



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.**

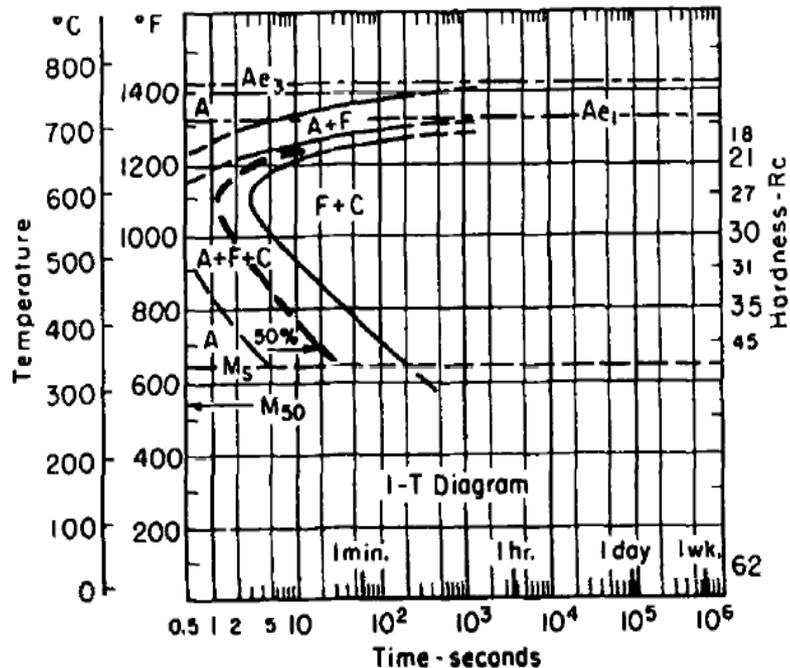
**EM MATERIAIS TEMPERÁVEIS A TÊMPERA É MAIS
FÁCIL.**

**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

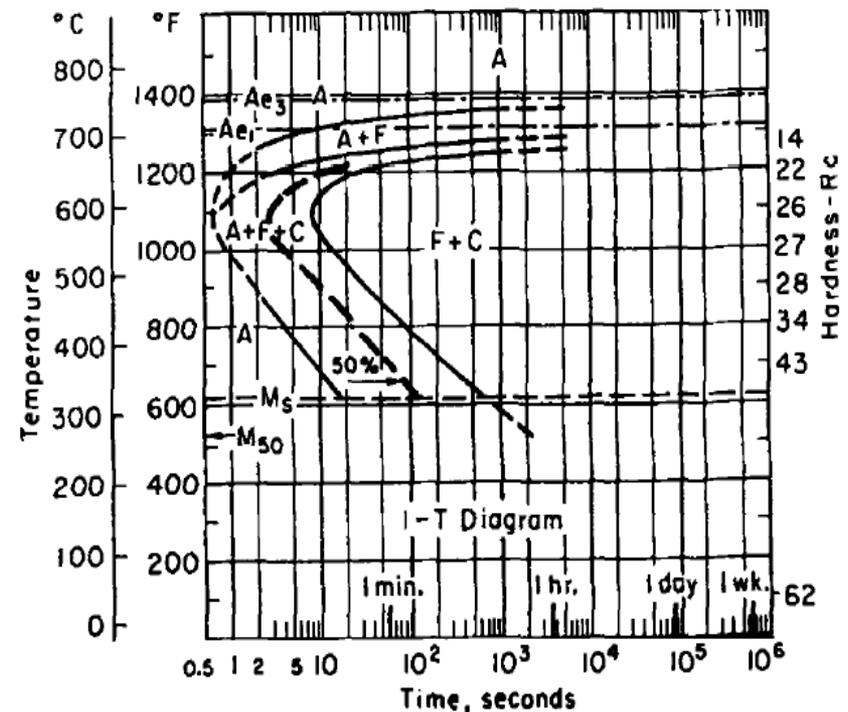
Type: 1045/1050

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

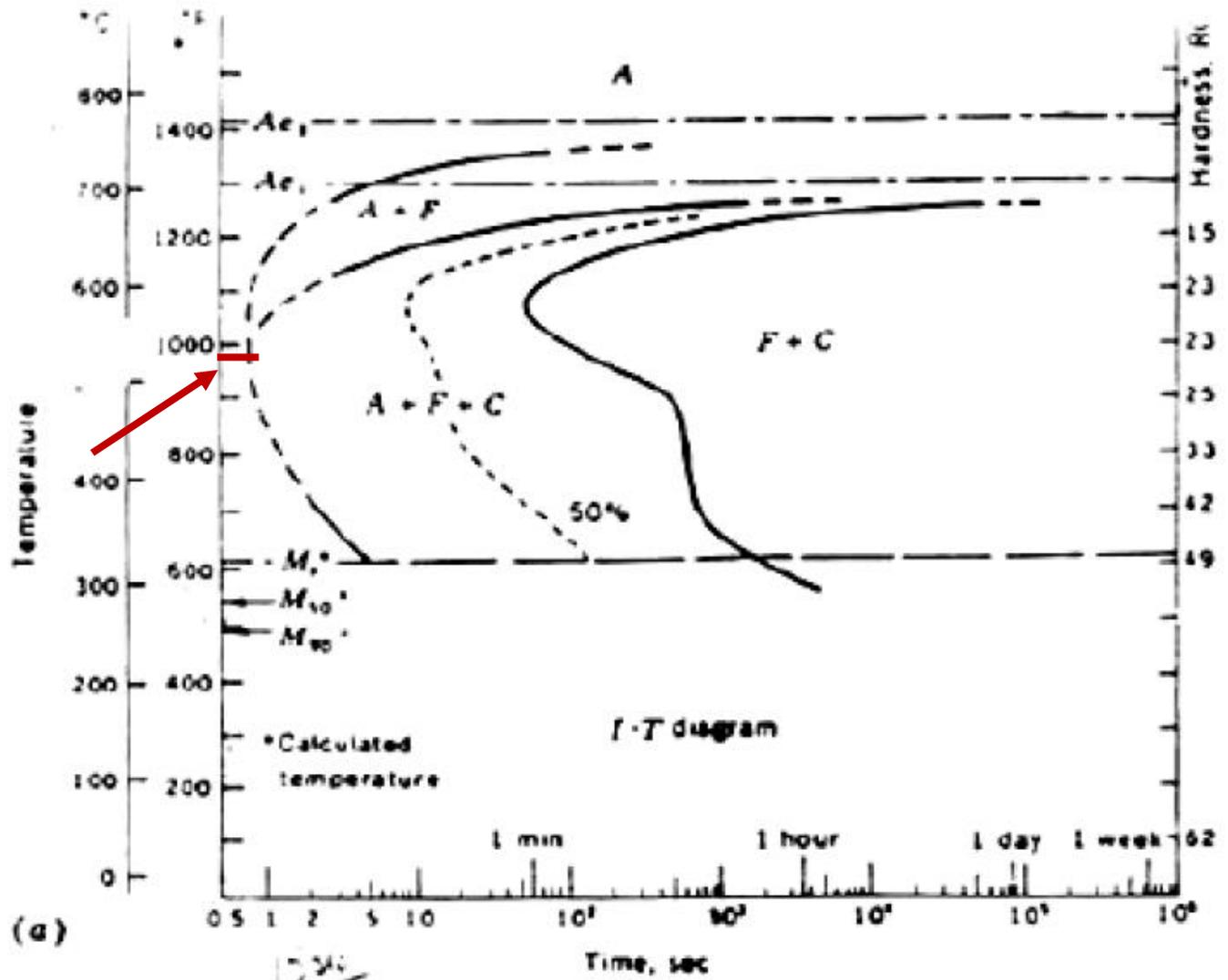
Composition: Fe - 0.49% C - 0.54% Mn - 0.20% Si - 1.49% Cu Grain size: 50% 8, 50% 5 Austenitized at 843°C (1550°F)



