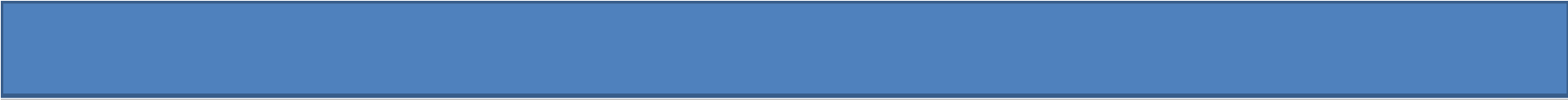


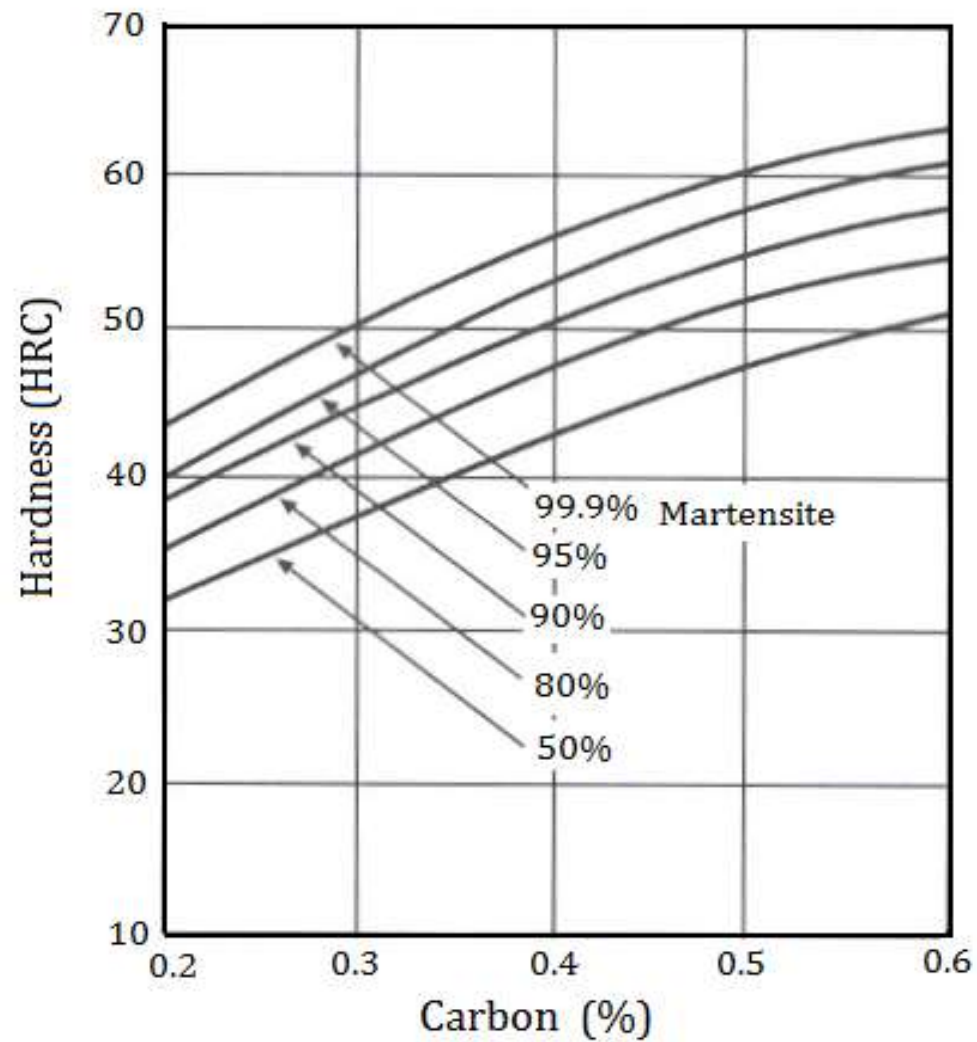



# TEMPERABILIDADE

Profa.Dra. Lauralice Canale

- 
- Para velocidades maiores do que a crítica, a dureza da têmpera depende principalmente do teor de C dissolvido na austenita.
  - Para velocidades menores do a crítica, a % de martensita é reduzida, levando a uma diminuição da dureza

# % Martensita X Durezza

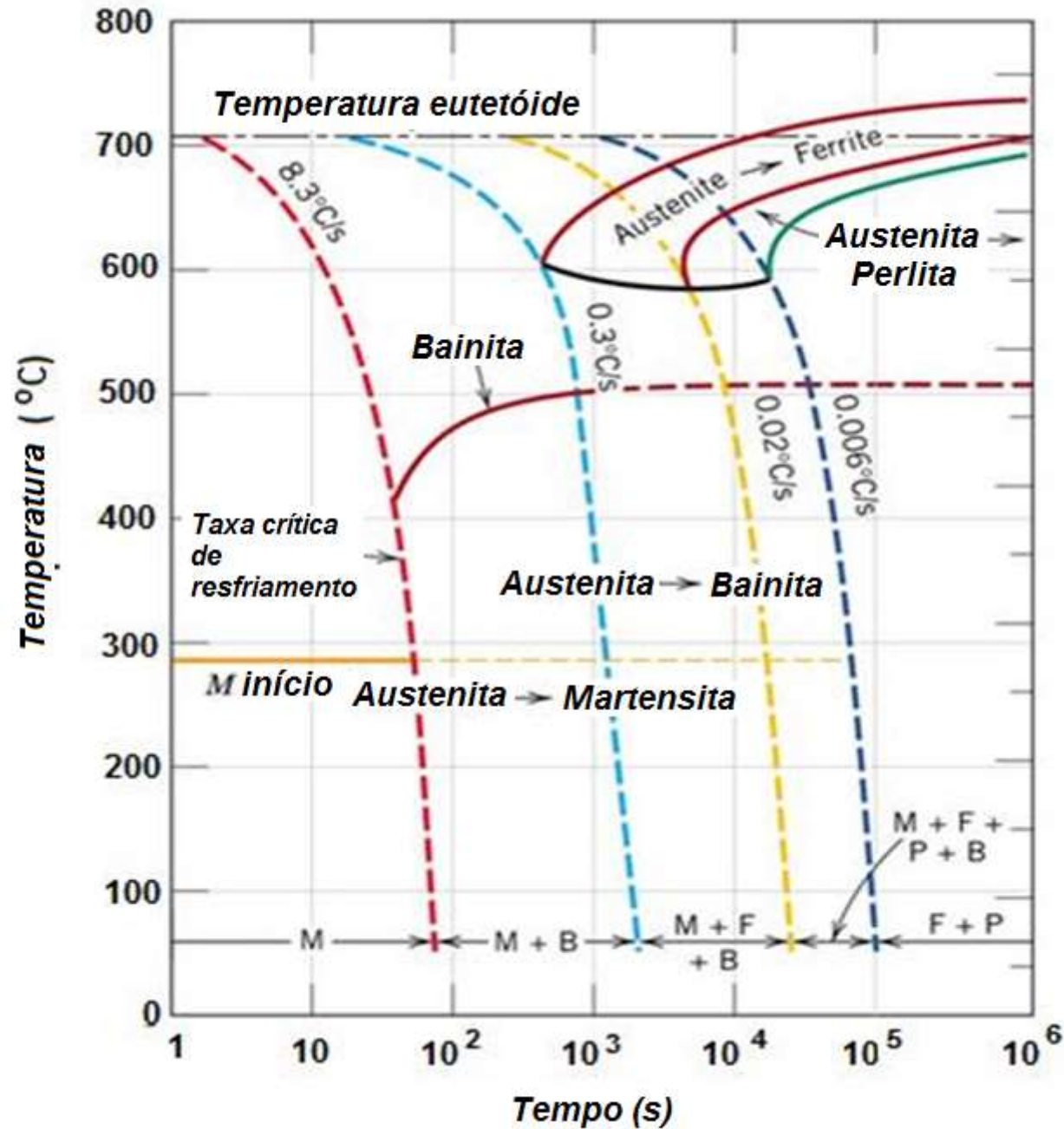


- 
- Se o C permanecer como carboneto após a austenitização, ele não toma parte da reação martensítica e não influencia a dureza da martensita .

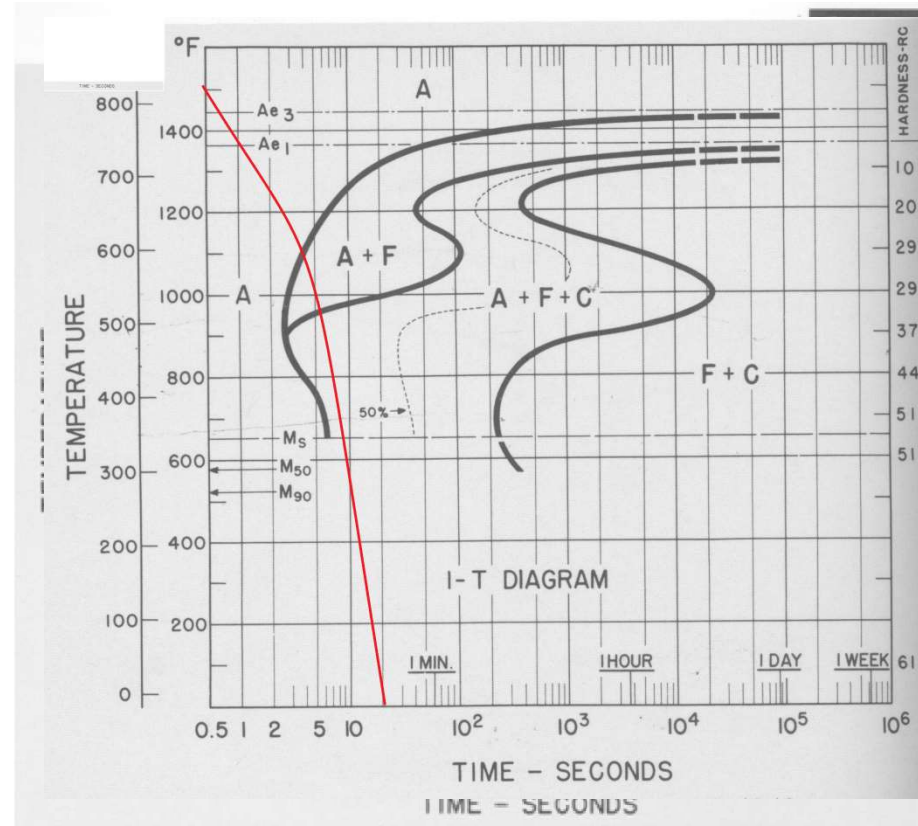
# Temperabilidade

- 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
- Enquanto a dureza da superfície é primariamente dependente do teor de carbono e taxa de resfriamento, a profundidade , na qual um certo nível de dureza é mantido para uma dada condição de resfriamento, é função da sua temperabilidade.

- Confeção a frio para diminuir o tempo de levar



A dureza também diminui se as taxas permanecerem as mesmas mas se as curvas se deslocarem pra esquerda.



# TEMPERABILIDADE

- Elementos de liga como carbono, manganês, cromo e molibdênio são elementos efetivos em aumentar a temperabilidade do aço.
- S forma MnS
- Co aumenta taxa de nucleação e crescimento da perlita
- Ti forma TiC (homogeneidade da austenita)



# TEMPERABILIDADE

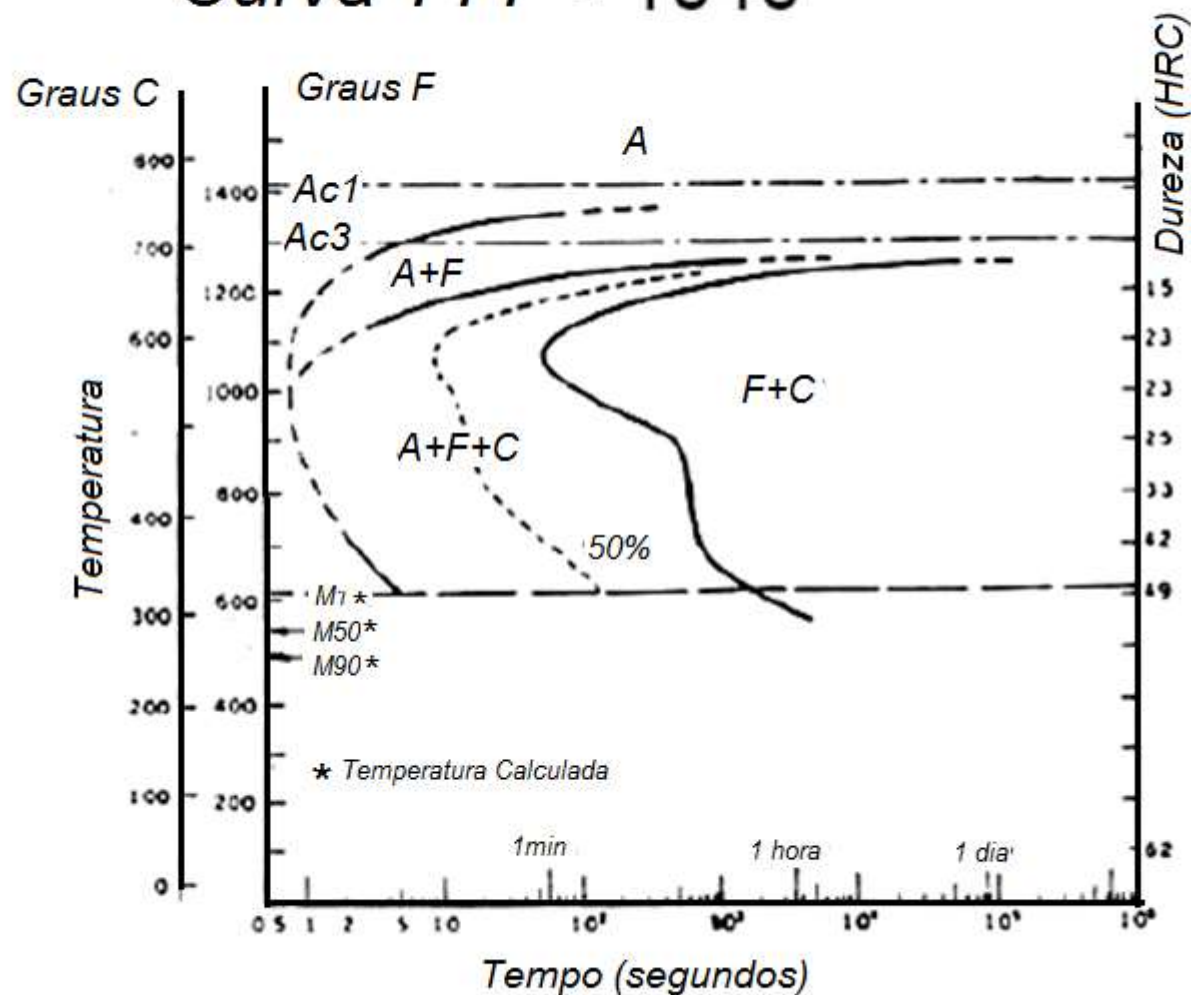
- A presença desses elementos causa um retardo nas transformações por difusão o que praticamente significa que as curvas CCT se deslocam para a direita.
- Isso reduz a taxa crítica para a obtenção da martensita.

