



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3203

**- Tratamento térmico e
termoquímico dos materiais-**

2020.1



Tópicos

- ▶ Tratamentos térmicos
- ▶ Tratamentos termoquímicos
- ▶ Outros tratamentos superficiais



Tratamentos térmicos

Porque usar tratamentos térmicos ou termoquímicos?

- As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço, de um metal e em especial das ligas dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do histórico de processamento mecânico e termomecânico e dos **tratamentos térmicos** realizados



Tratamentos térmicos

- os tratamentos térmicos podem ser descritos por são ciclos de aquecimento e resfriamento controlados no material puro ou liga, que causam modificações na microestrutura dos mesmos





Tratamentos térmicos

Definição

São um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos determinados materiais, em especial aços, sob condições controladas de tempo, temperatura, atmosfera e velocidade de resfriamento, com os objetivos de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. propriedades.



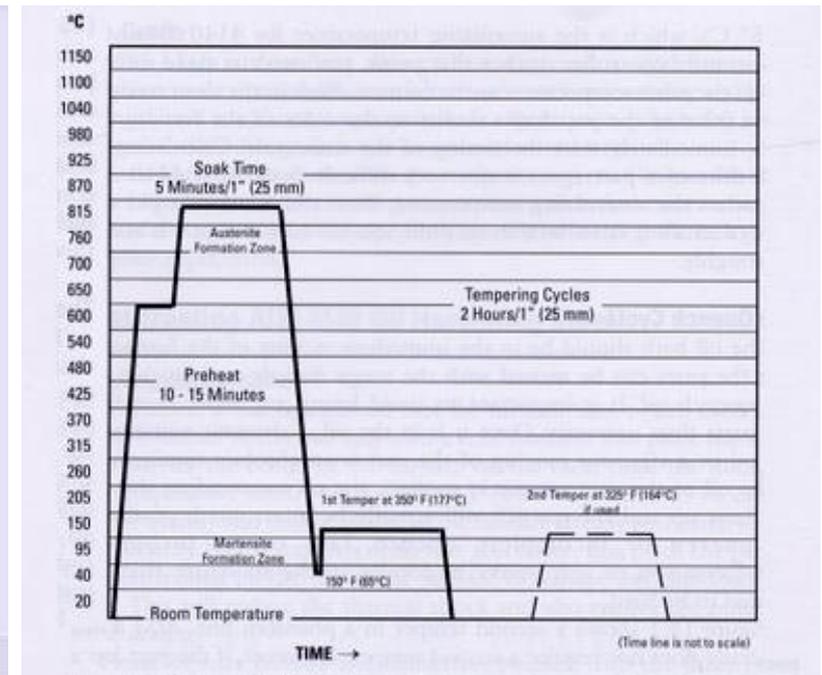
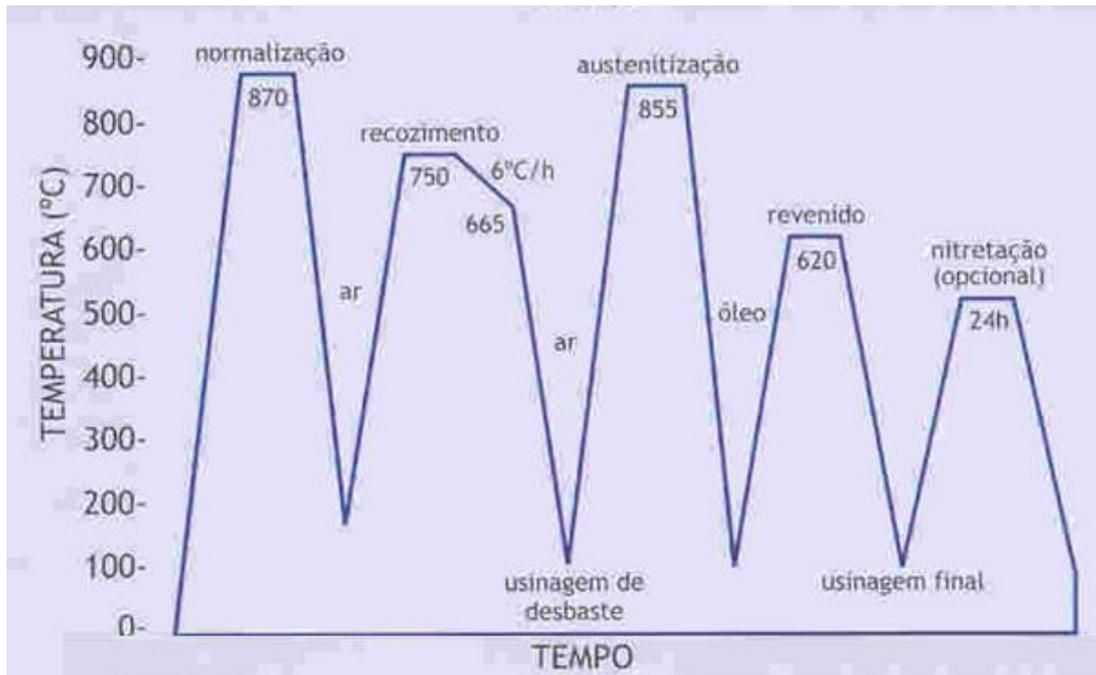
Tratamentos térmicos em aços

As propriedades dos aços dependem de sua estrutura (e grau de encruamento – deformação a frio).

Os tratamentos térmicos modificam em maior ou menor grau as estruturas dos aços alterando suas propriedades.



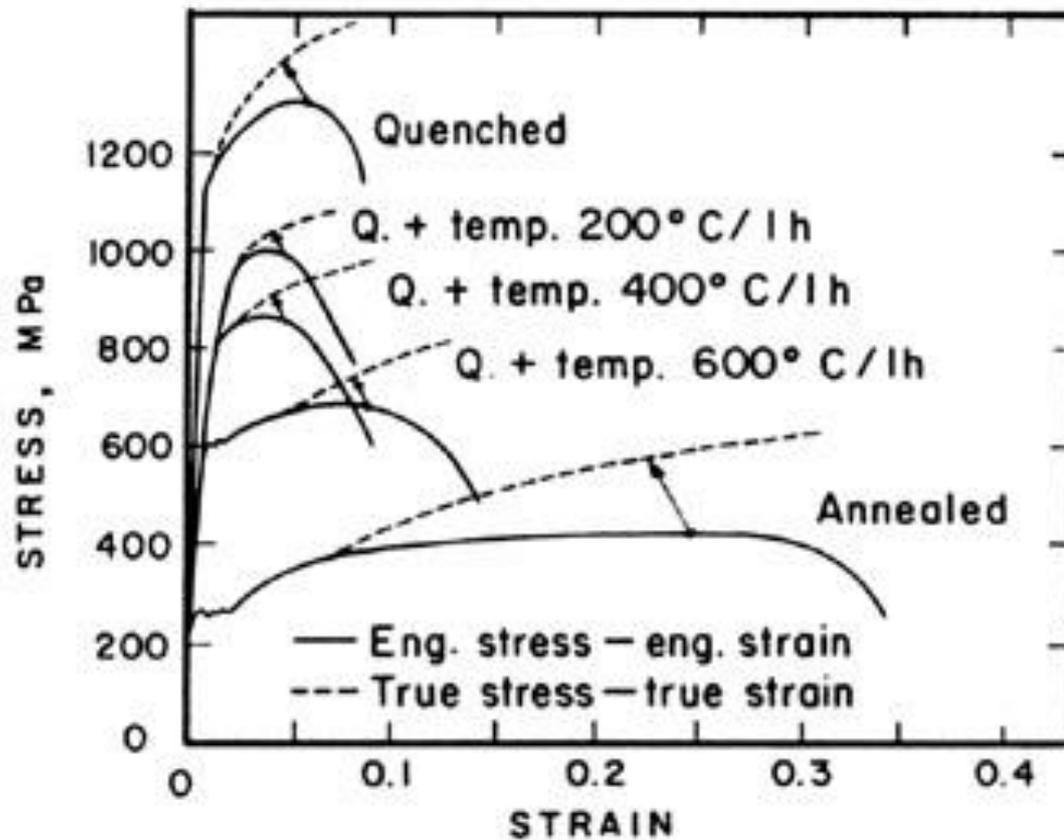
Tratamentos térmicos em aços



Representação esquemática de ciclos de tratamentos térmicos para o aço ABNT ANSI 4140.



Tratamentos térmicos em aços



Aço 1040 submetido a diferentes tratamentos térmicos. Tratamentos térmicos: Quenched (têmpera), tempered (revenimento), annealed (recozimento).



Tratamentos Térmicos de Aços

Para cada liga de aço diferente existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e o resfriamento. Endurecibilidade é um termo usado para descrever a habilidade de uma liga de ser endurecida pela formação de martensita como resultado de um tratamento térmico.



Tratamentos térmicos em aços

Aços ao carbono de baixo e médio carbono: Preferencialmente utilizados nas condições típicas de como vem da siderúrgica ou seja com a estrutura de um aço trabalhado a quente e resfriado ao ar.(estruturas previstas no diagrama de equilíbrio ferrita, perlita e cementita)

Aços de alto carbono e contendo elementos de liga (aços liga): São em geral submetidos a tratamentos térmicos antes de serem colocados em serviço.



Principais objetivos

- Remoção de tensões internas: (que vem de deformação plástica, soldagem usinagem etc...)
- Aumento e diminuição da dureza
- Aumento ou redução da resistência mecânica
- Melhora da ductilidade
- Melhora da usinabilidade
- Melhora da resistência ao desgaste
- Melhora da resistência a corrosão



Fatores de influencia

Composição química:

- Temperatura final de aquecimento
- Tempo de permanência na temperatura final de aquecimento (1 polegada por hora ou 1,5 minuto por mm). Deve ser o suficiente para encharcar a peça,
- Forma e dimensões da peça (quanto mais intrincado o formato da peça maior possibilidade de empenamentos ou fissuras)
- Meio de resfriamento: (de uma maneira geral quanto mais rápido o resfriamento maior a resistência e dureza e menor a deformabilidade e usinabilidade.



Tipos de Tratamentos térmicos

- Recozimento;
- Têmpera;
- Revenimento;
- Recuperação/ recristalização



Tipos de tratamentos térmicos

Recozimento - Objetivos

- Reduzir as propriedades mecânicas tais como resistência e dureza
- Aumentar a ductilidade e melhorar a usinabilidade



Recozimento

O recozimento é um tratamento térmico no qual um material é aquecido até uma temperatura elevada por um período prolongado e em seguida resfriado lentamente.

Objetivos do recozimento:

- 1- Aliviar tensões;
- 2- Tornar o material mais mole, dúctil e tenaz;
- 3- Produzir uma microestrutura específica.



Recozimento

Etapas:

- Aquecimento até a temperatura desejada;
- Manutenção por tempo preestabelecido nesta temperatura;
- Resfriamento controlado até a temperatura ambiente.



Recozimento

Generalidades:

Durante o aquecimento e o resfriamento , existem gradientes de temperatura entre as partes de fora e de dentro da peça; as suas magnitudes dependem do tamanho e da geometria da peça.



Recozimento

Generalidades:

O tempo real de recozimento deve ser longo o suficiente para permitir quaisquer reações de transformação necessárias.

A temperatura também é um importante fator a ser considerado

O recozimento pode ser acelerado pelo aumento da temperatura, uma vez que normalmente estão envolvidos processos de difusão



Recozimento

Recozimento intermediário:

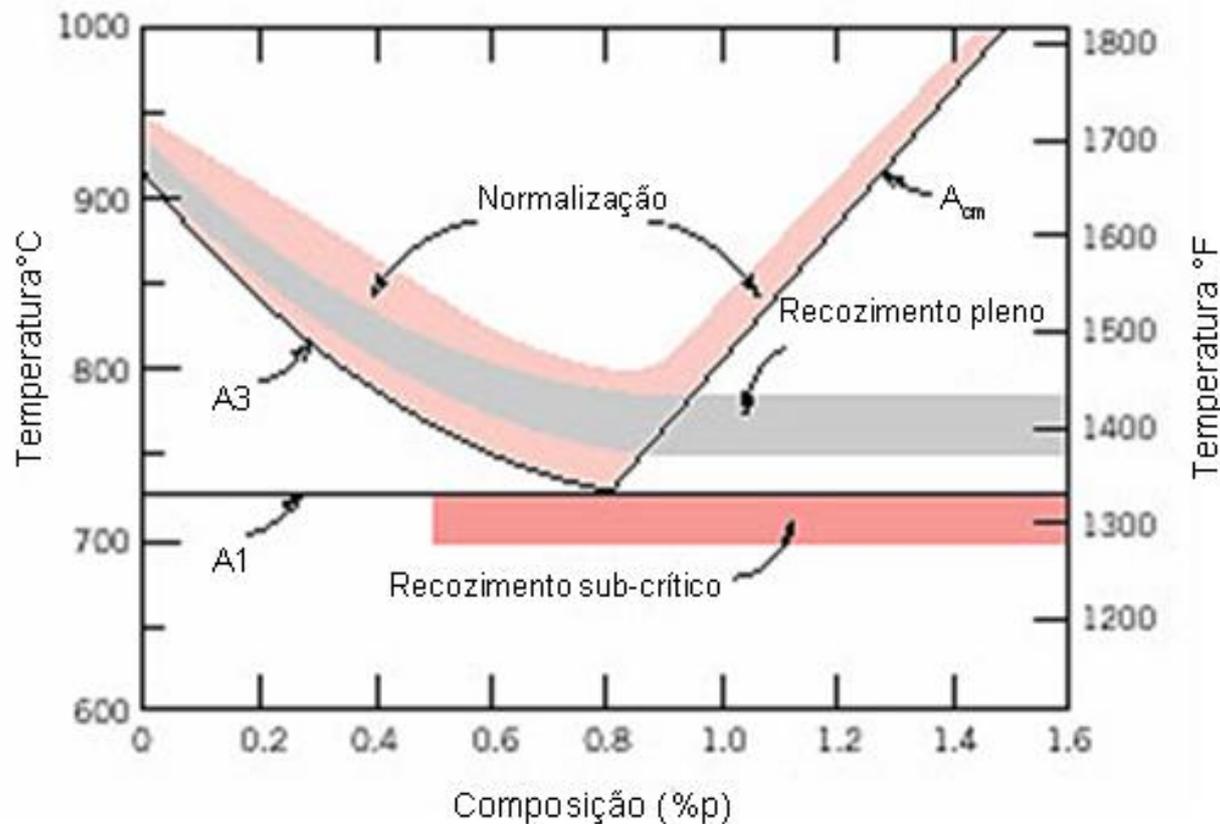
- O recozimento intermediário é um tratamento utilizado para anular os efeitos da deformação plástica a frio.
- Torna o material mais mole e aumenta a ductilidade de um metal que tenha sido submetido a um processo de encruamento com alto grau de deformação



Alívio de tensões

Distorções e empenamento podem ocorrer em um material se não forem removidas as tensões residuais causadas pelos seguintes processos:

- Deformação plástica como usinagem e lixamento;
- Resfriamento não uniforme de uma peça que foi processada ou fabricada a uma temperatura elevada com solda ou fundição;
- Transformação de fases que seja induzida mediante um resfriamento onde as fases de origem e de produto possuem densidades diferentes.
- Para aliviar essas tensões utiliza-se o tratamento de recozimento.



