



ENSAIOS CONFINADOS E ACELERADOS DE FLUÊNCIA EM GEOSSINTÉTICOS

Fagner Alexandre Nunes de França

*Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil,
fagner@sc.usp.br*

Benedito de Souza Bueno

*Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil,
bsbueno@sc.usp.br*

Jorge Gabriel Zornberg

*University of Texas at Austin, Austin, Estados Unidos,
zornberg@mail.utexas.edu*

A realização de ensaios confinados e acelerados de fluência em geossintéticos é de fundamental importância no dimensionamento e na avaliação do comportamento de estruturas de solo reforçado com esses materiais. Ambas as medidas são comumente adotadas individualmente para contornar as principais limitações dos ensaios normalizados de fluência. Contudo, uma rotina de ensaios simultaneamente confinados e acelerados de fluência em geossintéticos ainda precisa ser desenvolvida. A união dessas abordagens em um único procedimento permitirá a elaboração de uma metodologia inovadora para considerar um dos aspectos mais controversos no projeto de estruturas de reforço de solo com geossintéticos: a fluência.

O uso de geossintéticos na engenharia geotécnica vem permitindo o aprimoramento de técnicas existentes, possibilitando o seu emprego unido a outros materiais e munindo o profissional geotécnico com novas soluções. Entre as principais funções que os geossintéticos podem desempenhar, destaca-se o seu uso como elemento de reforço por ter gerado um grande crescimento nas aplicações e na oferta de novos tipos de geossintéticos (Vertematti, 2004).

O dimensionamento de obras de solo reforçado com geossintéticos considera, entre outros parâmetros, fatores de redução parciais aplicados à resistência a tração desses materiais. Assim, a resistência de projeto dos geossintéticos é calculada como uma fração daquela obtida em ensaios de curta duração. Estes fatores de redução consideram incertezas inerentes ao projeto deste tipo de estrutura, entre as quais se destacam os danos mecânicos de instalação, a degradação ambiental (biológica e química) e a fluência

dos geossintéticos. A consideração de todos os fatores de redução parciais comumente conduz a uma resistência de projeto igual a cerca de 20% do valor obtido nos ensaios de curta duração. Isso pode levar ao dimensionamento de projetos muito conservadores.

O fator de redução devido à fluência dos geossintéticos destaca-se, frequentemente, como o mais influente. Valores da ordem de 2 a 4 são comumente encontrados na literatura técnica (Vertematti, 2004; Koener, 2005). Verifica-se uma grande amplitude nos valores deste parâmetro. Isto é justificado pela sua dependência em relação a vários fatores, e.g. tipo de polímero e de geossintético, velocidade de aplicação e nível do carregamento e temperatura.

ENSAIOS DE FLUÊNCIA EM GEOSSINTÉTICOS

O comportamento de fluência dos geossintéticos pode ser determinado a partir de ensaios normalizados (ABNT NBR 15226 e ASTM D 5262, por exemplo) de baixa complexidade. Neles, um corpo de prova é submetido a um esforço de tração constante, enquanto seu alongamento é verificado ao longo do tempo. Este carregamento é comumente referido à resistência a tração do geossintético. O ensaio completo requer que diferentes corpos de prova sejam submetidos a níveis de carregamento distintos. Assim, diferentes níveis de carregamento são avaliados.

Além da determinação do fator de redução parcial devido à fluência dos geossintéticos, estes ensaios podem ser utilizados para inferir o comportamento do geossintético em longo prazo. Assim, antes mesmo da execução do respectivo projeto, os dados obtidos nestes ensaios podem ser utilizados para prever e limitar as deformações que ocorrerão na estrutura. Assim, percebe-se que a caracterização deste parâmetro é fundamental no dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geossintéticos.

Apesar do seu uso extenso e de sua alta simplicidade, os ensaios de fluência em geossintéticos possuem dois aspectos negativos principais. Em primeiro lugar, são ensaios demorados, que podem atingir mais de 1.000 horas de duração.

Assim, a completa caracterização da fluência de um dado geossintético pode se tornar bastante onerosa. Além deste aspecto, a ausência do solo circundante não permite a aplicação de tensões confinantes, o que pode levar a resultados conservadores em alguns casos. Estes pontos negativos podem levar ao aumento nos custos dos ensaios e à elaboração de projetos excessivamente conservadores.

CONTORNANDO OS ASPECTOS NEGATIVOS

A elevação da temperatura nos ensaios de fluência pode ser usada para acelerar a caracterização deste parâmetro nos geossintéticos (Bueno et al., 2005). Os resultados são, então, interpretados por meio de técnicas de superposição tempo-temperatura. Em outros termos, o alongamento verificado em temperaturas elevadas é interpretado como um alongamento equivalente em temperatura ambiente, porém em uma escala de tempo diferente. Dessa forma, uma sequência de ensaios de fluência conduzidos sob um mesmo nível de carregamento, mas em temperaturas diferentes, pode ser interpretado como um único ensaio de maior duração realizado em temperatura ambiente.

