

## Questões

- 1 . A Figura 1 mostra a curva mestre para um ensaio de relaxação de tensão em uma borracha natural da Malásia com massa molecular  $M_w = 60000 \text{ g mol}^{-1}$ , obtida por S. Kaang<sup>1</sup>. Os ensaios originais consistiram em afixar uma tira da borracha de 40 mm de comprimento a uma máquina universal de ensaios, sendo esta, a seguir, estirada a 100% de deformação em temperaturas variando entre -15 e 80 °C . O gráfico apresenta a tensão medida em função do tempo, corrigido pelo fator de deslocamento de Williams-Landel-Ferry (assumindo-se  $T_g = -65^\circ\text{C}$  ). Com base neste resultado calcule a tensão efetivamente medida na tira estirada a 30°C após 2 segundos de aplicação da carga.

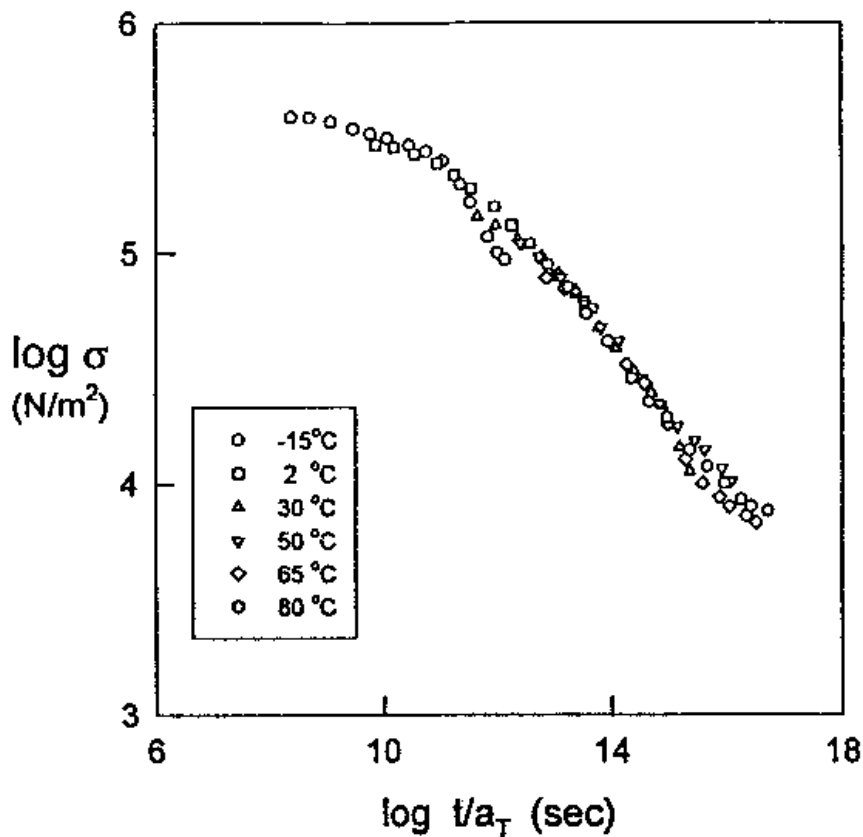


Figura 1: Curva mestre de uma borracha natural com massa molecular de  $60000 \text{ g mol}^{-1}$ .

<sup>1</sup>S. Kaang, Stress relaxation and elastic recovery of rubber melt, *Korea Polymer Journal* 4(2), 239 – 243, 1996, disponível aqui (acesso em 20/05/2010).

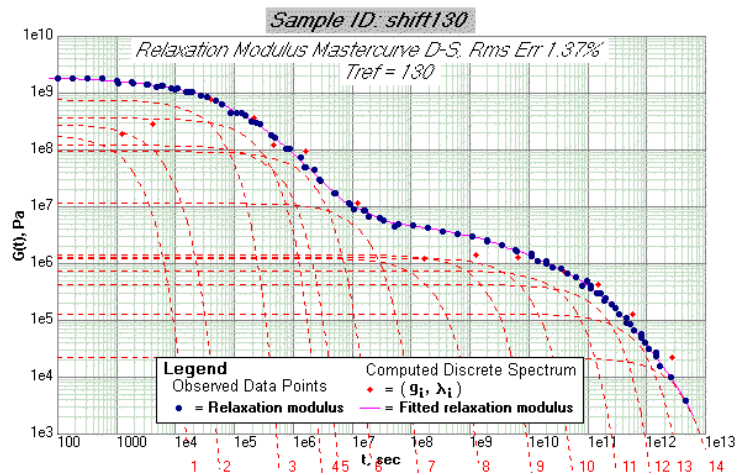


Figura 2: Curva-mestra do módulo de relaxação do Policarbonato na temperatura de referência de 130°C.

