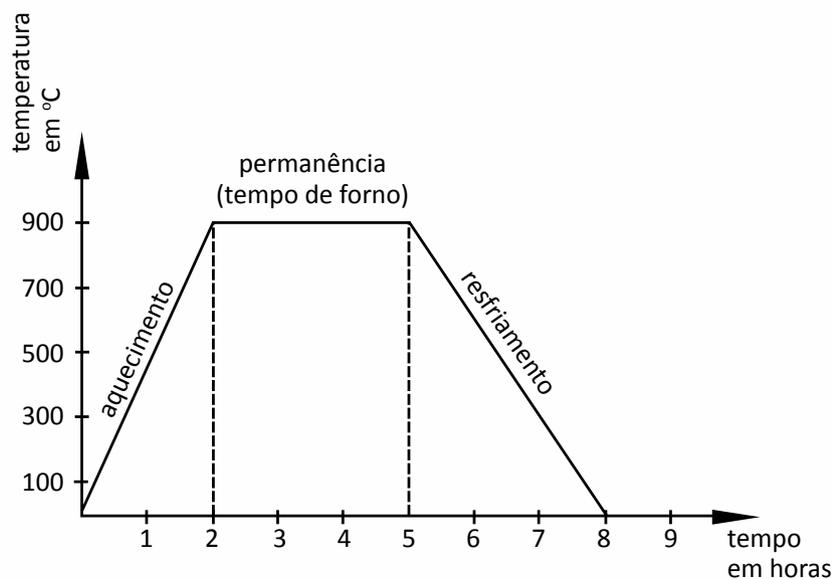
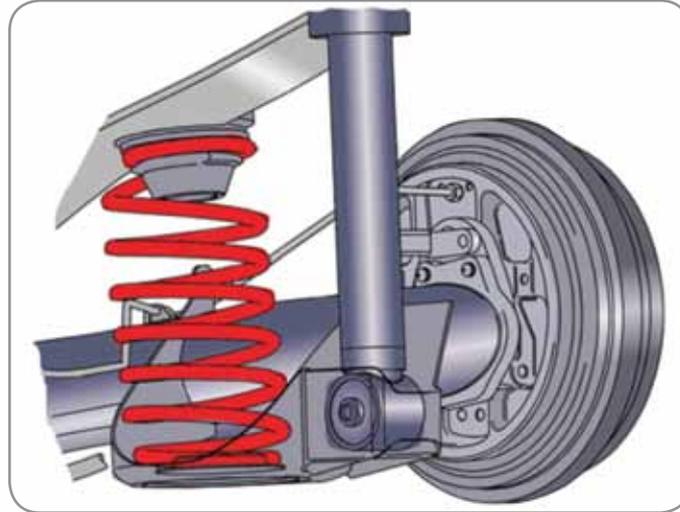


Tratamento térmico

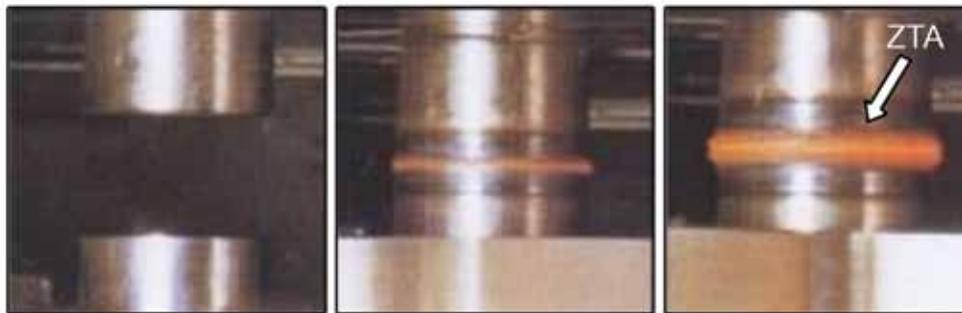
Tratamento térmico pode ser definido como o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final.



Uma mola espiral, por exemplo, necessita ser tratada termicamente para ser utilizada no sistema de suspensão de um veículo automotor. Ao ser comprimida, na passagem do veículo por uma lombada, a mola acumula energia amortecendo o movimento da roda. Após a passagem pela lombada a mola se estende devolvendo a energia acumulada e fazendo a roda do veículo retornar à sua posição inicial. O tratamento térmico permite que a mola sofra deformação elástica sem perder sua forma e a geometria original. Para resistir a esses esforços é preciso que a mola tenha dureza elevada, elasticidade e resistência mecânica para não sofrer deformação plástica permanente.



Nem sempre os tratamentos térmicos são intencionais. Algumas vezes, peças metálicas sofrem tratamentos térmicos, durante o processo de fabricação, passando por ciclos de aquecimento ou resfriamento, que podem alterar suas propriedades de forma prejudicial. Como exemplo podemos citar a operação de soldagem de estruturas de aço, que ao serem aquecidas até temperaturas elevadas podem sofrer têmpera e fragilização, na zona termicamente afetada (ZTA), comprometendo a tenacidade da estrutura como um todo.



Da mesma maneira, operações de conformação plástica a frio podem introduzir tensões indesejadas, no interior do material e esgotar sua capacidade de sofrer deformação plástica adicional, tornando-os frágeis.

Os tratamentos térmicos são frequentemente associados com o aumento da resistência do material. Entretanto, podem ser utilizados para alterar características de fabricabilidade, como usinabilidade, estampabilidade ou restauração de ductilidade, após intenso processo de conformação a frio.

Pode-se dizer, então, que os tratamentos térmicos são processos de fabricação que são utilizados tanto para facilitar outros processos de fabricação como

para aumentar o desempenho dos produtos através do aumento da resistência mecânica ou de outras propriedades.

O benefício trazido pelos tratamentos térmicos aos aços é muito grande, pois esses materiais respondem muito bem aos diferentes ciclos de tratamento utilizados. Num mesmo aço, dependendo do tratamento térmico, podem-se obter níveis de resistência mecânica, dureza, ductilidade e tenacidade muito variados, permitindo, por exemplo, amolecer o material para usinagem e posteriormente endurecê-lo para obter alta resistência. Essa é uma das razões pelas quais a utilização comercial do aço é muito maior que a de outros materiais.

Uma grande variedade de tratamentos térmicos e termoquímicos pode ser utilizada em aços, podendo-se, grosso modo dividi-los em dois grupos:

1. Tratamentos de amolecimento
2. Tratamentos de endurecimento

Amolecimento

O amolecimento é feito para reduzir a dureza, remover tensões residuais, melhorar a tenacidade ou quando se deseja refinar o grão do material.

Em decorrência dos processos de fabricação, por laminação a frio ou trefilação os aços endurecem (encruamento) e é necessário restaurar sua ductilidade ou remover as tensões residuais existentes. Em estruturas soldadas, freqüentemente é necessário fazer-se um tratamento térmico de amolecimento pós-soldagem visando diminuir a dureza de uma zona endurecida e fragilizada (denominada zona termicamente afetada) para restaurar a tenacidade do material.

Endurecimento

O endurecimento dos aços é feito para aumentar a resistência mecânica e a resistência ao desgaste. O termo “resistência mecânica” pode ser empregado para: (a) resistência estática - capacidade de resistir a cargas de curta duração na temperatura ambiente, (b) resistência à fadiga - capacidade de resistir a cargas cíclicas ou flutuantes no tempo e (c) resistência à fluência - capacidade de resistir a cargas em temperaturas capazes de produzir alteração progressiva das dimensões, durante o período de aplicação da carga. A resistência ao desgaste resulta em menor perda de massa dos componentes metálicos em serviço, por atrito com outras peças.

A utilização do tratamento térmico de têmpera e revenimento permite obter elevada dureza e aumentar a resistência à fadiga e ao desgaste de engrenagens, girabrequins, comandos de válvula, molas, e outras partes móveis, existentes no interior de motores e sistemas de transmissão de veículos automotores.

O pré-requisito para endurecer um aço é que haja carbono suficiente para se conseguir o endurecimento. Havendo carbono suficiente na peça pode-se temperá-la para obter endurecimento superficial. Entretanto, para que haja penetração de dureza no interior da peça é necessária uma certa quantidade de elementos



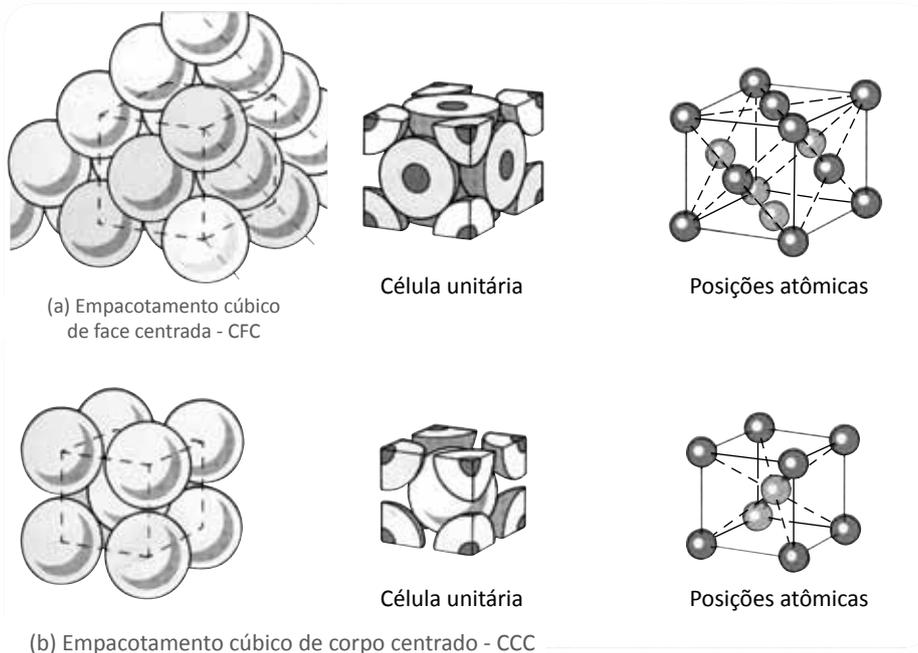
de liga, introduzidos no aço com a finalidade de aumentar a sua temperabilidade (profundidade de penetração de dureza por têmpera.)

As propriedades mecânicas dos aços são dependentes de sua microestrutura e um bom entendimento das etapas de formação dos microconstituintes durante e após tratamentos térmicos permite selecionar com maior conhecimento e propriedade, materiais e tratamentos térmicos para se obter os níveis de resistência mecânica desejados.

