

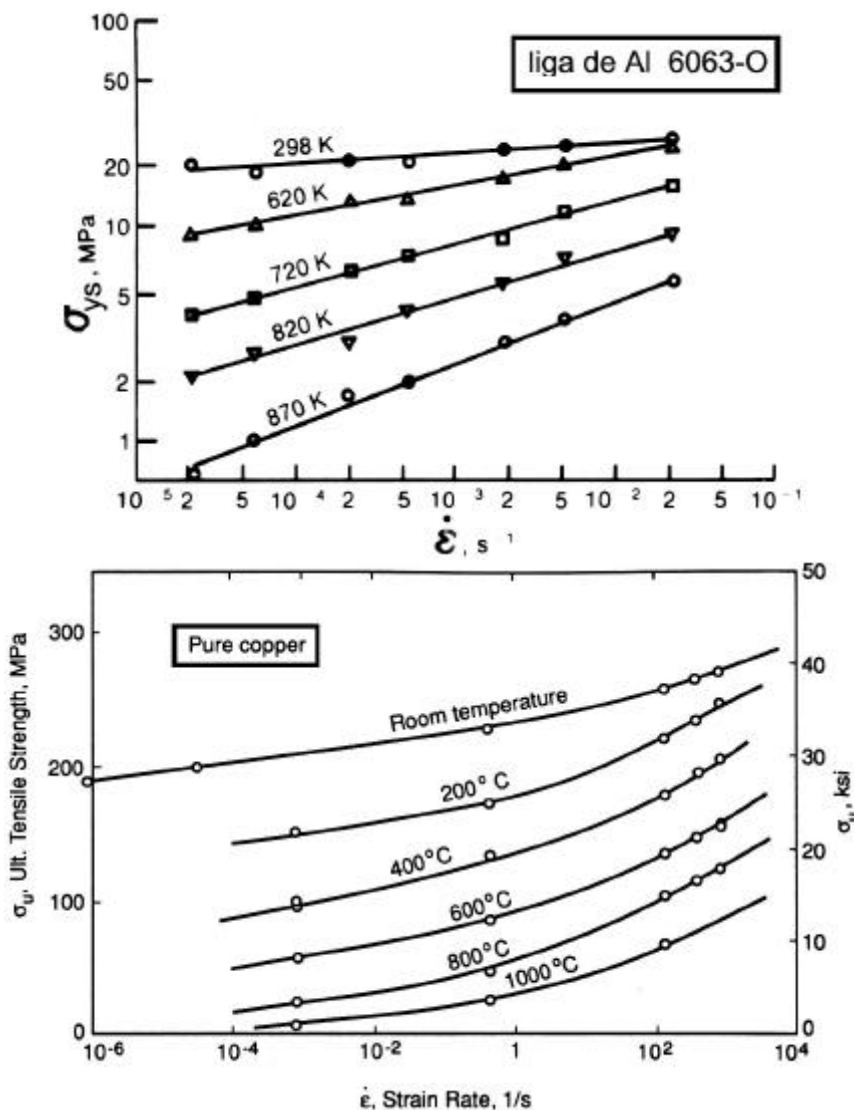


Figura 2.9 – Variação no limite de escoamento de uma liga de alumínio e do cobre puro com a variação na taxa de deformação e temperatura de teste para uma liga de alumínio, Dieter (1988), e para o cobre puro, Dowling (1993).

Na equação (2.8), o parâmetro “m” é conhecido como “sensibilidade à taxa de deformação”. Seu valor pode ser obtido de um gráfico log. tensão versus log. taxa de deformação, como o diagrama mostrado na figura 2.9: deve-se notar que este parâmetro muda com a temperatura. Existem tabelas onde são explicitados os valores de “m” e de “ σ_{ys0} ”, Helman e Cetlin (1983) apresentam uma que foi adaptada para os ábacos da figura 2.10.

