

Avaliação da Fluência de Geotêxteis não Tecidos com Ensaios Acelerados

Evaluation of Creep of Non-Woven Geotextile Using Accelerated Tests

Avaliación de la Fluencia de Geotextiles no Tecidos con Ensayos Acelerados

Marcio Antonio Costanzi¹, Benedito de Souza Bueno², Luiz Cláudio Schwarz Baras³,
Jorge Gabriel Zornberg⁴

Resumo. A obtenção de resultados de fluência em geossintéticos (isócronas e curva de ruptura por fluência) requer longo tempo de observação e rigoroso controle laboratorial. Dessa forma, muitos produtos disponíveis no mercado brasileiro não foram ensaiados quanto a este fenômeno dificultando sobremaneira a elaboração de projetos mais seguros e econômicos. Há, portanto, a necessidade de estudos não só do fenômeno da fluência em si, mas também de métodos de ensaio que facilitem e acelerem a obtenção das curvas de fluência. Este trabalho apresenta um estudo da fluência de dois geotêxteis não tecidos, um de polipropileno e outro de poliéster, através de ensaios acelerados, utilizando-se o processo denominado *Stepped Isothermal Method* (SIM). Os valores obtidos pelo método SIM foram comparados aos valores obtidos nos ensaios convencionais, realizados segundo a norma ISO 13431. Os resultados experimentais indicam que os ensaios acelerados, utilizando o método SIM, foram capazes de simular o fenômeno da fluência com boa precisão e, portanto, podem trazer uma grande economia de tempo, além de facilitar e agilizar a caracterização da fluência de geossintéticos.

Palavras-chave: ensaios não confinados de fluência, ensaios acelerados de fluência, superposição tempo-temperatura, *Stepped Isothermal Method* (SIM), geotêxteis não tecidos.

Abstract. *Creep tests are time consuming and require rigorous laboratory testing control. Because of that many products commercially available in Brazil were not tested regarding this phenomenon. The absence of creep data is an obstacle to the design of soil reinforced structures. It is therefore required continuous research effort not only to elucidate creep phenomenon but also to help in the development of test methods that ease and speed up the obtaining of creep curves. This paper presents a creep study carried out on two non-woven geotextiles (PP and PET) using temperature accelerated creep test, namely the Stepped Isothermal Method (SIM). The values obtained using the SIM method were compared to the ones obtained using conventional creep tests following the ISO 13431. The experimental results indicate that the accelerated creep tests, using the SIM method, were capable of simulating the creep phenomenon with good accuracy and, hence, they can bring a great deal of time saving to the characterization of creep in geosynthetics.*

Key words: *unconfined creep tests, accelerated creep tests, time-temperature superposition, Stepped Isothermal Method (SIM), non woven geotextiles.*

Resumen. La obtención de resultados de fluencia en geosintéticos (isocronas y curva de ruptura por fluencia) requiere un largo período de tiempo de observación y riguroso control de laboratorio. Así, muchos productos disponibles en el mercado brasileiro no fueron ensayados en relación a este fenómeno y eso dificulta sobremanera la

¹Marcio Antonio Costanzi, Eng. Civil, Mestrando, USP/São Carlos.

²Benedito de Souza Bueno, PhD, Professor Associado, USP/São Carlos. e-mail: bsbueno@sc.usp.br.

³Luiz Cláudio Schwarz Baras, MSc, Doutorando, USP/São Carlos.

⁴Jorge Gabriel Zornberg, PhD, Assistant Professor, University of Texas/Austin.

Recebido em 17/6/2003; Aceitação final em 25/9/2003; Discussões até 30/4/2004.

elaboración de proyectos mas seguros y económicos. Hay, por lo tanto, necesidad de estudios no solo del fenómeno de fluencia en sí, sino también de métodos de ensayo que faciliten y aceleren la obtención de las curvas de fluencia. Este trabajo presenta un estudio sobre fluencia de dos geotextiles no tejidos, uno de polipropileno y otro de poliéster a través de ensayos acelerados, utilizándose el proceso denominado *Stepped Isothermal Method* (SIM). Los valores obtenidos por el método SIM fueron comparados a los valores obtenidos en los ensayos convencionales, realizados según la norma ISSO 13431. Los resultados experimentales indican que los ensayos acelerados, utilizando el método SIM, fueron capaces de simular el fenómeno de fluencia con buena precisión y por lo tanto, pueden traer una gran economía de tiempo, además de facilitar y agilizar la caracterización de la fluencia de geosintéticos.

Palabras clave: ensayos no confinados de fluencia, ensayos acelerados de fluencia, superposition tiempo-temperatura, *Stepped Isothermal Method* (SIM), geotextiles no tejidos.

1. Introdução

Na maioria das aplicações, os geossintéticos são submetidos a esforços de tração de longa duração. Sob este efeito estes materiais sofrem fluência, *i.e.*, deformam-se ao longo do tempo sob carregamento constante. Em vista disto, a fluência em geossintéticos é importante e deve ser adequadamente considerada nos projetos.

Por ser um fenômeno característico dos materiais poliméricos e tendo em vista que ocorre à temperatura ambiente, se não for devidamente quantificado, pode induzir deformações excessivas indesejáveis. No caso de solo reforçado pode levar ao colapso do sistema pela ruptura das inclusões. As deformações por fluência para um dado material podem ser estimadas através das curvas mestras de fluência e o risco de colapso, pela curva de ruptura por fluência.

Os procedimentos convencionais de ensaio para a determinação da curva mestra de fluência prescrevem 1000 horas (ISO 13431) ou 10000 horas (ASTM D 5262) de observação. Estes ensaios consistem na aplicação de um carregamento constante em um ambiente com temperatura e umidade controladas, onde os registros dos deslocamentos verticais das amostras são obtidos com o tempo. Isto permite definir curvas de fluência que correlacionam o tempo, em escala logarítmica, e deformação, para um determinado carregamento (Thorton *et al.*, 1997; Thorton, 1998; Farrag e Shirazi, 1997; Farrag, 1998; Baras, 2001). Um conjunto de curvas mestras permite a determinação das curvas isócronas do material que correlacionam carga versus deformação para um dado tempo de vida útil da obra (Costa, 1999; Baras, 2001; Baras *et al.*, 2002).

