

## 5 Recozimento de Materiais Metálicos

Este item foi baseado nos textos de [REED-HILL](#), capítulo 7, [DIETER](#), item 6.15, [McQUEEN e JONAS \(1.975\)](#) e [CAHN](#).

### 5.1 Introdução

Foi definido anteriormente que *recozimento* é qualquer tratamento térmico realizado com o objetivo de reduzir ou eliminar os efeitos da deformação plástica sobre a estrutura de um material metálico.

O processo de recozimento envolve normalmente três etapas: *recuperação*, *recristalização* e *crescimento de grão*, que estarão presentes em maior ou menor intensidade dependendo de alguns fatores que serão discutidos posteriormente.

Na etapa de *recuperação* ocorrem todas as mudanças que não envolvem a varredura da estrutura deformada pela migração de contornos de grão de alto ângulo. A estrutura deformada não é modificada, apenas a densidade e a distribuição dos defeitos presentes são alteradas.

Já na *recristalização*, a orientação cristalina de qualquer região no material deformado é modificada pela passagem de contornos de grão de alto ângulo através do material.

Na *recristalização primária* ocorre a *nucleação* de novos grãos, principalmente nos contornos de grãos deformados. Devido à elevada energia interna presente no material gerada na deformação, os novos grãos crescem às custas da estrutura deformada, até eliminá-la completamente.

A continuidade do recozimento leva ao *crescimento de grão*, etapa na qual a estrutura já recristalizada passa a apresentar crescimento anormal de alguns grãos pela continuação do processo de migração dos contornos de grão.

Essa etapa é também denominada *recristalização secundária* e é ativada pela redução de energia superficial dos contornos de grão, diferenciando-se assim da recristalização primária.

A **figura 5.1** extraída de [REED-HILL](#), apresenta o comportamento da resistividade elétrica e da dureza, bem como a energia liberada durante o recozimento do níquel encruado. Observa-se que a resistividade elétrica é quase que completamente recuperada antes da etapa de recristalização, enquanto que a queda acentuada de dureza ocorre simultaneamente com essa etapa.

Também a energia liberada durante o recozimento, exemplifica a ocorrência das etapas de recuperação (baixa energia liberada) e recristalização (liberação total da energia interna). Curvas semelhantes são obtidas para outros materiais metálicos.

Um conceito importante refere-se às diferenças entre o recozimento posterior à deformação a frio, que tem como objetivo fornecer ao material deformado as melhores características de ductilidade e resistência para continuidade do processo de conformação e, o recozimento que ocorre simultaneamente à deformação, como nos processos realizados a quente.

No primeiro caso (recozimento posterior) as etapas de recuperação e recristalização são definidas como *estáticas* e são ativadas apenas termicamente. Já no trabalho a quente, recuperação e recristalização são denominadas *dinâmicas*, são concorrentes à deformação e ativadas tanto térmica quanto mecanicamente.

A ocorrência estática ou dinâmica das etapas de recuperação e recristalização depende de fatores como o grau e a taxa de deformação, a temperatura e principalmente da energia de falha de empilhamento.

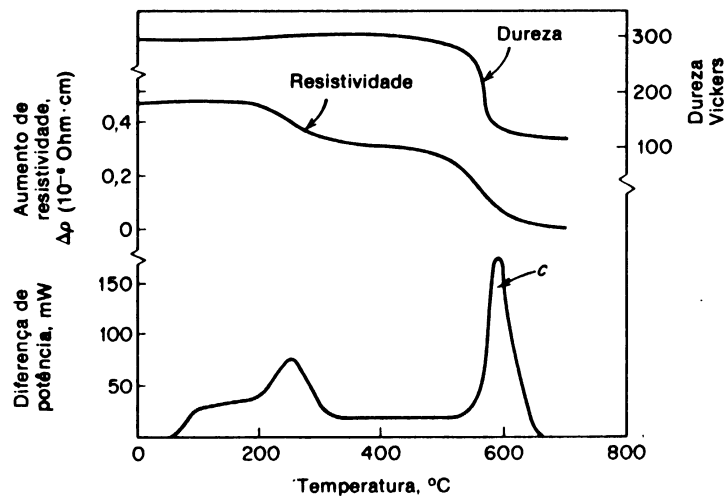


Figura 5.1 - Variação da resistividade, da dureza e da energia interna durante o recozimento.

