

Física dos Materiais – 4300502

1º Semestre de 2016

Instituto de Física
Universidade de São Paulo

Professor: **Luiz C. C. M. Nagamine**

E-mail: nagamine@if.usp.br

Fone: 3091.6877

homepage: <http://disciplinas.stoa.usp.br/course/view.php?id=10070>

Processamento Térmico de Ligas Metálicas

Processos de Recozimento

É um tratamento térmico no qual o material é exposto a uma alta temperatura por um período de tempo longo e posteriormente resfriado lentamente. Objetivos do recozimento:

- 1) Aliviar tensões
- 2) Tornar o material mole, dútil e tenaz
- 3) Produzir uma microestrutura de interesse

Processo: aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento.

Longos tempos são exigidos, para minimizar os gradientes de temperatura (que levam a empenamento ou trincamento).

A temperatura de recozimento controla a velocidade do processo (devidos aos processos difusivos).

Alguns exemplos:

Recozimento Intermediário é frequentemente utilizado para amolecer e aumentar a ductilidade de ligas metálicas, para permitir extensas deformações plásticas a frio.

Alívio de Tensão em peças metálicas

Tensões residuais podem ser provenientes de processos de deformação plástica (usinagem, lixamento, ...); resfriamento não uniforme de peça fabricada a alta temperatura (com soldas ou fundição) ou quando existem transformações de fases envolvendo variações de densidade. Nestes casos, um tratamento térmico a temperatura baixa e por tempos longos, permite a homogeneização da peça e o alívio das tensões residuais.

A CINÉTICA DE REAÇÕES NO ESTADO SÓLIDO

A maioria das transformações no estado sólido não ocorre instantaneamente porque obstáculos impedem o curso da reação e a torna dependente do tempo. Por exemplo, de vez que a maioria das transformações envolve a formação de pelo menos uma nova fase que tem uma composição e/ou estrutura cristalina diferente daquela da matriz (de onde se originou), alguns rearranjos atômicos via difusão são requeridos. Difusão é um fenômeno dependente do tempo, como discutido na Seção 5.4. Um segundo tipo de impedimento à formação de uma nova fase é o aumento em energia livre associado com os contornos de fase que são criados entre as fases matriz(mãe) e produto.

Do ponto de vista microestrutural, o primeiro processo que acompanha uma transformação de fase é a **nucleação** - a formação de partículas muito pequenas (às vezes submicroscópicas), ou núcleos, da nova fase, que são capazes de crescer. Posições favoráveis para a formação destes núcleos são sítios de imperfeição, especialmente contornos de grão. O segundo estágio é o *crescimento*, no qual os núcleos aumentam de tamanho; durante este processo, naturalmente, algum volume de fase matriz desaparece. A transformação se completa se for permitida a ocorrência do crescimento de partículas de nova fase até que se atinja a fração de equilíbrio.

Como poder-se-ia esperar, a taxa de transformação é uma importante consideração no tratamento térmico de materiais, cujo estudo é às vezes denominado **cinética**. Com a maioria das investigações cinéticas, a fração de reação que ocorreu é medida como uma função do tempo, enquanto a temperatura é mantida constante. Progresso da transformação é usualmente certificado quer pelo exame microscópico quer pela medida de alguma propriedade física (tal como a condutividade elétrica) cuja magnitude é distintiva da nova fase. Dados são graficados como a fração de material transformado versus o logaritmo do tempo; uma curva em forma de S similar àquela da Figura 10.1 representa o comportamento cinético típico para a maioria das reações de estado sólido. Estágios de nucleação e crescimento estão indicados na figura.

A fração de transformação y é função do tempo t , através:

$$y = 1 - \exp(-kt^n)$$

onde k e n são constantes independentes do tempo para uma particular reação. A expressão acima é às vezes referida como a *Equação de Avrami*.

Por convenção, a taxa de uma transformação r é tomada como o recíproco do tempo requerido para que a transformação ocorra até a sua metade, $t_{0,5}$, ou

$$r = \frac{1}{t_{0,5}}$$

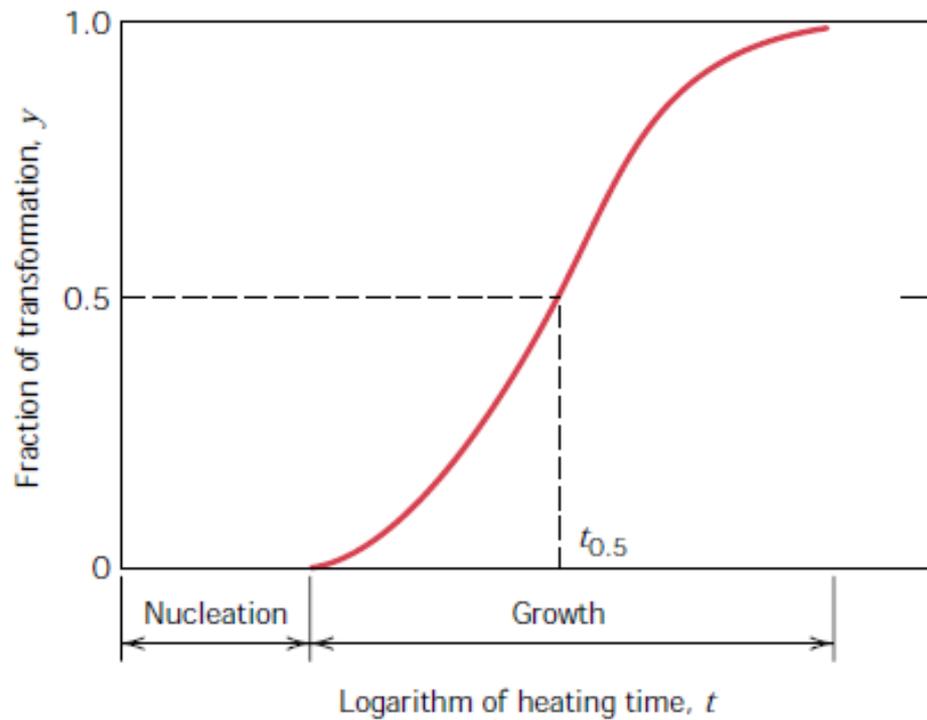


FIGURE 11.1 Plot of fraction reacted versus the logarithm of time typical of many solid-state transformations in which temperature is held constant.