# TEMPERABILIDADE

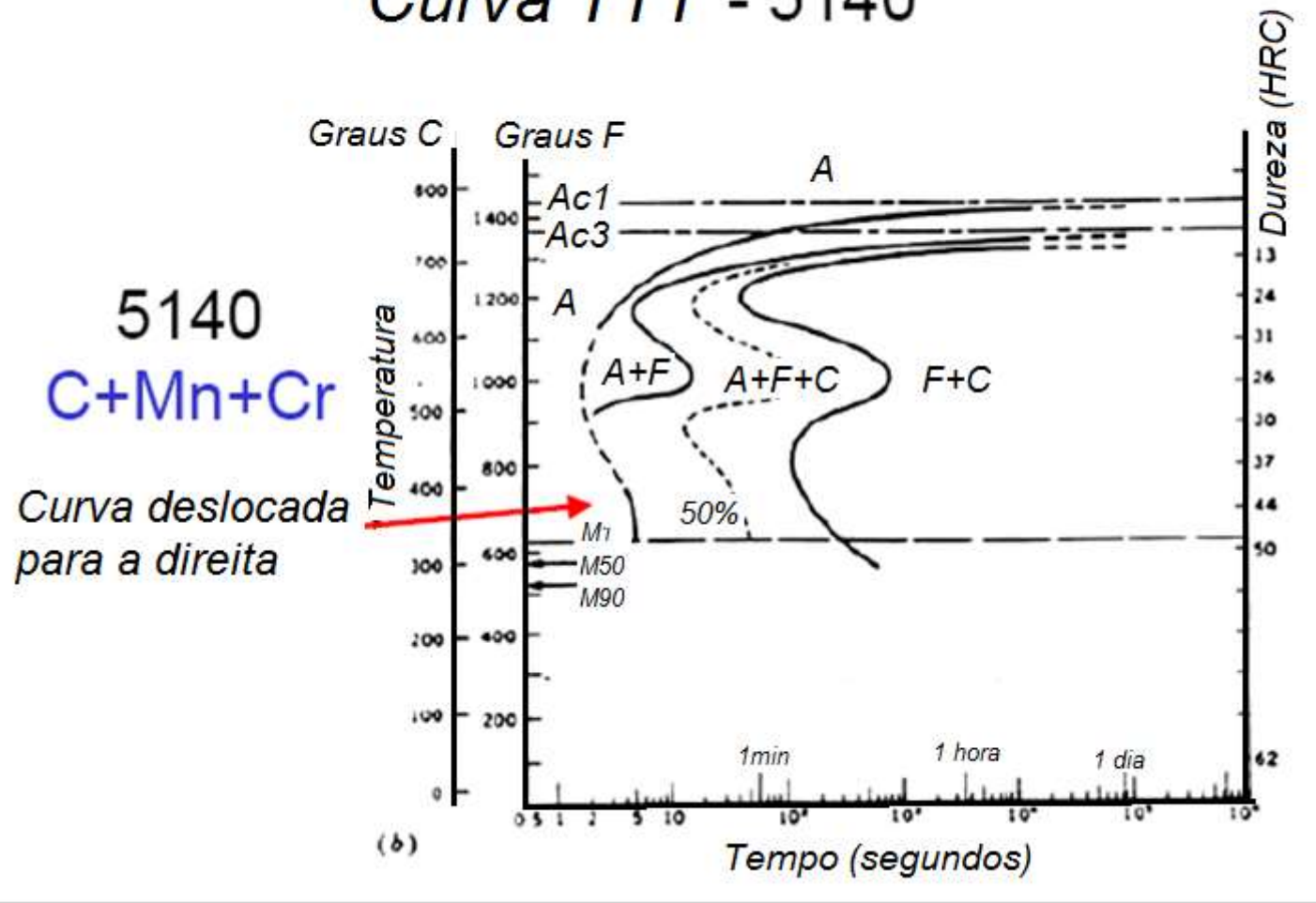
- Neste sentido, a medida que a temperabilidade aumenta, diminui-se a taxa crítica necessária para a transformação completa de austenita em martensita.

# Curva TTT - 1040

1040  
C+Mn

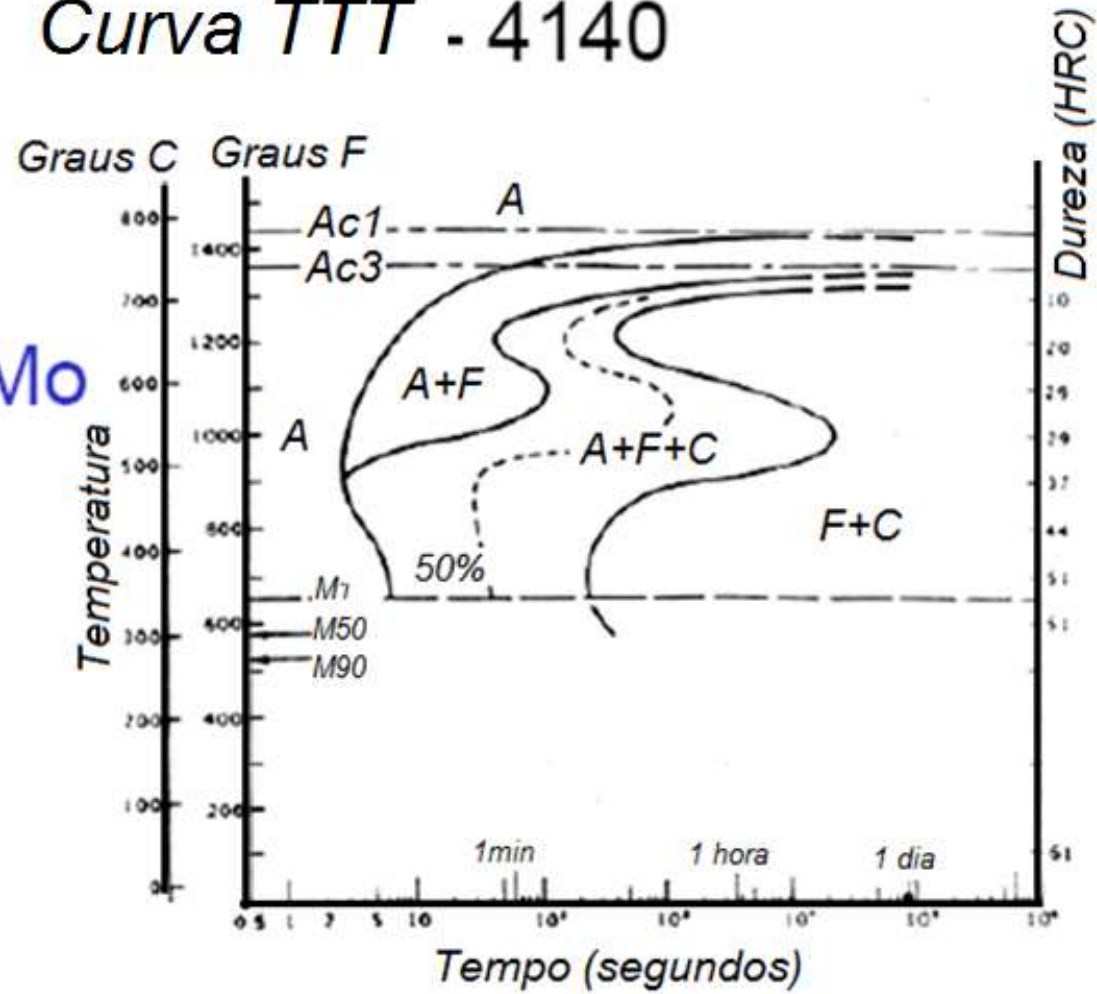


# Curva TTT - 5140



# Curva TTT - 4140

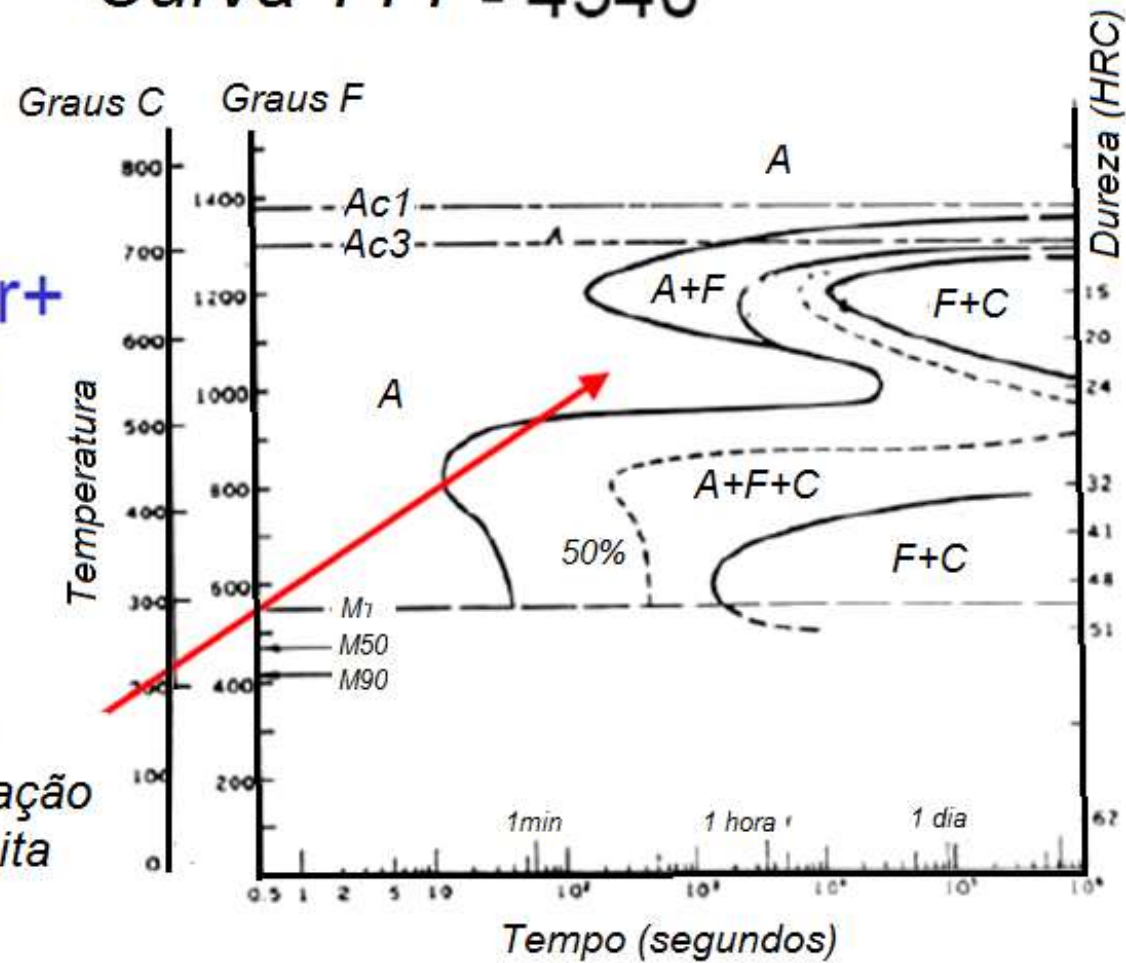
4140  
C+Mn+Cr+Mo



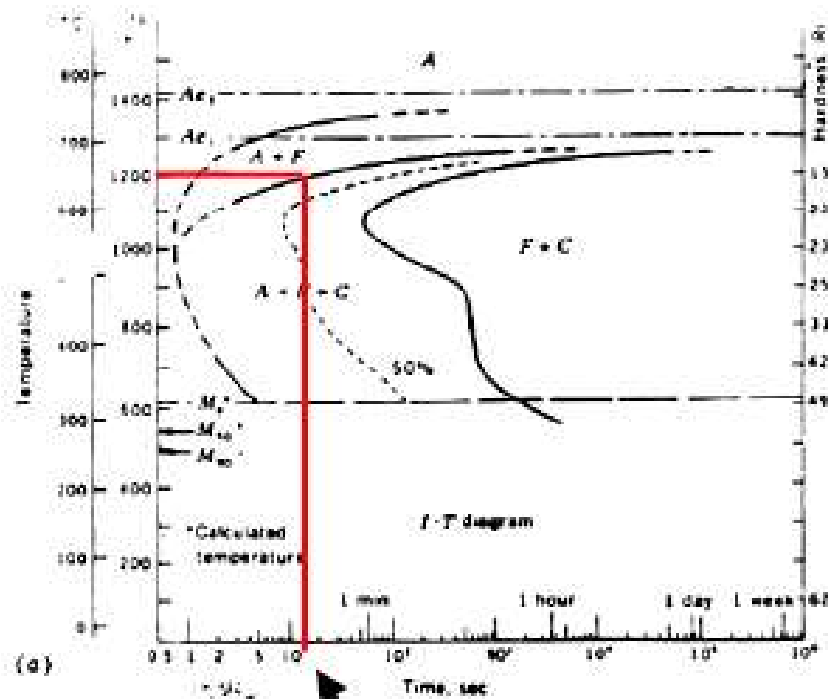
## Curva TTT - 4340

4340  
C+Mn+Cr+  
Ni+Mo

Separação das  
regiões de formação  
de perlita e bainita

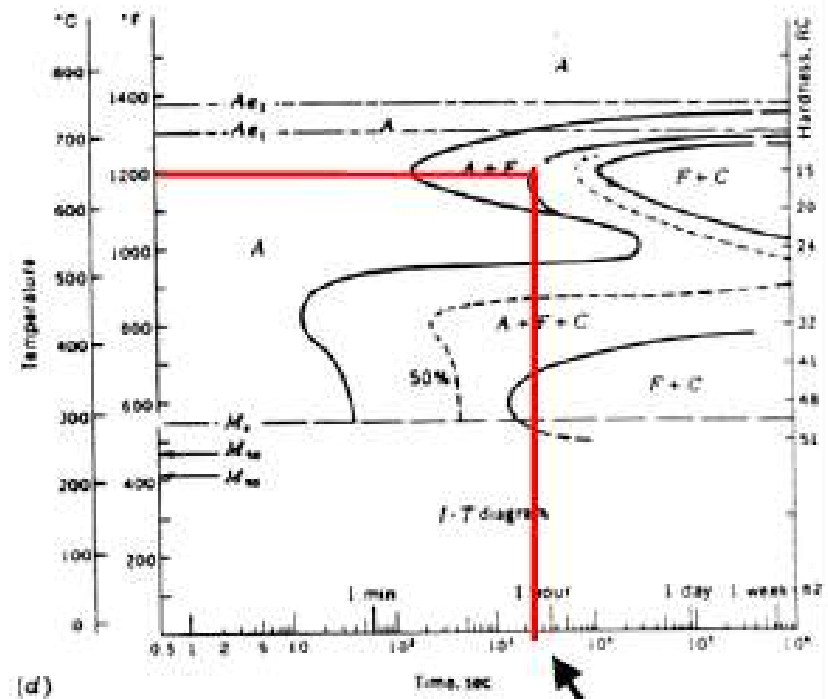


1040



15 sec

4340



1 hour

## FATORES QUE AFETAM A POSIÇÃO DAS CURVAS TTT NOS AÇOS

- Teor de carbono e elementos de liga dissolvidos (temperatura de austenitização)
- Tamanho do grão da austenita (temperatura de austenitização)
- Homogeneidade da austenita (temperatura de austenitização)



# 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

# TEMPERABILIDADE

- Deve-se no entanto estar ciente de que aços com mais carbono e com maior teor de elementos de liga tem temperaturas Ms menores com reflexos na % austenita retida.

Carbono/%	Ms temperatura/C
0.2	430
0.4	360
1.0	250

# TEMPERABILIDADE

- Elementos de liga também aumentam o  $C_{eq}$ .

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{14} + \frac{Mo}{10} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{30} + \frac{V}{6} + 3N + 20B$$

- Trincas e distorções aumentam a medida que o  $C_{eq}$  aumenta. Aços com  $C_{eq}$  maiores do que 0.52% são mais propensos a esses problemas.
- Com isso os meios de resfriamento precisam ser bem dimensionados

# TEMPERABILIDADE

- Algumas vezes pode-se atingir as propriedades necessárias sem usar aços de maior temperabilidade mas aumentando a velocidade de resfriamento de maneira a que o centro do componente atinja ainda a velocidade crítica.

# TEMPERABILIDADE

- Isso pode ser conseguido mudando-se o meio de resfriamento, por exemplo substituindo um óleo convencional por um óleo rápido, ou, no caso de soluções de polímeros, diminuindo-se a concentração.
- Alterações nas condições de agitação também podem surtir algum efeito na velocidade de resfriamento.