Onde:

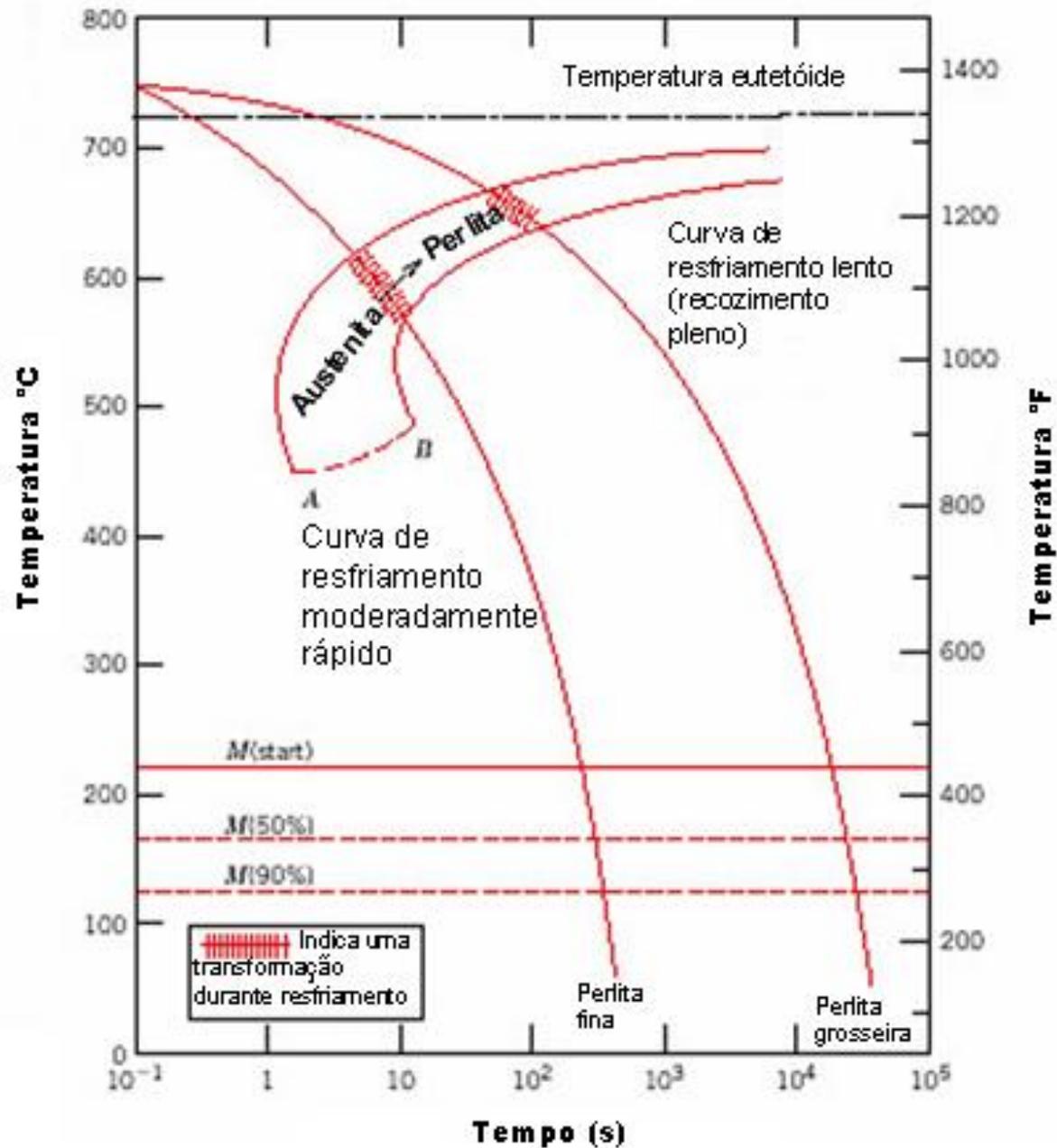
A1 = Temperatura crítica interior (abaixo dela toda a austenita se transformou em ferrita e cementita).

A3 e A_{CM} representam as linhas que compõem a temperatura crítica superior para os aços hipoeutetóides e hipereutetóides, respectivamente.



Recozimento Pleno

Tratamento onde a liga é austenizada pelo aquecimento até a temperatura de 15 a 40 °C, acima das linhas A1 ou A3 até ser atingida uma condição de equilíbrio e depois ela é resfriada no forno. O produto desse tratamento é uma microestrutura de perlita grosseira , relativamente mole e dúctil, com grãos pequenos e estrutura granular uniforme. Tratamento usado em aços de baixo e médio teores de C que irão experimentar uma extensa deformação plástica.





Recozimento Subcrítico

O tratamento de recozimento subcrítico consiste em aquecer a liga até uma temperatura imediatamente abaixo da temperatura eutetóide (A1), ou até aproximadamente 700°C na região $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ do diagrama de fases. Se a microestrutura original contiver perlita, os tempos de recozimento subcrítico irão ficar em geral , na faixa de 15 e 25h. Nesse processo existe uma coalescência do Fe_3C para formar as partículas globulizadas. Os produtos são moles, possuem máximo de ductilidade e são facilmente usinados ou deformados.



Normalização - Objetivo:

Refinar, uniformizar e diminuir o tamanho de grão.

Aquecimento: Região da austenita entre 800 e 950 C.

Resfriamento: Ao ar calmo (resfriamento lento)

Estrutura que se forma: ferrita perlita para aços com menos de 0.8% de "C", só perlita para aços com 0.8% e perlita e cementita (Fe_3C) para aços com mais de 0,8% de "C".



Normalização

Tratamento térmico de recozimento usado para refinar os grãos (diminuir o tamanho médio dos grãos) e produzir uma distribuição de tamanhos mais uniforme e desejável. Aços perlíticos com grãos mais finos são mais tenazes que aços com grãos mais grosseiros.

A normalização é obtida por aquecimento a uma temperatura aproximadamente de 55 a 85°C, acima da temperatura crítica superior. Após de passado o tempo de austenização, resfria-se o material ao ar.



Endurecibilidade

A endurecibilidade é uma medida qualitativa da taxa segundo a qual a dureza cai em função da distância ao se penetrar no interior de uma amostra como resultado do menor teor de martensita. Uma liga de aço que possui endurecibilidade elevada é uma liga que endurece, ou forma martensita, não apenas na sua superfície, mas em elevado grau também ao longo de todo o seu interior.



Têmpera - Objetivo: Obtenção da estrutura chamada martensita que possui alta dureza e resistência, mas alta fragilidade

A tempera é aplicável apenas para aços com mais de 0,3% de carbono)

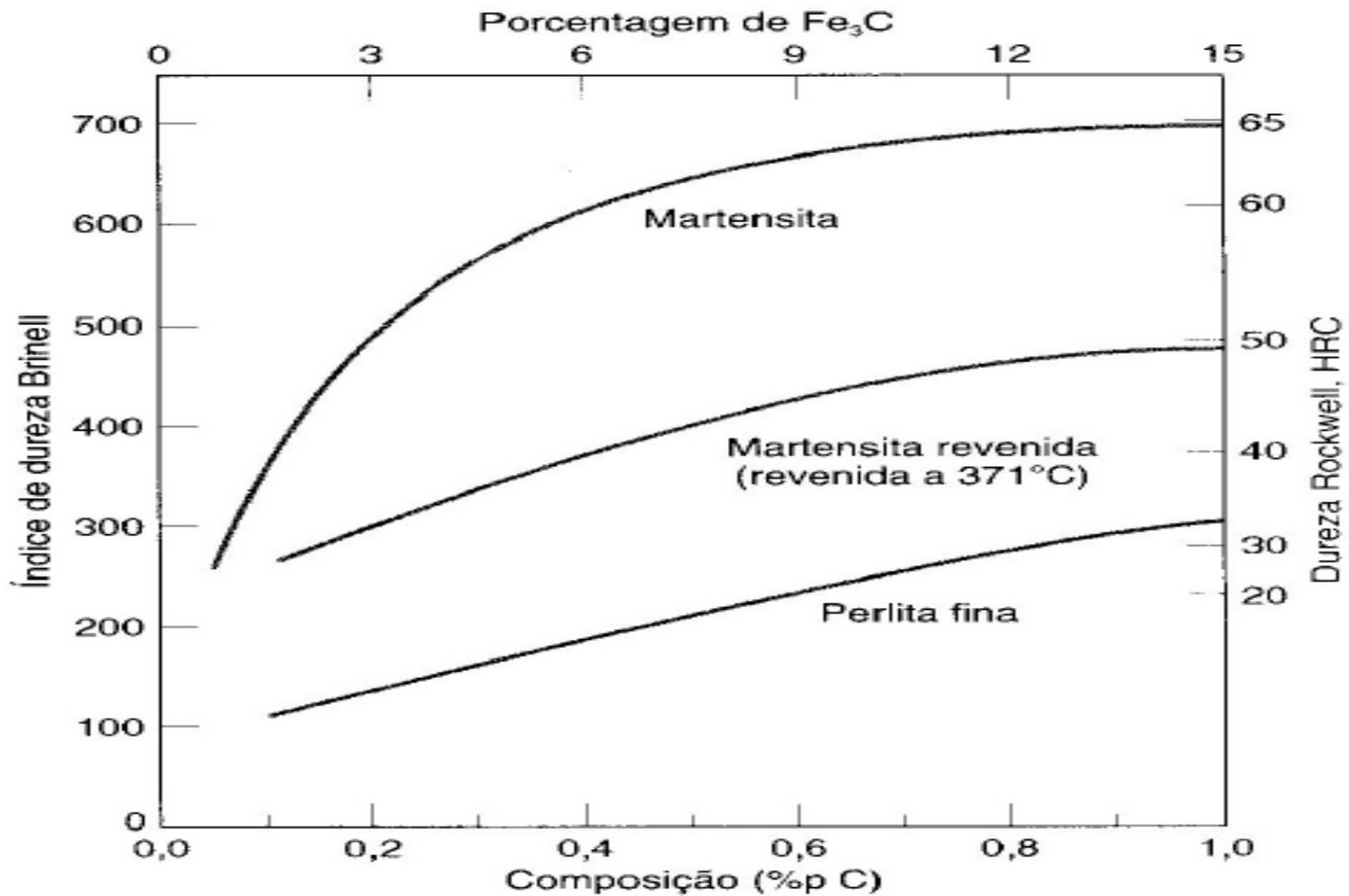
Aquecimento: Região da austenita entre 800 e 950 C.

Resfriamento: Em aços comuns ao carbono sem elementos de liga em água ou em óleo, em aços contendo elementos de liga em banho de sais polímeros ou mesmo ao ar.