A **figura 5.2** extraída de *McQUEEN e JONAS* mostra que processos em que a deformação é baixa (como na laminação), o amolecimento dá-se por recuperação dinâmica. Nesse caso, durante o resfriamento, materiais com alta EDE (a) apresentam recuperação estática e materiais com baixa EDE (b), recristalização estática.

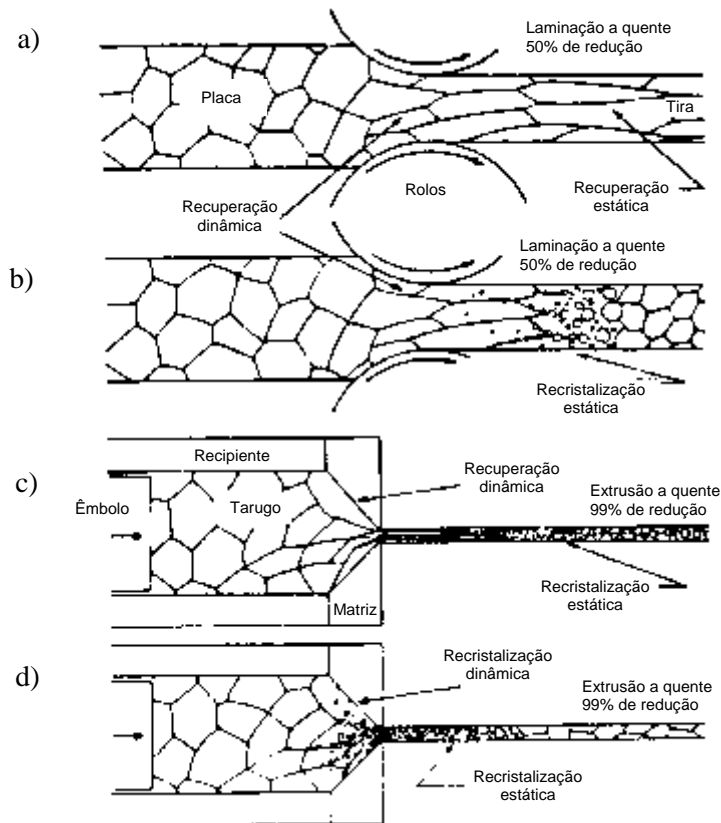


Figura 5.2 - Comparação dos processos envolvidos no recozimento estático e dinâmico.

Já processos em que a deformação é elevada (como na extrusão), os materiais com alta EDE (c) apresentam amolecimento por recuperação dinâmica, seguida por recuperação e recristalização estáticas durante o resfriamento. Nesse tipo de processo, materiais com baixa EDE (d) apresentam amolecimento por recuperação e recristalização dinâmicas, seguidas por recristalização estática.

Faz-se a seguir a descrição dos mecanismos que levam à recuperação e recristalização de materiais metálicos, distinguindo-se processos estáticos e dinâmicos.

## 5.2 Recuperação e Recristalização Estáticas

### a) Recuperação estática após o trabalho a frio

Para metais com alta EDE, ocorre a formação de uma estrutura celular durante a deformação, com acúmulo de discordâncias nas paredes das células.

Interrompido o processo de conformação, o aquecimento leva à recuperação estática com considerável amolecimento e caso o grau de deformação prévio esteja abaixo de um valor mínimo para recristalização, a recuperação será o único processo presente.

Como praticamente não há movimentação de contornos de grão, a microestrutura de grãos alongados não é alterada.

Já materiais com baixa EDE, apresentam após a deformação, discordâncias empilhadas em arranjos planares de elevada energia, assim a recristalização estática predomina, observando-se pequeno efeito da etapa de recuperação.

A **figura 5.3** apresenta a seqüência de mudanças na estrutura celular, comparando a deformação a frio, a recuperação estática e o trabalho a quente.