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

TTT curve - 1040

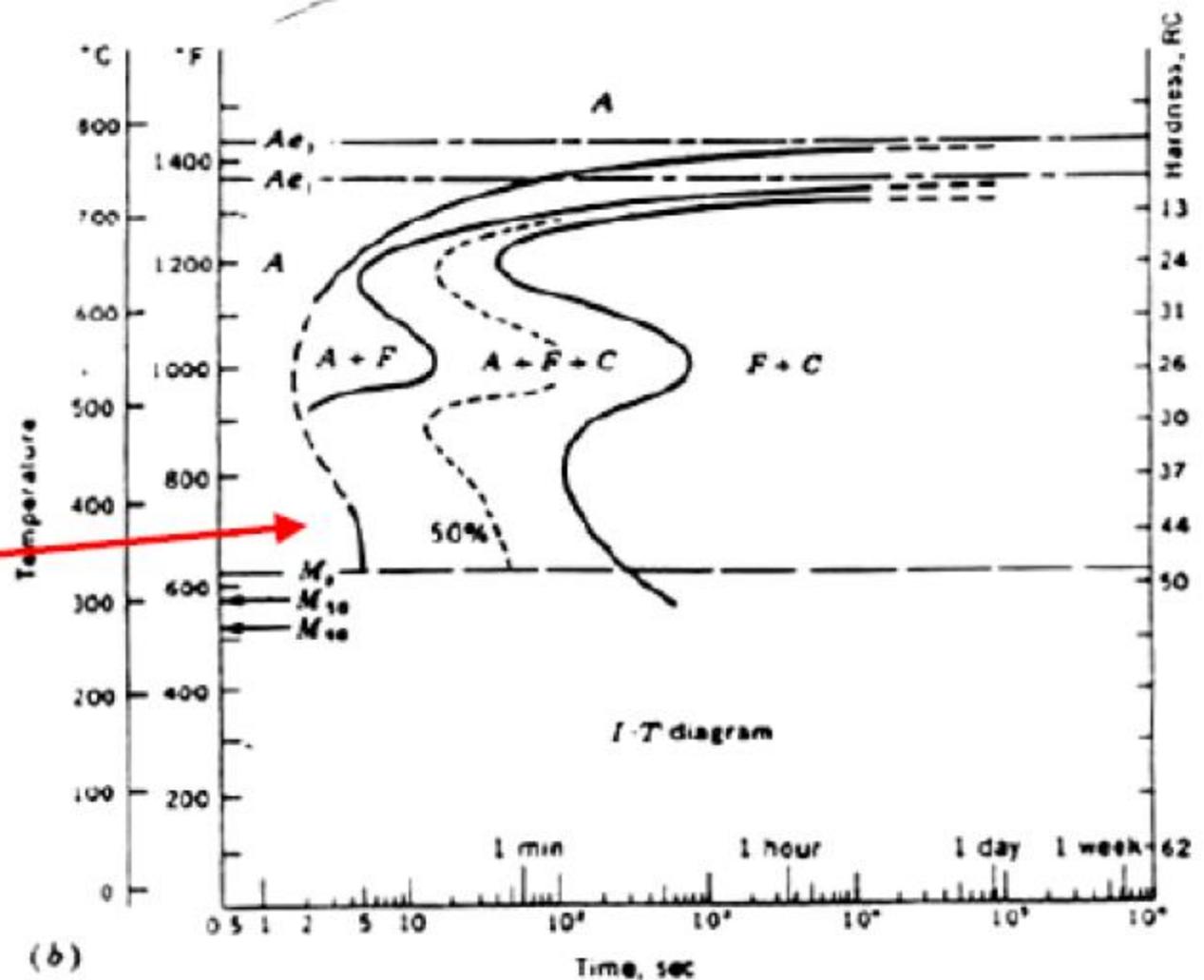
1040
C+Mn



TTT curve - 5140

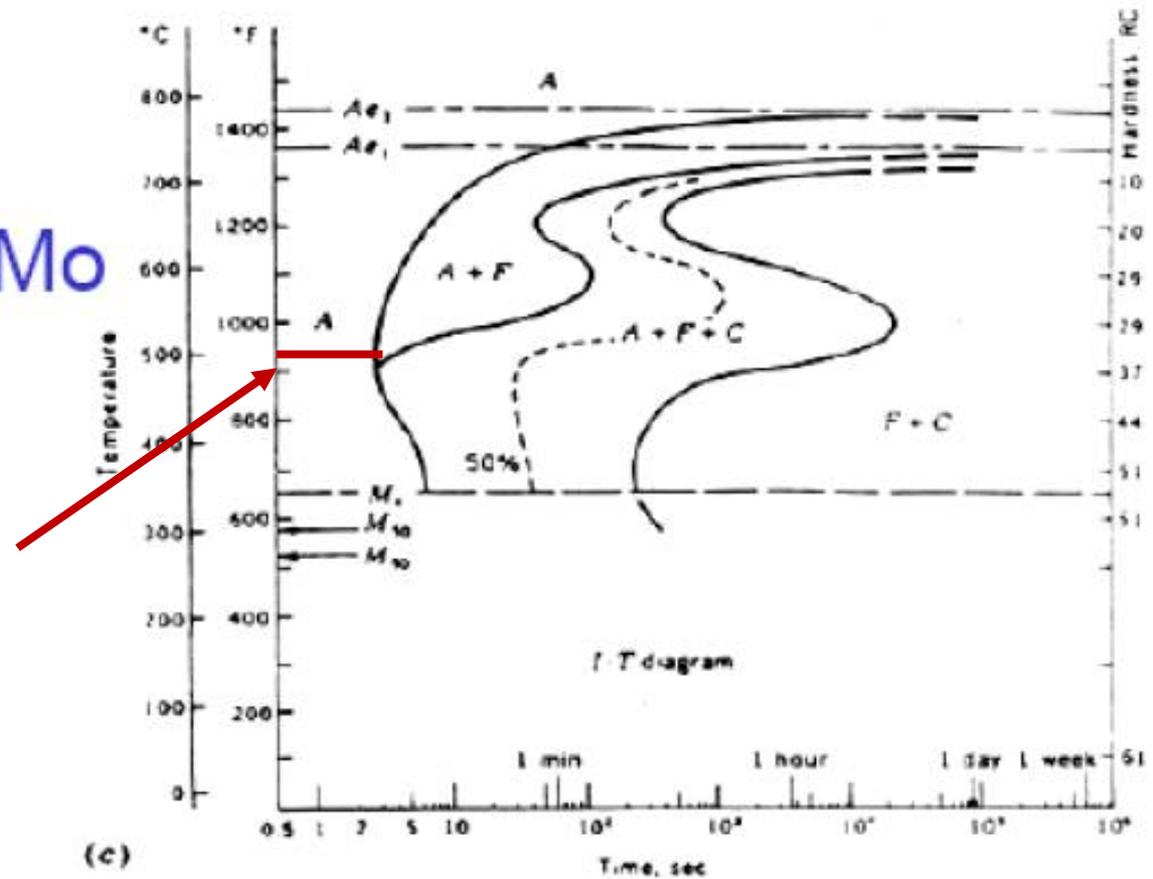
5140
C+Mn+Cr

Curve shifted
to right

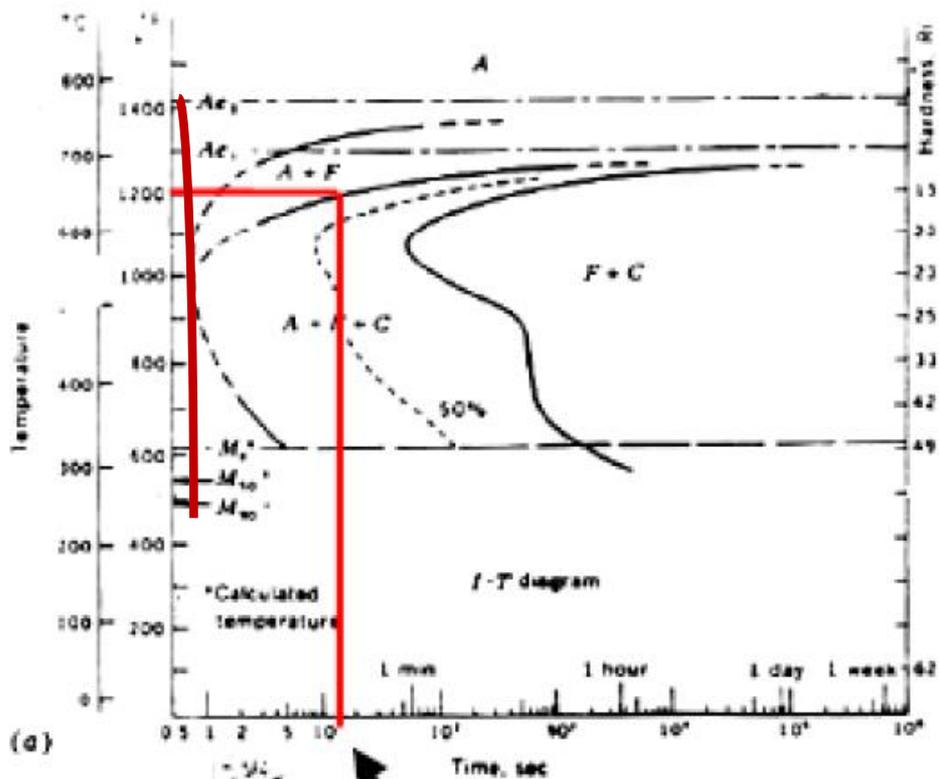


TTT curve - 4140

4140
C+Mn+Cr+Mo

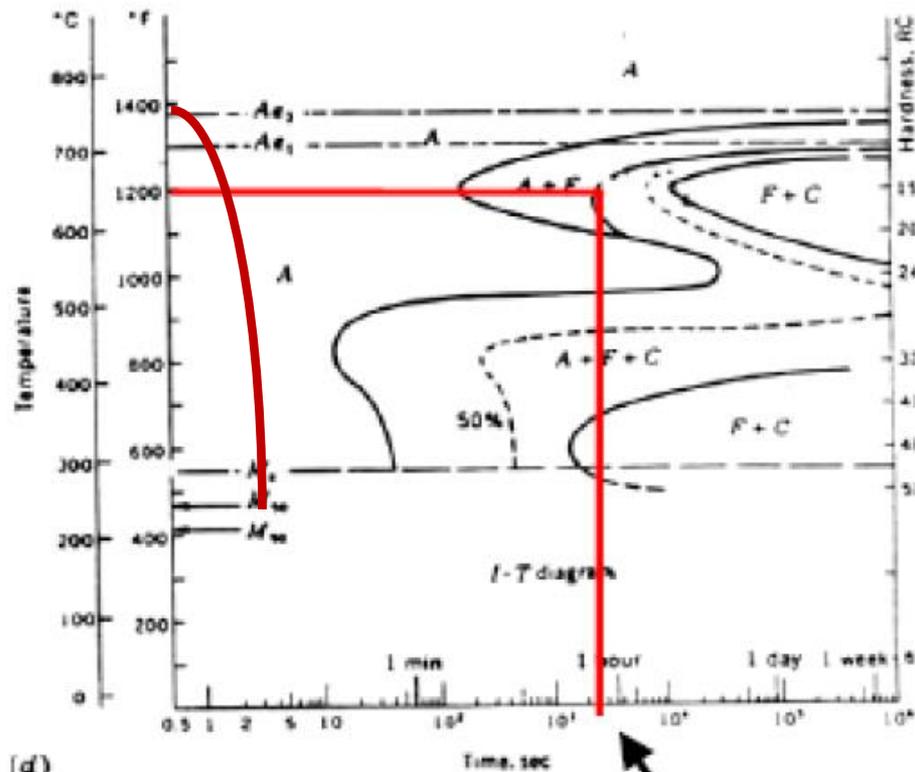


1040



15 sec

4340



1 hour

Temperabilidade

- Velocidade crítica de resfriamento

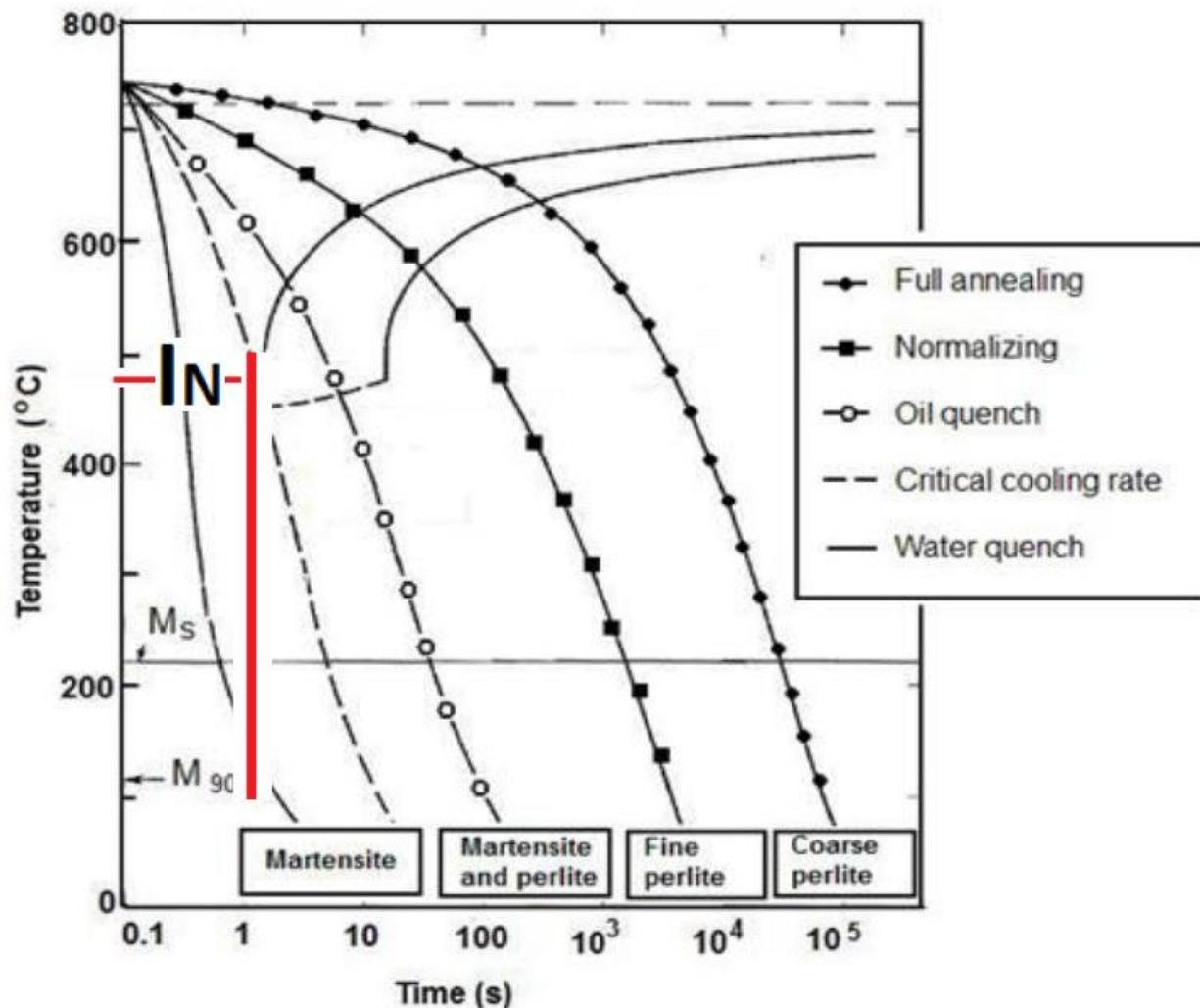
$$V_M = \frac{T_A - T_N}{I_N}$$

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** .