Além disso, a sensibilidade à taxa de deformação pode apresentar uma certa dependência com a deformação, por isso uma forma mais precisa de se medir o valor de m é pela mudança na tensão de escoamento com uma mudança na taxa de carregamento a uma deformação e temperatura constantes. Neste caso, considerando-se o equacionamento abaixo:

$$m = \left(\frac{\partial \ln s}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{e,T} = \frac{\dot{\epsilon}}{s} \left(\frac{\partial s}{\partial \dot{\epsilon}} \right)_{e,T} = \frac{\Delta \log s}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{\log s_2 - \log s_1}{\log \dot{\epsilon}_2 - \log \dot{\epsilon}_1}$$

$$m = \frac{\log \left(\frac{s_2}{s_1} \right)}{\log \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)} \quad (2.9)$$

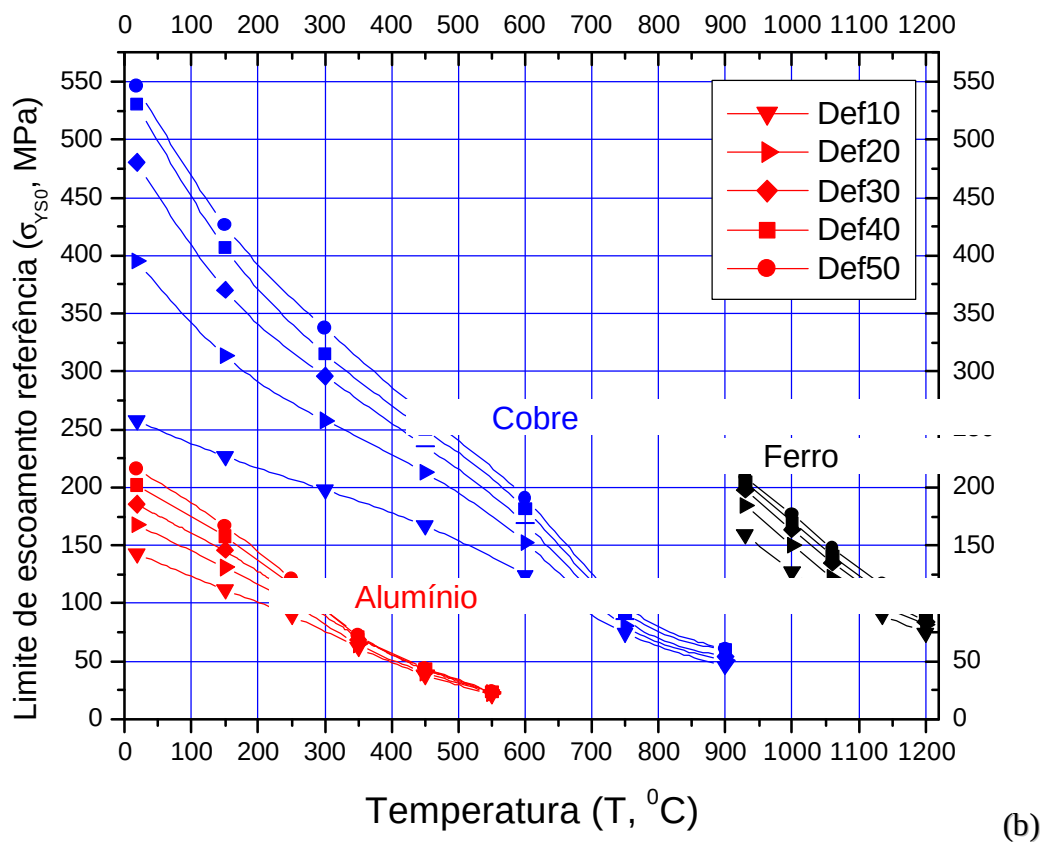
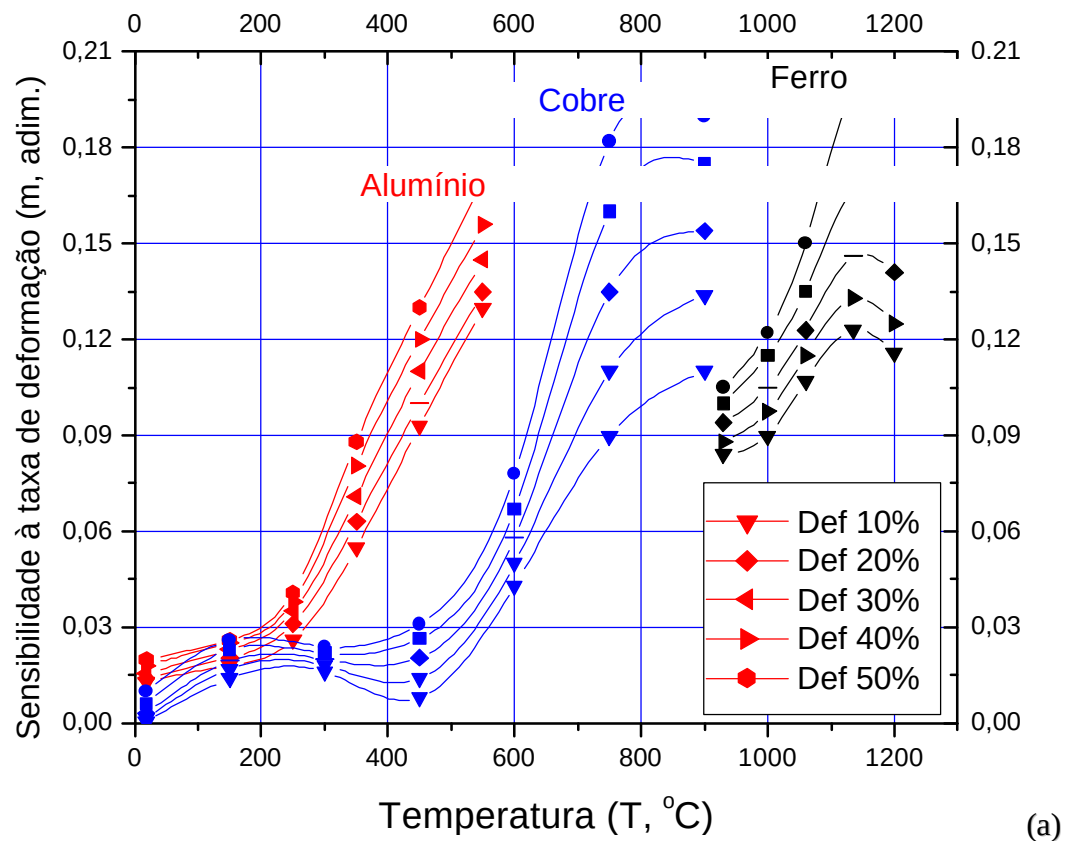