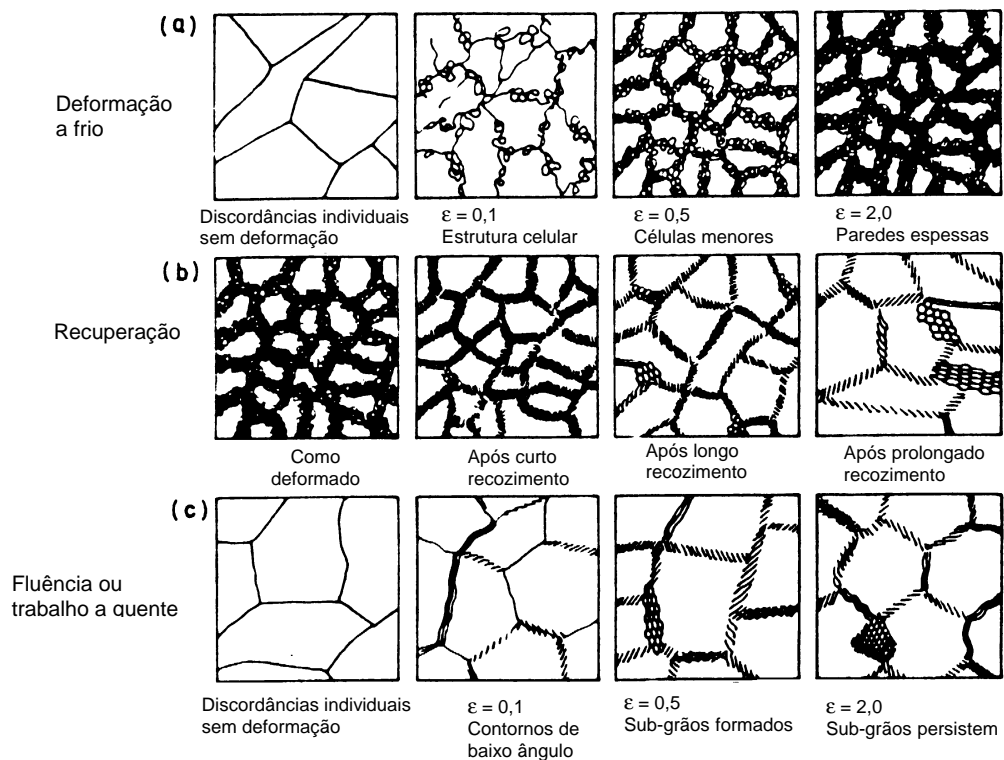


Figura 5.3 - Modificações na estrutura celular de discordâncias.

Na primeira fase da recuperação estática, as discordâncias presentes no interior das células são atraídas para as paredes, onde muitas são aniquiladas, tornando os contornos de sub-grão mais nítidos.

O movimento das discordâncias dá-se na recuperação estática devido ao campo de tensões causado pela presença de outras discordâncias. A presença de barreiras a esse movimento pode ser evitada pela ativação térmica de mecanismos como a escalagem, o deslizamento cruzado e o desbloqueio de defeitos pontuais (“unpinning”).

Com a continuidade da movimentação e aniquilação de discordâncias, os sub-grãos tornam-se maiores, com conseqüente surgimento de contornos de grão com grandes ângulos. Sob condições adequadas, esses sub-grãos tornam-se núcleos para o crescimento de novos grãos recristalizados.

Como a energia de ativação para recuperação é normalmente menor que aquela necessária para recristalização, pode-se observar a recuperação separadamente pelo uso de temperaturas mais baixas.

A adição de elementos em solução sólida dificulta o mecanismo de escalagem, bem como provoca a redução da energia de falha de empilhamento pela dissociação e distanciamento de discordâncias parciais, o que dificulta os mecanismos de deslizamento cruzado e de desbloqueio de discordâncias.

Assim, ou a recuperação é retardada ou ela ocorre, mas o crescimento dos sub-grãos é dificultado.

De forma semelhante, a presença de precipitados finos e dispersos pode estabilizar sub-estruturas de discordâncias e desta forma retardar a recuperação.

#### *b) Recristalização estática após o trabalho a frio*

Ao longo do recozimento, após ter ocorrido recuperação estática, nota-se uma grande redução na resistência do material, indicando a ocorrência de recristalização estática. A etapa de recristalização também é denominada *recristalização primária*.

A **figura 5.4** extraída de *Callister*<sup>1</sup> apresenta a evolução da estrutura de um latão deformado a frio que é recozido, analisando-se o efeito do tempo e da temperatura de recozimento. Observa-se além do aumento do tamanho do grão recristalizado, o surgimento de maclas de recozimento.

Durante a recristalização, ocorre formação e crescimento de novos grãos com pequenas densidades de discordâncias ( $10^6$  a  $10^8$  cm<sup>-2</sup>).

Muitos são os mecanismos propostos para a nucleação de novos grãos, de acordo com o metal deformado e o grau de deformação prévia. A **figura 5.5** apresenta alguns desses mecanismos.

