

The background features a dark blue gradient with technical diagrams. On the left, a large circular scale is visible with numerical markings from 160 to 260. To the right, there are several circular diagrams with arrows indicating clockwise and counter-clockwise directions, suggesting a process or cycle. The overall aesthetic is scientific and technical.

TEMPERABILIDADE

ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

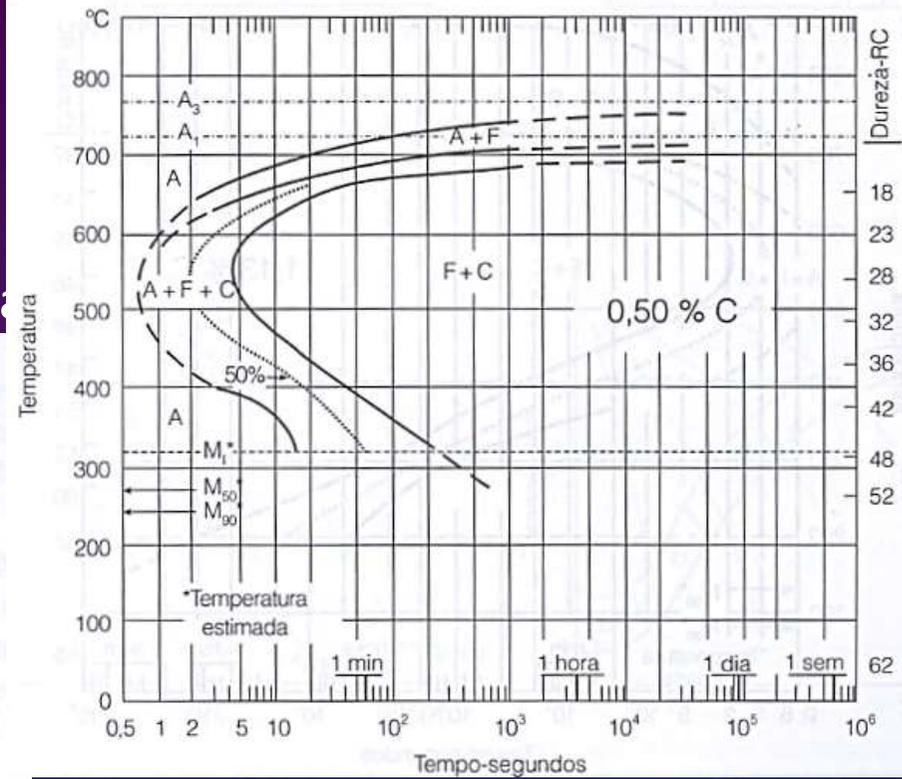
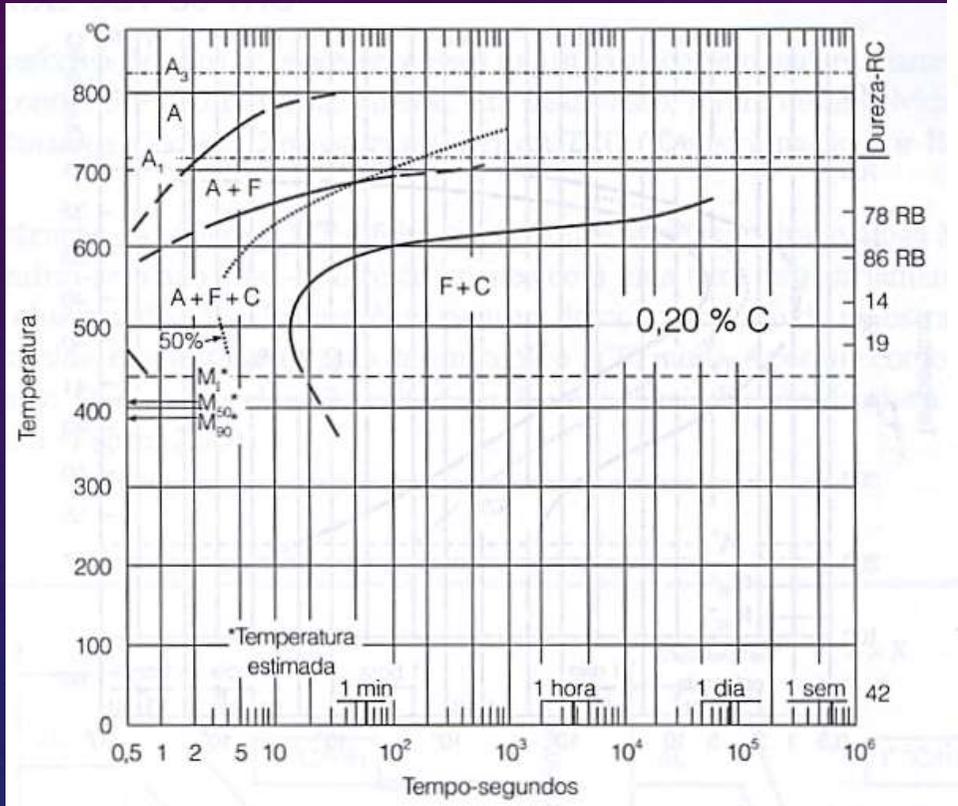
PROFA.DRA. LAURALICE CANALE

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 (aba



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*

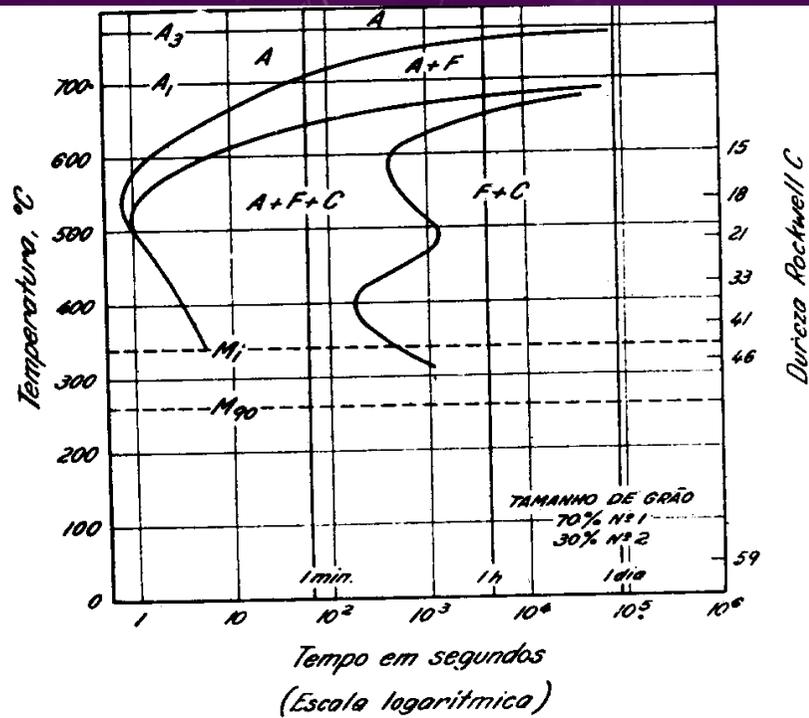


FIG. 25 — Curva TTT para aço AISI 1335 com 0,35% de carbono e 1,85% de manganês.

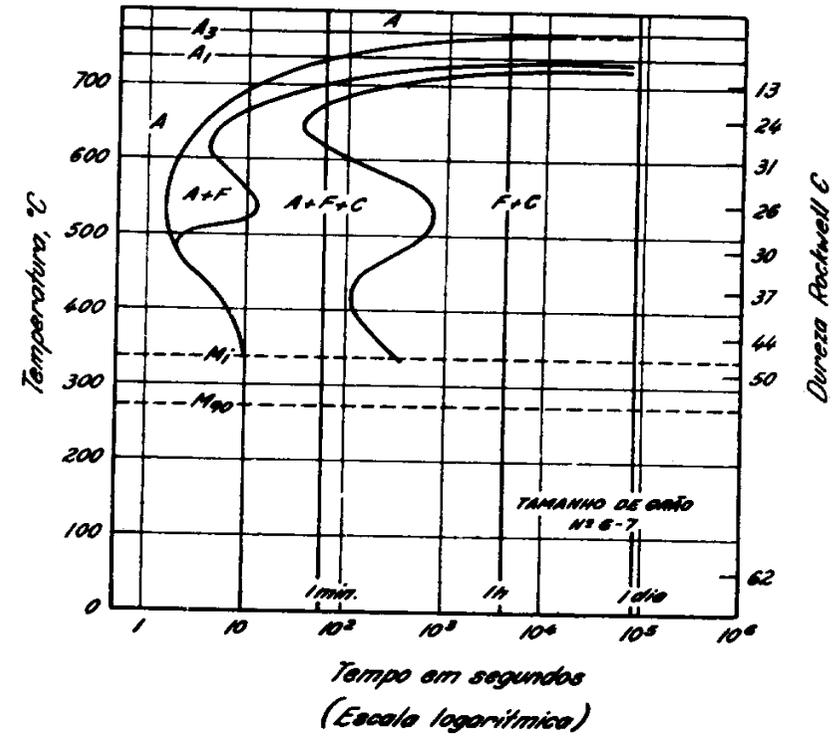


FIG. 27 — Curva TTT para aço AISI 5140 com 0,43% C, 0,68% Mn e 0,93% Cr.

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

COMPOSIÇÃO QUÍMICA/ELEMENTOS DE LIGA

AISI 4340 → m
contínuo

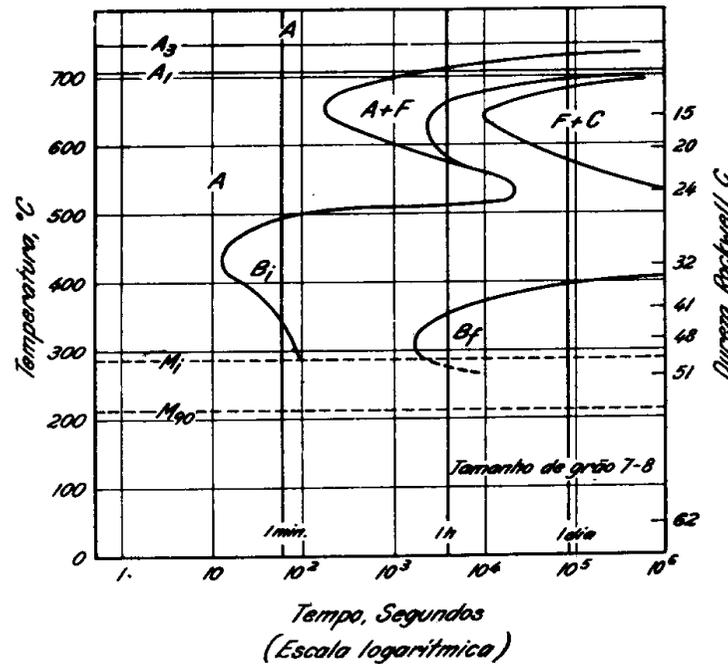


FIG. 28 — Curva TTT para aço AISI 4340 com 0,42% C, 0,78% Mn, 1,79% Ni, 0,80% Cr e 0,33% Mo.

por resfriamento

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



**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

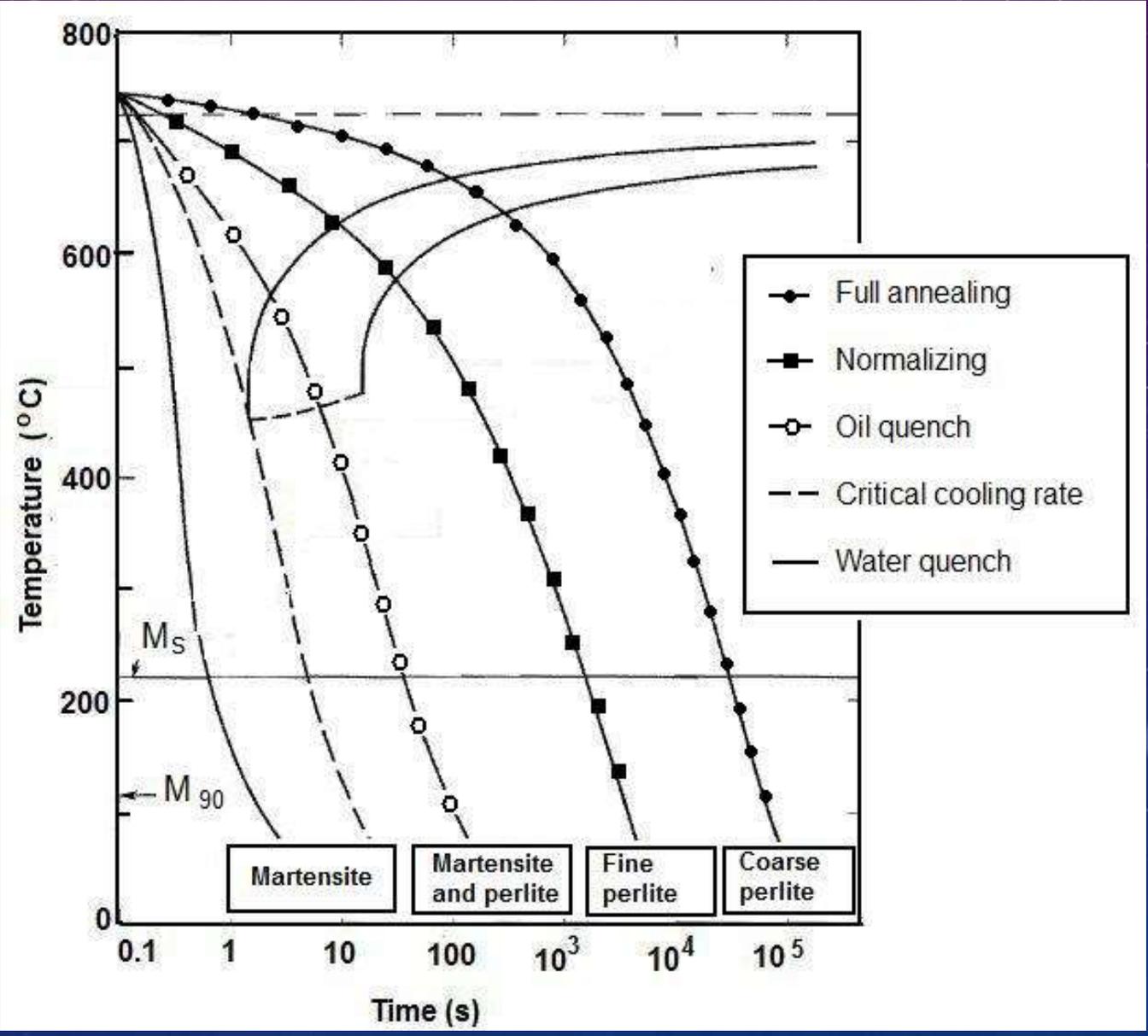
Quanto homogênea a austenita mais para a direita
deslocam-se as curvas TTT

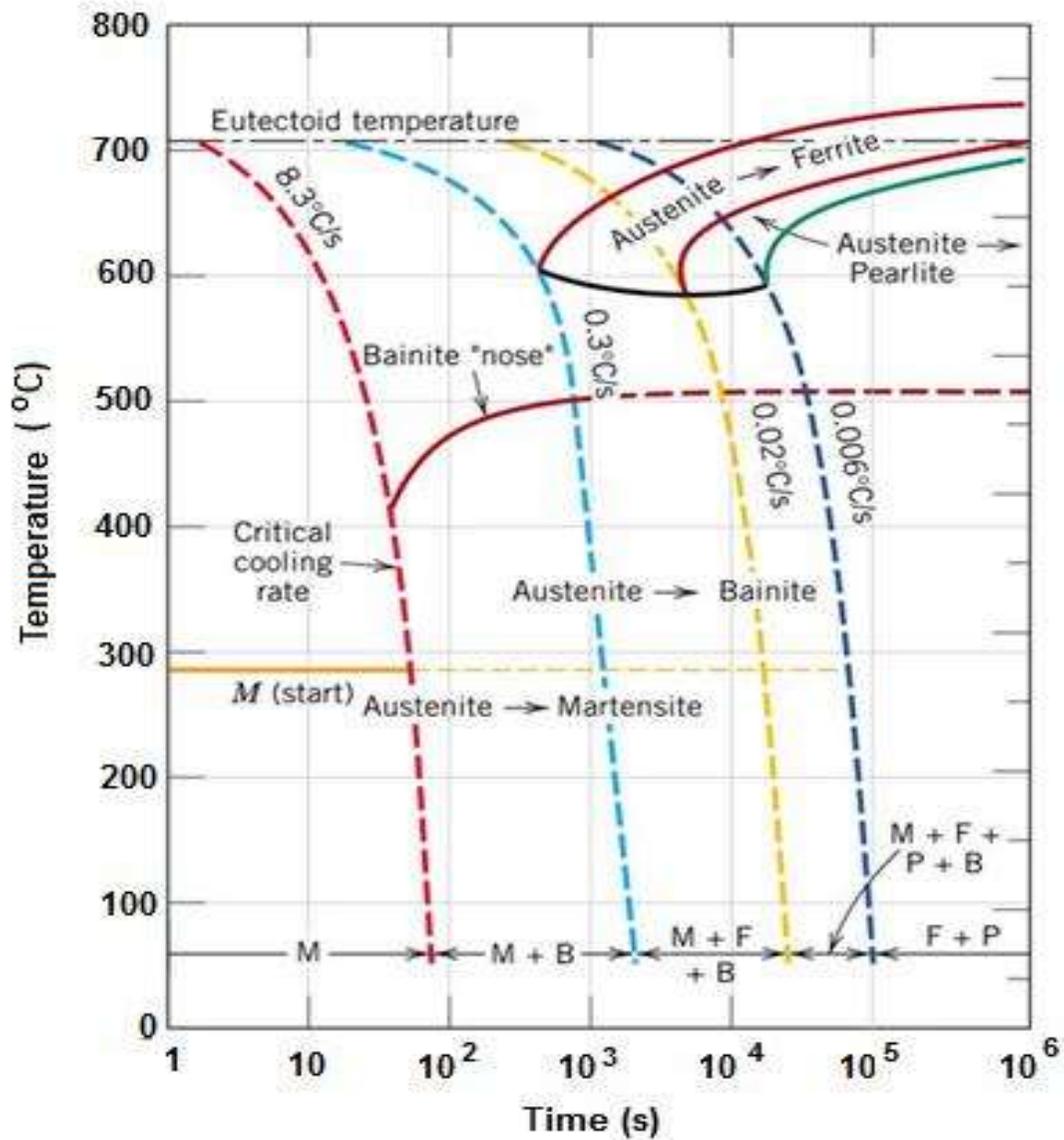


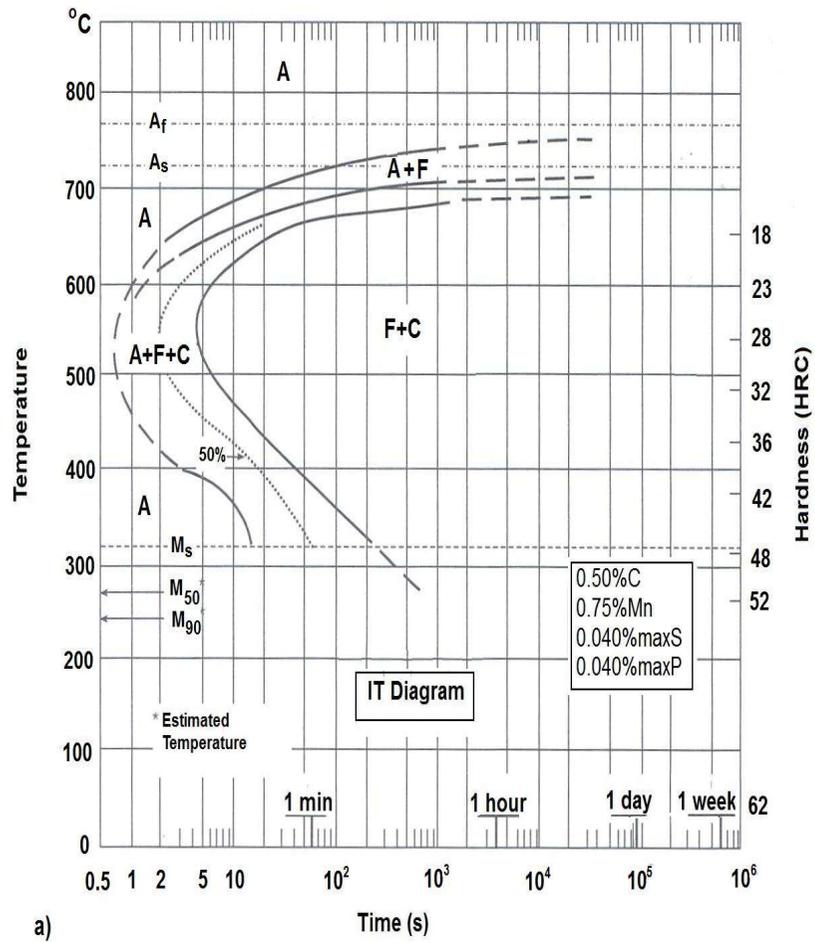
Os carbonetos residuais ou regiões ricas em C atuam
como núcleos para a formação da perlita



