



OBTENÇÃO DO COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA A PARTIR DE ENSAIOS DE RELAXAÇÃO EM RESINAS DE POLIÉSTER

Luiz Claudio Oliveira

Pontif. Univ. Católica de Minas Gérias – PUC-Minas, Mestrado de Eng^a Mecânica — R. Dom José Gaspar, 500, Belo Horizonte-MG, 30.535-610 — lco@pucminas.br, luiz_claudio_o@yahoo.com

Henner Alberto Gomide

Universidade de Uberaba – UNIUBE, Fac. de Eng^a Civil — Av. Nenê Sabino 180, bairroUniversitário, Uberaba-MG, 38.055-500 — henner.gomide@uniube.br

Raquel Santini Leandro Rade

Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Física — Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, N.º 2160, Uberlândia-MG, 38400-902 — rslr@ufu.br

Resumo. *Mostra-se o comportamento inicial à fluência típico de um material viscoelastoplástico. Este comportamento é obtido de um procedimento numérico sobre curvas de relaxações múltiplas em corpos de prova cilíndricos, variadas a taxa de deformação e a temperatura. O material ensaiado são misturas proporcionais em peso de resinas de poliéster rígida/flexível com endurecedores, apresentando características fotoelásticas, sendo geralmente utilizadas como material de modelagem na Fotomecânica. O enfoque destes ensaios trata do comportamento mecânico. Um forno com temperatura controlada foi projetado para acoplamento à máquina universal de ensaios MTS 810. Os corpos de prova foram instrumentados com extensômetros eletrônicos, registrando-se os dados num arquivo ASCII. Um procedimento numérico é utilizado para obterem-se as curvas de fluência de uma série de curvas de relaxação. Com o aumento da temperatura, existe uma diminuição do tempo necessário para se chegar a uma dada deformação. A taxa temporal de deformação, utilizada nas trações anteriores às relaxações, influi no início da relaxação. Já que a fluência é obtida desta, é de se esperar e verifica-se experimentalmente uma influência desta taxa de deformação na fluência, dependendo da porção do gráfico de relaxação de onde serão retirados os valores para cálculo da fluência.*

Palavras-chave: *comportamento mecânico, análise de tensões/deformações, viscoplasticidade, fluência, modelagem numérico-experimental.*

1. INTRODUÇÃO

O trabalho, do qual este artigo é parte, se reporta ao estudo do comportamento de materiais de modelagem fotoviscoelásticos e de materiais compostos, tanto na modelagem computacional quanto na modelagem experimental, com elaboração de modelos e metodologia de ensaios nesta área.

No campo da análise experimental de tensões e deformações, o estudo da presença de viscosidade leva ao conjunto mais amplo de variáveis fenomenológicas a serem consideradas em ensaios caracterizadores: tensão, deformação, temperatura e tempo. A viscosidade tem uma importância predominante sob altas temperaturas, ou sob esforços de grande intensidade. A fluência, obtida a partir de curvas de relaxação, é o objeto de estudo deste artigo.

O ensaio de fluência e suas aplicações práticas são descritos de forma simplificada por Souza (1982). McClintock e Argon (1966) descrevem a apresentação e correlação de dados experimentais para materiais de engenharia. Kraus (1979) descreve extensamente sobre a modelagem da fluência. A determinação da fluência através de relaxações múltiplas, metodologia utilizada aqui, é tratada por Lemaitre e Chaboche (1985). Um estágio mais avançado nos estudos do comportamento mecânico de um material diz respeito à incorporação dos resultados dos diversos tipos de ensaios em *modelos*. Lemaitre (1971) trata da determinação das leis de comportamento para materiais elastovisco-plásticos. Belhedi (1988) descreve os ensaios de tração, relaxação, fluência, cíclicos, para materiais viscoplásticos, e identifica um modelo de comportamento utilizando-se do conceito de variáveis internas, com temperatura variável. Como exemplos específicos, podemos citar o modelo LMAM - “Laboratoire de Mécanique Appliqué pour les Métaux” para metais, e o modelo LMAC - “Laboratoire de Mécanique Appliqué pour les Composites” para materiais compostos, desenvolvido por Maire (1992) e Rade (1994).

