

# FLUÊNCIA

## I. Generalidades

Materiais que são freqüentemente submetidos a condições de trabalho em elevadas temperaturas sob carregamento estático podem apresentar deformação por fluência. Por exemplo, componentes como rotores de turbinas em motores a jato e geradores de vapor que sofrem tensões centrífugas e linhas de vapor de alta pressão. A fluência é definida como uma deformação permanente (plástica) dependente do tempo de materiais submetidos a um carregamento constante. É um fenômeno indesejável por ser um limite a vida útil do equipamento. A fluência é observada em todos os tipos de materiais. No caso dos metais, se torna importante quando as temperaturas de trabalho são superiores à  $0,4 T_h$  ( $T_h$ - temperatura absoluta de fusão).

Polímeros amorfos, incluindo plásticos e borrachas são especialmente sensíveis à deformação por fluência.

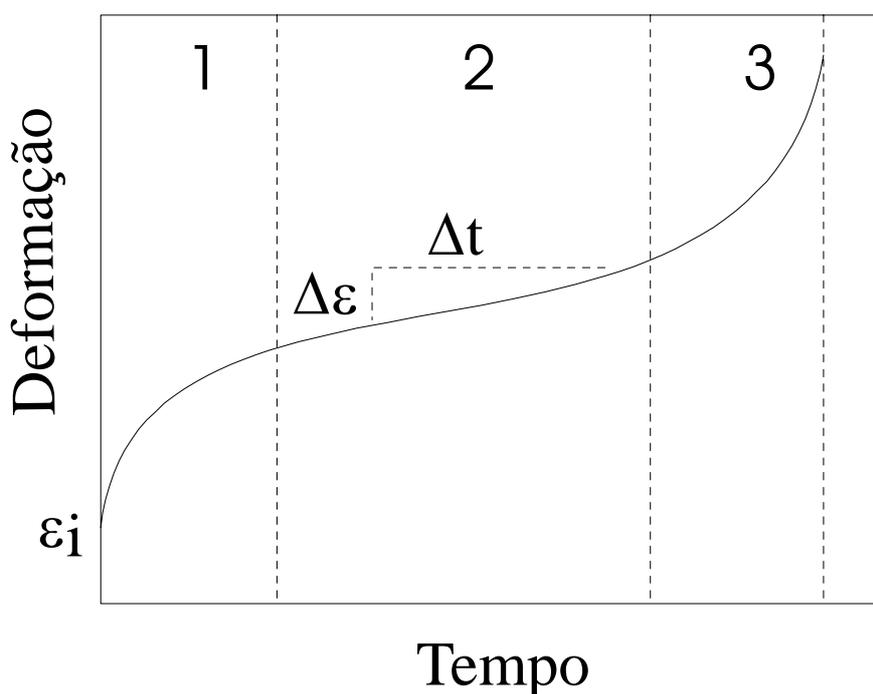
## II. Comportamento em Fluência

Um ensaio típico de fluência consiste em submeter um corpo-de-prova a uma carga ou tensão constante sob uma temperatura constante medindo-se a deformação como função do tempo decorrido. A maior parte dos ensaios são do tipo carga constante os quais fornecem resultados de engenharia. Ensaios com tensão constante são empregados para propiciar um melhor entendimento dos mecanismos de fluência.

A figura abaixo mostra o aspecto típico do comportamento de metais sob carregamento constante.

Sob à aplicação de uma carga há uma deformação instantânea a qual é elástica em quase sua totalidade.

A curva de fluência resultante consiste de 3 regiões, cada uma das quais apresentando uma característica *deformação X tempo* distinta.



**1- Fluência Primária (ou Transiente)** - É caracterizada por apresentar uma taxa decrescente de fluência, onde a inclinação da curva diminui com o tempo. Nesta etapa entende-se que o material apresenta um aumento da resistência à fluência por efeito de encruamento, onde a deformação se torna mais difícil na medida em que o material é deformado.