O coalescimento de sub-grãos (caso *a*) ocorre em metais com alta EDE com grau de deformação prévia elevada e faz surgir regiões praticamente livres de discordâncias, envolvidas por contornos de grande ângulo de desorientação, capazes de migrarem.

Metais com baixa EDE também fortemente deformados, apresentam elevada concentração de discordâncias emaranhadas (caso *b*), de forma que as paredes das células já possuem grande desorientação, sendo capazes de iniciar a migração sem que ocorra a fase de coalescimento.

Para graus de deformação menores, foi observado um outro mecanismo relacionado ao curvamento (“*bulging*”) de um pequeno segmento de um contorno de alto ângulo (caso *c*). Esse encurvamento faz surgir um núcleo de recristalização (região aproximadamente esférica, livre de discordâncias), que pode migrar livremente.

---

<sup>1</sup> Materials Science and Engineering, an Introduction, William D. Callister, Jr., 3<sup>rd</sup> Edition, J. Wiley & Sons, 1984, p. 7.21

O crescimento dos grãos durante a recristalização, é ativado pela presença de um campo de tensões devido à diferença de densidade de discordâncias do núcleo em relação ao material que o cerca.

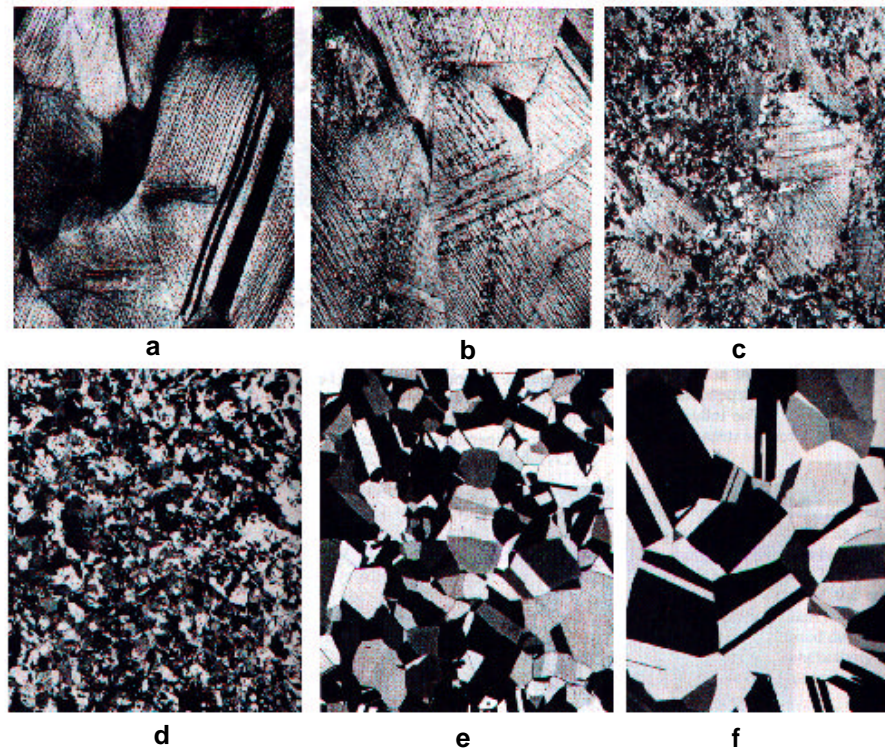


Figura 5.4 – Microestruturas de estágios de recristalização e crescimento de grão em latão previamente deformado a frio 33%: a) como deformado, b) recozido por 3s a 580 °C, c) recozido por 4s a 580 °C, d) recozido por 8s a 580 °C, e) recozido por 15 min a 580 °C e f) recozido por 10 min a 700 °C

Durante o decorrer do recozimento, a taxa de recristalização decresce devido à aniquilação de discordâncias durante a etapa de recuperação, bem como à redução das áreas deformadas, substituídas por novas regiões recristalizadas.

O efeito de partículas finas e soluções sólidas é de diminuir a taxa de recristalização, ao retardar a migração dos contornos.

As fases de nucleação e crescimento são ativadas termicamente. Assim, são aceleradas com o aumento da temperatura de recozimento. Contudo, o tamanho dos grãos recristalizados depende da densidade de núcleos e por conseguinte, do grau de deformação prévio.

