



# Temperabilidade

Engenharia e Ciência dos Materiais I  
Profa.Dra. Lauralice Canale

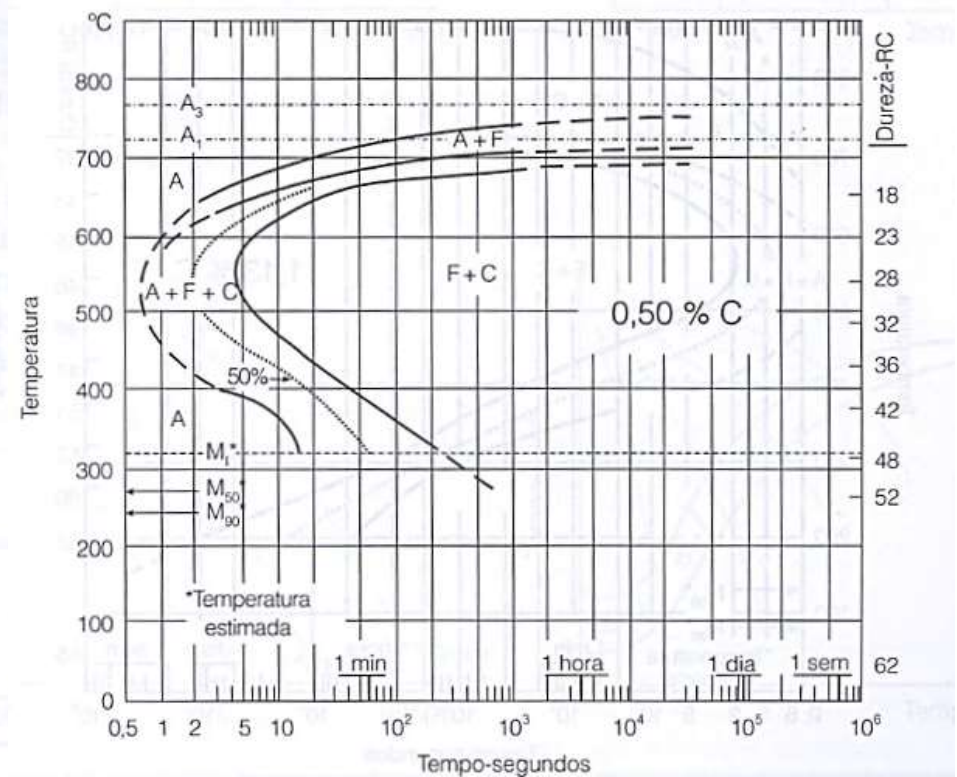
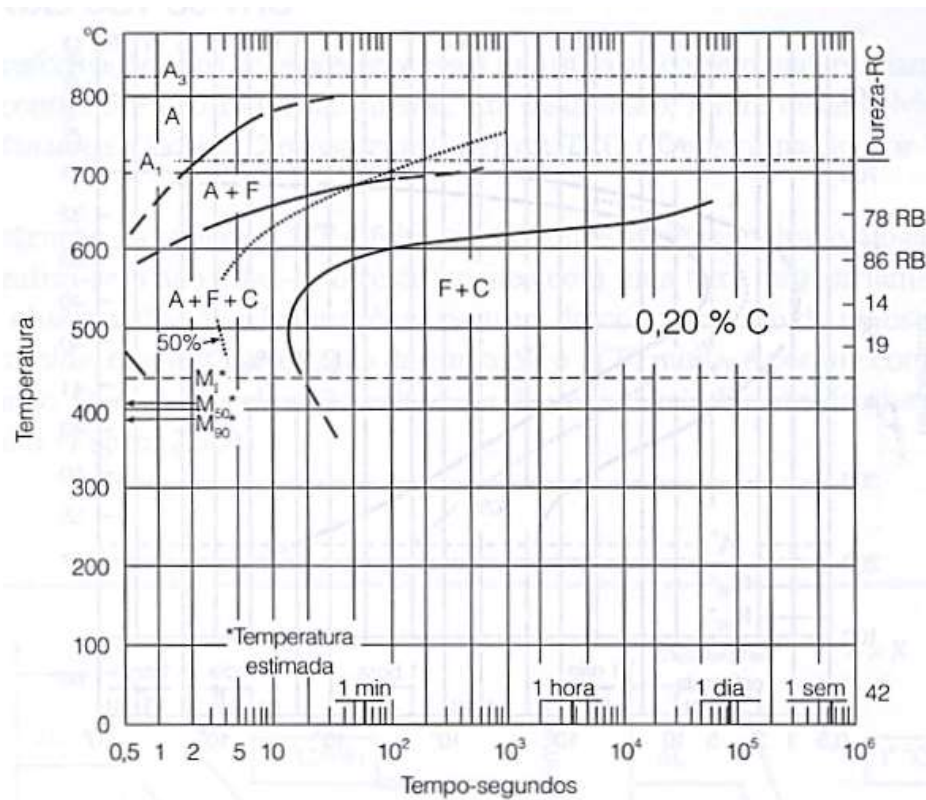


# FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

- Teor de carbono
- Tamanho do grão da austenita
- Composição química (elementos de liga)

# TEOR DE CARBONO

- Quanto menor o teor de carbono (abaixo do eutetóide) mais difícil de se obter estrutura martensítica





# ELEMENTOS DE LIGA

Quanto maior o teor e o número dos elementos de liga, mais numerosas e complexas são as reações



Todos os elementos de liga (**exceto o Cobalto**) deslocam as curvas para a direita, retardando as transformações e promovem a formação de um Joelho separado para a bainita



**Facilitam a formação da martensita**

*\*\*\* Conseqüência: em determinados aços pode-se obter martensita mesmo com resfriamento lento*

# EFEITO DE ELEMENTOS DE LIGA NAS CURVAS TTT

## AISI 1335

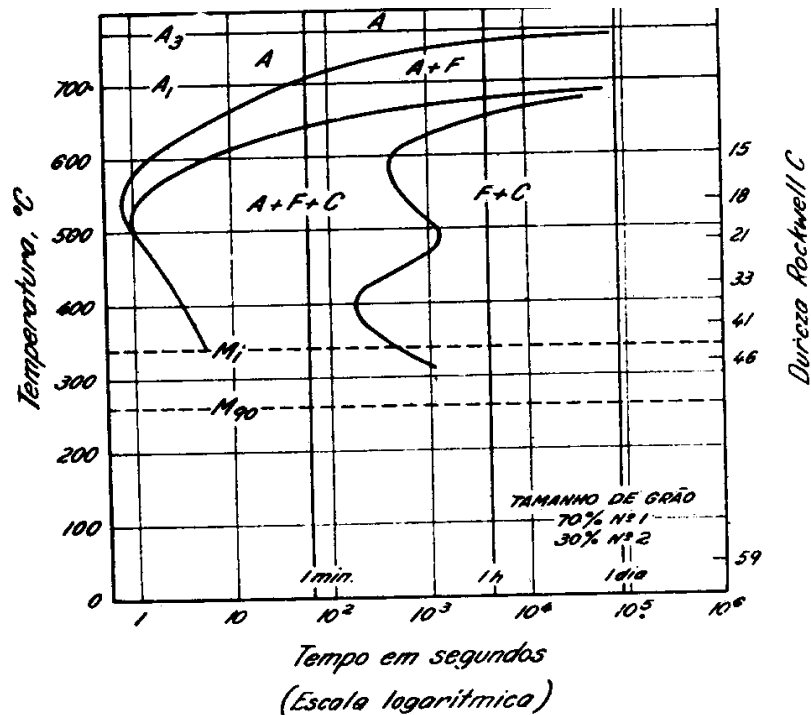


FIG. 25 — Curva TTT para aço AISI 1335 com 0,35% de carbono e 1,85% de manganês.

## AISI 5140

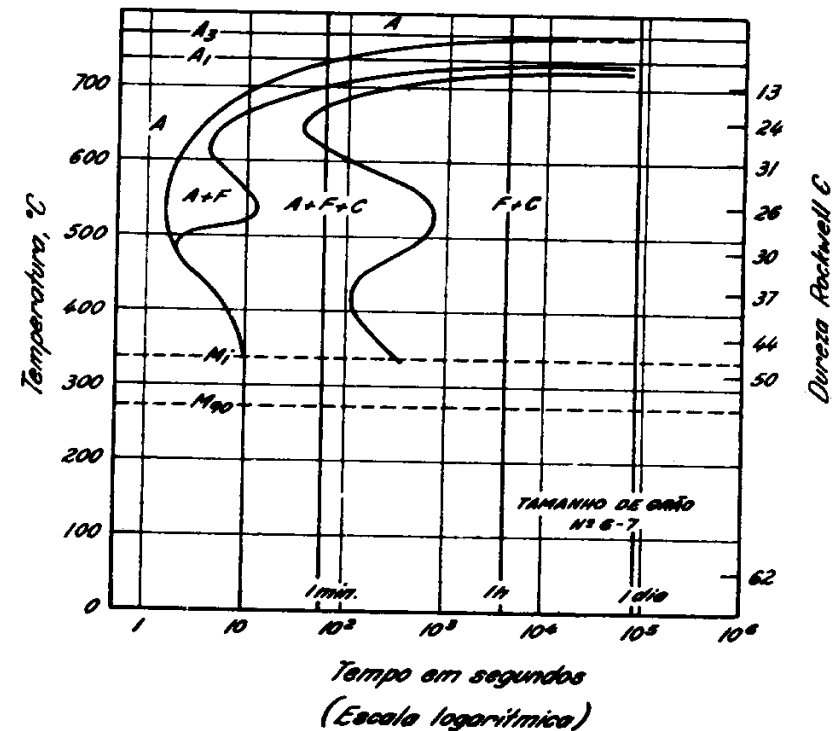


FIG. 27 — Curva TTT para aço AISI 5140 com 0,43% C, 0,68% Mn e 0,93% Cr.

*Praticamente o mesmo teor de carbono mas com diferentes elementos de liga*

# COMPOSIÇÃO QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA

AISI 4340 → neste aço é possível obter bainita por resfriamento contínuo

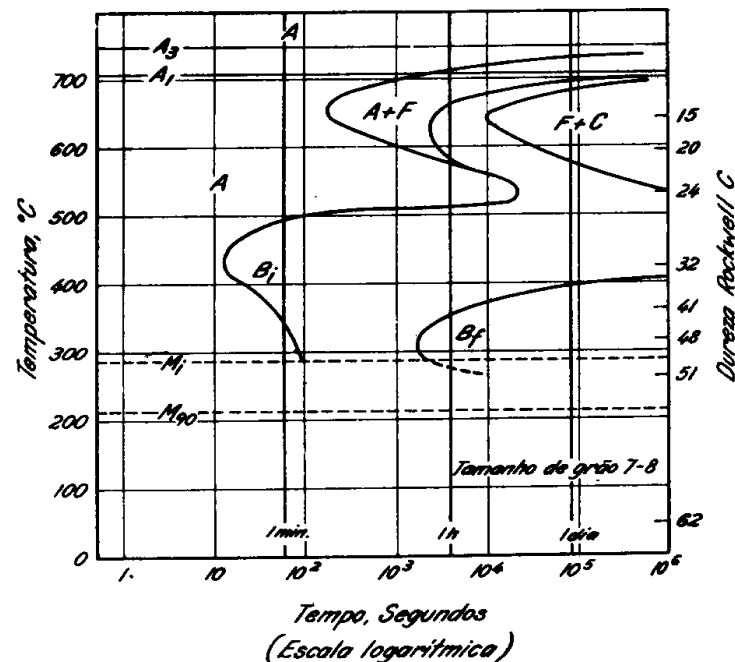


FIG. 28 — Curva TTT para aço AISI 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,33% Mo.



# TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

Quanto maior o tamanho de grão mais para a direita deslocam-se as curvas TTT



Tamanho de grão grande dificulta a formação da perlita, já que a mesma inicia-se no contorno de grão



Então, tamanho de grão grande favorece a formação da martensita



# TAMANHO DE GRÃO DA AUSTENITA

No entanto deve-se evitar tamanho de grão da austenita muito grande porque:

- Diminui a tenacidade
- Gera tensões residuais
- É mais fácil de empenar
- É mais fácil de ocorrer fissuras





# HOMOGENEIDADE DA AUSTENITA

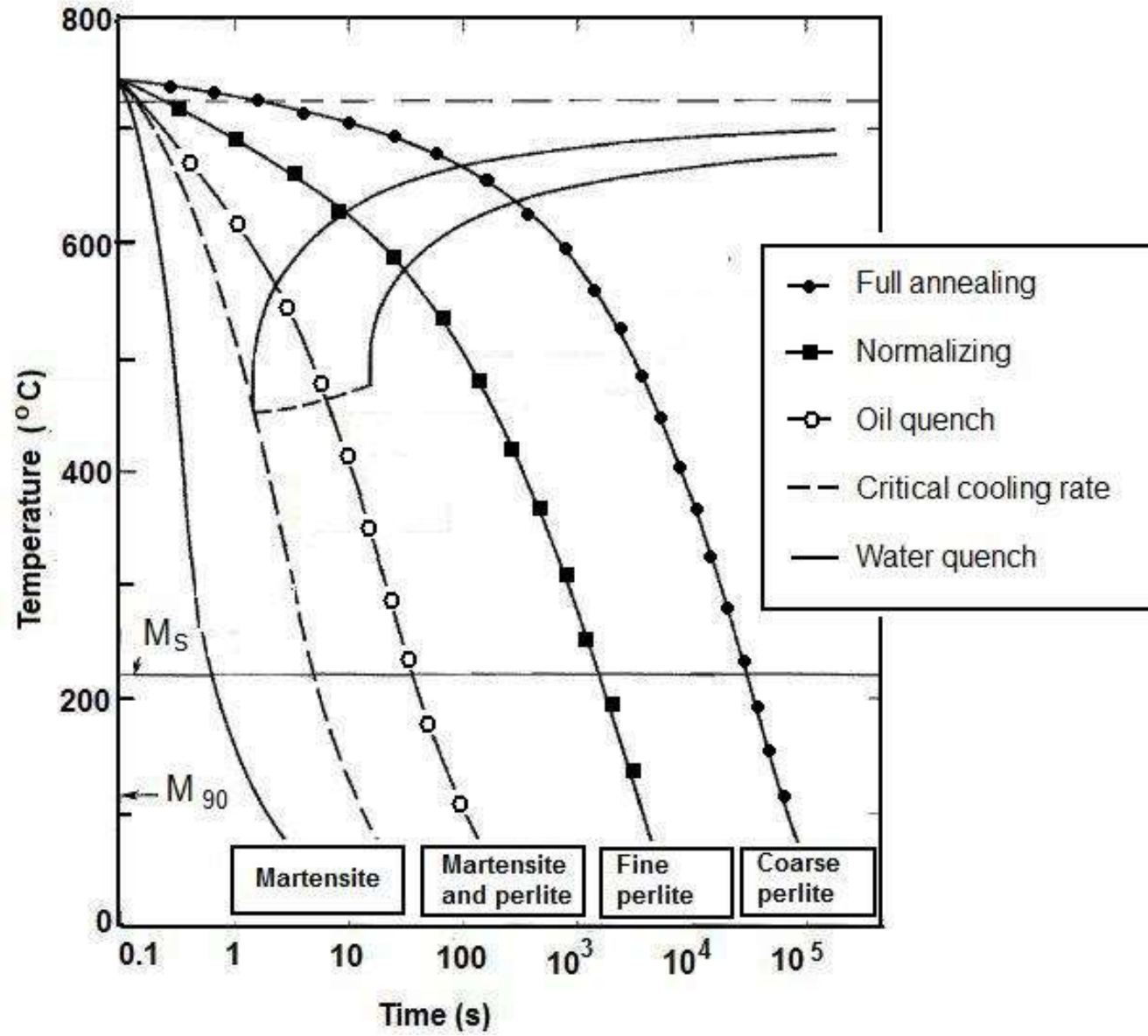
Quanto homogênea a austenita mais para a direita deslocam-se as curvas TTT