Diversas publicações científicas tratam da elevação da temperatura para acelerar a determinação da fluência de geossintéticos. Zornberg et al. (2004), Bueno et al. (2005), Jones e Clark (2007), Tong et al. (2009) e Yeo et al. (2009) são exemplos recentes da utilização dessa abordagem. Adicionalmente, a norma estadunidense ASTM D 6992 apresenta o procedimento para execução de ensaios acelerados de fluência a partir de um único corpo de prova, inicialmente desenvolvido por Thornton et al. (1998). Percebe-se, portanto, que a elevação da temperatura de ensaio para aceleração dos ensaios de fluência em geossintéticos é uma metodologia bem estabelecida na literatura técnica.

O comportamento de fluência dos geossintéticos pode ser fortemente dependente das tensões confinantes às quais o material está submetido. Elias et al. (1998) propõem que a redução na movimentação relativa entre as fibras ou filamentos do geossintético pode provocar tal dependência. Assim, graus de influência diferentes são esperados de acordo com o tipo de geossintético, sendo relatada mais intensamente em geotêxteis não tecidos, seguidos por geotêxteis tecidos e geogrelhas.

A realização de ensaios em câmaras adaptadas, onde o corpo de prova é submetido ao confinamento do solo, permite considerar a influência deste parâmetro na fluência dos geossintéticos. Esta abordagem foi pioneiramente empregada por McGown et al. (1982), mas conta também com diversas publicações mais recentes (Costa, 2004; Mendes et al., 2007; Ding et al., 2009; Kamiji et al., 2009). Assim, semelhantemente a aceleração dos ensaios

por meio da elevação da temperatura, a aplicação de tensões confinantes no corpo de prova se apresenta como um aspecto bastante discutido na literatura técnica.

ASPECTO INOVADOR

Diversas publicações lidam com ambas as abordagens utilizadas para mitigar os aspectos negativos dos ensaios de fluência em geossintéticos. Contudo, a união dos dois procedimentos em um único ensaio não apresenta precedentes. Assim, um equipamento inédito capaz de realizar ensaios de fluência simultaneamente sob a ação de tensões confinantes e em temperaturas elevadas foi desenvolvido com o objetivo de considerar ambos os aspectos negativos destes ensaios.

Este novo equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Trata-se de um aparato simples e de baixo custo, que une as características necessárias para a consideração de cada abordagem explicitada acima.

Os componentes do novo equipamento de fluência de geossintéticos são descritos a seguir. São também apresentados os resultados obtidos em ensaios realizados com dois geossintéticos diferentes. Três tipos de ensaios de fluência foram realizados com o novo equipamento: confinados, acelerados e confinado-acelerados. Adicionalmente, ensaios de fluência baseados no aparato normalizado foram executados como forma de comparar os resultados obtidos com o novo equipamento com a prática atual.

NOVO EQUIPAMENTO DE FLUÊNCIA

O equipamento inédito apresentado neste artigo é capaz de reproduzir as condições necessárias a execução de ensaios de fluência em geossintéticos simultaneamente confinados e acelerados. Dessa forma, o novo equipamento possui diferentes elementos responsáveis pela aplicação do carregamento, medição do alongamento do corpo de prova, reprodução do confinamento do solo, elevação da temperatura de ensaio e aquisição dos dados. A figura 1 apresenta um esquema do novo equipamento, juntamente com fotografias que destacam diversos elementos. Salienta-se que os componentes apresentados em uma das extremidades do equipamento repetem-se no lado oposto.

O novo equipamento de fluência em geossintéticos possui uma câmara metálica com área plana quadrada, com 400 mm de aresta, altura igual a 200 mm e paredes com 12,5 mm de espessura. Ela é dividida em dois compartimentos: superior e inferior. O meio confinante (solo) e o corpo de prova de geossintético a ser ensaiado são

