Recristalização em Altas Temperaturas

Fulvio Siciliano

fulvio.siciliano@gmail.com

MICROALLOYED STEEL INSTITUTE L.P.

ITI International

2ª Parte-Recristalização em Temperaturas Altas

- Processamento mecânico em temperaturas elevadas;
- Introdução ao modelamento matemático da laminação a quente;
- Alguns tipos de laminadores industriais;
- Exemplo de processamento.

Fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante a Laminação a quente/Processamento Termomecânico

- Recristalização estática, dinâmica e metadinâmica
- Crescimento de grão, precipitação
- Transformações de fase

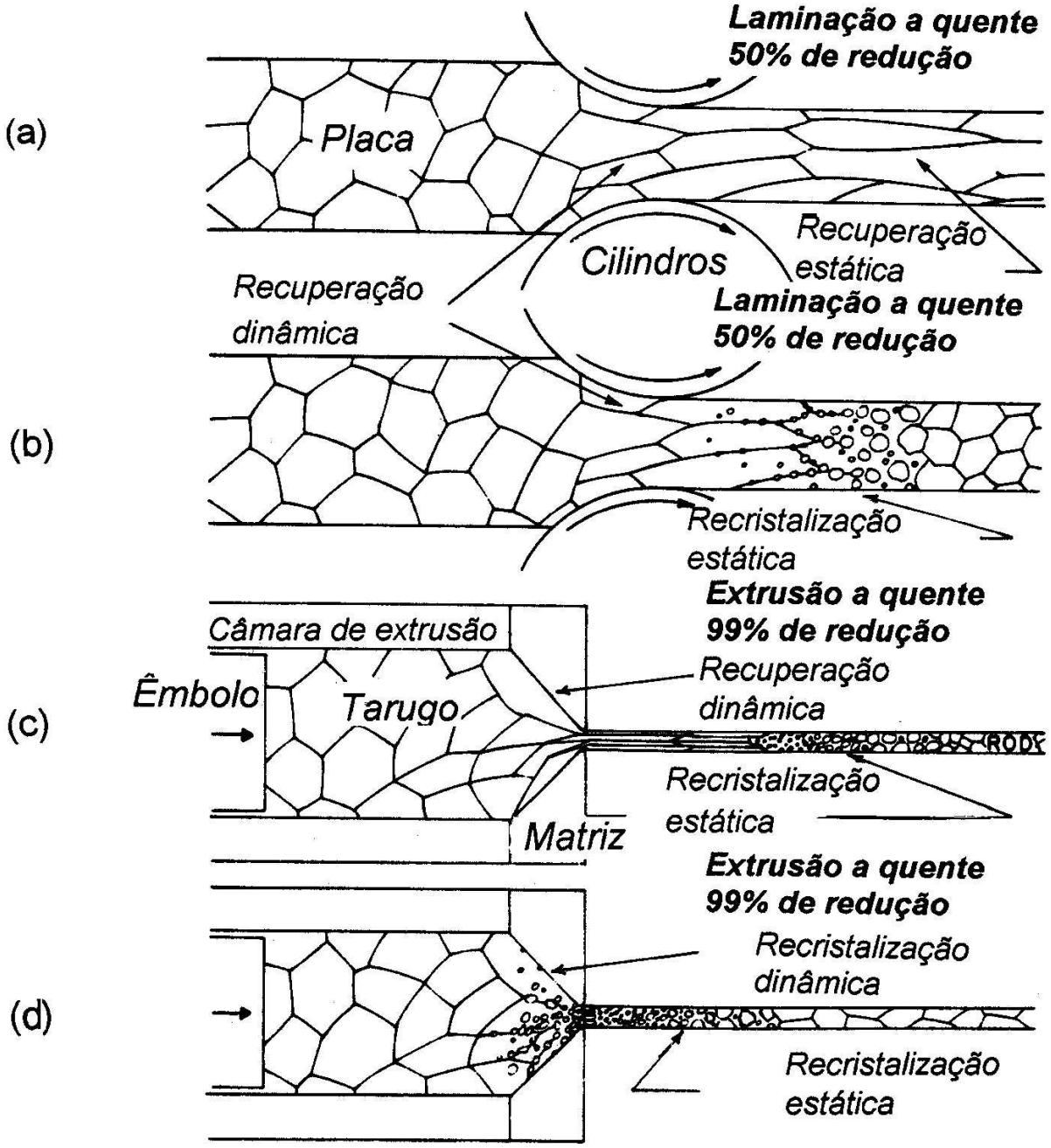
Processo	T / T_m
Trabalho a frio	<0,3
Trabalho morno	0,3 a 0,5
Trabalho a quente	>0,6

Deformação a quente

Os processos de recuperação e recristalização quando ocorrem durante a deformação são denominados *recuperação dinâmica* e *recristalização dinâmica*.

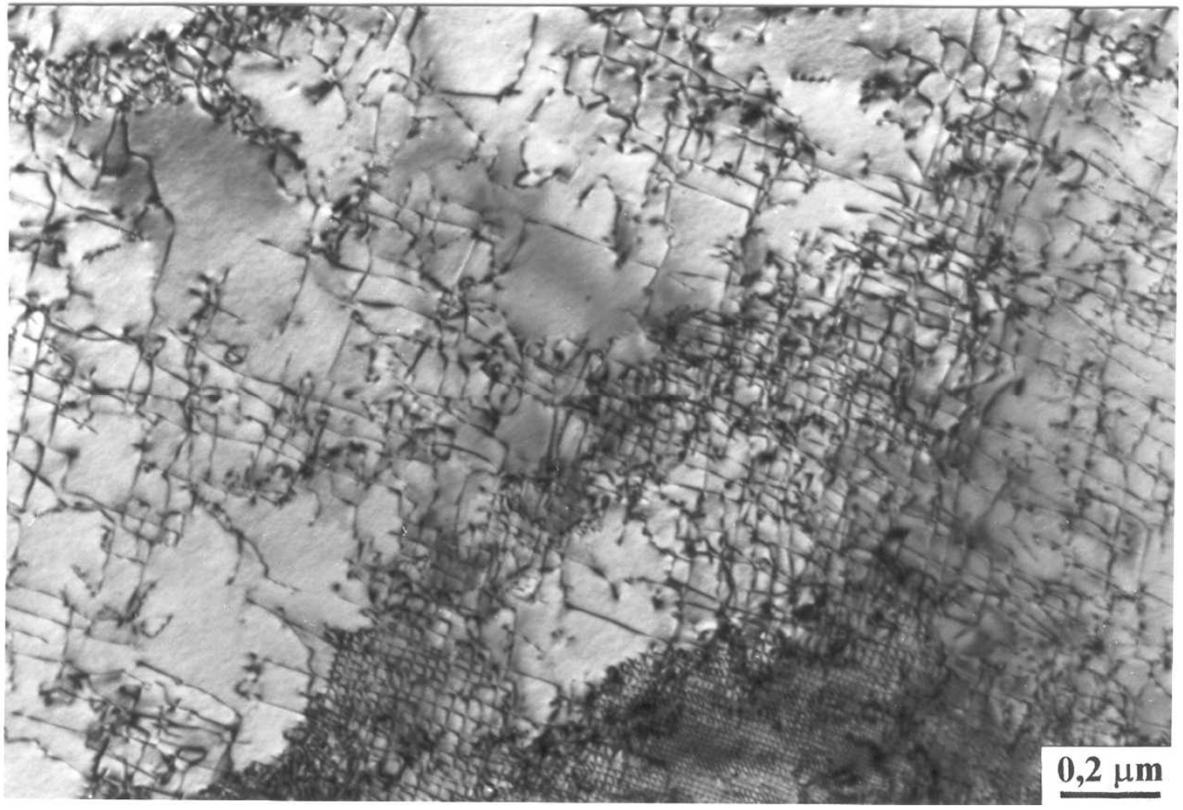
Dificuldade de observação

“metalografia mecânica”

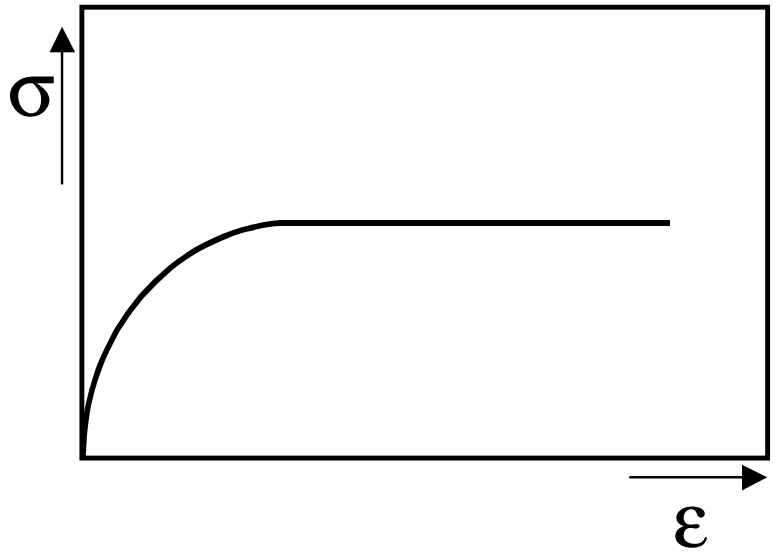

(a)
Laminação a quente
50% de redução
Placa
Cilindros
Recuperação
estática
Recuperação
dinâmica
(b)
Laminação a quente
50% de redução
Recristalização
estática
(c)
Extrusão a quente
99% de redução
Câmara de extrusão
Êmbolo
Tarugo
Recuperação
dinâmica
Recristalização
estática
Matriz
(d)
Extrusão a quente
99% de redução
Recristalização
dinâmica
Recristalização
estática

RECUPERAÇÃO DINÂMICA

Estrutura de subgrãos formada durante a deformação a quente



deformação a quente de aço inoxidável austenítico AISI 304 (A.F. Padilha)



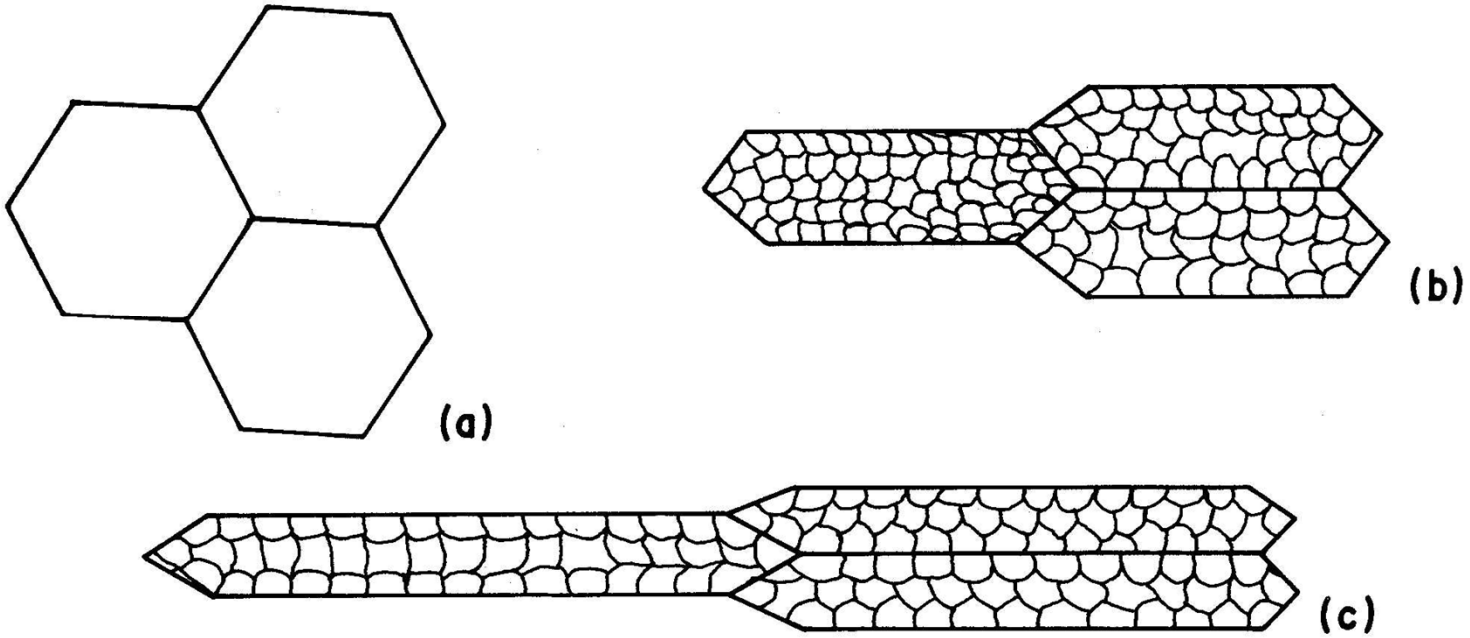
Quantidade de defeitos gerados ↔ quantidade de defeitos eliminados.