A dissertação de doutorado originária deste artigo, Oliveira (2000), descreve o estudo da caracterização e da modelagem de misturas de resinas de poliéster, material de modelagem cujo nível de (visco)plasticidade pode ser ajustado para um comportamento mais ou menos rígido ou viscoso. Gomide e Siqueira (1994) utilizaram testes de tração/compressão, cíclicos e de tração/torção para estudar o comportamento destas resinas, variando em alguns ensaios a proporção resina rígida/resina flexível e em outros a temperatura e taxa de deformação. Já utilizando-se resultados de Oliveira (2000), um resumo da metodologia de ensaios bem como resultados de relaxação estão em Oliveira et alii (1997b). O equipamento desenvolvido para os ensaios, assim como o teste de tração com relaxação múltiplas e alguns resultados de ensaios estão descritos em Oliveira et alii (1997a). Uma visão do comportamento típico e as bases do equacionamento estão em Oliveira et alii (1998b), e uma visão dos ensaios e resultados em Rojas et alii (1998). Parâmetros numéricos iniciais e o procedimento para sua utilização numa simulação experimental estão descritos em Oliveira et alii (1998a). Uma apresentação sucinta da formulação empregada para descrever os vários diagramas é feita em Oliveira et alii (1999a), e uma mostra do comportamento à tração, relaxação, e ensaios cíclicos são dadas em Oliveira et alii (1999b). O presente artigo complementa esta série, mostrando de maneira mais extensa a formulação e os resultados em fluência.

2. O ENSAIO DE TRAÇÃO COM RELAXAÇÕES MÚLTIPLAS

A fim de se obterem parâmetros caracterizadores de encruamento, relaxação e fluência a partir de um só ensaio, os ensaios monotônicos clássicos de encruamento e relaxação são combinados em um teste composto único. Trata-se do ensaio de tração com relaxações múltiplas (Lemaitre e Chaboche 1985; Rade 1994). A partir deste ensaio podem-se obter os parâmetros elastoplásticos do material. Obtêm-se, ainda, curvas de relaxação iniciando-se em vários níveis de tensão e, através destas, a curva de fluência por um processo numérico, para uma dada tensão σ^* , σ^{**} , etc.

No procedimento de ensaio, faz-se um teste de tração comum, num corpo de prova cilíndrico, durante o qual, no entanto, são programadas “paradas” na tração, em determinados níveis de deformação/tensão, por um certo período de tempo. Como o material tem características viscosas, ao se manter a deformação constante durante estes períodos de tempo, ocorrem quedas na tensão, i.e. relaxação. Dessa forma, as “paradas” na tração permitem que o processo de relaxação aconteça.

3. VARIÁVEIS FENOMENOLÓGICAS E METODOLOGIA DE FORMULAÇÃO

Para o estudo das propriedades viscoplásticas de um material, é necessário especificar, em cada experimento, a taxa temporal de deformação e a temperatura. Estas variáveis vão determinar a resposta do material, i.e. os diversos diagramas $\sigma \times \epsilon$, $\sigma \times t$, sobre os quais serão identificados os parâmetros caracterizadores de seu comportamento.

As quantidades fenomenológicas variadas/medidas são: taxa temporal de deformação, tempera-

tura, tensão, deformação e tempo, para uma mistura específica definida pela relação porcentagem de resina rígida / porcentagem de resina flexível. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de diâmetro 12 mm para o material 80/20 (proporção de resina rígida/proporção de resina flexível, v. sobre a proporção de resinas em Oliveira et alii (1997)), 10 mm para 70/30, e 17 mm para 60/40. Um equacionamento separado para cada mistura foi realizado com o objetivo de evitar-se incluir na formulação as proporções resina rígida/resina flexível. A seguir, são indicados os equacionamentos à tração e relaxação, extensamente descritos em outros artigos, e detalhado o equacionamento da fluência, objetivo deste artigo.

3.1 Tração e relaxação

Para descrever a tração e relaxação foram efetuados equacionamentos parciais interligados. A metodologia de tal formulação é a seguinte. Inicialmente obtêm-se os parâmetros numéricos K e M que descrevem diagramas tensão-deformação. Em seguida, formula-se a variação destes parâmetros K e M com a temperatura θ , obtendo-se nova série de parâmetros numéricos K , M e N . Finalmente, equaciona-se a variação destes últimos parâmetros com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$, obtendo-se uma série final de parâmetros numéricos k_i , m_i , n_i (Oliveira et alii, 1997a). A este tipo de equacionamento se chama formulação interligada, acoplada ou imbricada (Rade 1994), onde cada estágio de formulação depende intrinsecamente de um estágio anterior, estando os parâmetros e as equações interligados ou “acoplados” uns aos outros. A metodologia utilizada para a relaxação é essencialmente idêntica, iniciando-se pelos diagramas tensão-tempo, definindo parâmetros numéricos A , D e G que são posteriormente relacionados à temperatura θ , produzindo nova série de parâmetros α_i , δ_i , γ_i . Estes últimos, por sua vez, são relacionados à taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ resultando uma série final de parâmetros a_i , b_i , c_i , d_i , e_i , f_i , g_i , h_i , l_i (Oliveira et alii, 1997b).

Nos dois casos, tração e relaxação, o processo de equacionamento utilizando-se parâmetros numéricos e variáveis físicas é o mesmo, somente variando o tipo de equação algébrica utilizado em cada etapa. Utilizou-se, para cada etapa, um tipo algébrico de equação que se mostrou mais adequado para descrever as relações para os três tipos de materiais simultaneamente.