Para se definir a curva de ruptura por fluência, aplicam-se cargas constantes, em geral tomadas

como uma fração da carga que leva o corpo de prova à ruptura no ensaio de tração em faixa larga (ABNT-NBR-12824) e registram-se os tempos para a quebra das amostras. Os valores de carga aplicada versus tempo de quebra, em escala logarítmica, se alinham, dando origem à curva de ruptura por fluência. Assim, definindo-se um tempo de vida útil para a obra é possível prever a carga que deveria ser aplicada ao geossintético para provocar-lhe a ruptura por quebra.

Considerando o longo tempo necessário para execução da maioria dos ensaios convencionais de fluência, muitos materiais comercializados rotineiramente no Brasil não dispõem destes resultados. Portanto, qualquer tentativa de se acelerar a determinação da fluência em geossintéticos é de grande valia. Neste contexto, alguns pesquisadores têm utilizado recursos experimentais e de tratamento de resultados já consagrados na engenharia de polímeros, para acelerar os tempos de observação dos ensaios de fluência. O referido processo denomina-se princípio da superposição tempo-temperatura (STT ou ainda TTS, abreviatura inglesa do princípio)

No presente trabalho, o princípio TTS foi utilizado conjuntamente com o método SIM (*Stepped Isothermal Method*) para acelerar os tempos de observação nos ensaios de fluência laboratoriais em dois geotêxteis não tecidos fabricados no país, com fibras curtas e agulhados, um de poliéster (PET) e outro de polipropileno (PP).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geossintéticos, do Departamento de Geotecnia da USP em São Carlos que dispõe de um equipamento próprio o qual permite ensaiar geossintéticos em um ambiente de temperaturas elevadas. Neste trabalho, será dada ênfase à influência da temperatura, em face de sua relação direta com o desenvol-

vimento e interpretação dos resultados dos ensaios acelerados. Discussões sobre as interferências dos demais fatores na fluência de geotêxteis podem ser encontrados em Costa e Bueno (2001), Costa (1999) e Baras (2001).

2. Revisão Bibliográfica

Em engenharia, o termo fluência refere-se às deformações viscosas causadas pela ação de carregamento constante e de longa duração aplicado a um corpo qualquer. A maioria dos materiais poliméricos utilizados na fabricação dos geossintéticos flui, em maior ou menor escala. A magnitude da fluência depende não só da matéria prima e do método de fabricação utilizados, mas também do nível de carregamento aplicado e da temperatura do meio ambiente onde o geossintético está inserido (Den Hoedt, 1986).

Os materiais poliméricos são formados por cadeias moleculares longas a partir de unidades de repetição denominadas monômeros. Estas cadeias podem assumir formas geométricas de relativa complexidade e estar unidas umas às outras através de ligações cruzadas. Além disto, o corpo polimérico pode apresentar áreas de grande orientação molecular (áreas semi-cristalinas) e regiões onde prevalecem um arranjo aleatório entre as macromoléculas (zonas amorfas).

Devido à energia cinética presente no corpo molecular, as cadeias poliméricas estão em constante movimento. As extensões destes movimentos crescem com o aumento da temperatura. Microestruturalmente, um corpo polimérico apresenta espaços vazios para onde se deslocam as moléculas em movimento cinético. Quando uma molécula se desloca para um espaço vazio ela deixa o seu espaço anterior para que uma outra possa se movimentar. O processo de movimentação é contínuo e depende, portanto, da existência dos espaços livres e da velocidade de movimentação das moléculas. O termo volume livre é utilizado em engenharia polimérica para descrever o volume total ocupado por estes vazios em um corpo polimérico. Quanto maior o volume livre, maior é a possibilidade das moléculas se movimentarem no interior da massa. Sua importância relaciona-se também com o coeficiente de expansão termal, que representa primariamente a criação de um volume livre adicional com aumentos da temperatura. A troca de posição espa-

cial das moléculas cresce com aumentos da temperatura pela expansão termal e pelo aumento da energia de ativação das moléculas.

A partir deste modelo de comportamento, é possível estabelecer que as deformações viscosas, que ocorrem devido a estes movimentos moleculares no volume livre do corpo, crescem com o aumento da temperatura. Além disto, admitindo-se que este crescimento segue uma lei de viscosidade linear, pode-se afirmar que existe uma proporcionalidade linear entre as deformações e o aumento da temperatura. Finalmente, se aumentos da temperatura provocam uma aceleração das deformações pelo aumento da energia de ativação, é lícito supor que estes aumentos podem ser entendidos como uma aceleração do tempo. Reside nesta asserção a base física dos ensaios de fluência acelerados com os aumentos da temperatura.

Há duas temperaturas importantes que regem os movimentos moleculares e, portanto, o comportamento visco-elástico dos materiais poliméricos. A primeira delas é denominada temperatura de fusão (T_m) e é característica das zonas cristalinas. A segunda, denominada temperatura de transição vítrea (T_g), pode ser descrita como um ponto ou pequena região na escala de temperatura onde o coeficiente de expansão termal α sofre uma descontinuidade, caracterizando a passagem do estado físico sólido para um outro conhecido como de mobilidade (Ferry, 1980). Esta temperatura de transição, características das zonas amorfas dos polímeros, corresponde a uma mudança na inclinação da reta que define volume específico vs. temperatura, como ilustrado na Fig. 1. Nesta figura, volume específico refere-se ao volume do material

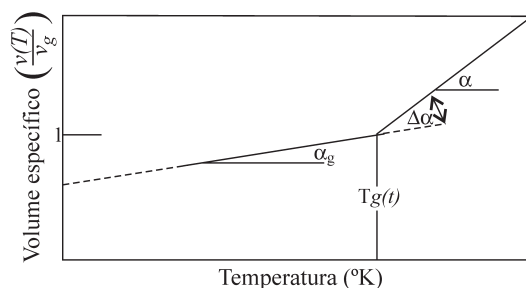


Figura 1. Esquema da variação do volume específico vs. Temperatura (relativo ao volume específico em T_g). (modificado de Ferry, 1980).

em uma dada temperatura dividido pelo seu volume na temperatura de transição vítrea.

