

# FLUÊNCIA

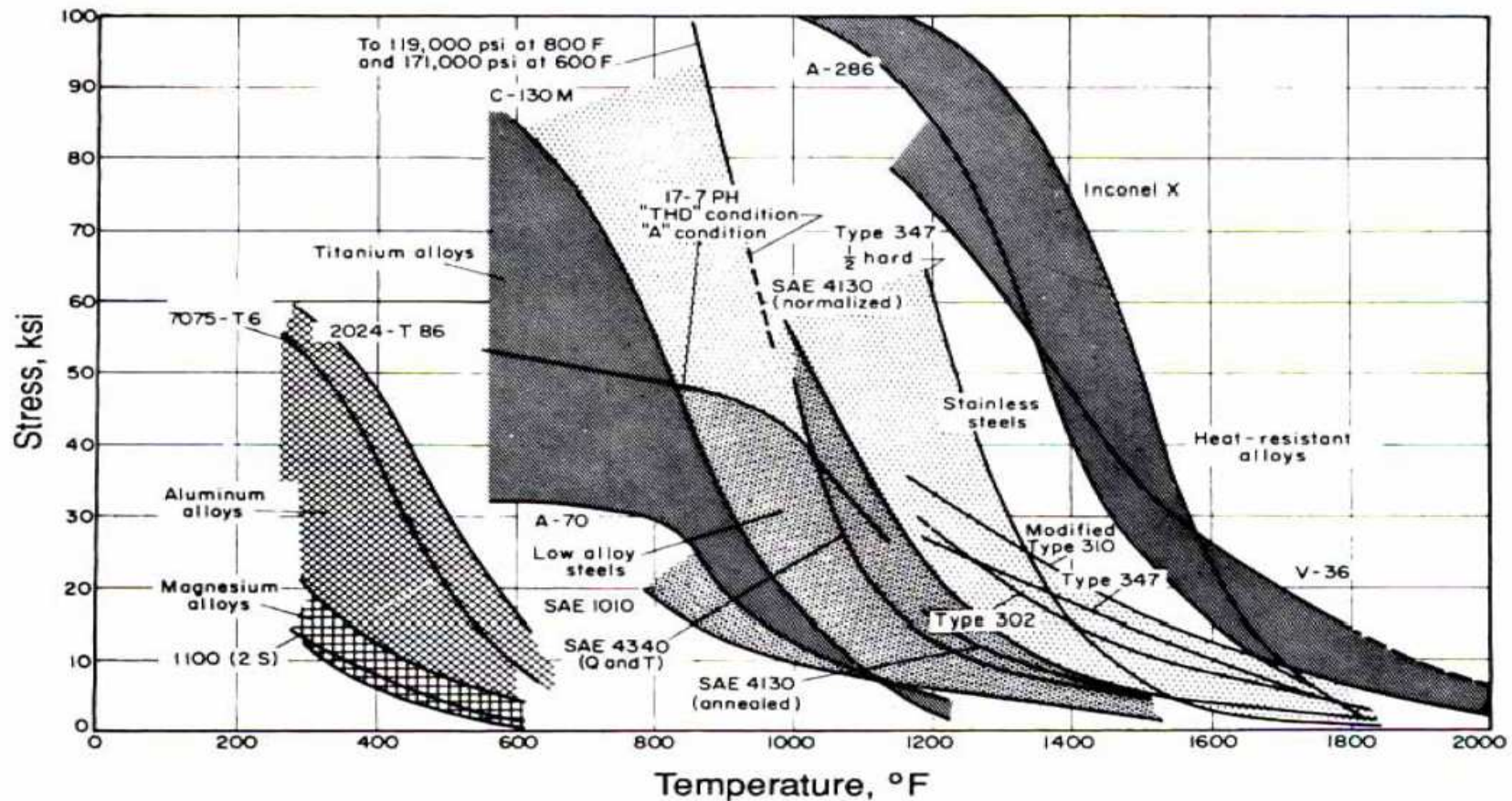
# CONTEÚDO

- 1. Introdução**
- 2. Modos de Fratura em Altas Temperaturas**
- 3. Ensaaios de fluência**
- 4. Mecanismos de fluência**
- 5. Parâmetros Tempo-Temperatura e Estimativa de Vida**

# 1. Introdução

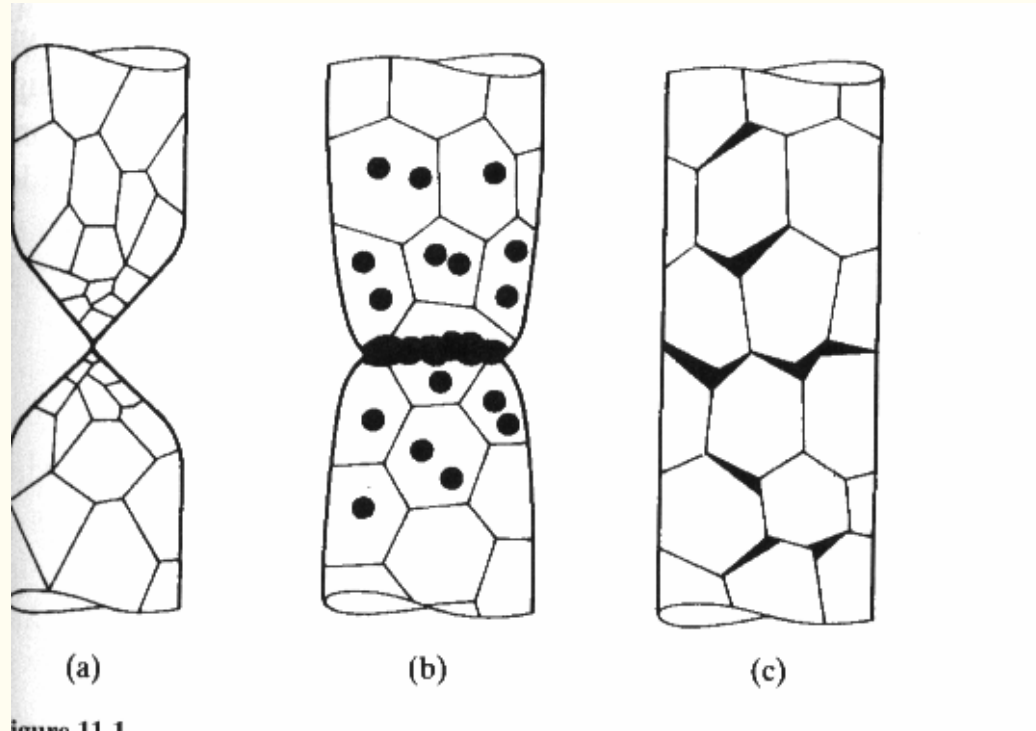
- Freqüentemente os materiais são submetidos a operações por longos períodos sob condições de elevadas temperaturas. Estas condições são favoráveis a mudanças de comportamento dos materiais em função do processo de difusão dos átomos, movimento de discordâncias, escorregamentos de contornos de grãos e da recristalização.
- O processo de fratura tecnologicamente mais importante em alta temperatura é a *Fratura por Fluência*.
- Assim, o fenômeno da fluência deve ser levado em consideração no projeto de componentes que trabalharão em altas temperaturas, tais como:
  - Turbinas a vapor e aeronáutica,
  - Vasos de pressão em sistemas geradores de energia.
  - Outros exemplos: filamento de lâmpadas, o relaxamento dos aros das armações oculares e deformação em tubos de plástico.
- O ensaio de Fluência é utilizado para análise dos materiais sob estas condições e que permitam evitar a falha por fluência.

- No caso de metais e cerâmicas cristalinas, a deformação por fluência é importante quando a *temperatura de trabalho é da ordem de 30 a 60%* da temperatura absoluta de fusão ( $T_{\text{fusão}}$  em K ou  $T_m$ ).
- Grande quantidade de fluência pode ocorrer em polímeros e vidros quando submetidos a carregamentos em temperaturas acima de  $T_g$  (temperatura de transição vítrea).
- Existe uma grande diferença no comportamento em fluência entre as diferentes classes de metais.



Tensão x Temperatura para causar 3% de deformação em um tempo de 10 min<sub>4</sub>

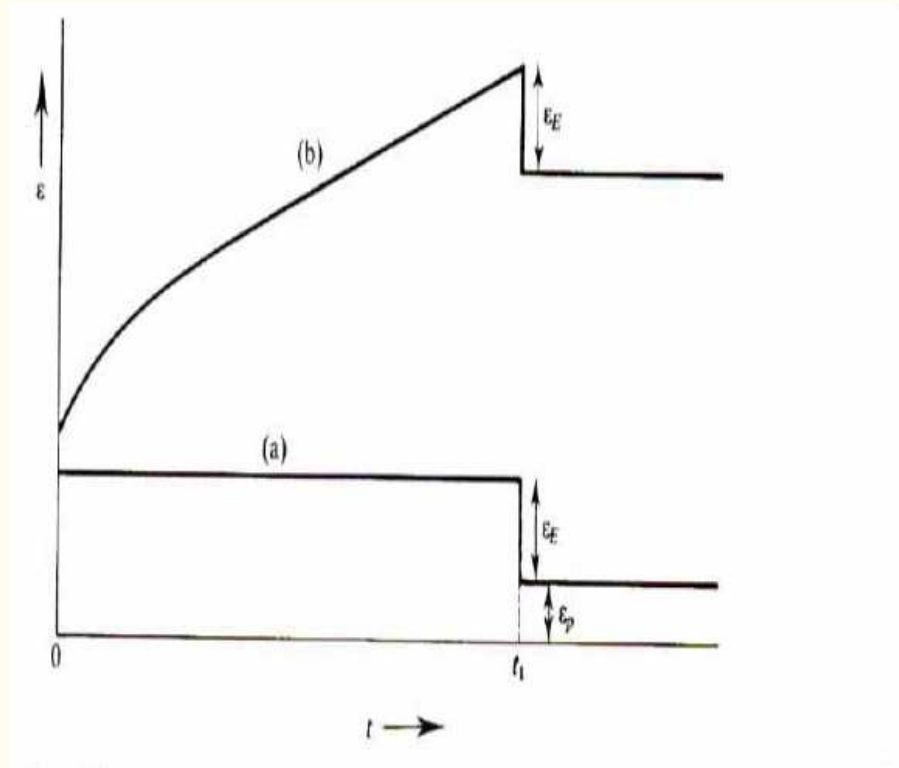
## 2. Modos de Fratura em Altas Temperaturas



- a) **Ruptura:** redução de área próxima a 100%, normalmente o fenômeno de recristalização dinâmica que previne a nucleação interna de microvazios.
- b) **Fratura por fluência transgranular, FFT:** é o tipo de fratura análogo a fratura dútil em baixa temperatura.
- c) **Fratura por fluência intergranular, FFI:** acontece em níveis de tensão e taxas de deformação abaixo das que causam FFT. Durante a FFI a formação de vazios acontece nas partículas de segunda fase e inclusões formadas ao longo dos contornos.