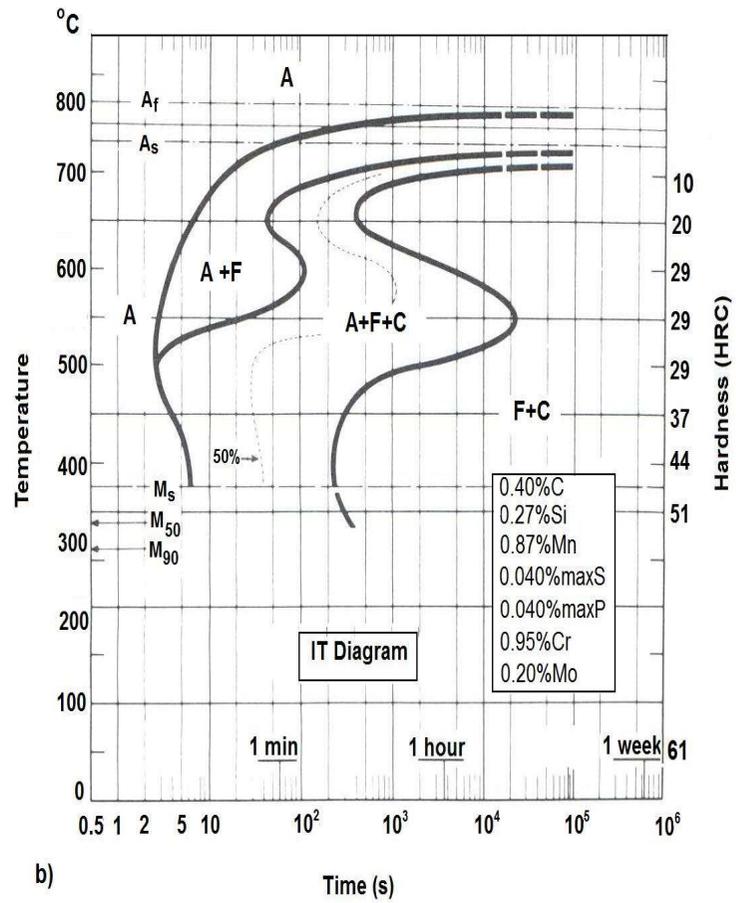
**Então, uma maior homogeneidade
favorece a formação da martensita**



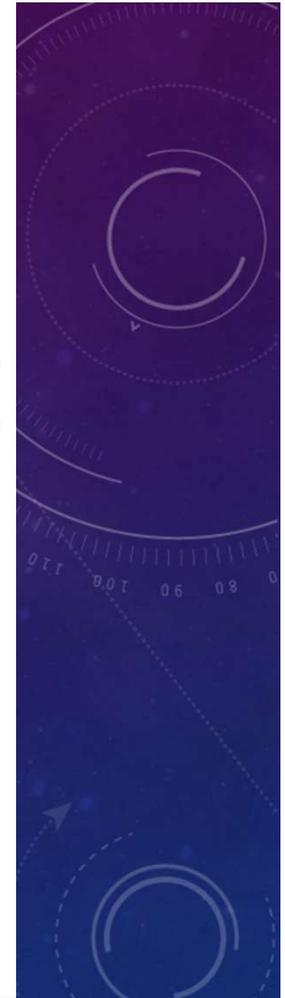




a)

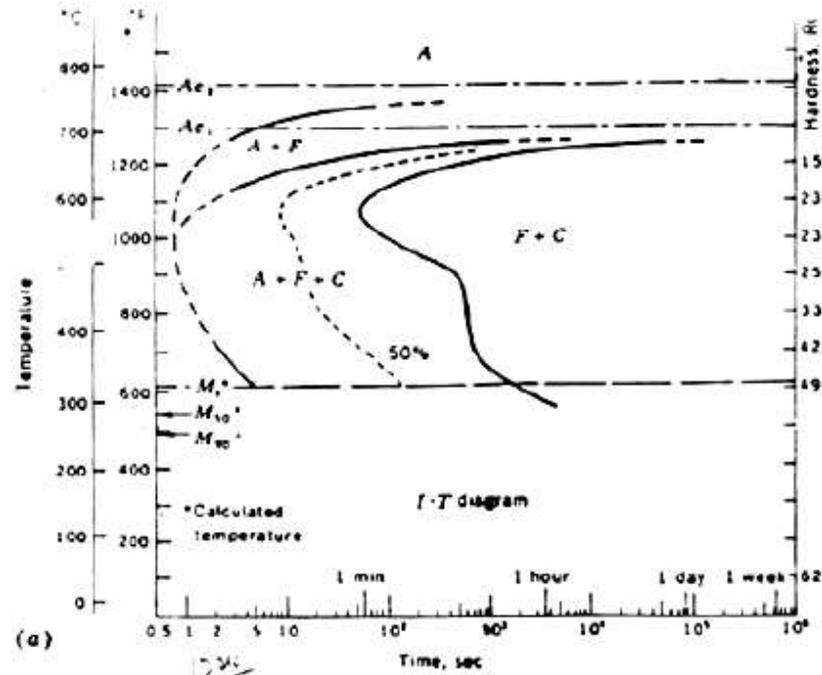


b)



1040
C+Mn

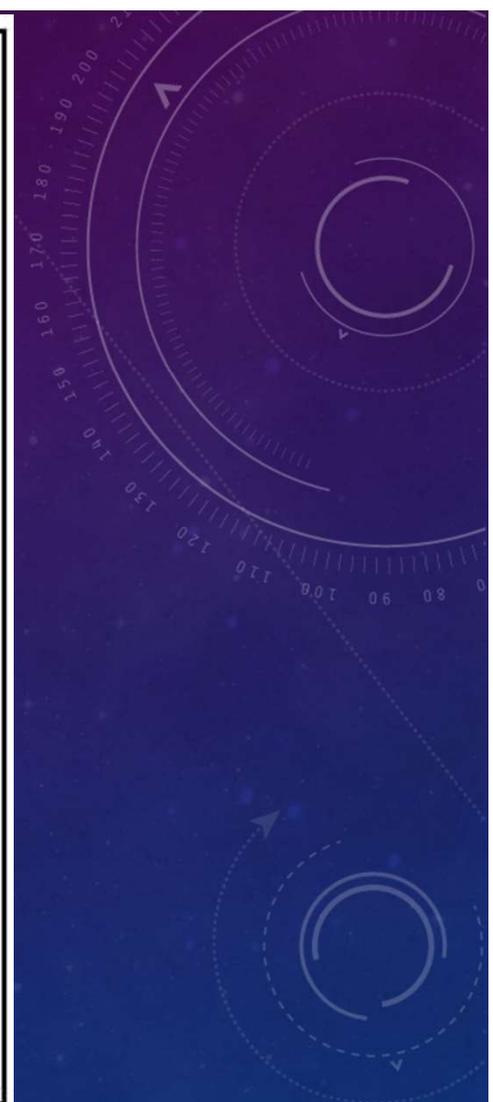
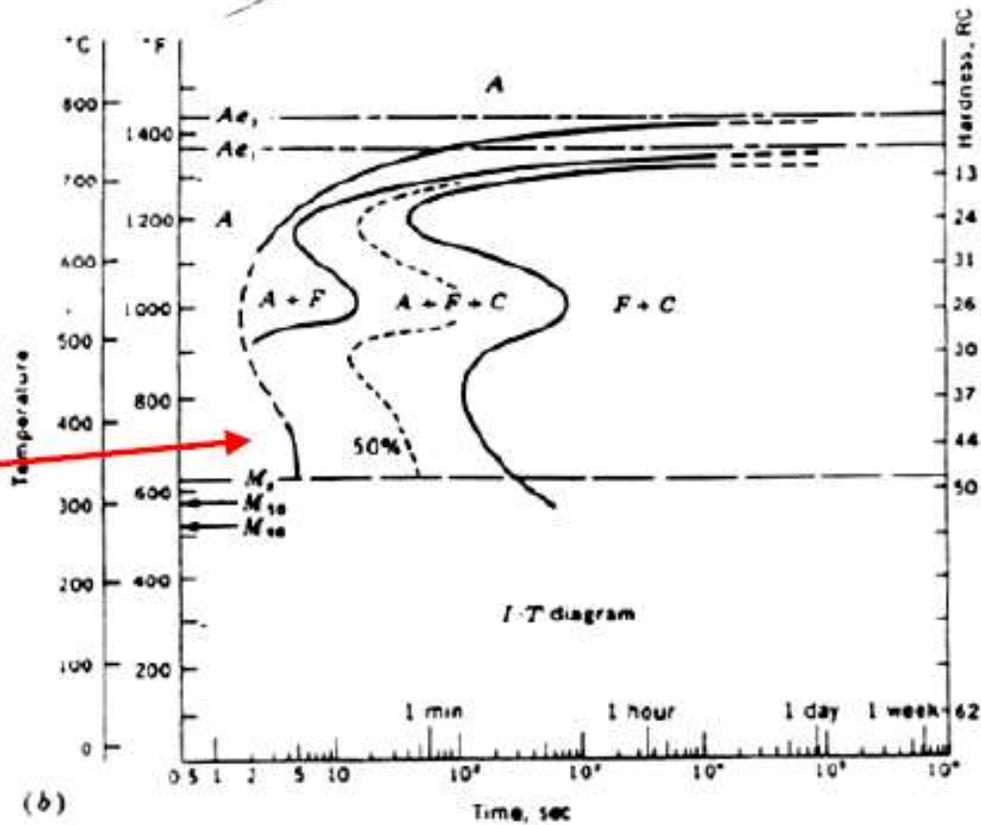
TTT curve - 1040



TTT curve - 5140

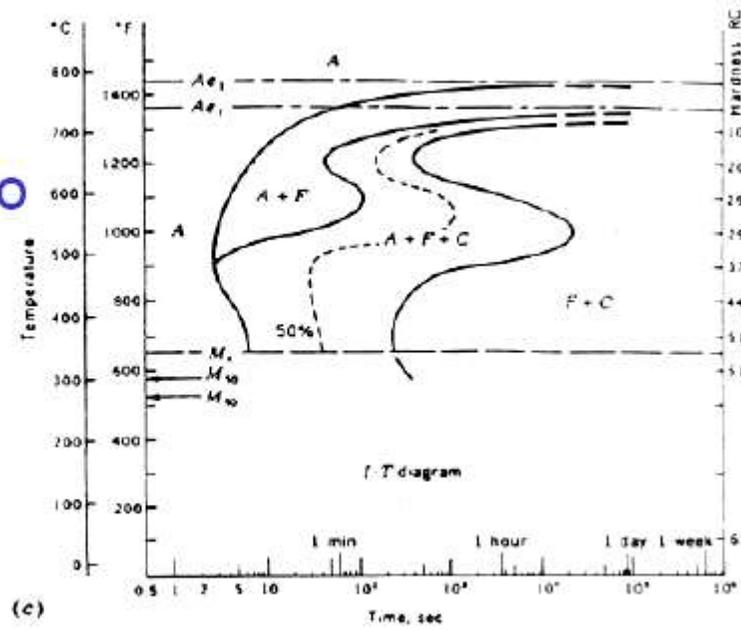
5140
C+Mn+Cr

Curve shifted
to right



TTT curve - 4140

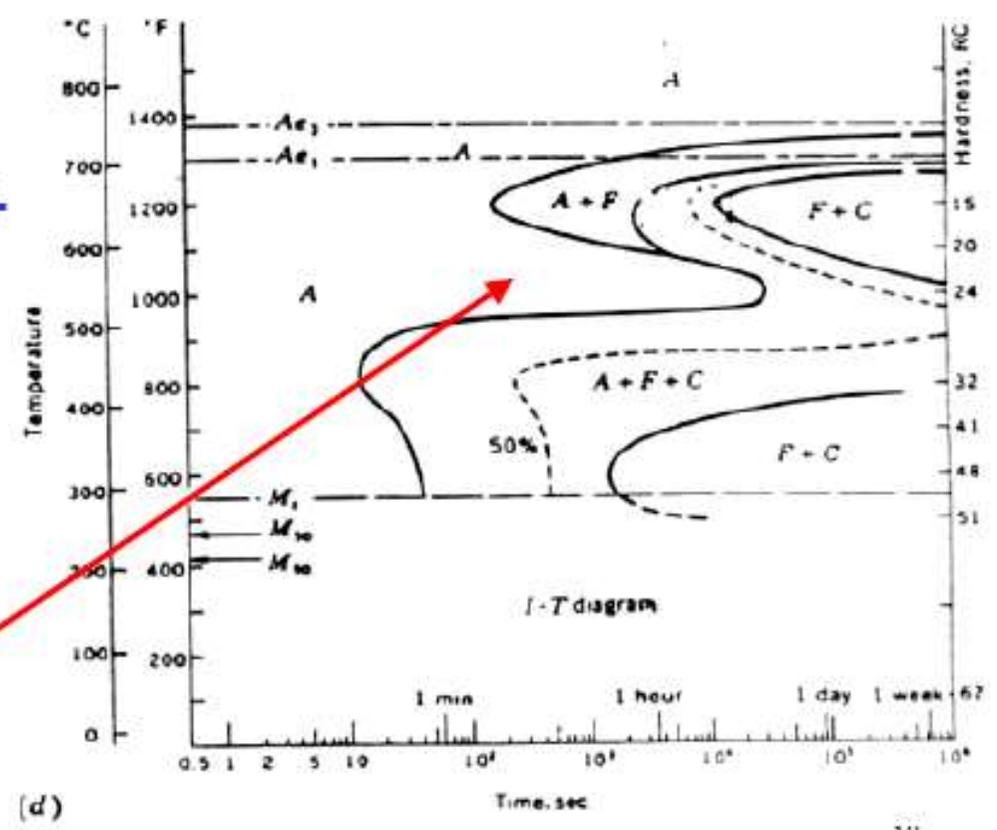
4140
C+Mn+Cr+Mo



TTT curve - 4340

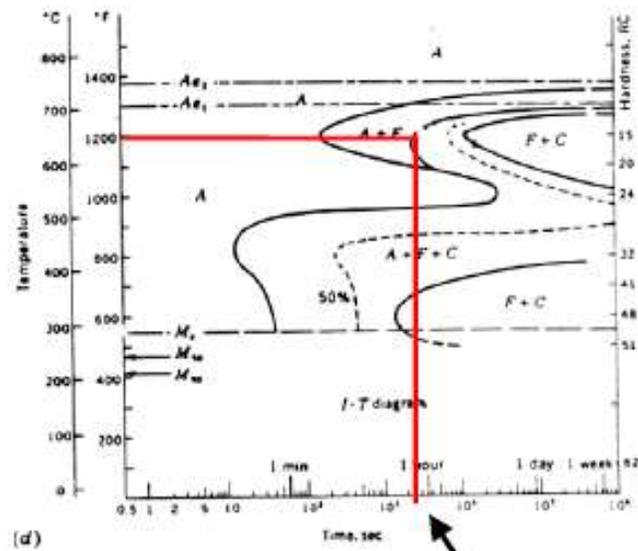
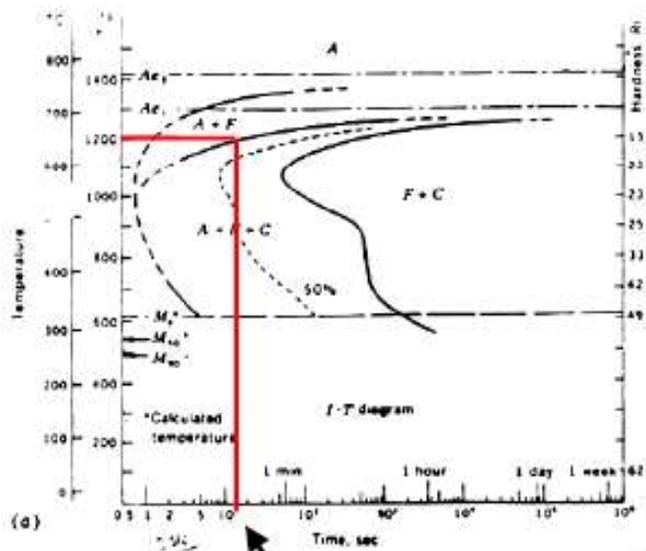
4340
C+Mn+Cr+
Ni+Mo

Separation of
pearlite and
bainite nose



1040

4340



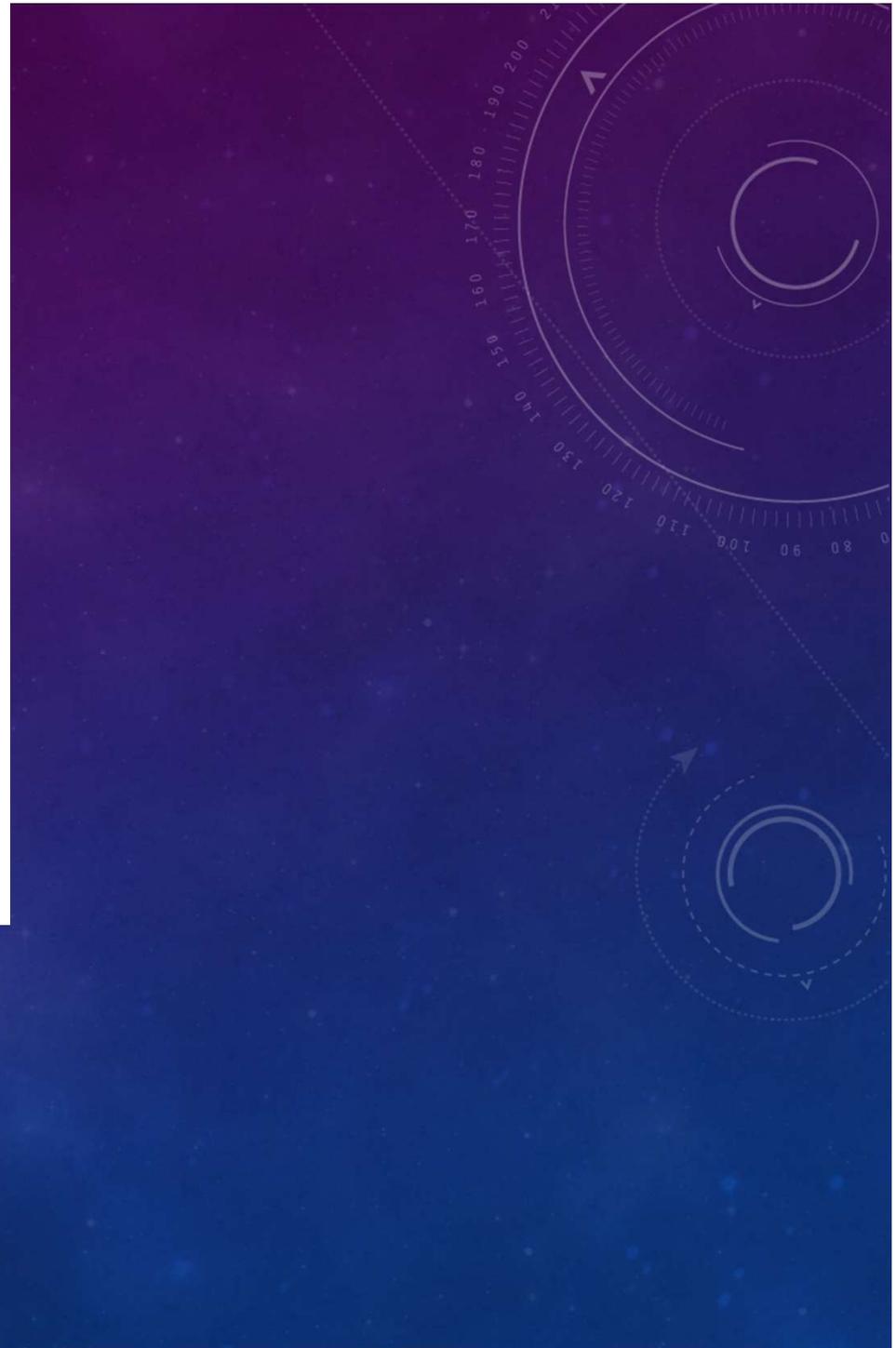
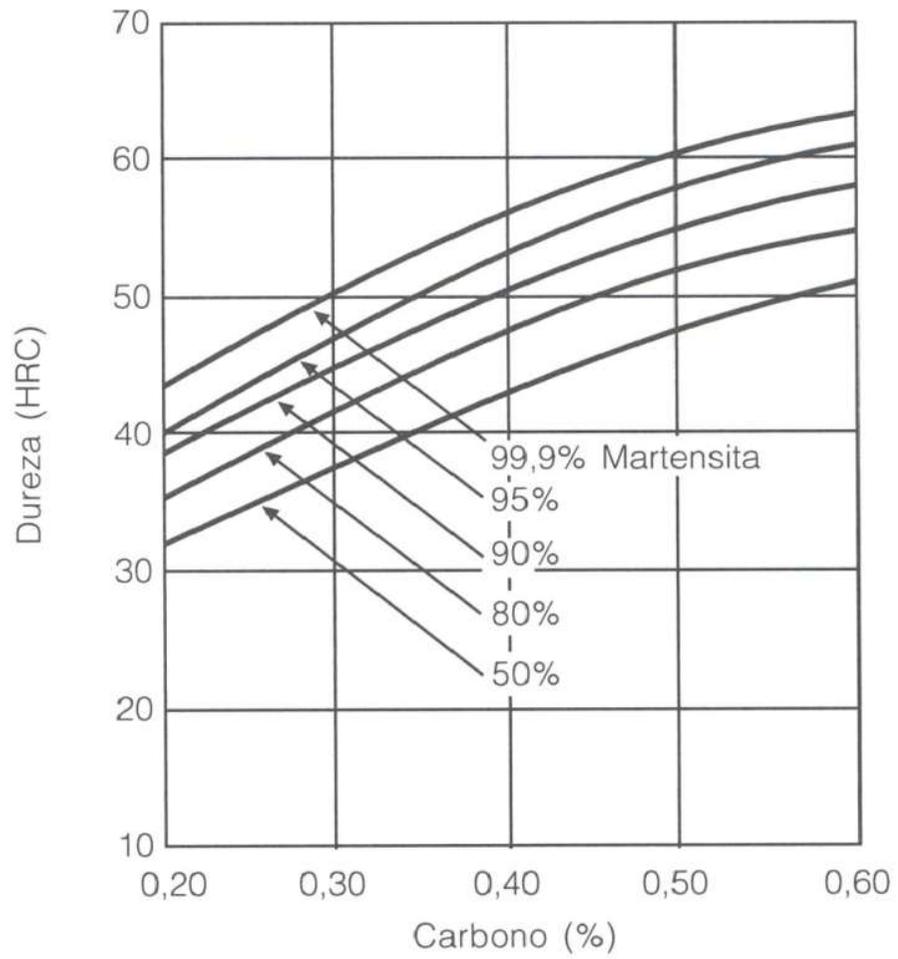
15 sec

