

Tratamento térmico

Porque fazer Tratamentos Térmicos?

Modificação de propriedades sem alterar composição química, pela modificação da microestrutura

Sites de interesse:

www.infomet.com.br

www.cimm.com.br

Variáveis do tratamento térmico:

- ✓ Temperatura de aquecimento
- ✓ Taxa de aquecimento
- ✓ Tempo de austenitização
- ✓ Taxa de resfriamento
- ✓ Atmosfera

(histórico do aço é importante... A estrutura inicial afeta tempos e temperaturas dos TT)

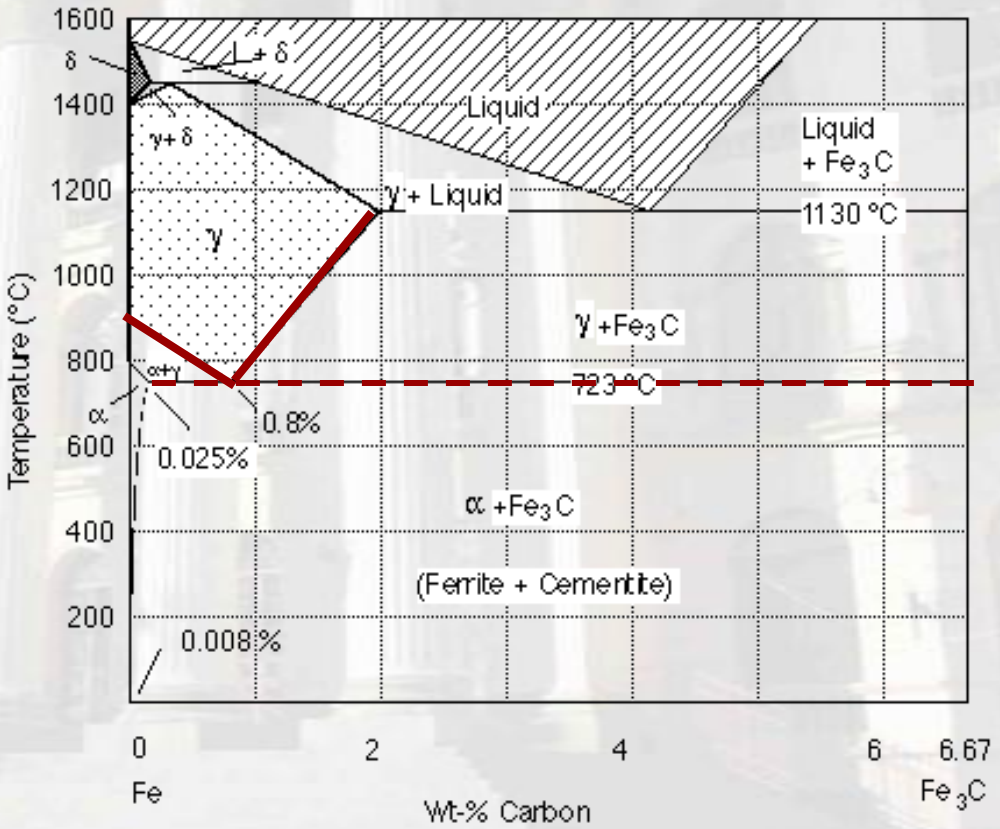
Temperatura de aquecimento

depende do material e da transformação de fase ou microestrutura/propriedade desejada

Ex: material será austenitizado?

Temperatura muito **alta**.....
(crescimento de grão, oxidação dos contornos de grão, etc.)

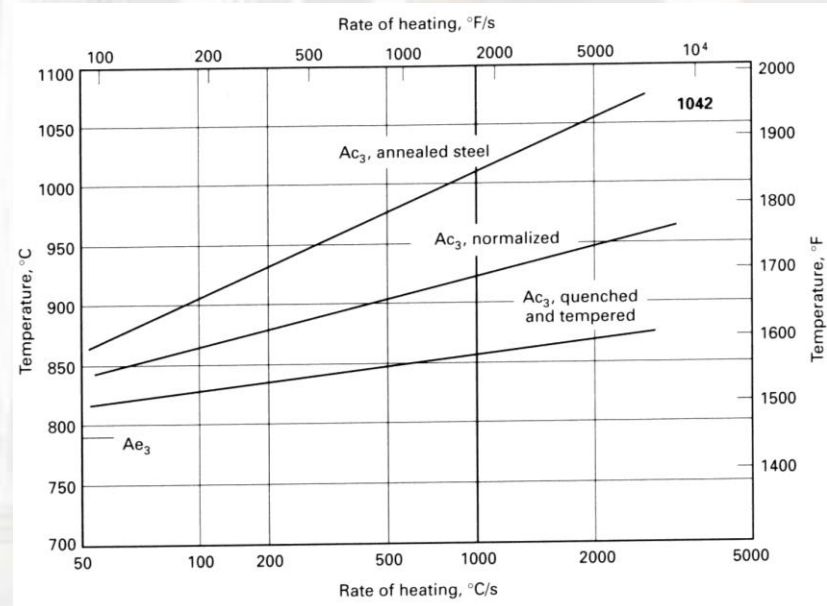
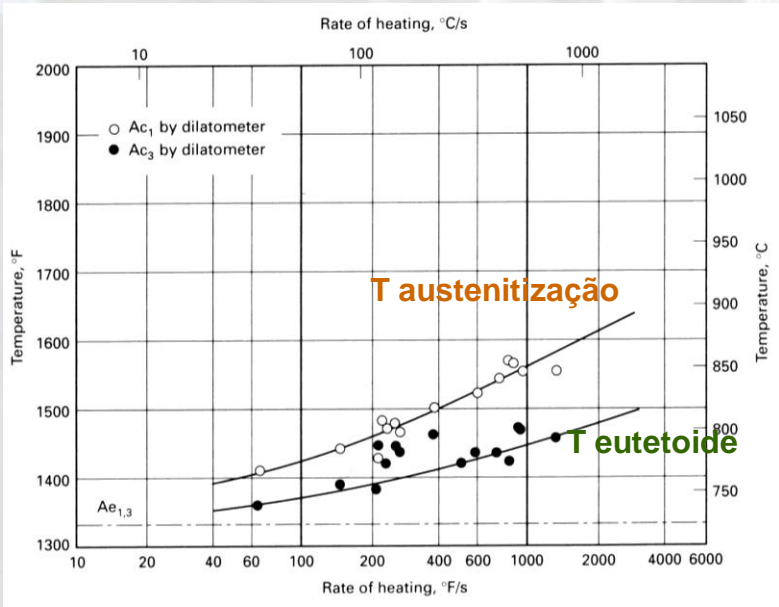
Temperatura muito **baixa**.....
(material não será completamente austenitizado)



Taxa de aquecimento

efeito depende do volume de material a ser aquecido

Quanto maior a taxa de aquecimento mais elevadas as temperaturas de transformação de fases em relação ao diagrama



Tempo na temperatura de TT

depende muito das dimensões da peça e da microestrutura desejada.

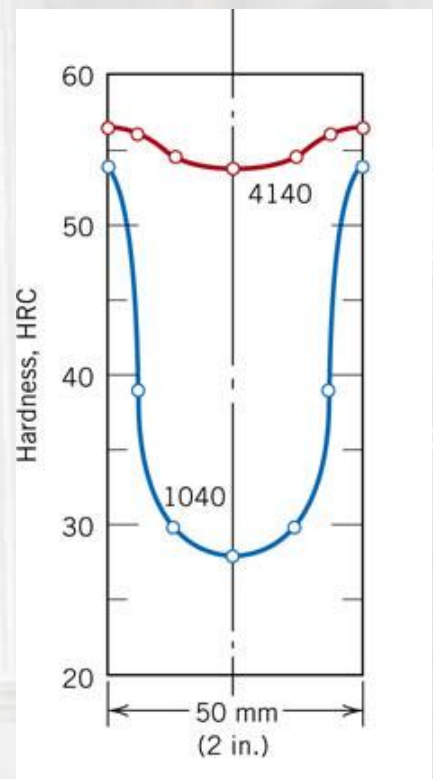
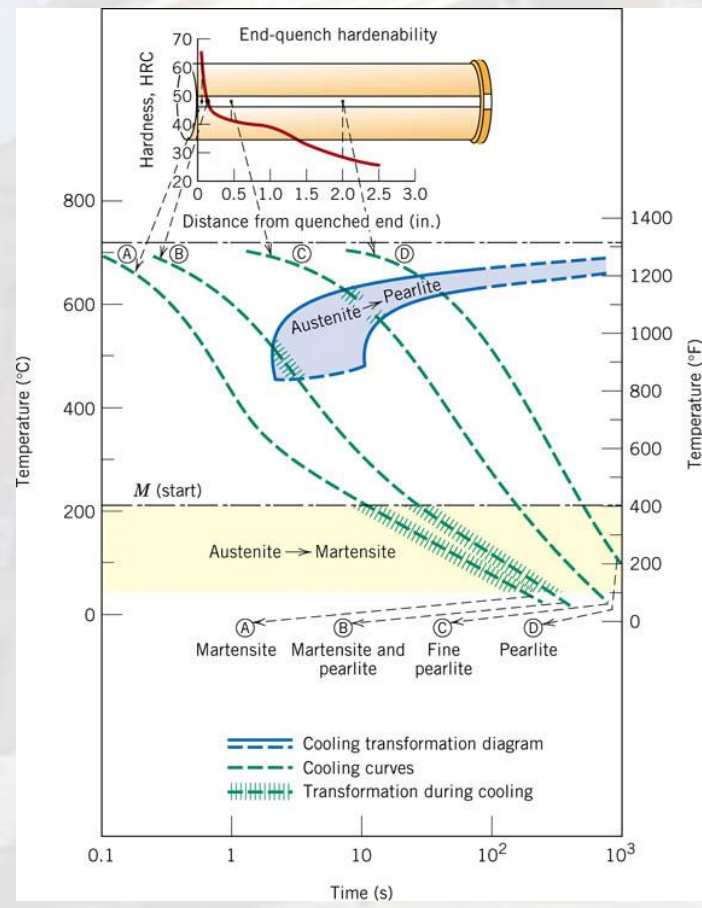
Muito longo – maior a segurança da completa dissolução das fases para posterior transformação

crescimento de grão, oxidação dos contornos de grão, descarbonetação da superfície

Muito curto – material não austenitiza completamente/homogeneamente (núcleo pode manter estrutura original)

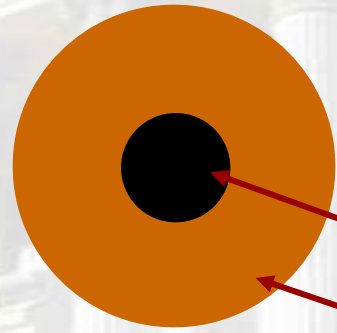
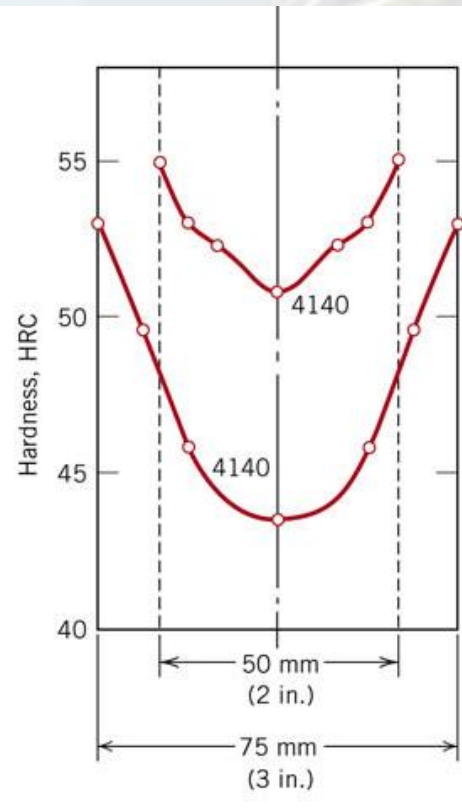
Taxa de resfriamento - determina as propriedades finais

Informações do ensaio Jominy (resfriamento em água)



Taxa de resfriamento - determina as propriedades finais

Efeito das dimensões do material



Posição
centro
superfície

Tx de resfriamento
baixa
alta

Dureza
baixa
alta

Aumento da razão superfície/volume:

- Aumento da taxa de resfriamento
- Aumento da dureza

Taxa de resfriamento - determina as propriedades finais

Depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada

- É o mais importante porque é o que efetivamente determinará a microestrutura, além da composição química do material

A seleção do meio de resfriamento é um **compromisso** entre:

- Obtenção das características finais desejadas (microestruturas e propriedades),
- Ausência de fissuras e empenamento na peça,
- Minimização de concentração de tensões

Meios de resfriamento

Ambiente do forno (+ brando)

Ar

Banho de sais ou metal fundido (+ comum é o de Pb)

