

FLUÊNCIA

1. INTRODUÇÃO

**MATERIAIS UTILIZADOS EM ALTA TEMPERATURA
PODEM APRESENTAR:**

- **REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA COM A TEMPERATURA;**
- **ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS COM O TEMPO E TEMPERATURA;**
- **OCORRÊNCIA DE TENSÕES TÉRMICAS;**
- **OXIDAÇÃO;**
- **CORROSÃO;**
- **FLUÊNCIA.**

FLUÊNCIA

MATERIAIS UTILIZADOS EM ALTA TEMPERATURA DEVEM APRESENTAR RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA

FLUÊNCIA: Acúmulo lento e progressivo de deformação ao longo do **tempo**, sob **carga constante** em **altas temperaturas** (para metais: acima de $0,4 t_f$).

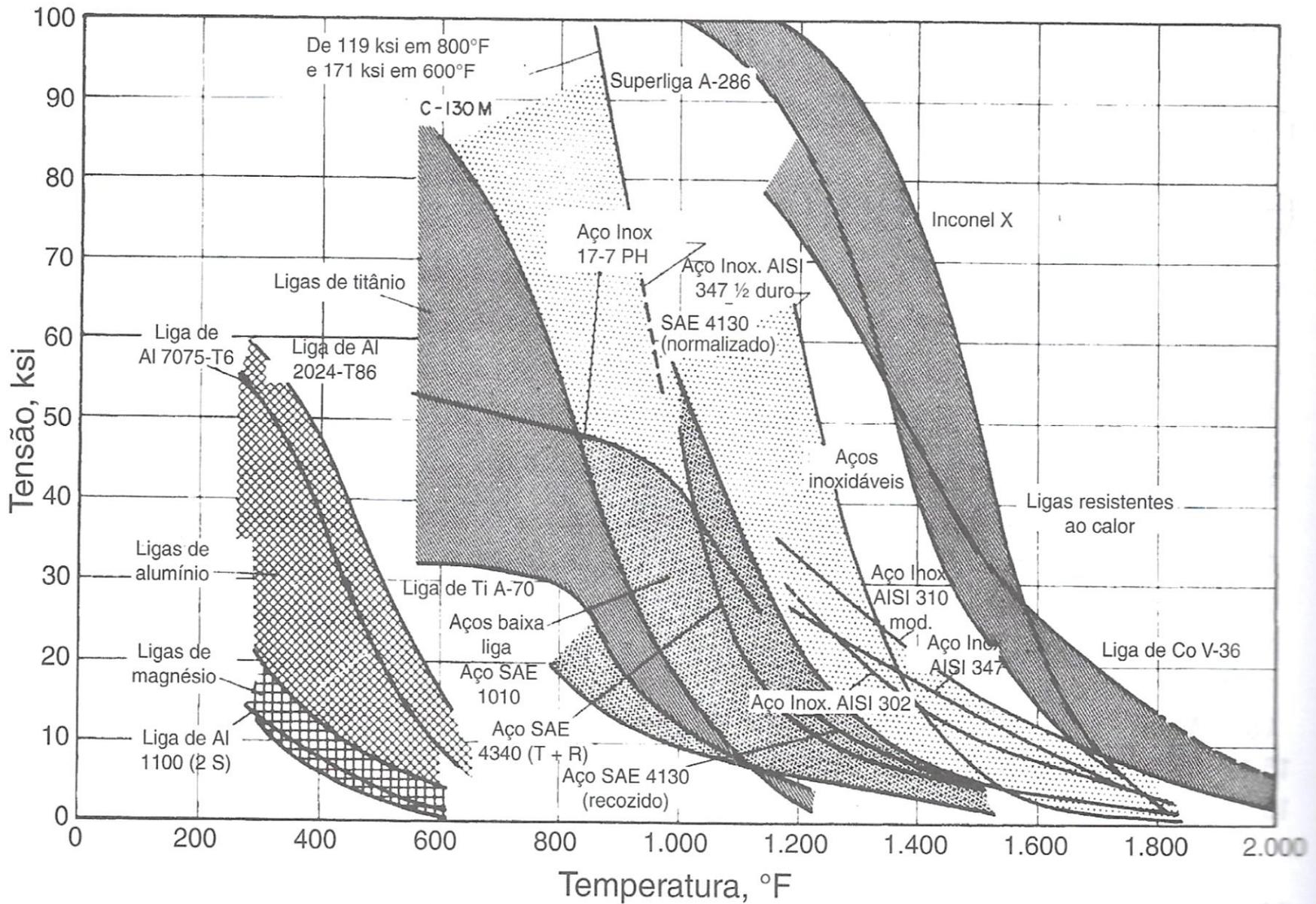
Ex: Para o Alumínio, $T_f = 660^\circ\text{C} + 273\text{K} = 933\text{K}$

$933\text{K} \times 0,4 = 373,2\text{K} - 273\text{K} = 100,2^\circ\text{C}$

Ou seja, a faixa de temperatura a partir da qual o alumínio estará sujeito a fluência inicia em $100,2^\circ\text{C}$

- Os mecanismos de deformação por **fluência** estão relacionados à **difusão** dos átomos/vacâncias, movimento de **discordâncias**, **escorregamentos** de contornos de grãos. Pode ocorrer **recristalização** e **recuperação** durante o fenômeno;
- O processo de **fratura** tecnologicamente **mais importante** em alta **temperatura** é a **Fratura por Fluência**;
- A Fluência pode ocorrer em peças como:
 - **Turbinas a vapor e aeronáutica**;
 - **Vasos de pressão em sistemas geradores de energia**;
 - **Filamento de lâmpadas, armações de óculos, 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);
- **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.

Mecanismos de Deformação por Fluência

Dowling [2018]: deformação plástica que ocorre gradualmente, com o **tempo** (Creep Strain);

Kassner [2015]: fluência é um fenômeno associado à **plasticidade** dependente do **tempo** sob **tensão constante**, em **temperatura elevada** ($\gg 0,5 T_f$);

Cowan [2014] e outros: temperatura de possível ocorrência do fenômeno de fluência a **partir da temperatura homóloga** ($T_h = T_p / T_f$). [Helman, 1983];

1. Deformação em fluência por escoamento viscoso

- Alguns materiais sólidos comportam-se como um fluido de elevada viscosidade, o que geralmente ocorre com materiais amorfos como vidros de sílica e alguns polímeros quando solicitados mecanicamente;
- Quando uma tensão é aplicada, moléculas e grupos de moléculas movem-se umas em relação às outras e resultando em deformação dependente do tempo: fluência [Dowling, 2018];
- Da Mecânica dos Fluidos, tem-se que viscosidade (η) de um líquido é dada por: $\eta = \tau / \dot{\gamma}$;

Onde, τ é a tensão cisalhante e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação angular.

- De forma análoga a viscosidade em tração, é: $\eta' = \sigma / \dot{\epsilon}$;
- Para um fluido incompressível, tem-se que $\eta' = 3\eta$.
- A taxa de deformação em fluência: $\dot{\epsilon} = \sigma / \eta'$

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

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

- **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**:

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

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

Um **caso particular** de escoamento **viscoso** para materiais **policristalinos** é o **deslizamento de contornos de grão**, que alguns autores postulam ser um mecanismo específico, porém, normalmente, acompanha outros mecanismos.

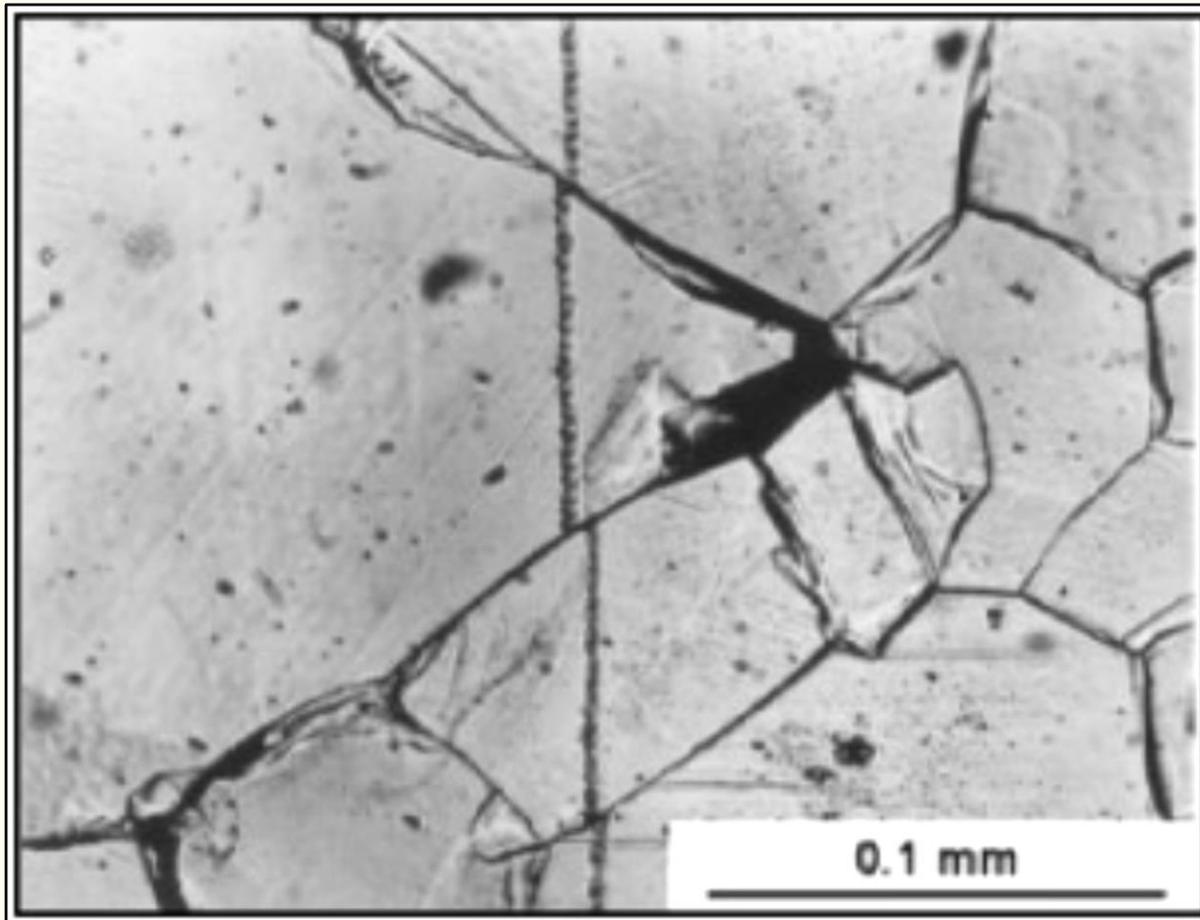


Imagem de MO apresentando o fenômeno de deslizamento de grãos. A seta mostra o risco desalinhado [Langdon, 2006].

- A **taxa de deformação** depende da **área de contornos de grão por volume** (A_V) e é **inversamente** proporcional ao tamanho de grão (**d**):

$$\dot{\epsilon}_v = A_V(\sigma/d) e^{(-Q_v/RT)}$$

- Se o **deslizamento de contornos** de grão fosse o **único** mecanismo ativo, haveria um **acúmulo de material** de um lado do grão e uma **falta de material** do outro lado, assim, para **eliminar** essa **desigualdade**, **outros** mecanismos são **ativados** como **difusão**, **movimentação de discordâncias** ou **migração de contornos de grão**;
- **Nos primórdios**: Deslizamento de CG era tido como principal e definia-se uma **“temperatura de equicoesiva”** como limite. Atualmente sabe-se que o deslizamento de contornos acompanha os diversos mecanismos de deformação por fluência;
- Maior contribuição em temperaturas **próximas à temperatura de fusão** e para materiais com **grãos submicrométricos**;
- É o principal na formação de **microcavidades** nos contornos de grãos, que provoca o fenômeno conhecido como **cavitação**.

1.2 Fluência em Polímeros

- **Abaixo de Tg**, os efeitos de **fluência** são **pequenos** mas **acima de Tg** o efeito torna-se rapidamente **significante**;
- Como a **Tg** é geralmente entre **-100 e +200 °C**, ela **pode ser excedida mesmo abaixo** ou por volta da **temperatura ambiente**;
- No caso de **polímeros cristalinos**, o **escoamento viscoso** acontece em **temperaturas bem acima de Tg**, especialmente **próximo à 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.

2. Fluência em Materiais Cristalinos

Uma **equação geral** do fenômeno de **fluência** em estado estacionário para **materiais cristalinos** é dada por:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{A \cdot \sigma^m}{T \cdot d^q} e^{\frac{-Q}{RT}}$$

Onde, $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação, σ é a tensão aplicada, d é o tamanho de grão médio, Q é energia de ativação, R é a constante universal dos gases. Os coeficientes A , Q , q e m dependem do material, e do mecanismo de deformação que está efetivamente atuando.

Mecanismo	m	q	Descrição
Fluência por difusão			Difusão de vacâncias
mecanismo de Nabarro-Herring	1	2	pela rede cristalina
Fluência por difusão			Difusão de vacâncias
mecanismo de Coble	1	3	pelos contornos de grão
Deslizamento de contornos de grão	2	2 ou 3	Deslizamento combinado com
			difusão de vacâncias pela rede
			(q=2) ou com difusão pelos
			contornos (q=3)
Movimentação de discordâncias	3 a 8	0	Movimentação de discordâncias.
			Escalagem.

Fonte: [Dowling, 2018]

2.1 Fluência Difusional

- Pode ocorrer em **baixas tensões**, mas requer **temperaturas relativamente altas**. Envolve difusão de vacâncias no retículo cristalino;
- Difusão de vacâncias pelo interior do grão: mecanismo de **fluência NABARRO-HERRING** ($m=1$ e $q=2$);
- Difusão pelos contornos de grão: mecanismo de **fluência COBLE** ($m=1$ e $q=3$);
- As **vacâncias surgem** em contornos de grãos **perpendiculares à tensão trativa** e difundem para os CG em tensões **compressivas** ou **com baixos valores de tensões trativas**. O material move na direção oposta .

Difusão de vacâncias pelo interior do grão: mecanismo de **fluência NABARRO-HERRING** ($m=1$ e $q=2$)

Vacâncias surgem em CG perpendicular es à Tração

e difundem para regiões em compressão

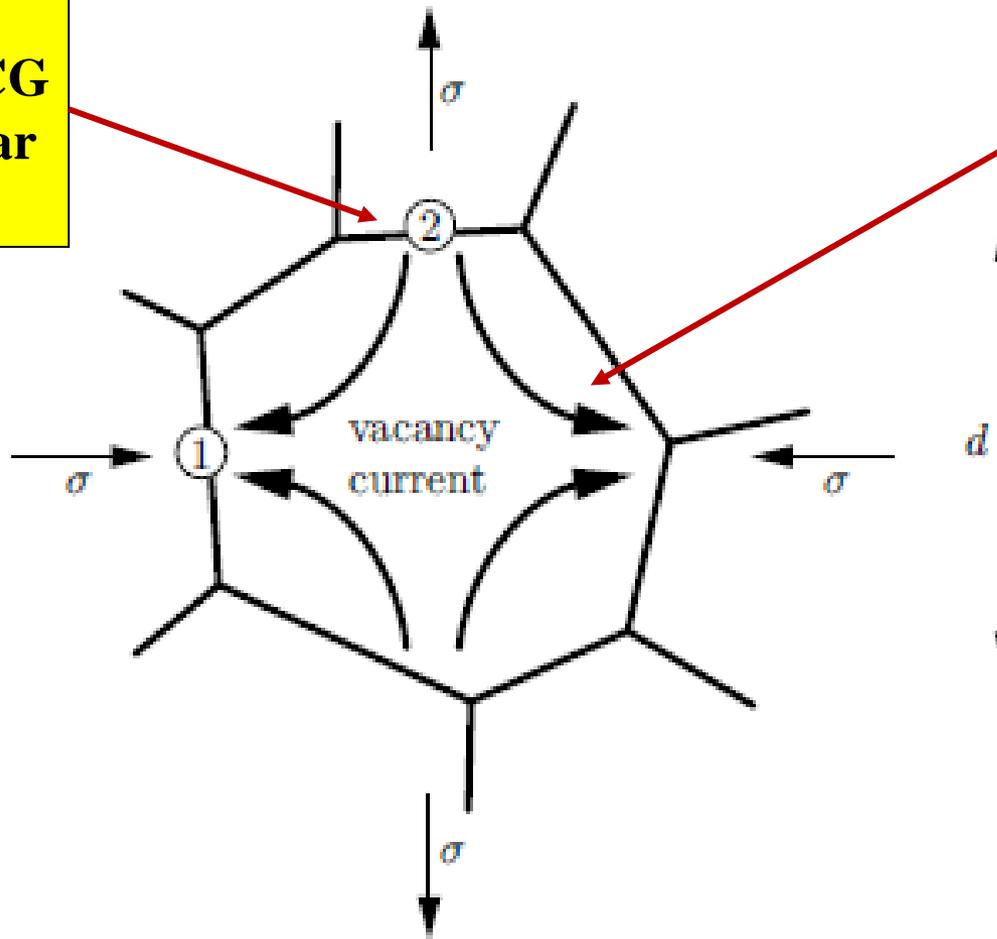
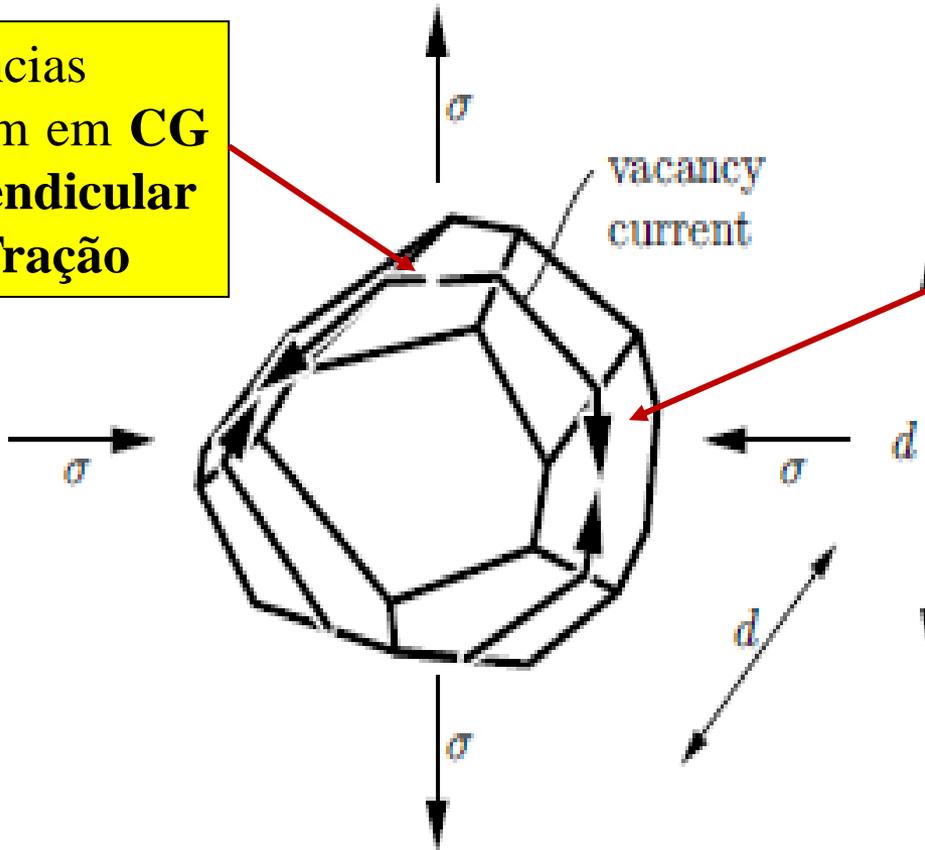