**2- Fluência Secundária ou Estado Estacionário** - É caracterizado por uma velocidade de deformação constante, sendo este o estágio de maior duração. Observa-se ainda que este trecho da curva de fluência é linear. A característica da constante da fluência neste estágio é explicada com base no balanço entre os processos competitivos de encruamento X recuperação / recristalização. Ou seja, na medida em que o material é deformado, um grau de encruamento suficiente para ativar os mecanismos de recuperação e recristalização é atingido, lembrando que além de elevada temperatura a quantidade de deformação plástica acumulada é condição indispensável para a ocorrência destes fenômenos.

**3- Fluência Terciária** - É caracterizado pelo aumento da velocidade de deformação e fratura. Ocorre o esgotamento da capacidade de recuperação do material. A falha é simplesmente denominada de ruptura e resulta de alterações metalúrgicas e/ou microestruturais, como por exemplo:

- Separação de contornos de grão.
- Formação de trincas internas, cavidades e vazios.

Para cargas trativas pode ocorrer estrição, o que leva à uma redução da seção resistente e um aumento da velocidade de deformação.

Ensaio UNIAXIAL - para materiais metálicos. (Compressão UNIAXIAL para materiais frágeis).

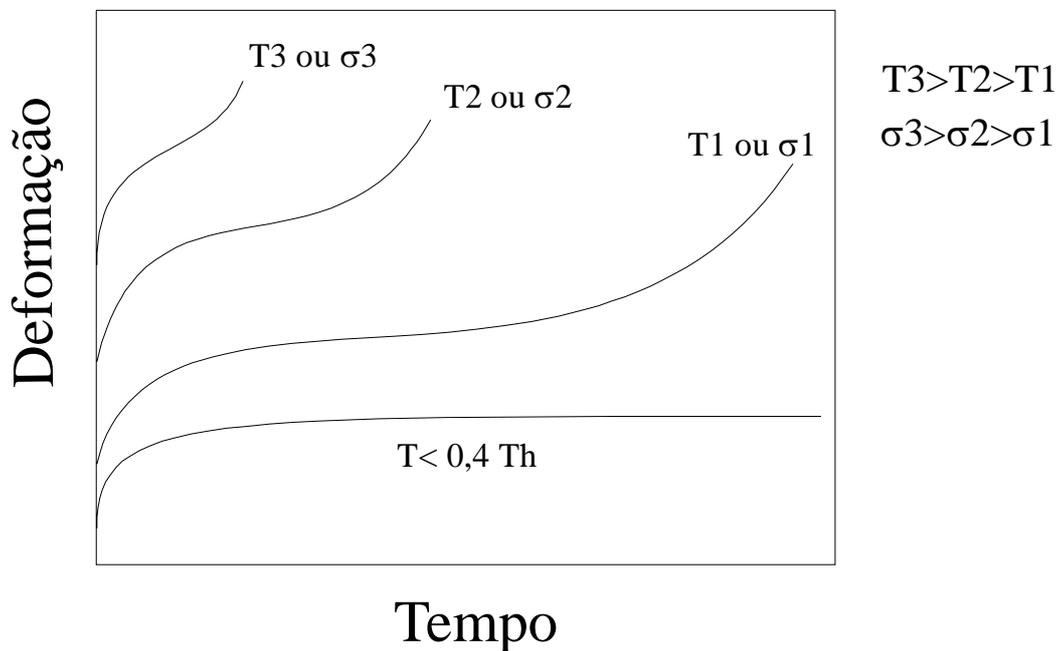
Para a maioria dos materiais as propriedades em fluência são independentes da direção de carregamento.

O parâmetro mais importante em fluência corresponde ao valor da taxa mínima de fluência, ou seja, a velocidade de deformação por fluência em regime estacionário,  $\dot{\epsilon}_s$ . Este é o parâmetro aplicado em projeto de engenharia para considerações sobre vida longa de equipamentos como reatores nucleares que são idealizados para operar por várias décadas e quando a fratura ou deformação excessiva não são desejados.

