

Comportamento plástico e os efeitos do Envelhecimento sobre a tensão de escoamento

Rômulo Feitosa Navarro
Professor Titular – UAEMa – CCT – UFCG
romulonavarro@ufcg.edu.br

(Recebido em 13/12/2018; aceito em 29/12/2018)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

A maioria dos usos dos materiais exige que eles mantenham-se íntegros e que todos os esforços a que são submetidos apenas provoquem modificações que sejam reversíveis. Todavia, em uso, os materiais sofrem a ação de intempéries e de agentes químicos ou físicos não ambientais que modificam-lhe o comportamento mecânico ou fazem com que passem a trabalhar para além do limite elástico. No presente trabalho, são apresentadas as diversas formas de comportamento plástico e os efeitos do envelhecimento natural e acelerado sobre as propriedades mecânicas mais usuais e, em especial, sobre a tensão de escoamento, mostrando que nem sempre ocorre a clássica fragilização caracterizadas pela diminuição do módulo, da tensão de escoamento, da resistência à tração e da deformação na ruptura.

Palavras-chave: Deformação plástica; tensão de escoamento; envelhecimento

Abstract:

The general use of materials needs they unperturbed and all the applied stress doesn't make permanent deformation. But in every use, materials experience environment, chemical and physical actions that change their mechanical behavior or make than work above their elastic limit or yield stress. At present work, all the fashion of plastic behavior, natural and artificial aging effects under mechanical behavior, specially, yield stress are presented. It was shown many others behavior than the classical modulus, yield stress, tensile strength and deformation at break decrease.

Keywords: Plastic deformation; yield stress; aging

Introdução

Alguns materiais apresentam, após uma tensão suficientemente alta, conhecida por diversos nomes, tais como limite elástico, ponto de escoamento, tensão de escoamento ou tensão de cedência, uma deformação irreversível. A partir dessa tensão, a relação tensão-deformação deixa de ser linear, e a deformação assume, mesmo que parcialmente, valores permanentes. Essa não linearidade, em geral, é associada a um escoamento plástico induzido por tensão no material, que passa a permitir um rearranjo em sua estrutura microscópica, no qual os átomos estão sendo movidos para novas posições de equilíbrio [1]. Esse tipo de plasticidade requer um mecanismo para a mobilidade atômica ou molecular. Assim, materiais que não permitem essa mobilidade impedem o movimento de blocos, e, por essa razão, são frágeis. Os que permitem são dúcteis, e a deformação resultante do rearranjo associado ao escoamento plástico nesses materiais não é reversível em sua totalidade após a remoção da tensão.

Ponto de Escoamento

Um termo diretamente ligado à deformação plástica é o ponto de escoamento, σ_y , que, grosso modo, pode ser definido como a tensão necessária para induzir a deformação plástica no material.

Em uma curva comum de tensão x deformação (TD), a identificação do ponto de escoamento nem sempre é direta, haja visto que nem todas as curvas apresentam uma separação marcante entre o fim do comportamento elástico, caracterizado pela relação linear entre tensão e deformação, e o início do comportamento plástico, em que essa relação deixa de ser linear, como mostrado na Figura 1. Para certos metais, como algumas ligas de Fe-C, há um nítido ponto ou região de inflexão que representa a fronteira entre os dois comportamentos, como fica claro na Figura 2. Para materiais frágeis, entretanto, esse limite deixa de ser importante, já que só apresentam comportamento elástico (Figura 3).

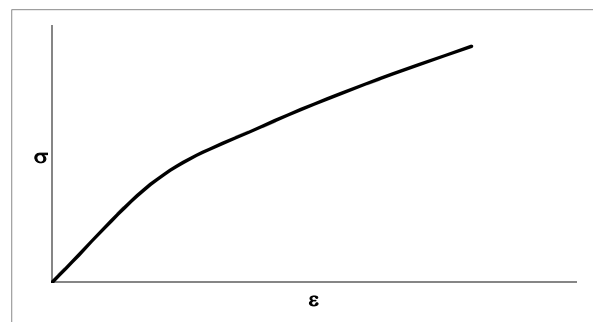


Figura 1. Curva típica de tensão x deformação para materiais dúcteis.

Para materiais que apresentam uma curva TD como a mostrada na Figura 1, foi proposta uma regra em que o ponto de escoamento seria o valor da tensão resultante da interseção de uma reta paralela à região linear da curva TD iniciando-se em uma deformação de 0,2% (*offset yield point*), como mostrado na Figura 4, que seria uma espécie de ponto compensado de escoamento a 0,2% de deformação. Embora essa metodologia seja sempre válida para os metais, para outros materiais que apresentam ductilidade isso nem sempre ocorre. Para esses materiais, se a região de baixa deformação da curva TD for ampliada convenientemente, se verá que antes mesmo da deformação de 0,2% o material já apresenta falta de linearidade na relação TD.