Estrutura cristalina

Os metais são constituídos por um aglomerado compacto de átomos, arranjados ordenadamente, denominado estrutura cristalina. Os átomos costumam ser representados por esferas rígidas como se fossem bolas de bilhar. Embora esta forma de representação seja bastante simplificada, ela é adequada para explicar as propriedades físicas e mecânicas dos metais.

Os aços são ligas ferro-carbono e para entender como os átomos de ferro e carbono formam a estrutura cristalina é preciso antes visualizar os aglomerados de átomos de ferro (raio atômico 140 pm) e as formas cristalinas que esse elemento pode assumir. Em temperaturas elevadas o aço apresenta uma estrutura, denominada cúbica de face centrada – CFC, mostrada na parte superior da figura abaixo. É formada por 8 átomos de ferro, situados nos vértices de uma célula unitária cúbica e por 6 átomos de ferro, situados nas faces do cubo. Veja que somente 1/8 de cada átomo situado nos vértices do cubo faz efetivamente parte da célula unitária. Da mesma forma, somente 1/2 de cada átomo situado no centro das faces fica no interior da célula unitária. Em temperaturas mais baixas os átomos de ferro se organizam de outra maneira formando uma estrutura cúbica de corpo centrado - CCC, com 8 átomos nos vértices da célula unitária cúbica e um único átomo no centro do cubo, como mostrado na parte inferior da figura abaixo.



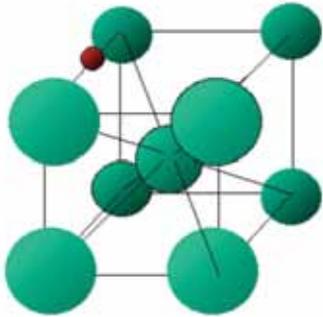
A estrutura CFC – denominada austenita ou fase γ - é estável desde temperaturas muito altas, logo após a solidificação do aço, passando pelas temperaturas de laminação ou forjamento (1000 a 1200°C), até a temperatura de 912°C. A 912°C ocorre a transformação do ferro CFC para a estrutura CCC – denominada ferrita ou fase α - estável até a temperatura ambiente.

A austenita, nos aços de baixa liga, não é uma fase estável na temperatura ambiente¹. Já a ferrita é estável e apresenta propriedades mecânicas de dureza e resistência muito baixas. Em compensação é uma fase que apresenta alta ductilidade e alta conformabilidade.

Praticamente todos os tratamentos térmicos realizados em aços se baseiam na transformação $Fe^{\gamma}_{CFC} \leftrightarrow Fe^{\alpha}_{CCC}$. Se essa transformação não existisse não haveria a possibilidade de endurecer os aços e obter materiais tão duros e tão resistentes ao desgaste e à fadiga.

O carbono, por sua vez é um átomo muito pequeno (raio atômico 70 pm), quando comparado com o átomo de ferro, que ocupa as posições vazias existentes no reticulado cristalino do ferro, chamadas posições intersticiais, como mostrado na figura ao lado.

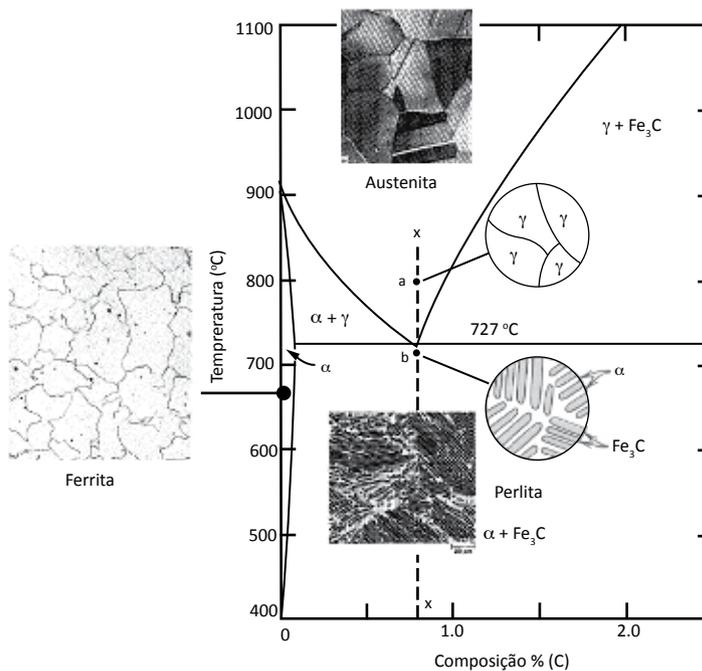
¹ A austenita pode aparecer como uma fase metaestável – austenita retida - nos aços temperados, no meio de plaquetas de martensita. Sua presença impede a obtenção de durezas elevadas nos aços temperados.



Quando o teor de carbono é mais alto o carbono se combina com o ferro formando uma fase cerâmica - carboneto de ferro Fe_3C , denominada cementita. A estrutura cristalina da cementita é complexa, com 16 átomos por célula unitária, 12 de ferro e 4 de carbono. É uma fase muito dura (1050 HV) e frágil e suas propriedades mecânicas são parecidas com as do vidro.

Diagrama de equilíbrio Fe-C

Existem diagramas que descrevem, para as ligas Fe-C, as faixas de temperaturas em que as fases ferrita, austenita e cementita são estáveis e as temperaturas em que ocorrem as transformações. Esses diagramas são chamados diagramas de equilíbrio. Através desse diagrama é possível prever quais fases se formam quando o aço é resfriado lentamente (no equilíbrio). Na figura abaixo o diagrama de equilíbrio Fe-C mostra que a ferrita é uma fase que aparece isolada somente para teores muito baixos de carbono $< 0,02\%C$. Nos aços em que o teor de carbono é maior que $0,02\%C$, ocorre precipitação de cementita (Fe_3C). A precipitação de cementita ocorre de forma alternada com a ferrita formando uma estrutura lamelar denominada perlita. Pode-se dizer que a perlita é um material compósito natural, pois é constituída de lamelas alternadas de ferrita e cementita.



Estrutura dos aços

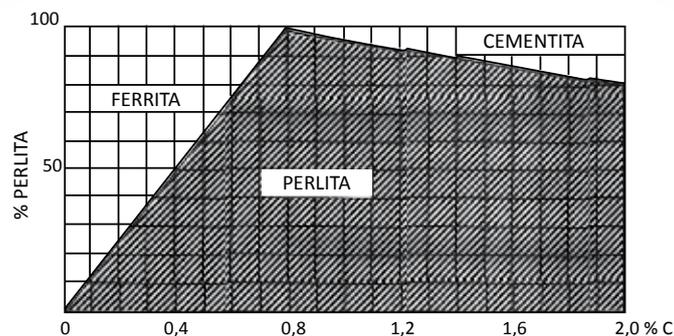
resfriados lentamente

Quando o teor de carbono é menor que 0,02 %C, o aço contém somente ferrita, sendo muito mole e dútil. Por outro lado os aços com 0,8% C apresentam na microestrutura 100 % de perlita. Se aumentarmos o teor de carbono dos aços entre 0,1 e 0,8%, teremos um aumento da quantidade de perlita e uma diminuição da quantidade de ferrita. Assim, um aço com 0,4% C tem aproximadamente 50% de ferrita e 50% de perlita.



Microestrutura de um aço com 0,4% C.
Ferrita e Perlita

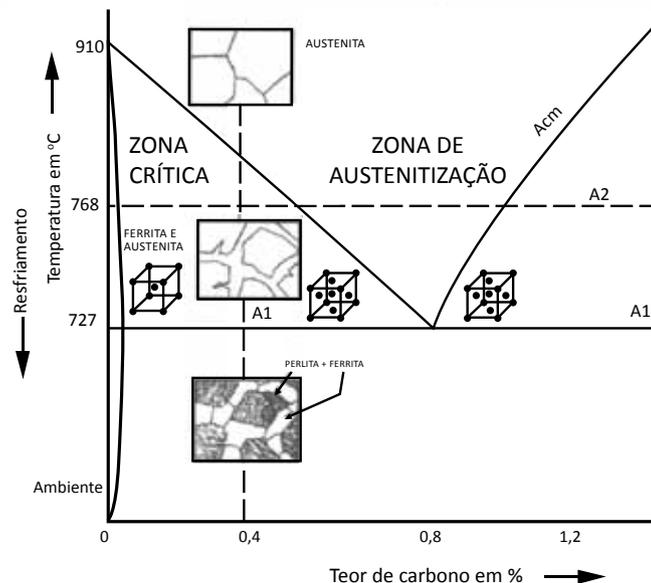
Pode-se colocar num gráfico a variação da quantidade de ferrita e perlita, em aços com teor de carbono entre 0 e 0,8% e a quantidade de cementita e perlita nos aços com teor de carbono maior 0,8%.



Variação da porcentagem de perlita em função do teor de carbono nos aços resfriados lentamente

Quando um aço contendo 0,4% C é aquecido acima de 727°C, dentro da zona crítica, a perlita existente na microestrutura se transforma em austenita e a ferrita continua estável. Se, entretanto, aquecermos acima de aproximadamente 830°C todo o material se transforma em austenita.

Se agora resfriarmos o material lentamente a austenita começa a se transformar em ferrita, dentro da zona crítica, e finalmente a 727 °C toda austenita se transforma em perlita.



A cementita endurece o aço e a ferrita o mantém tenaz. A dureza da perlita é intermediária entre a dureza da ferrita e da cementita, como se vê na tabela abaixo.

Microconstituente	Dureza (HV)
Ferrita (Fe- α)	90
Cementita (Fe ₃ C)	1050
Perlita (α + Fe ₃ C)	230

As propriedades mecânicas dos aços carbono resfriados lentamente variam com o teor de carbono. Quanto maior é o teor de carbono maiores são o limite de escoamento, o limite de resistência e a dureza e menor é a ductilidade, como pode ser visto no gráfico abaixo.

