

SMM 0193 – ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS I

TEMPERABILIDADE

**TEMPERABILIDADE É A CAPACIDADE DE ENDURECER
POR TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA.**

**A TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA É OBTIDA COM
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA.**

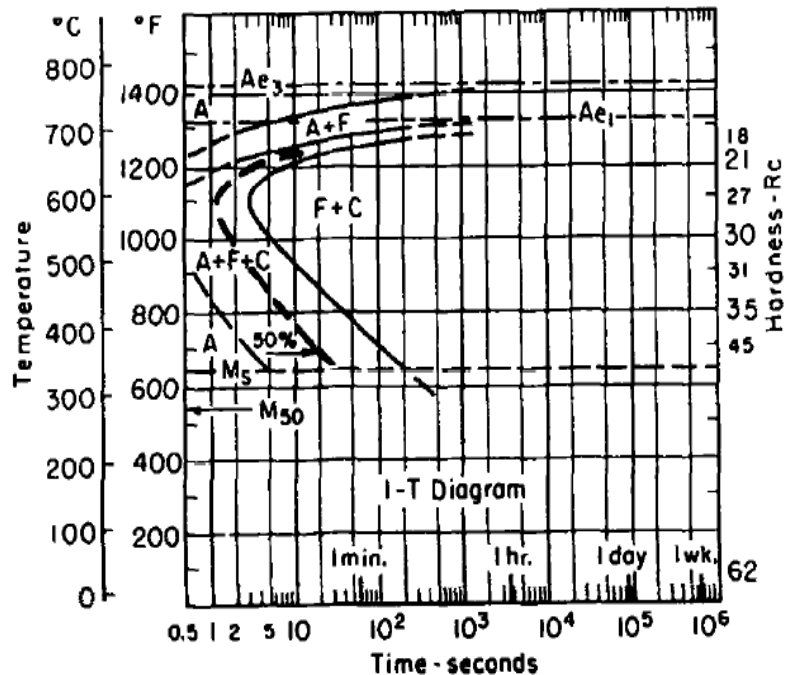
**EM MATERIAIS TEMPERÁVEIS A TÊMPERA É MAIS
FÁCIL.**

**EM UMA LIGA QUE APRESENTA ALTA
TEMPERABILIDADE OCORRERÁ FORMAÇÃO DE
MARTENSITA NA SUPERFÍCIE E NO INTERIOR DO
MATERIAL ATÉ CERTA PROFUNDIDADE. DEPENDENDO
DAS DIMENSÕES, OCORRERÁ EM TODO O INTERIOR.**

ELEMENTOS DE LIGA ALTERAM AS CURVAS TTT/TRC

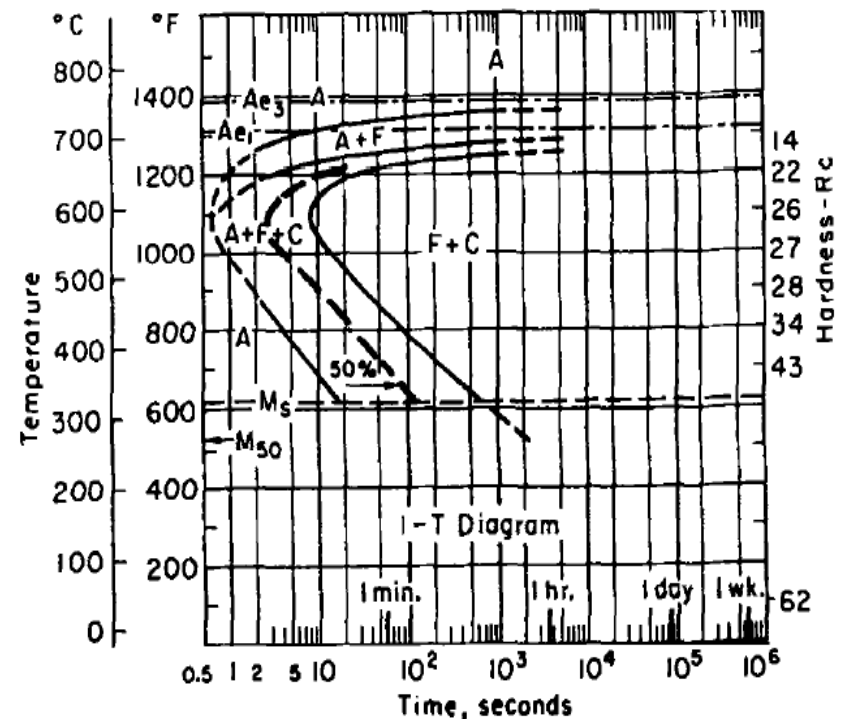
Type: 1045/1050

Composition: Fe - 0.47% C - 0.57% Mn - 0.06% Cu Grain size: 50% 8, 50% 5 Austenitized at 843°C (1550°F)



Type: 1045/1050 + Cu

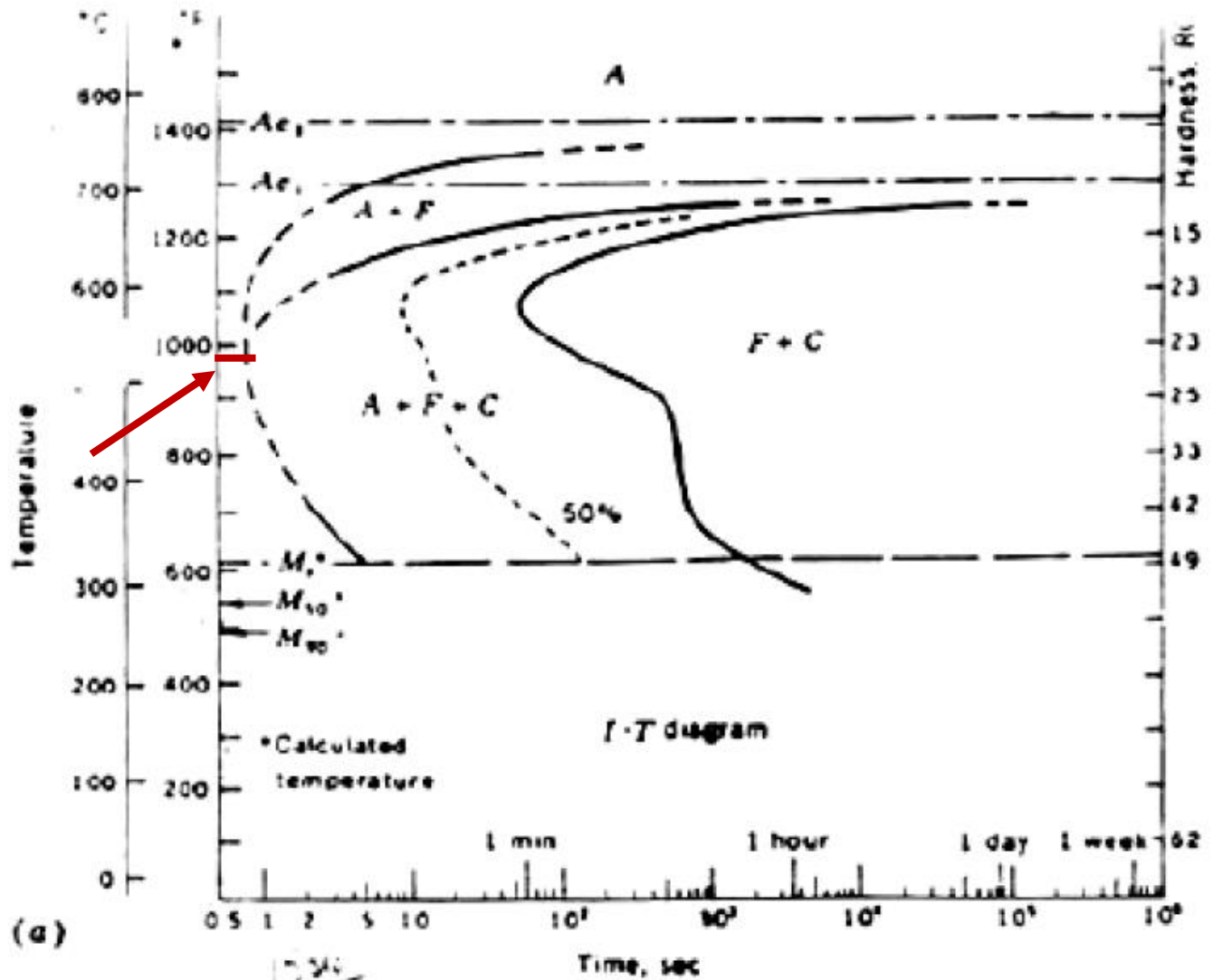
Composition: Fe - 0.49% C - 0.54% Mn - 0.20% Si - 1.49% Cu Grain size: 50% 8, 50% 5 Austenitized at 843°C (1550°F)



A adição de alguns elementos de liga deslocam as curvas TRC para a direita: aumentam a temperabilidade!