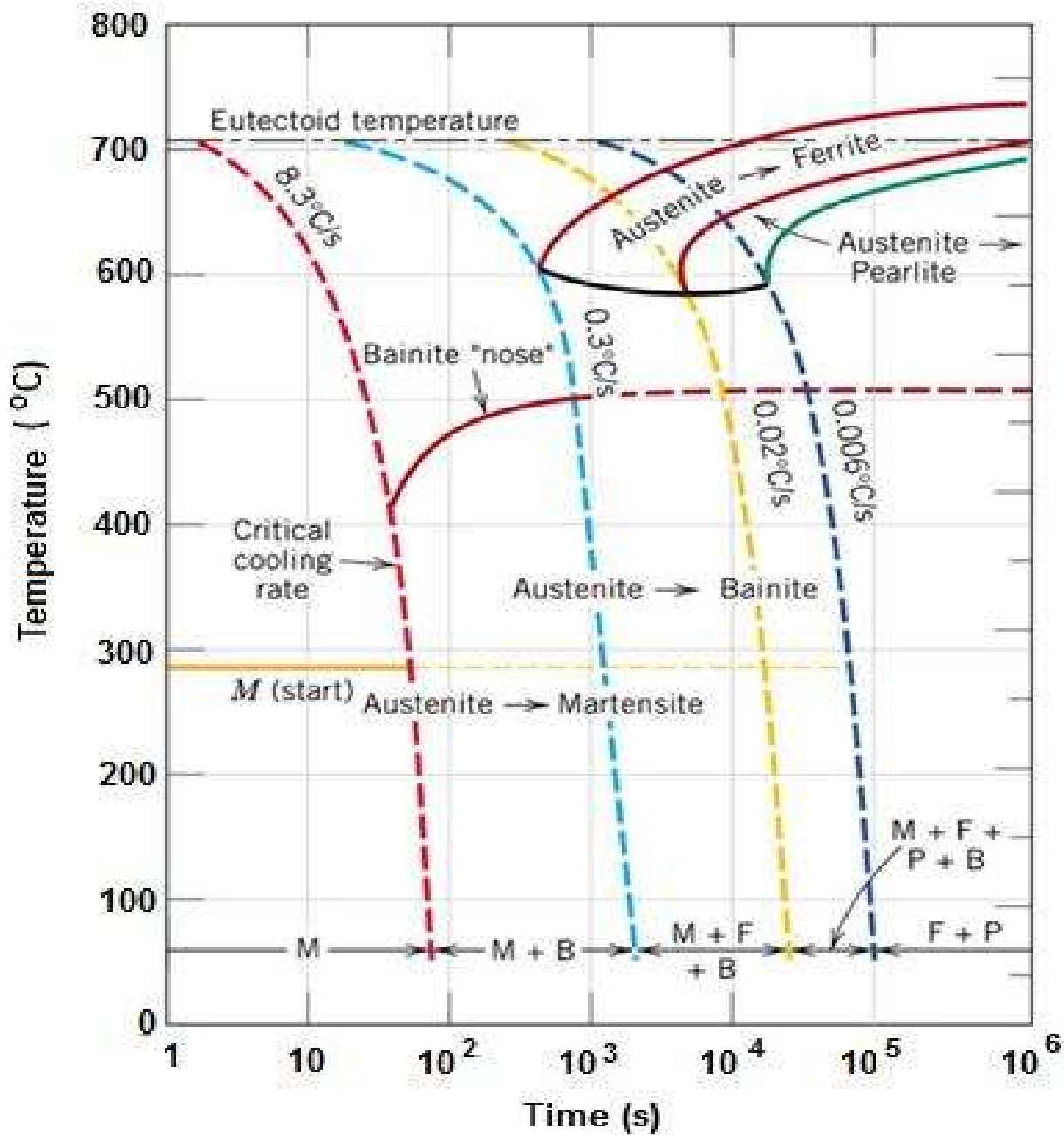


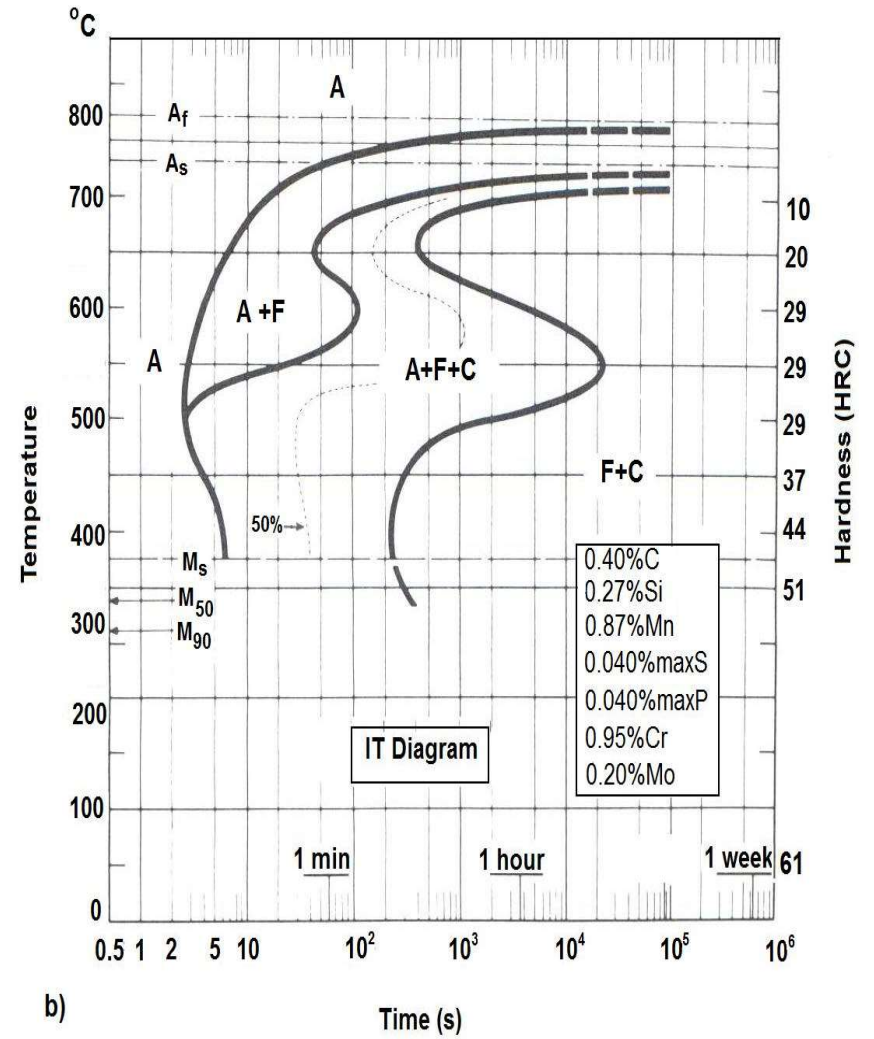
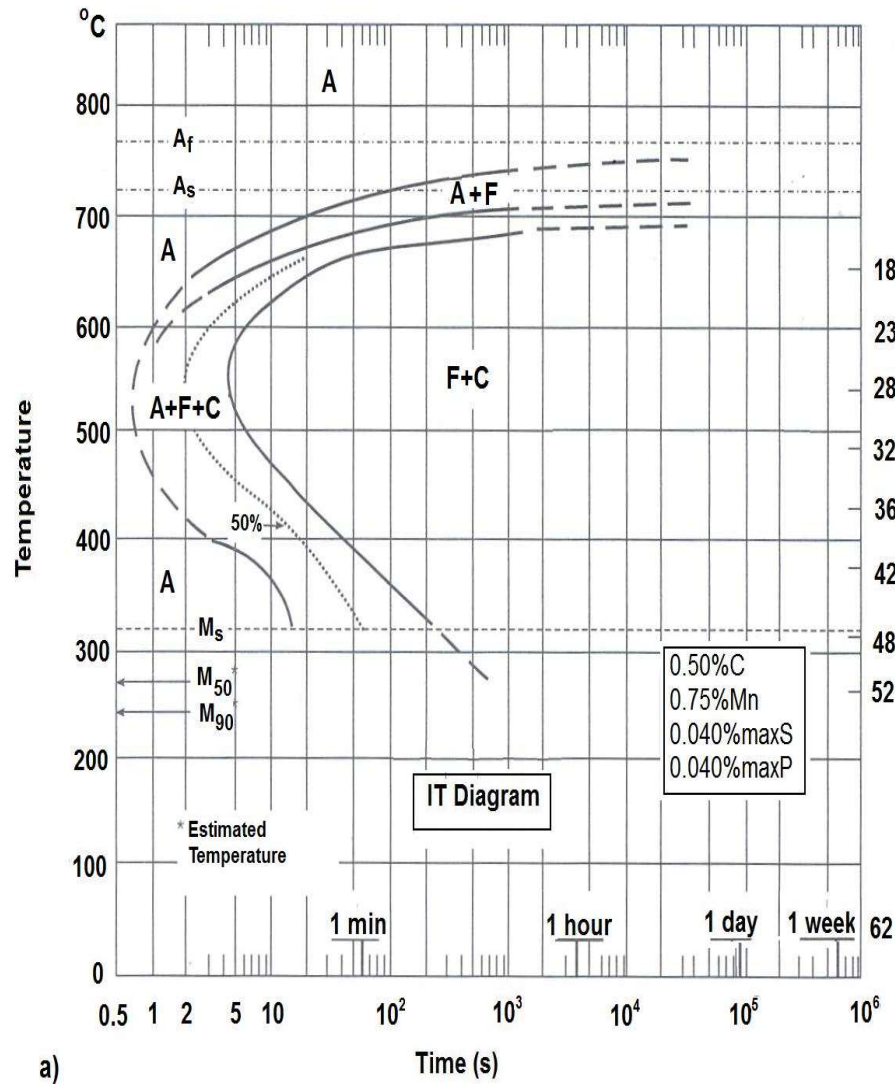
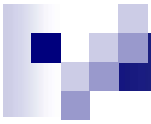
Os carbonetos residuais ou regiões ricas em C atuam como núcleos para a formação da perlita