- 2 . A Figura 2 apresenta a curva-mestra para o módulo de relaxação de um Policarbonato na temperatura de referência de 130°C. Considere que a temperatura de referência é  $T_g$  deste polímero e suponha que um cilindro do material com dimensões iniciais de 25,4mm de diâmetro externo, 12,7mm de diâmetro interno e 50mm de altura será comprimido tal que seu comprimento diminua para 49,8 mm. Suponha que este cilindro será usado como separador de isolamento entre dois cabos elétricos em uma junta vedada a 75 °C e que o critério de segurança do dispositivo requer que esta junção seja reapertada quando a tensão mecânica for reduzida em 10% do valor inicial. Com base no exposto responda qual será o tempo esperado para executar esta operação de reaperto. Qual a recomendação que você dará ao engenheiro de manutenção responsável por este dispositivo.
  
- 3 . A Figura 4 mostra o resultado de ensaios de compressão realizados em uma aula de laboratório realizada no dia 17/05/2013 em corpos de prova da PP isotático, usando três velocidades de decida do travessão diferentes. Desses resultados obtemos a tabela 1, que mostra o valor da tensão de escoamento para uma deformação total  $\varepsilon = -0,1$  (-10%). Com base nesses resultados e assumindo-se que a velocidade de decida do travessão pode ser convertida diretamente em taxa de deformação, dividindo-a por 12 mm (a altura inicial dos corpos de prova), responda:
  - a Qual é a viscosidade efetiva desse polímero (para  $\varepsilon = -0,1$ ) para cada um dos três valores de  $\dot{\varepsilon}$  isoladamente
  - b Considerando agora a tensão de escoamento (para  $\varepsilon = -0,1$ ) é função da taxa de deformação, determine se é possível afirmar que essa função pode ser descrita por uma lei de potência. Caso afirmativo, estime o valor do expoente, caso negativo, interprete o comportamento do polímero.

- c Como se pode justificar que a tensão de escoamento para a velocidade de  $30 \text{ mm min}^{-1}$  seja menor que a do caso em que a velocidade é  $3 \text{ mm min}^{-1}$  quando as deformações são superiores a  $-0,4$ ?

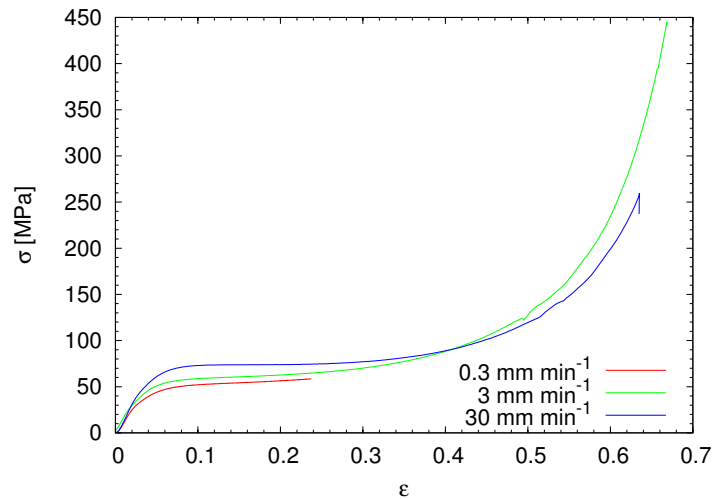


Figura 3: Resultados dos ensaios de compressão em PP.

Tabela 1: Tensão de escoamento para  $\varepsilon = -0,1$  em PP isotático.

velocidade [ $\text{mm min}^{-1}$ ]	$\sigma$ [MPa]
0,3	52,1
3	58,8
30	72,9

## Solução

- Calculando o fator WLF:

$$\log_{10} a_T = \frac{-17,44 [30 - (-65)]}{51,6 + 30 - (-65)} = -11,3 \Rightarrow a_T \approx 2 \times 10^{-11} \quad (1)$$

Temos então que:

$$\log_{10} \frac{5}{2 \times 10^{-11}} = \log_{10} 2,5 \times 10^{11} = 11,4 \quad (2)$$

Lendo no gráfico, temos que a tensão será, aproximadamente,  $5 \text{ N m}^{-2}$  ou  $5 \text{ Pa}$ .

