

TRATAMENTOS TÉRMICOS

Definição

- ▶ Submeter um material a um ciclo de variações de temperatura conhecido (idealmente seria controlado), com o objetivo de se obter no material uma determinada microestrutura, mantendo suas características externas gerais.
- ▶ Segundo *Tschiptschin*: Aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a finalidade de alterar suas propriedades físicas ou mecânicas, sem alterar a forma do produto final

Histórico

- ▶ O homem aprendeu a realizar tratamentos térmicos nos primórdios do seu domínio da metalurgia, descobrindo acidentalmente diversos fenômenos relativos ao calor:
 - ▶ Os metais, se aquecidos o suficiente, fundem
 - ▶ Um metal deformado e que está muito duro, após aquecido, volta a ficar trabalhável
 - ▶ Um pedaço de ferro, aquecido imerso em brasas, ao ser resfriado em água fica muito duro



Exemplos de Aplicações

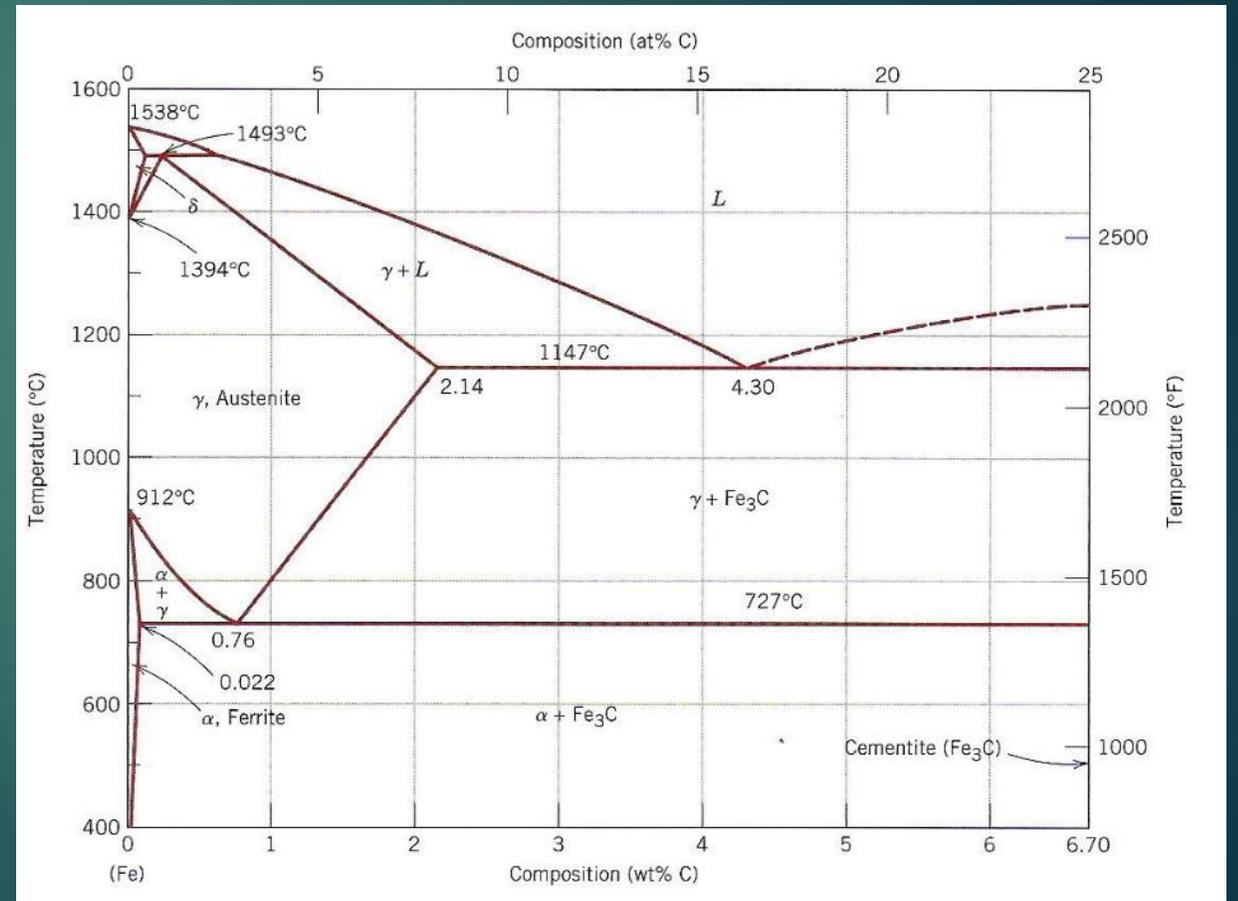
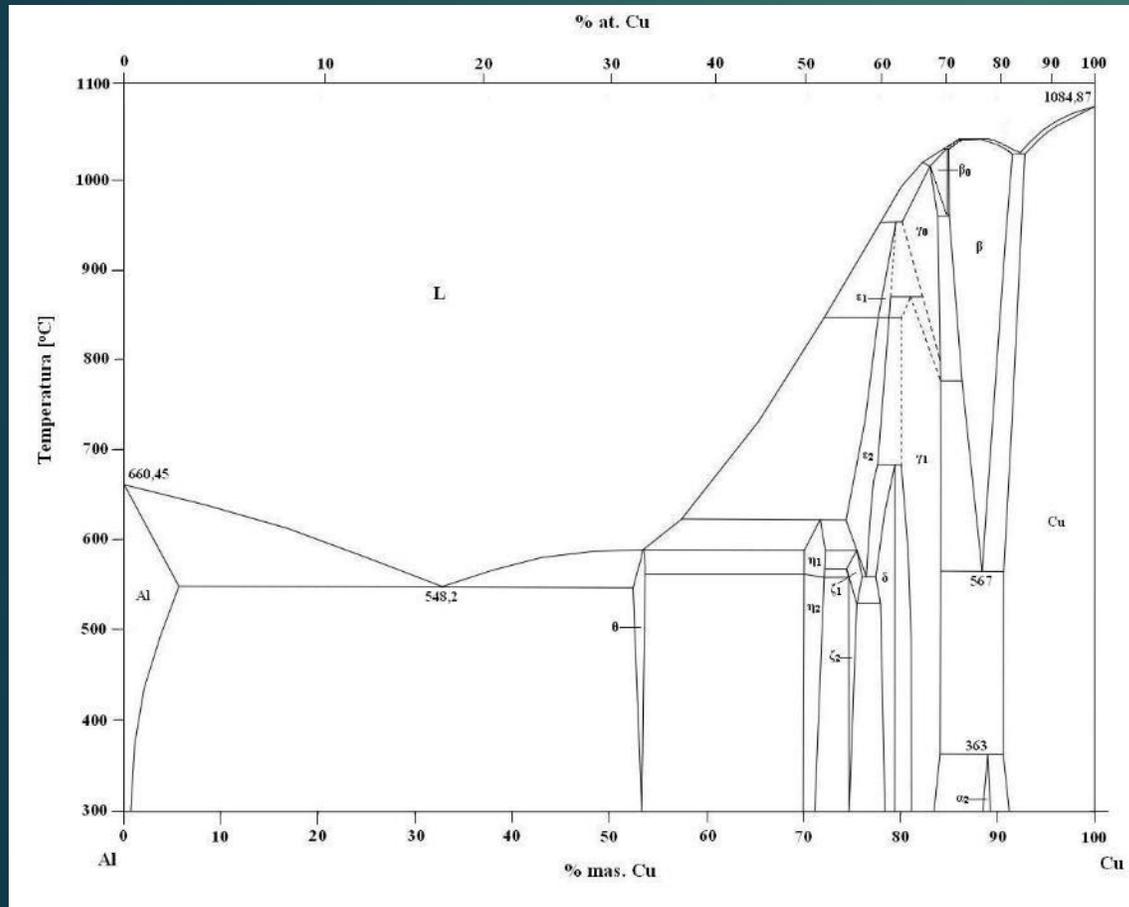
- ▶ Obter aços duros para fabricação de serras para diversas aplicações
- ▶ Obtenção de aços com propriedades mecânicas adequadas para produção de molas
- ▶ Amolecimento de ligas diversas (aços, ligas de cobre, alumínio, etc.) para prosseguimento do processamento após certos níveis de deformação

Princípios

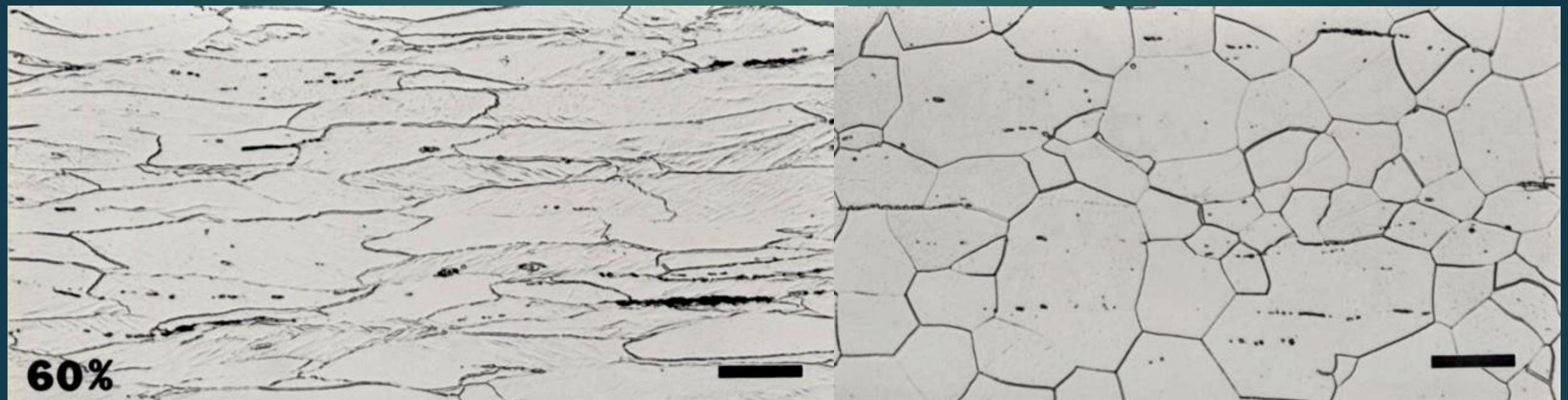
- ▶ É necessário conhecer a liga com que se está trabalhando:
 - ▶ Composição química
 - ▶ Metalurgia física (microestruturas formadas para cada situação)
 - ▶ Seu efeito nas propriedades de interesse
 - ▶ O sistema usado (forno, cadinhos, refratários, etc.)