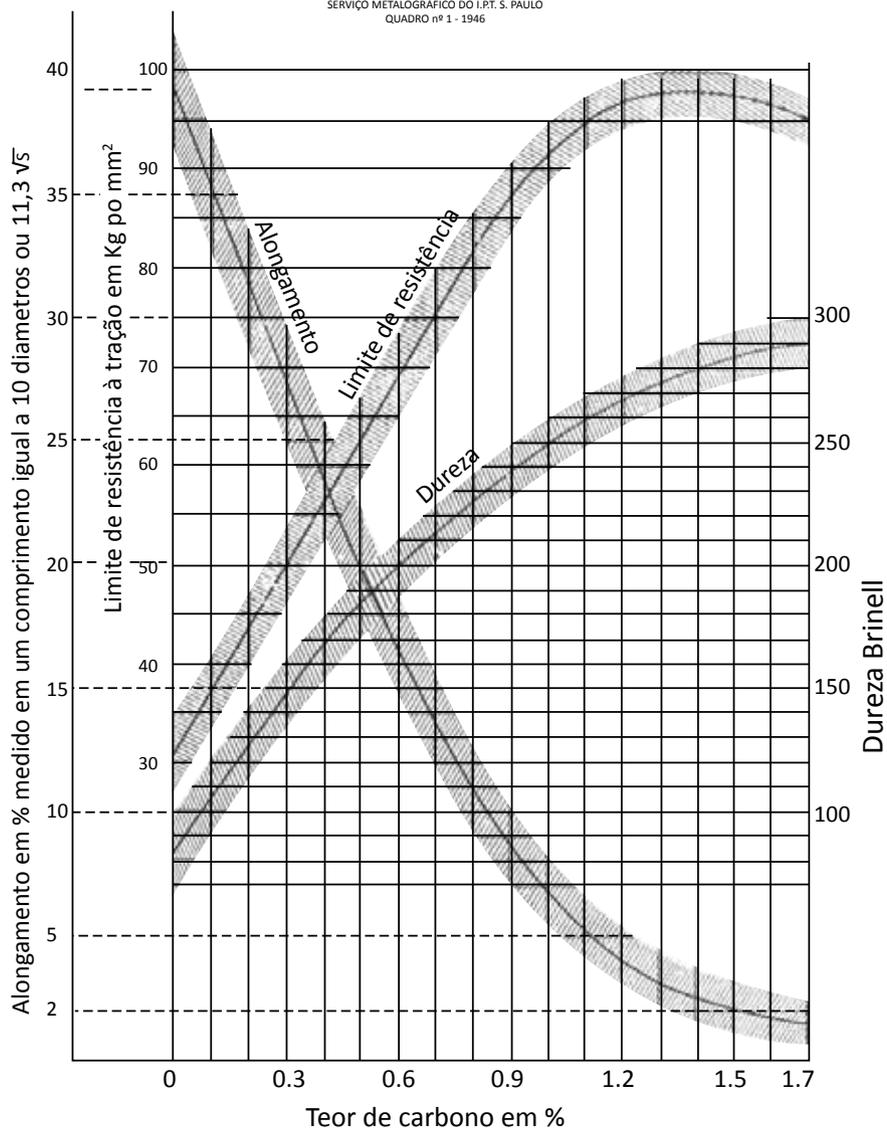
Essa variação grande de propriedades gera famílias diferentes de materiais. Um material muito bom para uma certa aplicação pode ser totalmente inadequado para outra. Se, por exemplo, compararmos as vigas metálicas utilizadas na construção de uma ponte, com os trilhos de trem que serão fixados aos dormentes de madeira, assentados sobre a plataforma de uma ponte, vemos que as vigas devem ter resistência mecânica suficiente para aguentar as cargas aplicadas (trem de carga passando sobre a ponte). O projetista sabe, entretanto, que o material selecio-

nado deve ter tenacidade à fratura e resistir à formação e propagação de trincas. Além disso, a estrutura deve poder ser soldada, pois esse é o método construtivo de menor custo para este tipo de ponte. O aço selecionado seria um aço C-Mn - ASTM A572 grau 50, contendo no máximo 0,23% C, sob pena de não apresentar soldabilidade suficiente para a finalidade.

GRÁFICO MOSTRANDO APROXIMADAMENTE A VARIAÇÃO DE ALGUMAS MECÂNICAS DOS AÇOS COMUNS, ESFRIADOS LENTAMENTE. EM FUNÇÃO DO TEOR DE CARBONO

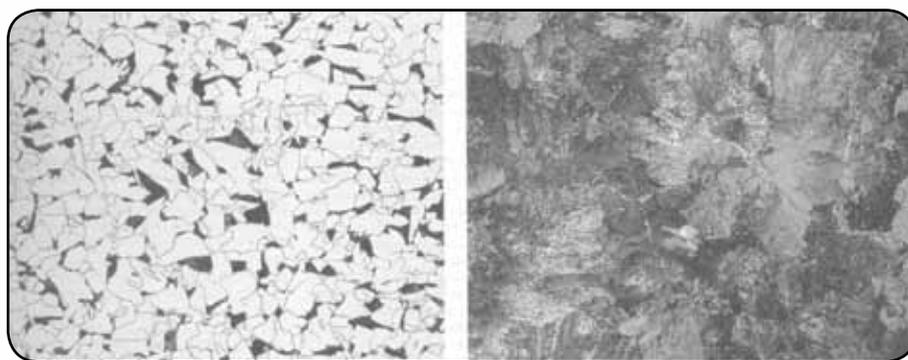
AÇOS LAMINADOS OU FORJADOS

SERVIÇO METALGRÁFICO DO I.P.T. S. PAULO
QUADRO Nº 1 - 1946



Varição das propriedades mecânicas dos aços resfriados lentamente, com o teor de carbono. [Colpaert, H.]
Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns – Ed. Edgar Blücher, 1970.

Já o aço do trilho deve apresentar além de elevada resistência mecânica, elevada resistência ao desgaste, pois as rodas do trem trabalham diretamente, sobre o trilho, e o contato metal-metal não lubrificado constitui a solitação crítica. Os aços para trilho utilizados hoje em dia são 100% perlíticos e para tanto devem conter aproximadamente 0,8 % C.



Aço ARBL - ASTM A572 grau 50, com 0,23 %C max, utilizado para fabricar vigas estruturais, 200X.

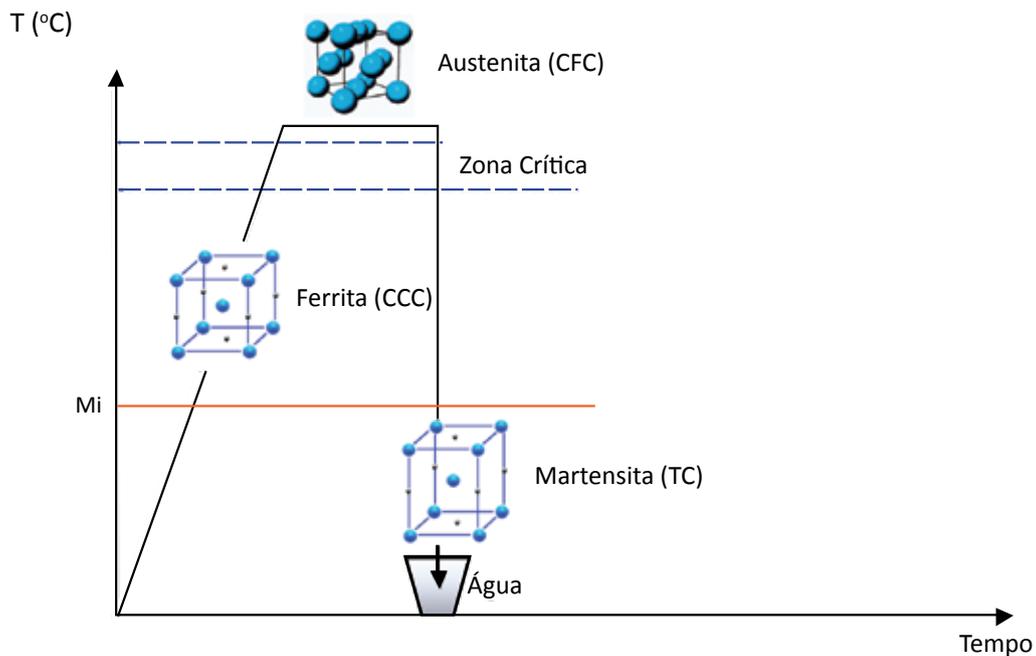
Aço 1080, com 0,8%C, 100% perlítico, utilizado para fabricar trilhos de trem. 500X.

Têmpera do aço

O artefato temperado mais antigo, datado de 1.100 AC, foi encontrado em ruínas arqueológicas, na ilha de Chipre. Entretanto, a têmpera do aço parece ter sido desenvolvida mais amplamente pelos romanos, para endurecer e aumentar a resistência ao desgaste de ferramentas. O processo foi descoberto casualmente. Os ferreiros após martelarem suas ferramentas a quente esfriavam-nas em água para que não ficassem quentes dentro da oficina. Após a têmpera a ferramenta se tornava muito dura. Os povos antigos passaram a usar a têmpera para endurecer armas brancas, tais como espadas, facas, sabres, etc.

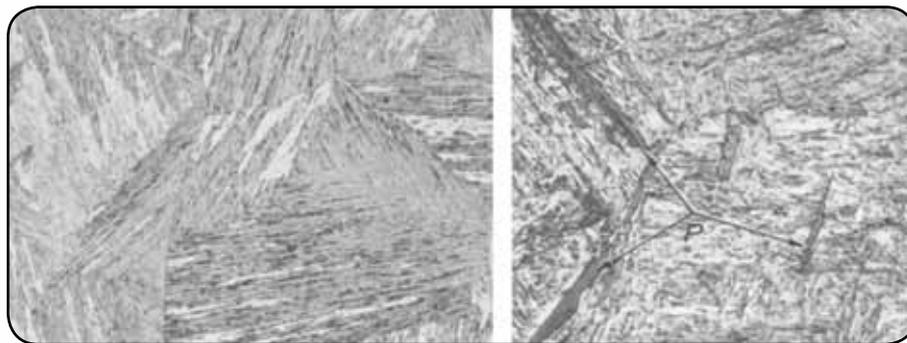


A têmpera consiste em aquecer o aço até uma temperatura acima da zona crítica (austenitização), mantê-lo nesta temperatura por um certo tempo e em seguida resfria-lo bruscamente.



Abaixo de uma temperatura M_i de início de formação de martensita forma-se uma estrutura muito dura e frágil denominada martensita, com reticulado TC - tetragonal compacto.

A estrutura martensítica é formada por agulhas ou placas muito finas como se vê na Figura abaixo.

