

ALGUNS RESULTADOS DE ENSAIOS DE FLUÊNCIA E ROTURA EM FLUÊNCIA À TRACÇÃO DE GEOSSINTÉTICOS

Some results of tensile creep and creep rupture tests of geosynthetics

António Miguel Paula*

Margarida Pinho-Lopes**

Maria de Lurdes Lopes***

RESUMO – Descreve-se um equipamento desenvolvido para a realização de ensaios laboratoriais de fluência e de rotura em fluência à tracção de geossintéticos. Estes ensaios permitem estudar o comportamento mecânico em tracção de longo prazo dos geossintéticos. Começa-se por apresentar os conceitos de fluência e de rotura em fluência, em que se baseia a definição dos procedimentos de ensaio. É feita a referência normativa correspondente. Para além do equipamento desenvolvido, são descritas as metodologias de ensaio e são apresentados alguns resultados iniciais obtidos através deste ensaio. A campanha de ensaios incluiu dois geossintéticos com estruturas diferentes. São apresentados os valores para os coeficientes de segurança parciais determinados a partir dos resultados dos ensaios. Referem-se ainda as principais conclusões deste estudo.

SYNOPSIS – An equipment developed to carry out tensile creep and creep rupture tests of geosynthetics is described. These tests allow studying the long term tensile mechanical behaviour of geosynthetics. First, the concepts of creep and creep rupture are presented, which are the basis for the tests procedures. The equipment developed and the test method used are described and some initial test results are presented. The research program included two geosynthetics, a woven polypropylene geotextile and a woven polyester geogrid, with similar values for their nominal tensile strength. The results are presented and discussed. The main conclusions of this study are also presented.

PALAVRAS CHAVE – Durabilidade, fluência, rotura em fluência, comportamento a longo prazo de geossintéticos.

1 – INTRODUÇÃO

Uma das questões mais pertinentes nas estruturas em que os geossintéticos estão presentes é a possibilidade de redução da sua resistência. De facto, os geossintéticos podem sofrer variações de resistência, tanto a curto como a longo prazo, motivadas por diversos factores. Entre estes referem-se as ligações efectuadas durante a aplicação, a danificação no decurso da instalação por acção dos equipamentos de construção e de deficientes técnicas de colocação, a fluência e a exposição a agentes físicos, químicos e biológicos (Pinho-Lopes e Lopes, 2003).

Estes factores de degradação, em geral, são considerados no dimensionamento de estruturas com geossintéticos através de coeficientes de segurança que representam a redução de resistência

* Mestre em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança. E-mail: mpaula@ipb.pt

** Doutora em Engenharia Civil, Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro. E-mail: mlopes@ua.pt

*** Doutora em Engenharia Civil, Professora Catedrática, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. E-mail: lcosta@fe.up.pt

devida a mecanismos distintos e não relacionados. Segundo alguns autores, os coeficientes de segurança mais elevados dizem respeito à fluência e à danificação durante a instalação. A importância destas questões é grande e foi alvo de um trabalho extenso realizado por Pinho Lopes, 2006.

A questão da danificação durante a instalação em obra de geossintéticos tem vindo a ser estudada, nomeadamente por Pinho-Lopes (2006) e Pinho-Lopes e Lopes (2003), enquanto a questão da fluência permanece pouco estudada em Portugal.

Além disso, ao contrário de muitos outros materiais tradicionalmente utilizados em engenharia civil, os polímeros e, conseqüentemente, os geossintéticos sofrem fluência, isto é, sofrem extensões no tempo, mesmo sob carga constante.

Segundo Rolin (2004), a fluência e a rotura em fluência de geossintéticos [à tracção] só devem ser relevantes para o dimensionamento destes materiais quando se prevê que estes exerçam a função de reforço a longo prazo, por exemplo, no reforço de taludes, em muros de suporte ou em reforço de fundações realizadas sobre solos moles.

Este autor refere ainda que é igualmente importante definir a extensão de fluência, já que, mesmo para solicitações associadas a níveis de carga baixos, esta extensão pode implicar que a estrutura atinja um estado limite de utilização que, por sua vez, pode conduzir à rotura da estrutura. A este tipo de questão associam-se os ensaios de fluência. Para níveis de cargas mais elevados, associada à fluência (deformações de extensão), surge ainda a rotura em tracção dos geossintéticos, designada por rotura em fluência. Por sua vez, este último mecanismo conduz a menores tempos de vida do material (Rolin, 2004).

Como os geossintéticos são feitos com base em polímeros, exibem propriedades reológicas que influenciam o seu comportamento a longo prazo. Estes fenómenos, tal como a fluência e a relaxação de tensões, podem determinar a alteração das distribuições de tensões numa estrutura de solo reforçado, por exemplo (Sawicki, 2000). Esta alteração pode, por sua vez, induzir comportamentos inesperados, tais como perda de estabilidade global, deformações excessivas da estrutura, entre outros.

Deste modo, dada a importância da avaliação da fluência e da rotura em fluência no comportamento mecânico dos geossintéticos (em particular quando estes materiais exercem a função de reforço), a possibilidade de realizar ensaios para a determinação destas propriedades torna-se essencial.

Assim, neste trabalho aborda-se a fluência e a rotura em fluência de geossintéticos, nomeadamente com a descrição do equipamento laboratorial desenvolvido de forma a avaliar em laboratório o comportamento em fluência e rotura em fluência de geossintéticos e apresentação dos primeiros resultados experimentais obtidos. Então, foram realizados ensaios de fluência e rotura em fluência de dois geossintéticos distintos (no que respeita à sua estrutura). Os resultados do estudo são apresentados e analisados. São apresentados os valores para os coeficientes de redução a aplicar no dimensionamento dos geossintéticos estudados.

2 – FLUÊNCIA E ROTURA EM FLUÊNCIA DE GEOSSINTÉTICOS

2.1 – Fluência

A fluência é um fenómeno dependente do tempo, caracterizado pelo aumento gradual da extensão de um material, quando submetido a cargas constantes (Sawicki, 2000).

Allen e Bathurst (1996) referem que a fluência dos geossintéticos (poliméricos) é a resposta viscoelástica do material polimérico a cargas estáticas de tracção constantes e que resulta em extensão permanente que varia no tempo. Assim, para uma dada carga, a magnitude da fluência dos geossintéticos depende, essencialmente, do tempo, da temperatura e do polímero que constitui o geossintético.

Na fluência dos geossintéticos é possível distinguir três fases: fluência primária (I), secundária (II) e terciária (III), representadas na Figura 1.

Antes de ocorrer fluência primária, há lugar a extensão instantânea (ϵ_0) do material, elástica e plástica.

A fluência primária caracteriza-se por as extensões se desenvolverem rapidamente, sendo a taxa de extensão decrescente no tempo. Este trecho é linear se representado numa escala semi-logarítmica, ou seja, eixo do tempo em escala logarítmica. Nesta fase da fluência a curva, representada na Figura 1a, tem a concavidade voltada para baixo, o que significa que a taxa de extensão é decrescente no tempo. Müller-Rochholz (1997) refere que, nos polímeros semi-cristalinos, nesta fase ocorre orientação das cadeias moleculares.

A fase seguinte, fluência secundária, é linear numa escala aritmética (ou seja, na escala da Figura 1), o que significa que a taxa de extensão é constante no tempo. Durante a fluência secundária a orientação das cadeias moleculares dos polímeros atinge a configuração óptima (Müller-Rochholz, 1997) e os materiais suportam a carga aplicada com menor taxa de extensão (ver Figura 1b).

Por sua vez, a fluência terciária caracteriza-se por um aumento rápido da taxa de extensão no tempo e conduz à rotura do material. Müller-Rochholz (1997) salienta que nesta fase há desenvolvimento da rotura do material, no entanto, esta não ocorre em todos os polímeros. Segundo Müller-Rochholz e Koslowski (1996), para níveis de carga e temperaturas correntes, essa rotura ocorre para materiais em polietileno (PE) e em polipropileno (PP), no entanto, não se verifica para materiais em poliéster (PET).

A extensão total é a soma da extensão instantânea (ϵ_0) e das extensões de fluência que ocorrem nas diferentes fases (ϵ_I , ϵ_{II} , ϵ_{III}). Note-se que a extensão instantânea é composta por uma componente elástica (recuperável) e por uma componente plástica (irrecuperável e que ocorre logo que o geossintético é carregado).

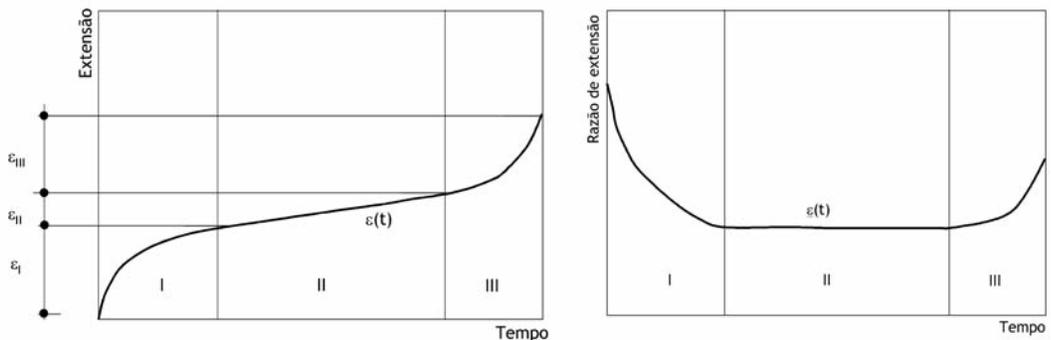


Fig. 1 – Fases típicas da fluência de geossintéticos: a) extensão de fluência no tempo; b) taxa de extensão no tempo (adaptado de Sawicki, 2000).

A curva representada na Figura 1 refere-se a níveis de carga elevados (em geral, excedendo 60% da resistência à tracção do material). Para níveis de carga mais baixos, o comportamento dos geossintéticos pode ser semelhante ao ilustrado na Figura 2 (Sawicki, 2000).

As curvas de fluência podem agrupar-se em três tipos, dependendo da fase de fluência dominante (Figura 3).