3.2 Comportamento em fluência

De acordo com o método de ensaios utilizado, encruamento com relaxações múltiplas, as curvas de fluência são obtidas indiretamente, a partir de um procedimento numérico sobre as várias curvas de relaxação múltipla, conforme mostrado a seguir. Não existem normas técnicas para este ensaio combinado, nem para os diversos procedimentos numéricos necessários para se obter a relação final ext. Sendo assim, a formulação e procedimentos desenvolvidos a seguir apresentam procedimentos adaptados para o material em estudo, sendo a estimativa do valor do módulo de elasticidade obtida através de um procedimento completamente inédito.

Uma esquematização do procedimento completo está mostrada na Figura 1. Em um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas, para cada i -ésima relaxação grava-se um conjunto de pontos (σ, t) experimentais num arquivo de dados, juntamente com os dados das trações imediatamente anteriores. Assim, tem-se um arquivo de dados com uma seqüência de trações-relaxações. No procedimento de cálculo para obtenção de uma curva de fluência, escolhe-se um valor de tensão arbitrário, σ^* , numa dada série de relaxações. Este é o valor de tensão constante para o qual vai-se estabelecer uma curva de fluência (a fluência, assim, se dá sempre sob um mesmo valor de tensão constante σ^*). Em cada uma das relaxações, Fig. 1-(1), deve-se localizar o valor de tensão mais aproximado de σ^* . Encontrado este valor, faz-se uma regressão linear com os pontos próximos a este valor, utilizando-se de 40 a 100 pontos experimentais, para se obter a inclinação da reta de regressão, M_f , para uma porção restrita da curva. Este valor se aproxima do valor da inclinação da reta tangente à curva $\sigma = \sigma(t)$ neste ponto, como na Fig. 1-(2) (a expressão algébrica desta curva não é

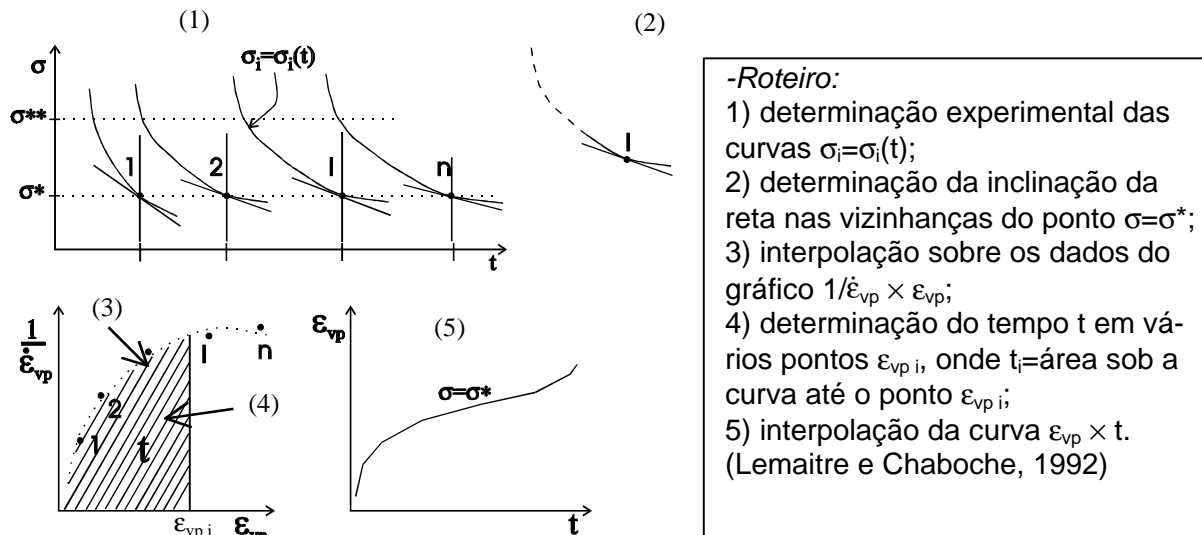


Figura 1. Cálculo de uma curva de fluência a partir de curvas de relaxações múltiplas

explicitada, somente interpolada neste segmento para fins de obtenção de M_f). Esta inclinação M_f , desse modo, fornece uma aproximação da derivada no ponto da função $\sigma = \sigma(t)$, $\dot{\sigma}$, Fig. 1-(2), ou seja:

$$M_f \approx \dot{\sigma} \quad (1)$$

Em seguida, de posse desta derivada, obtém-se a taxa $\dot{\epsilon}_{vp}$ no ponto através da relação:

$$\dot{\epsilon}_{vp} = -\frac{1}{E} \frac{d[\sigma_i]}{dt} = -\frac{\dot{\sigma}}{E} \quad (2)$$

A eq. (2) é obtida derivando-se a relação entre deformações, $\epsilon_{vp} = \epsilon - \epsilon_e = \epsilon - \frac{\sigma}{E}$, onde ϵ (a deformação total) é uma constante.