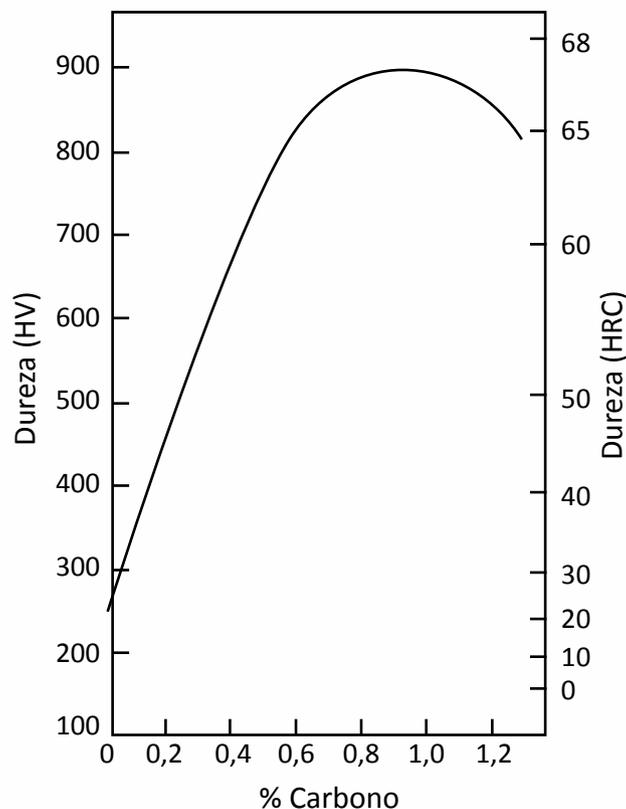


2% nital - 100X

2% nital - 1000X

Somente na metade do século passado começou-se a entender porque o aço endurece quando resfriado bruscamente. O reticulado TC é um reticulado CCC distorcido devido ao excesso de carbono contido. A ferrita tem capacidade muito pequena de dissolver carbono no reticulado. Já a austenita pode dissolver, em alta temperatura, todo o carbono contido no aço. Durante o resfriamento, não há tem-

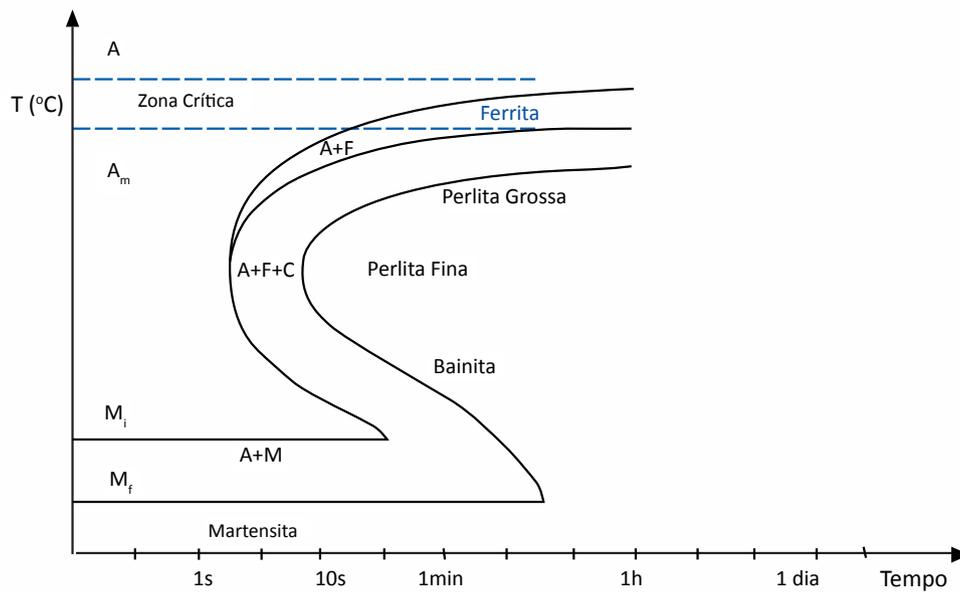
po suficiente para a austenita se transformar novamente em ferrita ou cementita e o carbono em excesso fica retido na estrutura martensítica, promovendo forte distorção e introduzindo tensões elevadas no reticulado. As tensões internas são tanto maiores quanto maior o teor de carbono em excesso, sendo responsáveis pelo aumento de dureza do aço.



A figura acima mostra a variação da dureza dos aços temperados com o teor de carbono. Dependendo do teor de carbono do aço é possível obter durezas que vão de 20 HRC até aproximadamente 67 HRC. Nos aços de muito alto teor de carbono não se obtém durezas mais elevadas devido à retenção de austenita (quando nem toda austenita se transforma para martensita).

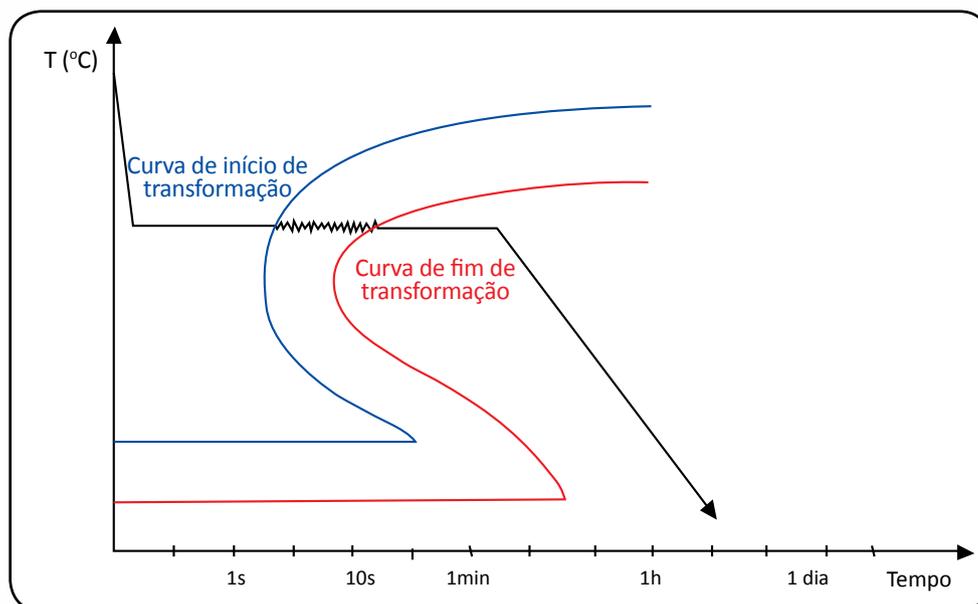
Curvas TTT

Quando os aços são resfriados com velocidades intermediárias outras microestruturas se formam. Para descrever o que ocorre durante o resfriamento dos aços submetido a tratamentos isotérmicos, utilizam-se as curvas TTT – Temperatura, Tempo, Transformação. São diagramas que relacionam as temperaturas e os tempos de início e fim de transformação. É possível localizar nas curvas as regiões em que se formam ferrita, perlita, bainita e martensita.



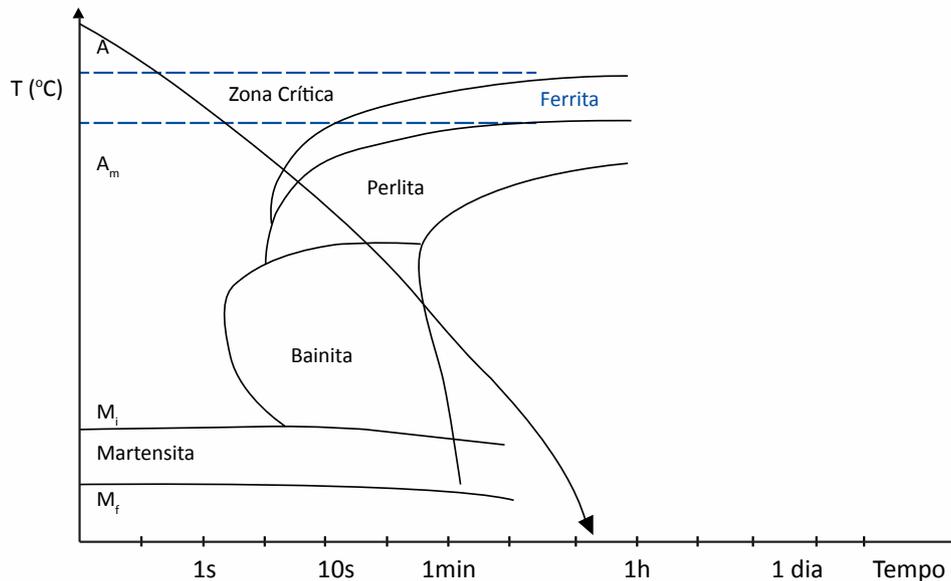
A curva TTT abaixo mostra a representação de uma transformação de fase durante um ciclo térmico. A curva mais à esquerda (azul) corresponde ao início das transformações e a mais à direita (cor vermelha) ao fim das transformações. Nas duas curvas existem duas retas horizontais denominadas respectivamente M_i e M_f . São as temperaturas de início e fim de transformação martensítica.

Quando uma curva de resfriamento cruza a curva TTT a transformação ocorre, na região assinalada por um serrilhado. Sabemos qual a estrutura é formada analisando-se em que região da curva TTT ocorreu a transformação.

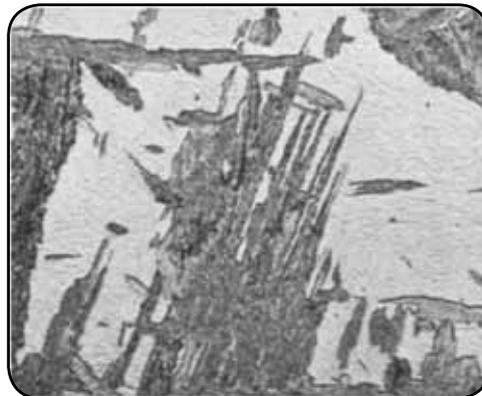


Curvas RC

Para tratamentos térmicos industriais, em que raramente as temperaturas são mantidas constantes e as peças são continuamente resfriadas desde a temperatura de austenitização até a temperatura ambiente, utilizam-se curvas de resfriamento contínuo que descrevem as transformações em resfriamento contínuo.



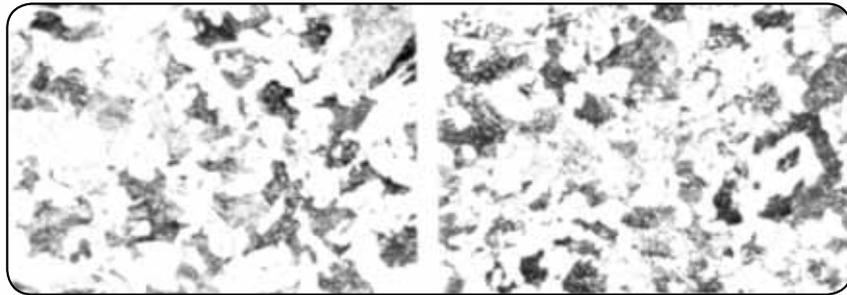
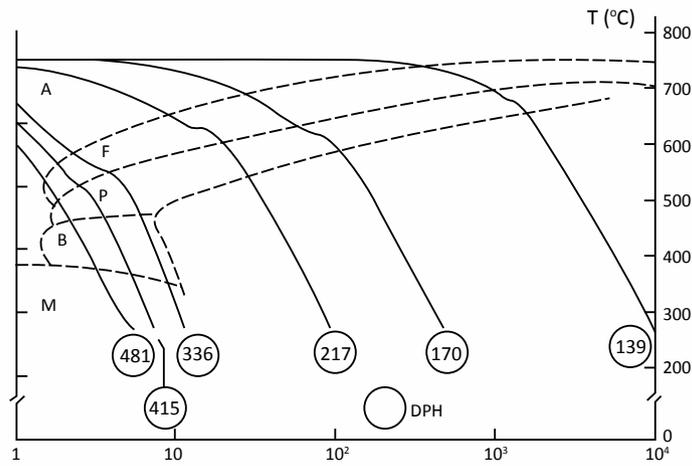
A bainita é uma estrutura acicular que se forma em uma região intermediária entre a de formação de perlita e a de martensita. Possui elevada dureza e boa tenacidade.