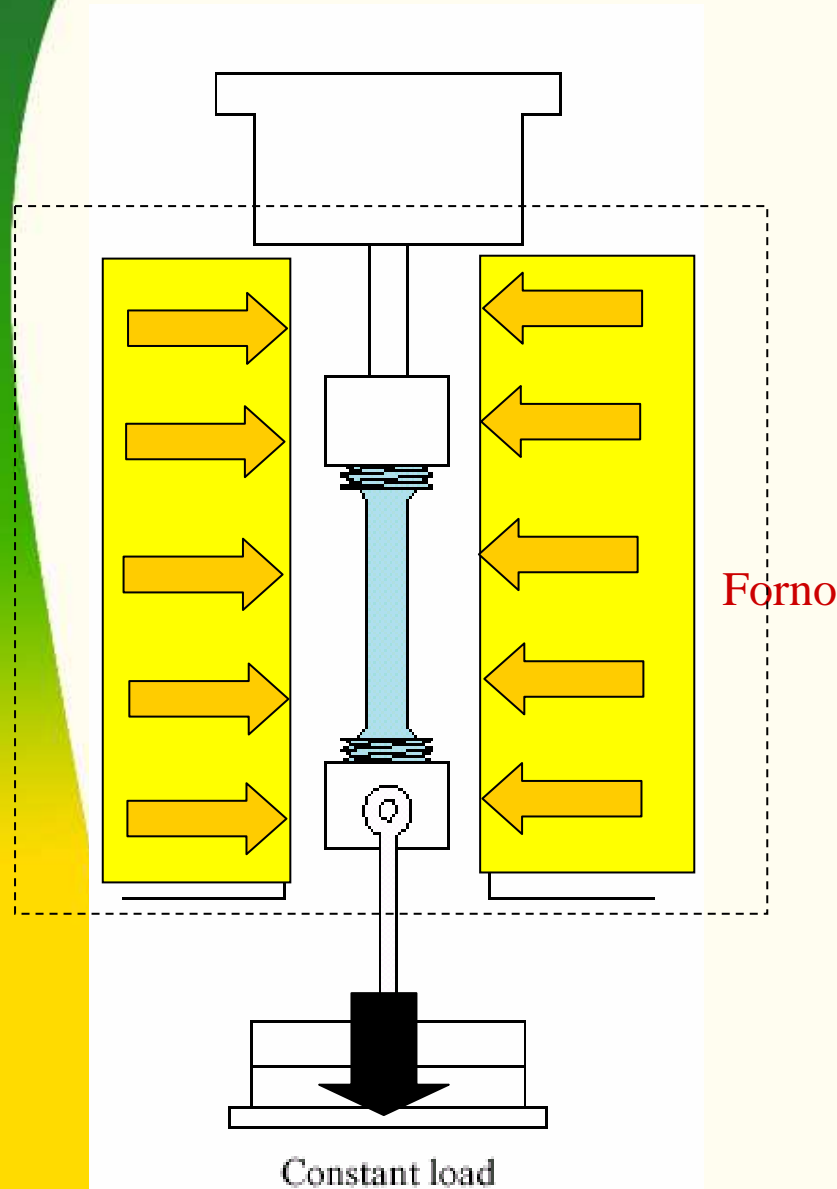
# Tensão Aplicada e de Escoamento

Se a tensão aplicada é maior do que a tensão limite de escoamento, então imediatamente ocorrerá uma deformação plástica independente do tempo.



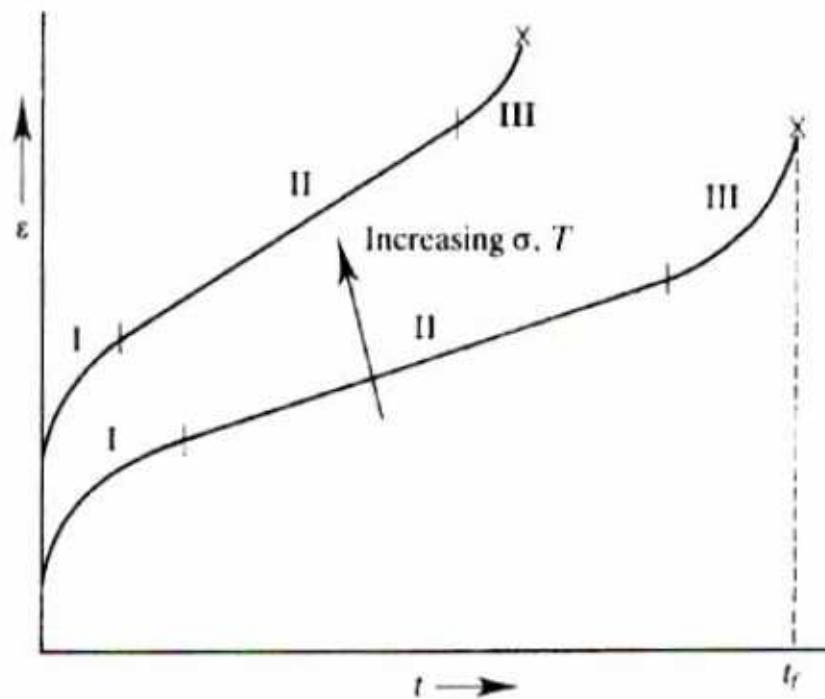
- Quando a tensão for removida, será restituída a deformação elástica e a deformação plástica permanecerá.
- Três variáveis estão envolvidas no processo de fluência: tensão constante (relativa a tensão limite de escoamento), temperatura e tempo.
- A taxa de deformação é uma outra variável importante num processo de deformação.

### 3. Ensaio de Fluência

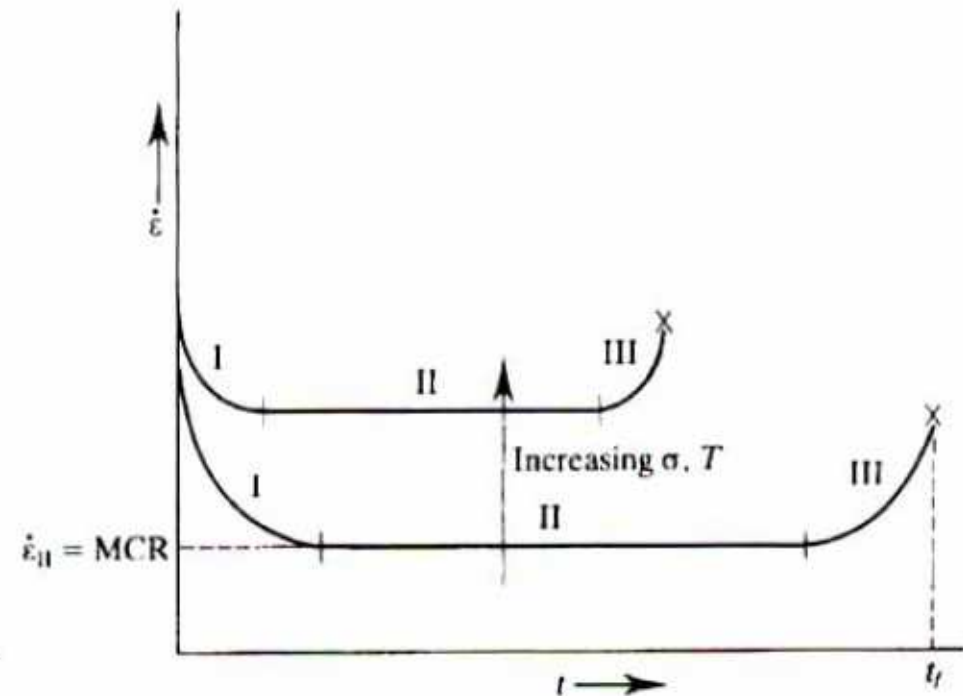


- O ensaio de fluência é executado pela aplicação de uma carga uniaxial constante a um CP de mesma geometria dos utilizados nos ensaios de tração, a uma temperatura elevada e constante.
- O tempo de aplicação de carga é principalmente em função da vida útil esperada do componente que será fabricado com o material submetido ao ensaio.
- As deformações que ocorrem no CP são medidas em função do tempo de realização do ensaio e indicadas na forma de gráfico  $\epsilon$  versus  $t$ .

## Comportamento observado no Ensaio de Fluência



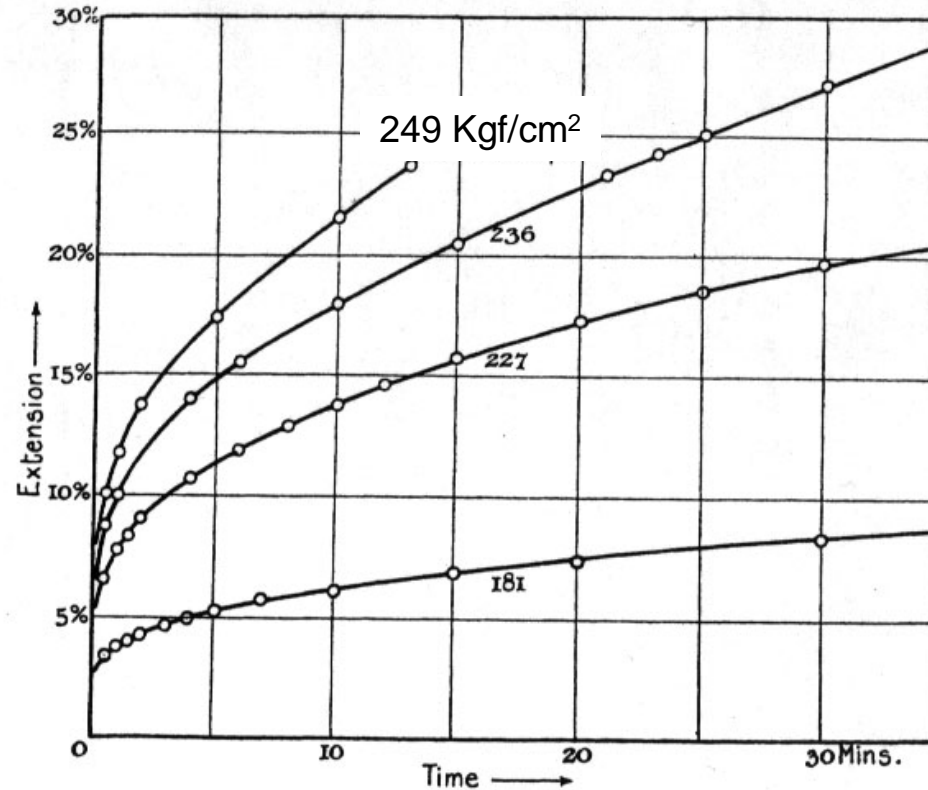
(a)



(b)

- No início a deformação é instantânea e principalmente elástica.
- I. **Primário** - Fluência transiente. A inclinação def. x tempo diminui com o tempo: encruamento.
- II. **Secundário** - fluência no estado estacionário. A taxa de def. é const.: encruamento e recuperação.
- III. **Terciário** - Taxa de deformação acelera rapidamente até a falha: formação de trincas internas, vazios, separação de grãos e empescoçamento





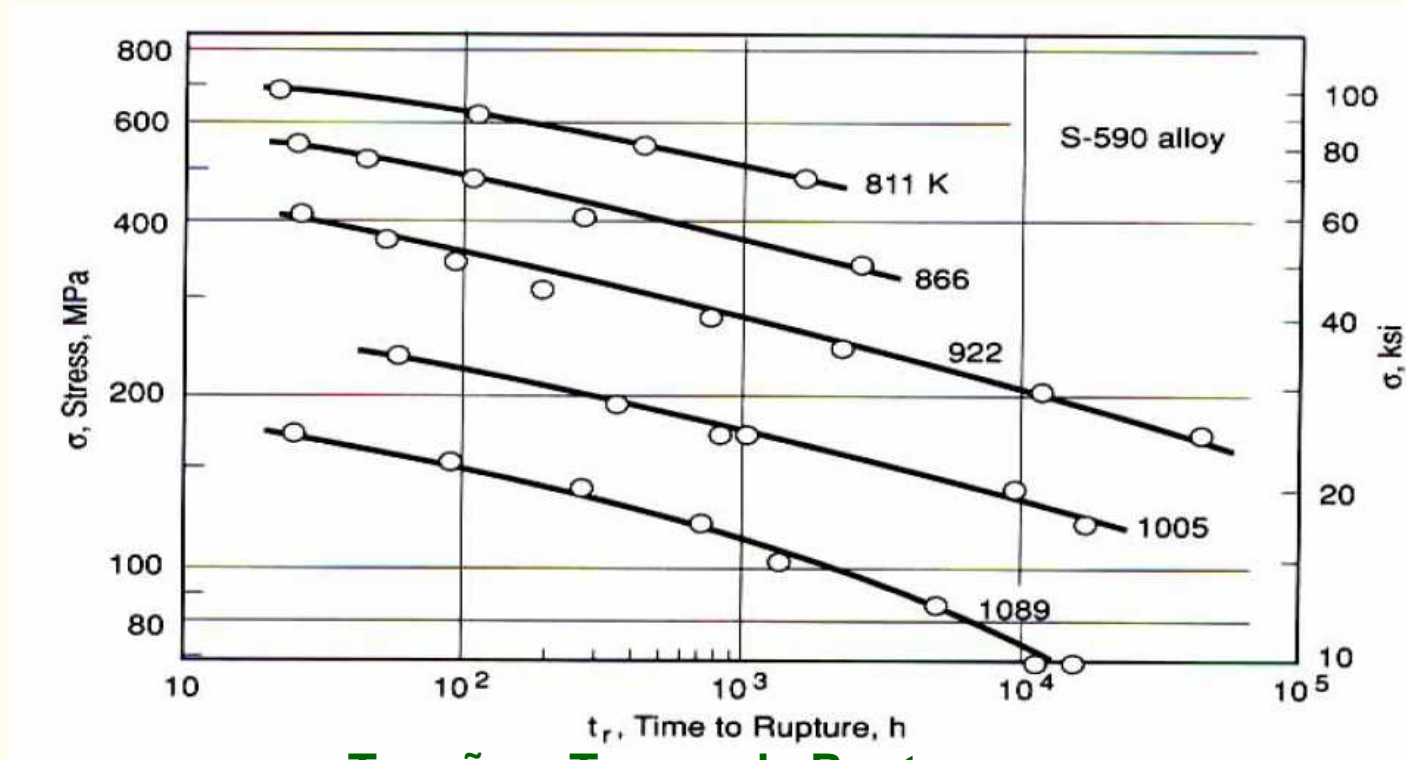
$$\sigma \uparrow \Rightarrow \dot{\epsilon} \uparrow$$

Creep curves for lead at 17°C from the early work of Andrade, where 1 kg/cm<sup>2</sup> = 0.0981 MPa. (From [Andrade 14]; used with permission.)