"steady state"

Declive negativo devido ao calor gerado na deformação (> 1 s^{-1})

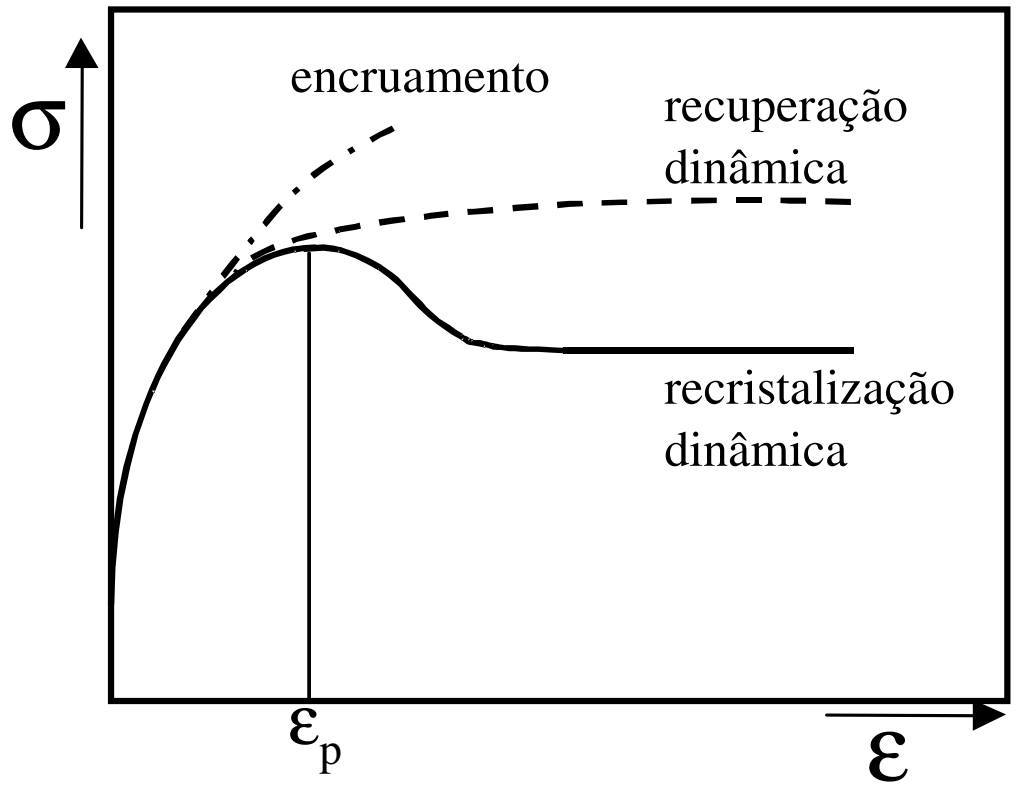
Não ocorre migração de contornos de alto ângulo

Subgrãos mantêm estrutura eqüiaxial



RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA

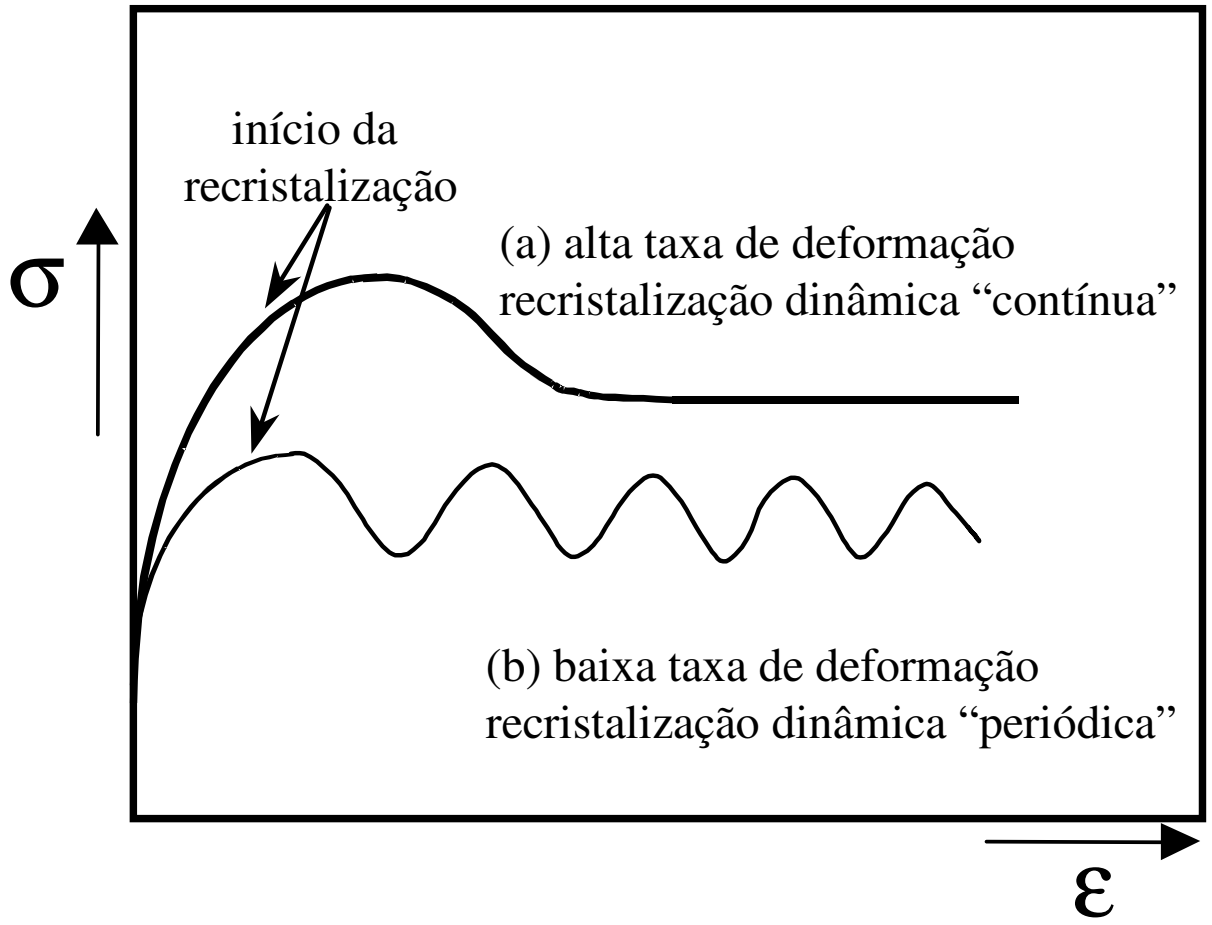
Migração de contornos de grão.
Defeitos não podem ser eliminados apenas por recuperação dinâmica,
Baixa EDE do material, aumentando o potencial termodinâmico para a recristalização.



A influência da velocidade de deformação

altas: um pico de tensão; ε_p

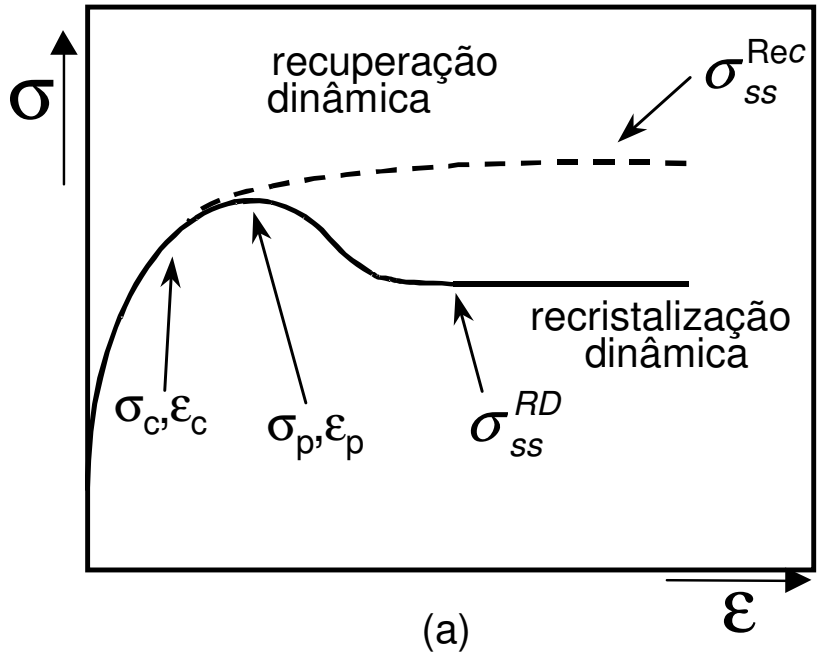
baixas: ciclos de deformação-recristalização dinâmica.