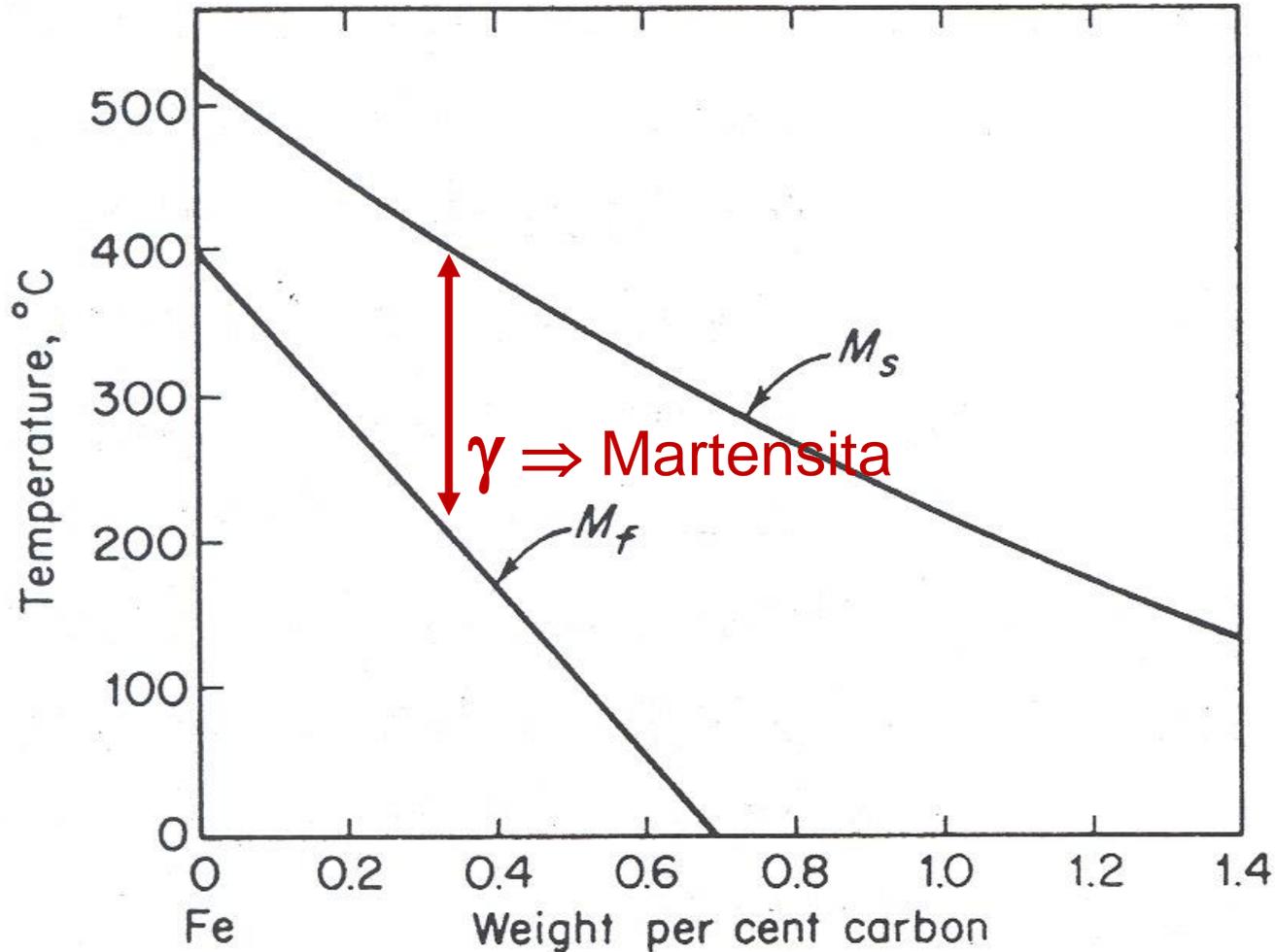
⇒ **Homogeneidade da austenita**

Problema:

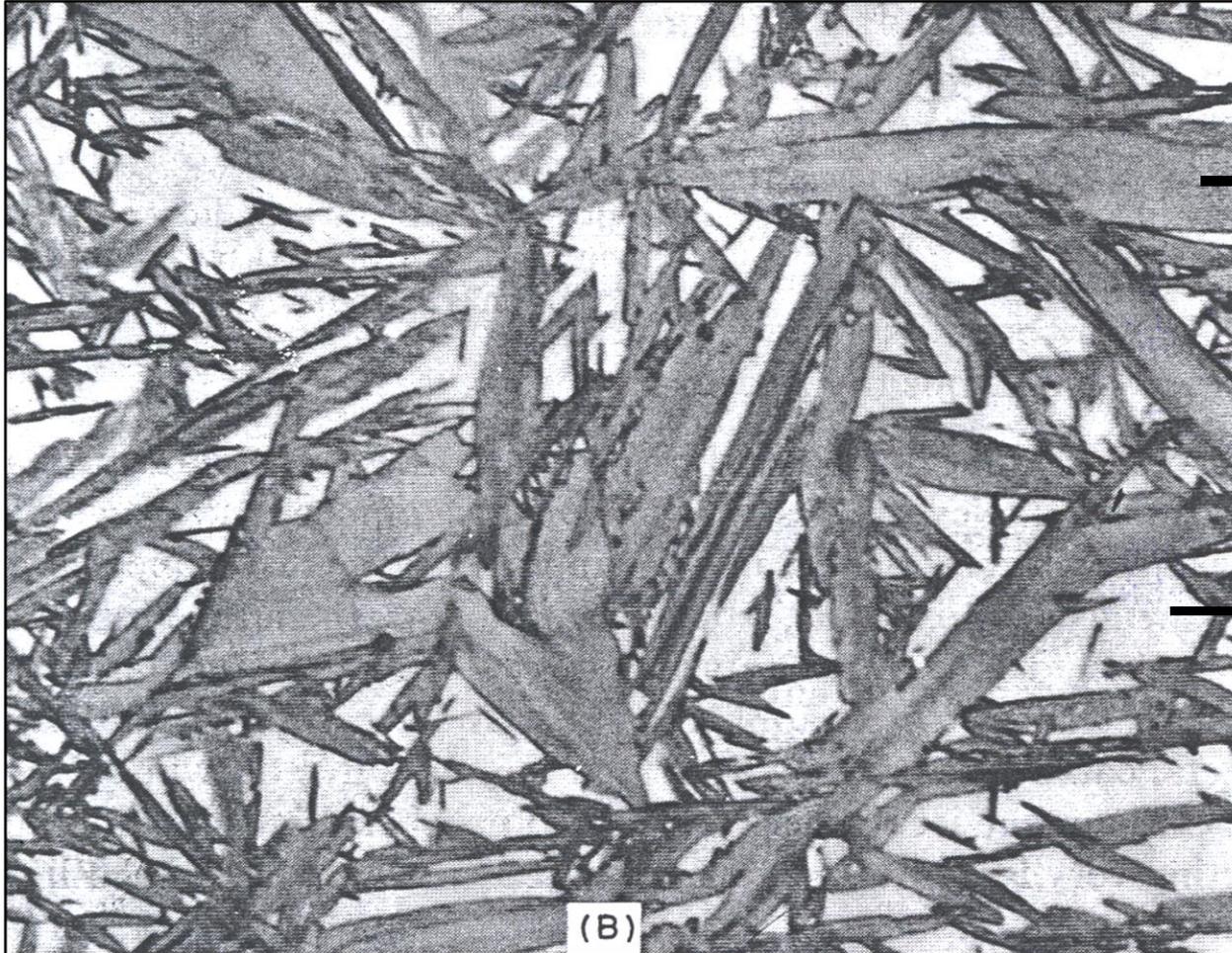
Quando a temperatura **M_f** estiver **abaixo** da temperatura **do meio de têmpera**, a transformação da austenita se dá de forma **incompleta**.

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**)