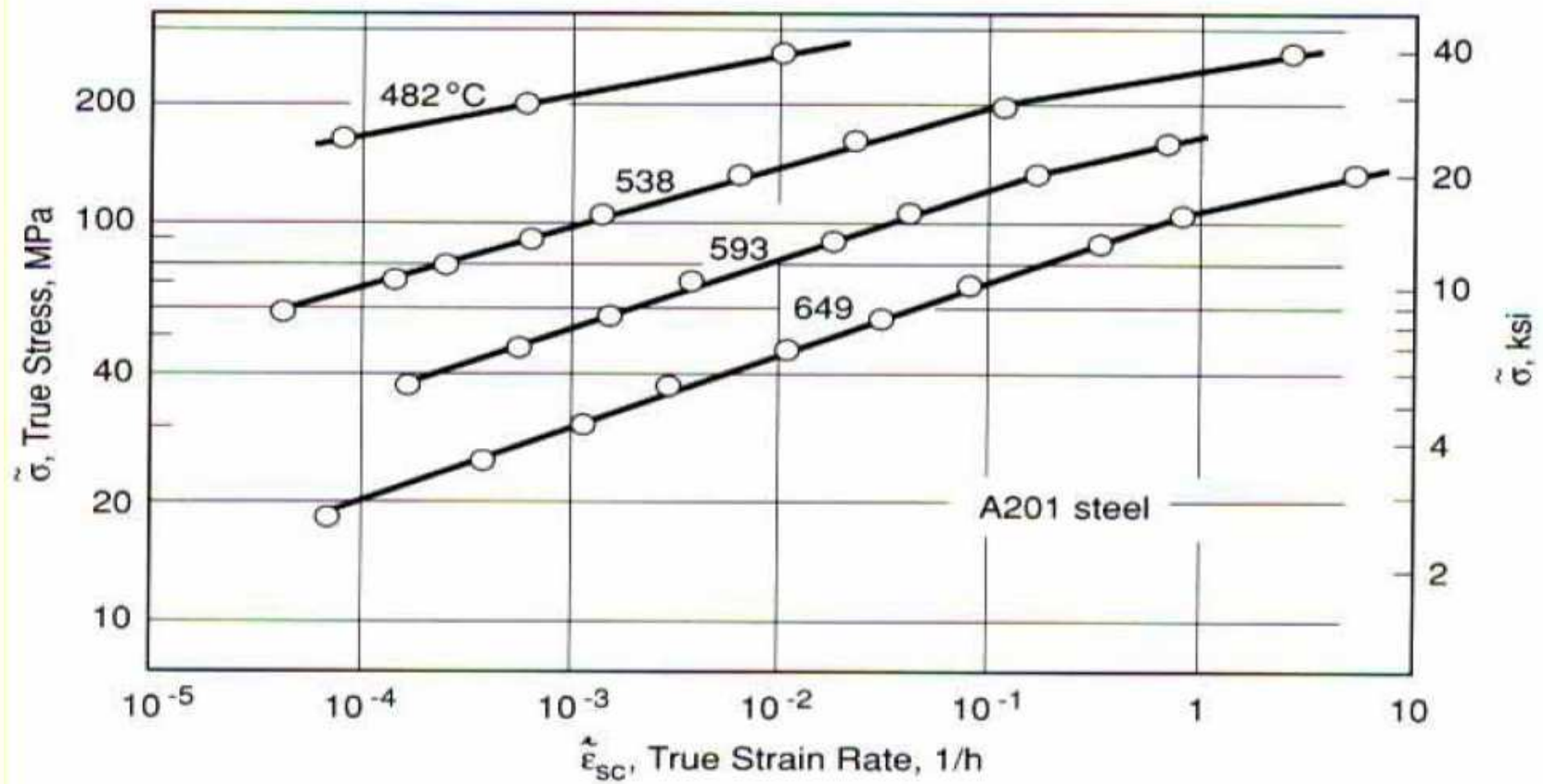
- Dados obtidos considerando tensão verdadeira constante. Observa-se a não existência do estágio terciário. Isto é decorrente do uso da tensão verdadeira constante (O 3º estágio acontece devido a redução acentuada da área).
- Em alguns casos a aceleração do estágio terciário não é devida a mudanças no comportamento do material, mas sim devido a diminuição da secção transversal. Isto causa o aumento da tensão verdadeira, que por sua vez causa um aumento da taxa de deformação.

## Representação dos Resultados dos Ensaios de Fluência

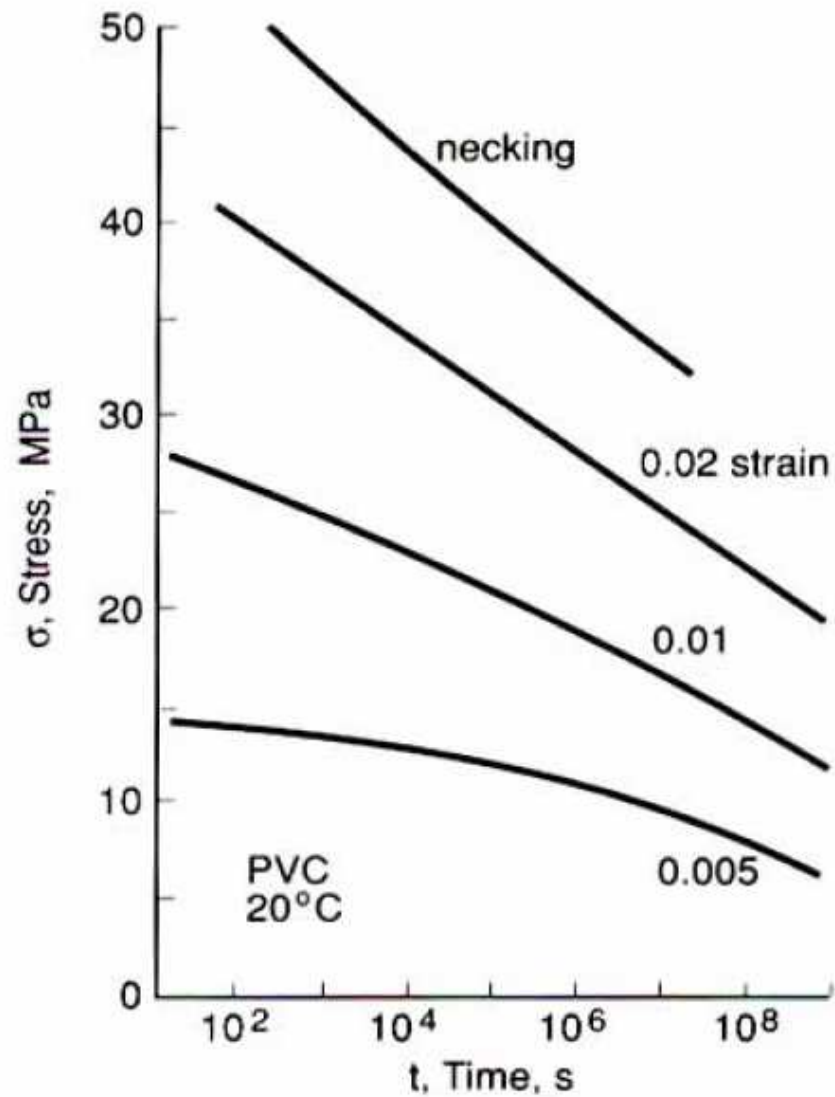
- Os dados do ensaio de fluência pode ser sumarizado considerando os quatro parâmetros seguintes.
  - Tensão,  $\sigma$ ,
  - Temperatura,
  - Taxa de fluência constante,  $\dot{\epsilon}_{SC}$
  - Tempo de ruptura.
- Existe uma grande variedade de formas de se apresentar os dados de um ensaio de fluência em diferentes temperaturas e tensões:



**Tensão x Tempo de Ruptura**  
Analogia com a curva tensão - Vida

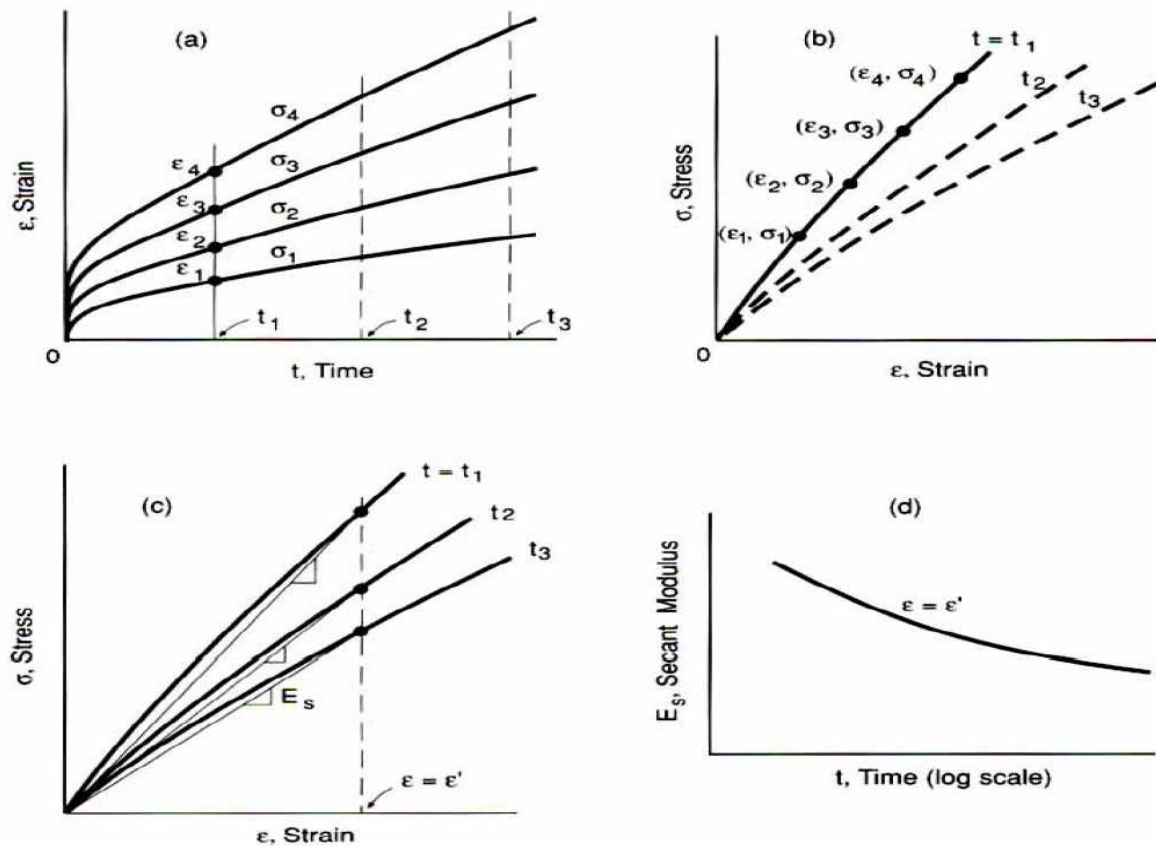


**Tensão Verdadeira x Taxa de Deformação Verdadeira de regime em várias temperaturas**



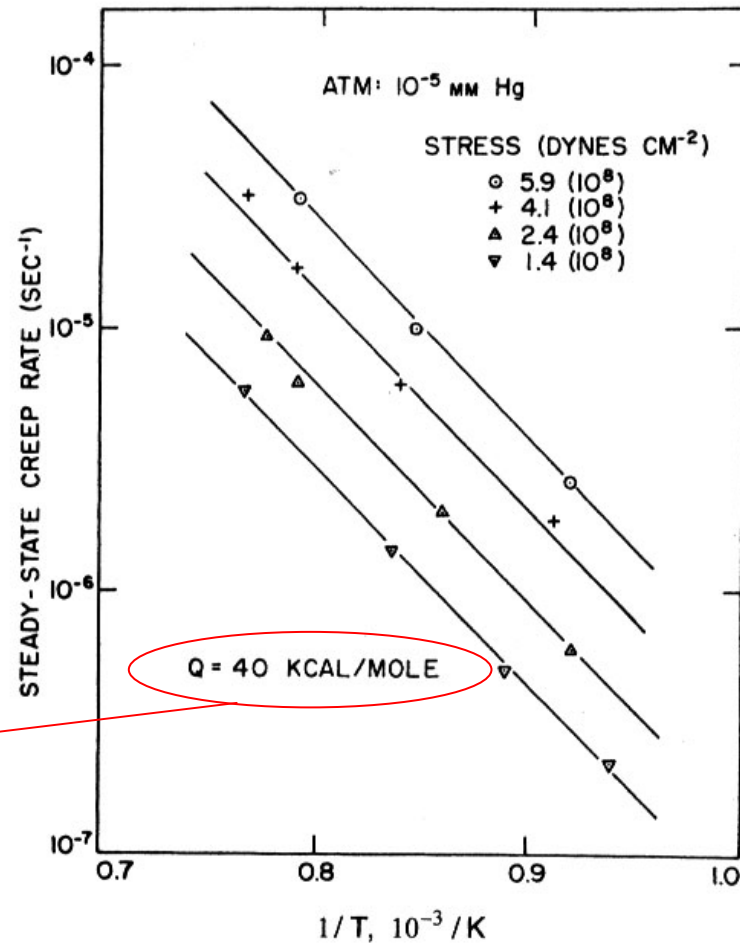
**Tensão x Tempo (para causar uma determinada deformação)**