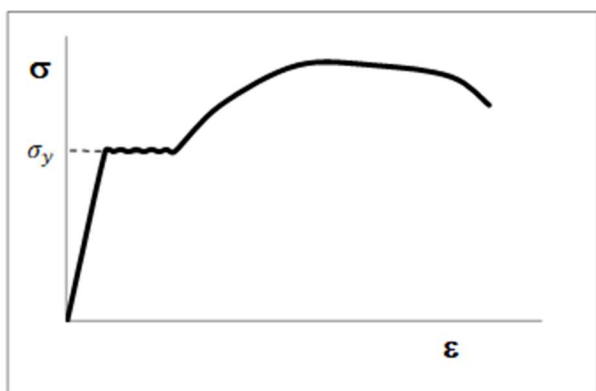


Figura 2. Curva TD típica de ligas de Fe-C de baixo teor de C.

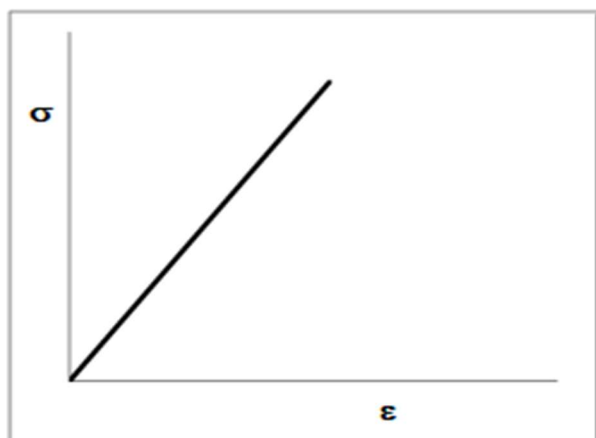


Figura 3. Curva TD típica de materiais vítreos.

Uma maneira racional de se obter σ_y a partir de uma curva TD como a mostrada na Figura 1 seria aplicar a primeira e segunda derivadas na curva. Os resultados são mostrados nas Figuras 4 para a primeira derivada. No ponto de inflexão da Figura 4 é onde a segunda derivada deve assumir o valor máximo. Assim, a deformação relativa ao ponto de inflexão da Figura 4 é um ponto de transição e está associado com σ_y , e a curva mostrada na Figura 1 passaria a ter a forma da Figura 5. Assim, a deformação nesse ponto seria $\epsilon = \epsilon_y$, e σ_y seria um ponto simples na curva TD, no qual o módulo tangente, E_t , se encontra em modificação na taxa mais elevada em relação ao aumento na deformação, ou seja,

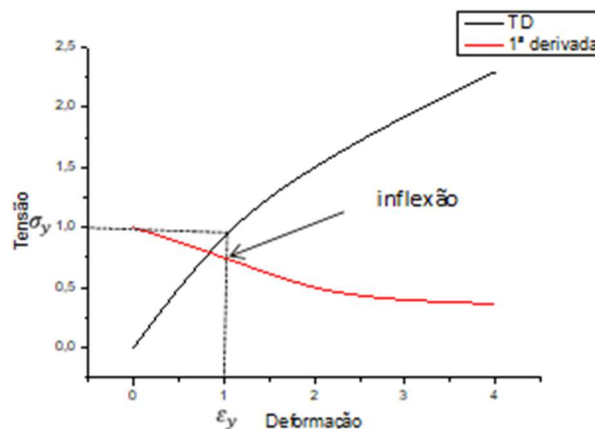


Figura 4. Curva TD semelhante à da Figura 1 e sua primeira derivada.

$$\sigma = \sigma_y \text{ em } \left| \frac{d^2\sigma}{d\epsilon^2} \right| \text{ máximo} \quad (1)$$

ou

$$\sigma = \sigma_y \text{ em } \frac{d^3\sigma}{d\epsilon^3} = 0 \quad (2)$$

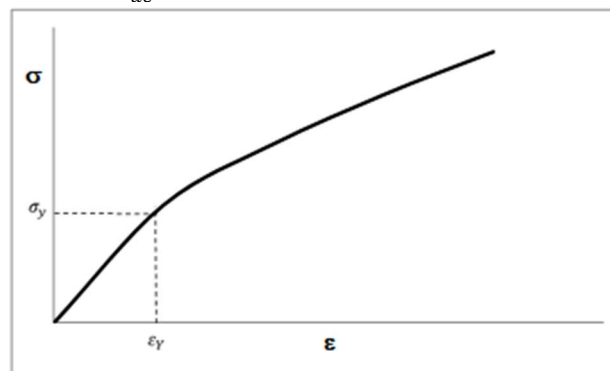


Figura 5. Curva da Figura 1 após introdução dos pontos relativos ao de escoamento.