Princípios

▶ Principal aliado: DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO



Recozimento de materiais deformados



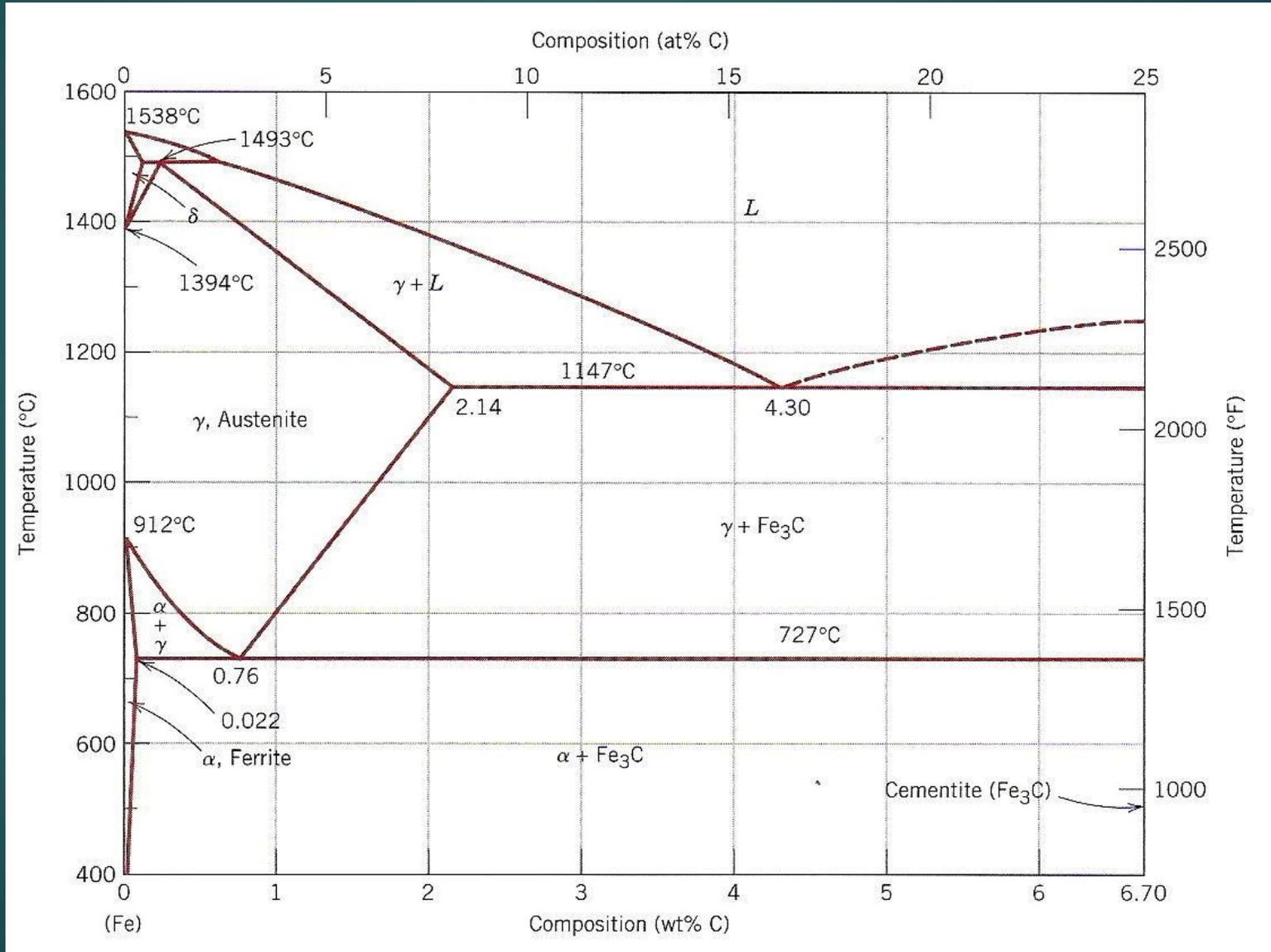
60%

Aço 1006 deformado 60%

Mesmo aço após recozimento

TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

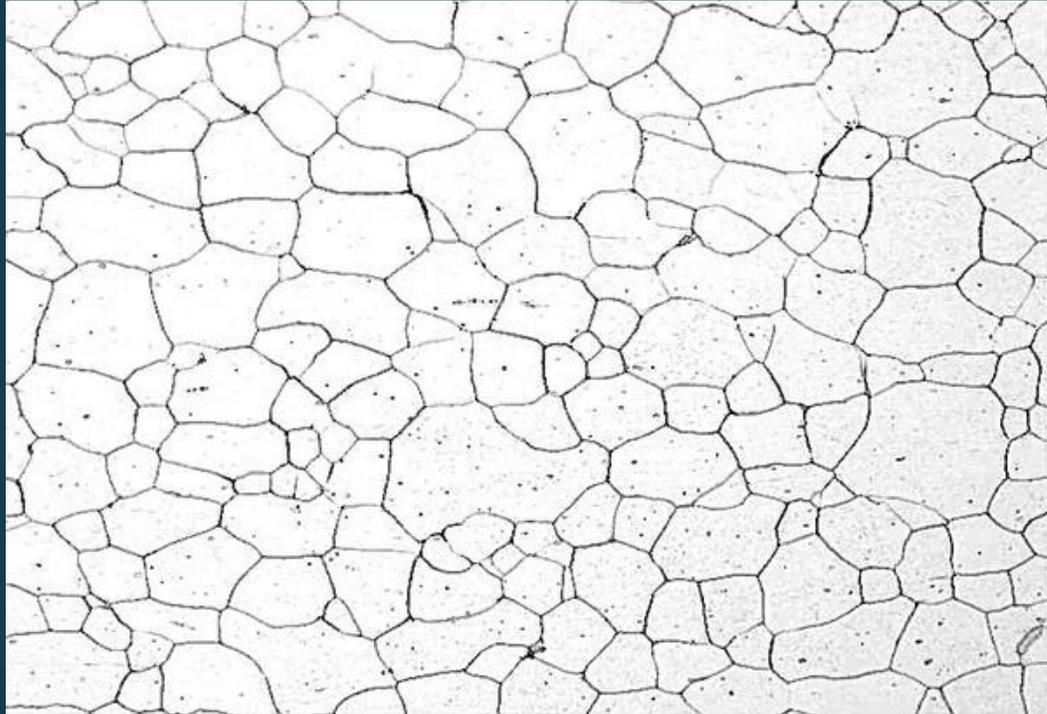
DIAGRAMA Fe-C



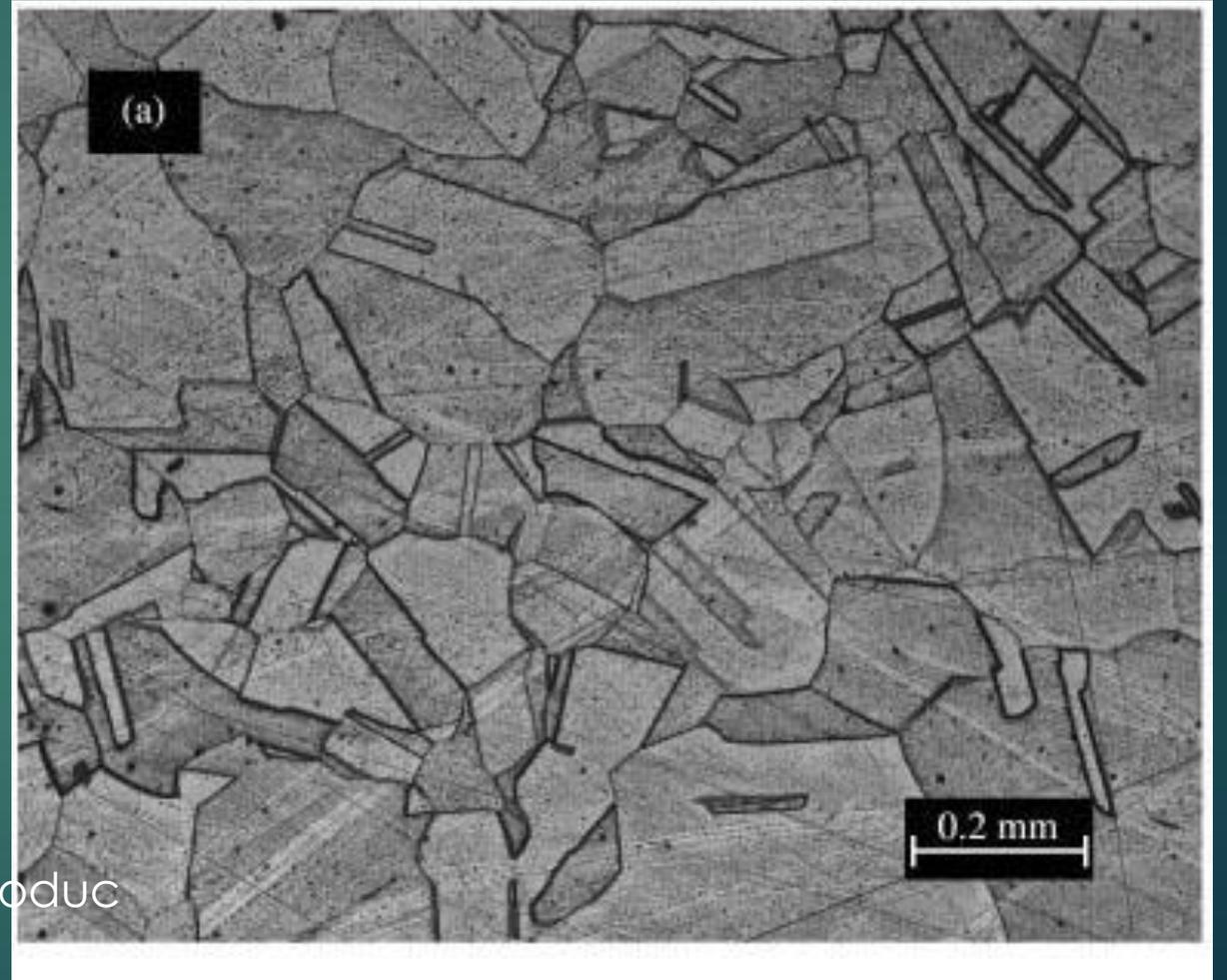
Principais microestruturas

- ▶ Ferrita
- ▶ Austenita
- ▶ Martensita
- ▶ Martensita revenida
- ▶ Bainita superior