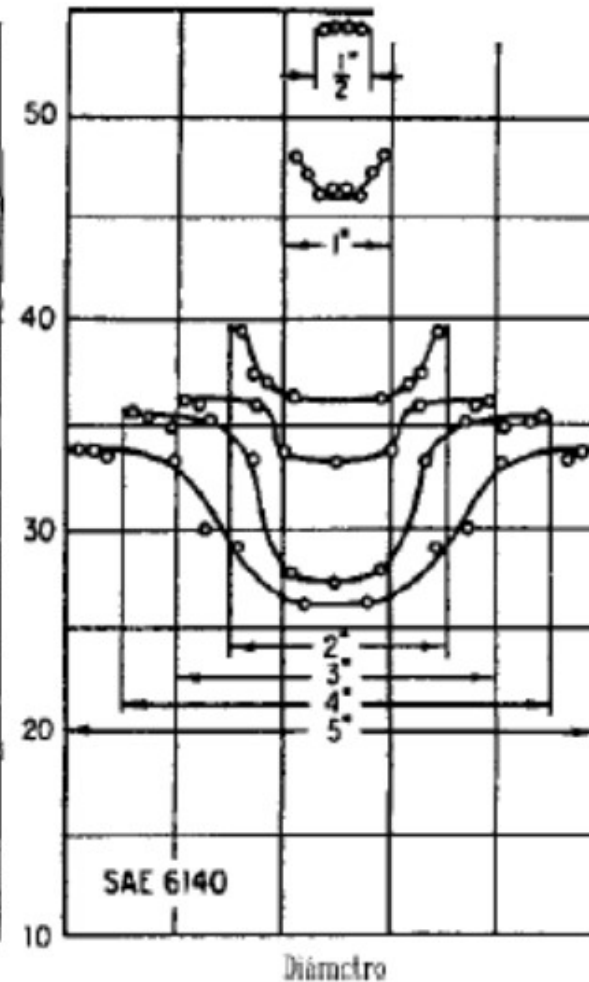
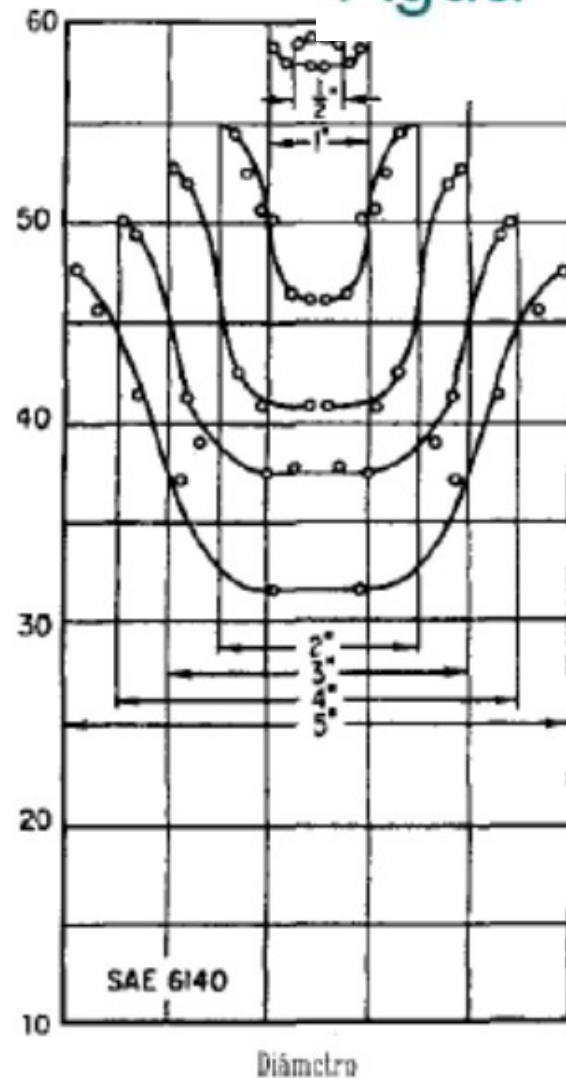
# Medidas de temperabilidade



# Como avaliar a temperabilidade

SAE 6140

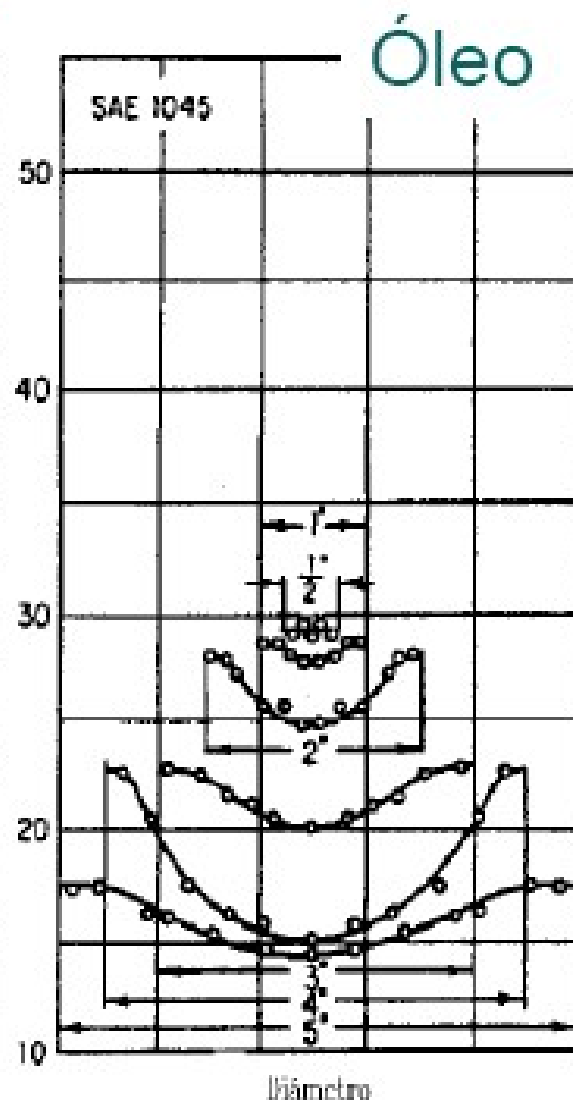
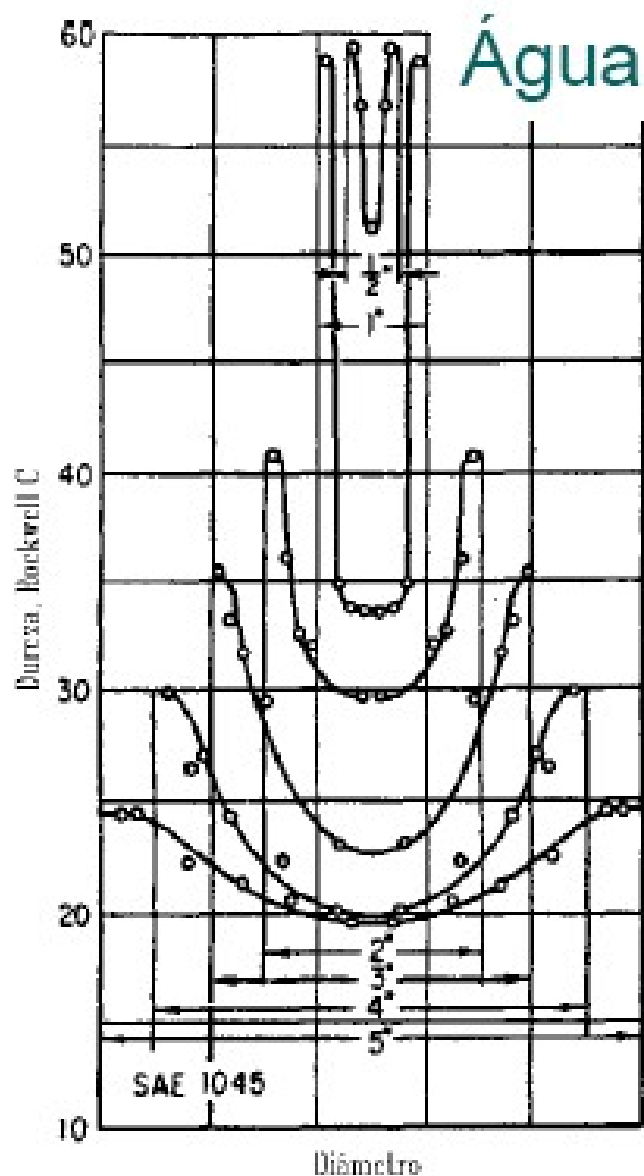
Água