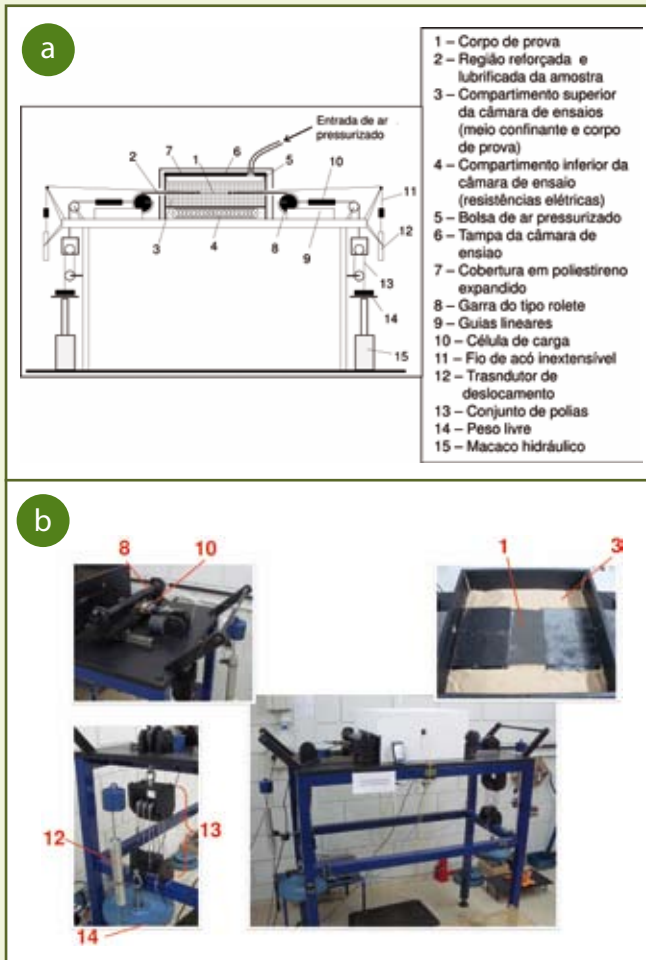


Figura 1 – Vista lateral esquemática (a) e fotografias (b) do novo equipamento de ensaios de fluência em geossintéticos

posicionados no compartimento superior (137,5 mm de altura). A porção inferior da câmara de ensaio (50 mm de altura), por sua vez, abriga as resistências elétricas responsáveis por elevar e manter a temperatura de ensaio.

A temperatura do conjunto solo-corpo de prova é acompanhada por meio de um termopar posicionado 20 mm acima do geossintético. Outro termopar foi instalado no compartimento inferior da caixa de ensaio com o propósito de ativar e desativar as resistências elétricas em função da temperatura desejada. Adicionalmente, uma cobertura em poliestireno expandido é posicionada sobre a câmara de ensaio após o seu fechamento.

A reprodução das tensões confinantes é realizada a partir de uma bolsa de ar pressurizado posicionada sobre o conjunto solo-corpo de prova. A tampa da câmara de ensaios é fixada por meio de parafusos nas laterais da câmara e funciona como reação para a pressão de ar aplicada no interior da bolsa inflável.

As paredes laterais da câmara de ensaio possuem aberturas (300 mm de largura e 5 mm de espessura) que possibilitam a passagem do corpo de prova ao lado externo da câmara. Este, por sua vez, é previamente preparado,

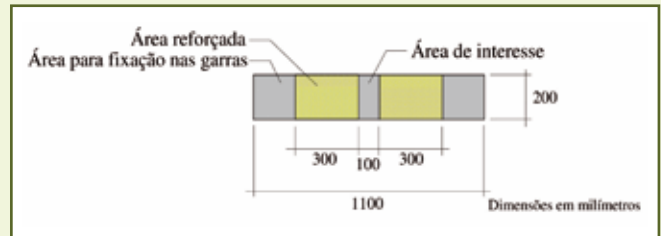


Figura 2 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no novo equipamento

resultando em uma faixa de interesse com 200 mm de largura e 100 mm de comprimento, como ilustrado na figura 2. A faixa de interesse dos corpos de prova é delimitada por duas regiões reforçadas com adesivo bicomponente à base de resina epoxi e cobertas com uma folha de poliéster fina. Adicionalmente, dois fios de aço inextensíveis são fixados à faixa de interesse e são utilizados para medir o alongamento dos corpos de prova. Transdutores de deslocamento posicionados nas laterais do equipamento registram o deslocamento destes pontos. Assim, as deformações dos geossintéticos são calculadas segundo a Equação 1.

$$\varepsilon = \frac{(A + B)}{L_0} \quad (\text{Equação 1})$$

onde ε é a deformação do corpo de prova, A e B são os deslocamentos de cada ponto de fixação dos fios inextensíveis no corpo de prova e L_0 é a distância inicial entre esses pontos.

O carregamento dos corpos de prova é aplicado com pesos livres conectados a eles através de garras do tipo rolete. Um conjunto de polias foi utilizado para multiplicar a solicitação dos pesos livres. Adicionalmente, duas células de carga registram continuamente essa solicitação durante os ensaios.

CALIBRAÇÕES

Dois processos de calibração se mostraram extremamente importantes no desenvolvimento do novo equipamento de fluência em geossintéticos. Primeiramente, a solicitação de tração aplicada nos corpos de prova foi calibrada em função da quantidade de pesos livres utilizada. Além disso, foi necessário determinar a relação entre a temperatura desejada em torno das resistências elétricas e a temperatura que o corpo de prova atinge.

O sistema de aplicação do carregamento foi calibrado para determinar a relação entre os pesos livres utilizados e as leituras das células de carga. Ainda foi possível avaliar a influência do conjunto de polias usado neste sistema. Esse procedimento foi executado a partir da montagem de um ensaio, seguida pelo posicionamento de cinco níveis de carregamento, sucessivamente, e o registro de suas respec-

tivas leituras nas células de carga. Por fim, os dados foram interpretados por uma regressão linear. A figura 3 ilustra o resultado deste procedimento.