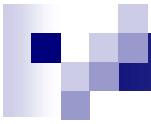


Então, uma maior homogeneidade favorece a formação da martensita



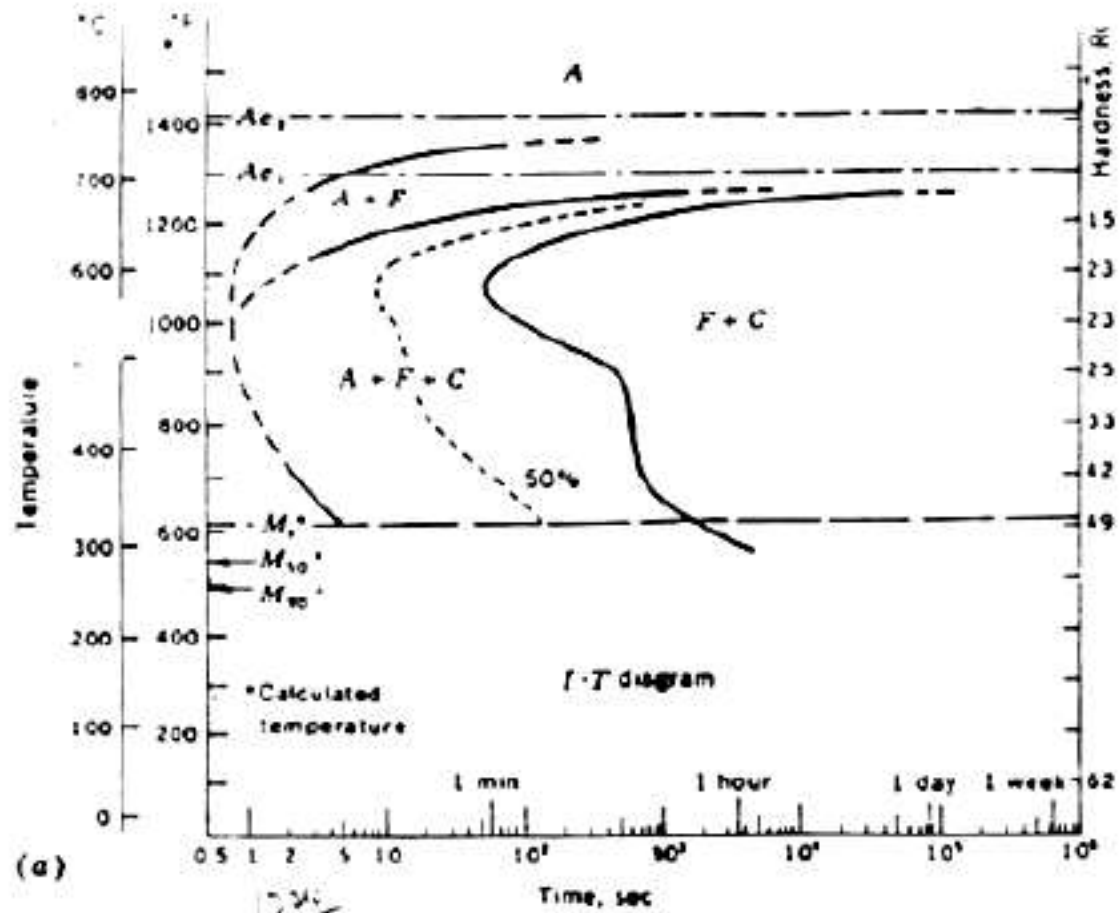


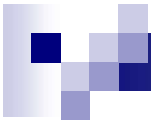




# TTT curve - 1040

1040  
C+Mn

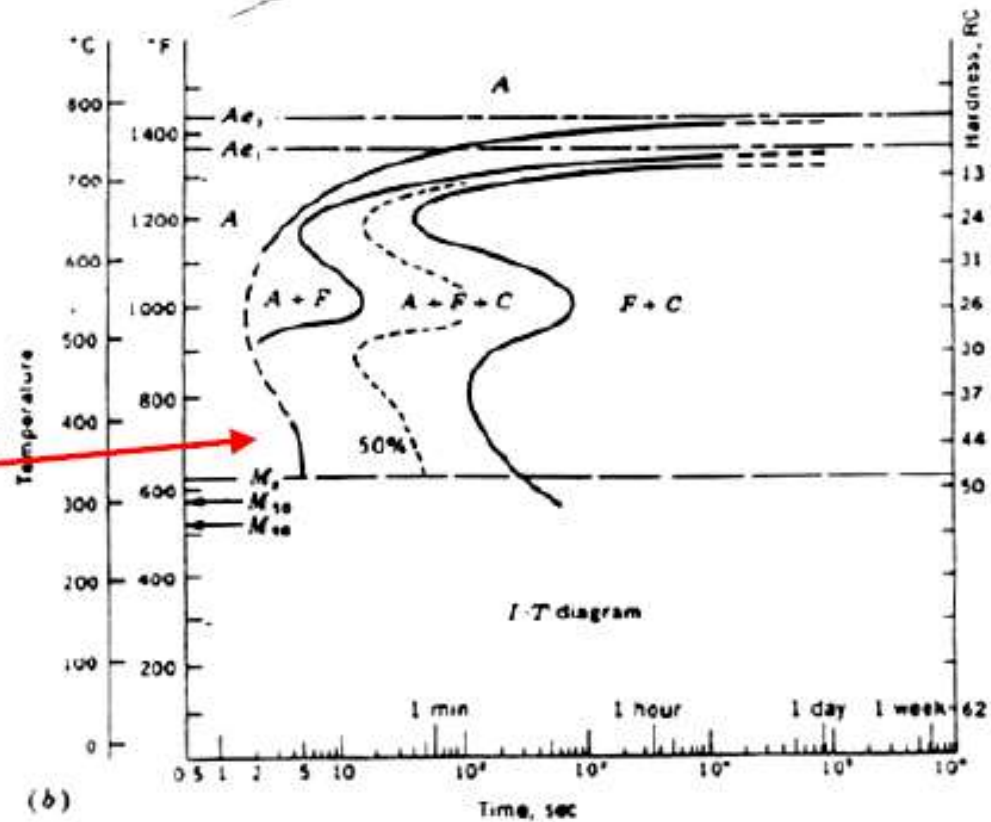


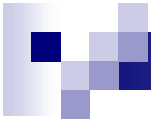


# TTT curve - 5140

5140  
C+Mn+Cr

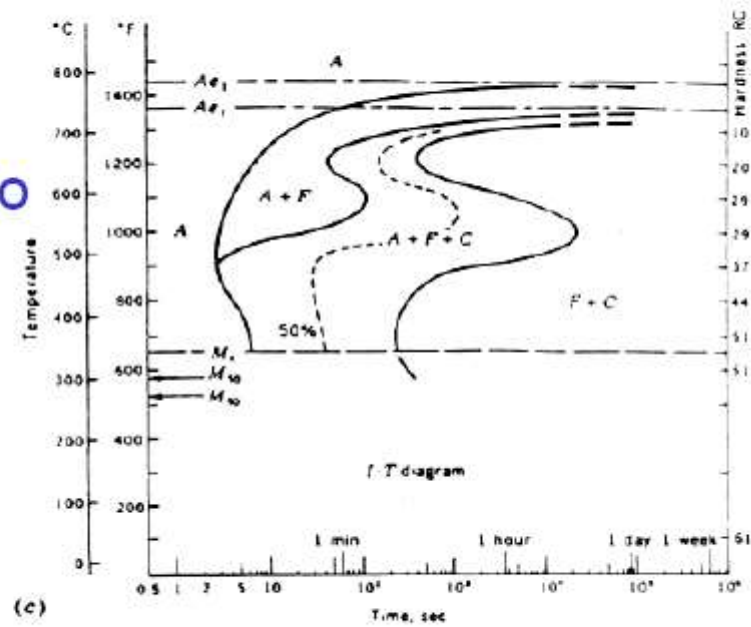
Curve shifted  
to right

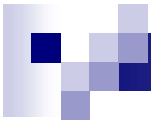




## TTT curve - 4140

4140  
C+Mn+Cr+Mo

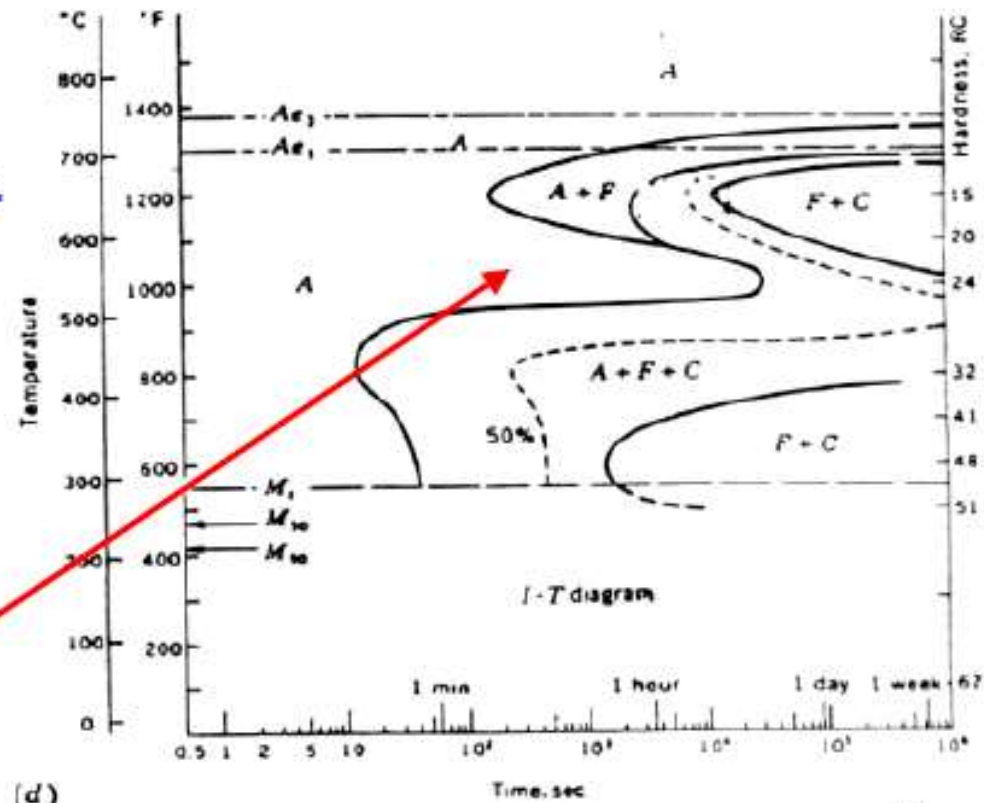




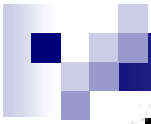
## TTT curve - 4340

4340  
C+Mn+Cr+  
Ni+Mo

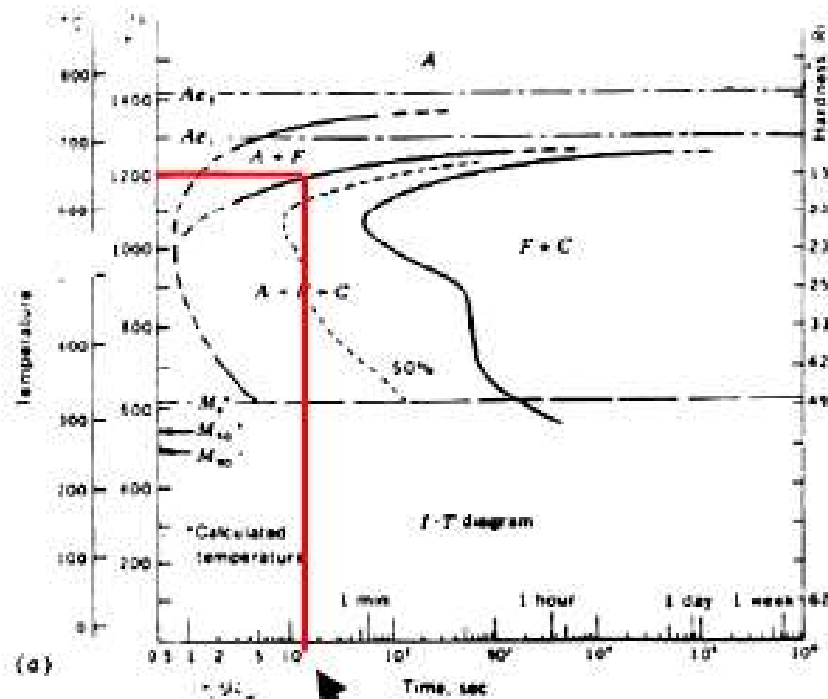
Separation of  
pearlite and  
bainite nose





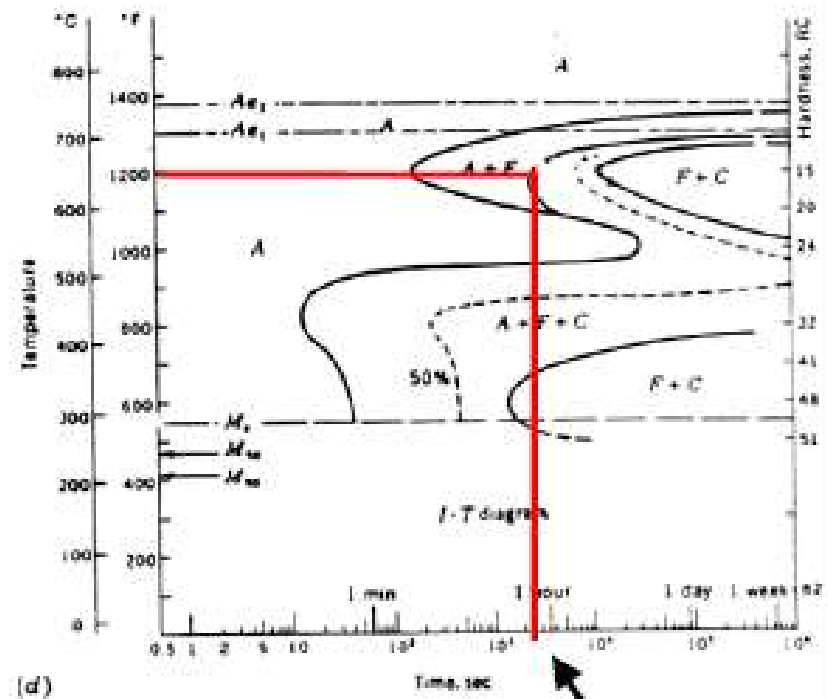


1040




15 sec

4340



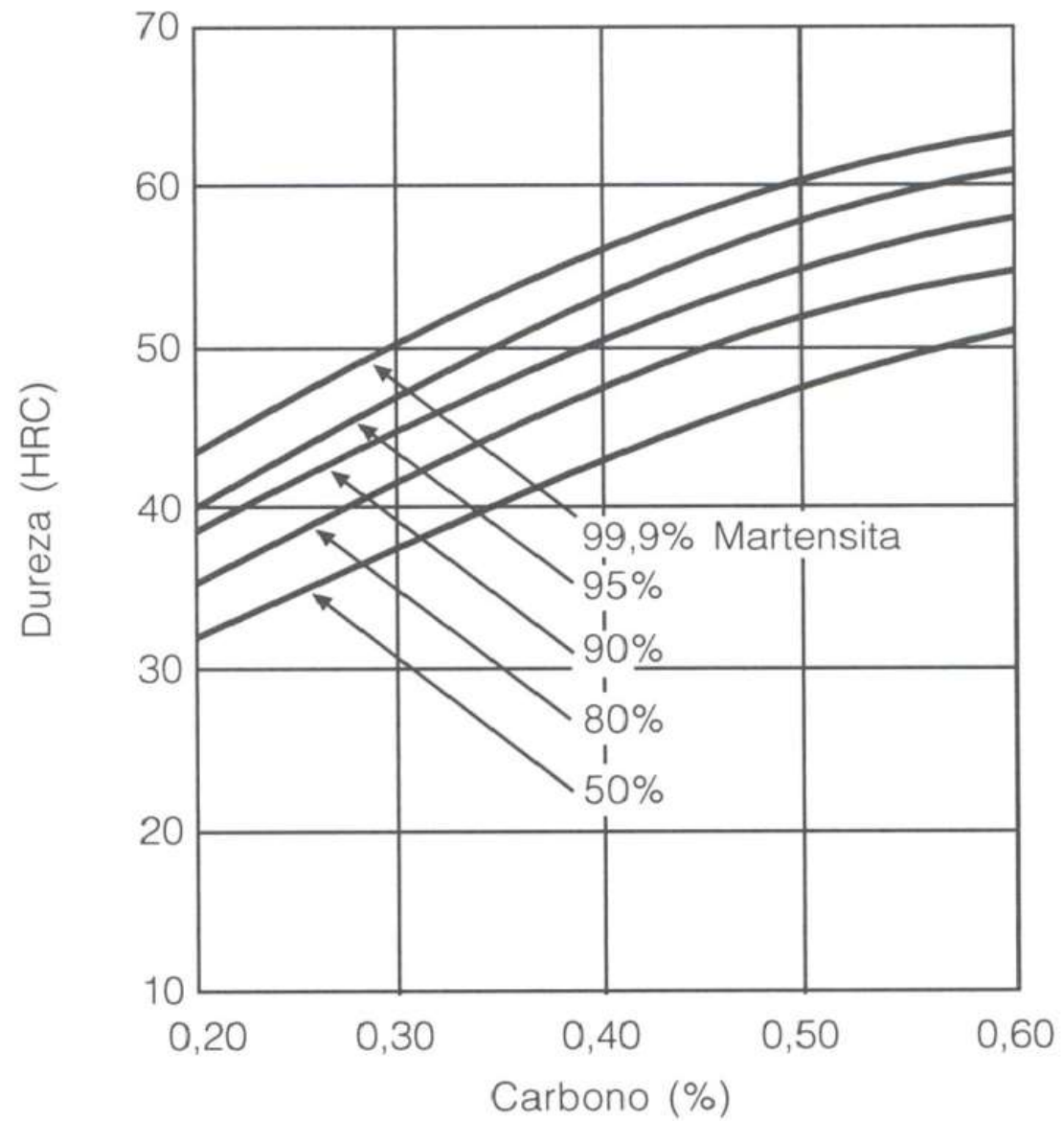
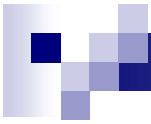
1 hour



## TTT Curves (1040, 5140, 4140, 4340)

5.  $B_f$  (bainite finish) times @  $T_{\text{transf}} 345^\circ\text{C}$

<b>Grade</b>	<b><math>B_f</math> time (seconds)</b>	<b>(minutes)</b>
1040	800	13
5140	200	3.5
4140	280	4.5
4340	2000	33





## ***Efeito da composição da liga na temperabilidade***

Aumento de C – Aumenta temperabilidade

Aumento de elementos de liga – Aumenta temperabilidade

Exceções:

S forma MnS

Co aumenta taxa de nucleação e crescimento da perlita

Ti forma TiC (homogeneidade da austenita)



# Temperabilidade

- Temperabilidade é um termo utilizado para descrever a habilidade de uma liga de ser endurecida pela formação de martensita
- Uma liga que possui alta temperabilidade forma martensita não apenas na sua superfície, mas em elevado grau também em todo o seu interior
- Temperabilidade X Dureza da martensita
- As medidas de temperabilidade podem ser feitas pelo método de Grossman e pelo método Jominy



# Método de Grossman(Diâmetro crítico)

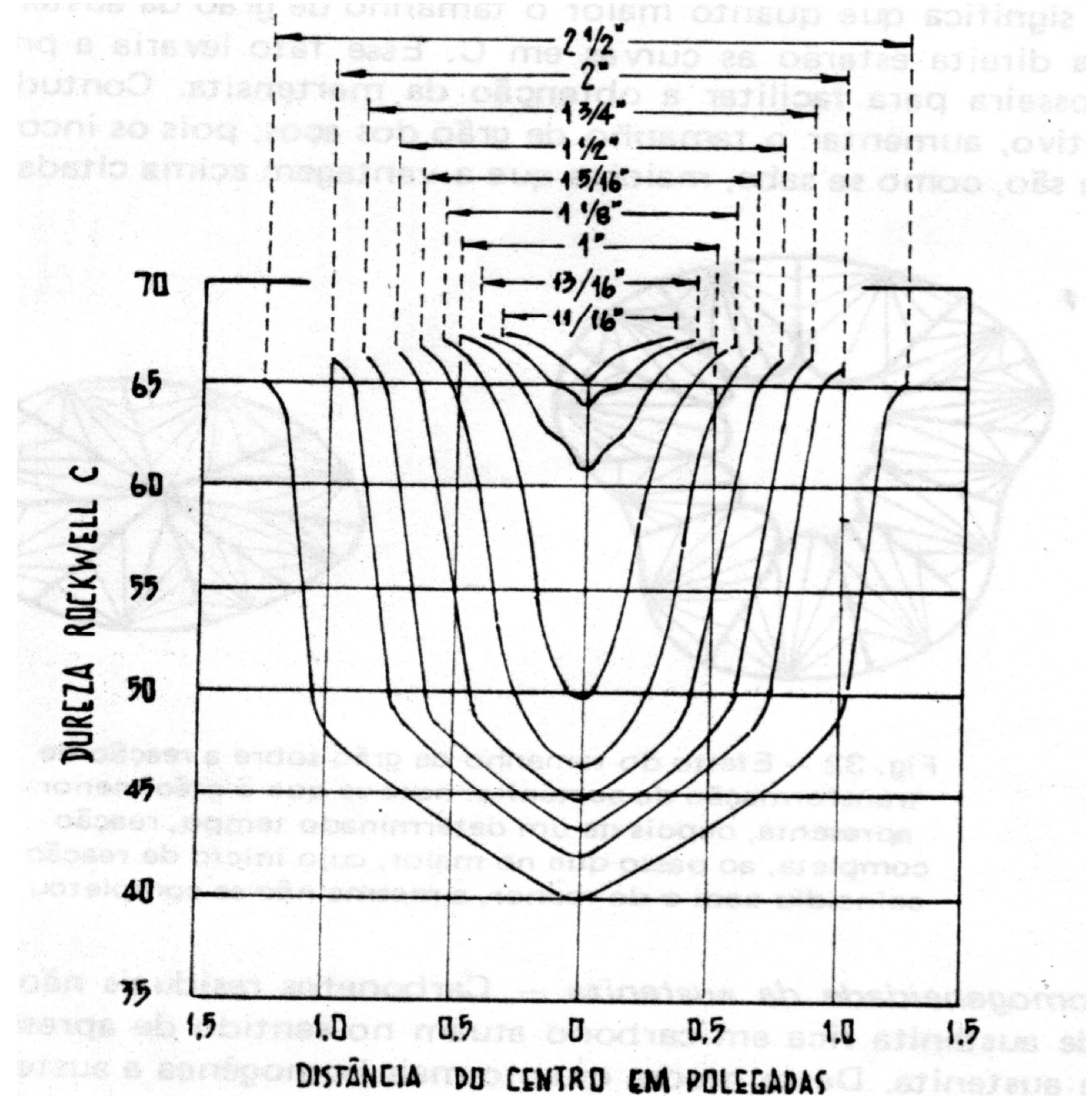
- Neste método, barras cilíndricas de aço, de diâmetros crescentes são austenitizadas e resfriadas rapidamente, em condições controladas para transformação da austenita em martensita
- Secções transversais das barras são a seguir submetidas à determinação de dureza do centro à superfície
- Traça-se um gráfico em que as abcissas são as distâncias dos centros e as ordenadas os valores de dureza (HRC)



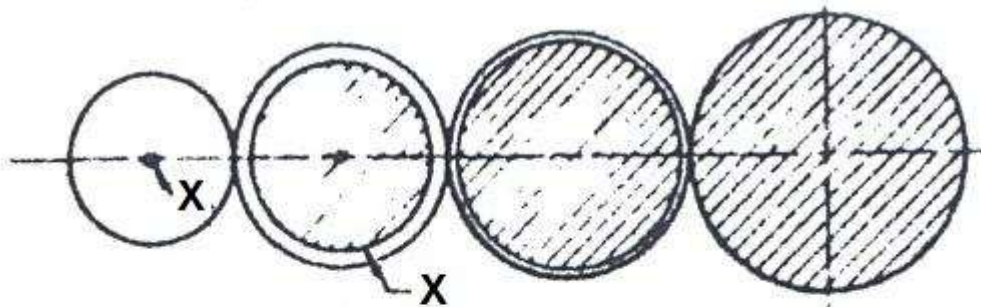
## Método de Grossman (Diâmetro crítico)

- Para o aço considerado as barras mais finas são as que apresentam uma distribuição de dureza mais uniforme ao longo de toda a seção temperabilidade corresponde ao menor diâmetro
- Devido à dificuldade em se conseguir uma estrutura martensítica total em toda a seção, costuma-se considerar um aço temperado quando seu centro apresentar no mínimo 50% de martensita.