Ainda em relação à temperatura de transição vítrea (T_g), nota-se que abaixo da T_g os movimentos intermoleculares das zonas amorfas se reduzem drasticamente à medida que a temperatura diminui e considera-se que haja um congelamento das atividades. O material torna-se rígido e apresenta um comportamento tensão versus deformação do tipo frágil. Acima da T_g estes movimentos se acentuam, o material torna-se mais deformável com curva carga versus deformação do tipo plástico.

Aproximações cinéticas e termodinâmicas têm sido utilizadas para medir e explicar as mudanças de comportamento nas propriedades dos polímeros. Admite-se em geral que estes materiais apresentam comportamento reológico de viscoelasticidade linear, em que as tensões podem ser descritas como uma função linear da taxa das deformações que ocorrem ao longo do tempo. Isto permite que se utilize o princípio de superposição de Boltzman, segundo o qual, a resposta de fluência de um material é função do histórico de carregamento aplicado, e cada estágio de carregamento pode ser tratado como evento independente. A resposta total de fluência, admitida a superposição de efeitos, é a soma das respostas individuais dos eventos independentes.

As previsões ou extrapolações das deformações por fluência em função da temperatura podem ser tratadas através de equações como a de Arrhenius ou a de William-Landel-Ferry (WLF). A primeira foi concebida para reger o estudo do movimento dos gases (cinética). É utilizada também para exprimir transformações físicas e reações químicas que dependem da temperatura (Segrestin and Jailloux, 1988). A equação pode também exprimir uma relação entre a temperatura e a deformação de fluência, ϵ , como:

$$\dot{\epsilon} = A_0 e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \quad (1)$$

onde: ϵ : taxa de deformação por fluência; A_0 : constante que depende do material e do fenômeno envolvido; E : energia de ativação (cal/mol); R : constante de Boltzmann (2 cal/mol.K); T : temperatura absoluta (K).

A Eq. (1) mostra que a taxa de deformação por fluência aumenta com a temperatura e com o de-

créscimo da energia de ativação, sendo todos os outros fatores mantidos constantes. A dificuldade do uso desta equação reside na obtenção da energia de ativação, visto que nos ensaios de fluência a taxa de deformação se altera com o tempo. Segundo Seymour e Carraher (1984) a equação de Arrhenius não é particularmente útil para temperaturas superiores a $T_g + 100$ K. Para essas faixas de temperatura torna-se mais interessante o uso da equação de WLF.

A equação WLF exprime uma translação do tempo em função da temperatura, através de um fator de aceleração ou de retardamento. Neste processo, curvas de fluência obtidas para temperatura superiores a um valor de referência são transladadas ao longo do eixo de tempo de forma a se obter uma única curva, a curva mestra da temperatura de referência, pelo alinhamento das várias curvas. O fator de translação, α_t , pode ser expresso da seguinte forma:

$$\log(\alpha_t) = \frac{-C_1(T - T_0)}{(C_2 + T - T_0)} \quad (2)$$

onde: T : temperatura do ensaio; T_0 : temperatura de referência adotada; C_1 e C_2 : constantes que dependem da temperatura de referência, onde C_1 é adimensional e C_2 tem a unidade da temperatura adotada.

Alternativamente, o alinhamento das curvas pode ser feito graficamente, com métodos de superposição tempo-temperatura (TTS). Segundo este processo, mantém-se a curva de fluência obtida para a temperatura de referência na sua posição original e desloca-se o conjunto de curvas de temperatura superiores até o alinhamento.

Os ensaios acelerados podem ser executados com os mesmos instrumentos dos ensaios convencionais, mas em um ambiente de temperatura controlada. Descrições de equipamentos utilizados para a execução deste tipo de ensaios podem ser encontradas, por exemplo, em Farrag e Shirazi (1997) e Baras (2001).

Há basicamente dois procedimentos experimentais para a execução desses ensaios, o convencional e o *Stepped Isothermal Method* (SIM). No método convencional, são realizados vários ensaios de fluência em corpos de provas distintos sob mesmo carregamento em diferentes temperaturas.

Este tipo de procedimento apresenta o inconveniente da variabilidade nas amostras.

O processo SIM foi idealizado por Thorton (1998) para minimizar problemas de variabilidade do material, pois é executado com apenas um corpo de prova. Para aplicação deste método deve-se admitir que o material apresenta comportamento de viscoelasticidade linear quando é possível aplicar princípio de superposição de Boltzmann, onde o evento independente é a temperatura. Os passos para obtenção da curva de fluência acelerada pelo SIM são mostrados a seguir (Thorton *et al.*, 1998):

- 1 passo: Lançar os resultados de deformação ou módulos de fluência em função do tempo, em escala linear, para identificar os tempos de início virtual dos estágios (mudança de temperatura);
- 2 passo: Linearizar os resultados a partir da transformação do tempo para uma escala logarítmica;
- 3 passo: Mudar a escala de tempo para cada segmento do ensaio para lançá-los em escala logarítmica, de modo a obter seus tempos virtuais de início. Isso é alcançado quando a inclinação inicial do novo seguimento é igual ao do final de seguimento anterior.
- 4 passo: Remover os efeitos da expansão térmica através de translação vertical;
- 5 passo: Através de translações horizontais obter a exata justaposição dos seguimentos, obtendo-se a curva de fluência acelerada.

3. Materiais e Métodos

Foram ensaiados dois geotêxteis não tecidos, de fibras curtas e agulhados, A e B, cujas caracterizações física e mecânica foram feitas através de ensaios prescritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. A Tabela 1 descreve os

Tabela 1. Características de fabricação dos geotêxteis ensaiados.

Características de fabricação	Geotêxtil A	Geotêxtil B
Matéria-prima	Poliprolileno (PP)	Poliéster (PET)
Tipo de fibras	Curtas	Curtas
Estrutura	Agulhada	Agulhada

tipos de materiais utilizados, e a Tabela 2 suas gramaturas e resistências à tração.