Na Figura 4 estão representadas curvas de fluência de geossintéticos para diferentes níveis de carga aplicados. Note-se que estas curvas podem representar duas situações distintas: 1) o comportamento de um determinado geossintético quando submetido a diferentes níveis de carga para uma mesma temperatura; ou 2) o comportamento de diferentes geossintéticos quando submetidos a um mesmo nível de carga e a uma dada temperatura.

Uma das características que é importante definir, é o limite de fluência de um determinado geossintético. Este consiste na força por unidade de largura a partir da qual há fluência do material

até este sofrer rotura. Este limite é controlado, essencialmente, pelo tipo de polímero e varia entre 20 a 60% da resistência à tracção do material (Holtz *et al.*, 1998).

É ainda importante referir que, como consequência secundária da fluência e da reorganização interna das cadeias moleculares é comum o aparecimento de anisotropia no material, associada à orientação das cadeias moleculares na direcção de aplicação da carga (Kay *et al.*, 2004).

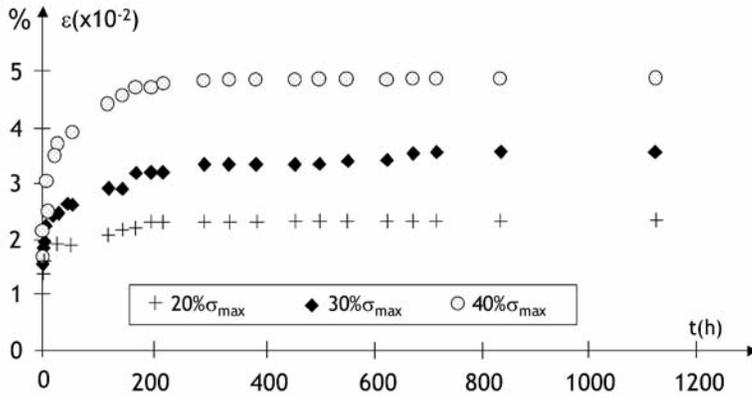


Fig. 2 – Curvas de fluência de um geotêxtil tecido (Sawicki, 2000).

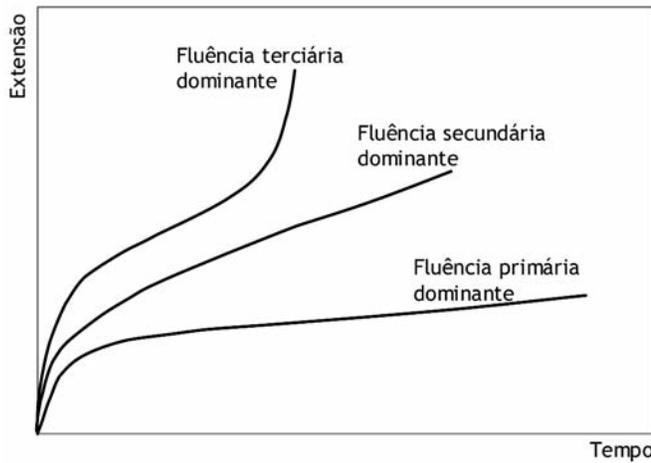


Fig. 3 – Tipos de fluência gerada (Sawicki, 2000).

2.2 – Rotura em Fluência

A rotura em fluência pode ser definida como o modo de rotura esperado após fluência extensa, que conduz a reduções significativas da secção transversal do material deixando este de conseguir suportar a carga aplicada.

Segundo Miller (1996), alguns polímeros começam a fendilhar após fluência extensa. Estas fendas propagam-se rapidamente e induzem rotura do material pouco tempo após o seu início. Este autor refere ainda que o tipo de rotura verificado depende da temperatura.

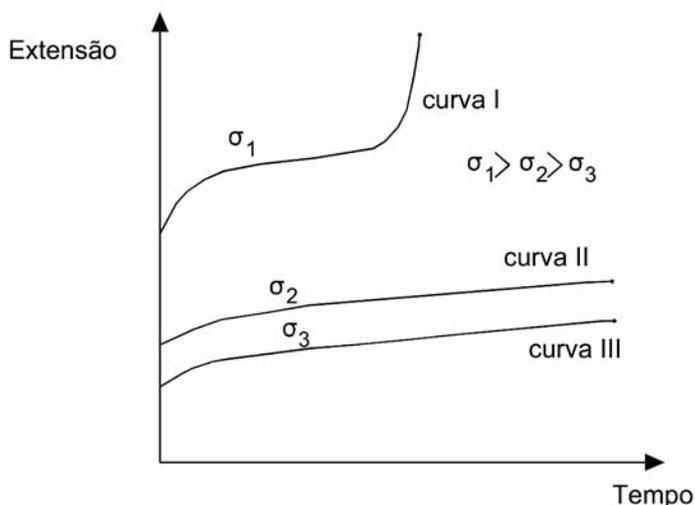


Fig. 4 – Curvas de fluência de geossintéticos (Lopes, 1992).

O tempo que decorre até à rotura depende do nível de carga aplicado, da temperatura ambiente, da geometria do provete ensaiado, da estrutura molecular do material, do método de fabrico, etc. (Crawford, 1998).

Segundo Crawford (1998), de forma simples, pode dizer-se que à medida que o material sofre fluência, a tensão induzida atinge um valor suficientemente elevado para provocar o aparecimento de microfendilhação no material, embora esta não se propague de forma catastrófica. Assim, a tensão induzida na secção intacta do material aumenta um pouco, o que, por sua vez, implica um crescimento estável da microfendilhação, de forma que durante um período de tempo haja um aumento da tensão induzida ao provete, devido ao efeito combinado da fluência e do constante aparecimento de microfendas. Crawford (1998) afirma que, eventualmente, se atinge 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.

2.3 – Curvas isócronas carga-extensão

Com base na informação obtida através dos ensaios de fluência e dos ensaios de rotura em fluência de geossintéticos é possível traçar curvas em que se relaciona a carga aplicada com a extensão do material. Cada uma dessas curvas corresponde a leituras realizadas após um determinado intervalo de tempo decorrido desde o início do ensaio e são designadas por curvas isócronas.

Para obter essas curvas é necessário trabalhar a informação obtida dos ensaios (Figura 5).

Nas curvas de fluência:

- considera-se um determinado instante t , para o qual se determina a extensão (ϵ) correspondente a um dado nível de carga (σ) aplicado, definindo pontos (ϵ, σ, t) ;
- em seguida, num gráfico carga-extensão, representam-se esses valores, obtendo-se uma curva para cada instante considerado;
- este procedimento deve ser repetido para outros instantes em que a extensão de fluência foi medida.

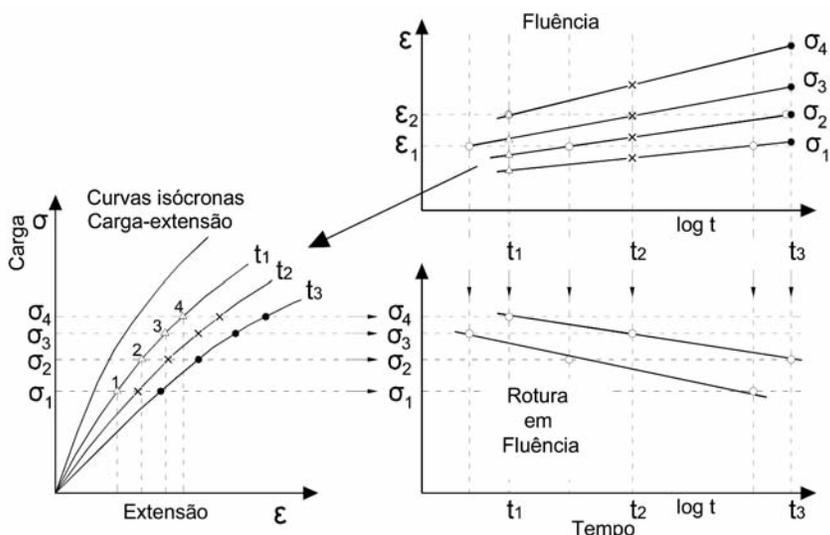


Fig. 5 – Curvas isócronas carga-extensão (Müller-Rochholz, 1997).

Nas curvas de rotura em fluência só é possível definir pontos para as curvas isócronas se houver registo da extensão de fluência ao longo do ensaio. Neste caso:

- considera-se um determinado nível de carga (σ) para o qual se determina o instante (t) para o qual ocorreu a rotura e a extensão (ϵ) correspondente, definindo pontos (ϵ, σ, t);
- em seguida, num gráfico carga-extensão, representam-se esses valores, obtendo-se uma curva para cada instante considerado;
- este procedimento deve ser repetido para outros níveis de carga em que se realizaram ensaios de rotura em fluência com medição da extensão.

Estas curvas permitem representar o comportamento do geossintético em termos de carga-extensão para um dado instante. Em geral, dado que o dimensionamento é feito para o fim do tempo de vida da estrutura, com a curva carga-extensão correspondente a esse instante pode estudar-se a resposta do geossintético à solicitação correspondente, tendo em conta as alterações observadas, nomeadamente em termos de rigidez.

3 – ENSAIOS LABORATORIAIS DE FLUÊNCIA E ROTURA EM FLUÊNCIA

3.1 – Procedimentos de ensaio

O ensaio de fluência e de rotura em fluência de geossintéticos encontra-se descrito na norma europeia EN ISO 13431 (1999), “Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and creep rupture behaviour”. Nos dois pontos seguintes é feita uma breve descrição resumida dos procedimentos dos ensaios.

3.1.1 – Ensaios de rotura em fluência

Antes de realizar o ensaio de rotura em fluência é necessário determinar as características do comportamento mecânico a curto prazo do geossintético de acordo com os procedimentos descritos na NP EN ISO 10319 (2006), incluindo a resistência à tracção, a extensão na rotura e a contracção

lateral dos provetes (necessário caso se recorra a provetes com largura inferior a 200mm no ensaio de rotura em fluência).

O ensaio de rotura em fluência baseia-se no seguinte princípio: os provetes do material a ensaiar são submetidos a uma força estática constante, em condições de temperatura e humidade também constantes. Essa carga deve estar distribuída igualmente em toda a largura do provete e é mantida até que este sofre rotura. O tempo decorrido desde a aplicação total da carga até à rotura é determinado recorrendo a um relógio incorporado no equipamento de ensaio que regista esse mesmo intervalo de tempo.