# Método de Grossman (Diâmetro crítico)

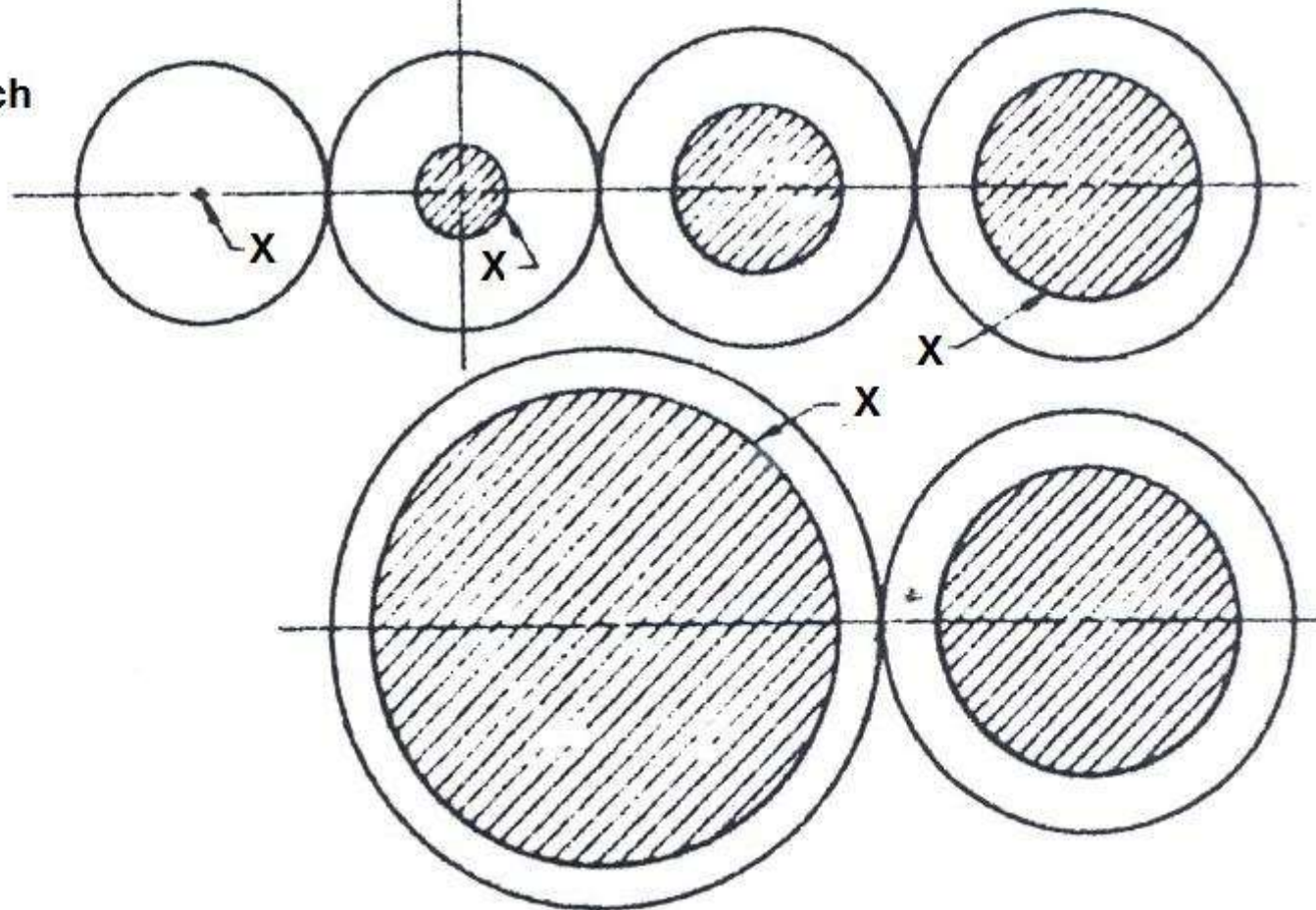






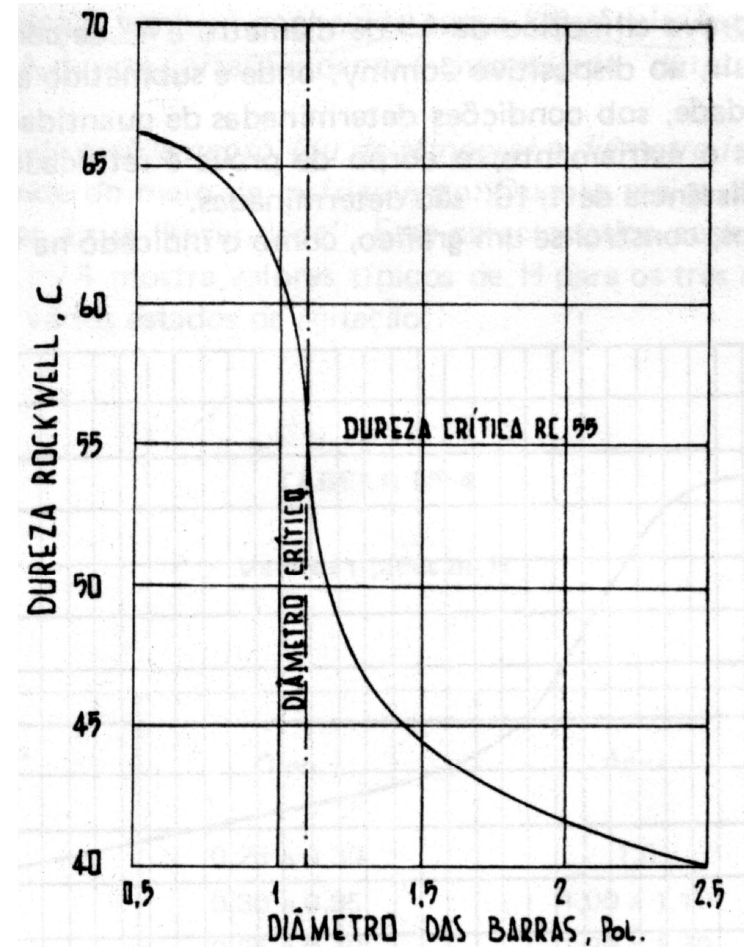
**Oil Quench**

**Water Quench**



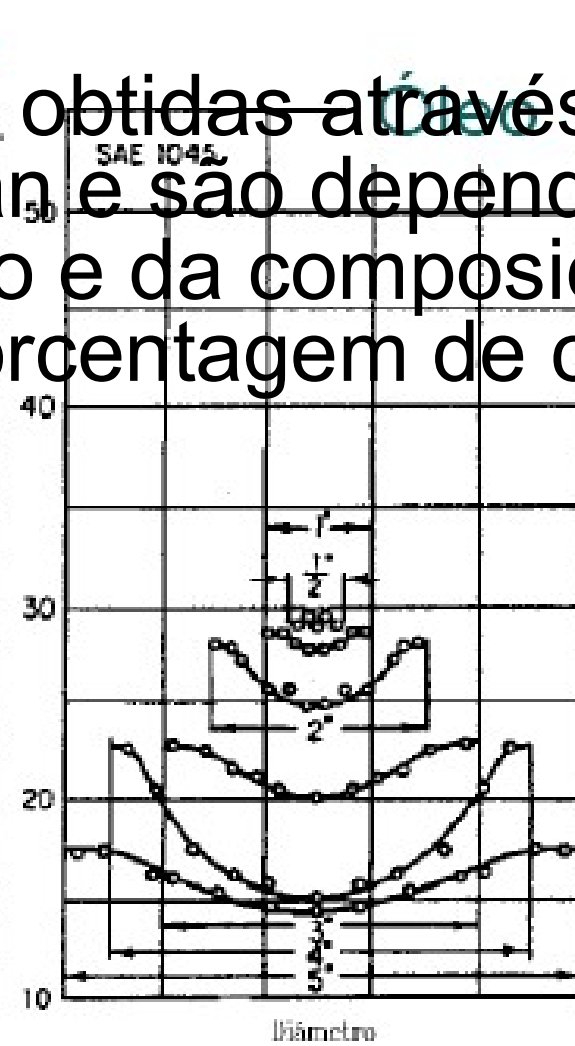
# Método de Grossman(Diâmetro crítico)

- Diâmetro crítico corresponde ao diâmetro da barra que mostrará no centro 50% de martensita
- O diâmetro crítico pode ser determinado graficamente, sendo o diâmetro da barra para a qual se verifica a mais brusca queda de dureza em um gráfico dos diâmetros das barras por durezas dos centros das barras
- Quanto maior o diâmetro crítico, maior a temperabilidade

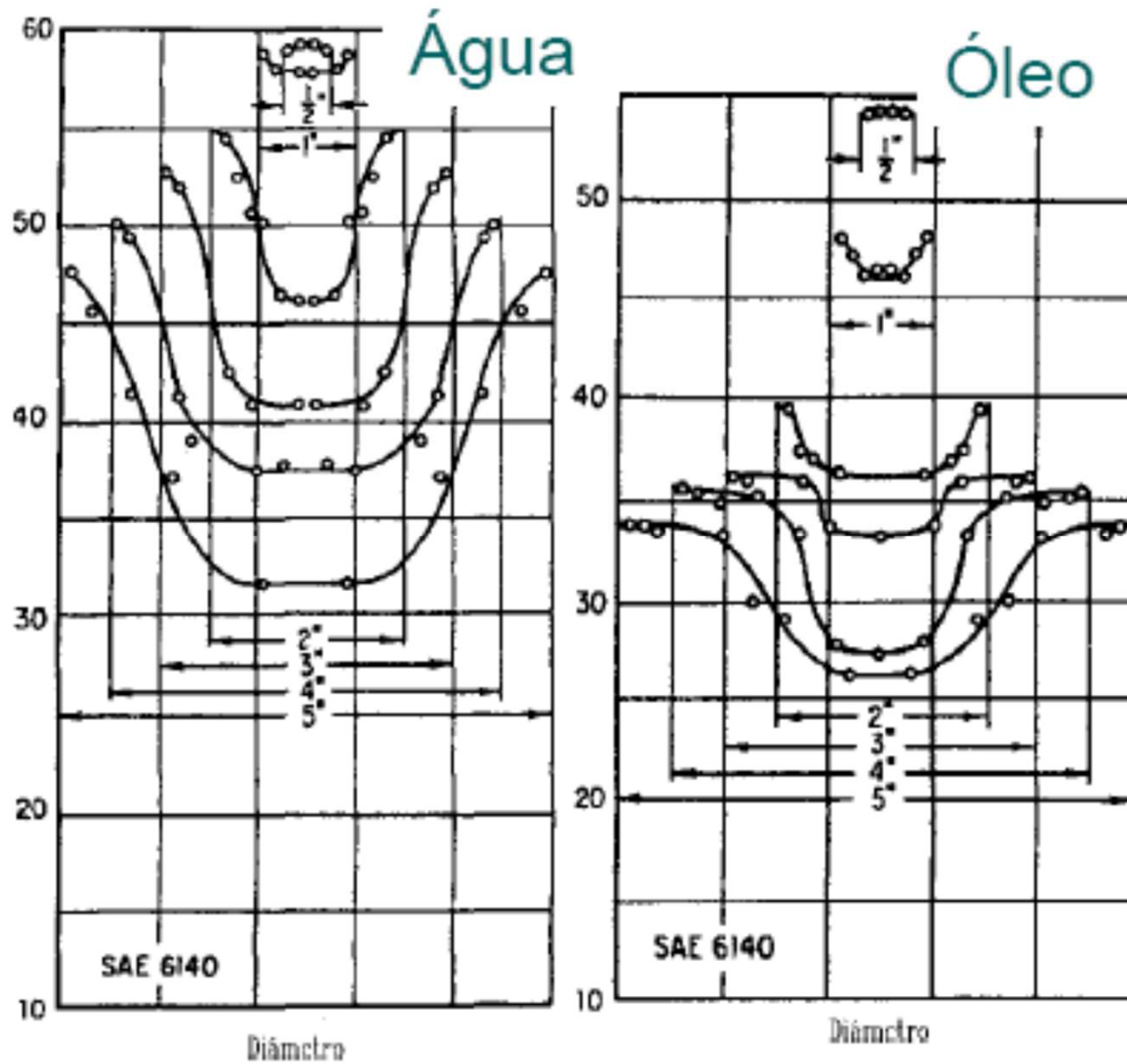


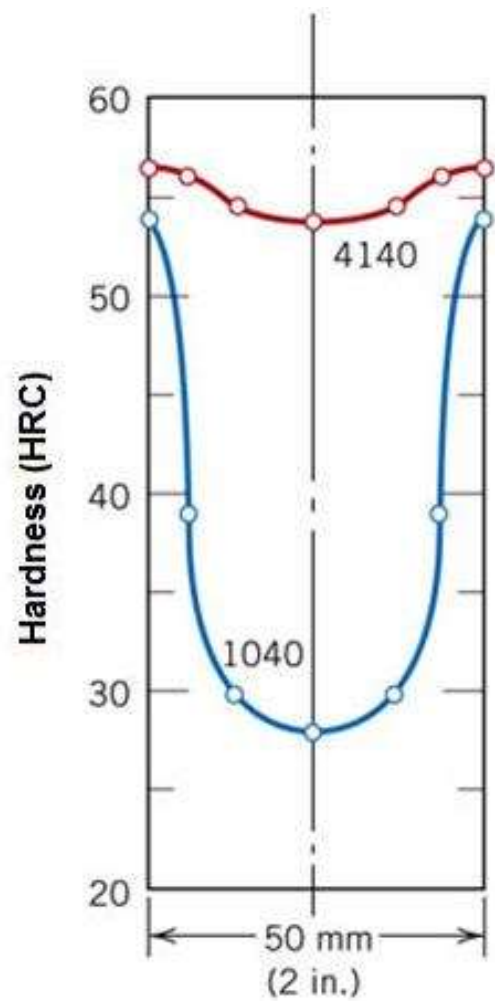
# Curvas em U

- As curvas em U são obtidas através do método de Grossman e são dependentes do meio de resfriamento e da composição química do metal (porcentagem de carbono e elementos de liga)

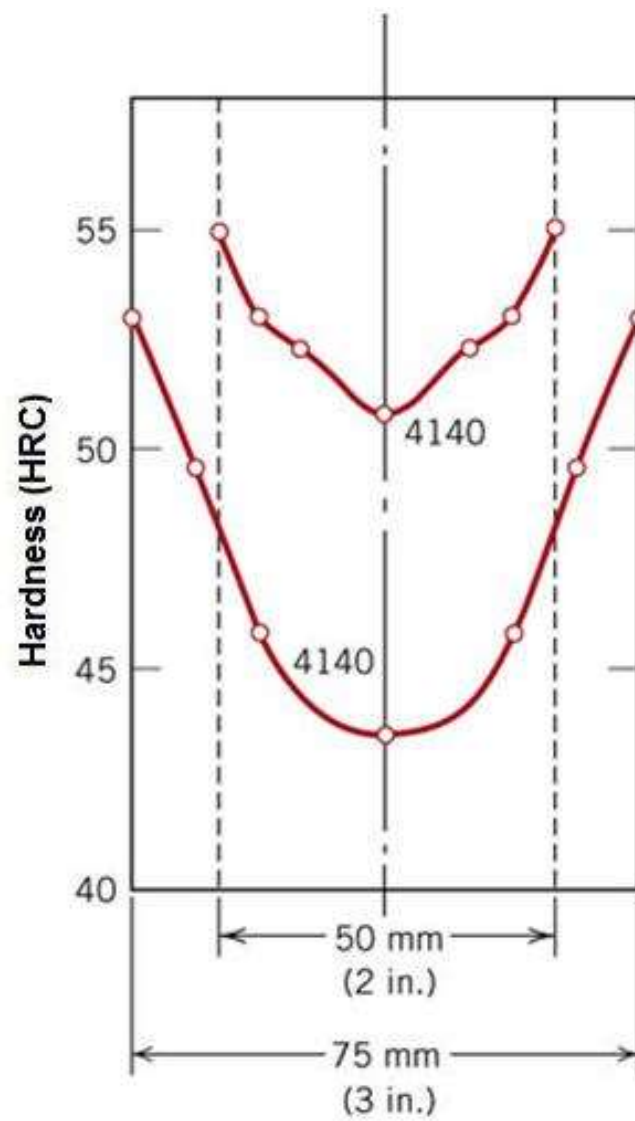


# Curvas em U





(a)