Os critérios acima foram propostos por Christensen [2]. O fato desse método, ou de outros semelhantes, não ser aplicado deriva do fato de que a totalidade das curvas TD atualmente ser meramente um conjunto de pontos para tensão e deformação, tornando assim a obtenção de qualquer derivada para a relação TD dependente da possibilidade de existência de alguma correlação matemática entre os dados experimentais. Havendo correlação e se a curva da primeira derivada $\frac{d\sigma}{d\epsilon} \times \epsilon$ for constantemente decrescente à medida que ϵ cresce, e possuir um ponto de inflexão, como na Figura 4, aí se identificará o ponto de escoamento. Entretanto, nem sempre o material mudará de um comportamento idealmente elástico para apresentar um real escoamento plástico, por razões diversas que incluem efeitos da anisotropia do escoamento ou do local de ocorrência do escoamento.

Alternativa matemática para a situação de passagem de comportamento elástico para plástico é imaginar que a deformação possa ser decomposta em partes elástica e plástica, segundo uma equação do tipo [2]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} - a \ln \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

em que a , m , e σ_0 são parâmetros a serem determinados. Observando-se a Eq. (3), verifica-se que quando m se torna muito grande, ela representa o comportamento elástico-perfeitamente plástico, como mostrado na Figura 6. Assim, exceto neste caso limite, a Eq. (3) representa uma função contínua com derivadas contínuas de acordo com a maioria das observações experimentais para as relações TD.

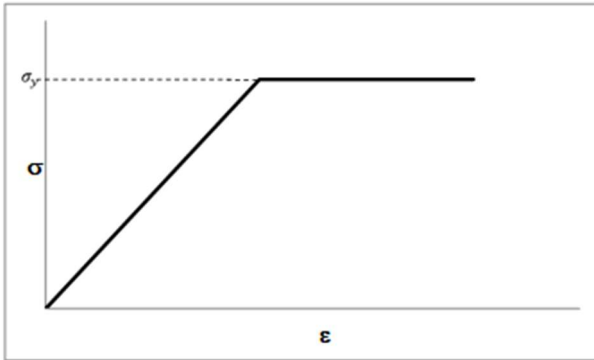


Figura 6. Comportamento elástico-perfeitamente plástico.

Por fim, um método baseado no empirismo mostra ser bastante precisa a observação de que o limite elástico é tomado como sendo a tensão na qual a deformação efetiva é 5% maior que aquela correspondente à projeção elástica linear, ver Figura 7, ou seja,

$$\sigma_y = \sigma(\varepsilon) \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_L}{\varepsilon_y} = 0,05 \quad (4)$$

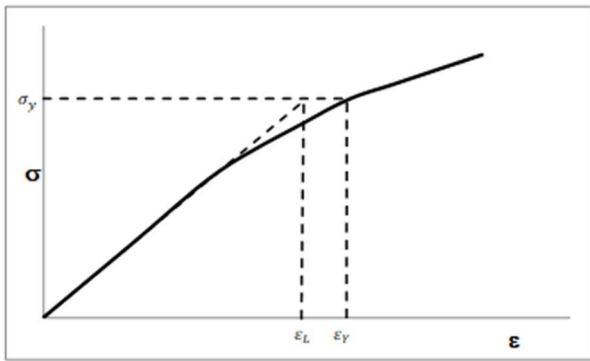


Figura 7. Condição de desvio de deformação na Eq. (4).

Escorregamento

Critério de Escoamento

As mais simples teorias relativas à plasticidade excluem o tempo como variável e ignoram qualquer característica do comportamento que ocorra abaixo do ponto de escoamento. Ou seja, assume-se um material elasto-plástico, cuja curva TD sob tração, mostrada na Figura 6, é uma variação da curva da Figura 8, para um material elasto-plástico com módulo infinito (rígido-plástico ideal) para $\sigma < \sigma_y$.

Para o material representado pela curva TD da Figura 8, para tensões menores que o ponto de escoamento, não há deformação. O escoamento plástico, assim, pode ser produto de uma ampla faixa de estados de tensão e não apenas por tração. Em geral, entretanto, deve-se assumir que as condições para o escoamento plástico dependem de uma função do campo tridimensional da tensão. Por exemplo, o sistema cartesiano é definido por seis componentes da tensão σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} e σ_{zx} . Porém, os valores numéricos desses componentes dependem da orientação dos eixos, e é fundamental que o critério do escoamento seja independente do ponto de observação escolhido [3]. Assim, é mais prático fazer uso das tensões principais, que têm direções e valores determinados unicamente pela natureza do campo de tensão. Se o material possuir uma tendência natural a apresentar o escoamento independente da direção das tensões, ou seja, se o material for isotrópico, então o critério do escoamento será função apenas das tensões principais. Portanto, o tensor de tensão geral dado por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

considerando que $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, corresponde ao tensor de tensão nos eixos ao longo das direções principais

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

em que os σ_i são as tensões principais.