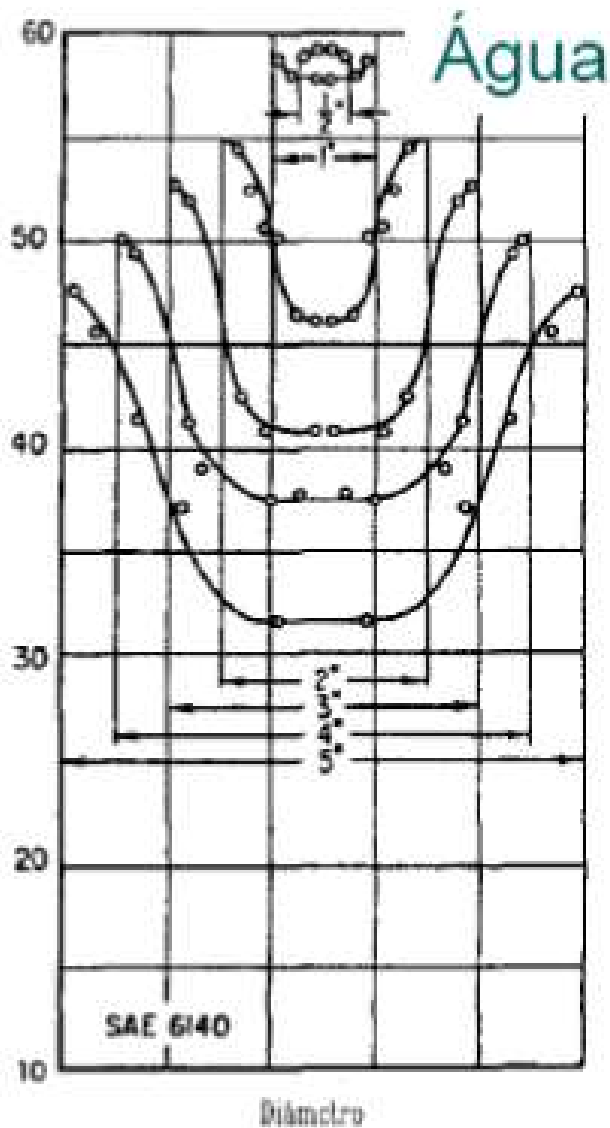
Óleo

# Como avaliar a temperabilidade

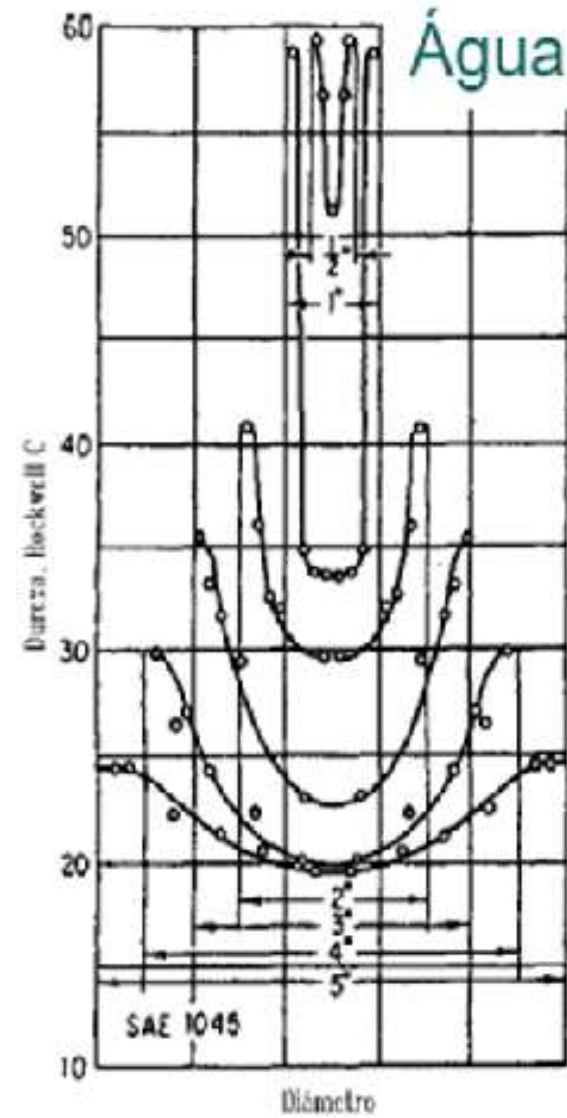
SAE 1045



# Como avaliar a temperabilidade

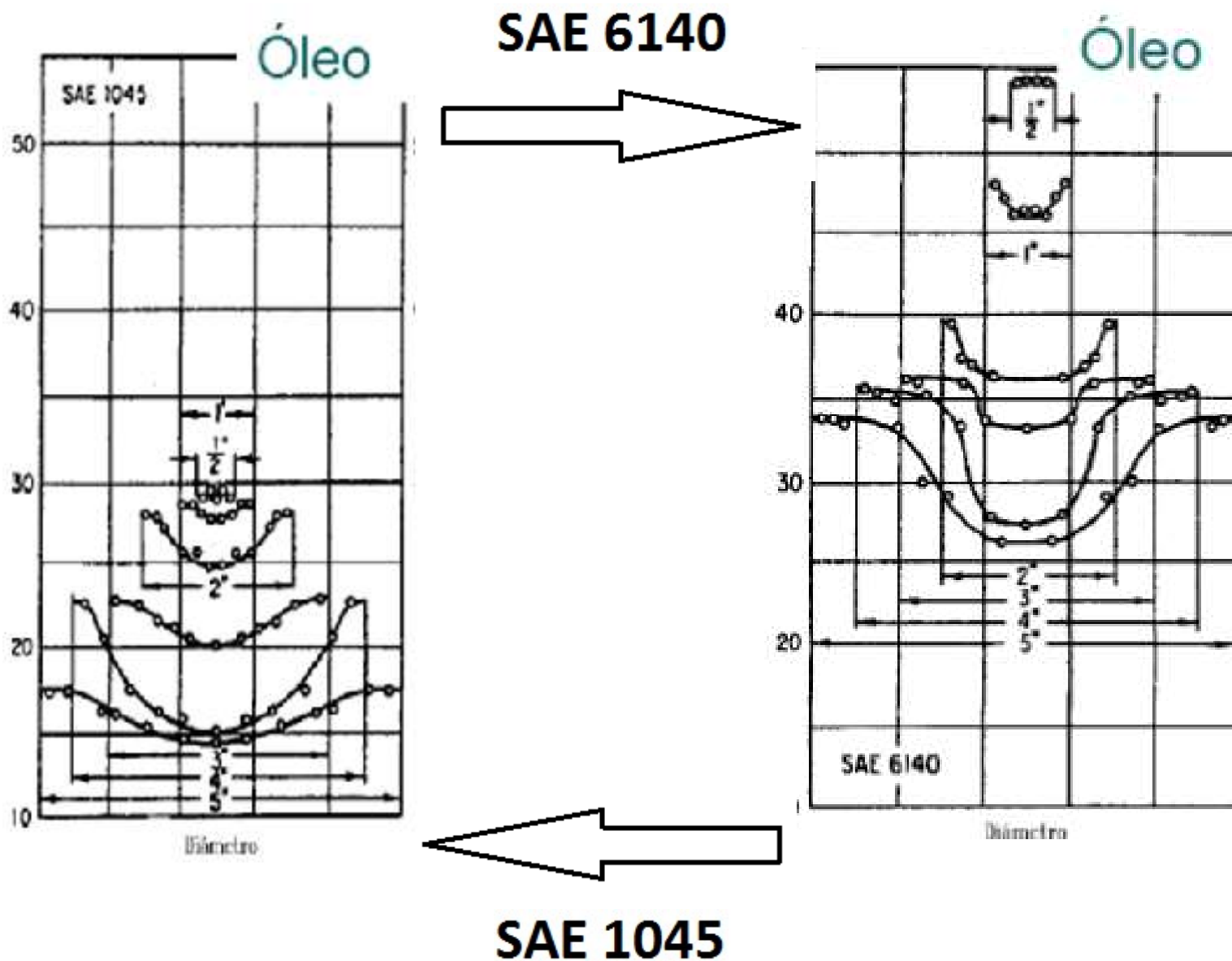


**SAE 6140**



**SAE 1045**

# Como avaliar a temperabilidade

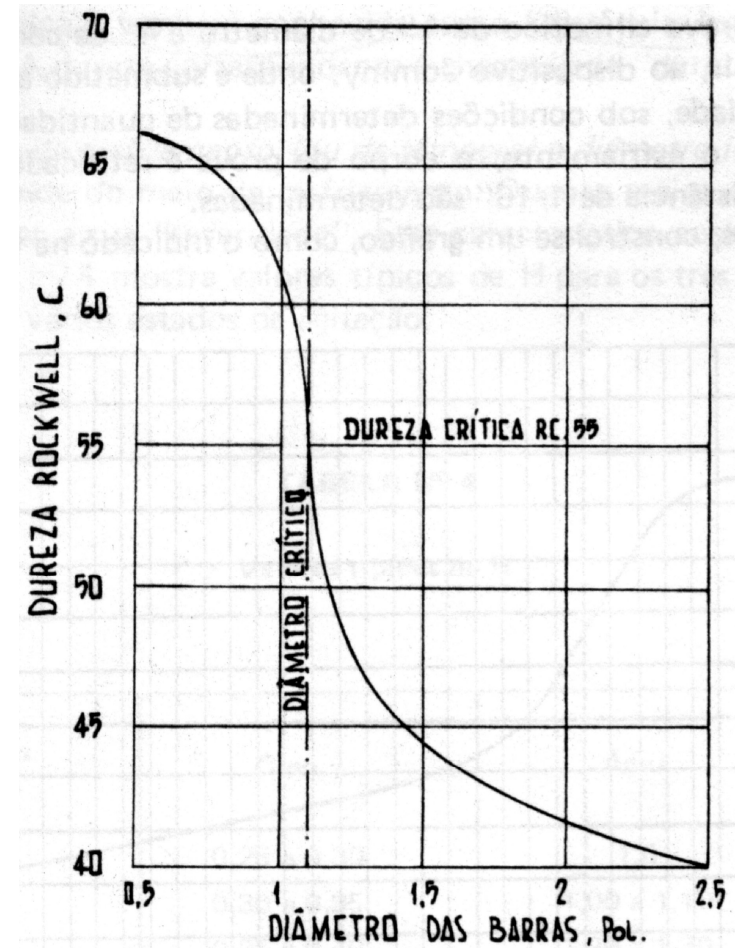


## Método de Grossman(Diâmetro crítico)

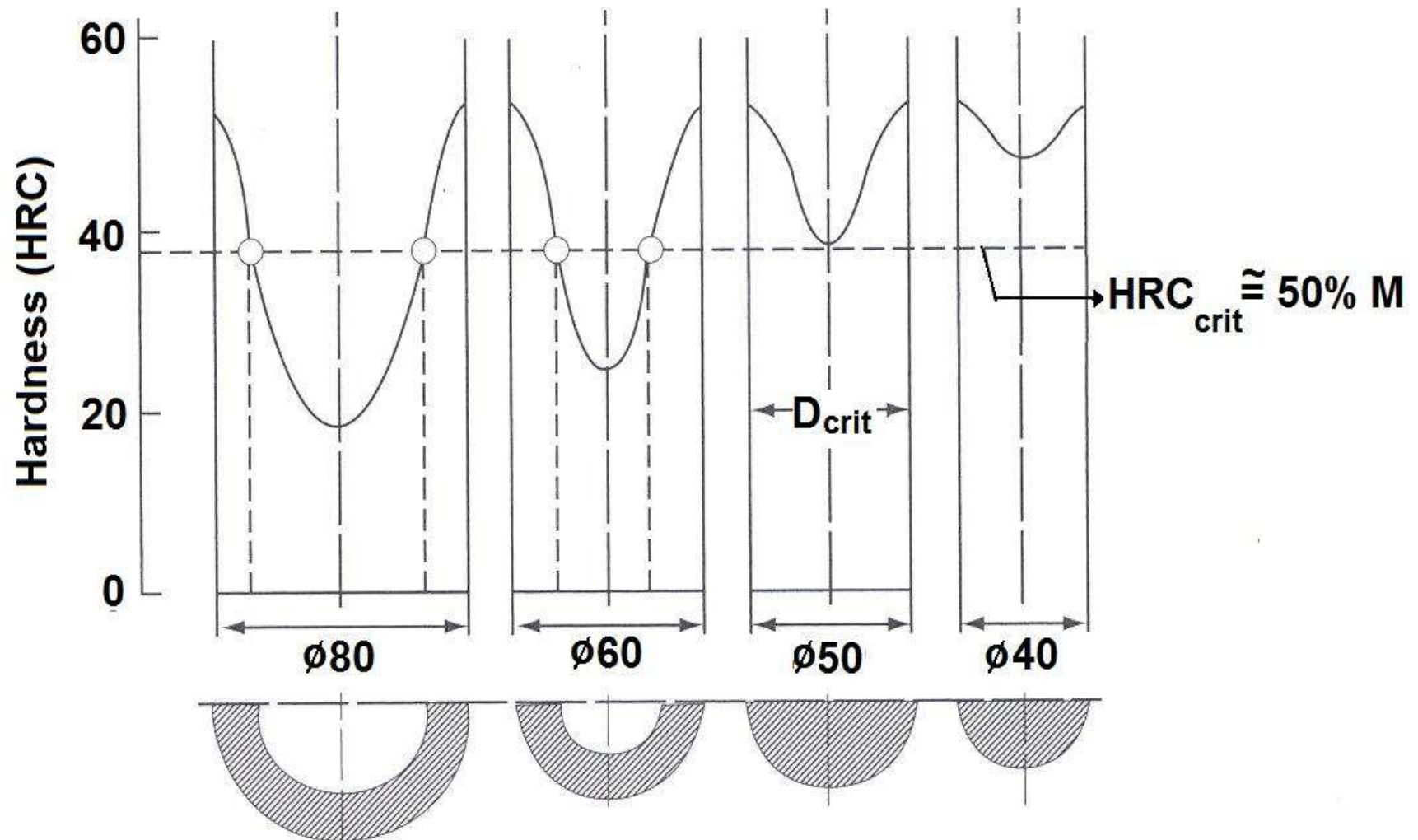
- Neste método, barras cilíndricas de aço, de diâmetros crescentes são austenitizadas e resfriadas rapidamente, em condições controladas para transformação da austenita em martensita
- Secções transversais das barras são a seguir submetidas à determinação de dureza do centro à superfície
- Traça-se um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

# Método de Grossman (Diâmetro crítico)

- 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



# Grossman (Diâmetro crítico)



O poder de resfriamento pode ser descrito de muitas maneiras:

- Valor H de Grossmann

$$H = \frac{h}{2k}$$

Está relacionado à condutividade térmica do aço e ao coeficiente de transferência de calor





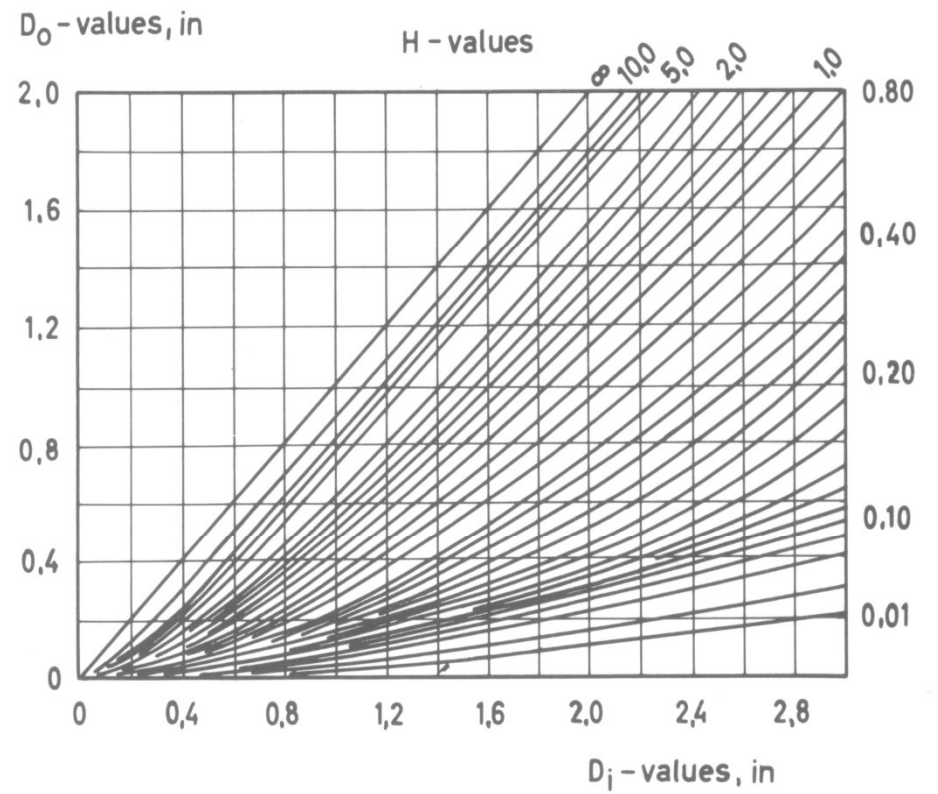
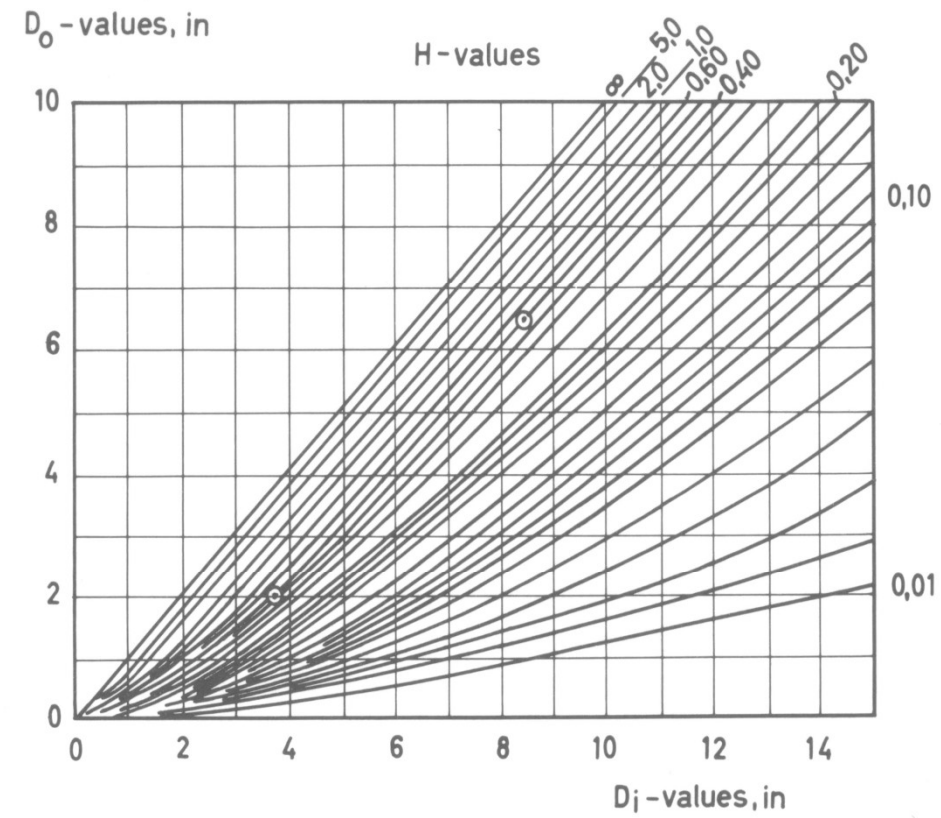
GROSSMAN

