF_W	A ₄	f_{m22}
Degradação química	RF_{CH}		
Condições especiais (ex., solicitações dinâmicas)		A ₅	
Extrapolação e outras incertezas	f_s		f_{m122} (fluência)

O coeficiente de redução para a danificação durante a instalação deve ser determinado a partir de resultados de ensaios de campo através da Equação 10.2, como o quociente entre a resistência à tração do material intacto ($T_{max,int}$) e do material danificado ($T_{max,dan}$).

$$CR_{DDI} = \frac{T_{max,int}}{T_{max,dan}} \quad \text{Equação 10.2}$$

No caso de não haver informação disponível o coeficiente de redução para a danificação durante a instalação pode ser estimado a partir de resultados disponíveis em bases de dados. Na secção 10.5 referem-se alguns trabalhos que incluem este tipo de informação.

No Quadro 10.5 apresentam-se valores a utilizar para o coeficiente de redução para a rotura em fluência (CR_{RFL}) na ausência de resultados específicos para o produto e condições em apreço num dado projeto.

Quadro 10.5 – Valores a utilizar para o coeficiente de redução para a rotura em fluência na ausência de resultados específicos para as condições de projeto, em função do polímero base do geossintético (adaptado de Greenwood *et al.*, 2016)

Polímero base	CR _{RFL}
Poliéster	1,5 a 2,5
Polipropileno	4,0 a 5,0
Poliétileno	2,5 a 5,0
Aramida	2,5
Poliamida	2,5

No Quadro 10.6 resumem-se as definições do coeficiente de redução para os agentes atmosféricos (CR_{ATM}) de acordo com o anexo B das normas europeias com requisitos para os geossintéticos, definidas no âmbito da marcação CE (EN 13249 a EN 13257 e EN 13265).

Quadro 10.6 – Valores a utilizar para o coeficiente de redução para os agentes atmosféricos de acordo com o anexo B das normas europeias com requisitos para os geossintéticos, definidas no âmbito da marcação CE (EN 13429 a EN 13257 e EN 13265)

Resistência retida após ensaios de acordo com EN 12224	Tempo de exposição	CR _{ATM}
> 80%	1 mês	1 / Percentagem de resistência retida
60% a 80%	2 semanas	1,25
< 60%	1 dia	1,0
Material não ensaiado	1 dia	1,0

De acordo com alguns autores, por exemplo Greenwood *et al.* (2016), o coeficiente de redução para agentes químicos e biológicos (CR_{QeB}) é difícil de estimar. Idealmente esse valor deve ser estimado com base na recolha de amostras em diferentes momentos do tempo de vida da estrutura/geossintético.

O coeficiente de segurança parcial, f_s , pretende ter em conta a variação estatística dos coeficientes de redução, nomeadamente devido à extrapolação de informação para períodos de tempo longos (Equação 10.3).

$$f_s = 1 + \sqrt{(1 - R_1)^2 + (1 - R_2)^2} \quad \text{Equação 10.3}$$

Na Equação 10.3 (ISO/TR 20432) intervêm dois parâmetros adicionais, R_1 e R_2 , que dependem dos resultados usados para a extrapolação dos coeficientes de redução da Equação 10.1. R_1 refere-se à extrapolação dos resultados de ensaios de rotura em fluência, enquanto R_2 está associado à extrapolação de resultados de ensaios acelerados de degradação química. O primeiro parâmetro, R_1 , relaciona o tempo de vida útil do geossintético de reforço (t_D) e o intervalo de tempo mais longo para o qual o geossintético foi ensaiado à rotura por fluência (t_{max}), expressos em horas (Equações 10.4 e 10.5).

$$R_1 = 1.2^{r-1} \quad \text{Equação 10.4}$$

$$r = \log\left(\frac{t_D}{t_{max}}\right) \quad \text{Equação 10.5}$$

O parâmetro R_2 pode ser estimado usando a Equação 10.6, em que T_{LIC} é o valor obtido para o limite inferior de confiança da resistência à tração do geossintético.

$$R_2 = \frac{T_{car}}{T_{LIC}} \quad \text{Equação 10.6}$$

10.5 CASOS DE ESTUDO

Nas secções seguintes resumem-se alguns casos de estudo publicados pelos autores referentes à durabilidade de geossintéticos, apresentados por ordem cronológica de publicação.

10.5.1 ENDURANCE

10.5.1.1 PAULA ET AL. (2004)

Paula et al. (2004) realizaram ensaios de danificação mecânica em laboratório com um equipamento desenvolvido para esse efeito. A norma de ensaio (ENV ISO 10722-1) prevê a utilização de um material granular sintético