Os ensaios de rotura em fluência devem ser realizados usando quatro níveis de carga distintos definidos entre 50% e 90% da resistência à tracção do geossintético, previamente determinada. Para cada um desses níveis de carga devem ser ensaiados três provetes, num total de doze provetes para cada tipo de amostra de geossintético estudada.

3.1.2 – Ensaio de fluência

Antes de realizar ensaios de fluência de geossintéticos é necessário, tal como para os ensaios de rotura em fluência, proceder a ensaios de tracção de acordo com a NP EN ISO 10319 (2006), para determinar a resistência à tracção, a extensão correspondente e a existência de contracção lateral dos provetes.

Os ensaios de fluência devem ser realizados com quatro níveis de carga distintos escolhidos entre os seguintes: 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% da resistência à tracção medida para o geossintético em estudo. Em seguida, deve submeter-se cada um dos quatro provetes a ensaiar a um dos níveis de carga definidos, de forma que cada provete esteja submetido a um nível de carga distinto.

A deformação do material, ou seja, a variação do comprimento de referência, deve ser medida com uma precisão de 0,1%, nos seguintes instantes, após a aplicação da totalidade da carga de fluência: 1, 2, 4, 8, 15, 30 e 60 minutos, 2, 4, 8, 24 horas e 3, 7, 14, 21 e 42 dias (42 dias = 1008 horas). Como alternativa, a medição da deformação do provete pode ser feita em intervalos de tempo regulares, desde que a primeira leitura seja feita até 1 minuto após a aplicação total da carga de fluência e desde que a última leitura seja feita após decorridas, no mínimo, 1000 horas desde o início do ensaio.

3.2 – Características do equipamento

3.2.1 – Ensaio de rotura em fluência

O equipamento de ensaio deve consistir num pórtico onde são fixas as garras, um sistema de aplicação da carga e um outro para registar o tempo decorrido até à rotura do provete.

O sistema de aplicação da carga deve ser suficientemente rígido para que não sofra deformações aparentes sob essa carga e deve ainda estar isolado de vibrações de fontes exteriores.

A carga deve ser constante, a menos de 1%, e pode ser aplicada recorrendo a cargas actuando directamente no provete, através de um sistema de alavanca, ou ainda através de qualquer outro sistema mecânico, hidráulico ou pneumático.

O sistema de aplicação da carga deve ainda permitir que aquela seja aplicada ao provete de forma suave, num período de tempo máximo de 60 segundos.

No que diz respeito ao relógio que deve ser incorporado no equipamento, a sua precisão deve ser de 1%, permitindo o início da contagem do tempo no instante em que é aplicada a totalidade da carga de fluência e o registo automático do instante de rotura do provete.

Na Figura 6 está representada, de forma esquemática, uma proposta para o equipamento em causa de acordo com a norma EN ISO 13431 (1999).

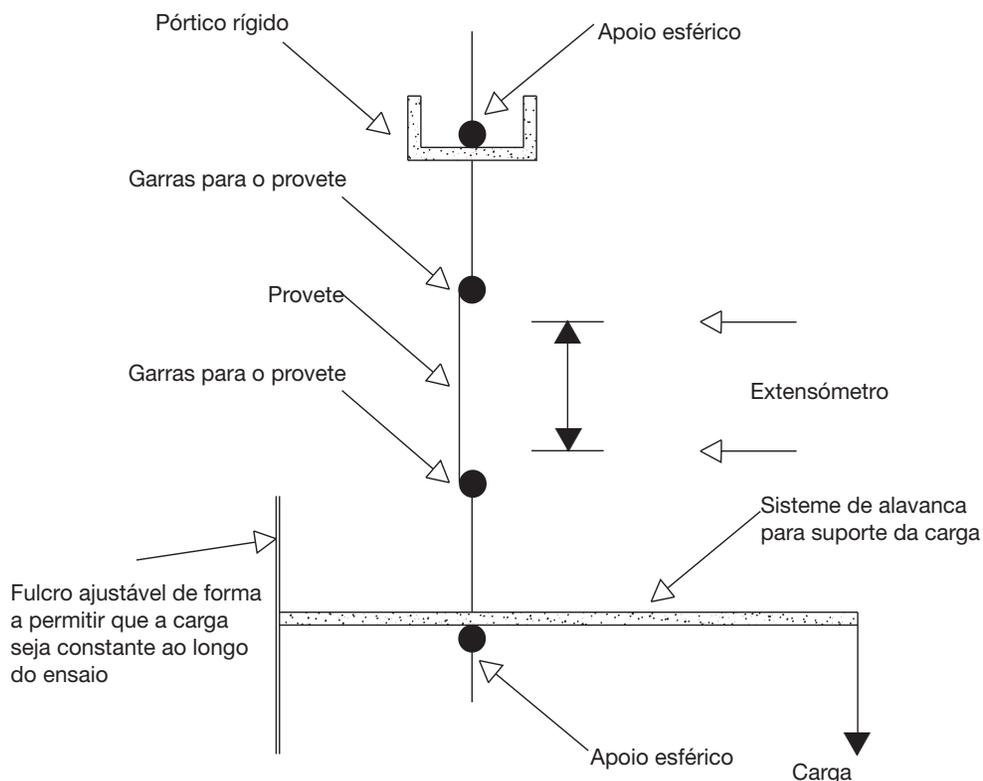


Fig. 6 – Representação esquemática do equipamento de ensaio de rotura em fluência de acordo com a norma EN ISO 13431 (1999), para uma solução com sistema de alavanca.

3.2.2 – Ensaio de fluência

O equipamento de ensaio é em tudo semelhante ao usado para avaliar a rotura em fluência: deve consistir num pórtico onde são fixas as garras, um sistema de aplicação da carga e um outro para medir a variação num dado comprimento de referência durante o ensaio.

O sistema de medição das extensões, que permite avaliar a variação de um dado comprimento de referência ao longo do ensaio, deve ser realizado entre duas linhas paralelas ao longo de toda a largura do provete ou entre dois pontos situados no eixo central do provete, relativamente à direcção de aplicação da carga. Cada uma dessas linhas ou pontos devem estar a uma distância mínima de 20mm da garra correspondente (Figura 7) e devem distar entre si, no mínimo, 200mm; no caso de geogrelhas, essa distância não deve ser inferior a dois elementos completos.

3.3 – Equipamento desenvolvido

O equipamento de ensaio de laboratório desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para estudo da fluência e da rotura em fluência de geossintéticos teve como base as orientações contidas na EN ISO 13431 (1999).

O equipamento base consiste num pórtico onde podem ser instalados quatro provetes (Figuras 8 e 9). A carga máxima aplicável em cada um desses quatro pontos de ensaio é de 30kN. Cada provete é fixo através de garras desenvolvidas para esse efeito e que, actualmente, podem ser de dois tipos: cilíndricas ou em cunha (Figura 10).



Fig. 7 – Dimensão dos provetes para os ensaios de fluência (caso geral).

A carga é aplicada ao provete através de um braço multiplicador, pela colocação de pesos na sua extremidade (Figura 11). Durante o ensaio, à medida que o provete de geossintético se vai deformando, é possível ajustar a posição do braço, de forma que a carga aplicada no provete seja constante. Tal é feito por meio de uma alavanca (Figura 12).

Para a medição da extensão entre dois pontos do provete concebeu-se, em parceria com o Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da FEUP, um sistema baseado em vídeo. Assim, através de uma câmara de vídeo, devidamente calibrada para o efeito, é registada a posição inicial de dois pontos (de referência) no início do ensaio e é acompanhada e registada a evolução do deslocamento relativo desses dois pontos ao longo do tempo.

O “software” foi concebido de forma a permitir a visualização “on-line” dos ensaios e da evolução da extensão dos provetes. São registados, por um lado, os valores da extensão medidos ao longo de cada ensaio e, por outro lado, as imagens correspondentes são também armazenadas. Esta última opção permite fazer um filme do ensaio, o que possibilita a observação das alterações nos provetes e a detecção de alterações no mecanismo de rotura (caso estas ocorram).

A existência de rotura é também detectada pelo “software”, no entanto, este prossegue a aquisição de informação e envia uma mensagem indicando a existência de rotura num determinado provete de um dado pórtico de ensaio.

O sistema de detecção dos pontos de referência e de medição da distância relativa entre eles tem por base um sistema de cores. Assim, dependendo da cor base do geossintético em estudo, os pontos de referência caracterizam-se por haver uma faixa branca seguida por uma faixa preta ou vice-versa. Na Figura 13 está ilustrado o princípio de funcionamento deste sistema.

A marcação eficaz dos pontos de referência foi uma das questões mais relevantes durante o desenvolvimento deste sistema. De facto, foram testadas várias soluções, tendo-se optado pela utilização de placas metálicas, fixas ao provete através de um parafuso (Figura 13b), no caso dos geotêxteis, ou com duas placas de ambos os lados de uma barra das geogrelhas (Figura 13c).

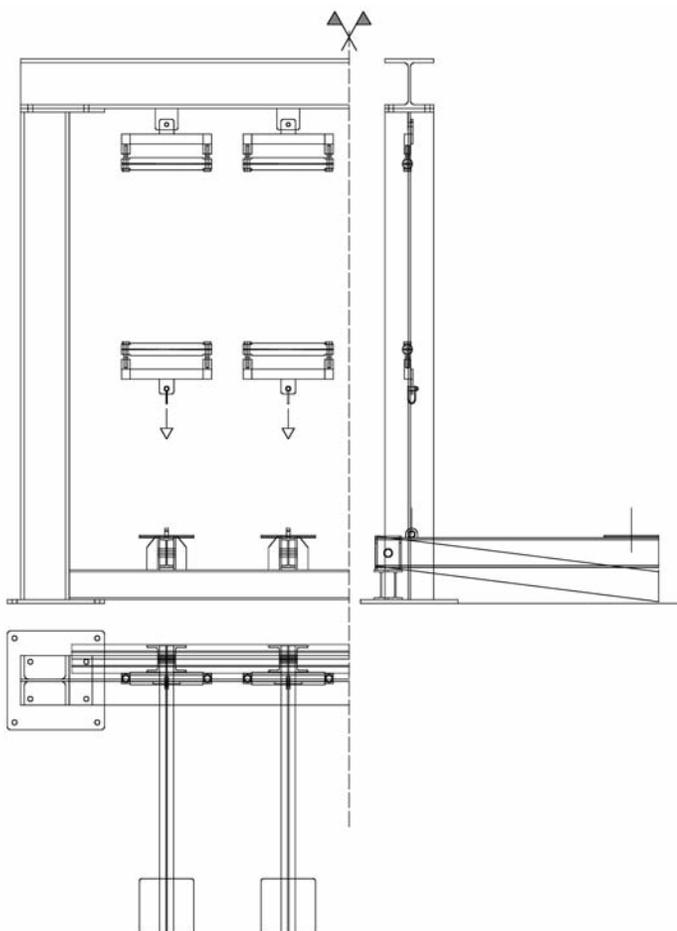


Fig. 8 – Esquema do pórtico concebido para realização de ensaios de fluência e de rotura em fluência de geossintéticos.