TTT curve - 1040

1040
C+Mn

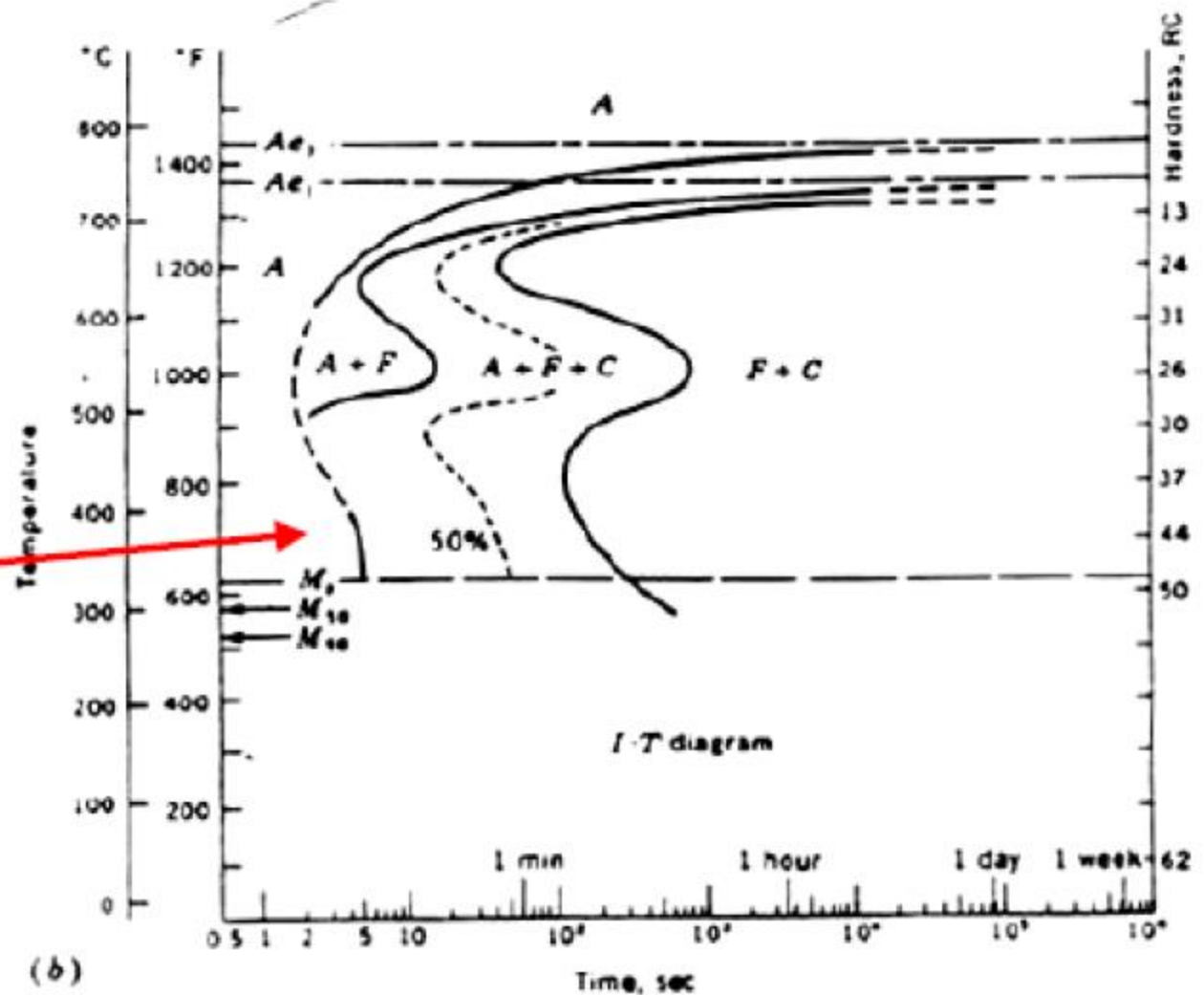


17/2/16

TTT curve - 5140

5140
C+Mn+Cr

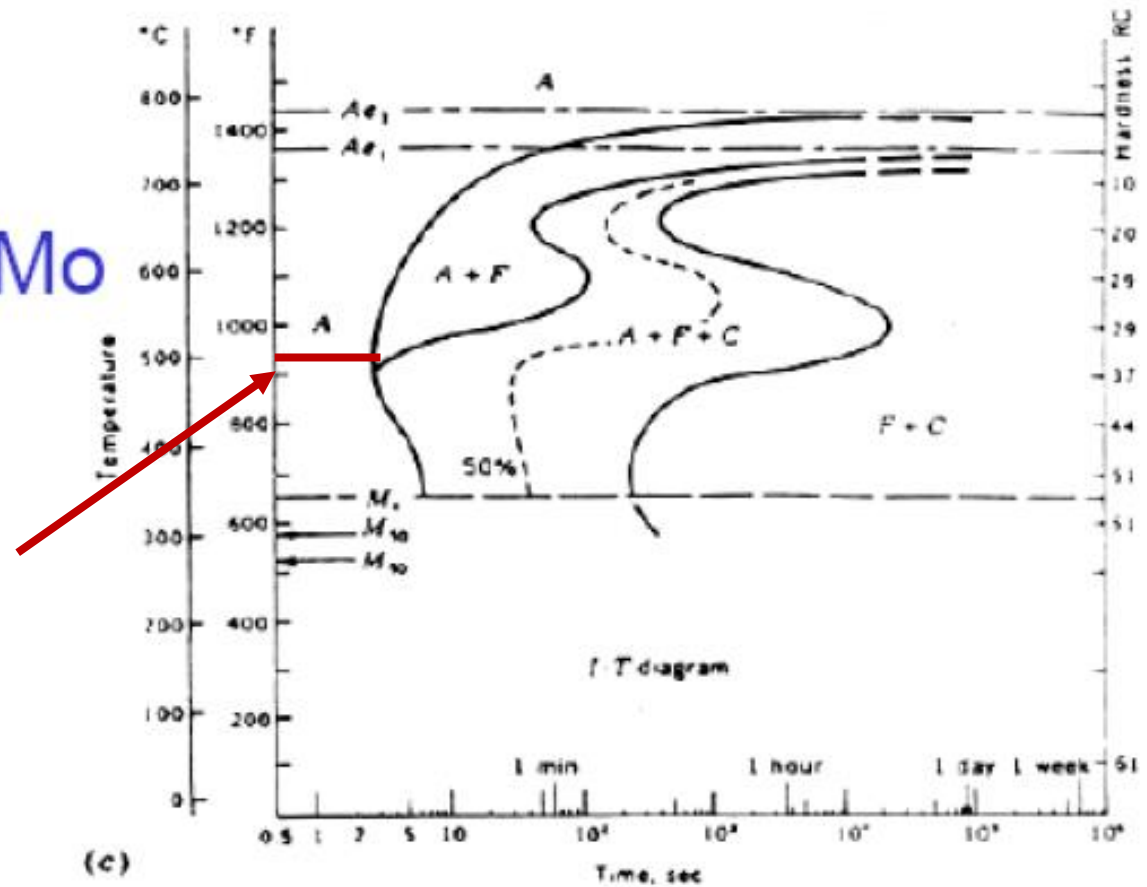
Curve shifted
to right



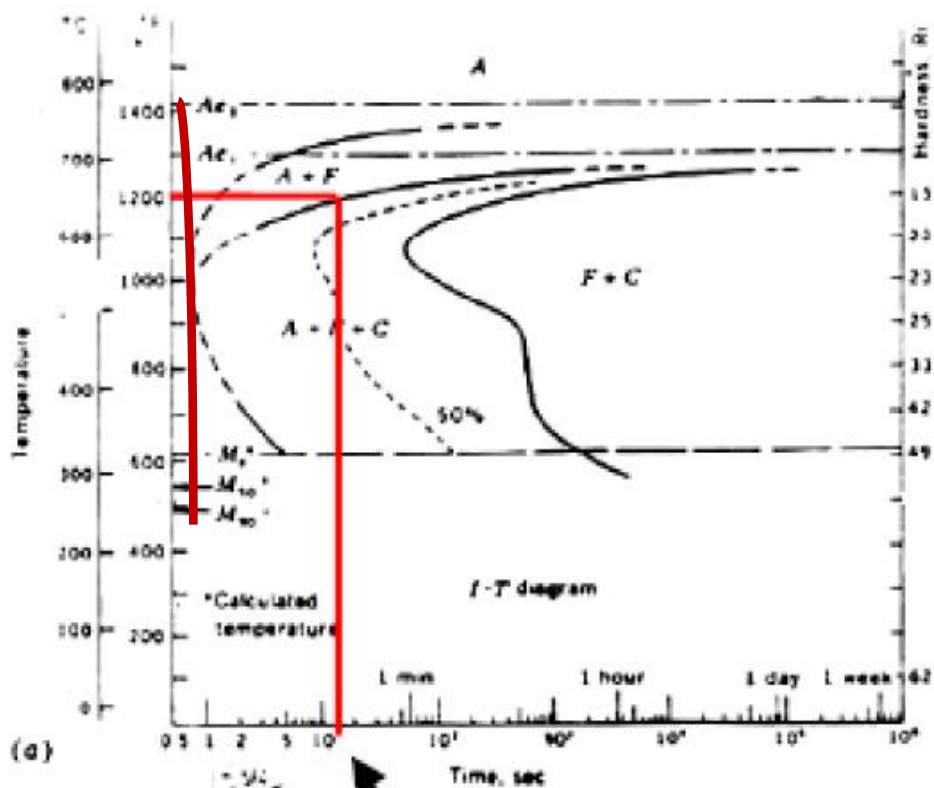
(b)

TTT curve - 4140

4140
C+Mn+Cr+Mo

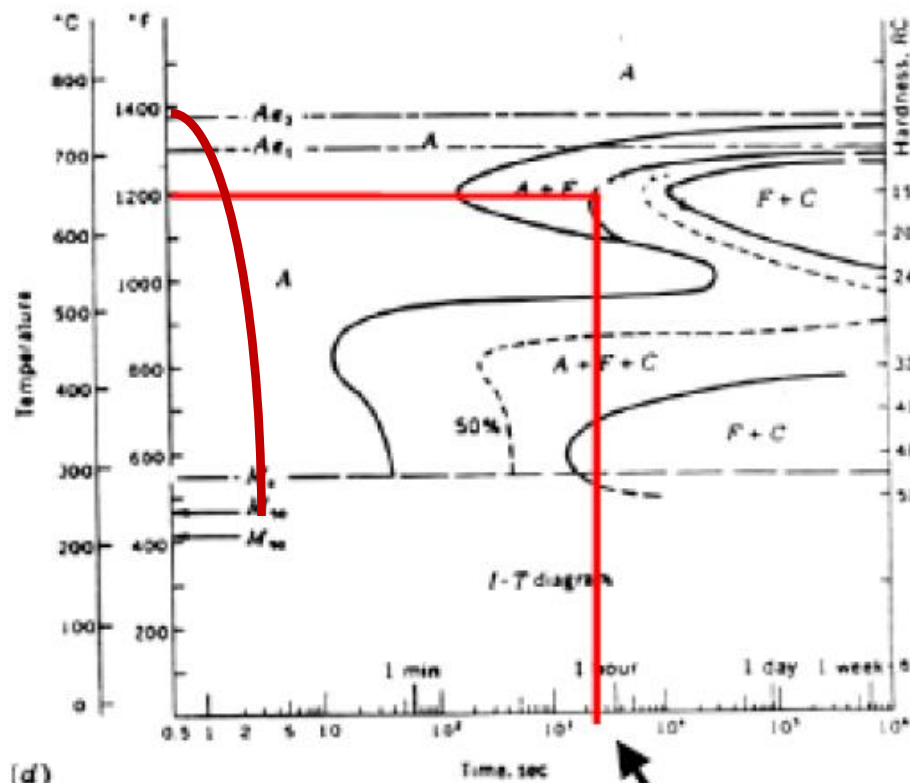


1040



15 sec

4340



1 hour

Temperabilidade

- Velocidade crítica de resfriamento

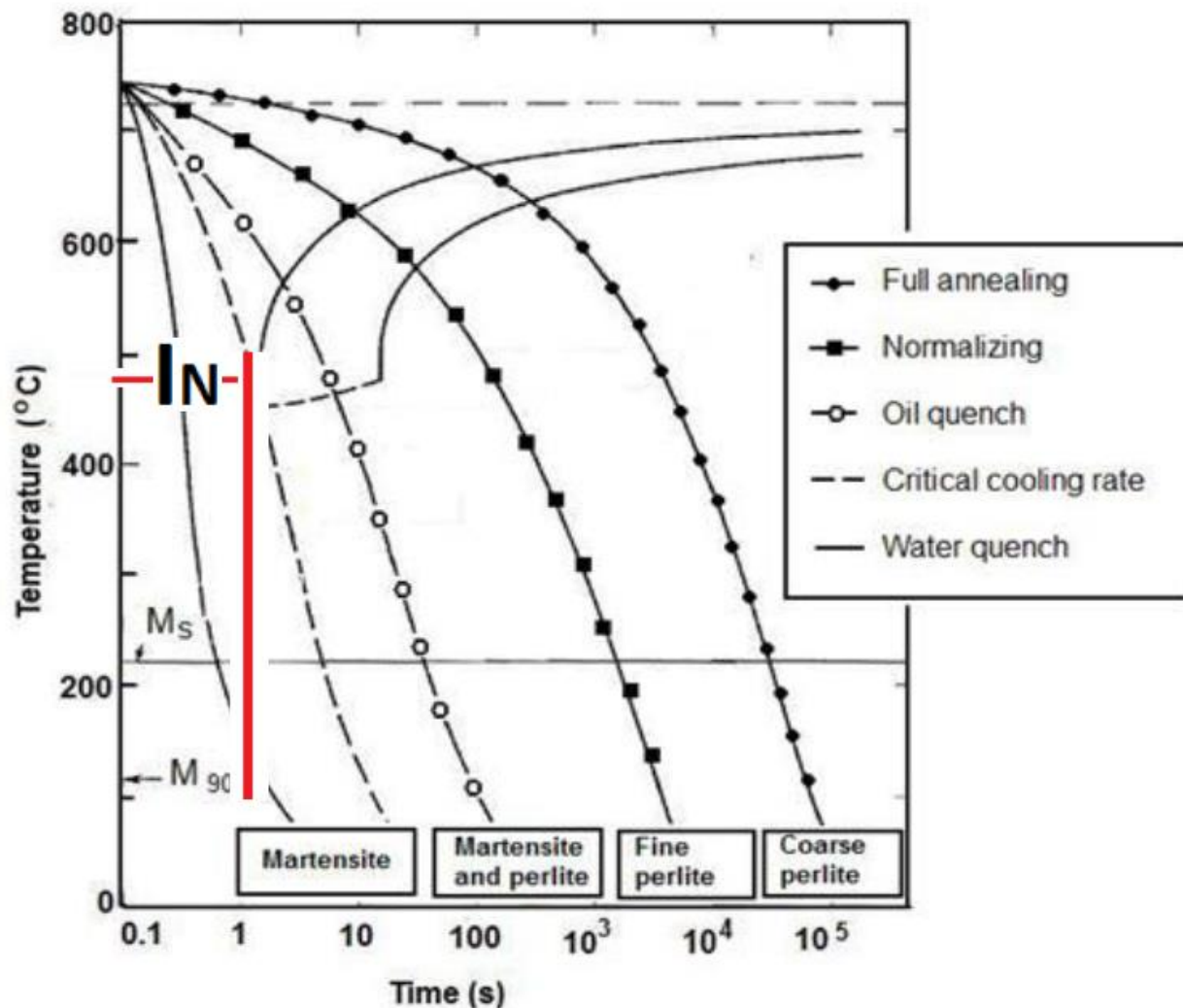
$$V_M = \frac{T_A - T_N}{I_N}$$

T_A is the austenitization temperature (°C),
 T_N is the corresponding temperature (°C) at the nose of the CCT curve (if there are two noses, use the temperature at the nose of the lower curve) and
 I_N is the incubation time(s).

Temperabilidade

T_A

T_N



Quanto maior I_N , mais temperável.

FATORES QUE PROVOCAM ABAIXAMENTO DA FAIXA M_i / M_f

Basicamente **os mesmos fatores** que provocam deslocamento da curva **TRC para a direita** também provocam **abaixamento da faixa M_i / M_f** para menores temperaturas. Os principais fatores são:

⇒ **%C em solução sólida na austenita**. Quanto maior a **%C** dissolvido na austenita, **menor** a temperatura de formação da martensita (**M_i/M_f**).

⇒ **%Elemento de Liga em solução sólida na austenita**. Os elementos de liga, com exceção do **Co** e do **Al**, provocam **abaixamento** da faixa **M_i / M_f** .

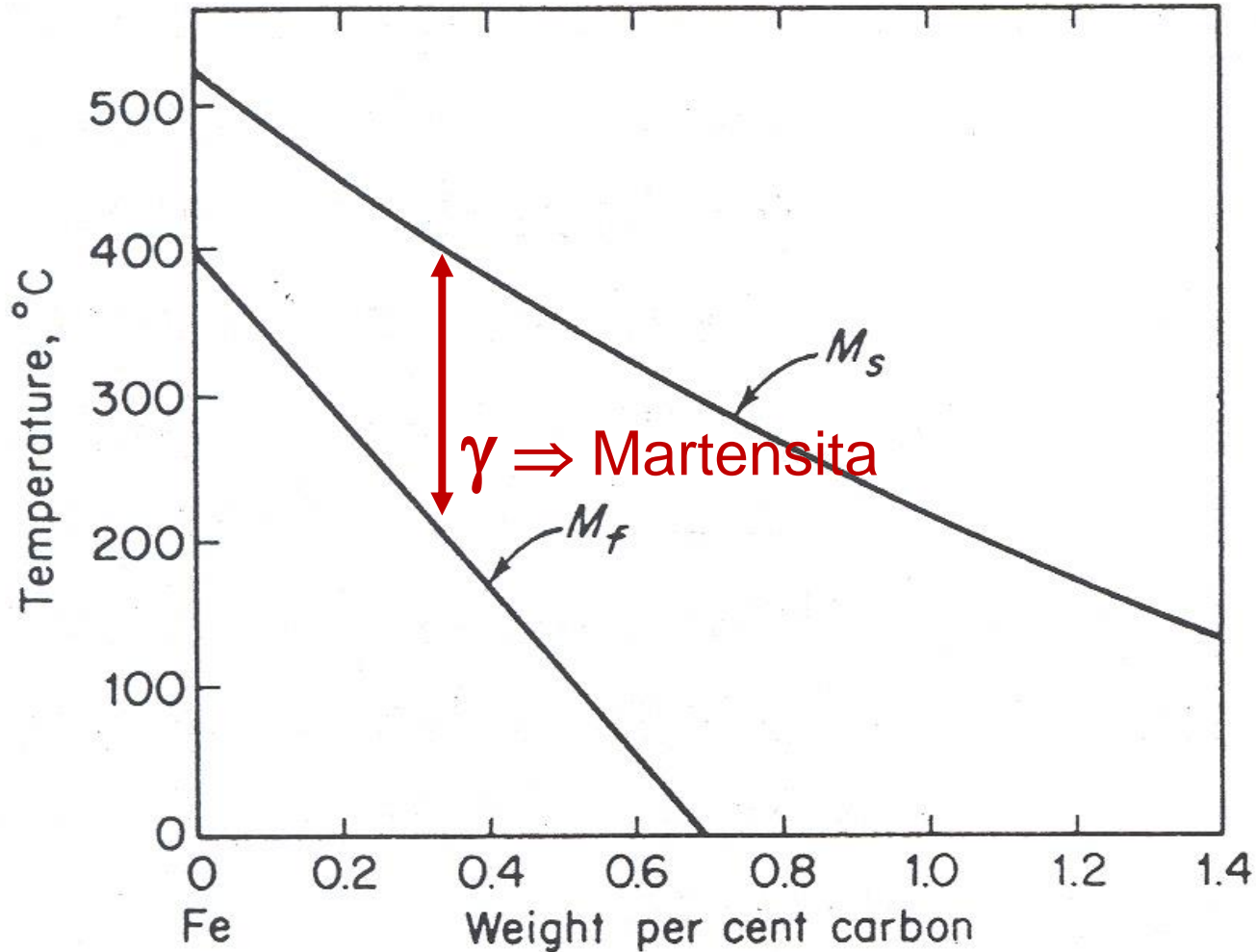
⇒ **Homogeneidade da austenita**

Problema:

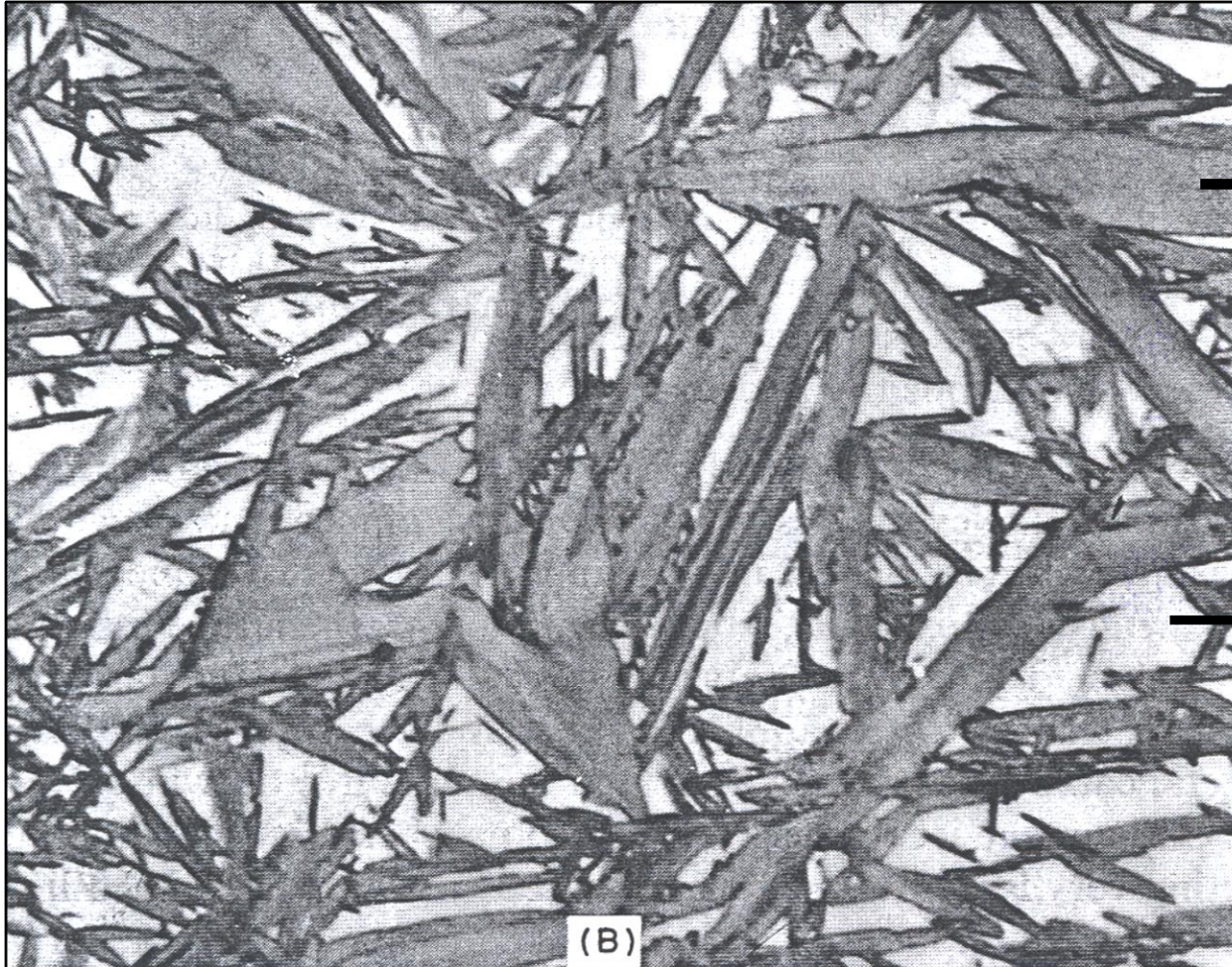
Quando a temperatura **M_f** estiver **abaixo** da temperatura **do meio de têmpera**, a transformação da austenita se dá de forma **incompleta**.

Estrutura obtida: Martensita e austenita retida

Efeito da %C em **solução sólida na austenita** sobre a posição da faixa de formação da martensita (linhas **M_i** e **M_f**)

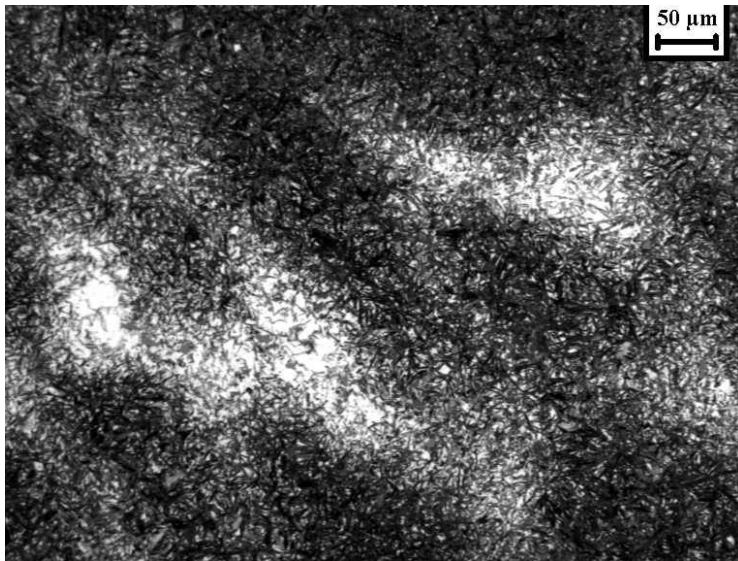


Martensita e Austenita Retida



Aguilhas de
Martensita

Austenita
Retida

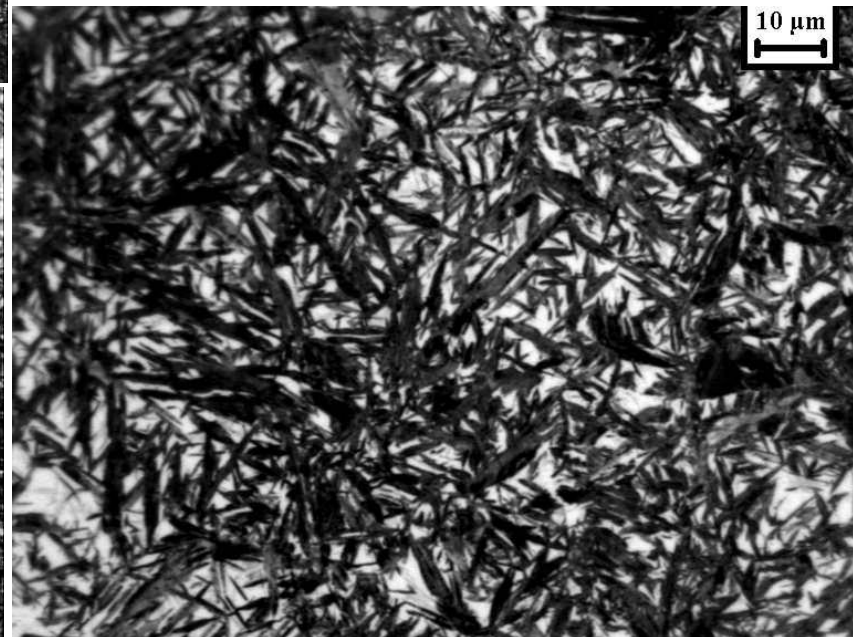
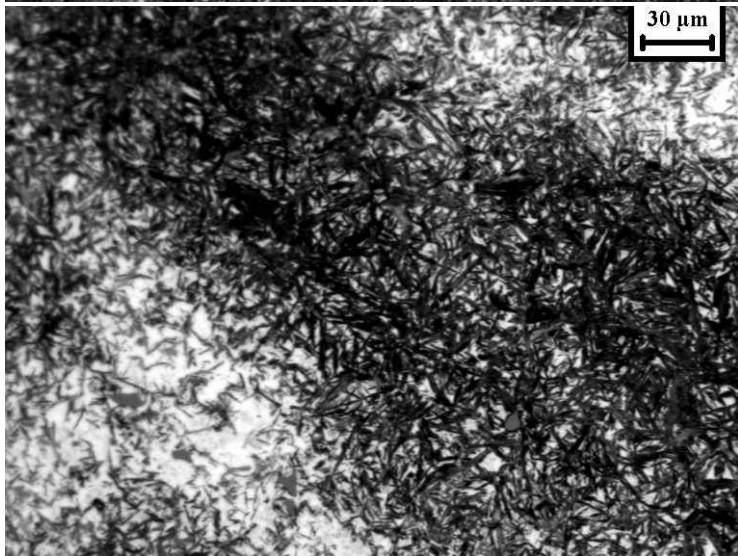


AÇO ALTA LIGA TEMPERADO

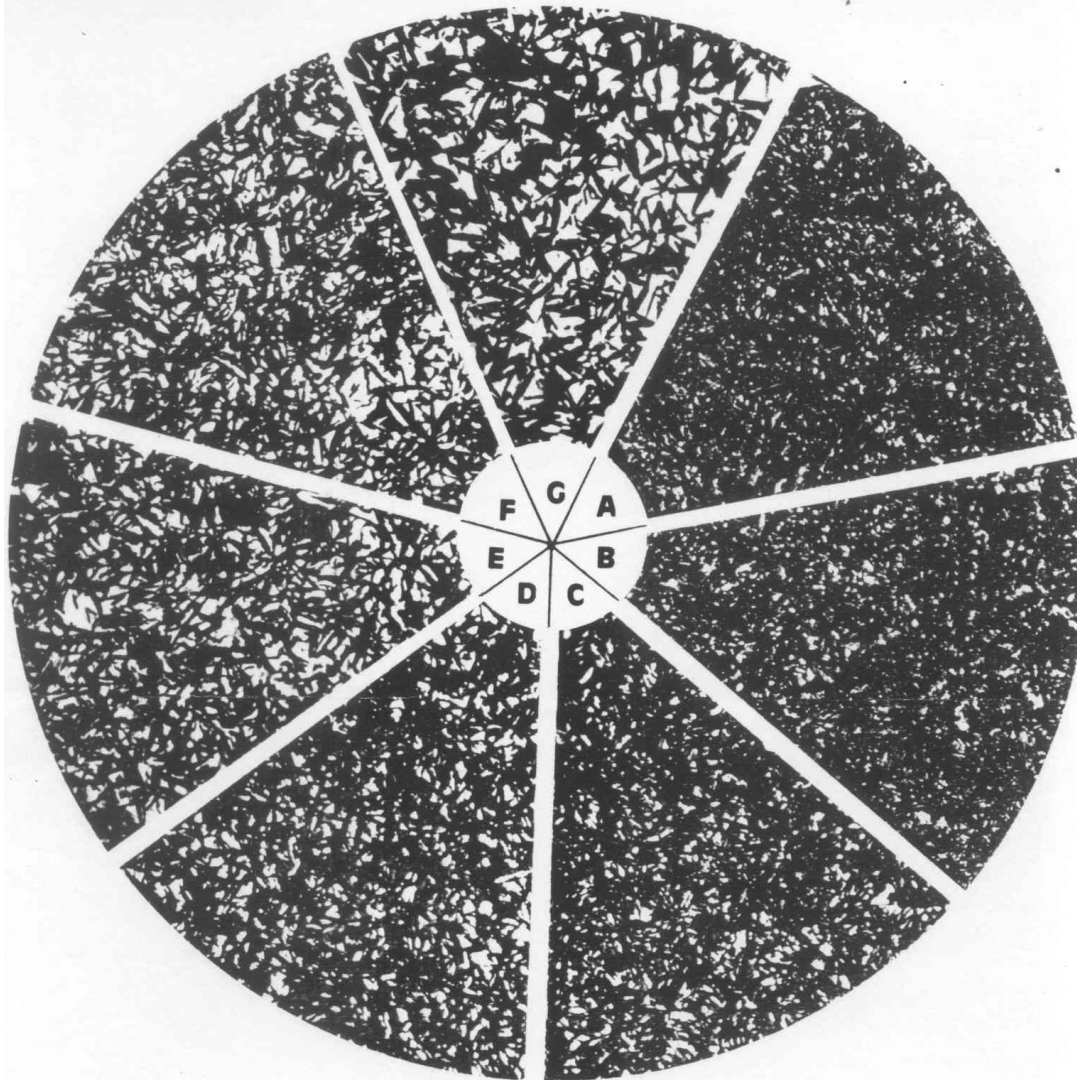
Estrutura:

martensita e austenita retida

A distribuição heterogênea dos elementos de liga provocou heterogeneidade microestrutural