2% nital - 500X

No tratamento térmico indicado na curva RC acima haverá formação de uma mistura de ferrita, perlita e bainita na microestrutura do aço.

Nos tratamentos térmicos industriais, em que o resfriamento do aço é contínuo podem-se formar misturas de microestruturas, como mostra a série de 6 curvas de resfriamento superpostas à curva RC. Os números indicados correspondem à dureza Vickers alcançada após cada um dos tratamentos térmicos indicados.

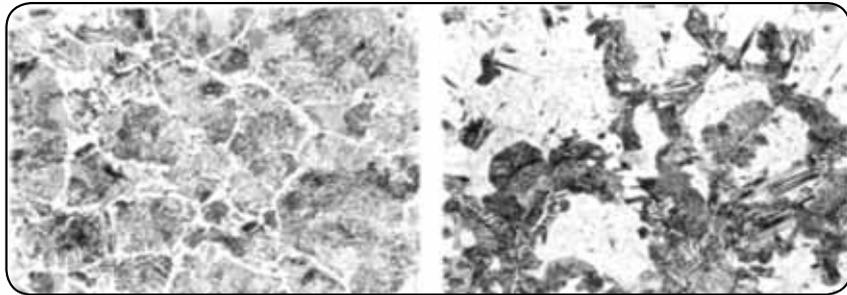


(a)

DPH = 139

(b)

DPH = 170

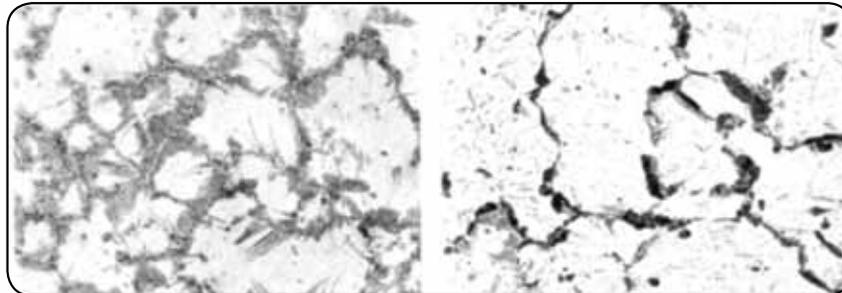


(c)

DPH = 217

(d)

DPH = 336



(e)

DPH = 415

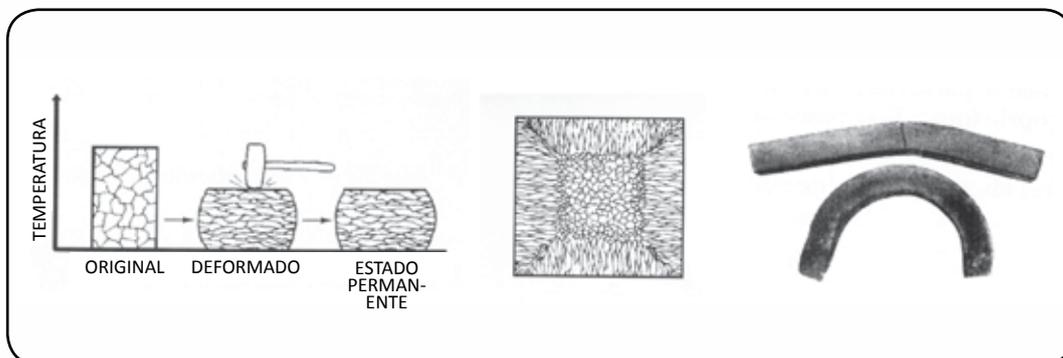
(f)

DPH = 481

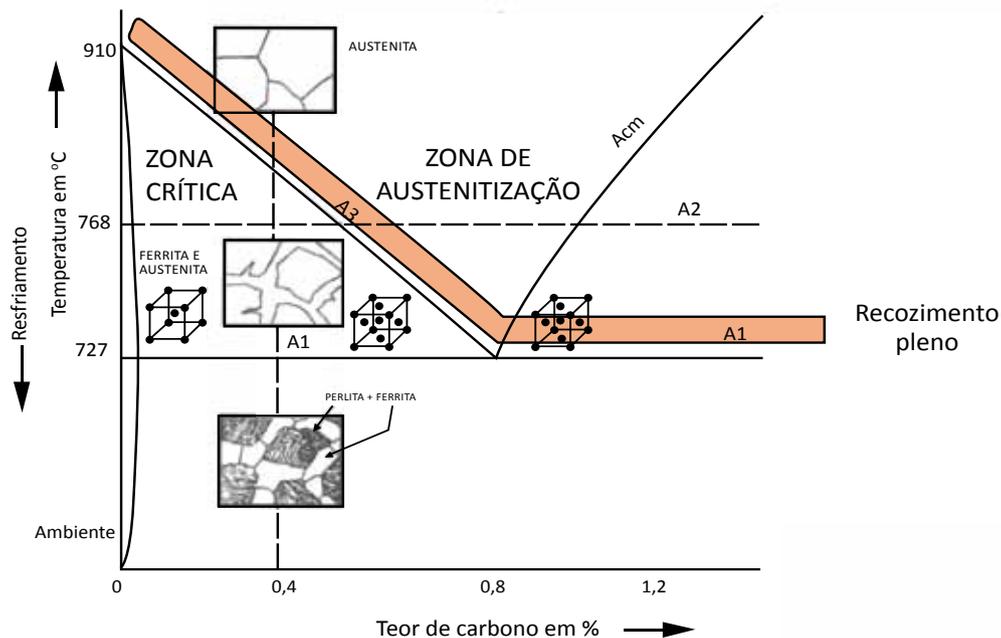
Microestruturas formadas após resfriamento com seis diferentes velocidades de resfriamento indicadas na figura anterior. Os números DPH são as durezas Vickers de cada estrutura.

Recozimento pleno

Em consequência dos processos de fabricação (fundição, lingotamento convencional, superaquecimento, etc.) as barras e tarugos de aço podem acumular tensões e apresentar microestruturas heterogêneas com exagerado tamanho de grão e dureza elevada. O recozimento pleno é feito com o objetivo de reduzir o máximo a dureza do aço. Por meio do recozimento pleno é possível aumentar a ductilidade e a usinabilidade do aço além de controlar seu tamanho de grão. Utiliza-se este tratamento quando na sequência de fabricação o aço deve sofrer elevado grau de deformação ou a peça deve ser usinada. O recozimento pleno garante ductilidade a peças que em outras circunstâncias apresentariam comportamento frágil.



O recozimento pleno consiste em elevar lentamente a temperatura do aço até aproximadamente 50 °C acima da zona crítica (austenitização total), no caso dos aços com teor de carbono menor que 0,8%. A formação de austenita em alta temperatura destrói todas as estruturas existentes anteriormente ao aquecimento. No resfriamento formam-se a ferrita e a perlita grossa que garantem amolecimento do material. Para os aços com teor de carbono maior que 0,8% (52100) o recozimento é feito em temperatura 50 °C acima do limite inferior da zona crítica.



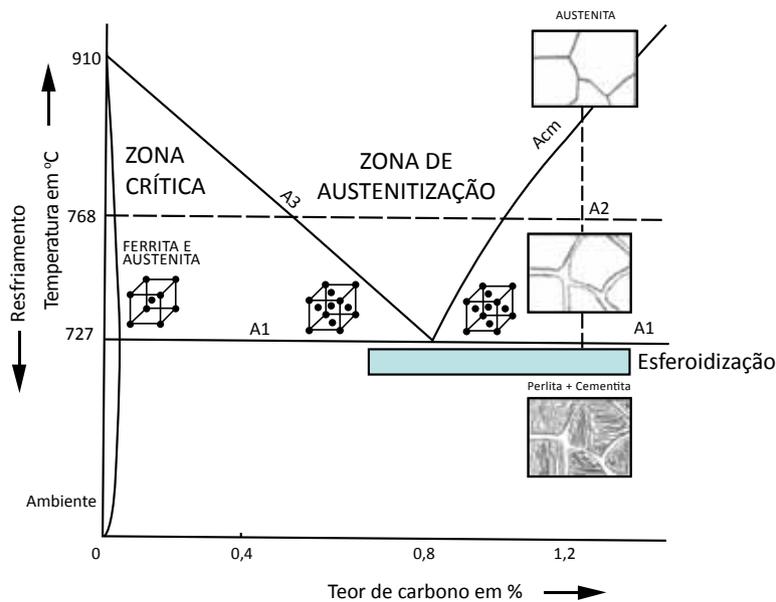
O aço é mantido na temperatura por um tempo suficiente para que a estrutura se torne austenítica ou uma mistura de austenita + cementita e em seguida é resfriado dentro do forno com uma velocidade de aproximadamente 25 °C/h, até aproximadamente 50 °C abaixo da zona crítica. A partir desta temperatura o aço pode ser resfriado ao ar. É importante que a passagem pela faixa de temperaturas em que ocorre a transformação seja bastante lenta para que se forme perlita grossa, perlita esferoidizada e cementita esferoidizada na estrutura do material. Na tabela abaixo é possível obter as temperaturas de austenitização e os ciclos de resfriamento para aços com diferentes teores de carbono, bem como suas durezas.