O grau de deformação está diretamente relacionado com a taxa de deformação e temperatura empregados no trabalho anterior ao recozimento e também afeta a taxa de recristalização, pois influi no aumento da densidade de núcleos e da energia interna do material.



### 5.3 Recuperação e Recristalização Dinâmicas

#### a) Recuperação dinâmica

O efeito principal da recuperação a alta temperatura é a movimentação de discordâncias, originando sub-grãos. Em muitos processos, a recuperação pode iniciar durante a deformação plástica, configurando o que se denomina *recuperação dinâmica*.

Para temperaturas elevadas, os efeitos da recuperação dinâmica são maiores pois a mobilidade das discordâncias aumenta com o aumento da temperatura. As células são formadas com deformações menores e apresentam paredes mais delgadas e nítidas. Como resultado, a energia necessária para continuidade da deformação diminui, com a conseqüente queda na taxa de encruamento.

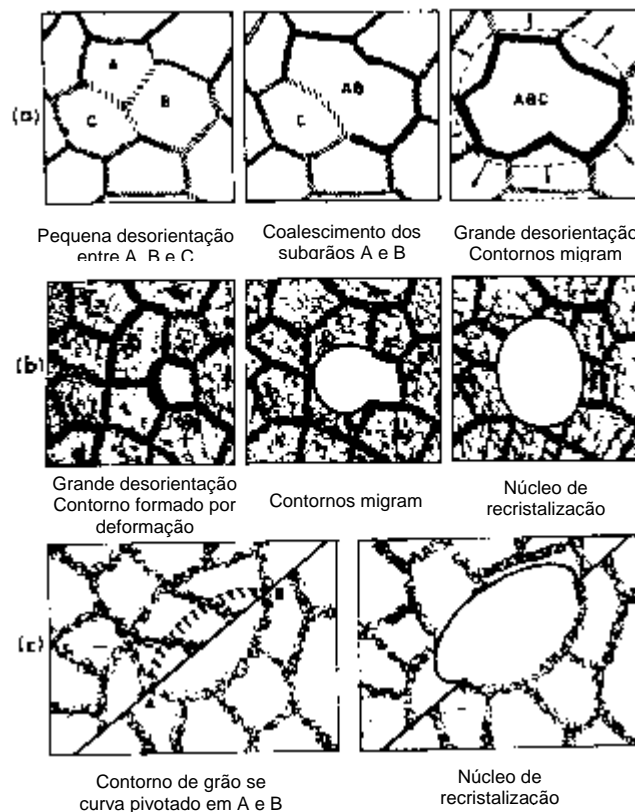


Figura 5.5 - Mecanismos de nucleação de grãos recristalizados.

A recuperação dinâmica ocorre de forma mais pronunciada para metais com alta energia de falha de empilhamento. Nos metais com baixa EDE, normalmente não se observa esse tipo de recuperação, apresentando uma estrutura de discordâncias alinhadas e bloqueadas nos planos de escorregamento.

Os mecanismos de movimentação e aniquilação de discordâncias durante a recuperação dinâmica são semelhantes aos definidos para a recuperação estática, quais sejam, escalagem, deslizamento cruzado e desbloqueio de defeitos pontuais.

A diferença refere-se à força motriz pois no processo dinâmico, à energia interna associada ao campo de tensões das discordâncias (responsável pela recuperação estática) é adicionada a tensão externa atuante durante o processo de conformação.

A curva de escoamento característica de um material trabalhado a quente e amolecido por recuperação dinâmica é mostrada na **figura 5.6**. Num primeiro estágio, para pequenas deformações, os mecanismos desenvolvidos durante o deslizamento são semelhantes àqueles

apresentados para o escoamento de monocristais (estágios I e II) com taxa de encruamento positiva.

No segundo estágio, são ativados termicamente os mecanismos de movimentação e aniquilação de discordâncias com a conseqüente queda da taxa de encruamento.

O terceiro estágio representa a região de regime permanente, onde a taxa de encruamento é quase nula. Nesse estágio, três parâmetros permanecem constantes: a tensão aplicada, a temperatura e a taxa de deformação.

Deve-se observar que as curvas apresentadas referem-se somente aos efeitos da recuperação dinâmica. Normalmente, a tensão de escoamento pode cair durante a deformação, como efeito de processos de recristalização dinâmica, aquecimento adiabático, crescimento de precipitados, texturização ou escoamento superplástico. Em alguns poucos casos, a tensão de escoamento cresce como resultado da precipitação de partículas duras ou pela eliminação de texturas mais dúcteis.