Fig. 11.6. Movement of vacancies in diffusion creep

COBLE ($m=1$ e $q=3$)

Vacâncias
surgem em **CG**
perpendicular
es à Tração



e difundem para
regiões em
compressão

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

A taxa de deformação em **fluência** é **proporcional** ao **fluxo (j)** de vacâncias **dividido** pelo **tamanho** do grão (**d**)

$$j = -D_0 \exp\left(-\frac{Q_{ex}}{kT}\right) \frac{n_1 - n_2}{d}$$
$$= \frac{2\sigma\Omega}{dkT} D_0 \exp\left(-\frac{Q_v + Q_{ex}}{kT}\right)$$

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

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

Onde **k** é a constante de Boltzmann, **A_{NH}** é parâmetro do material (Nabarro-Herring), **σ** é a tensão aplicada, **Ω** é o volume da vacância, **D₀** é a constante de difusão de vacâncias (termo pré-exponencial-coeficiente de difusão quando T tende ao infinito) . **D_v** é o coeficiente de difusão das vacâncias no material.

A taxa de deformação para fluência difusional nos contornos de grãos (Coble) é dada por:

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

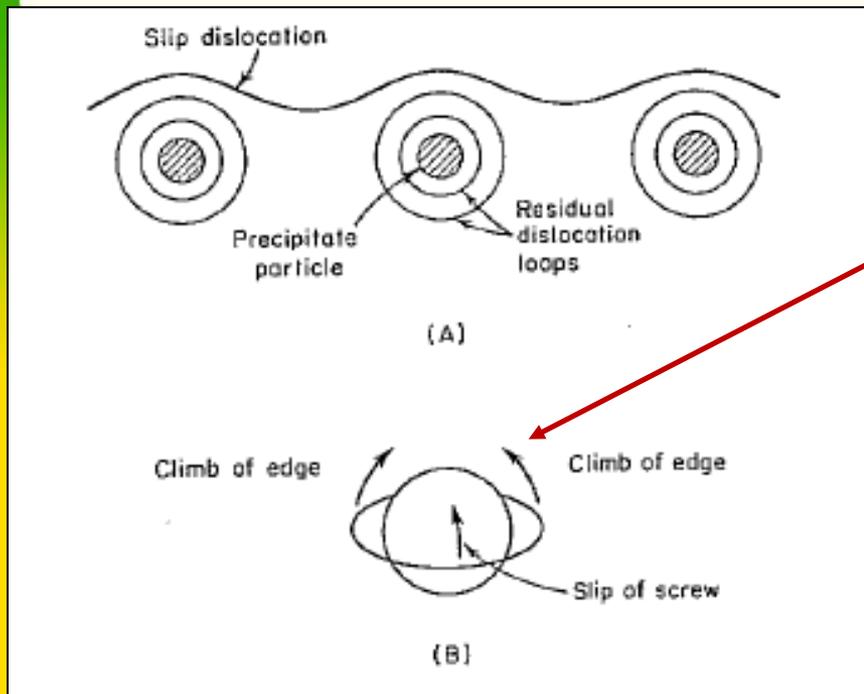
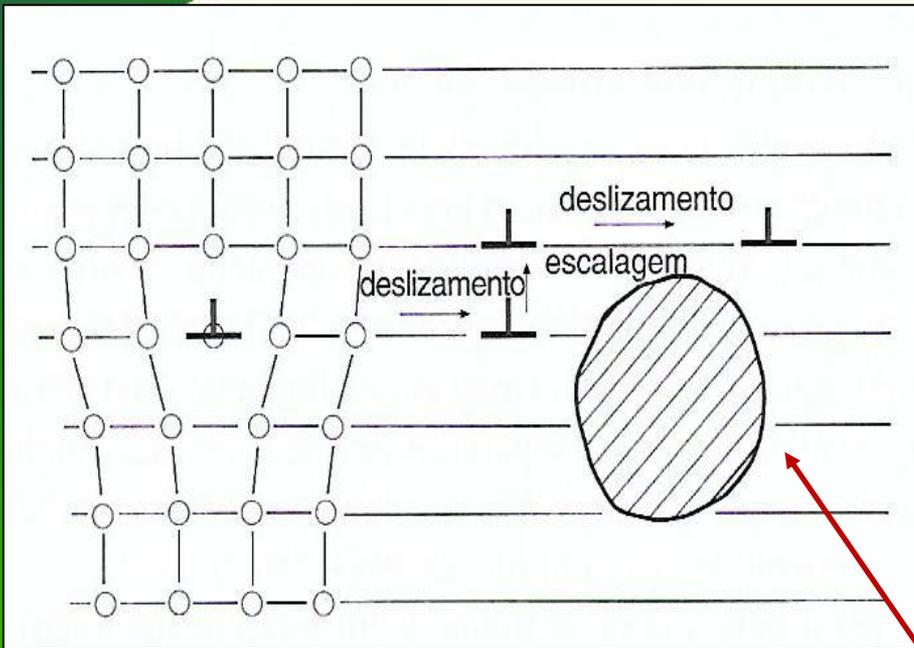
Onde A_C é outra constante do material, d é o diâmetro médio do grão e D_{GB} é o coeficiente de autodifusão nos contornos de grãos.

Existe ainda, o Mecanismo difusional de **Harper-Dorn**: apenas em **monocristais** ou materiais com estrutura grosseira. Depende da **escalagem de discordâncias em cunha**, que é controlada pela **difusão de lacunas**: alguns materiais metálicos, muito pouco em cerâmicas, pois a baixa T_g , favorece outros mecanismos, como Nabarro-Herring e Coble.

2.2 Fluência por movimentação de discordâncias

- Com o **aumento** de **T**, as **LD** podem **escapar aos obstáculos** emitindo ou recebendo **vacâncias**;
- Fluência por movimento de discordância (**dislocation creep**), envolve **altas tensões**, 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**

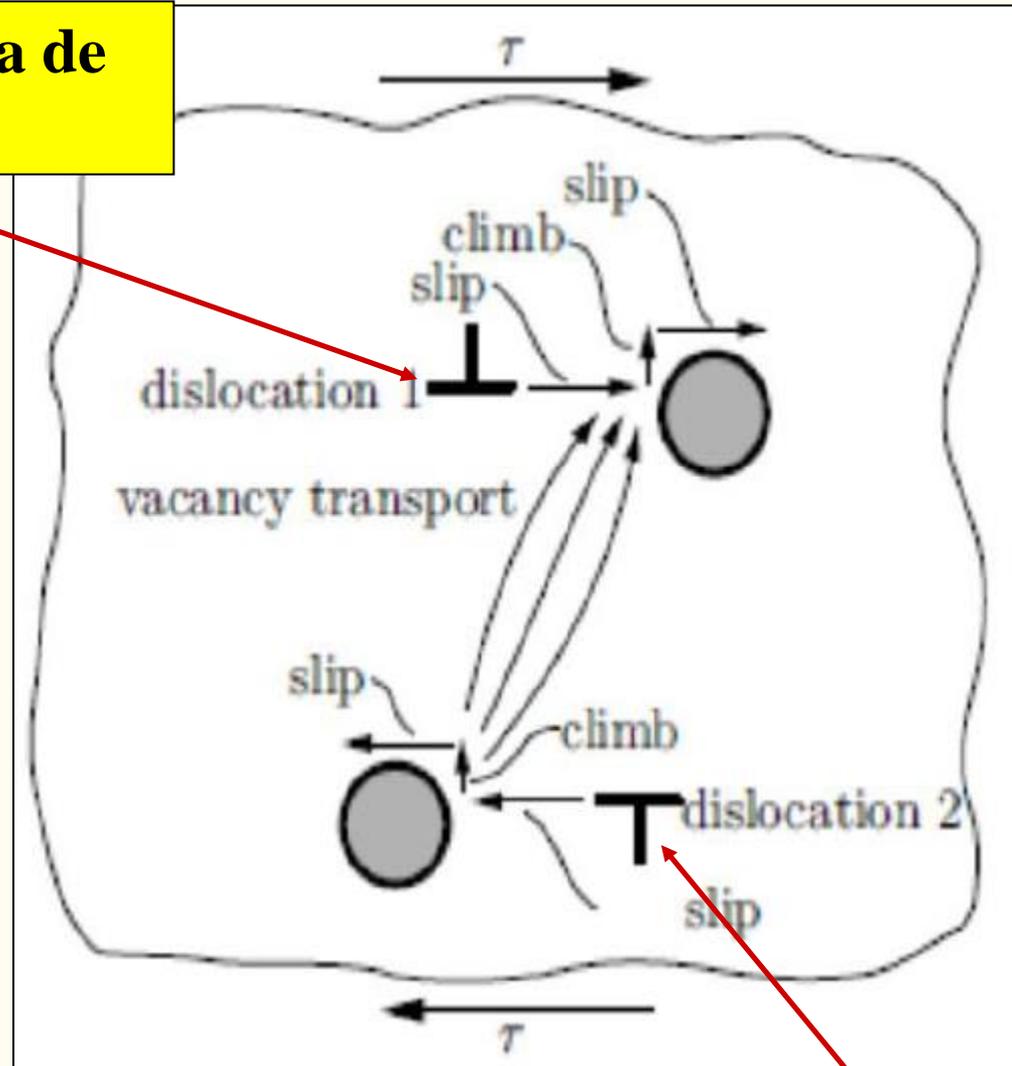
Mecanismo complexo, envolve a geração de vacâncias e a interação das LD mistas ou em anéis, com anéis de LD nos precipitados. Deformação da rede+ difusão de vacâncias: escalagem



Precipitado

A LD absorve vacância, e emite, durante o deslizamento, para que a escalagem ocorra.

LD 1: Receptora de vacância



LD 2: Emissora de vacância

A densidade de fluxo das vacâncias, j , é dada por

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

Onde V^* é o volume de ativação (*activation volume*), l é a distância entre os obstáculos

A taxa de deformação para fluência por movimento de discordâncias é proporcional a ao fluxo de vacâncias j e é dada por:

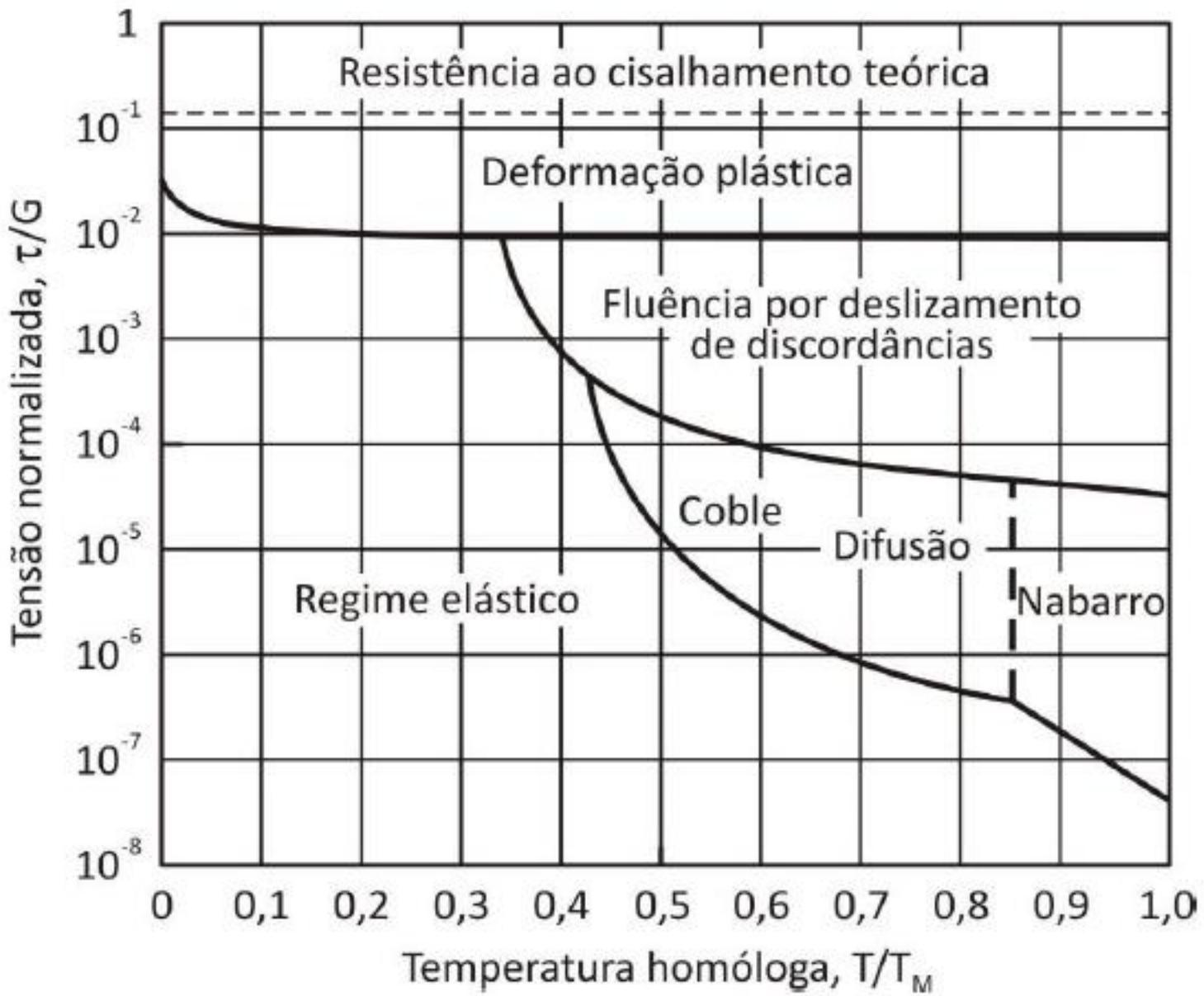
$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \frac{A\sigma^3}{kT} D_0 \exp\left(-\frac{Q_v + Q_{ex}}{kT}\right) \\ &= \frac{A\sigma^3}{kT} D_v(T).\end{aligned}$$

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

k é a constante de Boltzmann, A é parâmetro do material determinada experimentalmente, σ é a tensão aplicada, Q_v é a energia de formação de uma vacância, Q_{ex} é a energia para difusão da vacância, D_0 é o coeficiente de difusão de vacâncias (termo pré-exponencial-coeficiente de difusão quando T tende ao infinito). D_v é o coeficiente de difusão das vacâncias no material.