- ▶ Bainita inferior
- ▶ Perlita
- ▶ Carbonetos esferoidizados

Ferrita/austenita



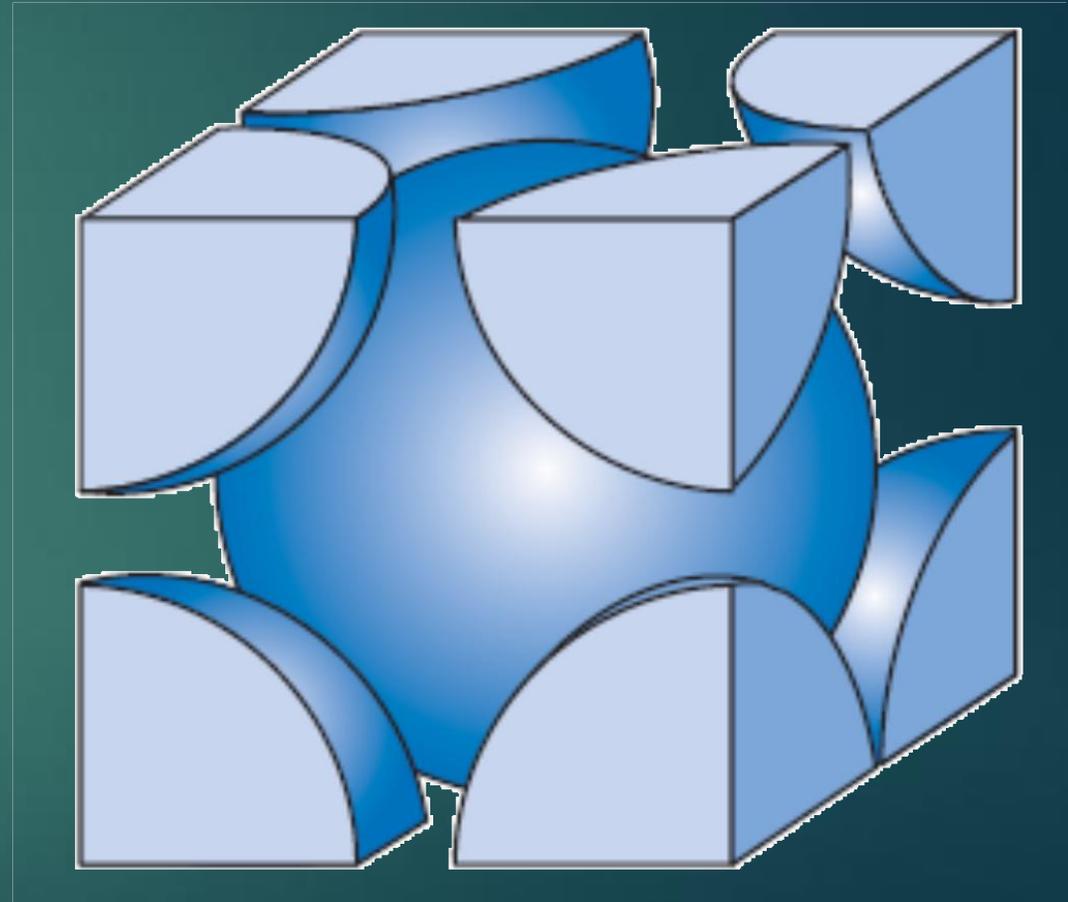
<http://automotive.arcelormittal.com/europe/products/HYTSS/BH/EN>



http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392005000400019&script=sci_arttext

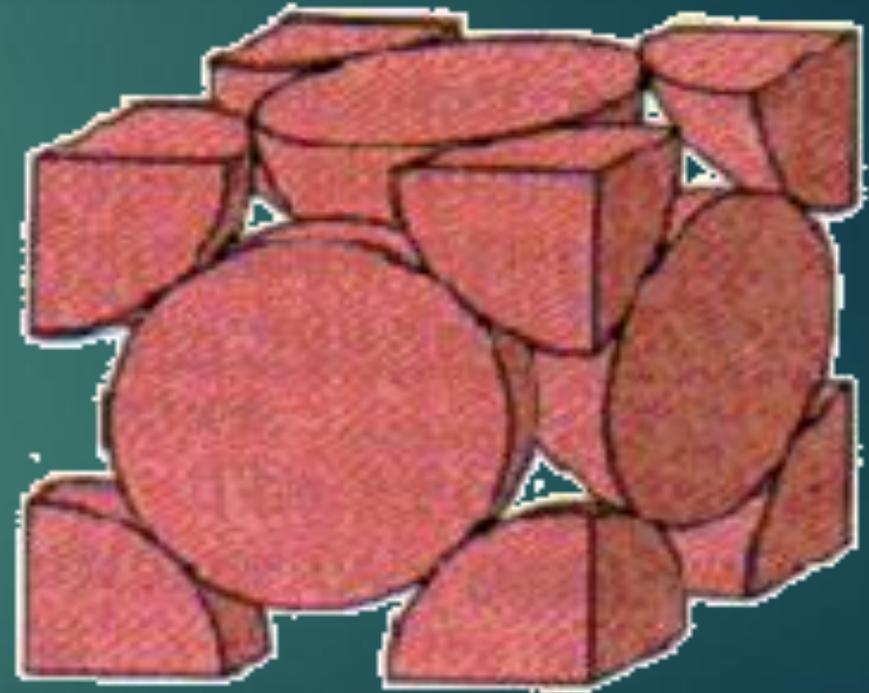
Ferrita

- ▶ Estável à temperatura ambiente
- ▶ Estrutura cúbica de corpo centrada
- ▶ Capacidade de dissolver teores muito baixos de carbono (0,02% à temperatura ambiente)