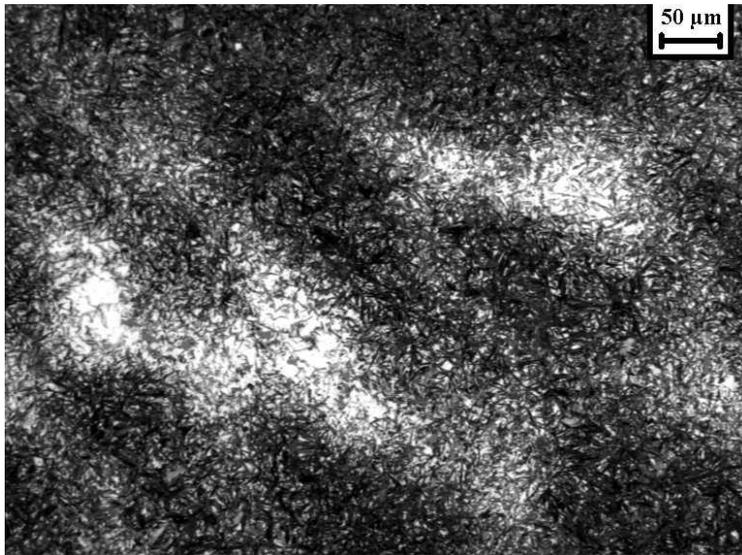


Martensita e Austenita Retida



→ Agulhas de
Martensita

→ Austenita
Retida

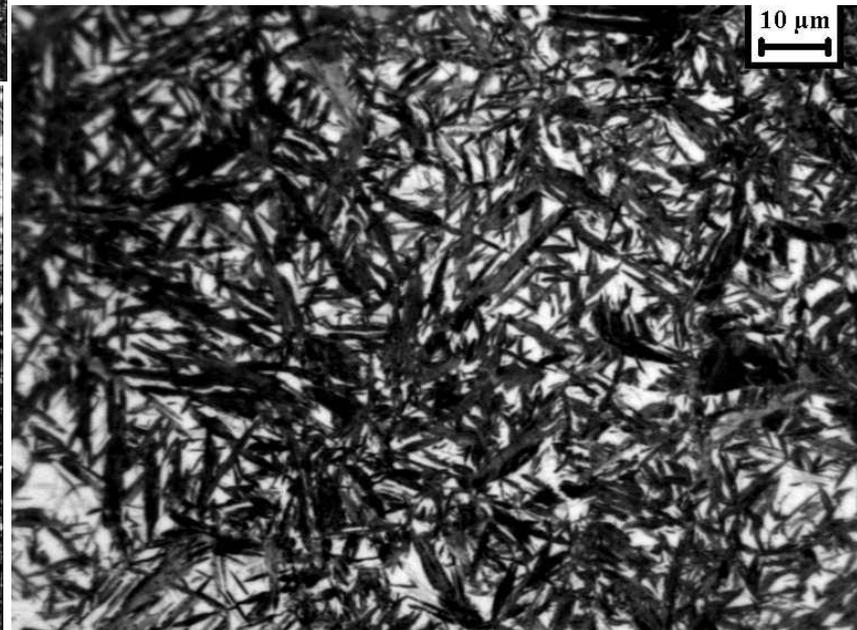
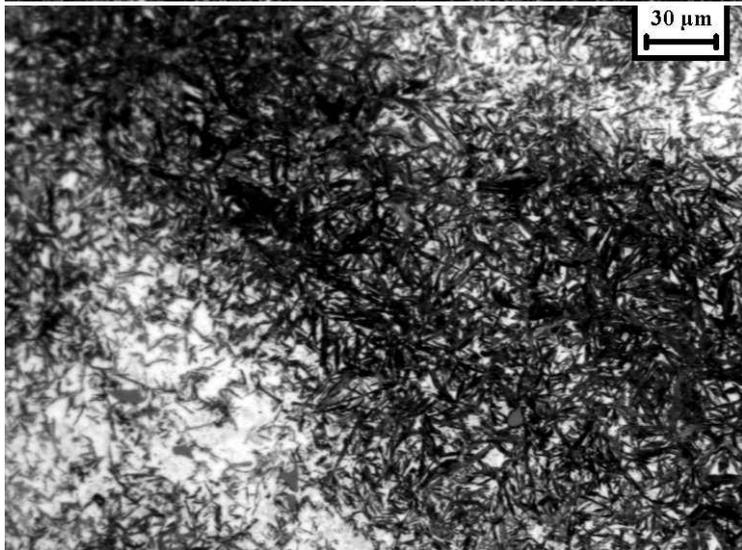


AÇO ALTA LIGA TEMPERADO

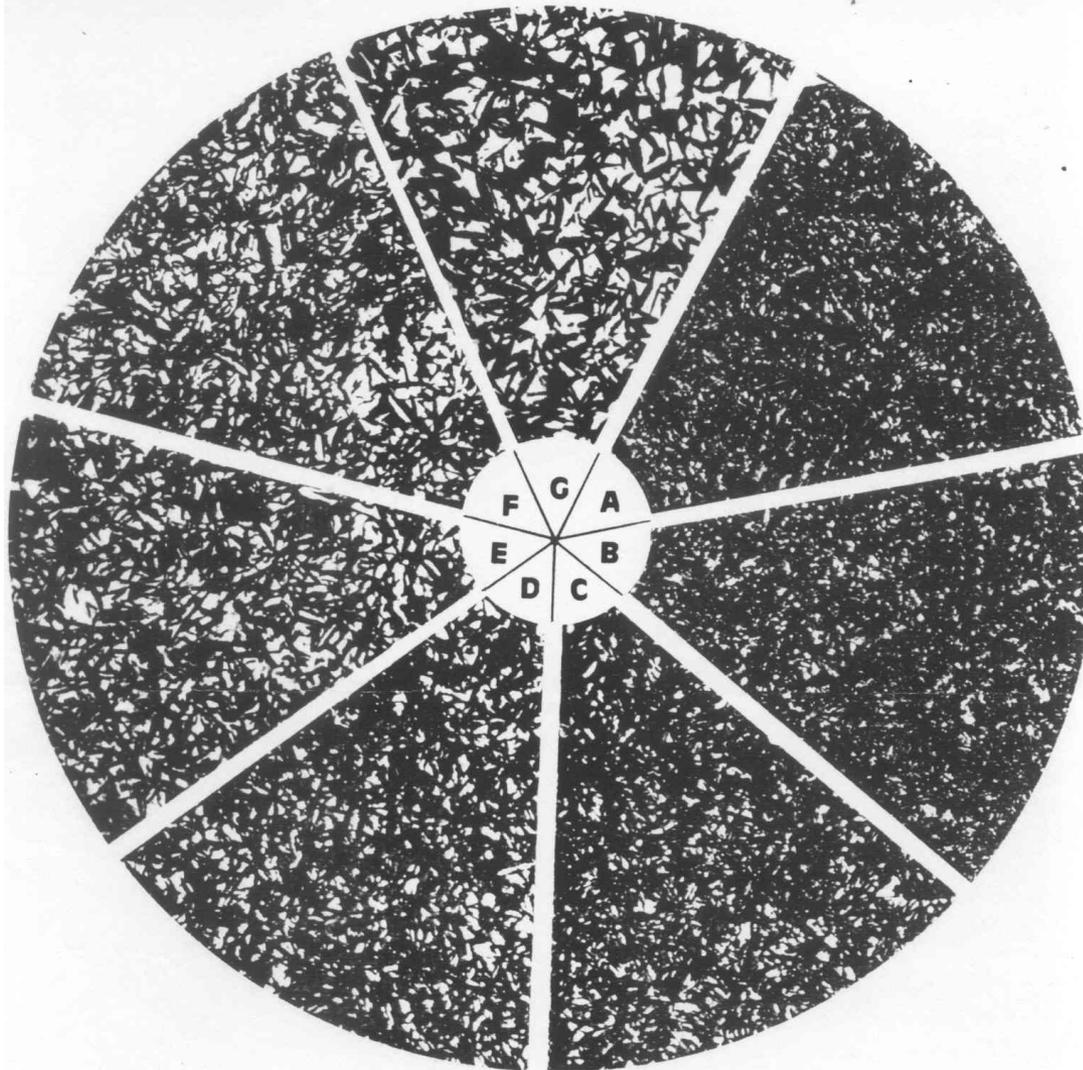
Estrutura:

martensita e austenita retida

A distribuição heterogênea dos elementos de liga provocou heterogeneidade microestrutural

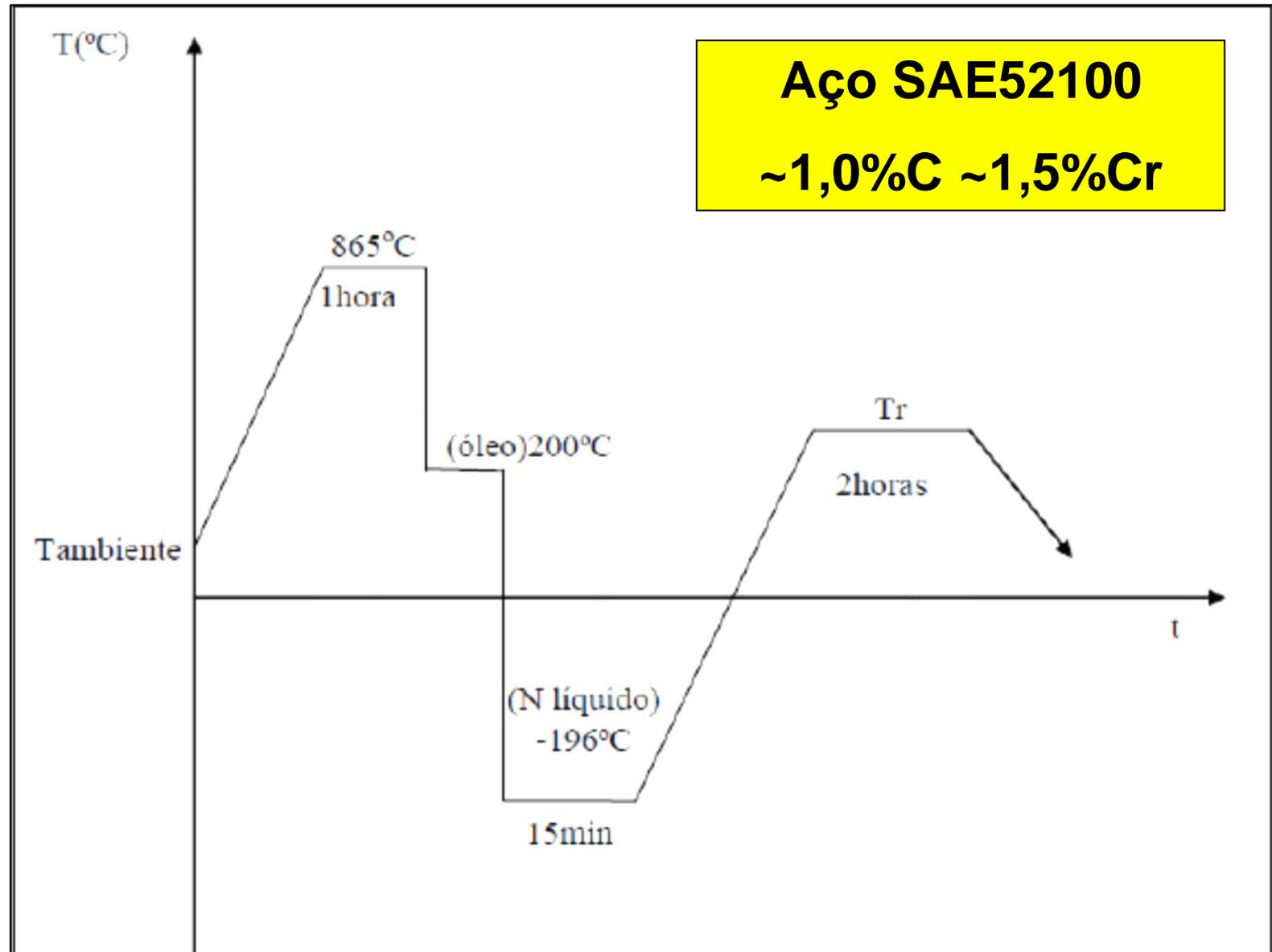


MARTENSITA E AUSTENITA RETIDA



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

TRATAMENTO SUBZERO



TEMPERABILIDADE

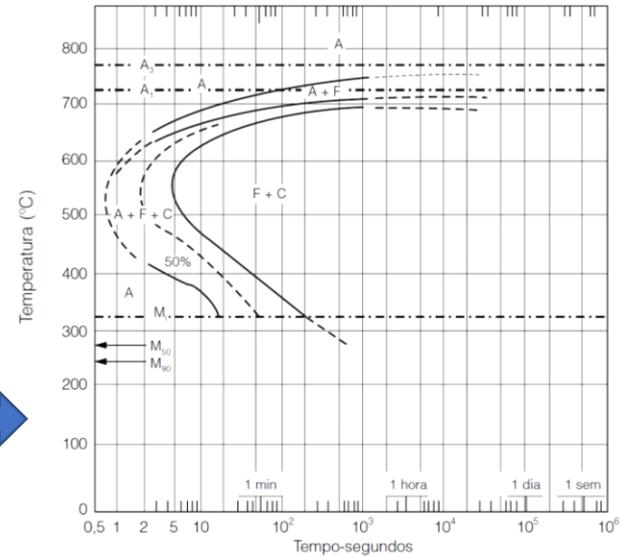
ELEMENTOS DE LIGA
ALTERAM AS
CURVAS TTT/TRC

AISI 1050

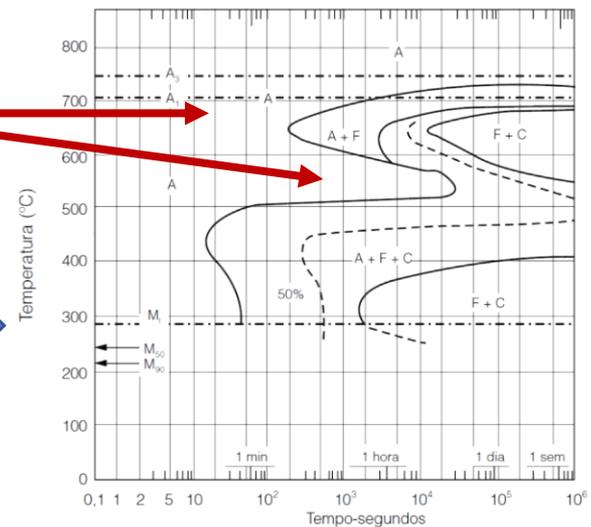
POSSIBILITA TRABALHO
MECÂNICO ANTES DA
TRANSFORMAÇÃO DE FASE

AISI 4340

(Costa e Silva & Mei)



(a) Curva ITT do aço AISI/ABNT 1050.