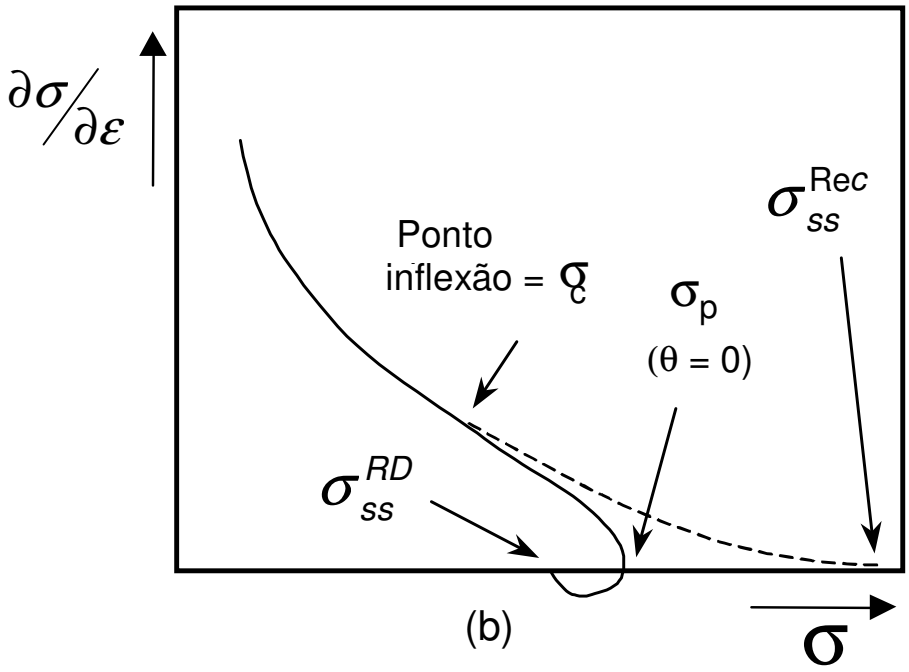


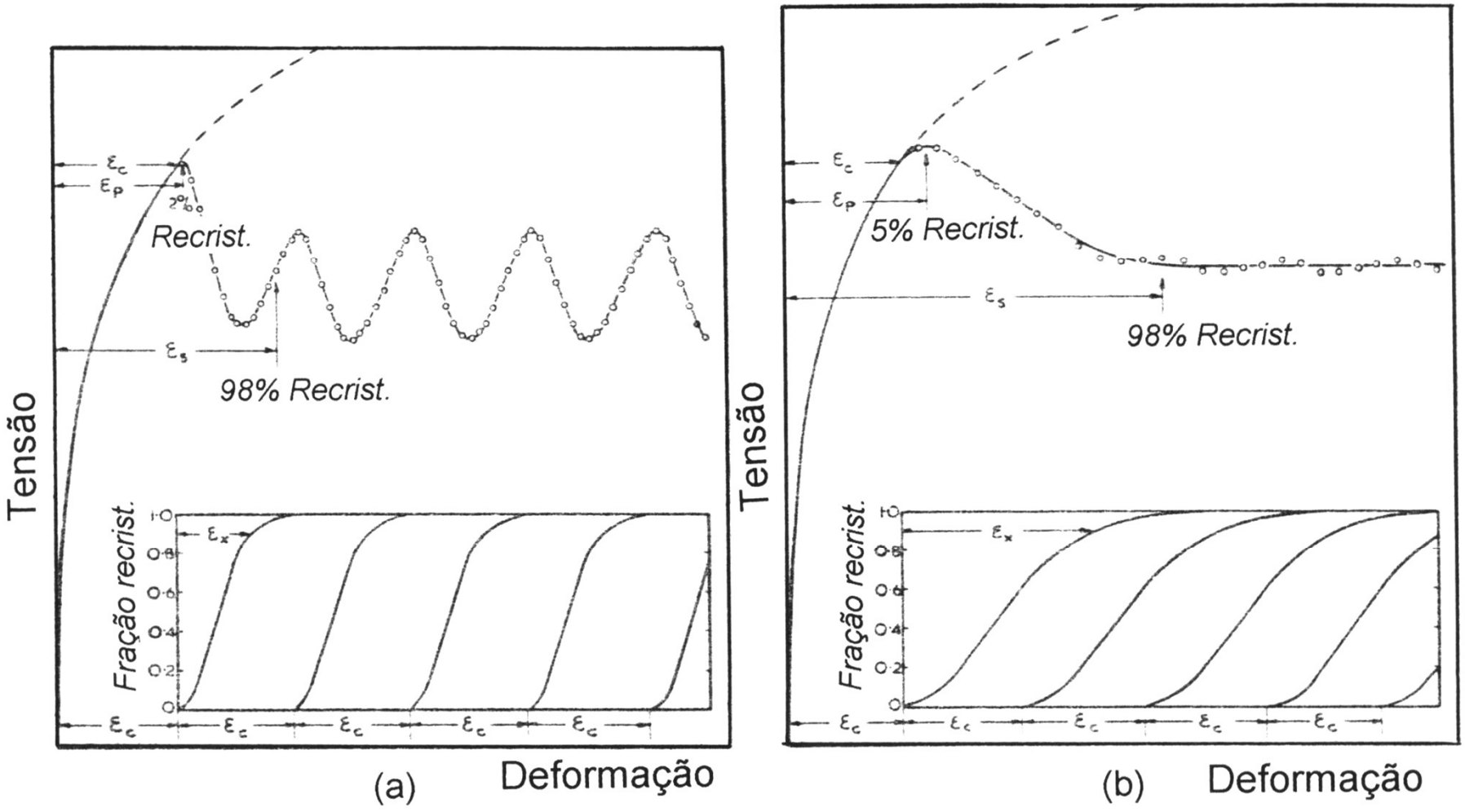
Deformação crítica para recristalização dinâmica

$\varepsilon_c = C^* \varepsilon_p$

C≈0.8 para aços C-Mn

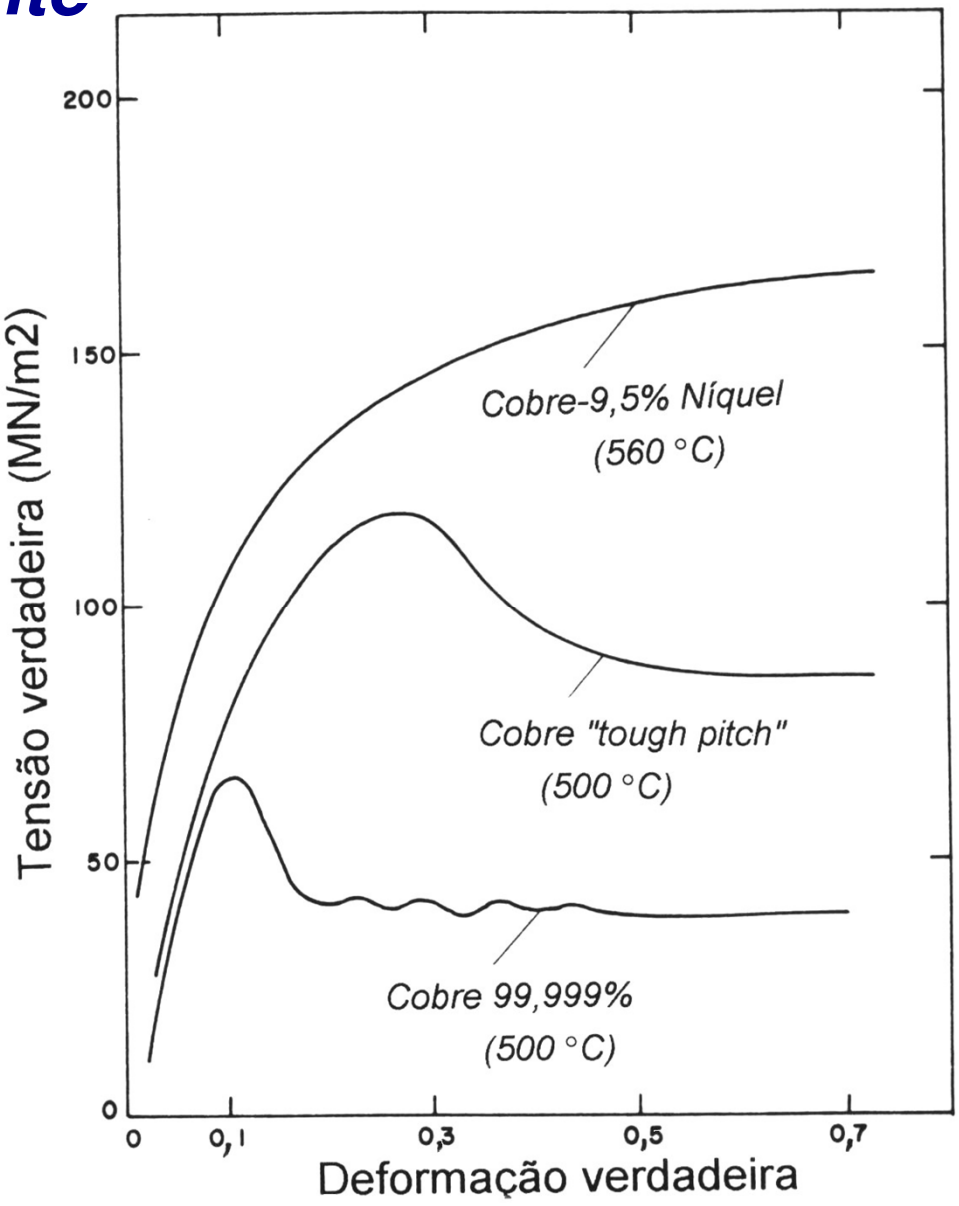





Tensão
ε_c
ε_p
Recrist.
ε_s
98% Recrist.
Fração recrist.
1·0
0·8
0·6
0·4
0·2
0
ε_x
ε_c
ε_c
ε_c
ε_c
ε_c
(a)
Deformação
Tensão
ε_c
ε_p
5% Recrist.
ε_s
98% Recrist.
Fração recrist.
1·0
0·8
0·6
0·4
0·2
0
ε_x
ε_c
ε_c
ε_c
ε_c
ε_c
(b)
Deformação

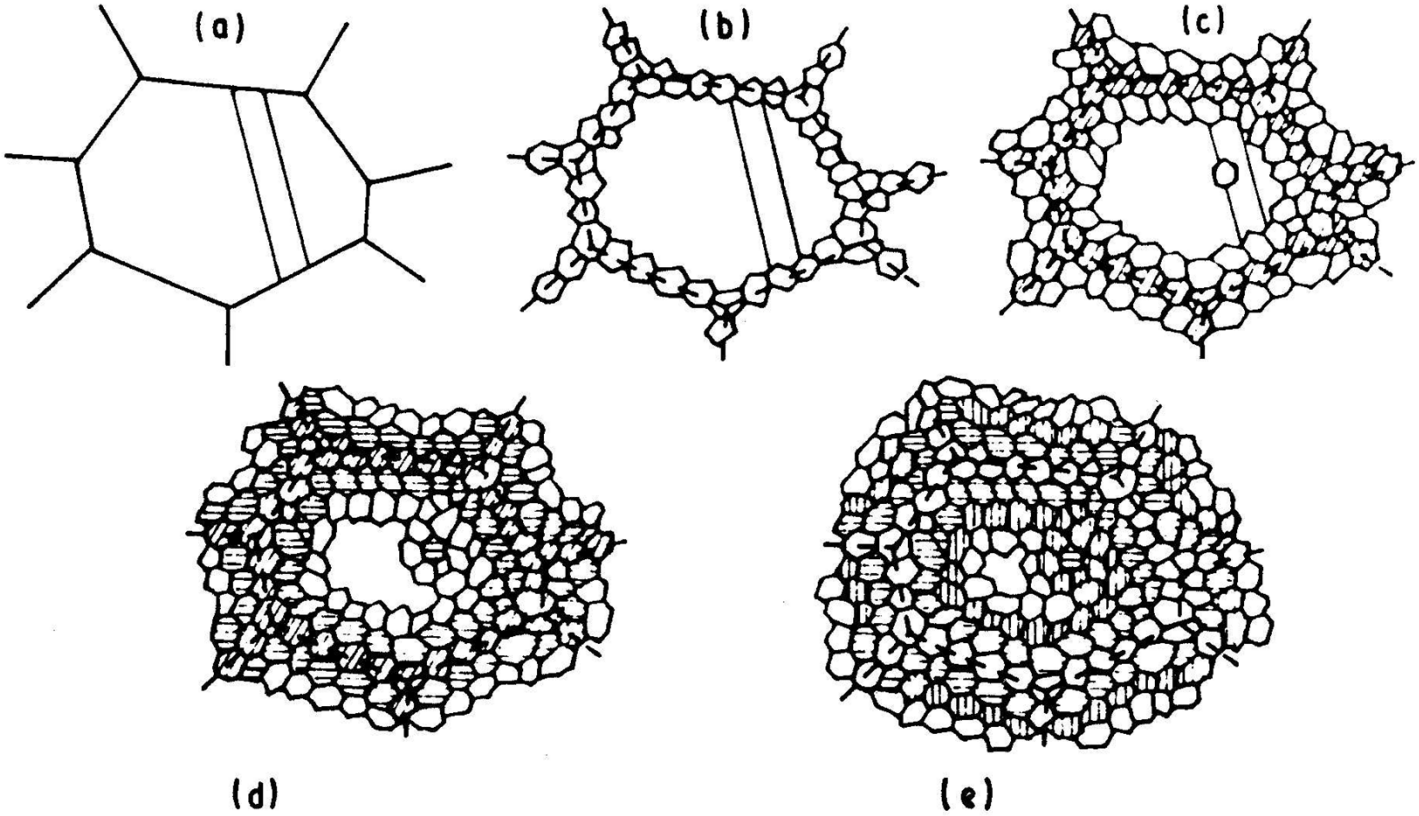
Ensaio de tração a quente

Materiais diferentes; comportamentos diferentes.