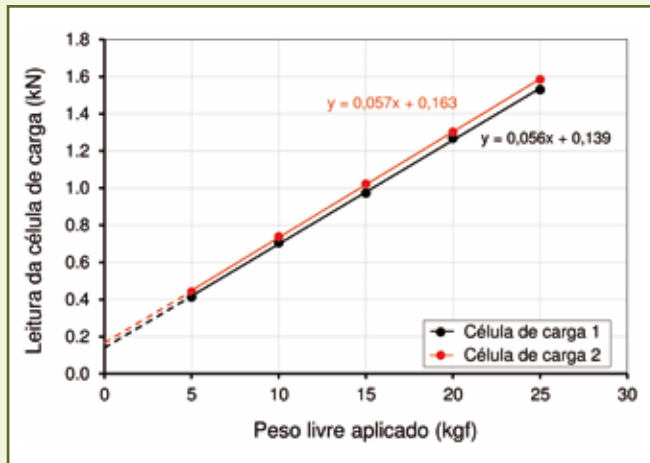


Figura 3 – Regressão linear obtida em cada célula de carga a partir da calibração do sistema de aplicação do carregamento

Verificaram-se respostas muito semelhantes nas duas células de carga (figura 3). Assim, optou-se por utilizar uma equação linear única, obtida a partir da média aritmética dos coeficientes lineares e angulares de cada regressão. Essa nova equação é, então, utilizada como uma estimativa inicial da quantidade de pesos livres a ser usada em cada ensaio. Em seguida, pequenos elementos metálicos são adicionados para manter a carga no valor desejado. Calcularam-se, também, os coeficientes de variação das leituras das células de carga em torno deste valor durante cada ensaio.

O segundo procedimento de calibração relaciona-se ao sistema de aquecimento. Ele foi realizado a partir da montagem de dois ensaios confinados de fluência, um com cada geossintético apresentado neste artigo. Salienta-se, contudo, que estes ensaios serviram apenas para este procedimento de calibração. A elevação da temperatura das resistências elétricas foi programada em cada montagem, em incrementos máximos de 15°C e patamares de cerca de 20

horas. Assim, após a estabilização das leituras próximas ao corpo de prova, fez-se o registro da par de valores de temperatura programada (resistências elétricas) e atingida nas proximidades do geossintético. A figura 4 apresenta os resultados obtidos com a montagem utilizando uma geogrelha de poliéster.

Similarmente aos resultados da calibração do sistema de aplicação do carregamento, as respostas obtidas nas duas montagens para a verificação das leituras de temperatura foram muito semelhantes. Optou-se, portanto, por considerar uma regressão linear média como orientação para a determinação da temperatura a ser programada. Em seguida, a temperatura próxima aos corpos de prova é registrada continuamente durante os ensaios. Assim, cada ensaio é referido com sua temperatura média obtida a partir desses registros. Adicionalmente, é calculado, em cada ensaio, o coeficiente de variação das leituras de temperatura após esta atingir um patamar constante.

ENSAIOS DE FLUÊNCIA

Quatro tipos de ensaios de fluência foram conduzidos nesta pesquisa: convencional, confinado, acelerado e confinado. Os ensaios convencionais foram realizados com base no procedimento descrito pela norma ASTM D 5262. Assim, procedeu-se uma caracterização da fluência dos geossintéticos comparável com a prática atual. Os demais tipos de ensaios foram executados com o novo equipamento.

Geossintéticos

Este artigo apresenta ensaios de fluência realizados com dois geossintéticos diferentes. Cada um deles foi submetido a uma série diferente de ensaios de fluência.

Primeiramente, um geotêxtil não tecido de poliéster, fabricado por agulhamento de fibras curtas, foi testado para avaliar o novo equipamento. Esse material possui grama-

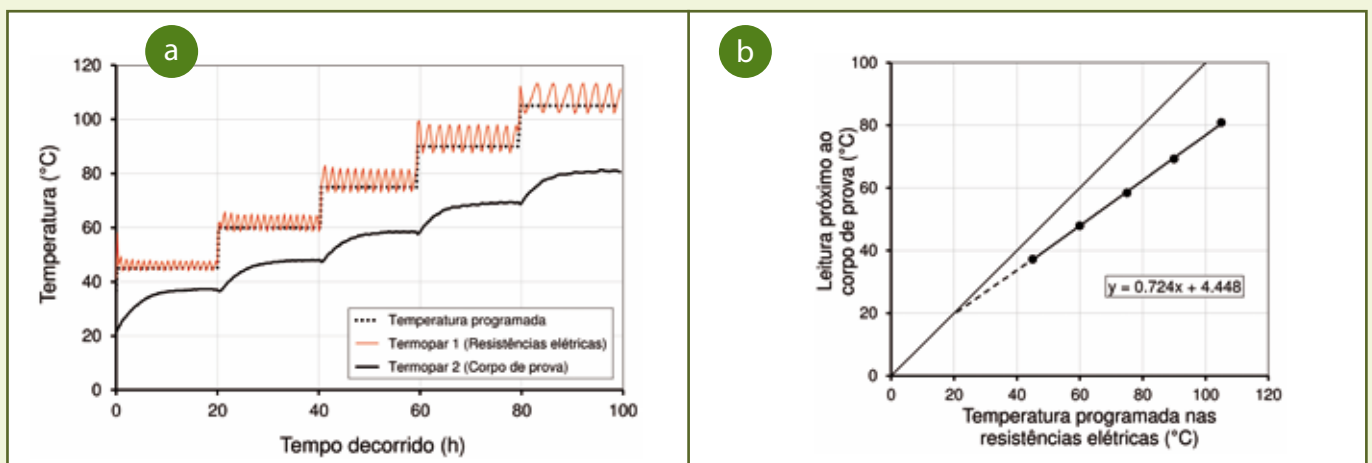


Figura 4 – Resultado da calibração do sistema de aquecimento: a) Estágios de incremento de temperatura; b) Exemplo da regressão linear obtida