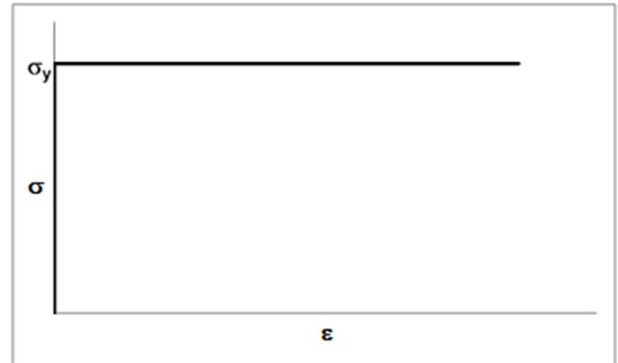


Figura 8. Curva TD para um material rígido-plástico ideal.

Definindo-se o material isotrópico como padrão, ao qual será confinada toda teoria, o critério de escoamento pode ser definido como

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = C \quad (7)$$

Critério de Tresca

O padrão definido por Tresca[4] foi o primeiro proposto para ser aplicado aos metais e pressupunha que o escoamento ocorreria quando a tensão máxima de cisalhamento atingisse um valor crítico, ou seja,

$$\sigma_1 - \sigma_3 = C \quad (8)$$

desde que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. O critério de Tresca pressupõe que a tensão de cisalhamento crítica, τ , seja independente da tensão normal, σ_N , sobre o plano no qual está ocorrendo o escoamento plástico.

Neste ponto, é preciso ter em mente que os metais, por se apresentarem tanto sob a forma de monocristais e sob a forma policristalina, apresentam mecanismos diversos de deformação plástica.

Lei de Schmid

Em metais monocristalinos puros, a tensão necessária para promover o escorregamento depende em grande parte da estrutura cristalina do metal e também das características de sua ligação atômica, da temperatura de deformação e da orientação dos planos de escorregamentos ativos em relação às tensões de cisalhamento [5]. O escorregamento se inicia no interior do cristal, quando a tensão de cisalhamento no plano de escorregamento, segundo a direção de escorregamento, atinge um determinado valor, chamado de tensão de cisalhamento resolvida crítica, τ_c . De forma concreta, esse é o valor da tensão de escoamento de um monocristal e é equivalente à tensão de escoamento de um metal ou liga policristalino determinada a partir de uma curva TD obtida de um ensaio de tração.

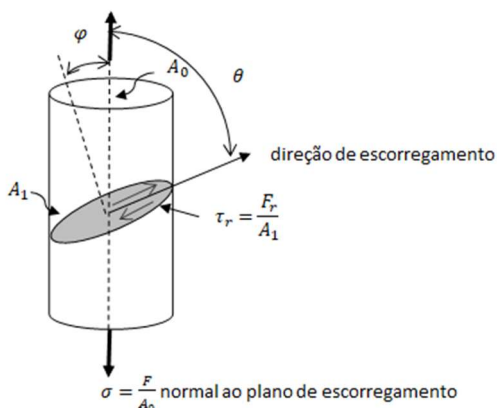


Figura 9. Relação entre as tensões axial e de cisalhamento resolvida. Adaptada de Smith & Hashemi[5].

Segundo a Lei de Schmid, a relação entre a tensão uniaxial que atua sobre um monocristal cilíndrico de um metal puro e a correspondente tensão de cisalhamento que atua no sistema de escorregamento no interior do cilindro pode ser deduzida. Para tanto, deve-se considerar que a tensão uniaxial de tração, σ , que atua sobre o cilindro metálico, é produto da ação da força axial, F , sobre a área transversal, A_0 , como mostrado na Figura 9. Sendo A_1 a área do plano de escorregamento ou de cisalhamento, sobre a qual atua a força de cisalhamento resolvida, F_r , pode-se definir as orientações tanto do plano como da direção de escorregamento pelos

ângulos, φ e θ , sendo φ o ângulo entre a força F e a normal ao plano de escorregamento de área, A_1 , e θ o ângulo entre F e a direção de escorregamento.

Para que haja escorregamento, a partir do movimento de uma discordância, por exemplo, a tensão resolvida, $\tau_r = F_r/A_1$, deverá ser superior a um determinado valor. De acordo com a Figura 9,

$$F_r = F \cos \theta \quad (9)$$

como $A_1 = A_0/\cos \varphi$, a tensão de cisalhamento resolvida será dada por:

$$\tau_r = \frac{F \cos \theta}{A_0/\cos \varphi} = \frac{F}{A_0} \cos \theta \cos \varphi = \sigma \cos \theta \cos \varphi \quad (10)$$

A Eq. (10) é conhecida como a Lei de Schmid.