Figura 2.10 – Valores dos parâmetros (a) m e (b) σ_{YS0} da equação (2.8) para três metais obtidos em ensaios de compressão, adaptado de Helman e Cetlin (1983).

Pode-se obter o valor de m através da mudança na taxa de deformação, durante um ensaio mecânico, desde que se registre as variações no limite de escoamento instantâneo para cada uma das taxas de deformação, tal como mostrado nos gráficos da figura 2.11.

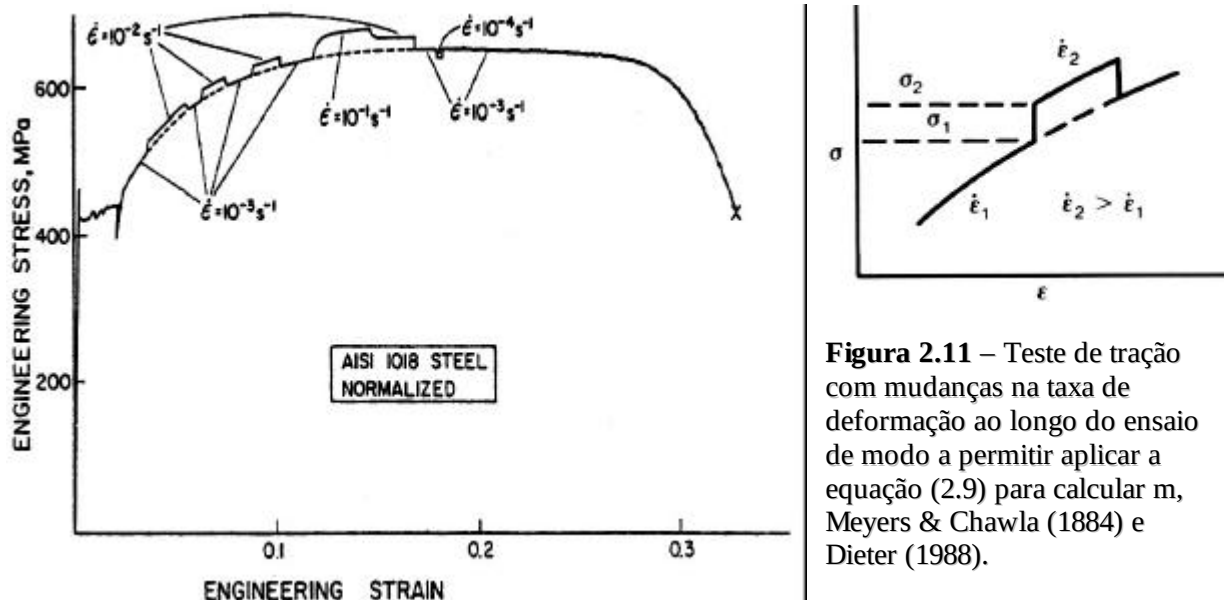


Figura 2.11 – Teste de tração com mudanças na taxa de deformação ao longo do ensaio de modo a permitir aplicar a equação (2.9) para calcular m , Meyers & Chawla (1984) e Dieter (1988).