MAPAS DE MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO

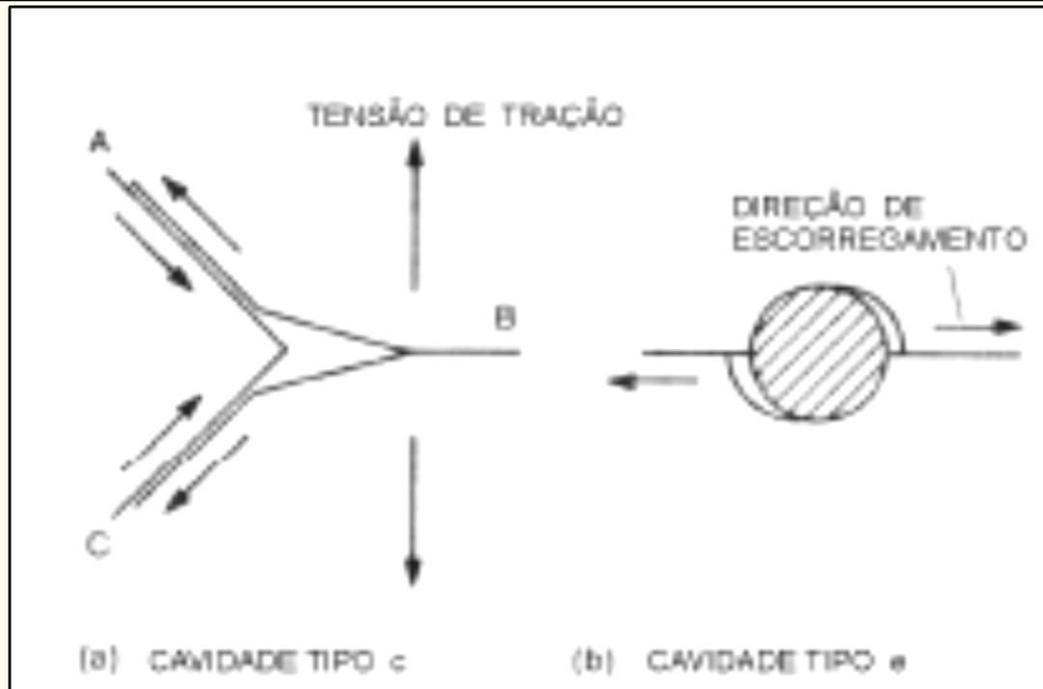
No caso de ocorrência de **múltiplos mecanismos**, o **controle da velocidade** de deformação será do **mecanismo potencialmente mais lento**. Os mapas de mecanismos de deformação criados por **M. F. Ashby** apresentam os **possíveis mecanismos de fluência**, de acordo com a **tensão normalizada e temperatura homóloga**. As **regiões demarcadas** nos “mapas de Ashby” mostram as **condições** em que um determinado **mecanismo governa a taxa de deformação** para um dado material.



Mapa simplificado de mecanismos de fluência [adaptado de Cowan, 2014]

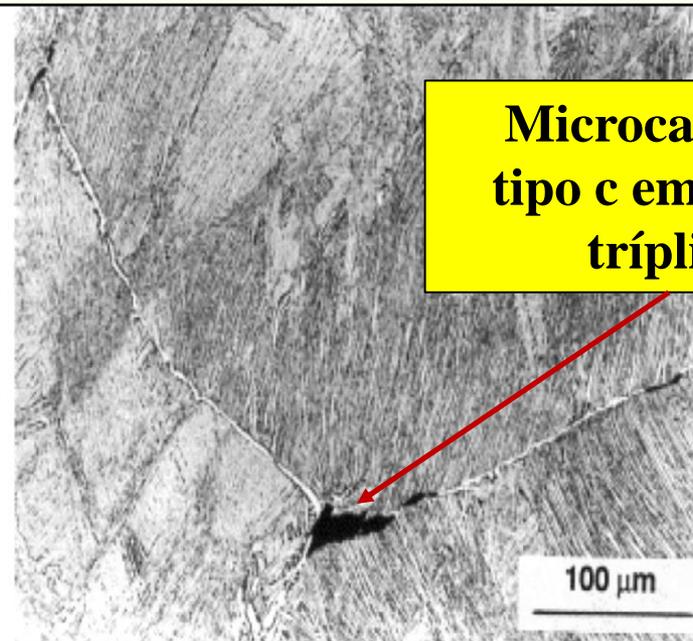
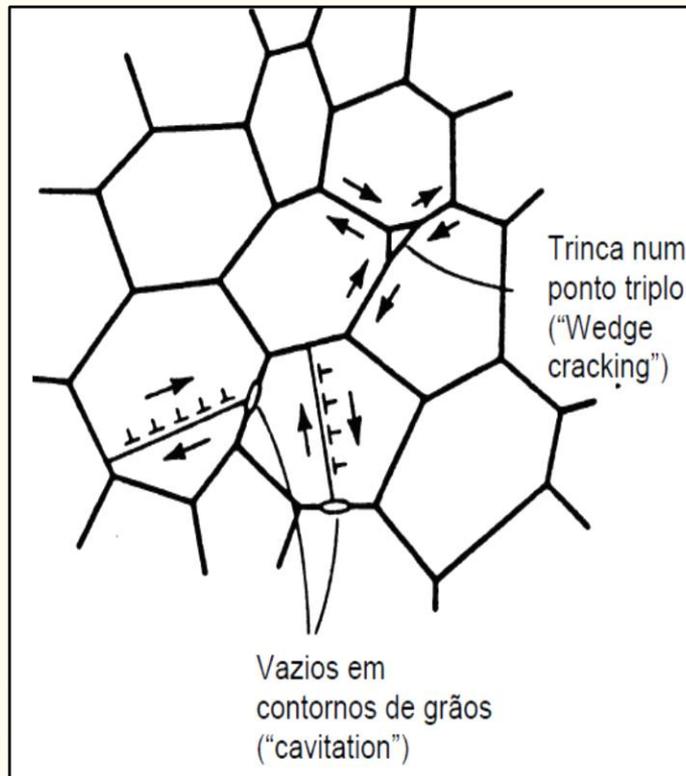
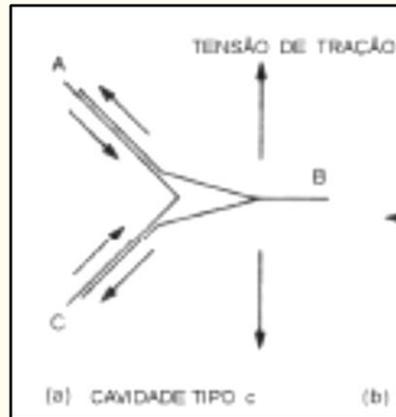
MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO EM FLUÊNCIA: CAVITAÇÃO

O mecanismo de **deslizamento de contornos de grão** é importante para o fenômeno da **cavitação**, que é um processo de fratura por fluência. A cavitação leva ao micromecanismo de **fratura intergranular** e se inicia com a formação de **microcavidades** ao longo dos **contornos de grão**, do tipo esféricas (**tipo e** ou **r**, do inglês *round*) e em ponto **tríplice**, que é o vértice de três grãos (**tipo c**, *cunha* ou **w**, do inglês *wedge*). Envolve a **difusão e coalescimento de vazios em CG**.



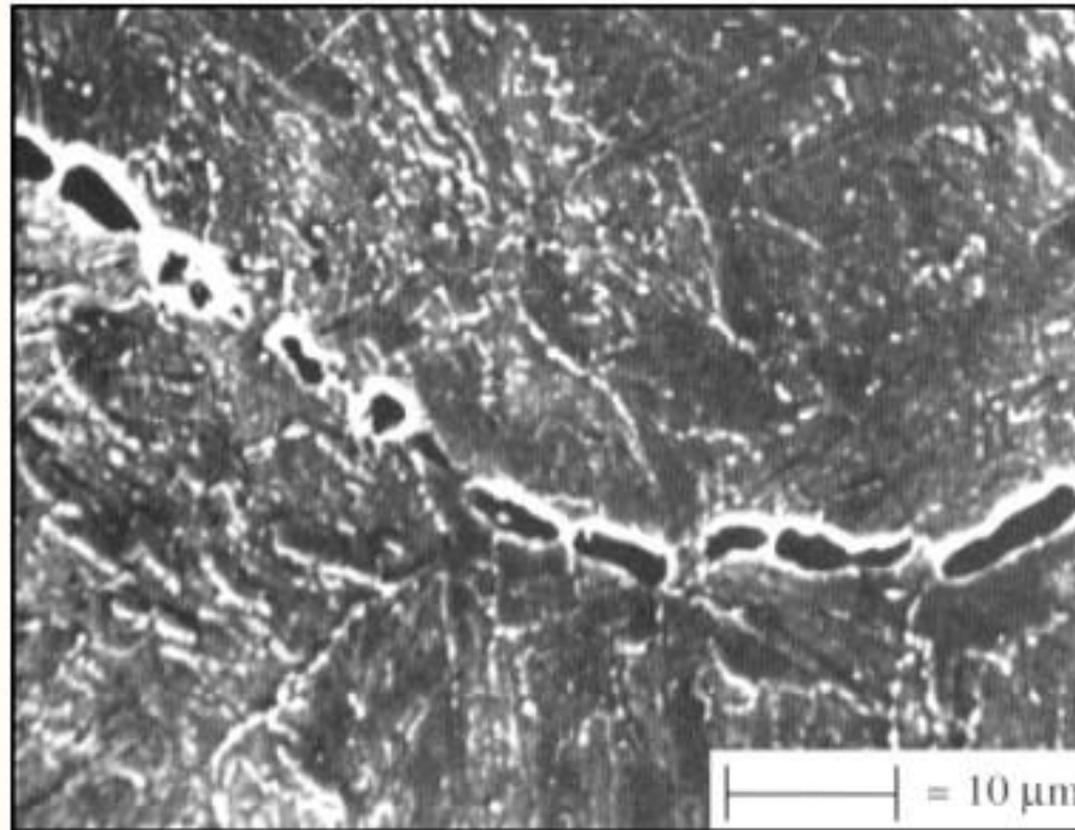
MECANISMOS- DEFORMAÇÃO/FRATURA POR FLUÊNCIA

CAVITAÇÃO



Microcavidade tipo c em ponto tríplice

Trinca em ponto triplíce na liga Ti6Al2Sn4Zr2Mo0,1Si forjada a quente

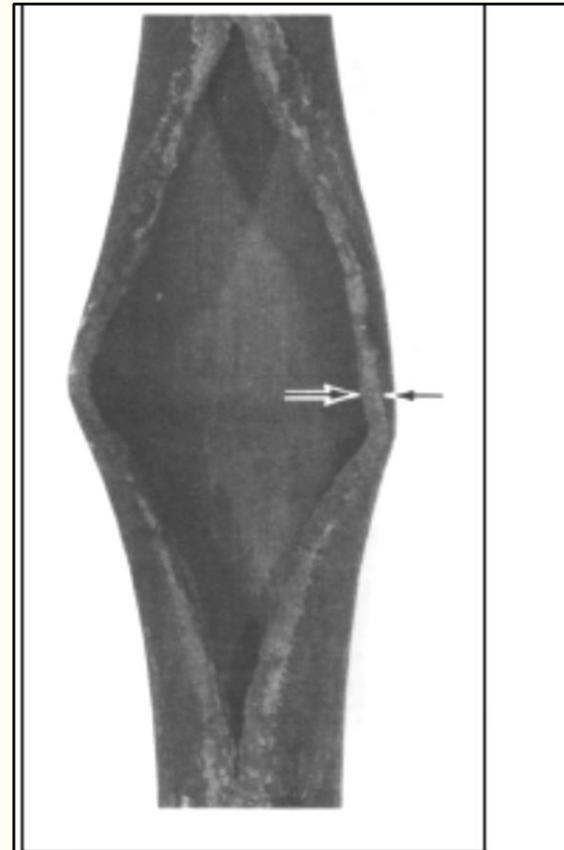


Microcavidades esféricas em contorno de grão [Silva, 1999].

FRATURA POR FLUÊNCIA

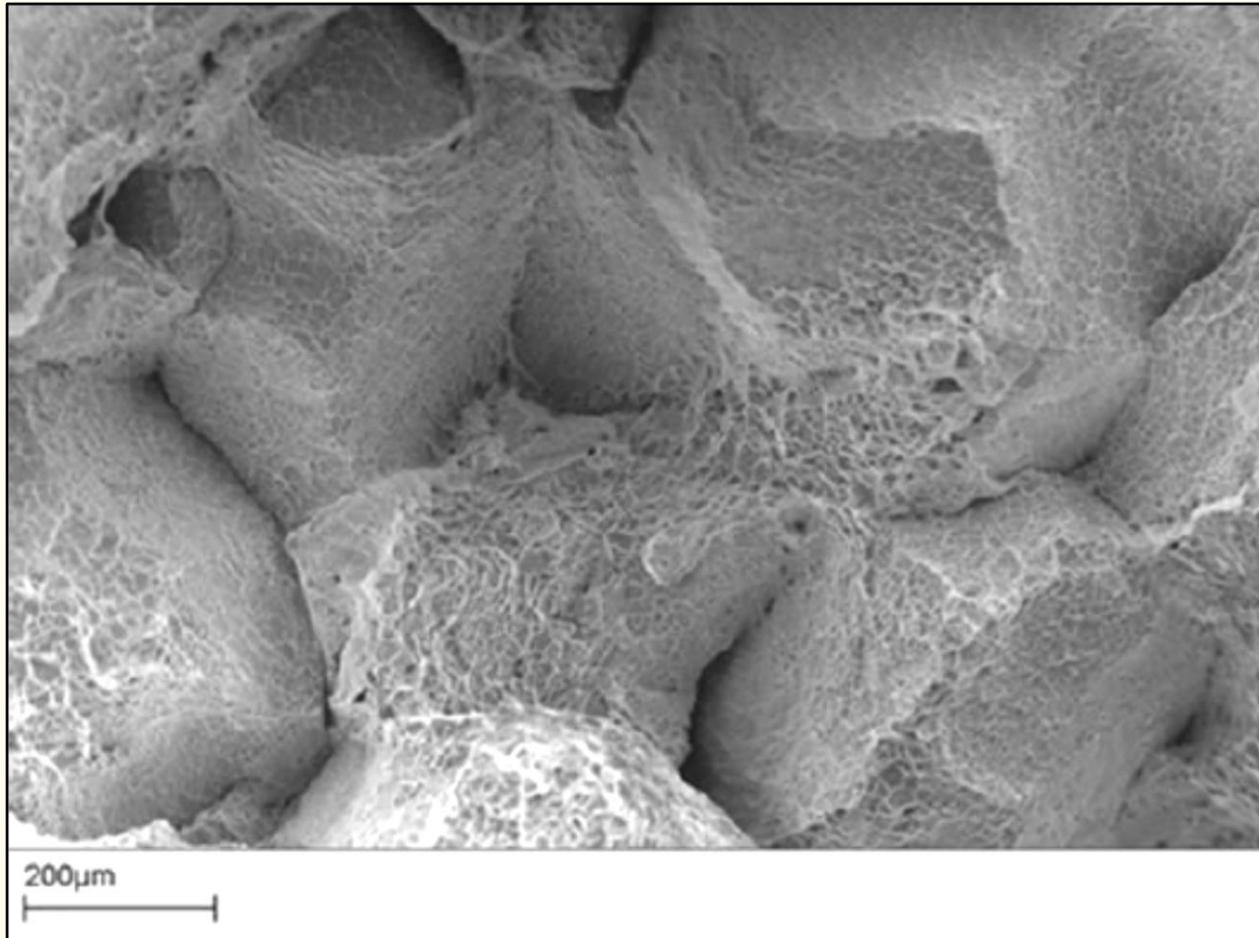
- **Fratura por fluência** propriamente dita: mecanismo de **nucleação e propagação** da fratura acontece **sob fluência**. Pode apresentar micromecanismo **intergranular**, por fenômenos internos de fragilização do contorno de grão, e **transgranular**, por excesso de deformação plástica;
- **Propagação** de fratura por **fluência**: propagação de uma trinca ou fratura pré-existente acontece sob fluência;
- Fraturas em **tubulações** em que passam fluídos em alta temperatura ocorrem por fluência;
- “**lábio grosso**” (superaquecimento de longa duração) e “**lábio fino**” (superaquecimento brusco).