Critério de Coulomb

Para polímeros, o critério de Tresca, no que diz respeito à independência da tensão crítica em relação à pressão normal ao plano de escoamento, não se aplica. Para esses materiais, o critério de Coulomb, no qual a tensão crítica de cisalhamento para o escoamento ocorrer em qualquer plano varia linearmente com a tensão normal ao plano, é aplicado. Nesse critério,

$$\tau = \tau_c - \mu \sigma_N \quad (11)$$

em que τ_c é uma tensão de coesão e μ coeficiente interno de fricção.

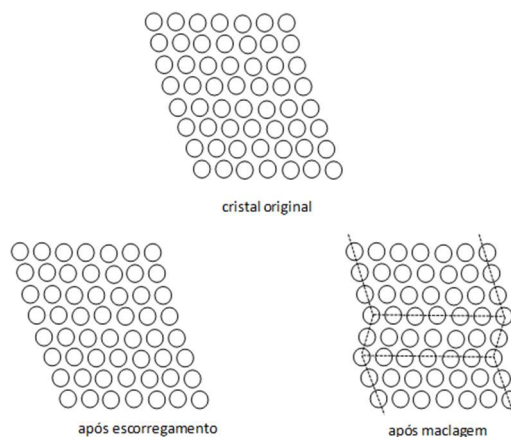


Figura 10. Comparação entre os mecanismos de deformação plástica por escorregamento e por maclagem [6].

Deformação Plástica de Materiais Policristalinos.

A deformação plástica em sólidos policristalinos corresponde a comparáveis distorções dos grãos individuais pela ação do escorregamento. Nesse

tipo de deformação plástica, a direção do escorregamento varia de um grão para outro como resultado da aleatoriedade da orientação cristalográfica dos grãos [6]. Por exemplo, o movimento de deslocação ocorre ao longo do plano de escorregamento que possua a orientação mais favorável em relação à orientação original. Nesse tipo de deformação, as linhas de escorregamento são bastante visíveis e, no caso de alguns metais policristalinos, como o cobre policristalino, dois sistemas de escorregamentos ocorrem simultaneamente para a maioria dos grãos, o que é evidenciado por dois conjuntos paralelos de conjunto de linhas que se interceptam[6].

Durante a deformação plástica em materiais policristalinos, a integridade mecânica e a coesão são mantidas ao longo do contorno de grão, isto é, o contorno de grão usualmente não se separa ou se abre. Como consequência, cada grão individual é constringido, em alguma magnitude, a assumir uma forma ditada pelos grãos vizinhos. Assim, grãos que possuem a mesma dimensão em todas as direções podem ser alongados na direção em que o corpo seja estendido.

Metais policristalinos, por exemplo, são mais rígidos que os monocristalinos correspondentes, isso significa que exigem tensões de maior magnitude para o início do processo de escorregamento⁴. Isso é, em grande parte, resultado também do constringimento geométrico que é imposto ao grão durante a deformação. Mesmo que um grão qualquer seja favoravelmente orientado com a tensão aplicada para o escorregamento, ele não poderá se deformar até que os vizinhos menos favoravelmente orientados sejam igualmente capazes de escorregar. Daí a necessidade de aplicação de uma tensão mais elevada[6] (ver Figura 11).

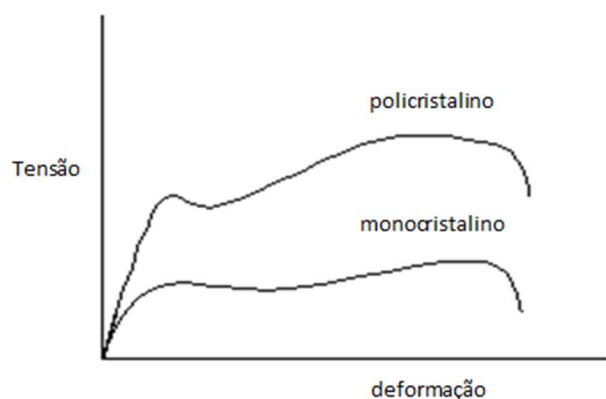


Figura 11. Curvas de TD deformação típicas para um metal em suas formas poli e monocristalina. Adaptado de Jenkins & Khara, 2018 [8].

Quanto menor o tamanho do grão do metal e de suas ligas maior a resistência que o material apresenta (ver Figura 11). Todavia, ficam mais suscetíveis à corrosão e à fluência. Todavia, a resistência mecânica é a característica mecânica mais relevante na maioria das aplicações. Daí a importância da relação entre o tamanho do grão e a resistência mecânica. Dentre essas relações,

destaca-se a conhecida equação de Hall-Petch, uma relação empírica, a qual relaciona a tensão de escoamento de um metal com o diâmetro médio de seus grãos, d , da seguinte forma:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{(d)^{0,5}} \quad (12)$$

com σ_0 e k sendo constantes relacionadas com o material em questão.