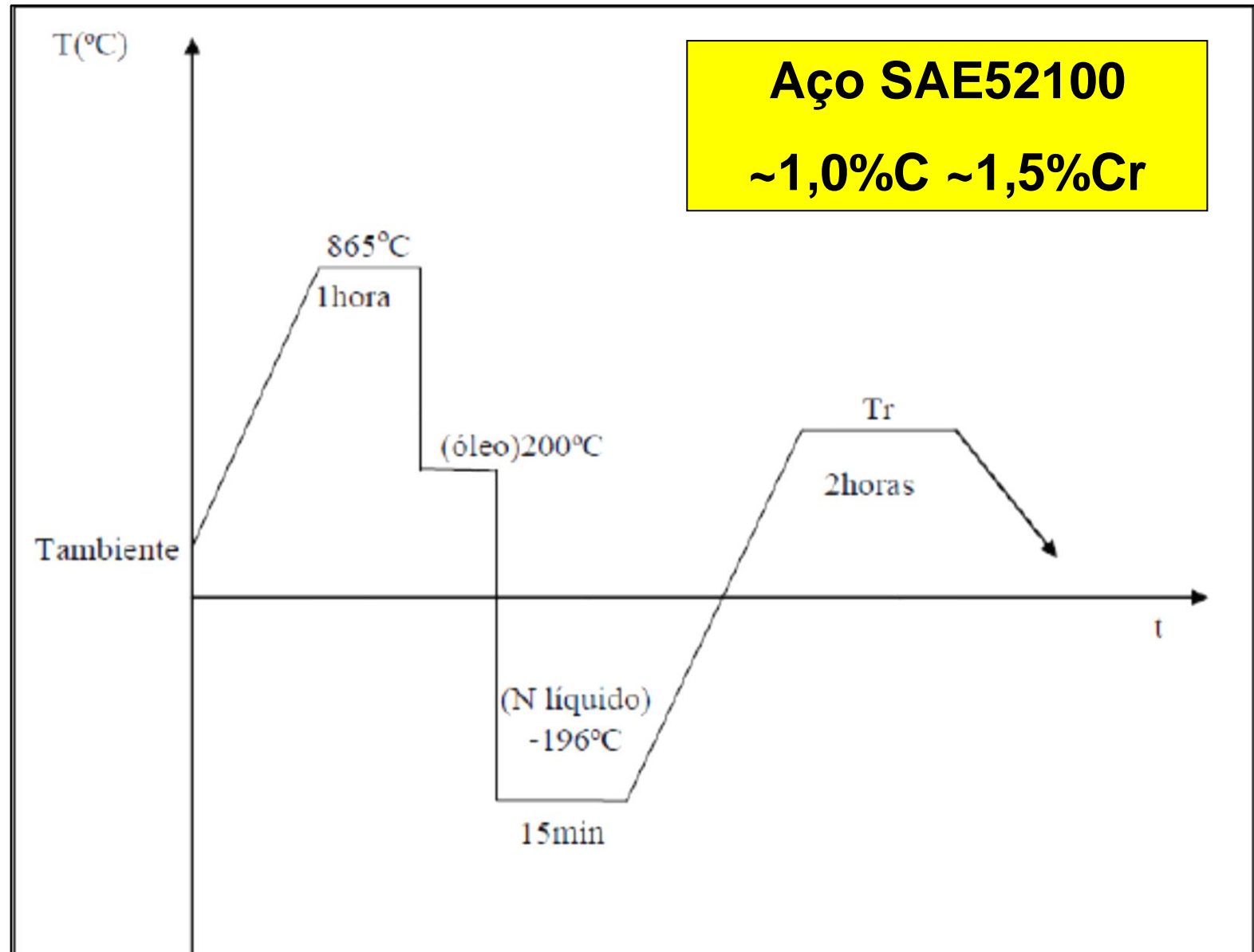
MARTENSITA E AUSTENITA RETIDA



| SETOR | $\% \gamma_R$ |
|-------|---------------|
| A | 10 |
| B | 15 |
| C | 20 |
| D | 25 |
| E | 30 |
| F | 35 |
| G | 40 |

TRATAMENTO SUBZERO

Aço SAE52100
~1,0%C ~1,5%Cr



TEMPERABILIDADE

ELEMENTOS DE LIGA
ALTERAM AS
CURVAS TTT/TRC

AISI 1050

POSSIBILITA TRABALHO
MECÂNICO ANTES DA
TRANSFORMAÇÃO DE FASE

AISI 4340

(Costa e Silva & Mei)

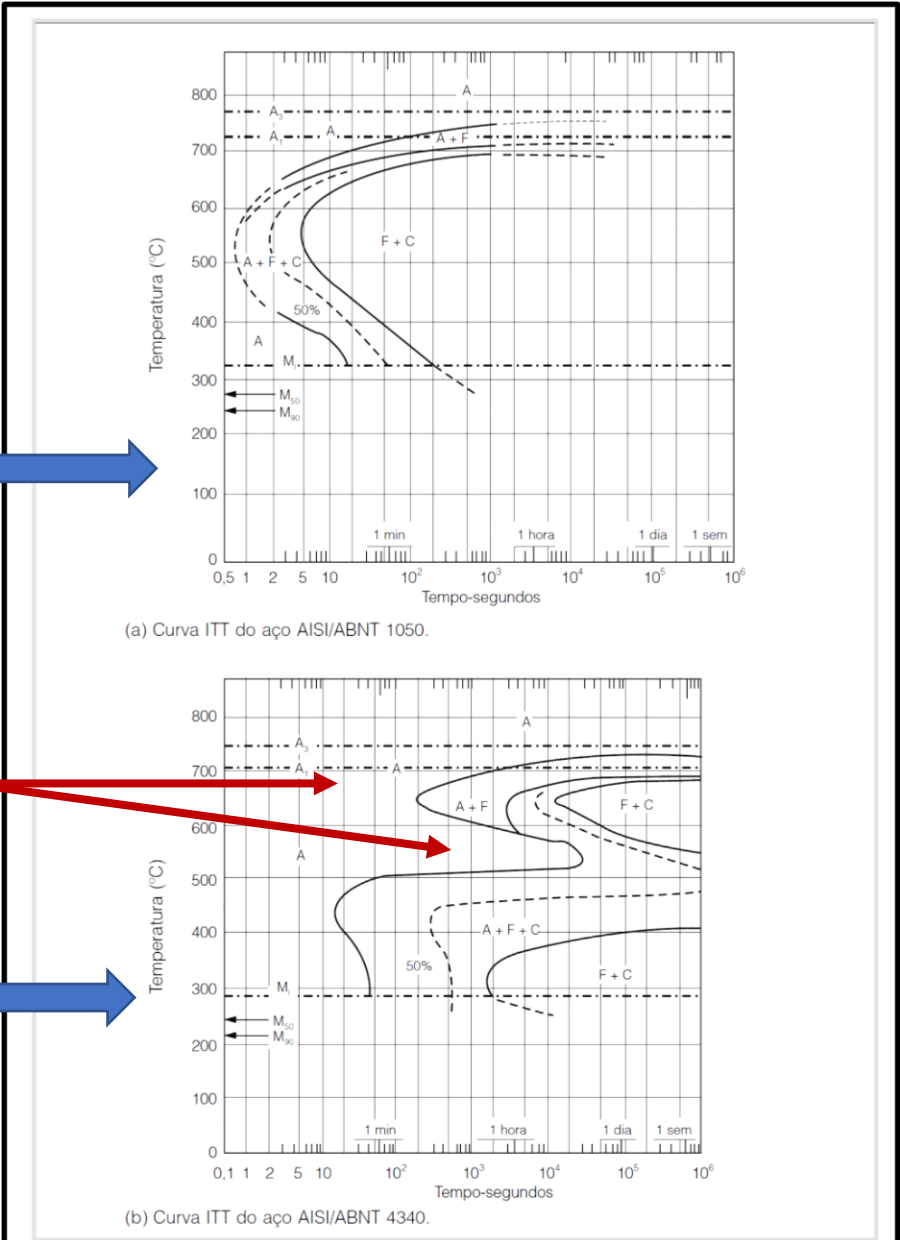
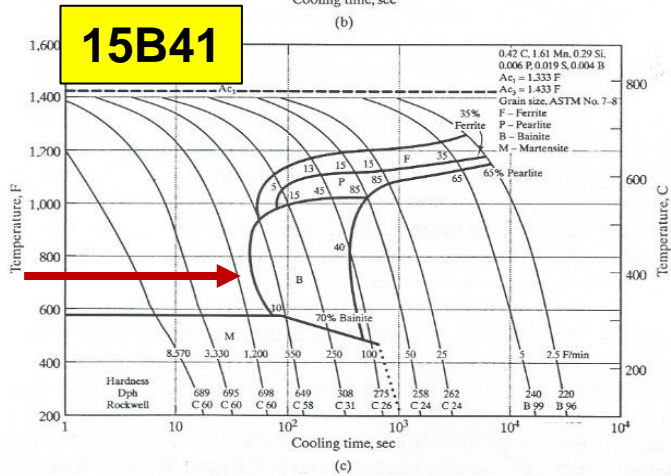
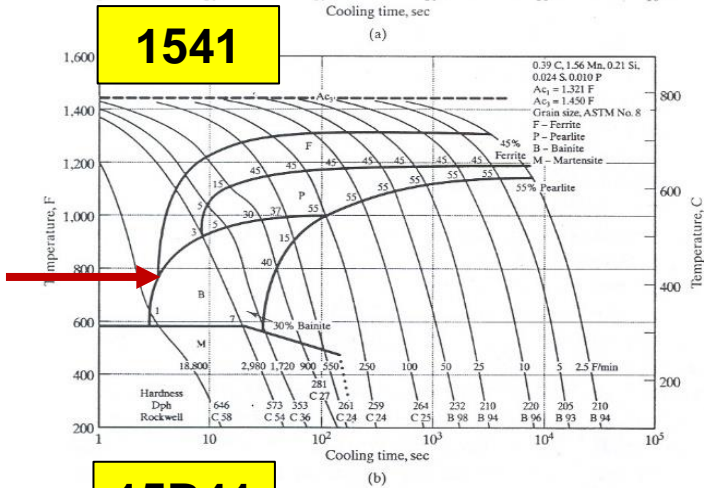
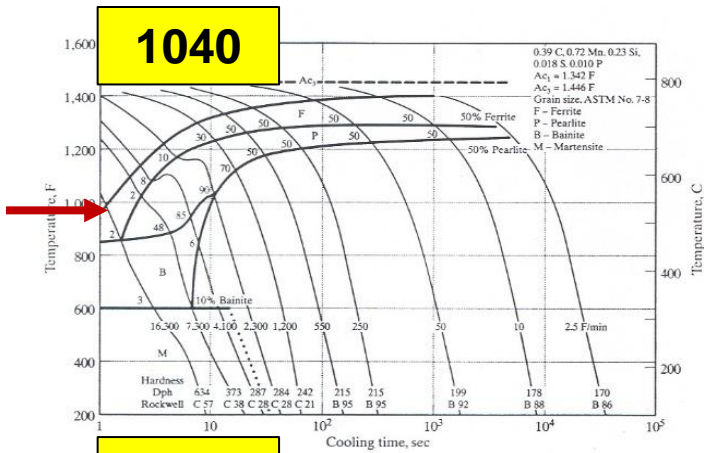


Figura 3.8 No aço ligado (b), é mais fácil a têmpera (formação da martensita) do que no aço carbono (a) [8].

TEMPERABILIDADE

Efeito da %Elemento de Liga do aço sobre a temperabilidade



CURVAS TRC DOS AÇOS

- ABNT 1040 (0,40 %C)
- ABNT1541 (0,40 %C + 1,5%Mn)
- ABNT 15B41 (0,40 %C + 1,6%Mn + B)

TEMPERABILIDADE

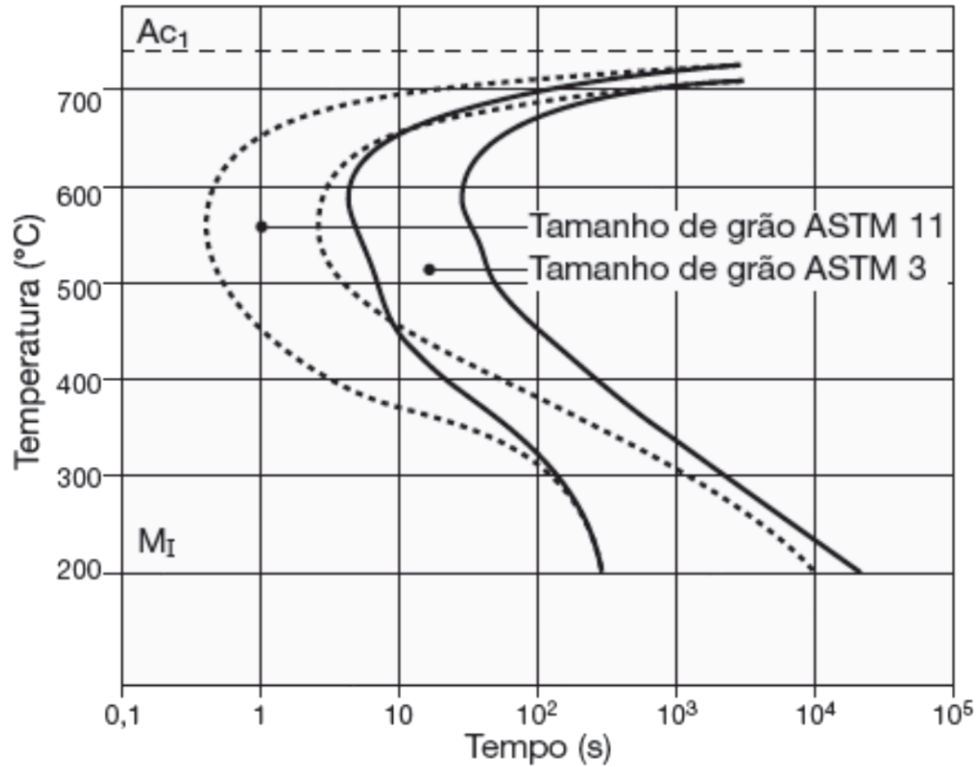


Figura 9.47

Influência do tamanho de grão austenítico no diagrama TTT de um aço com C = 0,87%, Mn = 0,30% e V = 0,27%. Adaptado de [42].