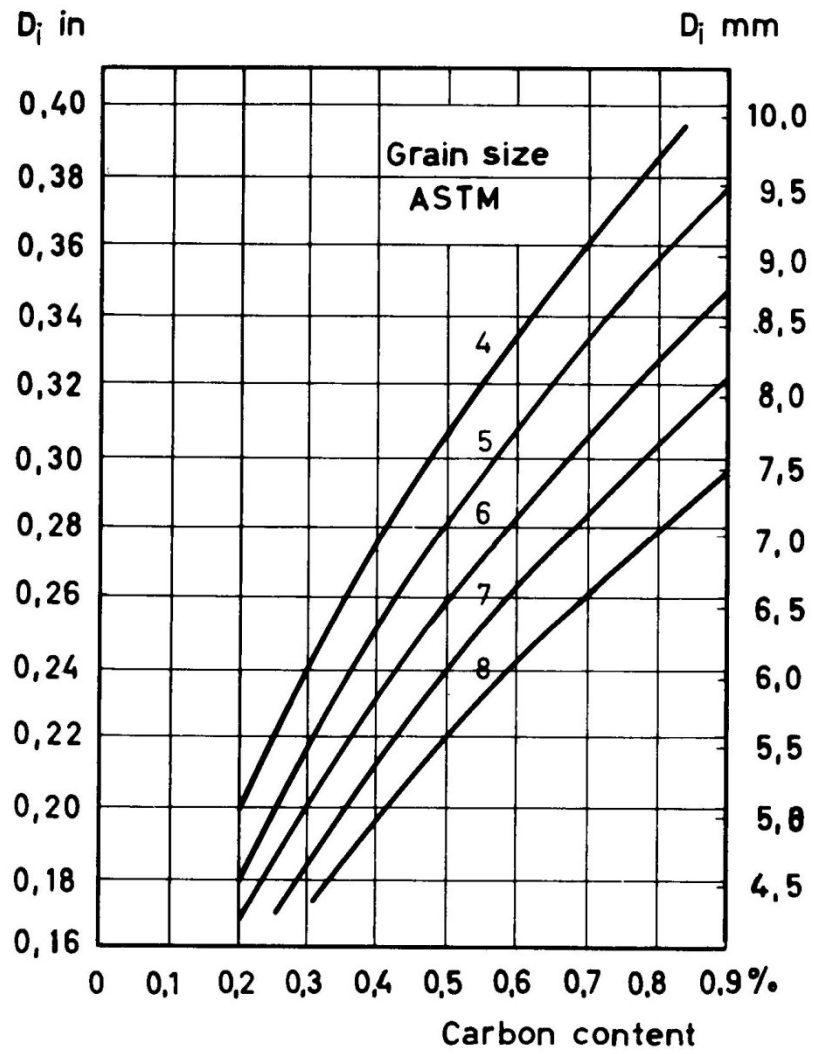
- valores de H

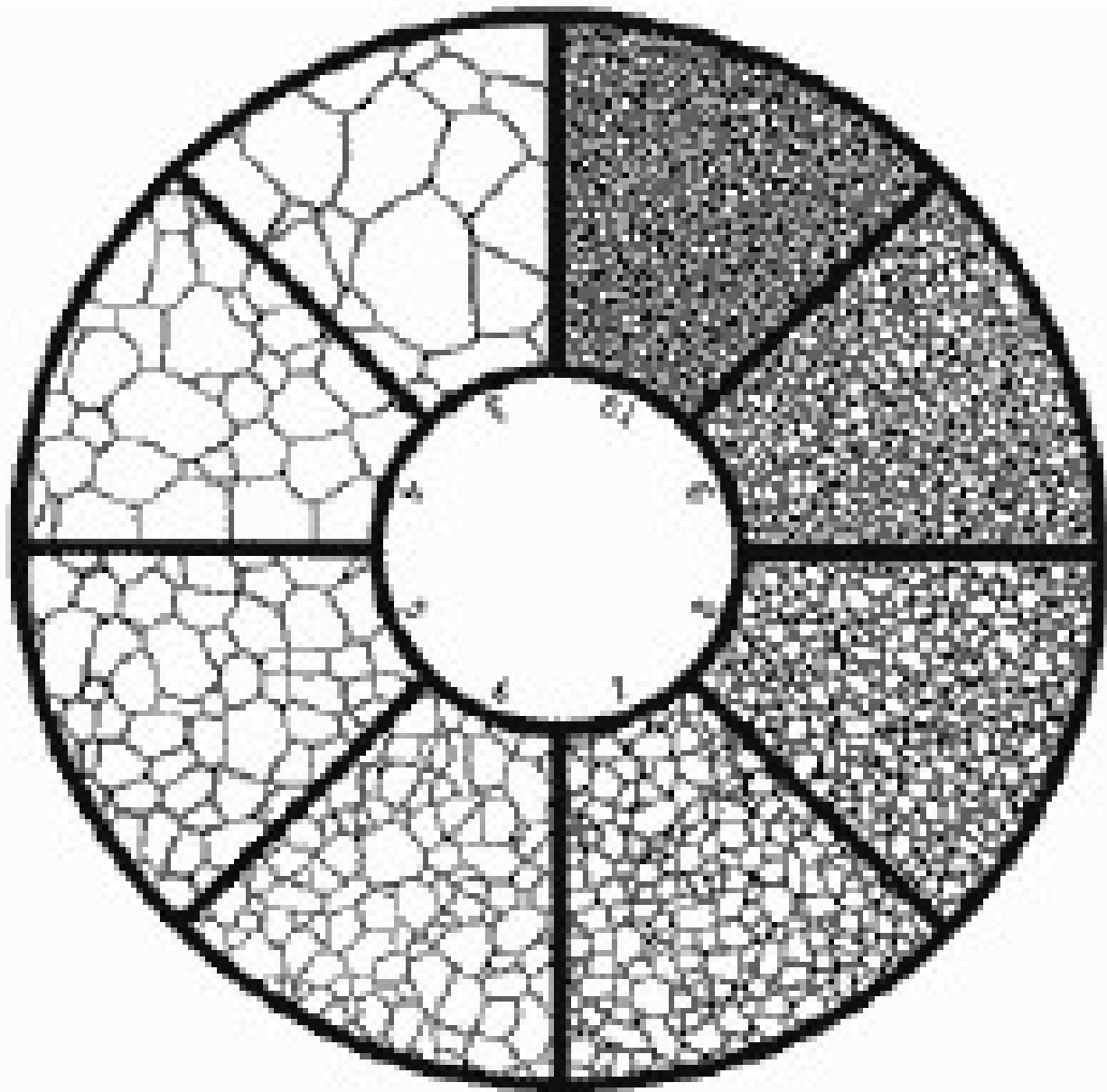
## Severidade de têmpera

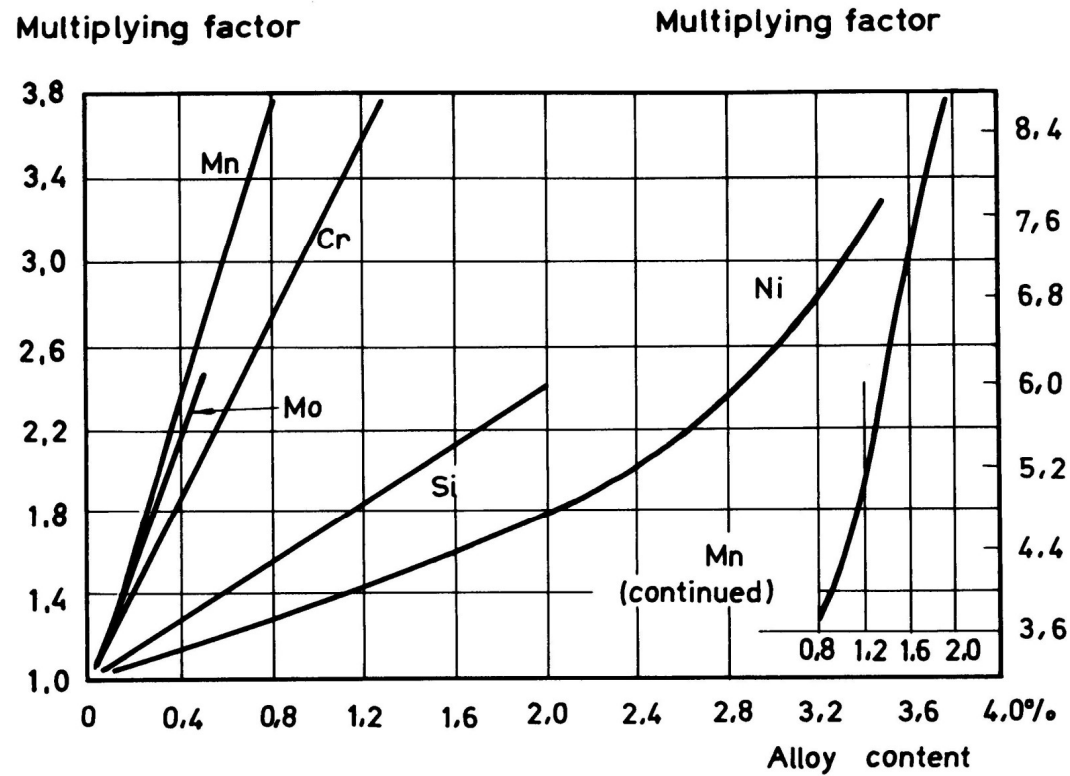
Agitação (fluido ou peça)	Óleo		Água		Salmoura	
	in. <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>	in. <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>	in. <sup>-1</sup>	mm <sup>-1</sup>
Sem agitação (circulação)	0.25	0.01	0.9	0.35		
	0.30	0.012	1.0	0.039	2	0.079
Leve <span style="margin-left: 100px;">a)</span>	0.30	0.012	1.0	0.039		
	0.35	0.014	1.1	0.043	2.2	0.086
Moderada	0.35	0.014	1.2	0.047	—	—
	0.40	0.016	1.3	0.051	—	—
	0.40	0.016	1.4	0.055		
Boa	0.50	0.020	1.5	0.059	—	—
	0.40	0.020	1.6	0.063		
Forte	0.80	0.030	2.0	0.079	—	—
	0.80	0.030				
Violenta	1.10	0.043	4.0	0.15	5.0	0.20

Source: Grossman, M.A., *Elements of Hardenability*, ASM, Cleveland, OH, 1952.



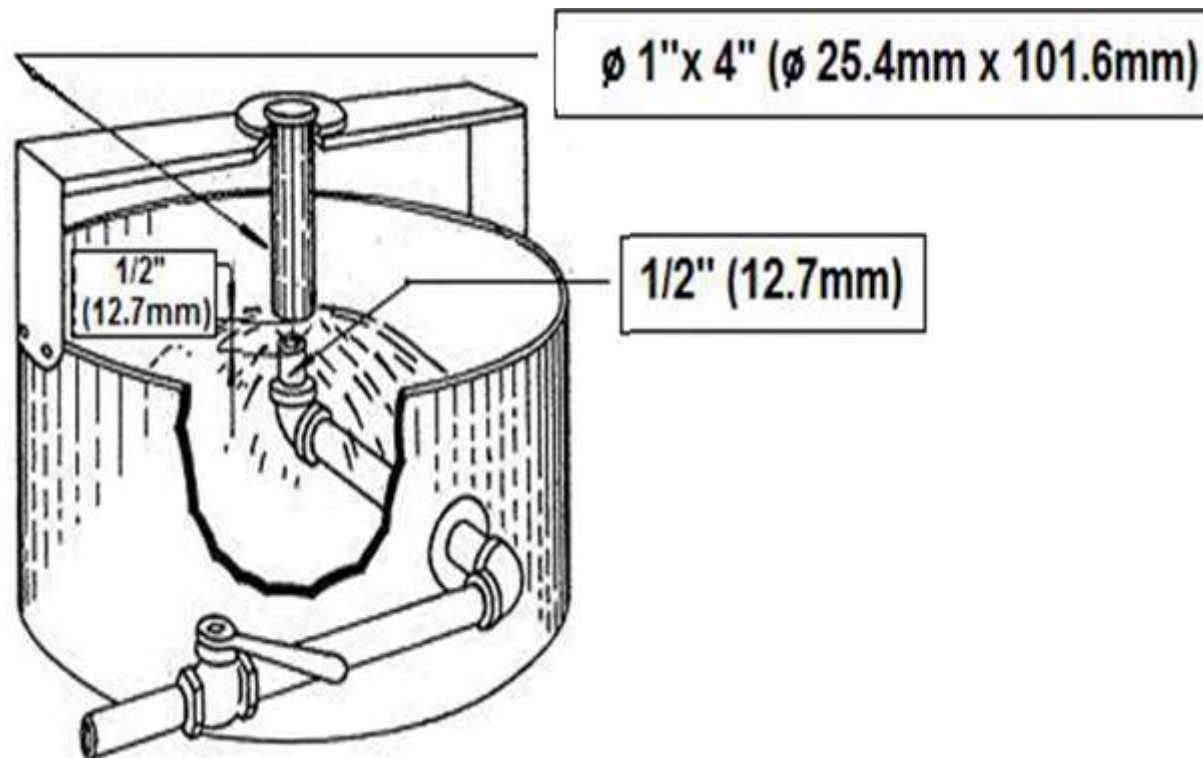






$$D_o = (TG \text{ Carbono}) \times f(Si) \times f(Mn) \times f(Cr) \times f(Mo) \dots$$

# Dispositivo Jominy



# Ensaio Jominy

- Após o esfriamento, o corpo de prova é retificado e valores de dureza, a distância de 1/16" são determinados.



# Ensaio Jominy

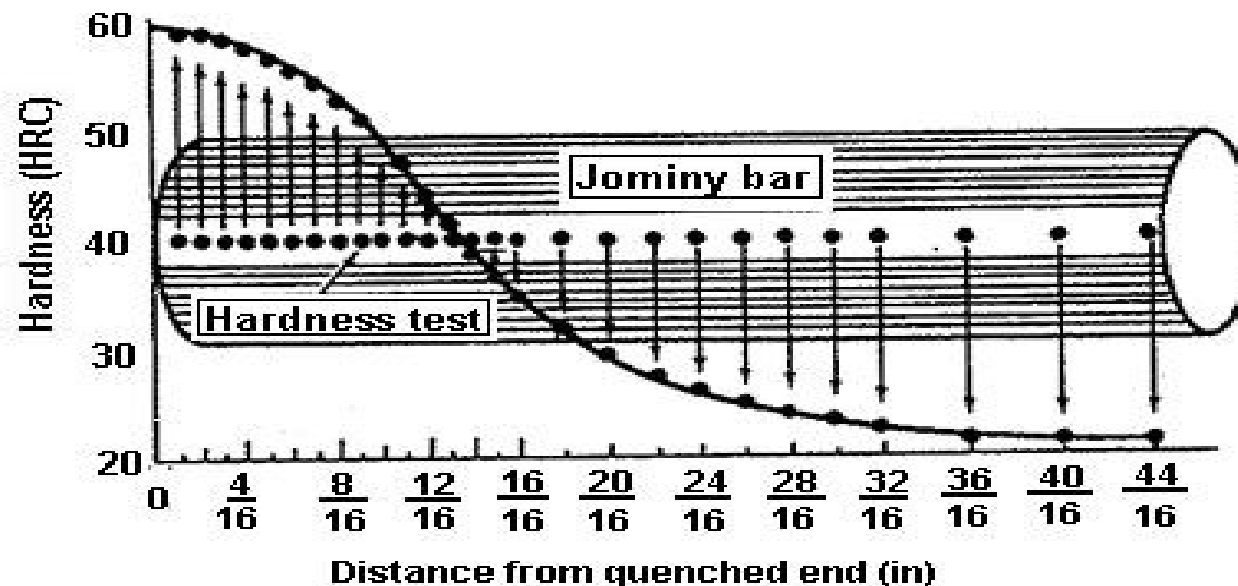
## Jominy e Boegehold



- 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.

# Ensaio Jominy

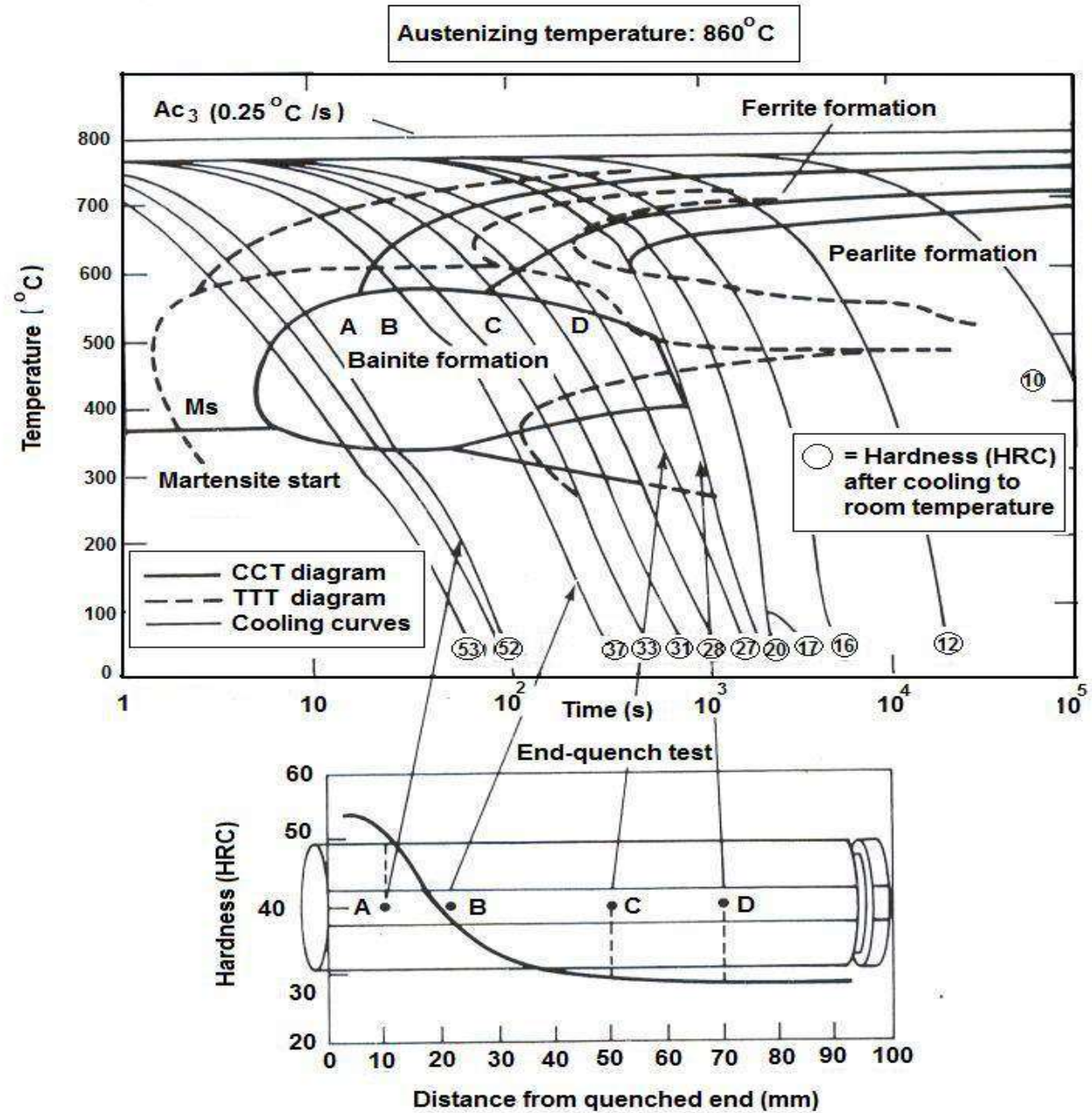
- Dessa forma, um aço que é muito temperável irá reter grandes valores de dureza ao longo de distâncias relativamente longas



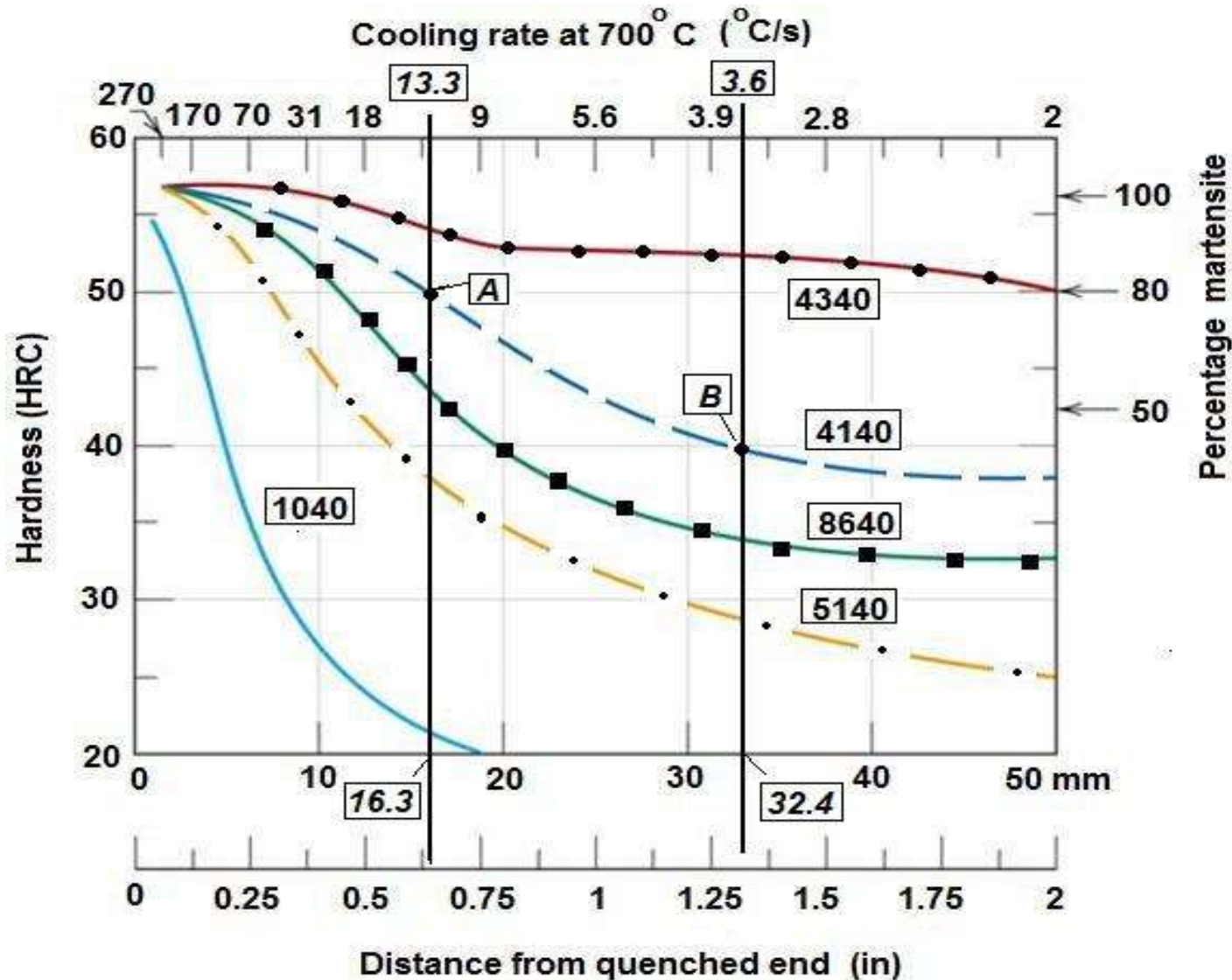
# Jominy teste

<b><i>Distância Jominy (pol)</i></b>	<b><i>Taxa de resfriamento (°C/s)</i></b>
$\frac{1}{16}$	315
$\frac{2}{16}$	110
$\frac{3}{16}$	50
$\frac{4}{16}$	36
$\frac{5}{16}$	28
$\frac{6}{16}$	22
$\frac{7}{16}$	17
$\frac{8}{16}$	15
$\frac{10}{16}$	10
$\frac{12}{16}$	8
$\frac{16}{16}$	5
$\frac{20}{16}$	3
$\frac{24}{16}$	2.8
$\frac{28}{16}$	2.5
$\frac{36}{16}$	2.2