NUCLEAÇÃO EM RECRISTALIZAÇÃO DINÂMICA

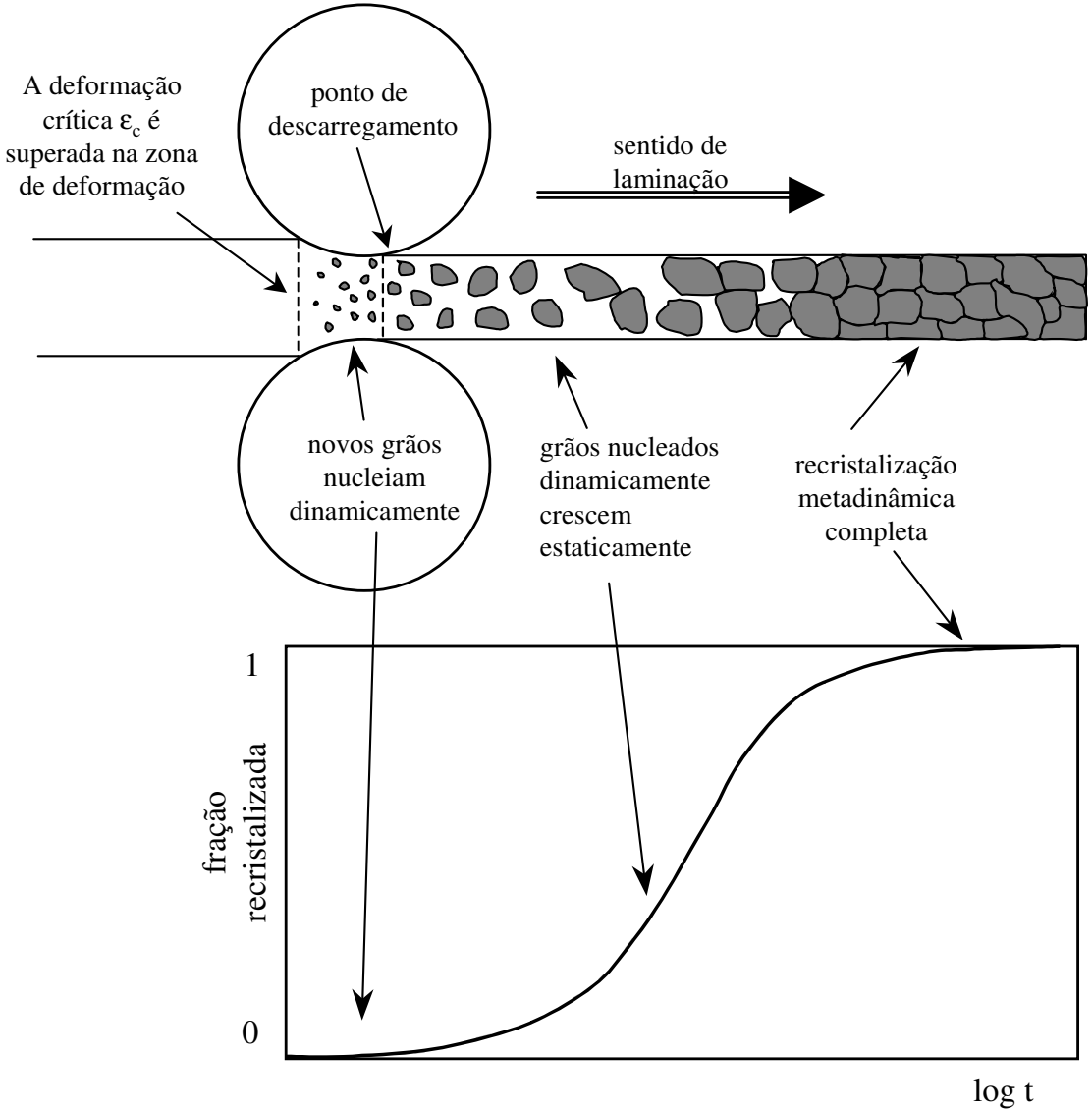
formação de colares sucessivos ("necklacing")



RECRISTALIZAÇÃO METADINÂMICA

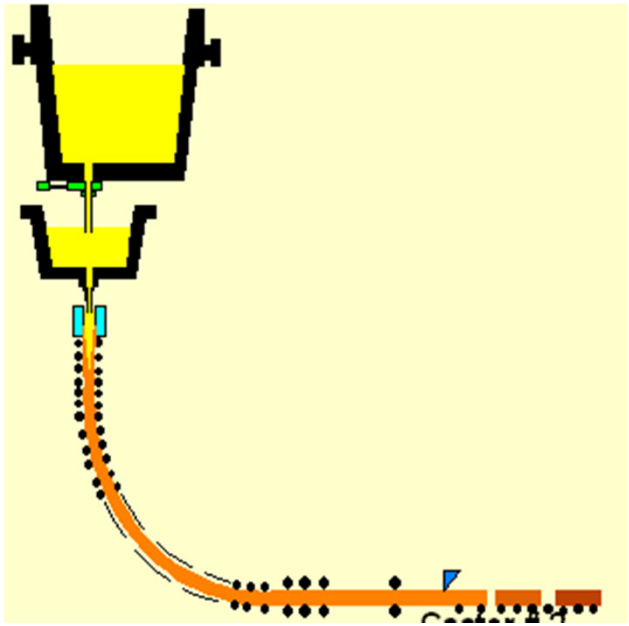
Inicia dinamicamente

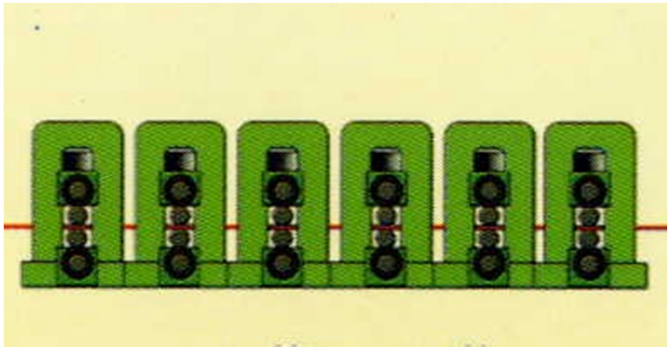
Termina estaticamente

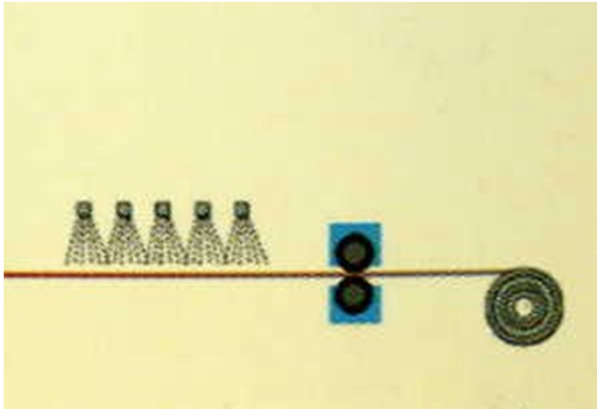


Filme de Recristalização Dinâmica

Laminação controlada







LAMINAÇÃO CONTROLADA

Primeiros estudos foram realizados na Universidade de Sheffield na década de 60:

J. Woodhead

W.B. Morrison – refino de grão

J. Malcolm Gray – precipitação

Objetivos da Laminação Controlada

Obter material de baixo custo (ligas) com:

- **BAIXO CARBONO EQUIVALENTE (Ceq)**
- **RESISTÊNCIA MECÂNICA**
- **TENACIDADE**

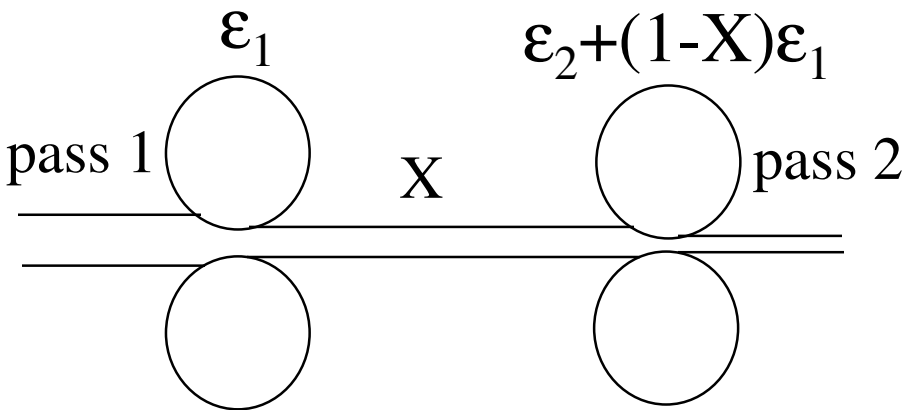
Três Possibilidades de Laminação Controlada

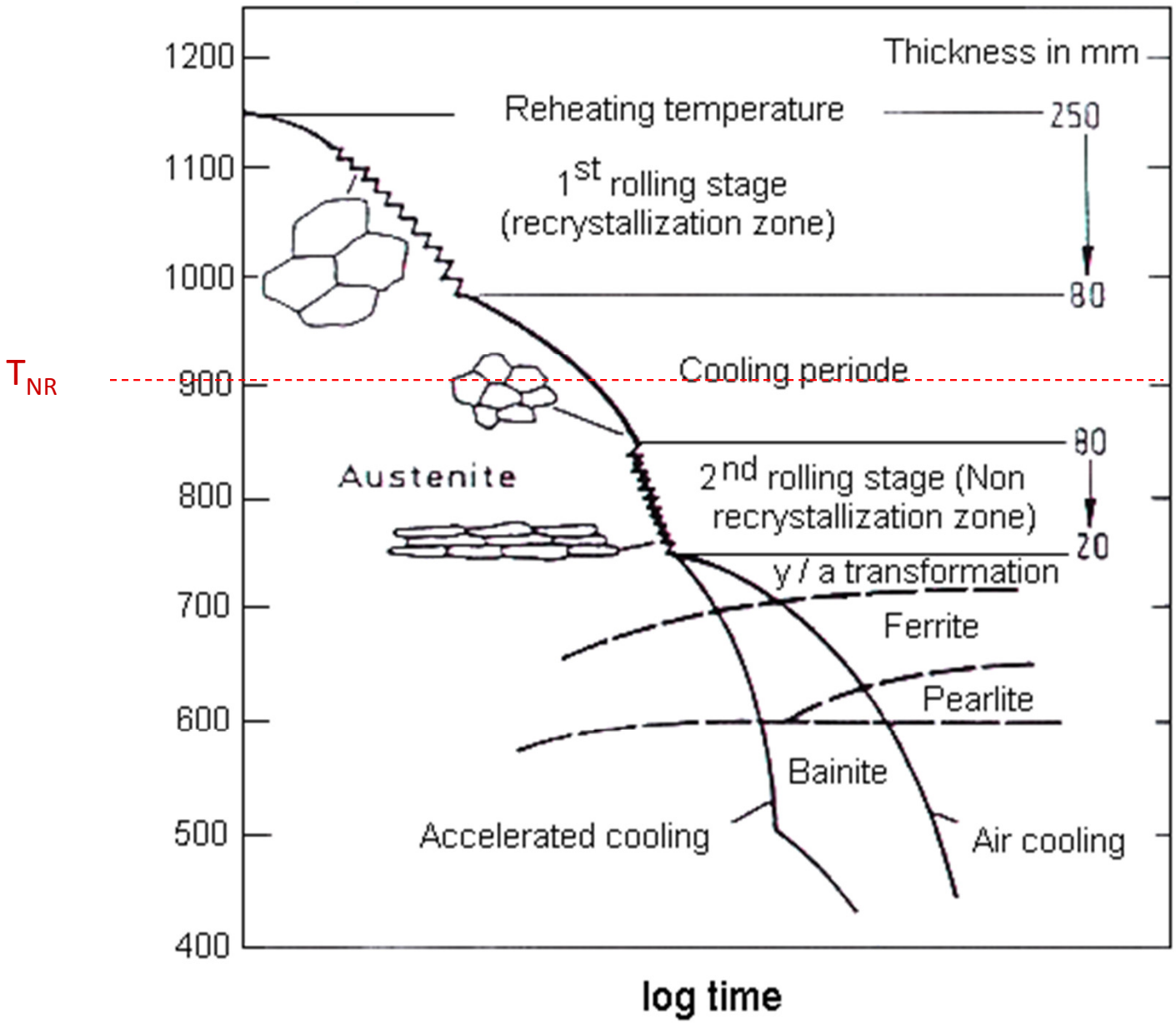
A) Laminação na fase de recristalização estática da austenita

B) Laminação na fase de não recristalização da austenita

C) Laminação na fase austenita mais ferrita (temperatura < Ar3)