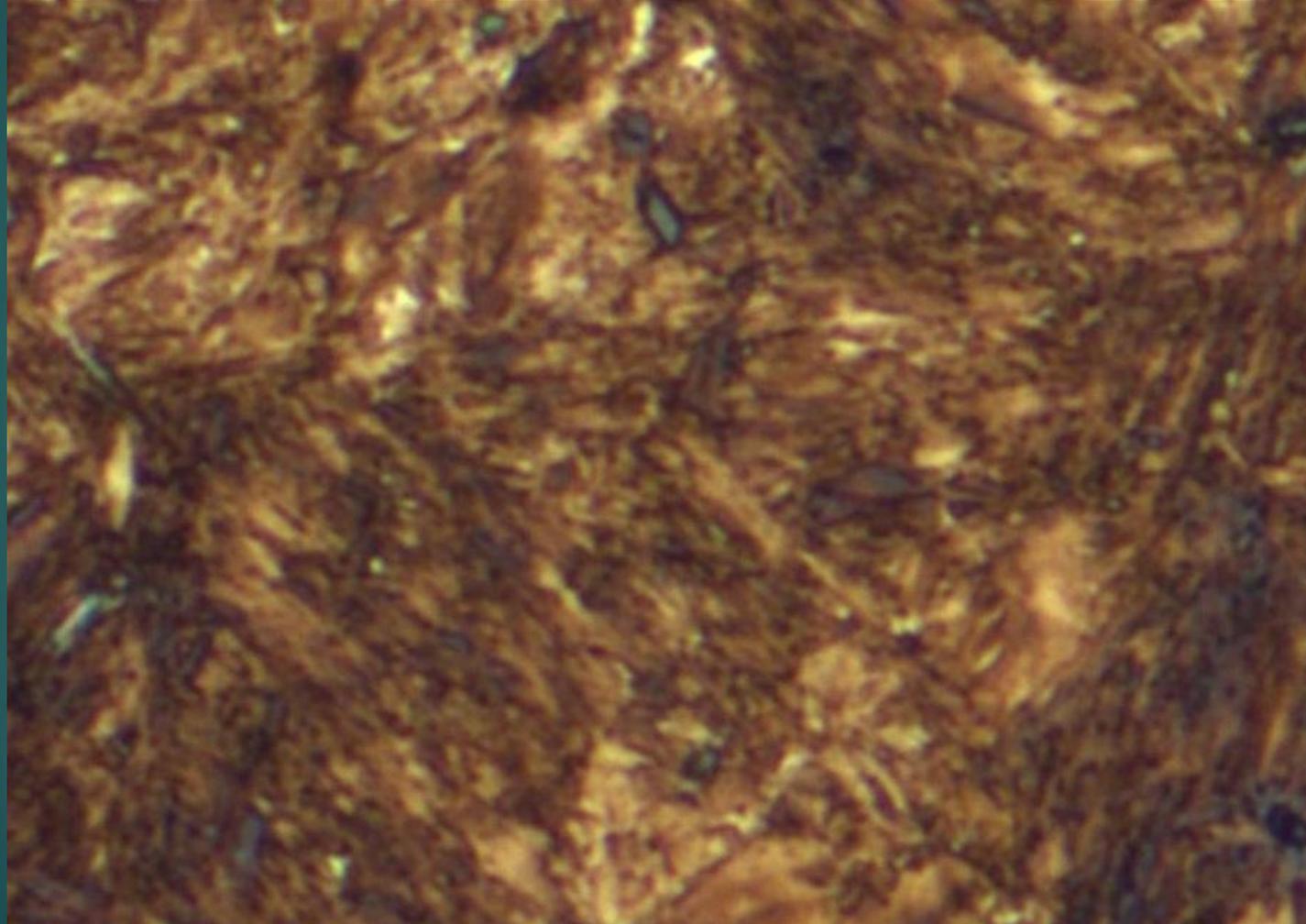


Austenita

- ▶ Ferro puro – Estável a partir de 912°C
- ▶ Ligado com carbono – começa a se formar a 723°C
- ▶ Estrutura cúbica de faces centradas
- ▶ Capacidade de dissolver grandes teores de carbono (acima de 2%)

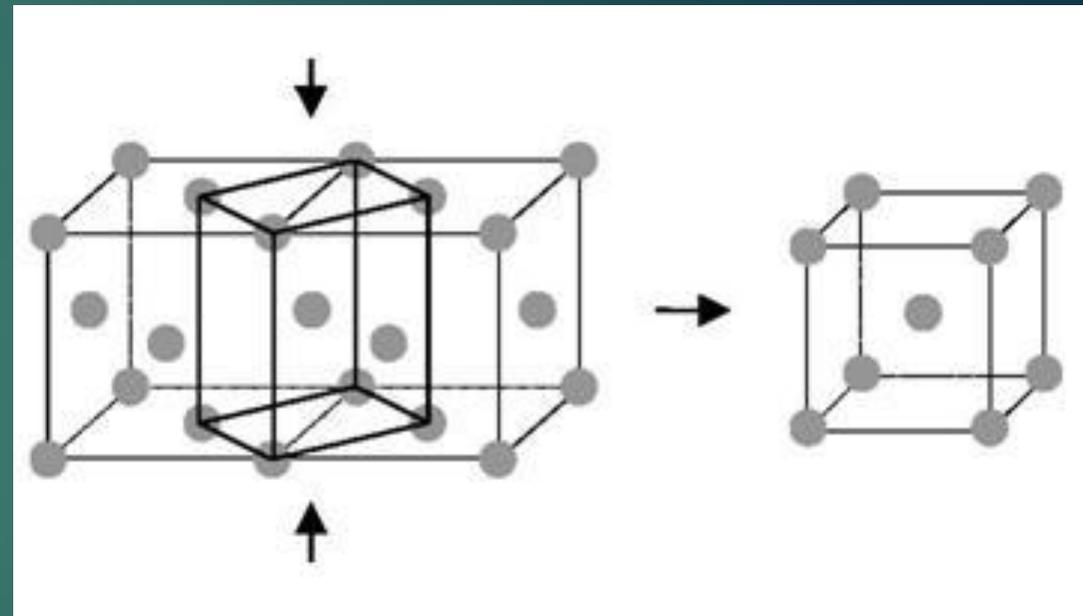


Martensita



Martensita

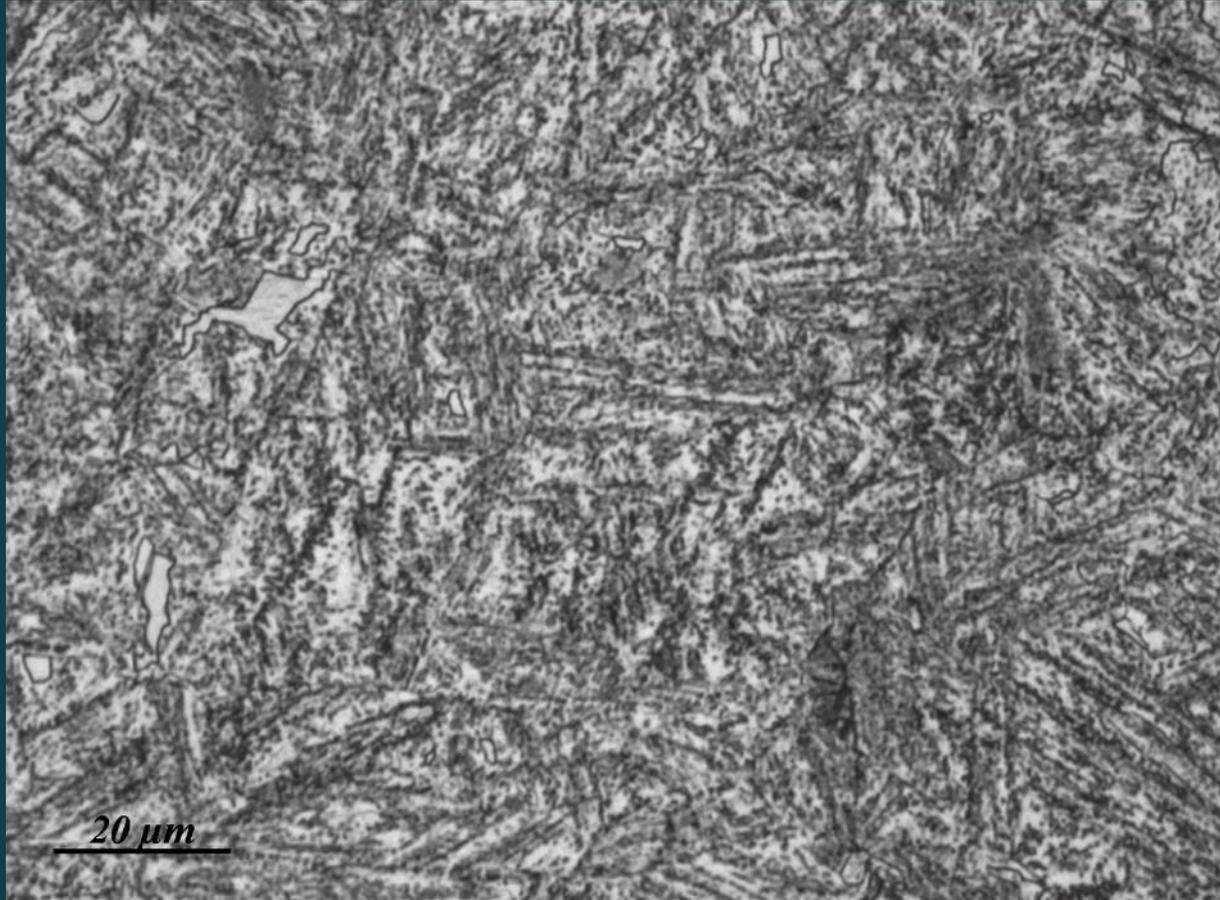
- ▶ Forma-se a partir da austenita quando esta é resfriada de forma suficientemente rápida (velocidade depende da liga)
- ▶ Teor de carbono é “herdado” da austenita
- ▶ Sua formação não envolve difusão, e pode ser descrita por uma deformação do reticulado
- ▶ Existe uma correspondência direta entre o reticulado da austenita e da martensita