“LÁBIO GROSSO”:
FRATURA INTERGRANULAR,
QUE OCORREU
LENTAMENTE,
AUMENTO MODERADO DE
TEMPERATURA POR TEMPO
PROLONGADO, SOB
TENSÕES MODERADAS.
EX: DESCONTROLE DE
TEMPERATURA DE
PROCESSO



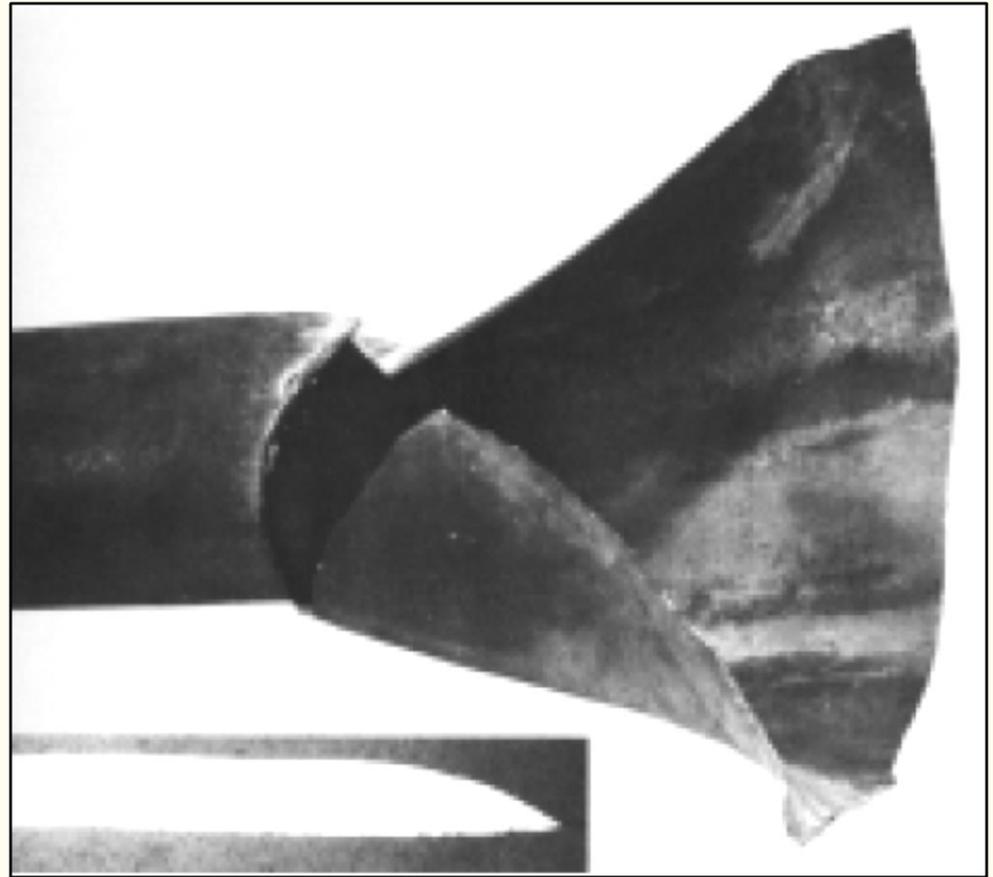
Fratura tipo “lábio grosso”

SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UM MATERIAL EXPOSTO À FLUÊNCIA (CARGA EM ALTA TEMPERATURA)-MEV



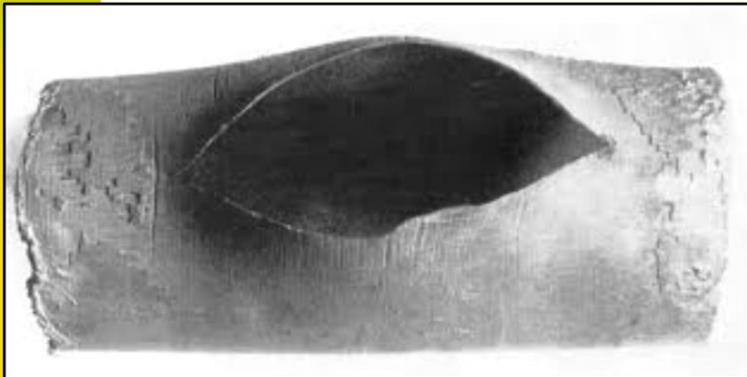
**ASPECTO GERAL DA SUPERFÍCIE DE FRATURA
INTERGRANULAR a 500°C e 350 MPa**

**“LÁBIO FINO”:
FRATURA DUTIL-
AUMENTO BRUSCO DA
TEMPERATURA DE
TRABALHO, POR
EXEMPLO, POR CORTE
ACIDENTAL DA ÁGUA
CIRCULANTE.
GERALMENTE
APRESENTA
MECANISMO
TRANSGRANULAR.**

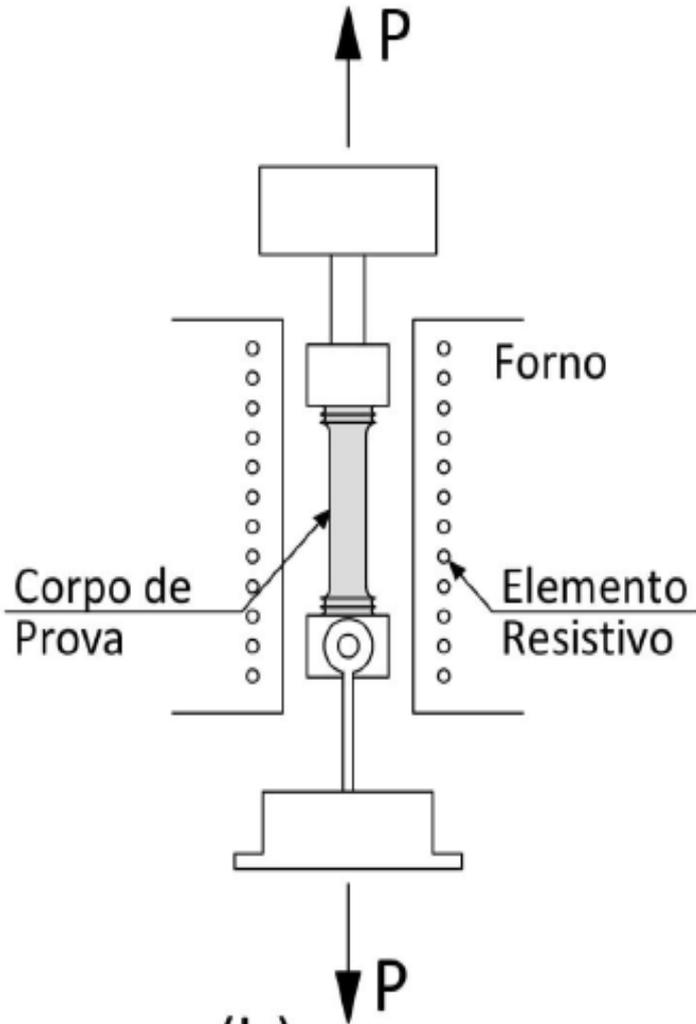


Fratura tipo “lábio fino”

FRATURA POR FLUÊNCIA

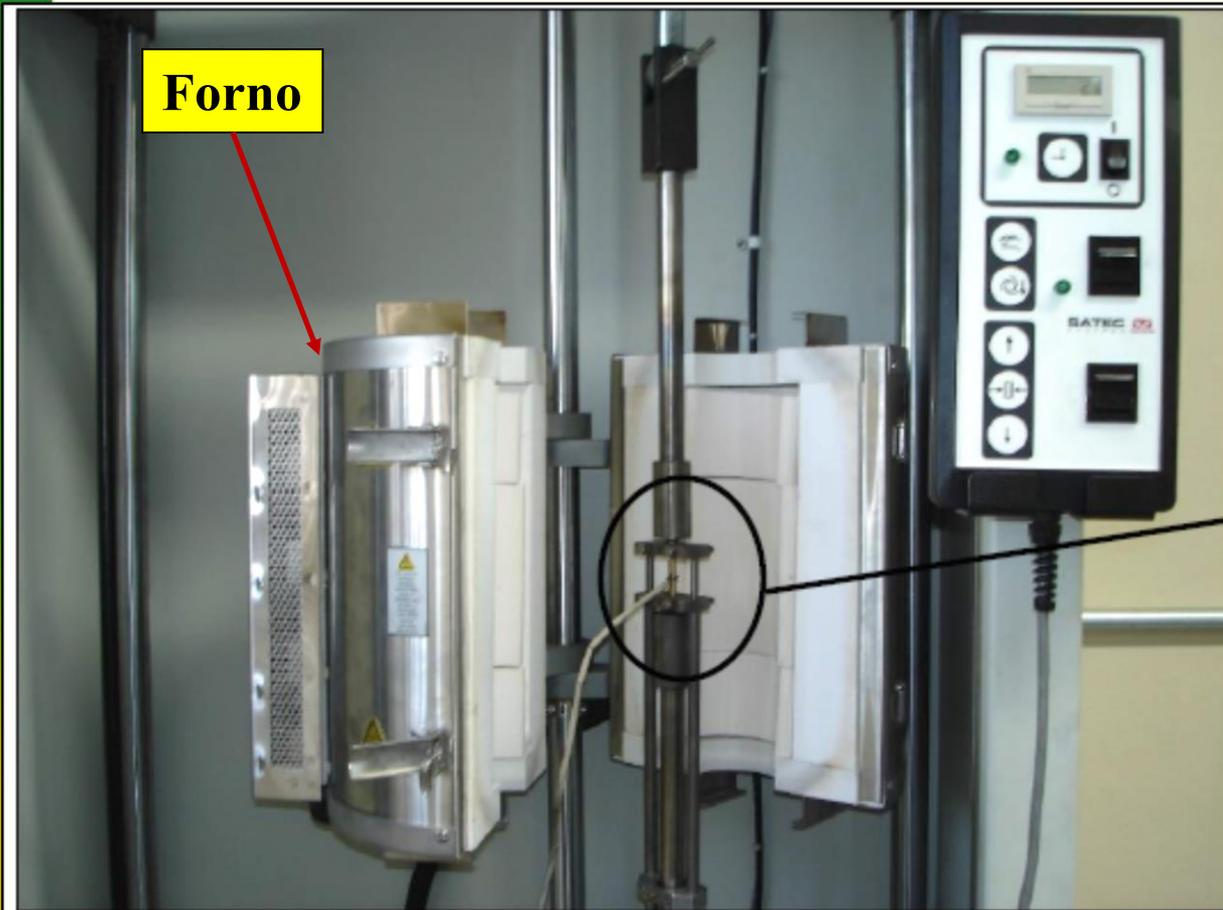


3. Ensaio de Fluência

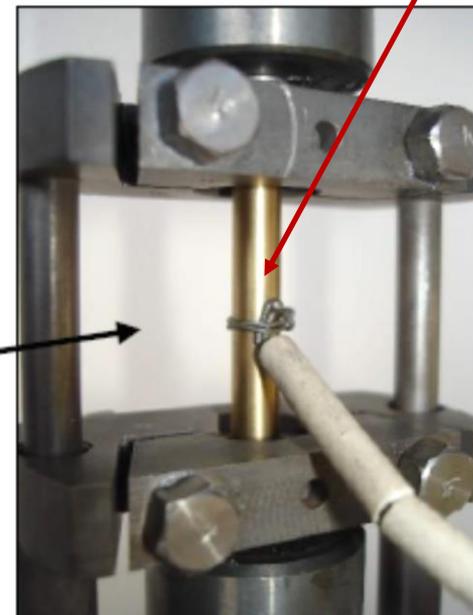


- O ensaio de **fluência** é executado pela **aplicação** de uma **carga uniaxial constante** a um **CP** de geometria **similar** a dos utilizados nos ensaios de **tração**, a uma **temperatura “elevada” e constante**;
- O tempo de aplicação de carga é principalmente em função da vida útil esperada do componente que será fabricado com o material submetido ao ensaio;
- As **deformações** do CP são **medidas** ao longo do **tempo** de realização do ensaio e indicadas na forma de uma curva $\epsilon \times t$.

Forno



CP

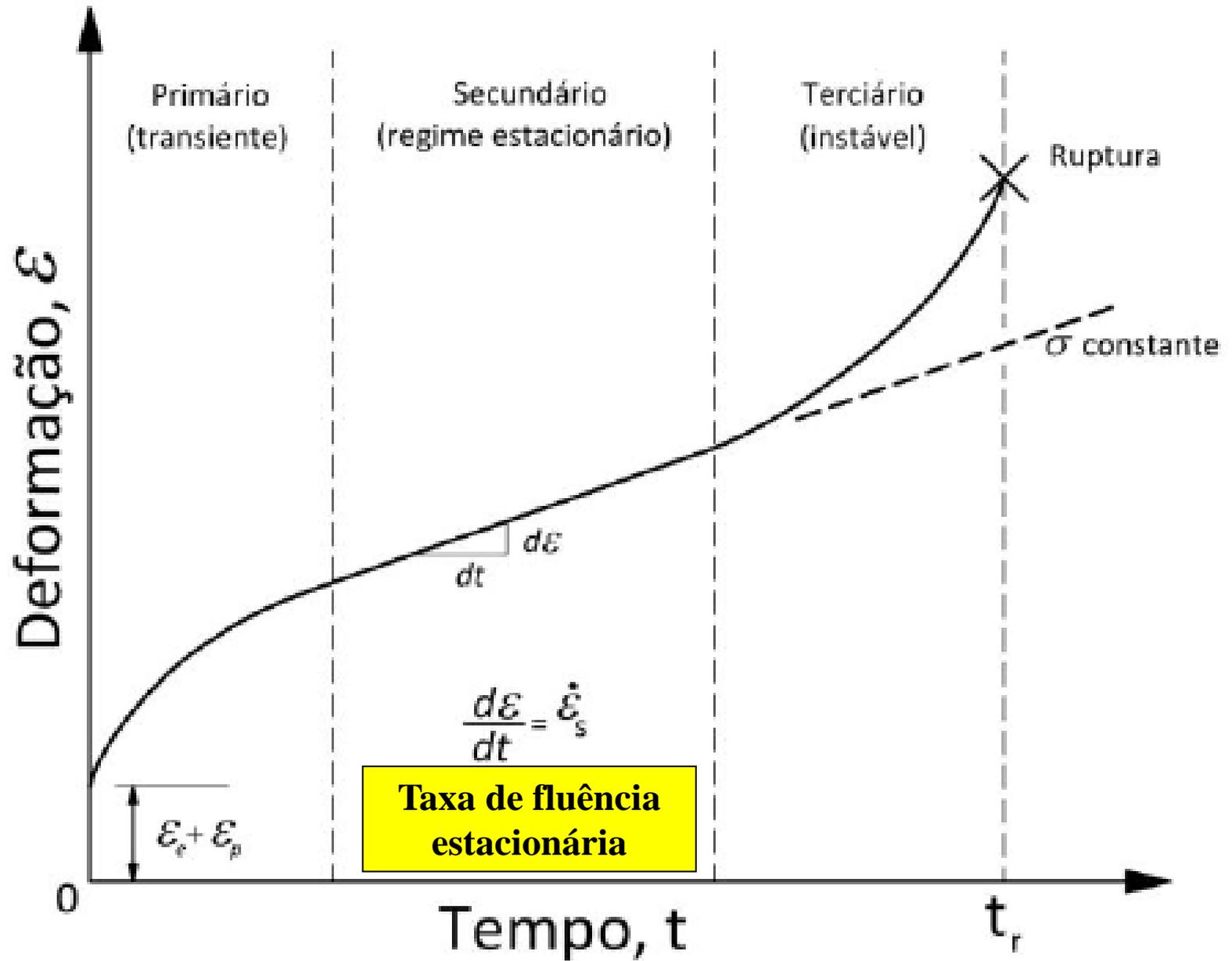


Ensaio de Fluência: curva $\epsilon \times t$

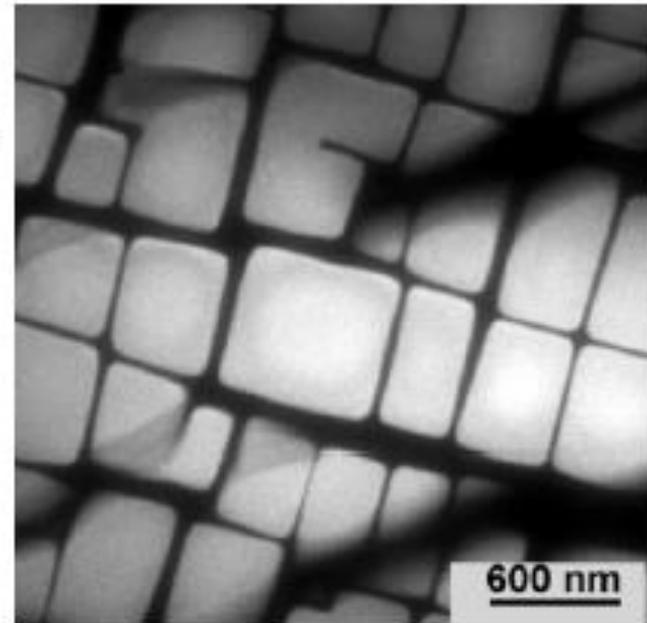
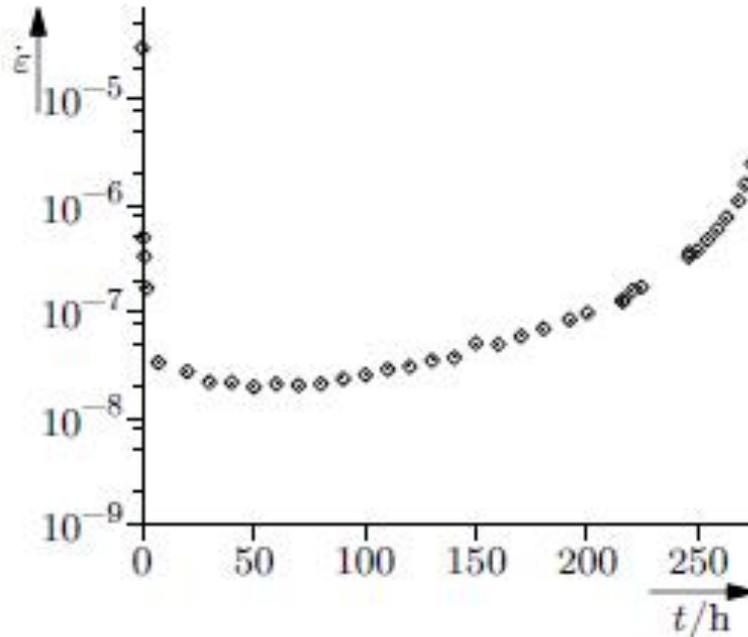
O ensaio de fluência pode ser dividido em três estágios:

- **Primário:** decréscimo contínuo da taxa de fluência ($d\epsilon/dt$) em função do aumento de resistência devido ao encruamento
- **Secundário:** taxa de fluência **constante**, devido ao equilíbrio entre encruamento e recuperação ($Temp.\uparrow$). O parâmetro mais importante (**taxa de fluência estacionária, $\dot{\epsilon}_s$**) consiste na inclinação da curva nesse estágio
- **Terciário:** aumento da taxa de fluência devido à **estricção do CP, aceleração da recuperação e cavitação: fratura.**





Em alguns materiais, em **temperaturas elevadas**, por exemplo as partículas de precipitado **podem coalescer** com o tempo e **não haver** a região de fluência em regime estacionário (**2º estágio**), e a taxa aumenta continuamente após um mínimo ser atingido, **não há obstáculos para as LD. (superdiscordâncias)**



(a) Experimental results for the creep rate versus time

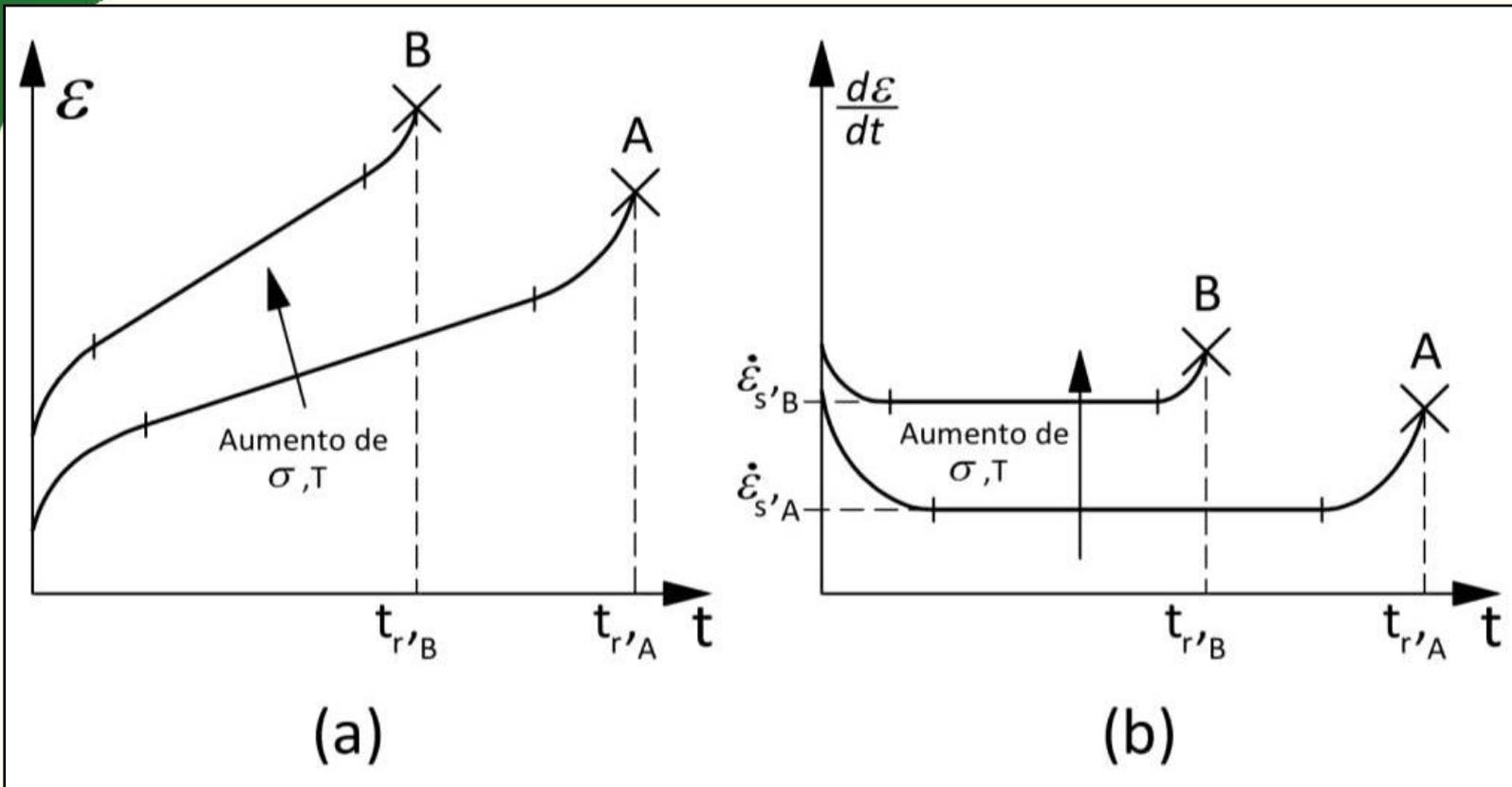
(b) Micrograph. The bright particles are the γ' precipitates (see also page 404)

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)

Recordando: **Superdiscordâncias** são similares às **parciais de Shockley** unidas por um “**contorno de antifase**”(intersecção entre uma rede ordenada e desordenada: **super-redes**).

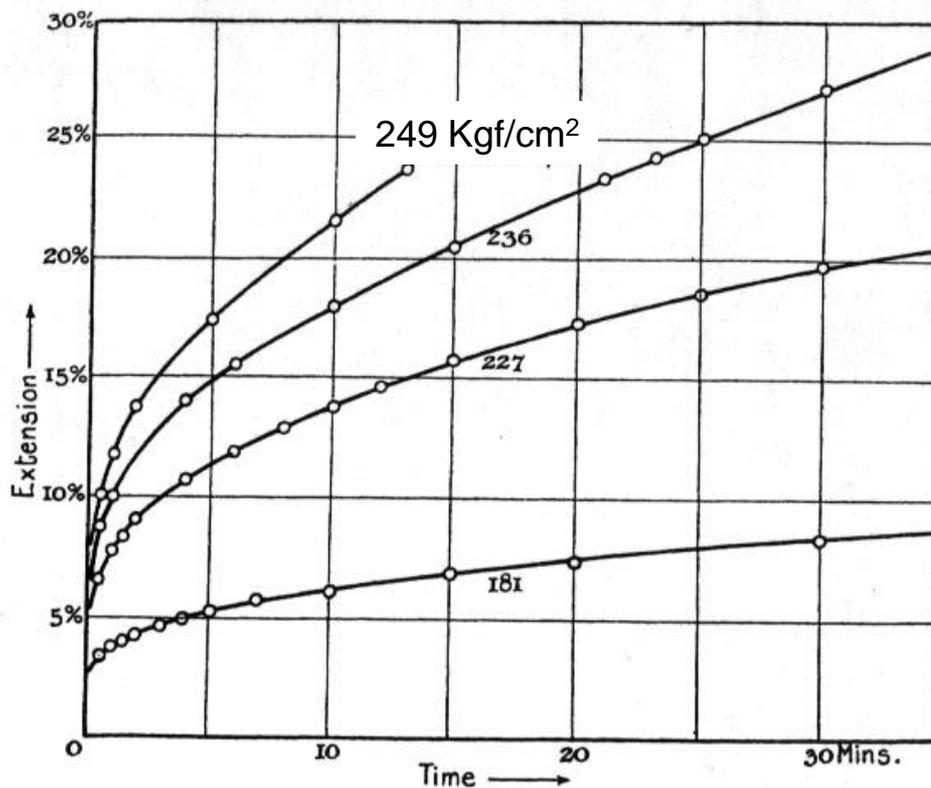
Ocorrem em **super-redes** como **ligas de Ni**, que apresentam **precipitados Ni₃Al**. Uma discordância perfeita “**divide-se**” em duas para ultrapassar um obstáculo como um precipitado.

A **importância** das superdiscordâncias está relacionada ao **pico de limite de escoamento** que ocorre nestas ligas, com o aumento da **temperatura**. Por isso, este tipo de **liga** é indicado em aplicações como **pás de turbinas** e outros componentes sujeitos à **fluência**.



Efeitos do aumento da tensão e da temperatura: (a) na curva de fluência; (b) na taxa de deformação.

- Altera a **inclinação** da curva $\epsilon \times t$;
- Provoca **aumento** da **taxa** de deformação/taxa de **fluência** estacionária;
- **Redução** do tempo para fratura.



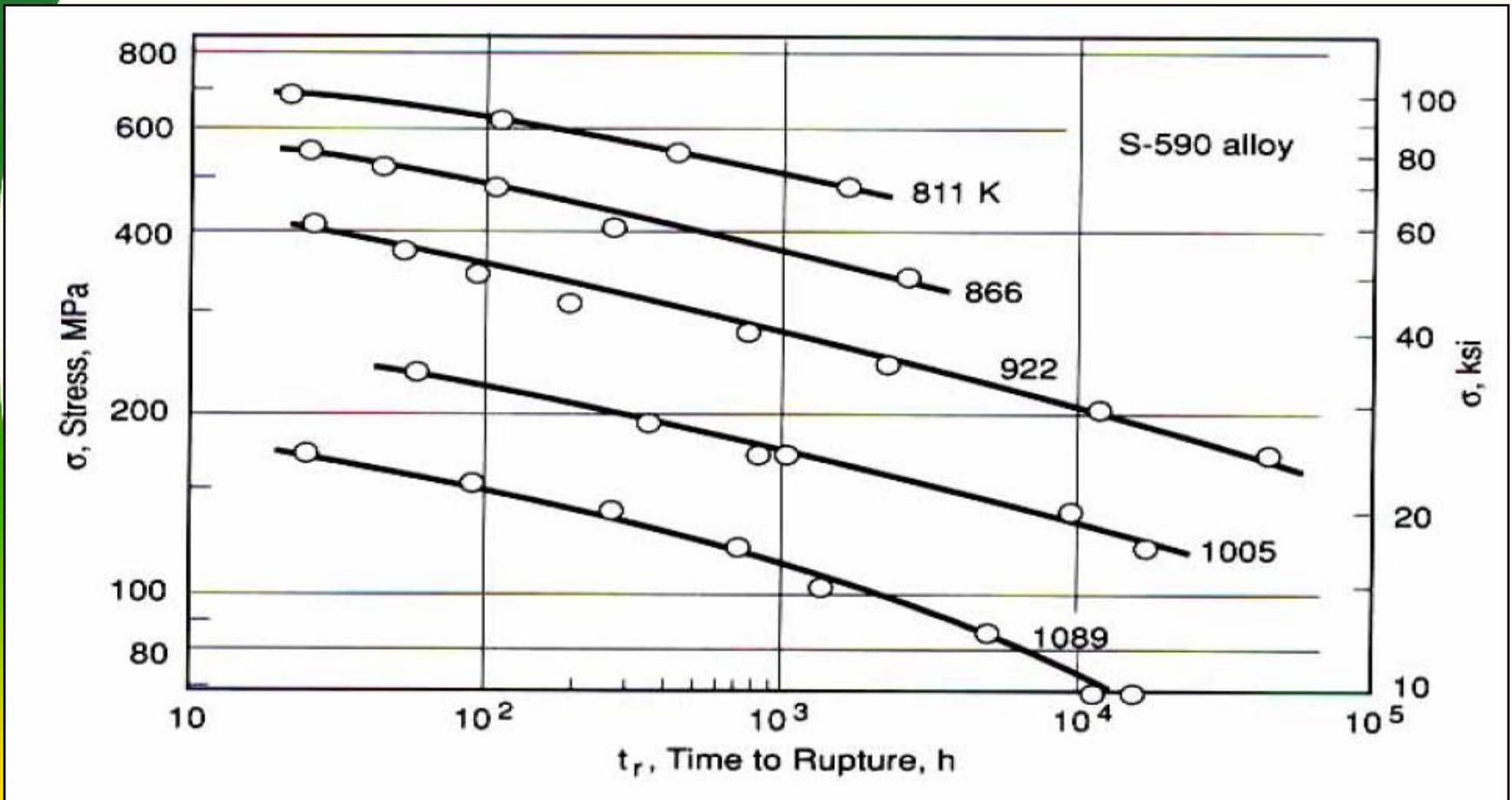
$$\sigma \uparrow \Rightarrow \dot{\epsilon} \uparrow$$

Creep curves for lead at 17°C from the early work of Andrade, where 1 kg/cm² = 0.0981 MPa. (From [Andrade 14]; used with permission.)

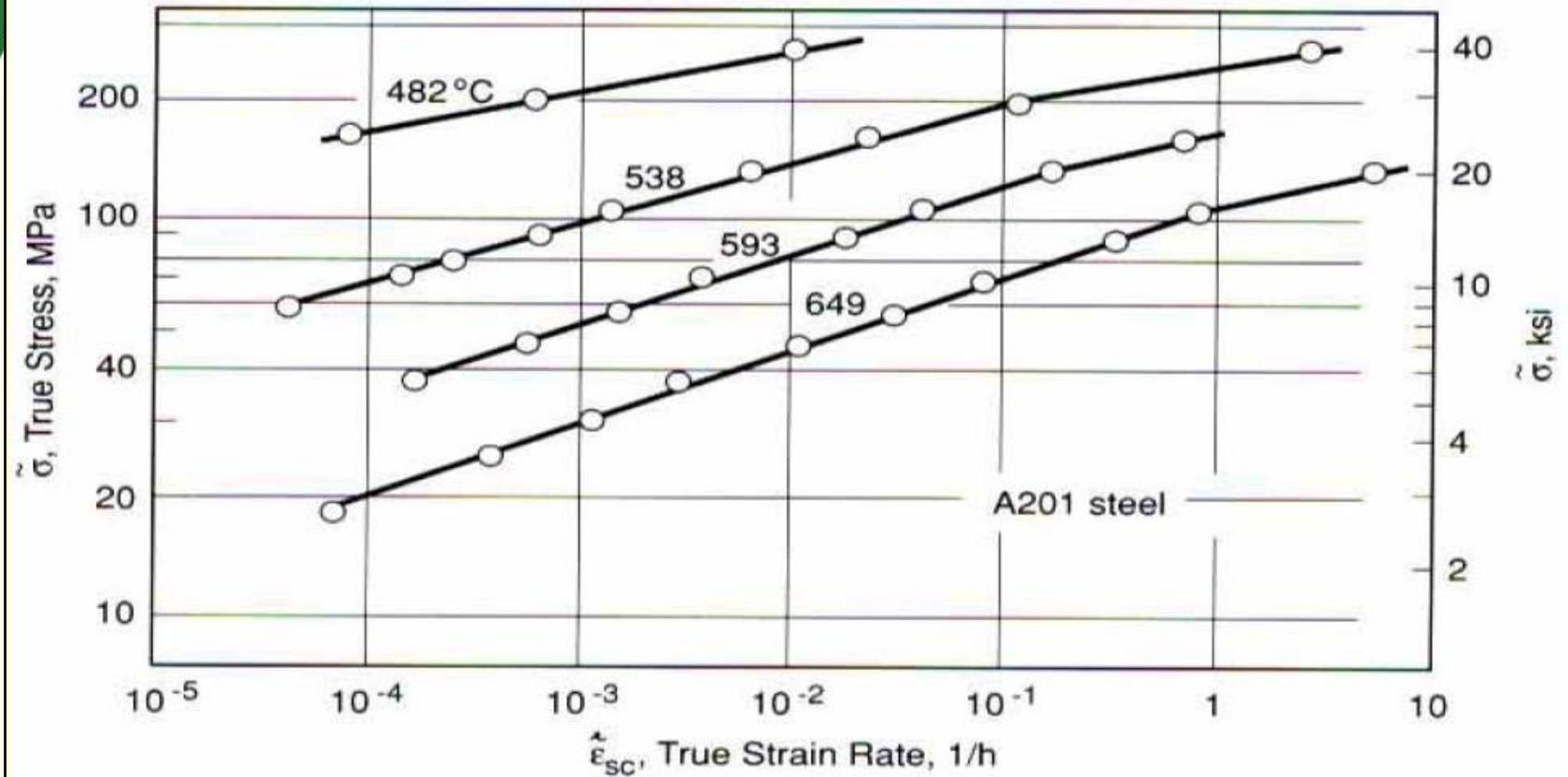
Em alguns casos a **aceleração do estágio terciário** não é devida a mudanças no comportamento do material, mas sim **devido a diminuição da secção transversal**. Isto causa o aumento da tensão verdadeira, que por sua vez causa um aumento da taxa de deformação. Se a estricção não for intensa, o 3º estágio pode não ocorrer.

Representação dos Resultados dos Ensaios de Fluência

- Os **resultados do ensaio** de fluência pode ser sumarizado considerando os quatro **parâmetros seguintes**:
 - **Tensão (σ)**;
 - **Temperatura**;
 - **Taxa de Fluência Estacionária ($\dot{\epsilon}_s$)** ,
 - **Tempo de ruptura (t)**.
- Existe uma **grande variedade** de formas de se apresentar os dados de um ensaio de fluência em diferentes temperaturas e tensões.