Para poder-se obter utilizar a Eq. (2) deve-se obter o módulo de elasticidade, ou então efetuar uma avaliação de seu valor, já que o módulo de elasticidade não é possível de ser calculado explicitamente nos experimentos realizados. Para este cálculo considere-se, inicialmente, que, apesar de quantitativamente pouco significativo, a deformação elástica está sempre presente, segundo a relação:

$$\epsilon_{vp_i} = \epsilon_i - \epsilon_e \quad (3)$$

onde ϵ_{vp_i} e ϵ_i são respectivamente a deformação viscoplástica e a deformação total no ponto i , sendo ϵ_e a deformação elástica correspondente. Nesta formulação, assume-se que a deformação total pode ser separada em componentes elástica e viscoplástica independentes. Admitindo-se a deformação elástica como linear, $\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$, tem-se a seguinte relação para o ponto "i":

$$\epsilon_{vp_i} = \epsilon_i - \frac{\sigma^*}{E} \quad (4)$$

onde o valor de tensão σ em ϵ_e é exatamente σ^* , o valor arbitrário de tensão escolhido para se obter a fluência. Nesta relação, ao se admitir $\epsilon_i \gg \epsilon_e$, tem-se a aproximação $\epsilon_{vp_i} \approx \epsilon_i$ conforme esperado. No entanto, ao invés de se utilizar somente este resultado final, $\epsilon_{vp_i} \approx \epsilon_i$, com algumas considerações adicionais pode-se utilizar a Eq. (4) para relacionar as deformações elástica e total, a fim de se obter uma estimativa do valor de E. Inicialmente, consideremos as parcelas da direita da Eq. (4) na forma de uma desigualdade:

$$\epsilon_e \ll \epsilon_i \Rightarrow \sigma^*/E \ll \epsilon_i \quad (5)$$

Utilizando-se um coeficiente para transformar esta desigualdade numa expressão obtém-se:

$$\sigma^*/E = p.\epsilon_i \quad (6)$$

onde “p” vai definir a relação, ou proporção, entre as deformações elástica e total. Estimando-se que a deformação elástica seja, por exemplo, no máximo 10% da deformação total, i.e. arbitrando-se um valor de 10% para “p”, tem-se:

$$\sigma^*/E = 0,1.\epsilon_i \Rightarrow E = \sigma^*/0,1.\epsilon_i \quad (7)$$

O valor de $p = 0,1$ é completamente arbitrário, e pode ser estimado, por exemplo, calculando-se as porções elástica e (visco)plástica para materiais com propriedades análogas. A Eq. (7) é utilizada, finalmente, para estimar o valor de E na eq. (2). Assim, já usando a relação (1):

$$\dot{\epsilon}_{vp} = (0,1.\epsilon_i) \frac{M_f}{\sigma^*} \quad (8)$$

Obtido o valor de $\dot{\epsilon}_{vp}$ forma-se, agora, um conjunto de pontos $(\epsilon_{vp}, 1/\dot{\epsilon}_{vp})$, Fig. 1(3), onde ϵ_{vp} é a deformação plástica no ponto, admitida como sendo a deformação total ao se considerar a deformação elástica desprezível, e $\dot{\epsilon}_{vp}$ é a taxa temporal de deformação. Sobre este conjunto de pontos faz-se uma regressão polinomial, obtendo-se uma relação do tipo:

$$1/\dot{\epsilon}_{vp} = f(\epsilon_{vp}) \quad (9)$$

Obtida esta primeira relação numérica, $f(\epsilon_{vp})$ na eq. (9), atribuem-se valores a ϵ_{vp} e encontram-se vários valores para $f(\epsilon_{vp})$, construindo-se uma série de valores igualmente espaçados $(\epsilon_{vp}, \dot{\epsilon}_{vp})$. O valor da integração (área) sob qualquer porção da curva $1/\dot{\epsilon}_{vp} \times \epsilon_{vp}$, Figura 1(3), corresponde ao valor do tempo para o correspondente valor de ϵ_{vp} da curva. Assim, calculando-se as áreas de intervalos sucessivos e somando-as cumulativamente encontram-se os valores de t para tais intervalos. Após a determinação do tempo t para cada um destes intervalos, chega-se finalmente a um conjunto de valores (ϵ_{vp}, t) , que formam a curva de fluência desejada, Fig. 1(5). Através de uma interpolação polinomial sobre estes pontos numérico-experimentais obtém-se uma expressão do tipo:

$$\epsilon_{vp} = A_f + D_f t + G_f t^2, \quad \sigma = \sigma^* \quad (10)$$

onde A_f , D_f , e G_f são os coeficientes do polinômio que caracteriza cada curva de fluência.

Tal procedimento pode ser repetido para um nível de tensão σ^{**} , e assim por diante, utilizando-se do intervalo de relaxação efetuado, para estabelecerem-se curvas de fluência a vários níveis de

tensão desejados.