que, devido às características de fragmentação, induz danificação conservativa em alguns geossintéticos. Com o objetivo de contribuir para a definição de uma alternativa a esse material, Paula *et al.* (2004) implementaram um programa de ensaios em que se utilizaram dois materiais naturais, com características granulométricas idênticas à do agregado sintético definido na norma de ensaio, e diferentes tipos de geossintéticos. Neste estudo concluiu-se que: (1) quando o material confinante é natural a sua petrografia influencia a danificação induzida aos geossintéticos; (2) dos geossintéticos considerados, os geotêxteis foram os que revelaram maior suscetibilidade à danificação durante a instalação, em particular os geotêxteis tecidos; (3) a danificação durante a instalação altera o comportamento tração-extensão dos geossintéticos, tanto mais quanto maior for o grau de danificação induzida; (4) a danificação durante a instalação dos geossintéticos simulada em laboratório é maior quando o material confinante é o material granular sintético previsto na norma ENV ISO 10722-1; (5) a consideração do valor de resistência ao desgaste *Los Angeles* carece de significado quando o material granular confinante é natural. O estudo comparativo apresentado por Paula *et al.* (2004) realça a importância de definir um material granular a utilizar nos ensaios de laboratório que simule a danificação durante a instalação dos geossintéticos em obras reais de forma realista sempre que é impraticável, por razões económicas e de tempo, executar aterros experimentais para definição do coeficiente de redução para a danificação durante a instalação a aplicar ao geossintético no dimensionamento da estrutura onde ele se insere.

10.5.1.2 PINHO-LOPES ET AL. (2006)

Pinho-Lopes *et al.* (2006) compararam o efeito da danificação durante a instalação de três geossintéticos (um geotêxtil tecido, uma geogrelha tecida e uma geogrelha extrudida) induzida através de ensaios de campo e de ensaios laboratoriais de danificação mecânica (ENV ISO 10722-1). Os ensaios laboratoriais de danificação mecânica foram realizados com três agregados diferentes (dois naturais e um sintético). Pinho-Lopes *et al.* (2006) concluíram que nos ensaios de danificação *in situ* a estrutura do geossintético, a dimensão das partículas do solo e a sua angulosidade, bem como a energia de compactação, tiveram uma influência significativa na danificação induzida. No caso da danificação induzida em laboratório, a estrutura do geossintético e a angulosidade das partículas de agregado foram os fatores mais relevantes. Este estudo permitiu concluir que a fiabilidade dos ensaios laboratoriais na previsão da danificação durante a

instalação *in situ* depende do tipo de geossintético e do tipo de material confinante.

10.5.1.3 ROSETE *ET AL.* (2013)

Rosete *et al.* (2013) estudaram a sinergia entre a danificação por abrasão e por danificação mecânica associada à instalação em obra de geossintéticos, nomeadamente os seus efeitos isolados e combinados (considerando sinergia) em propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de seis geossintéticos: dois geotêxteis não-tecidos (PP), duas geogrelhas (uma tecida, PET, e outra extrudida, PP) e dois geocompósitos de reforço (geotêxtil em PP com cordões de reforço em PET). Os resultados mostraram que os efeitos da danificação induzida dependem sobretudo da estrutura do geossintético. Para os materiais mais afetados pela danificação induzida, as reduções de resistência após abrasão (isolada ou combinada com danificação mecânica) foram mais elevadas do que após danificação mecânica. Assim, para a maioria dos geossintéticos estudados por Rosete *et al.* (2013), a abrasão foi o agente de endurance que mais condicionou o comportamento mecânico dos materiais estudados. A dimensão característica da abertura dos geossintéticos ensaiados em que essa propriedade é relevante (geotêxteis e geocompósitos de reforço) aumentou após danificação, que não foi acompanhada por um aumento da permissividade dos materiais. Estas diferenças podem ser devidas aos procedimentos de ensaio correspondentes.

10.5.1.4 PINHO-LOPES & LOPES (2014)

Pinho-Lopes & Lopes (2014) estudaram a influência de vários fatores na danificação durante a instalação de geossintéticos: tipo de geossintético e a sua resistência à tração nominal, solo em contacto com os geossintéticos, energia de compactação e o método utilizado para induzir a danificação mecânica (ensaios de campo em verdadeira grandeza e ensaios laboratoriais). Neste trabalho foram estudados seis geossintéticos (dois geotêxteis tecidos, duas geogrelha tecidas, uma geogrelha extrudida e um geocompósito de reforço). Pinho-Lopes & Lopes (2014) apresentam valores para os coeficientes de redução para representar a danificação mecânica associada à instalação em obra para a resistência à tração dos geossintéticos e para a rigidez secante para extensão de 2%. A inspeção visual realizada, nomeadamente através de microscopia eletrónica de varrimento, mostrou que a danificação mecânica induzida em laboratório pode ser mais severa do que a induzida em campo sob condições reais, em

particular para os materiais tecidos. Uma maior resistência nominal dos geossintéticos, para uma dada estrutura, resultou numa maior resistência à danificação durante a instalação. No entanto, a abordagem tradicional (reduções de resistência à tração) foi conservativa em relação às reduções de rigidez observadas. Neste trabalho foram ainda propostas correlações entre os coeficientes de redução para a danificação durante a instalação e a dimensão das partículas de solo e a resistência à tração do material intacto. Neste estudo concluiu-se ainda que o módulo de rigidez secante dos geossintéticos pode ser usado no dimensionamento para estados limites últimos que não envolvam a rotura em tração dos geossintéticos ou para estados limites de utilização. Deste modo, podem conseguir-se projetos mais económicos e dimensionamentos mais realistas.