# Ensaio Jominy



# Influência de elementos de liga



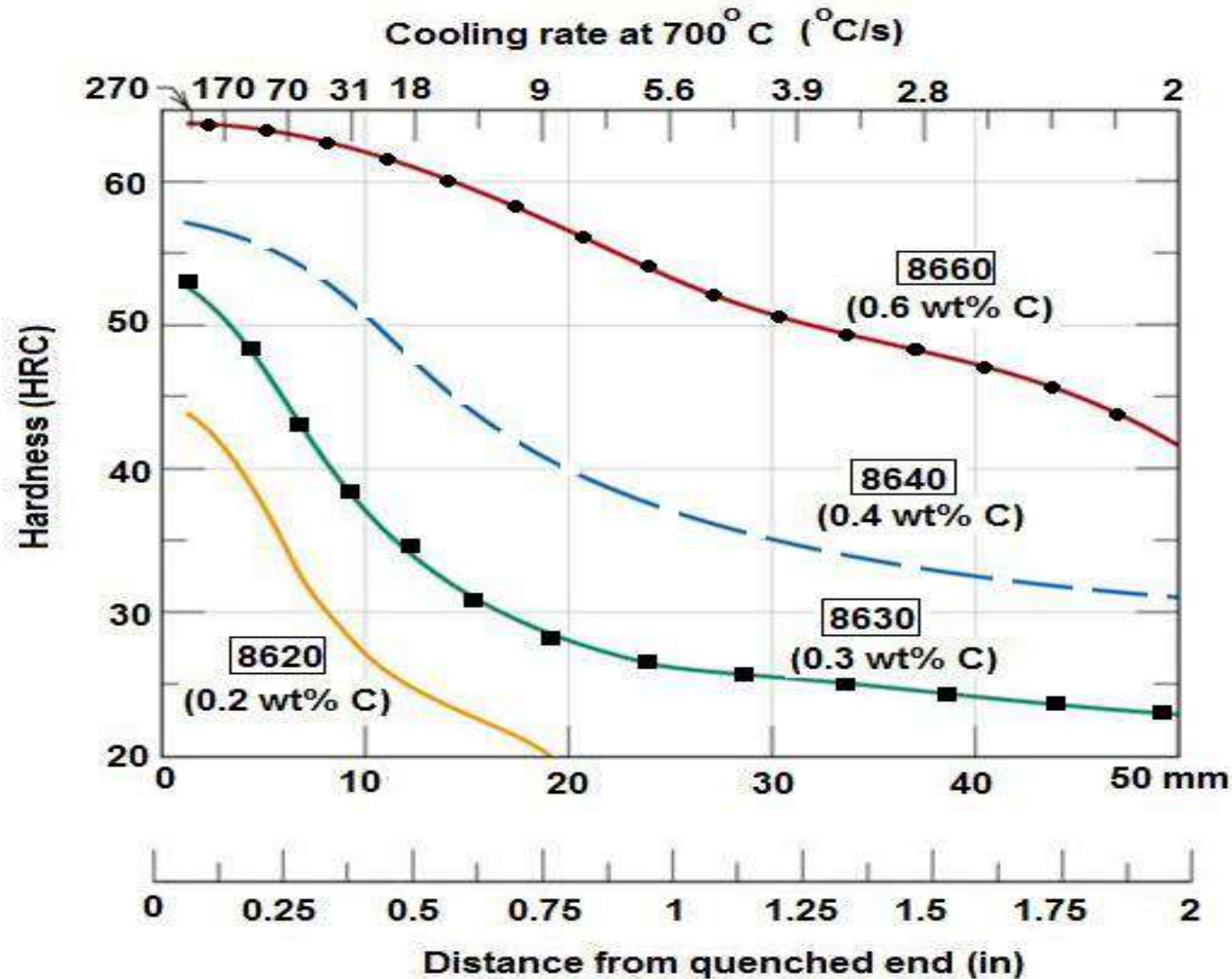
# Influência de elementos de liga

- 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

# Influência de elementos de liga

- 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 do teor de carbono

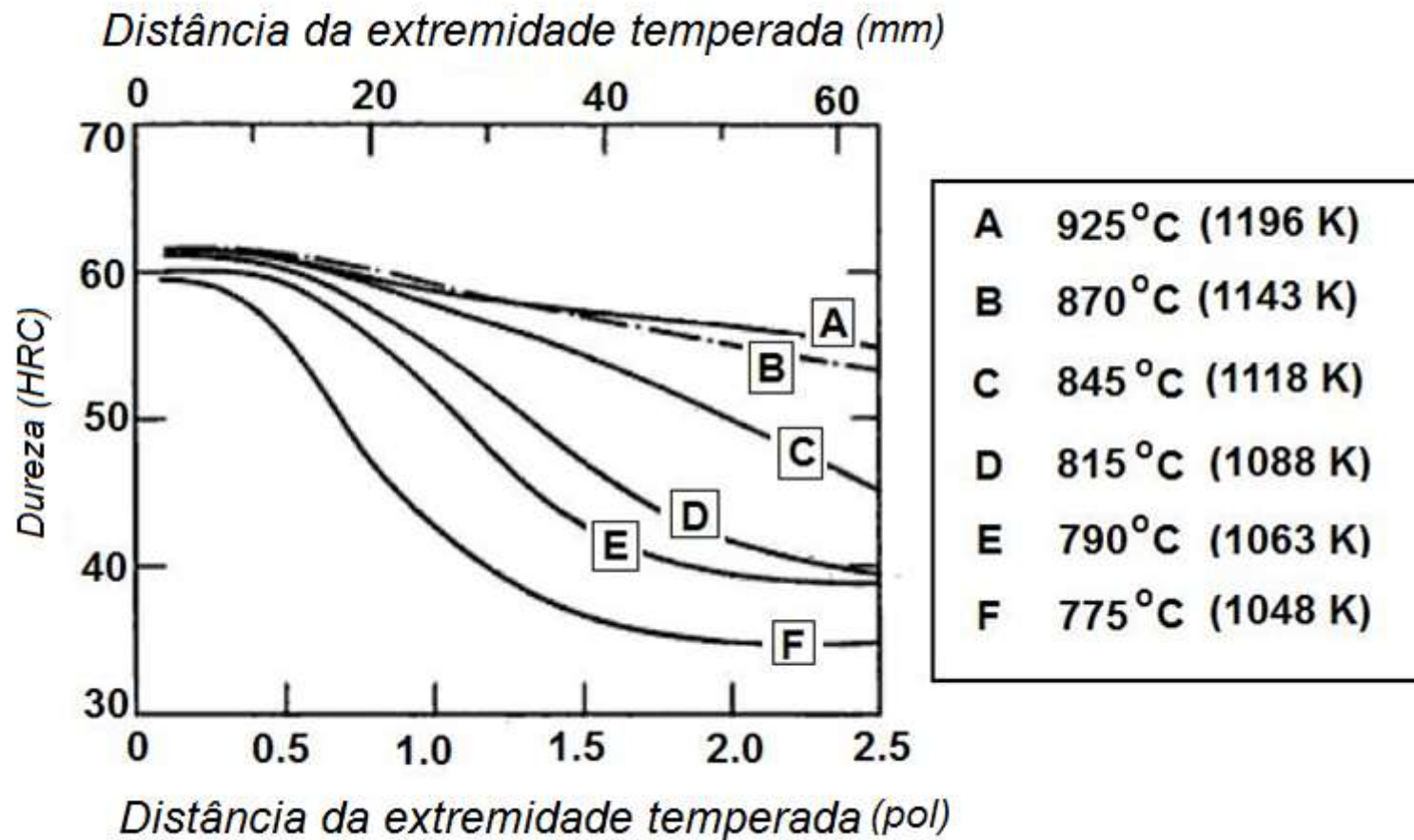


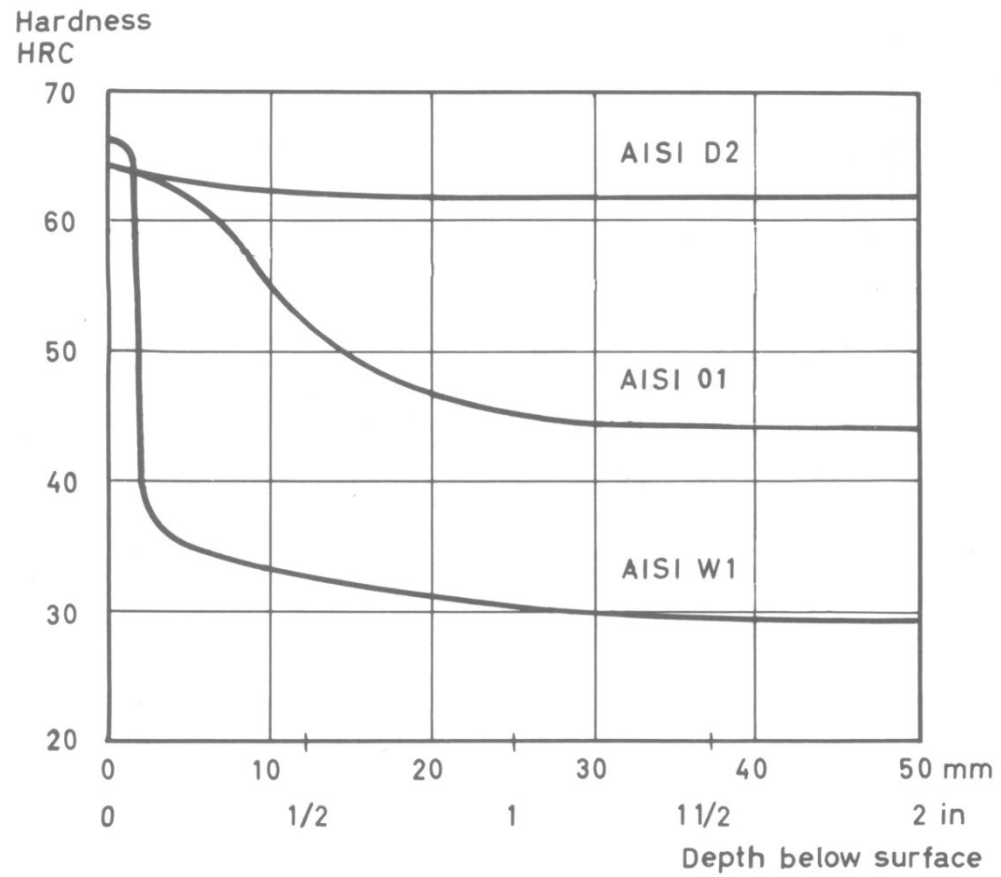


# Influência do teor de carbono

- 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

# Influência da temperatura de austenitização na temperabilidade de um aço SAE 4150

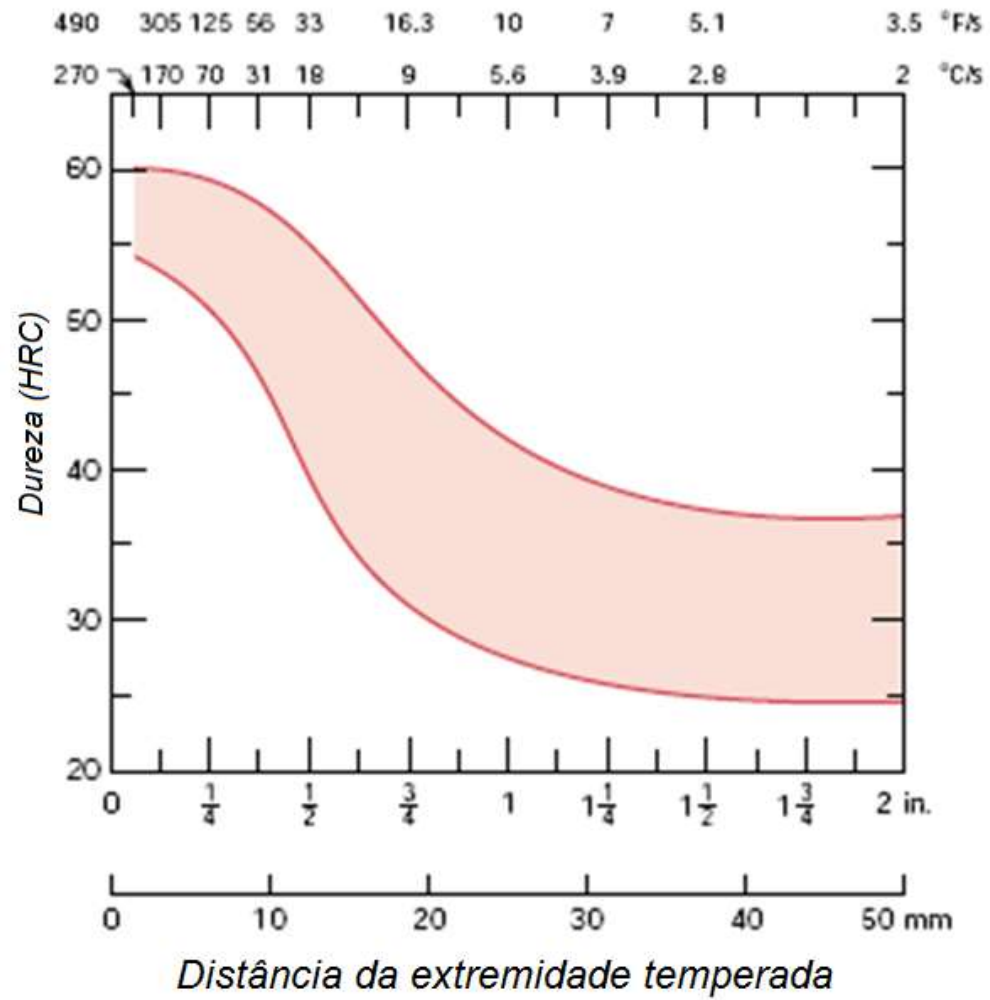




# Banda de temperabilidade

- 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

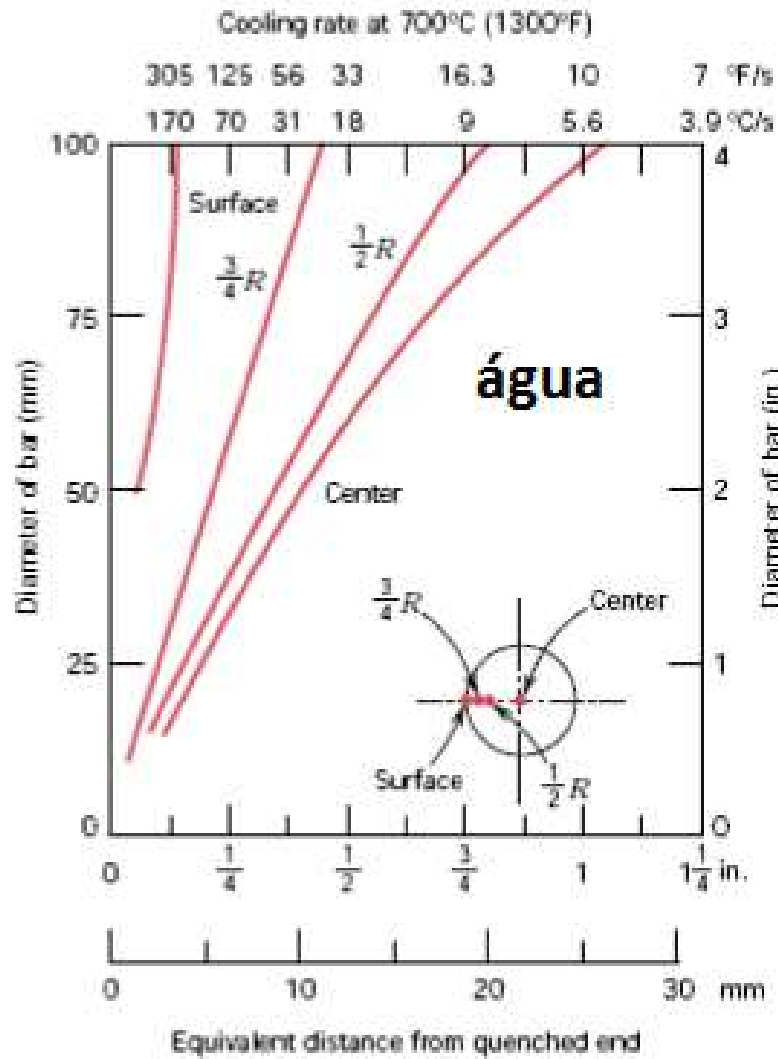
*Taxa de resfriamento a 700 Graus C*



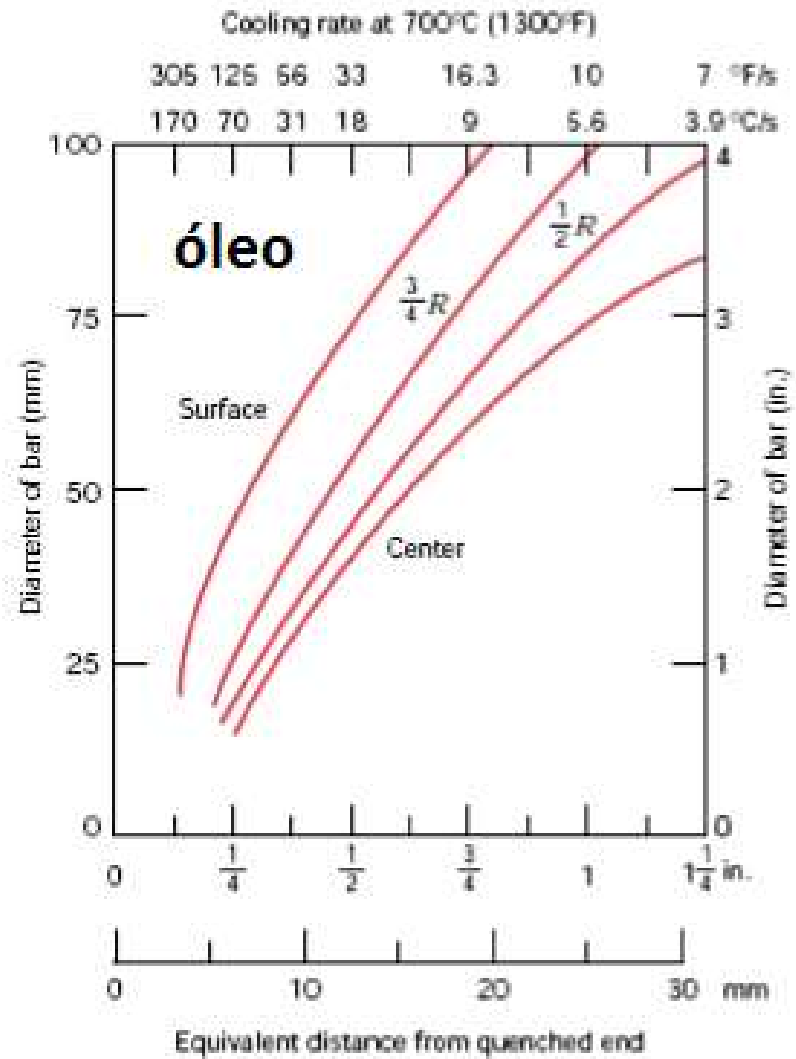