tura igual a 313 g/m² e espessura nominal de 2,54 mm. Ensaio de resistência a tração no sentido transversal de fabricação completaram a sua caracterização (17,24 kN/m e deformação na ruptura igual a 90,86%). Os ensaios de fluência foram todos realizados neste sentido.

O comportamento de fluência de uma geogrelha biaxial de poliéster foi também estudado. Este material possui elementos soldados e abertura da malha igual a 28,2 mm. O ensaio de resistência a tração no sentido longitudinal de fabricação apontou valor máximo de 37,25 kN/m e deformação na ruptura igual a 10,87%. Os ensaios de fluência também foram conduzidos neste sentido.

Meio confinante

O meio confinante empregado nos ensaios de fluência confinados e confinado-acelerados foi uma areia seca mal graduada (SP). Ensaio de caracterização apontam coeficiente de curvatura e de uniformidade iguais a 1,01 e 0,72, respectivamente, peso específico dos sólidos igual a 26,7 kN/m³, peso específico seco máximo igual a 16,7 kN/m³ e peso específico seco mínimo igual a 15,0 kN/m³. A densidade relativa escolhida para o preenchimento da câmara de ensaio é 45%. Ensaio de cisalhamento direto realizados com essa areia, neste valor de densidade relativa, resultaram em ângulo de atrito interno de pico e residual iguais a 34,4° e 27,5°, respectivamente.

GEOTÊXTIL NÃO TECIDO

O geotêxtil não tecido foi escolhido para avaliar o novo equipamento antes de sua utilização com outros materiais. Este tipo de geossintético é, reconhecidamente, considerado o que apresenta comportamento de fluência com maior dependência em relação ao confinamento do solo. Por esse motivo estes testes foram realizados com este geotêxtil.

Primeiramente, um ensaio de fluência convencional foi conduzido com o geotêxtil submetido a 20% da sua resistência a tração, em temperatura ambiente (23°C). Em seguida, avaliou-se a influência do confinamento em areia na fluência deste material, sob uma tensão normal igual a 30 kPa, novamente em temperatura ambiente (22°C). Por fim, como forma de verificar o uso de todos os sistemas do novo equipamento, um ensaio confinado-acelerado de fluência foi realizado. Neste último, o corpo de prova foi submetido a uma temperatura média igual a 49°C e a uma tensão normal igual a 30 kPa, simultaneamente. Salienta-se que todos os ensaios foram realizados com carregamento igual a 20% da resistência a tração do geotêxtil e duraram no mínimo 100 horas. A tabela 1 apresenta um resumo com as características de cada ensaio de fluência realizado com o geotêxtil não tecido.

Tabela 1 – Características dos ensaios de fluência realizados com o geotêxtil não tecido

Tipo de ensaio	Carregamento (%) ¹ (COV) ²	Duração (h)	Temperatura (°C) (COV) ²
Convencional	20,0% (0,0%)	100,0	23,0 (2,7%)
Confinado	20,0% (1,4%)	113,7	21,9 (1,3%)
Confinado-acelerado	19,6% (1,5%)	111,8	49,3 (0,9%)

¹ Carregamento, em relação à resistência a tração

² Coeficiente de variação obtido a partir das leituras registradas

A figura 5 apresenta a representação gráfica dos resultados dos ensaios de fluência com o geotêxtil tecido em escala semilogarítmica. Essa representação permite comparar a inclinação da reta de ajuste das deformações por fluência em função do tempo decorrido e, portanto, verificar a relação entre a tensão confinante e as deformações por fluência deste material.

A tabela 2 apresenta os coeficientes angulares destes ajustes na escala semilogarítmica, bem como o coeficiente de determinação calculado para cada ajuste.