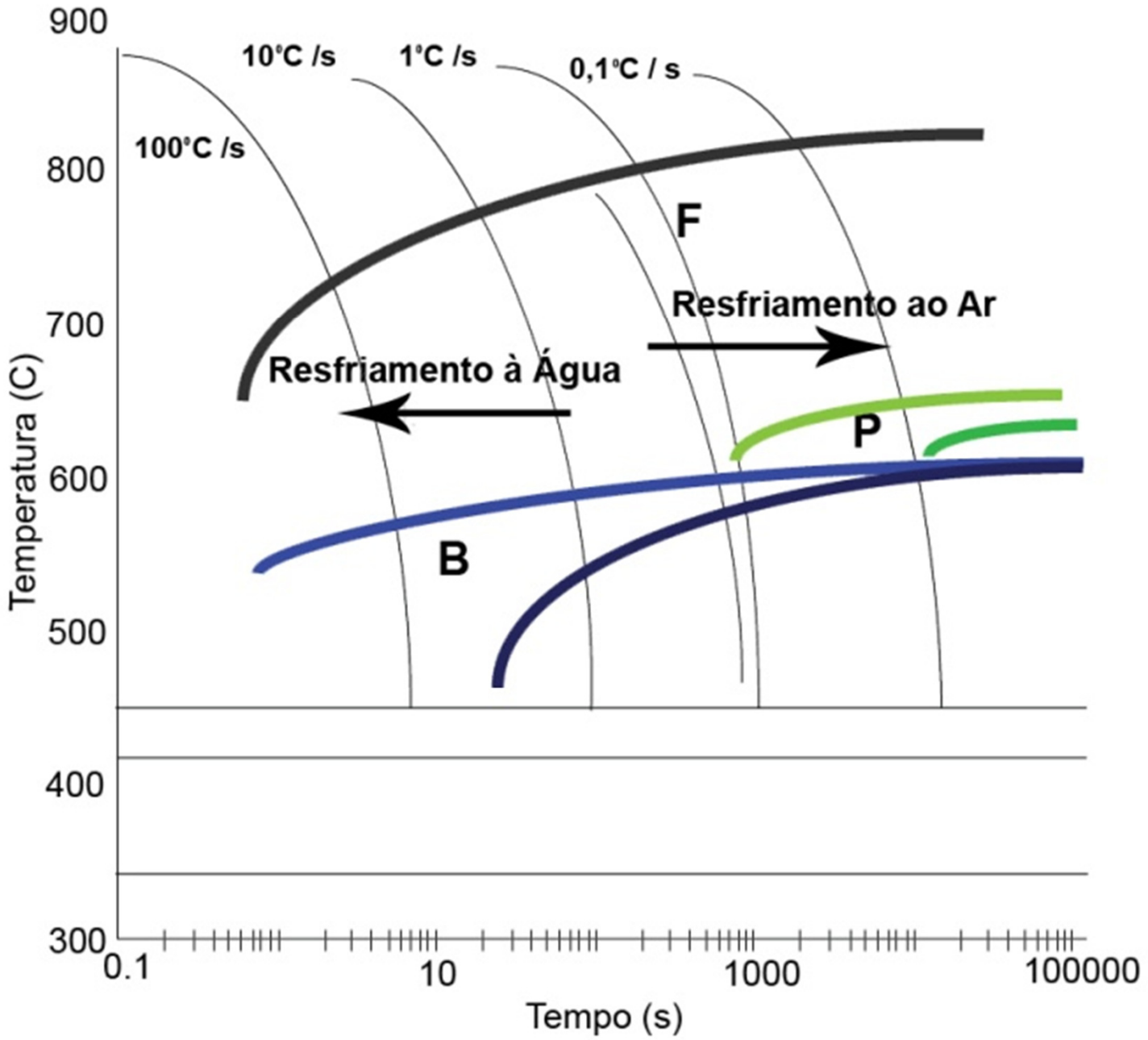
Deformação Acumulada (amaciamento incompleto)



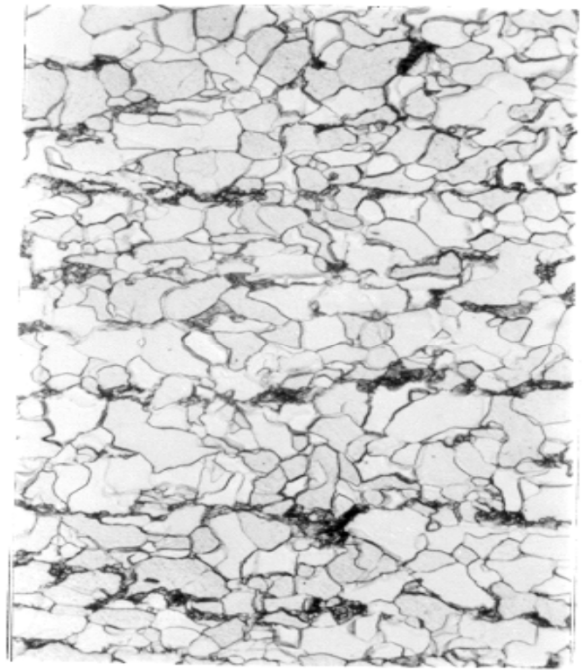


T_{NR}

Schematic illustration of the thermomechanical rolling process

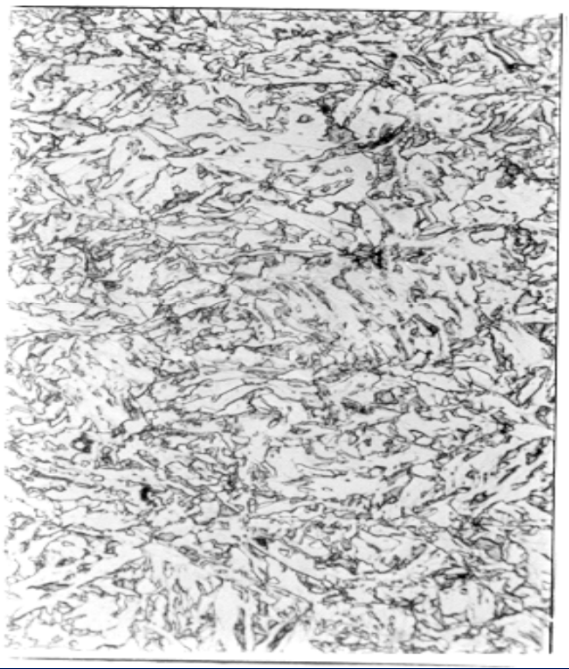

900
800
700
600
500
400
300
Temperatura (C)
0.1
10
1000
100000
Tempo (s)
10°C /s
1°C /s
0,1°C / s
100°C /s
F
Resfriamento ao Ar
Resfriamento à Água
P
B

Laminação Controlada

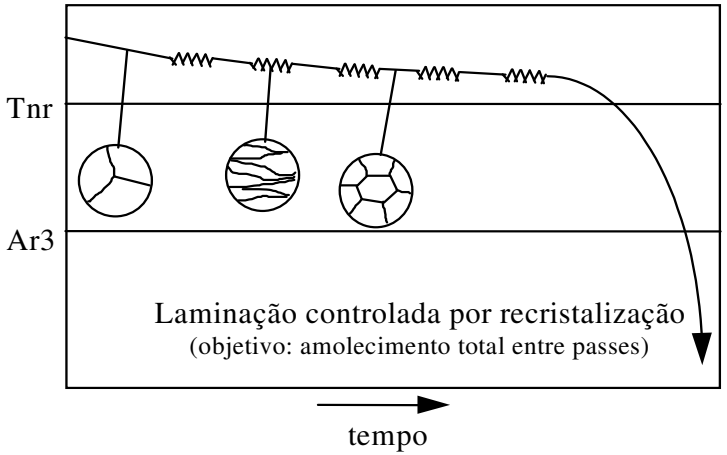


Ferrita e Perlita

Ferrita e Bainita



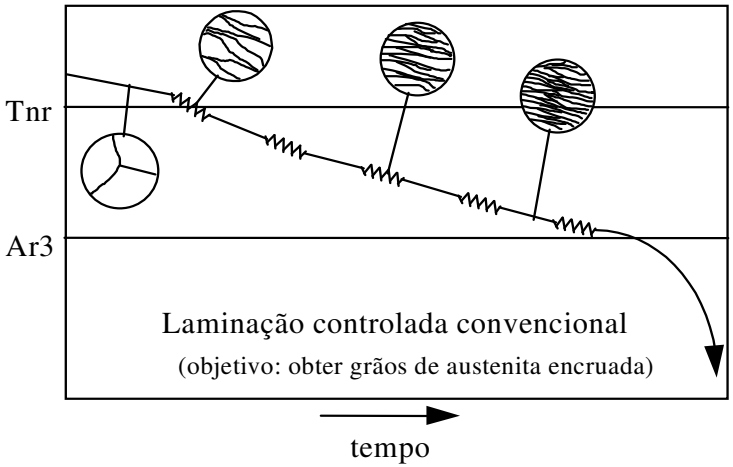
Bainita



Laminação controlada por recristalização:

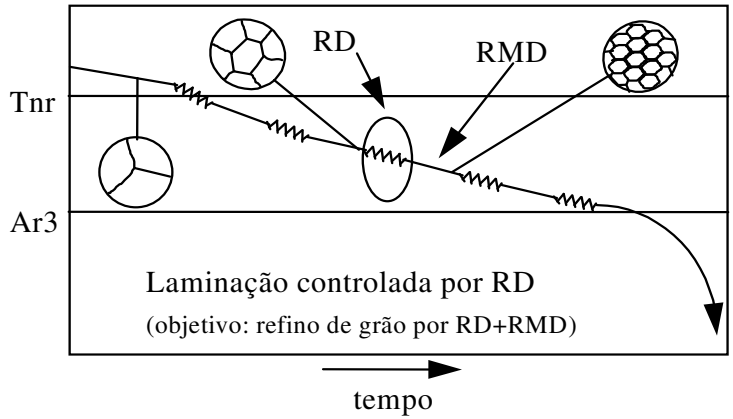
Cargas baixas

Recristalização entre passes



Laminação controlada convencional:

cargas altas, temperaturas baixas, microligante, γ encruada, recristalização estática, amaciamento parcial entre passes.



Laminação controlada por RD:

cargas mais baixas, indução da recristalização dinâmica, intenso refino de grão austenítico.

Estágios industriais de processamento a quente

1. Reaquecimento

Objetivo:
Aumentar a deformabilidade pela diminuição da resistência a deformação a quente e solubilização dos elementos de liga

Condições termomecânicas: ~1200°C

Efeitos na microestructura: -dissolução de precipitados
-crescimento de grão

Outros efeitos: -oxidação (formação de carepa)

2. Laminação de desbaste

Objetivo: redução em larga escala (ex.: 250 → 60mm)

Condições termomecânicas: 1200-1000°C; vários passes; deformações: 0.3-0.6 por passe; taxa de deformação: 5-20 s-1; tempos interpasse: segundos

Efeitos na microestructura:
-refino de grão por recristalização
-homogeneização microestrutural e de composição química

Outros efeitos: fechamento de defeitos de lingotamento (trincas e vazios)

3. Laminação de acabamento

Objetivo: laminar até a dimensão final (ex: 3mm) a partir de um esboço de ~60mm.

Condições termomecânicas: temperatura: 1050°C até cerca de Ar3; múltiplos passes; deformações: 0.3-0.6 por passe; taxas de deformação: 20-100 s-1; tempos interpasse: frações de segundo.

Efeitos na microestructura:

-refino de grão por recristalização
-precipitação
-encruamento da austenita (acúmulo de deformações)

4. Mesa de resfriamento/resfriamento acelerado

Objetivo: resfriamento até a temperatura desejada (bobinamento ou término de ACC)

Condições termomecânicas: chapas grossas: resfriamento ao ar (1°C/s) ou acelerado (até 20°C/s)

Efeitos na microestructura:

-transformação da austenita
-precipitação

5. Bobinamento (LTQ/Steckel)

Objetivo: simplificar manuseio do material

Condições termomecânicas: temperatura de bobinamento por volta de 400-600°C

Efeitos na microestructura:

-crescimento de grão ferrítico
-transformação da austenita residual
-precipitação

Outros efeitos: oxidação

Resumo - Eventos do processamento

- elevação da temperatura do material a ser deformado/reaquecimento: reaustenitização com conseqüente solubilização dos elementos microligantes;
- alteração de forma/laminação de desbaste: recristalização da austenita; refino e crescimento de grão;
- deformação/amaciamento: refino de grão por recristalização da austenita, acúmulo de deformação na austenita, e precipitação;
- durante o resfriamento: formação de ferrita a partir da austenita deformada, precipitação de nitretos, e carbonetos de elementos microligantes.