Para a maioria das reações e ao longo de faixas específicas de temperaturas, a taxa aumenta com o aumento da temperatura de acordo com a expressão

$$r = A e^{-Q/RT}$$

onde

R = a constante do gás

T = temperatura absoluta

A = uma constante independente da temperatura

Q = uma energia de ativação para a particular reação

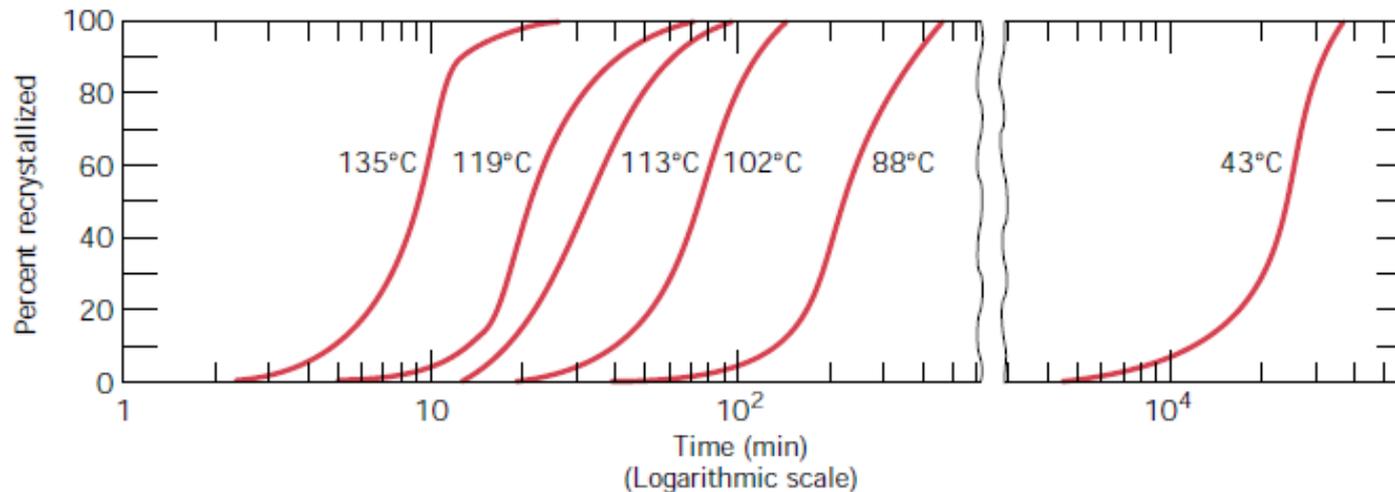


FIGURE 11.2 Percent recrystallization as a function of time and at constant temperature for pure copper. (Reprinted with permission from *Metallurgical*

Pode-se recordar que o coeficiente de difusão tem a mesma dependência em relação à temperatura (Equação 5.8). Processos cujas taxas exibem esta correlação com a temperatura são às vezes denominados **termicamente ativados**.

$$D = D_o \exp (- Q_d / RT)$$

D_o = um preexponencial independente da temperatura (m^2/s)

Q_d = a **energia de ativação** para difusão (J/mol, cal/mol, ou eV/átomo)

R = a constante do gás, 8,31 J/mol.K, 1,987 cal/mol.K, ou $8,62 \times 10^{-5}$ eV/átomo

T = temperatura absoluta (K)

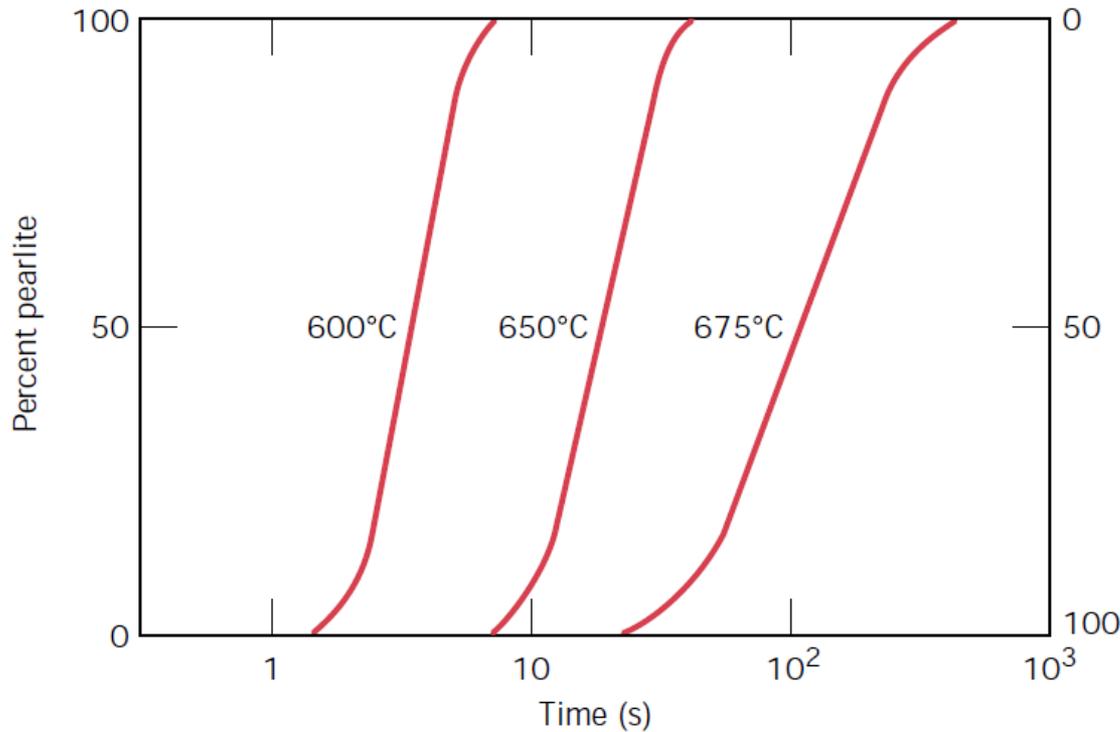
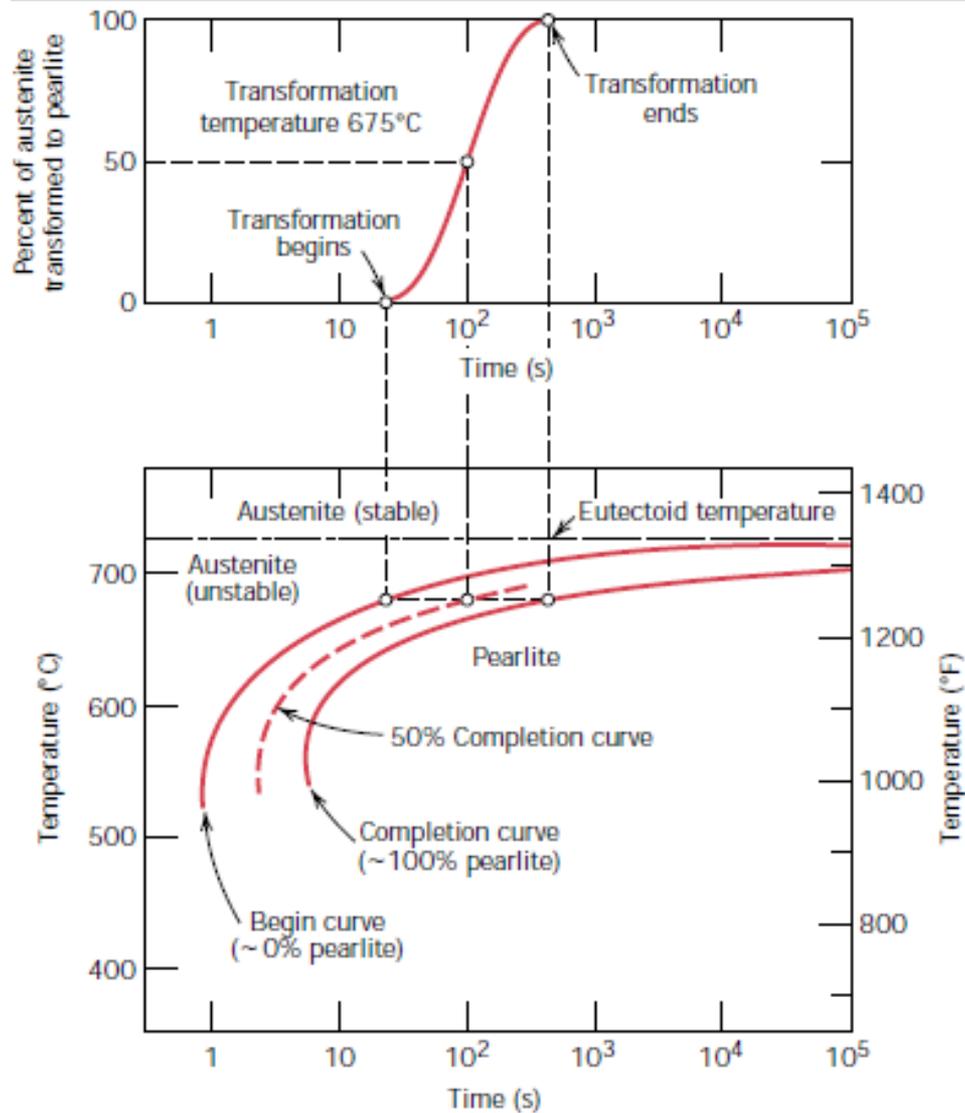