AÇOS-CARBONO ABNT (AISI)	TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO °C	CICLO DE RESFRIAMENTO* DE ATÉ		FAIXA DE DUREZA (BRINELL)
1020	855° - 900°	855°	700°	111 - 149
1025	855° - 900°	855°	700°	111 - 149
1030	840° - 885°	840°	650°	126 - 197
1035	840° - 885°	840°	650°	137 - 207
1040	790° - 870°	790°	650°	137 - 207
1045	790° - 870°	790°	650°	156 - 217
1050	790° - 870°	790°	650°	156 - 217
1060	790° - 840°	790°	650°	156 - 217
1070	790° - 840°	790°	650°	167 - 229
1080	790° - 840°	790°	650°	167 - 229
1090	790° - 830°	790°	650°	167 - 229
1095	790° - 830°	790°	660°	167 - 229

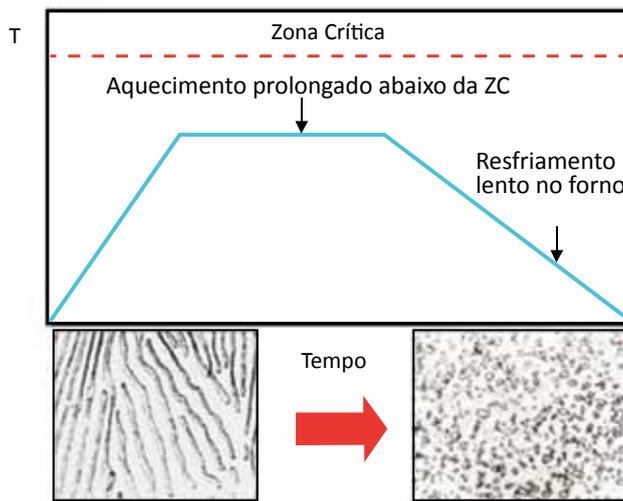
*Resfriamento a 25°C/h, no interior do forno.

Esferoidização

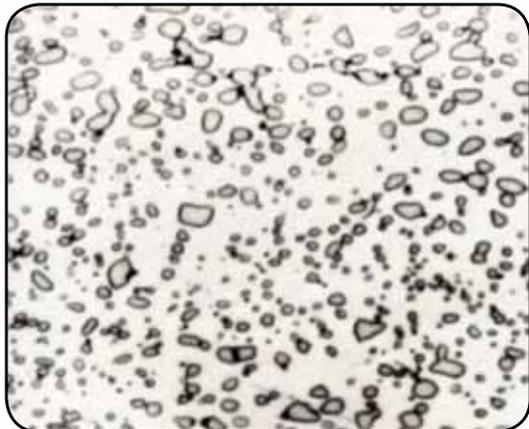
Os aços de alto carbono % C > 0,8% (p.e aços para rolamento) apresentam uma rede frágil de cementita precipitada nos contornos da perlita. Esta quantidade maior de cementita presente nestes aços torna-os difíceis de usar. Para melhorar sua usinabilidade faz-se um tratamento de esferoidização. O tratamento é assim chamado porque as partículas de cementita tornam-se esféricas após tempos prolongados de exposição a temperaturas ligeiramente subcríticas. O tratamento produz cementita esferoidal em uma matriz de ferrita, eliminando a presença de perlita e a rede de carbonetos frágeis anteriormente existentes na microestrutura.



O tratamento consiste em aquecimento do aço até uma faixa de temperaturas 50°C abaixo da zona crítica, manutenção prolongada (várias horas) nesta temperatura e resfriamento lento dentro do forno.



Esta estrutura confere mínima dureza e máxima usinabilidade.



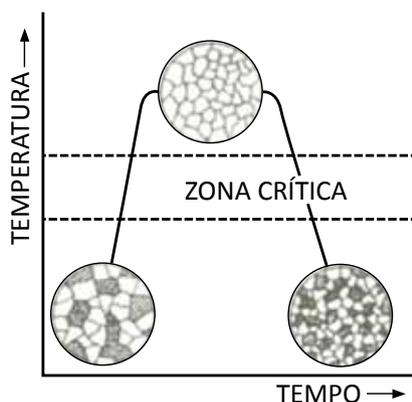
Os aços de baixo teor de carbono quase nunca são esferoidizados porque são muito moles e deformáveis e empastam a ferramenta, provocando seu aquecimento e desgaste excessivo.

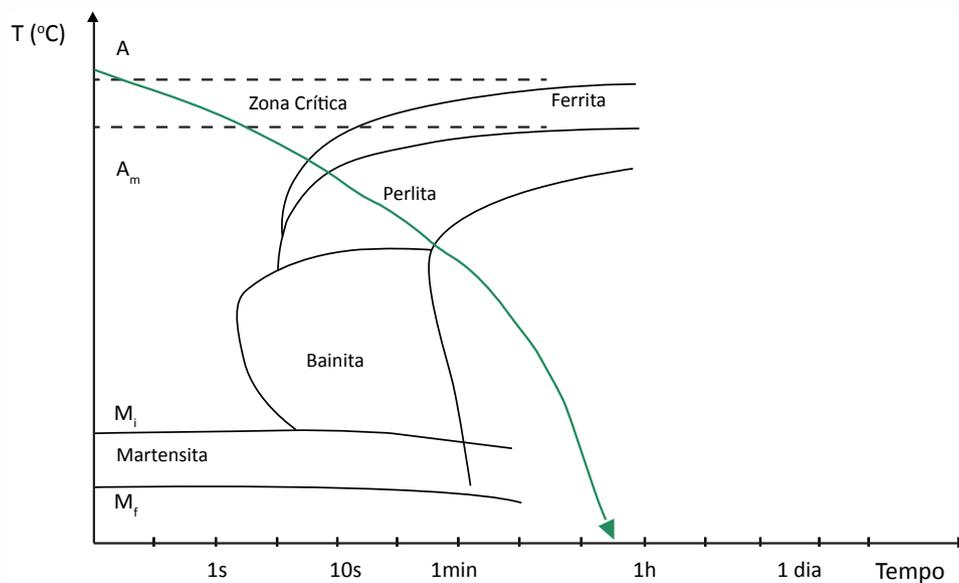
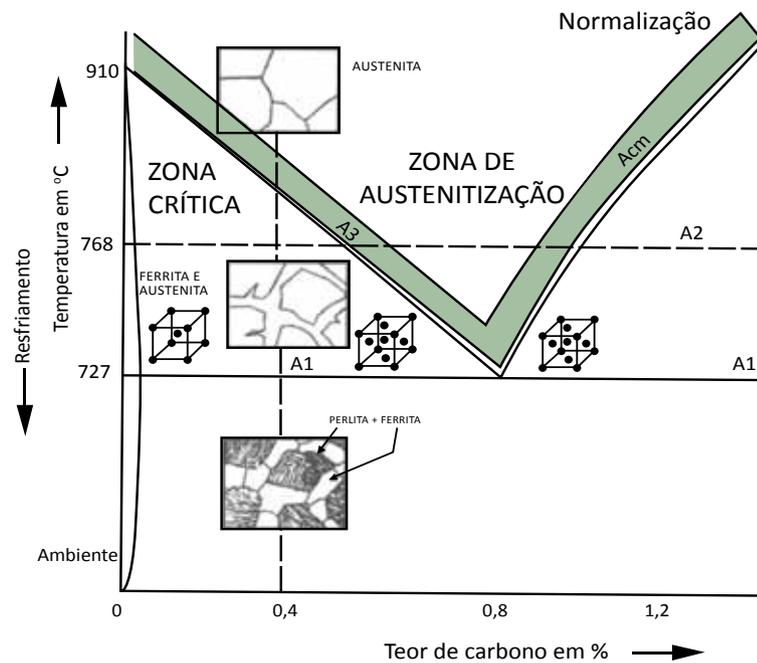
Alívio de tensões

O aquecimento dos aços para alívio de tensões é feito para reduzir tensões residuais introduzidas por usinagem pesada ou conformação mecânica a frio. Muitas vezes é também chamado de recozimento subcrítico. Geralmente é feito em temperaturas subcríticas e através deste tratamento consegue-se aumentar a ductilidade, melhorar a usinabilidade, remover tensões residuais, através da redução da dureza, do limite de escoamento e do limite de resistência do material.

Normalização

A normalização do aço é feita quando se deseja refinar o grão do material. O aço com grãos grandes tende a apresentar maior heterogeneidade de propriedades e maior fragilidade. O refino de grão garante maior homogeneidade de propriedades, e maior tenacidade. O tratamento térmico de normalização consiste no aquecimento do aço até 60 °C acima do limite superior da zona crítica (A_3 ou A_{cm}), sempre garantindo austenitização total do material. Em seguida é retirado do forno e deixado resfriar ao ar natural. A estrutura resultante é de pequenos grãos de ferrita e perlita fina. Esse tratamento é bem mais barato que o de recozimento pleno, pois o forno pode ser desligado logo após o fim do período de austenitização.





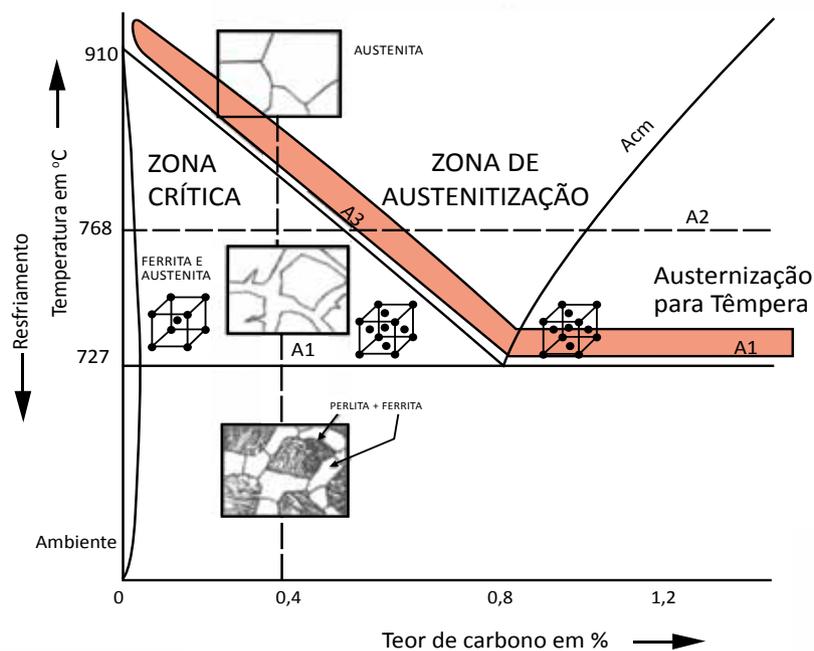
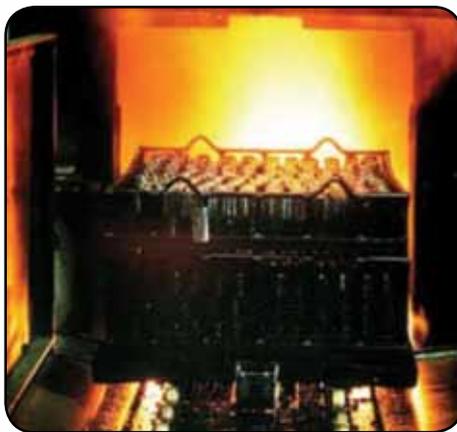
A principal diferença entre os tratamentos de recozimento pleno e de normalização é que as peças tratadas em recozimento pleno apresentam ductilidade e usinabilidade homogêneas em todas as regiões, já que a peça toda fica exposta ao ciclo de resfriamento. Já no caso da peça normalizada a velocidade de resfriamento não é uniforme. Seções mais espessas resfriam mais lentamente do que seções mais finas. Como a velocidade de resfriamento é heterogênea, a microestrutura e as propriedades (usinabilidade e conformabilidade) também o são. Caso se deseje usar a peça nas etapas subsequentes de fabricação é melhor fazer o recozimento pleno.