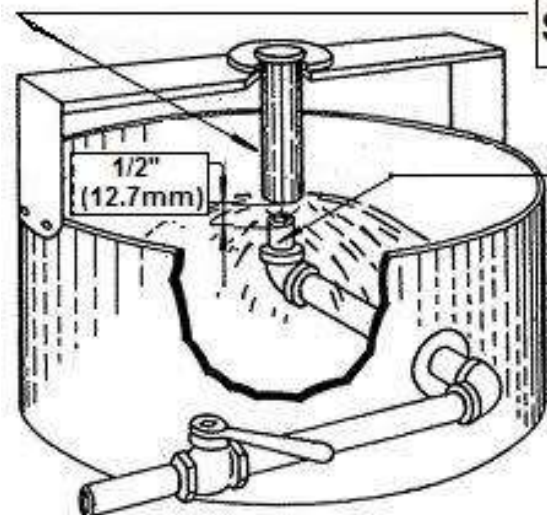
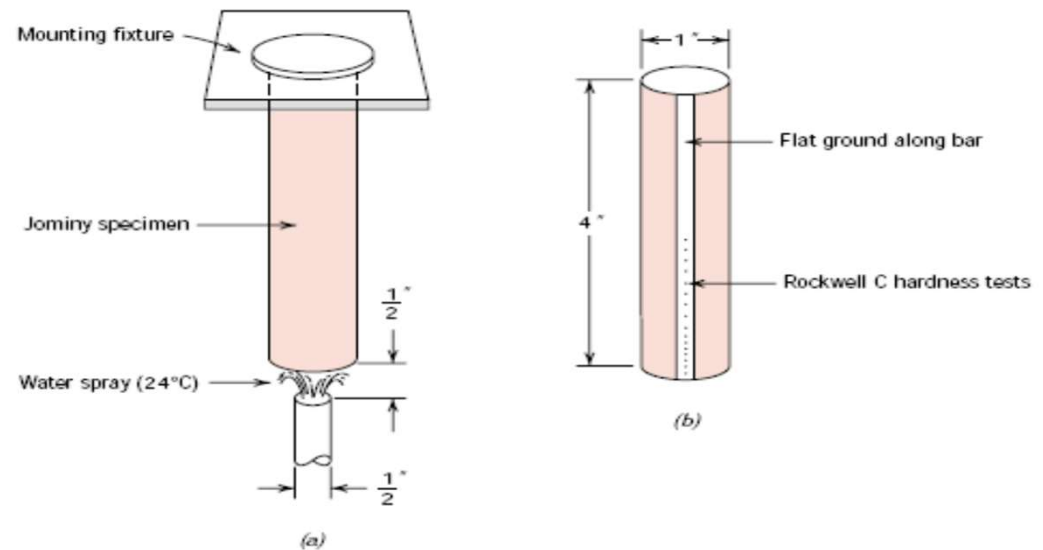
(b)



# Ensaio Jominy

- No ensaio Jominy uma corpo de prova cilíndrico de 1" de diâmetro e 4" de comprimento é austenitizado e levado ao dispositivo Jominy, onde é submetido ao efeito de um jato d'água na sua extremidade.
- Após o esfriamento, o corpo de prova é retificado e valores de dureza, a distância de 1/16" são determinados.

# Jominy test



Sample -  $\phi$  1" x 4" ( $\phi$  25.4mm x 101.6mm)

Pipe spraying water- 1/2" (12.7mm)

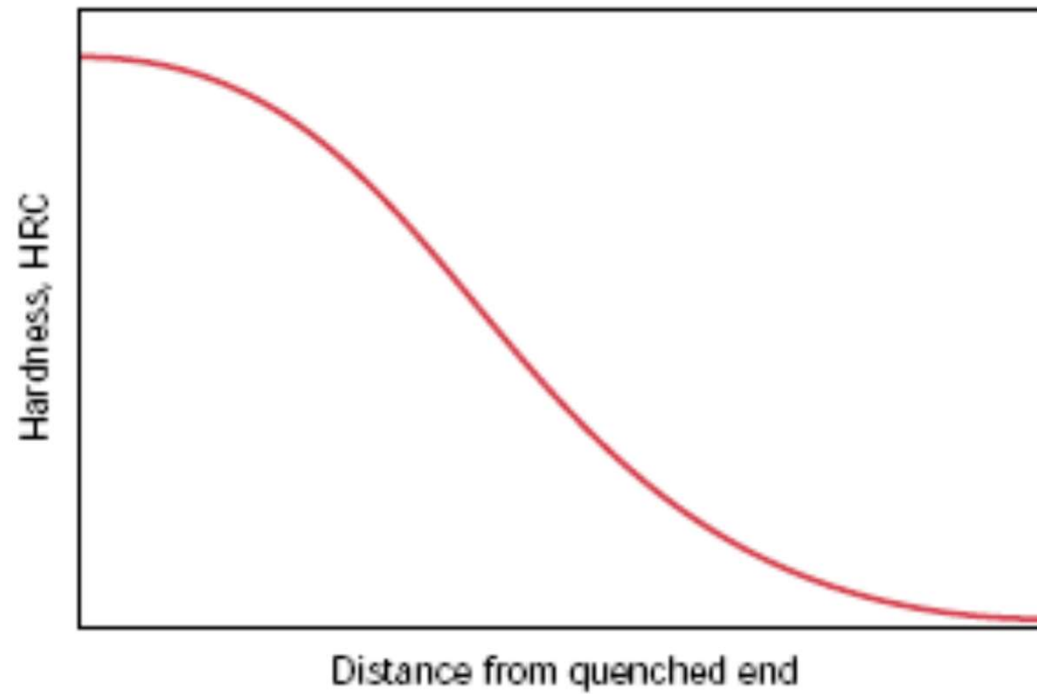


# Ensaio Jominy

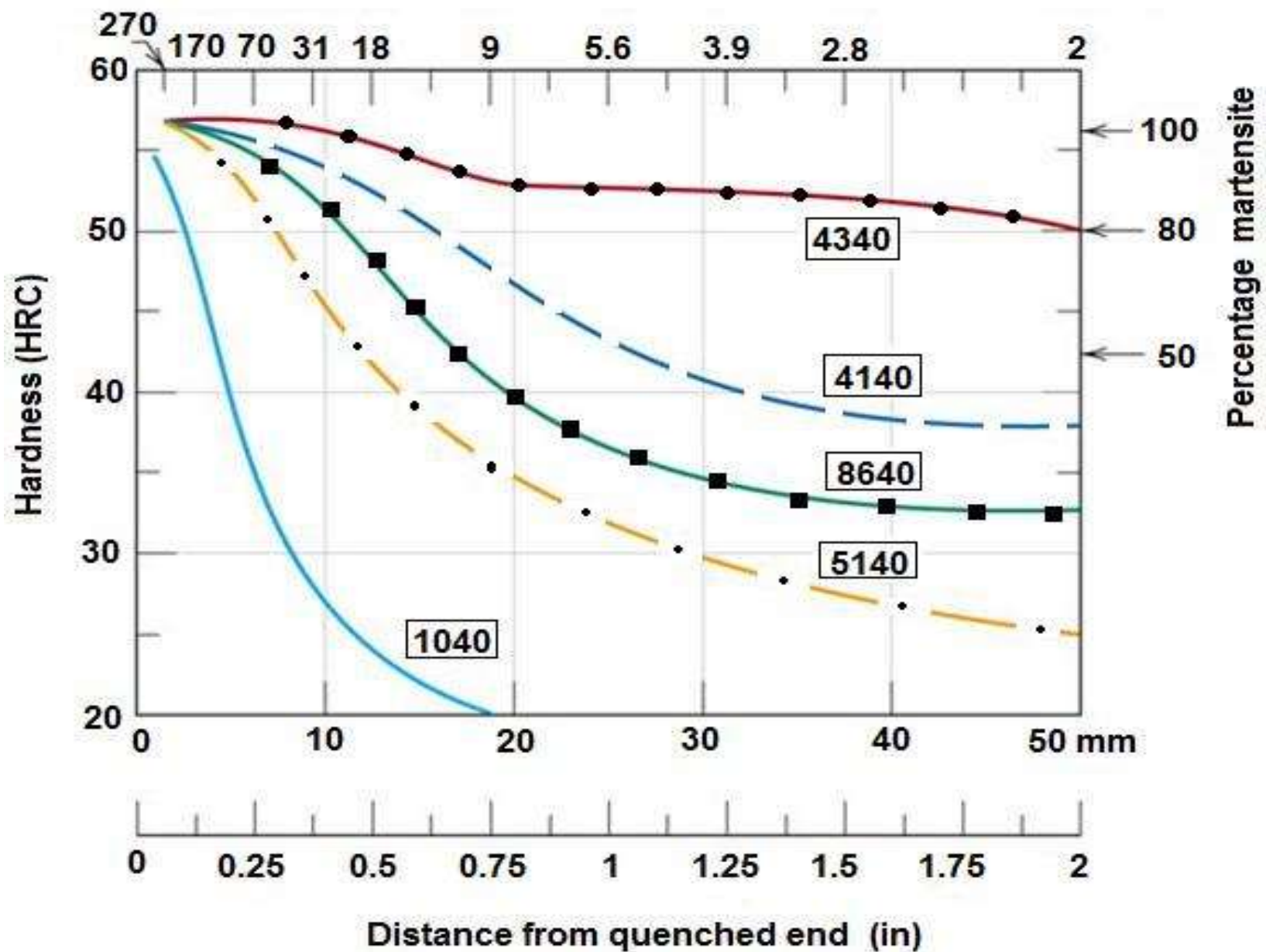
- A extremidade temperada é resfriada mais rapidamente e exibe a maior dureza; para a maioria dos aços, o produto nessa posição é 100% martensita
- A taxa de resfriamento diminui com o aumento da distância e assim há mais tempo disponível para a difusão do carbono e formação de maior proporção de perlita, mais mole.
- Dessa forma, um aço que é muito temperável irá reter grandes valores de dureza ao longo de distâncias relativamente longas



# Jominy test

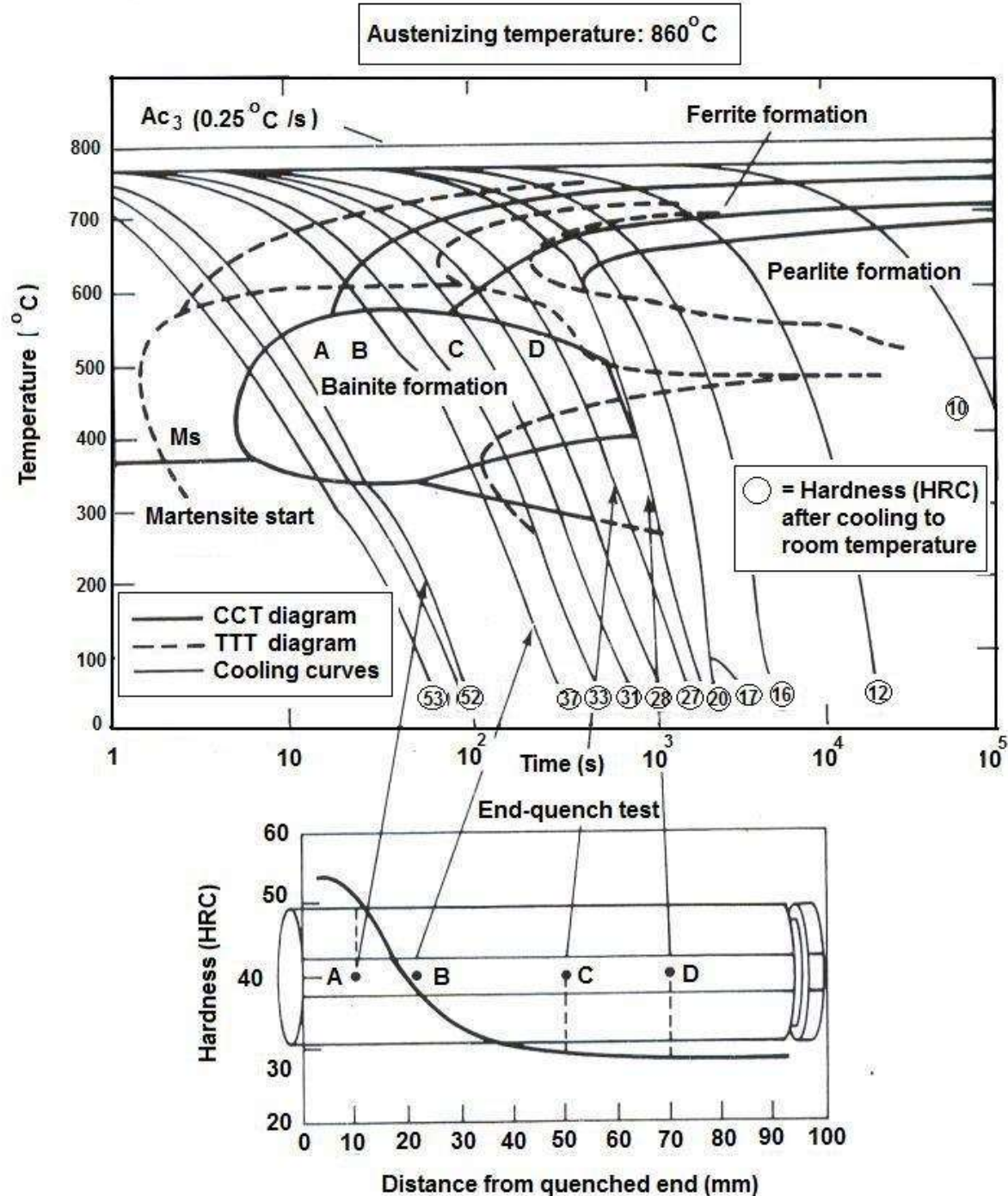


Cooling rate at 700°C (°C/s)



# Ensaio

- Pode ser usado para determinar a temperatura crítica de transformação em função da taxa de resfriamento.