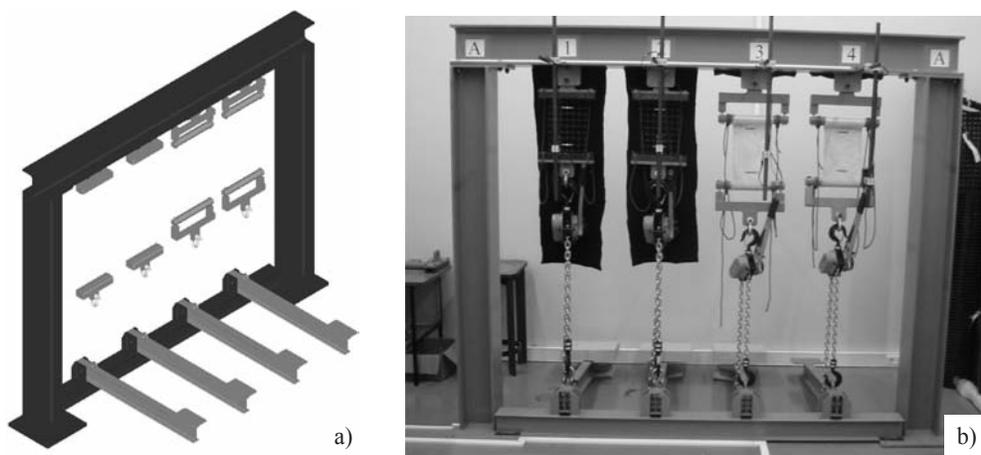


Fig. 9 – Pórtico para realização de ensaios de fluência e de rotura em fluência de geossintéticos: a) esquema tridimensional; b) vista geral.

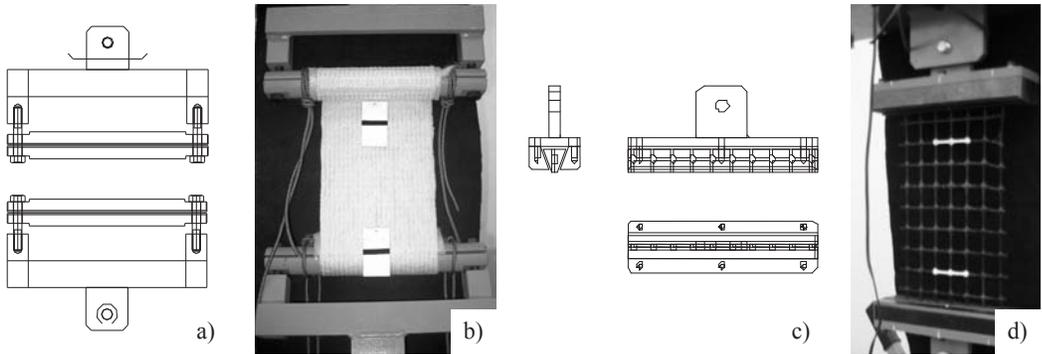


Fig. 10 – Garras usadas nos ensaios de fluência e de ruptura em fluência: a) esquema representativo das garras cilíndricas; b) garras cilíndricas; c) esquema representativo das garras em cunha; d) garras em cunha.



Fig. 11 – Braço multiplicador onde são aplicados os pesos que materializam a carga transmitida ao provete durante o ensaio.



Fig. 12 – Alavanca usada para transmitir a carga aplicada no braço multiplicador ao provete e que permite o ajuste da posição do braço

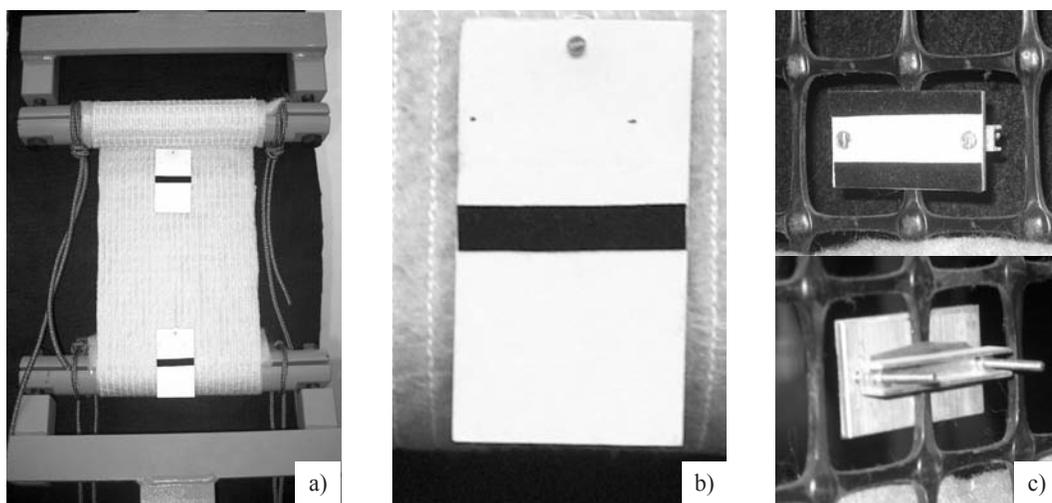


Fig. 13 – Sistema para medição da distância entre pontos de referência: a) provete com pontos de referência; b) pormenor das marcas utilizadas nesses pontos para geotêxteis; c) pormenor das marcas utilizadas nesses pontos para geogrelhas.

Na Figura 14a está ilustrado o monitor de onde é possível controlar os parâmetros de ensaio e a sua evolução. A detecção, pelo programa, dos pontos de referência é avaliada pelo utilizador através de um gráfico anexo a imagens do provete actualizadas em tempo real.

Uma outra questão essencial para este equipamento é a exigência, feita na norma, relativamente à precisão na medição das extensões do geossintético. Por esta razão, optou-se pelo sistema vídeo, utilizado com muito sucesso; contudo, é necessário ter grande cautela na sua utilização.

Em primeiro lugar, apesar de este sistema garantir a precisão necessária (através do número de píxeis de cada imagem), é fundamental que a distância medida seja corrigida sempre que haja distorção da imagem pela câmara. A resolução dos vários problemas associados a estas questões foi muito morosa. Para obviar estas questões, foi adicionada ao programa uma função, através de parâmetros de calibração da câmara, que permitem fazer as correcções necessárias para evitar erros associados à distorção da imagem.

Em segundo lugar, é necessário que exista uma calibração da distância medida. Então, para calibrar, para cada provete, a câmara e a distância medida utiliza-se uma régua com faixas brancas e pretas alternadas, tal como se ilustra na Figura 14c.

Assim que o programa é iniciado e após a calibração da câmara, é possível fazer imagens do posto de ensaio (mesmo antes da colocação do provete), podendo obter-se um registo de todas as fases de ensaio. As imagens são feitas a intervalos crescentes no tempo, já que, em geral, ao longo do ensaio as alterações na extensão vão sendo cada vez mais espaçadas.

No que se refere à medição da distância entre pontos de referência e, conseqüentemente, da extensão do provete, esta é feita a intervalos de tempo crescentes, com um mínimo de 1 segundo.

É de salientar que no programa de ensaio foi introduzida uma outra possibilidade: a de registar a ocorrência de eventos significativos, que possam eventualmente ter repercussões no comportamento de um dado provete. Como exemplos deste tipo de acção refiram-se: a colocação da alavanca, para aplicação da carga ao provete; o início da aplicação da carga; o fim da aplicação da carga (para que se possa confirmar se o tempo correspondente indicado na norma é cumprido); a rotura de um provete no mesmo pórtico ou noutro adjacente; uma eventual falha de luz (embora o sistema esteja preparado para reiniciar, mantendo todas as configurações existentes antes de uma falha); etc.

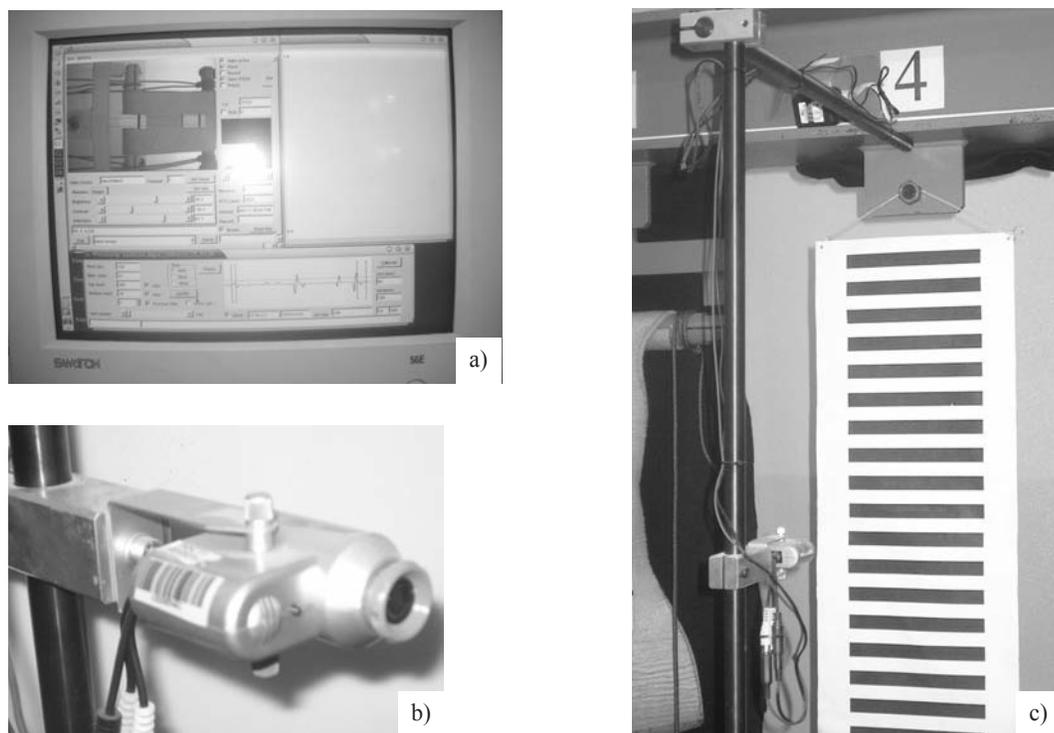


Fig. 14 – Medição da extensão: a) monitor para controlo dos parâmetros de ensaio; b) pormenor de uma das câmaras; c) régua de calibração da câmara.