10.5.1.5 PINHO-LOPES & LOPES (2015)

Dada a possibilidade de interferência entre agentes e mecanismos associados à durabilidade de geossintéticos, Pinho-Lopes & Lopes (2015) estudaram a sinergia entre a danificação por abrasão e a danificação mecânica de geossintéticos sob condições padrão. A danificação foi induzida em laboratório e a repetibilidade dos resultados foi avaliada. Para aumentar o significado estatístico dos resultados, cada ensaio foi realizado três vezes. Para os três geossintéticos estudados (um geotêxtil não-tecido, uma geogrelha tecida e um geocompósito de reforço) foram estudadas propriedades mecânicas (comportamento à tração de curto prazo) e propriedades hidráulicas. A abrasão foi crítica para o comportamento mecânico analisado, em particular para a geogrelha e para o geocompósito. Para estes materiais as junções entre os seus constituintes foram pontos de fragilidade no ensaio de danificação por abrasão. Por sua vez, devido à espessura e massa por unidade de área elevadas, o geotêxtil sobreviveu bem à danificação induzida. As propriedades mecânicas exibiram sinergia positiva entre a danificação mecânica e a danificação por abrasão, mais importante para a resistência à tração do que para a rigidez secante. A danificação mecânica foi mais crítica para a permissividade do geotêxtil e do geocompósito, devido à colmatação dos poros induzida. No que se refere à permissividade e à dimensão característica das aberturas, observou-se sinergia negativa, pelo que a abordagem tradicional usada no dimensionamento (considerando que os vários agentes e mecanismos que afetam a durabilidade são independentes) resultou em estimativas inseguras das propriedades referidas.

10.5.1.6 PINHO-LOPES ET AL. (2015)

No caso de aplicações de reforço de solos a interação solo-reforço é essencial para uma transferência de tensões adequada do solo para os reforços. Para avaliar o efeito da danificação durante a instalação no comportamento de interfaces solo-geogrelha, Pinho-Lopes *et al.* (2015) realizaram ensaios de arranque de amostras intactas e exumadas após instalação em obra sob condições reais. Neste trabalho foram estudadas duas geogrelhas extrudidas e um geocompósito de reforço com estrutura tipo grelha. Para avaliar o efeito de alguns parâmetros nos resultados, tais como o valor nominal da resistência à tração das geogrelhas e a energia de compactação usada nos ensaios de danificação durante a instalação em obra, analisaram-se os coeficientes de interação solo-geogrelha. Os efeitos da instalação em obra nesses coeficientes variaram, dependendo do tipo de geossintético e do tipo de solo em que o geossintético foi instalado. A utilização de um solo com maior resistência ao corte mostrou-se mais eficaz na mobilização de resistência na interface solo-geogrelha, tanto para as amostras intactas como para as amostras exumadas após instalação em obra. O tipo de solo em que o geossintético foi confinado foi mais importante para a resposta da interface do que a tensão de confinamento aplicada durante os ensaios de arranque. Este trabalho permitiu ainda concluir que os coeficientes de redução para a danificação em obra para a resistência à tração das geogrelhas são muito conservativos para estimar os efeitos na resposta ao arranque dos geossintéticos.

10.5.1.7 PINHO-LOPES ET AL. (2016)

Pinho-Lopes *et al.* (2016) estudaram a resistência da interface solo-geossintético após instalação em obra para movimentos de corte em plano inclinado e de arranque. Os geossintéticos estudados, um geotêxtil tecido e uma geogrelha tecida, foram exumados após instalação em obra sob condições reais. Os resultados indicaram que após instalação em obra houve acumulação de partículas finas do solo sobre a superfície dos geossintéticos que reduz o atrito mobilizado na superfície dos materiais. Em alguns casos a danificação durante a instalação induziu roturas prematuras dos provetes, em particular nos ensaios de arranque e na secção não confinada dos provetes. Estas roturas deram origem a reduções significativas do coeficiente de interação em arranque. As estimativas da contribuição das barras transversais da geogrelha para a resistência ao arranque realizadas usando equações da literatura foram muito otimistas. No caso do comportamento em corte em plano inclinado, a danificação durante a instalação induzida não

foi importante. As diferenças observadas nos dois tipos de resposta estudadas devem-se aos diferentes tipos de movimento relativo mobilizados em cada um dos ensaios e à deformação dos geossintéticos que ocorre durante os ensaios de arranque. Os coeficientes de redução para a danificação durante a instalação obtidos para a resistência à tração dos geossintéticos sobrestimam os efeitos dessa instalação no comportamento da interface solo-geossintético em arranque e em corte em plano inclinado.