Estrutura: martensita (acicular)



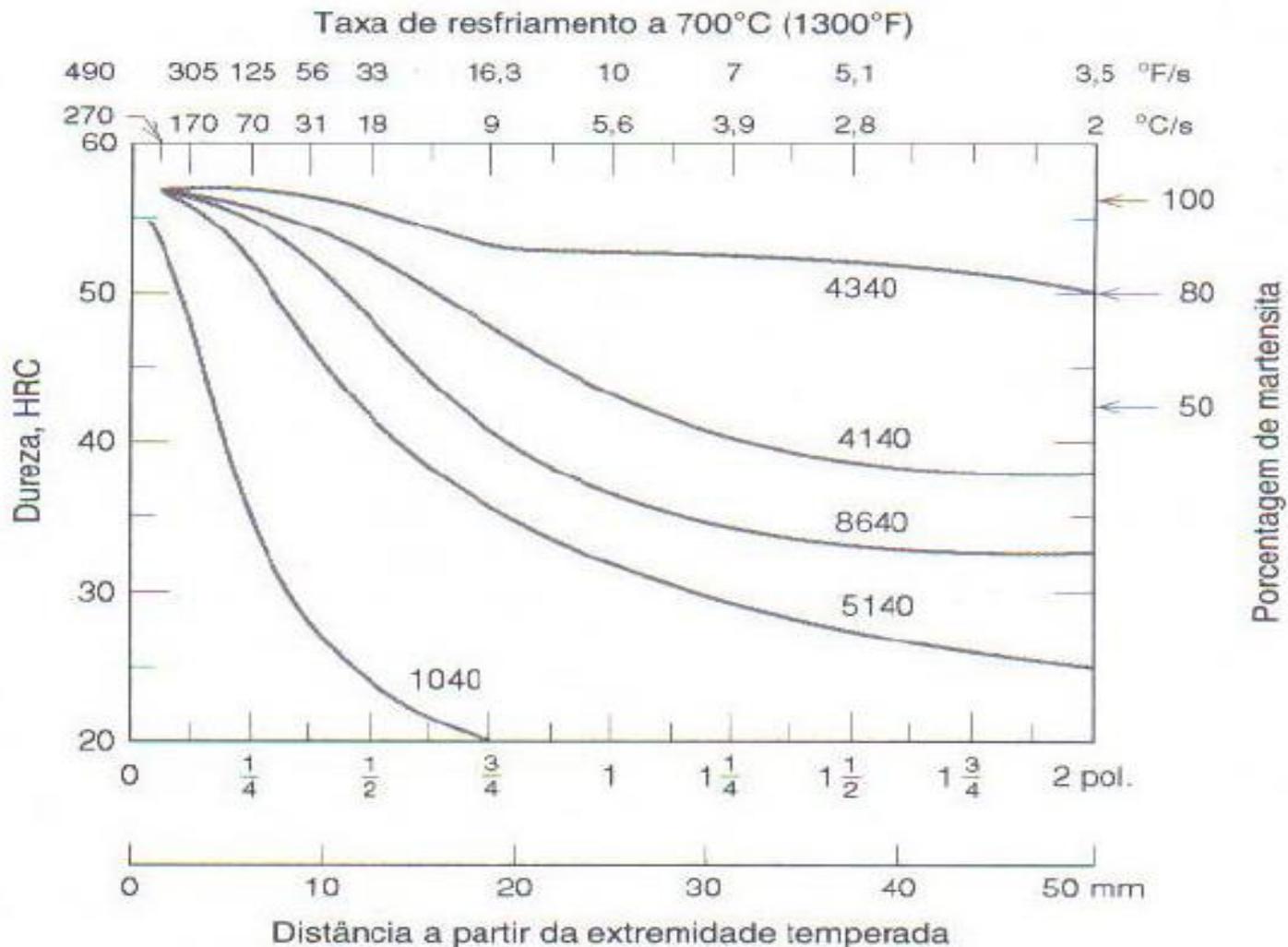
Dureza de aços comuns em função da quantidade de carbono e microestrutura





Curvas de temperabilidade dos aços 1040, 4140, 4340, 5140 e 8640.

Diferentes composições químicas, mas todos com 0.4%C





Revenido: Objetivo: Corrigir a excessiva dureza e fragilidade do material (da estrutura martensita) após a têmpera.

Tratamento OBRIGATÓRIO após a tempera

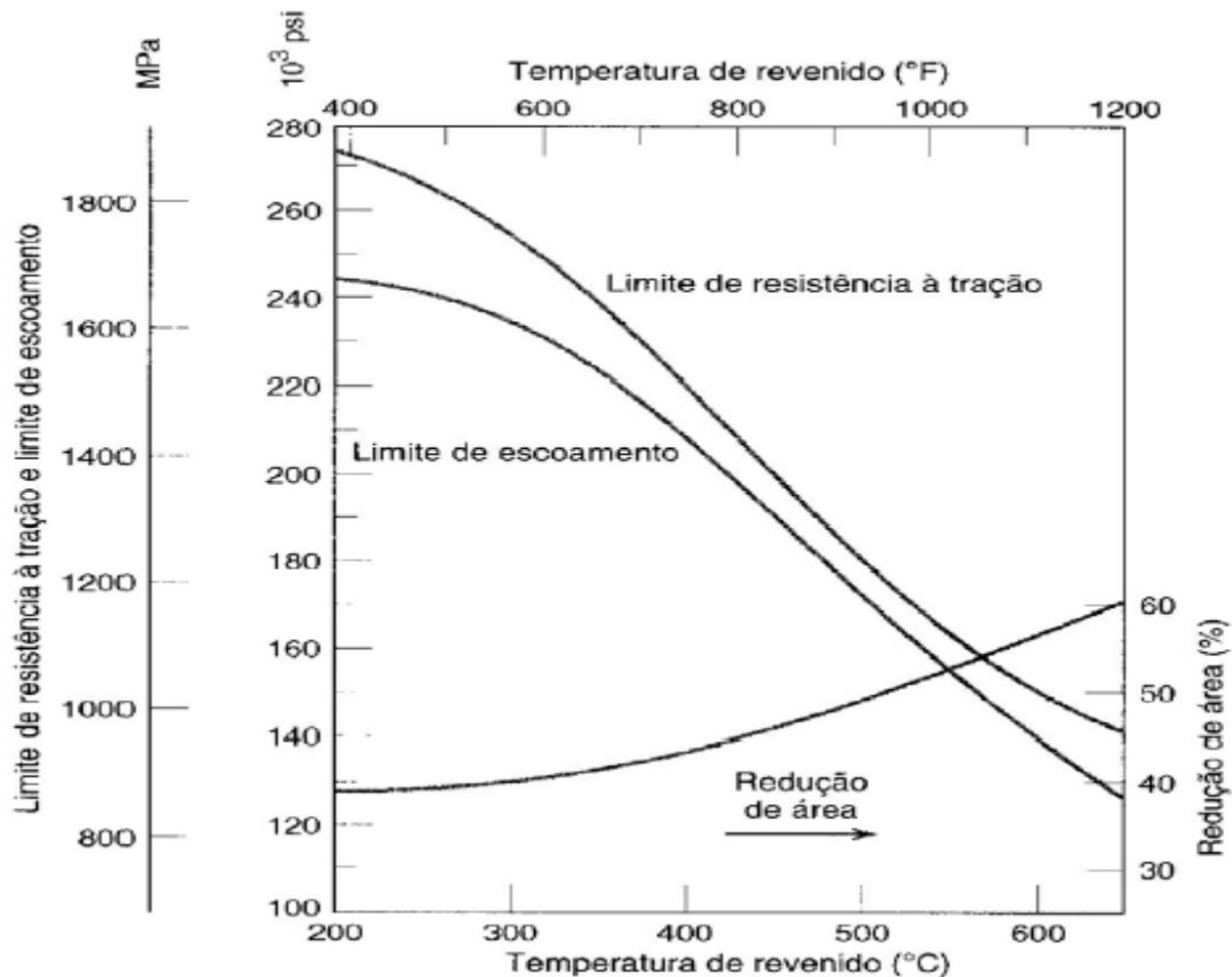
Aquecimento: Entre 100 C e 723 C

Quanto maior a temperatura menor a dureza e resistência e maior a ductilidade.

Estrutura: Martensita revenida.



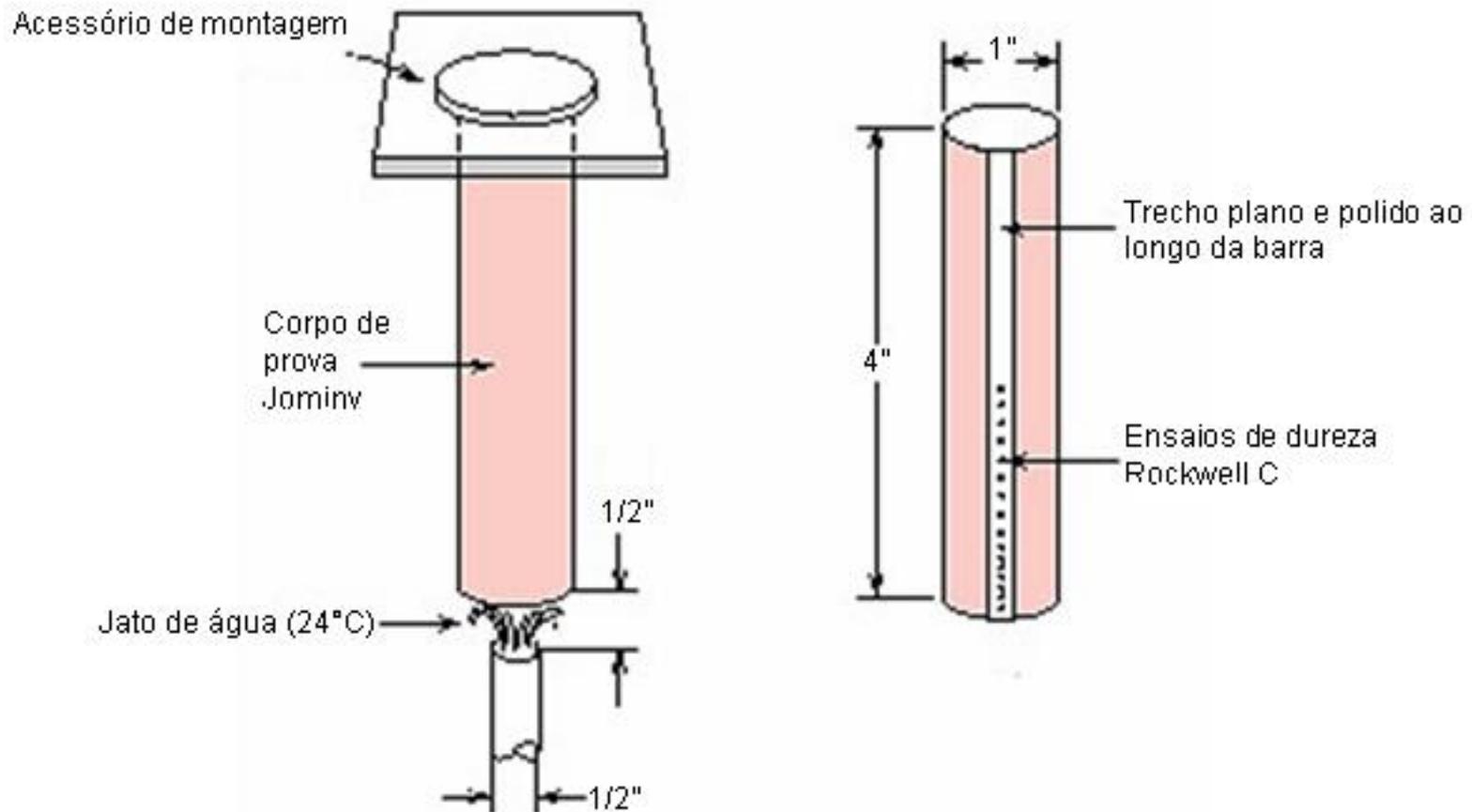
Variação das propriedades mecânicas do aço 4340 temperado em óleo em função da temperatura de revenido





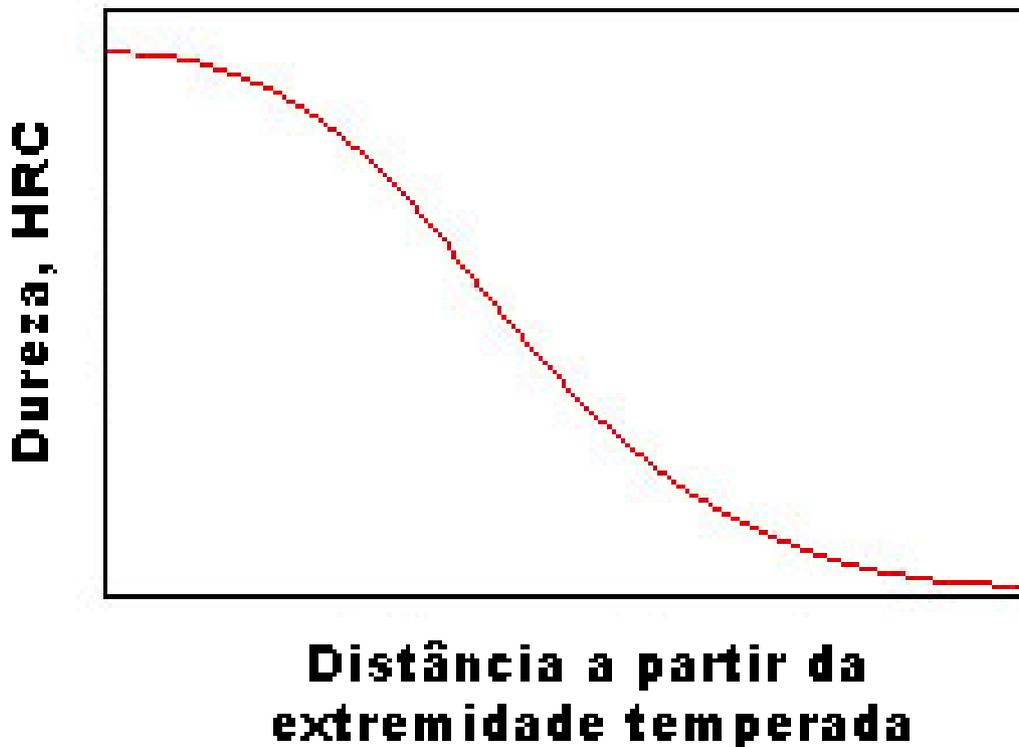
Tempera

Ensaio Jominy da Extremidade temperada





Curva de endurecibilidade



A extremidade temperada é resfriada mais rapidamente e exibe maior dureza.

A taxa de resfriamento diminui em função do aumento da distância até a extremidade resfriada e a dureza também diminui.

Um aço que é muito endurecível irá reter grandes valores de dureza ao longo de distâncias relativamente longas; um aço pouco endurecível vai reter pouca dureza. Cada liga de aço possui sua própria e exclusiva curva de endurecibilidade.