TG γ

(Colpaert)

ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE

TEMPERABILIDADE

TEMPERABILIDADE É A CAPACIDADE DE ENDURECIMENTO POR TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA

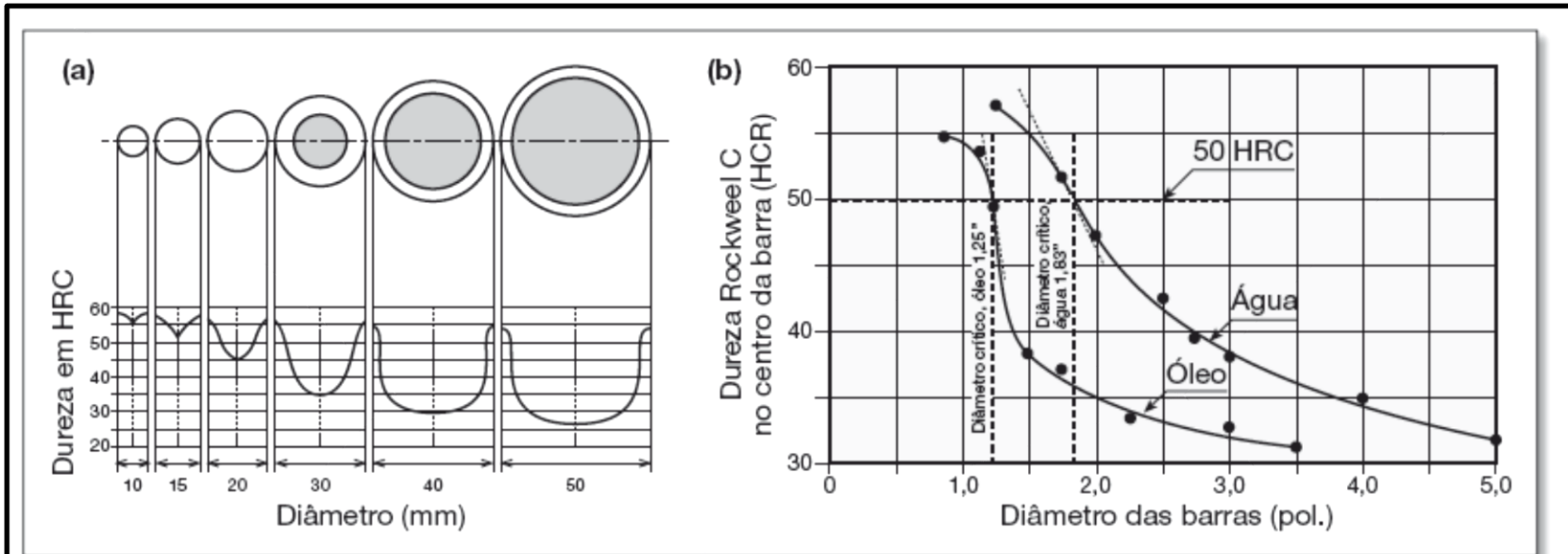


Figura 10.42

Ensaio Grossmann. (a) Barras de diferentes diâmetros são temperadas e o perfil de dureza ao longo do diâmetro da barra é medido. (b) A dureza no centro das barras pode ser apresentada em um único gráfico onde o diâmetro crítico é determinado, para um determinado meio de têmpera. No exemplo, resultados para AISI 3140, Adaptado de [20] e [17].

(Colpaert)

GROSSMANN

TEMPERABILIDADE

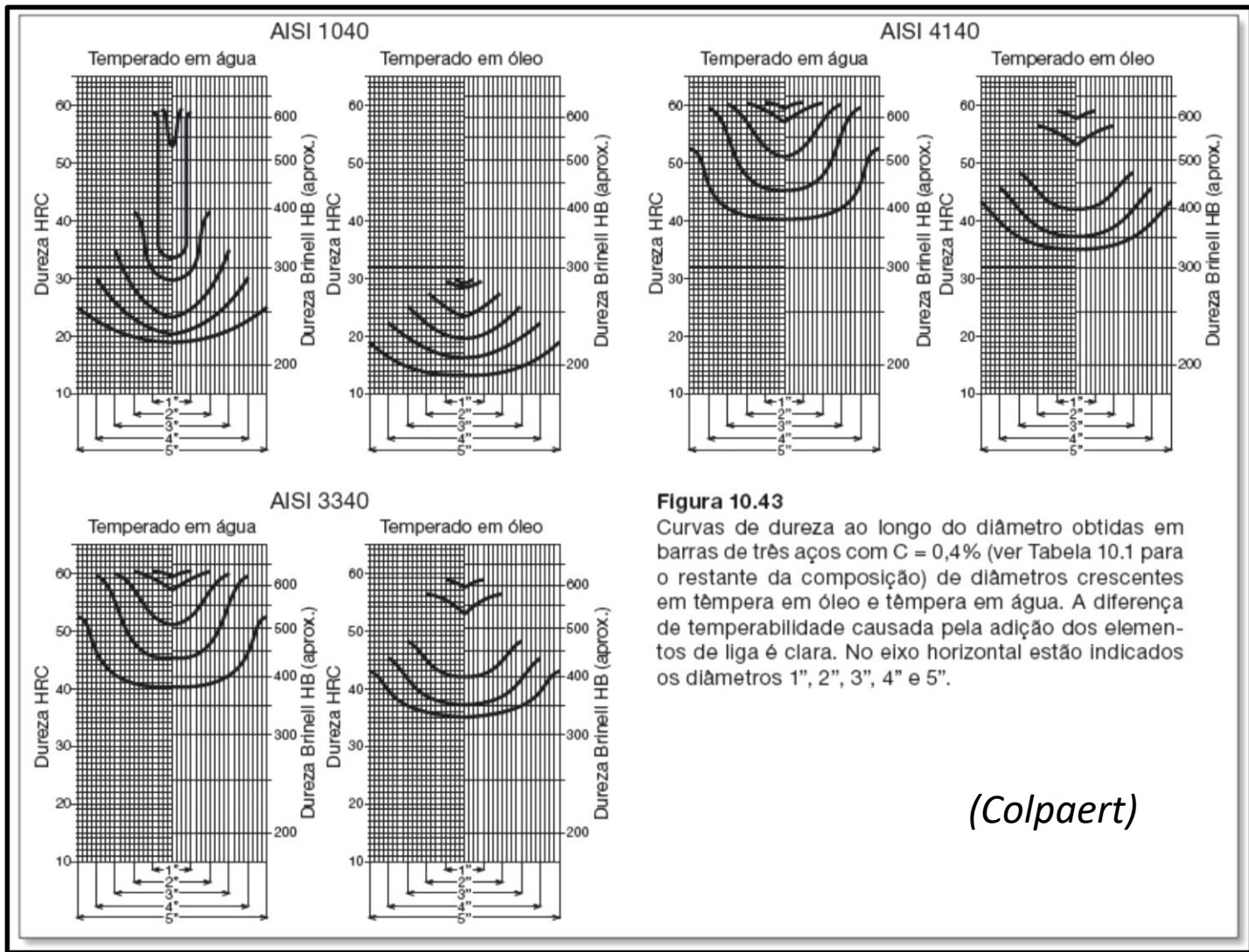


Figura 10.43
Curvas de dureza ao longo do diâmetro obtidas em barras de três aços com C = 0,4% (ver Tabela 10.1 para o restante da composição) de diâmetros crescentes em têmpera em óleo e têmpera em água. A diferença de temperabilidade causada pela adição dos elementos de liga é clara. No eixo horizontal estão indicados os diâmetros 1", 2", 3", 4" e 5".

(Colpaert)

Diâmetro Ideal

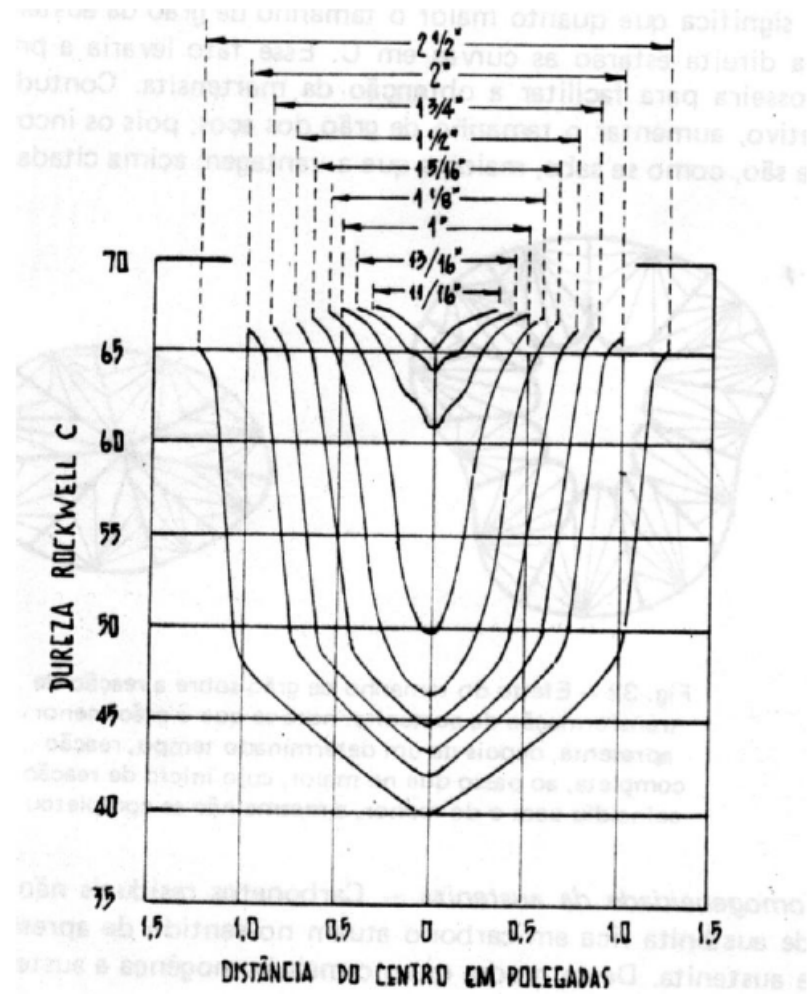
Diâmetro de um dado aço que produziria 50% de martensita no centro quando temperado em severidade de têmpera H^∞

H^∞ indica um meio de têmpera hipotético que reduz a temperatura da superfície do aço à temperatura do banho instantaneamente (tempo zero)

O diâmetro crítico é definido para cada meio. Diâmetro no qual ocorre, pelo menos 50% de martensita no centro. Verificação por mapeamento de dureza e metalografia, em relação ao diâmetro das barras, em MO.

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.
- 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.

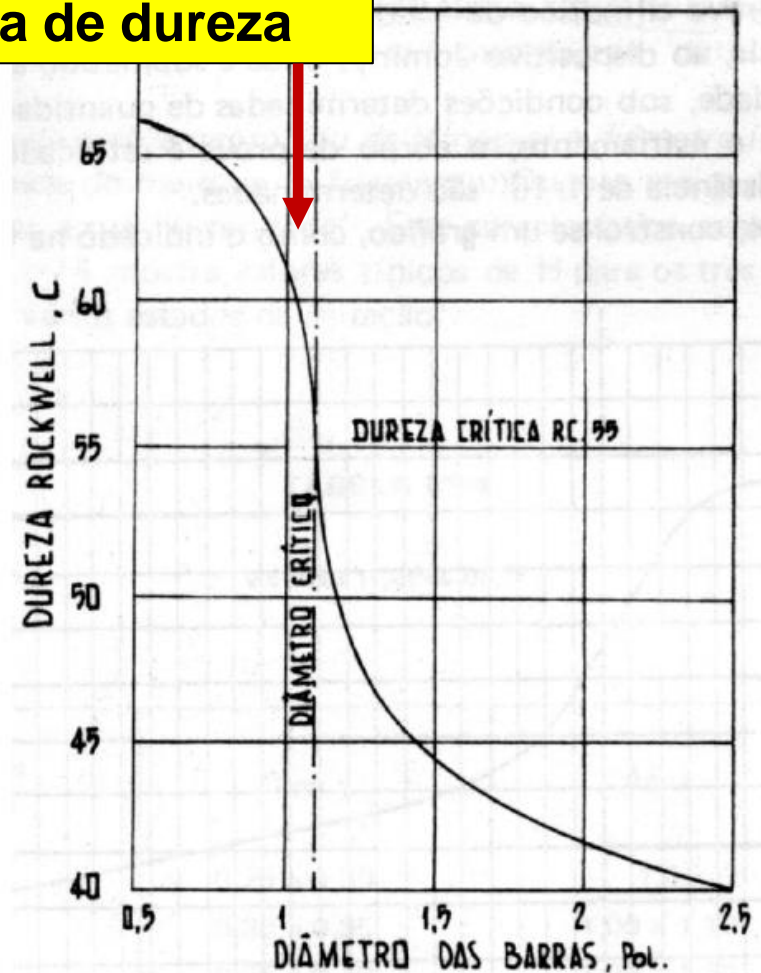


Método de Grossman(Diâmetro crítico)

Dureza do centro das barras X diâmetros

Diâmetro crítico: queda mais brusca de dureza

- 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



TEMPERABILIDADE-PLANILHA DE CÁLCULO PELA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Cálculo de Temperabilidade para Aços COM ou SEM Boro - Norma 1E38 Caterpillar

| | ACIARIA | | CLIENTE | | Fator de Multiplicação | | Faixa de Aplicação (%) | | |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|------------|--|------------|------------|
| <i>Elem.</i> | <i>Mín</i> | <i>Máx</i> | <i>Mín</i> | <i>Máx</i> | <i>Mín</i> | <i>Máx</i> | <i>Elem.</i> | <i>Mín</i> | <i>Máx</i> |
| %C | 0,41 | 0,22 | 0,20 | 0,45 | 0,216 | 0,119 | %C | 0,10 | 0,90 |
| %Si | 0,28 | 0,09 | 0,06 | 0,40 | 1,196 | 1,063 | %Si | 0,10 | 2,40 |
| %Mn | 0,76 | 0,76 | 0,94 | 0,90 | 3,533 | 3,533 | %Mn | 0,50 | 1,95 |
| %Cr | 0,16 | 0,89 | 0,53 | 1,20 | 1,346 | 2,922 | %Cr | - | 1,75 |
| %Ni | 0,10 | 0,06 | 0,10 | 0,25 | 1,036 | 1,022 | %Ni | - | 2,00 |
| %Mo | 0,02 | 0,01 | 0,21 | 0,06 | 1,060 | 1,030 | %Mo | - | 0,55 |
| %Cu | 0,05 | 0,20 | 0,08 | 0,35 | 1,020 | 1,070 | %Cu | - | 0,55 |
| %V | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,01 | 1,010 | 1,010 | %V | - | 0,20 |
| <i>Boro</i> | | | | | 1,00 | 1,00 | <input type="radio"/> DI em mm <input checked="" type="radio"/> DI em polegadas | | |
| <i>DI (mm)</i> | 35,31 | 37,85 | 35,56 | 43,18 | | | | | |
| <i>DI (pol)</i> | 1,39 | 1,49 | 1,4 | 1,7 | | | | | |

Atenção : Para Aços ao Boro, colocar um "x" no campo *Boro*.