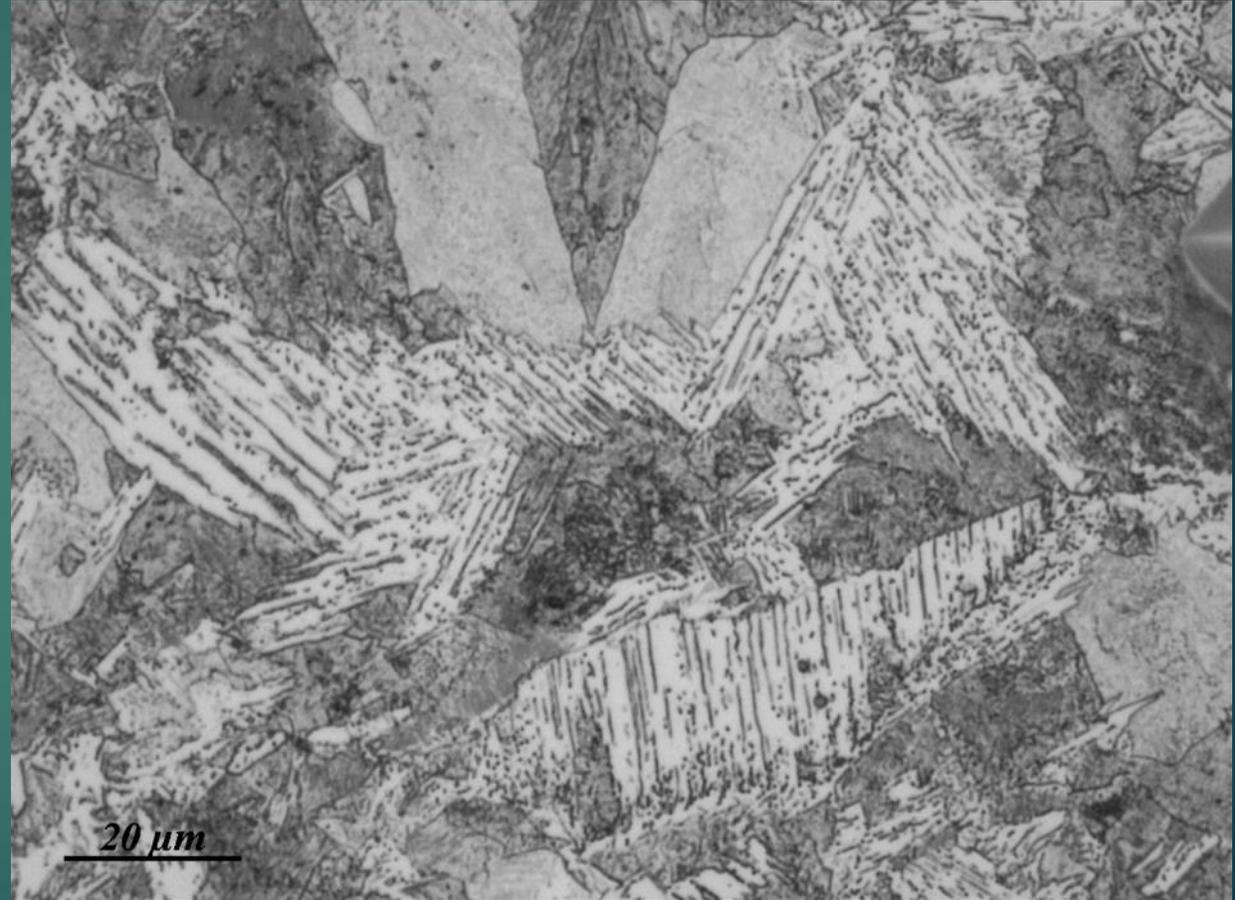
Martensita

- ▶ Alta dureza; frágil se não for tratada
- ▶ Passa por novo tratamento a “baixa” temperatura chamado revenimento ou revenido
- ▶ Revenimento causa a formação de carbonetos, e aumenta a tenacidade
- ▶ Sua formação é praticamente instantânea, e a fração formada depende da temperatura a que se resfriou o material.

Bainita



INFERIOR

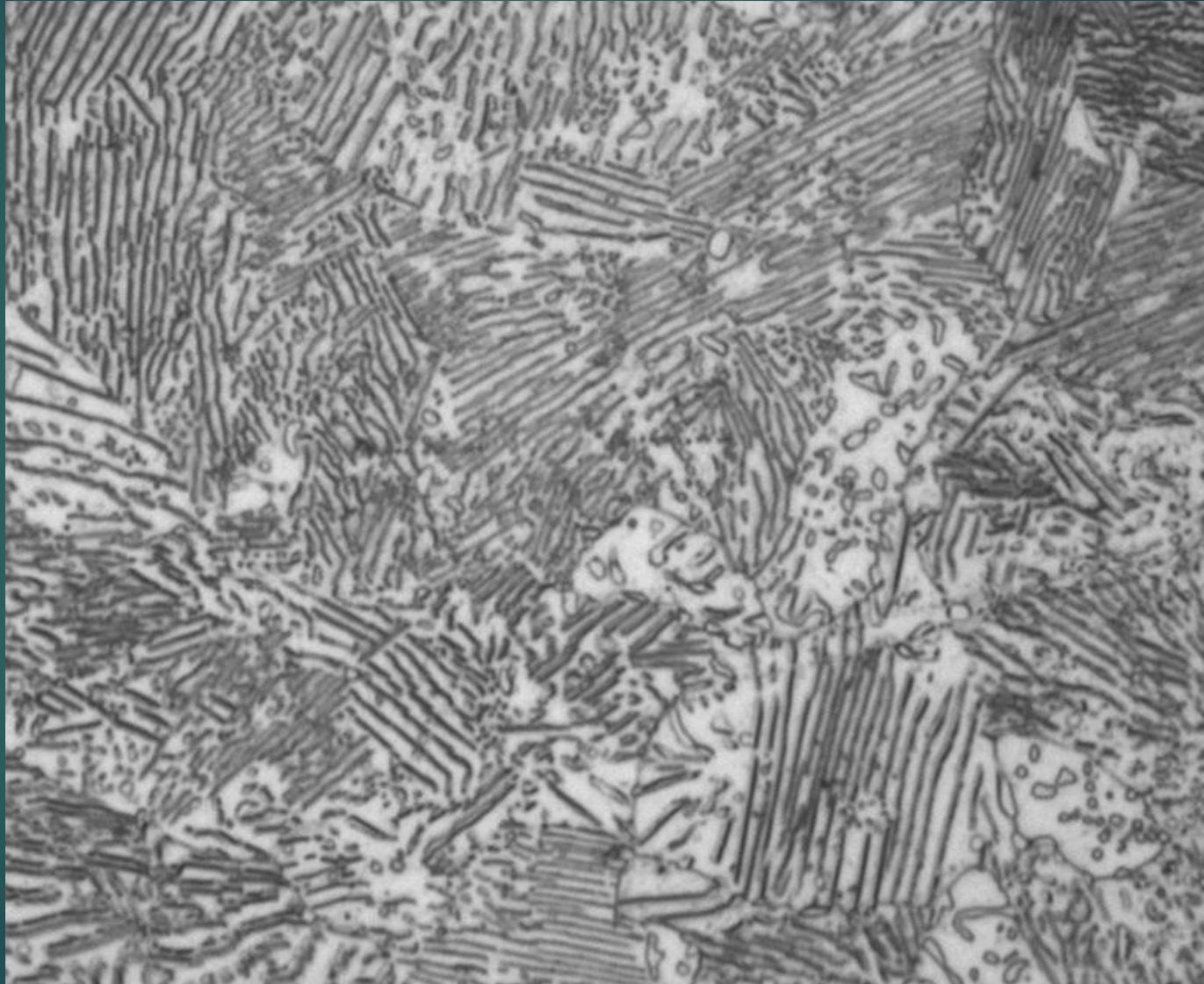


SUPERIOR

Bainita

- ▶ Composta de ferrita na forma de placas ou agulhas e carbonetos de ferro dispersos
- ▶ Alta dureza (não tão alta quanto a martensita)
- ▶ Bastante tenaz
- ▶ Formada em temperaturas acima daquelas em que se forma martensita