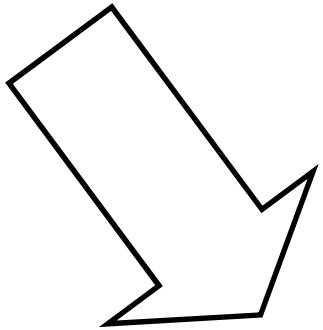
Introdução aos modelos matemáticos microestruturais durante a laminação a quente

*Comportamento da tensão de escoamento média;

*Amaciamento entre passes;

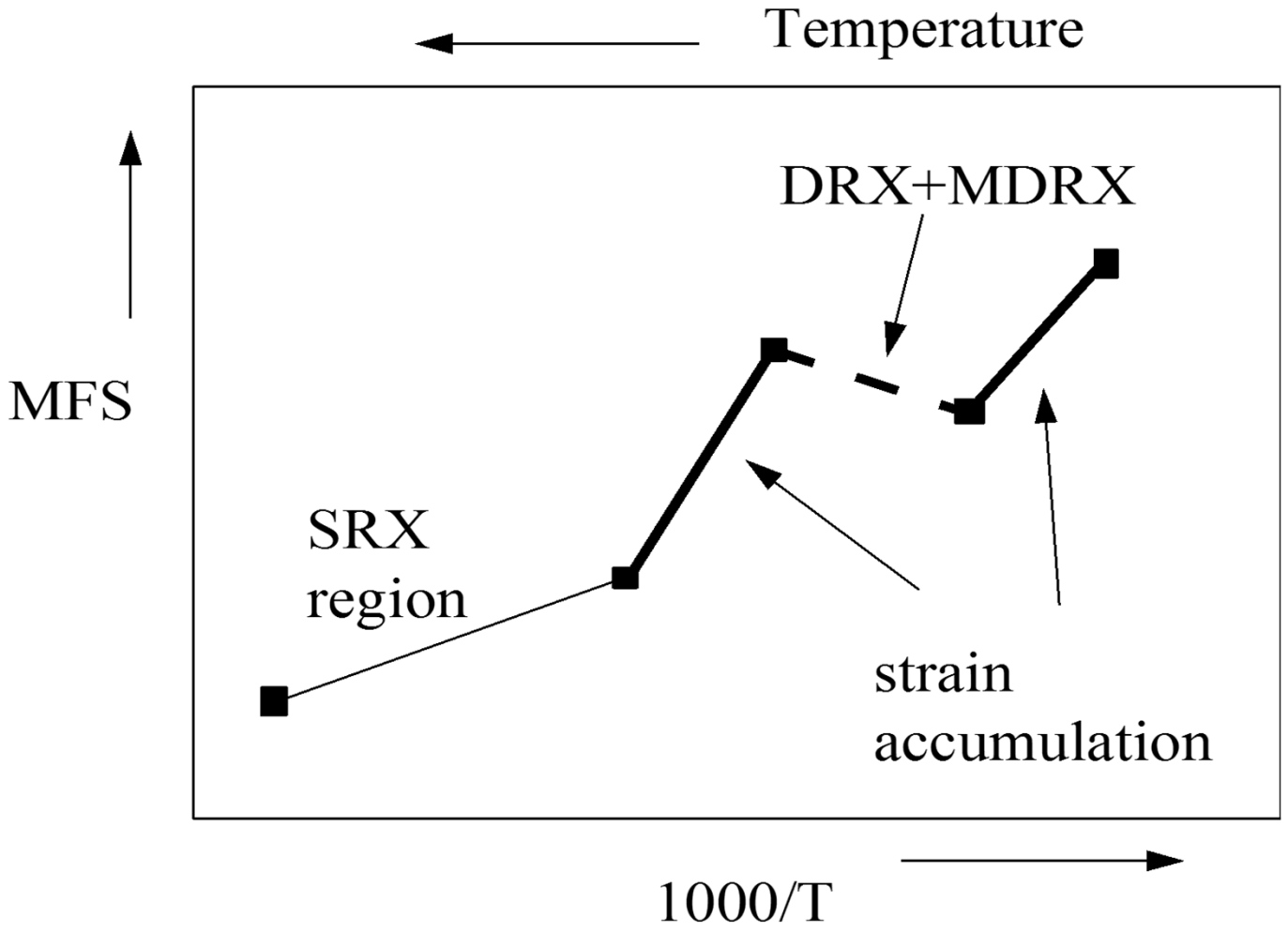
*Evolução do tamanho de grão;

*Precipitação.



Otimização do processo

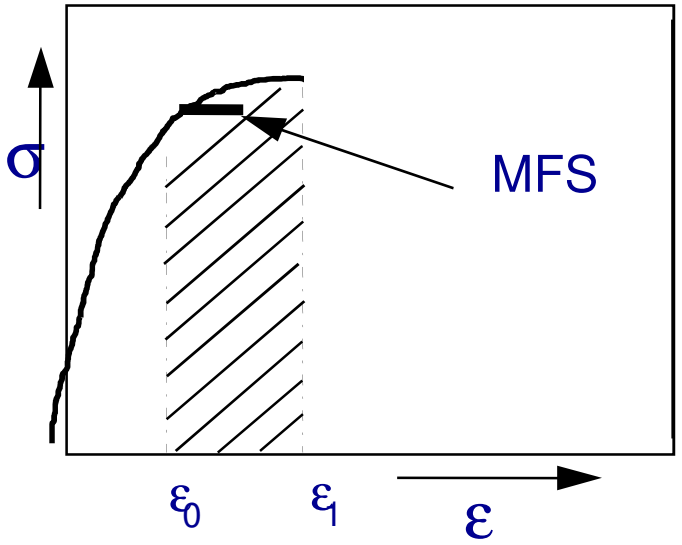
Análise da curva de tensão de escoamento média (*Mean Flow Stress-MFS*)



Cálculo da TEM

- curva tensão-deformação

$$TEM = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon$$



- Em laminação: complexidade geométrica e deformação não uniforme.

Métodos: "Mecânicos": Orowan, Sims e Ford & Alexander

"Empiricos": Misaka & Yoshimoto, Shida

Cálculo da TEM segundo Sims a partir de dados de laminação

Considerações: atrito máximo (achatamento do cilindro de trabalho, escorregamento avante, deformação redundante)

$$TEM = \frac{F}{b} \cdot Q_p \cdot \sqrt{R' \Delta h}$$

onde:

F = Força [Kgf]

b = largura [mm]

$\sqrt{R' \Delta h}$ **= arco de contato[mm]**

Δh = $h_f - h_o$ [mm]

Q_p = "fator geometrico" = $\frac{\pi}{4} + 0{,}25 \times \sqrt{\frac{R' \Delta h}{hm}}$ **onde: $h_m = (h_f + h_o)/2$ [mm]**

Modelamento da TEM

Equação de Misaka

$$\sigma_M = \exp\left(0.126 - 1.75\,[C] + 0.594\,[C]^2 + \frac{2851 + 2968\,[C] - 1120\,[C]^2}{T}\right)\varepsilon^{0.21}\,\dot{\varepsilon}^{0.13}$$

- Deduzida originalmente para aços C-Mn
- Utiliza parâmetros de processamento típicos
- Não leva em conta o efeito de outros elementos de liga

Aplicação de fatores de correção para a equação de Misaka

$$TEM = f \cdot TEM_{Misaka}$$

onde:

$$f = a + b\,[Mn] + c\,[Nb] + d\,[Ti] + e\,[Al] + \ldots$$

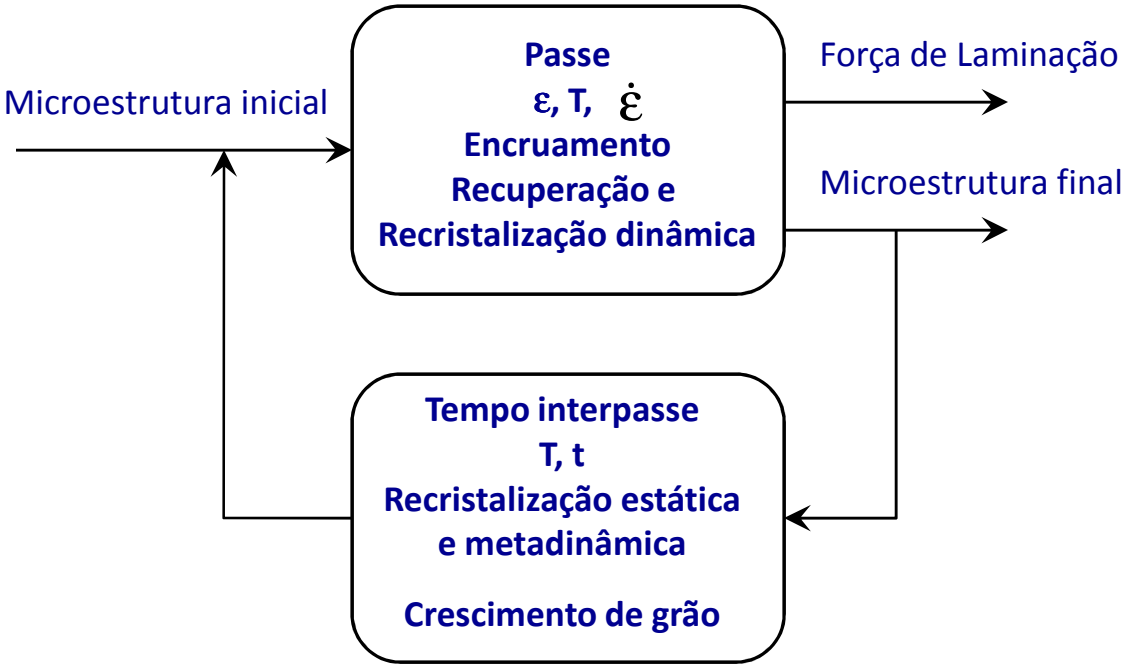
Exemplo:

$$f = 0.835 + 0.098\,[Mn] + 0.51\,[Nb] + 0.128\,[Cr]^{0.8} + 0.144\,[Mo]^{0.3} + 0.175\,[V] + 0.01\,[Ni]$$

Outros exemplos

Author	Mill	Equation
"Original Misaka"	Mechanical Testing	$\sigma_{(MPa)} = 9.81 * \exp\left(0.126 - 1.75[C] + 0.594[C]^2 + \frac{2851 + 2968[C] - 1120[C]^2}{T(K)}\right) \varepsilon^{0.21}\, \dot{\varepsilon}^{0.13}$
Misaka et al.	HSM	MFS=[Original Misaka]*(0.916+0.18·[Mn]+0.389· [V]+0.191· [Mo]+0.004· [Ni])
Minami et al.	Sumitomo-Kashima	MFS=[Original Misaka]*(0.78+0.137·[Mn]+0.51· [Nb]+4.217· [Ti])
Kirihata et al.	Sumitomo-Wakayama	MFS=[Original Misaka]*(0.835+0.098·[Mn]+ 0.51· [Nb]+0.175· [V]+0.144· [Mo]+0.01· [Ni] +0.128· [Cr])
Kang et al.	POSCO	MFS=[Original Misaka]*(0.68+0.161·[Mn]+ 2.74· [Nb]+ 4.03· [Ti] +0.86· [V]+0.29· [Mo] +0.128· [Cr])
Bruna et al.	Sidor	$\mathrm{MFS(MPa)} = 9.81 * \exp\left(\frac{3126 + 68[\mathrm{C}] + 2117[\mathrm{Nb}] + 54[\mathrm{Mn}] + 152[\mathrm{Mo}]}{\mathrm{T(K)}}\right) \cdot \varepsilon^{0.21} \cdot \dot{\varepsilon}^{0.13}$
Bruna et al. [7]	Siderar	MFS=[Original Misaka]*(1.02+0.097·[Mn]+ 2.13· [Nb]+0.53· [V]+ 1.01· [Ti] +0.30· [Cu])
Poliak et al. [8]	Mittal-Inland	MFS=[Original Misaka]*(1.09+0.056·[Mn]+ 4.54· [Nb]+ 1.21· [Ti] +0.056· [Al]+0.10· [Mo]
Hensger et al.	Hylsa	$\mathrm{MFS(MPa)} = 9.8 \cdot \exp\left(\frac{2674 + 3345[\mathrm{Nb}] + 220[\mathrm{Mn}]}{\mathrm{T(°C)} + 273}\right) \cdot \varepsilon^{0.21} \cdot \dot{\varepsilon}^{0.13}$