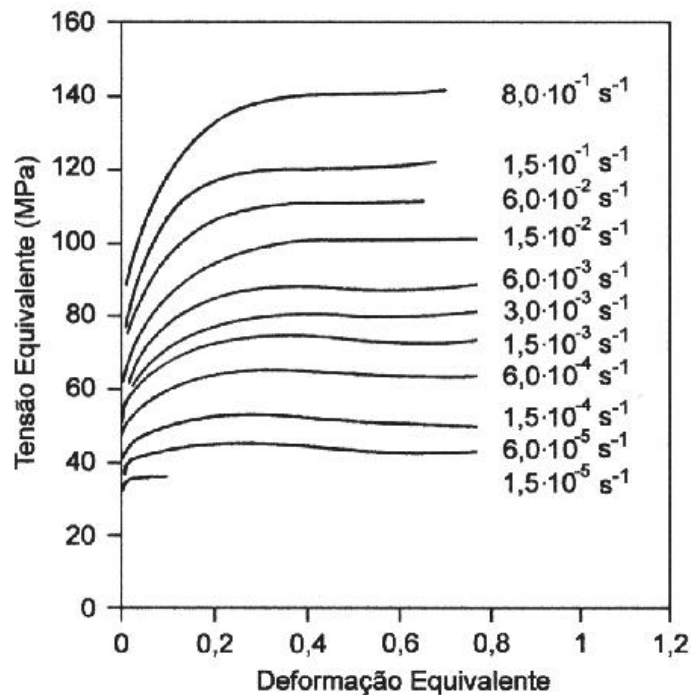


Figura 5.6 - Curvas de escoamento para deformação a quente a 700 °C de ferro Armco apresentando recuperação dinâmica.

#### b) Recristalização dinâmica

Sob condições específicas de deformação, temperatura, taxa de deformação e características do material trabalhado como composição química, estrutura e EDE, a energia interna apresenta-se suficiente para que ocorra nucleação e recristalização dinâmicas.

Como apresentado na descrição da recristalização estática, também na recristalização dinâmica, após o surgimento de núcleos livres de discordâncias e com contornos de elevada desorientação, ocorre a migração desses contornos, com grande redução da densidade de discordâncias pela sua aniquilação e surgimento de regiões totalmente recristalizadas.

A **figura 5.7** apresenta as curvas de escoamento para processos nos quais supõe-se tenha ocorrido a recristalização dinâmica. Observa-se que para taxas de deformação pequenas, o amolecimento produzido pela recristalização é seguido por um novo

endurecimento, estabelecendo-se um comportamento cíclico com período aproximadamente constante porém com amplitude decrescente ao longo da deformação.

Esse comportamento pode ser explicado pela baixa energia de deformação verificada para taxas de deformação menores. As células formadas não apresentam paredes muito emaranhadas (ou seja, têm baixa desorientação) assim, a nucleação dá-se pelo mecanismo de “bulging” que demanda um tempo maior para ativação.

Já em processos com elevadas taxas de deformação, a tensão de escoamento atinge um valor máximo e depois como resultado da recristalização dinâmica, diminui até um valor intermediário entre o limite de escoamento e o pico de tensão observado, mantendo-se ao longo do ensaio pela continuidade do processo de recristalização.