Não esquecer de lançar os teores de todos os elementos na faixa da aciaria

OBS CONTINUAR SIMULAÇÃO

MEIO DE TÊMPERA - SEVERIDADE

Tabela 10.2

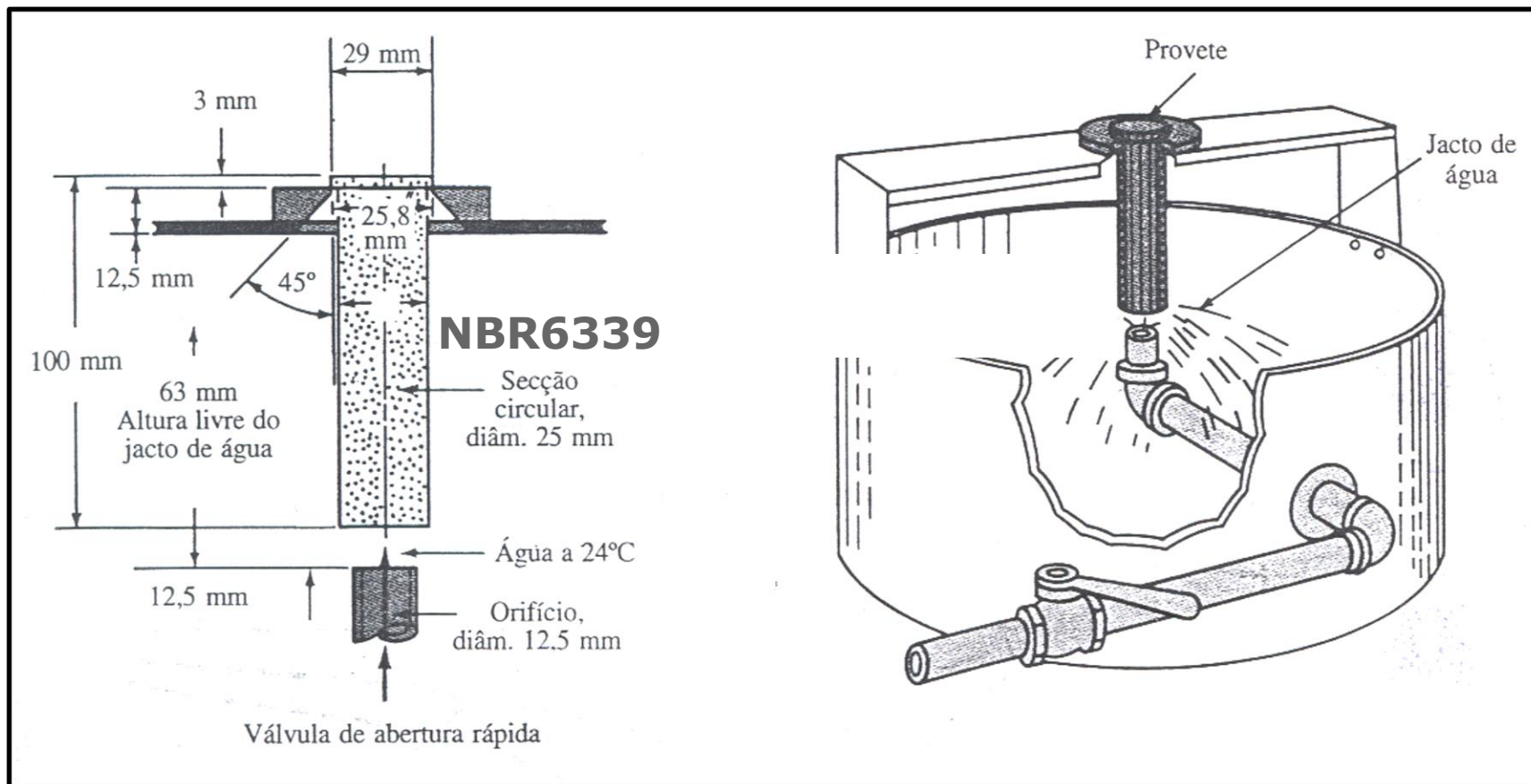
Severidade de t mpera de diferentes meios comparados com a  gua.

| Meio de t mpera | Severidade de t mpera (H) |  <p>Crescem: Velocidade de resfriamento Trincas Distor o</p> <p>(Colpaert)</p> |
|-----------------------------|---------------------------|--|
|  leo sem agita o | 0,2 | |
|  leo moderadamente agitado | 0,5 | |
|  leo violentamente agitado | 0,7 | |
|  gua sem agita o | 1,0 | |
|  gua fortemente agitada | 1,5 | |
| Salmoura sem agita o | 2,0 | |
| Salmoura fortemente agitada | 5,0 | |

ENSAIO JOMINY – NORMAS: NBR6339 E ASTM A 255

Ensaio para determinação da temperabilidade do aço

Ensaio Jominy: Corpo de provas e tanque



**LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
ENGENHARIA MECÂNICA E ENGENHARIA DE
CONTROLE AUTOMAÇÃO**

■ **Coordenação:**

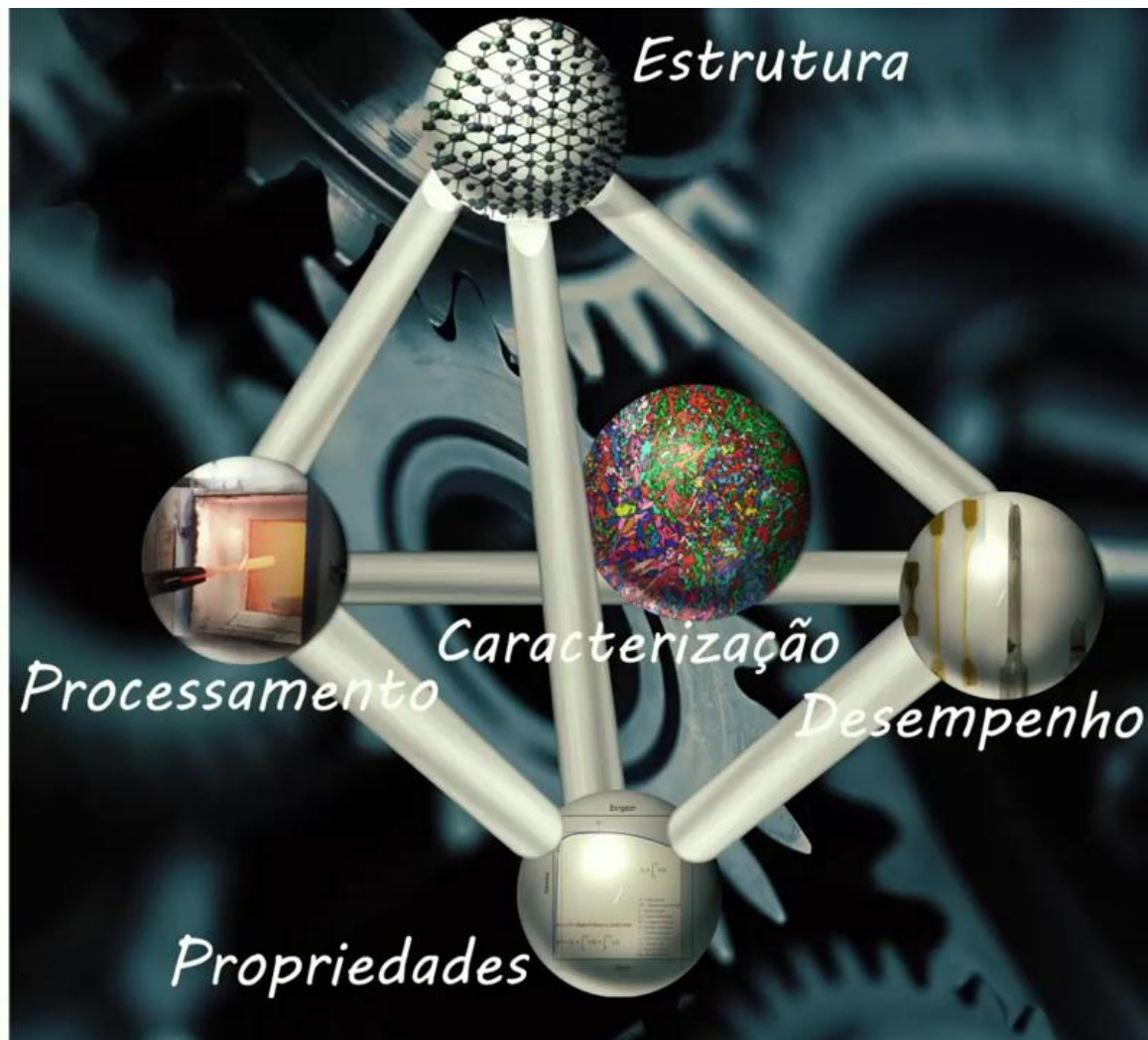
- Prof. Dr. Éder Sócrates Najar Lopes
- Prof. Dr. Rubens Caram Junior

■ **Auxiliar Docente:**

- Mestrando André Henrique Guimarães Gabriel
- Doutorando Caio Chaussê de Freitas
- Doutoranda Fernanda de Melo Fernandes
- Mestranda Kleanny Gama Sales de Souza
- Mestrando Matheus Piovesana Wischi
- Mestrando Rodrigo da Silva Miranda