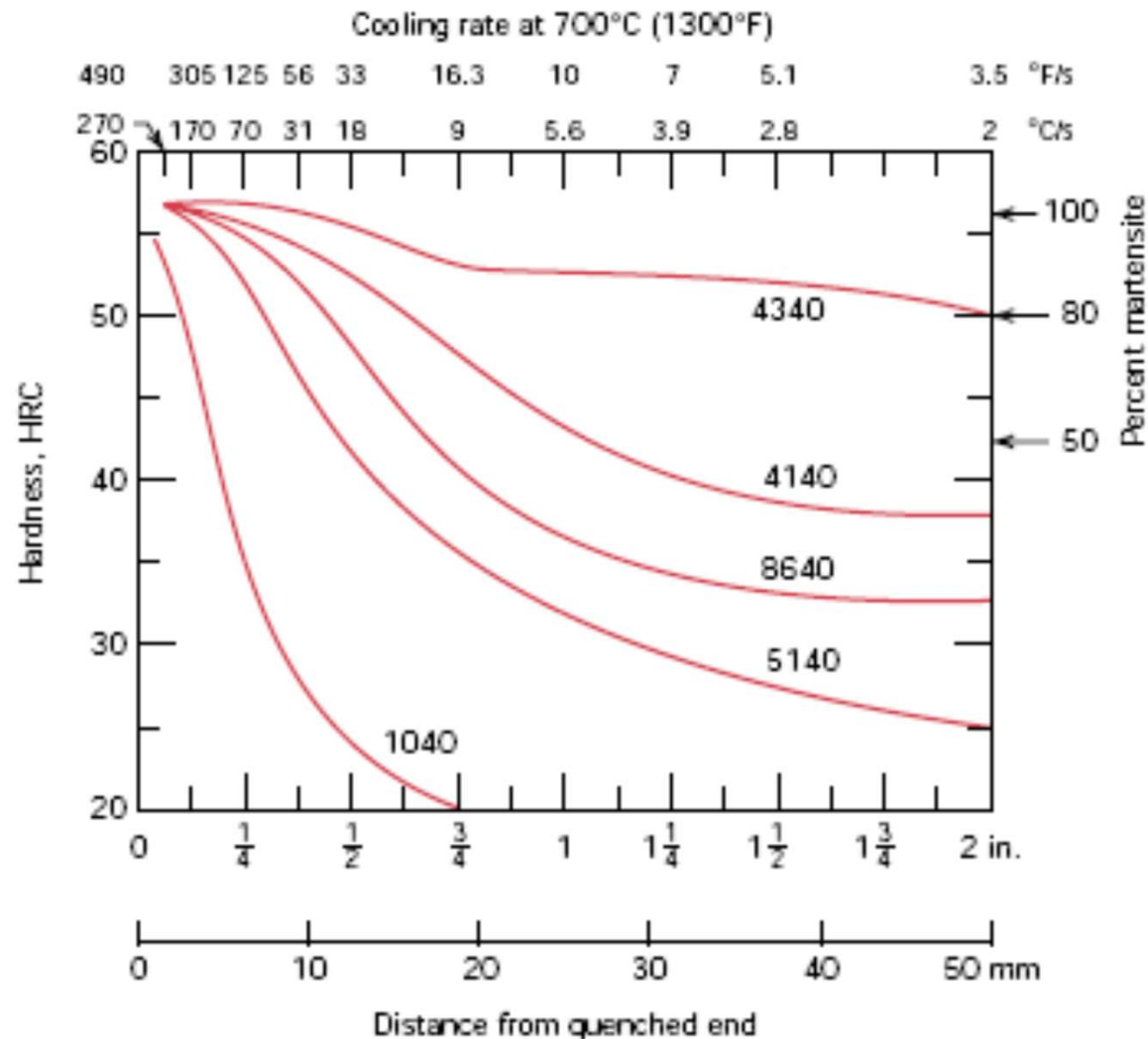
ção  
le



# Influência de elementos de liga

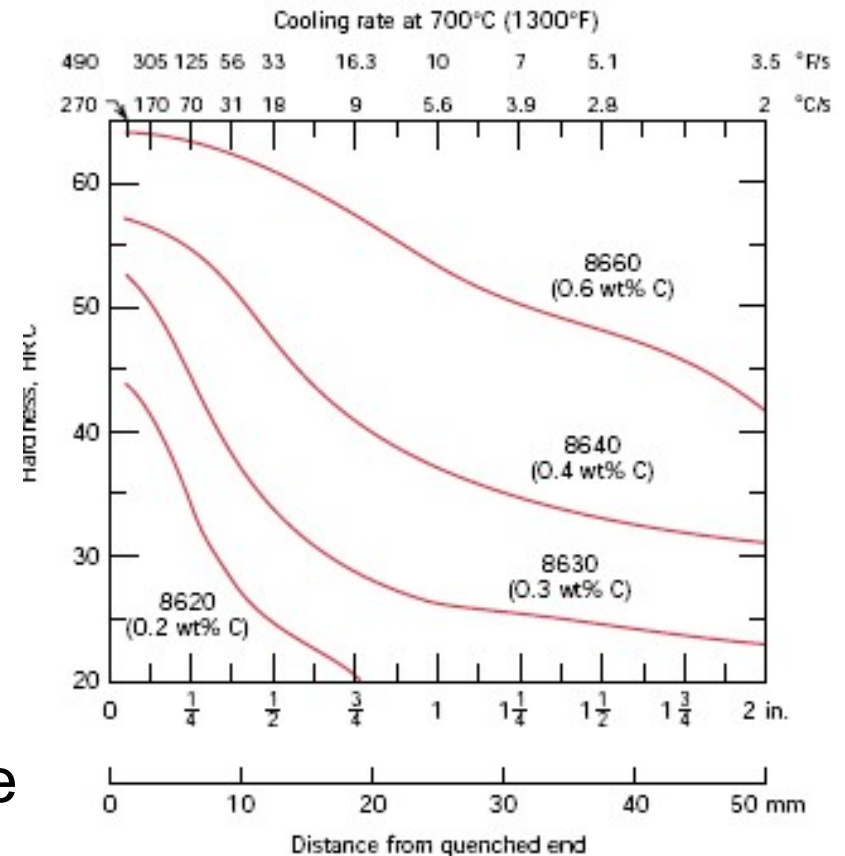
- Todas as cinco ligas possuem durezas idênticas nas extremidades temperadas; essa dureza é função exclusivamente do teor de carbono
- O aço carbono comum possui a menor temperabilidade, pois sua dureza decai de maneira brusca após uma distância Jominy relativamente curta
- Os aços-liga terão uma dureza temperada mais alta até profundidades maiores
- Os elementos de liga como níquel, cromo e molibdênio retardam as reações da austenita para perlita e/ou bainita e assim mais martensita é formada

# Influência de elementos de liga



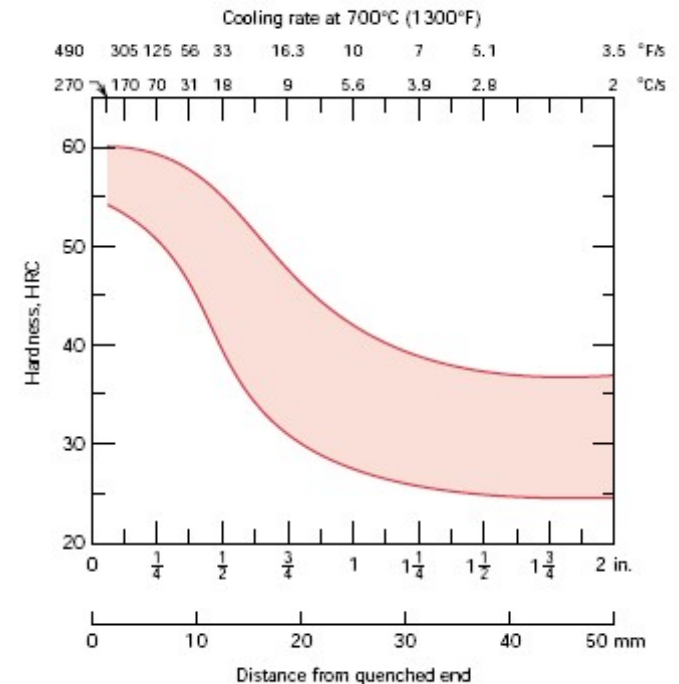
# Influência do teor de carbono

- As curvas de temperabilidade dependem também do teor de carbono
- A dureza em qualquer posição Jominy aumenta em função do aumento do teor de carbono
- Com o aumento de teor de carbono a formação de produtos de transformação (perlita, ferrita e cementita) é mais difícil



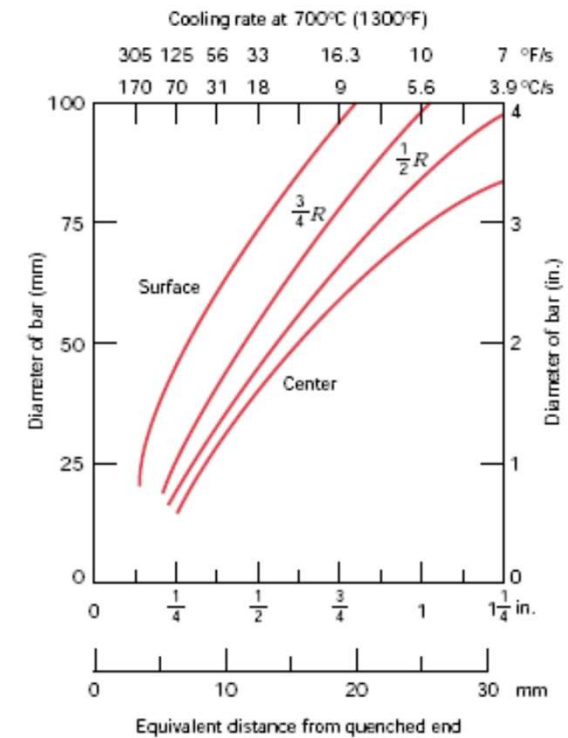
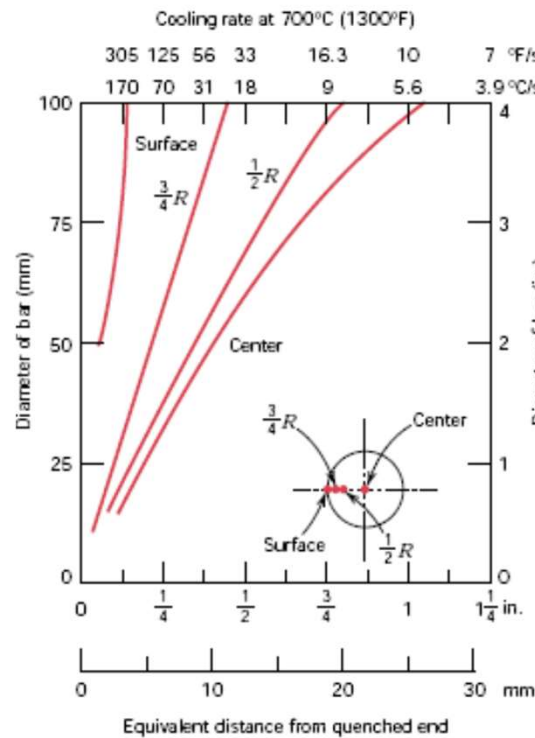
# Banda de temperabilidade

- Durante a produção industrial existe sempre uma ligeira e inevitável variação na composição e no tamanho médio do grão.
- Isso resulta em um espalhamento dos dados de medição de temperabilidade que são plotados na forma de uma banda ou faixa que representam os valores mínimos e máximos esperados para uma liga



# Relação entre os ensaios

- O diagrama ao lado apresenta uma relação entre os dois ensaios. É apresentado a taxa de resfriamento em função do diâmetro da barra para quatro pontos da seção transversal em função da distância Jominy equivalente
- Uma utilidade desse diagrama é a previsão de dureza ao longo da seção transversal de uma amostra



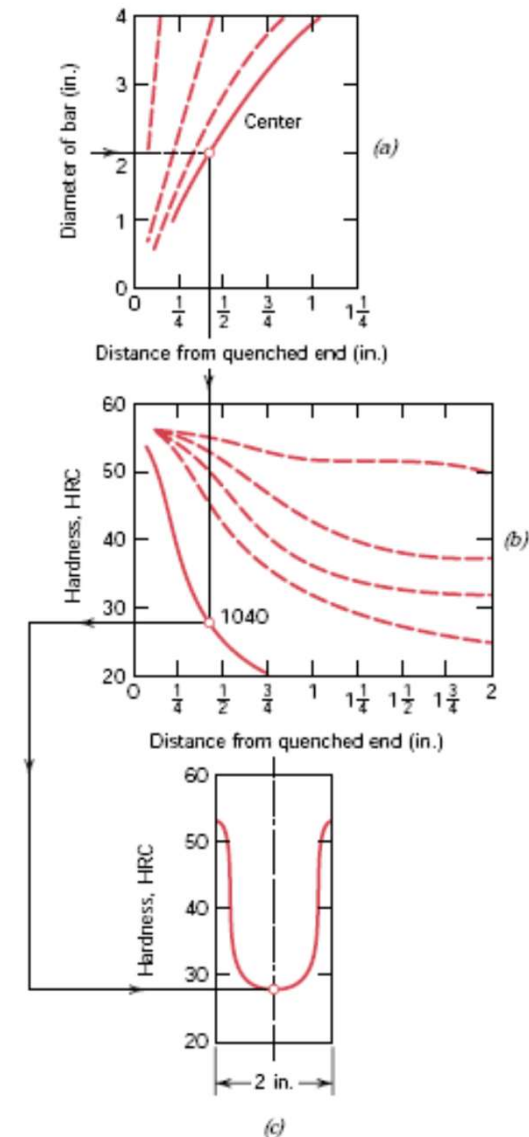


# Determinação de dureza através do Ensaio Jominy

- Através do Ensaio Jominy é possível plotar o perfil de dureza em uma curva em U
- Pode-se então determinar as durezas no centro, na superfície, na metade do raio e a  $\frac{3}{4}$  do raio

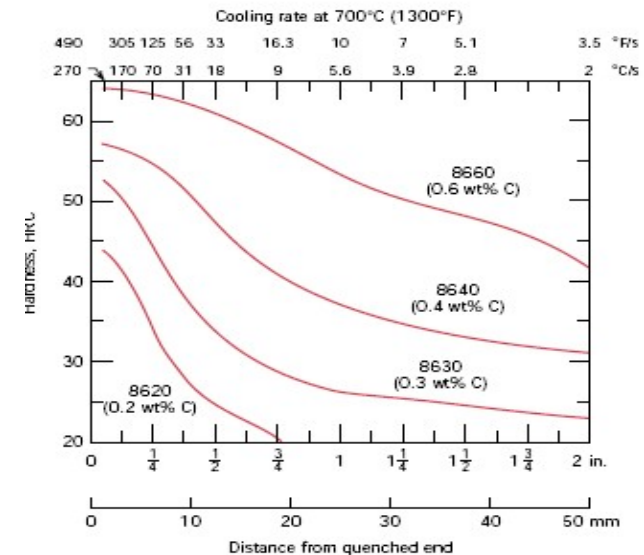
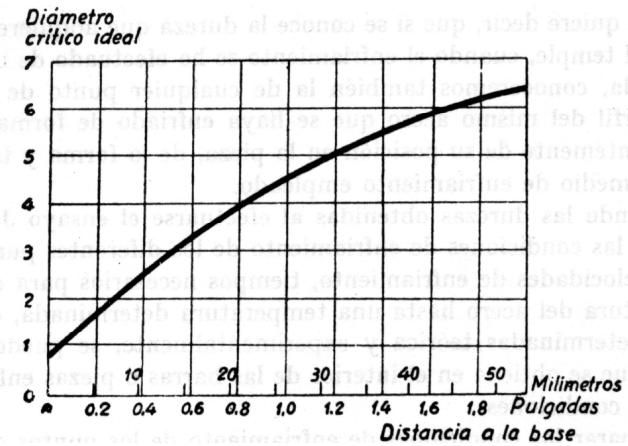
Nesse caso:

- Centro = 28HRC
- Metade do raio = 30 HRC
- $\frac{3}{4}$  do raio = 39 HRC
- Superfície = 54 HRC



# Determinação do diâmetro crítico pelo ensaio Jominy

- É possível se obter o diâmetro crítico ideal a partir de um ensaio Jominy.
- Por exemplo um aço 8640 que apresente dureza de 50HRC, na curva Jominy apresenta distância Jominy equivalente de  $\frac{1}{2}$ ". Pegando esse valor e analisando a curva em que o meio de têmpera é ideal encontra-se um valor de diâmetro crítico de 3".