FIGURE 11.3 For an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C), isothermal fraction reacted versus the logarithm of time for the austenite-to-pearlite transformation.

A taxa de caminhamento ao equilíbrio para sistemas sólidos é tão lenta que estruturas de equilíbrio verdadeiro são raramente alcançadas. Condições de equilíbrio são mantidas somente se aquecimento ou resfriamento é realizado em taxas extremamente lentas e impraticáveis. Para resfriamentos outros que não o de equilíbrio, as transformações são deslocadas para temperaturas menores do que aquelas indicadas pelo diagrama de fases; para o aquecimento, o deslocamento é para temperaturas maiores do que as indicadas pelo diagrama de fases. Estes fenômenos são denominados **superresfriamento** e **superaquecimento**, respectivamente. O grau de cada um depende da taxa de variação da temperatura; quanto mais rápido o resfriamento ou o aquecimento, tanto maior o superresfriamento ou o superaquecimento. Por exemplo, para taxas normais de resfriamento a reação eutetóide ferro-carbono é tipicamente deslocada 10 a 20°C (18 a 36°F) abaixo da temperatura de transformação de equilíbrio.

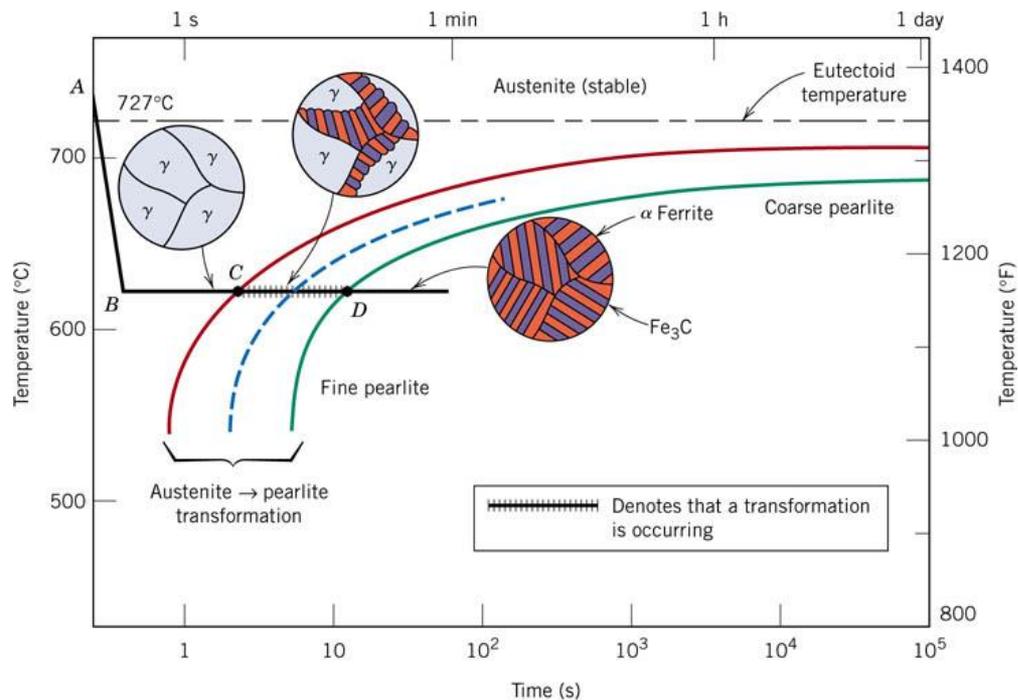
Para muitas ligas tecnologicamente importantes, o estado (ou microestrutura) preferido(a) é um(a) metaestável, intermediário(a) entre os estados inicial e o de equilíbrio; ocasionalmente, uma estrutura bem deslocada do equilíbrio é desejada. Torna-se assim imperativo investigar a influência de tempo sobre as transformações de fase. Esta informação cinética é, em muitas instâncias, de maior valor do que um conhecimento do estado final de equilíbrio.



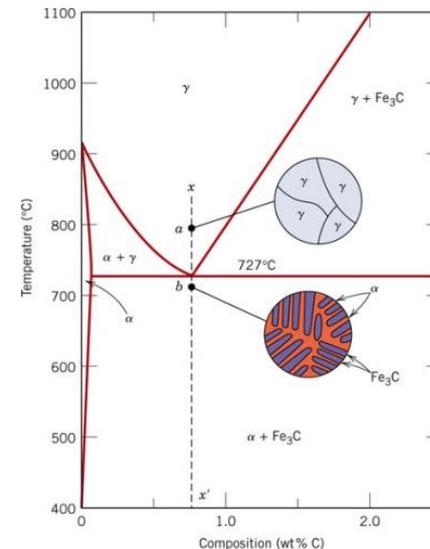
Demonstration of how an isothermal transformation diagram (bottom) is generated from percent transformation-versus-logarithm of time measurements (top). (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 369.)