O procedimento acima indica como obterem-se curvas de relaxação a partir de um ensaio de encruamento com relaxações múltiplas. Estas curvas são arbitrárias, dependendo do valor σ^* , σ^{**} , etc. escolhido. Como a relaxação é um fenômeno derivado da fluência, de acordo com o enfoque do ensaio de encruamento-relaxações múltiplas utilizado neste trabalho, ao se caracterizar a relaxação, de fato já se caracteriza indiretamente a fluência. Não foi de interesse, neste trabalho, definirem-se as relações sistemáticas entre estes parâmetros de fluência, A_f , D_f e G_f , e as diversas temperaturas e taxas de deformação, isto é, não foi de interesse proceder-se a uma seqüência de equacionamentos interligados como nos casos da tração e da relaxação. Foi, então, realizada somente a análise dos parâmetros iniciais da fluência, como na Eq. (10).

No entanto, com os resultados das relaxações sucessivas é possível quantificar a fluência para um dado valor de tensão constante, seja σ^* , ou σ^{**} , etc. Sendo assim, as várias curvas formam uma base de dados sobre a qual podem-se quantificar curvas de fluência em níveis σ^* , σ^{**} , etc. dentro dos limites de σ_{MIN} e σ_{MAX_i} das diversas curvas de relaxação. Utilizando-se a base de dados de curvas de relaxação, é possível realizar-se um estudo separado da fluência para este material, como no roteiro esquematizado a seguir, que poderá ser de interesse em futuros trabalhos.

Cada conjunto de parâmetros de fluência A_f , D_f , G_f está ligado a um valor de tensão σ^*_i , numa dada temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Calculando-se estes parâmetros para outros valores σ^* , σ^{**} , etc. pode-se estabelecer, para cada temperatura e taxa de deformação, uma relação entre os parâmetros da relaxação e os valores de σ^* , σ^{**} , etc.:

$$\begin{aligned} A_f &= A_f(\alpha_{f_i}, \sigma^{n*}) \\ D_f &= D_f(\delta_{f_i}, \sigma^{n*}) \\ G_f &= G_f(\gamma_{f_i}, \sigma^{n*}) \end{aligned} \quad (11)$$

onde: • $A_f(\alpha_{f_i}, \sigma^{n*})$, etc. são funções a serem especificadas, com seus parâmetros numéricos; • α_{f_i} , δ_{f_i} , γ_{f_i} estão indicando uma nova série de parâmetros ligados a A_f , D_f , G_f e a tensão σ^{n*} ; • σ^{n*} é uma indicação genérica do valor de tensão constante dentro de um intervalo entre σ_{MIN} e o menor dos σ_{MAX_i} , i.e. dos valores constantes σ^* , σ^{**} , etc.

Deve-se estabelecer, agora, uma relação entre estes novos parâmetros e a temperatura, para um valor de taxa de deformação constante, e, logo após, entre os novíssimos parâmetros recém obtidos e a taxa de deformação. Assim, termos os equacionamentos:

$$\begin{aligned} \alpha_{f_i} &= \alpha_{f_i}(a_{f_i}, \theta), & a_{f_i} &= a_{f_i}(a_{f_i}, \dot{\epsilon}) \\ \delta_{f_i} &= \delta_{f_i}(d_{f_i}, \theta), & d_{f_i} &= d_{f_i}(d_{f_i}, \dot{\epsilon}) \\ \gamma_{f_i} &= \gamma_{f_i}(g_{f_i}, \theta), & g_{f_i} &= g_{f_i}(g_{f_i}, \dot{\epsilon}) \end{aligned} \quad (12)$$

onde: • $\alpha_{f_i}(a_{f_i}, \theta)$, etc. e $a_{f_i}(a_{f_i}, \dot{\epsilon})$, etc. são funções a serem especificadas, com seus parâmetros numéricos; • a_{f_i} , etc. e d_{f_i} , etc. estão indicando novas séries de parâmetros, ligados respectivamente à temperatura e à taxa de deformação, e aos respectivos parâmetros anteriores, α_{f_i} e a_{f_i} ;

Observe que, neste caso, necessita-se de um nível de equacionamento a mais além do que foi necessário na relaxação, pois existem várias tensões σ^* , σ^{**} , etc. para cada conjunto temperatura-taxa de deformação. Além disso, a quantidade de parâmetros envolvida indica dificuldades em se escolher as relações para efetivar tais relações com boa precisão.

A determinação destes parâmetros para fluência inicial, Eq. (10), será indicada a seguir.