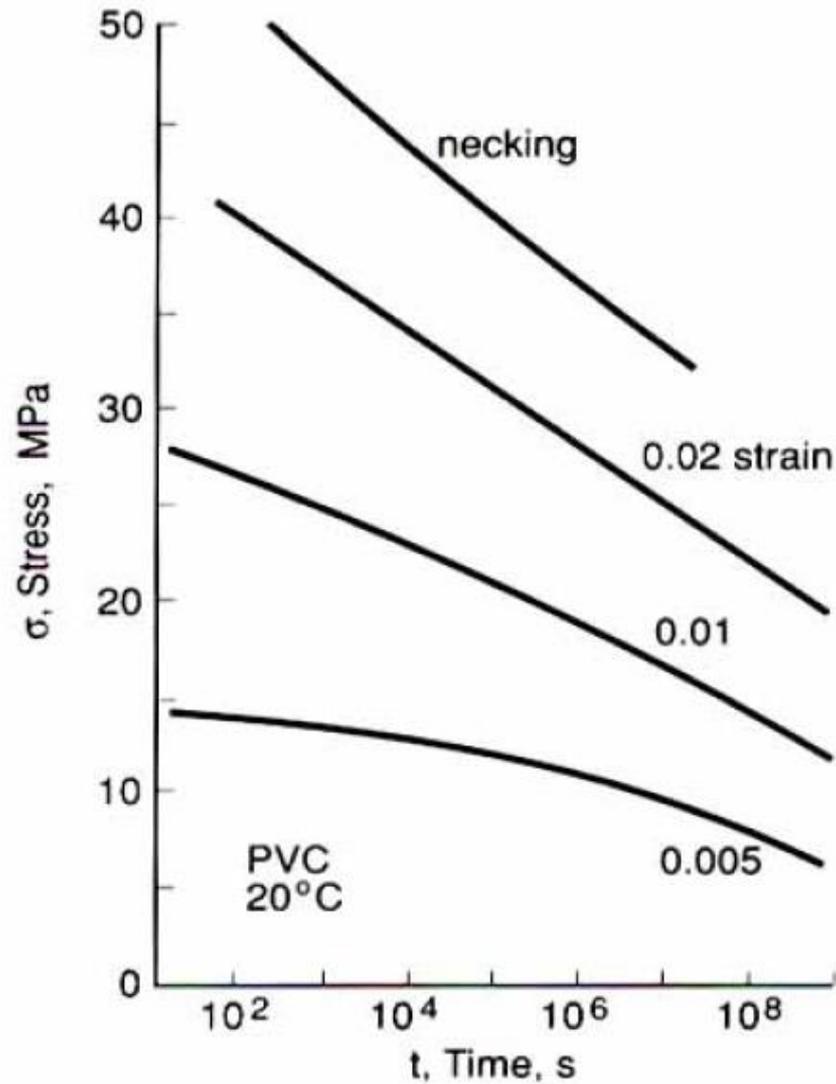


Tensão x Tempo de Ruptura



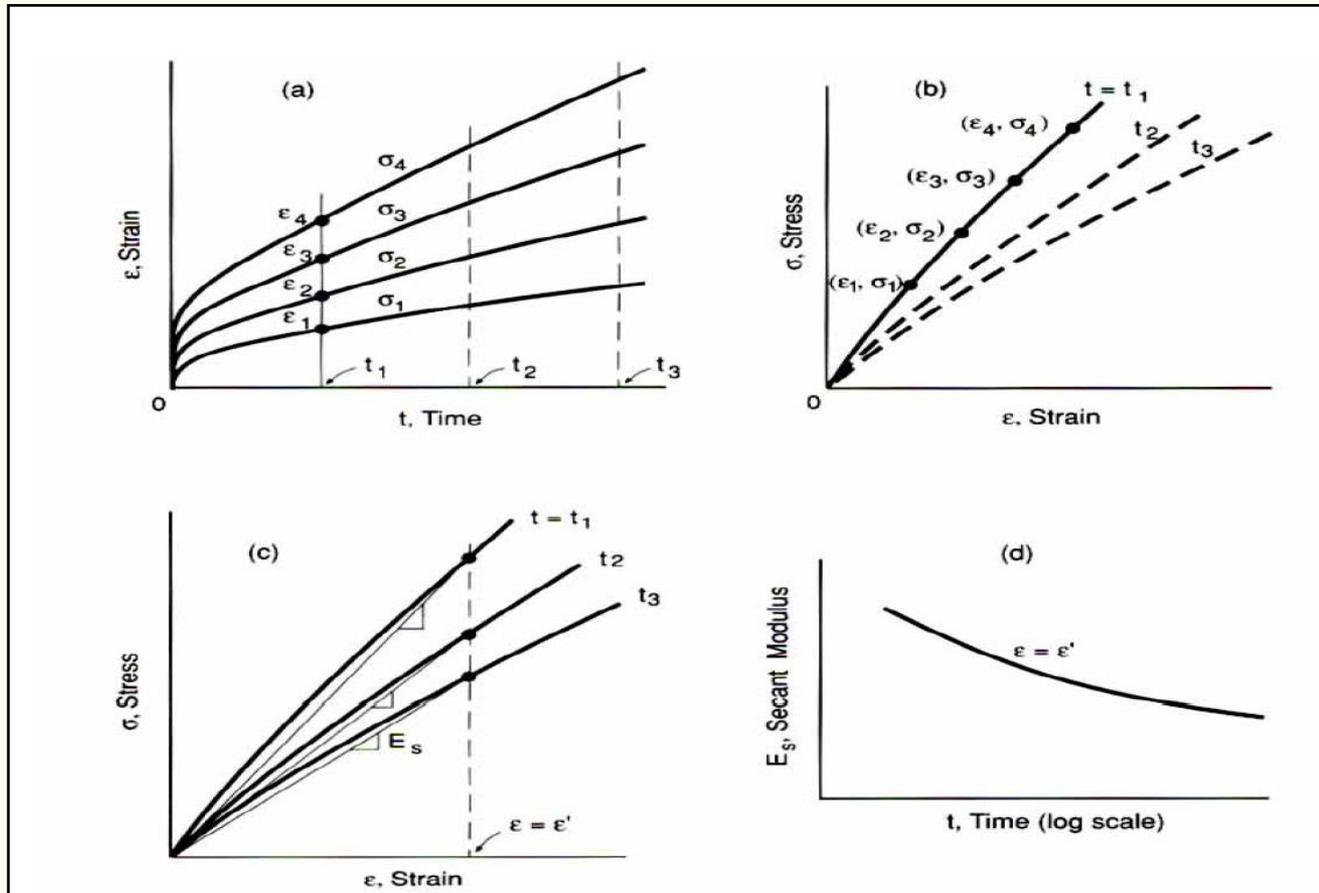
Tensão Verdadeira x Taxa de Deformação Verdadeira de regime em várias temperaturas

Se o ensaio for feito sob **tensão verdadeira constante** (com diminuição progressiva da carga compensando a redução de área), **não se observa a transição para o terceiro estágio**. O efeito da estrição é inibido.



Tensão x Tempo (para causar uma determinada deformação)

- Curvas $\sigma \times \varepsilon$ para tempo constante são muitas vezes necessárias;
- No caso de polímeros é muito comum a determinação do módulo secante E_s , correspondente a uma determinada deformação ε , que é então colocado em gráfico em função do tempo.



Curva $\sigma \times \varepsilon$ isócrona (mesmo tempo)

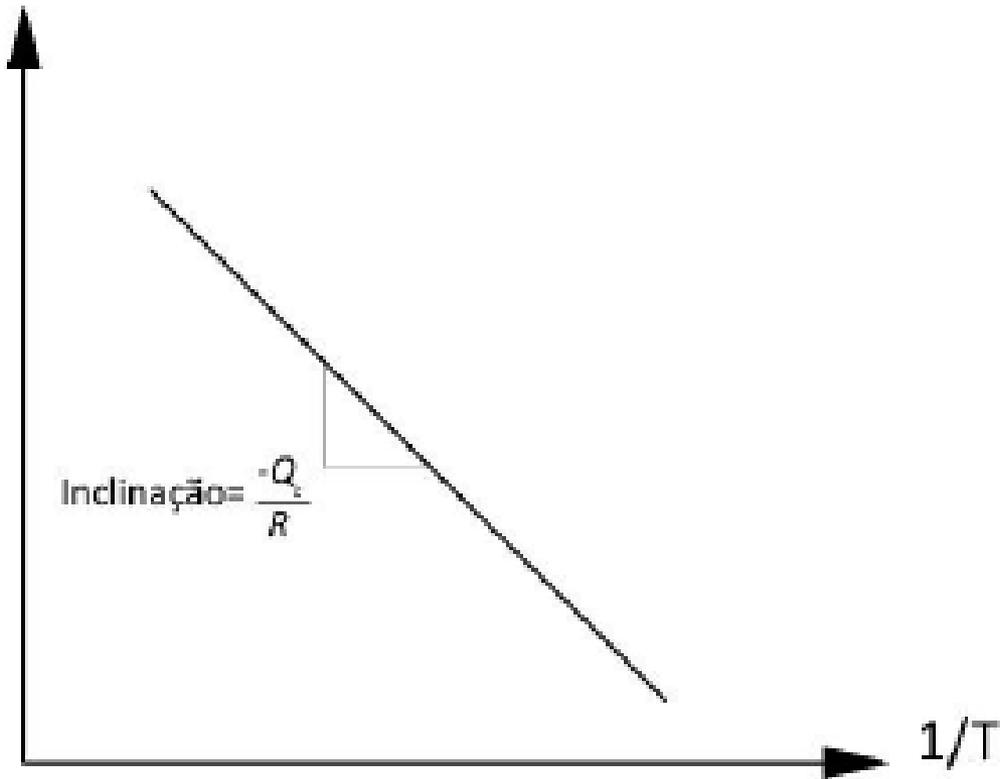
A **fluência** é um fenômeno **termicamente ativado** e existe uma **energia de ativação** para que ocorra, assim, a taxa de fluência estacionária ($\dot{\epsilon}_s$) é regida por uma **equação** tipo **Arrhenius**:

$$\dot{\epsilon}_s \propto \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

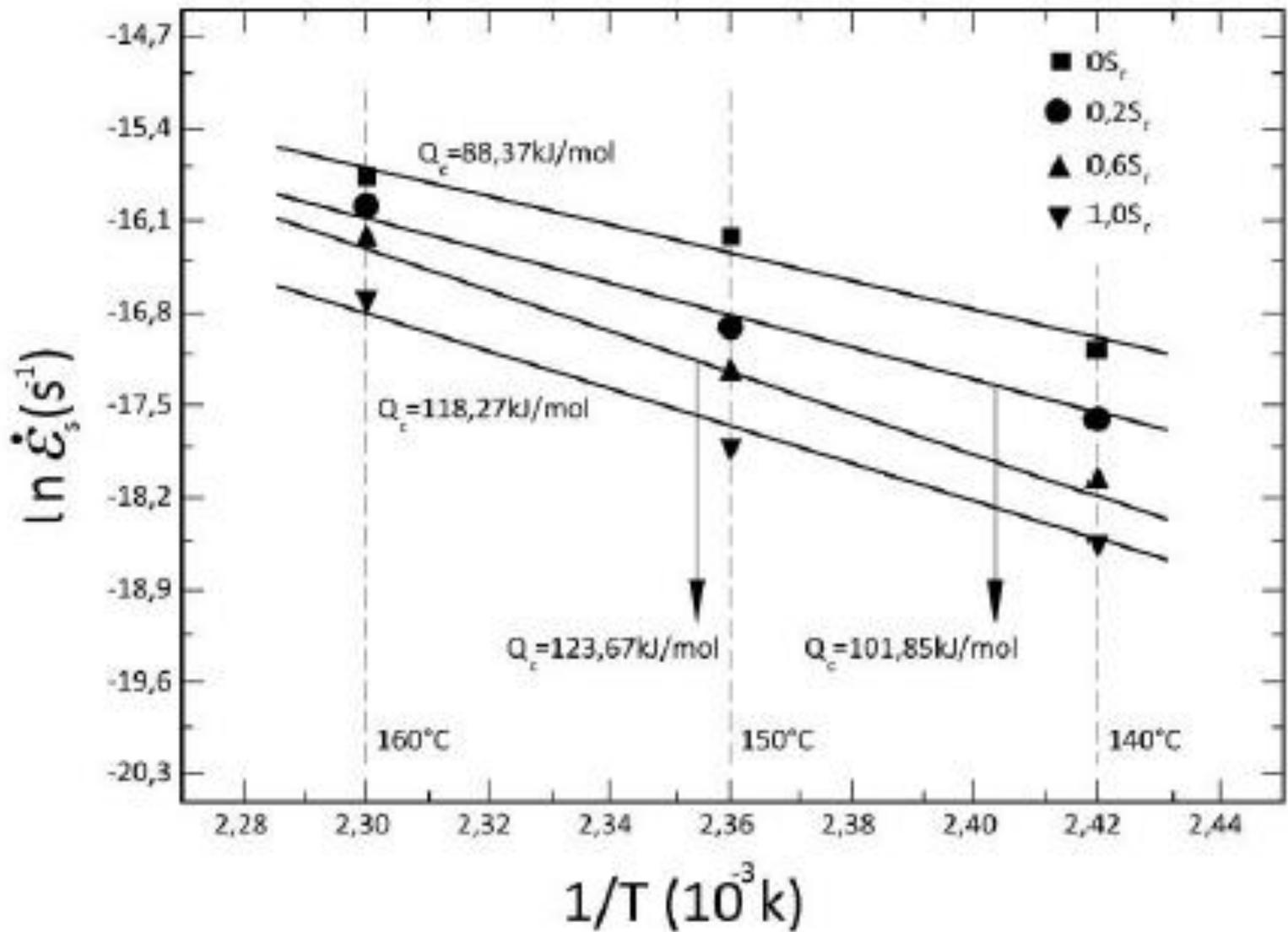
Podemos, então aplicar o **logaritmo neperiano**:

$$\ln \dot{\epsilon}_s \propto \left(-\frac{Q_c}{R}\right) \cdot \frac{1}{T}$$

$\ln \dot{\epsilon}_s$



Determinação da energia de ativação para a fluência.



Resultados de fluência para ligas Al-Mg com 0,5% de concentrado de terras raras à base de Ce e diferentes adições de Sr [Zhang, 2017].

NORMAS PARA O ENSAIO DE FLUÊNCIA

- **ASTM E139-11** Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials;
- **ASTM C1291-18** Standard Test Method for Elevated Temperature Tensile Creep Strain, Creep Strain Rate and Creep Time to Failure for Monolithic Advanced Ceramics;
- **ASTM D2990-17** Standard Test Methods for Tensile, Compressive and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics.

Parâmetro Tempo – Temperatura e Estimativa de Vida

- A **fluência** pode levar peças e dispositivos ao **rompimento**, por processos de fratura por difusão de vazios com evolução para microvazios, como a **cavitação**, já estudada;
- Em projetos de engenharia onde a fluência pode ocorrer, **não deve acontecer excessiva deformação, nem a ruptura dentro da vida desejada em serviço**;
- Em **usinas térmicas** ou nucleares, **refinarias**, indústrias **petroquímicas**, etc, os reatores são **projetados** para **vidas** sob fluência de cerca de 200.000 horas (**22 anos** e 10 meses).

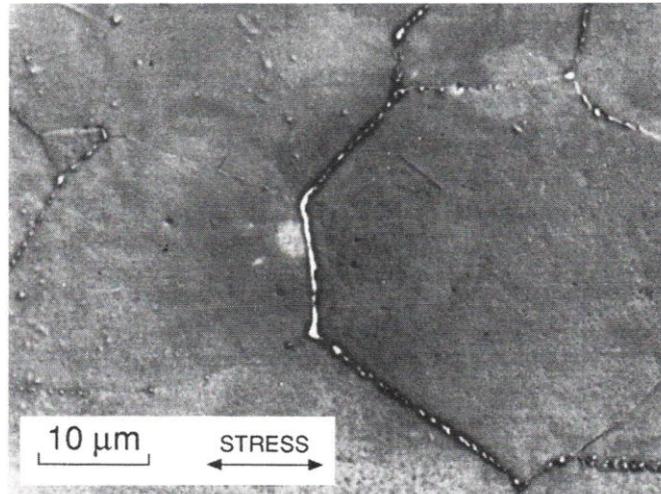
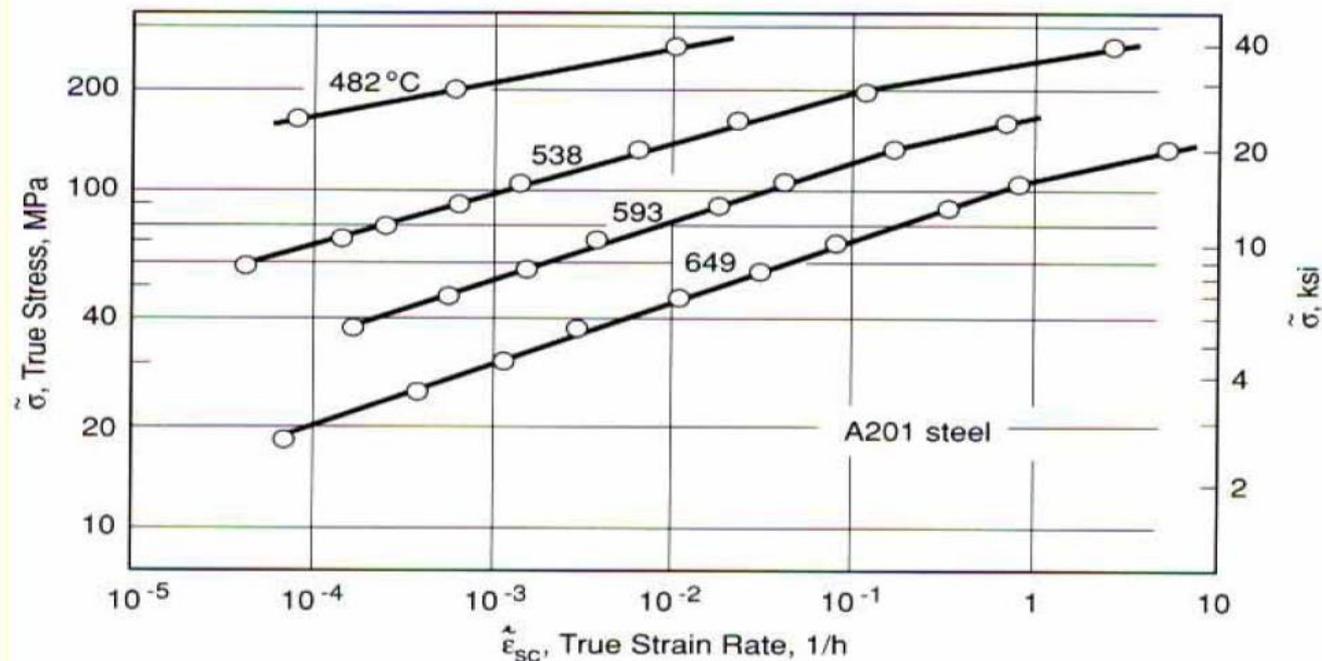


Figure 15.18 Grain boundary cavitation and cracking due to creep in a tantalum alloy (T-111), tested under creep-fatigue interaction with temperature variation between 200 and 1150°C. (Adapted from [Sheffler 72].)