Os ensaios convencionais de fluência foram executados carregando os corpos de prova ao longo do sentido 2, que fornece os maiores valores de resistência à tração para o caso de geotêxteis não tecidos fabricados com fibras curtas. Os ensaios foram executados de acordo com a norma ISO 13431, aplicando-se níveis de carregamentos equivalentes a 10, 20, 40 e 60% da resistência à tração (T_{ult}) obtida pela ABNT - NBR 12824, registrando-se os deslocamentos ao longo de todos os ensaios.

Os ensaios acelerados foram baseados nessa mesma norma, seguindo-se o procedimento descrito por Baras (2001). Esse processo utiliza quatro estágios de leitura da deformação por fluência, com duas horas de duração cada um, executados em temperaturas constantes (temperatura ambiente, 40 °C, 50 °C e 60 °C). A temperatura ambiente variou entre 18 °C e 26 °C. Os períodos de elevação de temperatura atingiram o tempo máximo de um minuto. Os ensaios acelerados foram executados com temperaturas de até 60 °C, por se entender que este é o limite inferior da temperatura de transição vítrea do poliéster.

Tabela 2. Resultados da caracterização dos geotêxteis ensaiados.

Material	Ensaio de gramatura (ABNT 12568, 1992)		Ensaio de tração (ABNT 12824, 1994)			
	(g/m ²)	CV (%)	Sentido 1		Sentido 2	
			(kN/m)	CV(%)	(kN/m)	CV(%)
A	305	7,60	11,10	9,10	17,20	5,10
B	336	11,10	11,50	20,60	15,40	12,10

CV: coeficiente de variação = relação entre o desvio-padrão e a média, expresso em porcentagem. Observação: O sentido 1 refere-se à direção longitudinal e o 2 à direção transversal.

Para a execução dos ensaios acelerados de fluência é necessário que se disponha, além dos instrumentos utilizados nos ensaios convencionais, de um ambiente de temperatura controlada. A câmara de temperatura controlável utilizada tem estrutura em madeira, com portas laterais deslizantes e janelas com dobradiças que facilitam a operação (Baras *et al.*, 2002).

Para o dimensionamento dos equipamentos necessários ao funcionamento térmico da câmara levaram-se em consideração que os ensaios acelerados seriam feitos pelo método SIM, que exige altos gradientes de temperatura a serem obtidos em tempos muito pequenos. O dimensionamento dos equipamentos necessários pode ser visto em Baras (2001).

O pórtico utilizado nos ensaios tem capacidade para apenas um ensaio, com a altura de 1,60 m e comprimento de 0,60 m, e foi confeccionado em aço. O sistema de ancoragem é semelhante ao utilizado por Costa (1999) em que as garras são compostas por barras de aço, sendo cada garra constituída por um conjunto de quatro peças divididas em dois tipos, duas menores (37 mm x 240 mm x 6,35 mm) e duas maiores (77 mm x 240 mm x 7,94 mm). A fixação ocorre enrolando-se o geotêxtil em uma das barras menores que é então encostada na outra peça de mesmo tipo, sendo ambas pressionadas pelas barras maiores. Todo o conjunto é, por fim, conectado através de parafusos. A presença de um recorte nas barras menores permite que as mesmas se apoiem nos parafusos que atravessam as peças maiores. Detalhes do equipamentos podem ser vistos em Baras (2001).

O método utilizado para a leitura dos alongamentos é baseado em fotografias digitais e é descrito em detalhes por Bueno (1987). O princípio básico deste método baseia-se no conhecimento da posição real de pontos que possam determinar um plano, chamado de referência global que circunscreve a amostra ensaiada. Com essas referências, pode-se conhecer a posição real de qualquer ponto presente numa imagem a ser trabalhada através de um fator de escala obtido de um sistema de equações muito simples escrito em função das coordenadas locais dos pontos de leitura medidas na foto e das coordenadas dos marcos de referência do sistema global. Para facilitar a execução do tratamento da imagem foi utilizado um programa chamado

“Tratamento” que está em fase final de desenvolvimento. Este programa, na versão atual, faz os cálculos das deformações, sendo necessário à entrada de dados das coordenadas globais, as posições das miras referentes aos pontos das coordenadas globais e as miras dos pontos aos quais se deseja calcular o deslocamento.

Para se executar a translação horizontal e obter a curva mestra de fluência (exata justaposição das curvas com inclinações semelhantes), seguiram-se às recomendações de Thornton *et al.* (1997) Farrag e Shirazi (1997). Nelas estes autores indicam que o ajuste entre as curvas deve ser tal que o coeficiente angular para o trecho final de uma curva seja o mais próximo possível do valor deste coeficiente para o trecho inicial da curva de temperatura imediatamente superior. No presente caso, o cálculo dos coeficientes angulares foi feito através do método dos mínimos quadrados, obtendo-se o maior valor do parâmetro R^2 para junção dos pares de segmento. Esse parâmetro foi obtido utilizando-se os três últimos pontos da curva de menor temperatura com os três primeiros pontos da curva de temperatura imediatamente superior. O fator de translação é definido como o quanto se desloca horizontalmente à curva na escala logaritmo do tempo, promovendo a sua linearização.

4. Resultados e Discussão

4.1. Fluência do geotêxtil A

Foram executados 16 ensaios para o produto A, sendo quatro convencionais e doze acelerados. As respostas das deformações por fluência em função do tempo para os ensaios acelerados são apresentadas na Fig. 2, que permitem o cálculo dos módulos de fluência, definido como a relação entre o carregamento e deformação específica, cujos resultados são mostrados na Fig. 3.

Com os dados da Fig. 2, aplicou-se o princípio de translação tempo-temperatura (TTS). As curvas mestras resultantes do método SIM e as curvas obtidas com os ensaios convencionais de fluência podem ser vistas na Fig. 4. Os corpos de prova CP1A, CP5A, CP9A e CP13A foram ensaiados durante 1008 h (ensaio convencional). Por fim, na Fig. 5, mostram-se curvas mestras de módulo de fluência *versus* log do tempo.