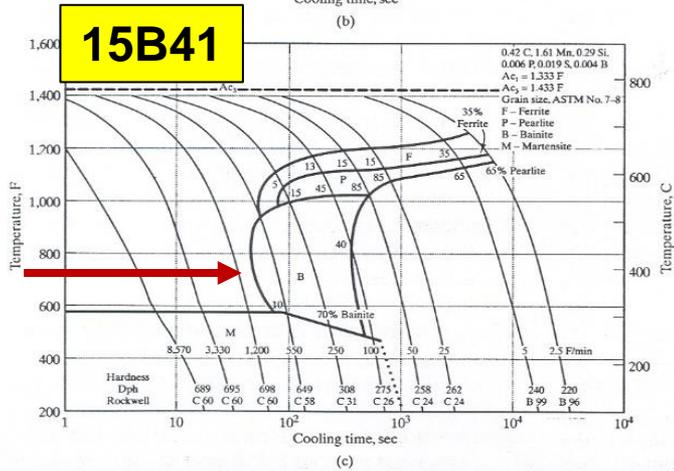
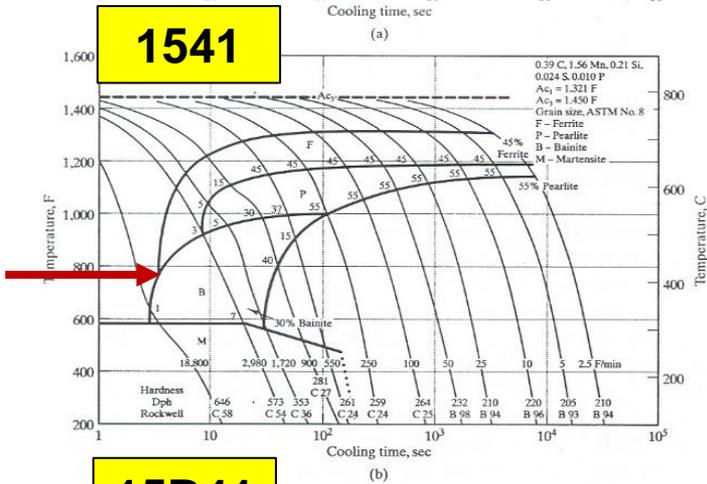
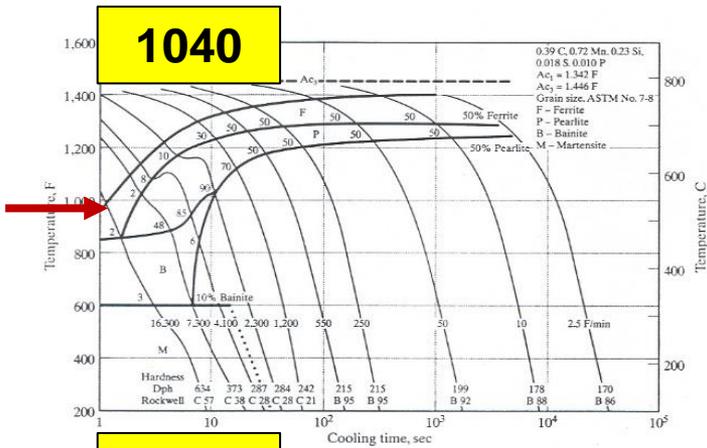


(b) Curva ITT do aço AISI/ABNT 4340.