Para obter os valores do limite de escoamento dos metais deve-se tomar cuidado com a aplicação dos dados coletados. No caso de se utilizar ensaio de tração, a deformação obtida nestes ensaios é muito limitada, o que limita a aplicação dos valores encontrados a situações de pequenas deformações. Como as operações de conformação mecânica normalmente ocorrem com maiores deformações, deve-se utilizar ensaios mecânicos, como os ensaios de compressão ou torção, que permitem medir os valores de resistência em largas deformações.

Além disso deve-se tomar cuidado com a aplicação dos resultados obtidos, nos ensaios mecânicos realizados em altas temperaturas. Normalmente a taxa de carregamento, ou de deformação, dos ensaios é menor do que a utilizada na prática. Como em altas temperaturas existe uma maior dependência entre as propriedades mecânicas e a taxa de deformação, os valores medidos nos ensaios podem subestimar excessivamente os reais valores de resistência encontrados nas operações de conformação.

Esta tendência ser observada para o cobre, através do gráfico da figura 2.10. Neste caso, a sensibilidade à taxa de deformação é praticamente nula até a temperatura de 500°C, acima desta temperatura a resistência do cobre torna-se bastante sensível às variações na taxa de carregamento. Neste caso, qualquer ensaio mecânico, realizado a baixas taxas de deformação e em temperaturas acima de 500°C, subestimar a verdadeira resistência do cobre em operações de conformação a taxas de deformação maiores. A tabela 2.1 demonstra as taxas de deformação que podem ser obtidas em ensaios mecânicos.

2.5 – Transferência de Calor

Em alguns processos de conformação mecânica, especialmente naqueles em que altas temperaturas são utilizadas, torna-se necessário levar em consideração as trocas de térmicas que ocorrem. De acordo com a transferência de calor que possa ocorrer, o material pode se tornar mais aquecido ou perder a sua temperatura de maneira suficientemente rápida para

alterar o seu comportamento mecânico e conseqüentemente influenciar nos cálculos dos esforços de conformação.

Algumas estimativas simples do efeito das trocas térmicas podem ser feitas com base em modelos simples utilizando-se algumas propriedades dos materiais e coeficientes de transferência de calor do meio. As tabelas 2.2 e 2.3 ilustram o valor de alguns destes parâmetros.

Tabela 2.1 – Faixa de taxas de deformação em diferentes ensaios, Meyers & Chawla (1984).

STRAIN RATE	COMMON TESTING METHODS	DYNAMIC CONSIDERATIONS	
10 ⁷	HIGH VELOCITY IMPACT – Explosives	SHOCK-WAVE PROPAGATION	INERTIAL FORCES IMPORTANT
10 ⁶	– Pulsed laser	(See Section 15.3)	
10 ⁵	– Projectile impact		
10 ⁴	IMPACT Hopkinson Bar (plane stress)	PLASTIC WAVE PROPAGATION	
10 ³	Inclined parallel impact (shear)	SHEAR WAVE PROPAGATION	
10 ²	DYNAMIC High-velocity hydraulic or pneumatic machines; cam plastometer	MECHANICAL RESONANCE IN SPECIMEN AND MACHINE IS IMPORTANT	INERTIAL FORCES NEGLIGIBLE
10 ¹			
10 ⁰	QUASI-STATIC Hydraulic, servo-hydraulic or screw-driven testing machines	TESTS WITH CONSTANT CROSS-HEAD VELOCITY STRESS THE SAME THROUGHOUT LENGTH OF SPECIMEN	
10 ⁻¹			
10 ⁻²			
10 ⁻³			
10 ⁻⁴			
10 ⁻⁵	CREEP AND STRESS-RELAXATION	VISCO-PLASTIC RESPONSE OF METALS	
10 ⁻⁶	– Conventional testing machines		
10 ⁻⁷	– Creep testers		
10 ⁻⁸			
10 ⁻⁹			

Tabela 2.2 – Valores de peso específico, calor específico e condutividade térmica para alguns metais, Schaeffer (1999).