Por outro lado, para situações de vida em fluência relativamente curta como nos casos de palhetas de turbinas em aeronaves e bicos de motores de foguetes, o tempo para a ruptura  $t_r$  passa a ser o parâmetro dominante no projeto. Portanto, o conhecimento das características do material em fluência permitem ao engenheiro de projeto avaliar a adequação para uma aplicação específica.

### III - Efeitos de Tensão e Temperatura

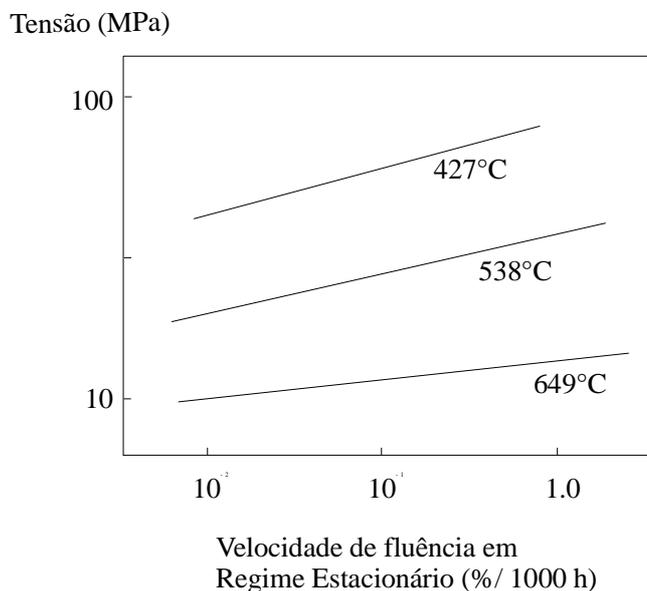
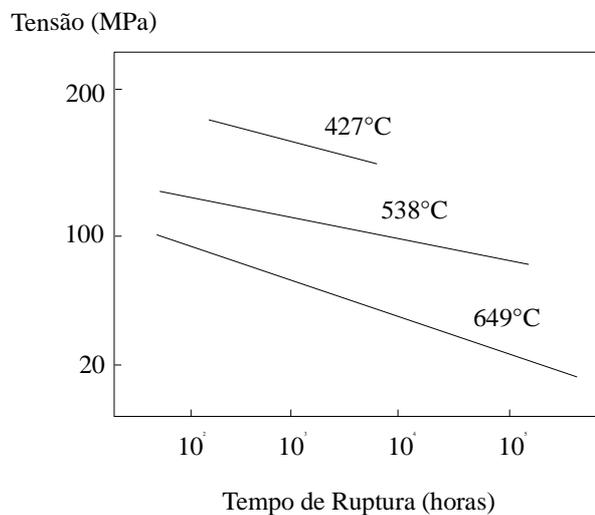
Tanto a temperatura quanto o nível de tensões aplicado afetam as características em fluência. Em temperaturas inferiores à  $0,4 T_h$  e após o estágio primário, a deformação é independente do tempo.



Com o aumento da tensão ou da temperatura observa-se:

- i) Aumento da deformação instantânea;
- ii) Aumento da velocidade de deformação em regime estacionário ( $\dot{\epsilon}_s = \Delta\epsilon/\Delta t$ );
- iii) Redução do tempo total para a ruptura.

A forma mais comum de se apresentar os resultados é na forma do log da tensão X log do tempo de ruptura. Cabe citar que algumas ligas não apresentam linearidade.



Relações empíricas para a fluência em regime permanente:

$$\dot{\epsilon}_s = k_1 \cdot \sigma^n \quad \text{onde } k_1 \text{ e } n \text{ são constantes do material.}$$

Um gráfico logarítmico de  $\dot{\epsilon}_s$  X  $\log \sigma$  produz uma reta cuja inclinação equivale a  $n$ . Acrescentado a esta análise a influência da temperatura obtém-se a seguinte equação:

$$\dot{\epsilon}_s = K_2 \sigma^n \cdot \exp(-Q_c/RT), \quad \text{onde } Q_c \text{ é a energia de ativação para a fluência.}$$

Vários mecanismos teóricos foram propostos para explicar o comportamento em fluência de diversos materiais empregados, estes mecanismos incluem:

- difusão de lacunas induzidas por tensão;
- difusão em contornos de grão (crescimento de grão);
- movimentação de discordâncias;
- deslizamento de contornos de grão.