- Curvas de Tensão – Def. para valores constante de tempo são muitas vezes necessárias.
- No caso de polímeros é muito comum a determinação do módulo secante  $E_s$ , correspondente a uma determinada deformação  $\epsilon'$ , que é então colocado em gráfico em função do tempo.



Curva Tensão - Deformação isócrona (mesmo tempo)

- De particular importância são as curvas da taxa de deformação em regime (região II) versus  $1/T$ . A inclinação destas curvas fornece a energia de ativação



Energia de ativação aparente

Steady-state creep rate versus reciprocal of absolute temperature for single crystals of titanium oxide ceramic,  $\text{TiO}_2$ , also called *rutile*, tested under compression in a vacuum, where  $1 \text{ dyne/cm}^2 = 10^{-7} \text{ MPa}$ . (Adapted from [Hirthe 63]; reprinted by permission of the American Ceramic Society.)

## 4. Mecanismos de Fluência

- Os mecanismos causadores de fluência diferem acentuadamente para as diferentes classes de materiais.
- Mesmo para uma classe de materiais, diferentes mecanismos agem dependendo das diferentes combinações de tensão e temperatura (Mapas de Micromecanismos de Fratura).
- Movimentos de átomos , vacâncias, discordâncias ou moléculas dentro dos sólidos ocorrem dependentemente do tempo, sendo mais ativos em temperaturas mais elevadas.
- Tais movimentos são importantes na explicação do comportamento em fluência e são genericamente chamados de **MECANISMOS DE DIFUSÃO**.

- Como no caso das deformações independentes do tempo, o movimento de discordâncias tem um papel importante no caso da fluência;
- Como pode ser observado, na fluência primária ocorre o aumento do número de discordâncias causa o encruamento, que é o responsável pela redução da taxa de deformação neste estágio;
- A densidade das discordâncias não pode aumentar indefinidamente, pois a partir de certa deformação tem-se o início do processo de recristalização, sendo que após algum tempo o equilíbrio é atingido (criação de aniquilação de discordâncias) e tem-se início o 2º estágio.

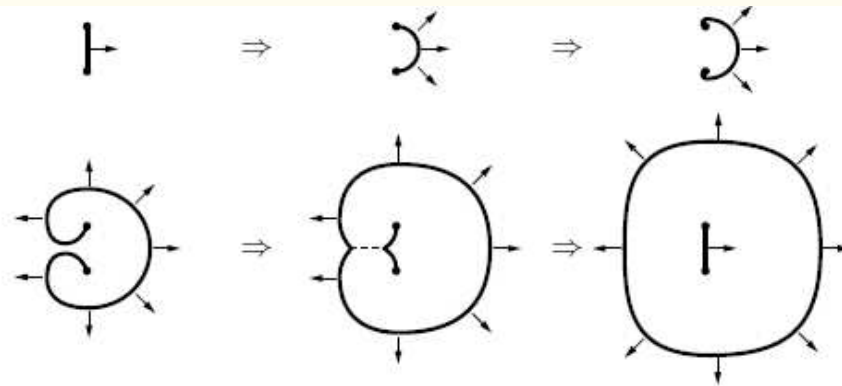
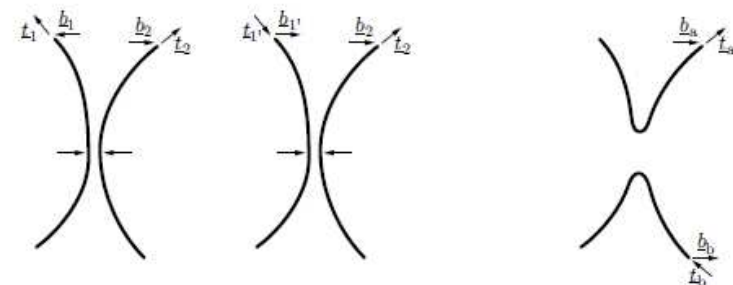


Fig. 6.19. Formation of dislocations by a Frank-Read source



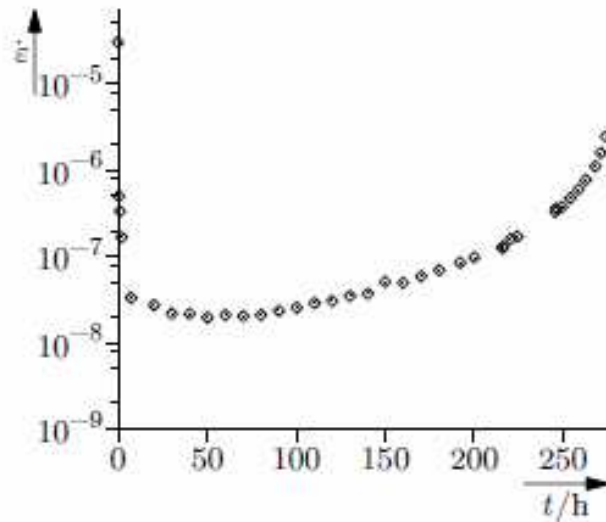
(a) Before the annihilation. In the left figure, both Burgers vectors have the opposite orientation; in the right figure, the line vectors have the opposite orientation. Both notations of the vectors  $(\underline{b}_1, \underline{t}_1)$  and  $(\underline{b}_1', \underline{t}_1')$  are equivalent. The adjacent dislocation segments attract and annihilate

(b) After the annihilation

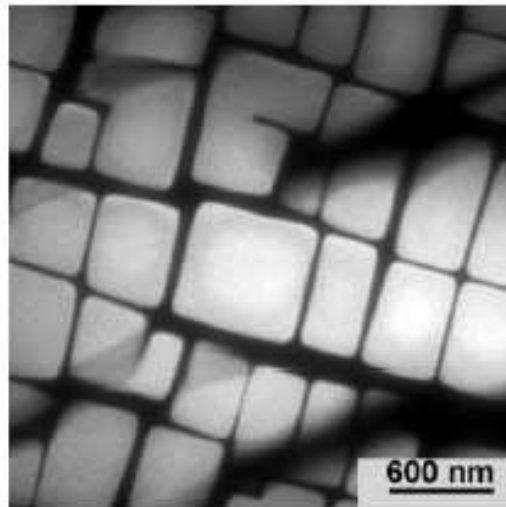
Fig. 6.21. Annihilation of dislocation segments



- Em alguns materiais, a microestrutura pode mudar em temperaturas elevadas, por exemplo as partículas de precipitado podem coalescer com o tempo e não haver a região de fluência em regime (2º estágio), e a taxa aumenta continuamente após um mínimo ser atingido.

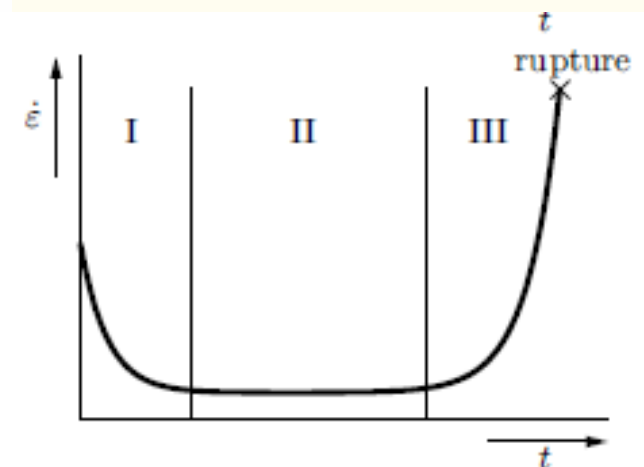


(a) Experimental results for the creep rate versus time



(b) Micrograph. The bright particles are the  $\gamma'$  precipitates (see also page 404)

**Fig. 11.4.** A nickel-base superalloy changes its microstructure during loading. There is no stationary value of the creep rate analogous to figure 11.1(a)



## 4.1 Fluência Considerando a Viscosidade

- Alguns sólidos comportam-se de maneira similar ao um líquido com uma viscosidade muito alta.

$$\eta_{\tau} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \Rightarrow \text{Viscosidade cisalhante}$$

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} \Rightarrow \text{Viscosidade Trativa}$$

- Para uma substância com viscosidade ideal  $\eta = 3\eta_{\tau}$
- Um valor constante de  $\eta$  corresponde ao comportamento ideal de um amortecedor, com a relação força – deslocamento da forma:

$$P = c\dot{x}$$

- Alguns sólidos comportam-se de maneira similar ao um líquido com uma viscosidade muito alta. É o caso de sólidos amorfos (vidros) e alguns polímeros.
- Em resposta a tensão aplicada ao material, moléculas ou grupos de moléculas se movem relativamente umas a outras em um modo dependente do tempo, resultando em deformação por fluência.

- Este tipo de movimento é dependente da temperatura. Tal situação é denominada de **ATIVACÃO TÉRMICA** e segue o modelo proposto por Arrhenius:

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- **Q** é a energia de ativação, cal/mol ou J/mol e é a medida da barreira energética que deve ser vencida para o movimento molecular ocorrer.
  - Se **Q** é obtido em (cal / moles) **R** que é a constante dos gases é **R = 2 cal/(K.mol)** ou **R = 8,31 J/(K.mol)** se **Q** for obtido em J/moles.
  - **T** é dado em **K**.
- Ou ainda uma mais completa envolvendo a tensão e temperatura:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- **A1** depende do material e **Q** pode mudar se os mecanismos físicos forem alterado devido a mudança rápida da tensão ou temperatura.
- Esta equação é bastante importante quando a fluência é devida a escoamento viscoso.

## 4.2 Fluência em Polímeros

- Abaixo de  $T_g$ , os efeitos de fluência são pequenos.
- Acima de  $T_g$  o efeito torna-se rapidamente significativo.
- Como a  $T_g$  é geralmente entre  $-100$  e  $+200$  °C, ela pode ser excedida mesmo abaixo ou por volta da temperatura ambiente.
- No caso de polímeros primariamente cristalinos, o escoamento viscoso acontece em temperaturas bem acima de  $T_g$ , especialmente próximo a temperatura de fusão. Neste caso, a fluência ocorre pelo escorregamento das cadeias moleculares em uma maneira viscosa.
- O comportamento é mais complicado em temperaturas intermediárias onde o comportamento é similar ao da borracha e o escorregamento é dificultado e as cadeias estão mais facilmente enroladas, particularmente se as cadeias são longas.
- Outros obstáculos como ligações cruzadas e ramificações de cadeias podem reduzir a deformação por fluência.
- Estes obstáculos podem causar o efeito memória e após a remoção do carregamento as deformações tendem a desaparecer com o tempo.