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

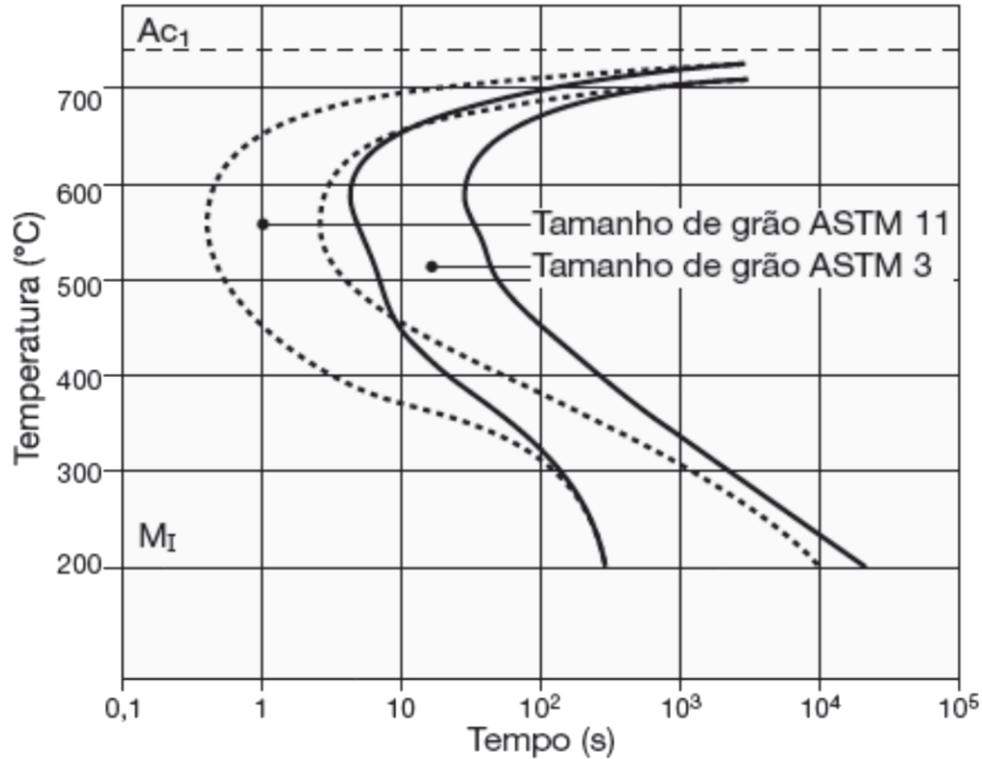


Figura 9.47

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

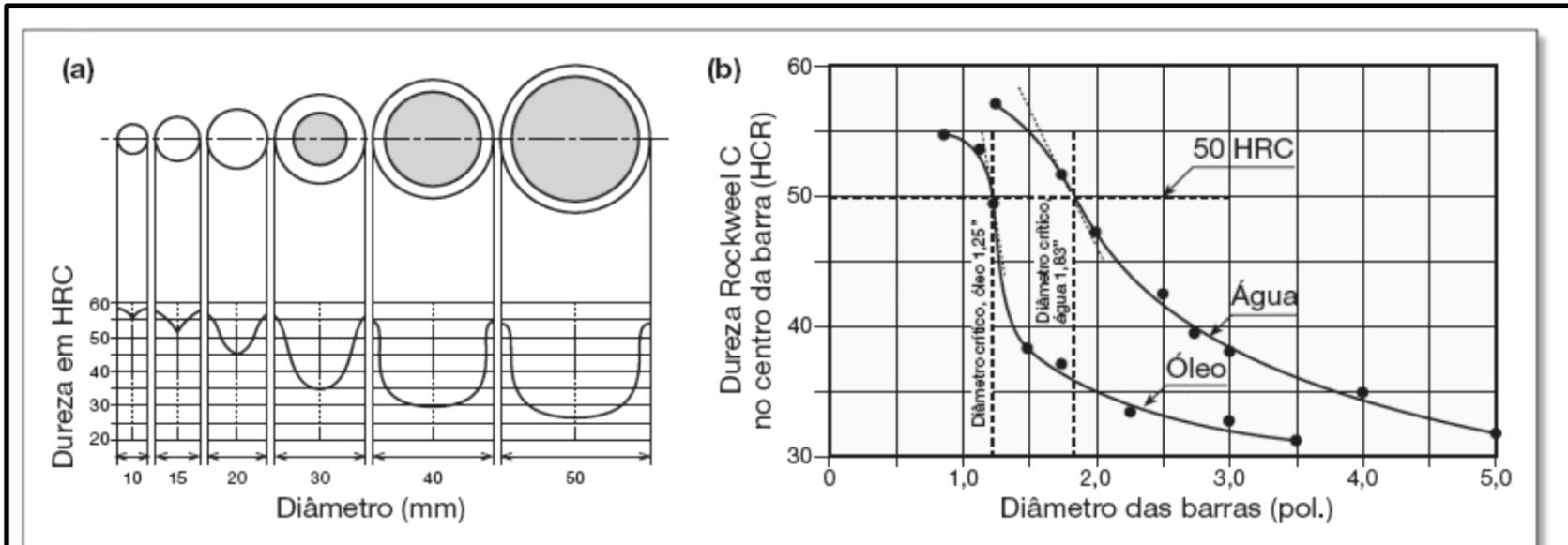


Figura 10.42

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

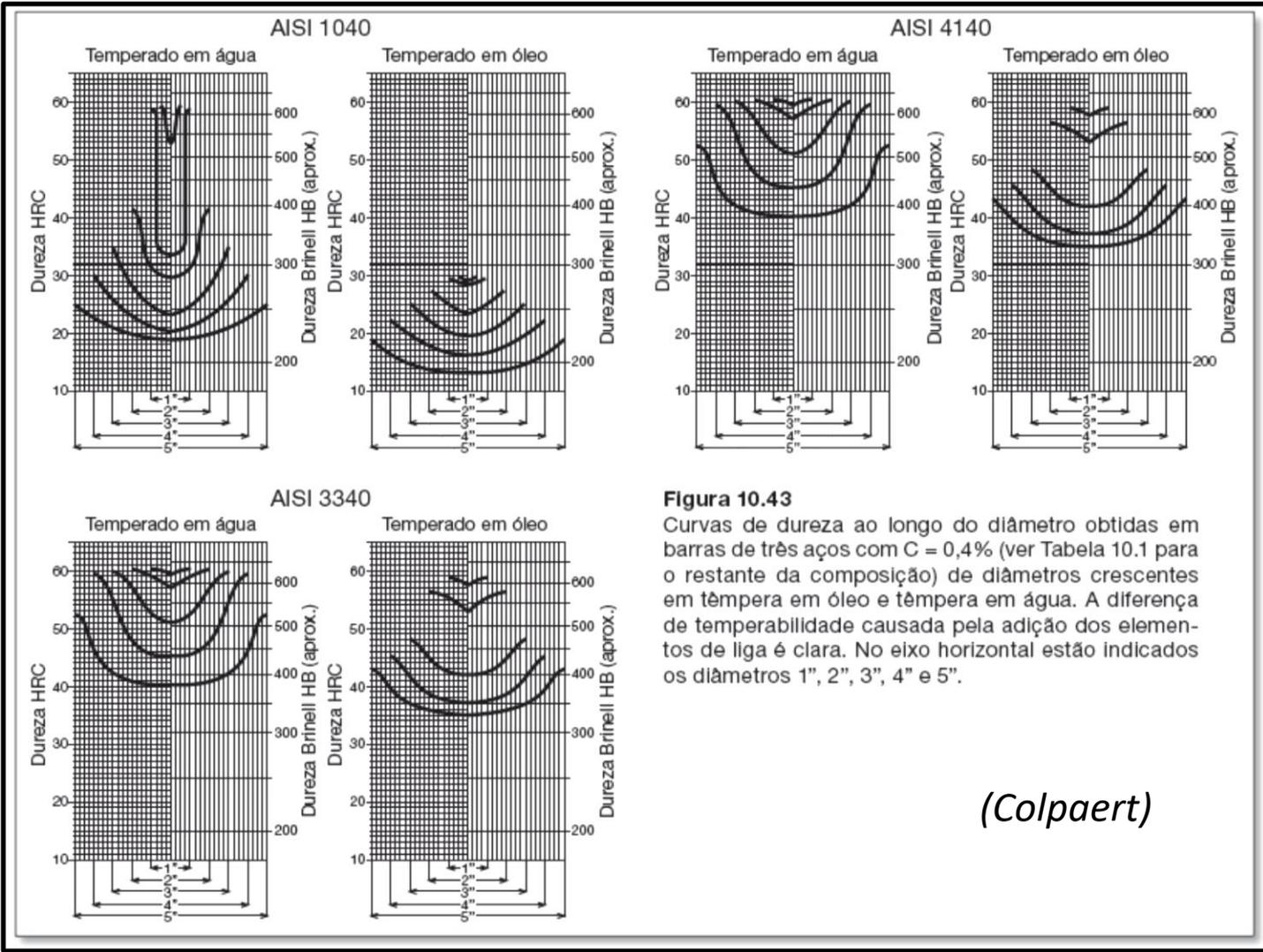


Figura 10.43
Curvas de dureza ao longo do diâmetro obtidas em barras de três aços com C = 0,4% (ver Tabela 10.1 para o restante da composição) de diâmetros crescentes em têmpera em óleo e têmpera em água. A diferença de temperabilidade causada pela adição dos elementos de liga é clara. No eixo horizontal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

(Colpaert)

Diâmetro Ideal

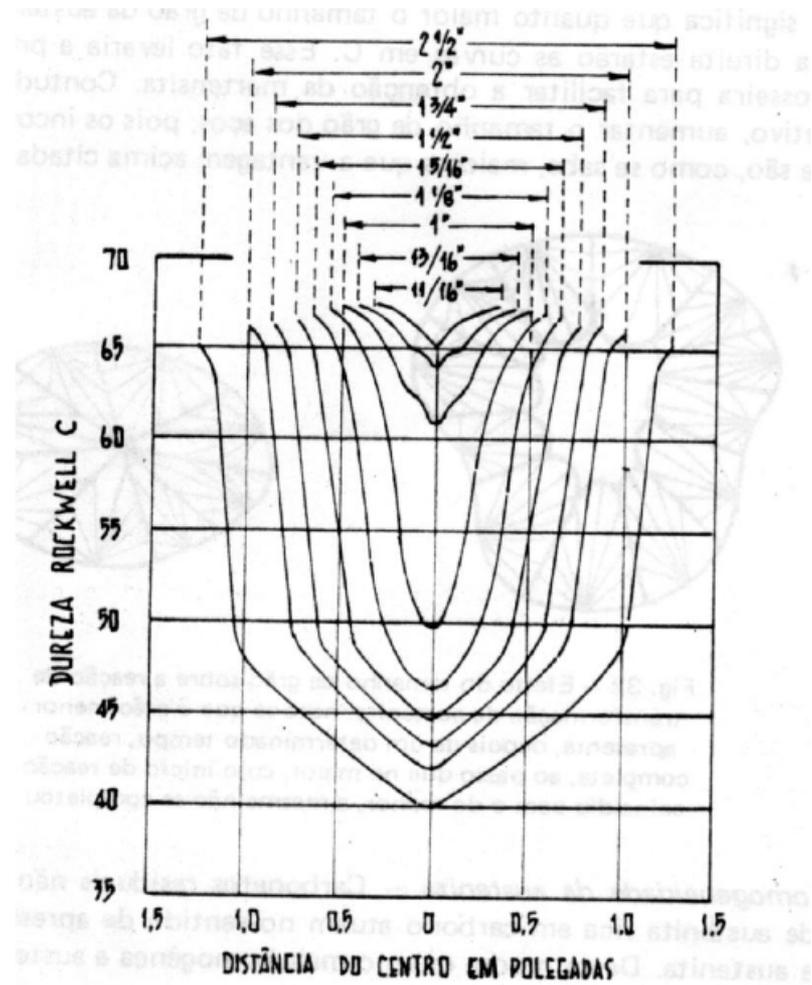
Diâmetro de um dado aço que produziria 50% de martensita no centro quando temperado em severidade de têmpera H^∞

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.

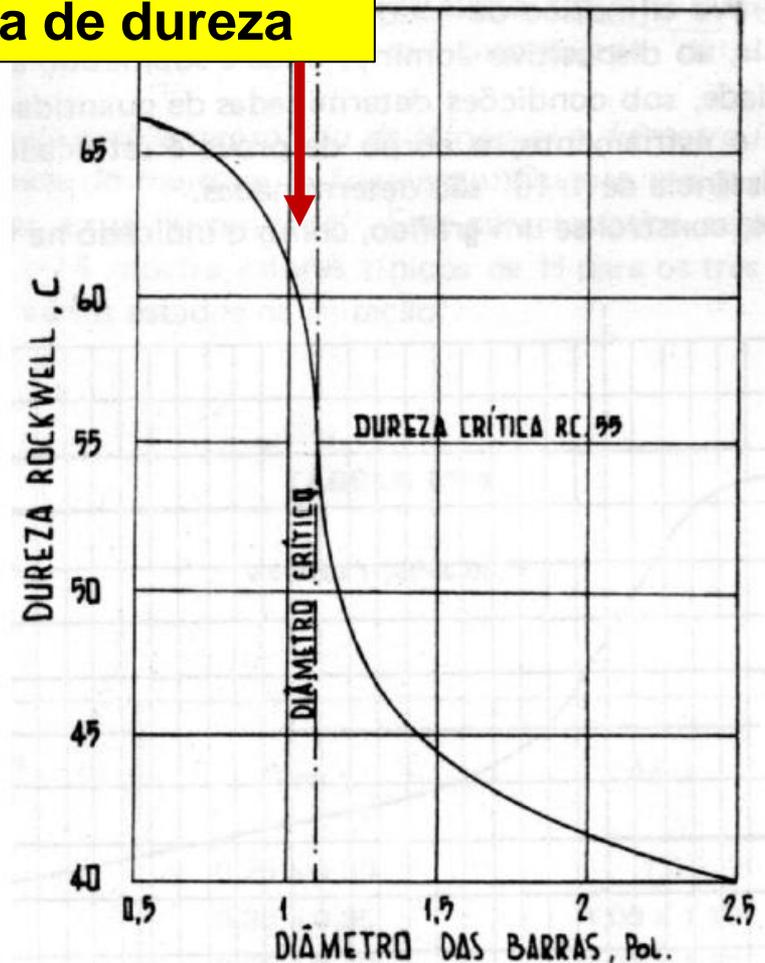


Método de Grossman(Diâmetro crítico)

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 (%)		
Elem.	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Elem.	Mín	Máx
%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
Boro					1,00	1,00			
DI (mm)	35,31	37,85	35,56	43,18			<input type="radio"/> DI em mm		
DI (pol)	1,39	1,49	1,4	1,7			<input checked="" type="radio"/> DI em polegadas		

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

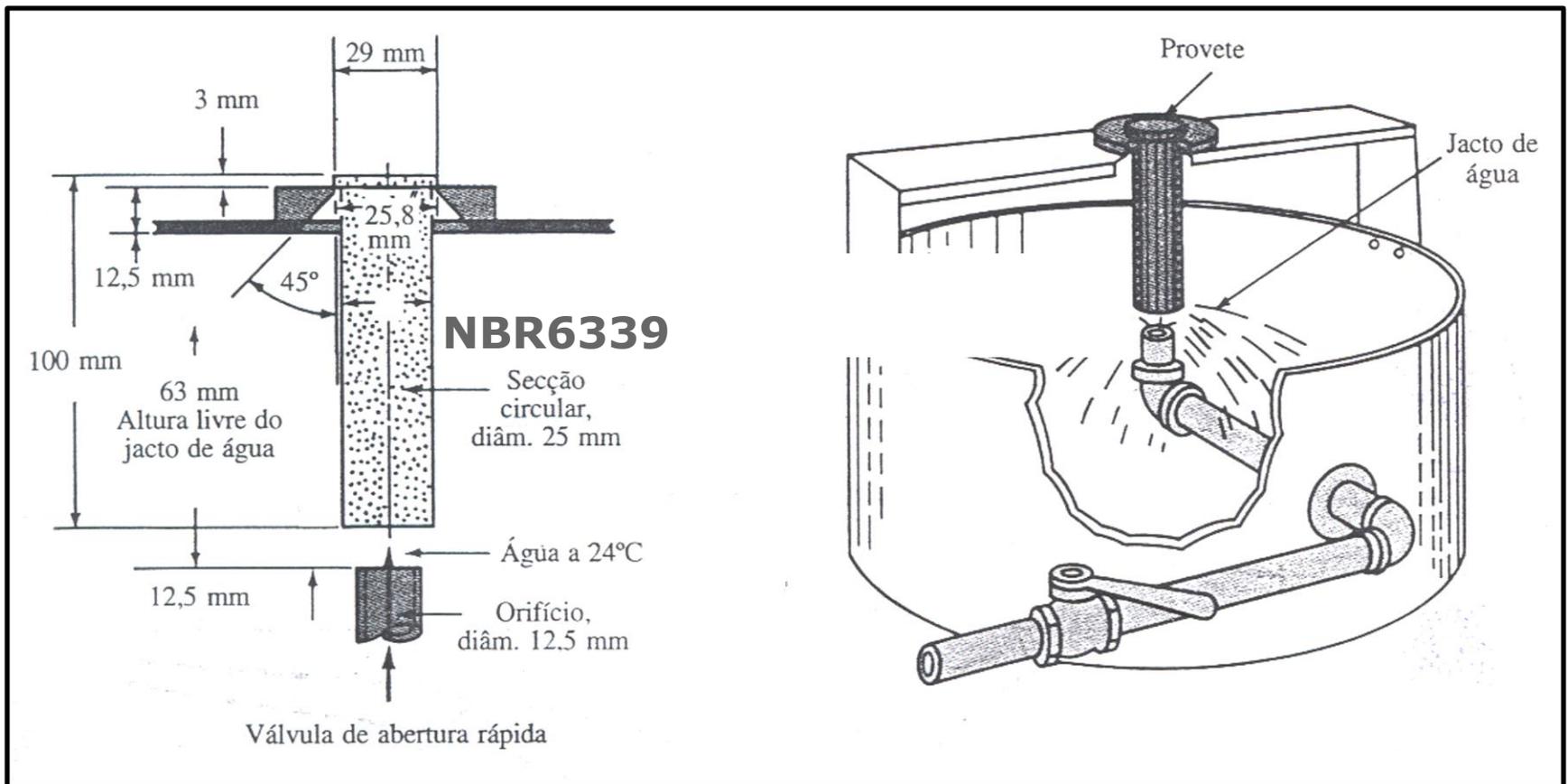
Severidade de têmpera de diferentes meios comparados com a  gua.