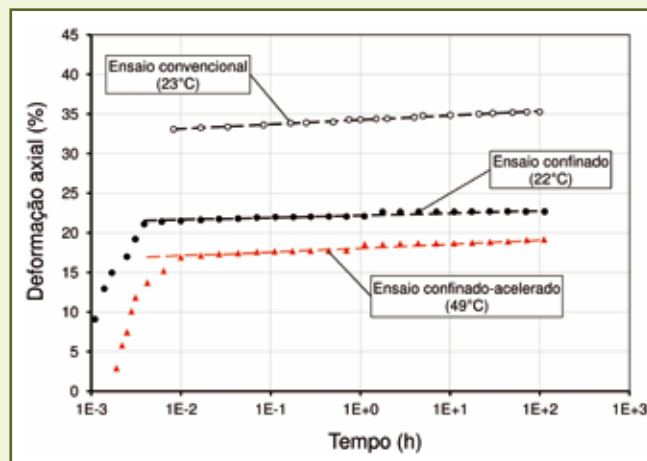


Figura 5 – Resultados dos ensaios de fluência com o geotêxtil não tecido

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de fluência com o geotêxtil não tecido

Tipo de ensaio	Coeficiente angular ¹	Coeficiente de determinação (R ²)
Convencional	0,559	0,992
Confinado	0,288	0,938
Confinado-acelerado	0,502	0,952

¹ Inclinação das retas de ajuste na representação semilogarítmica dos resultados

Percebe-se que as deformações por fluência do geotêxtil não tecido são fortemente dependentes das tensões confinantes. A redução na inclinação das retas ajustadas foi da ordem de 50%. Isso significa que as deformações por fluência do material submetido a tensões confinantes iguais a 30 kPa em um dado tempo *t* serão aproximadamente iguais à metade daquelas obtidas com o mesmo material em isolamento.

O resultado obtido no ensaio confinado-acelerado permitiu verificar o funcionamento do novo equipamento. Todos os sistemas funcionaram satisfatoriamente. Além disso, a realização de outros ensaios em temperaturas elevadas intermediárias (entre a temperatura ambiente e 49°C) possibilitará o uso de técnicas de superposição tempo-temperatura. Isto resultará em uma previsão das deformações por fluência para períodos mais longos, além de 100 horas.

GEOGRELHA BIAIXIAL

O comportamento de fluência da geogrelha biaxial foi avaliado a partir de uma série mais completa de ensaios. Esta série abrangeu os três tipos de ensaios de fluência que podem ser conduzidos com o novo equipamento e ensaios convencionais de fluência.

Inicialmente, este geossintético foi submetido a ensaios convencionais de fluência com duração de 10 horas e carregamento entre 20 e 80% do valor de resistência a tração do material. Apesar da curta duração em relação aos valores recomendados pelas normas técnicas utilizadas nesta pesquisa, estes ensaios foram suficientes para determinar o comportamento de fluência deste material. Foi possível também comparar seus resultados com aqueles obtidos nos demais tipos de ensaios de fluência.

De maneira similar aos ensaios realizados com o geotêxtil não tecido, os resultados dos ensaios de fluência com a geogrelha foram representados em escala semilogarítmica. A tabela 3 apresenta as características e os resultados dos ensaios convencionais de fluência conduzidos com este material.

Tabela 3 – Características e resultados dos ensaios convencionais de fluência realizados com a geogrelha biaxial

Carregamento (%) ¹	Temperatura (°C)	Coefficiente angular ¹	Coefficiente de determinação (R ²)
20,0%	26,3	0,159	0,975
40,0%	24,9	0,183	0,966
50,0%	24,5	0,235	0,983
60,0%	25,1	0,270	0,992
70,0%	26,5	0,388	0,995
80,0%	26,9	0,510	0,988

¹ Carregamento, em relação à resistência a tração

Percebe-se claramente que as deformações por fluência são diretamente proporcionais ao nível de carregamento aplicado ao corpo de prova. É válido ressaltar que estes ensaios foram conduzidos em uma máquina universal cuja programação permite a aplicação de um carregamento constante.

A etapa seguinte desta série de ensaios de fluência resume-se na realização de ensaios com o novo equipamento. Escolheu-se, portanto, o nível de carregamento igual a 50% para a execução destes ensaios. Assim, ensaios de fluência confinados, acelerados e confinado-acelerados foram conduzidos

neste nível de carregamento. A condição de confinamento em areia foi reproduzida com tensão normal iguais a 50 kPa. Os ensaios realizados em temperaturas elevadas (acelerados e confinado-acelerados) foram conduzidos em temperaturas da ordem de 45°C. Adicionalmente, um segundo ensaio acelerado foi realizado a 60°C para avaliar o funcionamento do sistema de aquecimento em temperaturas mais altas. A tabela 4 apresenta um resumo com as características dos ensaios de fluência realizado com a geogrelha biaxial.

Tabela 4 – Características dos ensaios de fluência realizados com a geogrelha

Tipo de ensaio	Carregamento (%) ¹ (COV) ²	Duração (h)	Temperatura (°C) (COV) ²
Convencional	50,0% (0,0%)	10,0	24,4 (2,0%)
Acelerado-45	50,6% (0,9%)	15,2	43,0 (0,8%)
Acelerado-60	49,8% (0,4%)	96,7	60,7 (1,1%)
Confinado	49,9% (1,4%)	15,8	24,6 (0,9%)
Confinado-acelerado	49,9% (1,5%)	22,2	44,1 (0,3%)

¹ Carregamento, em relação à resistência a tração

² Coeficiente de variação obtido a partir das leituras registradas

Os resultados dos ensaios apresentados na tabela 4 foram também representados em escala semilogarítmica. Assim, foi possível comparar os coeficientes angulares das retas ajustadas aos dados de cada ensaio. A figura 6 mostra a representação gráfica em escala semilogarítmica dos resultados dos ensaios de fluência com a geogrelha, exceto pelo ensaio acelerado de fluência conduzido a 60°C. Adicionalmente, os referidos coeficientes angulares são apresentados na tabela 5.