2. Primeramente calculamos a tensão inicial da junta, para tanto calculamos a deformação inicial:

$$\varepsilon = \frac{49,8 - 50}{50} = -4 \times 10^{-3} \quad (3)$$

A tensão será dada pelo módulo medido no instante  $t = 0$ , que vale  $\approx 2$  GPa, portanto:

$$\sigma = 2 \times 10^9 \times (-4 \times 10^{-3}) = 8 \text{MPa} \quad (4)$$

Da curva mestra observamos que, na temperatura de referência, para haver uma redução de 10% na tensão (reduzindo-a a 7,2 MPa) temos que ler o tempo correspondente à redução do módulo para 1,8 GPa, algo como  $t = 3 \times 10^3$  s.

Calculando agora o fator WLF:

$$\log_{10} a_T = \frac{-17,44 [75 - (130)]}{51,6 + 75 - (130)} = -282,11 \Rightarrow a_T \approx 10^{-282} \quad (5)$$

Assim:

$$a_T = \log_{10} \frac{t_{75}}{3000} \Rightarrow -282,11 = \frac{t_{75}}{3000} \Rightarrow t_{75} \approx -843000 \text{s} \quad (6)$$

O resultado obviamente é inconsistente com o que sabemos do comportamento mecânico do polímero. Analisando detalhadamente a expressão WLF, vemos que o sinal negativo vem do denominador, e não do numerador. De fato, a diferença de temperatura é superior a 51,6 K. Para essa diferença de temperatura o fator WLF seria infinito (!). Quando resgatamos a dedução original de WLF, vemos que nesse caso o volume livre do material polimérico atingiria o valor nulo, para diferenças ainda maiores, o volume livre se tornaria negativo, o que, obviamente, é fisicamente proibido. Portanto concluímos que a teoria não se aplica nesse caso. O que ocorre é que esse polímero, a 75 °C é rígido, portanto não há recomendação a se fazer ao engenheiro de manutenção.

3. a. A viscosidade efetiva é obtida por:

$$\eta_{ef} = \frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}} \quad (7)$$

Aplicando às três velocidades obtemos 125 kPa s para a primeira ( $4,17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), 14 kPa s para a segunda ( $4,17 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e 1,75 kPa s para a terceira ( $4,17 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ).

- b. O gráfico dos dados em escala bilogarithmica encontra-se na Figura 4. Como se observa, os dados podem ser descritos por meio de uma lei de potência e o expoente é  $b = 0,075 \pm 0,012$ .

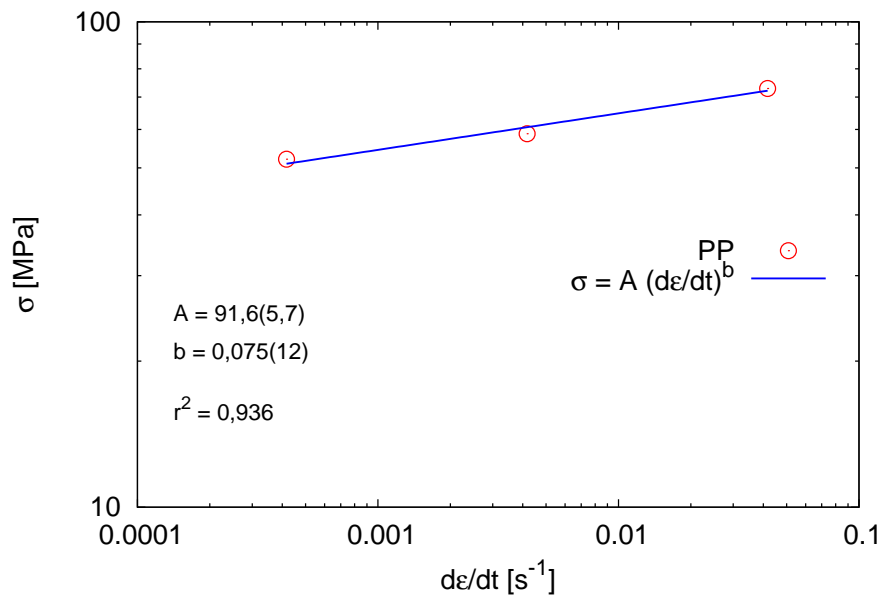


Figura 4: Tensão de escoamento para o polipropileno a  $\epsilon = -0,1$ .

- c. Deformação plástica gera calor, que precisa difundir para fora do material. Na maior taxa de deformação a velocidade era, provavelmente, maior que a capacidade de condução do corpo de prova e ele, provavelmente, se aqueceu na etapa final do ensaio, resultando em tensões de escoamento menores que a da velocidade intermediária (na qual a deformação provavelmente continuou isotérmica (aproximadamente)).