10.5.1.8 PINHO-LOPES ET AL. (2018)

Frequentemente no dimensionamento de geossintéticos, e em particular para aplicações de reforço de solos, assume-se que a danificação durante a instalação em obra apenas afeta as propriedades mecânicas de curto prazo dos geossintéticos. Pinho-Lopes *et al.* (2018) estudaram dois geossintéticos tecidos (um geotêxtil e uma geogrelha) e avaliaram o comportamento mecânico em tração a curto e a longo prazo, analisando propriedades relevantes para o dimensionamento de reforços em geossintéticos. Para tal foram realizados ensaios de tração (curto prazo) e de fluência e de rotura em fluência (longo prazo) de amostras intactas e de amostras exumadas após instalação em obra em aterros experimentais utilizando dois solos e duas energias de compactação distintos. Este trabalho mostrou que, ao contrário que que é apresentado na literatura e assumido nos métodos de dimensionamento atuais, para o geotêxtil tecido a danificação durante a instalação alterou significativamente o comportamento de longo prazo do material, em particular a rotura à fluência. Pinho-Lopes *et al.* (2018) mostraram ainda que, após a instalação, os geossintéticos exibiram um potencial para rotura em fluência mais reduzido e que a fluência primária termina para deformações de fluência menores. A danificação durante a instalação e o comportamento em tração a longo prazo exibiram sinergia e a abordagem tradicional para o dimensionamento de reforços em geossintético para o geotêxtil é insegura e para a geogrelha ligeiramente conservativa.

10.5.2 DEGRADAÇÃO

10.5.2.1 CARNEIRO (2009)

Carneiro (2009) estudou a resistência de diferentes geossintéticos (geotêxteis, geomembranas e georredes) face a vários agentes de degradação físicos, químicos e biológicos, tais como: substâncias ácidas e alcalinas, temperaturas elevadas, oxigénio, radiação UV e outros agentes

climatéricos e agentes do solo. Com exceção das geomembranas, foram estudados materiais com diferentes estabilizações químicas: diferentes quantidades dos aditivos Chimassorb 944 (C944) (Figura 10.4), negro de carbono e Tinuvin 783.

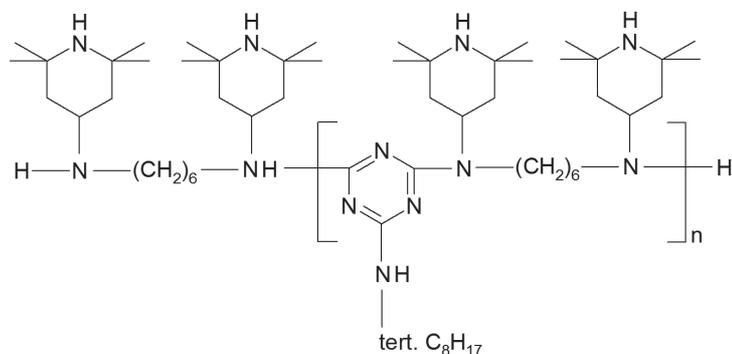


Figura 10.4 – Chimassorb 944 (Carneiro, 2009)

Os danos sofridos pelos geossintéticos nos vários ensaios de degradação foram avaliados pela monitorização de diversas características ou propriedades dos materiais, usando um, ou mais, dos seguintes métodos: (1) inspeção visual, (2) determinação de propriedades físicas (massa por unidade de área, espessura e dimensões), (3) determinação de propriedades mecânicas (comportamento à tração, ao rasgamento e ao punção estático), (4) determinação de propriedades hidráulicas (permeabilidade à água normal ao plano), (5) microscopia eletrónica, (6) microanálise por raio X, (7) espectroscopia de infravermelho e (8) determinação do teor de C944 por cromatografia líquida de alta eficiência com deteção UV.

10.5.2.2 CARNEIRO ET AL. (2011)

Carneiro *et al.* (2011) estudaram a resistência de 4 geotêxteis não-tecidos de PP (estabilizados com diferentes quantidades de C944 e negro de carbono) contra o envelhecimento climatérico. Os materiais foram expostos a ciclos alternados de radiação UV, *spray* de água e condensação num simulador laboratorial (QUV *Weathering Tester*, Q-Panel Lab Products) sob condições de degradação aceleradas. Os resultados obtidos por Carneiro *et al.* (2011) permitiram concluir que (1) a exposição ao envelhecimento climatérico provocou alterações muito significativas no comportamento mecânico dos geotêxteis (alterações dependentes da composição química dos materiais), (2) na ausência de estabilização química adequada, os geotêxteis de PP possuem uma baixa resistência ao envelhecimento climatérico, (3) a presença do aditivo C944 retardou os danos causados pelo envelhecimento

climatérico, (4) o aumento do teor de C944 (de 0,2% para 0,4%, percentagens em massa) resultou numa melhor proteção dos geotêxteis contra o envelhecimento climatérico e (5) a presença de negro de carbono (percentagem em massa de 1,08%) forneceu uma proteção adicional contra o envelhecimento climatérico.

10.5.2.3 VALENTE *ET AL.* (2011)

Valente *et al.* (2011) desenvolveram um método para a determinação de C944 em geotêxteis de PP por cromatografia líquida de alta eficiência com deteção UV. O método foi usado para a determinação do teor de C944 num geotêxtil exposto a radiação UV sob condições artificiais e sob condições naturais (exposição ao ar livre). Os resultados obtidos mostraram que o teor de C944 existente no geotêxtil diminuiu com o aumento da energia total da radiação UV incidente (exposição sob condições artificiais) e com o aumento do tempo de exposição ao ar livre. Desta forma, foi possível concluir que ocorreu um consumo e/ou perda do C944 no desempenho da sua função protetora contra os efeitos da radiação UV.