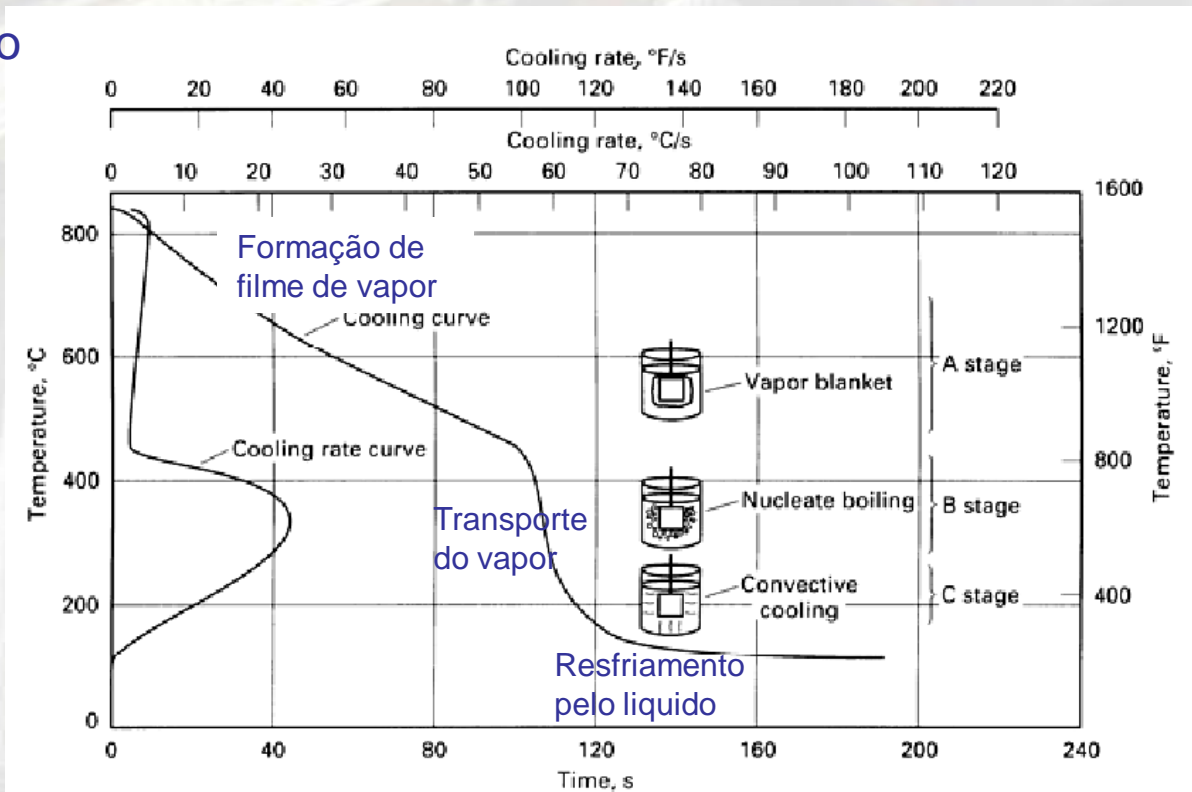
Óleo

Água

Soluções aquosas de NaOH, Na₂CO₃ ou NaCl (+ severos)

Taxa de resfriamento - determina as propriedades finais

Tx de resfriamento e curva de resfriamento



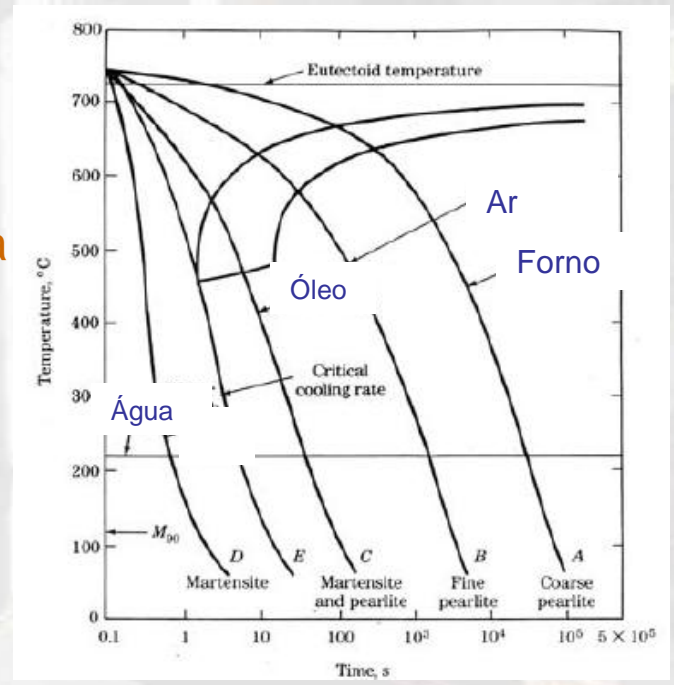
Taxa de resfriamento - determina as propriedades finais

Severidade de tempera – depende do meio onde o aço é resfriado depois da austenitização

Meio
ar
óleo
água

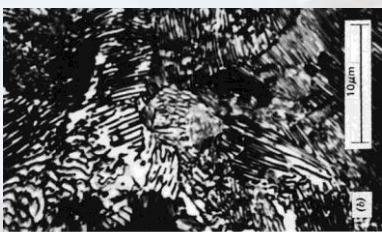
Severidade de tempera
baixa
moderado
alta

Dureza
baixa
moderada
alta

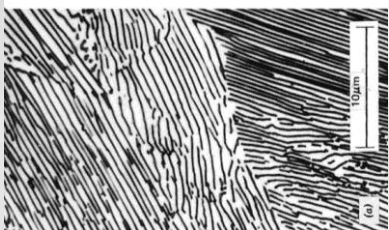


Tratamentos térmicos com taxas de *resfriamento lentas*

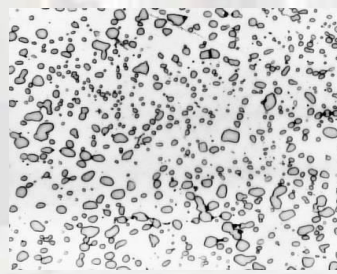
Recozimento



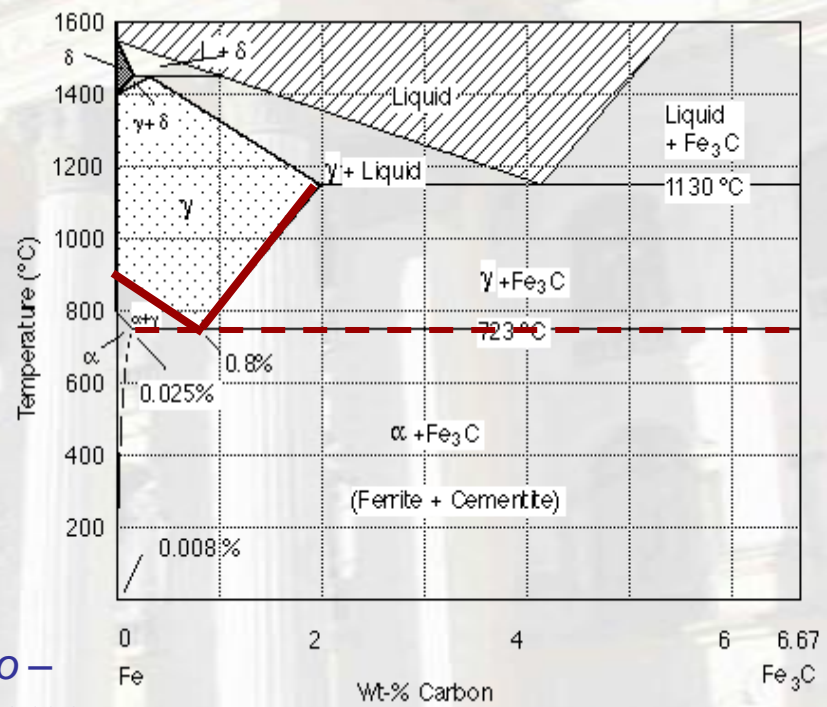
normalização –
resfriamento ao ar



recozimento pleno –
resfriamento em forno



Esferoidização – longos
tempos de austenitização
resfriamento ao ar



Recozimento

Objetivos:

- Remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos
- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência e ductilidade
- Ajustar o tamanho de grão
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas
- Produzir uma microestrutura definida

Tipos de recozimento

- Recozimento para alívio de tensões (qualquer liga metálica)
- Recozimento para recristalização (qualquer liga metálica)
- Recozimento para homogeneização (para peças fundidas)
- Recozimento total ou pleno (aços)
- Recozimento isotérmico ou cíclico (aços)

Recozimento para alívio de tensões

- **Objetivo**

Remoção de tensões internas originadas de processos (tratamentos mecânicos, soldagem, corte, ...)

- **Temperatura**

→ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase

- **Resfriamento**

Deve-se evitar velocidades muito altas devido ao risco de distorções

Recozimento para recristalização

- **Objetivo**

Eliminar o encruamento gerado pela deformação à frio

- **Temperatura**

→ Não deve ocorrer nenhuma transformação de fase

- **Resfriamento**

Lento (ao ar ou ao forno)

Recozimento Pleno

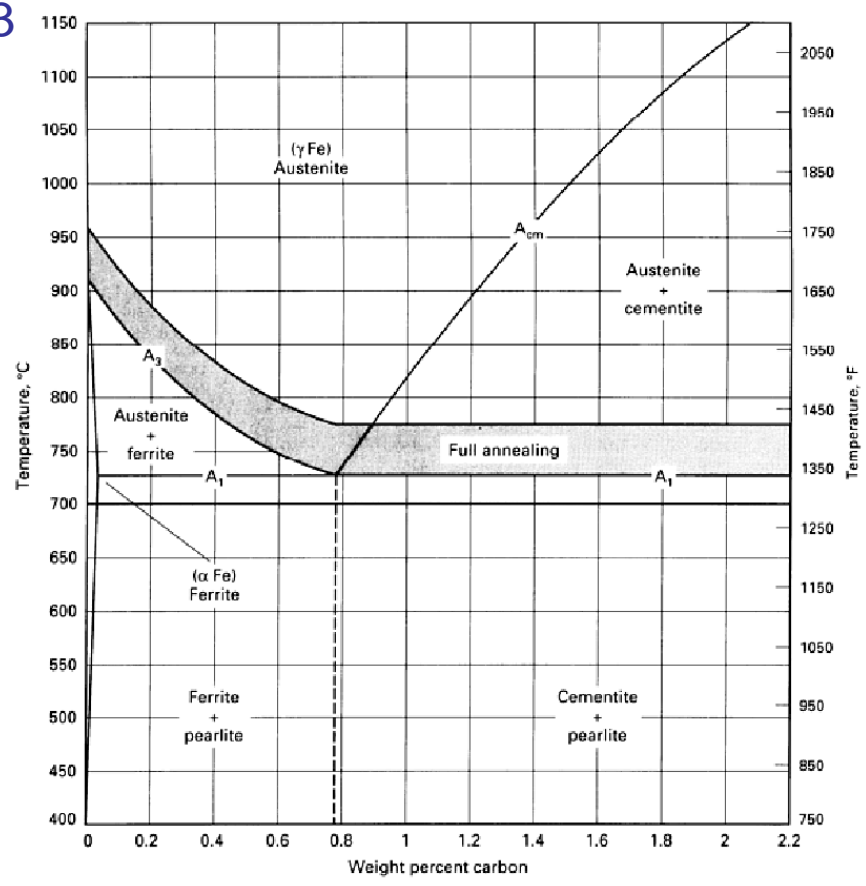
Aços hipoeutetóides - 50 °C Acima de A3

Austenitização completa

Aços hipereutetóides – Entre A1 e Acm

Resfriamento dentro do forno

(longo tempo de processo)



Recozimento Pleno

Microestrutura final

Hipoeutetóide → ferrita + perlita
grosseira

Eutetóide → perlita grosseira

Hipereutetóide → cementita + perlita
grosseira

* *A perlita grosseira é ideal para melhorar a usinabilidade dos aços baixo e médio carbono*

* *Para melhorar a usinabilidade dos aços alto carbono recomenda-se a esferoidização*

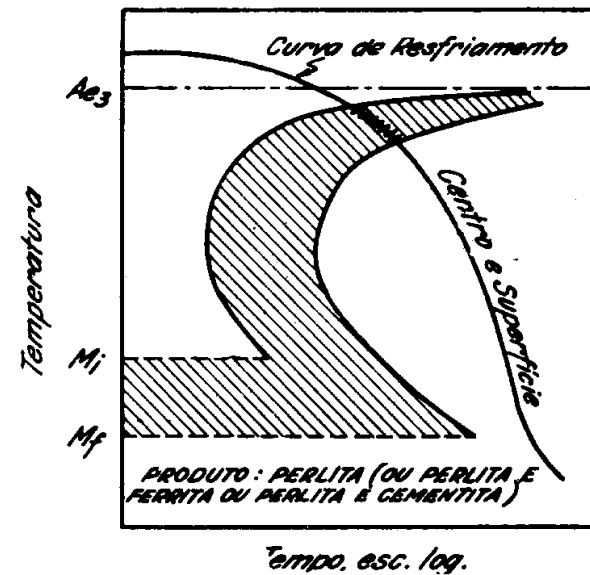
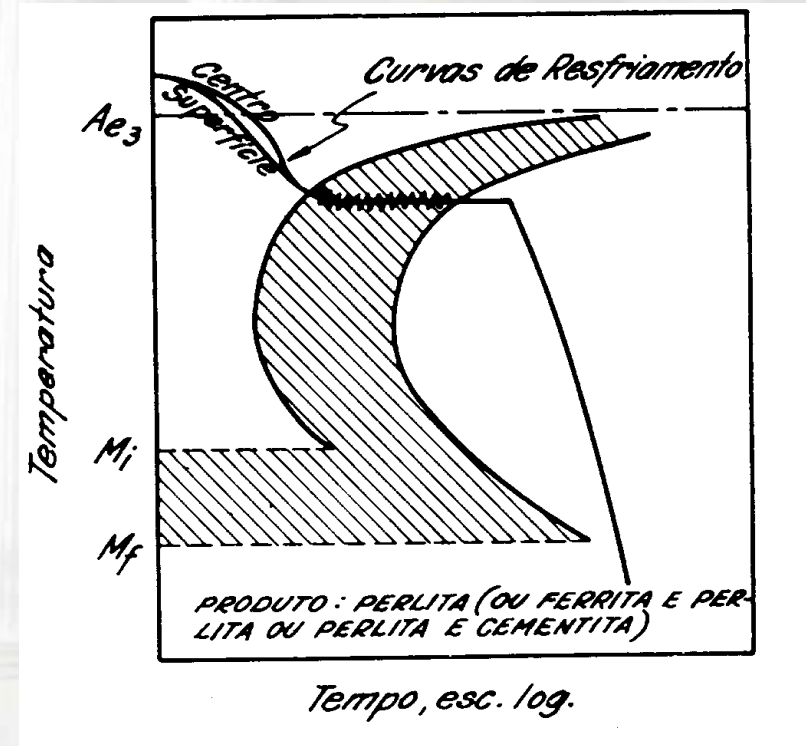


FIG. 44 — Diagrama esquemático de transformação para recozimento pleno.