1 hour

TTT Curves (1040, 5140, 4140, 4340)

5. B_f (bainite finish) times @ T_{transf} 345°C

| Grade | B_f time (seconds) | (minutes) |
|-------|-------------------------|-----------|
| 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)

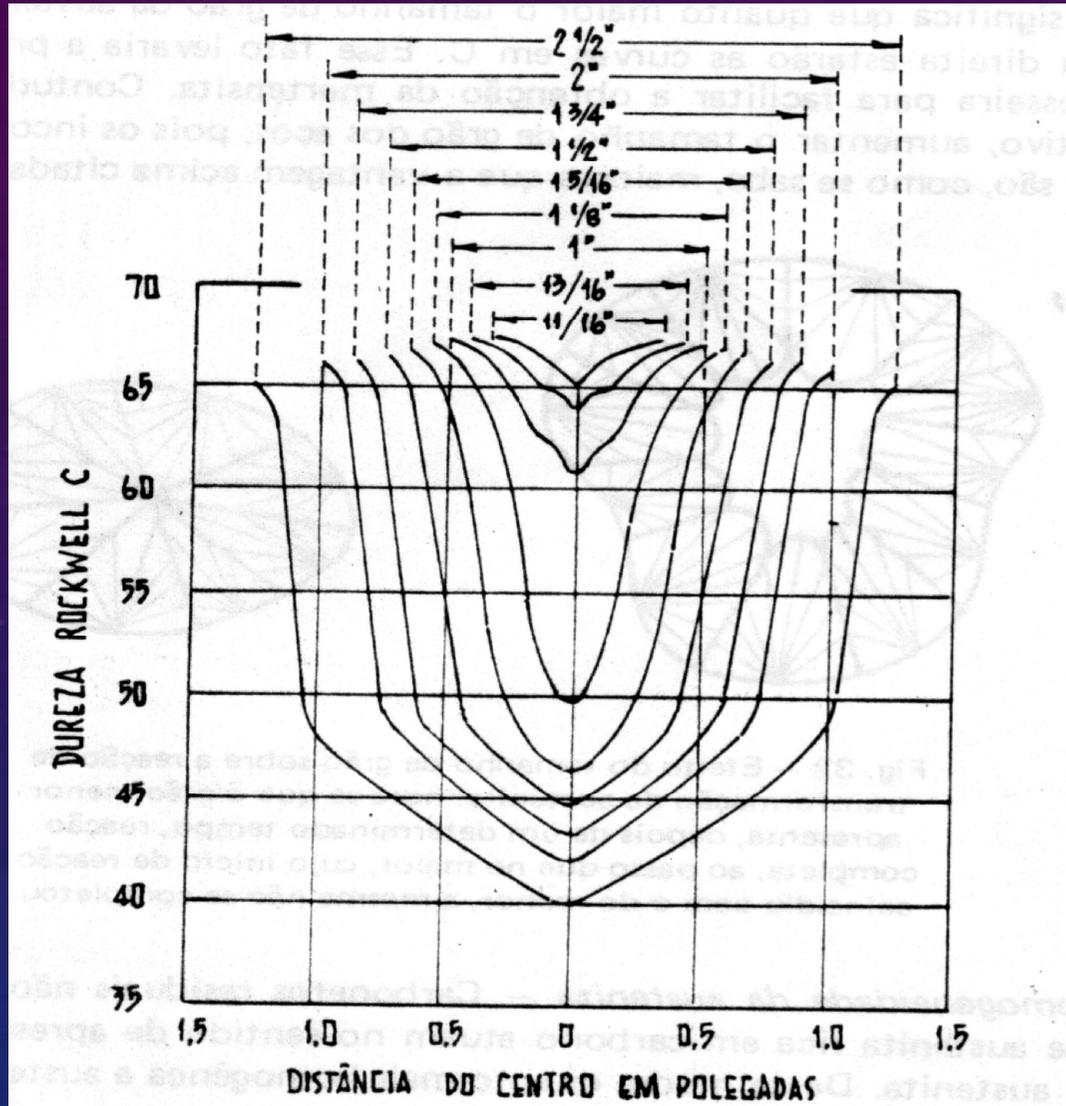
- Neste método, barras cilíndricas de aço, de diâmetros crescentes são austenitizadas e resfriadas rapidamente, em condições controladas para transformação da austenita em martensita
- Secções transversais das barras são a seguir submetidas à determinação de dureza do centro à superfície
- Traça-se um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

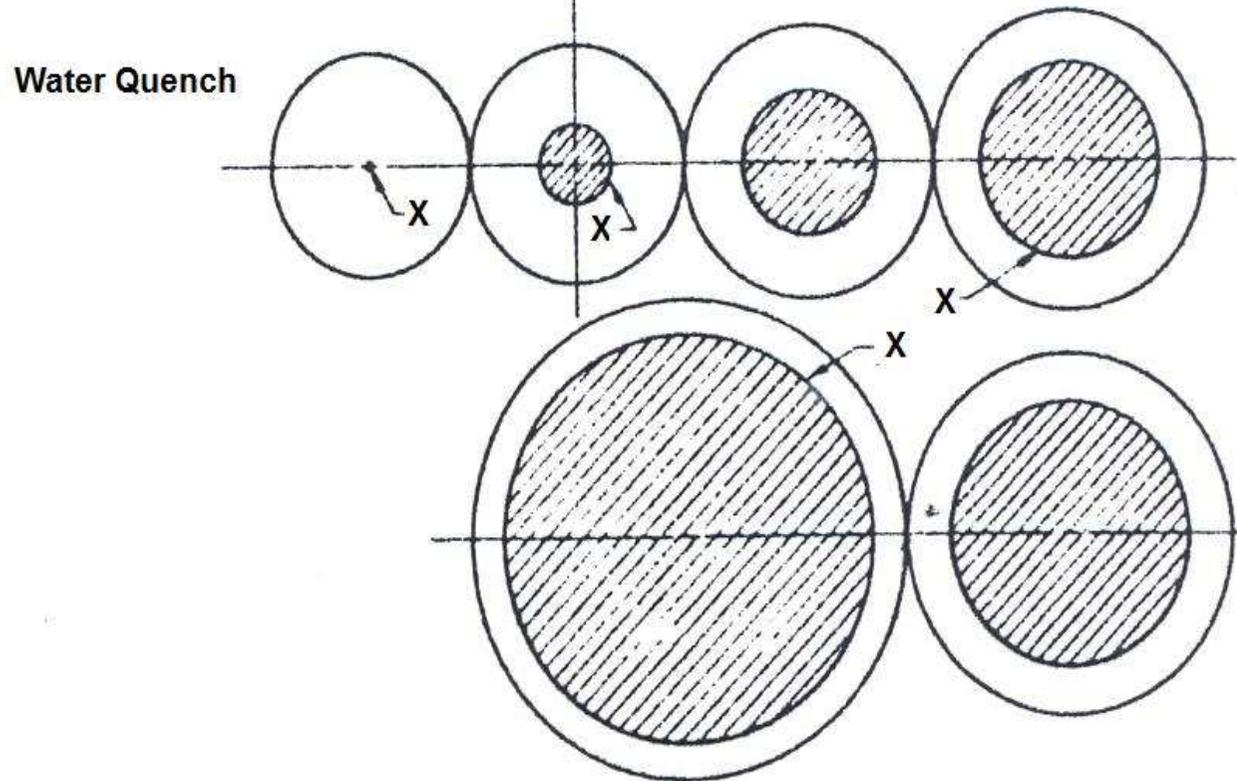
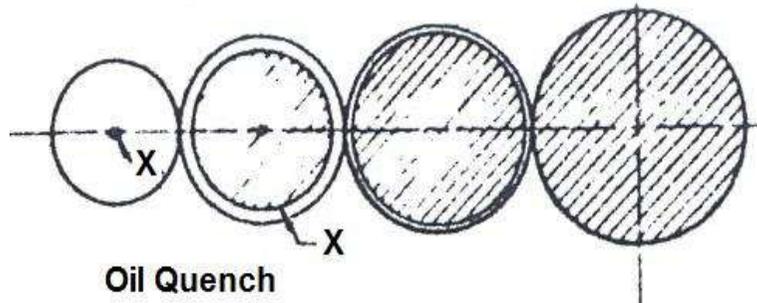
MÉTODO DE GROSSMAN (DIÂMETRO CRÍTICO)

- **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.

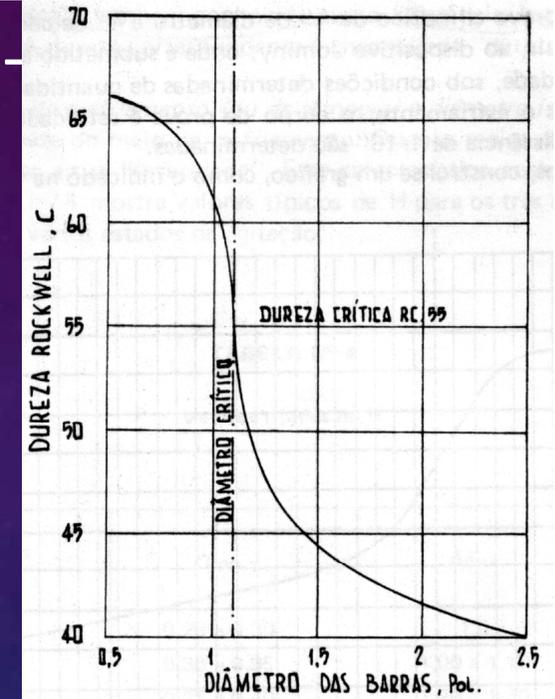
MÉTODO DE GROSSMAN (DIÂMETER CRÍTICO)





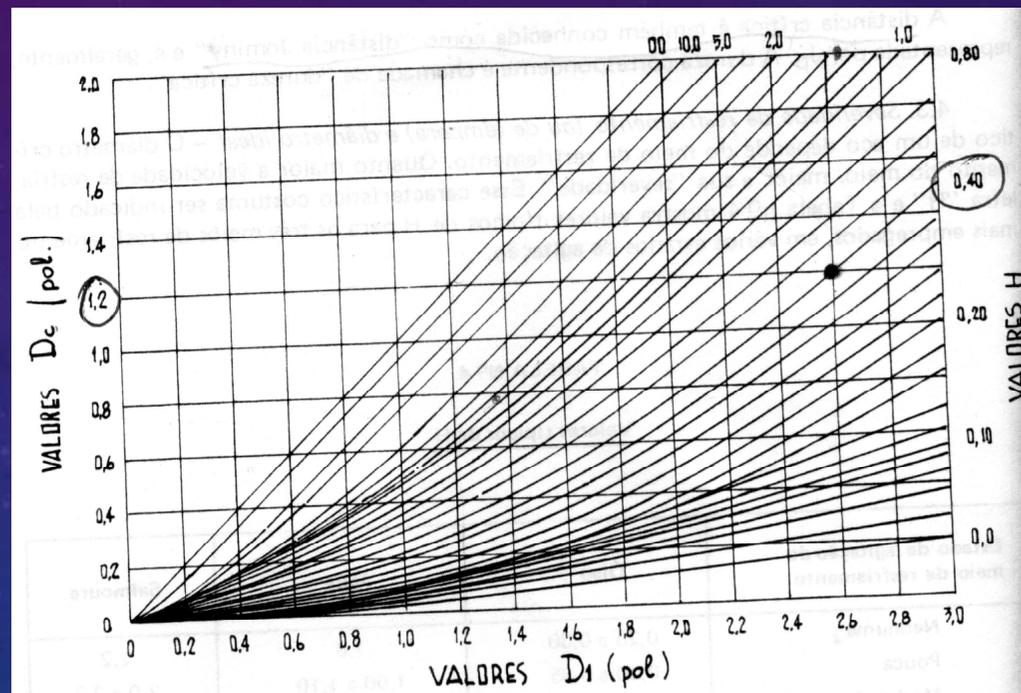
MÉTODO DE GROSSMAN(DIÂMETRO CRÍTICO)

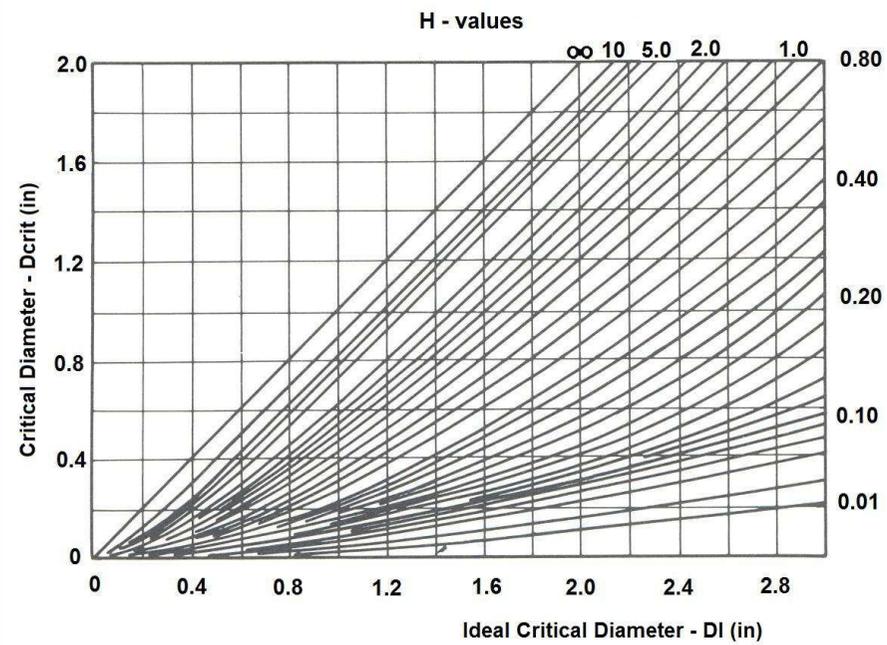
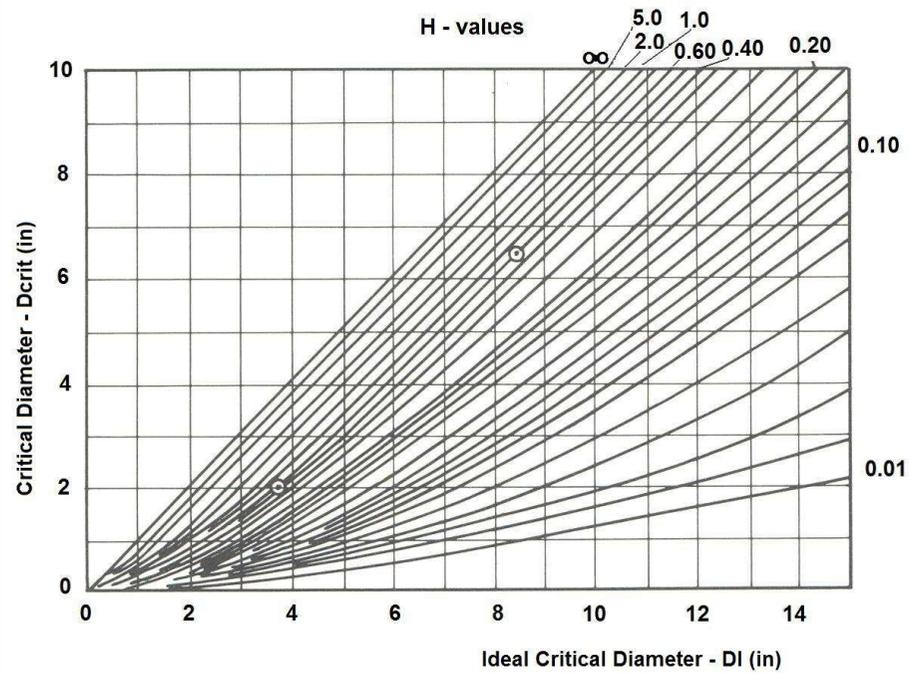
- Diâmetro crítico corresponde ao diâmetro da barra que mostrará no centro 50% de martensita
- **O diâmetro crítico pode ser determinado graficamente, sendo o diâmetro da barra para a qual se verifica a mais brusca queda de dureza em um gráfico dos diâmetros das barras por durezas dos centros das barras**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