## 4.3 Fluência em Materiais Cristalinos

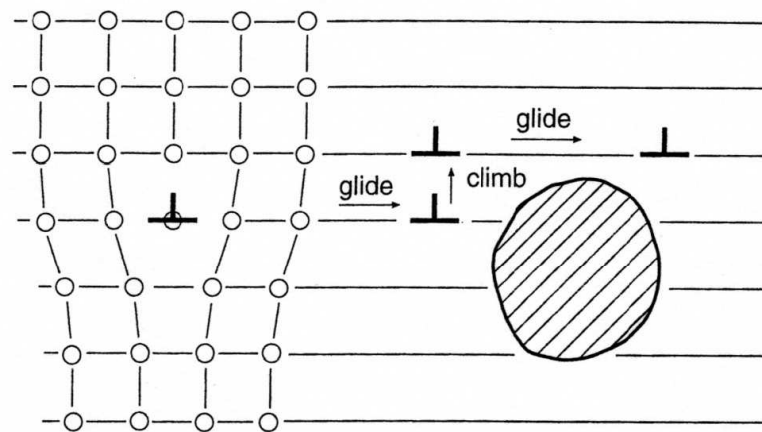
- **Consistem de metais e cerâmicas cristalinas.**
- Uma variedade de mecanismos ocorrem, que podem ser separados em duas grandes classes.
  - Fluência Difusional
    - Difusão de vacâncias pelo retículo cristalino.
    - Difusão de vacâncias nos contornos de grãos.
  - Fluência por movimento de discordância (dislocation creep);
  - Fluência por escorregamento de grãos.
- A equação geral que representa a taxa de deformação em regime é dada por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A_2 \sigma^m}{d^q T} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- Onde **d** é o tamanho de grão.
- **A<sub>2</sub>, m e q** e a energia de ativação, **Q**, têm valores que dependem do material e em particular dos mecanismos de fluência que está atuando. **m** é o expoente de fluência .

## Fluência por Movimento de Discordância

- Similar a deformação em baixas T, mas em altos T as discord. podem escapar aos obstáculos emitindo ou recebendo vacâncias;
- Fluência por movimento de discordância (dislocation creep), envolve o movimento mais drástico de discordâncias. Conseqüentemente, altas tensões são necessárias, mas pode ocorrer em temperaturas intermediárias onde o escoamento difusional é baixo.
- O mecanismo é complexo e não é completamente entendido, sabe-se que a escalagem de discordâncias é importante e a taxa de def. é determinada pela taxa de emissão ou absorção de vacâncias



**Figure 15.14** Climb of an edge dislocation, permitting continued glide past an obstacle, and enabling deformation to proceed.

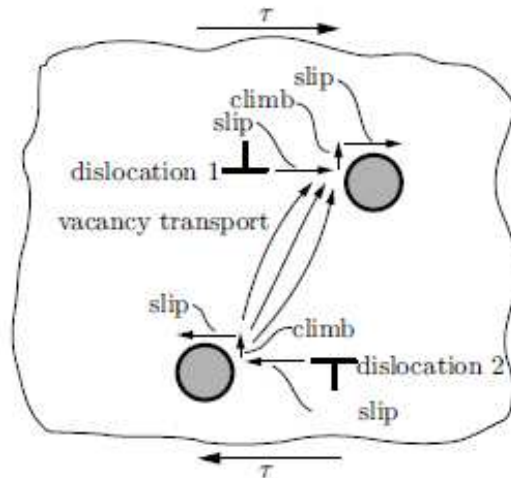


Fig. 11.5. Pile-up of dislocations at obstacles and vacancy diffusion. Dislocation 1 is a vacancy sink, dislocation 2 a vacancy source.

- Disc. absorve vacâncias e a 2 necessita emitir vacâncias para fazerem a escalagem;
- A densidade de fluxo das vacâncias,  $j$ , é dada por:

$$n = \exp\left(-\frac{Q_V}{kT}\right)$$

$$n_1 = \exp\left(-\frac{Q_V + \tau V^*}{kT}\right)$$

$$n_2 = \exp\left(-\frac{Q_V - \tau V^*}{kT}\right)$$

$$j = -D_0 \exp\left(-\frac{Q_{ex}}{kT}\right) \frac{\partial n}{\partial x}$$

Lei de Fick. Considerando que  $\tau V^*$  é pequeno comparado com  $Q_V$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial x} &= \frac{n_1 - n_2}{l} = -\frac{1}{l} \exp\left(-\frac{Q_V}{kT}\right) \left( \exp\left(\frac{\tau V^*}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\tau V^*}{kT}\right) \right) \\ &\approx -\exp\left(-\frac{Q_V}{kT}\right) \frac{2\tau V^*}{kT} \end{aligned} \quad (11.11)$$

- Considerando que  $\exp x = (1+x)$  para  $x$  pequenos:

$$j = -D_0 \exp\left(-\frac{Q_{ex}}{kT}\right) \frac{n_1 - n_2}{l}$$

$$= D_0 \exp\left(-\frac{Q_{ex}}{kT}\right) \frac{2\tau V^*}{lkT} \exp\left(-\frac{Q_V}{kT}\right).$$

$$j = \frac{2\tau V^*}{lkT} D_0 \exp\left(-\frac{Q_V + Q_{ex}}{kT}\right),$$

- No caso da taxa de deformação para fluência por movimento de discordâncias é proporcional a ao fluxo de vacâncias  $j$  e a densidade de discordâncias  $\delta$  e é dada por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{A\sigma^3}{kT} D_0 \exp\left(-\frac{Q_V + Q_{ex}}{kT}\right)$$

$$= \frac{A\sigma^3}{kT} D_V(T).$$

$$k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

- Onde  $V^*$  é o volume ativado (activation volume),  $l$  é a distância entre os obstáculos,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $A$  é parâmetro do material determinada experimentalmente,  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $Q_V$  é a entalpia para criar uma vacância,  $Q_x$  é a entalpia para migração da vacância é o volume da vacância,  $D_0$  é a constante de difusão de vacâncias.  $D_V$  é o coeficiente de difusão para difusão própria no volume de material.



## Fluência Difusional

- Escoamento difusional pode ocorrer em baixas tensões, mas requer temperaturas relativamente altas. Envolve o movimento de vacâncias no retículo cristalino.
- Se as vacâncias movem pelo retículo cristalino, o comportamento é chamado de **fluência NABARRO-HERRING** ( $m=1$  e  $q=2$ ).
- Se elas se movem pelos contornos, o comportamento é chamado de **fluência COBLE** ( $m=1$  e  $q=3$ ).
- As vacâncias surgem em contornos de grãos que estão perpendiculares a tensão trativa e movem para os CG em tensões compressivas ou com baixos valores de tensões trativas. O material move na direção oposta .

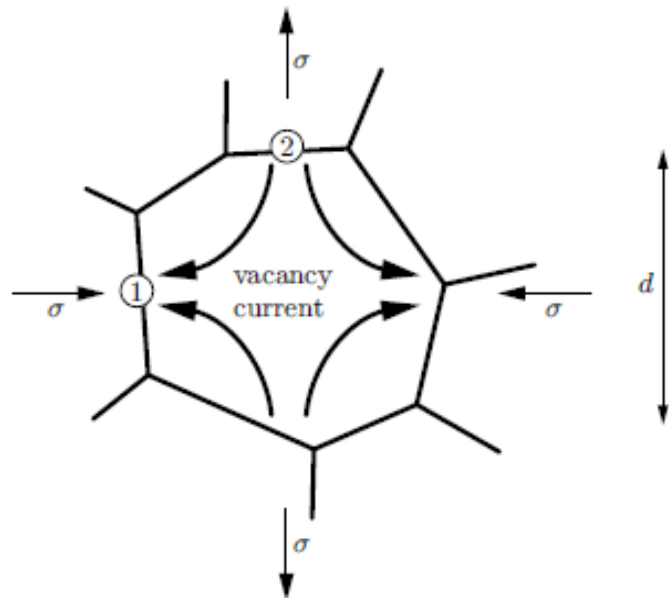


Fig. 11.6. Movement of vacancies in diffusion creep

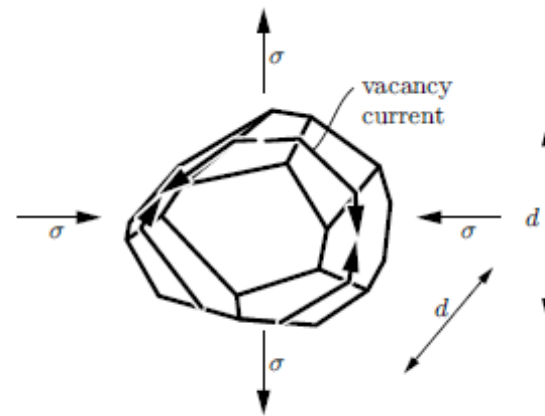


Fig. 11.7. Movement of vacancies along grain boundaries in diffusion creep

- A taxa de fluência é proporcional ao fluxo de vacâncias dividido pelo tamanho do grão

$$j = -D_0 \exp\left(-\frac{Q_{ex}}{kT}\right) \frac{n_1 - n_2}{d}$$

$$= \frac{2\sigma\Omega}{dkT} D_0 \exp\left(-\frac{Q_v + Q_{ex}}{kT}\right)$$

$$\dot{\epsilon} = A_{NH} \frac{\sigma\Omega}{kT} \frac{D_0}{d^2} \exp\left(-\frac{Q_v + Q_{ex}}{kT}\right)$$

$$= A_{NH} \frac{\sigma\Omega}{kT} \frac{D_v}{d^2}$$

$$k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

- Onde k é a constante de Boltzmann,  $A_{NH}$  é parâmetro do material,  $\sigma$  é a tensão aplicada,  $\Omega$  é o volume da vacância,  $D_0$  é a constante de difusão de vacâncias.  $D_v$  é o coeficiente de difusão para difusão própria no volume de material.

- No caso da taxa de deformação para fluência difusional nos contornos de grãos e é dada por:

$$\dot{\epsilon} = A_C \frac{\sigma \Omega}{kT} \frac{\delta D_{GB}}{d^3}$$

- Onde  $A_C$  é outra constante do material,  $\delta$  é a espessura do CG e  $D_{GB}$  é o coeficiente de difusão própria nos contornos de grãos.

## Fluência por Escorregamento de Grãos

- No caso da taxa de deformação para fluência por escorregamento de grãos é dada por:

$$\dot{\epsilon} = A_{GBS} \frac{\delta \sigma^n D_{GB}}{d}$$

- Onde  $A_{GBS}$  é outra constante do material,  $\delta$  é a espessura do contorno de grão,  $D_{GB}$  é o coeficiente de difusão própria nos contornos de grãos,  $n$  expoente de fluência (ou  $m$  como na equação da Tabela a seguir) para o escorregamento nos contornos de grãos

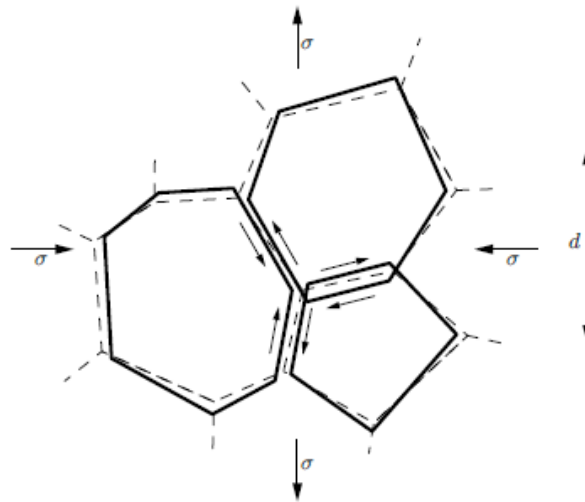


Fig. 11.8. Grain boundary sliding ensures the compatibility of grains which would be violated if only diffusion creep would occur

$$\dot{\epsilon} = \frac{A_2 \sigma^m}{d^q T} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

**TABLE 15.1 CREEP EXPONENTS FOR VARIOUS PHYSICAL MECHANISMS**

Name of Mechanism	$m$	$q$	Description
Diffusional flow (Nabarro-Herring Creep)	1	2	Vacancy diffusion through the crystal lattice
Diffusional flow (Coble creep)	1	3	Vacancy diffusion along grain boundaries
Grain boundary sliding	2	2 or 3	Sliding accomodated by vacancy diffusion through the crystal lattice ( $q = 2$ ) or along grain boundaries ( $q = 3$ )
Dislocation creep (Power law creep)	3 to 8	0	Dislocation motion, with climb over microstructural obstacles