Para mais facilmente se controlar os efeitos deste tipo de eventos, à sinalização de um evento pode associar-se uma alteração (geralmente, diminuição) do intervalo entre leituras da distância entre pontos de referência e a gravação de imagens com intervalos de tempo também menores. Na Figura 15 está ilustrado o menu correspondente à identificação dos eventos referidos.

Para proceder à avaliação da carga efectivamente aplicada a cada um dos provetes foi desenvolvido um programa de computador específico. Assim, antes de colocar o provete nas garras e no pórtico, a célula de carga é colocada no local correspondente, os pesos são dispostos sobre o braço multiplicador e este é colocado na horizontal. Desta forma, a carga que será aplicada ao provete é aplicada à célula de carga e registada (Figura 16).

Note-se que, quando o provete estiver colocado é necessário fazer algumas correcções no valor da carga aplicada, tendo em conta o peso da célula de carga e do sistema associado e o peso da garra inferior e da alavanca aplicada na sua extremidade.

Tal como se referiu anteriormente, as condições a que os provetes de geossintético são ensaiados, nomeadamente a temperatura ambiente, condicionam o seu comportamento e os resultados destes ensaios. Por essa razão, a sala onde se instalou o equipamento de fluência não possui janelas. A sala da FEUP onde este equipamento foi instalado tem uma particularidade que implicou algumas dificuldades adicionais: uma das paredes é exterior e virada a sul, o que se traduzia em grandes alterações na temperatura ambiente, em particular no Verão. Por esta razão, e para minimizar as variações de temperatura, esta parede foi revestida com placas de um material isolante - poliestireno extrudido. Além disso, dado que esta medida não se revelou suficiente, foi instalado um sistema de ar condicionado.

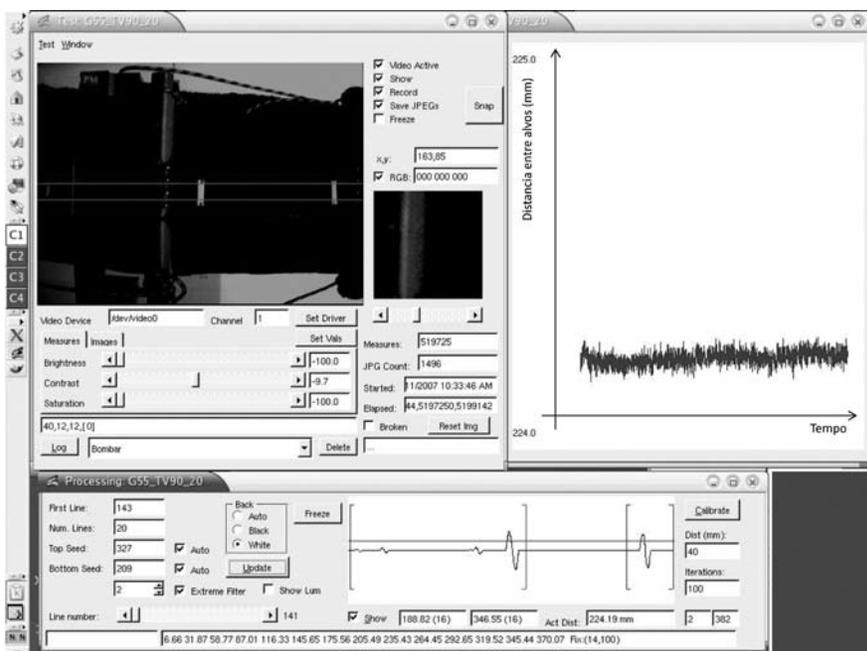


Fig. 15 – Menu de identificação de eventos significativos para o ensaio de fluência ou rotura em fluência.

Actualmente existem três pórticos na sala de fluência do laboratório de Geossintéticos da FEUP, o que permite ensaiar 12 provetes simultaneamente.

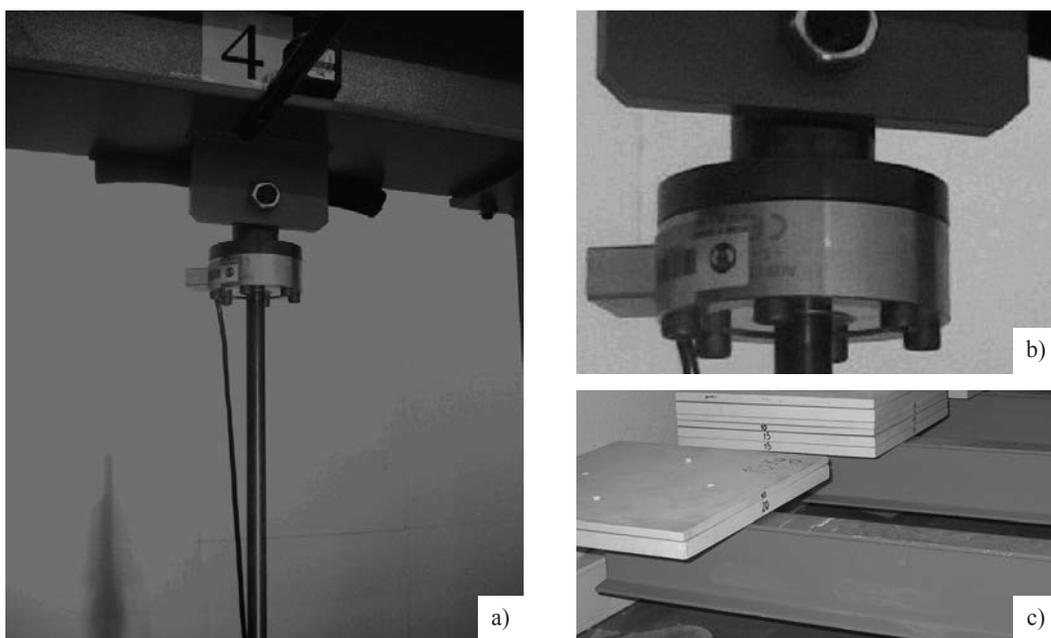


Fig. 16 – Calibração da carga aplicada ao provete: a) e b) célula de carga e suporte respectivo; c) peso na extremidade dos braços.

4 – PROGRAMA DE ENSAIOS REALIZADO

4.1 – Geossintéticos

Os geossintéticos considerados no estudo foram um geotêxtil tecido em polipropileno (PP), GTX, e uma geogrelha tecida biaxial em poliéster (PET), GGR, ilustrados na Figura 17. As principais propriedades físicas e mecânicas destes dois geossintéticos são apresentadas no Quadro 1.

Para que a comparação dos resultados dos ensaios seja possível, os geossintéticos foram seleccionados com valores da resistência nominal semelhantes (55 e 65 kN/m).

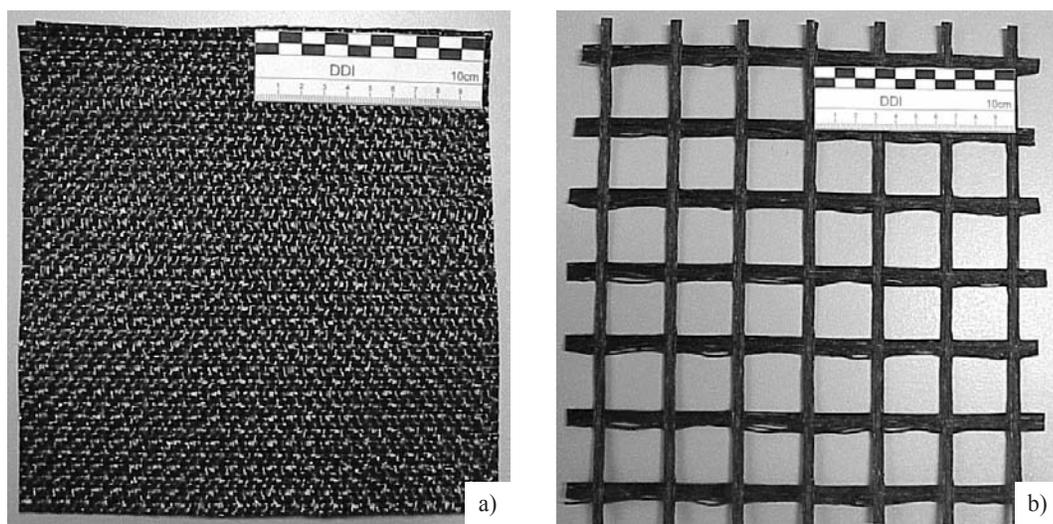


Fig. 17 – Geossintéticos ensaiados: a) geotêxtil tecido GTX; b) geogrelha tecida biaxial GGR.

Quadro 1 – Propriedades dos geossintéticos estudados.

Geossintéticos	Massa por unidade de área (g/m ²)	Resistência à tracção		Extensão (%)
		DF (kN/m)	DPF (kN/m)	
GTX	320	65	65	15
GGR	–	55	55	15

Nota: DF = direcção de fabrico. DPF = direcção perpendicular à de fabrico.

4.2 – Programa de trabalho

4.2.1 – Descrição geral

O programa de trabalhos estabelecido consiste em caracterizar o comportamento mecânico isolado dos geossintéticos (ensaios de tracção de acordo com a norma NP EN ISO 10319, 2006) e o comportamento a longo prazo dos geossintéticos através de ensaios de fluência e rotura em fluência (de acordo com a norma EN ISO 13431, 1999).