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

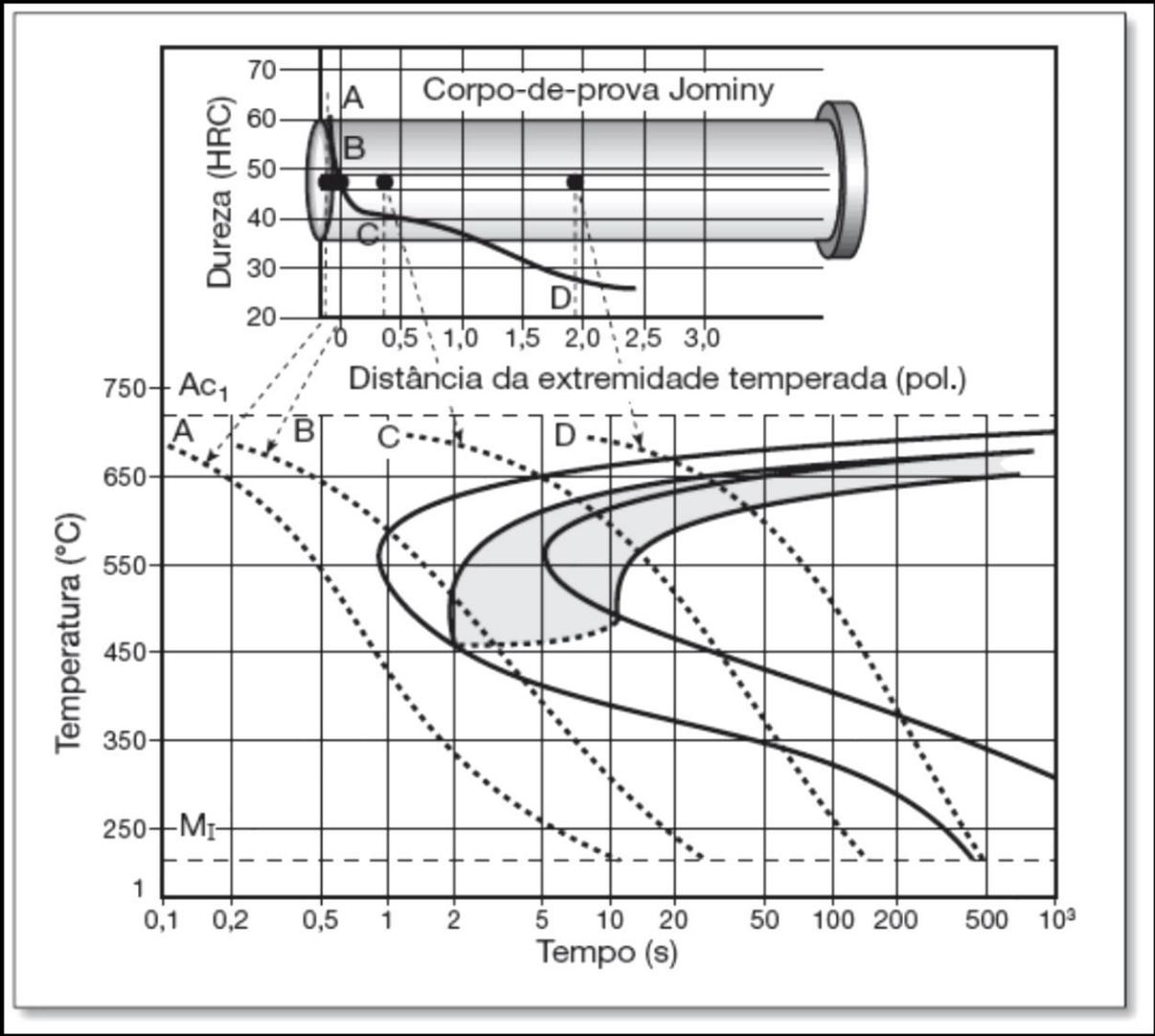


JOMINY

Resfriamento do corpo de provas no ensaio Jominy

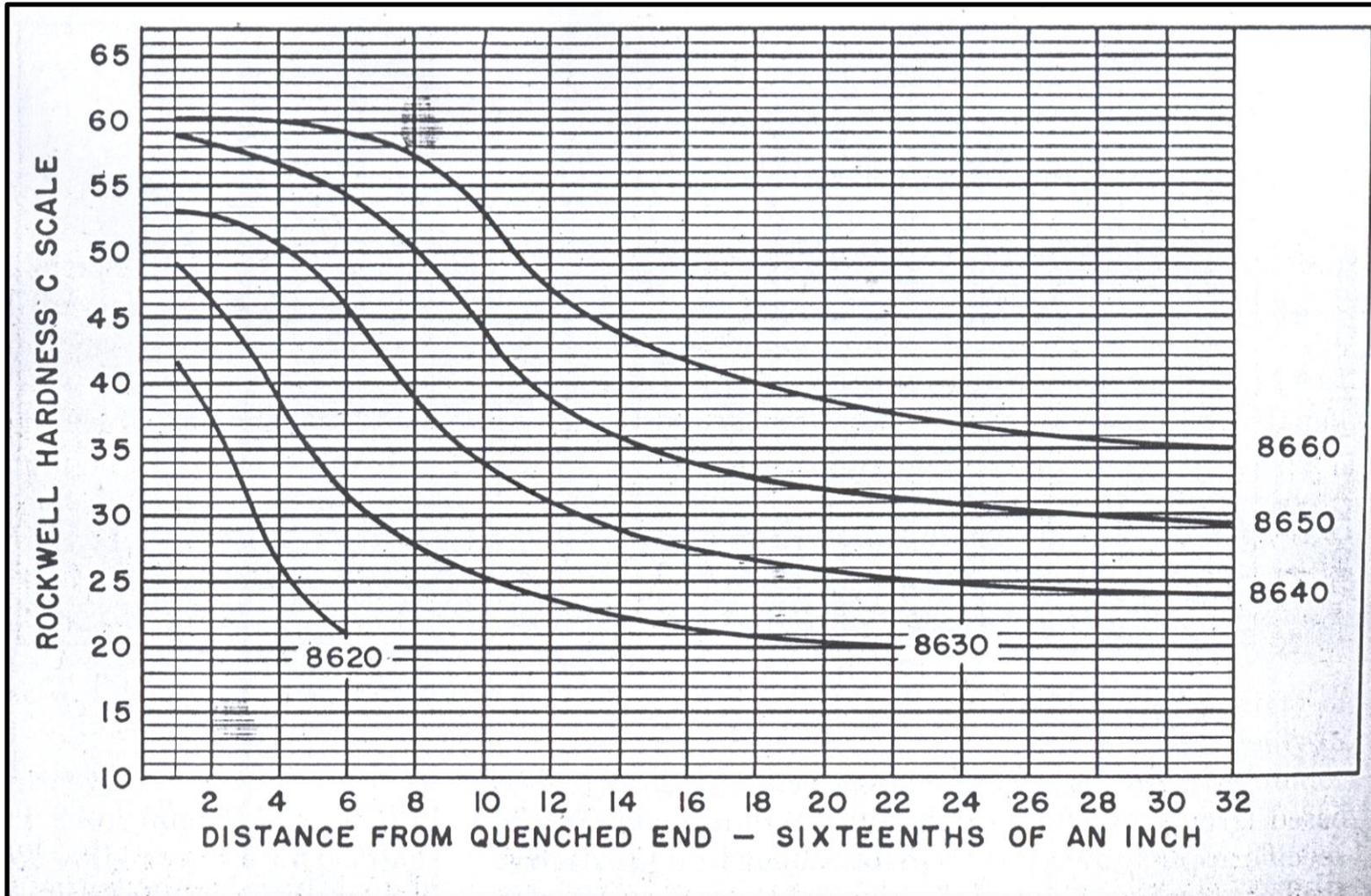


JOMINY

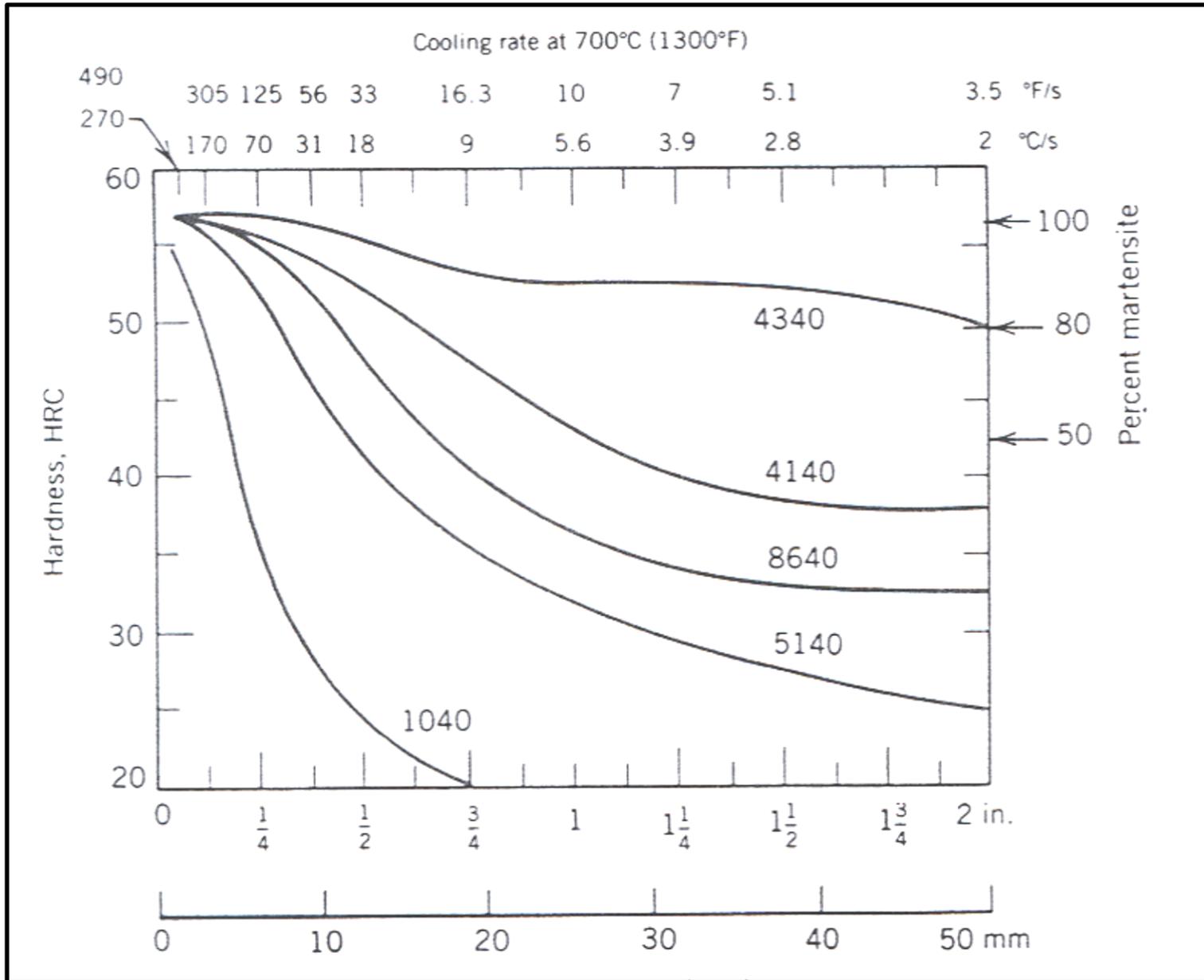


(Colpaert)