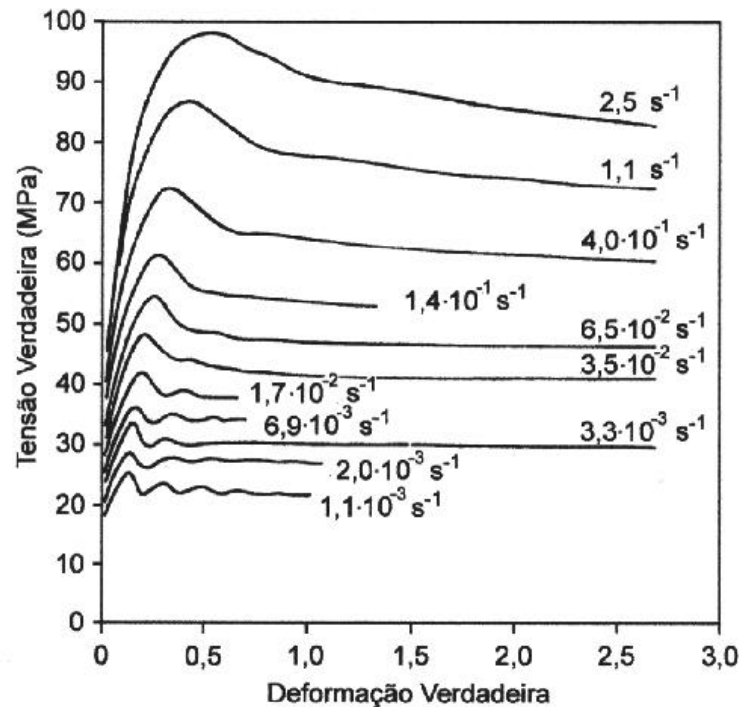


Figura 5.7 - Curvas de escoamento para deformação a quente a 1100 °C de um aço com 0,25 %C, apresentando recristalização dinâmica.

Nesse caso, a estrutura celular apresenta-se fina e com paredes fortemente emaranhadas, ou seja, com elevada energia associada. Dessa forma, o mecanismo de “bulging” é impedido.

Com o decorrer da deformação, os contornos de sub-grão passam a ter uma maior desorientação, o que possibilita o surgimento e a migração de seus contornos. A densidade de núcleos é elevada próxima a contornos de grão, onde a energia é maior devido a uma acomodação da anisotropia plástica.

Atingido o regime permanente, pequenos e novos grãos equiaxiais substituem os grãos deformados, mantendo tamanho e forma constantes, ao longo do restante do ensaio.

A diferença de comportamento entre as curvas para baixas e altas taxas de deformação refere-se à diferente distribuição de discordâncias nas subestruturas.

Para baixas taxas de deformação, há tempo suficiente para que os grãos sejam totalmente, recristalizados, reduzindo consideravelmente a densidade de discordâncias em seu interior. Com a continuidade da deformação, os grãos já recristalizados são novamente deformados e o ciclo se repete.



Já para taxas elevadas, existe um gradiente acentuado de deformação entre o núcleo e o contorno dos grãos recristalizados. Devido à elevada densidade de discordâncias gerada pela continuidade da deformação, novos núcleos são formados. Assim, em um dado instante, há várias regiões com diferentes graus de deformação, de tal forma que mantém-se uma tensão de escoamento média ao longo do ensaio.

Os efeitos de partículas sobre a recristalização dinâmica apresentam-se semelhantes aos descritos na recristalização estática.

Há também a definição de *recristalização metadinâmica* ou *pós-dinâmica* que ocorre logo após a deformação a temperaturas elevadas. Ao encerrar-se o processo, alguns núcleos formados ainda apresentam contornos migrando. Como a recristalização metadinâmica não requer um tempo de incubação para nucleação, o crescimento dos grãos recristalizados prossegue rapidamente logo após a deformação.

A **tabela 5.1** apresenta os diferentes processos de restauração de propriedades de acordo com o tipo de metal, o trabalho prévio a que foi submetido e o tipo de recozimento efetuado.

Tabela 5.1 – Mecanismos de restauração de propriedades

		Altas Temperaturas		
Metais	Subestrutura Deformada a Frio	Durante recozimento Estático	Durante deformação Dinâmico	Entre etapas de deformação Estático
Alumínio Ligas Ferríticas Metais ccc refratários Ligas de Zr	Estrutura celular bem definida	Recuperação seguida por recristalização (nucleação por coalescimento a grandes deformações)	Recuperação mesmo grandes deformações	Recuperação; Recristalização lenta prevenida por resfriamento
Ni Ligas Austeníticas Cobre Latões	Subestrutura celular com distribuição uniforme de discordâncias de acordo com EDE	Recuperação limitada seguida por recristalização (nucleação por abaulamento de contornos)	<b>Pequenas deformações</b>	
			Recuperação	Recuperação; seguida por rápida recristalização
			<b>Grandes deformações</b>	
			Recuperação e recristalização	Recuperação e recristalização metadinâmica seguida por recristalização estática

A **figura 5.8** extraída de *A. Belyakov1 et al.*<sup>2</sup> apresenta microestruturas de um aço inoxidável 304 modificadas pela temperatura de deformação no trabalho a morno e a quente a uma taxa de deformação de  $0,001 \text{ s}^{-1}$ . Pode-se observar que a nucleação de grãos recristalizados ocorre nos contornos de grão para a temperatura de 1023 K, parcialmente no interior dos grãos para 1073 K e em todo o material para 1173 K.