4.2.2 – Ensaios de tracção

De acordo com a norma NP EN ISO 10319 (2006), para o ensaio de tracção e para cada geossintético, foram ensaiados à tracção 5 provetes, com 200mm de largura. Neste trabalho foram apenas realizados ensaios de tracção na direcção de fabrico.

A forma de preparação dos provetes deve ser adequada à sua estrutura. No caso do geotêxtil tecido, os provetes foram cortados com uma largura de cerca de 220mm, sendo, posteriormente, removidos fios dos dois lados do provete, de modo a que o material ficasse com franjas laterais. Desta forma pretendeu-se atingir uma largura nominal de 200 ± 1 mm com igual número de elementos resistentes nos diferentes provetes, bem como manter a integridade da cada provete ao longo do ensaio.

No caso da geogrelha, os provetes foram preparados com um mínimo de 200mm de largura e comprimento suficiente para assegurar uma distância livre entre garras de 100mm. Os provetes incluem 7 elementos completos na sua largura. Os cortes feitos nas barras nas extremidades do provete estão, no mínimo, a 10mm de distância dos nós.

Os provetes a ensaiar foram acondicionados e os ensaios foram realizados em atmosferas de acordo com o definido na norma ISO 554: 1976, Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications; para geotêxteis e produtos relacionados essas condições são: $20 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa.

A resistência à tracção de um geossintético (R_t), em kN/m, é calculada da seguinte forma:

$$R_t = F_{\max} \times c \quad (1)$$

F_{\max} – força máxima medida durante o ensaio (em kN);

c – parâmetro determinado de acordo com as Equações 2 ou 3, conforme o caso.

Para o geotêxtil, GTX, com largura nominal do provete, B , em metros:

$$c = \frac{1}{B} \quad (2)$$

No caso da geogrelha, GGR:

$$c = \frac{N_m}{N_p} \quad (3)$$

N_m – número mínimo de elementos traccionados existentes em 1 metro de largura do material;

N_p – número de elementos traccionados do provete ensaiado.

Durante o ensaio de tracção foi também feito o registo do valor da extensão (em %) correspondente à força máxima, $\epsilon_{F_{\max}}$, e portanto, correspondente à resistência à tracção do material.

4.2.3 – Ensaios de fluência e rotura em fluência

Para os ensaios de fluência e rotura em fluência foram ensaiados três provetes para cada nível de carga utilizada. Foram apenas realizados ensaios de fluência e rotura em fluência na direcção de fabrico. Nos ensaios de rotura em fluência foram usados quatro níveis de carga distintos definidos entre 50% e 90% da resistência à tracção do geossintéticos, o que corresponde a 12 provetes ensaiados à rotura em fluência. Nos ensaios de fluência foram realizados com quatro níveis de carga

distintos entre 5% a 60% da resistência à tracção. Note-se que, para os ensaios de fluência, na norma de ensaio apenas se indica a realização de um provete para cada nível de carga. No entanto, neste trabalho foram ensaiados três provetes para cada nível de carga.

Os procedimentos a usar na preparação dos provetes são os já indicados para o ensaio de tracção. No caso do geotêxtil, os provetes foram cortados com uma largura de cerca de 120mm, sendo, posteriormente, removidos fios dos dois lados do provete, de modo a que o material ficasse com franjas laterais. Desta forma pretendeu-se atingir uma largura nominal de 100 ± 1 mm com igual número de elementos resistentes nos diferentes provetes, bem como manter a integridade da cada provete ao longo do ensaio.

No caso da geogrelha, os provetes foram preparados com um mínimo de 100mm de largura e incluem 5 elementos completos na sua largura. Os cortes feitos nas barras da extremidade dos provetes estão, no mínimo, a 10mm de distância dos nós.

Foi necessário optar por provetes de largura inferior a 200mm já que para larguras do provete iguais a 200mm seria necessário aplicar no equipamento cargas muito elevadas e de difícil controlo.

A carga de fluência e a carga de rotura de fluência foi aplicada ao provete de forma suave e num período de tempo não superior a 60 segundos. O instante zero do ensaio é aquele em que a totalidade da carga é aplicada ao provete.

A medição da deformação do material no ensaio de fluência, ou seja, a variação do comprimento de referência foi medida no instante após a aplicação da totalidade da carga de fluência e posteriormente aos 10 segundos, os intervalos seguintes aumento num factor de tempo de 1,1 comparativamente ao intervalo anterior.

De acordo com a norma EN ISO 13431 (1999), a duração dos ensaios de fluência é de cerca de 1000 horas, no entanto esse valor foi ultrapassado em alguns ensaios apresentados.

5 – ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 – Ensaios de Tracção

Os resultados dos ensaios de tracção obtidos são apresentados no Quadro 2 e incluem os valores médios da resistência à tracção (R_t) e da extensão (ϵ) registada para o valor máximo da força, bem como os coeficientes de variação correspondentes (CV_{R_t} e CV_{ϵ} , respectivamente).

Como se pode verificar, os valores da resistência à tracção das amostras dos dois geossintéticos considerados são superiores aos valores nominais respectivos (definidos pelos produtores e apresentados no Quadro 1). Além disso, os coeficientes de variação dessa grandeza são baixos. Os valores da extensão para a resistência à tracção dos geossintéticos são inferiores aos valores nominais correspondentes (Quadro 1). A esta grandeza estão associados valores do coeficiente de variação um pouco mais elevados, mas sempre inferiores a 6%.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de tracção.

Grandeza	Geossintéticos	
	GTX	GGR
R_t (kN/m)	77,5	83,4
CV_{R_t} (%)	1,8	2,4
ϵ (%)	13,0	14,9
CV_{ϵ} (%)	4,8	5,7

5.2 – Ensaio de fluência e rotura em fluência

5.2.1 – Ensaio de rotura em fluência

Os resultados do ensaio são apresentados em termos do tempo decorrido até à rotura do proveite quando submetido a um dado nível de carga, constante durante esse tempo. De acordo com a norma EN ISO 13431 (1999), para a determinação da rotura em fluência, deve ser apresentado um quadro com os valores do tempo decorrido até à rotura de cada proveite e carga aplicada correspondente.

No Quadro 3 são apresentados os resultados obtidos deste ensaio que puderam ser validados, para os dois materiais ensaiados.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de rotura em fluência dos geossintéticos GTX e GGR.

GTX		GGR	
% da Resistência à tracção	Tempo até à rotura (horas)	% da Resistência à tracção	Tempo até à rotura (horas)
86,4	0,04056	79,2	0,13389
86,4	0,00194	79,2	0,29556
86,4	0,01889	79,2	0,08444
77,7	4,05611	74	20,44667
77,7	2,21306	74	12,42806
77,6	2,13667	74	12,65222
70,9	26,63444	69,8	173,29333
70,9	11,23306	70,8	124,97694
70,9	20,20222	69,5	80,41306
60,7	848,97056	63,3	1348,81444
60,7	1107,32444	64	2324,44500
60,7	622,73833	64,6	601,70139

Nas Figuras 18 e 19 estão representadas as curvas de rotura em fluência para o geotêxtil tecido GTX e para a geogrelha tecida GGR, respectivamente. Em cada uma das figuras estão também indicadas as regressões lineares dos resultados (linha a cheio) acompanhadas da equação correspondente e do coeficiente de determinação da mesma e das linhas correspondentes ao limite inferior de confiança de 95% (LCL (95%)), representada a traço interrompido e determinada através do tratamento estatístico dos resultados.

Para estes dois geossintéticos, os resultados obtidos são muito fiáveis. Por um lado, o coeficiente de determinação da aproximação linear dos resultados é bastante elevado (0,94); e, por outro lado, a curva correspondente ao limite inferior de confiança de 95% é bastante próxima dos pontos obtidos.

Os resultados de ensaios de rotura em fluência permitem avaliar o tempo de vida do material sob acção de carga constante, nomeadamente através de extrapolações. No entanto, estas devem ser realizadas com cautela e com informação relevante, por exemplo, resultados obtidos para geossintéticos análogos e ensaiados em condições semelhantes. Greenwood e Friday (2003) referem que extrapolações superiores a duas ordens de grandeza devem ser evitadas, no entanto, cada projectista deve decidir em cada caso o que é aceitável, em função da informação disponível e das exigências de cada projecto.

Note-se que neste trabalho, os resultados apresentados são os primeiros resultados disponíveis. De facto, presentemente há ainda ensaios a decorrer, com cargas mais baixas e que conduzirão a intervalos de tempo até à rotura mais longos. Assim, para realizar com elevada confiança extrapolações para tempos de vida típicos de estruturas em que os geossintéticos exercem a função de reforço será necessário dispor desses resultados. No entanto, considerou-se útil fazer extrapolações para tempos de serviço de 30 anos, sempre salvaguardando a necessidade de confirmar os resultados apresentados com resultados de ensaios mais longos.

Entre os dois geossintéticos estudados o efeito de rotura em fluência é maior no GTX do que no GGR. Os resultados apresentados indicam que, após 30 anos de serviço sob carga constante, o material GTX, sofreria rotura e a carga correspondente seria de 49,7% da resistência à tracção do geossintético, para o GGR, a rotura ocorreria para 60,32% da resistência à tracção.

Com estes resultados é possível determinar o coeficiente de redução a aplicar para considerar o efeito da rotura em fluência dos geossintéticos (CR_{FLU}). Este coeficiente foi determinado comparando a carga de rotura do material intacto associada a um tempo de vida de 1 minuto (F_{1min}) com a carga de rotura de longo prazo, tempo de serviço de 30 anos (F_{30anos})

$$CR_{FLU} = \frac{F_{1min}}{F_{30anos}} \quad (4)$$

O valor do coeficiente de redução é de 1,74 para o geotêxtil tecido GTX e de 1,47 para a geogrelha tecida GGR. Estes valores traduzem bem o maior efeito da rotura em fluência no geotêxtil tecido.

É de notar que é provável que estas diferenças nos resultados sejam devidas essencialmente aos diferentes polímeros que constituem os geossintéticos estudados. De facto, o GTX é constituído por PP que é mais sensível à fluência e à rotura em fluência do que o PET, da GGR.