Recozimento Isotérmico

- A diferença do recozimento pleno está no resfriamento que é bem mais rápido, tornando-o **mais prático e mais econômico**,
- Permite obter estrutura final + homogênea
- Não é aplicável para peças de grande volume porque é difícil de baixar a temperatura do núcleo da mesma
- Esse tratamento é geralmente executado em banho de sais



Esferoidização

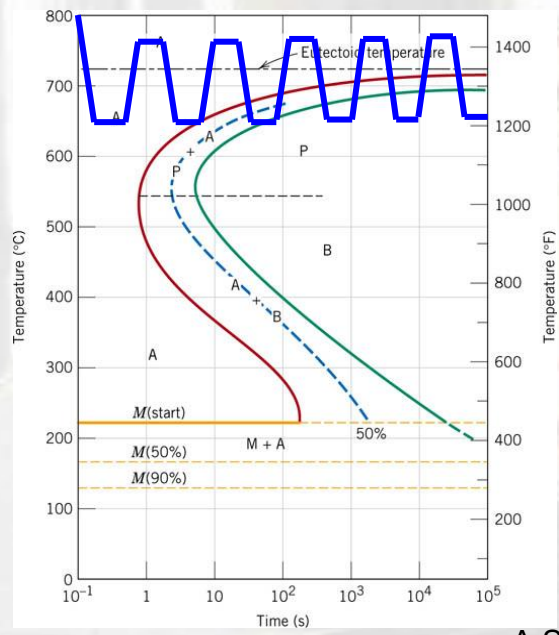
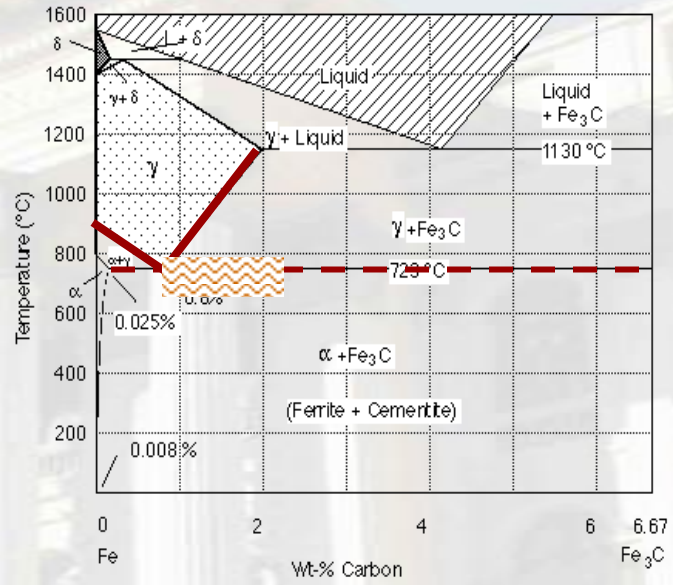
Objetivo

Produção de uma estrutura globular ou esferoidal de carbonetos no aço

- melhora a usinabilidade, especialmente dos aços alto carbono
- facilita a deformação a frio

Outras forma de esferoidizar a estrutura:

- Aquecimento por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica,
- Aquecimento e resfriamentos alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da linha inferior de transformação.

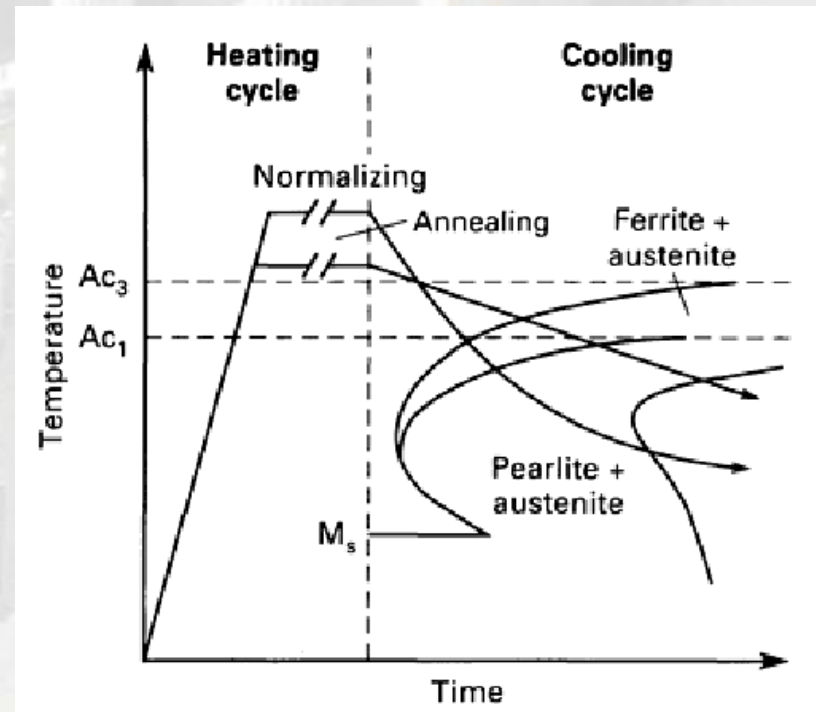
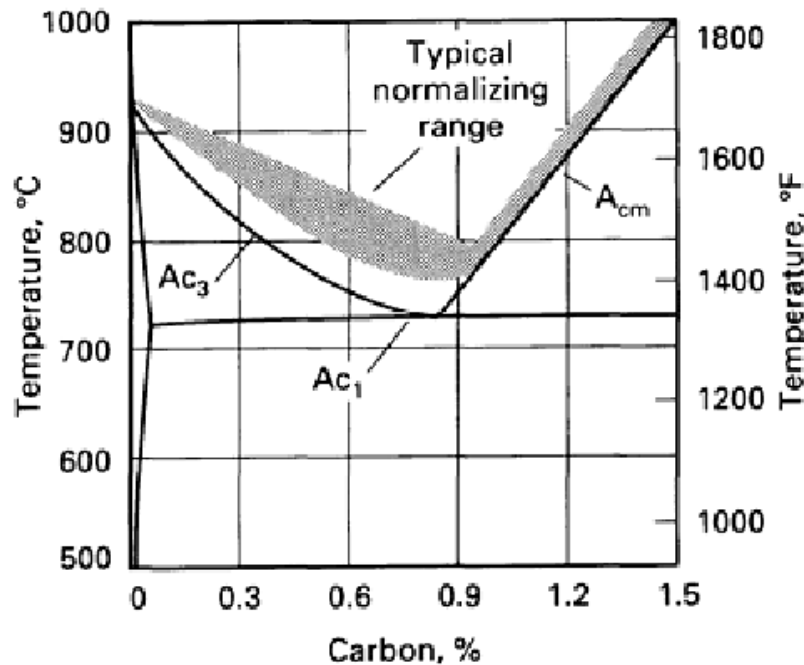


Normalização:

Objetivos:

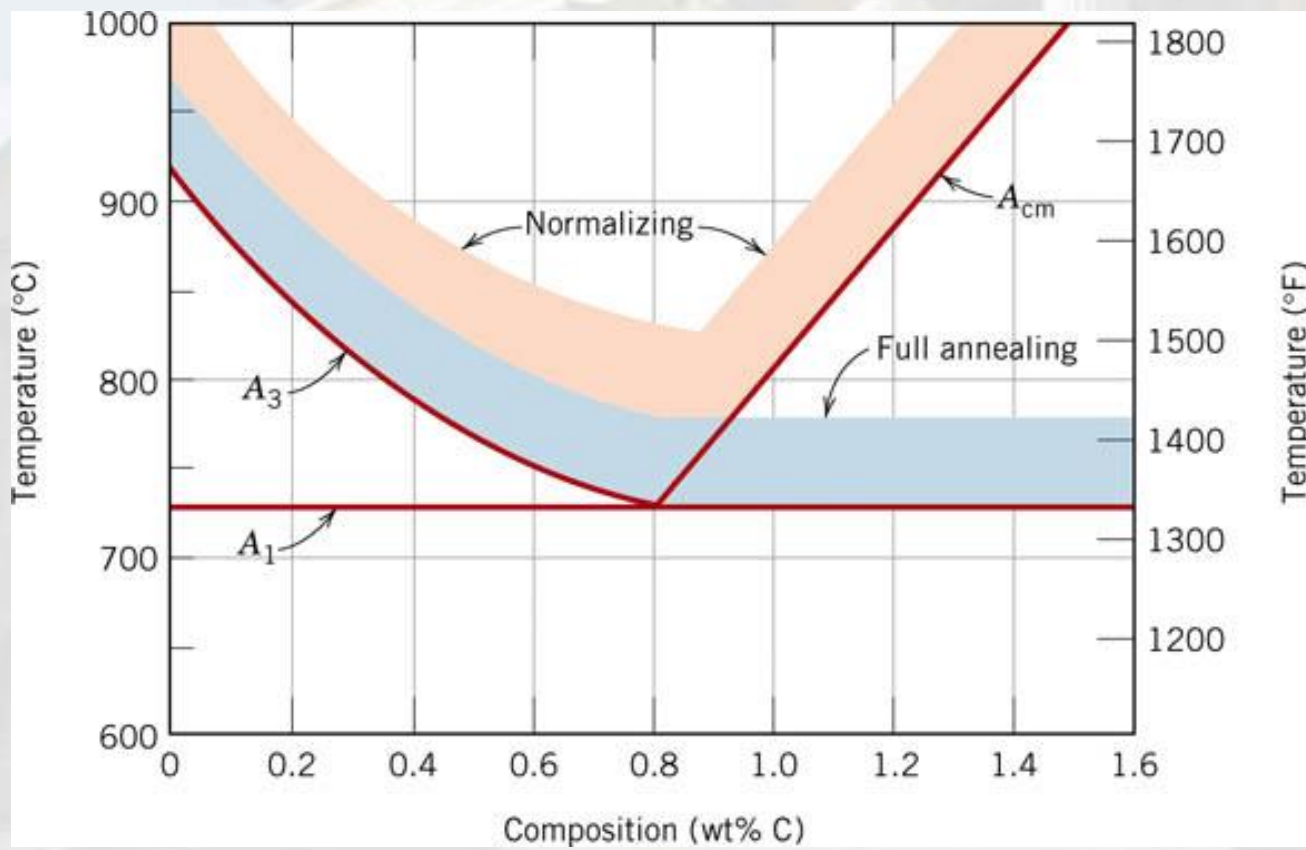
- Refinar o grão
- Melhorar a uniformidade da microestrutura

*** É usada antes da têmpera e revenido



Aquecimento em campo austenítico 50°C acima de Ac_3 (aços hipereutetoides) ou A_{cm} (aços hipereutetoides) seguido de resfriamento ao ar.

Recozimento pleno vs normalização



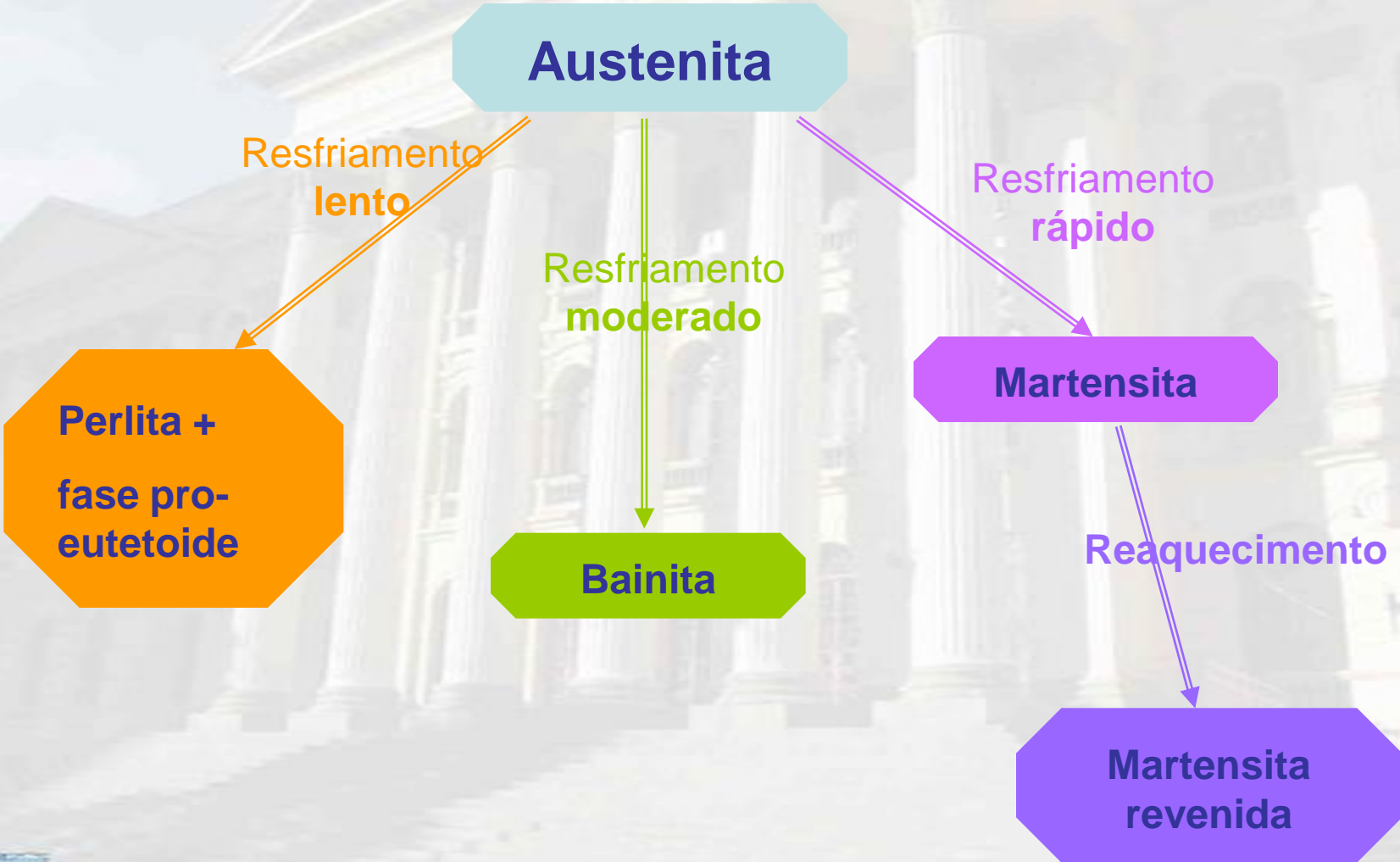
Aula 2

Especificação de procedimento para tratamento térmico

Variáveis do tratamento térmico:

- Temperatura de aquecimento
- Taxa de aquecimento
- Tempo de austenitização
- Taxa de resfriamento