10.5.2.4 CARNEIRO *ET AL.* (2014)

O trabalho realizado por Carneiro *et al.* (2014) avaliou a existência de sinergismos entre alguns agentes de degradação de geotêxteis. Os autores submeteram um geotêxtil não-tecido de PP a vários ensaios de degradação: imersão em líquidos (água e soluções de ácido sulfúrico, ácido nítrico, hidróxido de sódio e sais de nitrato), termo-oxidação e envelhecimento climatérico (em laboratório sob condições de degradação artificiais). O geotêxtil foi (1) exposto individualmente a cada agente de degradação (exposição única) e (2) exposto sucessivamente a combinações de dois agentes de degradação (exposição múltipla). Os resultados mostraram que, em alguns casos, a ação combinada de dois agentes de degradação foi diferente (mais danosa) da soma das ações individuais de cada um dos agentes. Os exemplos mais relevantes de sinergismos entre os agentes de degradação incluíram: (1) imersão numa solução de hidróxido de sódio e termo-oxidação, (2) imersão numa solução de nitrato de ferro e termo-oxidação e (3) imersão em soluções de nitrato de cádmio ou nitrato de cobre e envelhecimento climatérico.

10.5.2.5 CARNEIRO & LOPES (2017)

Carneiro & Lopes (2017) avaliaram a resistência ao envelhecimento climático de 4 geotêxteis não-tecidos de PP com diferentes quantidades de C944 e de negro de carbono. Os geotêxteis foram expostos ao ar livre (sob condições de degradação naturais) por um período máximo de 36 meses. Os resultados obtidos permitiram concluir que (1) a exposição ao ar livre provocou a deterioração das propriedades mecânicas dos geotêxteis, (2) o comportamento dos geotêxteis foi altamente dependente da sua composição química (teor em C944 e em negro de carbono), (3) os geotêxteis de PP não estabilizados possuem uma baixa resistência ao envelhecimento climático, (4) o aumento do teor de C944 de 0,2% para 0,4% (percentagens em massa) deu origem a uma maior proteção contra o envelhecimento climático e (5) a presença de negro de carbono (percentagem em massa de 1,08%) forneceu uma proteção adicional contra os efeitos do envelhecimento climático. De um modo geral, os resultados obtidos por Carneiro & Lopes (2017) sob condições de degradação naturais confirmaram as conclusões obtidas por Carneiro *et al.* (2011) sob condições de degradação aceleradas.

10.5.2.6 CARNEIRO *ET AL.* (2018a)

O trabalho realizado por Carneiro *et al.* (2018a) avaliou a resistência de 3 geotêxteis não-tecidos de PP (estabilizados com diferentes teores de C944 e de negro de carbono) contra agentes de degradação presentes em ambientes marinhos. Os materiais foram expostos a envelhecimento climático (exposição junto ao mar), imersos no oceano e expostos à ação das marés (imersos em preia-mar e emersos em baixa-mar). Estas exposições foram realizadas no Arquipélago dos Açores (ilhas do Pico e do Faial) e tiveram uma duração máxima de 36 meses. Os resultados obtidos mostraram que (1) a maior danificação dos geotêxteis ocorreu durante a exposição ao envelhecimento climático (as conclusões obtidas nos ensaios de envelhecimento climático foram idênticas às obtidas por Carneiro & Lopes, 2017), (2) a imersão no oceano não provocou alterações relevantes nos geotêxteis e (3) as algas e resíduos acumulados nas estruturas dos geotêxteis durante a exposição à ação das marés protegeu-os da ação da radiação UV.

10.5.2.7 CARNEIRO ET AL. (2018b)

Carneiro *et al.* (2018b) avaliaram a existência de interações entre alguns agentes de degradação presentes em ambientes marinhos. Para tal, os autores submeteram um geotêxtil não-tecido de PP a vários ensaios de degradação em laboratório: imersão em líquidos (água, água do mar e solução aquosa de cloreto de sódio), termo-oxidação e envelhecimento climatérico. Tal como em Carneiro *et al.* (2014), o geotêxtil foi (1) exposto de forma isolada a cada agente de degradação e (2) exposto sucessivamente a combinações de agentes de degradação. Os resultados obtidos mostraram a existência de interações relevantes entre os agentes de degradação (o cloreto de sódio acelerou o processo de termo e foto-oxidação do geotêxtil) e mostraram que, na existência de interações (sinergismos) entre os agentes de degradação, os coeficientes de redução obtidos pela metodologia tradicional (determinação de coeficientes de redução em separado para cada agente de degradação e posterior multiplicação dos mesmos) não foram capazes de representar corretamente (subestimando) a degradação ocorrida no geotêxtil (deterioração de propriedades de tração) quando exposto sucessivamente a esses agentes.