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 γ
grain size and
%C on D_1

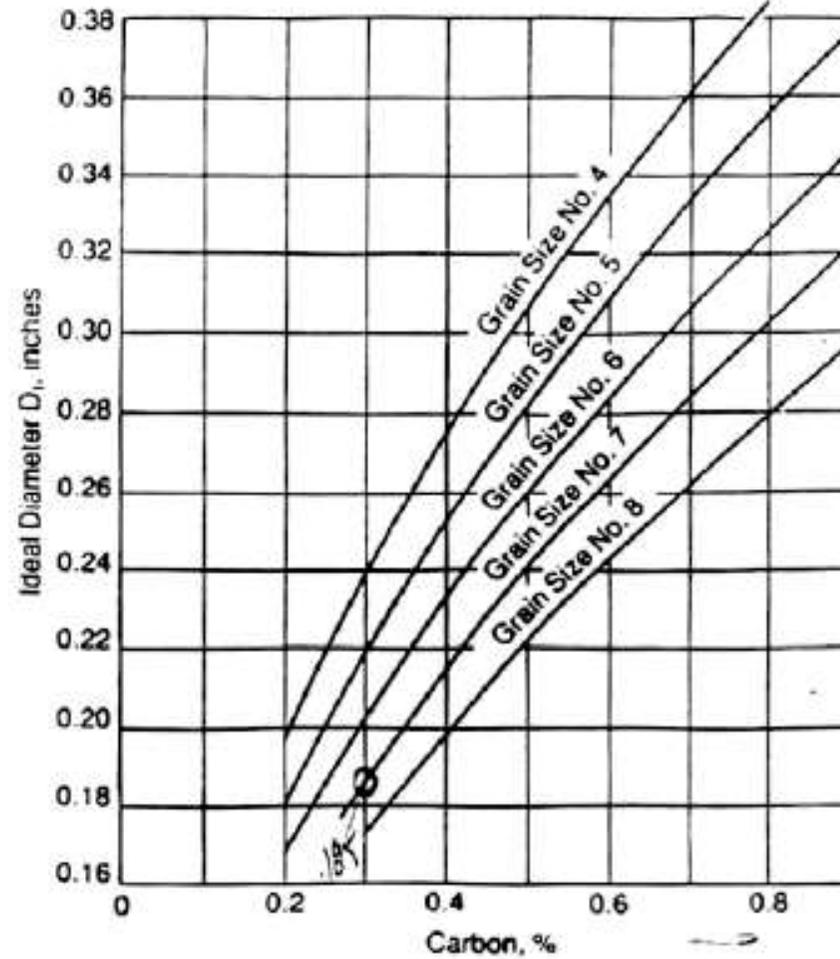
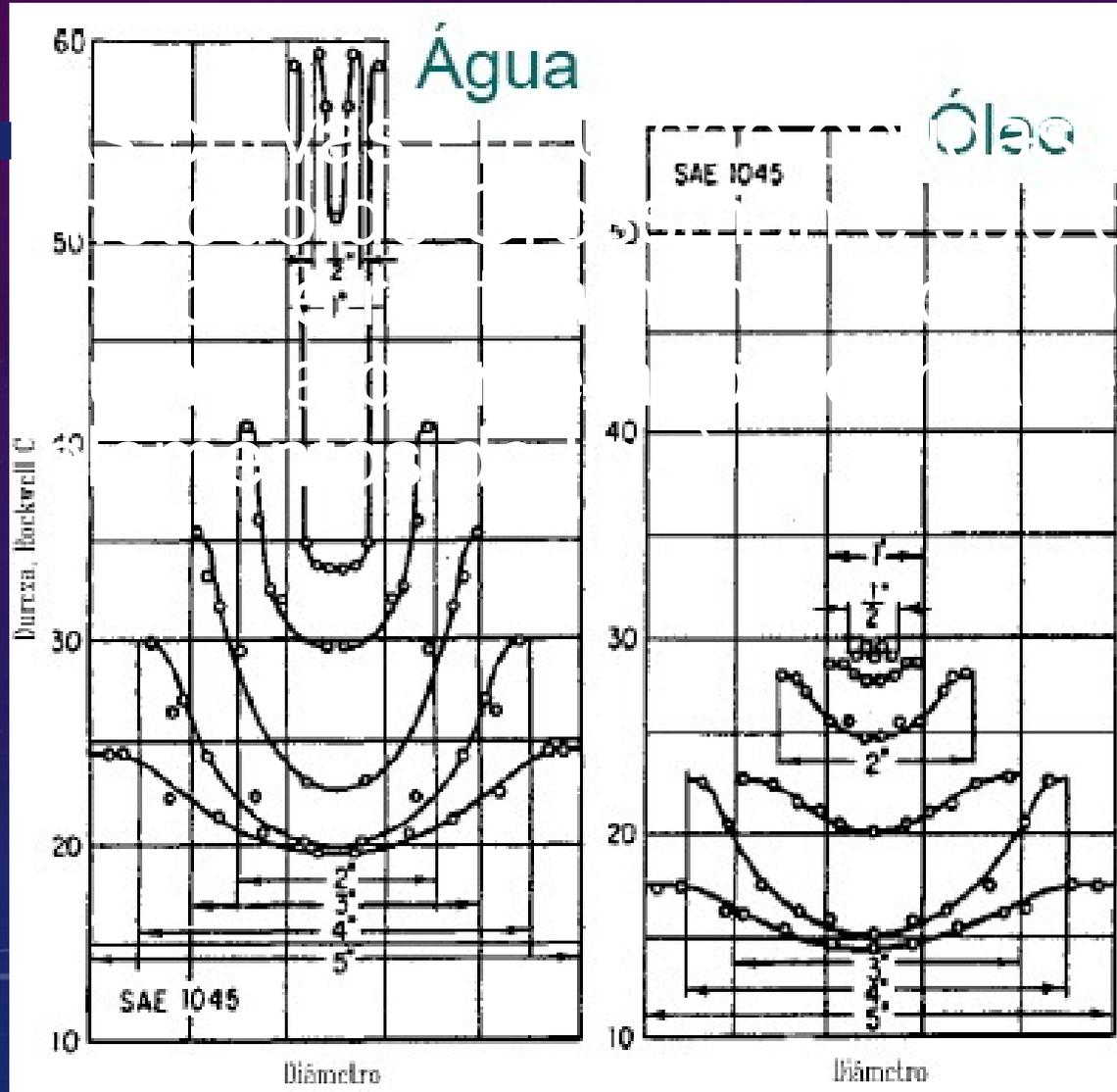


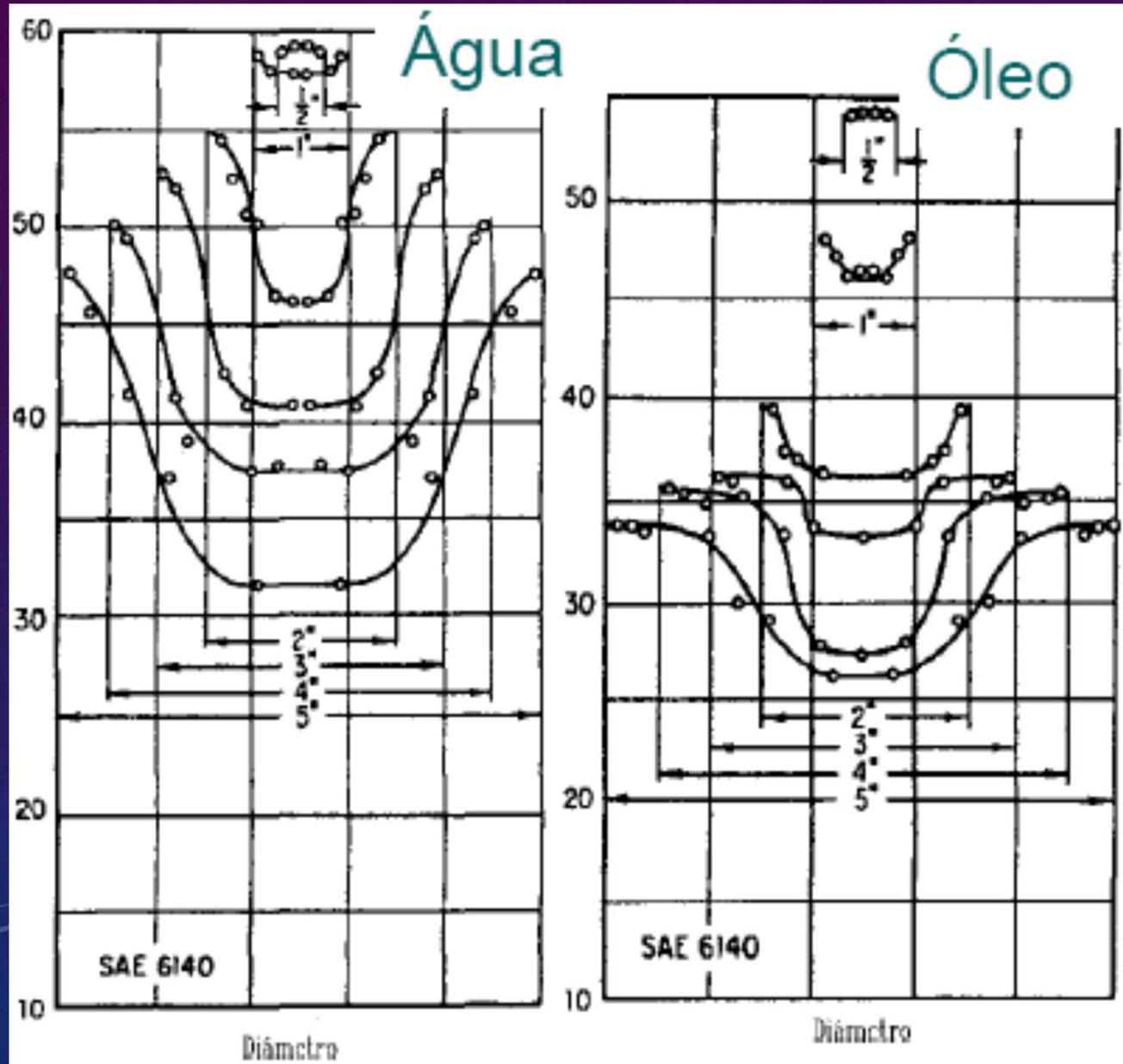
Figure 4-4 Smith

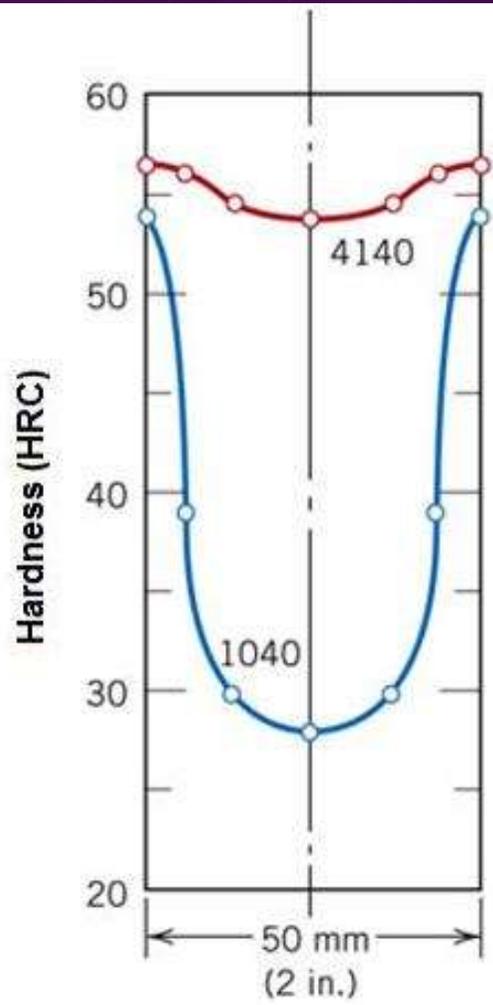
CURVAS EM U



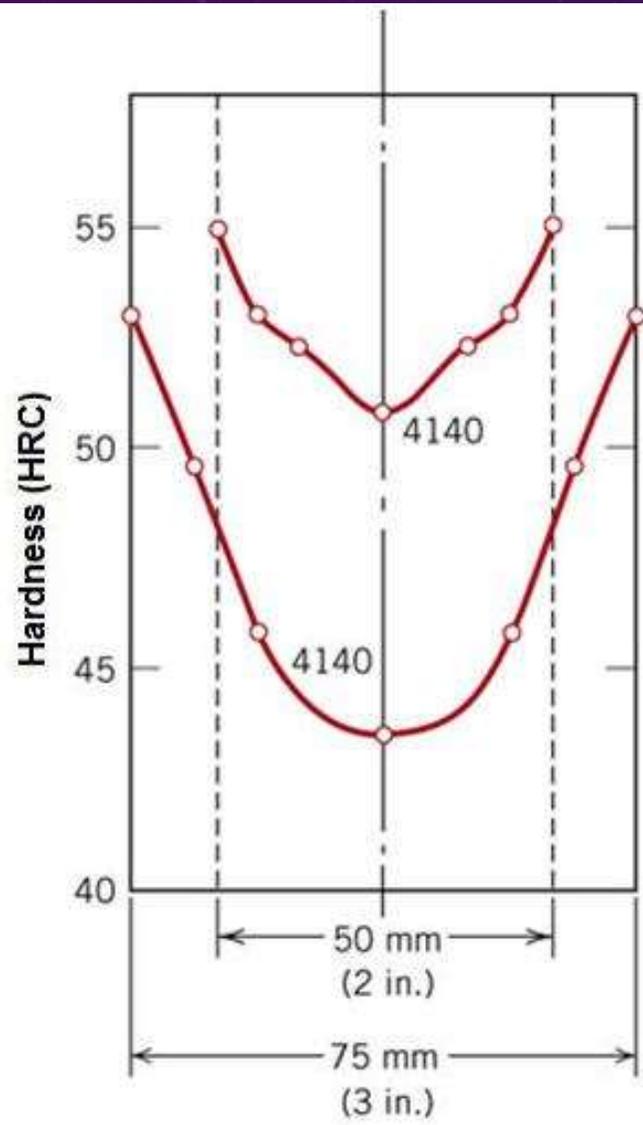
por meio do
dependentes do
composição
em de carbono e

CURVAS EM U





(a)

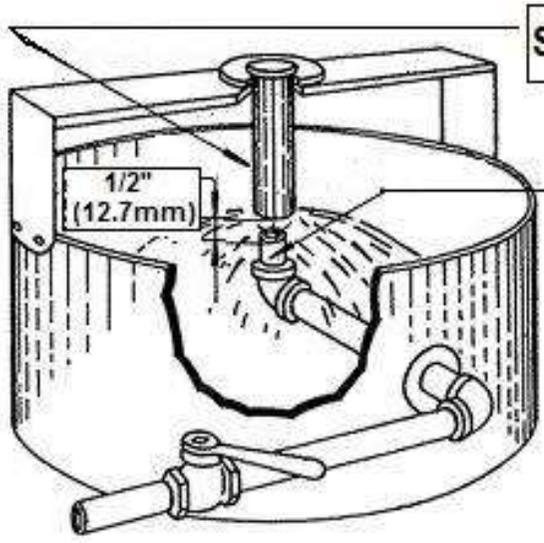
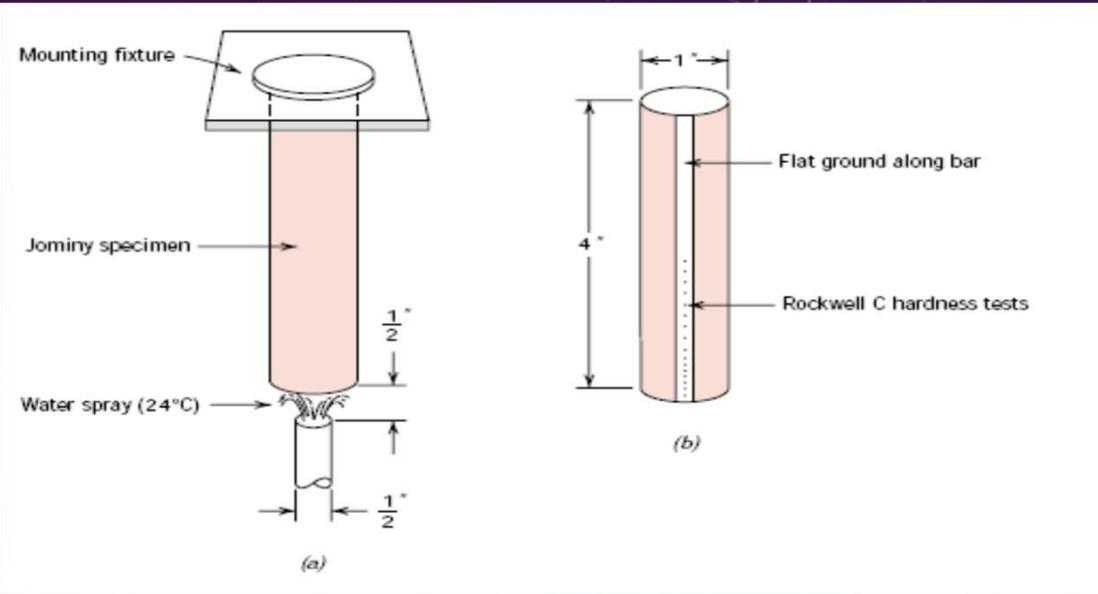


(b)

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



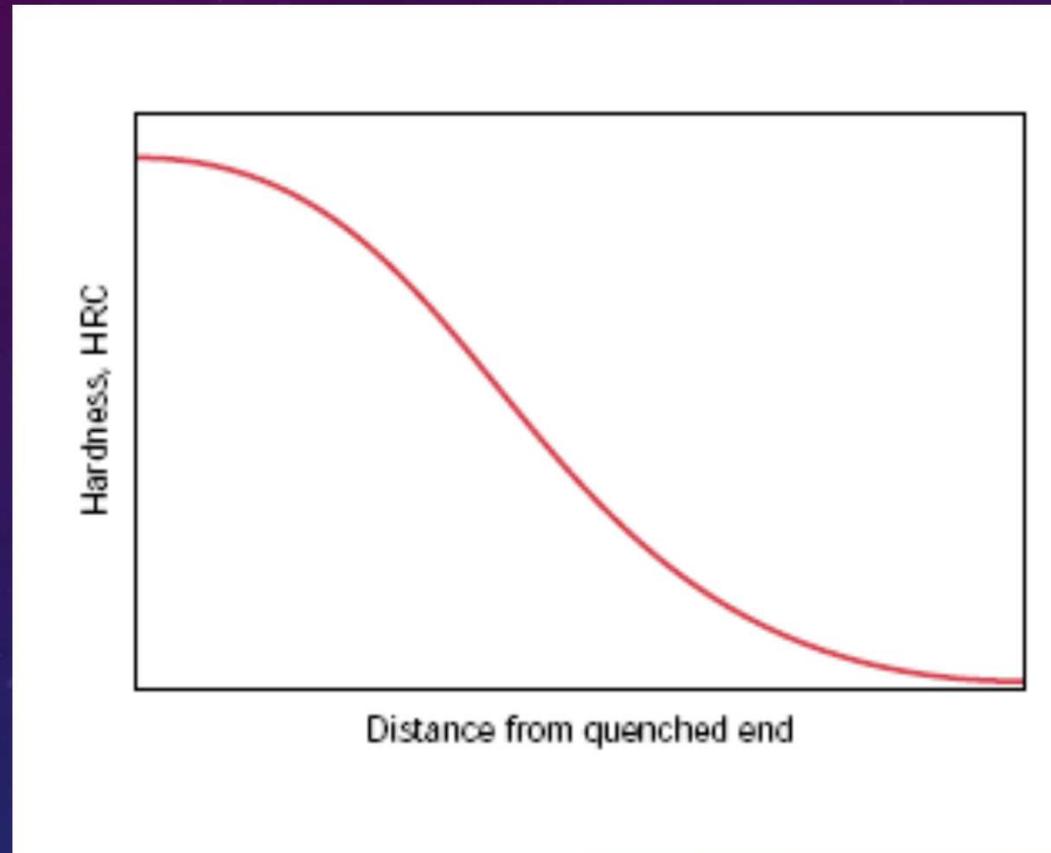
Sample - ϕ 1"x 4" (ϕ 25.4mm x 101.6mm)