Velocidade de resfriamento define as propriedades finais



Resfriamento lento

Recozimento

Objetivos:

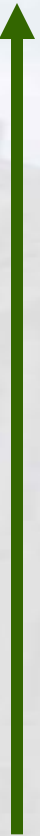
- Remoção de tensões internas devido aos tratamentos mecânicos
- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência e ductilidade
- Ajustar o tamanho de grão
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas
- Produzir uma microestrutura definida

Tipos de recozimento

- Recozimento para alívio de tensões (qualquer liga metálica)
- Recozimento para recristalização (qualquer liga metálica)
- Recozimento para homogeneização (para peças fundidas)
- Recozimento total ou pleno (aços)
- Recozimento isotérmico ou cíclico (aços)

Recozimento

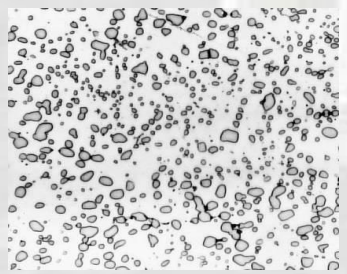
Velocidade de resfriamento



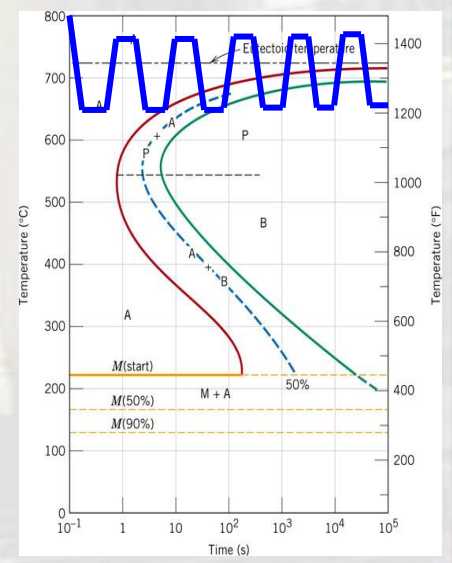
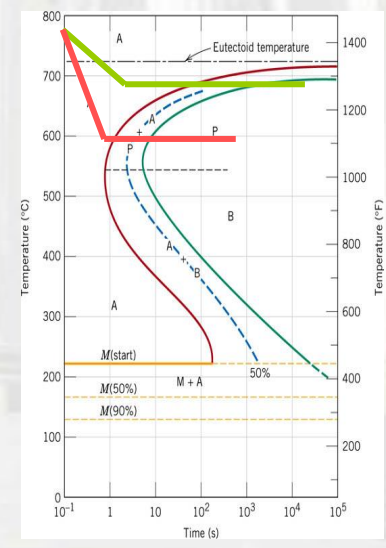
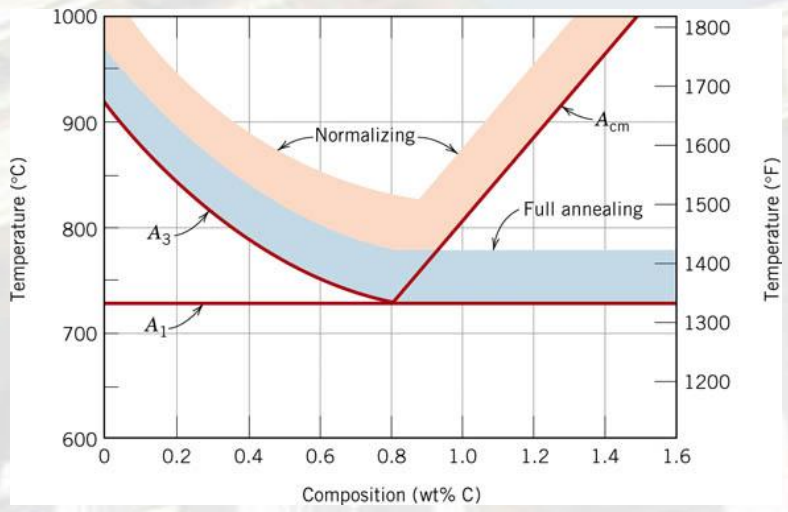
normalização –
resfriamento ao ar



recozimento pleno –
resfriamento em forno



Esferoidização – longos
tempos de austenitização
resfriamento ao ar



Tratamentos térmicos com taxas de *resfriamento rápida*

Resfriamento rápido

A seleção do meio de resfriamento é um **compromisso** entre:

- Obtenção das características finais desejadas (microestruturas e propriedades),
- Ausência de trincas e empenamento na peça,
- Minimização de concentração de tensões

Meios de resfriamento

Ambiente do forno (+ brando)

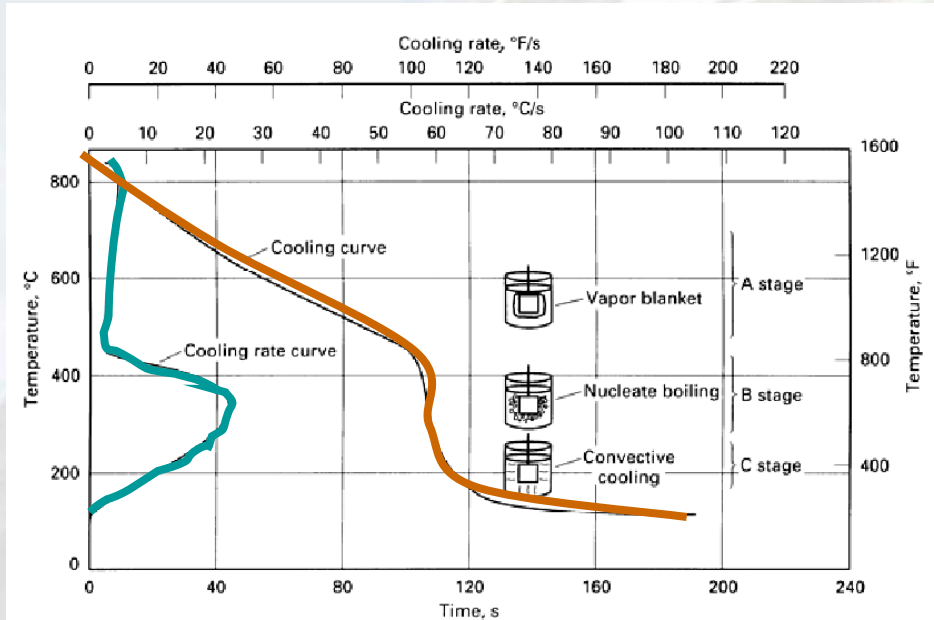
Ar

Banho de sais ou metal fundido (+ comum é o de Pb)

Óleo

Água

Soluções aquosas de NaOH, Na₂CO₃ ou NaCl (+ severos)

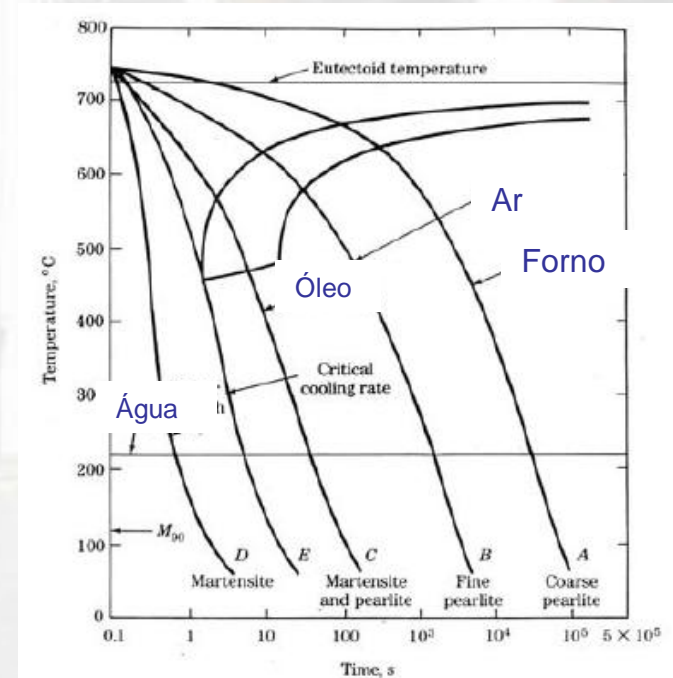


Tx de resfriamento e curva de resfriamento

Meio
ar
óleo
água

Severidade de tempera
baixa
moderado
alta

Dureza
baixa
moderada
alta



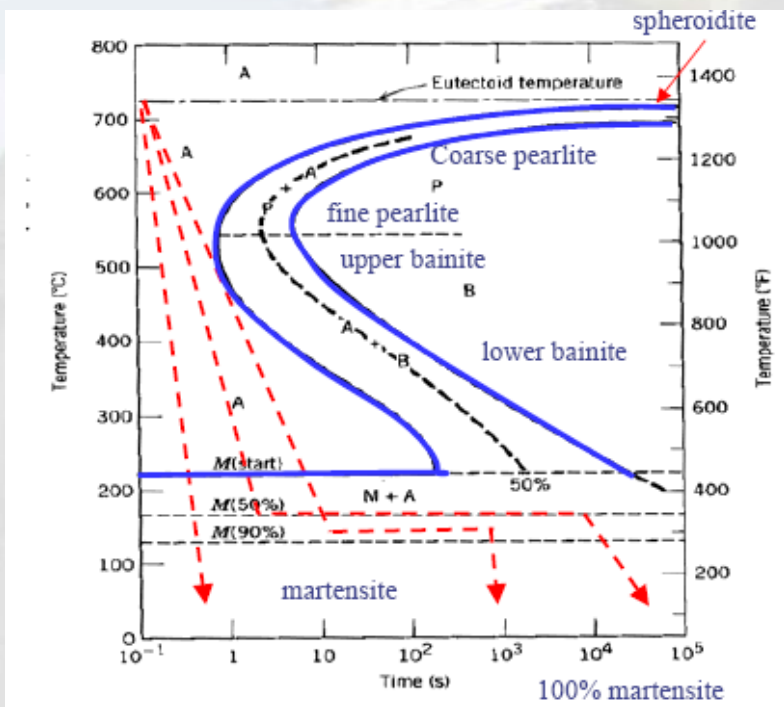
Tempera

Objetivos:

- Obter estrutura martensítica para se obter
 - Aumento na dureza
 - Aumento na resistência à tração
 - Redução na tenacidade

Tempera

Após austenitização aço é resfriado rapidamente com velocidade maior ou igual a velocidade crítica de resfriamento



O meio de resfriamento depende muito da composição do aço (% de carbono e elementos de liga) e da espessura da peça

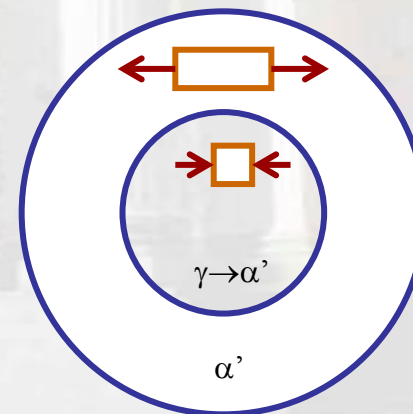
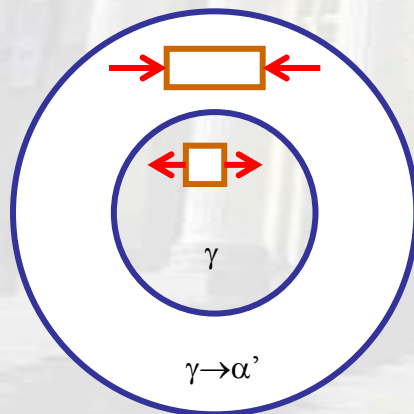
*A **têmpera** gera tensões
deve-se fazer revenido posteriormente*

Tensões residuais

(transformação martensítica provoca expansão volumétrica de até 4%)

Superfície expande devido à transformação martensítica;

para “manter” a continuidade o núcleo é tracionado para acompanhar a superfície externa



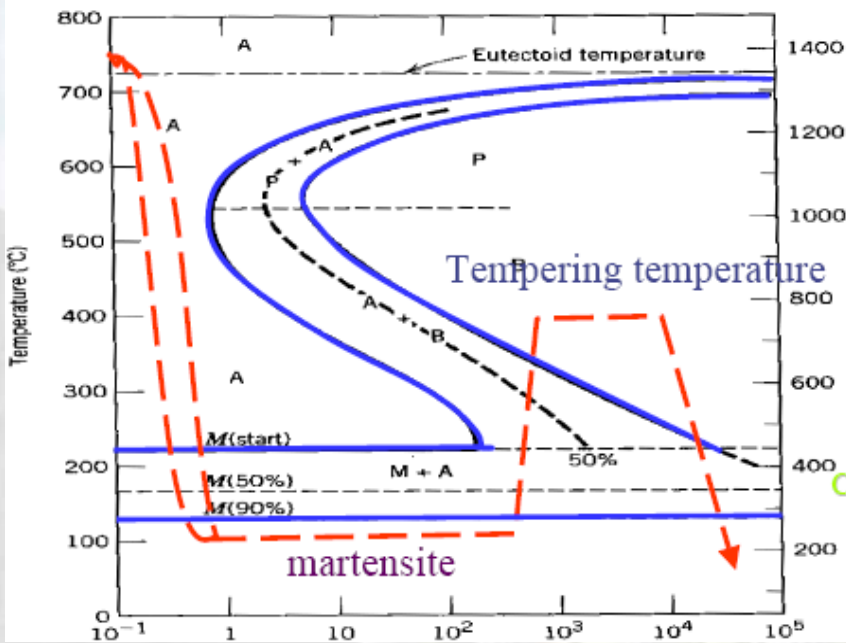
Revenido

Sempre acompanha a têmpera

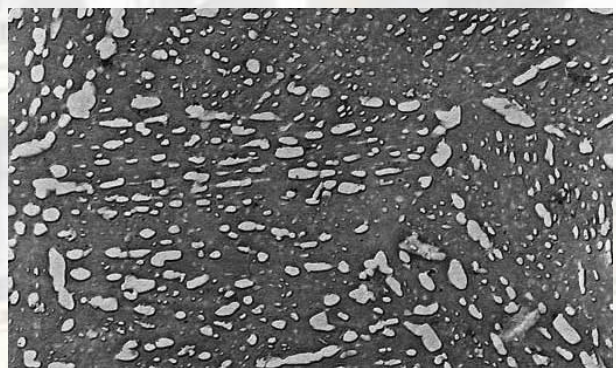
Objetivos:

- Alivia ou remove tensões
- Corrige a dureza e a fragilidade,
- aumenta a dureza e a tenacidade

Revenido

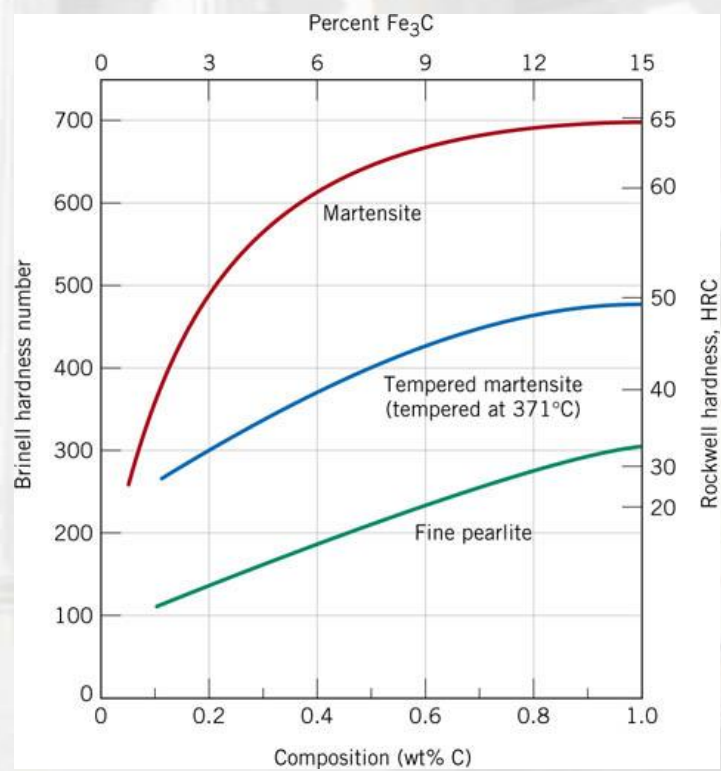
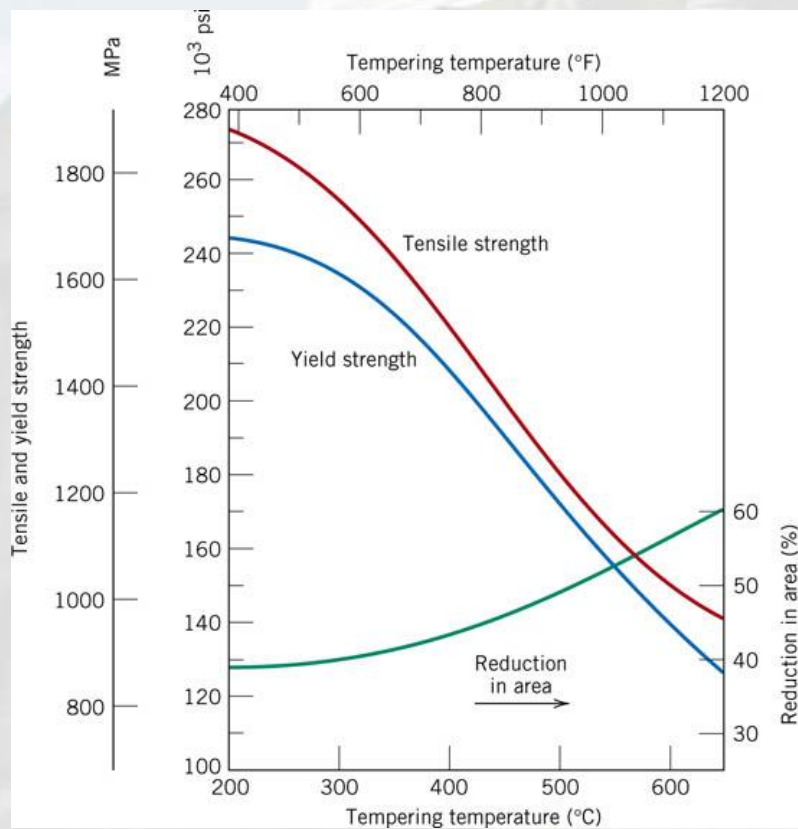


Martensita revenida e carbonetos



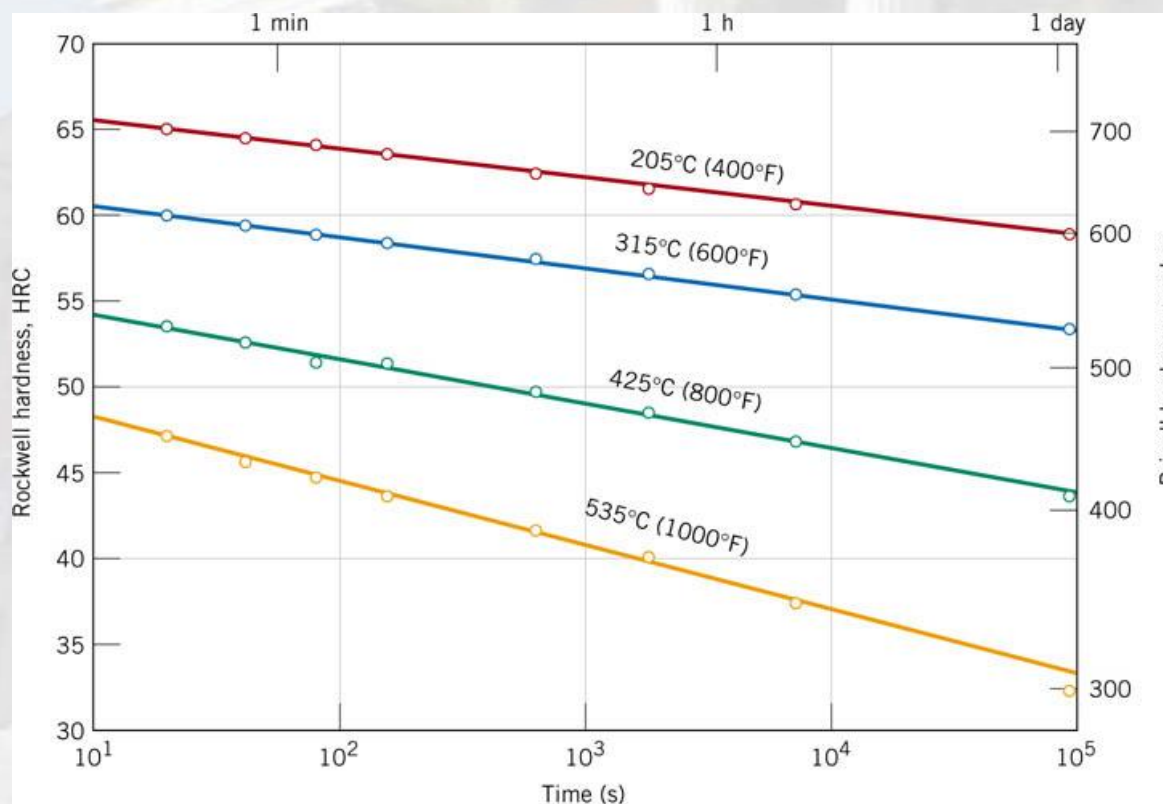
Temperatura do revenido

Deve ser escolhida de para atender as propriedades específicas em projeto



Temperatura do revenido

Queda de dureza com aumento da temperatura de revenido de um aço carbono



Estágios do revenido

100- 200°C → os carbonetos ϵ ($\text{Fe}_{2.4}\text{C}$) começam a precipitar

Dureza: 65 RC → 60-63 HRC

200-350°C → Austenita retida se transforma em ferrita e cementita

200-350°C → carboneto Fe_3C precipita

Dureza: 62 RC → 50 HRC

350-500°C → Segregação de impurezas e elementos de liga (fragilização do revenido)

400- 500°C → os carbonetos (de Fe) crescem em glóbulos

Dureza: 20-45 HRC

500-700°C → Formação de carbonetos com elementos de liga (W, V, Nb, Cr); Fe_3C pode dissolver) – endurecimento secundário

Tratamento sub-zero

Aços não apresentam 100% martensita

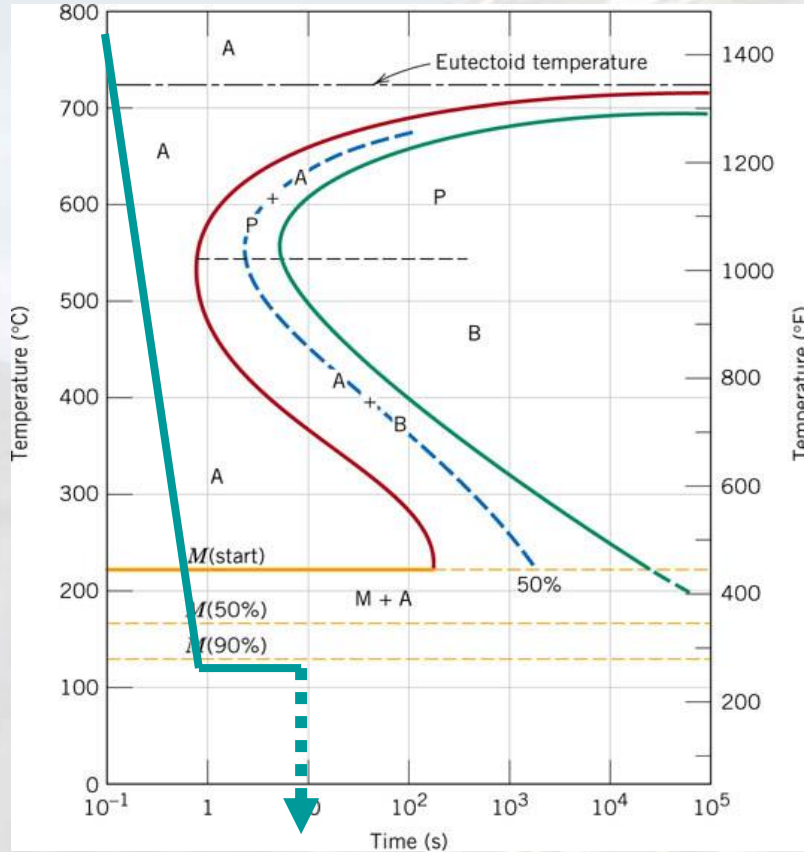
Quanto maior o teor de carbono, maior o volume de austenita retida



Austenita retida se transforma sob esforços mecânicos

**Tratamento
sub-zero**

Tratamento sub-zero



Componente temperado e revenido é jogado em nitrogênio líquido (-196°C)

ΔT necessário para reiniciar e “terminar” a formação da martensita

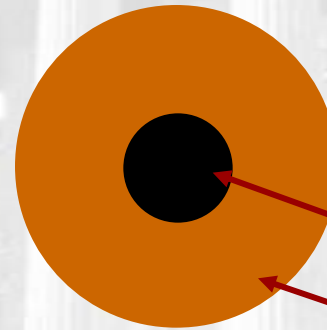
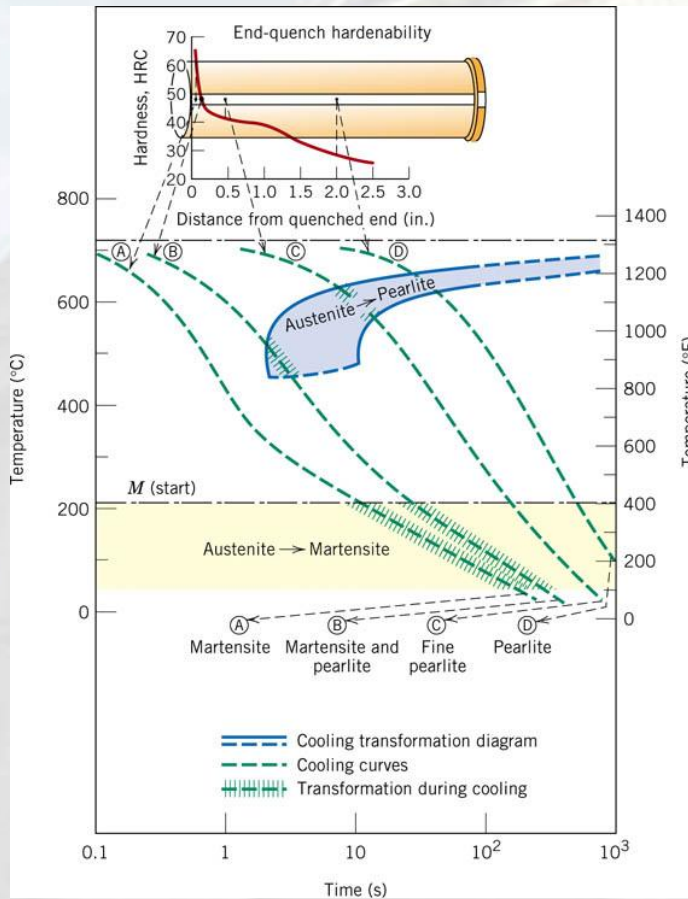
Fragilidade do revenido

- Ocorre em determinados tipos de aços quando aquecidos na faixa de temperatura entre 375-475 °C ou quando resfriados lentamente nesta faixa.
- A fragilidade ocorre mais rapidamente na faixa de 470-475 °C
- A fragilidade só é revelada no ensaio de impacto, não há alteração na microestrutura.