O níquel policristalino e o nanocristalino exibem curvas de tensão e deformação de engenharia bem distintas como mostrado na Figura 11. O níquel policristalino possui uma tensão de escoamento de 208 MPa, resistência à tração máxima de 442 MPa e 50% de alongamento à fratura. Por outro lado, o níquel nanocristalino mostra uma tensão de escoamento de 950 MPa, resistência à tração máxima de 1504 MPa e 8% de alongamento à fratura. Esses resultados ilustram que a tensão de escoamento e a resistência mecânica melhoram significativamente quando o tamanho do grão é refinado de 30 μm para 30 nm. Isso está de acordo com as observações que levaram à equação de Hall-Petch[6], muito embora que ainda haja controvérsias sobre essa teoria no caso de metais nanoestruturados tanto quando se consideram tamanhos de grãos inferiores a 10 μm quanto inferiores a 100 nm[7].

Efeitos do Envelhecimento sobre a Tensão de Escoamento.

Ao contrário de outras propriedades mecânicas, a tensão de escoamento não apresenta um comportamento padrão em termos de variação frente ao envelhecimento. Sendo uma propriedade intermediária entre os regimes elástico e plástico de deformação, seria justo supor um comportamento intermediário entre aqueles referentes aos estágios inicial e final de deformação, quando o material é exposto a condições de deterioração: temperatura, umidade e radiação.

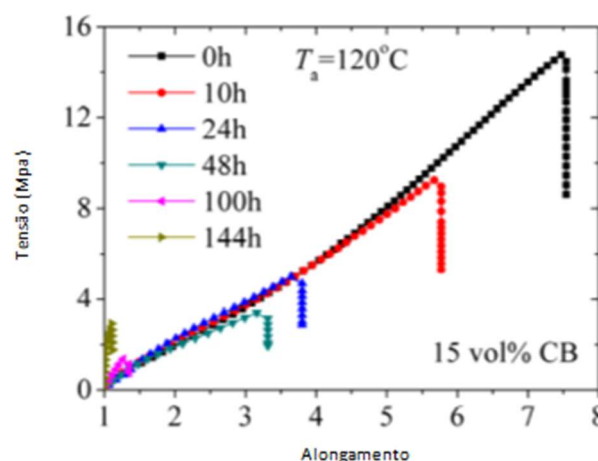


Figura 12. Efeito do tempo exposição a 120°C de tiras de borracha com 15% em volume de negro de fumo, com alongamento a 100 mm/min[9].

Na Figura 12, pode-se observar o comportamento mecânico de um elastômero em

temperatura elevada. Esse comportamento aproxima-se do ideal, no qual não haveria modificação nem no módulo nem na tensão de escoamento, apenas redução das propriedades terminais, no caso deformação e tensão na ruptura, com o aumento do tempo de exposição em uma dada temperatura. De fato, isso ocorre até quase 100h de exposição, a partir de quando, aumenta-se tanto o módulo quanto a tensão de escoamento. Esse comportamento típico para tiras de borracha natural, verificado por Xialing et al (2013)[9], foi também citado por Verdu [10] como comum a polímeros vítreos, como o PMMA, no qual não se verificou alteração na tensão de escoamento ao longo do tempo de exposição, como mostrado na Figura 13.

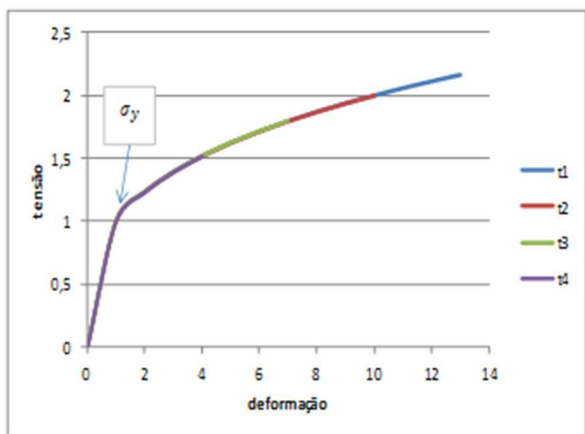


Figura 13. Curva TD típica para polímeros vítreos, segundo Verdu [10], com $t_4 > t_3 > t_2 > t_1$.