■ **Técnicos de Laboratório:**

- Thiago Gonzaga
- Marcos Antônio Porta Saramago



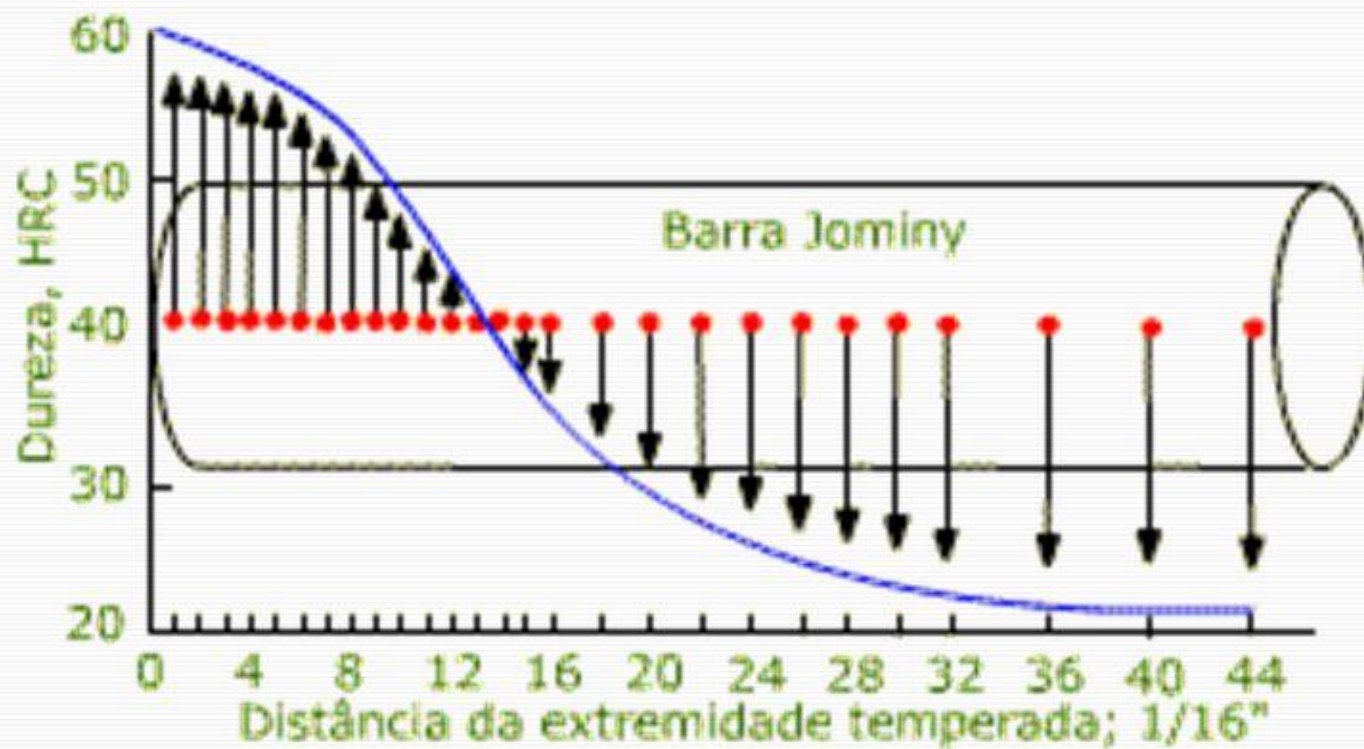
JOMINY

Resfriamento do corpo de provas no ensaio Jominy

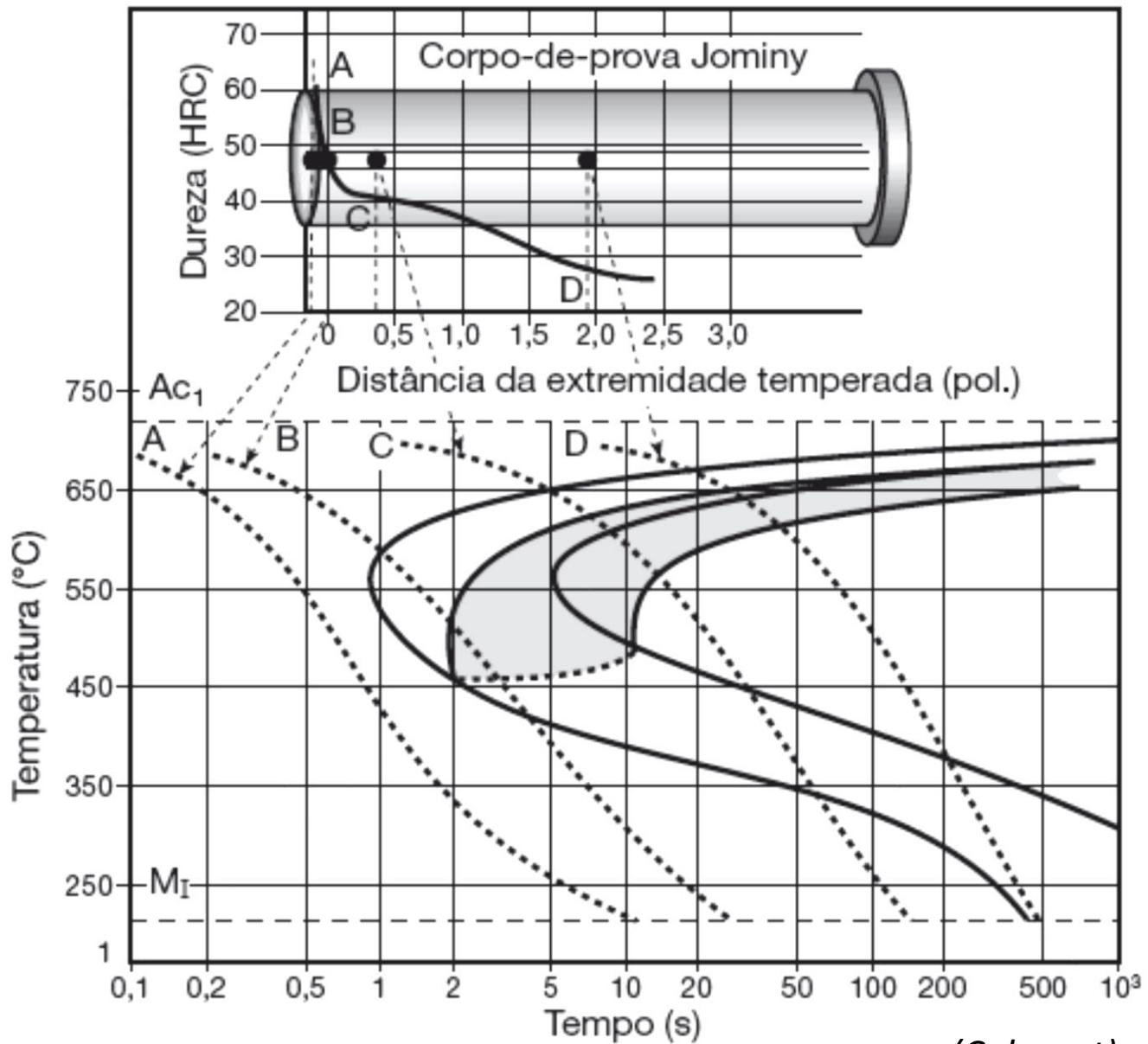


Tratamentos térmicos

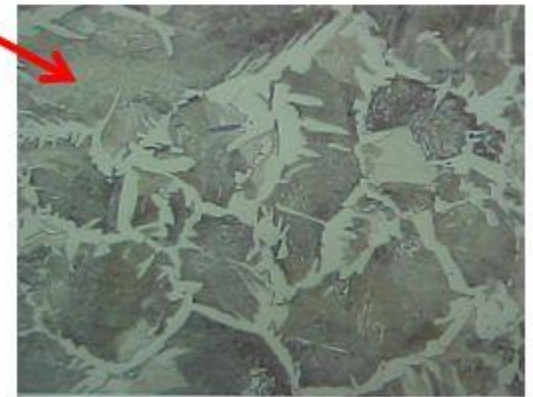
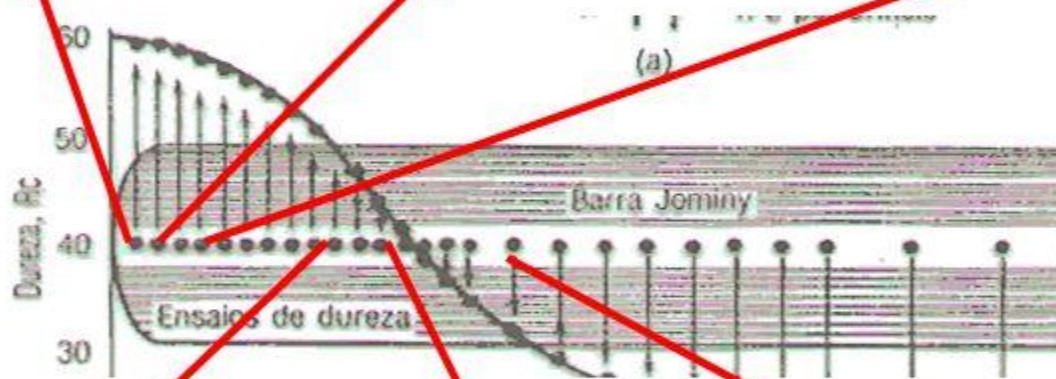
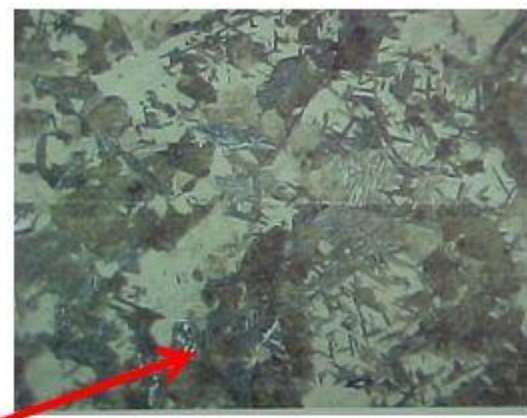
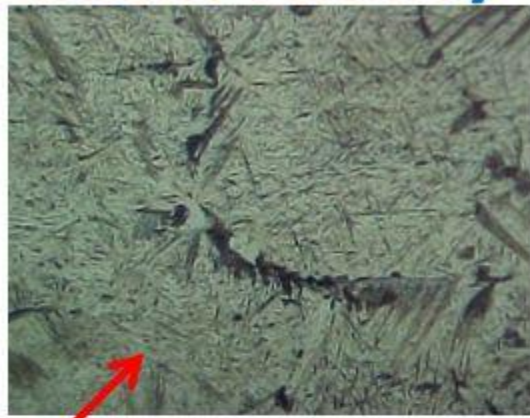
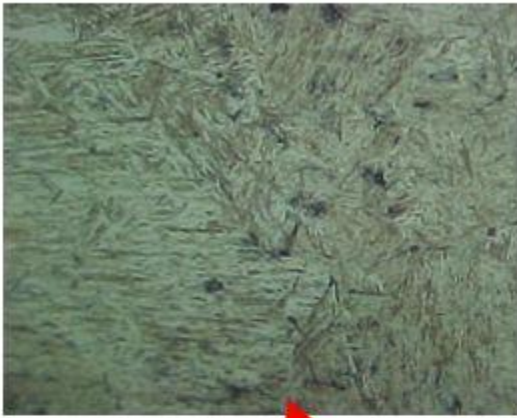
Temperabilidade - ENSAIO JOMINY