Tratamentos para endurecimento do aço

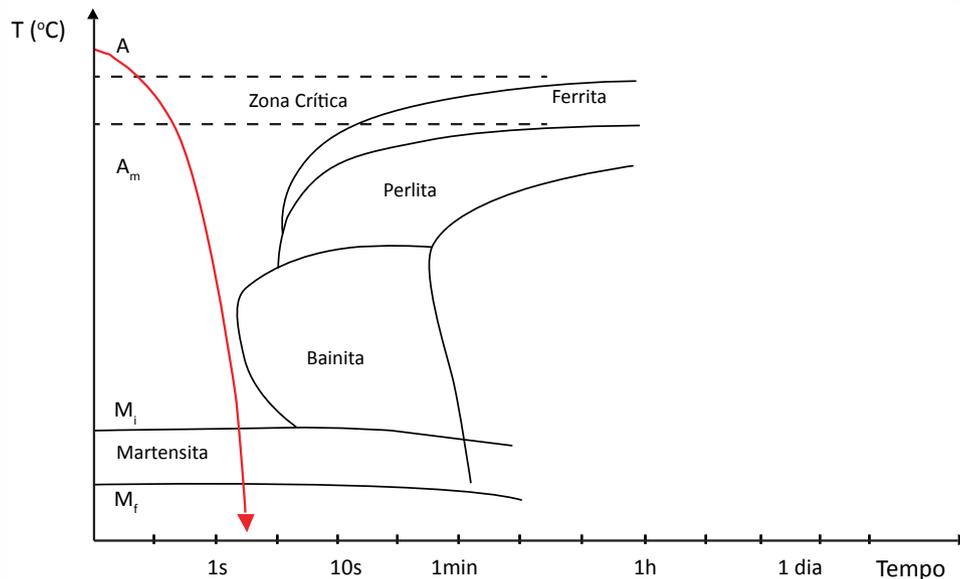
Os tratamentos de endurecimento visam aumentar a resistência mecânica dos aços.

Têmpera

O tratamento consiste em aquecimento até uma temperatura 50 °C acima da temperatura crítica (a mesma faixa utilizada para recozimento pleno) e em seguida resfriá-lo bruscamente em água, óleo ou em meios de têmpera de composição química especial.

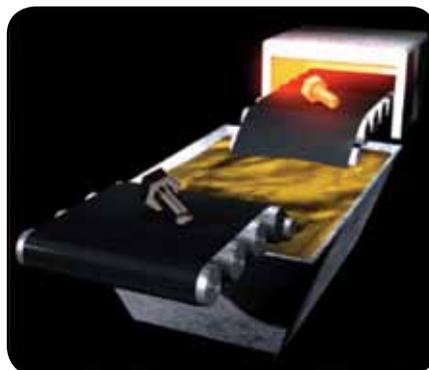


O objetivo do tratamento de têmpera é obter martensita na estrutura do aço, microconstituente muito duro e frágil. Para tanto, as peças devem ser resfriadas rapidamente, para evitar a formação de ferrita, perlita, bainita, microconstituente mais moles que a martensita.

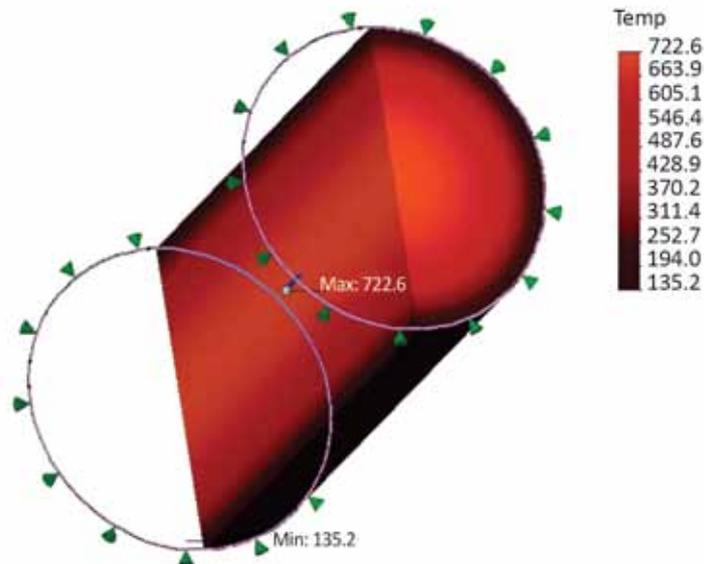


Quando se faz o resfriamento brusco do aço, durante a têmpera, ocorre choque térmico devido à passagem da peça de temperaturas de 850 a 900 °C para a temperatura ambiente, em poucos segundos.

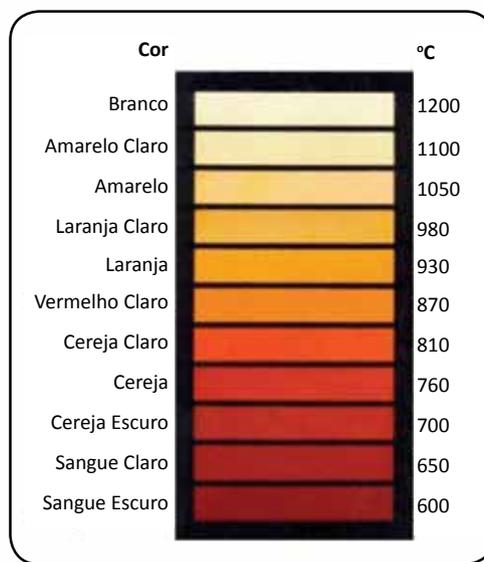
O resfriamento brusco pode causar distorções e até mesmo trincas na peça, denominadas trincas de têmpera. Entretanto, o resfriamento deve ser rápido o suficiente para garantir que se forme martensita na superfície do material. O tempo disponível para resfriamento é dado pela distância do cotovelo da curva RC ao eixo das temperaturas. Quanto mais deslocada para a direita a curva RC, mais fácil é temperar o aço.



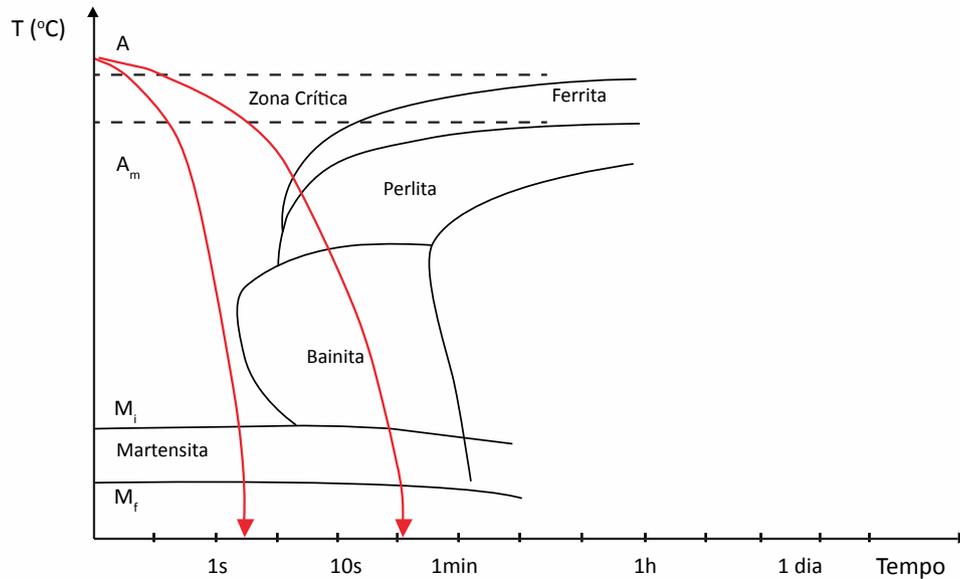
Quando a velocidade de resfriamento é alta, estabelecem-se grandes diferenças de temperatura entre a superfície e o centro da peça, pois a superfície em contato direto com o meio refrigerante resfria rápido, enquanto o núcleo resfria mais lentamente.



Assim, quando se faz tratamentos térmicos de peças médias e grandes deve-se sempre levar em consideração que o núcleo e a superfície, submetidos a diferentes velocidades de resfriamento, podem apresentar microestruturas e propriedades mecânicas muito diferentes.

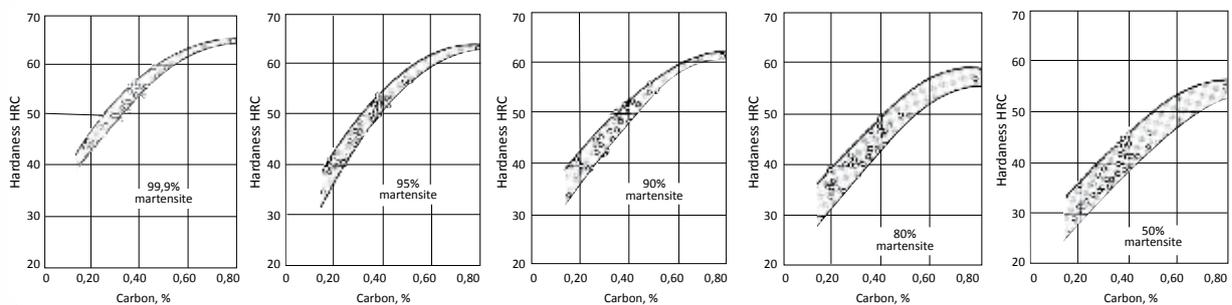


Isso pode ser visto na Curva RC abaixo, em que a superfície da peça apresenta martensita e o núcleo uma mistura de ferrita, perlita, bainita e martensita.