Material	Temperatura (°C)	Peso Específico g/cm ³	Calor Específico J/(kg·K)	Cond. Térmica W/(m·K)
Aço baixa liga	20	7,84	460	39
	900	7,57	600	27
	1300	7,38	715	32
Ligas de Al-Si	200	2,7	900	240
	300	2,6	1000	230
	400	2,6	1100	230
Ligas de cobre	20	8,9	360	25 a 400
	700	8,6	490	60 a 360
	1000	8,4	490	70 a 340

A determinação exata dos efeitos das trocas térmicas geralmente é feita por modelos matemáticos implementados por computadores. Nestes casos a geometria, as condições de transferência de calor, o material e as temperaturas envolvidas são relacionados por meio destes modelos e uma solução é obtida de modo a estabelecer as condições do processo.

2.6 – Influência da temperatura na conformação

A conformação plástica dos metais é realizada em temperaturas que variam da ambiente até temperaturas próximas à fusão do material. A resistência mecânica dos metais normalmente cai à medida que a temperatura aumenta, conforme descrito no item I.4.1 do anexo I e como pode ser facilmente percebido nos gráficos das figuras 2.9 e 2.10. Como novo exemplo, na figura 2.12 são mostradas as variações nas propriedades mecânicas do ferro e do aço baixo carbono com o aumento da temperatura.

Deve-se notar, no caso do aço baixo carbono, que o material apresenta uma alteração de comportamento localizada entre a temperatura ambiente e 300° C, caracterizada pela forma serrilhada da curva tensão versus deformação. Este fenômeno é característico deste material e é conhecido como envelhecimento por deformação dinâmica, que é uma forma de fragilidade induzida por deformação em uma certa faixa de temperaturas do aço. Este fenômeno deve ser evitado durante a conformação de aços.

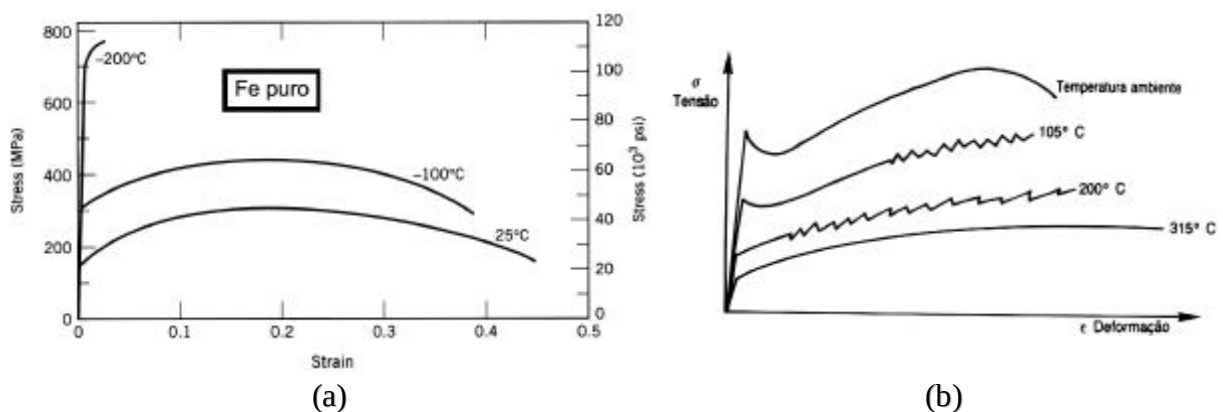


Figura 2.12 – Variação nas curvas tensão versus deformação para (a) ferro puro, Callister (1997) e (b) aço baixo carbono, adap. de Dieter (1988).

Aparentemente, quanto maior for a temperatura de conformação, menor será o limite de escoamento do material e consequentemente menor deve ser o gasto de energia para executar o processo de conformação. Entretanto existem alguns fatores que limitam a utilização de temperaturas elevadas:

- gasto de energia no aquecimento do material;
- dificuldade de manuseio do material aquecido;
- maior desgaste das partes em contato com as partes aquecidas;
- necessidade de se obter encruamento ou textura no material conformado;
- possível surgimento de efeitos secundários nas propriedades mecânicas;
- ocorrência de oxidação.