Processamento Térmico de Ligas Metálicas

Transformação de fase isotérmica

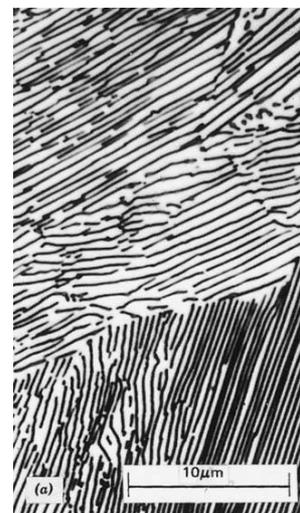


Composição eutetoide

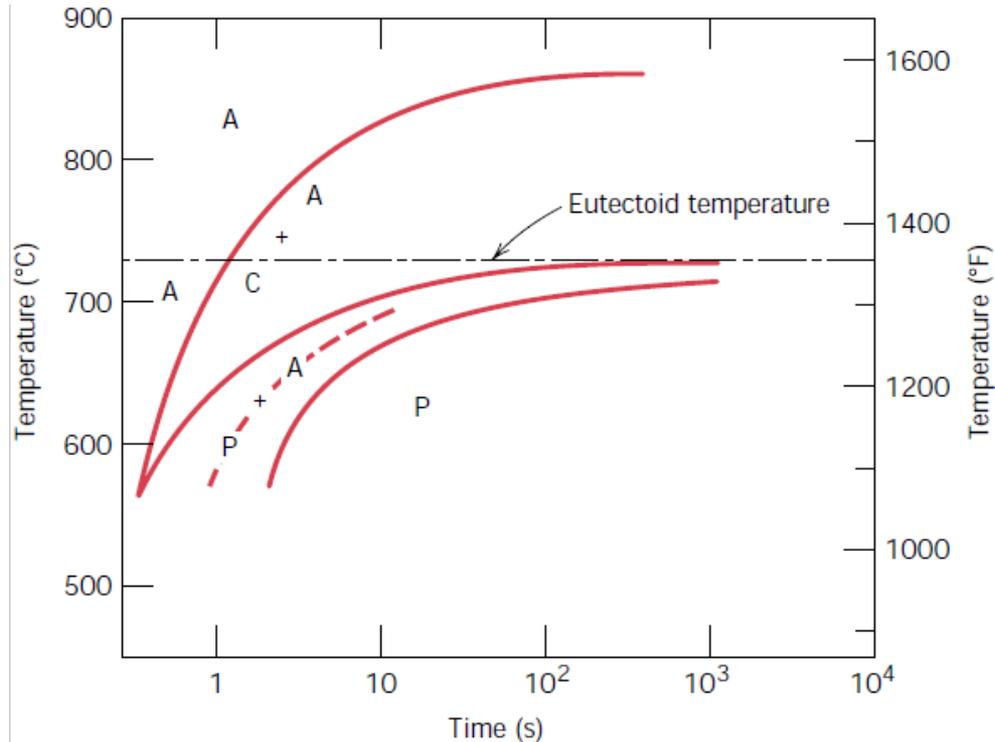


Perlita grossa

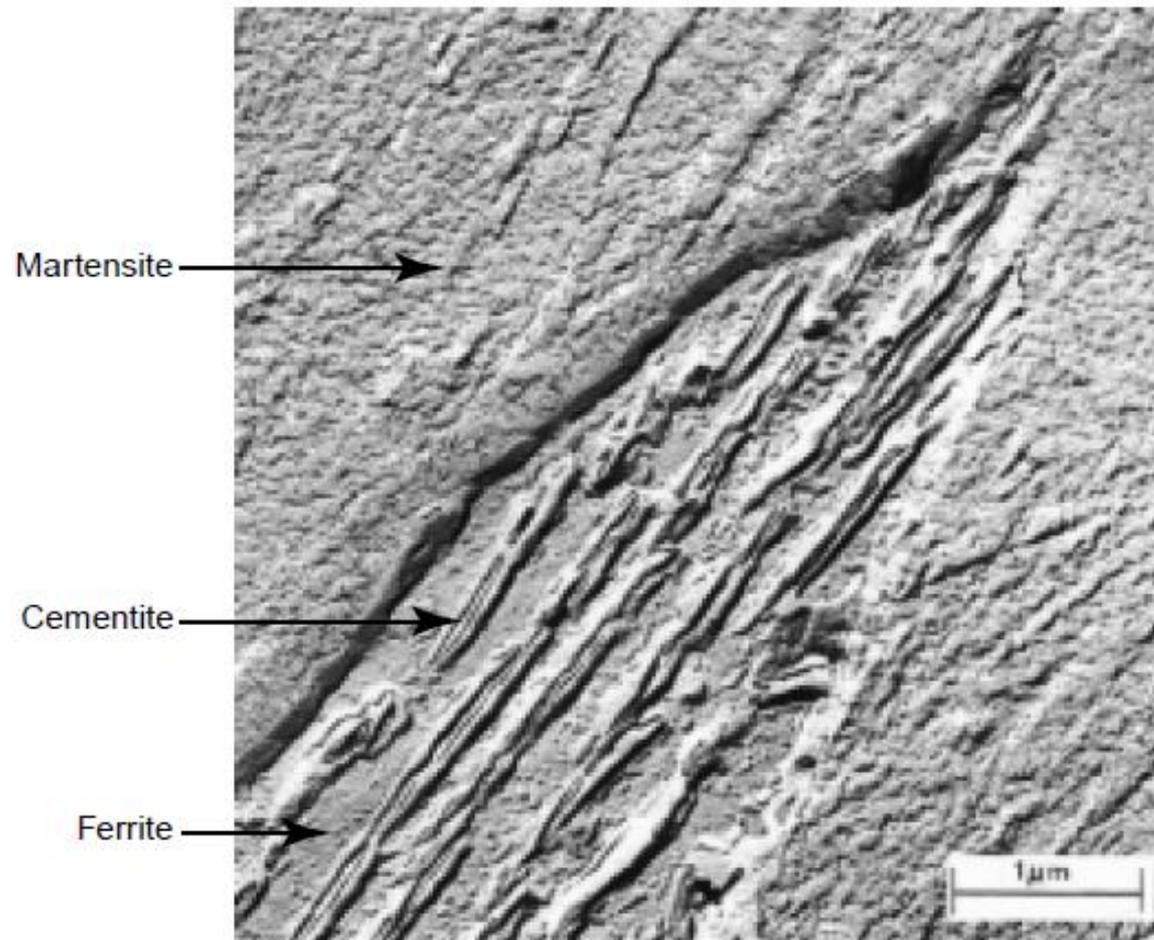
Perlita fina (~540°C)