A **figura 5.9.a** apresenta uma subestrutura típica do material descrito na **figura 5.7** obtida na deformação de pico de tensão para uma temperatura de trabalho de 1073 K. Pode-se observar que as células com paredes densas de discordâncias são formadas no interior dos grãos e que o crescimento dos sub-grãos dá-se pela curvamento e movimentação dos contornos de grãos iniciais, com seu curvamento (“bulging”) e migração como destacada na **figura 5.9.b**.

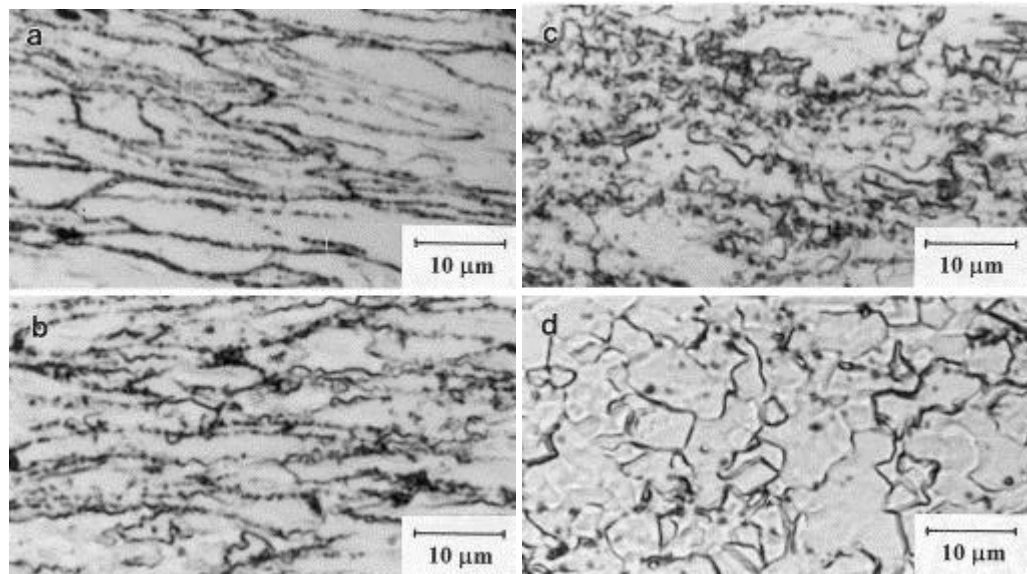


Figura 5.8 – Efeito da temperatura na microestrutura de um aço inoxidável 304 deformado às temperaturas de (a) 973 K, (b) 1023 K (c) 1073 K (d). 1173 K.

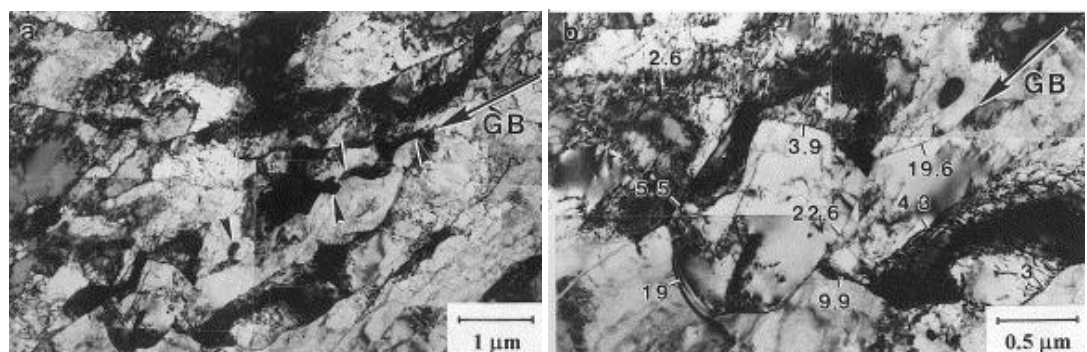


Figura 5.9 – (a) Subestruturas típicas desenvolvidas ao longo de contornos de grão de um aço inoxidável 304, observadas para a deformação de pico ( $\epsilon = 0,5$ ) a 1073 K. (b) ampliação do canto inferior esquerdo de (a).

<sup>2</sup> Dynamic recrystallization under warm deformation of a 304 type austenitic stainless steel, A. Belyakov1, H. Miura and T. Sakai, Materials Science and Engineering A, V. 255, 1-2, pp.139-147