Os resultados mostram que as curvas mestras para o polipropileno tiveram um alcance muito dis-

perso, variando de 12,74 a 1959,16 anos. Essa diferença apesar de ser grande pode ser considerada satisfatória, pois uma pequena variação obtida no cálculo do tempo de início virtual, obtido pelo método dos mínimos quadrados, implica em grande variação do alcance. Isto se deve ao fato do tempo ser lançado em escala logarítmica, em que, para

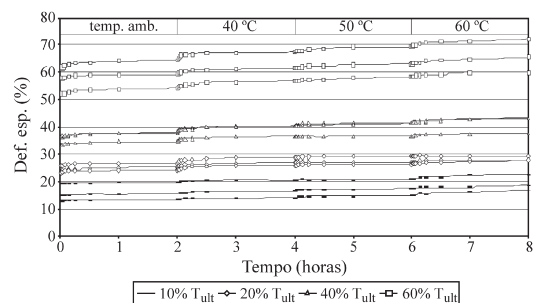


Figura 2. Curvas das deformações por fluência em função do tempo para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} obtidas com ensaios acelerados para o geotêxtil A.

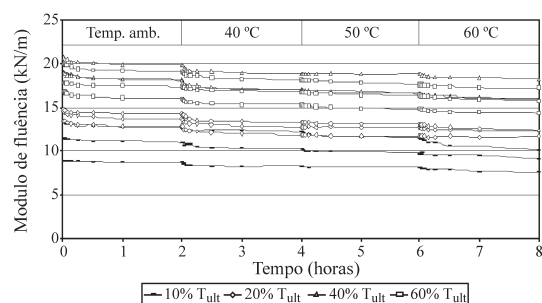


Figura 3. Curvas dos módulos de fluência em função do tempo para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} obtidas com ensaios acelerados para o geotêxtil A.

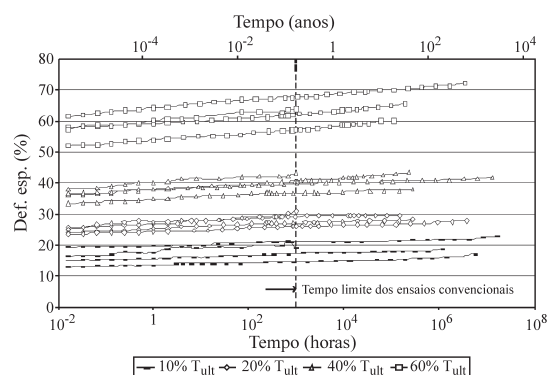


Figura 4. Curvas mestras obtidas pelo SIM e por ensaios convencionais para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} para o geotêxtil A.

tempos elevados, um pequeno deslocamento do ponto, no eixo horizontal, representa uma grande variação de tempo. Outro fator que pode influenciar nesta diferença é a variabilidade de propriedades mecânicas do material que ocorre de amostra para amostra. Na Tabela 3, são mostrados os tempos de resposta para cada corpo de prova. A ordem de grandeza dos tempos alcançados pelo método SIM para os produtos testados é equivalente aos tempos

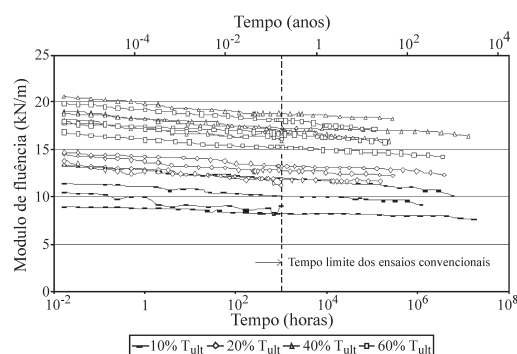


Figura 5. Curvas mestras do módulo de fluência obtidas pelo SIM e por ensaios convencionais para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} para o geotêxtil A.

Tabela 3. Resultados dos tempos de alcance do geotêxtil A.

Carregamento	CP	Tipo de ensaio	Tempo de alcance
10%	1A	Convencional	-
	2A	SIM	663,84 anos
	3A	SIM	1959,16 anos
	4A	SIM	131,63 anos
20%	5A	Convencional	-
	6A	SIM	17,15 anos
	7A	SIM	33,01 anos
	8A	SIM	438,61 anos
40%	9A	Convencional	-
	10A	SIM	1500,29 anos
	11A	SIM	33,01 anos
	12A	SIM	27,01 anos
60%	13A	Convencional	-
	14A	SIM	386,27 anos
	15A	SIM	12,74 anos
	16A	SIM	21,80 anos

obtidos por outros autores que utilizaram este método de ensaio como, por exemplo, Thorton *et al.* (1998).

Visualmente ocorreu uma ótima concordância entre os métodos SIM e convencional. Para analisar os dados pode-se, por exemplo, utilizar os coeficientes angulares das retas obtidos através de regressão linear para todos os ensaios. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 4. O modelo utilizado foi:

$$y = a \ln(x) + b \quad (3)$$

As curvas de fluência obtidas com ensaios convencionais e pelo SIM mostram boa concordância. A principal diferença entre curvas de mesmo UTS diz respeito basicamente ao valor da deformação inicial. Os ensaios convencionais de 10 e 20% apresentam discrepâncias nos coeficientes angulares em relação ao método SIM. O coeficiente angular tende a crescer com o aumento do nível de carregamento, exceto para os CP9A.

4.2. Fluência do geotêxtil B

Analogamente ao produto A, foram executados 16 ensaios com o geotêxtil B, sendo quatro conven-

Tabela 4. Coeficientes obtidos por regressão linear.