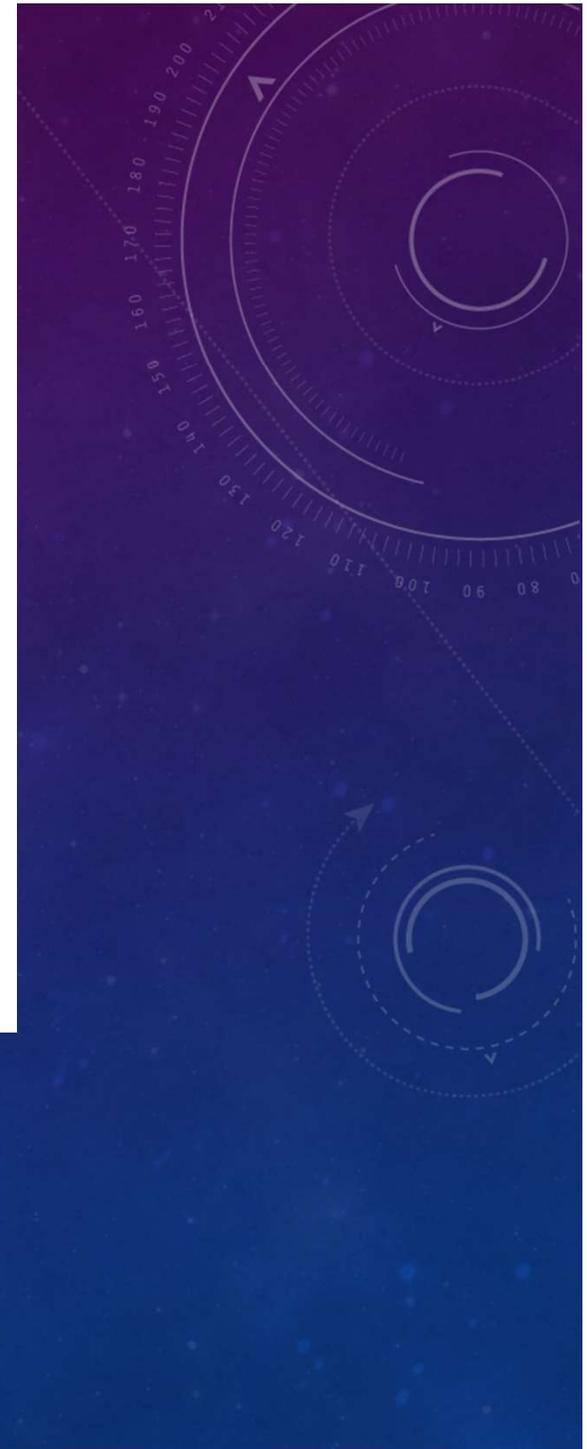
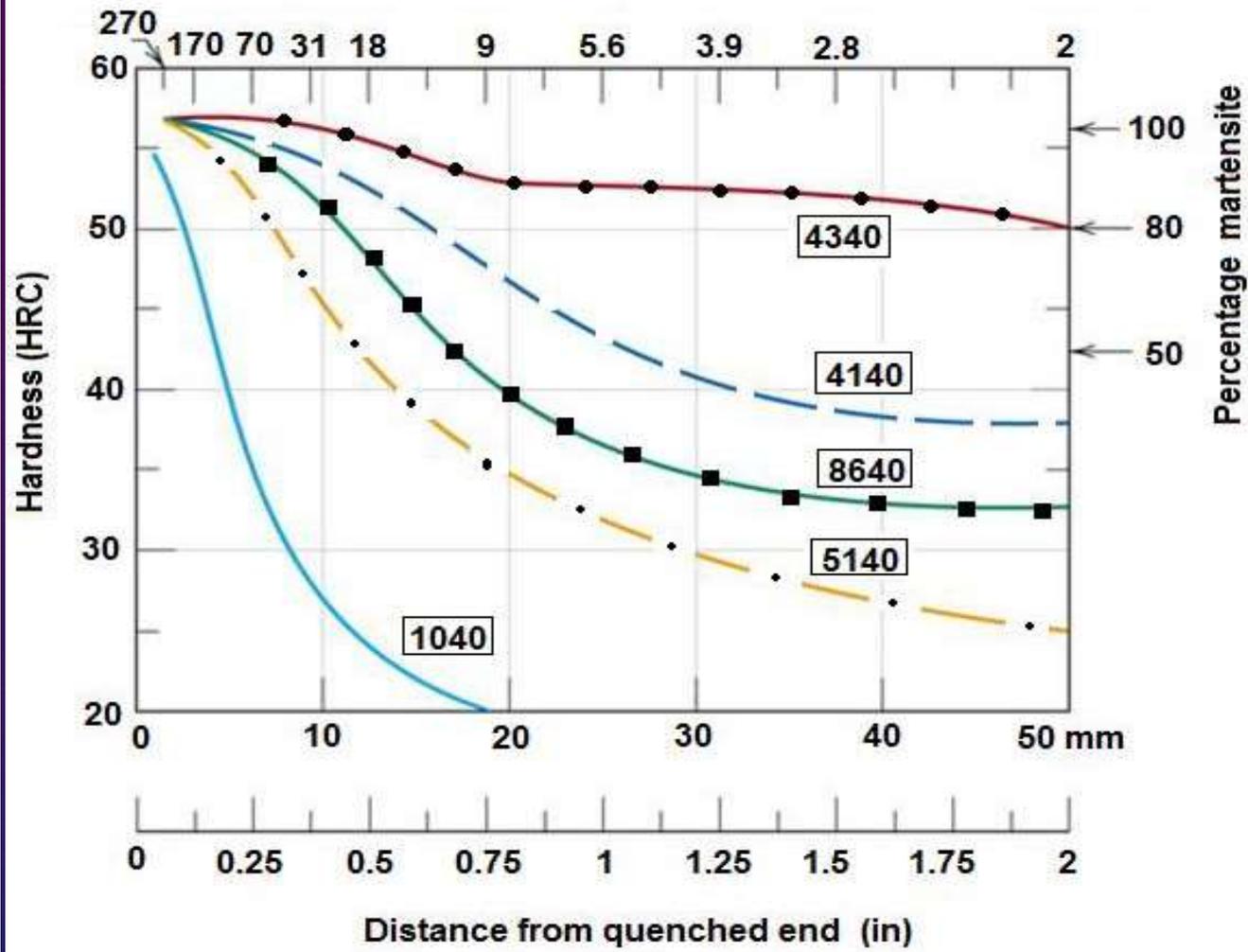
Pipe spraying water- 1/2" (12.7mm)

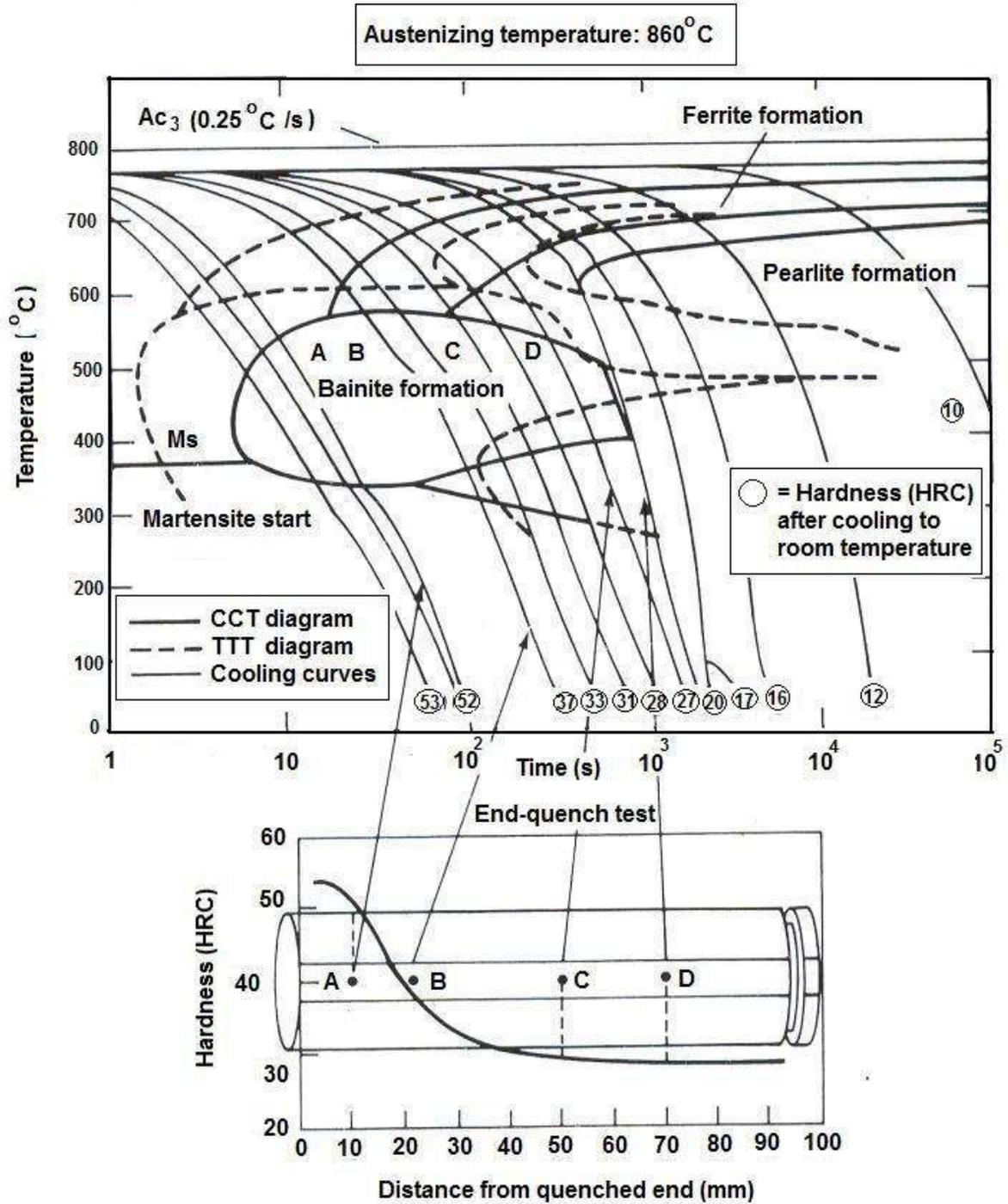
ENSAIO JOMINY

- **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



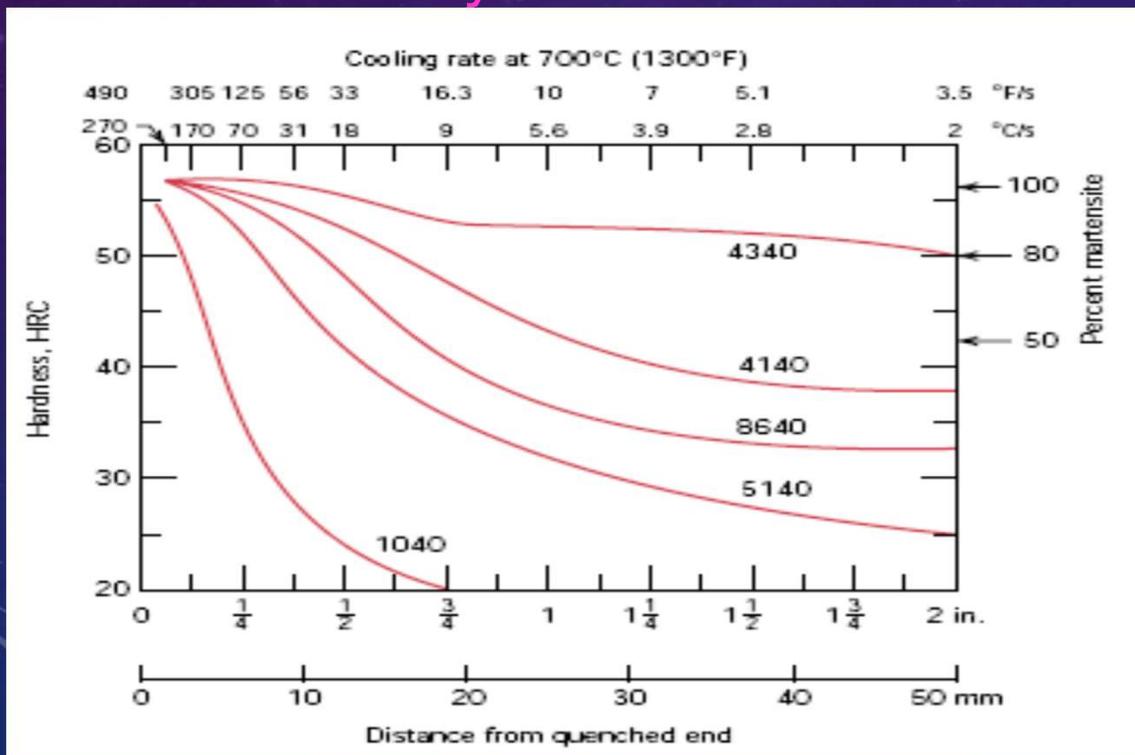




correlação
corpo de

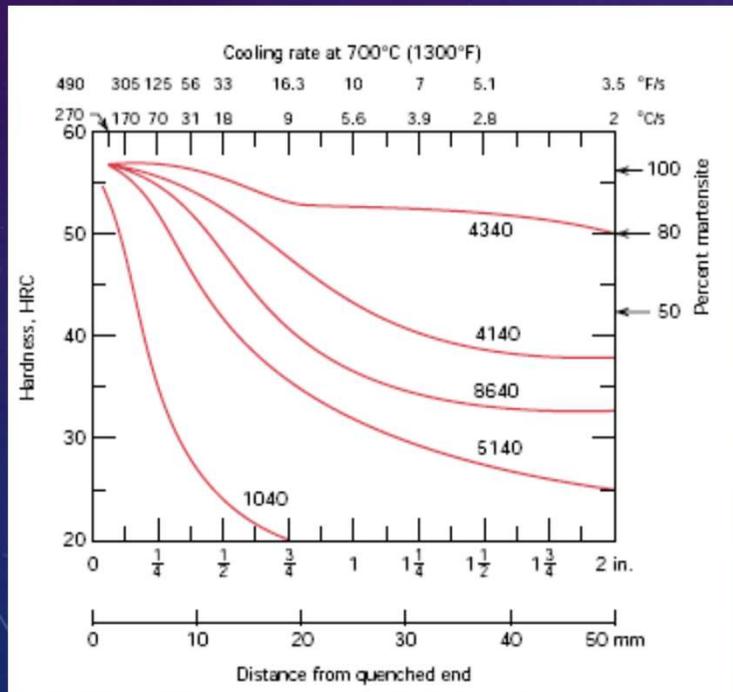
INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS DE LIGA

- 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



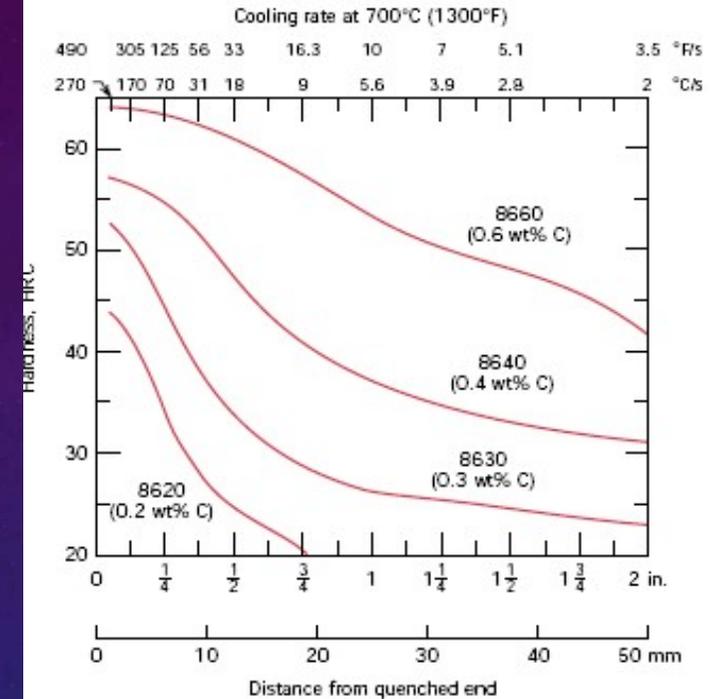
INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS DE LIGA

- 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

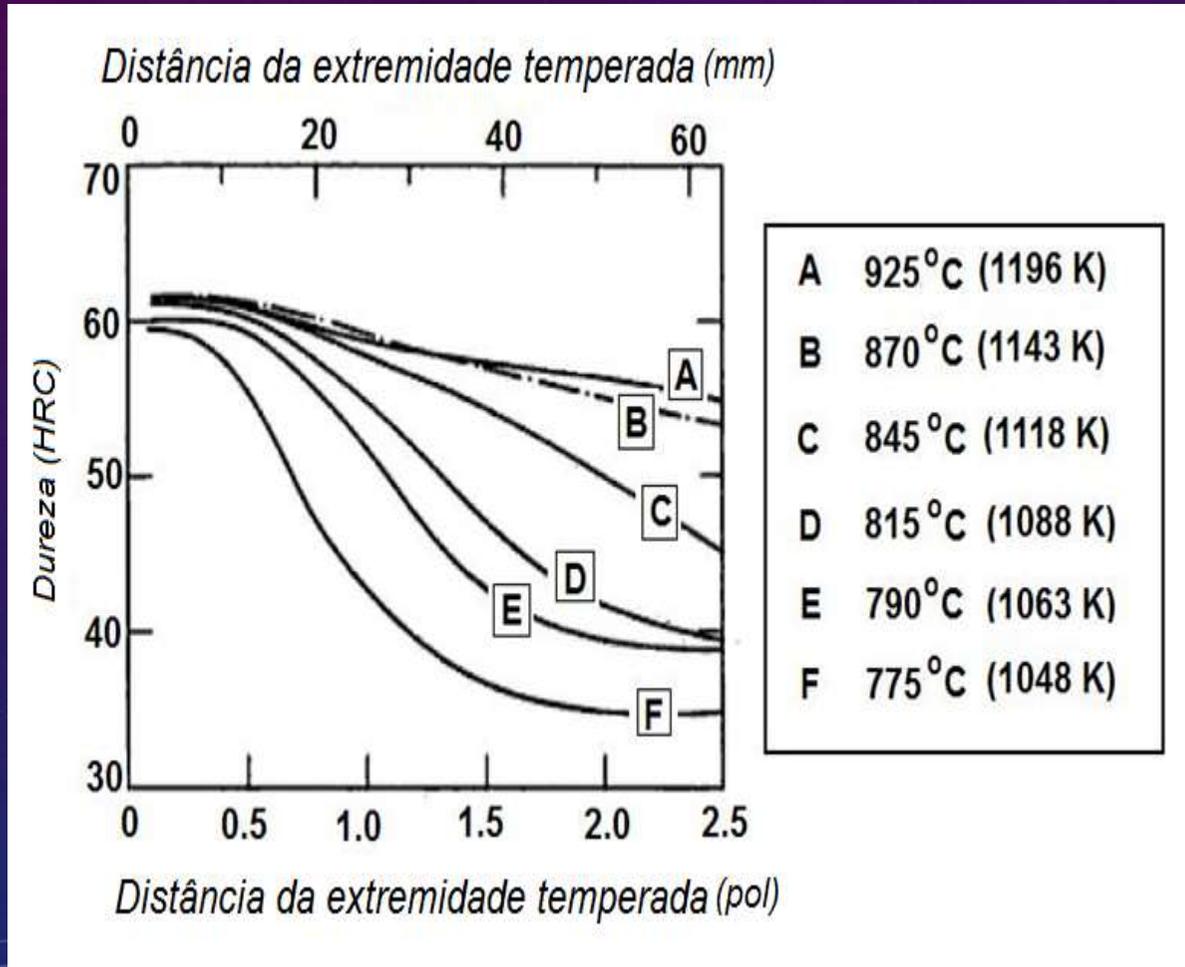


INFLUÊNCIA DO TEOR DE CARBONO

- 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**

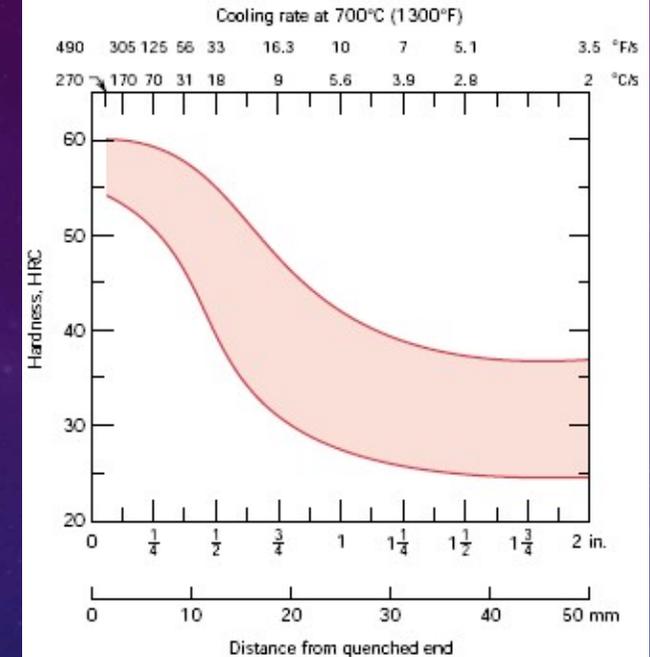


INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NA TEMPERABILIDADE DE UM AÇO SAE 4150