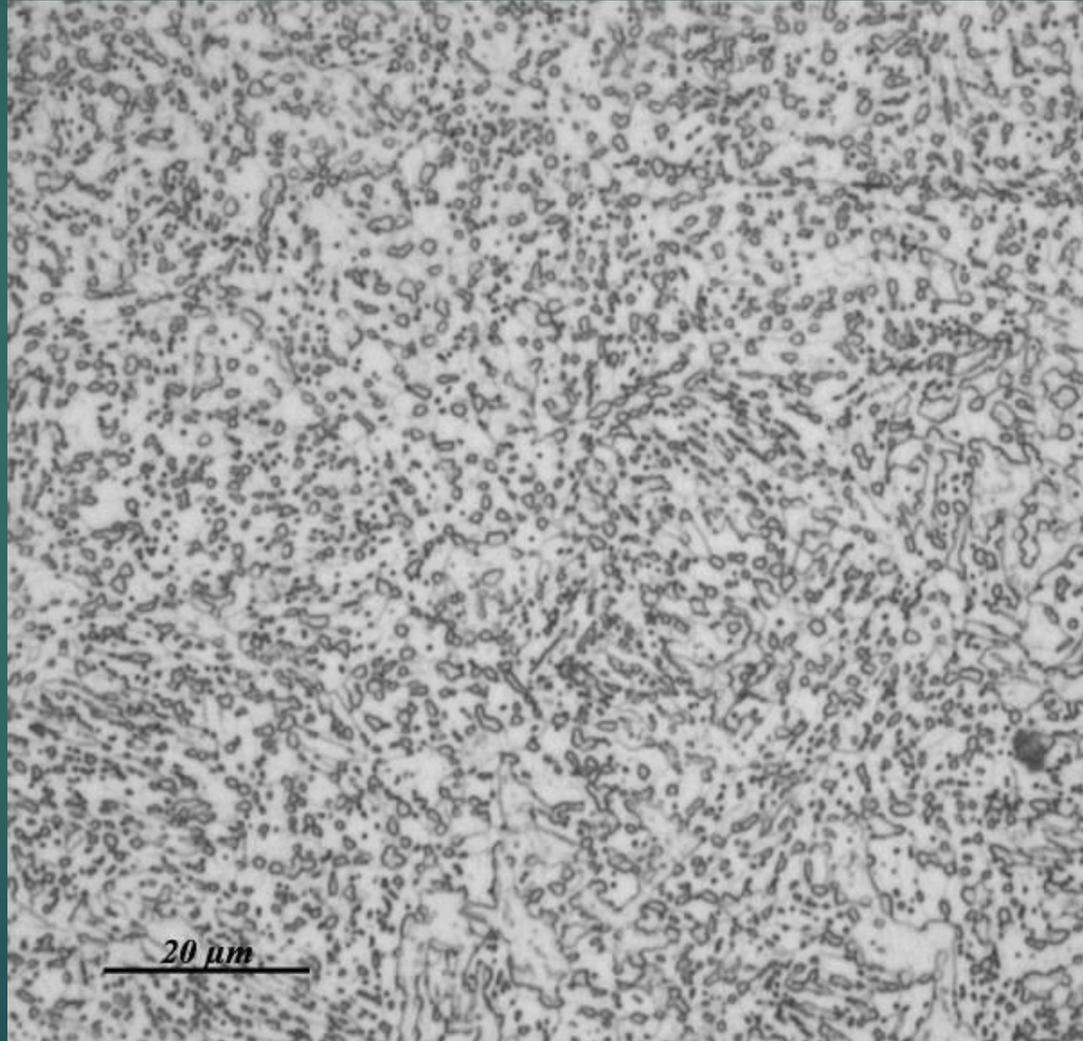
Perlita



Perlita

- ▶ Lamelas alternadas de ferrita e cementita
- ▶ Distância entre lamelas diminui quanto menor for a temperatura de formação
- ▶ Ferrita e cementita avançam juntas (crescimento cooperativo)
- ▶ Dureza média a alta

Carbonetos esferoidizados



Principais tratamentos

- ▶ Aços baixo carbono:
 - ▶ Recozimento – Diminuição da dureza, ajuste do tamanho de grão, etc.

- ▶ Aços alto carbono
 - ▶ Têmpera – Objetiva obtenção de martensita
 - ▶ Martêmpera – Obtenção de martensita, porém reduzindo tensões associadas ao tratamento
 - ▶ Austêmpera – obtenção da bainita
 - ▶ Revenido – diminuição da fragilidade da martensita
 - ▶ Esferoidização – obtenção de carbonetos esferoidizados (melhora as condições de trabalho mecânico)

Ferramentas para definição de ciclos térmicos

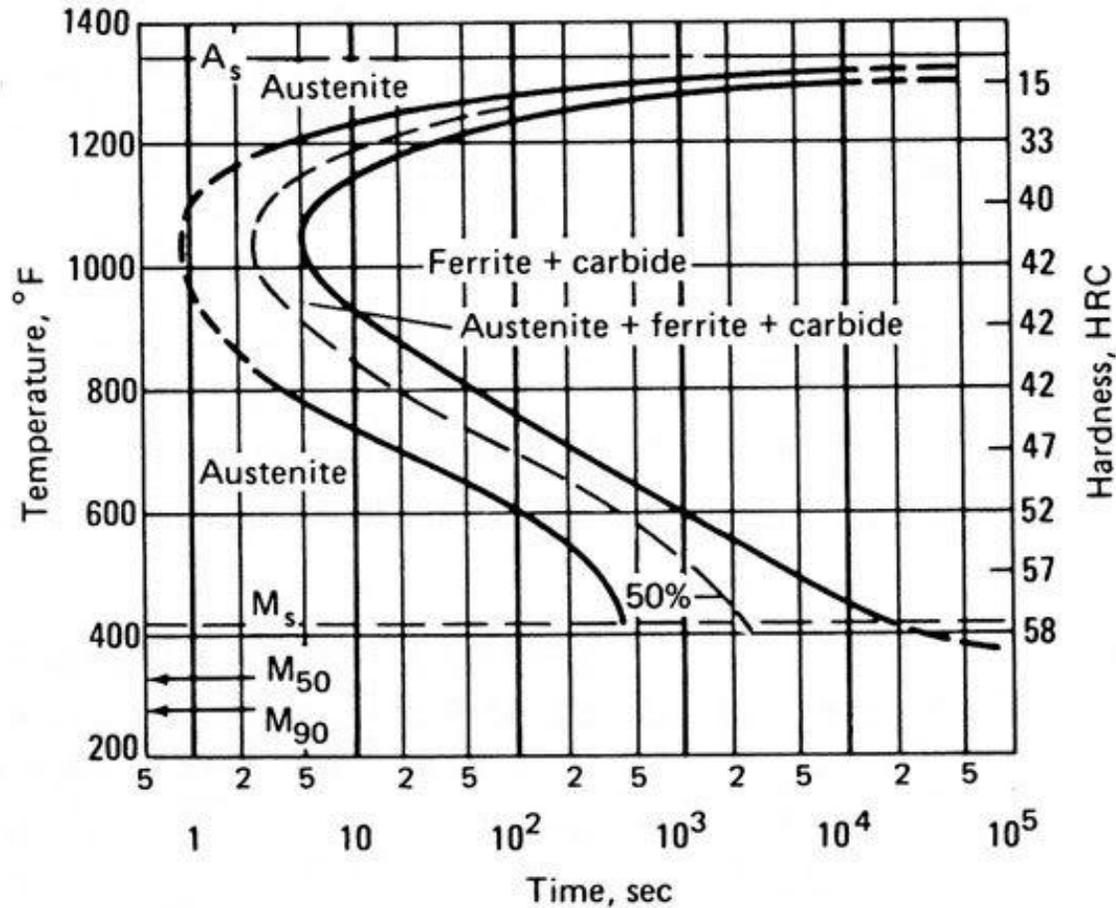
- ▶ Diagrama de equilíbrio
- ▶ Curvas Temperatura – Tempo – Transformação – (TTT)
- ▶ Curvas de Resfriamento Contínuo (RC)

Curvas TTT

- ▶ Indicam o progresso de uma transformação em uma mesma temperatura (tratamento isotérmico)
- ▶ Seu levantamento é feito por meio de vários tratamentos isotérmicos em diferentes tempos e temperaturas
- ▶ Sempre há indicação de condições como temperatura de partida e tamanho de grão da fase de alta temperatura

Curvas TTT

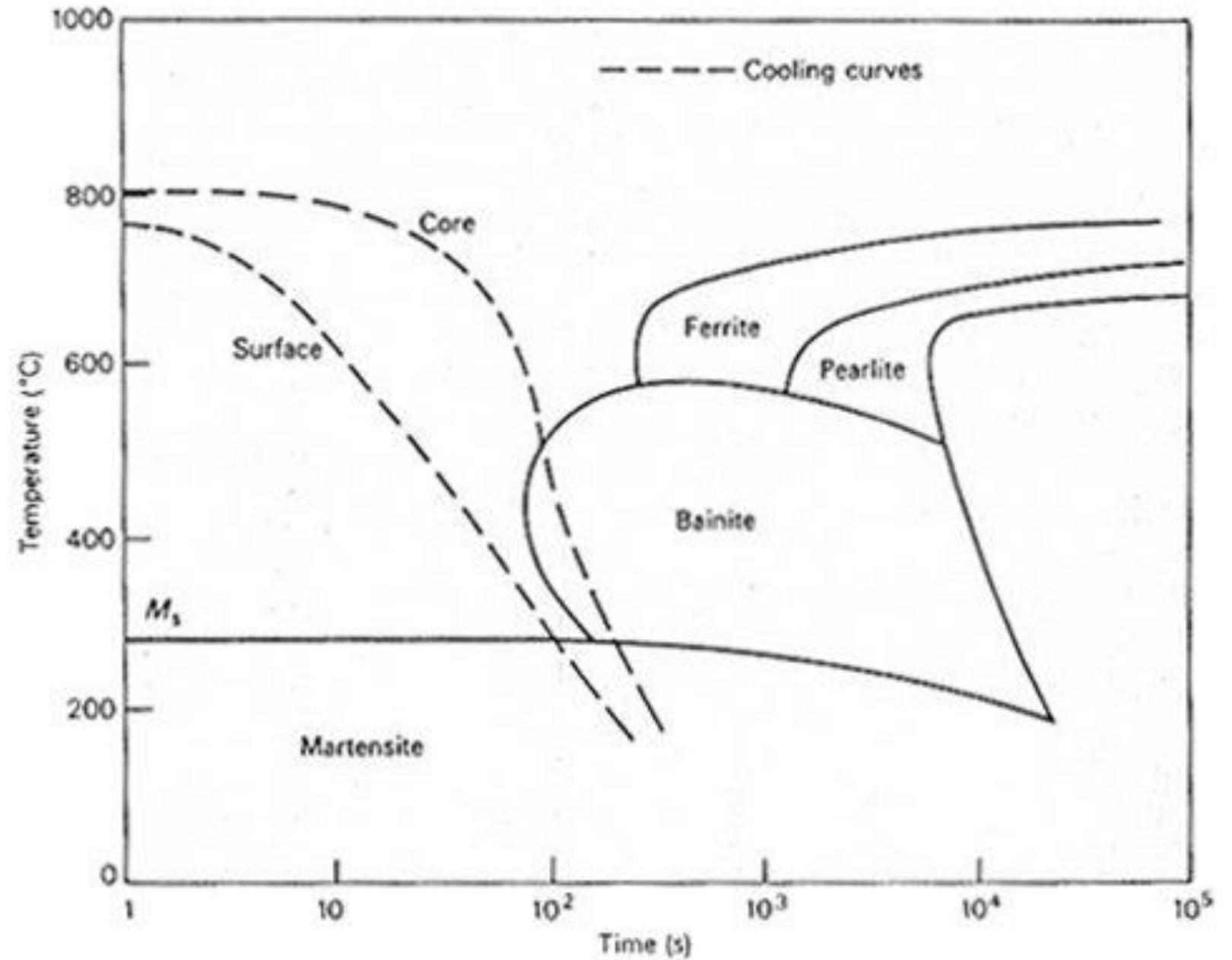
1095: Isothermal Transformation Diagram. Composition: 0.89 C, 0.29 Mn. Austenitized at 1625 °F (885 °C). Grain size, 4 to 5. (Source: *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977)