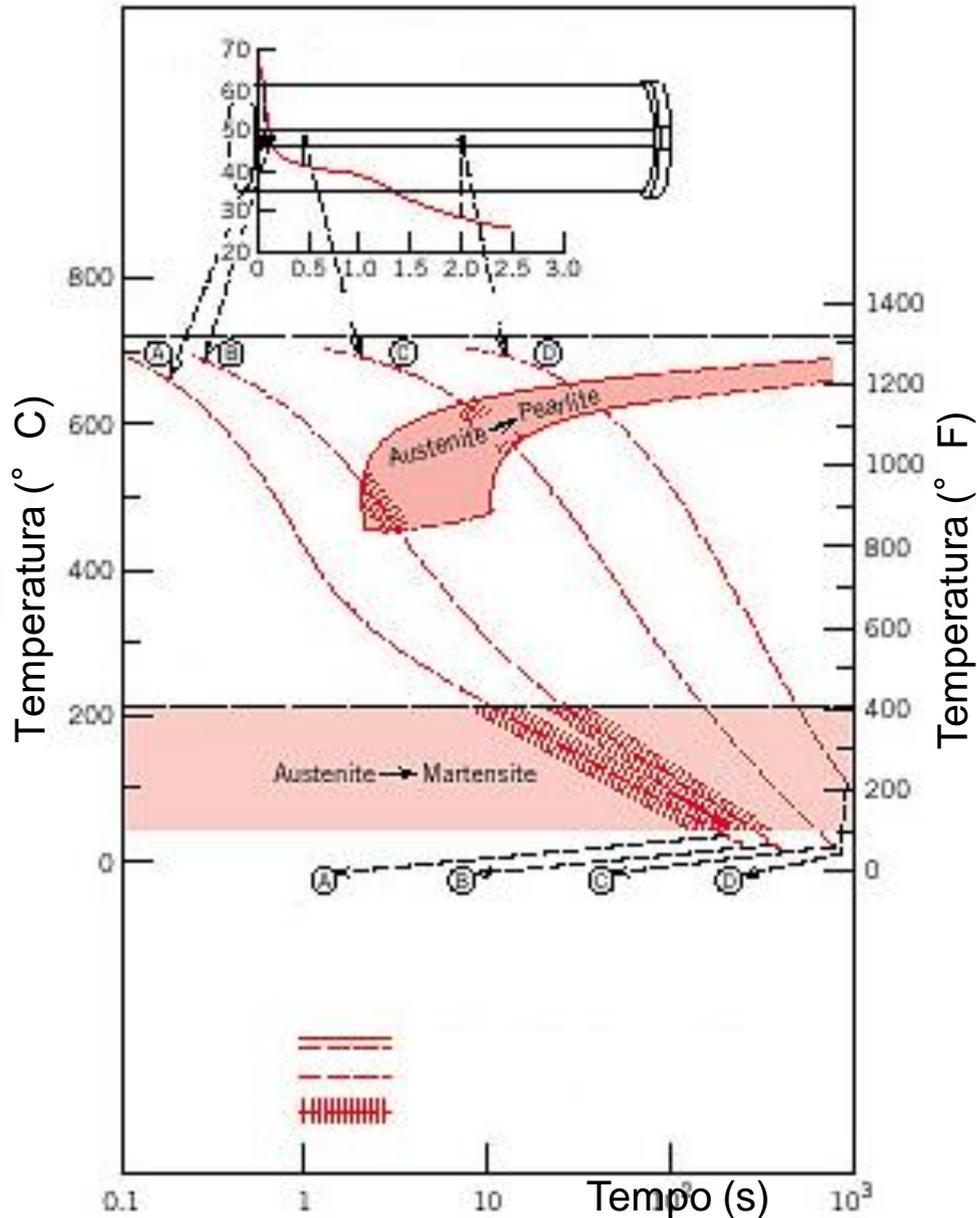
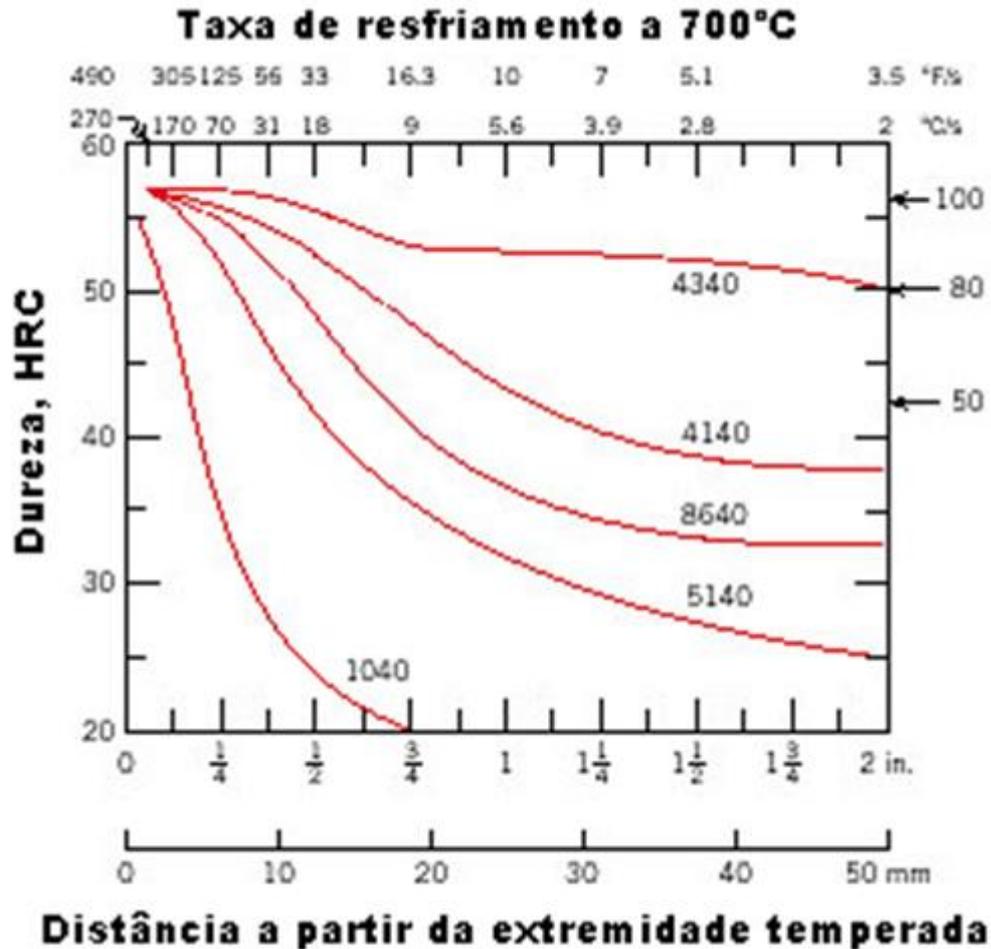


Diagrama de resfriamento contínuo para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide sobre o qual estão superpostas as curvas de resfriamento para quatro posições Jominy diferentes, bem como as microestruturas correspondentes que resultam para cada.

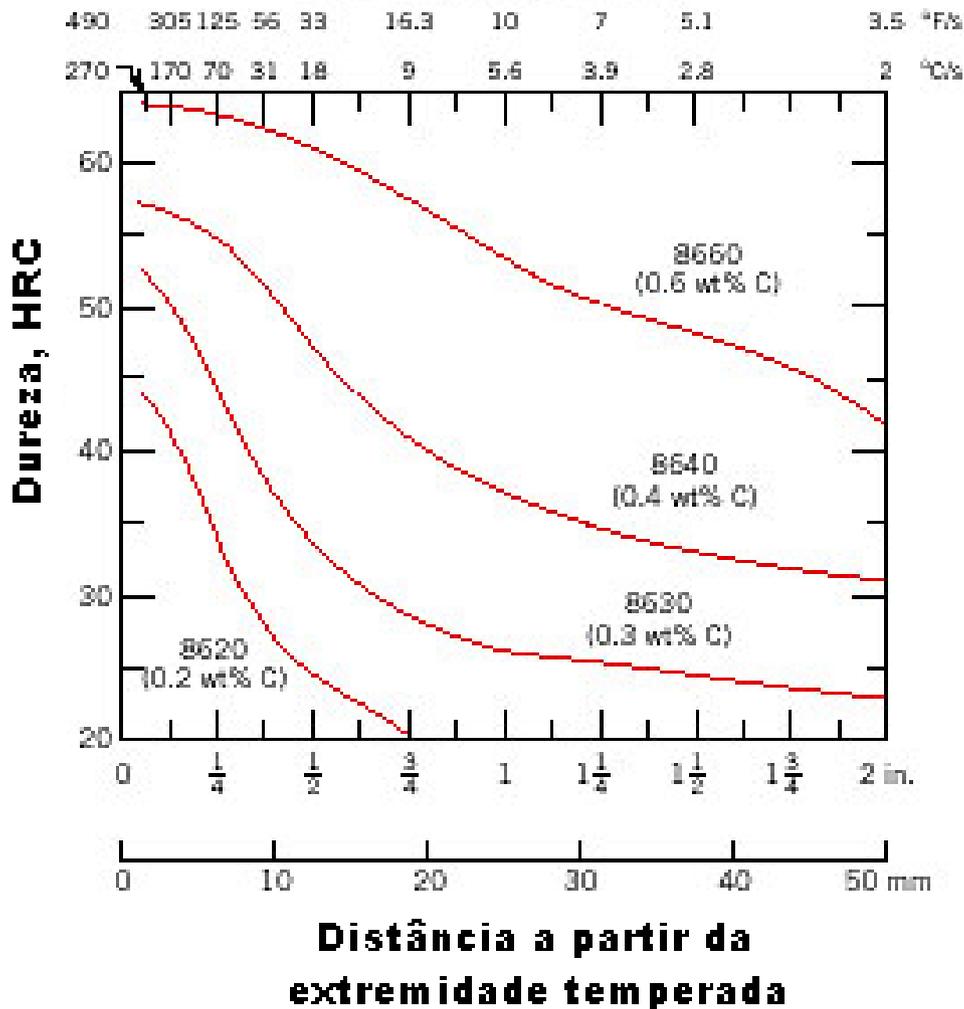


Curvas de endurecibilidade para cinco ligas de aço diferentes, cada uma contendo 0,4%p C. As composições (em %p) aproximadas das ligas são as seguintes: 4340-1,85Ni, 0,80Cr e 0,25Mo; 4140- 1,0Cr e 0,20Mo; 8640-0,55Ni, 0,50Cr e 0,20Mo; 5140-0,85Cr; 1040 é um aço sem elementos de liga.