Evolução Microestrutural



- Amaciamento interpasse;
- Acúmulo de deformação devido ao amaciamento incompleto
- Evolução do tamanho de grão

Equações utilizadas para descrição dos fenômenos metalúrgicos

Temperaturas de dissolução

Irvine:

$\log[Nb][C+12/14N] = -6770/T+2.16$

Mori:

$\log[Nb][C]^{0.87} = -7700/T+3.18$

$\log[Nb][N]^{0.65}[C]^{0.24} = -10400/T+4.09$

Meyer:

$\log[Nb][C] = -7290/T+3.04$

$\log[Nb][N+C] = -5860/T+1.54$

Siciliano:

$$\log\ [\mathrm{Nb}]\cdot[\mathrm{C}+{}^{12}\!/_{14}\,\mathrm{N}] = 2.26+\frac{838\ [\mathrm{Mn}]^{0.246}-1730\ [\mathrm{Si}]^{0.594}-6440}{\mathrm{T}}$$

Dong:

$$\log[Nb]\cdot[C+{}^{12}\!/_{14}\,N] = 3.14+0.35[Si]-0.91[Mn]+\frac{1371[Mn]-923[Si]-8049}{T}$$

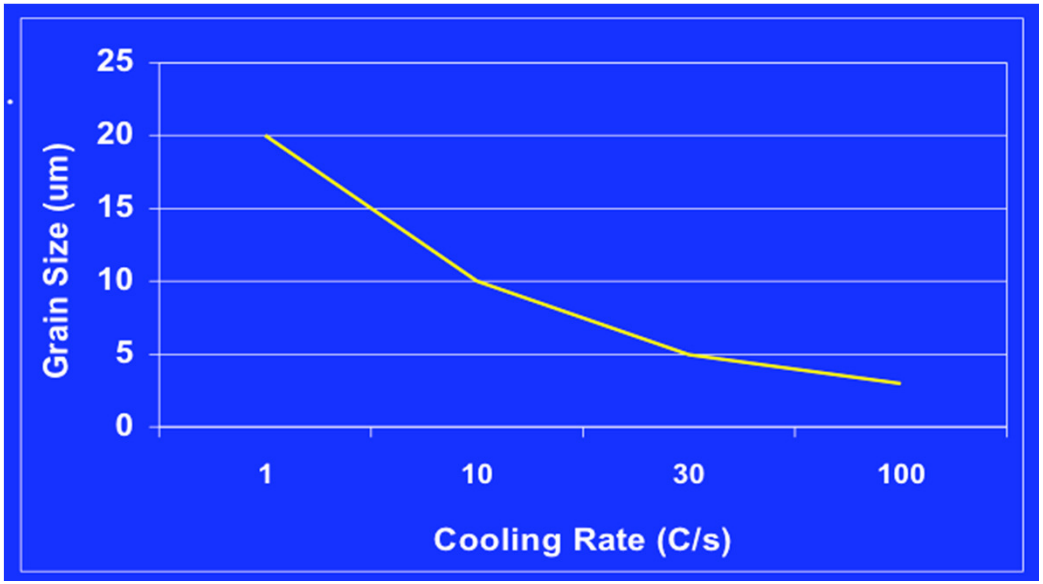
Equações microestruturais

Event	Equation
Fractional Softening	$X = 1 - \exp\left[-0.693\left(t/t_{0.5}\right)\right]$
Recrystallized grain size, d	If $\varepsilon_a<\varepsilon_c$: $d_{SRX} = 1.9\varepsilon^{-0.67} d_0^{0.67}$ If $\varepsilon_a>\varepsilon_c$ $d_{MDRX} = 1400 \cdot Z^{-0.13}$
Time for 50% recrystallization $t_{0.5}$	If $\varepsilon_a<\varepsilon_c$: $t_{0.5}^{SRX} = (-5.24 + 550[Nb])10^{-18}\varepsilon^{(-4.0+77[Nb])} d_0^2 \exp\left(\frac{330\ 000}{RT}\right)$ If $\varepsilon_a>\varepsilon_c$ $t_{0.5}^{MDRX} = 4.42 \times 10^{-7} \cdot \dot{\varepsilon}^{-0.59} \exp\left(\frac{153\ 000}{RT}\right)$
Grain growth	$d^{4.5} = d_0^{4.5} + 4.1 \times 10^{23}(t_{ip} - 4.32\, t_{0.5}) \exp\left(\frac{-435\ 000}{RT}\right)$

Tamanho de grão ferrítico

$$d_{\alpha}^{0} = 2{,}5 + 3{,}0 \cdot \dot{T}^{-1/2} + 20(1 - \exp(-1{,}5 \times 10^{-2} d_{\gamma})$$

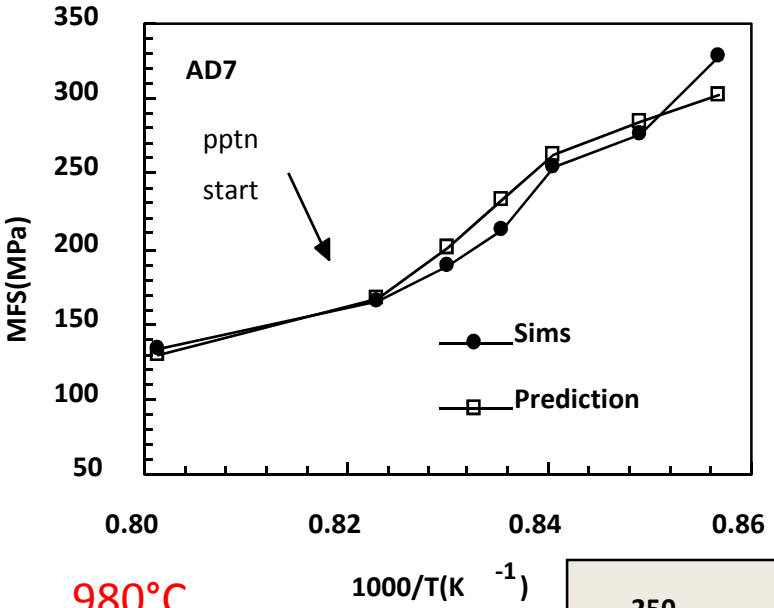
$$d\alpha = d\alpha_0 (1 - 0.45\sqrt{\varepsilon_r})$$



Exemplo de Utilização de Modelo Matemático Microestrutural na Laminação de Chapas Grossas

Cargar altas - o que fazer?

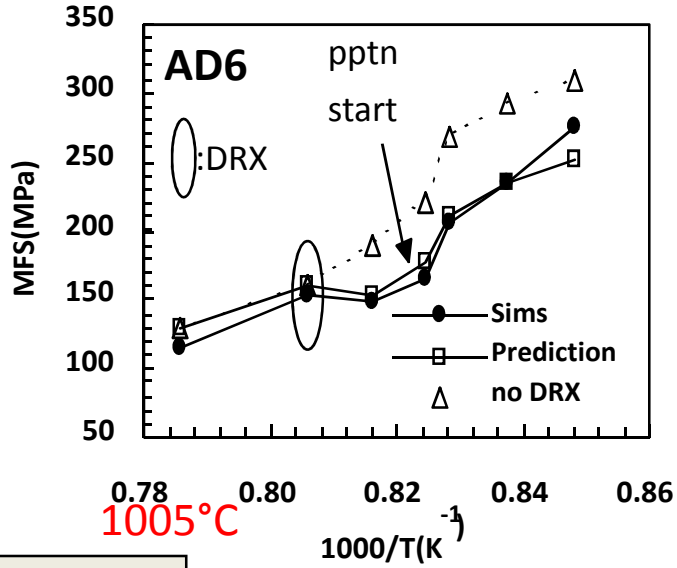
Mudar a estratégia de laminação refinando a microestrutura por recristalização dinâmica



980°C

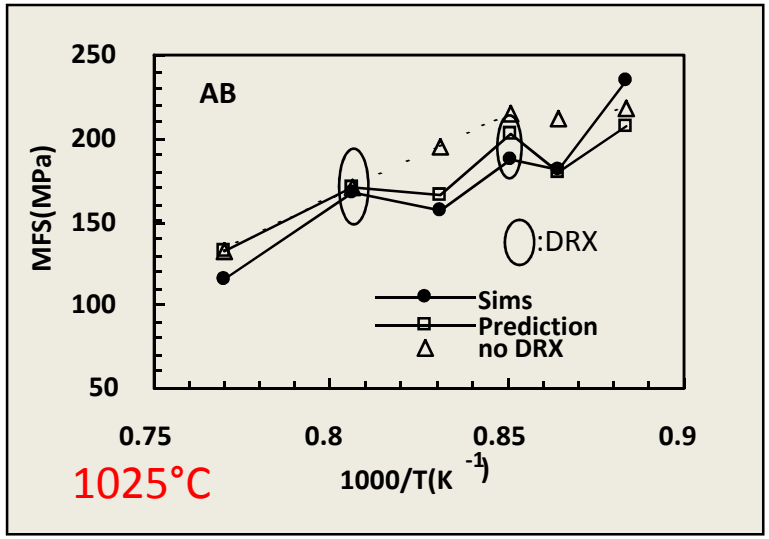
(i-CCR)

(ii-DRXCR)



1005°C

(iii-DRX+CCR)