- Ensaio são limitados a geralmente a 1000 h (42 dias), algumas vezes 10.000 h (14 meses), mas raramente 100.000 h (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.



- Um exemplo destas **metodologias** são a utilização resultados de **ensaios de curta duração**, em **temperatura 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**. Os mais utilizados são:
 - **Sherby-Dorn**
 - **Larson-Miller**

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 estacionário (estágio II)**

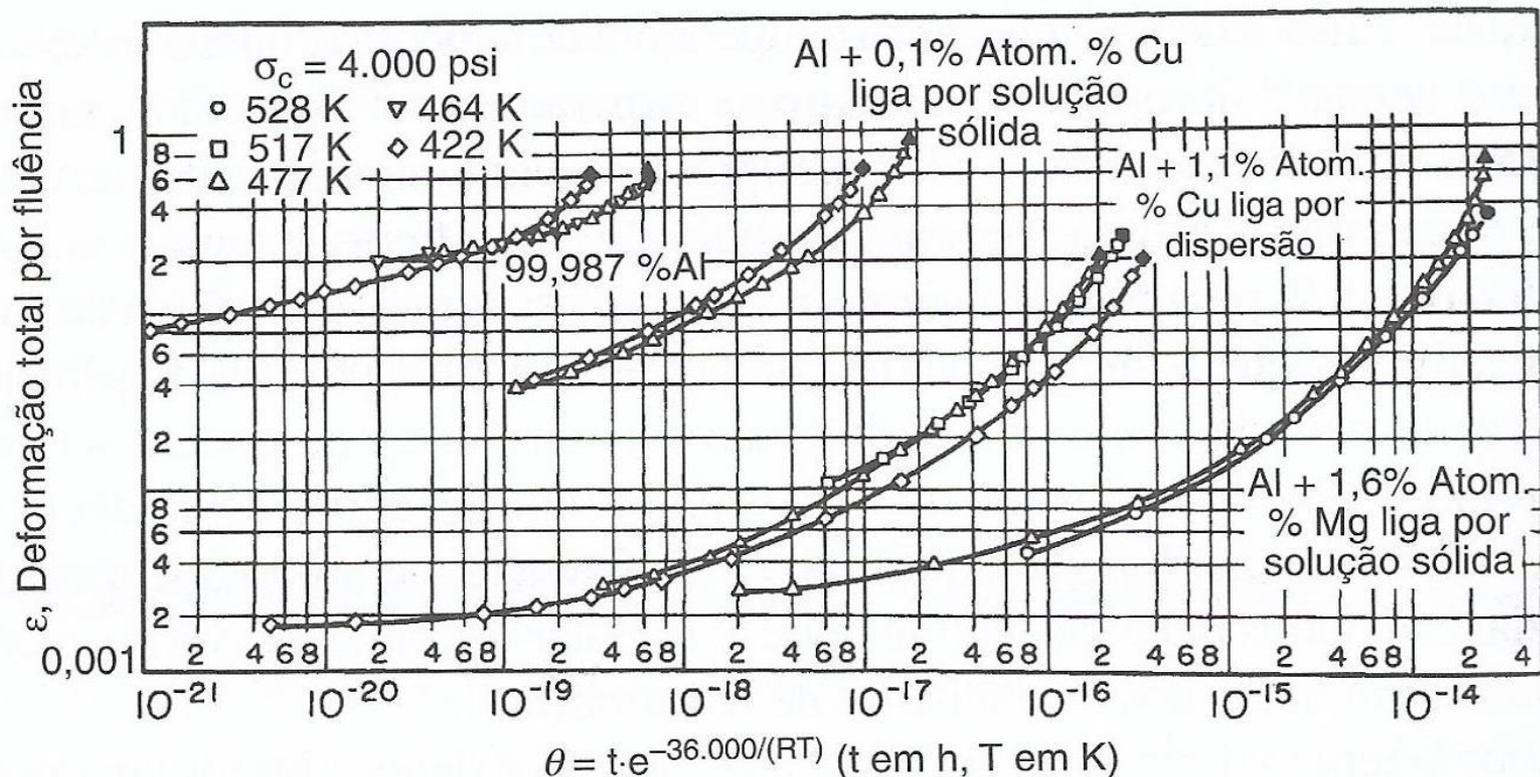
$$\varepsilon_{sc} = A(\sigma) t e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- Esta equação sugere que as **deformações de fluência para uma dada tensão, levam a uma única curva se colocada em gráfico de $\theta = (\varepsilon_{sc}/A(\sigma))$ em função de Q:**

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

- θ é chamado de **parâmetro temperatura- tempo compensado**

- Para definir o **parâmetro S-D**, considera-se que:
 - A **deformação em fluência na ruptura** é aproximadamente **constante** para um dado θ (temperatura-tempo compensado), i.e., existe um θ_r , que **depende** somente da **tensão** para um determinado material;
 - Assim, para um material **específico**, uma **única** curva relaciona θ_r e a **tensão** para cada **par temperatura e tempo** de ruptura.



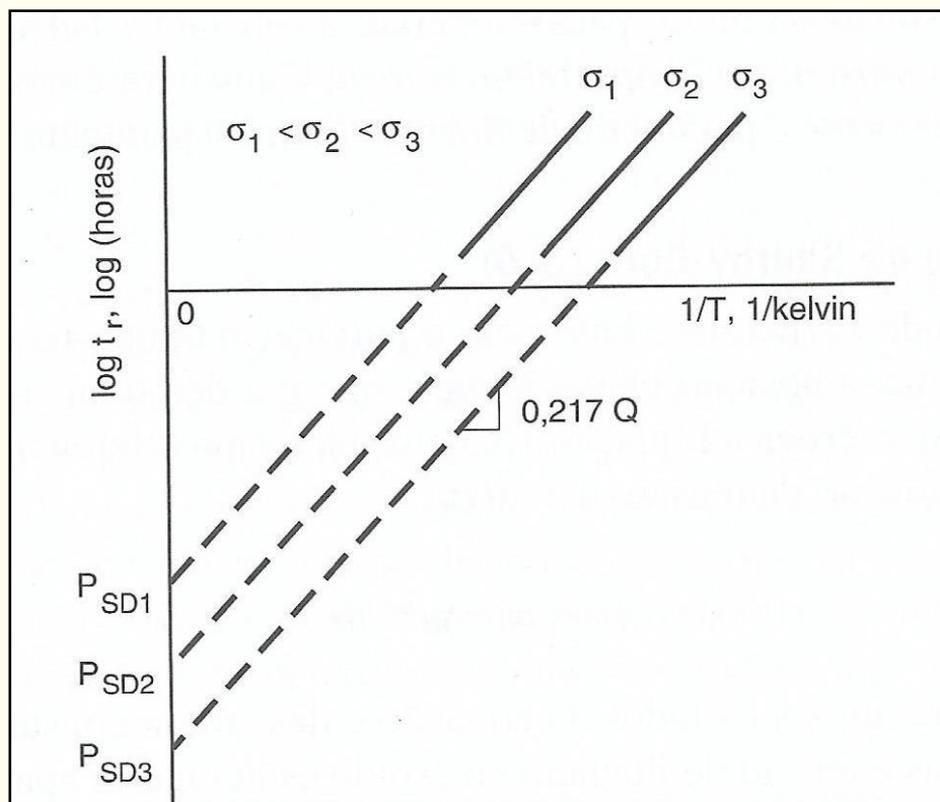
Desse modo, ao invés de trabalhar com θr , define-se o parâmetro **S-D** como sendo ($R=2,0$ [cal/(K.mole)]; $\log(e) = 0,434$):

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

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

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

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



Uma vez **determinado Q**, os dados de **Tensão – Vida (em fluência)** podem ser empregados para obter-se a **curva de $P_{S-D} \times \sigma$** .

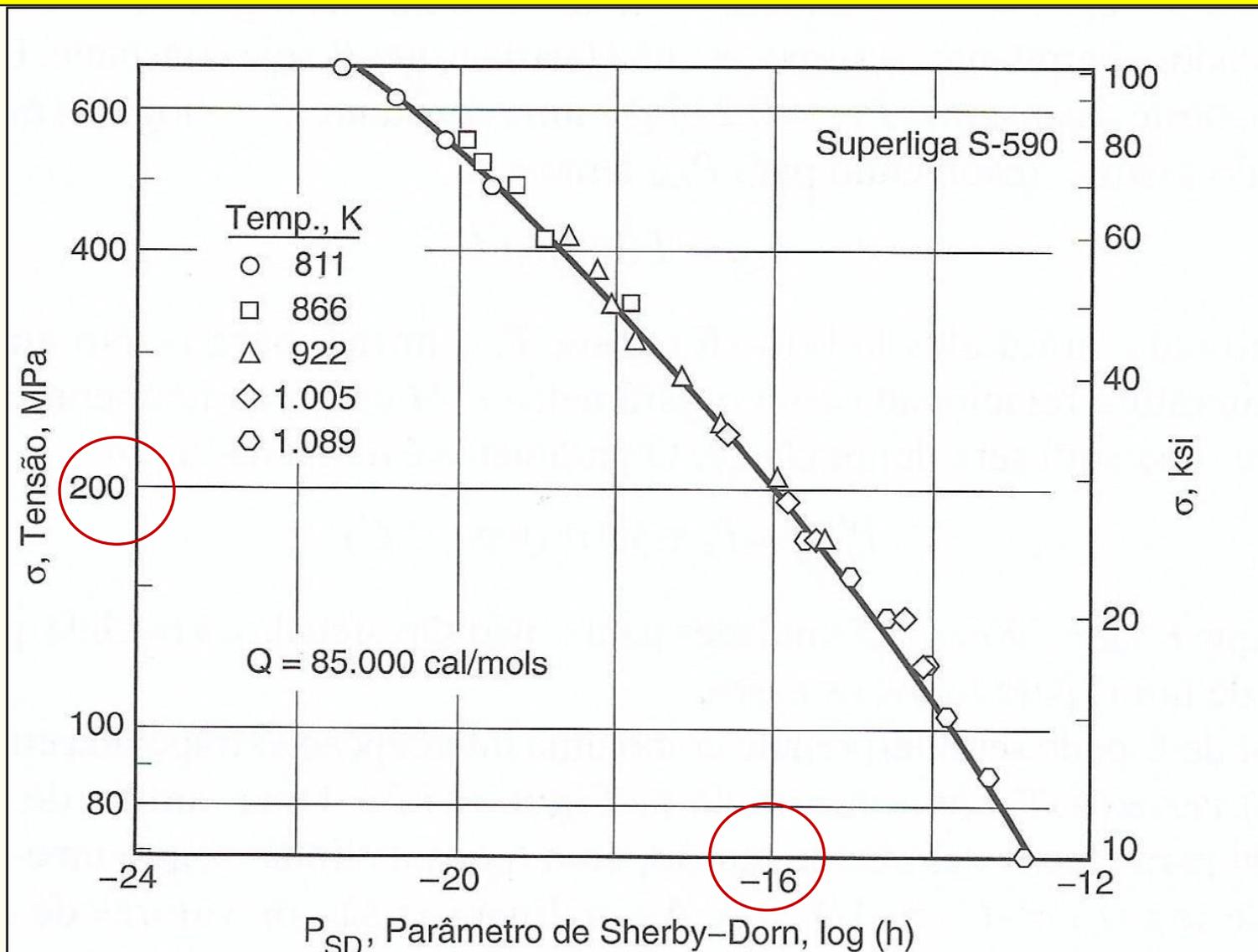


Figura 15.21 (exemplo)

EXEMPLO 15.2

Um componente de engenharia feito da superliga S-590, à base de Fe-Cr-Ni-Co e resistente ao calor, é submetido em serviço a uma tensão estática de 200 MPa a uma temperatura de 600 °C. Qual é a expectativa para a vida em dias para a ruptura por fluência?

Solução

A Figura 15.21 fornece a tensão necessária *versus* a curva P_{SD} e o valor de $Q = 85.000$ cal/mols para o material. Ao introduzir na curva $\sigma = 200$ MPa, obtém-se $P_{SD} \approx -16,0$. A temperatura deve estar em kelvin para a Equação 15.16; isto é, $T = 600$ °C + 273 = 873 K. A Equação 15.16 fica então:

$$\log t_r = P_{SD} + \frac{0,217Q}{T} = -16 + \frac{0,217(85,000 \text{ cal/mole})}{873 \text{ K}} = 5.128 \quad (\text{Resposta})$$

$$t_r = 10^{\log t_r} = 10^{5.128} = 134.400 \text{ horas} = 5.600 \text{ dias}$$

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

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

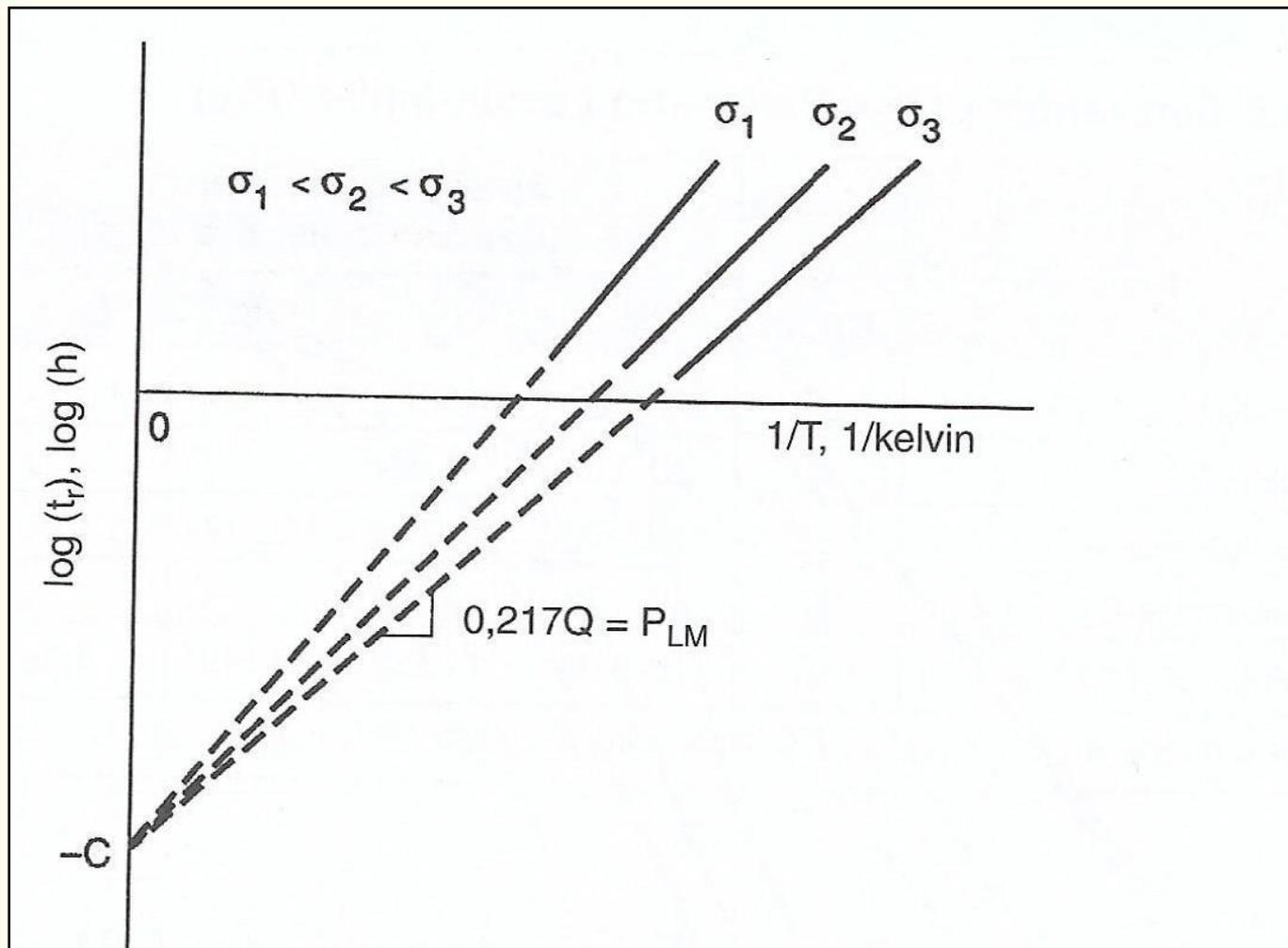
- Substitui-se $\theta = \theta_r$ e $t = t_r$. Neste caso **Q não é assumido constante** e θ_r é **constante**. O termo P_{L-M} é definido como:

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

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

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

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



Note que esta **metodologia** tem a **mesma base teórica** do parâmetro **S-D**, a **diferença** é que **Q não** é considerada **constante**.