Endurecibilidade dependente do teor de carbono

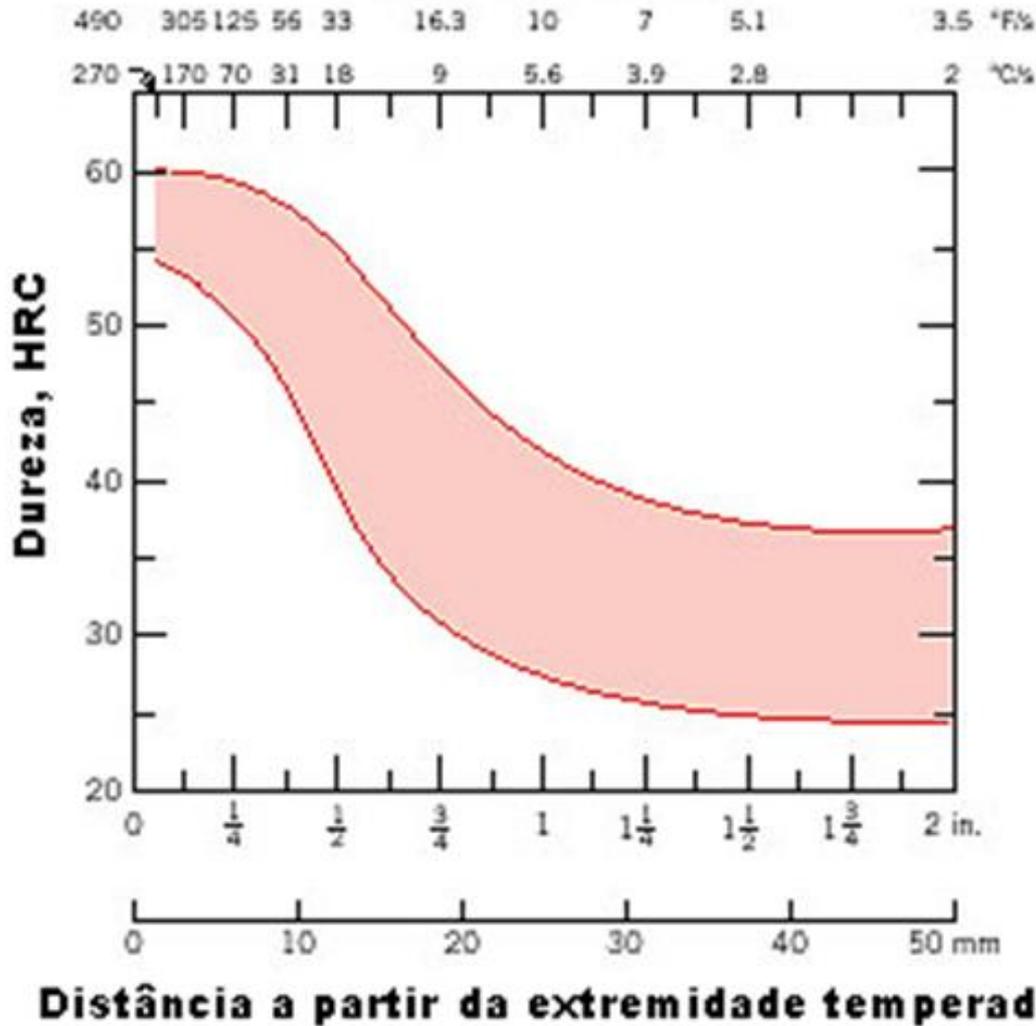
Taxa de resfriamento a 700°C



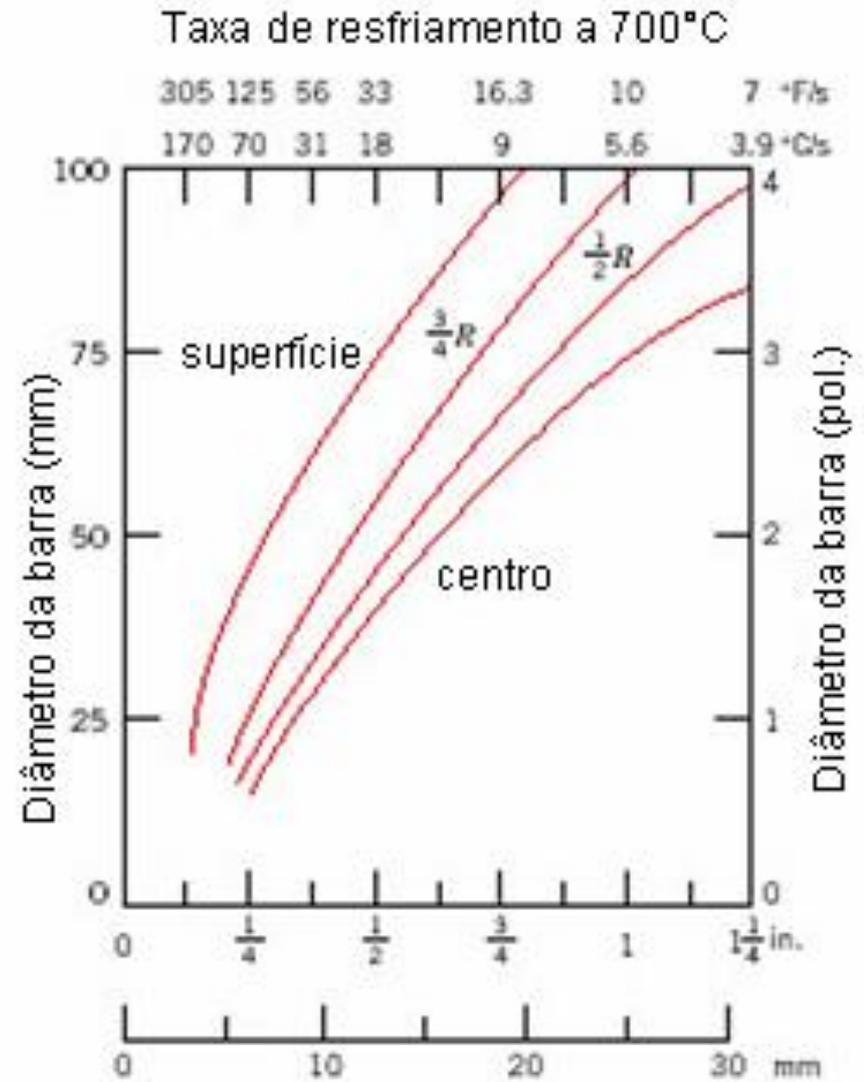
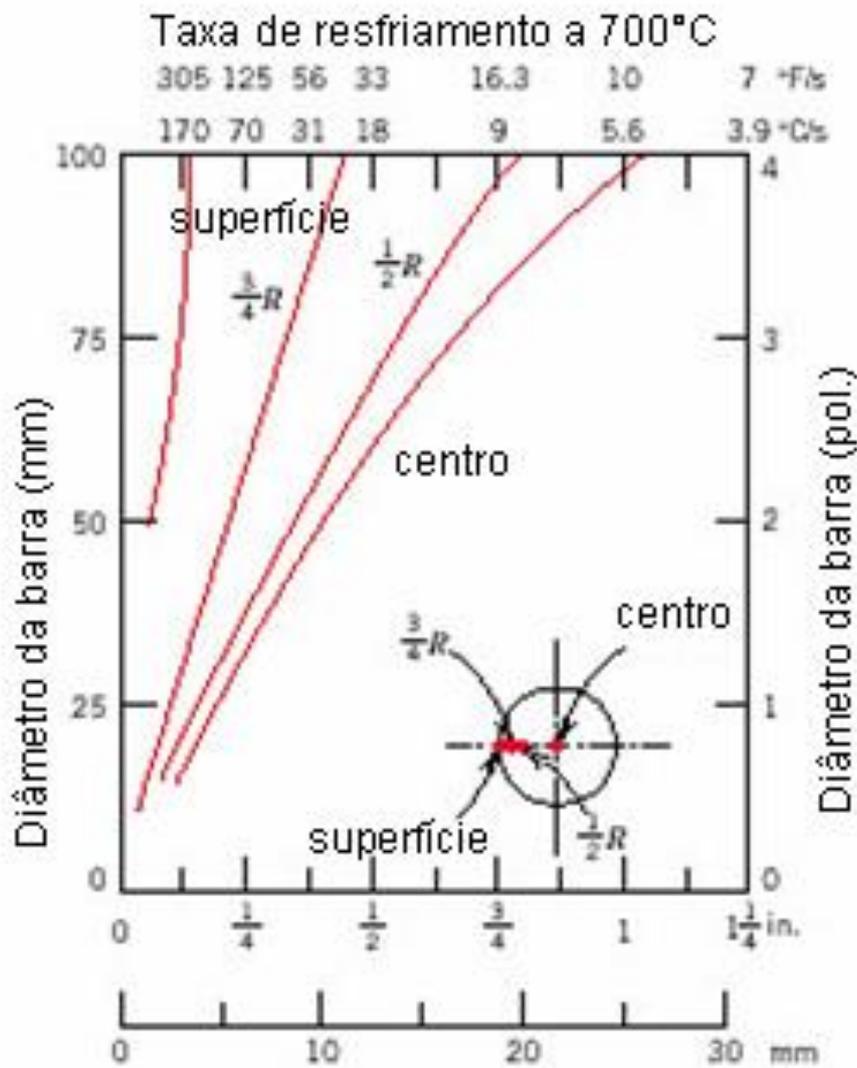
Curva de endurecibilidade para quatro ligas da série 8600 contendo a concentração de carbono indicada.



Taxa de resfriamento a 700°C



A banda de endurecibilidade para um aço 8640 indicando os limites máximo e mínimo.

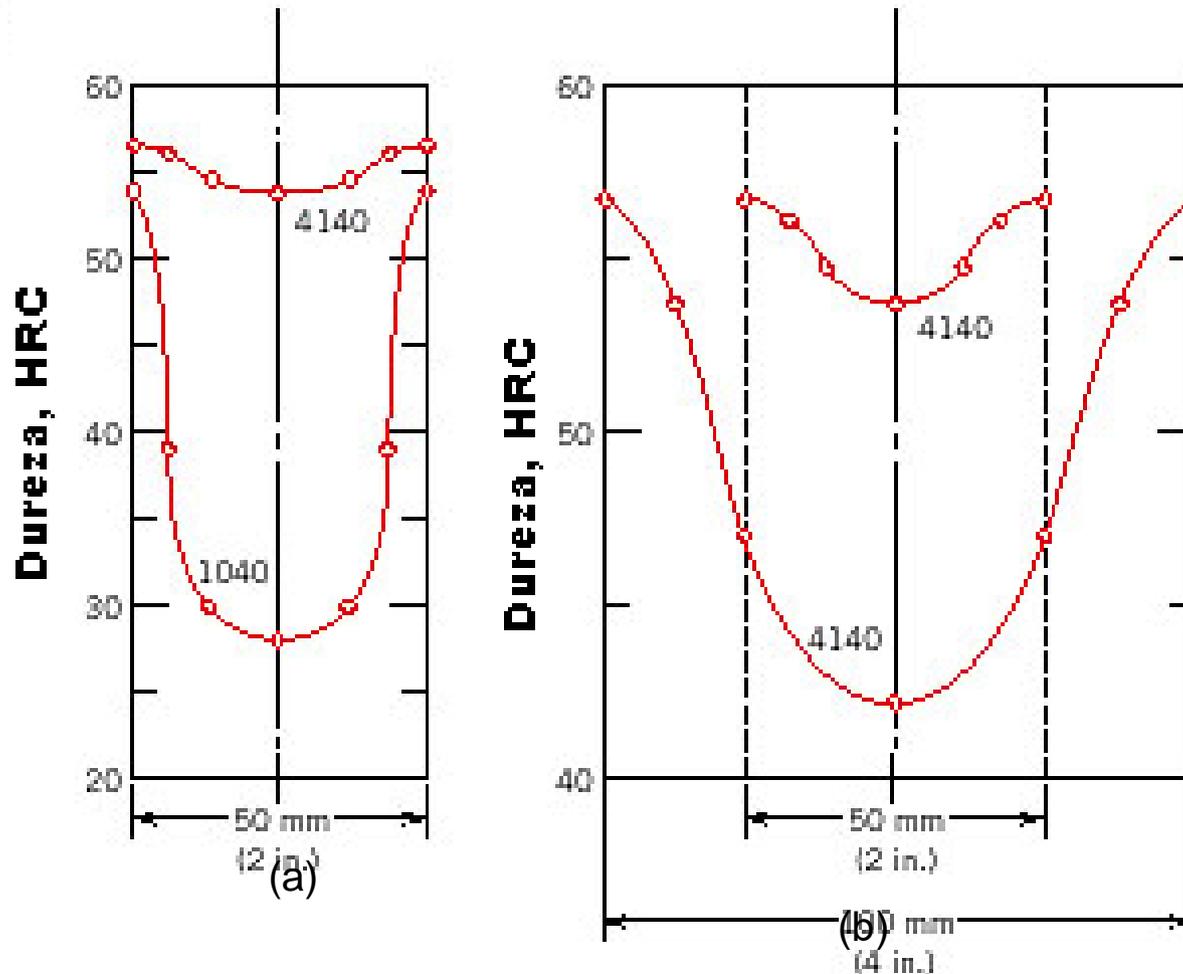


Distância equivalente a partir da extremidade temperada. (a)

Distância equivalente a partir da extremidade temperada. (b)



Dureza transversal ao longo da secção reta de uma amostra



Perfis radiais de dureza para (a) amostras cilíndricas de aço 1040 e aço 4140 com diâmetro de 50mm temperadas em água moderadamente agitada; (b) e amostras cilíndricas de aço 4140 com diâmetros de 50 mm e 100 mm temperadas em água moderadamente agitada.



Outros tratamentos térmicos

- Austêmpera
- Martêmpera
- Esferoidização



Endurecimento por precipitação

A resistência e a dureza de algumas ligas metálicas podem ser melhoradas pela formação de partículas extremamente pequenas e uniformemente dispersas de uma segunda fase no interior da matriz da fase original. O processo responsável por esse efeito denomina-se **endurecimento por precipitação**, e as partículas de nova fase são conhecidas por precipitados.



Endurecimento por precipitação

O termo envelhecimento ou endurecimento por envelhecimento também é usado para designar o endurecimento por precipitação

Ligas endurecíveis por precipitação:

- Al-Cu;
- Cu-Be;
- Cu-Sn;
- Mg-Al;

E algumas ligas ferrosas também.



Endurecimento por precipitação

Duas características obrigatórias devem ser exibidas pelos diagramas de fases dos sistemas da liga para que ocorra o endurecimento por precipitação:

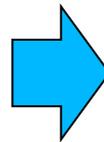
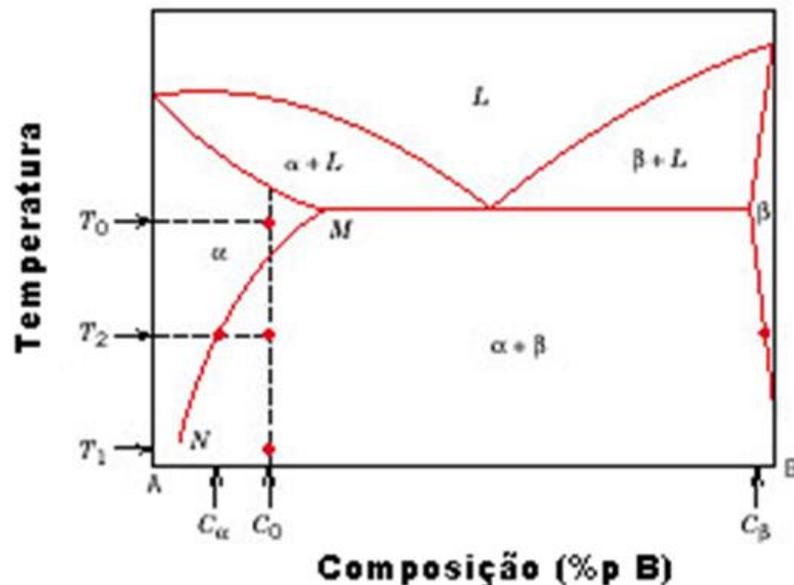
1. Deve haver uma solubilidade máxima apreciável de um componente no outro, da ordem de vários pontos percentuais;
2. E deve haver um limite de solubilidade que diminua rapidamente com a concentração do componente em função de uma redução da temperatura.



Endurecimento por precipitação

Etapas do Tratamento de Endurecimento por Precipitação

1 - Tratamento Térmico de Solubilização: onde todos os átomos do soluto são dissolvidos para formar uma solução sólida monofásica.



Uma liga de composição C_0 é tratada até uma temperatura (T_0) dentro do campo de fase α e aguarda até que toda a fase β que possa ter estado presente seja completamente dissolvida.

Esse procedimento é seguido por um resfriamento rápido, ou têmpera até a temperatura T_1 , a qual para muitas ligas é a temperatura ambiente.