Curvas RC

- ▶ Indicam os produtos formados a partir de uma fase de alta temperatura quando a amostra é resfriada continuamente
- ▶ Seu levantamento é feito com uma série de tratamentos de resfriamento contínuo interrompidos ou não

Curvas RC



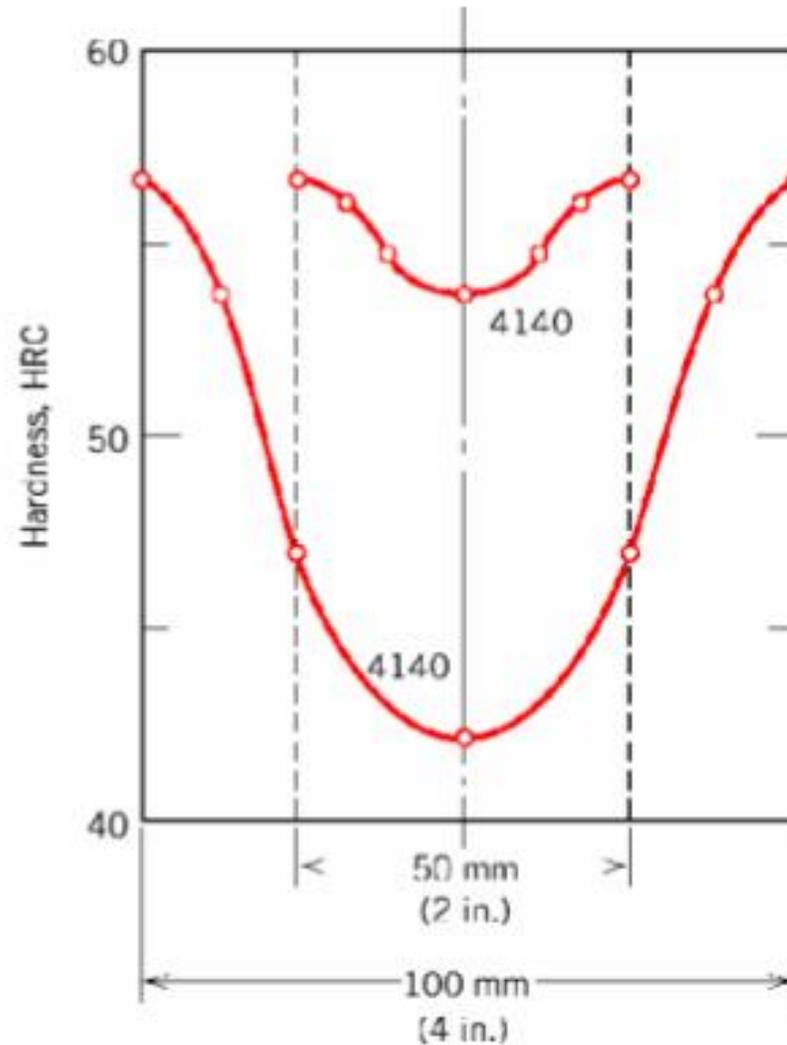
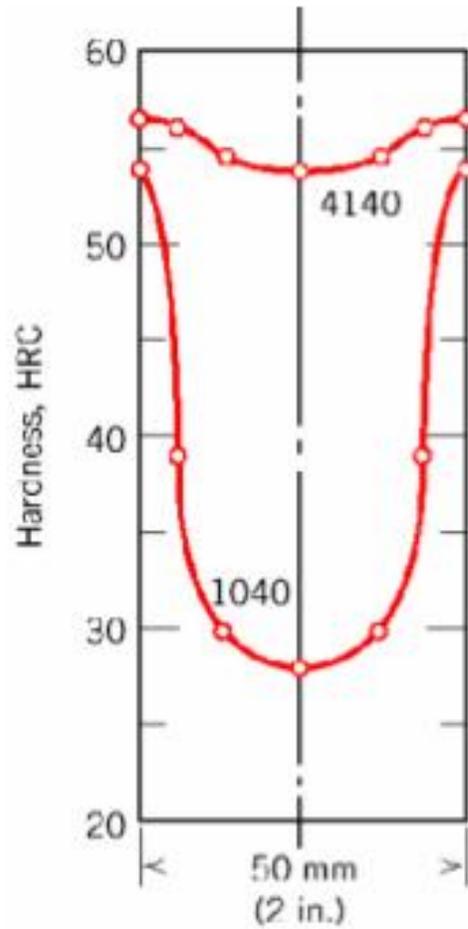
Temperabilidade

- ▶ Capacidade que um aço tem de ser temperado.
- ▶ Medida em função da profundidade da camada martensítica obtida em um certo ensaio
- ▶ Elementos de liga causam alterações na temperabilidade
- ▶ Mudanças na temperabilidade indicam que a temperatura à qual se inicia a formação da martensita (M_s) se altera.

TEMPERABILIDADE

- ▶ Uma das maneiras de se avaliar a temperabilidade é a “curva em U”.
- ▶ Cilindros de diferentes espessuras do mesmo aço são tratados na mesma temperatura, e resfriados bruscamente
- ▶ O núcleo da amostra resfria com uma taxa diferente da superfície. Isso causa variações na dureza da microestrutura formada.
- ▶ Dependendo do tipo de aço e diâmetro da amostra, o núcleo pode chegar a não ficar martensítico

TEMPERABILIDADE



TEMPERABILIDADE – ENSAIO JOMINY

- ▶ Uma amostra de 100 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro é austenitizada e resfriada por um jato d'água na face inferior.
- ▶ A taxa de resfriamento cai com a distância da face inferior
- ▶ Medem-se as durezas em várias profundidades



ASTM A255 End-Quench Test for Hardenability of Steel

©2003 Daniel Samborsky
Chemical and Biological Engineering Department

Tratamentos térmicos e termoquímicos superficiais

- ▶ Feitos com a finalidade de se endurecer uma camada superficial do material, mantendo o núcleo mole
- ▶ Exemplos
 - ▶ Têmpera por indução
 - ▶ Cementação
 - ▶ Outros tratamentos termoquímicos

Têmpera por indução

- ▶ A peça, normalmente cilíndrica, é inserida em uma bobina de indução
- ▶ As correntes parasitas induzidas aquecem a peça até uma certa profundidade
- ▶ Após o resfriamento rápido, uma camada superficial se forma com estrutura martensítica.
- ▶ Usado por exemplo em cilindros de laminação, cilindros de dispositivos hidráulicos, etc.