Bainita

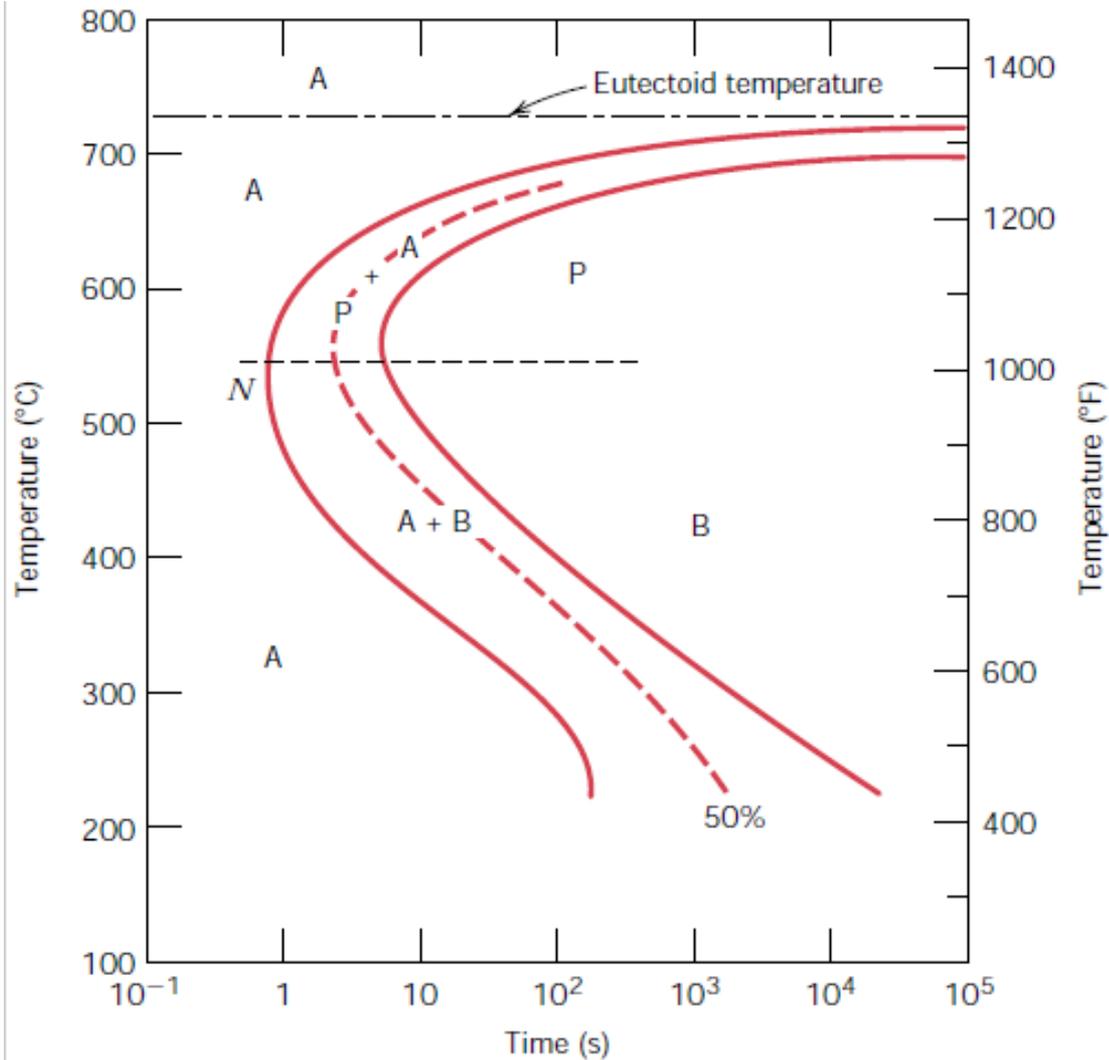


Isothermal transformation diagram for a 1.13 wt% C iron-carbon alloy: A, austenite; C, proeutectoid cementite; P, pearlite. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 33.)



Bainita

FIGURE 11.8 Replica transmission electron micrograph showing the structure of bainite. A grain of bainite passes from lower left to upper right-hand corners, which consists of elongated and needle-shaped particles of Fe_3C within a ferrite matrix. The phase surrounding the bainite is martensite. (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, Vol. 8, 8th edition, *Metallography, Structures and Phase Diagrams*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1973.)



Isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition, including austenite-to-pearlite (A-P) and austenite-to-bainite (A-B) transformations. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.)

Esferoidita

Se um aço tendo microestruturas quer perlítica quer bainítica for aquecido até uma temperatura abaixo da temperatura eutetóide e aí mantido durante um tempo suficientemente longo - por exemplo, a cerca de 700°C (1300°F) durante 18 a 24 horas - mais uma outra microestrutura se formará. Ela é chamada **esferoidita** (Figura 10.11). Em vez de lamelas alternadas de ferrita e cementita (perlita) ou de partículas alongadas de Fe₃C numa matriz de ferrita (bainita), a fase Fe₃C aparece como partículas esféricas embutidas numa matriz contínua de fase α . Esta transformação tem ocorrido por uma adicional difusão de carbono sem nenhuma mudança na composição ou quantidades relativas de fases ferrita e cementita. A força motriz para esta transformação é a redução da área da interface fase α - Fe₃C. A cinética da formação de esferoidita não está incluída nos diagramas de transformação isotérmica.