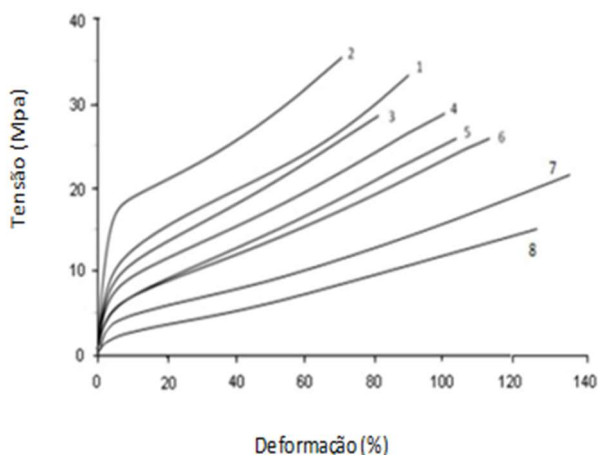


Figura 14. Efeito da exposição de amostras de poliuretano a 120°C por uma (curva 3), duas (4), três (5), quatro (6), nove (7) e 13 (8) semanas e dois dias (2) de exposição. A curva 1 é do material não exposto[11].

Amostra de poliuretano expostas a 120°C por várias semanas, apresenta um comportamento não regular para várias propriedades mecânicas frente ao tempo de exposição, todavia, após uma semana de exposição, a tensão de escoamento diminui gradativamente com o tempo de exposição, sem que isso implique diminuição na capacidade de apresentar

deformação plástica. Ou seja, não há transição dúctil-frágil, mas o material, mesmo não tendo alterada significativamente sua deformação na ruptura, se rompe em tensões cada vez mais baixas, como pode ser vista na

Polímeros como o policarbonato apresentam comportamento típico de transição dúctil-frágil durante a exposição. Esse comportamento, mostrado na Figura 15. Isso ocorre devido a uma competição entre processos de fragilização, como ligações cruzadas físicas devido aos pontos de contato entre os segmentos cinéticos da cadeia macromolecular. Em polímeros semicristalinos, essas ligações cruzadas físicas exigem a presença de moléculas de amarração ou ancoragem [10]. Comportamento semelhante foi observado para amostras de PET amorfo submetidas a 51°C por 90 min[12].

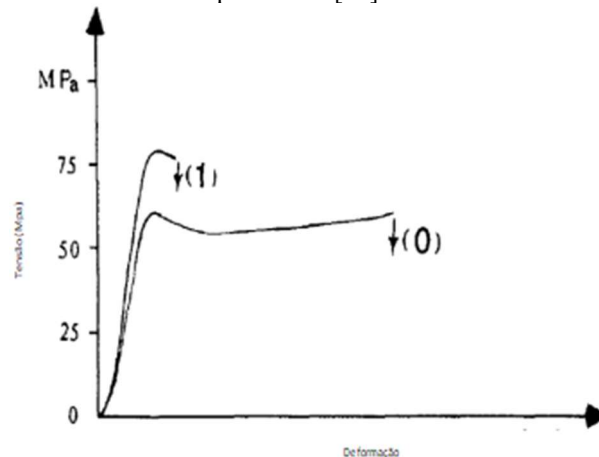


Figura 15. Efeito da exposição a 140°C de amostra de policarbonato (0) não exposta e (1) exposta[10].

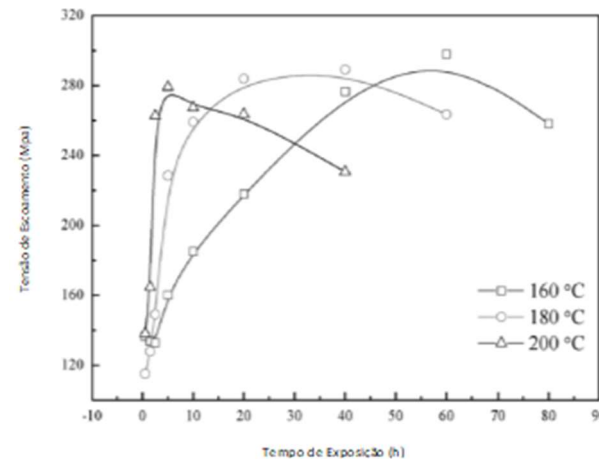


Figura 16. Efeito do tempo de exposição em várias temperaturas sobre a tensão de escoamento da liga de alumínio AA6061[14].

Algumas ligas metálicas, como as de alumínio da serie 6XXX, têm sua tensão de escoamento aumentadas com o tempo de exposição a uma dada temperatura, com esse aumento sendo bastante dependente da temperatura utilizada. Quanto maior a temperatura maior o aumento verificado em curto espaço de tempo. Porém, mais cedo a tensão de escoamento irá diminuir com o tempo de exposição. Em temperatura na

faixa de 160°C – 180°C, o crescimento mais tênue da tensão de escoamento com o tempo de exposição favorece a que essa propriedade permaneça crescente ou constante por mais tempo. O aumento inicial na tensão de escoamento é devido ao mecanismo de difusão assistida de vacâncias e à formação de zonas de alta concentração de zonas de precipitação do tipo Guinier-Preston seguida pela formação de precipitados de β' e β'' metaestáveis que perturbam a regularidade do retículo cristalino assim como devido à presença de partículas de outra fase perturbando o livre movimentos das partículas desta fase. O decréscimo após o pico pode ser devido à coalescência dos precipitados em partículas maiores e com maior tamanho de grão, proporcionando menos obstáculos ao movimento da dislocação e também devido processo de recozimento dos defeitos[6].