Têmpera por indução



Cementação

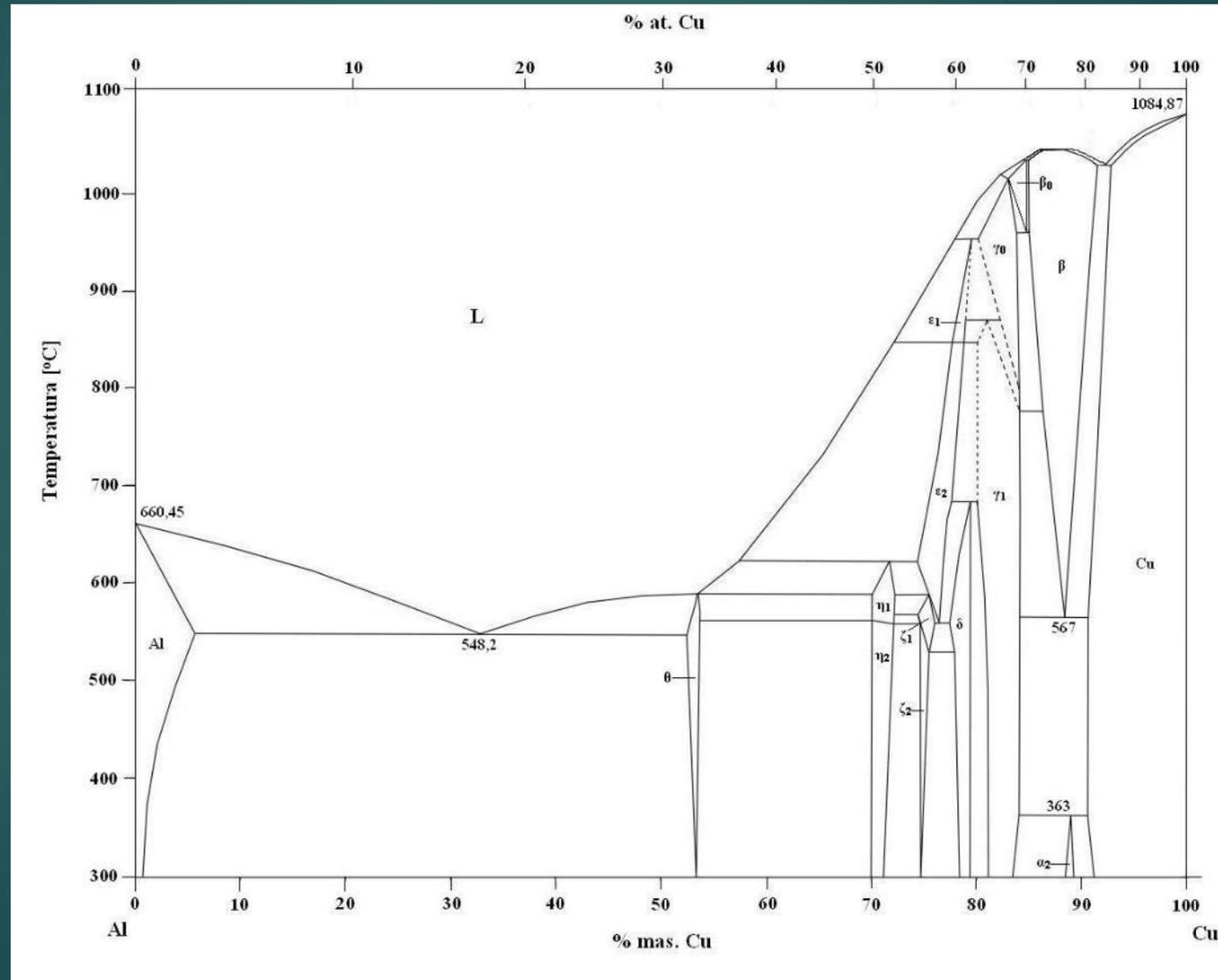
- ▶ Tratamento pelo qual se introduz carbono no aço em alta temperatura, utilizando-se um meio líquido ou gasoso com potencial de carbono equivalente a um certo teor de carbono no aço
- ▶ Feito para aumentar a dureza superficial, deixando o núcleo como um material de baixo carbono
- ▶ Meios carburantes: Mistura CO/CO₂, Metano, carvão (às vezes com Hidróxido de Bário), sais fundidos ricos em carbono, etc.

Cementação



TRATAMENTO TÉRMICO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

DIAGRAMA Al-Cu



Tratamento de ligas de alumínio

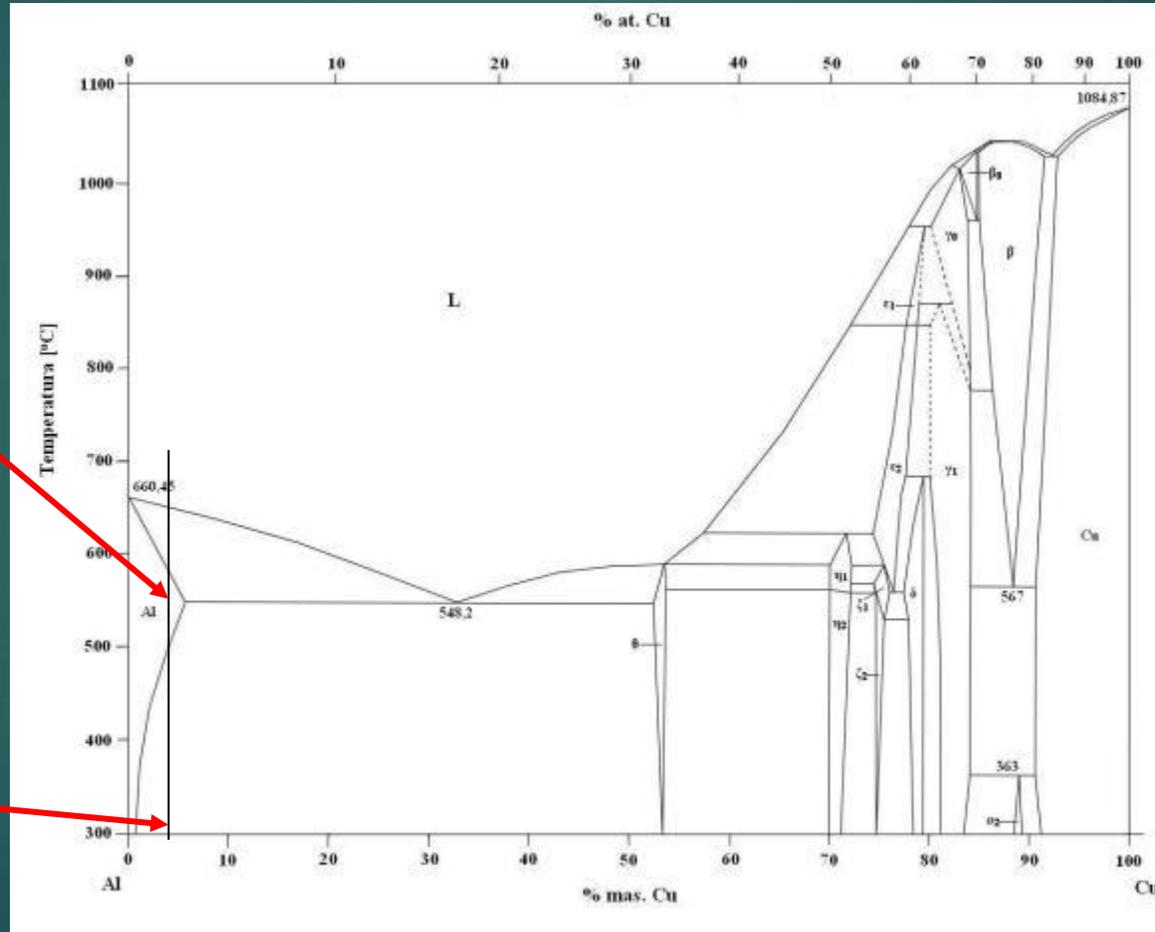
- ▶ No início do século XX, Paul Merica estava tentando desenvolver processos de têmpera para endurecer ligas Al-4%Cu
- ▶ Após medir durezas das peças tratadas, ele ficou decepcionado que a dureza não era maior, e decidiu ir pescar para relaxar
- ▶ Dias depois, ao voltar ao laboratório, voltou a medir a dureza das suas amostras, e os valores encontrados foram bem mais altos

Tratamento térmicos de ligas de alumínio

Tratamento a 550°C (campo de uma fase)

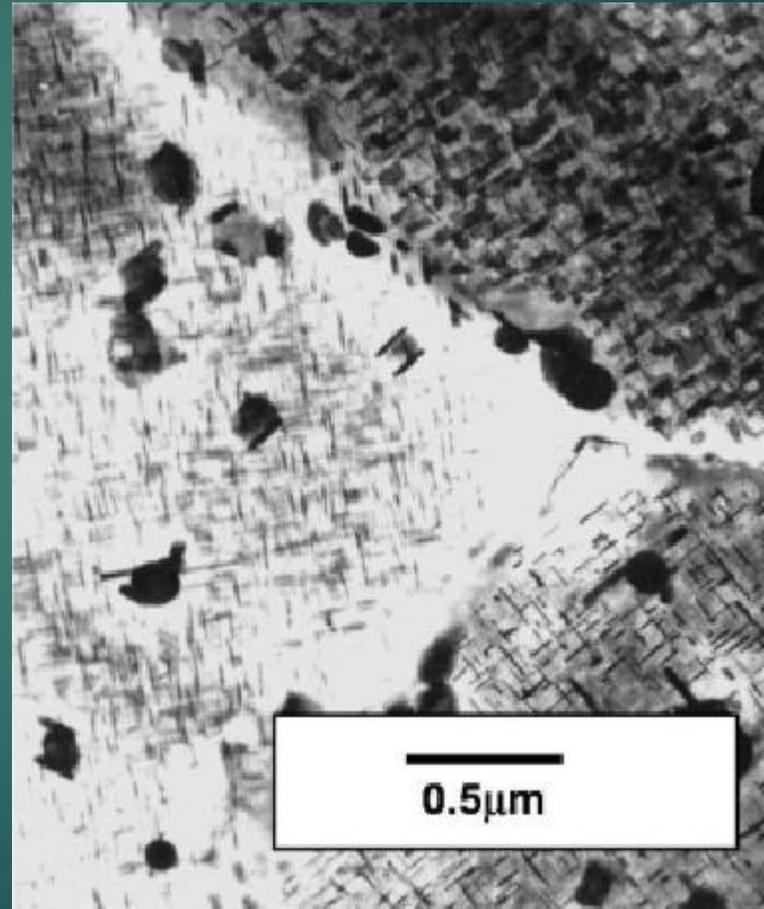
Resfriamento rápido à temperatura ambiente

Novo tratamento em temperatura da ordem de 250-300°C



Tratamento térmico de ligas de alumínio

- ▶ Estrutura resultante:
 - ▶ Precipitados coerentes (bom ajuste de rede cristalina) dispersos na matriz
- ▶ Propriedade resultante:
 - ▶ Alta resistência mecânica



Tratamento térmico de ligas de alumínio

- ✓ Partículas finas de uma segunda fase.

Endurecimento por precipitação:

- As partículas têm dimensões reduzidas
- Existe uma certa continuidade na rede cristalina entre a matriz e a partícula — há uma distorção da rede cristalina
- A partir de uma certa dimensão, perde eficiência para endurecer o material