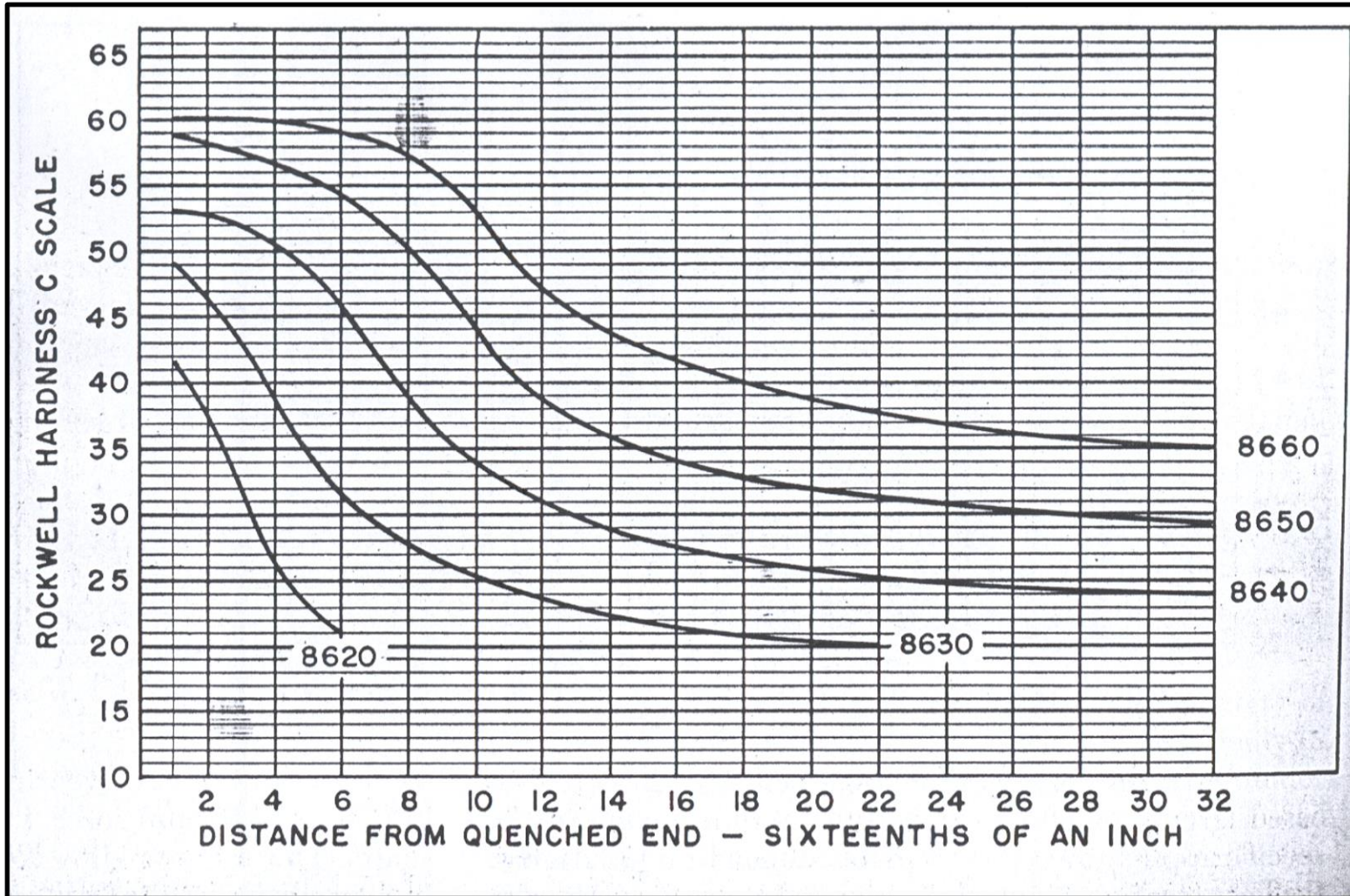
JOMINY



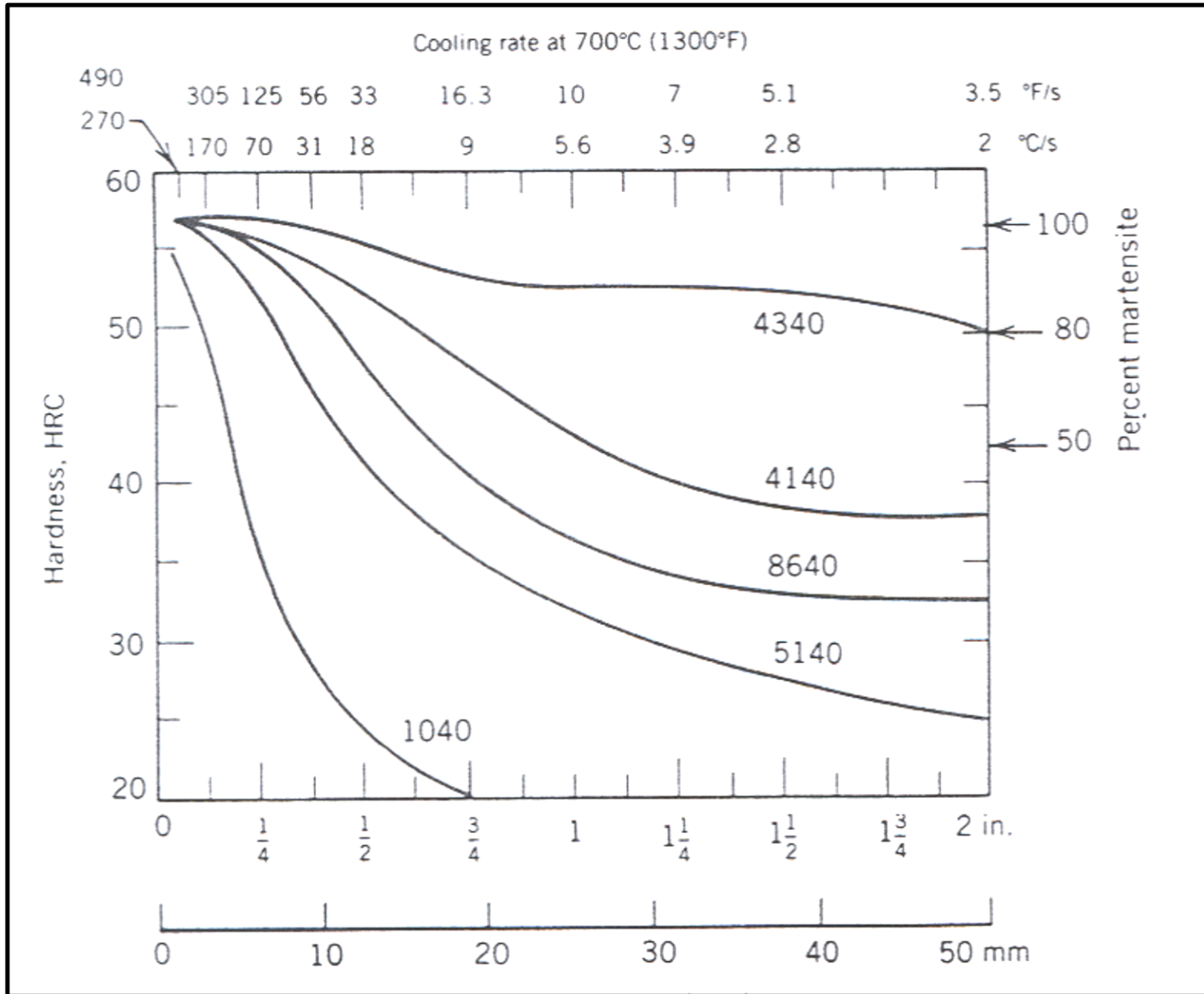
Ensaio Jominy



JOMINY- TEOR DE CARBONO



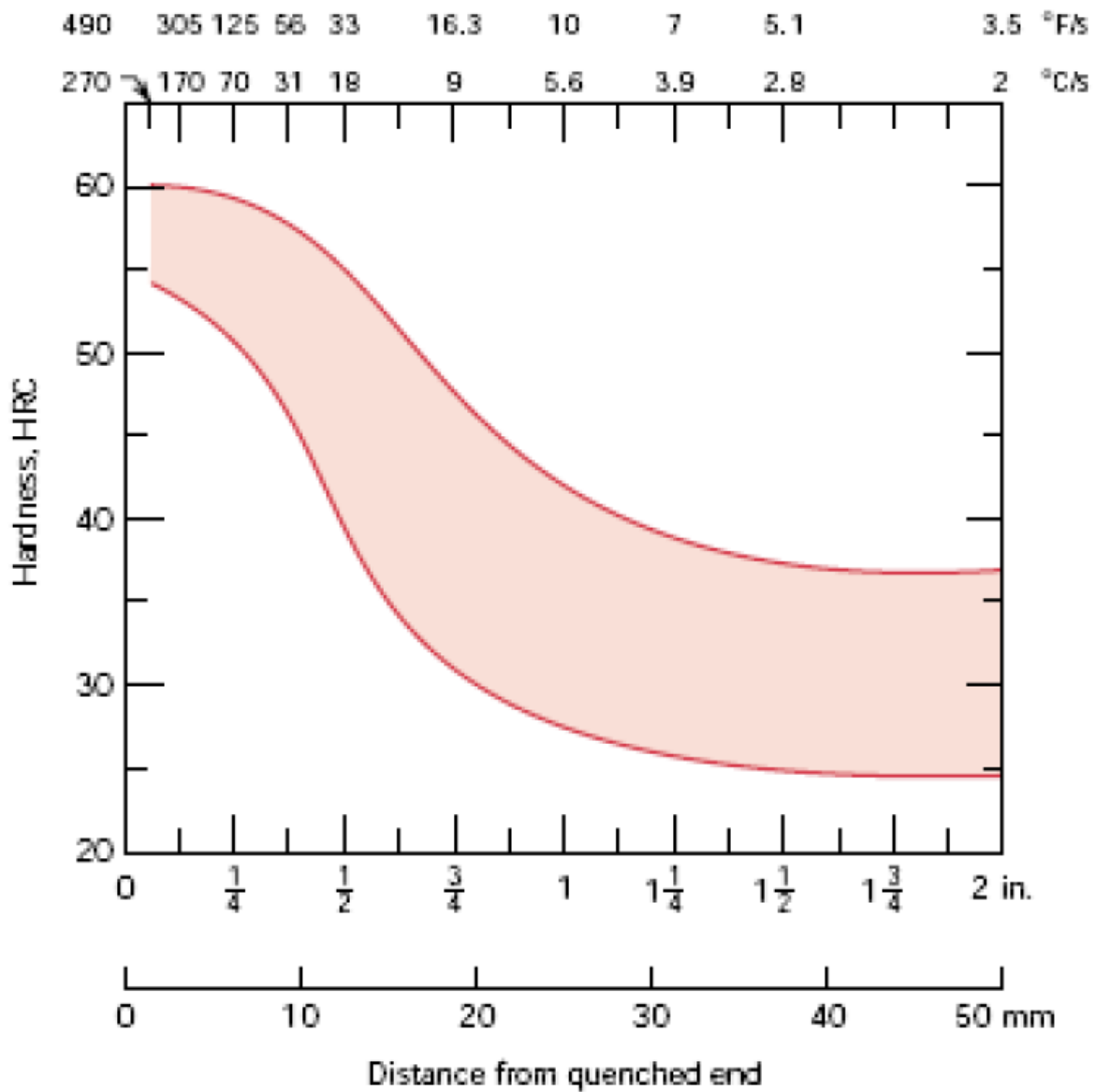
JOMINY-ELEMENTOS DE LIGA-MESMO TEOR DE CARBONO



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

Cooling rate at 700°C (1300°F)



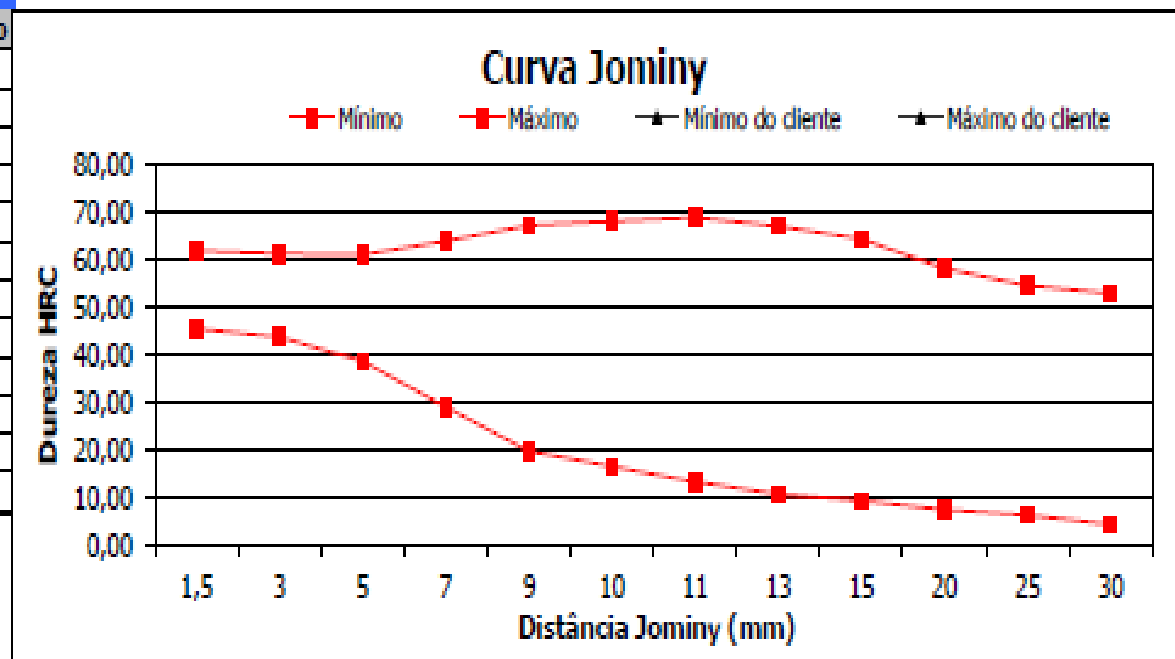
SEP 1664 - tabela 1b: Cálculo teórico de Jominy através de Regressão Múltipla

Para uso com ligas de Cr recozidas e temperadas com teores de cromo em torno de 1%

$$HPC = a_0 + a_1 \times \%C + a_2 \times \%Si + a_3 \times \%Mn + a_4 \times \%P + a_5 \times \%S + a_6 \times \%Cr + a_7 \times \%Mo + a_8 \times \%Ni + a_9 \times \%Al + a_{10} \times \%Cu + a_{11} \times \%N_2$$

| Norma | Cliente | Liga | Composições Químicas | | | | | | | | | | |
|-----------|---------|--------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| | | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Al | Cu | N ₂ |
| % em peso | Aciaria | Mínimo | 0,2200 | 0,0200 | 0,5900 | 0,0050 | 0,0030 | 0,8000 | 0,0050 | 0,0100 | 0,0120 | 0,0170 | 0,0060 |
| | | Máximo | 0,4680 | 0,3600 | 0,9700 | 0,0370 | 0,0380 | 1,2400 | 0,0900 | 0,2800 | 0,0620 | 0,3200 | 0,0148 |
| | Cliente | Mínimo | | | | | | | | | | | |
| | | Máximo | | | | | | | | | | | |

| J (mm) | Dureza HRC | | | |
|--------|------------|--------|---------|--------|
| | Aciaria | | Cliente | |
| | Mínimo | Máximo | Mínimo | Máximo |
| 1,5 | 45,42 | 61,86 | | |
| 3 | 43,60 | 61,24 | | |
| 5 | 38,56 | 61,06 | | |
| 7 | 28,89 | 63,91 | | |
| 9 | 19,51 | 67,22 | | |
| 10 | 16,29 | 68,06 | | |
| 11 | 13,08 | 68,90 | | |
| 13 | 10,50 | 67,05 | | |
| 15 | 9,09 | 64,41 | | |
| 20 | 7,23 | 58,13 | | |
| 25 | 6,05 | 54,54 | | |
| 30 | 4,07 | 52,82 | | |

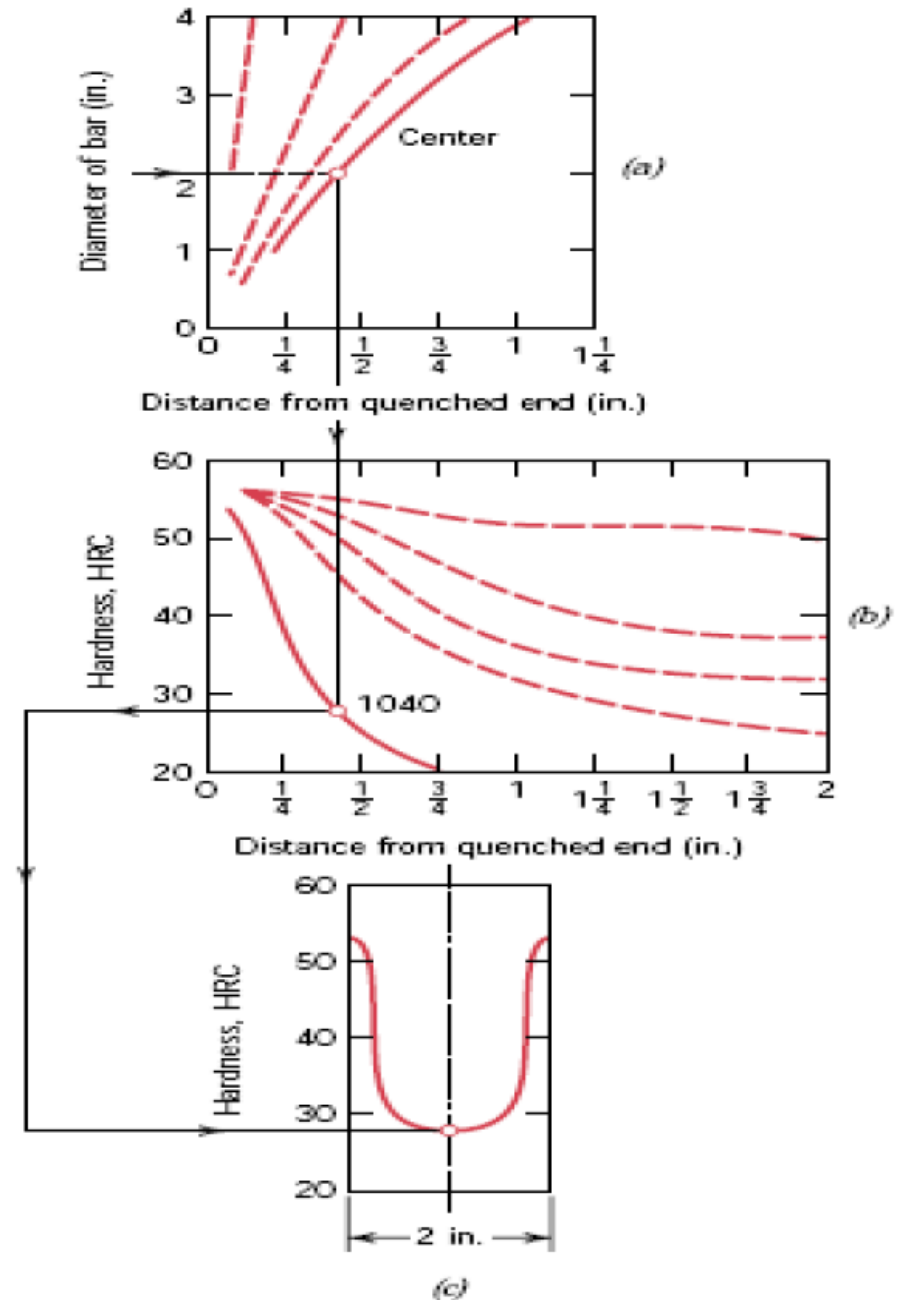
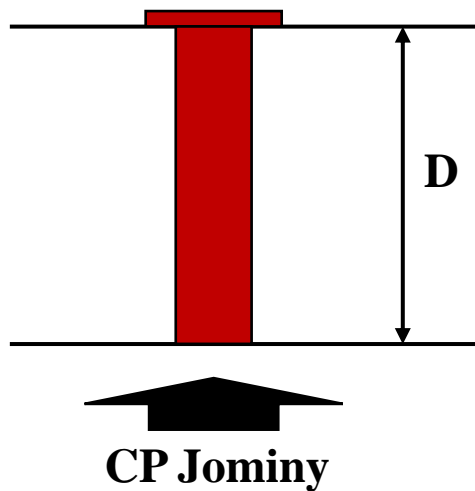


Determinação de dureza por meio do Ensaio Jominy

- 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



SIMBOLOGIA DAS NORMAS DE TEMPERABILIDADE

1. NORMA SAE J 1268

Na norma SAE 1268 , a simbologia H significa “HARDENABILITY” ,potencial de endurecimento ou temperabilidade . Desse modo , existe uma faixa de composição química , descrita nesta norma que , conseqüentemente , garante uma faixa de dureza obtida no ensaio Jominy , também descrita na norma.

Desse modo, o aço SAE 4140 , com garantia de temperabilidade , seria chamado de SAE 4140 H.

2.NORMA DIN EN 10083-1 , DIN EN 10083-3 E DIN EN 10084.

As normas DIN antigas utilizavam a mesma simbologia da norma SAE J 1268 . Com o intuito de diferenciar a simbologia , as novas normas adotaram o símbolo +H.

Nestas normas , a garantia de temperabilidade é sinalizada com o símbolo +H , , tendo ainda as variações +HH e +HL.

O símbolo +HH significa “ Hardenability – High” , sendo que o segundo H (High) significa que a faixa de composição química seria mais alta que a faixa de composição do +H , garantindo uma faixa de dureza maior no ensaio Jominy. O símbolo +HL significa “ Hardenability – Low” , sendo que o L(Low) , significa que a faixa de composição química é menor que a faixa do +H. Conseqüentemente , a faixa de dureza do ensaio Jominy deverá ser menor que a do aço +H.

Existe uma diferença entre a faixa de composição química e , conseqüentemente de dureza da norma SAE e norma DIN, como mostra a tabela 1 do exemplo abaixo.

Exemplo: Aço DIN 41Cr4 - equivalente – Aço SAE 5140.

TABELA 1 – VALORES JOMINY

| | DIN EN 10083-1 | | | SAE J 1268 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| DISTÂNCIA JOMINY(mm) | DIN 41Cr4 | | | SAE 5140 |
| | +H(HRc) | +HH(HRc) | +HL(HRc) | H(HRc) |
| J 1,5 | 53-61 | 56-61 | 53-58 | 54-59 |

FIM