10.5.2.8 CARNEIRO ET AL. (2019)

Carneiro *et al.* (2019) avaliaram a resistência de um geotêxtil não-tecido de PP à radiação UV, tanto em laboratório (sob condições aceleradas), como ao ar livre (sob condições naturais). Os danos ocorridos no geotêxtil foram avaliados quantitativamente (monitorizando alterações no seu comportamento à tração e na sua massa por unidade de área e espessura) e qualitativamente (por microscopia eletrônica de varrimento). Os resultados obtidos permitiram concluir que (1) a exposição à radiação UV (em laboratório e ao ar livre) induziu danos relevantes nas fibras de PP (fissuras transversais), o que provocou a deterioração do comportamento à tração do geotêxtil, (2) a exposição a uma maior quantidade de radiação UV resultou numa maior degradação do geotêxtil, (3) a degradação das fibras de PP ocorreu mais rapidamente em laboratório do que ao ar livre e (4) a degradação observada por microscopia eletrônica de varrimento correlacionou-se bem com a deterioração do comportamento à tração do geotêxtil.

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 D543 (2020) – *Standard practice for evaluating the resistance of plastics to chemical reagents*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D1042-12 (2017) – *Standard test method for linear dimension changes of plastics caused by exposure to heat and moisture*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D1204 (2014) – *Standard test method for linear dimensional changes of nonrigid thermoplastic sheeting or film at elevated temperature*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D1435 (2013) – *Standard practice for outdoor weathering of plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D1693 (2015) – *Standard test method for environmental stress-cracking of ethylene plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D1987 (2018) – *Standard test method for biological clogging of geotextile or soil/geotextile filters*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D2102 (2018) – *Standard test method for shrinkage of textile fibers (bundle test)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D2259 (2016) – *Standard test method for shrinkage of yarns*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D4355/D4355M (2018) – *Standard test method for deterioration of geotextiles by exposure to light, moisture and heat in a xenon arc-type apparatus*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D4594/D4594M (2015) – *Standard test method for effects of temperature on stability of geotextiles*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D4886 (2018) – *Standard test method for abrasion resistance of geotextiles (sandpaper/sliding block method)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5208 (2014) – *Standard practice for fluorescent ultraviolet (UV) exposure of photodegradable plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5262 (2016) – *Standard test method for evaluating the unconfined tension creep and creep rupture behaviour of geosynthetics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5322 (2017) – *Standard practice for laboratory immersion procedures for evaluating the chemical resistance of geosynthetics to liquids*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5397 (2019) – *Standard test method for evaluation of stress crack resistance of polyolefin geomembranes using notched constant tensile load test.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5496 (2015) – *Standard practice for in field immersion testing of geosynthetics.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5721 (2018) – *Standard practice for air-oven aging of polyolefin geomembranes.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5747/D5747M (2013) – *Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geomembranes to liquids.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5818 (2018) – *Standard practice for exposure and retrieval of samples to evaluate installation damage of geosynthetics.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5885/D5885M (2017) – *Standard test method for oxidative induction time of polyolefin geosynthetics by high-pressure differential scanning calorimetry.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D5970/D5970M (2016) – *Standard test method for deterioration of geotextiles from outdoor exposure.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D6213 (2017) – *Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geogrids to liquids.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D6388 (2018) – *Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geonets to liquids.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D6389 (2017) – *Standard practice for tests to evaluate the chemical resistance of geotextiles to liquids.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D6992 (2016) – *Standard test method for accelerated tensile creep and creep-rupture of geosynthetic materials based on time-temperature superposition using the stepped isothermal method.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM D7238 (2017) – *Standard test method for effect of exposure of unreinforced polyolefin geomembrane using fluorescent UV condensation apparatus.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G7/G7M (2013) – *Standard practice for atmospheric environmental exposure testing of nonmetallic materials.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G21 (2015) – *Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G24 (2013) – *Standard practice for conducting exposures to daylight filtered through glass.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G29 (2016) – *Standard practice for determining algal resistance of polymeric films*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G90 (2017) – *Standard practice for performing accelerated outdoor weathering of materials using concentrated natural sunlight*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G151 (2019) – *Standard practice for exposing nonmetallic materials in accelerated test devices that use laboratory light sources*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G152 (2013) – *Standard practice for operating open flame carbon arc light apparatus for exposure of nonmetallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G153 (2013) – *Standard practice for operating enclosed carbon arc light apparatus for exposure of nonmetallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G154 (2016) – *Standard practice for operating fluorescent ultraviolet (UV) lamp apparatus for exposure of nonmetallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G155 (2013) – *Standard practice for operating xenon arc light apparatus for exposure of non-metallic materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

ASTM G160 (2019) – *Standard practice for evaluating microbial susceptibility of nonmetallic materials by laboratory soil burial*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA

Austin, R.A. (1998) – *Installation effects on geosynthetics*. Seminar Volume on Installation Damage in Geosynthetics, ERA Technology, Leatherhead, UK, pp. 3.2.1-3.2.10

Brown, R.P. & Greenwood, J.H. (2002) – *Practical guide to the assessment of the useful life of plastics*. Rapra Technology Limited, Shrewsbury, Shropshire, UK, 180p.

BS 8006-1 (2010) – *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. British Standards Institute, London, UK

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, Universidade do Porto, Portugal, LXVIII-534p.

Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. & Lopes M.L. (2011). *Accelerated weathering of polypropylene geotextiles*. Science and Engineering of Composite Materials, Vol. 18, No. 4, pp. 241-245

Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. & Lopes, M.L. (2014) – *Some synergisms in the laboratory degradation of a polypropylene geotextile*. Construction and Building Materials, Vol. 73, pp. 586-591

Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. & Lopes, M.L. (2018b) – *Laboratory evaluation of interactions in the degradation of a polypropylene geotextile in marine environments*. Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2018, Article ID 9182658, 10p.