Outros tratamentos térmicos

Martêmpera

Evitando trincas e distorções



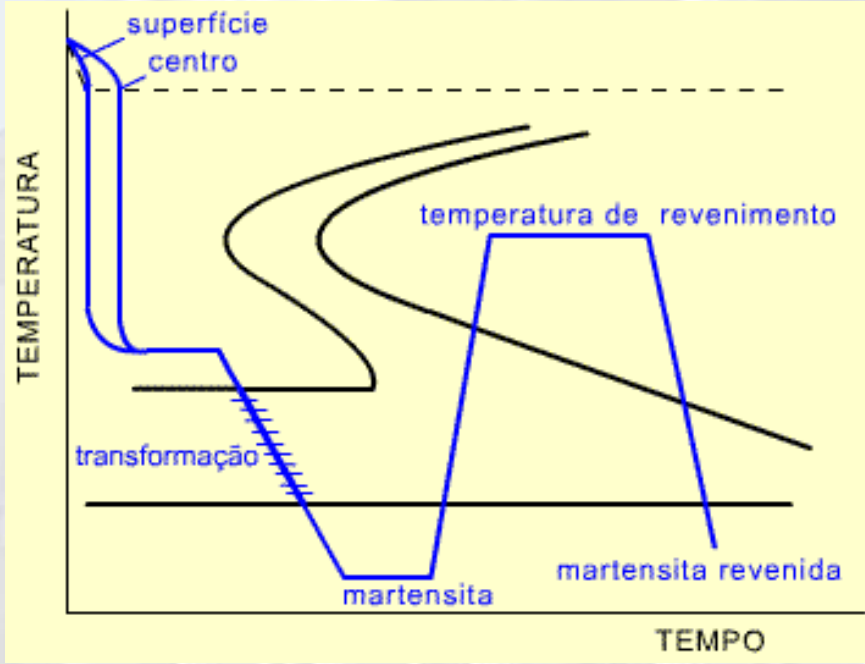
Posição centro superfície

Tx de resfriamento baixa alta

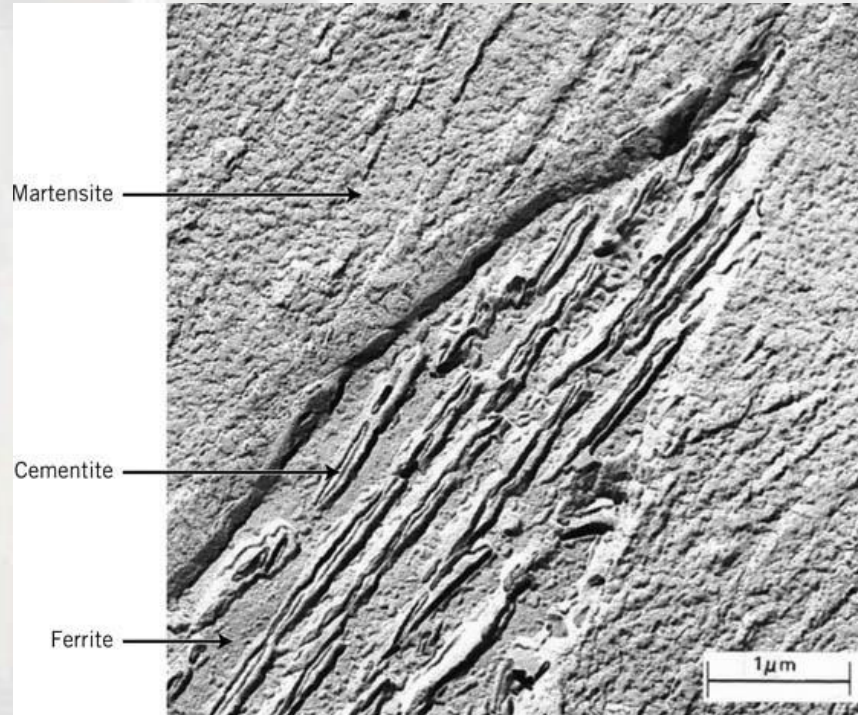
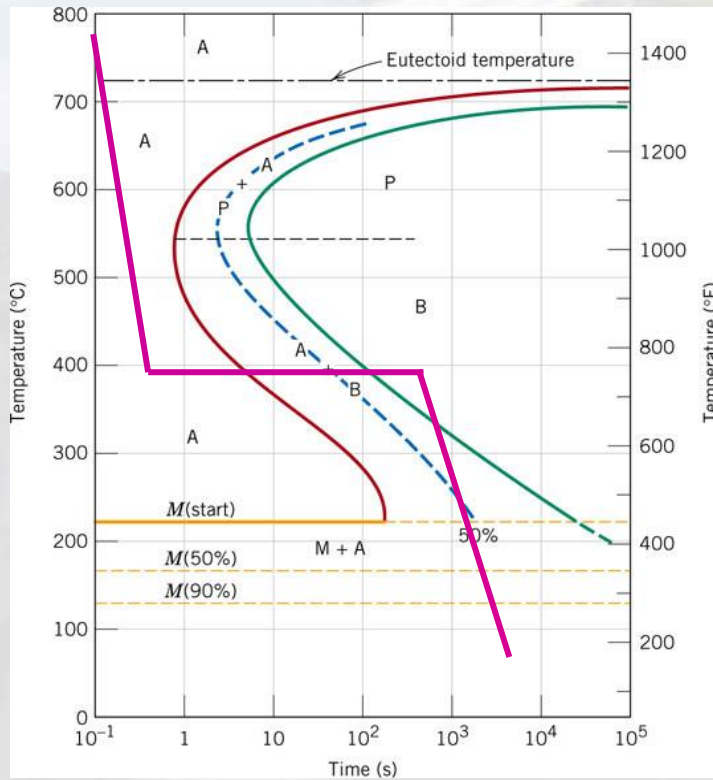
Dureza baixa alta

Martêmpera

alternativa para evitar distorções e trincas

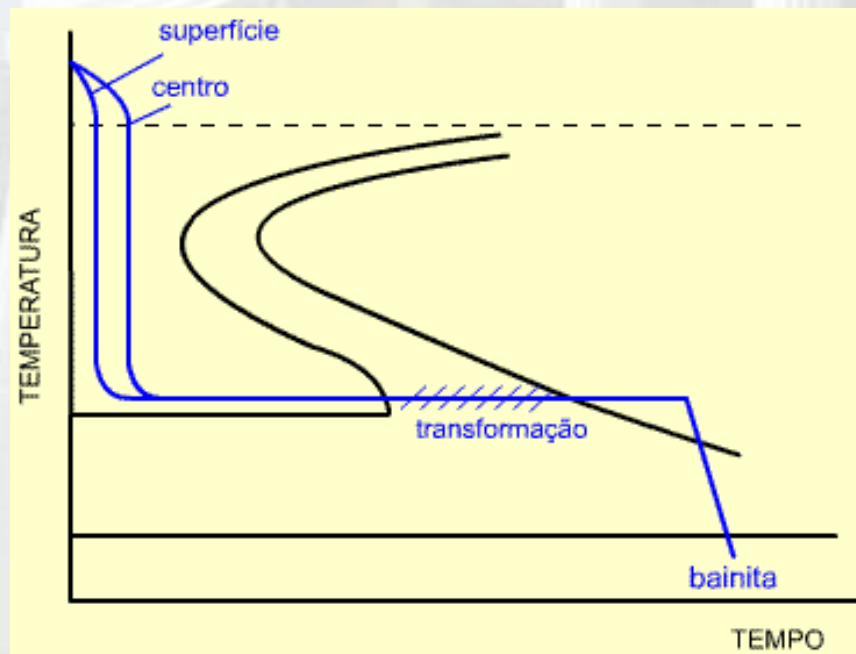


Austempera alternativa para evitar distorções e trincas



Austempera

alternativa para evitar distorções e trincas



Aula 3

Tratamentos térmicos superficiais

Objetivo:

aumento da resistência ao desgaste;

induzir tensões residuais compressivas na superfície

Tempera Superficial

Cementação

Nitretação

Boretação

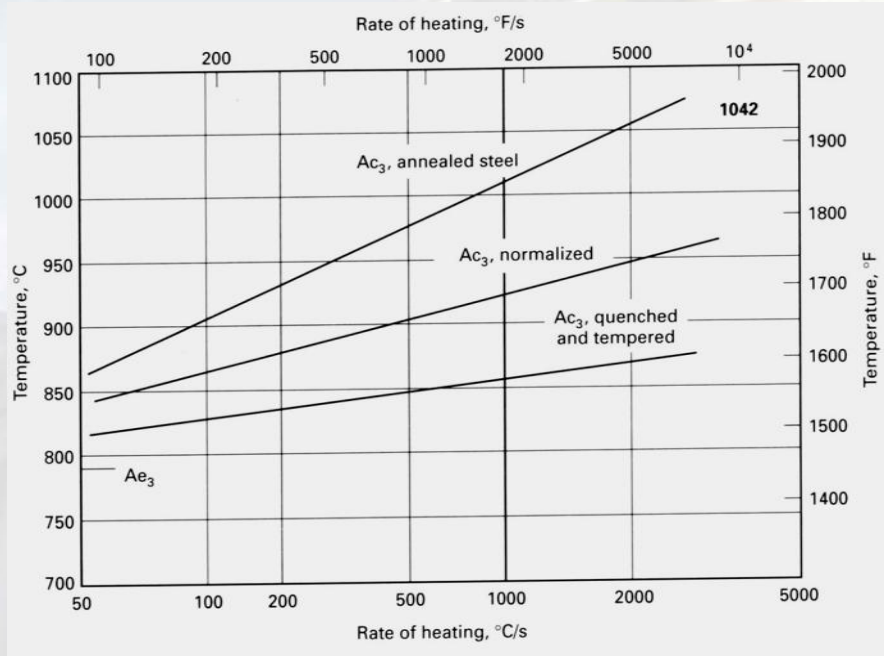
Tempera superficial

Endurecimento da superfície de um componente pela formação de martensita

Procedimento:

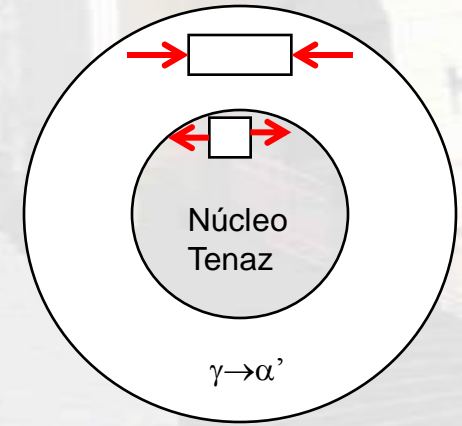
Austenitização de uma camada de aço na superfície do componente seguida de resfriamento rápido para formação de martensita (necessita de revenido)

Tempera superficial



Condição inicial do material e taxa de aquecimento

Desenvolvimento de tensões residuais compressivas



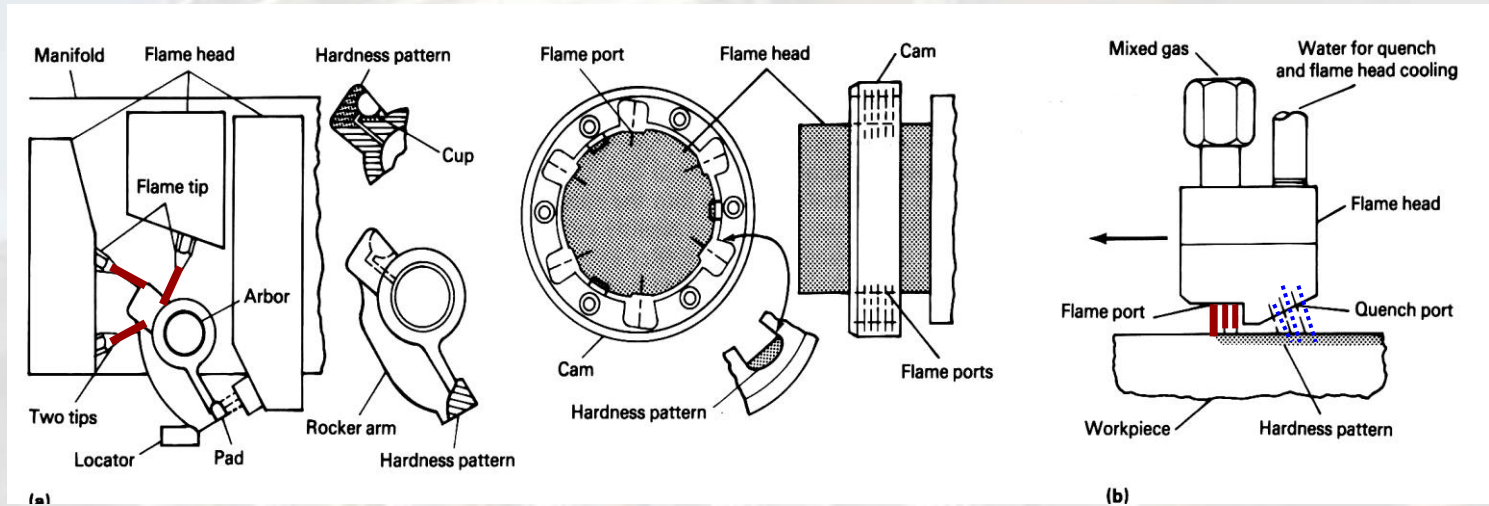
Tempera superficial:

Os diferentes processos de tempera superficial diferem entre si em função da **fonte de energia** usada para austenitizar a superfície e os **meios de resfriamento**