## MAPAS DE MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO, MMD

- Os mecanismos de fluência diferem na sua dependência da temperatura por causa que a energia de ativação dos mecanismos é diferente. A dependência deles com a tensão também é diferente.
- Como vimos na Tabela, os valores do expoente de fluência ( $m$  ou  $n$ ) varia entre 1 para fluência por difusão e 3 para fluência por movimento de discordâncias;
- Os chamados MMD permite observar o mecanismos dominantes para condições diferentes;

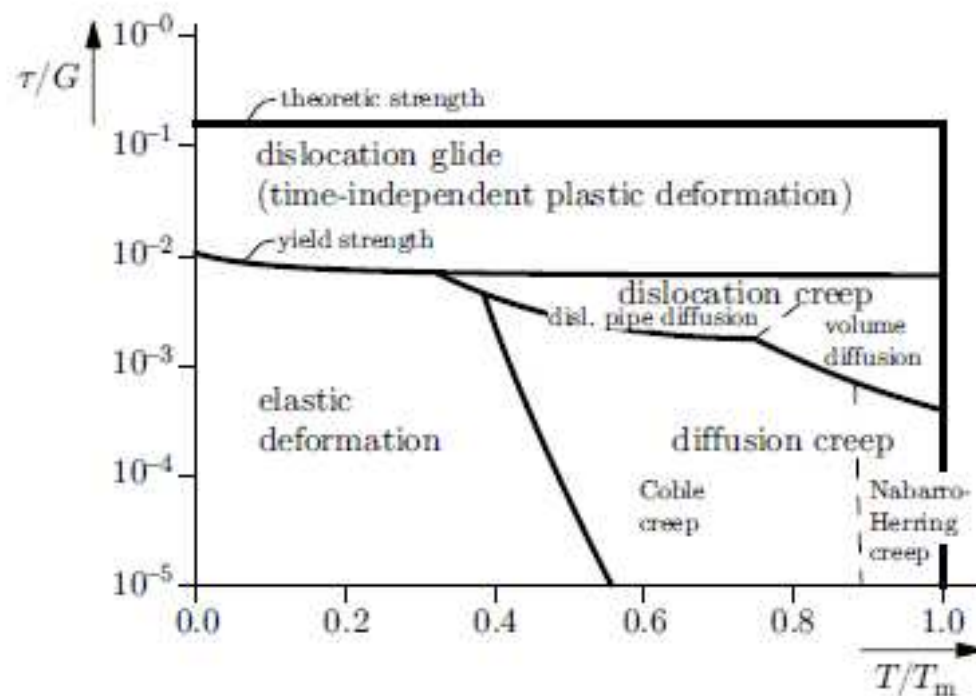


Fig. 11.9. Idealised deformation mechanism map (after [26])

- Baixa  $\sigma$  e baixa  $T$ : def. elástica;
- Alta  $T$  fluência difusional inicia, sendo mais forte em baixa  $\sigma$  do que fluência por movimentação de disc;
- Em baixa  $T$ , o mecanismo de difusão no CG é mais importante por causa de uma mais baixa  $Q$  para DCG do que para difusão no grão (bulk difusion) ;
- Altas  $\sigma$ , fluência por movimentação por discordâncias torna-se predominante.

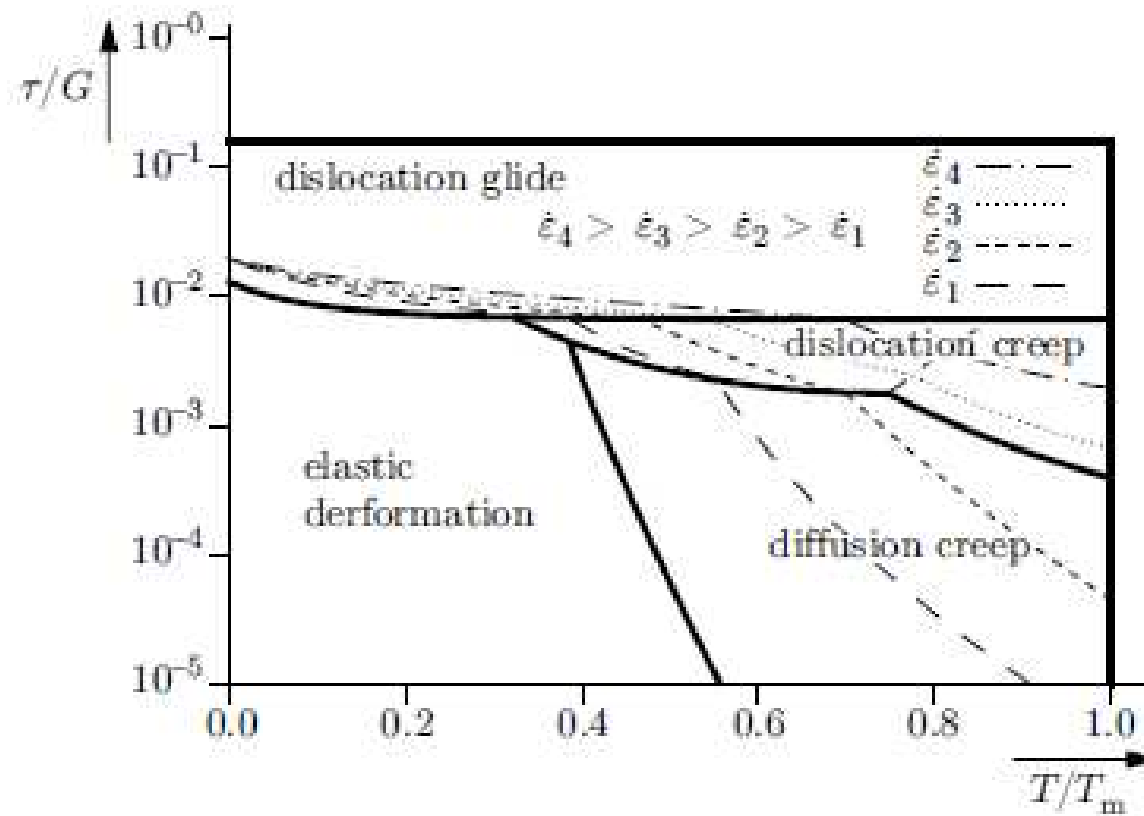
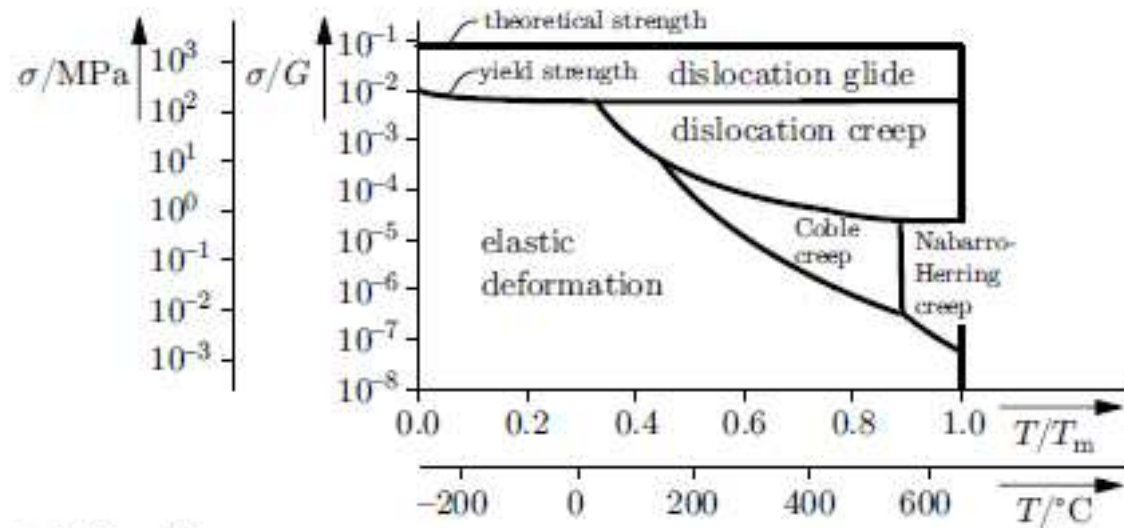
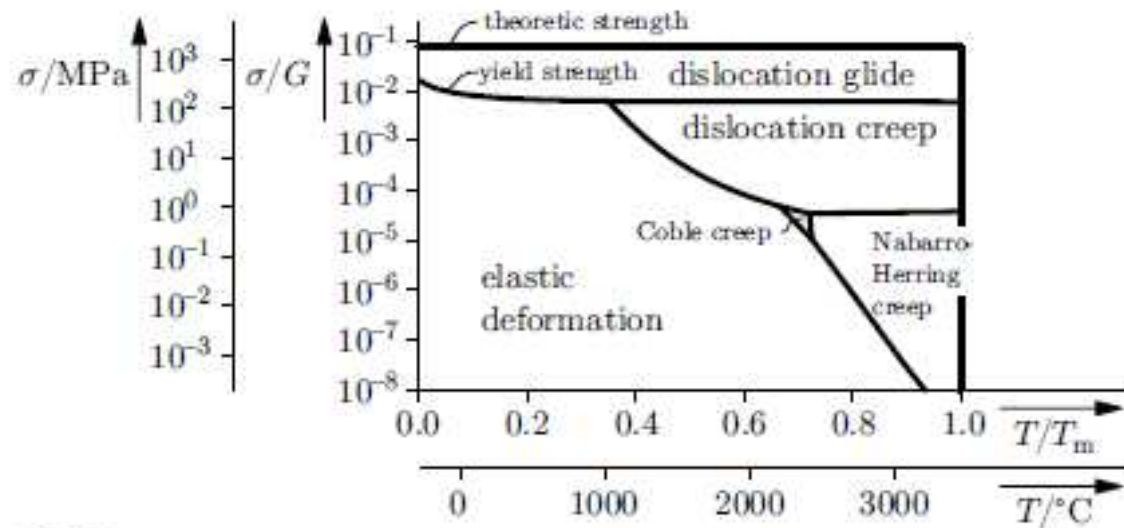


Fig. 11.12. Idealised deformation mechanism map at different strain rates (after [26])



(a) Aluminium



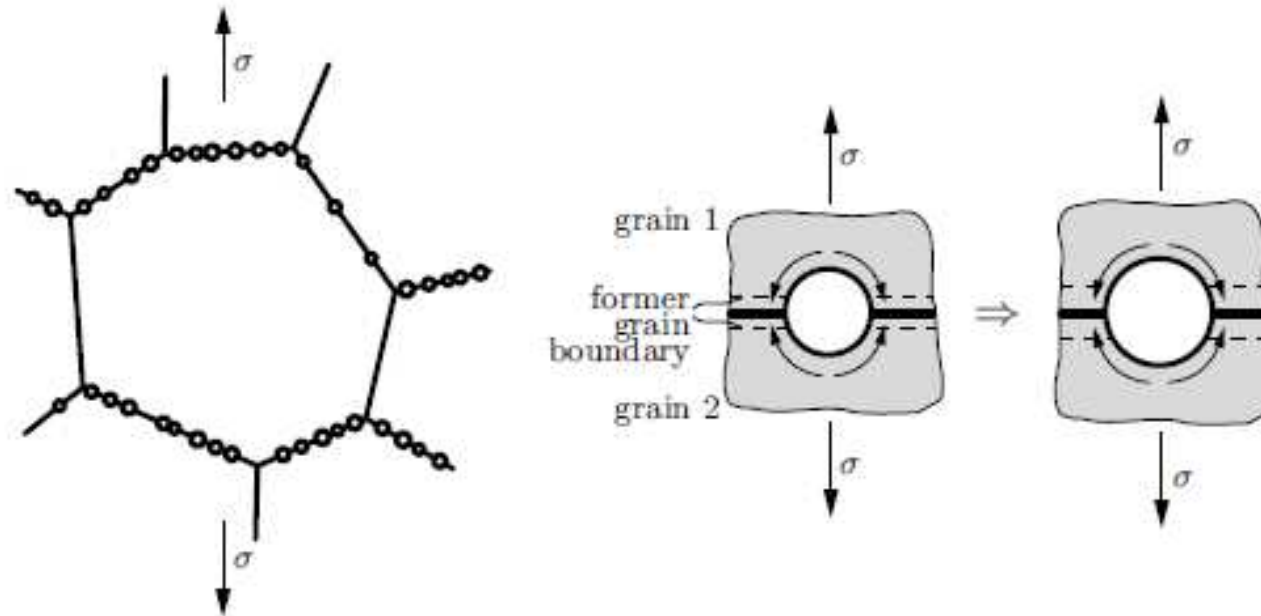
(b) Tungsten

**Fig. 11.10.** Deformation mechanism maps (after [35]). The grain size is  $32\ \mu\text{m}$  in both cases



## Fratura por Fluência

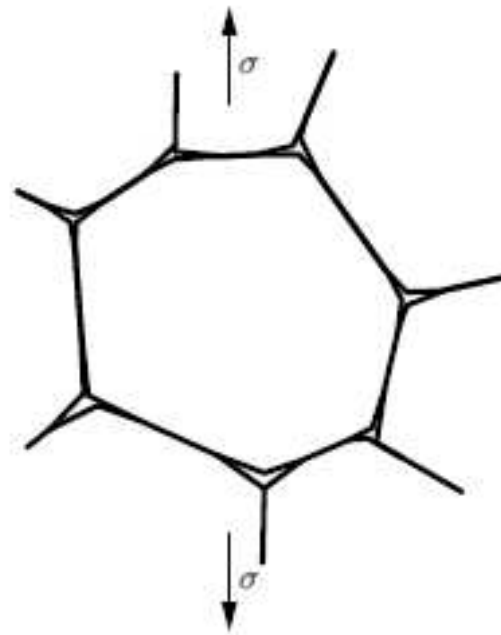
- Após um tempo de carregamento suficientemente longo, o material falha por fluência.
- A taxa de fluência é mínima no secundário e aumenta no terciário, terminando com a fratura, denominada de fratura por fluência;
- Na maioria dos casos, a fratura por fluência é a acontece pela falha nos contornos de grãos;