Além disso, já foi visto no item 2.1 que temperaturas suficientemente altas podem produzir uma recuperação da estrutura do material, quando o material perde o encruamento induzido pelo processo de conformação mecânica. Admite-se que isto ocorra para temperaturas maiores do que a metade da temperatura de fusão do material na escala absoluta ou utilizando-se a “temperatura homóloga” (T_h), definida pela equação 2.10:

$$T_h = \frac{T}{T_f} \quad (2.10)$$

onde T_f é a temperatura de fusão do material em questão na escala absoluta (Kelvin).

Quando o material é conformado em temperaturas homólogas maiores do que 0,5, considera-se que a estrutura do material seja recuperada e que o encruamento é perdido. Nestes casos, definiu-se que o processo de conformação é “a quente”. Quando a temperatura homóloga é menor do que 0,5, considera-se que o processo de deformação é “a frio”.

A deformação plástica resultante de trabalho mecânico a frio provoca encruamento, cujos efeitos são traduzidos por uma deformação da estrutura cristalina e modificação das propriedades mecânicas do material, conforme mostrado na figura 2.4. O trabalho a frio produz uma deformação geral dos grãos que constituem o metal, tornando-os alongados em direção da deformação mecânica induzida, conforme mostrado na figura 2.13.

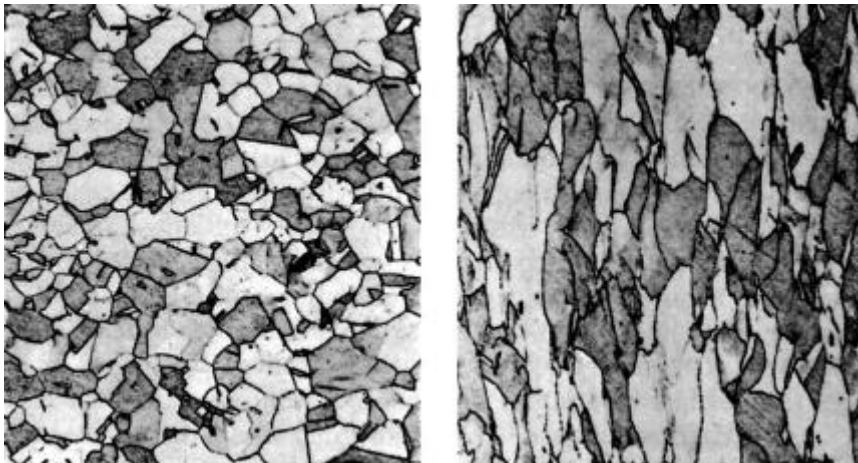


Figura 2.13 –
Alteração da
estrutura de grãos
de um material
metálico devido à
conformação
mecânica a frio,
Callister (1997).

A conformação mecânica a quente provoca encruamento do metal conformado, mas que é imediatamente recuperado devido a temperatura em que o material se encontra. Neste caso a perda da capacidade de deformação plástica, devido ao processo de conformação plástica, também é recuperada, tornando-se teoricamente ilimitada a capacidade de deformação plástica do metal. Na prática as limitações impostas são exatamente as mesmas apresentadas no final da página anterior. A figura 2.14 apresenta uma conhecida representação das alterações que podem ocorrer devido à utilização de deformação a frio e a quente em processos de conformação plástica.

Por outro lado, uma maneira de se obter grandes deformações no material sem necessitar de processá-lo “a quente” é pela utilização de ciclos alternados de conformação a frio (quando o material fica encruado e perde a sua capacidade de deformação plástica) e recozimento de recristalização (quando o material perde o seu encruamento e recupera a sua capacidade de deformação plástica). A figura 2.15 ilustra o que ocorre quando um material é submetido a um ciclo deste tipo.