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

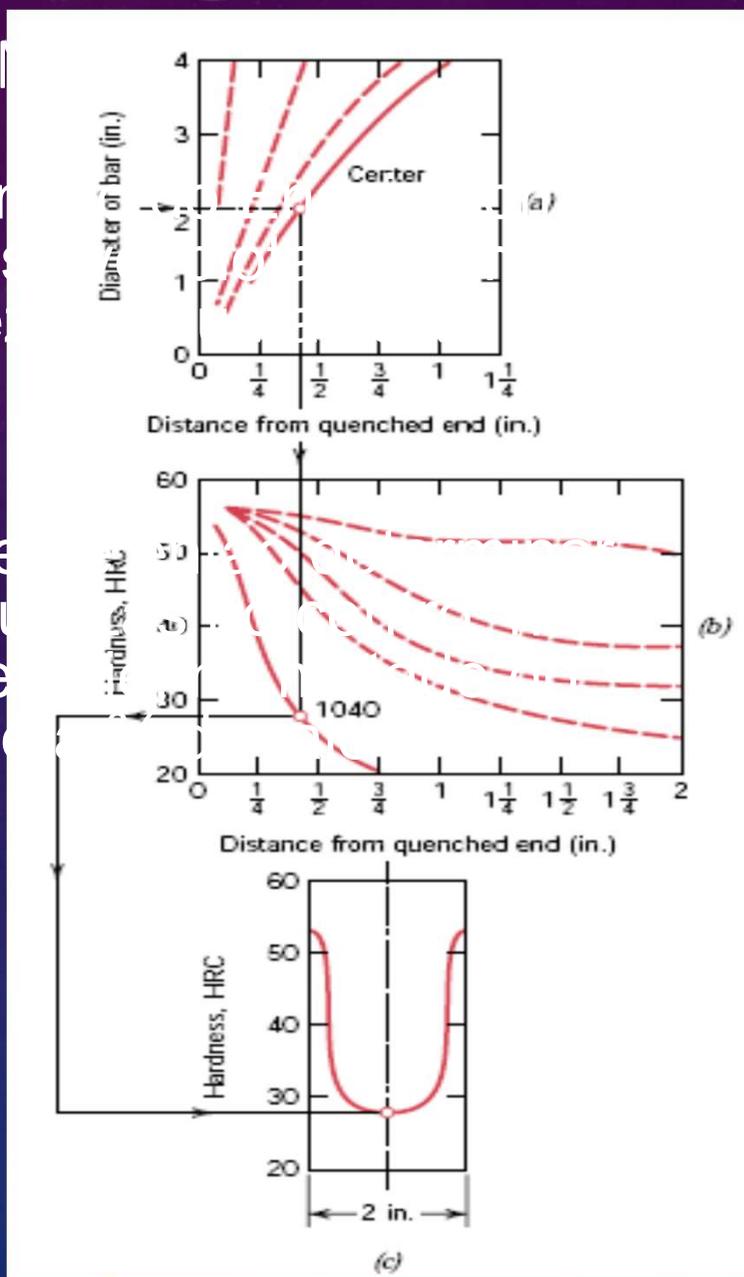


DETERMINAR

- Por meio de um teste de dureza

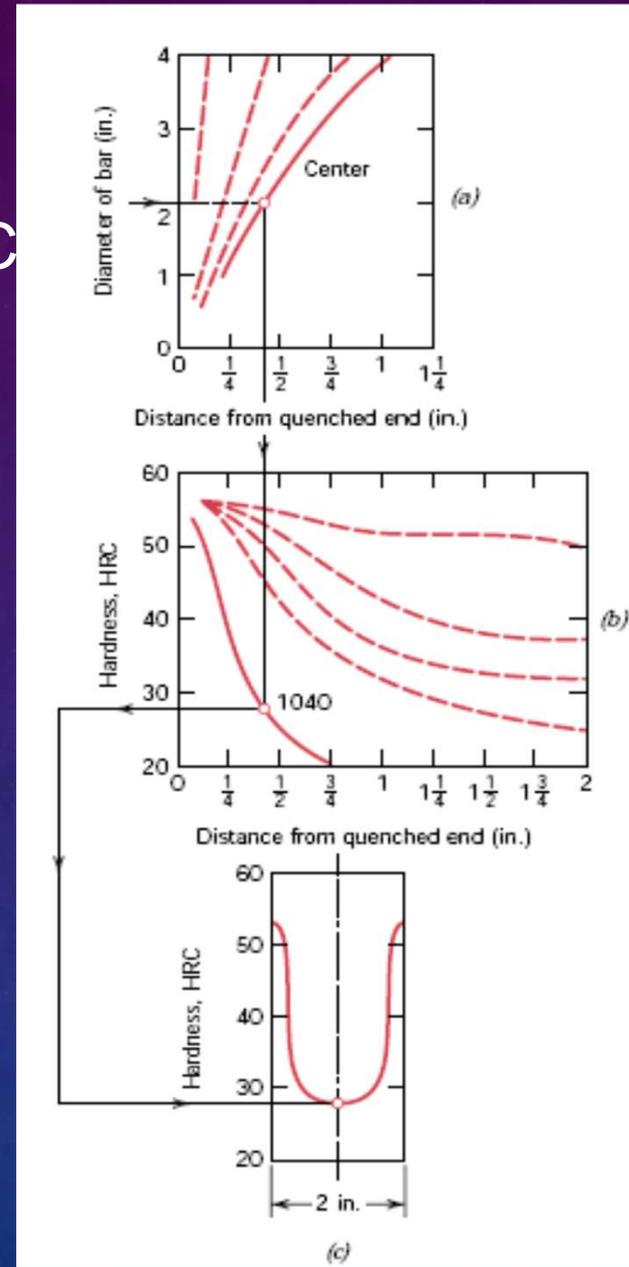
- Pode-se determinar o tamanho do grão de superfície

ATRAVÉS DO ENSAIO JOMINY



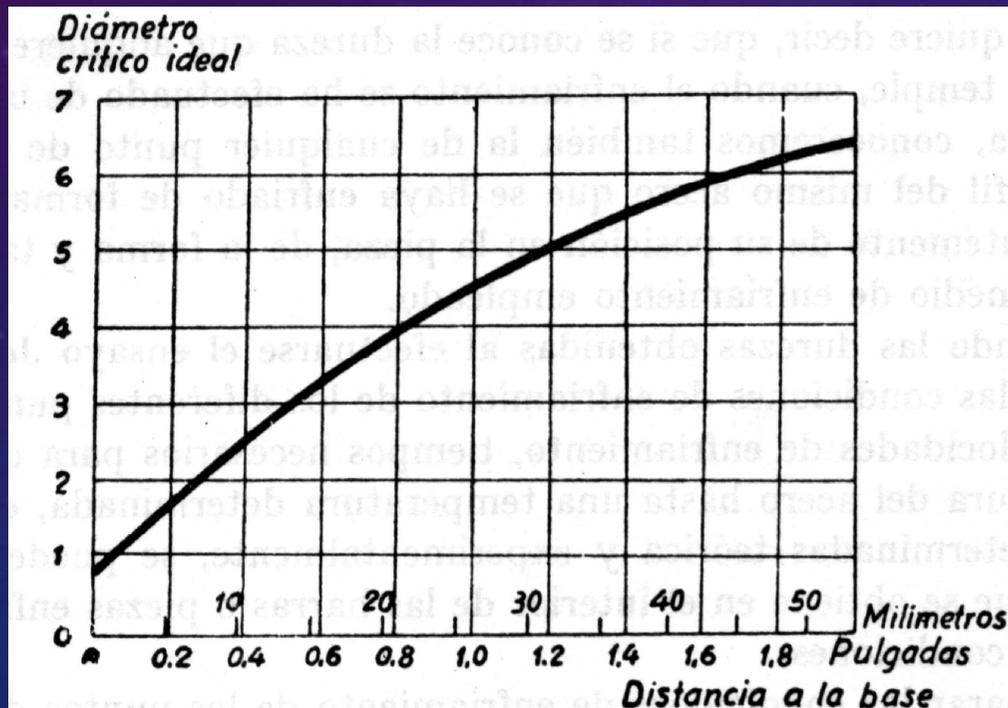
Nesse caso:

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

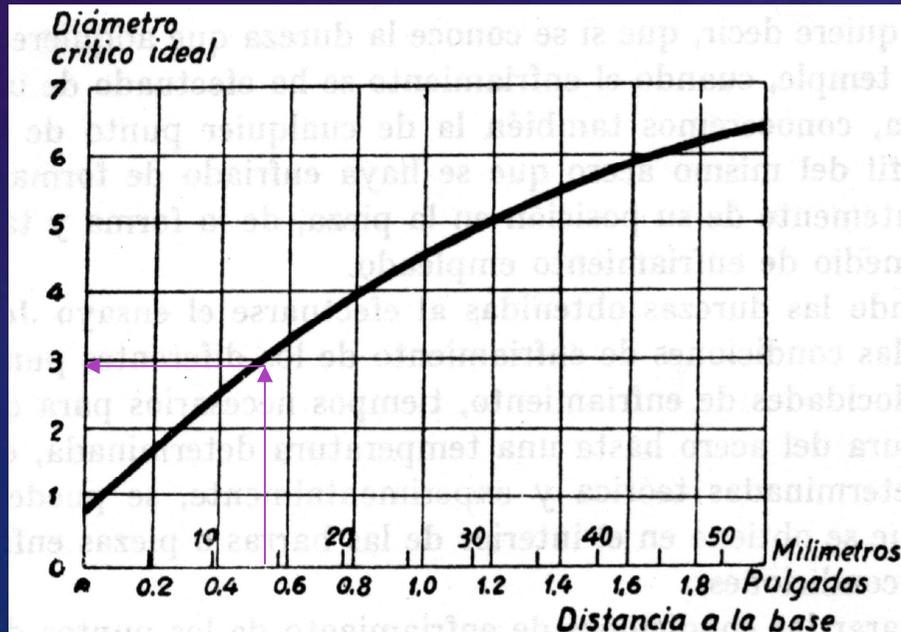
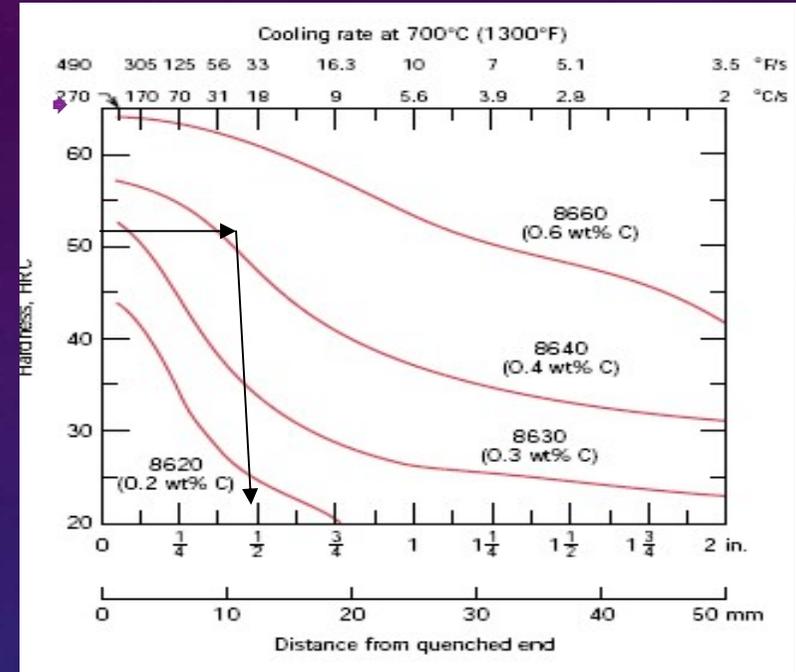


DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO CRÍTICO PELO ENSAIO JOMINY

- É possível se obter o diâmetro crítico ideal a partir de um ensaio Jominy.



- Por exemplo um aço 8640 que apresenta 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

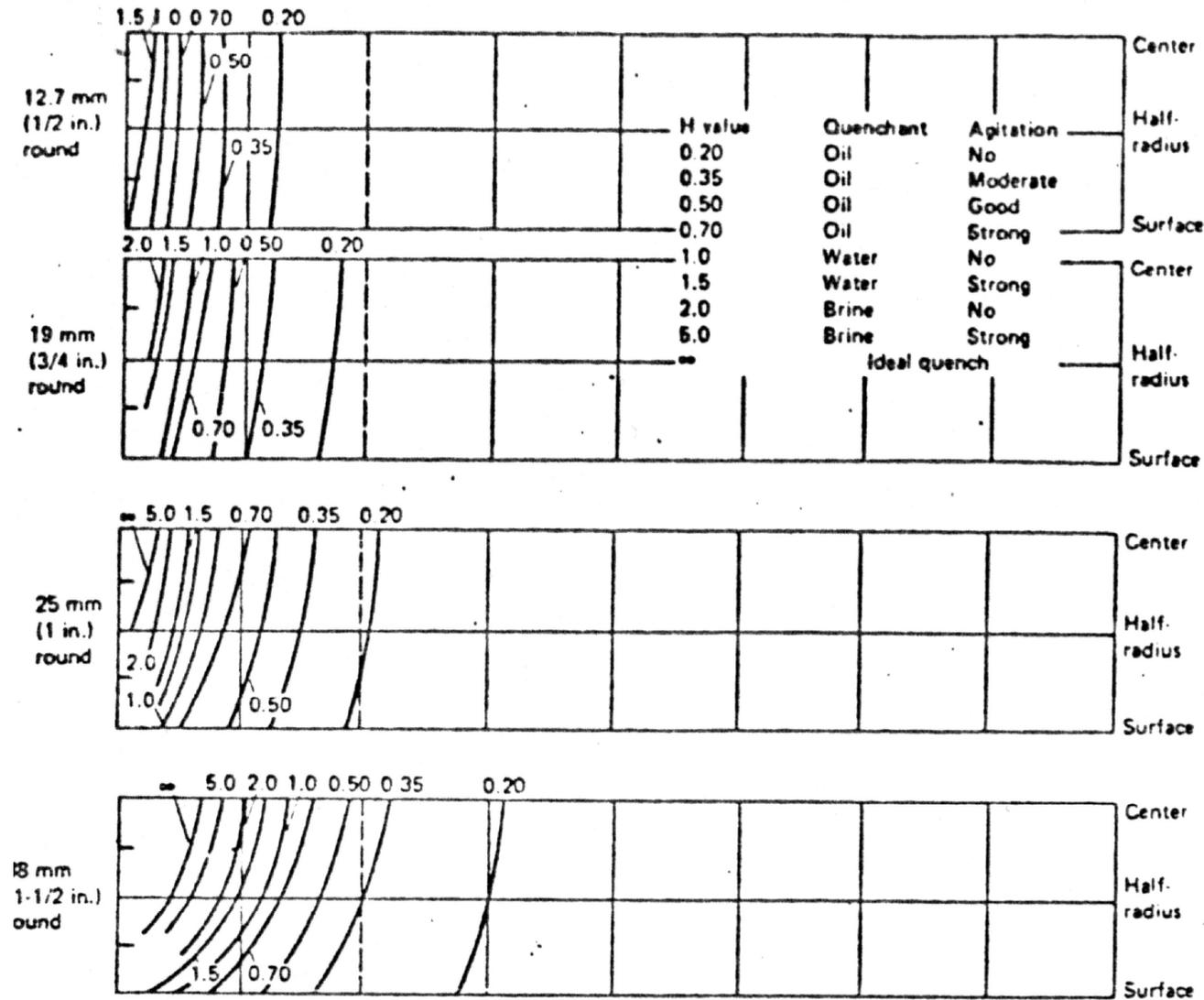
- O diâmetro crítico de um aço depende do meio de resfriamento. Quanto maior a velocidade de resfriamento, maior a sua severidade. Essa característica costuma ser indicada pela letra “H”.
- Para que se pudesse comparar aços diferentes, quanto à temperabilidade seria necessário associar os diâmetros críticos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

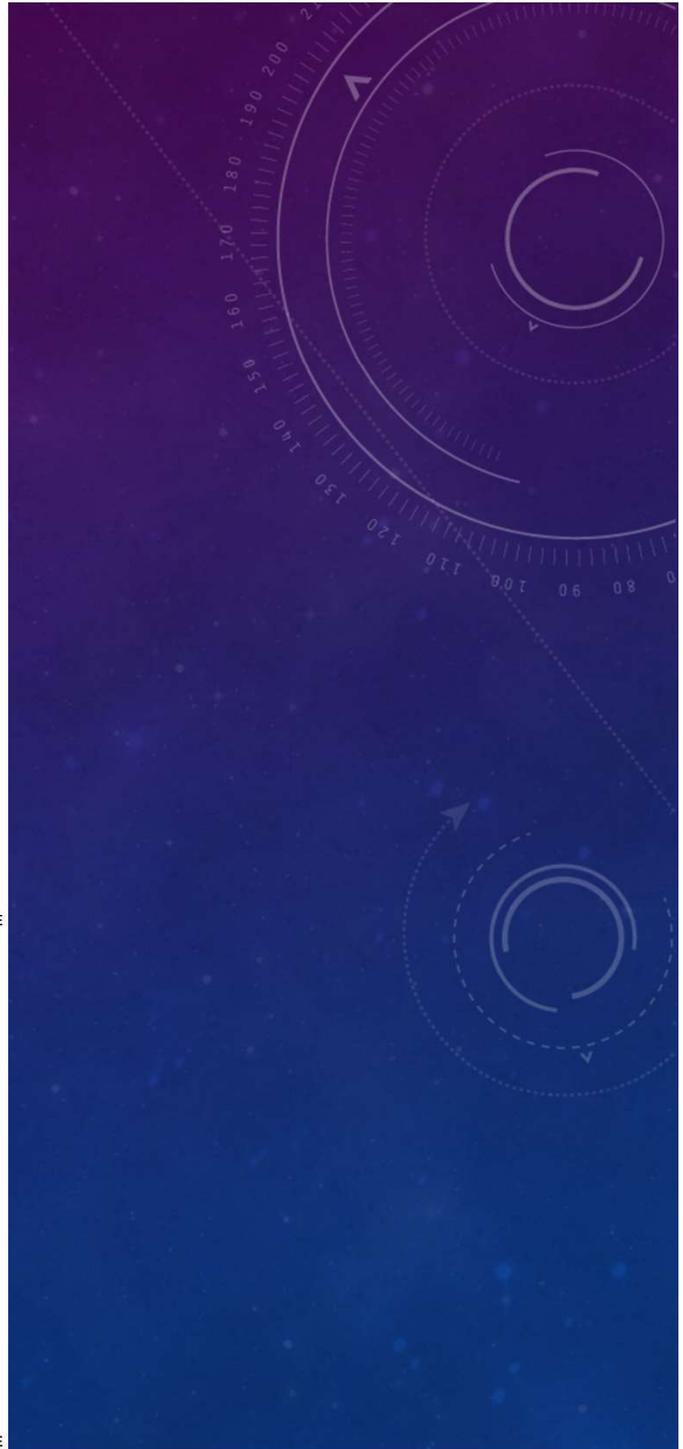
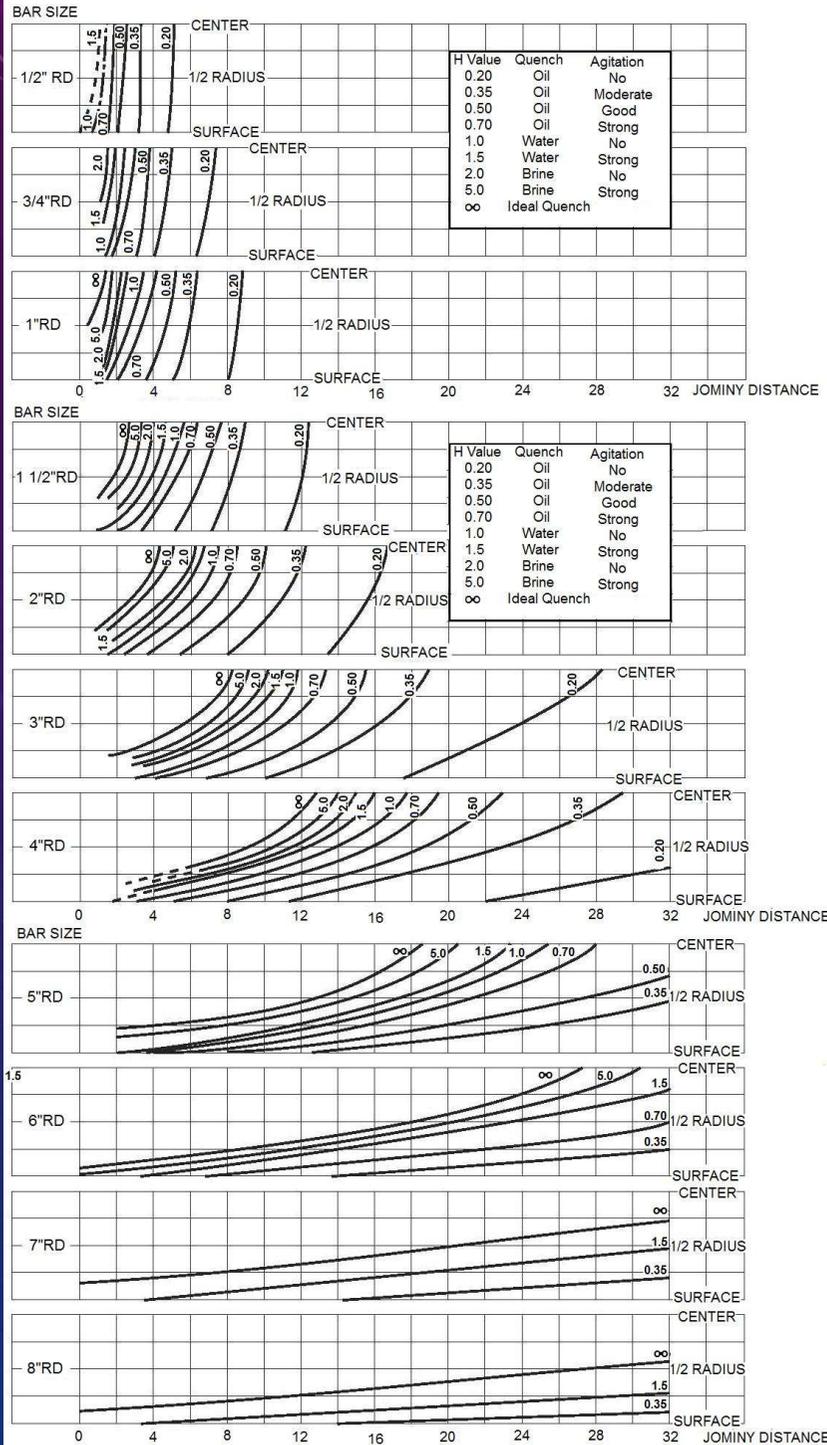
Valores típicos de H