# Severidade de Têmpera

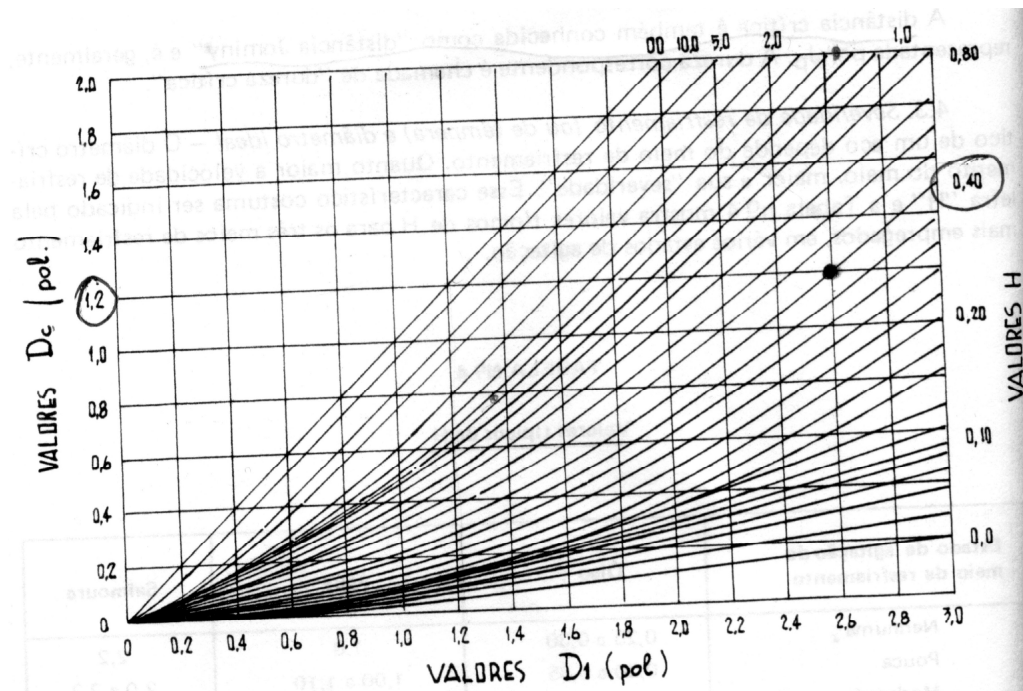
- O diâmetro crítico de um aço depende do meio de resfriamento. Quanto maior a velocidade de resfriamento, maior a sua severidade. Essa característica costuma ser indicada pela letra “H”.
- Para que se pudesse comparar aços diferentes, quanto à temperabilidade seria necessário associar os diâmetros críticos a um certo H

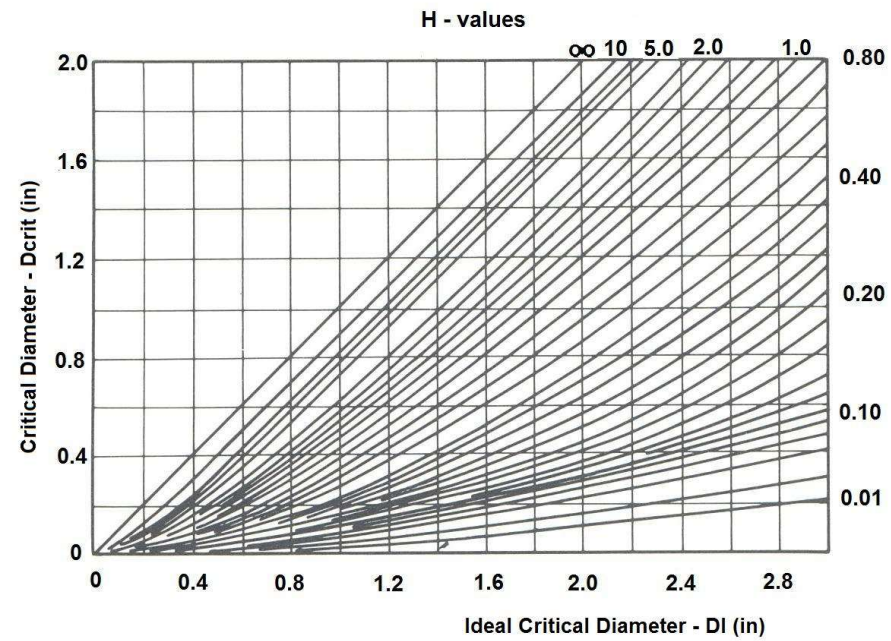
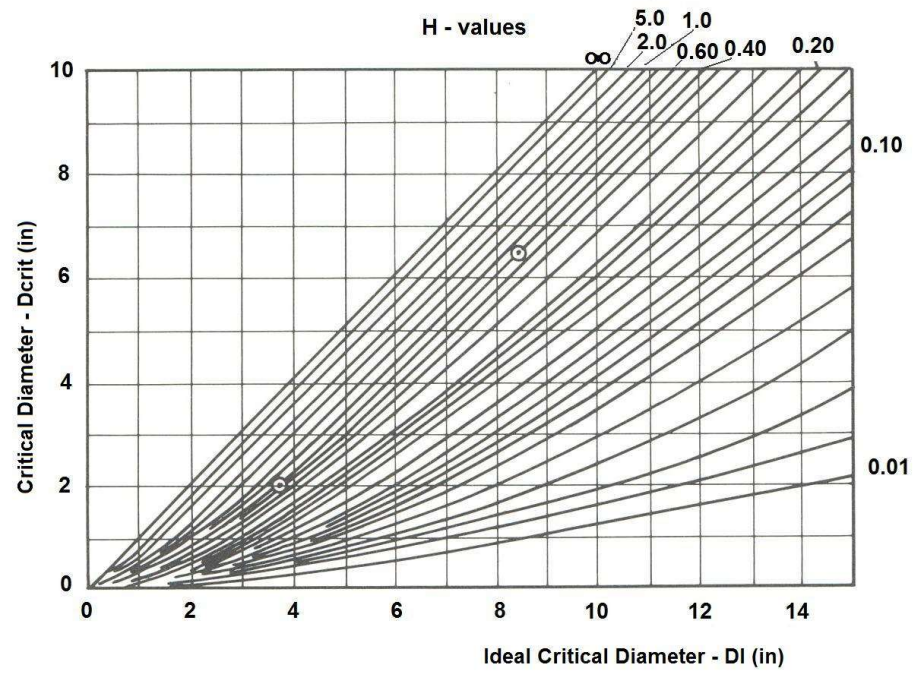
Valores típicos de H

Estado de agitação do meio de resfriamento	Óleo	Água	Salmoura
Nenhuma	0,25 a 0,30	1,0	2,2
Pouca	0,30 a 0,35	1,00 a 1,10	2,0 a 2,2
Moderada	0,35 a 0,40	1,20 a 1,30	—
Boa	0,40 a 0,50	1,40 a 1,50	—
Forte	0,50 a 0,80	1,60 a 2,00	—
Violenta	0,80 a 1,10	4,0	5,0

# Diâmetro Crítico Ideal

- O diâmetro crítico obtido por um meio de resfriamento hipotético com capacidade infinita de extração de calor ( $H=\infty$ )
- Pode-se definir a temperabilidade de um aço por meio de um valor numérico. É uma medida de previsão de diâmetro de uma barra redonda que endurecerá em qualquer meio
- Por exemplo, um aço com diâmetro crítico 1,2 esfriado em um meio com  $H=4$  possui diâmetro crítico ideal = 2,6





Effect of  $\gamma$   
grain size and  
%C on  $D_I$

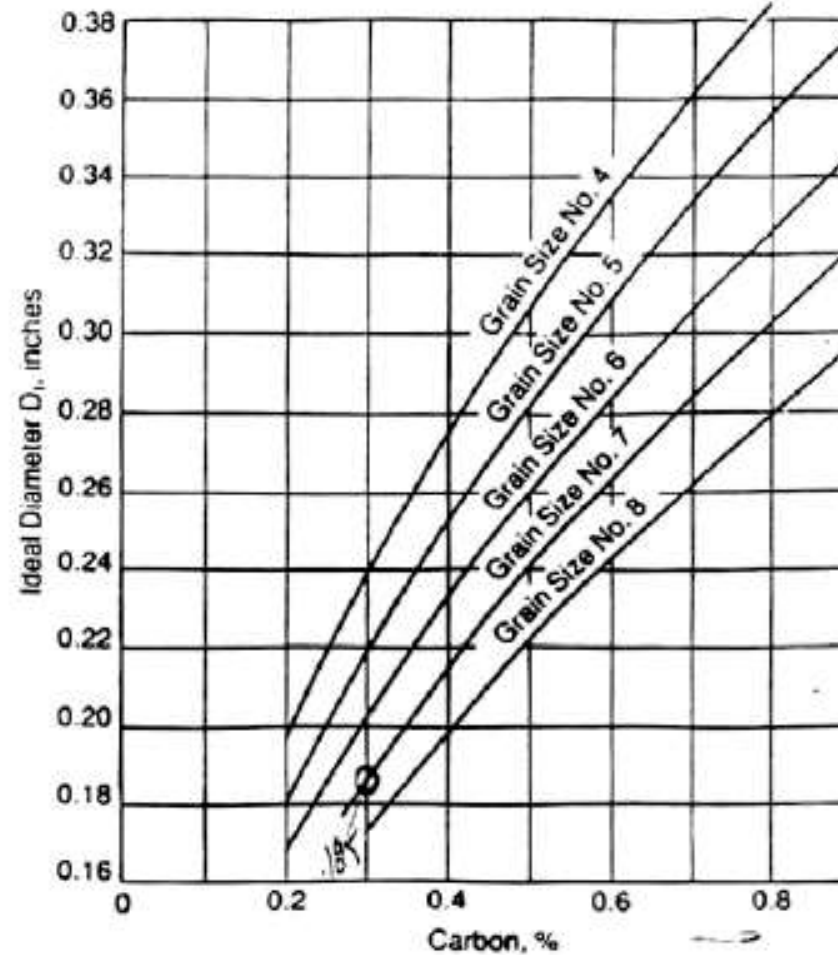
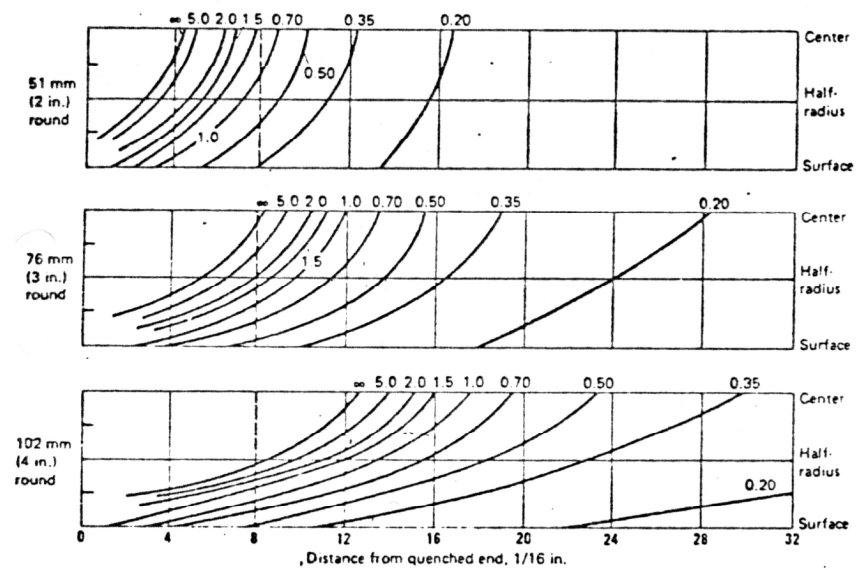
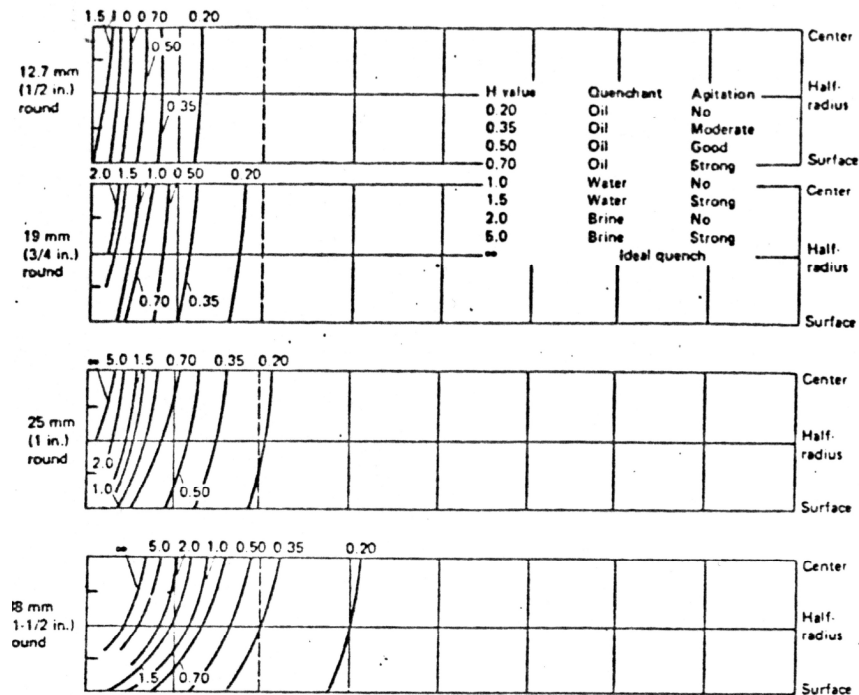
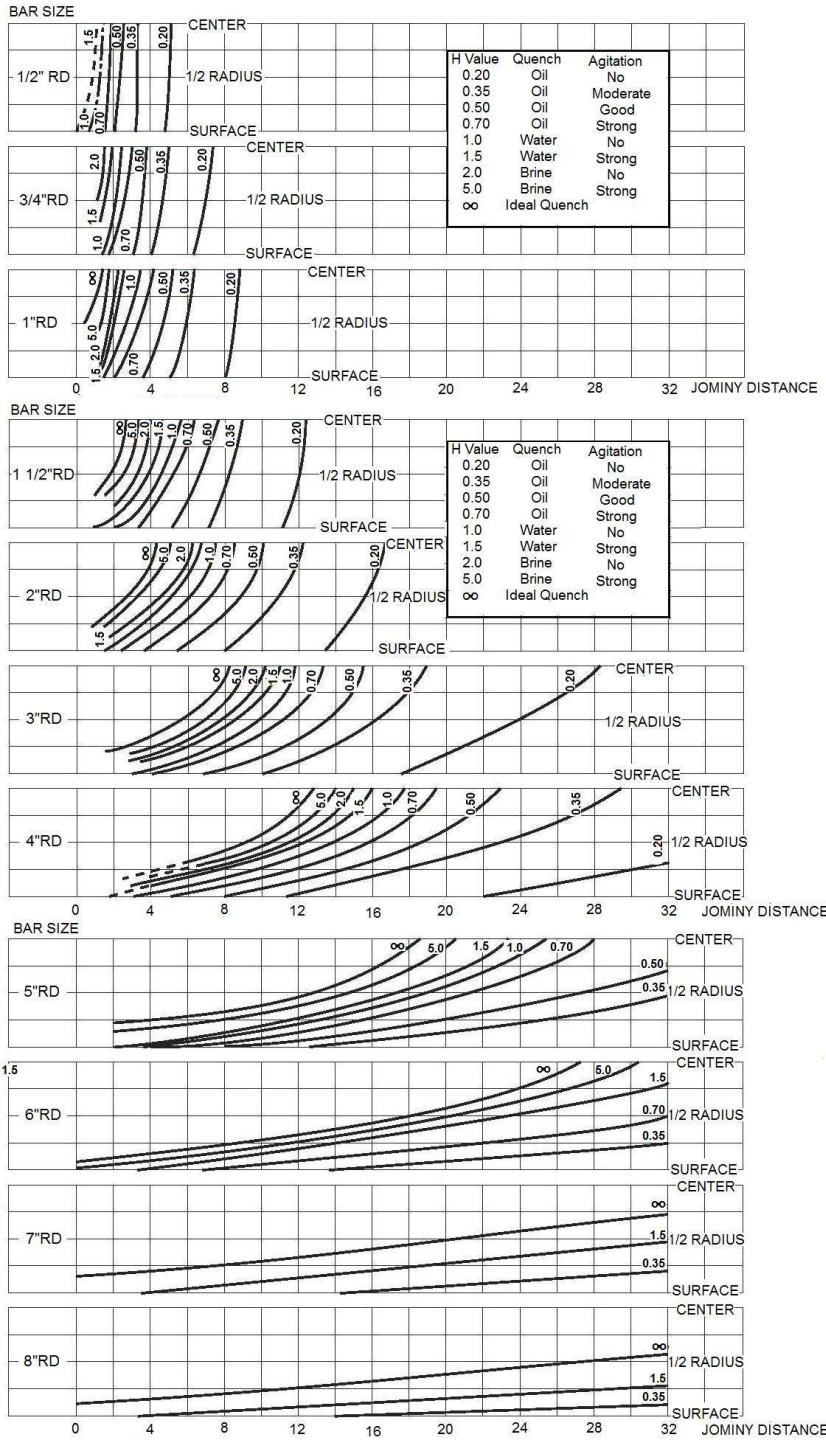


Figure 4-4 Smith

# Curvas de correlação

**Fig. 17 Correlation of  $J_{\text{eq}}$ , equivalent hardness positions in end-quench hardenability specimen and various locations in round bars quenched in oil, water and brine**