3.3 Determinação dos parâmetros experimentais de uma curva de fluência

A determinação de uma curva de fluência depende do nível de tensão desejado, chamado σ^* , σ^{**} , etc. Para obter-se uma curva de fluência, segue-se o procedimento numérico esquematizado na

Tabela 1. Exemplo de parâmetros A_f , D_f , e G_f da fluência, sob valores de tensão constante σ^* , caracterizadores da variação da deformação total ϵ com o tempo t

Material 60/40-C						
θ (°C)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	σ^* (kN/mm ²)	A_f	D_f	G_f	$r^2 \dagger$
39	0,0006	0,011	0,046299993	0,42637790	-5,041439E-5	0,999
43	0,0006	0,0085	0,046900020	0,55177824	-4,5252539E-5	0,963
46	0,0006	0,0,0055	0,046905108	0,85233438	0,0067660886	0,912
50	0,0006	0,003	0,046683774	1,5661148	-0,099550947	0,976
55	0,0006	0,0017	0,046400010	2,7588440	-4,0388452E-4	0,885
38	0,0024	0,0131	0,048000007	0,35802400	-1,4427159E-5	0,883
42	0,0024	0,0094	0,046900005	0,49894951	-3,7934466E-5	0,841
46	0,0024	0,006	0,045100043	0,78169511	-2,4114347E-4	0,804
50	0,0024	0,037	0,046383672	1,2695377	-0,049059200	0,966
54	0,0024	0,00175	0,046199982	1,0000127	-1,7994851E-4	0,887

†: coeficiente de correlação linear da interpolação sobre os dados experimentais $1/\dot{\epsilon}_p \times \epsilon_p$, passo (3) do roteiro da Fig. 2, indicando a representatividade experimental dos parâmetros A_f , D_f e G_f nas condições de temperatura θ e taxa de deformação $\dot{\epsilon}$.

Figura 1. Parâmetros A_f , D_f , e G_f obtidos para o material 60/40-C, em duas taxas de deformação e duas temperaturas, relativos aos níveis de tensão indicados, estão mostrados na Tabela 1. Uma visão gráfica das curvas resultantes é mostrada no item a seguir.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O comportamento básico, da forma como descrito aqui, se refere à variação das curvas tensão×deformação e tensão×tempo com a temperatura e taxa de deformação, para cada mistura, indicado pelos parâmetros numéricos das equações de regressão.

Para melhor compreensão da fluência, são importantes algumas observações sobre a relaxação. É interessante observar que a temperatura não é o fator preponderante no desenvolvimento inicial da relaxação, como seria de se esperar fazendo uma extensão do que acontece com a tração. O desenvolvimento inicial da relaxação está ligado à velocidade com que se atinge um determinado nível de tensão: quanto mais rápida for a taxa de deformação da tração (anterior à relaxação), mais rápida será a relaxação inicial. Por sua vez, o efeito do aumento da temperatura na relaxação se mostra através de um ligeiro aumento na concavidade do gráfico. Esta concavidade, no entanto, tende a se concentrar na porção inicial da curva, mais próximo ao eixo dos y's. Isto indica que, para temperaturas mais altas, existirá uma queda de tensão ligeiramente maior logo no início da relaxação, posteriormente diminuindo de intensidade.

O comportamento típico à fluência, resultante do procedimento numérico sobre as curvas de relaxações múltiplas indicado na Figura 1, com os parâmetros da Tabela 1, é mostrado na Fig. 2. Observa-se uma fluência linear. Isto é de se esperar, já que os tempos de relaxação utilizados foram bastante curtos, iniciando-se em 1,5 min, atingindo em média 4 a 5 min nas relaxações mais longas, e assim estas curvas darão origem a gráficos de fluência primária. Na fluência primária, verifica-se uma variação significativa da deformação com o tempo, mostrada pela inclinação significativa das curvas.

O comportamento típico em fluência fica bem caracterizado pelo material 60/40-C, Figs. 2a e b.