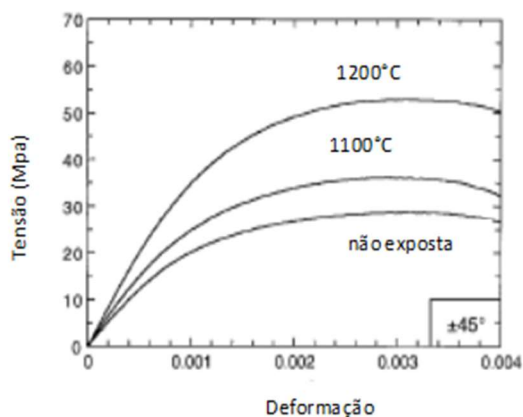


Figura 17. Comportamento sob tração de amostras compósitos de alumina com fibras de mulita com orientação de 45° não expostas e expostas por 1000h a 1100°C e 1200°C [6].

Materiais cerâmicos, frequentemente, não apresentam deformação plástica. Assim, o limite de escoamento é também sua tensão de ruptura. Materiais cerâmicos porosos, como os ossos, por exemplo, apresentam estabilidade frente à densificação, porém é notável o aumento na resistência à tração e da tensão de escoamento com o aumento da temperatura de exposição quando há a introdução de fibras cerâmicas em matrizes cerâmicas porosas, como o sistema alumina/fibras de mulita. Nesse tipo de compósito de matriz e reforços rígidos, é possível se obter compósitos com elevada ductilidade, em que tanto o limite elástico como a resistência à tração aumentam com o aumento da temperatura de exposição[16]. O comportamento mostrado na Figura 17 está de acordo com o melhoramento e reforçamento da interface matriz-fibra devido ao envelhecimento, aumentando a eficiência da transferência de carga da matriz para as fibras

Referências

[1] – Roylance, D., Mechanical Properties of Materials, Massachusetts: MIT; 2008.

[2] – Christensen, R., Observation on the definition of yield stress, Acta machanica, 196, 239-244 (2008).

[3] – Ward, S., Swuuedy, J., An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers, 2nd Ed., Chichester: J. Wiley and Sons, LTD; 2008.

[4] – Tresca, H., C. R. Acad. Sci (Paris), 59, 754, 1864. Apenas para fins de informação.

[5] – Smith, W., Hashemi, J., Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais, 5 ed., Porto Alegre: AMGH; 2012.

[6] – Navarro, R. F., Mecânica dos Biomateriais Aplicáveis ao Corpo Humano, Mauritius: Novas Edições Acadêmicas; 2018.

[7] – Aifantis, K.E., Konstantinidis, A. A., Hall-Petch revisited at the nanoscale, Materials Science and Engineering: B, 163 (3), pg. 139-144, 2009.

[8] – Jenkins, S., Khara, W., capturado em 27/10/2018, <http://www1.us.elsevierhealth.com/books/elsevier/companionsites/JenkinsKhanna/mmd/yieldpoint/yieldpointa.html>

[9] - Hu, X., Li, Y., Liu, X., Luo, W., Experimental studies of thermal aging Effects on the tensile and tearing fracture behavior of carbon black filled rubbers, 13th International Conference on Fracture, 16–21 de junho, Pequim; 2013.

[10] - Verdu, J., Effect of aging on the mechanical properties of polymeric materials, Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 31:10, 1383-1398, 1994.

[11] - Tcharkhtchi, A., Farzaneh, S., Abdallah-Elhirsiti, S., Esmaeillou, B., Nony, F., Thermal aging effect on mechanical properties of polurethane. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 19 (7), pg. 571-584, 2014.

[12] - Harmon, J. P., Beatty, C. L., “Thermal Stresses and Physical Aging,” in Engineering Plastics, Volume 2, Engineered Materials Handbook, ASM International, 1988, p.751. Adaptado e republicado em Characterization and Failure Analysis of Plastics pg. 295-304, ASM International. www.asminternational.org, 2003.

[13] - Carelli, E. A. V.; Hiroki, J. , Yang, J. Y., Zok, F. W., Effects of thermal aging on the mechanical properties of a porous-matrix ceramic composite, Journal of the American Ceramic Society, 85 (3) 595-602; 2002.

[14] - Ozturk, F., Avsar, M., Polat, A., Effects of the artificial-aging temperature and time on mechanical properties and springback behavior of AA6061, Materials and Technology, 49 (4), pg. 487-493, 2015.