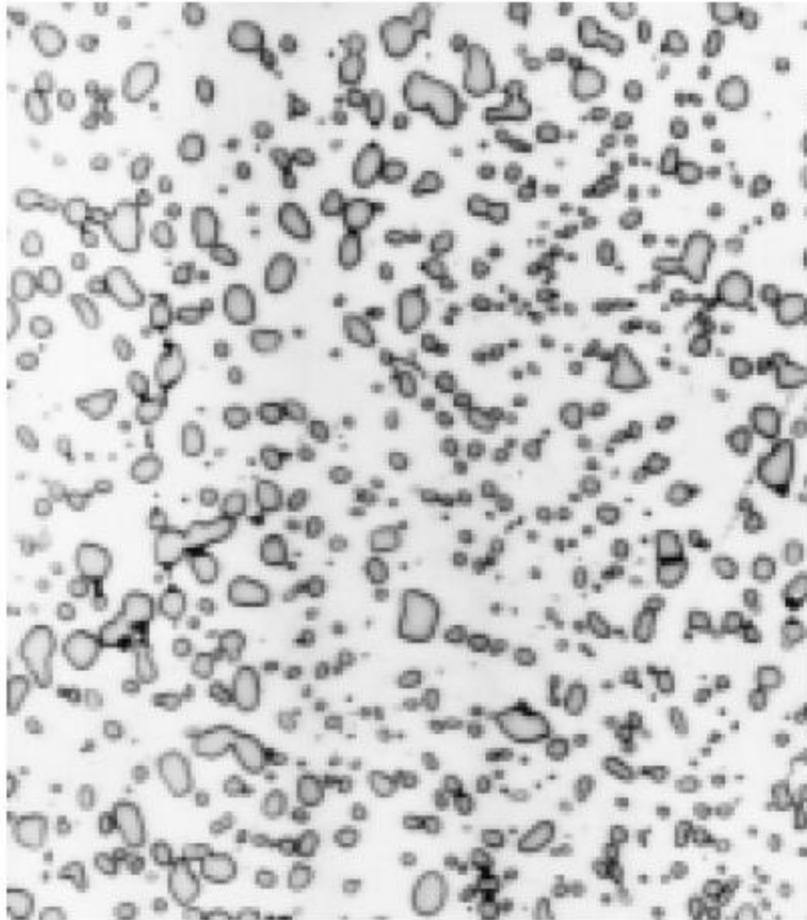


FIGURE 11.10 Photomicrograph of a steel having a spheroidite microstructure. The small particles are cementite; the continuous phase is α ferrite. 1000 \times . (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

Martensita

Ainda um outro microconstituente ou fase chamado **martensita** é formado quando ligas ferro-carbono austenitizadas (ou resfriadas) até uma relativamente baixa temperatura (na vizinhança da temperatura ambiente). Martensita é uma estrutura monofásica de não-equilíbrio que resulta a partir de uma transformação da austenita sem difusão. Ela pode ser pensada como um produto de transformação que é competitivo com perlita e bainita. A transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é rápido suficiente para prevenir a difusão do carbono. Qualquer difusão seja qual for resultará na formação das fases ferrita e cementita.

A transformação martensítica não é bem entendida. Entretanto, grandes números de átomos experimentam movimentos cooperativos, no sentido de que existem apenas um pequeno deslocamento de cada átomo em relação aos seus vizinhos. Isto ocorre de tal maneira que a austenita CFC experimenta uma transformação polimórfica para uma martensita tetragonal de corpo centrado (TCC ou BCT em inglês). Uma célula unitária desta estrutura cristalina (Figura 10.12) é simplesmente um cubo de corpo centrado que foi alongado ao longo de uma de suas dimensões; esta estrutura é distintamente diferente daquela da ferrita CCC. Todos os átomos de carbono permanecem como impurezas intersticiais na martensita; como tal, eles (os átomos) constituem uma solução sólida que é capaz de rapidamente se transformar a outras estruturas se aquecida até temperaturas nas quais taxas de difusão se tornam apreciáveis. Muitos aços, entretanto, retêm sua estrutura martensítica quase indefinidamente à temperatura ambiente.

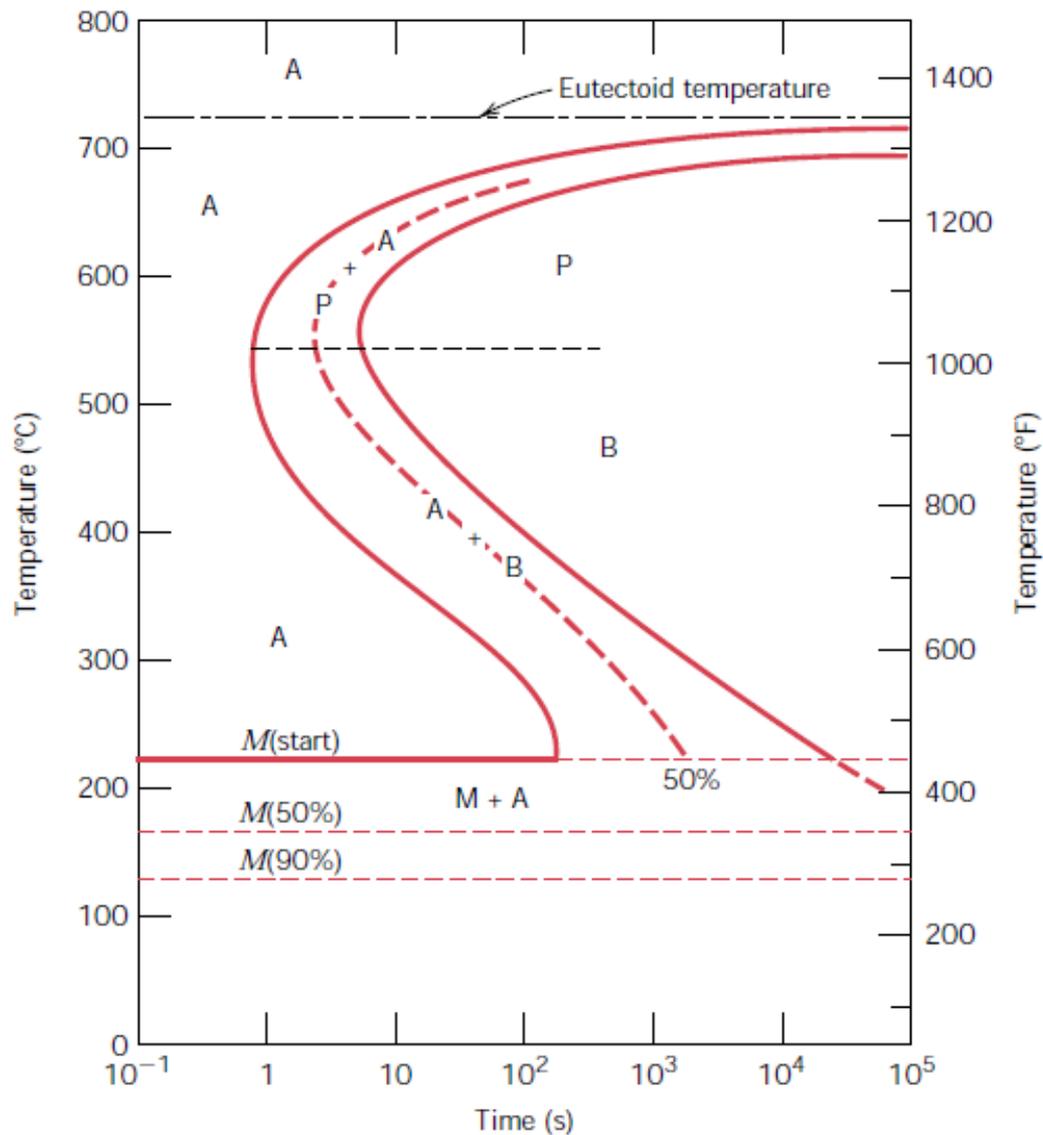


FIGURE 11.14 The complete isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition: A, austenite; B, bainite; M, martensite; P, pearlite.