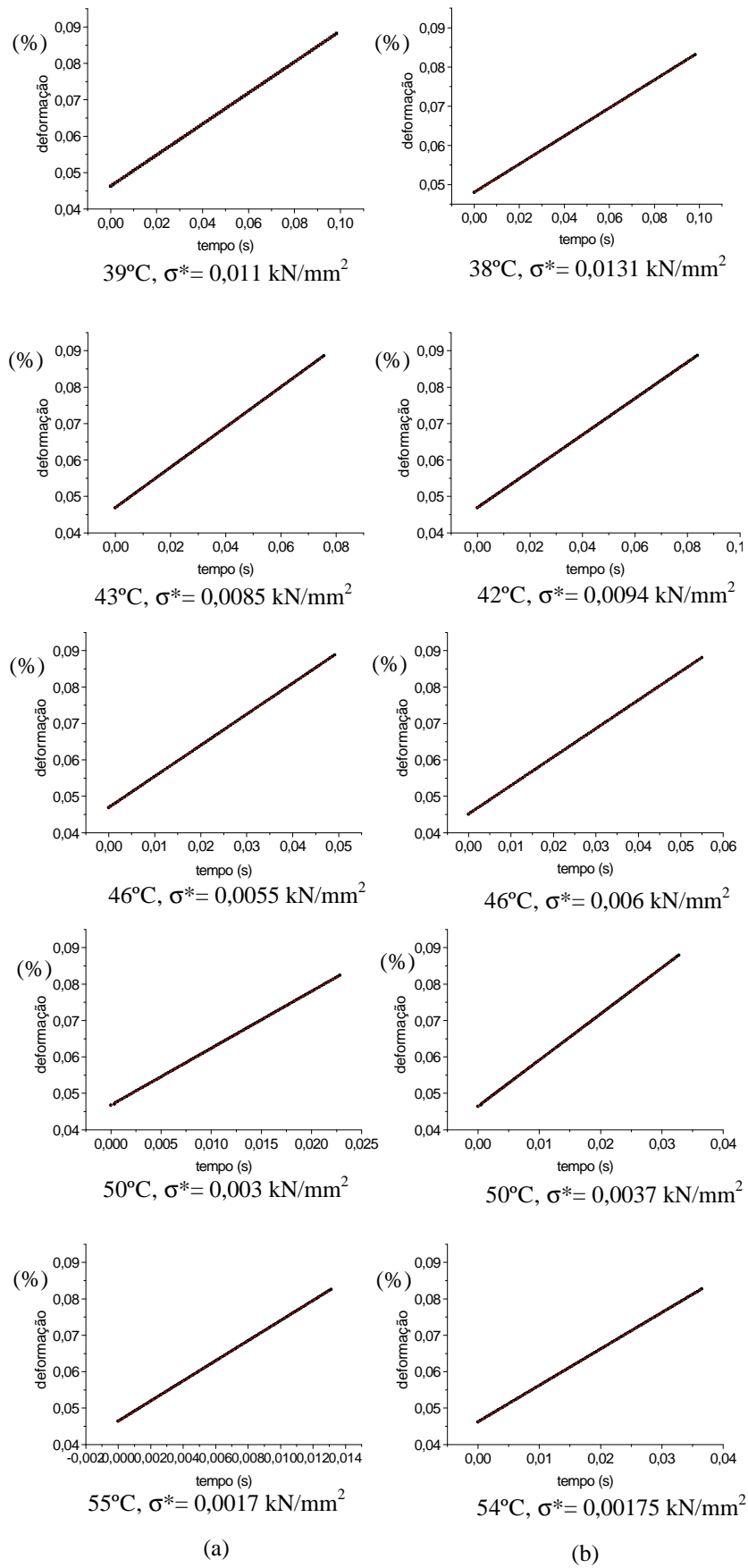


Figura 2. Variação da fluência, ϵ_{xt} , com a taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e a temperatura, material 60/40-C: (a) $\dot{\epsilon} = 0,00060 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon} = 0,00240 \text{ s}^{-1}$

Nestas séries de gráficos observa-se, com o aumento da temperatura, uma diminuição do tempo necessário para se chegar a uma dada deformação, i.e., com o aumento da temperatura a deformação até um certo nível ocorre num tempo menor. Como exemplo, observe que na Figura 2a, a 39°C atinge-se uma deformação de 0,08% em aproximadamente 0,08 s, a 43°C em 0,06 s, a 46°C em 0,04 s, até um tempo de 0,012 s a 55°C. Os tempos são bastante pequenos, por se estar num regime essencialmente viscoso, propício a deformações sensíveis de fluência num tempo bastante curto. O mesmo padrão de comportamento observa-se nas seqüências de temperaturas crescentes da Fig. 2b.

Com relação à taxa de deformação, como comportamento geral é de se esperar um aumento da resistência com o aumento da taxa temporal de deformação, e assim um aumento no tempo necessário para de atingir um mesmo nível de fluência. No entanto, conforme mencionado acima, a taxa temporal de deformação é o fator mais sensível na tração, para os valores utilizados nos ensaios, onde esta taxa tem uma atuação direta, lembrando-se que essa influência se restringe à porção inicial do gráfico na relaxação, já que esta última ocorre devido exatamente a uma parada na tração. No caso da fluência, como esta é obtida fundamentalmente a partir da inclinação do ponto σ^* da curva de relaxação, o efeito da taxa de deformação está relacionado à sua influência na porção da curva onde se situa o ponto σ^* , através da tangente. Assim, para valores de σ^* no início das curvas de relaxação, a taxa de deformação vai influenciar sensivelmente a fluência, já que é geralmente no início da curva de relaxação (para materiais nitidamente viscosos) que é sentido o efeito da taxa de deformação, produzindo uma relaxação mais rápida para taxas de deformação maiores. Por outro lado, para valores de σ^* no final da curva de relaxação, localização adotada aqui, o efeito inicial da taxa de deformação sobre a relaxação terá passado, e assim o efeito da taxa de deformação não se fará sensível para curvas de fluência calculada a partir de tangentes nesta localização.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do CNPq e FAPEMIG, fator fundamental para o progresso da pesquisa e da tecnologia no País.