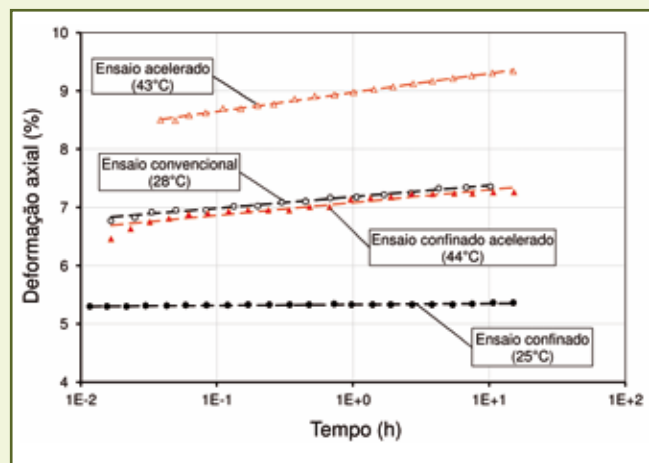


Figura 6 – Resultados dos ensaios de fluência com a geogrelha

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de fluência com a geogrelha

Tipo de ensaio	Coefficiente angular ¹	Coefficiente de determinação (R ²)
Convencional	0,235	0,983
Acelerado-45	0,325	0,992
Acelerado-60	0,760	0,992
Confinado	0,016	0,715
Confinado-acelerado	0,208	0,906

¹ Inclinação das retas de ajuste na representação semilogarítmica dos resultados

A elevação da temperatura produziu um aumento nas deformações por fluência em ambas as condições (sem confinamento e confinado com tensão normal igual a 50 kPa). Este comportamento é esperado uma vez que a fluência dos geossintéticos é função da temperatura de ensaio. Ensaios com temperatura intermediária entre os valores aqui apresentados contribuiriam para a avaliação das deformações por fluência em longo prazo, através de técnicas de superposição tempo-temperatura. Contudo, este tópico não faz parte do escopo deste artigo.

Como indicado na tabela 5, a inclinação das retas ajustadas é consideravelmente reduzida com a aplicação de uma tensão normal igual a 50 kPa no corpo de prova. Em temperatura ambiente, essa redução é tamanha que dificulta o ajuste de uma reta na representação em escala semilogarítmica. Isso justifica o baixo valor de coeficiente de determinação obtido no ensaio confinado. Em outras palavras, o alongamento do corpo de prova é muito pequeno, ao ponto de ser difícil de ser mensurado com os aparelhos do novo equipamento.

A comparação entre os ensaios Acelerado-45 e Confinado-acelerado permite uma visualização mais clara do efeito do confinamento nas deformações por fluência da geogrelha. Percebe-se claramente uma redução de cerca de 35% no coeficiente angular devido ao confinamento em areia.

As geogrelhas são comumente mencionadas na literatura técnica como geossintéticos cujo comportamento de fluência apresenta pouca ou nenhuma dependência relacionada ao confinamento. Contudo, os resultados obtidos até o momento ilustram o oposto para a geogrelha utilizada. Esses resultados apoiam a sugestão de Elias et al. (1998) de caracterizar o comportamento tensão-deformação e de fluência de qualquer geossintético antes de sua utilização.

Um último ensaio foi conduzido para avaliar o novo equipamento de fluência. Este ensaio foi conduzido em temperatura elevada (60,7°C) durante 96 horas. Assim, pôde-se verificar o desempenho do sistema de aquecimento por um período mais longo e em temperaturas mais elevadas. Para atingir tal temperatura nas proximidades do corpo de prova foi necessário programar as resistências elétricas em 80°C. O desempenho do equipamento foi satisfatório, resultando em um baixo valor de coeficiente de variação (1,1%) quando todas as leituras de temperatura registradas após o equilíbrio são consideradas.

CONCLUSÃO

Este artigo teve o objetivo de apresentar um equipamento inédito desenvolvido com o propósito de realizar ensaios de fluência em geossintéticos simultaneamente confinados e acelerados. Dessa forma, foi possível mitigar os dois

principais aspectos negativos dos ensaios convencionais de fluência nesses materiais. Adicionalmente, foram realizados ensaios para avaliar o funcionamento do referido equipamento usando dois geossintéticos diferentes (geotêxtil não tecido e geogrelha), ambos de poliéster. As conclusões a seguir podem ser retiradas do presente estudo:

- O novo equipamento de fluência de geossintéticos apresentou desempenho altamente satisfatório, uma vez que permitiu a realização de ensaios de fluência em diferentes condições de temperatura e confinamento.
- Os ensaios preliminares realizados com o geotêxtil não tecido apontaram uma redução de cerca de 50% na inclinação das retas de ajuste dos dados em uma representação semilogarítmica devido à aplicação de tensões normais ao corpo de prova.
- Os ensaios de fluência usando a geogrelha mostraram todo o potencial do novo equipamento de fluência. A dependência das deformações por fluência em relação à temperatura ficou clara com esta série de ensaios. Adicionalmente, o comportamento de fluência deste material também se mostrou dependente do confinamento em areia.