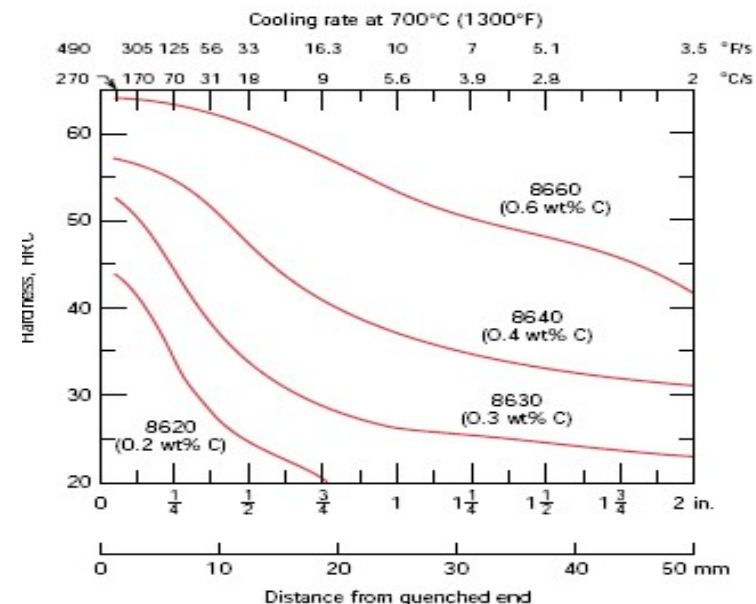
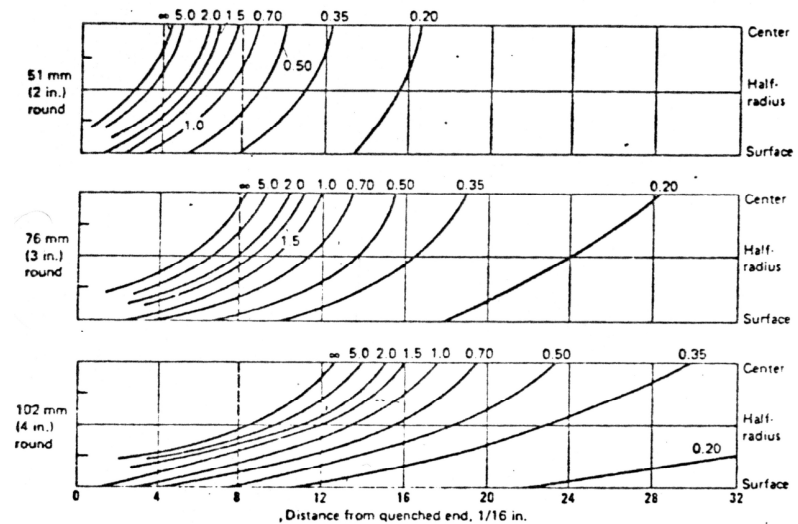






# Exemplo

- Através das curvas de correlação pode-se determinar a severidade de têmpera e assim o meio de têmpera que deve ser empregado.
- Por exemplo, se pegarmos uma barra de 2" de um aço 8640 e desejarmos uma dureza de 50HRC no centro tem-se  $\frac{1}{2}$ " de distância jominy ou  $\frac{8}{16}$ . Da curva de correlação tem-se que para no centro tenha-se  $\frac{8}{16}$  de distância Jominy a severidade de têmpera deve ser 1,0 (água sem agitação)



# Meios de Têmpera

- Para controle da taxa de resfriamento de modo a temperar o aço, utiliza-se diferentes meios de têmpera, com diferentes capacidades de extração de calor
- Quanto mais rápido for o meio de resfriamento menor será a temperabilidade necessária, entretanto altas velocidades de resfriamento estão associados a severos choques térmicos

Diâmetro	Temperatura			Tempo Aproximado
	Núcleo	Superfície	Diferença	
20 mm	240° C	200° C	40° C	50 seg
40 mm	280° C	200° C	80° C	80 seg
80 mm	410° C	200° C	210° C	115 seg
160 mm	590° C	200° C	390° C	180 seg

## ■ Óleo

Diâmetro	Temperatura			Tempo Aproximado
	Núcleo	Superfície	Diferença	
20 mm	275° C	200° C	75° C	13 seg
40 mm	390° C	200° C	190° C	16 seg
80 mm	600° C	200° C	400° C	18 seg
160 mm	740° C	200° C	540° C	20 seg

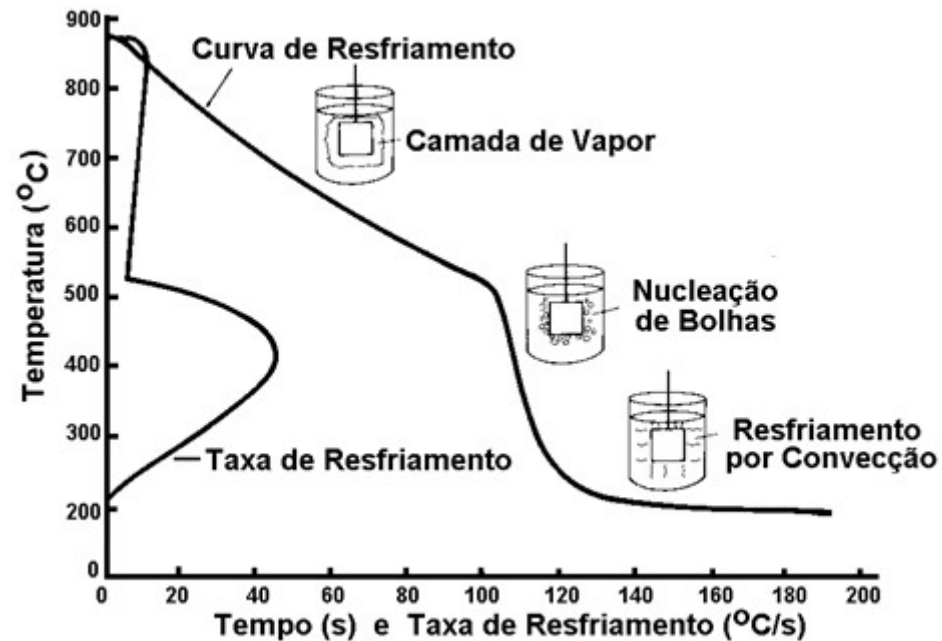
## ■ Água fortemente agitada



# Estágios de Resfriamento

- A temperatura em um meio líquido pode ocorrer em três estágios:
- 1º Estágio: quando o aço é introduzido forma-se uma camada de vapor que rodeia o metal e o resfriamento se faz por condução e radiação através da camada gasosa
- 2º Estágio: A película de vapor vai desaparecendo e dando lugar à formação e desprendimento de bolhas
- 3º Estágio: resfriamento se dá por condução e convecção. Durante este estágio ocorre a transformação martensítica

# Estágios de Resfriamento



$100 - 200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$10.000 - 20.000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$700 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$



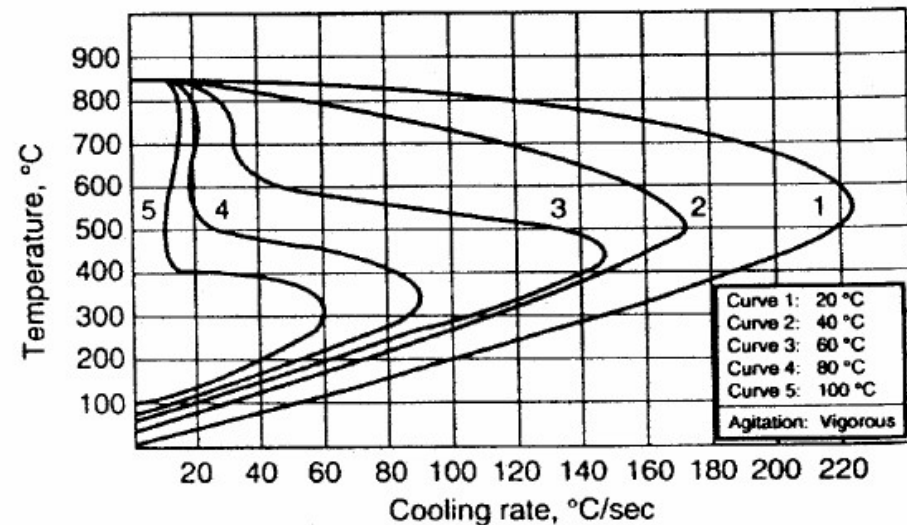
## Meios de Têmpera mais empregados

Os meios de têmpera mais utilizados são

- Água
- Salmoura
- Óleo
- Ar
- Solução de polímeros
- Soda cáustica

# Têmpera em água

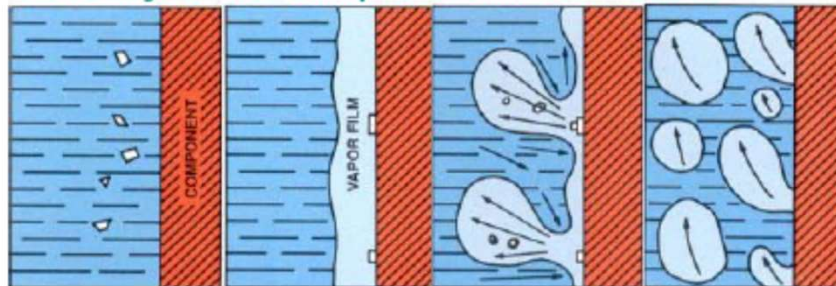
- A água atinge a máxima taxa de resfriamento e é usada quando não resulta em excessiva distorção ou trinca da peça
- Utilizada para o resfriamento de metais não ferrosos, aços inoxidáveis austeníticos
- Os valores mais elevados de dureza são obtidos com temperatura de 15° C a 25°C, pois acima dessa temperatura há o favorecimento de formação de estruturas mais moles pelo prolongamento do 1º estágio



# Têmpera em salmoura

- O termo salmoura refere-se à solução aquosa contendo diferentes quantidades de cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de cálcio (CaCl). As concentrações de NaCl variam entre 2 à 25%, entretanto, utiliza-se como referência a solução contendo 10% de NaCl.
- As taxas de resfriamento da salmoura são superiores às obtidas em água pura para a mesma agitação. A justificativa é que, durante os primeiros instantes da têmpera, a água evapora com contato com a superfície metálica e pequenos cristais de NaCl depositam-se nesta. Com o aumento da temperatura, ocorre a fragmentação destes cristais, gerando turbulência e destruindo a camada de vapor

Evolução da têmpera em salmoura





# Têmpera em salmoura

Principais vantagens:

- Taxa de resfriamento maior que da água
- Temperatura de têmpera menos crítica
- Resfriamento mais uniforme, ocasionando menor distorção das peças

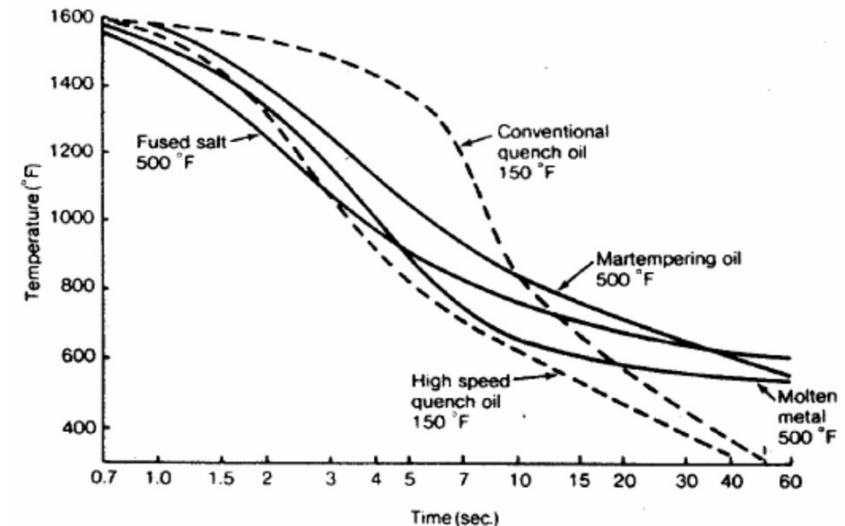
Desvantagens:

- Controle das soluções
- Custo mais alto
- Natureza corrosiva da solução



# Têmpera em óleo

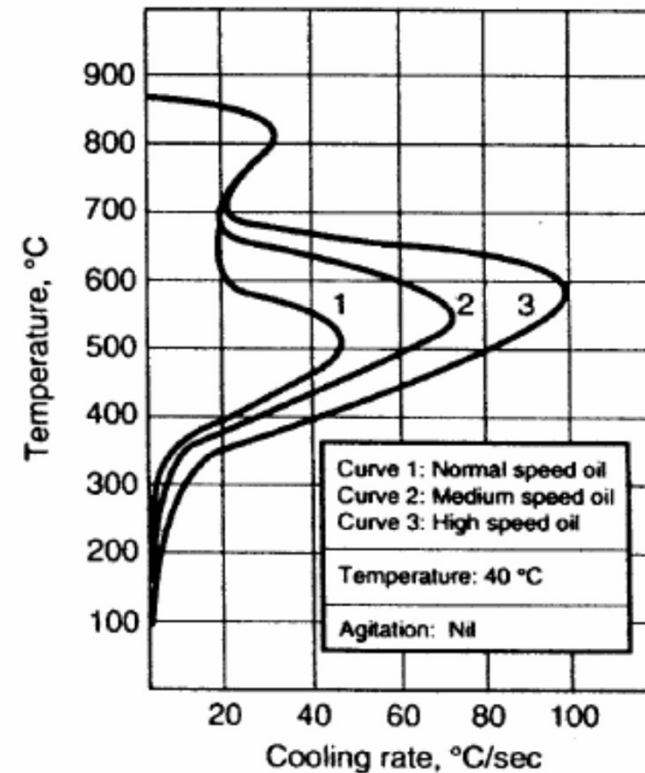
- Os óleos de têmpera podem ser divididos em vários grupos baseado na composição, efeito de resfriamento e temperatura
- Óleos convencionais – sem adição de aditivos
- Óleos rápidos – mistura de óleos minerais, contém aditivos que fornecem efeitos de têmpera mais rápidos
- Óleos de martêmpera – altos efeitos de têmpera devido à aditivos aceleradores de velocidade
- Óleos solúveis – normalmente utilizados como fluidos refrigerantes, mas em concentrações de 3 a 15 % são utilizados em têmpera com efeitos similares à água



Comparação das taxas de resfriamento obtidas em diferentes meios de têmpera.

# Têmpera em óleo - Considerações

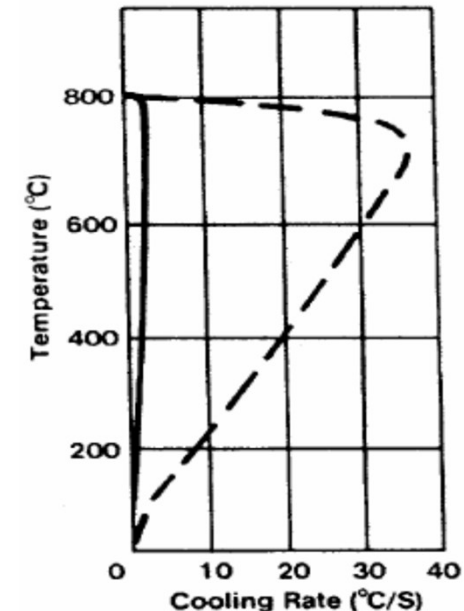
- A maior parte dos óleos de têmpera apresentam taxas de resfriamento menores que as obtidas em água ou em salmoura, entretanto, nestes meios o calor é removido de modo mais uniforme, diminuindo as distorções dimensionais e a ocorrência de trincas
- Os óleos são normalmente usados na faixa de temperatura de 40 a 95° C
- Temperaturas mais altas causam envelhecimento
- Temperaturas mais baixas causam distorção na peça pelo efeito de têmpera mais rápido e perigo de fogo pela alta viscosidade



Taxas de resfriamento em óleos de têmpera

# Têmpera em ar

- Como a água, o ar é um meio de têmpera antigo, comum e barato.
- A aplicação do ar forçado como meio de têmpera é mais comum em aços de alta temperabilidade como aços-liga e aços-ferramenta. Aços carbono não apresentam temperabilidade suficiente e, conseqüentemente, os valores de dureza após a têmpera ao ar são inferiores aos obtidos em óleo, água ou salmoura.
- Como qualquer outro meio de têmpera, suas taxas de transferência de calor dependem da vazão.





# Têmpera em solução de polímeros

- Essas soluções são utilizadas como meio intermediário entre água e óleo
- Isto porque a água se torna inadequada algumas vezes devido à formação de trincas enquanto que o óleo possui capacidade de extração de calor relativamente baixa
- Com a seleção de um polímero básico, através do controle de sua concentração e do procedimento de têmpera é possível cobrir toda uma faixa intermediária entre óleo e água com tão pequenos incrementos quanto se queira



# Têmpera em soda cáustica

- Soluções aquosas de soda cáustica são também utilizadas em 5 a 10% de concentração
- O desempenho é similar ao das soluções de salmoura, porém não apresenta comportamento corrosivo
- Essas soluções são utilizadas para processos de grande produção enquanto que a salmoura é adequada para aplicações pequenas de têmpera em ferramentas