Cada um destes fatores leva a diferentes valores de  $n$ .

No caso de sistemas bem estudados, os dados de fluência são apresentados na forma de gráficos Tensão X Temperatura denominados de “*Mapas de Mecanismo de Deformação*”. Estes mapas indicam os regimes Tensão - Temperatura (áreas) sobre as quais vários mecanismos podem atuar, sendo incluídos também os contornos de velocidade de deformação constante. Desse modo, em algumas situações de fluência, dado o mapa adequado e quaisquer dois dos três parâmetros - temperatura, nível de tensões e velocidade de deformação por fluência - o terceiro parâmetro pode ser determinado.

#### IV - Métodos de Extrapolação de Dados (determinação de tempo de ruptura)

A necessidade de extrapolação surge em função das limitações de coleta de dados em escala de laboratório. Isto é particularmente verdade quando se trata de exposições prolongadas (da ordem de anos).

Uma solução é a utilização de temperaturas superiores àquelas requeridas em projeto em períodos de tempo mais curtos em níveis de tensão comparáveis ao que se pretende utilizar.

Uma técnica comum de extrapolação é a utilização do parâmetro Larson-Miller definido como:

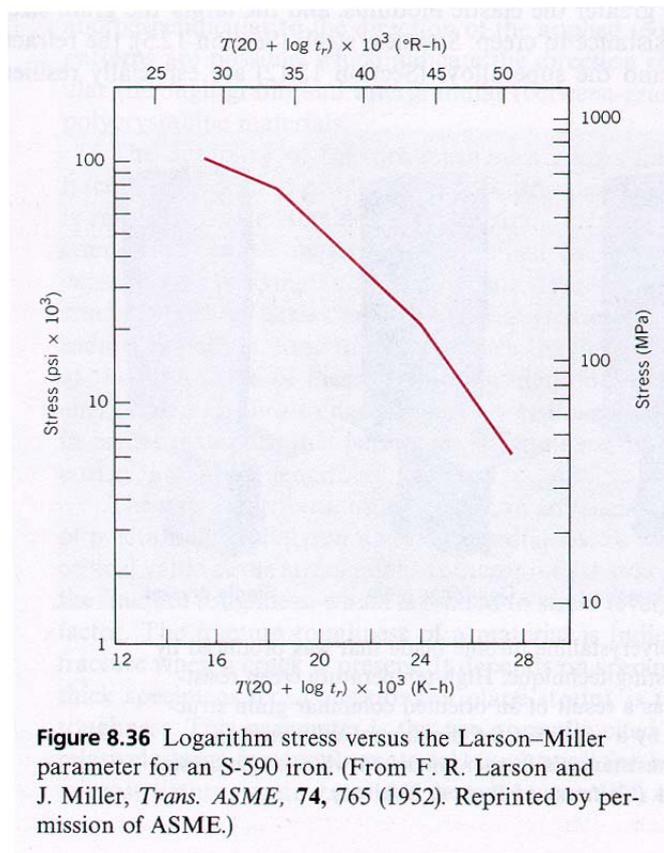
$$T(C + \log t_r),$$

C- Constante (normalmente = 20 para ligas ferrosas)

T - temperatura absoluta

$t_r$  - tempo para ruptura em horas

O tempo de ruptura para um dado material, medido em um nível de tensões específico, varia com a temperatura de tal modo que, este parâmetro permanece constante. Ou, os dados podem ser colocados em gráfico como o *log da tensão X parâmetro Larson-Miller*.



Exemplo:

Usando os dados conforme o parâmetro Larson-Miller para uma liga de ferro S-590, determine o tempo de ruptura para um componente que está sujeito a uma tensão de 140 MPa a temperatura de 800°C.