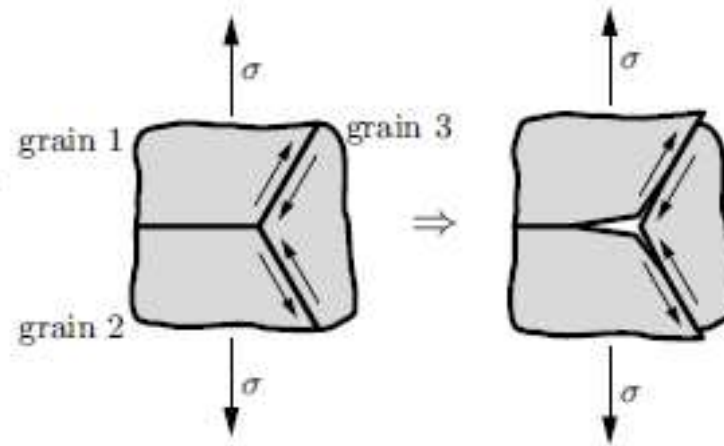
(a) Accumulation of cavities at the grain boundaries

(b) Mechanism of formation

Fig. 11.13. Schematic illustration of cavern-type pores at grain boundaries



(a) Wedge-type pores at triple-points of the grains

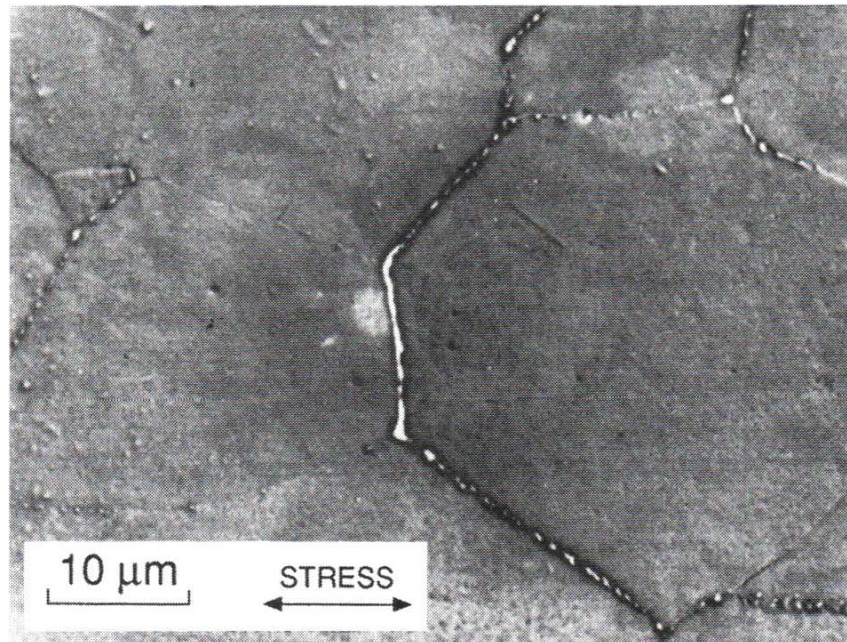


(b) Mechanism of formation

**Fig. 11.14.** Schematic illustration of wedge-type pores at triple-points

## 5. Parâmetro Tempo – Temperatura e Estimativa de Vida

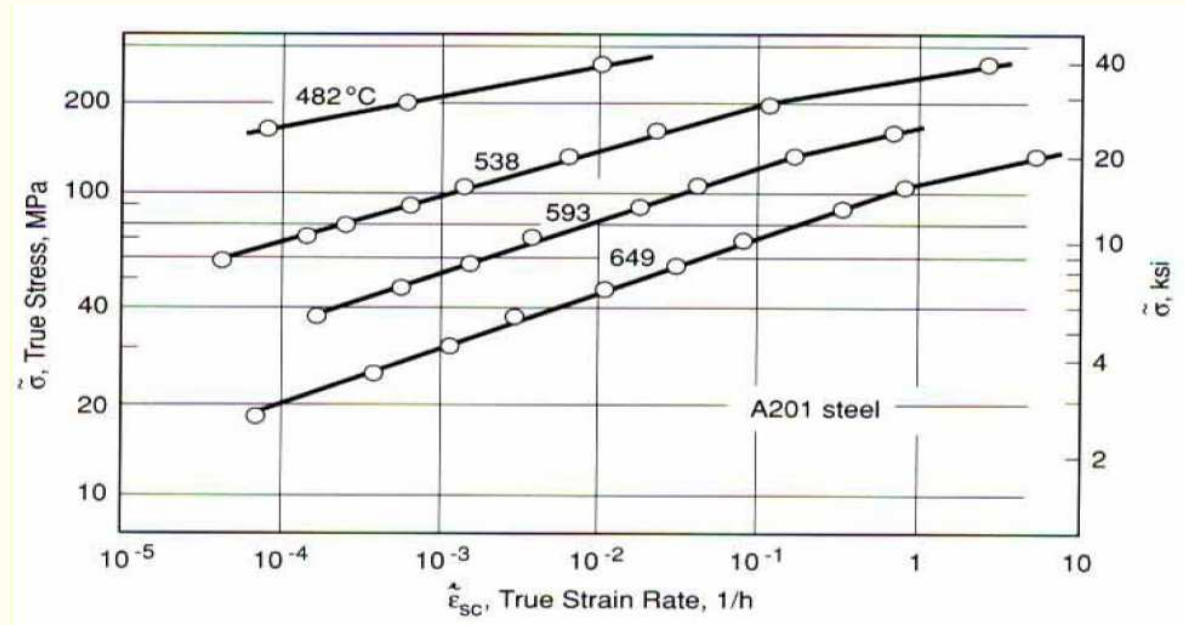
- A deformação pode proceder até a fratura do material pelo desenvolvimento de trincas, crazes ou outro tipo de dano que resultante da deformação intensa.
- Por exemplo vazios podem aparecer ao longo de contornos de grãos ou outros pontos com concentradores de tensões, tais como partículas de precipitadas pelo processo chamado de cavitação por fluência, que podem gerar trincas no material.



**Figure 15.18** Grain boundary cavitation and cracking due to creep in a tantalum alloy (T-111), tested under creep-fatigue interaction with temperature variation between 200 and 1150°C. (Adapted from [Sheffler 72].)

## 5. Parâmetro Tempo – Temperatura e Estimativa de Vida

- Em projetos de engenharia onde a fluência pode ocorrer, ***não deve acontecer excessiva deformação, nem a ruptura dentro da vida desejada em serviço***, que deve ser longa, como no caso de 20 anos.
- Ensaios estão limitados a geralmente a 1000 hr (42 dias), algumas vezes 10.000 hr (14 meses), mas raramente 100.000 hr (11 anos).
- Para estimativa do comportamento em baixas taxas de deformação e longas vidas, uma metodologia possível é estimar as deformações de fluência para a temperatura de serviço pela extrapolação da curva **tensão x taxa de deformação**



- Uma metodologia de mais sucesso é o uso de dados de ensaios de curta duração, mas em temperaturas acima da de serviço, para estimar o comportamento para uma vida mais longa na temperatura de serviço.
- Tais metodologias envolvem o uso do parâmetro tempo-temperatura. São os parâmetros:
  - **Sherby-Dorn**
  - **Larson-Miller**

## 5.1 Parâmetro de Sherby-Dorn (S-D)

- A equação de Arrhenius é a base para o parâmetro S-D.
- Ele considera que  $Q$  é constante e  $A = A(\sigma)$ . Assim, tem-se a equação na forma diferencial.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = A(\sigma) e^{\frac{-Q}{RT}}$$

$$d\varepsilon = A(\sigma) e^{\frac{-Q}{RT}} dt$$

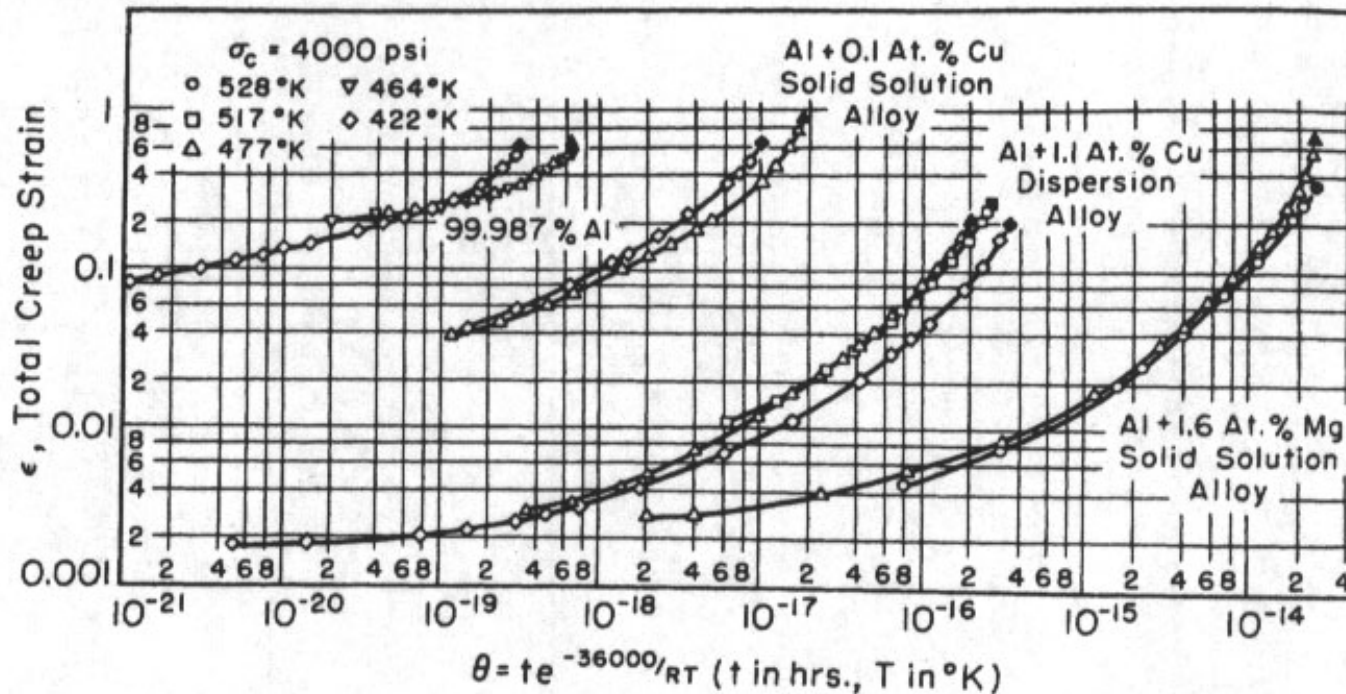
- Integrando ambos os lados e descartando as constantes de integração, obtêm-se a deformação em regime

$$\varepsilon_{sc} = A(\sigma) t e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- Esta equação sugere que as deformações de fluência para uma dada tensão, forma uma única curva se colocada em gráfico em função de  $\theta$ :

$$\theta = t e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- Que é chamado de parâmetro temperatura- tempo compensado