# Relação entre os ensaios

- O diagrama a seguir 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

# Relação entre os ensaios



(a)



(b)

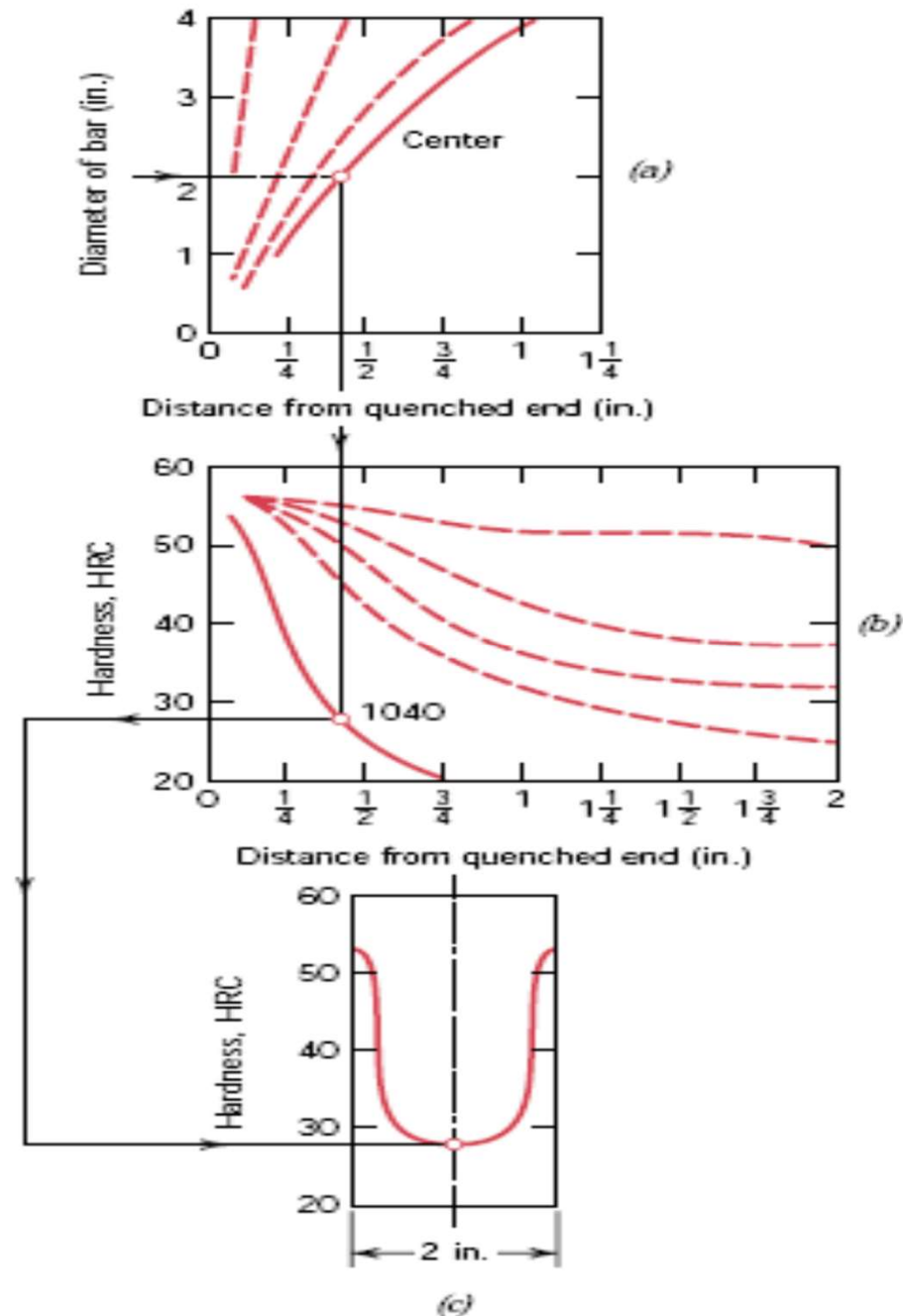
## Determinação de dureza por meio do Ensaio Jominy

- 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



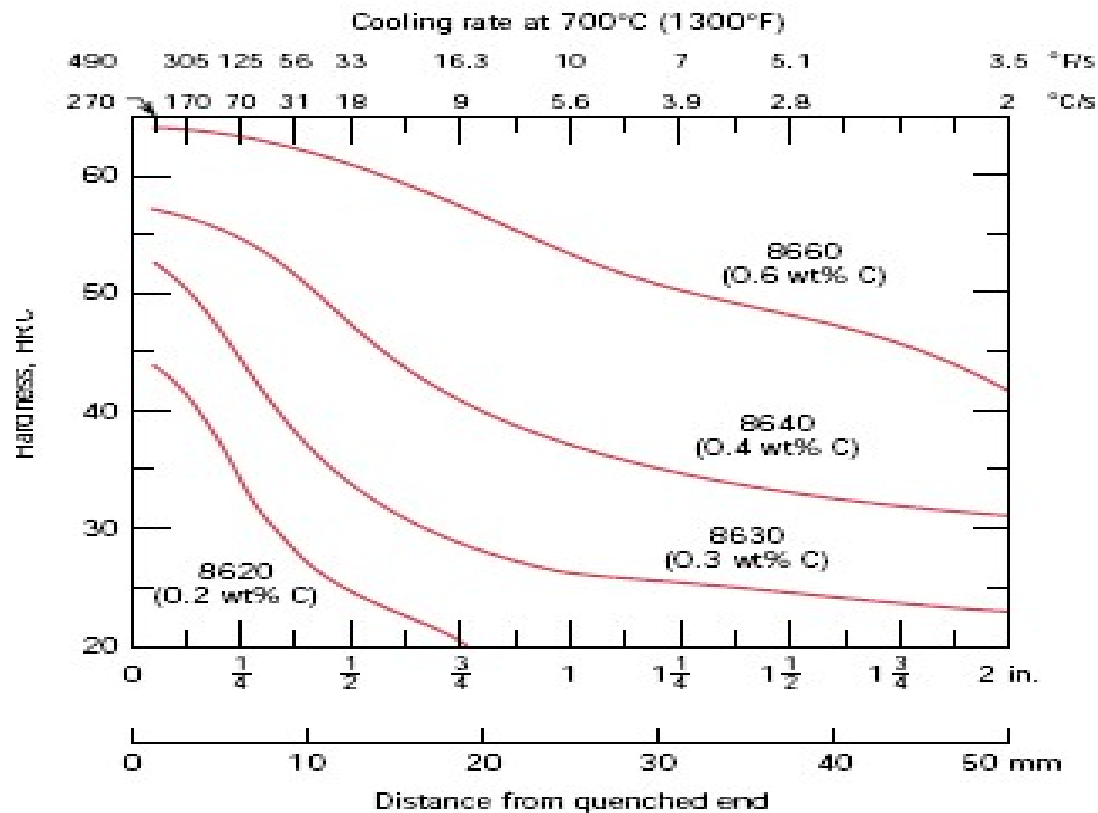
Nesse caso:

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



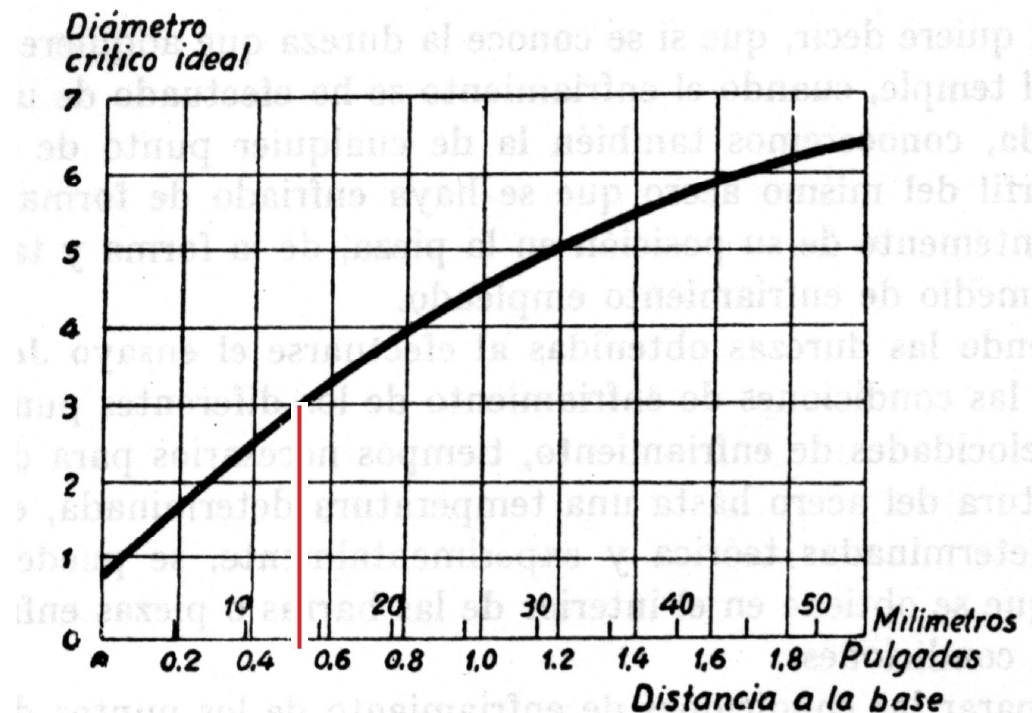
# Determinação do diâmetro crítico pelo ensaio Jominy

- Por exemplo um aço 8640 que apresente dureza de 50HRC, na curva Jominy apresenta distância Jominy equivalente de  $\frac{1}{2}$  “.

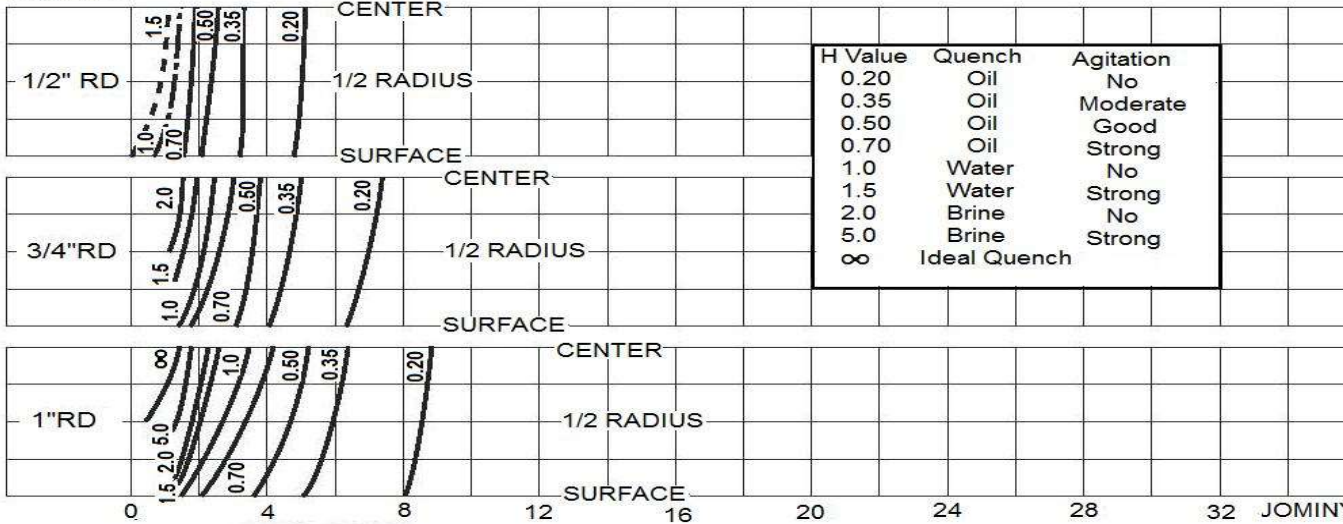


# Determinação do diâmetro crítico pelo ensaio Jominy

- Pegando esse valor e analisando a curva em que o meio de têmpera é ideal encontra-se um valor de diâmetro crítico de 3”.