6. REFERÊNCIAS

- Belhedi, B., 1988, "Étude Préliminaire pour la Comprehension d'une Certaine Classe de Lois de Comportement", Tese DEA, Univ. de Besançon, França.
- Kraus, H., 1979, "Creep Analysis", John Wiley, New York.
- Lemaitre, J., 1971, "Sur la Détermination des Lois de Comportement des Matériaux Élastovisco-plastiques", Tese de Doutorado, Univ. Paris XI (Orsay), França.
- Lemaitre, J. et Chaboche, J.-L., 1985, "Mécanique des Matériaux Solides", Bordas, Paris.
- Maire, J. F., 1992, "Études Théorique et Expérimentale du Comportement de Matériaux Composites en Contraintes Planes", Tese Doutorado, Univ. de Franche-Comté, França.
- Mcclintock, F. A. and Argon, A. S., 1966, "Mechanical Behavior of Materials", Addison-Wesley, Reading.
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A., Rade, R. S. L., 1997a, "Determination of the Viscoplastic Characteristics of a Polyester Resin Mixture", XIV COBEM, Bauru, Brasil. (em CD)
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A., Rade, R. S. L., 1997b, "Estudo das Características Viscoplasticas de uma Mistura de Resinas de Poliéster", I POSMEC, UFU, Uberlândia, Brasil.
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A. & Rade, R. S. L., 1998a, "Modelização Básica das Características Viscoplasticas de uma Mistura de Resinas", V CEM-NNE, Fortaleza, Brasil. (em CD)
- Oliveira, L. C., Gomide, H. A., Rade, R. S. L., 1998b, "Caracterização e Modelagem do Comportamento Mecânico e Ótico no Regime Inelástico-Anelástico de Misturas de Resina de Poliéster", II POSMEC, UFU, Uberlândia, Brasil.
- Oliveira, L.C, Gomide, H.A. & Rade, R.S.L., 1999a, "Viscoplastic Modeling of the Strengthening

- and Relaxation of a Polyester Resin”, III POSMEC, UFU, Uberlândia, Brasil.
- Oliveira, L.C, Gomide, H.A. & Rade, R.S.L., 1999b, “Fenomenologia Típica de Misturas de Resinas Fotoviscoelásticas”, VI PACAM, Rio de Janeiro.
- Oliveira, L.C, 2000, “Estudo da Caracterização e Modelagem do Comportamento Mecânico no Regime Inelástico-Anelástico de Misturas de Resina de Poliéster”, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia.
- Rade, R. S. L., 1994, “Une Étude Comparative de Deux Modèles de Comportement Viscoplastique Endommagé pour les Matériaux Composites Stratifiés”, Tese Doutorado, Univ. de Franche-Comté, França.
- Souza, S. A., 1982, “Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos”, 5ª ed., Edgard Blücher, São Paulo.
- Zachary, L. W. and Riley, W. F., 1977, “Optical Response and Yield Behavior of a Polyester Model Material”, *Experim. Mech.*, vol. 17, n. 9, pp. 321-326.

OBTAINING CREEP BEHAVIOR FROM RELAXATION TESTS IN POLYESTER RESINS

Luiz Claudio Oliveira

Pontif. Catholic Univ. of Minas Gerais – PUC-Minas, Master in Mechanical Eng. — address: R. Dom José Gaspar, 500, Belo Horizonte-MG, 30.535-610 — lco@pucminas.br, luiz_claudio_o@yahoo.com

Henner Alberto Gomide

University of Uberaba – UNIUBE, Fac. of Civil Eng. — address: Av. Nenê Sabino 180, bairroUniversitário, Uberaba-MG, 38.055-500 — henner.gomide@uniube.br

Raquel Santini Leandro Rade

Federal University of Uberlândia – UFU, Fac. of Physics — address: Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila, N.º 2160, Uberlândia-MG, 38400-902 — rslr@ufu.br

***Abstract.** It's shown the initial creep behavior typical of a viscoelastoplastic material. This behavior is obtained from a numerical procedure on relaxation curves from cylindrical test samples, being varied the rate of deformation and the temperature. The materials tested are proportional in weight mixtures of rigid/flexible resins with hardeners, showing photoelastic characteristics, generally used as a model material in Photomechanics. The approach used aims the mechanical behavior. An oven with controlled temperature has been designed for use with an MTS 810 universal testing machine. The test samples were instrumented with electronic extensometers, data being recorded in an ASCII file. A numerical procedure is used in order to obtain creep curves from a series of relaxation curves. With the increase in temperature, there is a decrease in the time needed to reach a given deformation. The time rate of deformation, used in the tension prior to the relaxation, has an influence in the beginning of the relaxation. Since the creep curve is obtained from the latter, it's expected and experimentally verified an influence of this rate of deformation on the creep behavior, depending on the portion of the relaxation curve from where values will be taken for creep calculation.*

***Keywords.** mechanical behavior, stress/strain analysis, viscoplasticity, creep, numeric and experimental modeling.*