Solução: Do gráfico, a 140 MPa o parâmetro L-M =  $24 \times 10^3$

$$\text{Logo: } 24,0 \times 10^3 = T (20 + \log t_r)$$

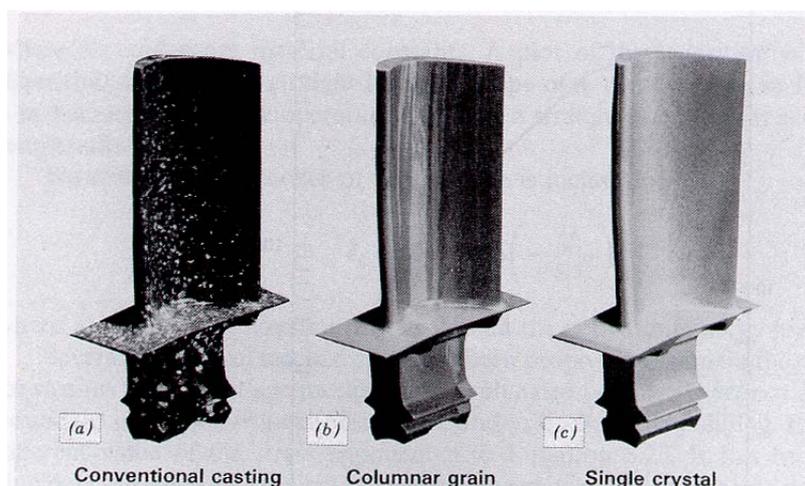
$$24,0 \times 10^3 = 1073 (20 + \log t_r)$$

Temos que  $t_r = 233$  horas. (9,7 dias).

## V- Parâmetros do Material a Serem Considerados

A vida em fluência de uma liga depende de alguns fatores metalúrgicos como:

**i) Tamanho de Grão** - Quanto menor o tamanho de grão do material menor poderá ser a vida em fluência do componente. Isto porque a tendência natural de um material policristalino, submetido a temperaturas elevadas é apresentar crescimento de grão, pela eliminação dos grãos menores ocorre um processo de redução da superfície de contornos de grão minimizando a energia livre interfacial. Este movimento de crescimento de grão associado a tensão externa aplicada pode levar ao deslizamento dos contornos, (acomodando o carregamento o que leva a uma deformação permanente) a geração microtrincas e coalescência de vazios em contornos de grão que fragilizam o material. Portanto, uma liga com tamanho de grão grosseiro terá maior resistência à fluência uma vez que sua tendência ao crescimento será bem menor do que em um material de grãos muito finos. Vale lembrar, que o crescimento de grão em um material além de ser uma função do quadrado do tempo e da quarta potência em relação a temperatura ( $CG = f(t^2, T^4)$ ) também depende do tamanho de grão inicial. De modo que, quanto menor o tamanho de grão inicial mais superfície de contorno de grão estará disponível para a reação de crescimento, ou seja, maior será a força motriz.



**Figure 8.37** (a) Polycrystalline turbine blade that was produced by a conventional casting technique. High-temperature creep resistance is improved as a result of an oriented columnar grain structure (b) produced by a sophisticated directional solidification technique. Creep resistance is further enhanced when single-crystal blades (c) are used. (Courtesy of Pratt & Whitney.)

**ii) Elementos de liga** - A composição química desempenha papel importante no comportamento das ligas, não só para o comportamento em fluência mas também para diversas outras propriedades. No caso da fluência, os elementos de liga com capacidade de endurecimento em solução sólida, ou que sejam capazes de se combinar com outros elementos da matriz formando carbonetos e precipitados que interfiram com os mecanismos de movimentação atômica como os movimentos de contorno de grão e discordâncias melhoram a vida em fluência. No caso dos aços o Mo (normalmente em teores de 0,5 a 1,0%) é o principal elemento empregado quando se deseja obter boas propriedades para uso em condições sujeitas à fluência.