Esta pesquisa encontra-se em andamento e ensaios complementares são previstos. Assim, será possível interpretar os dados através de técnicas de superposição tempo-temperatura e prever o comportamento de fluência desses materiais para valores maiores de tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pelo suporte técnico a esta pesquisa, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro.

LEITURAS COMPLEMENTARES

Bueno, B. S., Constanzi, M. A. e Zornberg, J. G. (2005) Conventional and Accelerated Creep Tests on Nonwoven Needle-Punched Geotextiles, *Geosynthetics International*, Vol. 12, No. 6, p. 276-287.

Costa, C. M. L. (2004) *Deformações Dependentes do Tempo em Muros de Solo Reforçado com Geotêxteis*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 330 p.

Ding, J., Tong, J. e Zhou, W. (2009) Test Study on the Confined Creep Features of HPDE Geogrid in Sand, *Proceedings of the*

Fourth European Geosynthetic Conference – EuroGeo4, IFAI, Edinburgh, Scotland.

Elias, V., Yuan, Z., Swan Jr., R. W. e Bachus (1998) *Development of Protocols for Confined Extension/Creep Testing of Geosynthetics for Highway Applications*. FHWA-RD-97-143, McLean, VA, 211 p.

Jones, C. J. F. P. e Clarke, D. (2007) The Residual Strength of Geosynthetic Reinforcement Subjected to Accelerated Creep Testing and Simulated Seismic Events, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, No. 3, p. 155-169.

Kamiji, T., Bueno, B. e Costa, C. (2009) Nonwoven Geotextiles: Evaluation of Behavior in Confined Creep Tests, *Proceedings of the Fourth European Geosynthetic Conference – EuroGeo4*, IFAI, Edinburgh, Scotland.

Koerner, R. M. (2005) *Designing with geosynthetics*. 5. ed. Upper Sadle River: Prentice-Hall.

McGown, A., Andrawes, K. Z. e Kabir, M. H. (1982) Load-Extension Testing of Geotextiles Confined in Soil, *Proceedings of the Second International Conference on Geosynthetics*, Vol. 3, IFAI, Las Vegas, Nevada, USA, p. 793-798.

Mendes, M. J. A., Palmeira, E. M. e Mathews, E. (2007) Some Factors Affecting the In-Soil Load Strain Behaviour of Virgin and Damaged Nonwoven Geotextiles, *Geosynthetics International*, Vol. 14, No. 1, p. 39-50.

Tong, J., Gong, B. e Liu, J. (2009) An Experimental Study on the Creep Behaviour of Geogrids at Different Temperature, *Proceedings of the Fourth European Geosynthetic Conference – EuroGeo4*, IFAI, Edinburgh, Scotland.

Thornton, J. S., Allen, S. R., Thomas, R. W. e Sandri, D. (1998) The Stepped Isothermal Method for Time-Temperature Superposition and its Application to Creep Data on Polyester Yarn, *Proceedings of Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol. 2, IFAI, Atlanta, Georgia, USA, p. 699-706.

Yeo, S. e Hsuan, Y. G. (2009) Evaluation of Stepped Isothermal Method Using Two Types of Geogrids, *Proceedings of the Fourth European Geosynthetic Conference – EuroGeo4*, IFAI, Edinburgh, Scotland.

Vertematti, J. C. (2004) *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. São Paulo: Edgard Blücher.

Zornberg, J. G., Byler, B. R. e Knudsen, J. W. (2004) Creep of Geotextiles Using Time-Temperature Superposition Methods, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130, No. 11, p. 1158-1168.

Este artigo resume os resultados apresentados no pôster premiado com o segundo lugar na Student Poster Competition, organizada pelo Geoinstitute da American Society of Civil Engineers durante o Geofrontiers 2011, em Dallas, Estados Unidos, em março de 2011. Nesta ocasião, Fagner França estava cumprindo o estágio no exterior com bolsa Capes, realizado na University of Texas at Austin.

AUTORES

Eng. MSc. Fagner Alexandre Nunes de França é aluno de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Dr. Benedito de Souza Bueno é professor titular do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

Dr. Jorge Gabriel Zornberg é professor associado do Civil, Architectural and Environmental Engineering Department da University of Texas at Austin.

CPB
CONCRETO PROJETADO DO BRASIL

Tirantes Rocsole™
Ancoragem por resina

ROCSOLO

Confabilidade e Inovação

ESTE Industrial

Bombas para
via seca e via úmida

Tels.: (11) 4703-3175 / 2858-5188
Fax : (11) 4148-4242
www.cpbconcretoprojetado.com.br
vendas@cpbconcretoprojetado.com.br