JOMINY- TEOR DE CARBONO



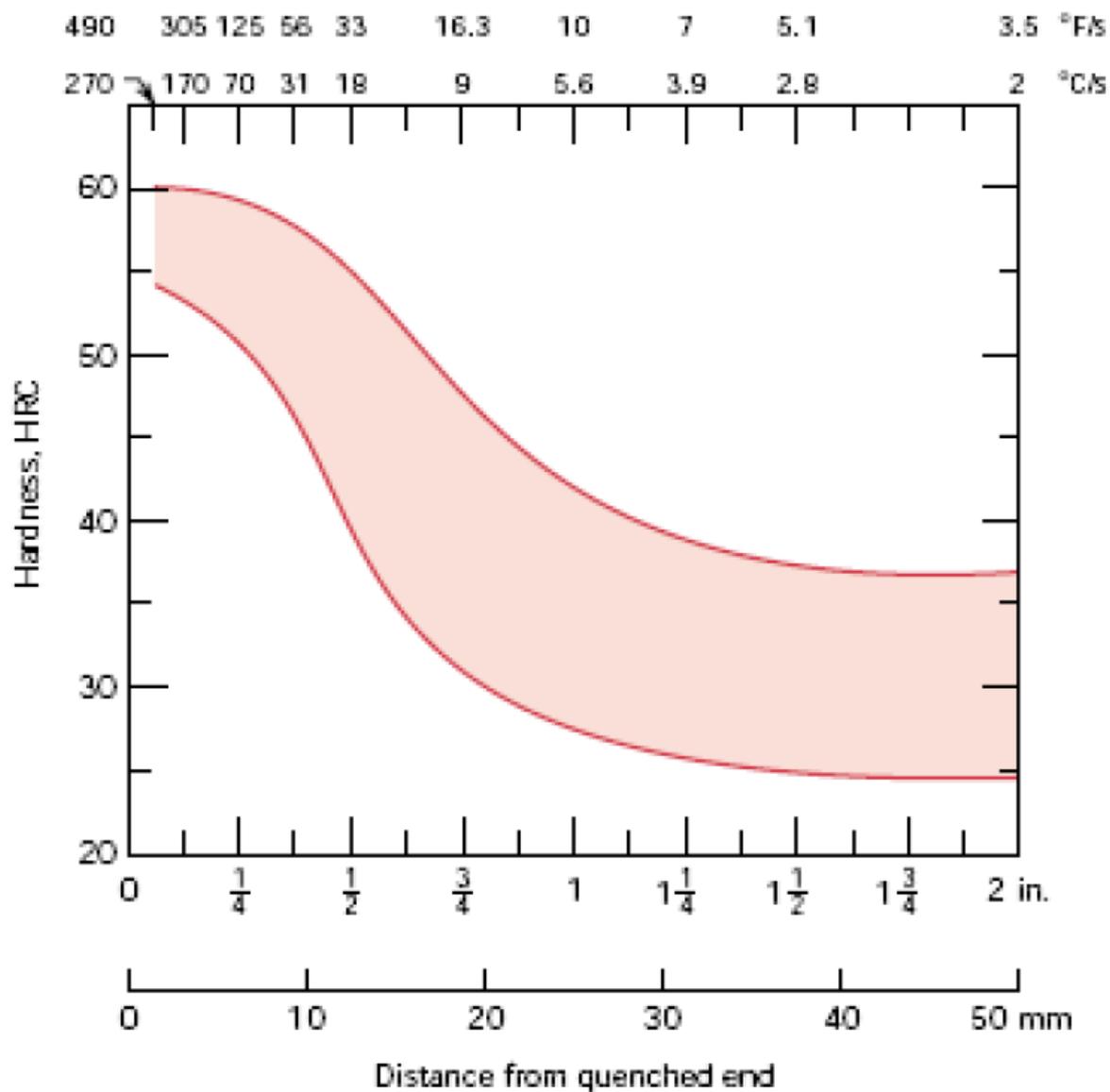
JOMINY-ELEMENTOS DE LIGA-MESMO TEOR DE CARBONO



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)



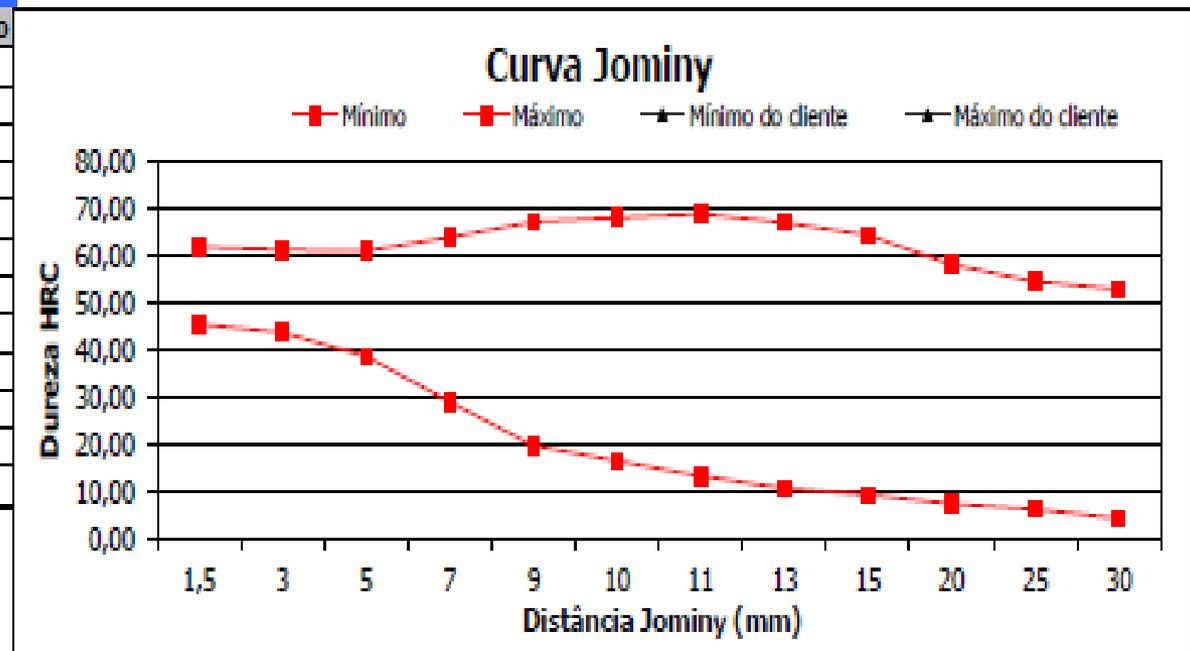
SEP 1664 - tabela 1b: Cálculo teórico de Jominy através de Regressão Múltipla

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		

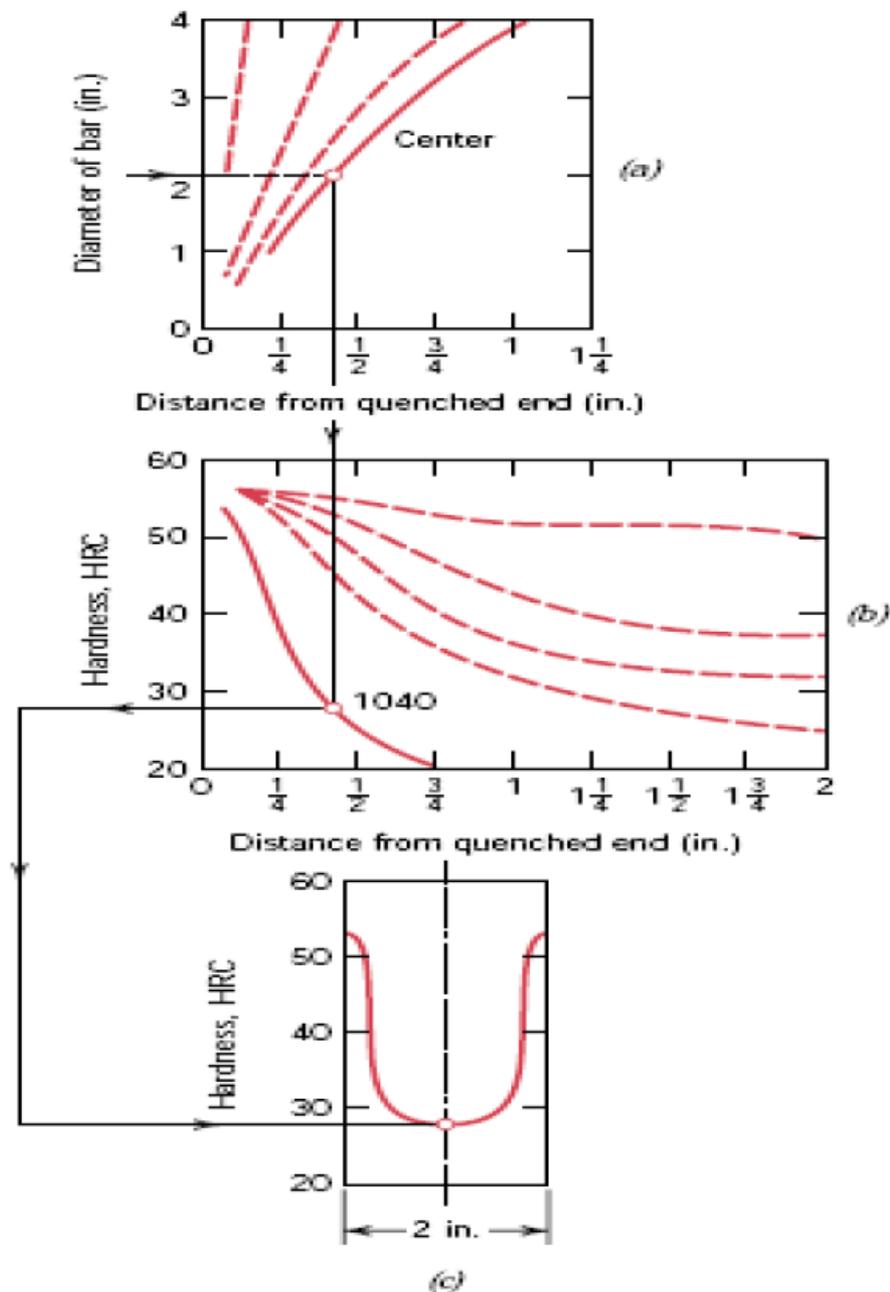


Determinação de dureza por meio do Ensaio Jominy

- 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
J 1,5	+H(HRc)	+HH(HRc)	+HL(HRc)	H(HRc)
	53-61	56-61	53-58	54-59

FIM