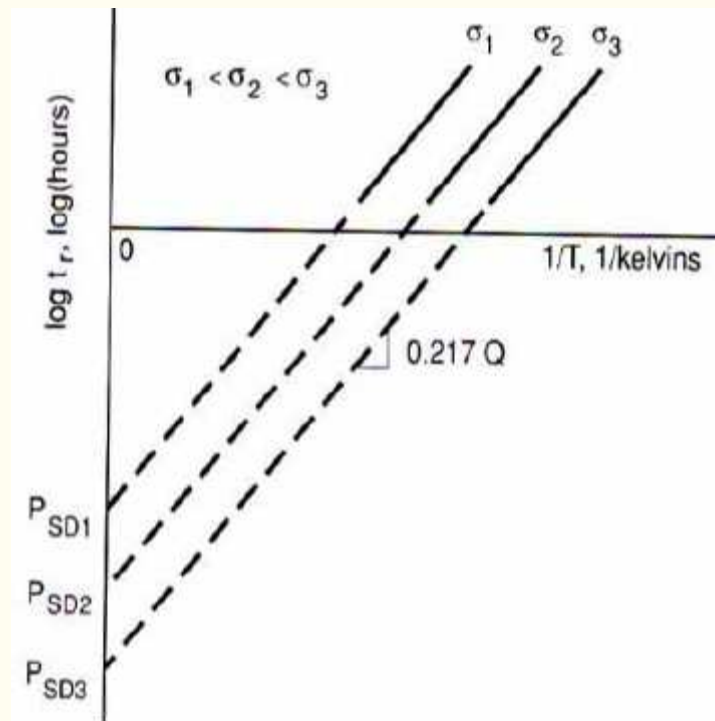
- Para formalmente definir o parâmetro S-D, a seguinte lógica é usada:
  - A deformação em fluência na ruptura é observada ser bem constante para um dado temperatura-tempo compensado na ruptura,  $\theta_r$ , que depende somente da tensão para um dado material.
  - Única curva de  $\theta_r$  versus tensão para cada par temperatura-tempo de ruptura.

- Ao invés de trabalhar com  $\theta r$ , define-se o parâmetro S-D como sendo ( $R=2,0$  [cal/(K.mole)];  $\log e = 0,434$ ):

$$P_{S-D} = \log \theta r$$

$$P_{S-D} = \log tr - \frac{0,217Q}{T}$$

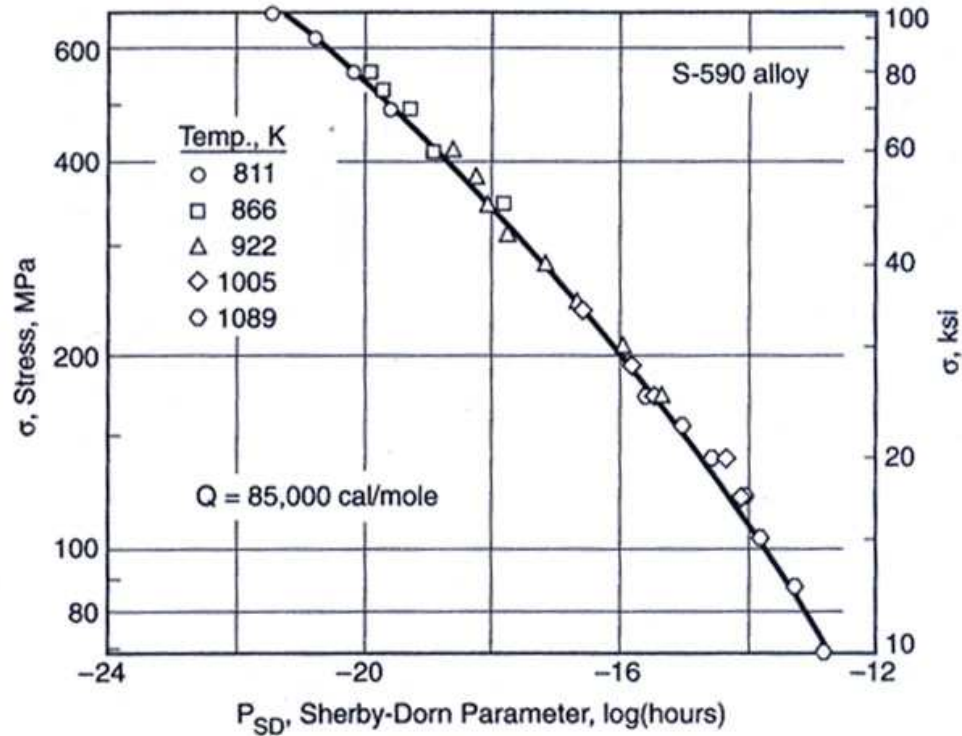
Com  $Q$  em cal/mol e  $T$  em K. Para determinação de  $Q$  usa-se



**Figure 15.20** Graphical interpretation for the Sherby-Dorn parameter, with constant slope proportional to the activation energy  $Q$ .



- Uma vez determinado  $Q$ , os dados de Tensão – Vida pode ser empregado para obter-se a curva de PSD versus a Tensão.



Correlation using the Sherby–Dorn parameter of creep-rupture data for S-590 alloy. (Data from [Goldhoff 59a].)

$$\log tr = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \frac{0,217Q}{T}$$

$$y = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_4 z_4$$

$$z_4 = 1/T$$

$$a_4 = 0,217Q$$

$$P_{S-D} = \log tr - \frac{0,217Q}{T}$$

$$P_{S-D} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$$

$$x = \log(\sigma)$$

## 5.2 Parâmetro de Larson-Miller(L-M)

- O parâmetro de Tempo-Temperatura de Larson e Miller é uma metodologia análoga a metodologia S-D. Da equação

$$\theta = t e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- Substitui-se  $\theta = \theta_r$  e  $t = t_r$ . Neste caso Q não é assumido constante e  $\theta_r$  é constante. O termo  $P_{L-M}$  é definido como:

$$\log \theta_r = \log t_r - 0,217 \frac{Q}{T} \quad P_{L-M} = 0,217Q$$

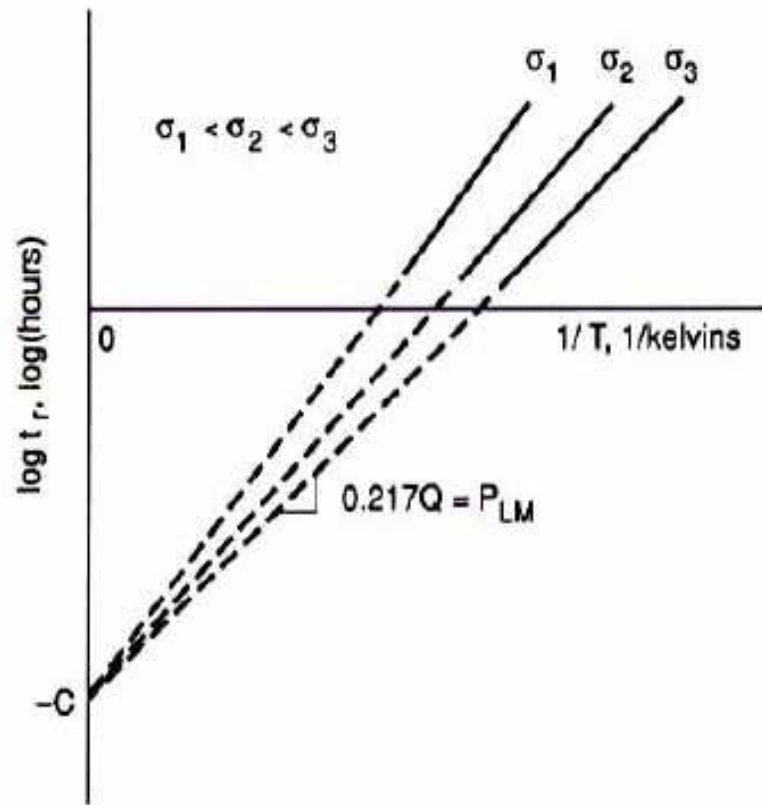
- e é empregada uma constante  $C = -\log \theta_r$ . Assim, tem-se:

$$P_{L-M} = T(\log t_r + C)$$

$$P'_{L-M} = (T_F + 460)(\log t_r + C)$$

$$P'_{LM} = 1,8 P_{LM}$$

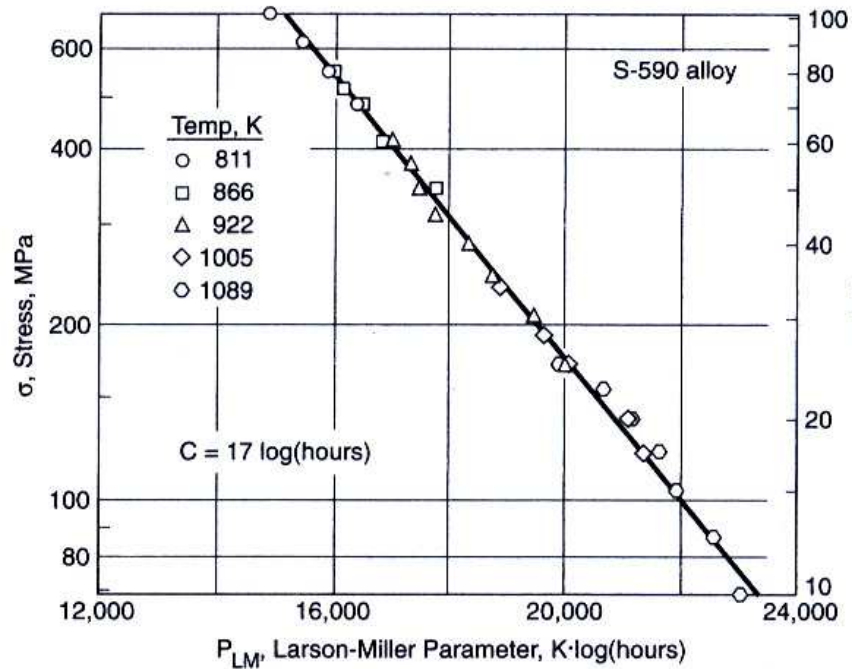
- O valor de C é uma constante do material e pode ser interpretado como uma extrapolação levando ao intercepto da curva  $\log(t_r)$  versus  $(1/T)$ .



**Figure 15.22** Graphical interpretation for the Larson-Miller parameter, with  $-C$  being the common intercept of lines of varying slope.

- Note que esta metodologia tem a mesma base teórica do parâmetro S-D, diferindo somente no fato de que  $Q$  não é assumido constante.

- Uma vez determinado Q, os dados de Tensão – Vida pode ser empregado para obter-se a curva de  $P_{LM}$  versus a Tensão.



Correlation using the Larson–Miller parameter of creep–rupture data for S-590 alloy. (Data from [Goldhoff 59a].)

$$\log tr = \frac{P_{L-M}}{T} - C$$

$$P_{L-M} = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3$$

$$\log tr = -C + b_0 \left( \frac{1}{T} \right) + b_1 \left( \frac{x}{T} \right) + b_2 \left( \frac{x^2}{T} \right) + b_3 \left( \frac{x^3}{T} \right)$$

$$y = d + b_0 z_1 + b_1 z_2 + b_2 z_3 + b_3 z_4$$

### Activation Energies for the Sherby–Dorn Parameter

Material	1Cr-1Mo-0.25V steel	A-286 Fe-Ni-Cr alloy	S-590 Fe-Cr-Ni-Co alloy	Nimonic 80A Ni-base alloy
$Q$ , cal/mole	110,000	91,000	85,000	91,000

Source: Data in [Conway 69], [Goldhoff 59a], and [Goldhoff 59b].

### Constants for the Larson–Miller Parameter

Material	$C$ log (hours)	Polynomial Fit (units of hours, K, and MPa)				Range of $L$ - $M$ Fit	
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\sigma$ , MPa	$T$ , K
1Cr-1Mo-0.25V steel	22	128,200	-141,500	64,380	-9,960	69–621	755–1005
AISI 310 stainless steel	10	20,470	-4,655	0	0	3.4–31	1255–1366
A-286 (Fe-Ni-Cr alloy)	20	116,400	-120,500	53,460	-8,188	69–758	811–1089
S-590 (Fe-Cr-Ni-Co alloy)	17	38,405	-8,206	0	0	69–690	811–1089
Nimonic 80A (Ni-base alloy)	18	16,510	11,040	-4,856	403	54–486	923–1089

Source: Values and data in [Conway 69], [Goldhoff 59a], [Goldhoff 59b], [Larson 52], [Orr 54], and [van Echo 67].