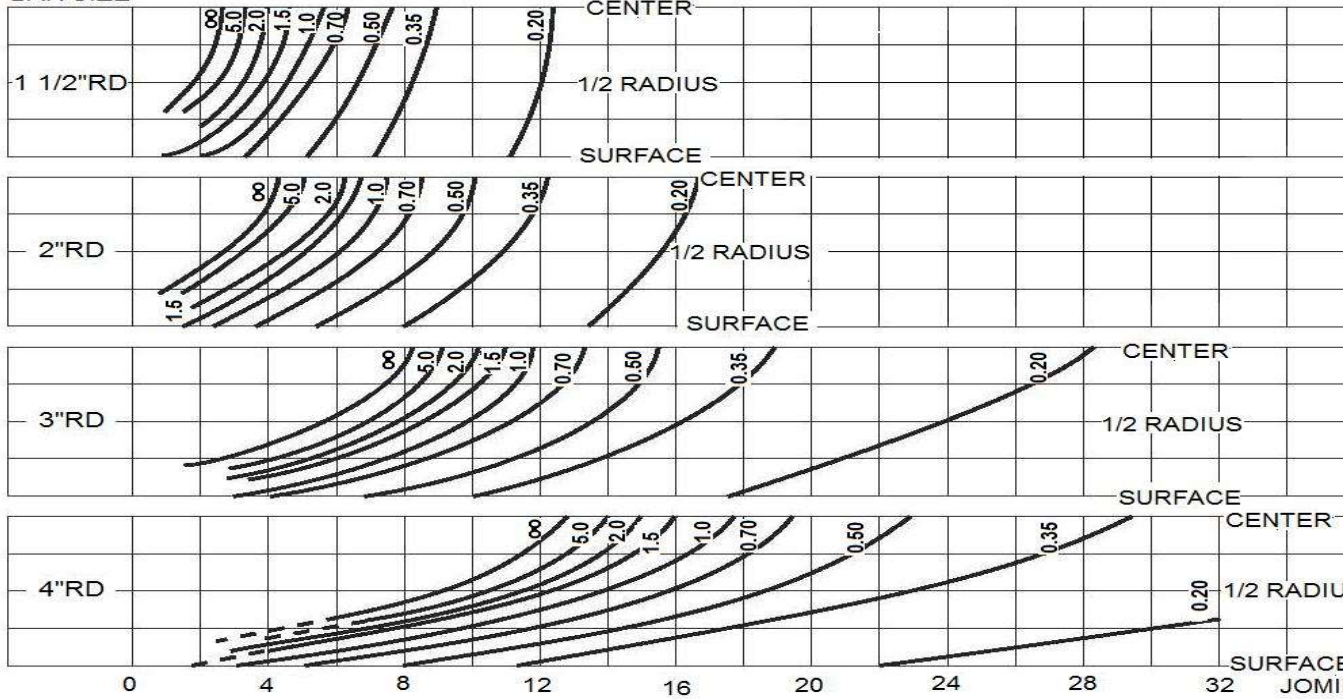


BAR SIZE



H Value	Quench	Agitation
0.20	Oil	No
0.35	Oil	Moderate
0.50	Oil	Good
0.70	Oil	Strong
1.0	Water	No
1.5	Water	Strong
2.0	Brine	No
5.0	Brine	Strong
∞	Ideal Quench	

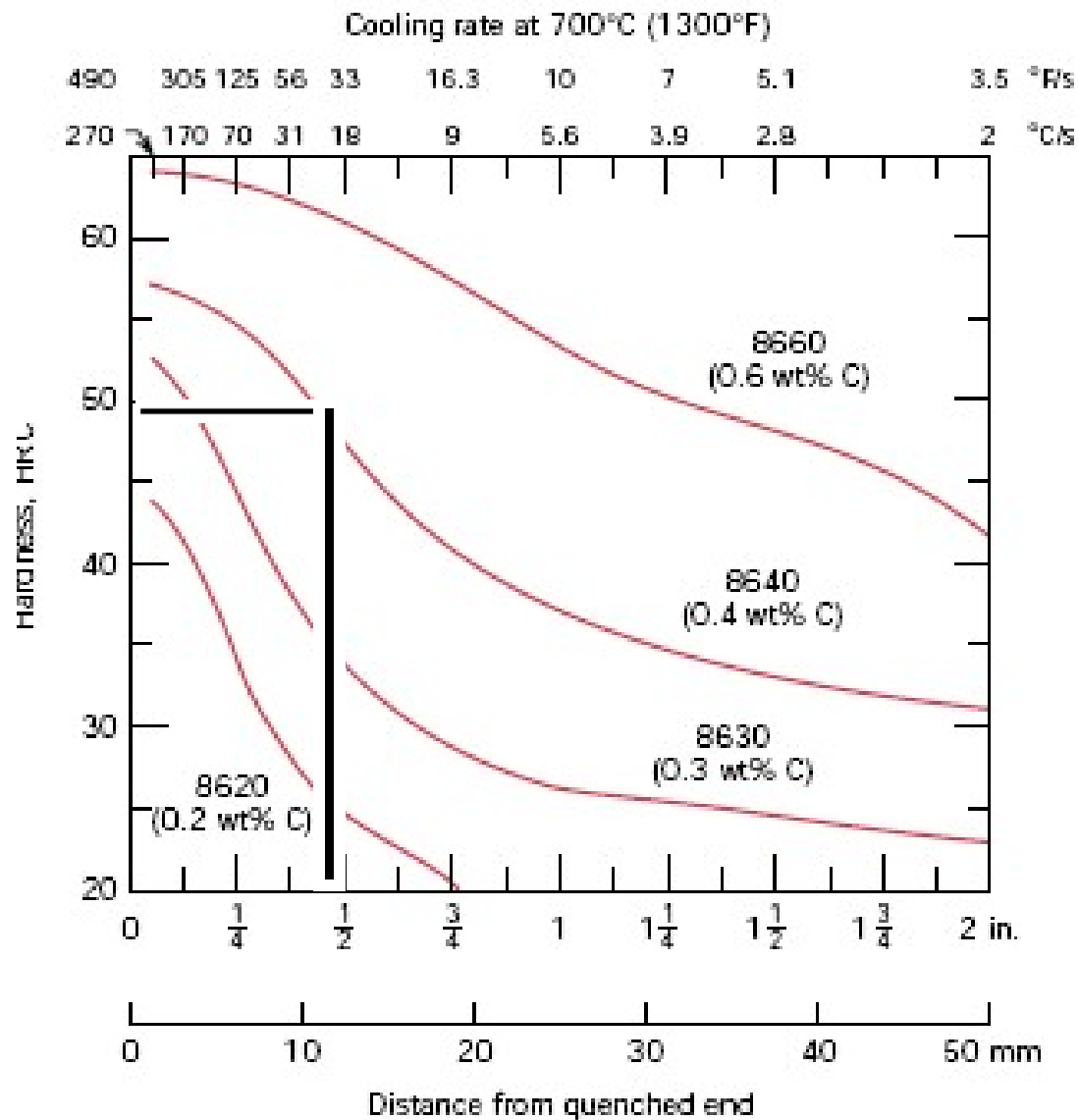
BAR SIZE



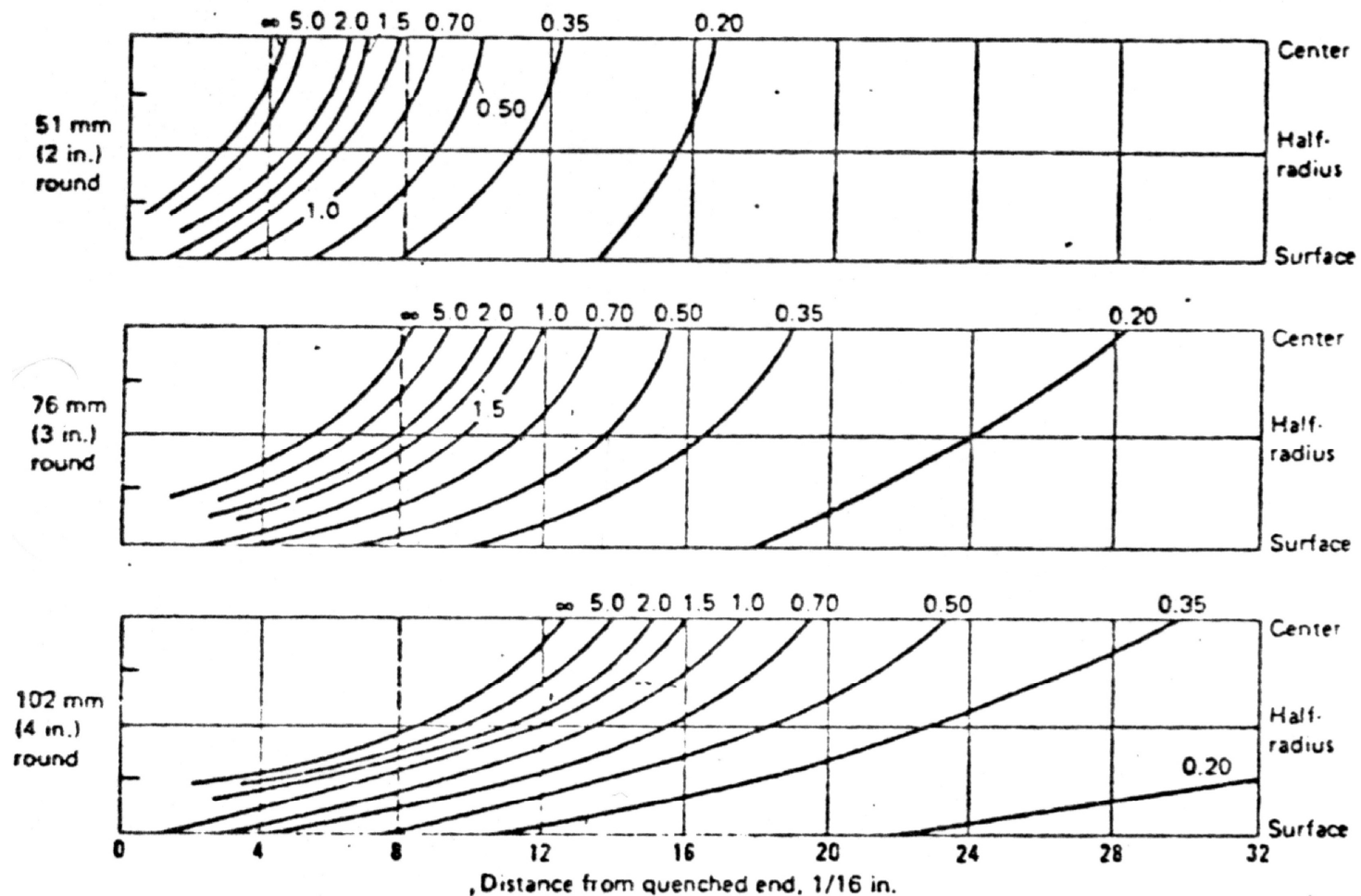
SURFACE  
1/2 RADIUS  
CENTER

# Exemplo

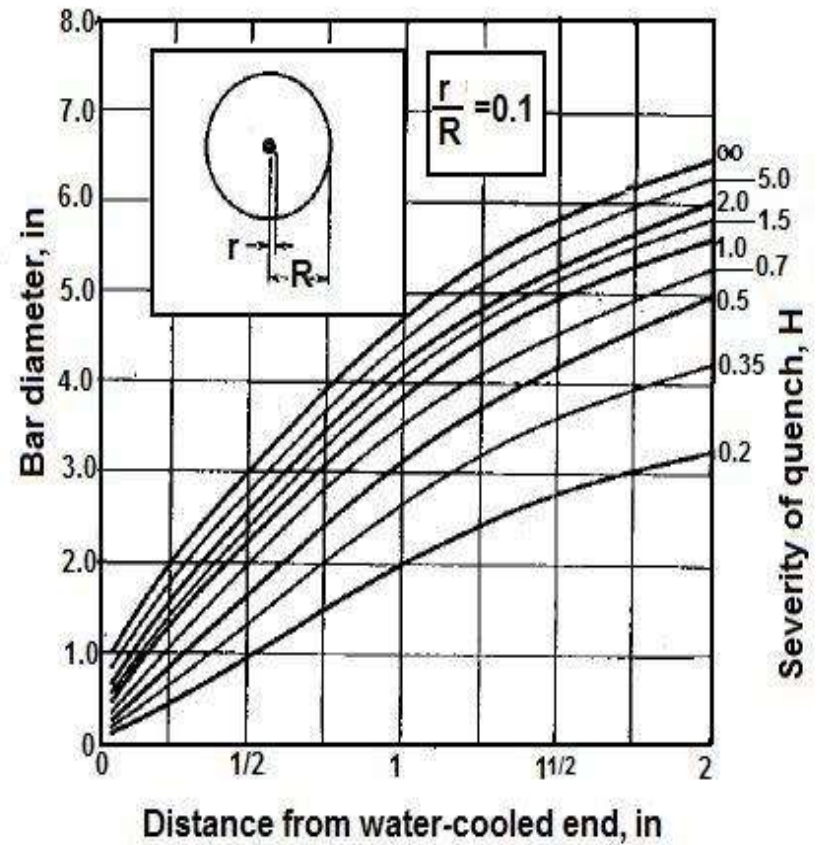
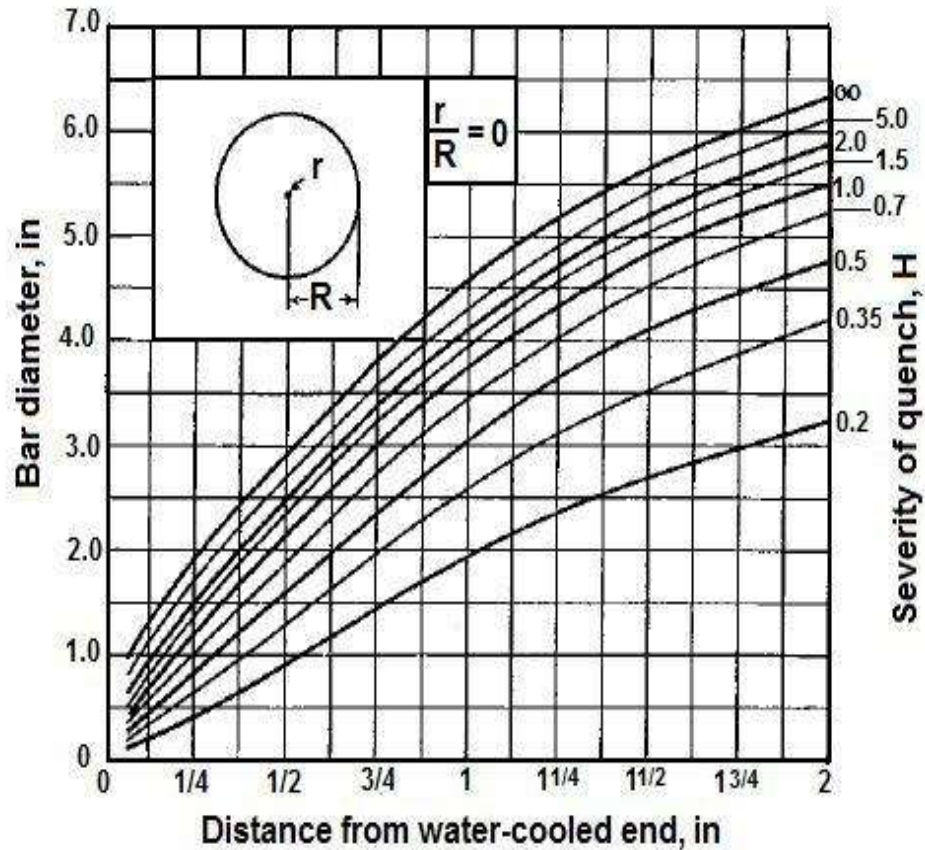
- Através das curvas de correlação pode-se determinar a severidade de têmpera e assim o meio de têmpera que deve ser empregado.
- Por exemplo, se pegarmos uma barra de 2" de um aço 8640 e desejarmos uma dureza de 50HRC no meio do raio.



- Tem-se que para no centro tenha-se 7/16 de distância Jominy a severidade de têmpera deve ser 1,0 (água)



# Curvas Lamont





# Curvas Lamont