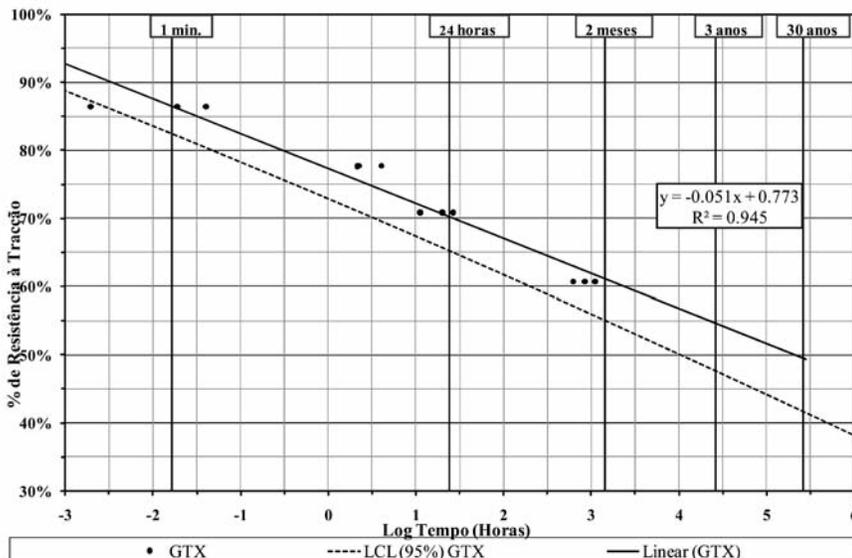


Fig. 18 – Curva de rotura em fluência para o geotêxtil tecido GTX.

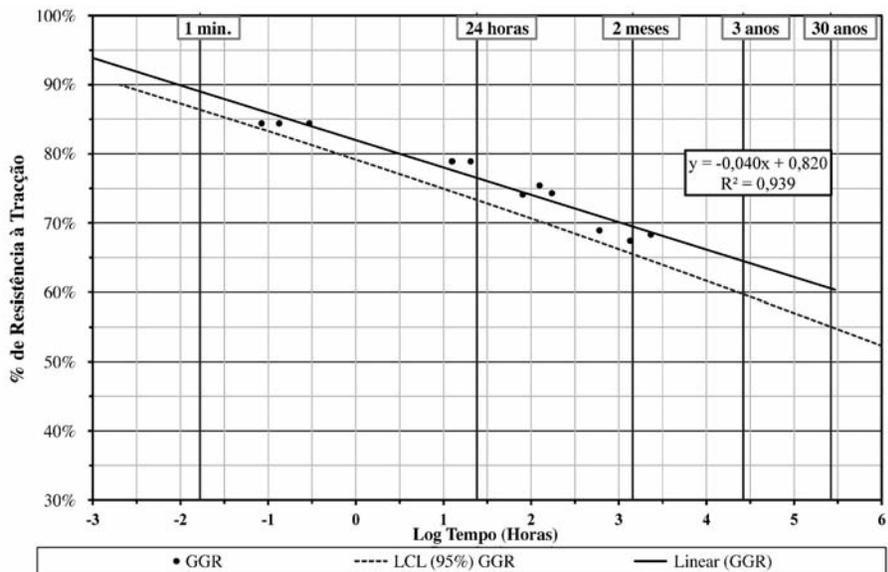


Fig. 19 – Curva de rotura em fluência para a geogrelha tecida GGR.

5.2.2 – Ensaios de fluência

Nas Figuras 20 e 21 apresentam-se os resultados obtidos para o geotêxtil tecido GTX e geogrelha tecida GGR, respectivamente. A carga aplicada a cada provete está também indicada nas figuras, como uma percentagem da resistência à tracção do geossintético. Para cada percentagem de carga, foram ensaiados 3 provetes.

Como seria de esperar, para as diferentes condições, as extensões associadas a níveis de carga

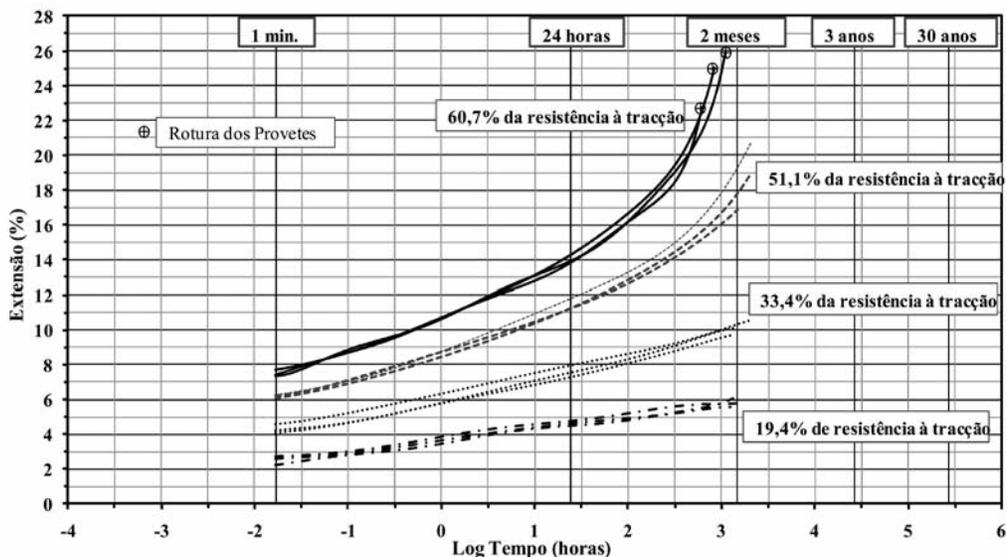


Fig. 20 – Curva de fluência GTX.

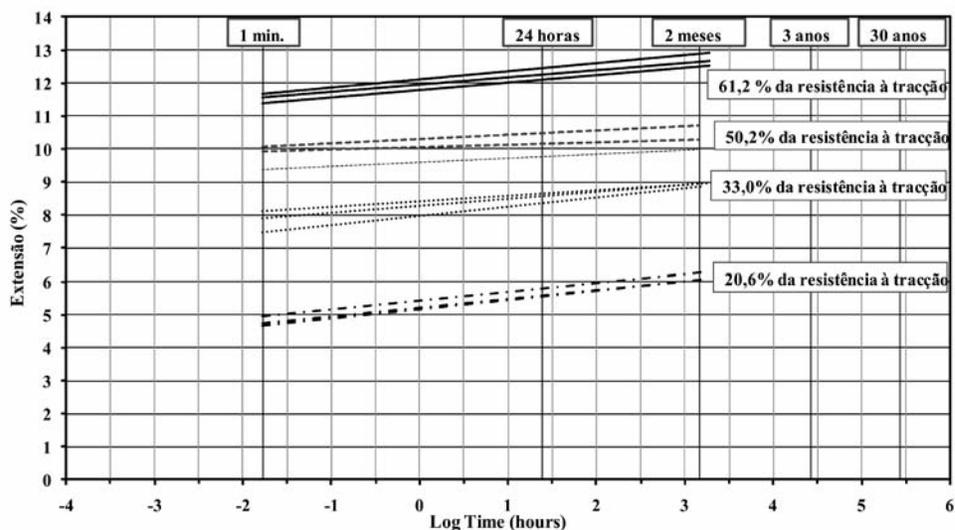


Fig. 21 – Curva de fluência GGR.

mais elevados são mais significativas.

Os provetes do geotêxtil tecido GTX submetidos a uma carga de 60,7% da resistência à tracção deste geossintéticos sofreram rotura. Os ensaios dos restantes provetes, com níveis de carga inferiores, foram interrompidos após 1440 horas (2 meses). Nenhum dos provetes da geogrelha tecida GGR sofreu rotura, até ser interrompido após as mesmas 1440 horas. No entanto, de referir, que para tempos de ensaio superior poderá ocorrer a rotura do provete. Assim, estes resultados devem ser utilizados com prudência, em particular quando se pretende extrapolar os resultados no tempo. Para os provetes do geotêxtil tecido GTX submetidos a uma carga de 60,7% e de 51,1% da resistência à tracção, é evidente que a taxa de deformação aumenta com o tempo. No caso dos provetes submetidos a carga de 60,7% da resistência à tracção a taxa de deformação aumenta antes da rotura, o que pode ser um bom indicador que a rotura do provete vai acontecer. Para os provetes com valores da carga aplicada mais baixos, a taxa de deformação é constante ao longo do tempo (na escala logarítmica do tempo). No entanto, salvaguarda-se uma vez mais que estes provetes não foram levados até à rotura.

Todos os provetes da geogrelha tecida GGR apresentam uma taxa de deformação constante ao longo do tempo (na escala logarítmica do tempo da Figura 21), evidenciando o menor efeito de fluência que a geotêxtil tecido GTX.

No Quadro 4, apresenta-se a extensão dos provetes após 1 minuto de ensaio dos dois geossintéticos para os diferentes níveis de carga aplicados, assim como a taxa de deformação na escala logarítmica do tempo. A taxa de deformação apresentada no Quadro 4 só foi determinada para os provetes que não sofrem rotura e em que a taxa de deformação é constante ao longo do logaritmo do tempo.

Da análise do quadro, verifica-se que a percentagem de extensão após 1 minuto de ensaio é maior na geogrelha tecida GGR do que no geotêxtil tecido GTX para idênticos níveis de carga aplicada (em termos de percentagem da resistência à tracção respectiva). De referir ainda que a extensão na rotura no ensaio de tracção também é maior na GGR do que no GTX. Este facto traduz uma maior deformabilidade da geogrelha tecida em relação ao geotêxtil tecido a curto prazo.

No entanto, a taxa de deformação na escala logarítmica do tempo é maior no geotêxtil tecido GTX do que na geogrelha tecida GGR. Como exemplo, para a percentagem de carga aplicada na ordem dos 50% da resistência à tracção do material, o geotêxtil tecido GTX apresenta uma taxa de

Quadro 4 – GTX e GGR: percentagem de extensão após 1 minuto.

GTX			GGR		
% de resistência à tracção	% de extensão após 1 minuto (valor médio)	Taxa de deformação na escala logarítmica do tempo	% de resistência à tracção	% de extensão após 1 minuto (valor médio)	Taxa de deformação na escala logarítmica do tempo
60,7	7,48	-	57,3	11,55	0,227
51,1	6,19	1,689	47,1	9,79	0,130
33,4	4,31	1,246	31,0	7,84	0,208
19,4	2,50	0,657	19,3	4,79	0,261

deformação de 1,689, enquanto a geogrelha tecida GGR apresenta um valor bastante inferior 0,227. Isto comprova, mais uma vez, o maior efeito de fluência no geotêxtil tecido GTX do que na geogrelha tecida GGR.