Carneiro, J.R. & Lopes, M.L. (2017) – *Natural weathering of polypropylene geotextiles treated with different chemical stabilisers*. Geosynthetics International, Vol. 24, No. 6, pp. 544-553

Carneiro, J.R.; Morais, M. & Lopes, M.L. (2018a) – *Degradation of polypropylene geotextiles with different chemical stabilisations in marine environments*. Construction and Building Materials, Vol. 165, pp. 877-886

Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. & Lopes, M.L. (2019) – *Evaluation of the resistance of a polypropylene geotextile against UV radiation*. Microscopy and Microanalysis, Vol. 25, No. 1, pp. 196-202

Crawford, R.J. (1998) – *Plastics Engineering*. 3rd Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 505p.

CEN/TS 14416 (2014) – *Geosynthetic barriers – Test method for determining the resistance to roots*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

CEN/TS 14418 (2014) – *Geosynthetic barriers – Test method for the determination of the influence of freezing-thawing cycles on the permeability of clay geosynthetic barriers*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 12224 (2000) – *Geotextiles and geotextile-related products – Determination of the resistance to weathering*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 12225 (2000) – *Geotextiles and geotextile-related products – Method for determining the microbiological resistance by soil burial test*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 12447 (2001) – *Geotextiles and geotextile-related products – Screening test method for determining the resistance to hydrolysis in water*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13249 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways or asphalt inclusion)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13250 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in the construction of railways*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13251 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in earthworks, foundations and retaining structures*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13252 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in drainage systems*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13253 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in erosion control works (coastal protection, bank revetments)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13254 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13255 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in the construction of canals*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13256 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in the construction of tunnels and underground structures*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13257 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in solid waste disposals*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13265 (2016) – *Geotextiles and geotextile-related products – Characteristics required for use in liquid waste containment projects*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 13719 (2016) – *Geosynthetics – Determination of the long term protection efficiency of geosynthetics in contact with geosynthetic barriers*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 14030 (2001) – *Geotextiles and geotextile-related products – Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 14414 (2004) – *Geosynthetics – Screening test method for determining chemical resistance for landfill applications*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 14415 (2004) – *Geosynthetic barriers – Test method for determining the resistance to leaching*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 14575 (2005) – *Geosynthetic barriers – Screening test method for determining the resistance to oxidation*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN 14576 (2005) – *Geosynthetics – Test method for determining the resistance of polymeric geosynthetic barriers to environmental stress cracking*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 10319 (2015) – *Geosynthetics – Wide-width tensile test*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 10321 (2008) – *Geosynthetics – Tensile test for joints/seams by wide-width strip method*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 10722 (2019) – *Geosynthetics – Index test procedure for the evaluation of mechanical damage under repeated loading – Damage caused by granular material (laboratory test method)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 11058 (2019) – *Geotextiles and geotextile-related products – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 11501 (2004) – *Plastics – Film and sheeting – Determination of dimensional change on heating*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 12236 (2006) – *Geosynthetics – Static puncture test (CBR test)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 12956 (2020) – *Geotextiles and geotextile-related products – Determination of the characteristic opening size*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 12957-1 (2018) – *Geosynthetics – Determination of friction characteristics – Part 1: Direct shear test*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 12957-2 (2005) – *Geosynthetics – Determination of friction characteristics – Part 1: Inclined plane test*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 12958 (2010) – *Geotextiles and geotextile-related products – Determination of the water flow capacity in their plane*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 13427 (2014) – *Geosynthetics – Abrasion damage simulation (sliding block test)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 13431 (1999) – *Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behaviour*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 13433 (2006) – *Geosynthetics – Dynamic perforation test (cone drop test)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 13438 (2018) – *Geosynthetics – Screening test method for determining the resistance of geotextiles and geotextile-related products to oxidation*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 25619-1 (2008) – *Geosynthetics – Determination of compression behaviour – Part 1: Compressive creep properties*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EN ISO 25619-2 (2015) – *Geosynthetics – Determination of compression behaviour – Part 2: Determination of short-term compression behaviour*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

ENV ISO 10722-1 (1998) – *Geotextiles and geotextile-related products – Procedure to simulate damage during installation – Part 1: Installation in granular materials*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

Greenwood, J.H.; Schroder, H.F. & Voskamp, W. (2012) – *Durability of geosynthetics*. CUR Building & Infrastructure, Gouda, Netherlands, Publication 243, 352p.