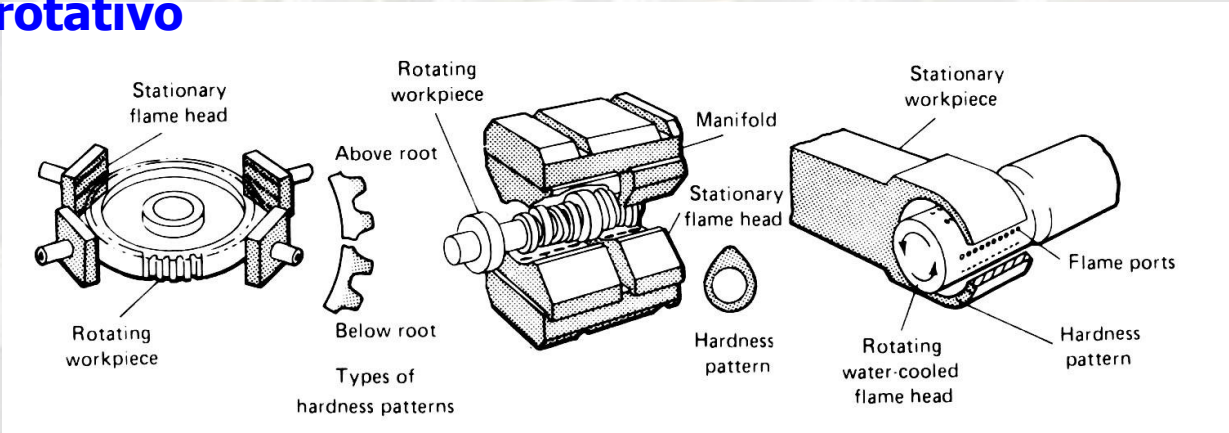
- Chama
- Indução
- Laser

Tempera a chama superficial

Processos estacionário e progressivo



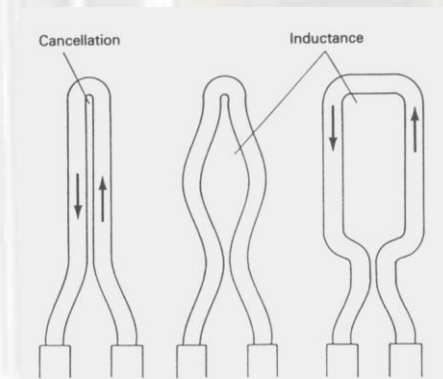
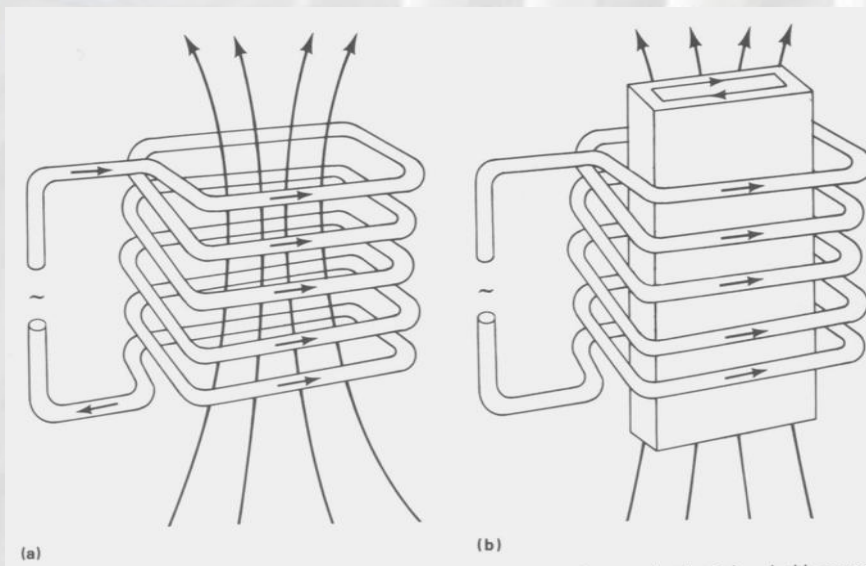
Processo rotativo



Tempera por indução

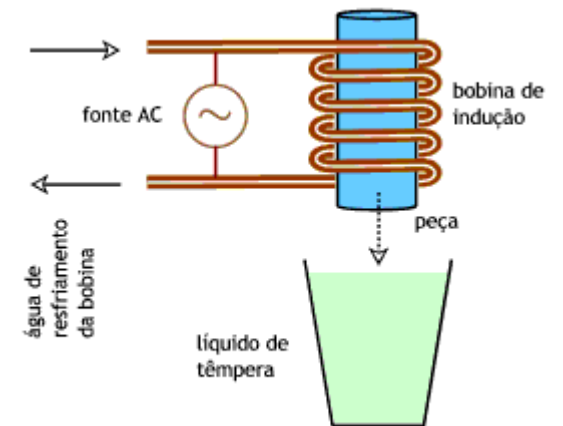
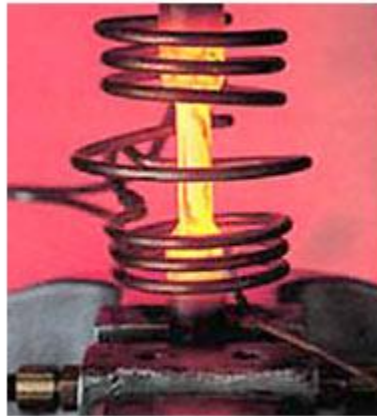
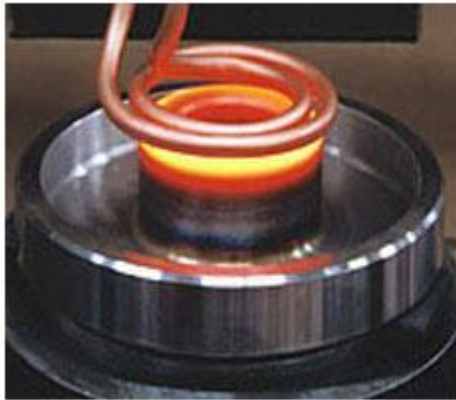
O aço é aquecido por um **campo magnético** gerado por uma corrente alternada de alta frequência que passa através de um indutor (bobina de cobre resfriada a água).

Campo gerado depende da resistência da corrente e do n. voltas da bobina



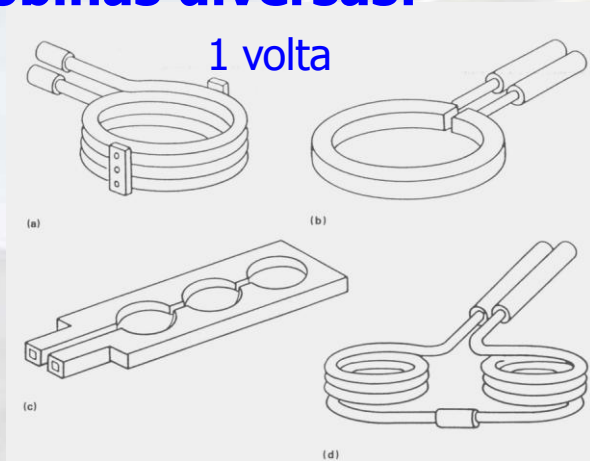
Colocar próximo da peça a tratar, maior n. de linhas de fluxo, melhor o aquecimento

Tempera por indução

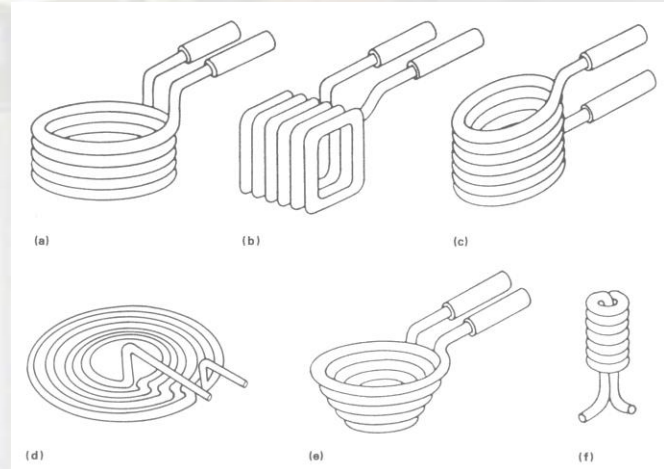


Tempera por indução

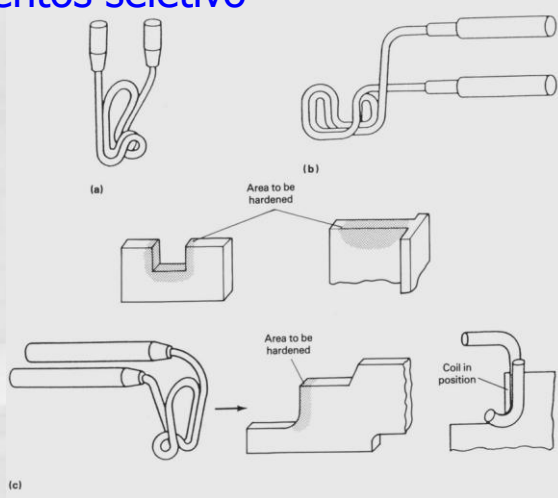
Bobinas diversas:



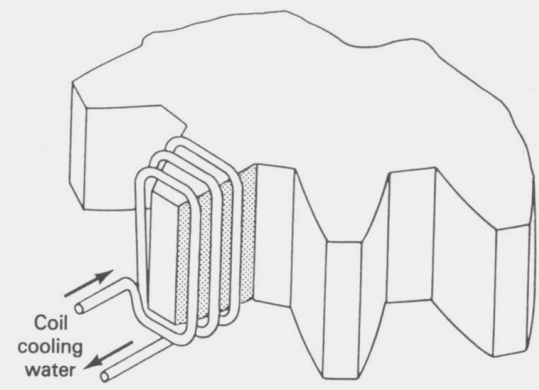
Várias voltas



Tratamentos seletivo

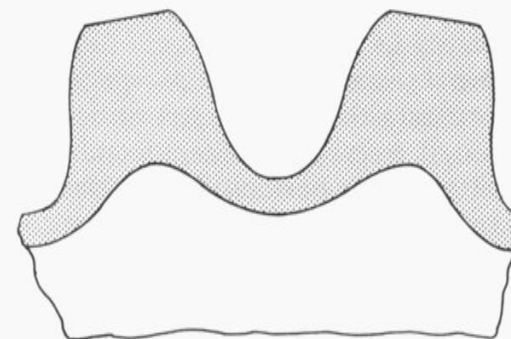
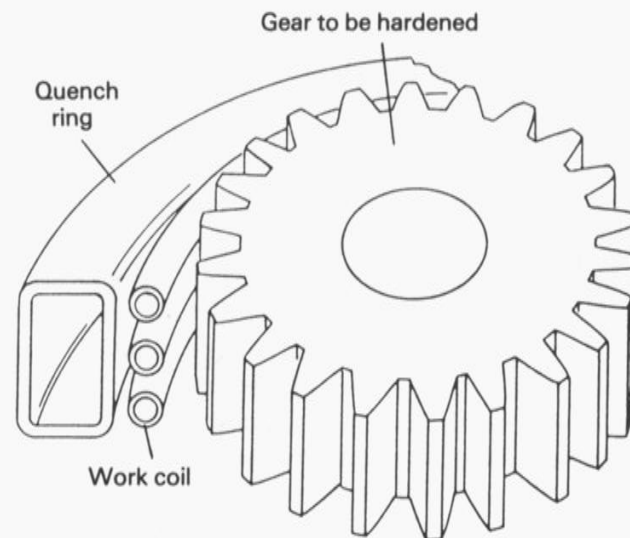


Tempera dente a dente



Tempera por indução

Tempera por indução de uma roda dentada



Zona tratada

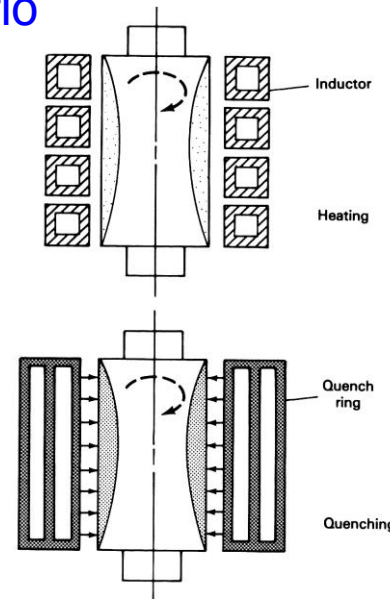
Tempera por indução

Sistema de tempera por indução

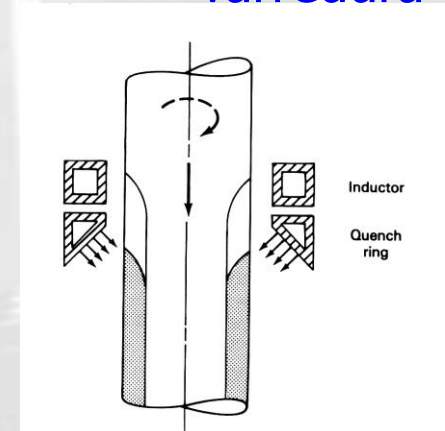
É preciso ter em consideração:

- ✓ geometria e tamanho do componente
- ✓ tipo de austenitização (da superfície ou total)
- ✓ tipo de aquecimento (estacionário ou de varredura)
- ✓ temperabilidade e meio de tempera (imersão ou tempera spray com água ou óleo)

estacionário



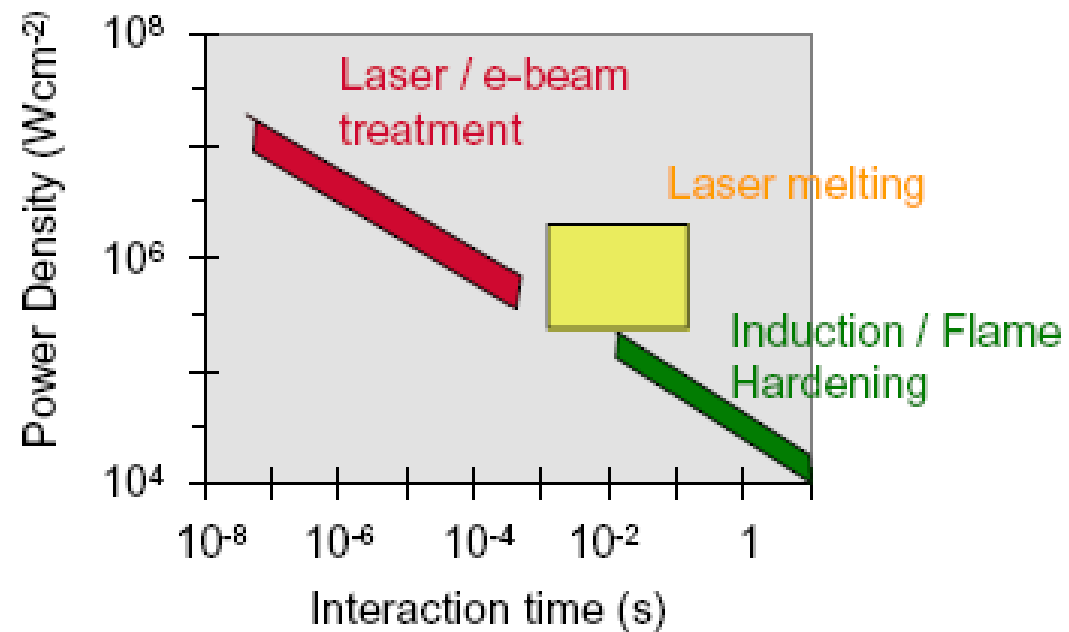
varredura



Tempera por laser

Fonte de luz com a qual se pode aplicar quantidade de energia pré-determinadas em regiões específicas de um componente.