5.2.3 – Curvas isócronas carga-extensão

Para os resultados obtidos com os geossintéticos em estudo foram obtidas as curvas isócronas, que se representam na Figura 22 e 23.

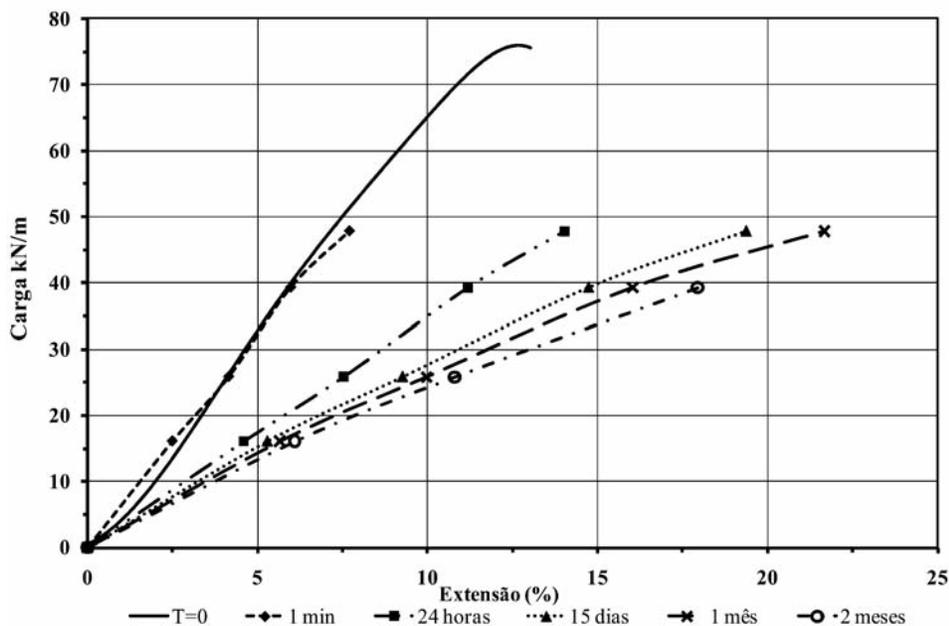


Fig. 22 – Curva isócronas carga-extensão do geotêxtil tecido GTX.

Para o GTX a curva carga-extensão obtida após 1 minuto é praticamente coincidente com a curva carga-extensão obtida do ensaio de tracção (esta corresponde a T=0). Para os períodos de 24h, 15 dias, 1 mês e 2 meses as curvas afastam-se da curva do ensaio de tracção, resultando numa diminuição de rigidez do geossintético com o tempo.

Para a GGR as curvas carga-extensão obtidas para os diferentes períodos (1min, 24h, 15dias, 1 mês e 2 meses) são mais próximas da curva carga-extensão obtida do ensaio de tracção. O que reforça o menor efeito de fluência deste material comparativamente ao geotêxtil tecido GTX.

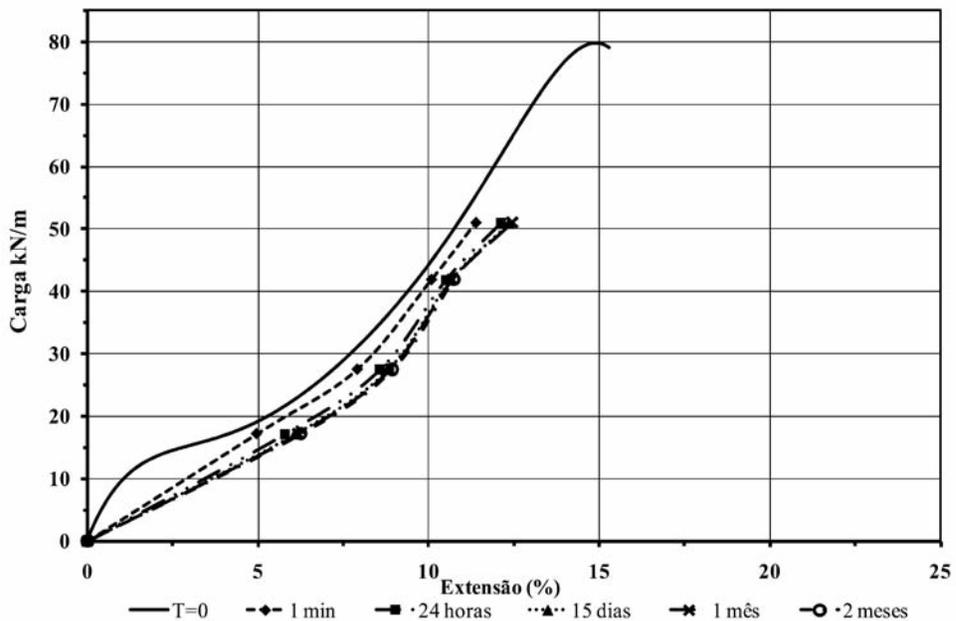


Fig. 23 – Curva isócronas carga-extensão da geogrelha.

6 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o equipamento desenvolvido na FEUP para realizar ensaios laboratoriais de fluência e rotura em fluência de geossintéticos de acordo com a norma EN ISO 13431 (1999).

Foram estudados dois geossintéticos com estruturas diferentes: um geotêxtil tecido em polipropileno e uma geogrelha tecida biaxial em poliéster.

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

- As propriedades mecânicas dos geossintéticos sofrem alterações com o tempo.
- O efeito de rotura em fluência é maior no geotêxtil tecido GTX do que na geogrelha tecida GGR. De facto, dos resultados disponíveis estima-se que após 30 anos de serviço sob carga constante, o GTX, sofreria rotura e a carga correspondente seria de 49,7% da resistência à tracção do geossintético, para a GGR, a rotura ocorreria para 60,32% da resistência à tracção. O que corresponde a valores do coeficiente de redução de 1,74 para o geotêxtil tecido GTX e de 1,47 para a geogrelha tecida GGR.
- Nos ensaios de fluência, as deformações associadas a níveis de carga mais elevados são mais significativas. A taxa de deformação do GTX aumenta antes de o material sofrer rotura, antecipando a rotura do provete. Nos provetes com níveis de carga baixos a taxa de deformação é constante ao longo do logaritmo do tempo. Para a GGR e para qualquer nível de carga aplicada, a taxa de deformação é sempre constante ao longo do logaritmo do tempo. De referir

que, nenhum provete deste material, sofreu rotura até ao dois meses (período em que os ensaios de fluência foram terminados). No entanto, de referir, que para tempos de ensaio superior poderá ocorrer a rotura do provete.

- A taxa de deformação na escala logarítmica do tempo é maior no GTX do que na GGR, trazendo, mais uma vez, o maior efeito de fluência no geotêxtil tecido GTX do que na geogrelha tecida GGR.
- A síntese destes resultados pode ser feita através das curvas isócronas carga-extensão, que representam o comportamento mecânico do material num dado instante (do seu tempo de vida útil).

É de salientar uma vez mais que, apesar da facilidade com que se podem fazer aproximações aos resultados e extrapolações, é fundamental utilizá-las com prudência. Assim, deve haver sempre sentido crítico e bom senso na sua utilização e, sempre que possível, deve ser procurada informação relativa a geossintéticos similares.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CEC (Centro de Estudos da Construção) da FEUP e da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), projecto de investigação: PTDC/ECM/67547/2006.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EN ISO 13431 (1999). “Geotextiles and geotextile-related products – Determination of tensile creep and tensile creep rupture behaviour”.

ISO 554 (1976). “Standard Atmospheres for Conditioning and/or Testing – Specifications”.

NP EN ISO 10319 (2006). “Geotêxteis – Ensaio de tracção em tiras largas”.

Allen, T. M. e Bathurst, R. J., (1996). “Combined allowable strength reduction factor for geosynthetic creep and installation damage”, *Geosynthetics International*, Vol. 3, No 3, pp. 407-439.

Crawford, R. J. (1998). “Plastics Engineering”, Butterworth-Heinemann, Oxford, 3ª edição, p. 505.

Greenwood, J. H. e Friday, A. (2003). “Seminar on Predicting a 100 year lifetime for Geosynthetics”, *Proceedings of the seminar, ERA Technology, Leatherhead, Surrey, UK*.

Holtz, R. D., Christopher, B. R. e Berg, R. R. (1998). “Geosynthetic design and construction guidelines”, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C., report FHWA-HI-95-038, revisto em 1998, p. 394.

Kay, D., Blond, E. e Mlynarek, J. (2004). “Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue”, *57th Canadian Geotechnical Congress, GeoQuébec 2004, Session 4D*, pp.1-14.

Lopes, M. L. (1992). “Muros reforçados com geossintéticos” *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, F.E.U.P., Porto*.

Miller, E. (1996). “Introduction to plastics and composites”, ed. Marcel Dekker, Inc, New York, USA, p. 434.

Müller-Rochholz, J. (1997). “Practicalities of measurement of creep and stress-rupture”, *Seminar volume on creep and assessment of geosynthetics, December 1997, ERA Technology, Leatherhead, U.K.*, pp. 1.1-1.12.

- Müller-Rochholz, J. e Koslowski, C. (1996). “Creep prediction”, Proceedings of the 1st European Conference on Geosynthetics, EuroGeo1, Maastricht, The Netherlands, pp. 1027-1030.
- Pinho-Lopes, M., Lopes, M. L. (2003). “Um Equipamento para Realização de Ensaios Laboratoriais de Danificação durante a Instalação de Geossintéticos”, Revista Geotecnia, Julho de 2003, nº 98, pp. 7-24.
- Pinho-Lopes, M.J.F. (2006). “Estudo dos coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão de solos e de estabilização de maciços com geossintéticos”, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, F.E.U.P., Porto.
- Rolin, A. (2004). “Long term performance of geotextiles”, 57th Canadian Geotechnical Congress, GeoQuébec 2004, Session 4D, pp.15-20.
- Sawicki, A. (2000). “Mechanics of reinforced soil”, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, p. 195.