Processamento Térmico de Ligas Metálicas

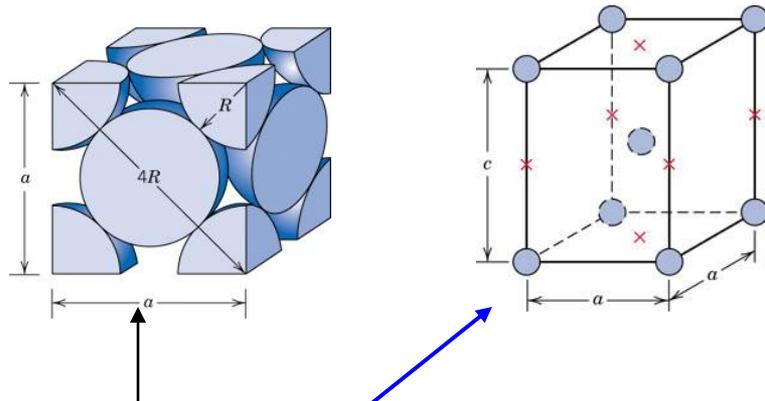
Tratamentos térmicos de Aços

Aços Martensíticos

São formados pelo resfriamento rápido (têmpera) de uma amostra austenitizada em meios líquidos (água ou óleo) ou ar.

Consiste em um estado meta-estável de longa duração.

(Podem ocorrer variações na têmpera ao longo da amostra)



Austenita é CFC com carbono nos interstícios.

Martensita é TCC (tetragonal de corpo centrado), com carbono nos interstícios.

A eficiência do processo de produção da martensita depende da composição da liga, do meio de resfriamento e do tamanho/forma da amostra.

Para o meio de resfriamento temos eficiência decrescente em:

Água => Óleo => Ar



Ampliação 1220X – As agulhas constituem a fase martensítica.

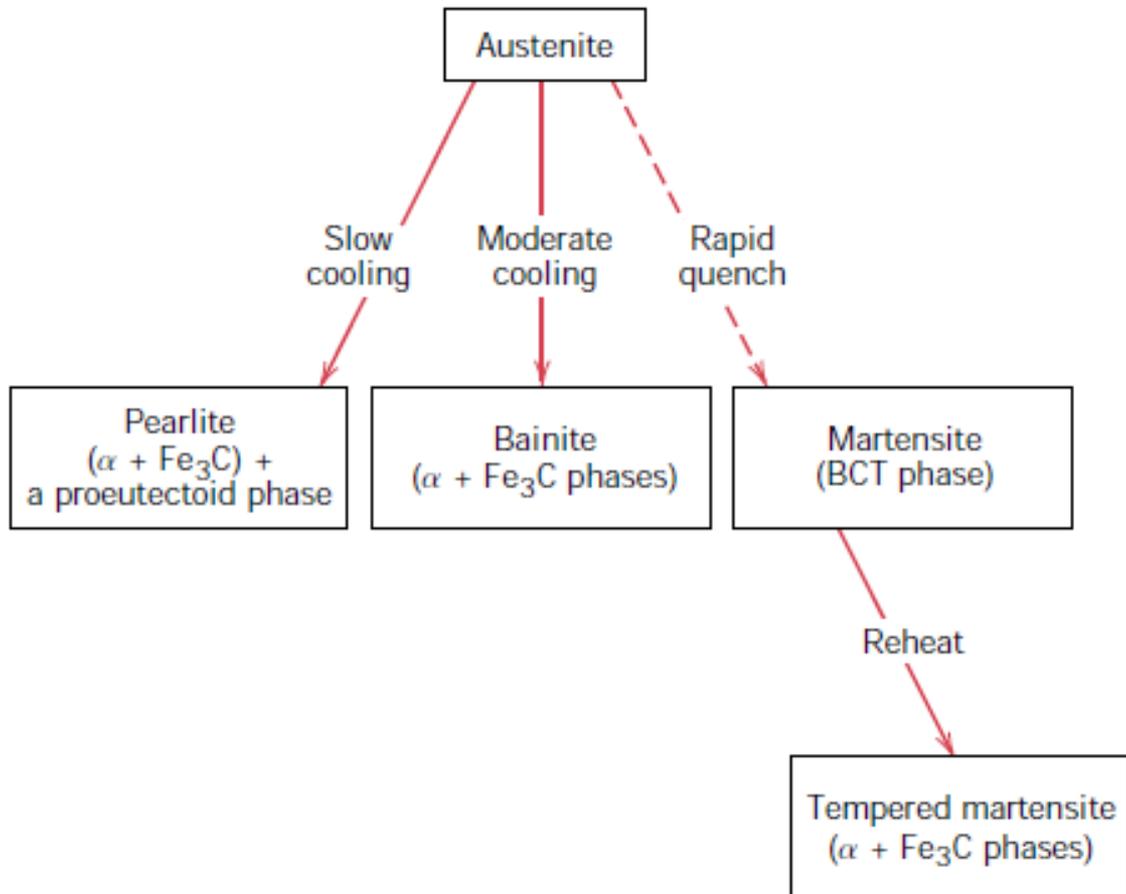


FIGURE 11.28 Possible transformations involving the decomposition of austenite. Solid arrows, transformations involving diffusion; dashed arrow, diffusionless transformation.

Resumo

Table 10.2 Summary of Microstructures and Mechanical Properties for Iron–Carbon Alloys

<i>Microconstituent</i>	<i>Phases Present</i>	<i>Arrangement of Phases</i>	<i>Mechanical Properties (Relative)</i>
Spheroidite	α Ferrite + Fe_3C	Relatively small Fe_3C sphere-like particles in an α -ferrite matrix	Soft and ductile
Coarse pearlite	α Ferrite + Fe_3C	Alternating layers of α ferrite and Fe_3C that are relatively thick	Harder and stronger than spheroidite, but not as ductile as spheroidite
Fine pearlite	α Ferrite + Fe_3C	Alternating layers of α ferrite and Fe_3C that are relatively thin	Harder and stronger than coarse pearlite, but not as ductile as coarse pearlite
Bainite	α Ferrite + Fe_3C	Very fine and elongated particles of Fe_3C in an α -ferrite matrix	Hardness and strength greater than fine pearlite; hardness less than martensite; ductility greater than martensite
Tempered martensite	α Ferrite + Fe_3C	Very small Fe_3C sphere-like particles in an α -ferrite matrix	Strong; not as hard as martensite, but much more ductile than martensite
Martensite	Body-centered tetragonal, single phase	Needle-shaped grains	Very hard and very brittle