Carregamento	CP	Deformação inicial (%)	a	b	R ²
10%	1A	16,27	0,37	17,85	0,833
	2A	12,89	0,16	13,45	0,943
	3A	19,25	0,14	19,72	0,955
	4A	14,94	0,19	15,61	0,984
20%	5A	24,91	0,40	27,19	0,890
	6A	25,64	0,27	26,90	0,949
	7A	23,63	0,26	25,12	0,949
	8A	23,32	0,22	24,20	0,981
40%	9A	37,92	0,39	39,89	0,853
	10A	36,17	0,26	37,64	0,976
	11A	33,26	0,26	34,74	0,949
	12A	36,50	0,40	37,83	0,991
60%	13A	57,24	0,56	59,91	0,973
	14A	61,35	0,53	64,08	0,994
	15A	51,94	0,51	53,72	0,991
	16A	57,87	0,45	59,15	0,978

cionais e doze acelerados. Os níveis de carregamento e número de ensaios executados foram os mesmos que para o material A. As deformações por fluência em função do tempo são apresentadas na Fig. 6. Os módulos de fluência *versus* tempo, na Fig. 7. As curvas mestras de fluência e do módulo de fluência estão lançados nas Figs. 8 e 9, respectivamente.

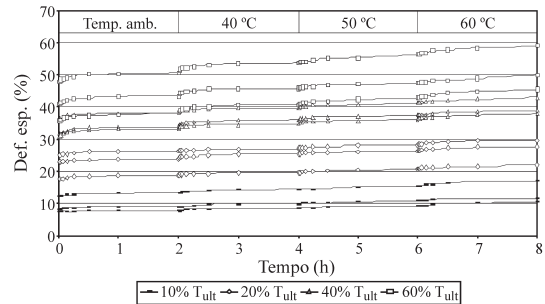


Figura 6. Curvas das deformações por fluência em função do tempo para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} obtidas com ensaios acelerados para o geotêxtil B.

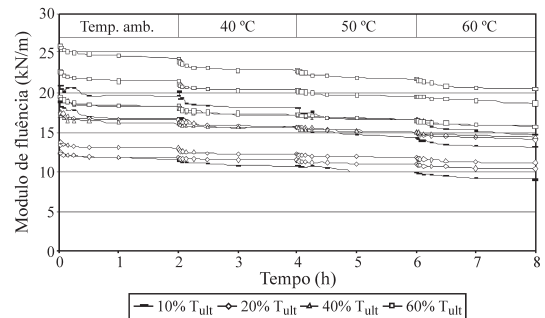


Figura 7. Curva dos módulos de fluência em função do tempo para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} obtidas com ensaios acelerados para o material B.

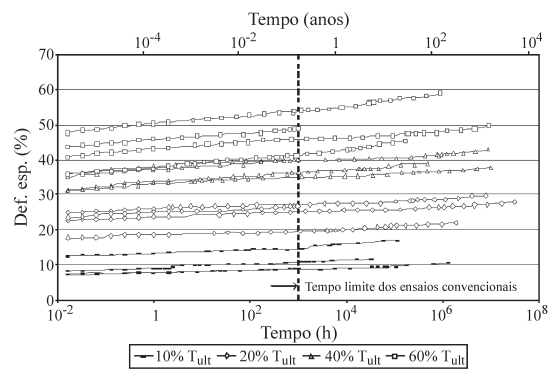


Figura 8. Curvas mestras obtidas pelo SIM e por ensaios convencionais para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} para o geotêxtil B.

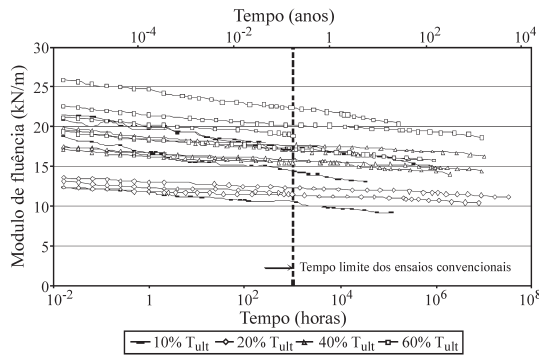


Figura 9. Curvas mestras do módulo de fluência obtidas pelo SIM e por ensaios convencionais para 10, 20, 40 e 60% T_{ult} para o material B.

Os resultados também mostram que para as curvas mestras de poliéster os alcances foram muito distintos, variando de 3,66 a 3648,52 anos. Além dos aspectos já mencionados esta diferença certamente está associada à variabilidade inerente que o material apresenta de amostra para amostra. Na Tabela 5, são mostrados os tempos de resposta para cada corpo de prova. Similarmente ao observado para o PP, visualmente pode-se perceber uma ótima concordância entre os valores obtidos pelos métodos SIM e convencionais. Para analisar os dados utilizaram-se também os coeficientes das retas obtidos através de regressão linear para todos os ensaios, Tabela 6.

As curvas convencionais e as obtidas pelo SIM mostram uma boa concordância. As diferenças entre curvas de mesmo UTS diferenciam-se basicamente na deformação inicial, mas diferentemente do polipropileno, observa-se uma maior variabilidade dos resultados. Apenas para o ensaio de 20% UTS os coeficientes angulares foram homogêneos. Os ensaios de 10, 40 e 60 % UTS apresentam discrepâncias nos coeficientes angulares. Apesar disso, os coeficientes angulares tendem a crescer com o aumento do nível de carregamento. O aumento do nível de carregamento acarreta também o aumento da deformação inicial.

4.3. Curvas isócronas

Através dos resultados dos ensaios de fluência é possível obter as curvas isócronas, que exprimem relação entre a carga de tração aplicada e a deformação axial do geossintético para um tempo pré-determinado. As curvas isócronas são utilizadas para se definir as deformações de projeto de estru-

Tabela 5. Resultados dos tempos de alcance do geotêxtil B.

Carregamento	CP	Tipo de ensaio	Tempo de alcance
10%	1B	Convencional	-
	2B	SIM	12,85 anos
	3B	SIM	3,66 anos
	4B	SIM	143,78 anos
20%	5B	Convencional	-
	6B	SIM	886,36 anos
	7B	SIM	212,97 anos
	8B	SIM	3648,52 anos
40%	9B	Convencional	-
	10B	SIM	56,02 anos
	11B	SIM	994,18 anos
	12B	SIM	1138,14 anos
60%	13B	Convencional	-
	14B	SIM	100,21 anos
	15B	SIM	1024,31 anos
	16B	SIM	18,94 anos

Tabela 6. Coeficientes obtidos por regressão linear.