Feixe de laser incide numa superfície, parte da sua energia é absorvida como calor na superfície



Tempera por laser

- ⌘ aquecimento e resfriamento rápidos
- ⌘ pequenas ZTA
- ⌘ pequenas distorções do componente
- ⌘ não afeta as propriedades no interior do componente.

Taxa de aquecimento: $\sim 10^6 \text{ K s}^{-1}$

Taxa de resfriamento: 10^4 K s^{-1}



Auto-tempera
por condução
térmica no
substrato



Transformação
martensítica em aço de
muito baixo C, sem
distorção e trincas
superficiais

Tratamentos termoquímicos:

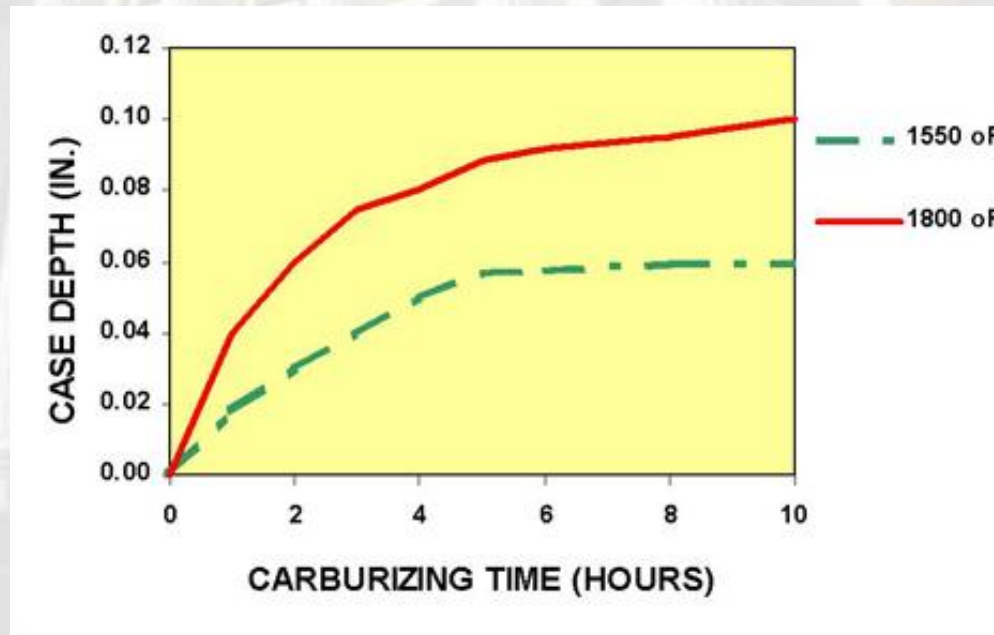
- Cementação
- Nitretação

Cementação

Enriquecimento da superfície do aço em carbono para posterior formação de martensita por tratamento térmico

Aços de baixo teor de carbono, “sem” elementos de liga

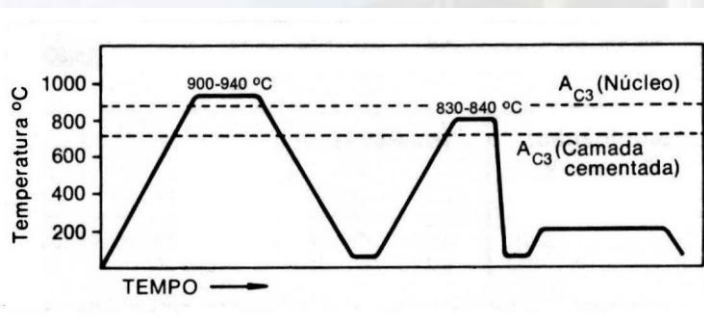
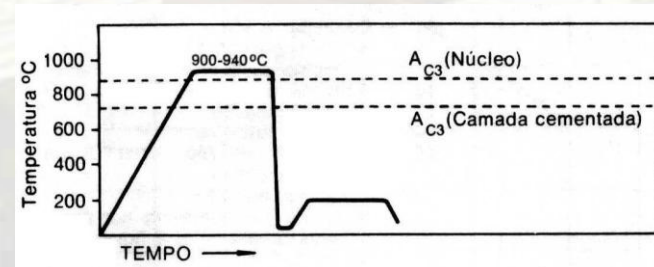
Aquecimento em campo austenítico (900-1000°C) - difusão do C na fase γ



Têmpera direta

Simplicidade. Não requer aquecimentos subsequentes nem proteção contra descarbonetação.

Tendência a apresentar austenita retida no caso dos aços ligados. O núcleo fica totalmente endurecido



Têmpera simples da camada cementada com resfriamento lento após a cementação

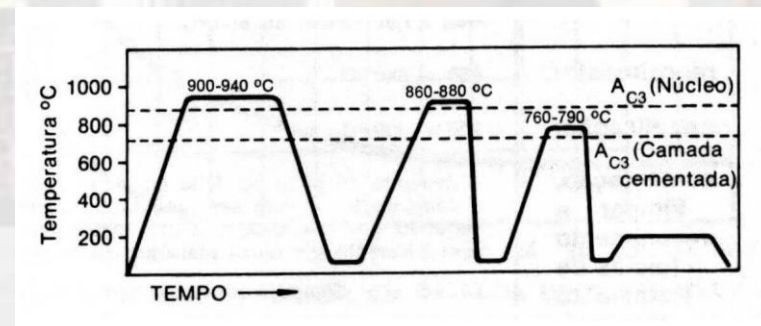
Além de conferir a camada cementada a dureza desejada, permite a obtenção de núcleos com diferentes teores de resistência e tenacidade, segundo a temperatura de têmpera adotada. Temperaturas de têmpera mais elevadas produzirão núcleos mais resistentes e menos tenazes.

Requer um aquecimento adicional até a temperatura de têmpera em meio que proteja a peça contra descarbonetação. Favorece a ocorrência de deformações, acentuando-se essa tendência para temperaturas mais elevadas.

Têmpera dupla, com resfriamento lento após a cementação

Reduz a ocorrência de austenita retida. É o ciclo que possibilita o maior refino de grãos do núcleo de da camada cementada.

Requer dois aquecimentos adicionais até as temperaturas de têmpera em meio que proteja a peça contra descarbonetação. Favorece a ocorrência de deformações pelas sucessivas seqüências de aquecimento e resfriamento.

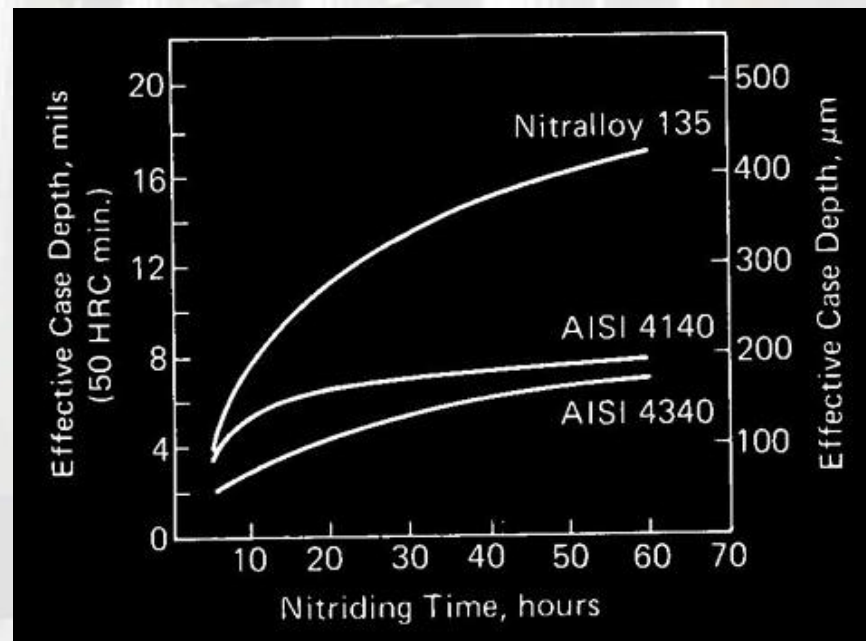


- *Cementação a gás:* método mais usado; componentes a serem tratados são carregados cestos e colocados em fornos contínuos ou intermitentes. A atmosfera rica em carbono resulta de um gás endotérmico enriquecido com metano ou propano. A tempera posterior é feita em óleo; muitos componentes cementados são submetidos a martempera que ocorre a temperaturas mais elevadas.
- *Cementação em caixa:* componentes são colocados em uma mistura a base de carvão com ativadores em uma caixa fechada que posteriormente é aquecida.
- *Cementação em vácuo e por plasma:* ambos os processos usam uma câmara de vácuo com gás de hidrocarbonetos como fonte de C. A principal vantagem deste processo é a ausência de oxigênio da atmosfera do forno e uniformidade da camada tratada.
- *Cementação em banhos de sais:* sais de cianetos, cianatos ou misturas de carbono e carbonatos. Adequados para produzir finas camadas cementadas pois o tempo de tratamento pode ser rigorosamente controlado.

Nitreção

Adição de N na superfície de componentes para aumento da dureza pela formação de nitretos

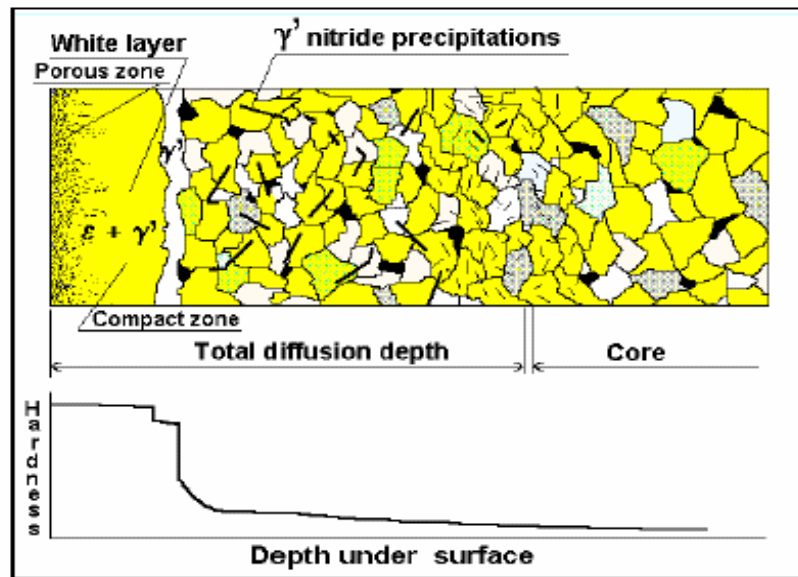
Aquecimento em campo ferrítico (500-600°C) – facilidade de difusão do N



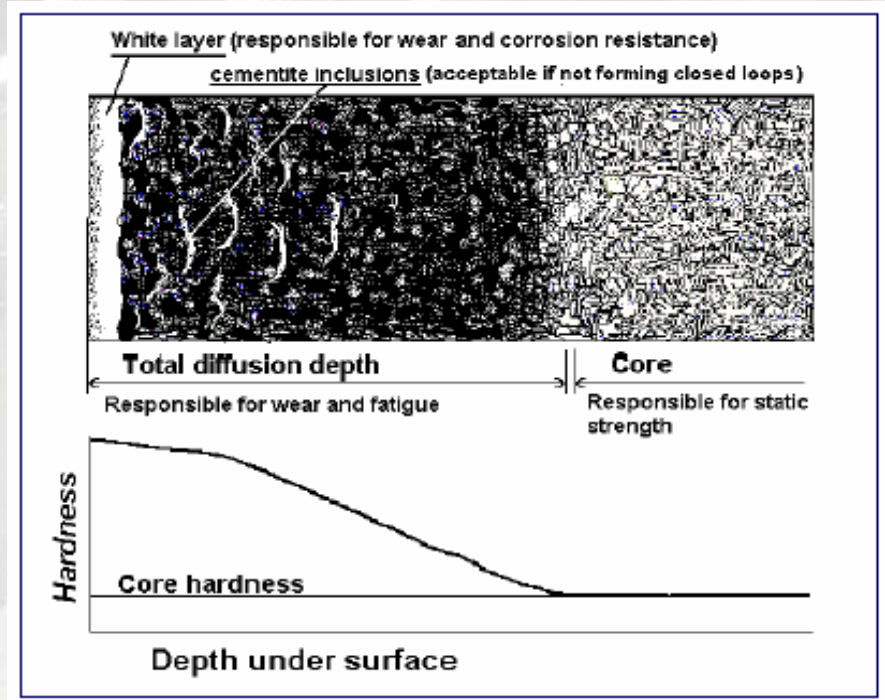
Nitreção

Efeito da composição química do aço

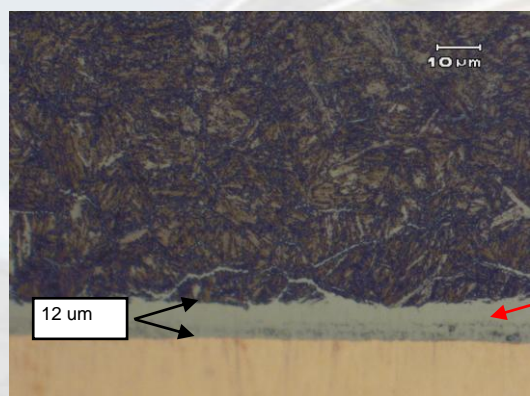
Aço carbono



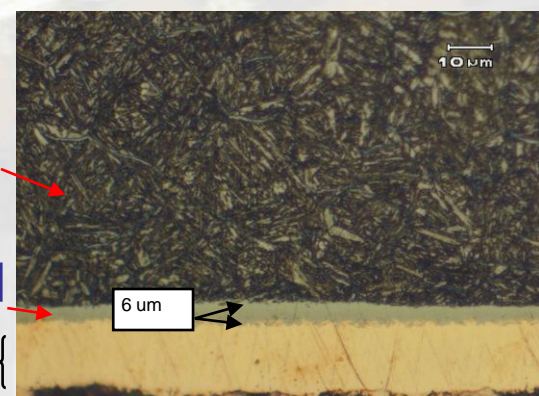
Aço ligado



Nitretação gasosa



Nitretação a Plasma



Camada de difusão (0,2 mm)
 Camada branca
 Metal de sacrifício