Processamento Térmico de Ligas Metálicas

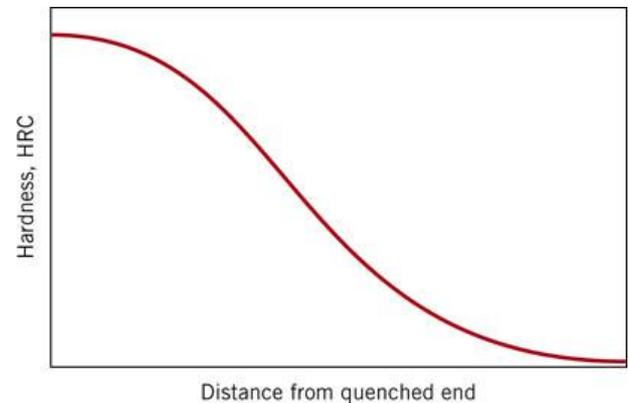
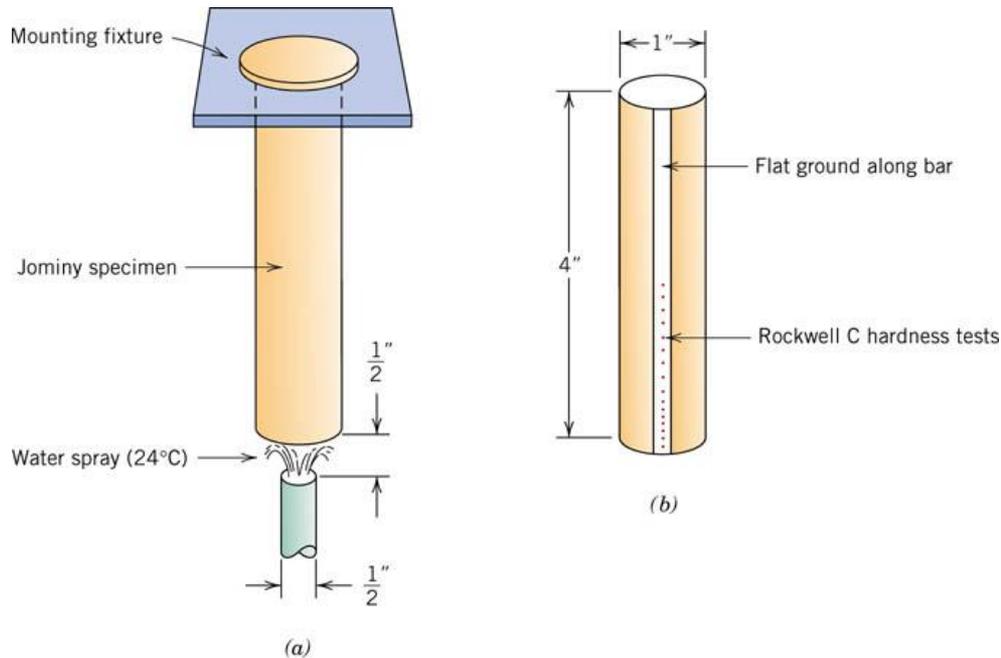
Efeito da composição da liga

Endurecibilidade

Endurecibilidade é a habilidade de uma liga em ser endurecida pela formação de martensita.

Ensaio Jominy

Um corpo cilíndrico é austenitizado e resfriado por um jato de água, como no esquema abaixo:



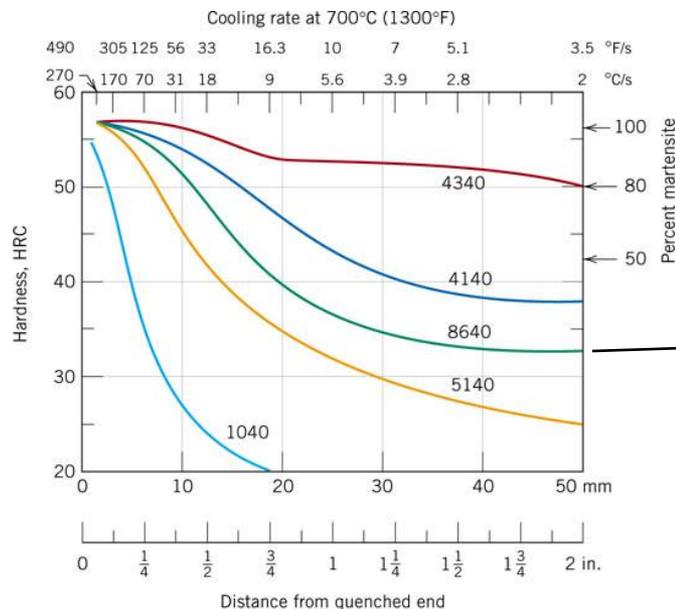
Processamento Térmico de Ligas Metálicas

Tratamentos térmicos de Aços

Aços Martensíticos

São formados pelo resfriamento rápido (têmpera) de uma amostra austenitizada em meios líquidos (água ou óleo) ou ar.

Consiste em um estado meta-estável de longa duração.



Aços com 0,4%p de C e outros elementos de liga.

4340= 1,85Ni + 0,8Cr + 0,25Mo,

4140= 1Cr + 0,2Mo,

8640= 0,55Ni + 0,5Cr + 0,2Mo,

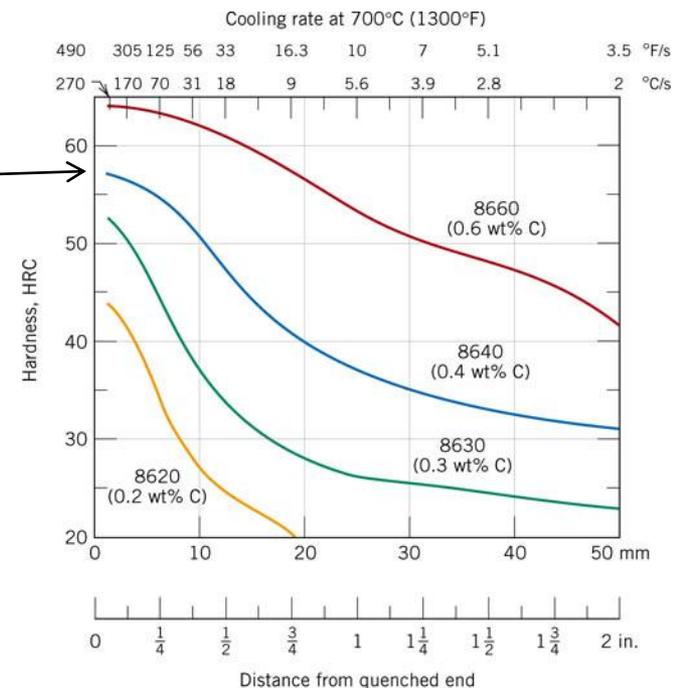
5140= 0,85Cr

1040= sem elementos de liga

Efeito da composição da liga

Endurecibilidade

Endurecibilidade é a habilidade de uma liga em ser endurecida pela formação de martensita.



Aços com diferentes concentrações de C