Carregamento	CP	Deformação inicial (%)	a	b	R ²
10%	1B	7,16	0,18	7,78	0,983
	2B	12,47	0,28	13,30	0,963
	3B	8,21	0,24	9,23	0,981
	4B	7,39	0,16	7,83	0,964
20%	5B	23,65	0,27	24,90	0,977
	6B	24,99	0,20	25,98	0,959
	7B	17,69	0,21	18,41	0,943
	8B	22,69	0,21	23,64	0,987
40%	9B	35,12	0,42	37,08	0,994
	10B	31,63	0,40	33,51	0,992
	11B	36,05	0,27	37,86	0,956
	12B	31,13	0,29	32,90	0,974
60%	13B	43,70	0,45	45,43	0,990
	14B	47,78	0,59	50,13	0,989
	15B	41,00	0,38	43,02	0,984
	16B	35,82	0,57	37,82	0,989

turas de solo reforçado na condição de estado de limite de serviço, como mostrado por Jewell (1996) e Palmeira (1999).

As curvas isócronas são obtidas a partir de pares de pontos tomados de curvas de fluência (deformação específica *versus* carga aplicada) para um tempo fixo. Como ilustração apresentam-se nas Figs. 10 e 11 curvas isócronas referentes aos materiais A e B, respectivamente. A Fig. 10 foi construída a partir de resultados obtidos nos ensaios 3A, 6A, 13A e 16A, e a Fig. 11, com os ensaios 4B, 6B, 11B e 15B.

Os resultados mostram que, para ambos os materiais, até cerca de 20 a 25% de deformação não há praticamente distinção entre as várias curvas isócronas para um mesmo material. A partir desta deformação, os resultados apontam para uma leve perda de rigidez com o aumento da carga aplicada.

4.4. Avaliação da taxa de deformação por fluência do material utilizando a equação WLF

Para se avaliar o acerto do valor de translação horizontal imprimido em cada caso através do ajust-

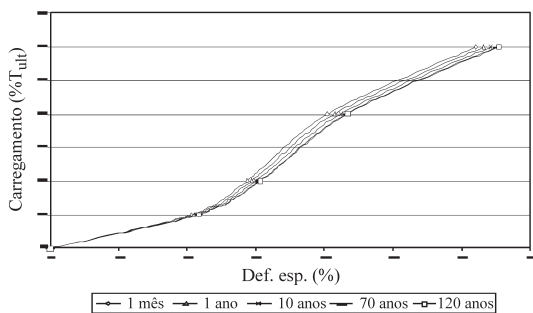


Figura 10. Curvas isócronas para o geotêxtil A, obtidas dos ensaios 3A, 6A, 13A e 16A.

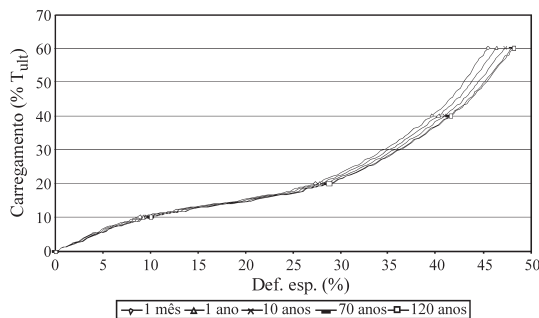


Figura 11. Curvas isócronas para o geotêxtil B, obtidas dos ensaios 4B, 6B, 11B e 15B.

te dos coeficientes angulares dos vários trechos da curva mestra de fluência, foram calculados fatores de aceleração através da Eq. (2) considerando os valores universais de C_1 e C_2 como 17,4 e 51,6 °C, respectivamente (Ferry, 1980). Os fatores de aceleração experimentais e os valores analíticos estão comparados nas Figs. 12 e 13 para os geotêxteis de PP e o PET, respectivamente, em função da diferença entre a temperatura do ensaio (T) e a temperatura de referência (T_r ou T_0).

As figuras mostram que, apesar de haver uma tendência similar no comportamento das duas curvas, não ocorreu uma boa concordância entre os valores experimentais e analíticos. Esta discrepância possivelmente se deve ao fato da curva analítica ter sido desenhada utilizando coeficientes de C_1 e C_2 , com valores denominados universais, ou seja, valores constantes, independentes do tipo de polímero utilizado na fabricação dos geossintéticos. No entanto, se sabe que estes valores de fato variam, ainda que suavemente, de acordo com o tipo de polímero empregado, com a sua temperatura de transição vítrea e, no caso dos geotêxteis, com a

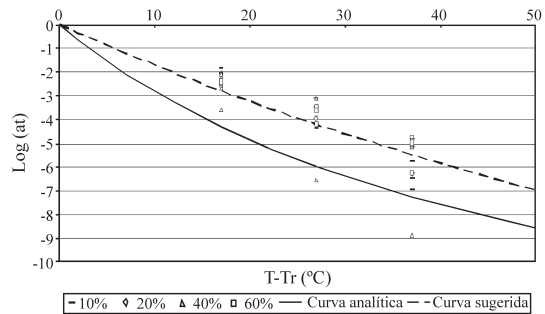


Figura 12. Fatores de ajustes, α_t analíticos e experimentais do material A.

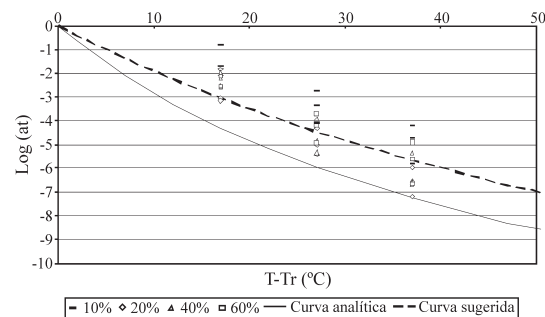


Figura 13. Fatores de ajustes, α_t analíticos e experimentais do material B.

formulação química da matéria prima básica que contém aditivos para ajustar suas propriedades de engenharia.