Uma vez **determinado Q**, os dados de **Tensão – Vida (em fluência)** podem ser empregados para obter-se a **curva de $P_{LM} \times \sigma$** .

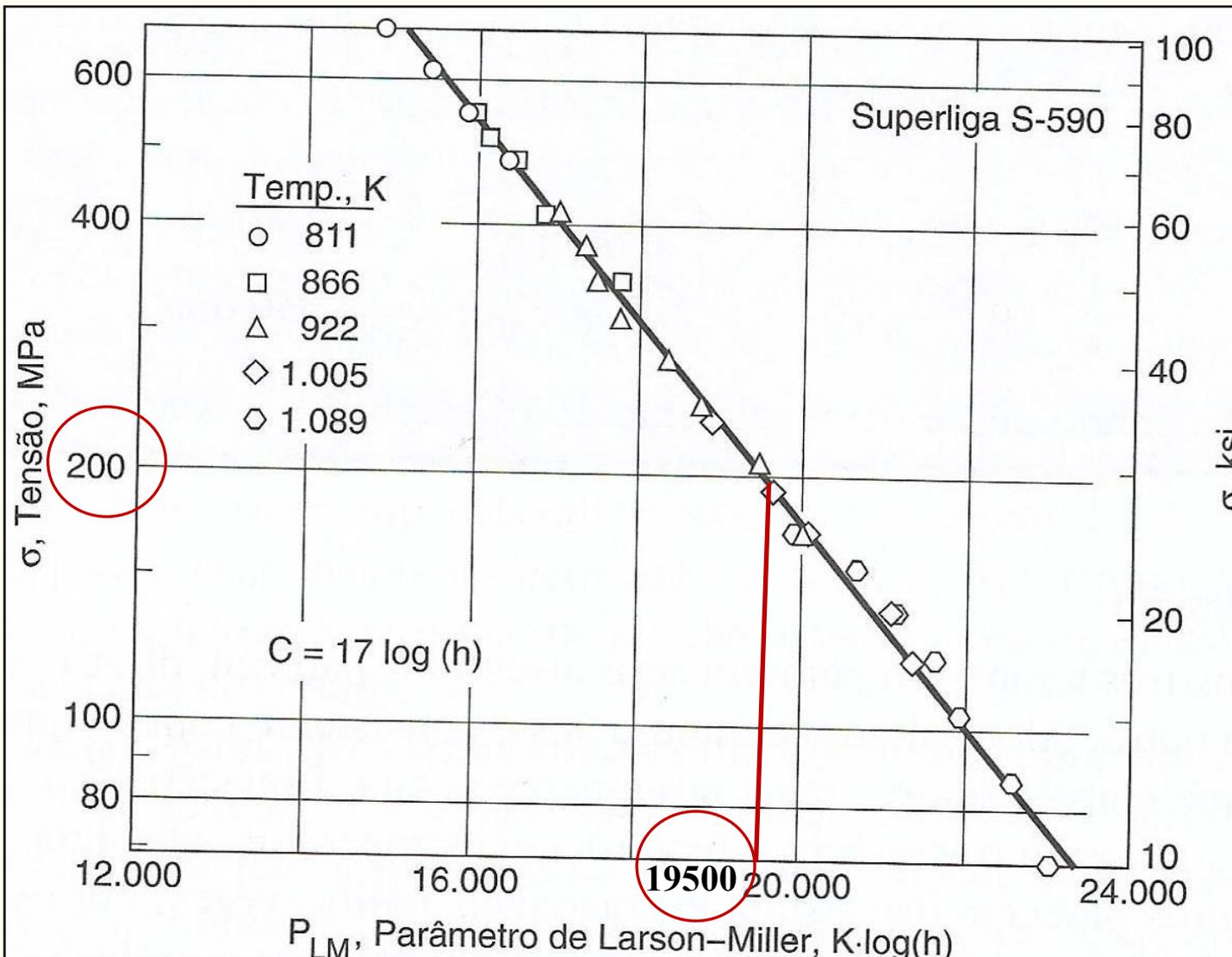


Figura 15.23 (exemplo)

EXEMPLO 15.3

Considere novamente o Exemplo 15.2, porém utilizando o parâmetro de Larson-Miller.

Solução

A lógica é a mesma de antes, exceto que agora é empregado o valor P_{LM} da Equação 15.17. A Figura 15.23 fornece a curva tensão *versus* P_{LM} necessária e o valor de $C = 17\log(h)$ para este material. Ao entrar na curva com $\sigma = 200$ MPa, obtém-se $P_{LM} \approx 19.500$. Empregando a Equação 15.17, com a temperatura em kelvin, $T = 600\text{ }^\circ\text{C} + 273 = 873$ K, temos:

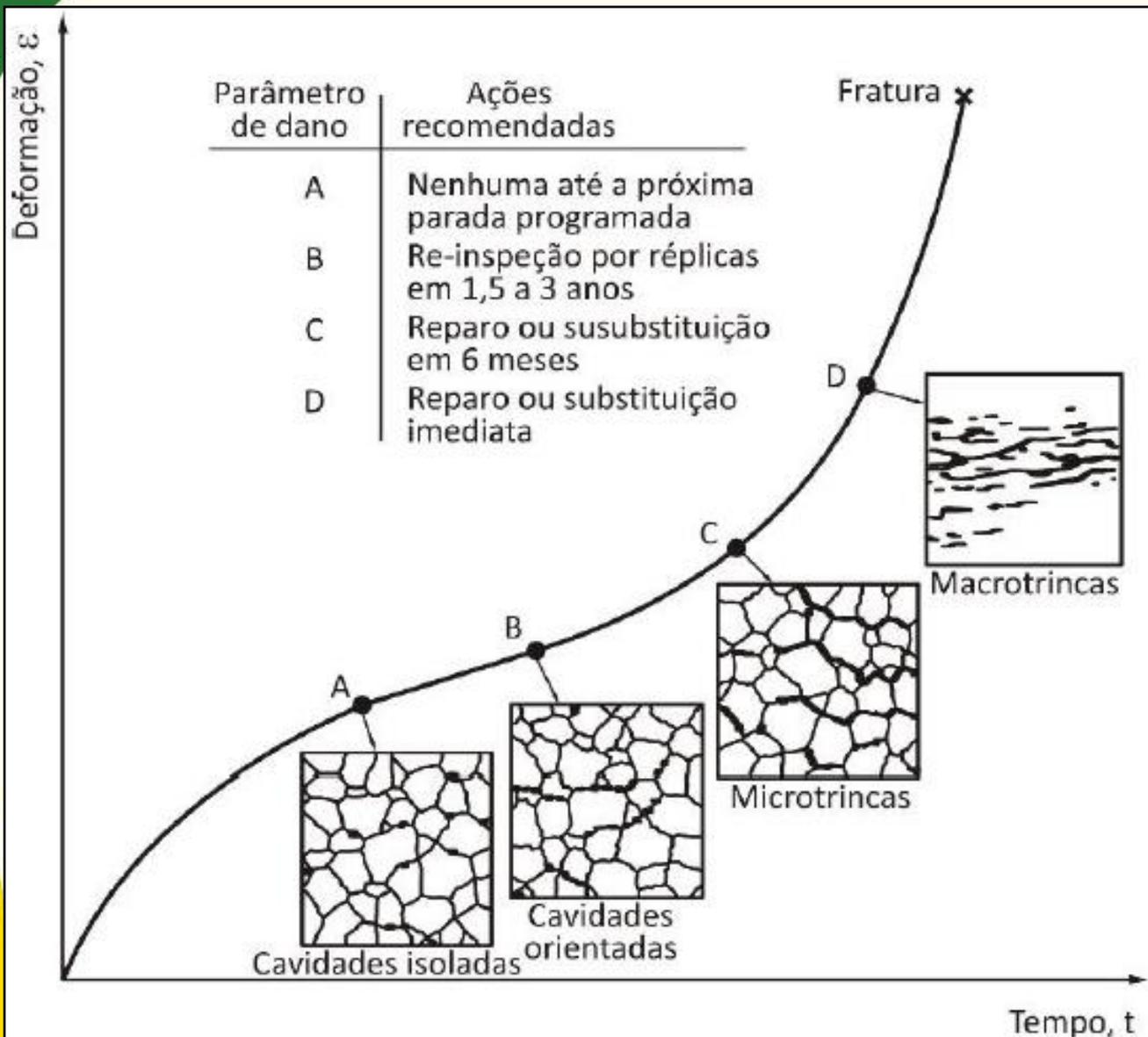
$$\log t_r = P_{SD} + \frac{P_{LM}}{T} - C = \frac{19.500}{873\text{ K}} = 5,337 \quad (\text{Resposta})$$

$$t_r = 10^{\log t_r} = 10^{5,337} = 217.200 \text{ horas} = 9.050 \text{ dias}$$

Note que o resultado difere razoavelmente do Exemplo 15.2, usando P_{SD} .

Método de Neubauer e Wedel

Levando em consideração que a fratura por fluência está relacionada à formação e crescimento de cavidades nos contornos de grão. Levando ao fenômeno da **cavitação**, Neubauer e Wedel fizeram várias observações em tubulações sob fluência e caracterizaram **quatro classes de danos e ações** a serem tomadas.. É baseado em inspeções por **réplica metalográfica**. Este método é bastante utilizado na indústria em **inspeções de campo** ou em **equipamentos de grandes dimensões** dos quais não é possível retirar amostras para análise metalográfica em laboratório. Consiste na **preparação** da superfície metálica, com lixamento, polimento e ataque químico. Posteriormente é aplicada uma **resina polimérica** que “**copia**” a microestrutura revelada. Essa resina é levada ao **microscópio óptico**, em laboratório.

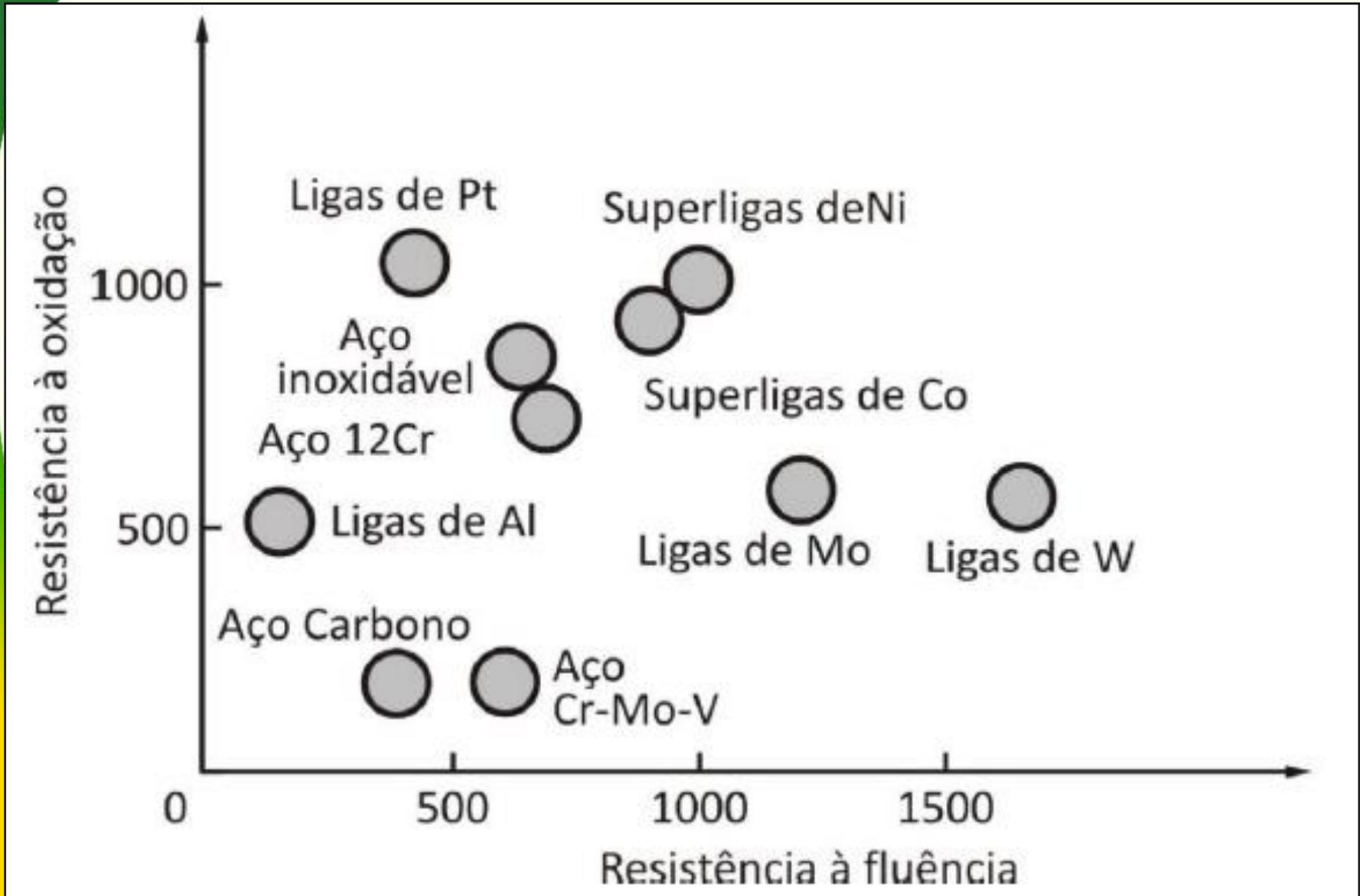


Método de Neubauer e Wedel relacionado à curva de fluência [Furtado, 2001].

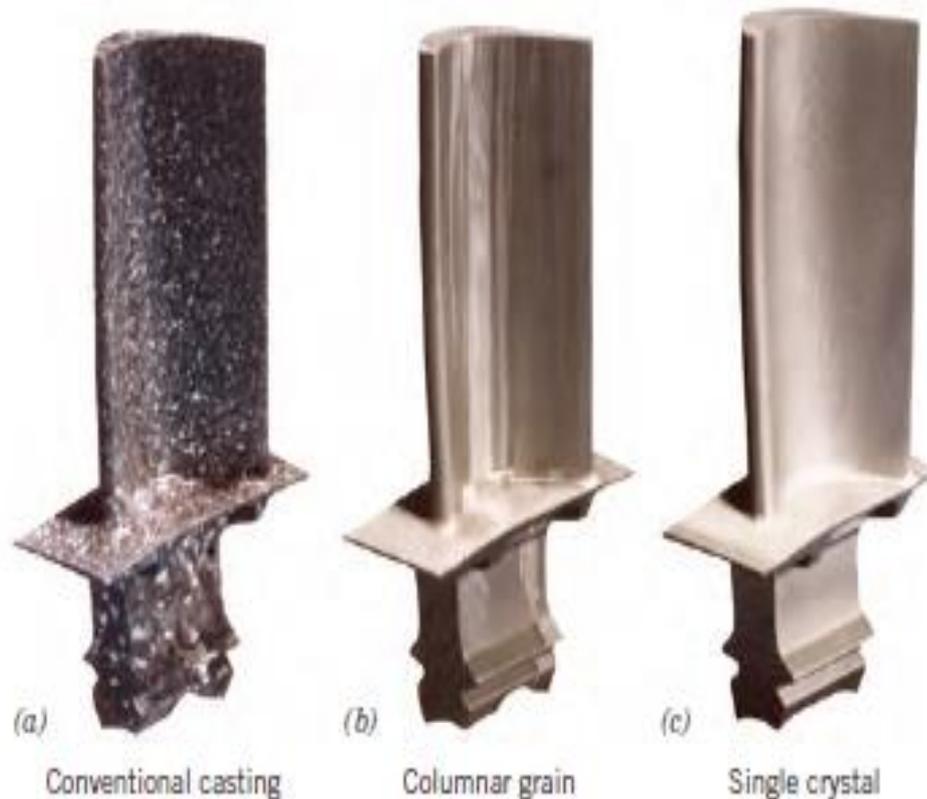
Outro problema: Oxidação superficial causada pela elevada temperatura



Figura 1 - Carepas na superfície do tarugo de aço (esquerda) e carepas eliminadas pelo processo (direita).



POLICRISTAL OU MONOCRISTAL? TAMANHO DE GRÃO GRANDE OU PEQUENO?



- **Baixas temperaturas:** Em geral grão pequeno melhor;
- **Altas temperaturas:** Em geral grão grande melhor;
- No exemplo ao lado, o caso “b” (fundição unidirecional) apresenta tempo de ruptura 2,5X maior que o caso “a” (fundição convencional), e 9X maior para lâminas monocristalinas.



FIM