Endurecimento por precipitação

Etapas do Tratamento de Endurecimento por Precipitação

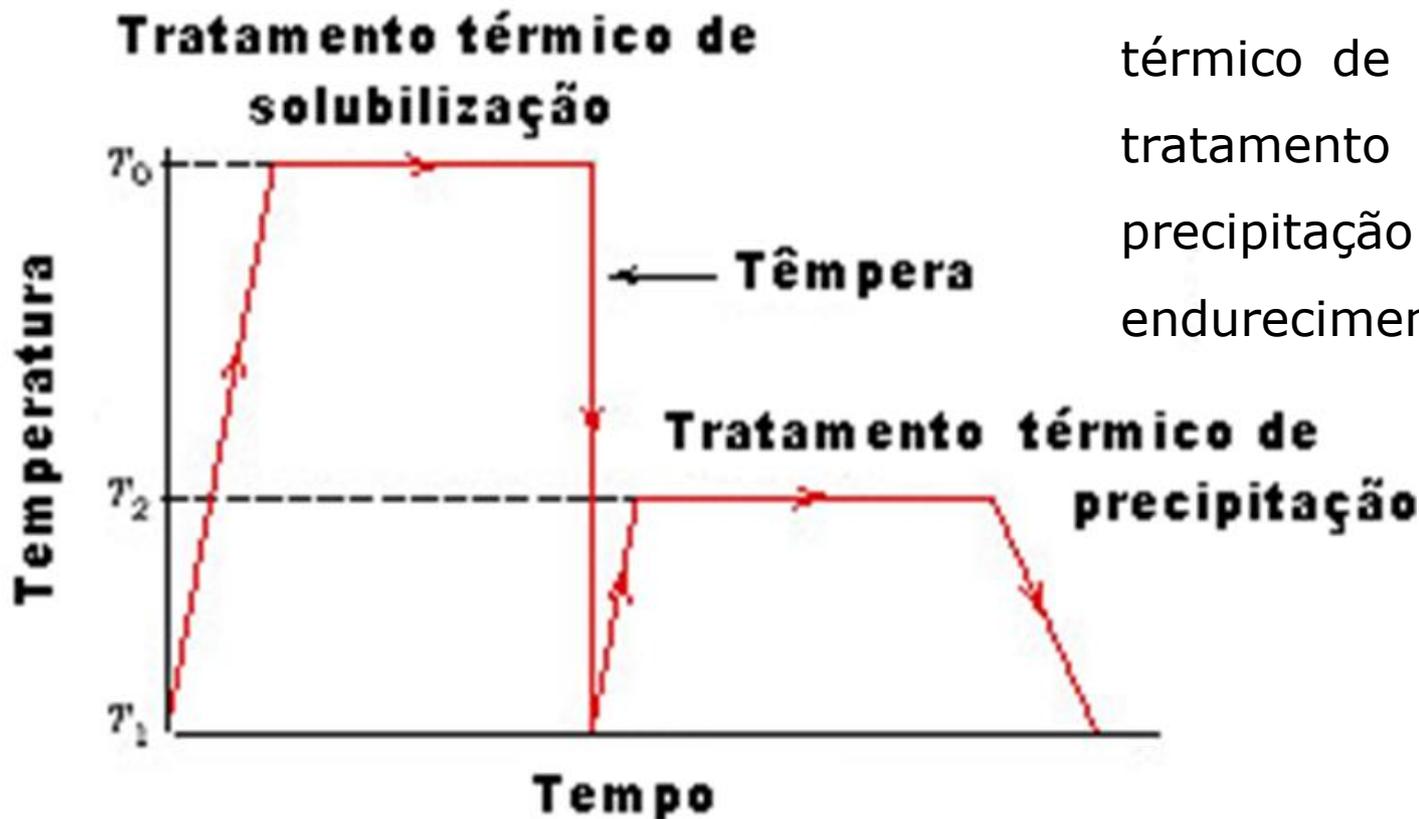
2 - Tratamento Térmico de Precipitação: onde a solução sólida α supersaturada é normalmente aquecida até uma temperatura intermediária T_2 , localizada dentro da região bifásica $\alpha + \beta$.

A fase β precipitada começa a se formar na forma de partículas finamente dispersas com composição C_β , em um processo que é algumas vezes conhecido como envelhecimento. Após o tempo de envelhecimento apropriado à temperatura T_2 , a liga é resfriada até a temperatura ambiente.



temperatura em função do tempo

Gráfico esquematizado da temperatura em função do tempo mostrando tanto o tratamento térmico de solubilização como o tratamento térmico de precipitação para o processo de endurecimento por precipitação.





Superenvelhecimento

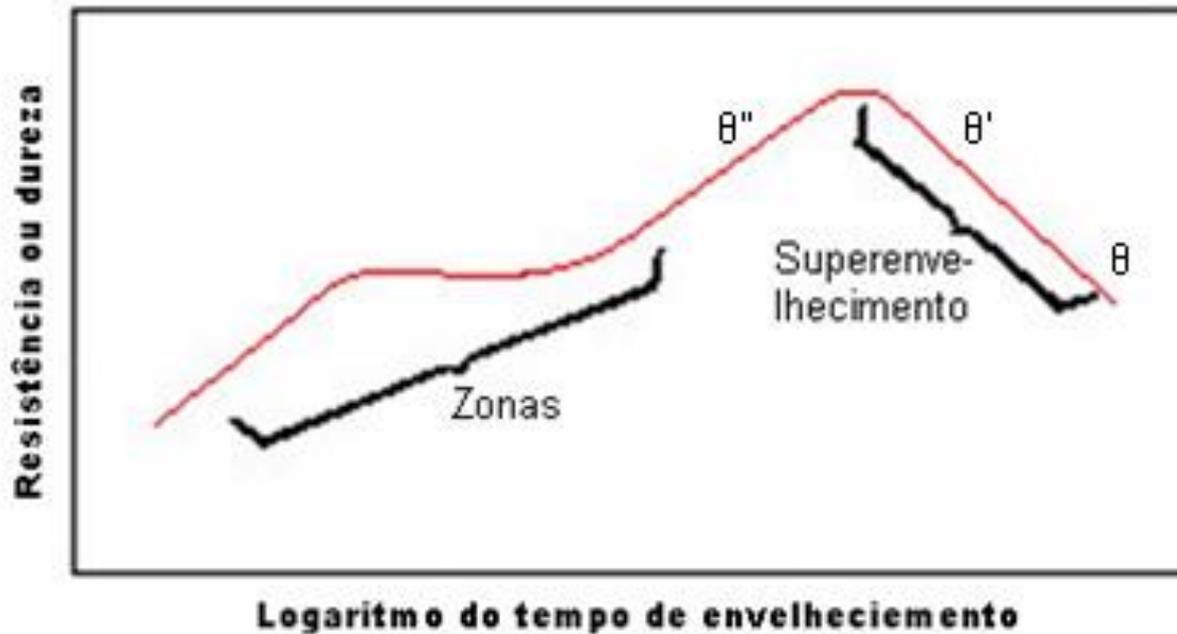
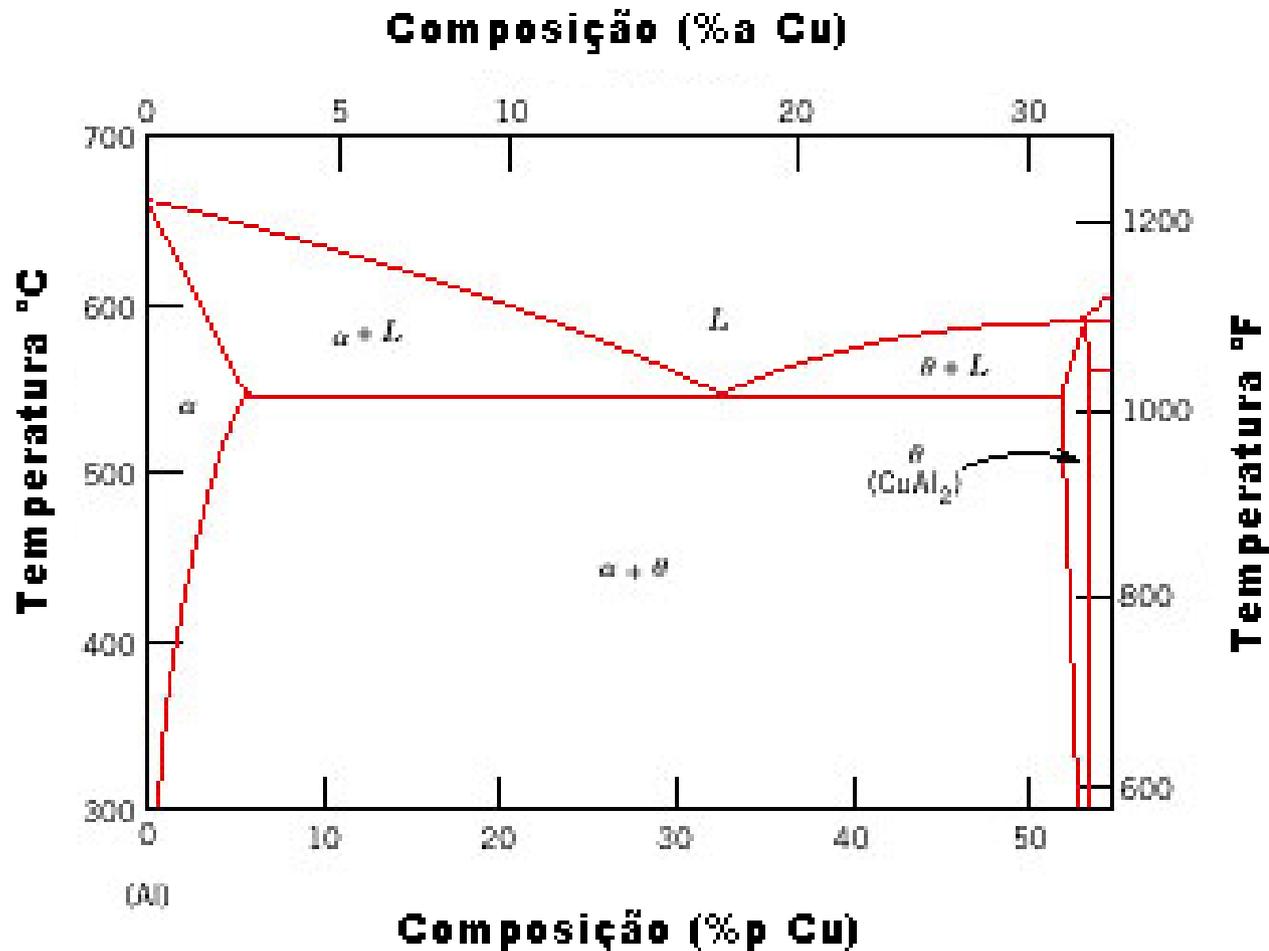


Diagrama esquemático mostrando a resistência e a dureza como uma função do logaritmo do tempo de envelhecimento a uma temperatura constante durante o tratamento térmico de precipitação.



Sistema Alumínio-Cobre

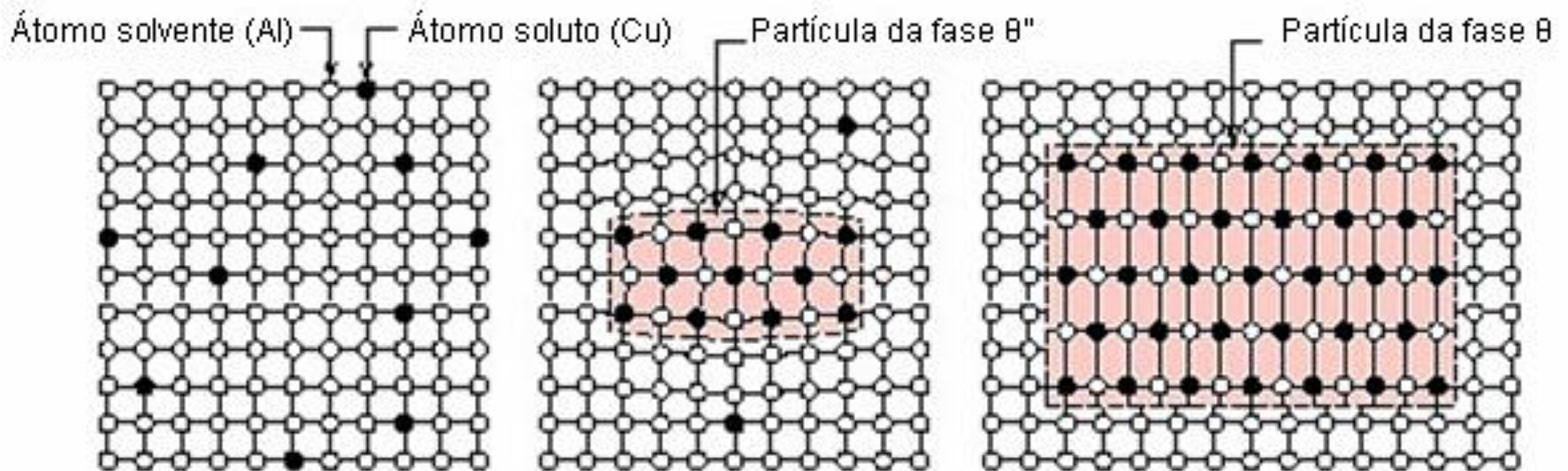


A região rica em alumínio do diagrama de fases alumínio-cobre.



Mecanismos de endurecimento

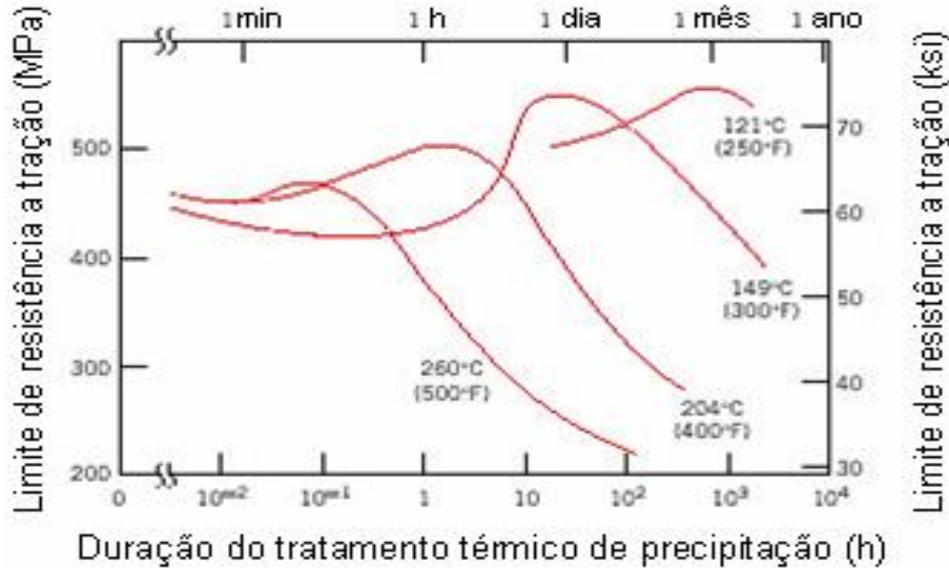
Representação esquemática de vários estágios do processo de formação da fase precipitada (θ) de equilíbrio. (a) Uma solução sólida α supersaturada. (b) Uma fase precipitada, θ'' , de transição. (c) A fase de equilíbrio, dentro da fase α da matriz. Os tamanhos reais das partículas da fase θ são muito maiores do que os mostrados aqui.