Apenas para efeito ilustrativo, foi realizada uma análise comparativa entre a curva sugerida e a curva analítica, nos pontos de interesse do material (faixa de temperatura dos pontos experimentais). Os resultados mostram que o erro de previsão variou de 24,4 a 35,0% para o polipropileno e 21,9 e 29,2% para o poliéster, o que pode ser considerado satisfatório tendo em vista a utilização de valores universais para os coeficientes C_1 e C_2 .

Na ausência de valores mais precisos, sugere-se, a partir dos resultados experimentais, que, para os geotêxteis ensaiados, C_1 e C_2 possam ser tomados como 30 e 165 °C para o polipropileno e 21 e 100 °C para o poliéster, respectivamente.

5. Conclusões

Nesse trabalho, avaliou-se a possibilidade de utilização de ensaios acelerados, do tipo SIM, para reproduzir as propriedades de fluência de geotêxteis não tecidos de polipropileno e poliéster. Os resultados obtidos permitem concluir que:

a) As deformações por fluência obtidas pelo método SIM quando comparadas às dos ensaios convencionais, realizados segundo a norma ISO 13431, mostraram ser de mesma ordem de grandeza. As maiores discrepâncias observadas entre os resultados obtidos com estes dois tipos de ensaios referem-se às deformações iniciais. Isto se deve às variações de deformabilidade entre os vários corpos de prova ensaiados;

b) Os resultados mostram que o método SIM pode ser empregado para a caracterização do comportamento da fluência dos geotêxteis de polipropileno (PP) e de poliéster (PET) testados. A diminuição do tempo de ensaio ficou evidente e demonstra a eficiência deste método de ensaio na obtenção de respostas rápidas para se quantificar a deformação ao longo do tempo;

c) Esta evidência experimental permite que a caracterização de geotêxteis não tecidos, sob o ponto de vista de fluência, possa ser feita através de ensaios acelerados. Com isto os tempos de ensaio se reduzem drasticamente e a fluência pode ser tratada como qualquer outra propriedade do projeto;

d) Finalmente, as comparações entre os fatores de translação, experimentais e analíticos, calcula-

dos utilizando valores universais para as constantes C_1 e C_2 , não mostraram boa concordância. As discrepâncias observadas sugerem que estas constantes devem ser mais bem avaliadas e nesta avaliação deve-se ter em conta os tipos específicos das matérias primas utilizadas na confecção dos geotêxteis.

6. Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1992). **ASTM D 5262** - Standard test method for evaluating the unconfined tension creep behavior of geosynthetics. In: Annual book of ASTM standards. New York.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 12553** - Geossintéticos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992). **NBR 12568** - Geotêxteis - Determinação da gramatura. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1994). **NBR 12824** - Geotêxteis - Determinação da resistência à tração não confinada - Ensaio de tração de faixa larga. Rio de Janeiro.
- BARAS, L.C.S. (2001). Estudo da fluência em geotêxteis através de ensaios não confinados convencionais e acelerados. **Dissertação de Mestrado**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BARAS, L.C.S.; BUENO, B.S.; COSTA, C.M.L. (2002). On the evaluation of stepped isothermal method for characterizing creep properties of geotextiles. **Geosynthetics - 7th ICG**. Swets & Zeitlinger, Liss ISBN 90 5809 523 1. p. 1515-1518.
- BUENO, B.S. (1987). **The behaviour of thin walled pipes in trenches**. Leeds, Leeds University (theses D.S.). 325 p.
- COSTA, C.M.L. (1999). Fluência em geotêxteis. São Carlos. **Dissertação de Mestrado**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COSTA, C.M.L.; BUENO, B.S. (2001). Fluência de Geotêxteis não-tecidos. **Revista Solos e Rochas**, v. 23, n. 3, pp. 235-246.
- DEN HOEDT, G. (1986). **Durability of geotextiles. Principles of creep and relaxation**. London, Chapman and Hall. p. 34-38.

- FARRAG, K. (1998). Development of an accelerated creep testing procedure for geosynthetics - Part II: Analysis. **Geotechnical Testing Journal**, v. 21, n. 1, p. 38-44.
- FARRAG, K.; SHIRAZI, H. (1997). Development of a accelerated creep testing procedure for geosynthetics - Part I: Testing. **Geotechnical Testing Journal**, v. 20, n. 4, p. 414-422.
- FERRY, J.D. (1980). **Viscoelastic properties of polymers**. 3rd Edition, John and Sons, New York, NY, USA
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTDIZATION (1998). ISO 13431 - **Geotextile and geotextile-related products - Determination of tensile creep and creep rupture behaviour**. Switzerland.
- JEWELL, R.A. (1996). **Soil reinforcement with geotextiles**. London, CIRIA.
- PALMEIRA, E.M. (1999). **Solo reforçado**. Husker Ltda.
- SEGRESTIN, P.; JAILLOUX, J.M. (1988). Temperature in soils and its effecte on the ageing of synthetic materials. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, p. 51-69.
- SEYMOUR, R.B.; CARRAHER, C.E. (1984). **Structure - property relationships in polymers**. Plenum Press, New York, NY, USA.
- THORNTON, J.S.; ALLEN, S.R.; THOMAS, R.W. (1997). Approaches for the prediction of long term viscoelastic properties of geosynthetics form short term tests. In: **Proceedings of Geosynthetics for soil reinforcement**; Leatherhead, 1997. ERA Report 98-0015, p. 2.1-2.9
- THORTON, J.S.(1998). The stepped isothermal method (SIM) for time-temperature superposition. In: **Proceedings of Creep and assessment of geossynthetics for soil reinforcement**; Leatherhead. Report 98-0015.
- THORNTON, J.S.; ALLEN, S.R.; THOMAS, R.W.; SANDRI, D. (1998). The stepped isothermal method for time-temperature superposition and its aplication to creep data on polyester yarn. In: **Sixth International Conference on Geosynthetics**, v. 2, pp. 699-706.