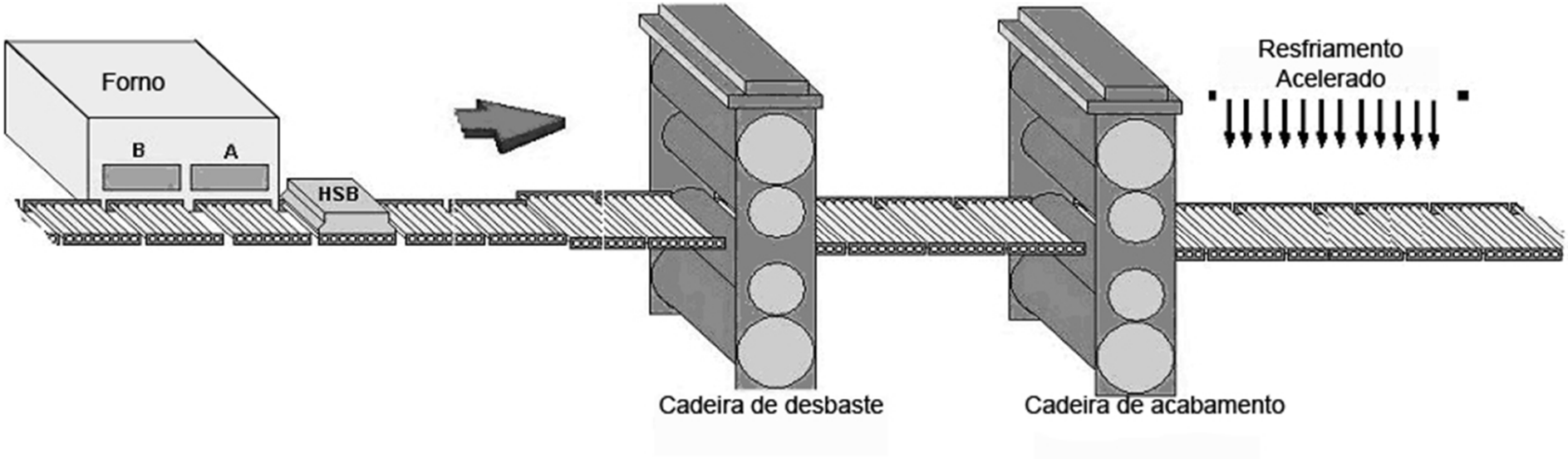


1025°C

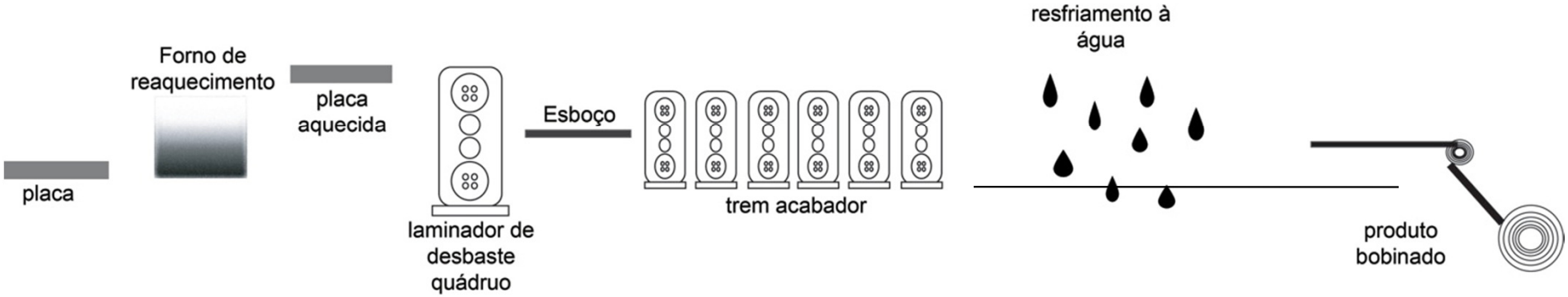
Case	Grade	γ grain size (μm)	residual strain	α grain size (μm)
i)	AD7	73.1	3.21	3.7
ii)	AB	6.0	0.42	4.2
iii)	AD6	17.1	1.53	4.3

Laminadores industriais

Laminador de Chapas Grossas

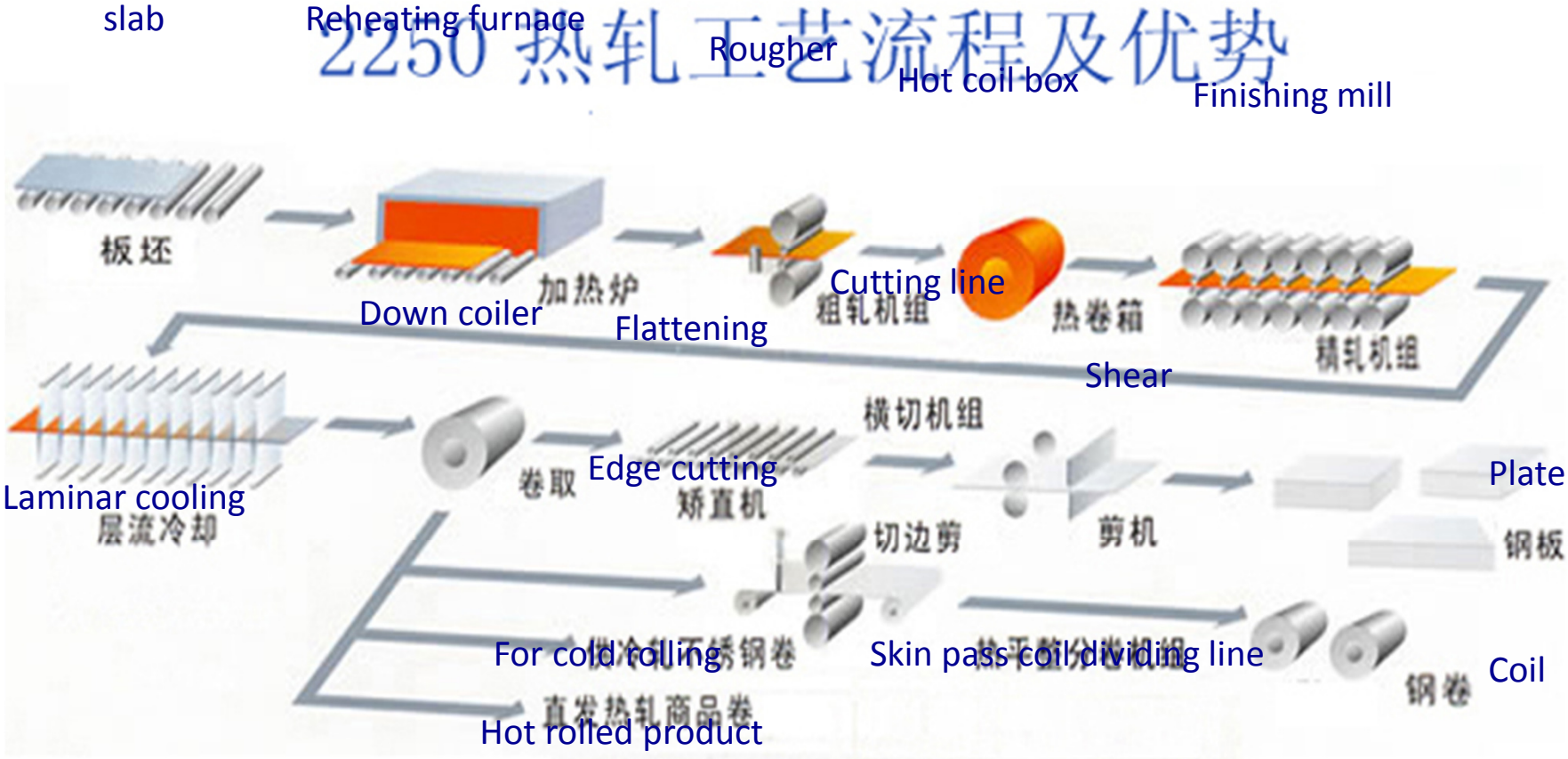


Laminador de Tiras a Quente

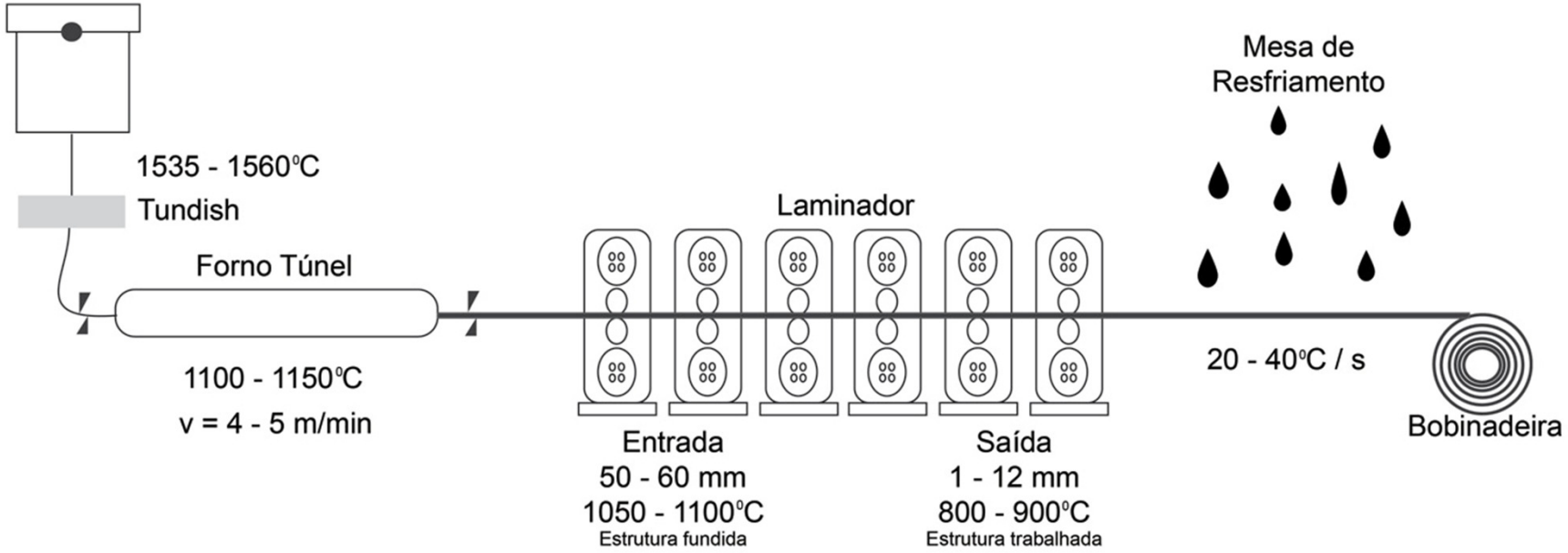


2250mm-TISCO

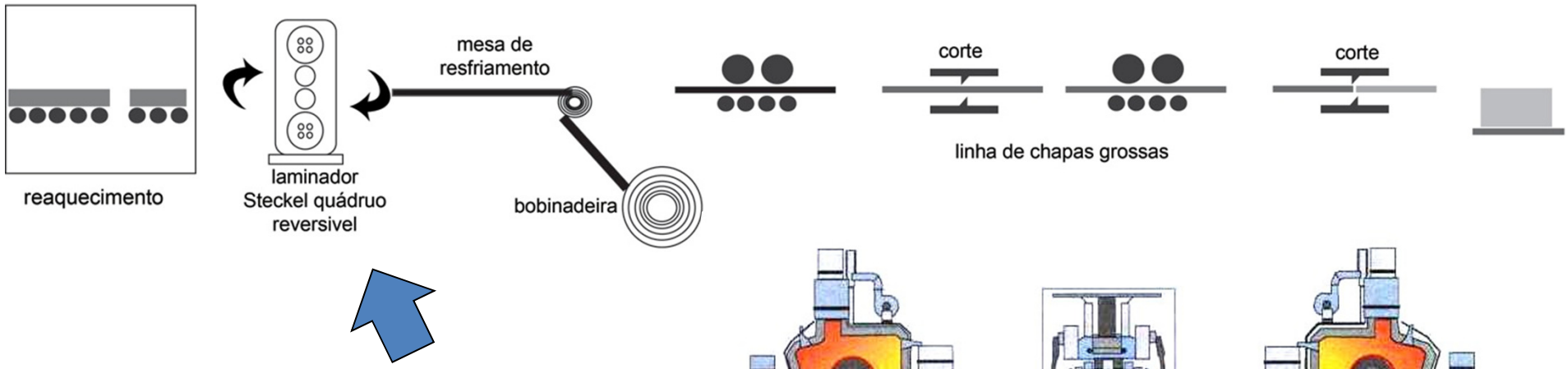
Process flowing of 2250mm hot rolled strip mill

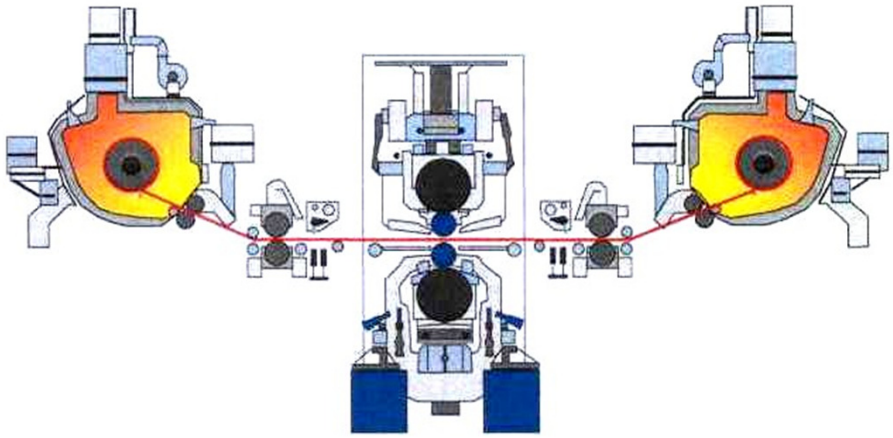


Laminador de Placas Finas



Laminador Steckel





Schematic of a Steckel Mill