Hufenus, R.; Rügger, R.; Flum, D. & Sterba, I.J. (2005) – *Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics*. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 23, No. 5, pp. 401-424

ISO 175 (2010) – *Plastics – Methods of test for the determination of the effects of immersion in liquid chemicals*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 846 (2019) – *Plastics – Evaluation of the action of microorganisms*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 887-1 (2009) – *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 1: General guidance*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 887-2 (2009) – *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 887-3 (2018) – *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 3: Intensified weathering using concentrated solar radiation*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 4892-1 (2016) – *Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 1: General guidance*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 4892-2 (2013) – *Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 2: Xenon-arc lamps*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 4892-3 (2016) – *Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 3: Fluorescent UV lamps*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 4892-4 (2013) – *Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 4: Open-flame carbon-arc lamps*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 11501 (1995) – *Plastics – Film and Sheeting – Determination of dimensional change on heating*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 22088-1 (2006) – *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Part 1: General guidance*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 22088-2 (2006) – *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Part 2: Constant tensile load method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 22088-3 (2006) – *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Part 3: Bent strip method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 22088-4 (2006) – *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Part 4: Ball or pin impression method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 22088-5 (2006) – *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Part 5: Constant tensile deformation method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO 22088-6 (2006) – *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Part 6: Slow strain rate method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO/TR 12960 (1998) – *Geotextiles and geotextile-related products – Screening test method for determining the resistance to liquids*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO/TR 20432 (2007) – *Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

ISO/TS 13434 (2008) – *Geosynthetics – Guidelines for the assessment of durability*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland

Kay, D.; Blond, E. & Mlynarek, J. (2004) – *Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue*. Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference, 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Session 4D, pp. 1-14

Koerner, R.M. (1999) – *Designing with geosynthetics*. 4th Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 761p.

Müller-Rochholz, J. (1997) – *Practicalities of measurement of creep and stress-rupture*. Seminar Volume of Creep and Assessment of Geosynthetics, ERA Technology, Leatherhead, UK, pp. 1.1-1.12

Paula, A.M., Pinho-Lopes, M. & Lopes, M.L. (2004) – *Avaliação laboratorial da danificação durante a instalação de geossintéticos*. Geotecnia, N.º 102, pp 71-83

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*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, LXXII-694p.

Pinho-Lopes, M.J.F. & Lopes, M.L. (2010) – *A durabilidade dos geossintéticos*, FEUP Edições, Porto, Portugal, 294p.

Pinho-Lopes, M. & Lopes, M.L. (2014) – *Tensile properties of geosynthetics after installation damage*. Environmental Geotechnics, Vol. 1, No. 3, pp. 161-178

Pinho-Lopes, M. & Lopes, M.L. (2015) – *Synergisms between laboratory mechanical and abrasion damage on mechanical and hydraulic properties of geosynthetics*. Transportation Geotechnics, Vol. 4, pp. 50-63

Pinho-Lopes, M.; Paula A.M. & Lopes, M.L. (2006) – *Avaliação da fiabilidade dos ensaios de laboratório na previsão da danificação durante a instalação in situ de geossintéticos*. Geotecnia, N.º 108, pp. 175-195

Pinho-Lopes, M.; Paula, A.M. & Lopes, M.L. (2015) – *Pull-out response of geogrids after installation*. Geosynthetics International, Vol. 22, No. 5, pp. 339-354

Pinho-Lopes, M.; Paula, A.M. & Lopes, M.L. (2016) – *Soil-geosynthetic interaction in pullout and inclined-plane shear for two geosynthetics exhumed after installation damage*. Geosynthetics International, Vol. 23, No. 5, pp. 331-347

Pinho-Lopes, M.; Paula, A.M. & Lopes, M.L. (2018) – *Long-term response and design of two geosynthetics: Effect of field installation damage*. Geosynthetics International, Vol. 25, No. 1, pp. 98-117.

Ram, A. (1997) – *Fundamentals of polymer engineering*. Plenum Press, New York, USA, 237p.

Richardson, G.N. (1998). *Field evaluation of geosynthetic survivability in aggregate road base*. Geotechnical Fabric Reports, pp. 34-38

Rosete, A.; Mendonça-Lopes, P.; Pinho-Lopes, M. & Lopes, M.L. (2013) – *Tensile and hydraulic properties of geosynthetics after mechanical damage and abrasion laboratory tests*. Geosynthetics International, Vol. 20, No. 5, pp. 358-374

RPG (1994) – *Guidelines for Testing Geotextiles for Navigable Waterways*. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Sawicki, A. (2000) – *Mechanics of reinforced soil*. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 195p.

SINTEF (2012) – *NorGeoSpec 2012 - Nordic system for the certification and specification of geosynthetics and geosynthetic-related products*. Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning, Trondheim, Norway. Disponível em: < https://www.norgeospec.org/data/uploads/dateien/sintef_guideline_27-09.pdf>. Consultado em 24 de maio de 2018

Sprague, C.J.; Goodrum, R.A. & Kuck, P.J. (1994) – *Durability assesement of exhumed polyester geotextiles*. Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related-Products, Singapore, Vol. 3, pp. 1191-1194

Soong, T.-Y. & Lord, A. E. Jr. (1998) – *Slow strain rate modulus assesement via stress relaxation experiments*. Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics, Atlanta, USA, Vol. 2, pp. 711-714

Shukla, S.K. (2016) – *An introduction to geosynthetic engineering*. CRC Press, London, UK, 472p.

Valente, I.M.; Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. & Lopes, M.L. (2011) – *Determination of Chimassorb 944 in polypropylene geotextiles by HPLC-UV*. Analytical Letters, Vol. 44, No. 4, pp. 617-625

Watn, A. & Chew, S.H. (2002) – *Geosynthetic damage – from laboratory to field*. Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, Vol. 4, pp. 1203