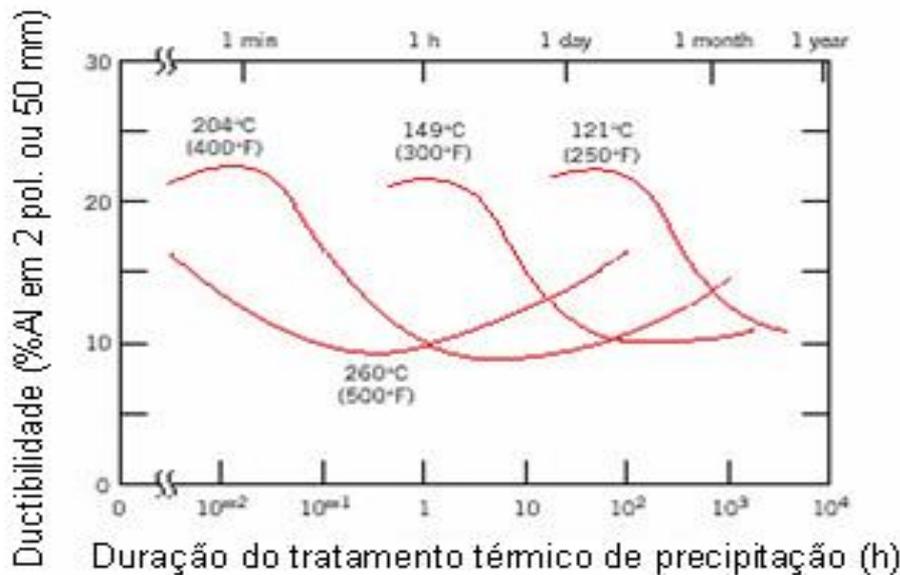
(a)

(b)

(c)



← O processo de aumento da resistência é acelerado à medida que a temperatura é aumentada .



← Uma redução na ductilidade está associada ao aumento da resistência.



Tratamentos termoquímicos

Tratamentos termoquímicos são os tratamentos que visam o endurecimento superficial dos aços, pela modificação parcial da sua composição química e aplicação simultânea de um tratamento térmico

Os tratamentos termoquímicos são também conhecidos como tratamentos de endurecimento superficial (que é sua principal finalidade)



Tratamentos termoquímicos

A modificação da composição química se dá por difusão termoquímica de elementos na superfície do aço como: carbono, nitrogênio e boro, entre outros.

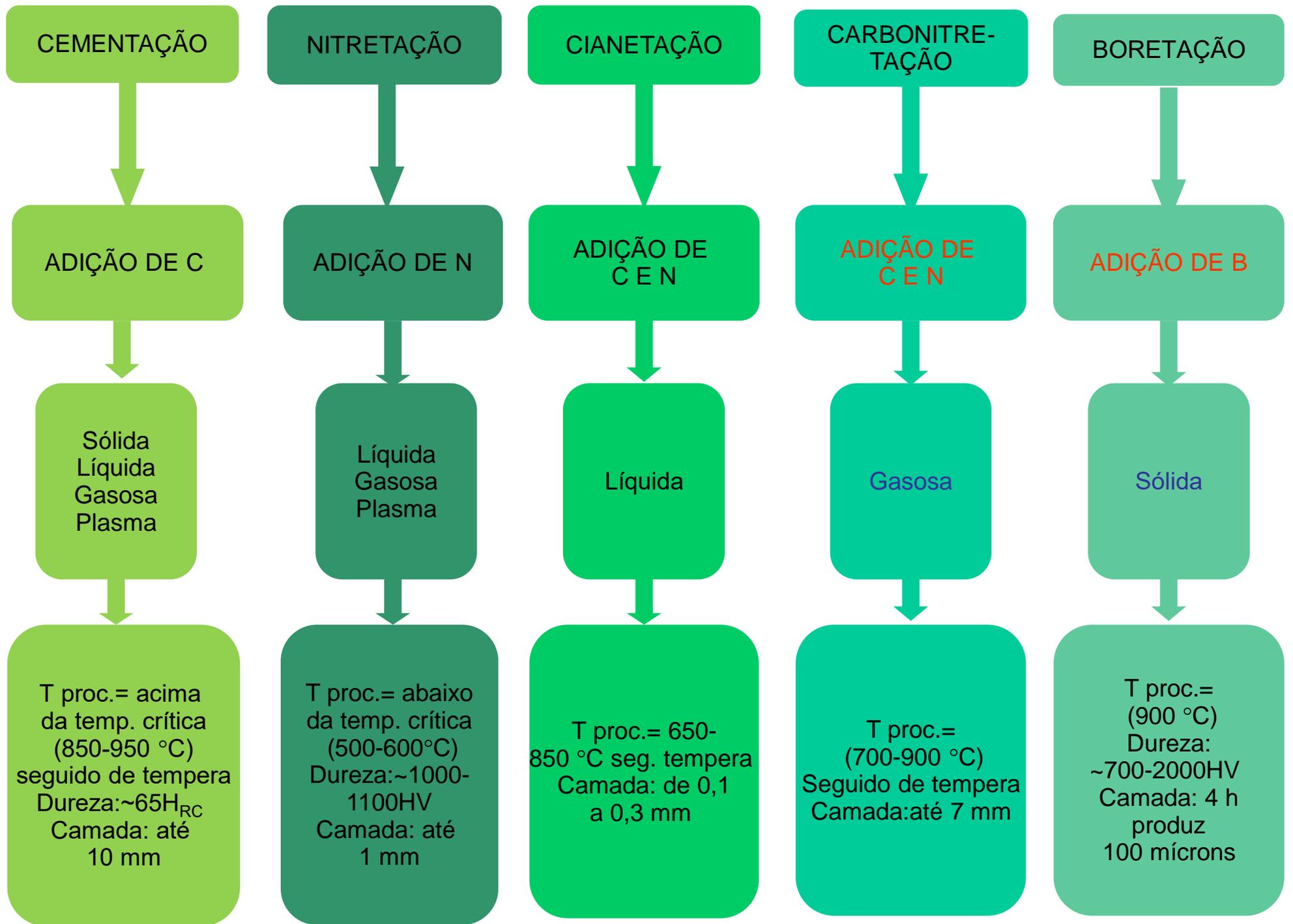
Pode ser usado também pra adquirir propriedades como resistência à fadiga, à corrosão e à oxidação em altas temperaturas



Tratamentos termoquímicos

Tipos:

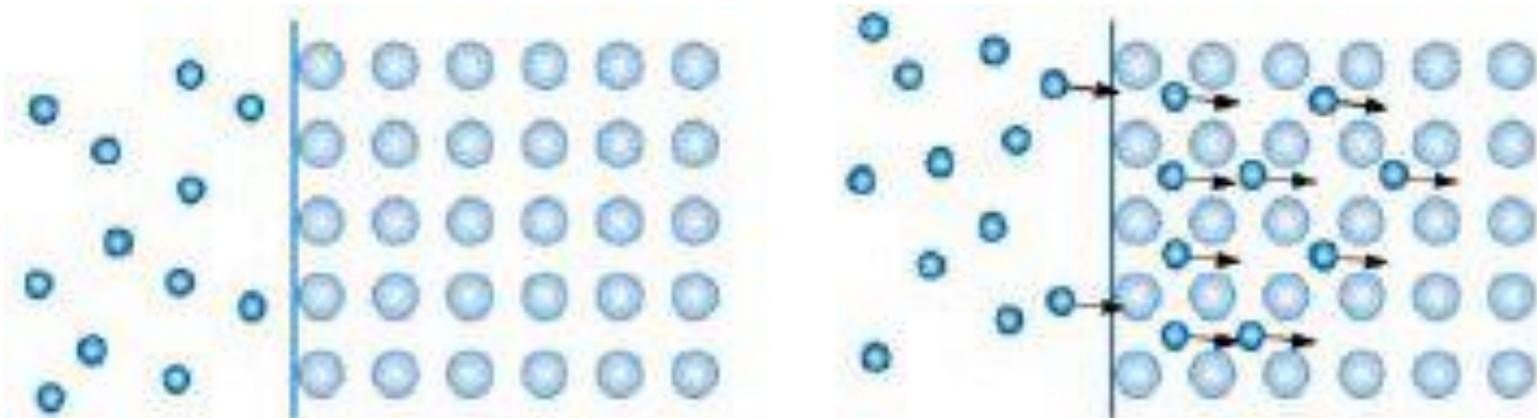
- Cementação (C)
- Nitretação (N)
- Cianetação (CN) (CNX)
- Carbonitretação (C + N)(C >N)
- Nitrocarbonetação (C + N) (N >C)
- Boretção (B)
- Tratamentos Termo reativos (CX + NX + CyNzX)
(V, Nb, Ta, Cr , W e Mo)





Tratamentos termoquímicos

Basicamente nos tratamentos termoquímicos temos matéria sendo transportada através da matéria, ou matéria sendo introduzida na matéria por difusão





Tratamentos termoquímicos

No caso da ligas a difusão é realizada concomitantemente pela:

- Superfície
- Contorno de Grão
- Através do volume sólido (Grão)

Dentro dos grãos a movimentação dos átomos se dá:

- Através dos defeitos na rede cristalina
- Através dos interstícios
- Forçosamente substituindo átomos



Cementação

Definição: Introdução de Carbono na superfície do aço de modo que quando depois de temperado tenha uma superfície mais dura.

Tipos Cementação:

- A alta temperatura
- Sólida ou “em caixa”
- Líquida
- Gasosa
- Vácuo
- Plasma ou Iônica





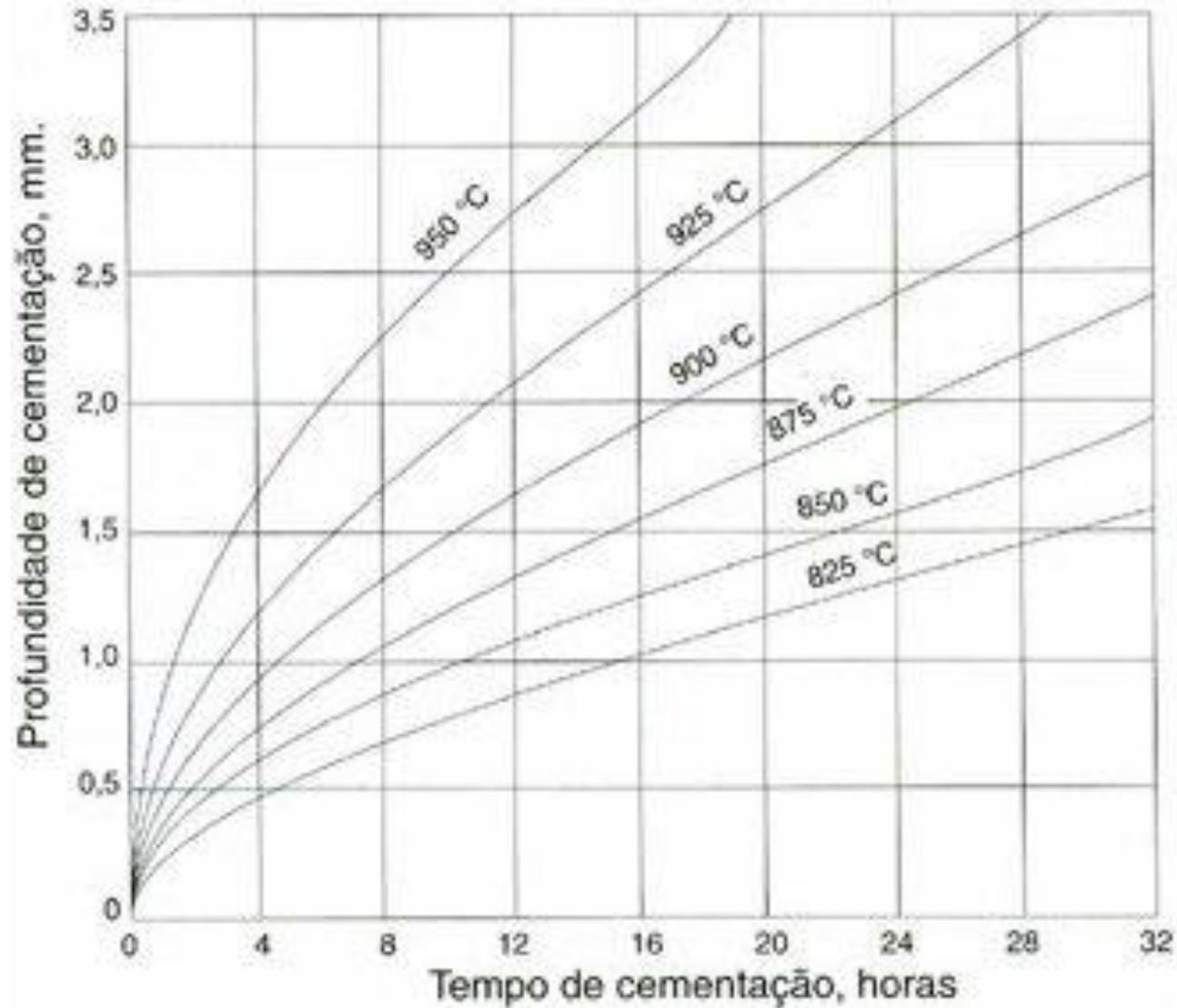
Cementação

Análise da camada cementada:

- Concentração de carbono antes do tratamento (-C) (+C)
- Tempo do tratamento (+t) (+C)
- Temperatura (+T) (+C)
- Agente Carbonetante (Facilidade de fornecer carbono)
- Velocidade de Fornecimento do Agente Carbonetante (V_{contr}) (+C)



Cementação





Cementação

Reações fundamentais

➔ Gás carbônico



➔ Gás Metano





Cementação

Tratamentos Térmicos na cementação:

- Normalização (Anterior) (Para permitir Usinagem - Retificação)
- Têmpera (Posterior) (Transformação em Martensita – Microconstituente mais duro)

Profundidades da camada difusa

- Em média 0,8 a 1,0%C (t, T)



Cementação

Pode ser:

- Sólida
- Gasosa
- Líquida



Cementação

Aços para cementação

Aços Carbono

- superfície resistente ao desgaste com núcleo tenaz
- 1016 / 1018 / 1019 / 1022
- peças pequenas / temperadas em água
- aplicações onde não é exigido baixa distorção

Aços baixa-liga

- superfície resistente ao desgaste / núcleo resistente e dútil
- 4023 / 5110 / 4118 / 8620 / 4620
- temperados em óleo / baixa distorção

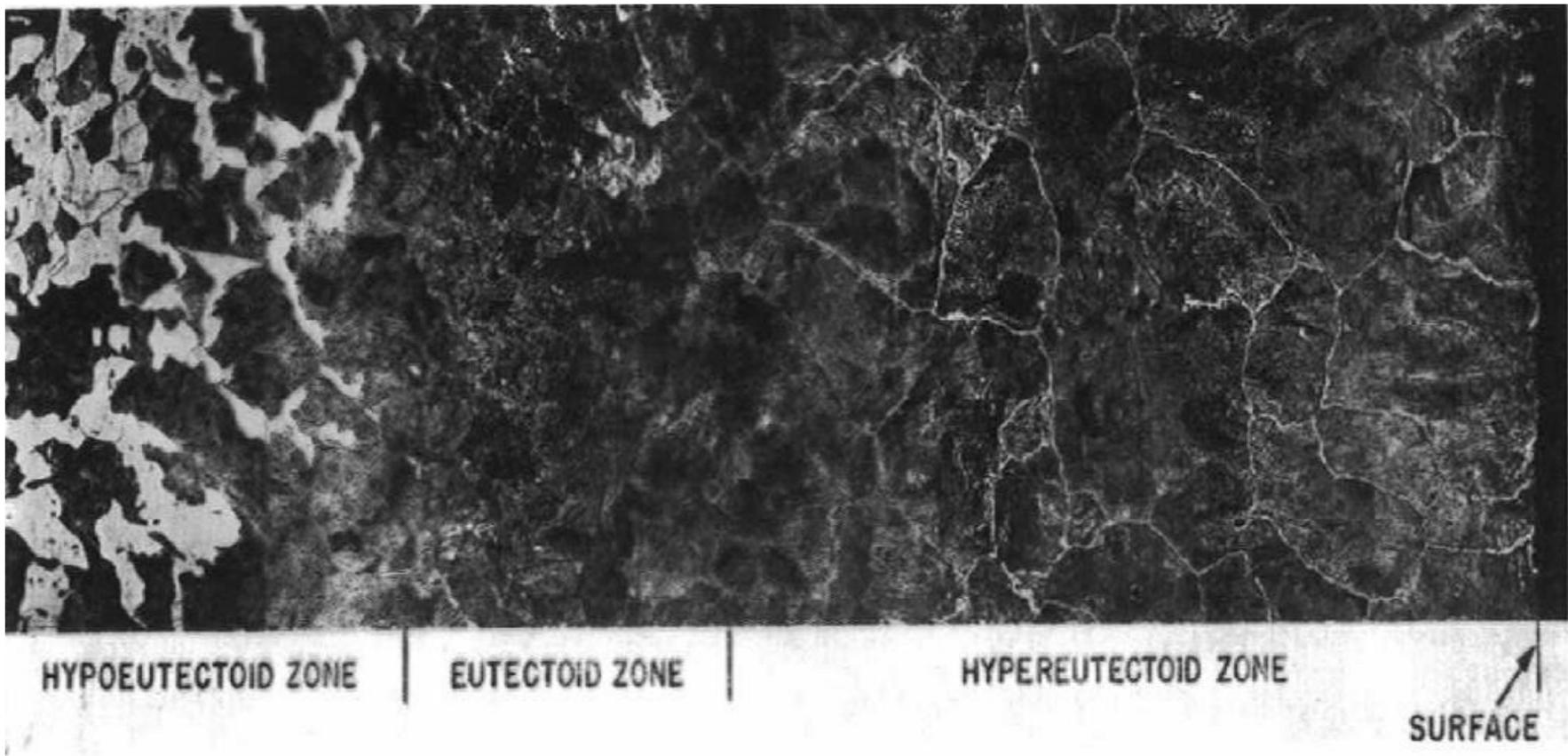
Aços média-liga

- aplicações onde é exigido menor distorção
- 4320 / 4817 / 9310



Cementação

Microestrutura





Nitretação

Tratamento térmico caracterizado pela introdução de Nitrogênio na superfície do aço

Temperatura do tratamento: 500 a 570°C

Não é necessário têmpera posterior

Tipos de nitretação:

- Gasosa
- Líquida
- Iônica ou a plasma



Nitretação

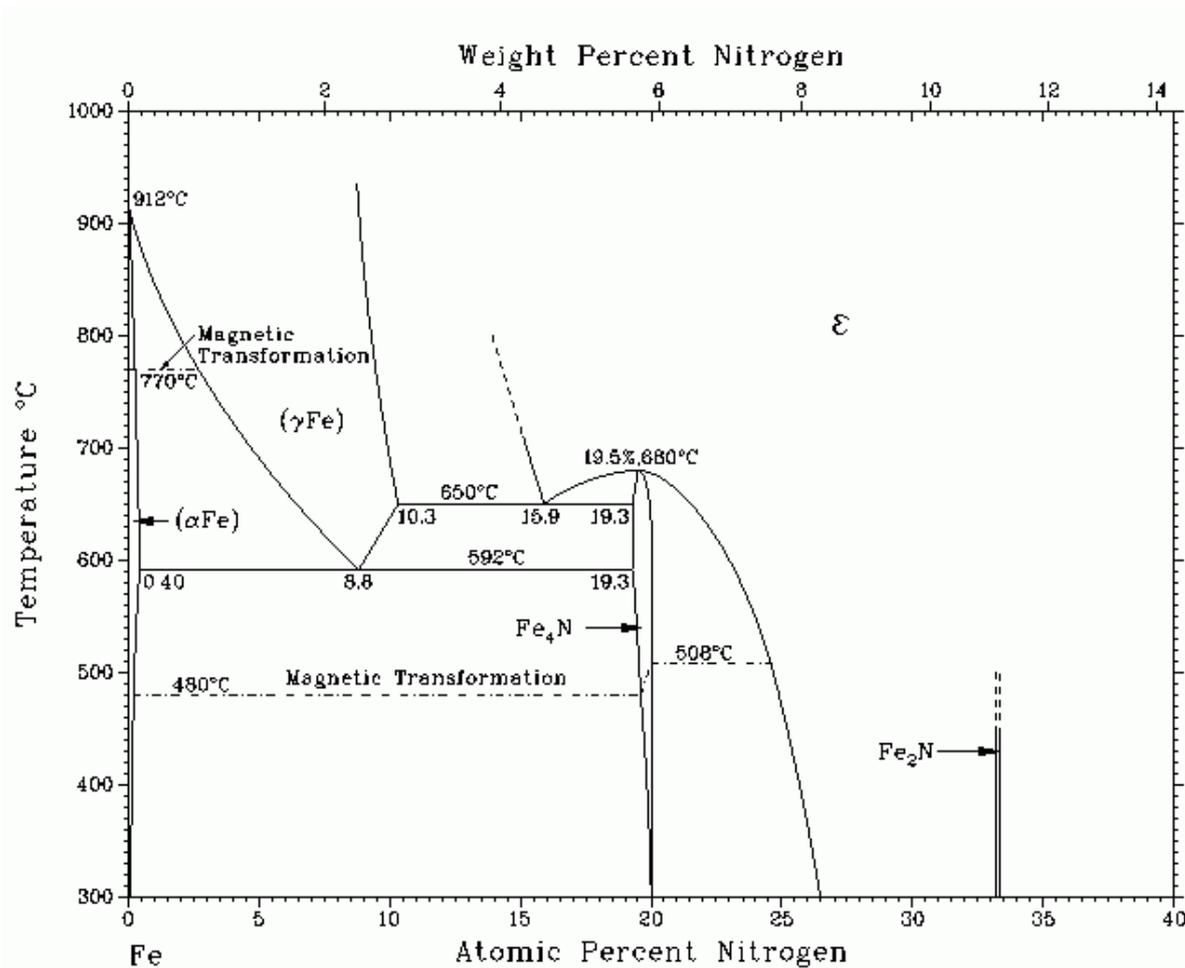
Razões de se fazer a nitretação

- Obter altíssima dureza superficial (70Rc) e alta resistência ao desgaste
- Melhorar a resistência à fadiga e a corrosão (exceto para os aços inoxidáveis)



Nitretação

diagrama de equilíbrio Fe-N





Nitretação

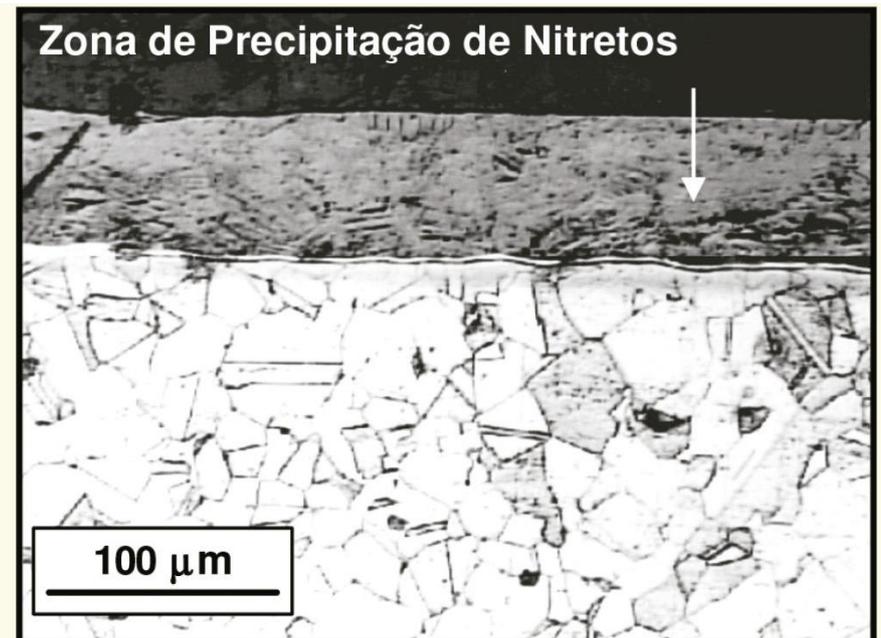
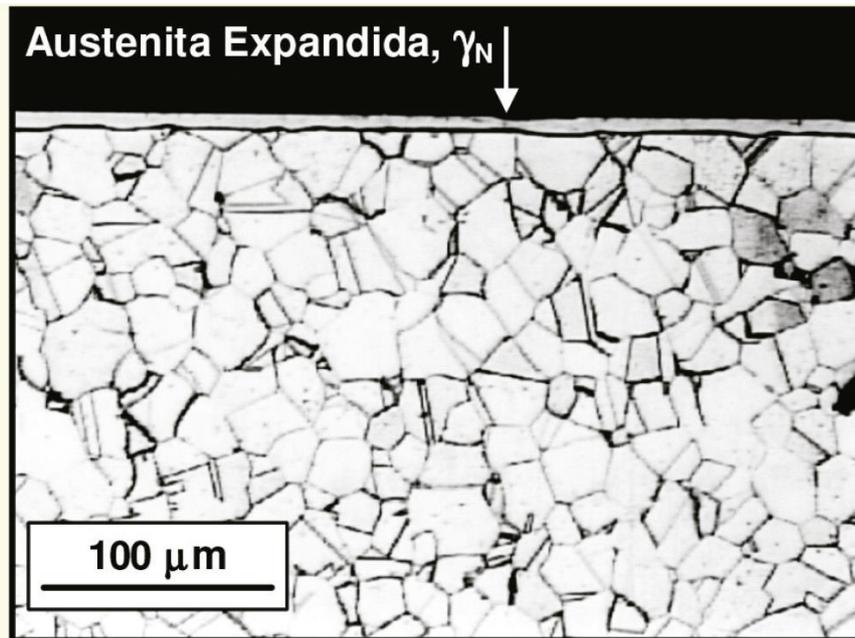
Aços nitretáveis:

- Aços de baixa liga contendo alumínio
- Aços de médio carbono, ao cromo, das séries 41xx, 43xx, 51xx, 61xx, 86xx, 87xx e 98xx
- Aços ferramenta com 5% cromo
- Aços inoxidáveis nitrônicos, Ferríticos, Martensíticos
- Aços conter alumínio ou cromo (Ideal série Nitraloy – 1%Al e 1,2%Cr)



Nitretação

Microestrutura





Cianetação

A cianetação consiste em aquecer o aço em temperatura acima da linha de austenitização, em sal fundido, de modo que a superfície do aço absorva carbono e nitrogênio.

Banhos de sal:

- 30 a 97% de cianeto de sódio
- 2 a 40% carbonato de sódio
- 0 a 30% de cloreto de sódio

Temperatura de Tratamento: 760° e 870°C

Equipamentos da cementação líquida



Outros tratamentos superficiais

- Revestimentos com filmes finos
- endurecimento superficial por ação mecânica
(shooting pining, tamboreamento, outros)



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FIM DA AULA