| 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 |

CURVAS DE CORRELAÇÃO

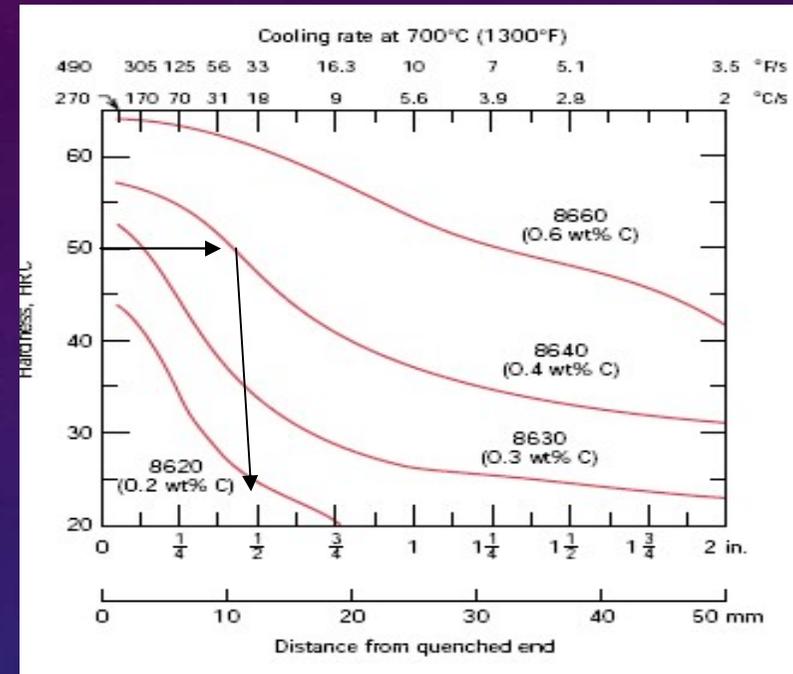
Fig. 17 Correlation of J_{eq} , equivalent hardness positions in end-quench hardenability specimen and various locations in round bars quenched in oil, water and brine





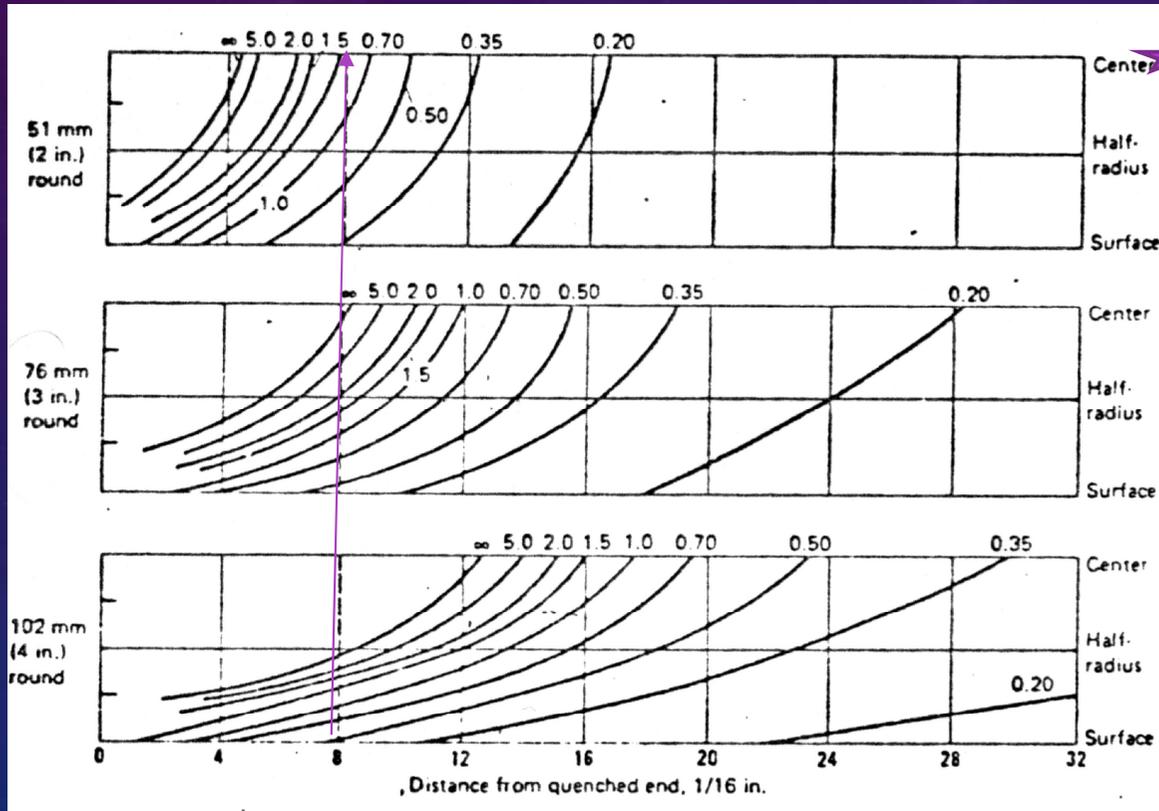
EXEMPLO

- Por meio 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 8/16.



EXEMPLO

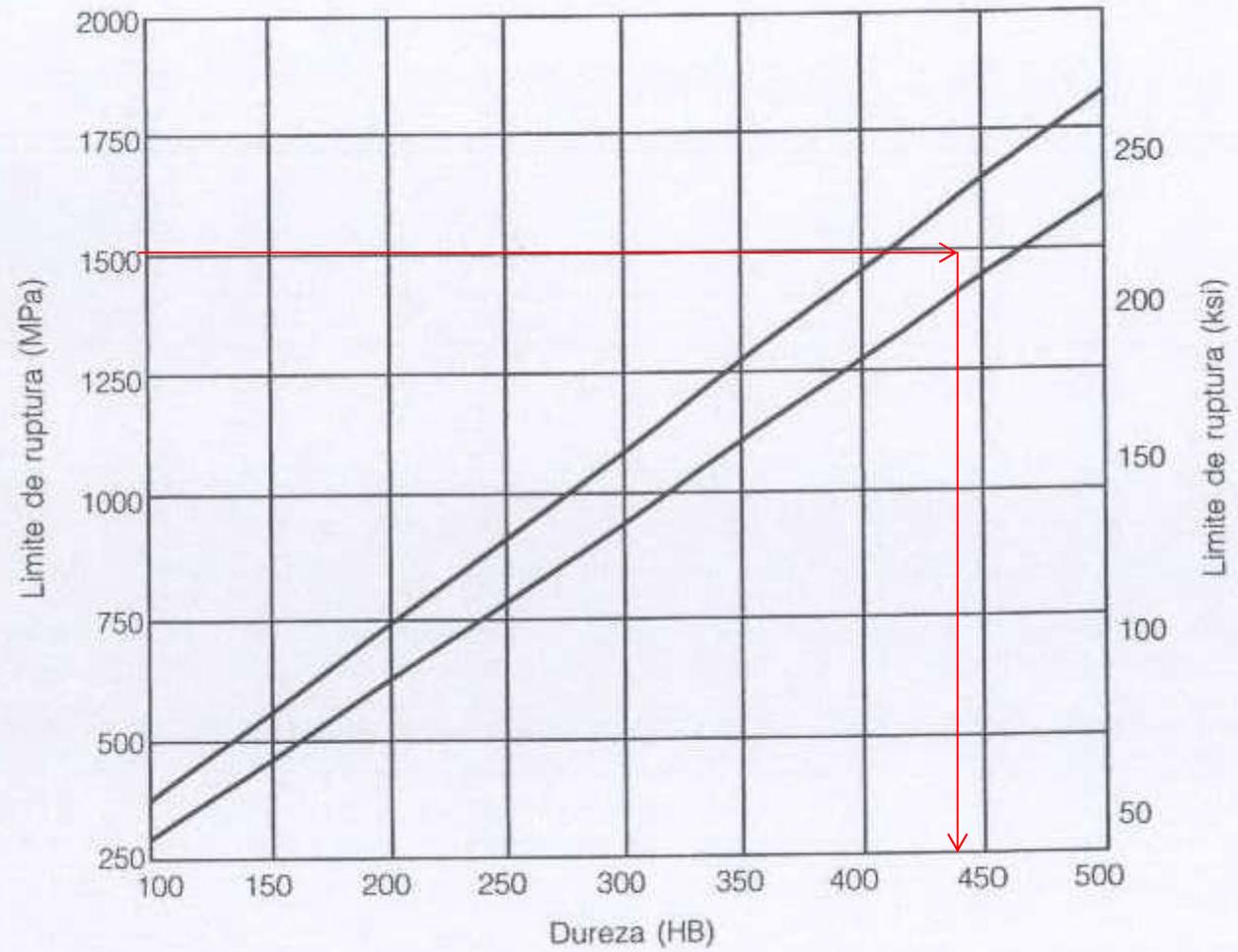
- Da curva de correlação tem-se que para no centro tenha-se 8/16 de distância Jominy a severidade de têmpera deve ser 1,5 (água com agitação)



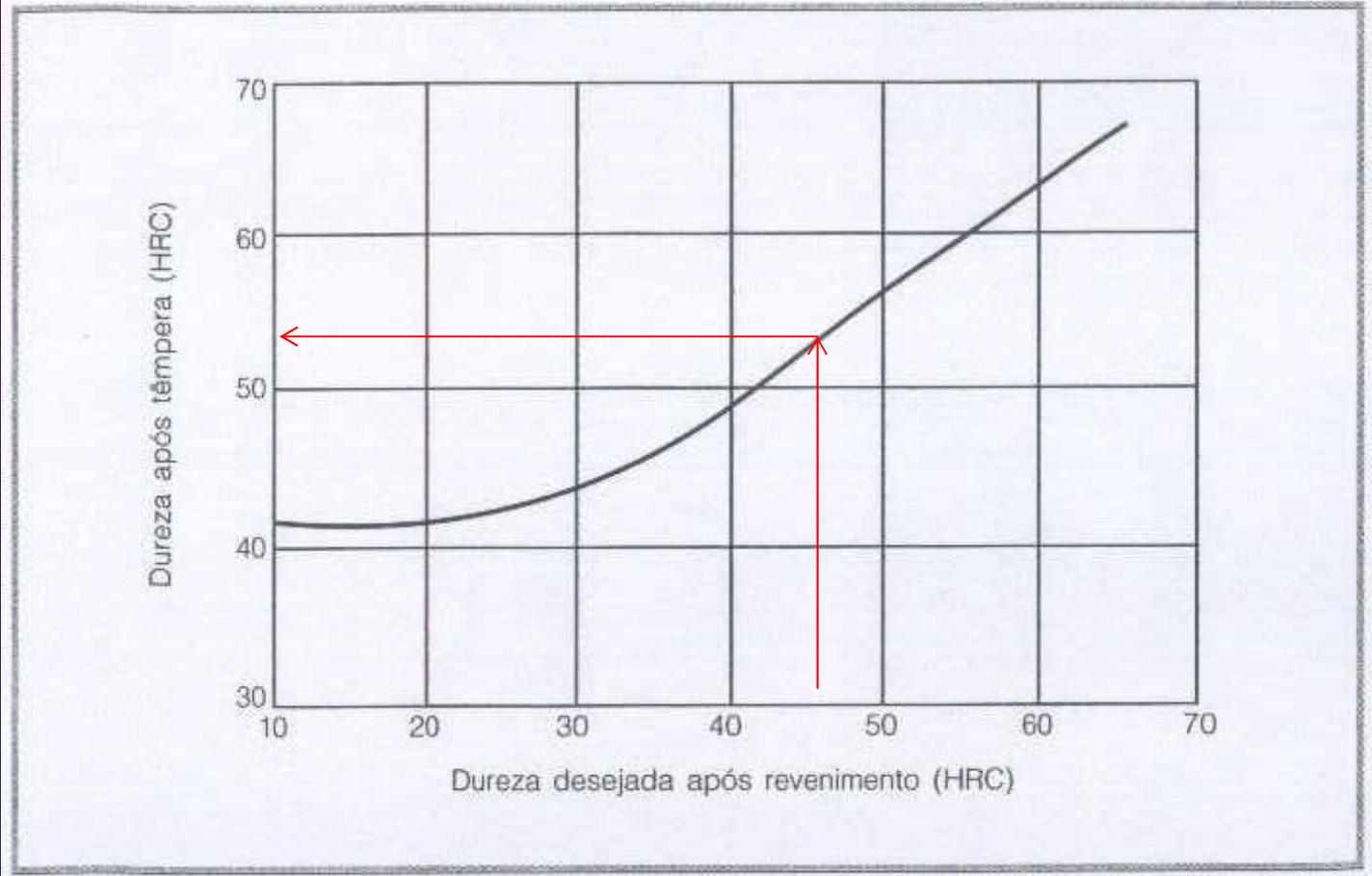
EXERCÍCIO

Selecionar um aço para um eixo de 2 pol de diâmetro submetido a uma carga axial estática que provoca uma tensão de projeto de 1500 MPa (já incluído fator de segurança). O tratamento térmico deve gerar pouco empeno.

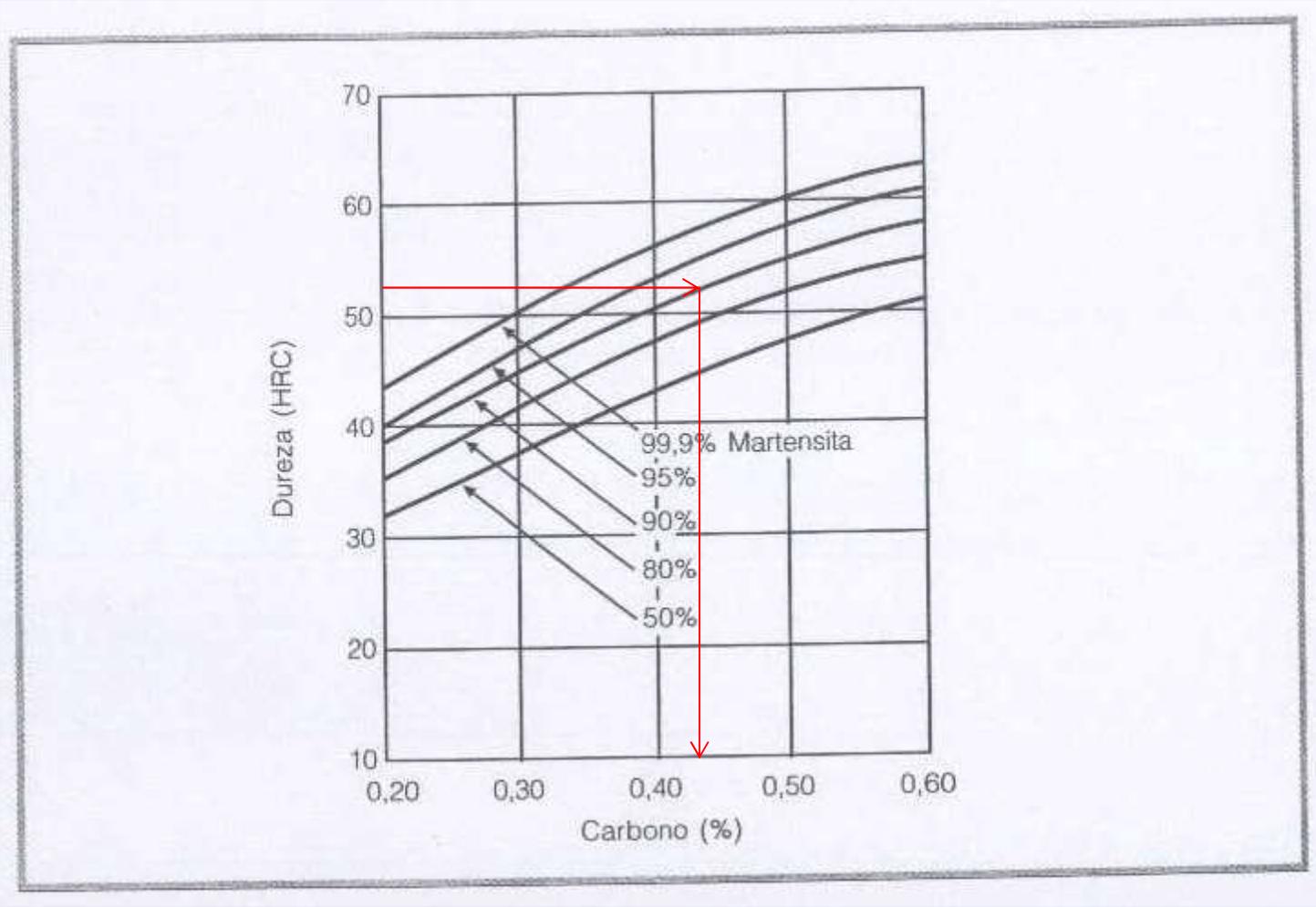
Aços e Ligas Especiais. Silva, A. L. C. Mei, P. R.



- 440 HB ou 46 HRC na situação pós tratamento térmico.
- Revenido de aços de baixa liga traz queda de dureza



- Após a têmpera devemos ter então uma dureza de 53HRC para que na condição pós revenido tenhamos 45 ou 46 HRC.
- É um eixo, que sofrerá solicitações elevadas, e por isso deve-se projetar uma estrutura inteiramente martensítica no seu centro (90% de martensita).