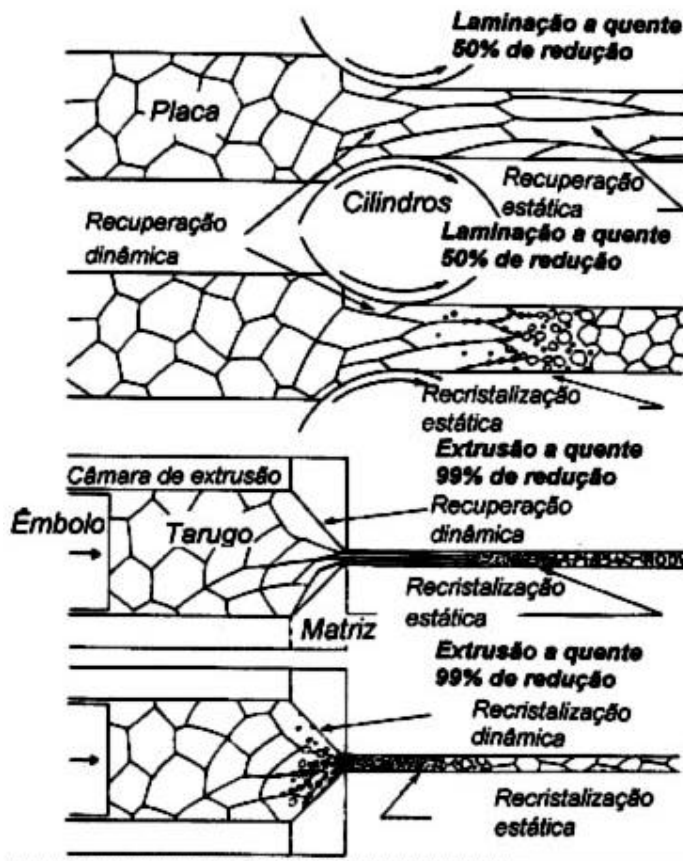


Figura 2.14 – Esquema das alterações microestruturais que podem ocorrer devido a conformação plástica a frio e a quente nos processos de laminação e extrusão, Plaut (1984).

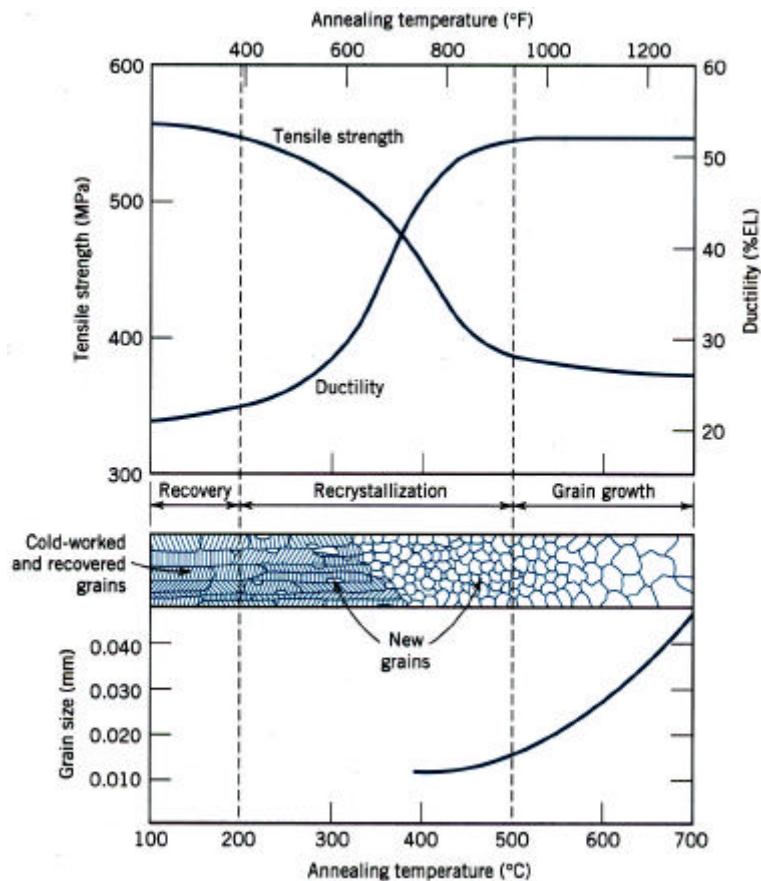
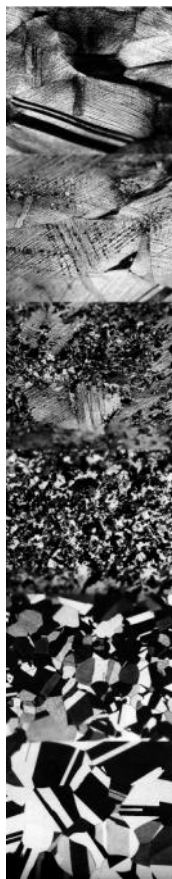


Figura 2.15 – Evolução do processo de recuperação das propriedades mecânicas de um material encruado sofrendo tratamento de recozimento de recristalização, Callister (1997).