- Aços com teor de Carbono entre 0,40 a 0,45 %

(Realmente esses aços são os mais utilizados para a fabricação de eixos com têmpera total)

Baixo empenamento no tratamento térmico



Meios de resfriamento de menor severidade

| Meio de t mpera | Severidade de t mpera (H) |
|-----------------------------|---------------------------|
|  leo sem agita o | 0,2 |
| moderadamente agitado | 0,5 |
|  leo violentamente agitado | 0,7 |
|  gua sem agita o | 1 |
|  gua fortemente agitada | 1,5 |
| Salmoura sem agita o | 2,00 |
| Salmoura fortemente agitada | 5,00 |

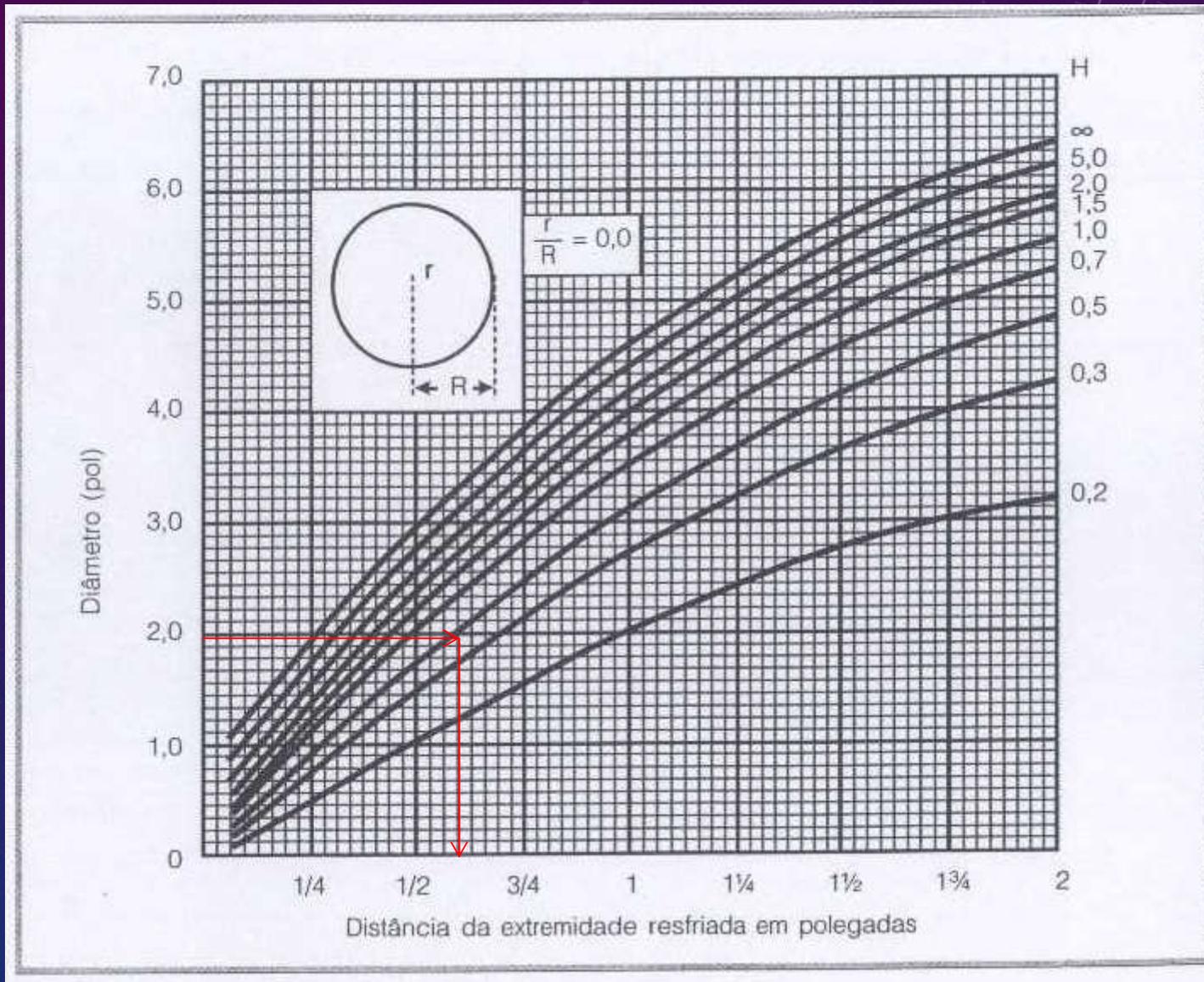
Distor o

Trincas

Velocidade de resfriamento

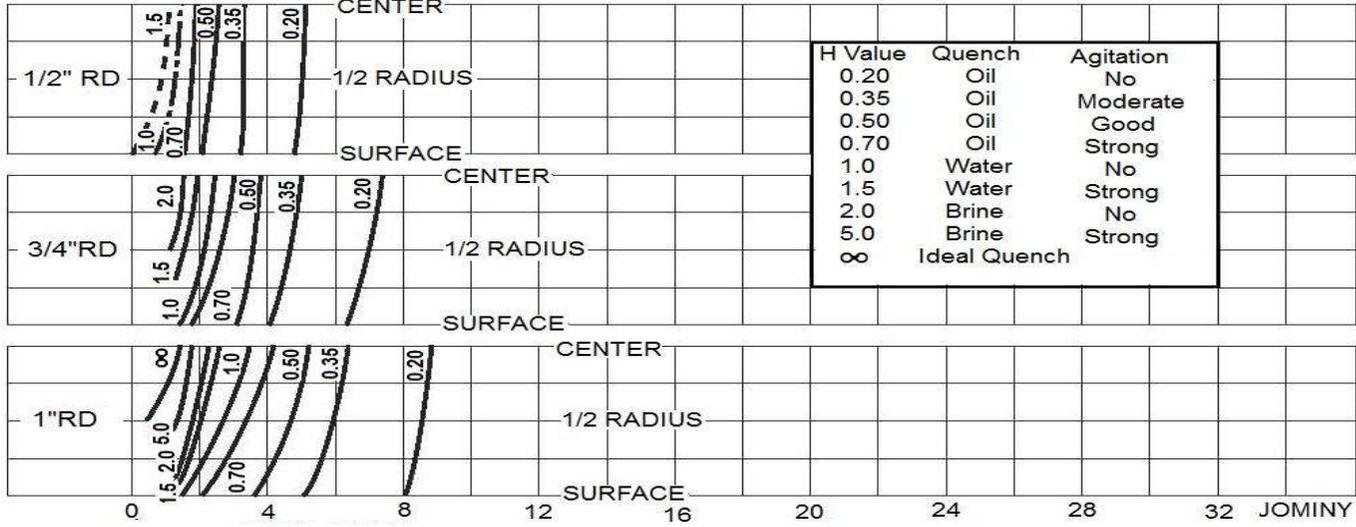
Crescem:



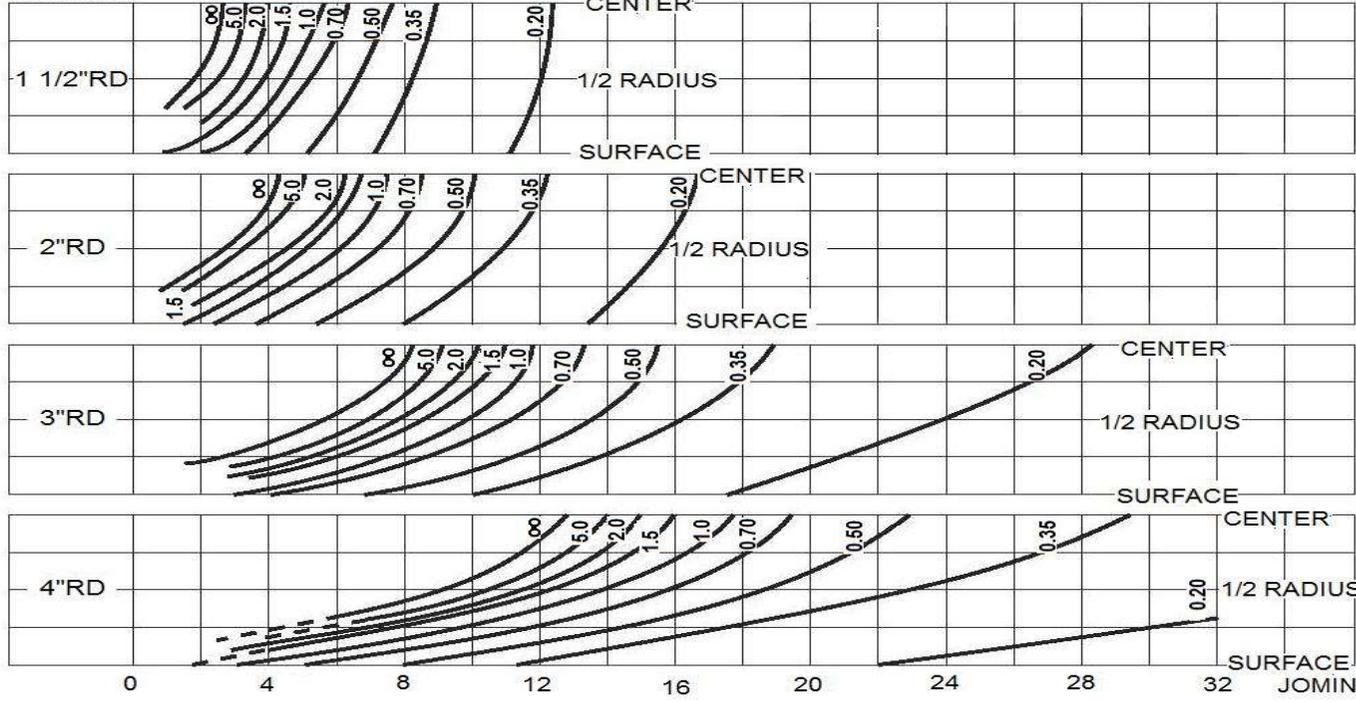


9,5/16

BAR SIZE

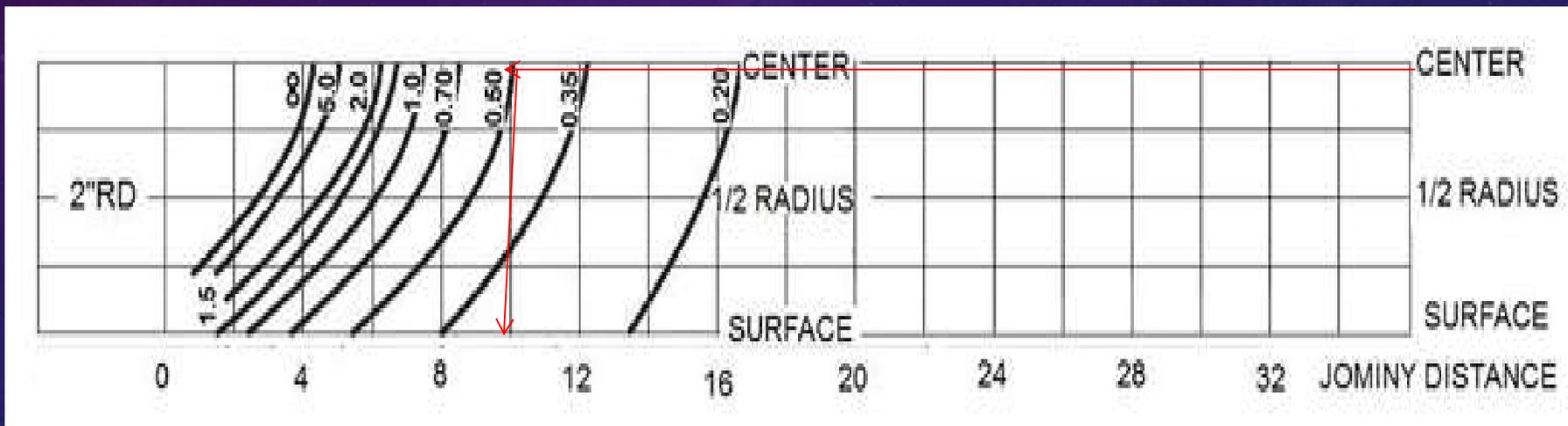


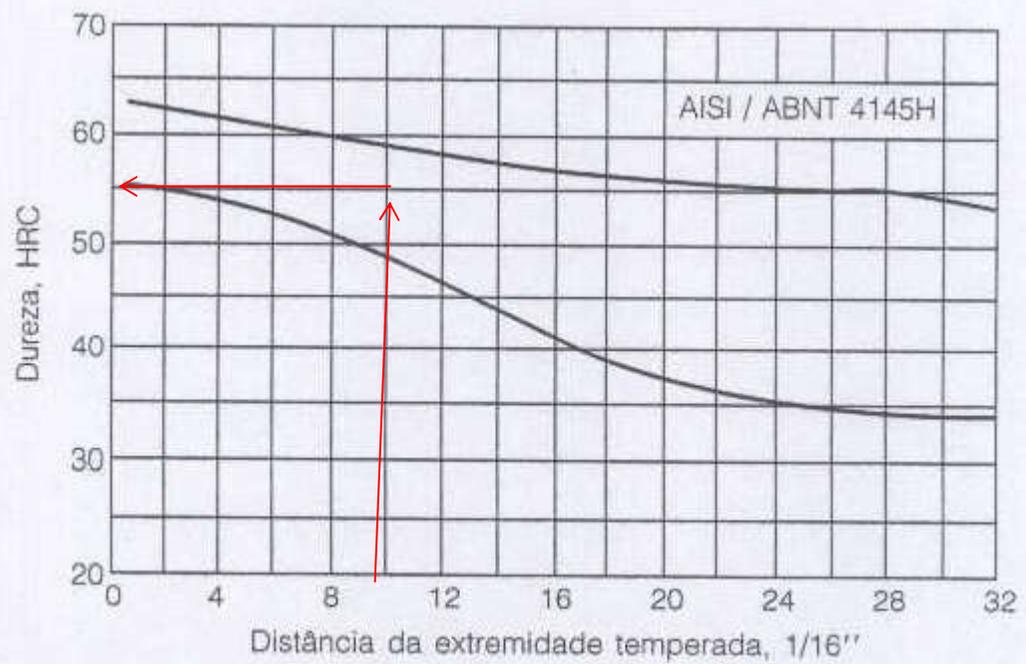
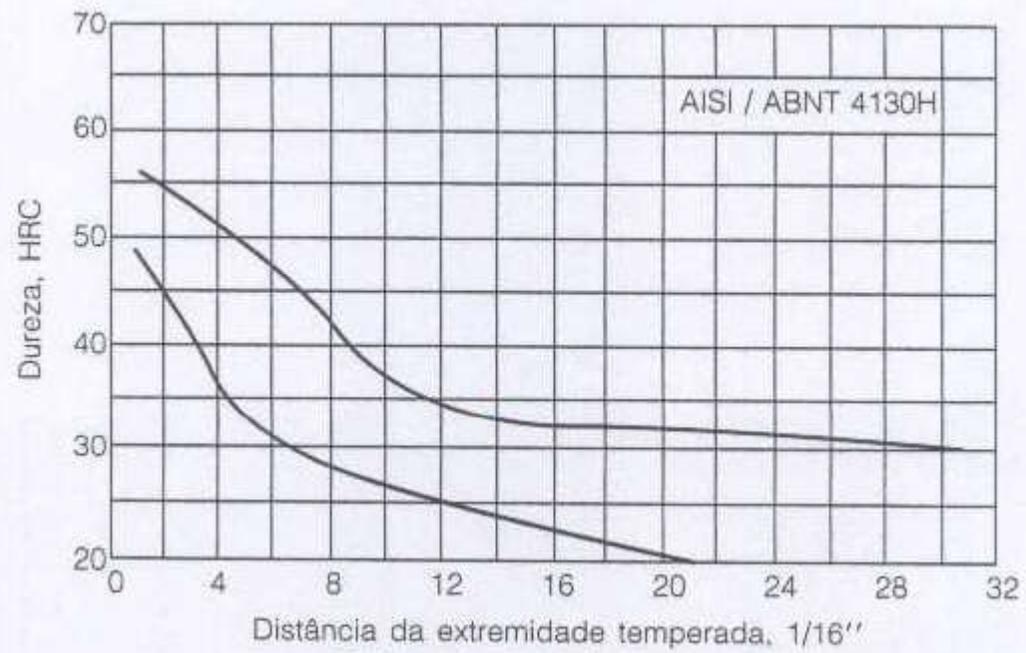
BAR SIZE

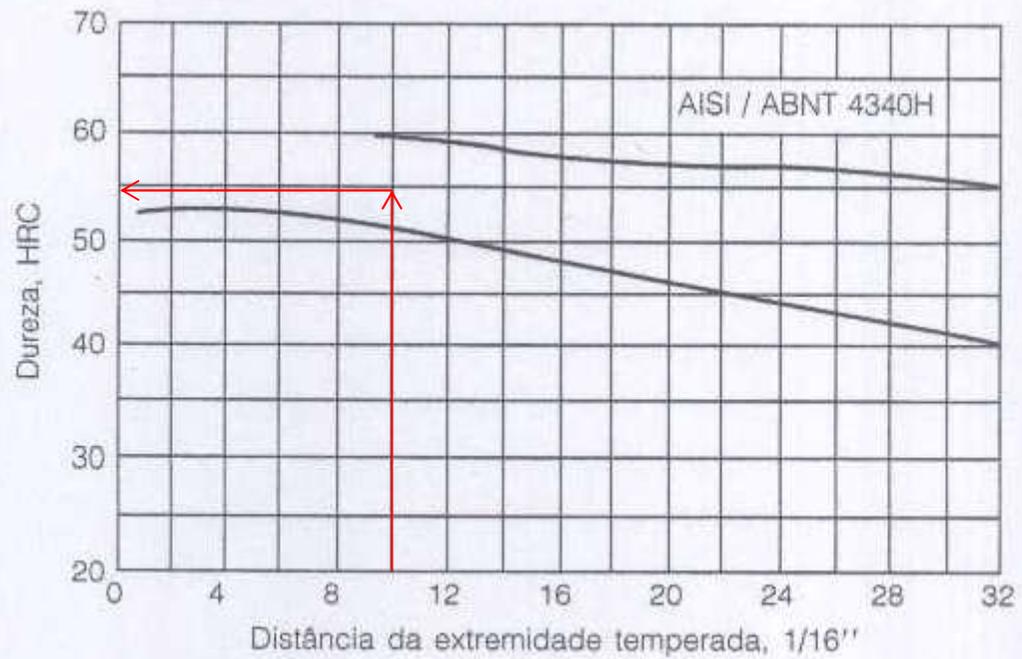
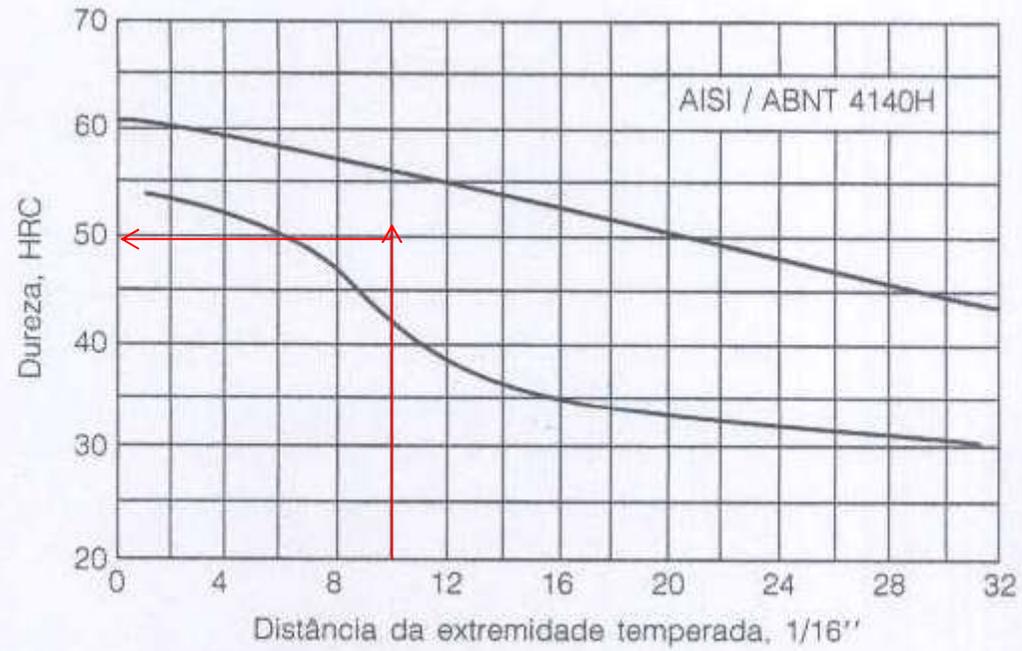


SURFACE
1/2 RADIUS
CENTER

JOMINY DISTANCE







- O controle de qualidade é feito pela dureza superficial.
- Qual seria o valor dessa dureza?