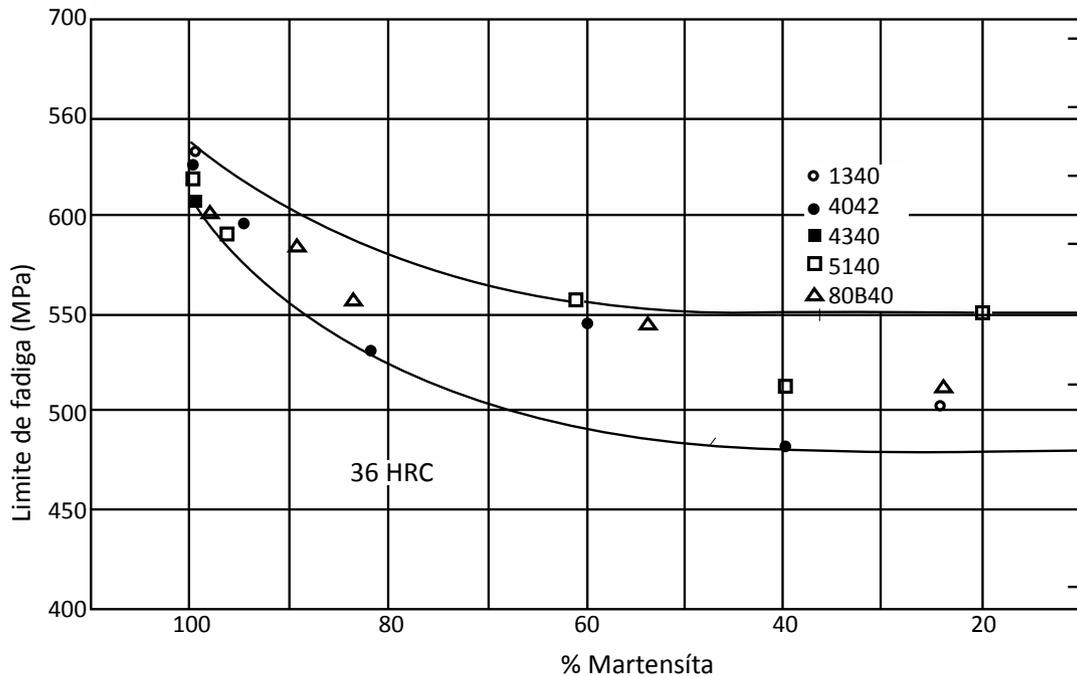


Pode-se observar que a transformação do aço na superfície ocorre em apenas 3 segundos enquanto no núcleo inicia após 8 segundos e somente termina após aproximadamente 30 segundos.

Em princípio é possível obter o mesmo valor de dureza em aços temperados com diferentes teores de carbono. É possível obter dureza de 50 HRC com 99,9% de martensita e 0,25% C ou com 95% de martensita e 0,35% C, ou com 90% de martensita e 0,4% C, ou com 80% de martensita e 0,45% C ou ainda com 50% de martensita e 0,6% C. Na Figura abaixo observa-se que quanto maior é o teor de carbono do aço, maior é a dureza da martensita obtida.



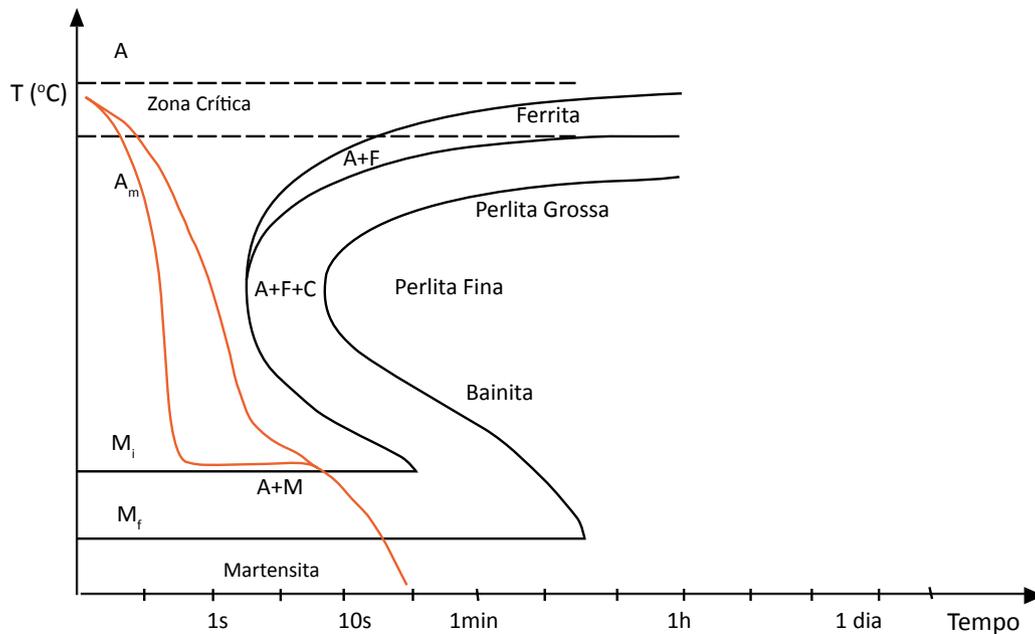
É preciso ter em mente que quanto maior é o teor de carbono mais frágil é o aço. Da mesma forma, quanto mais heterogênea é a estrutura do aço (mistura de martensita, bainita, perlita e ferrita) menor é a sua resistência à fadiga. Desta forma a seleção do material deve sempre ser feita adotando-se o menor teor de carbono compatível com a dureza desejada.



Martêmpera

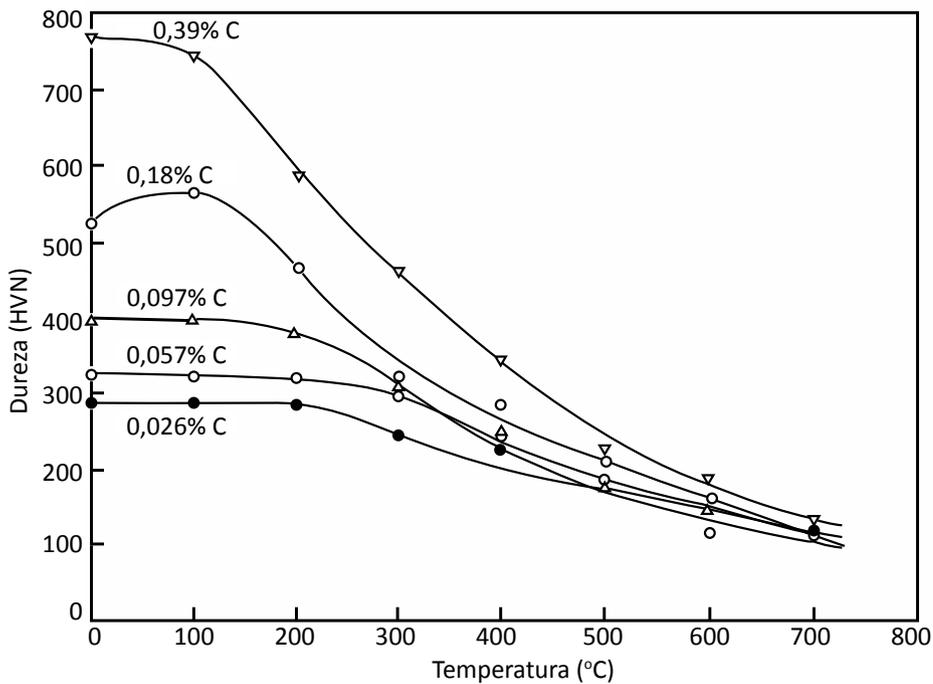
Muitas vezes é conveniente submeter o aço a um tratamento de martêmpera, que permite eliminar a diferença de temperaturas e tempos de transformação entre a superfície e o núcleo do aço. A martêmpera consiste na austenitização do aço nas temperaturas usuais seguida de têmpera em óleo aquecido ou em banho de sais em uma temperatura logo acima da temperatura M_i . O tempo de manutenção nesta temperatura deve ser suficiente para equalizar a temperatura em toda a peça, sem, entretanto, deixar que ocorra a transformação bainítica. Este tratamento é feito com o objetivo de minimizar as distorções e as tensões residuais decorrentes das diferenças de temperatura na superfície e no interior da peça.

A microestrutura final é martensítica, de alta dureza e baixa tenacidade. Da mesma forma que na têmpera convencional, esse tratamento deve ser seguido de revenimento para aumentar a tenacidade.



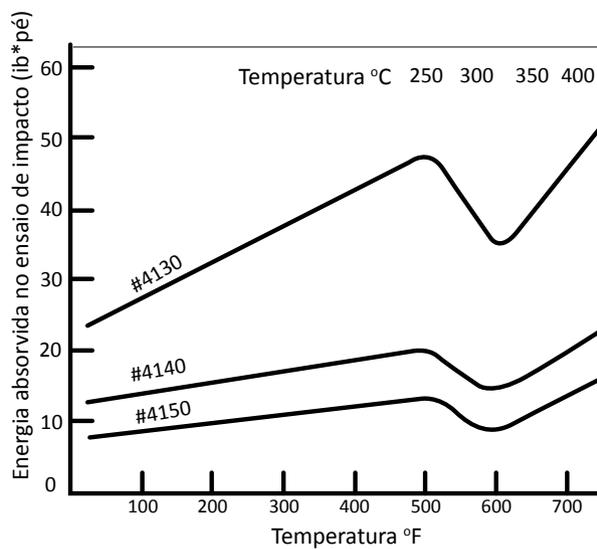
Revenimento

O tratamento de têmpera torna as peças muito duras, porém muito frágeis. Salvo raras exceções as peças temperadas são sempre revenidas, visando baixar a dureza e aumentar a tenacidade. Durante o revenido, a martensita com estrutura TC perde o excesso de carbono em solução e seu reticulado cristalino vai se tornando mais próximo do da ferrita, sem distorção e sem acúmulo de tensões mecânicas. Quanto mais alta a temperatura de revenido, menor é a distorção do reticulado, menor é a dureza e maior é a tenacidade do aço. Nos aços para construção mecânica, de baixa liga e alta resistência, a dureza cai continuamente com a temperatura de revenido, como mostra a figura na página seguinte.



Existe uma faixa de temperaturas em que o revenido deve ser evitado pois, a tenacidade é bastante prejudicada. Este fenômeno chama-se fragilidade azul ou fragilidade dos 500 °F (260 °C). O nome fragilidade azul deve-se ao fato de que na faixa de temperaturas em que essa fragilidade ocorre, forma-se uma película de óxido azulada, conforme se vê na tabela abaixo, que mostra as cores do revenido de aços ao carbono. A figura abaixo mostra a queda de energia absorvida no ensaio de impacto, na faixa de temperaturas entre 260 e 375 °C (500 a 700 °F).

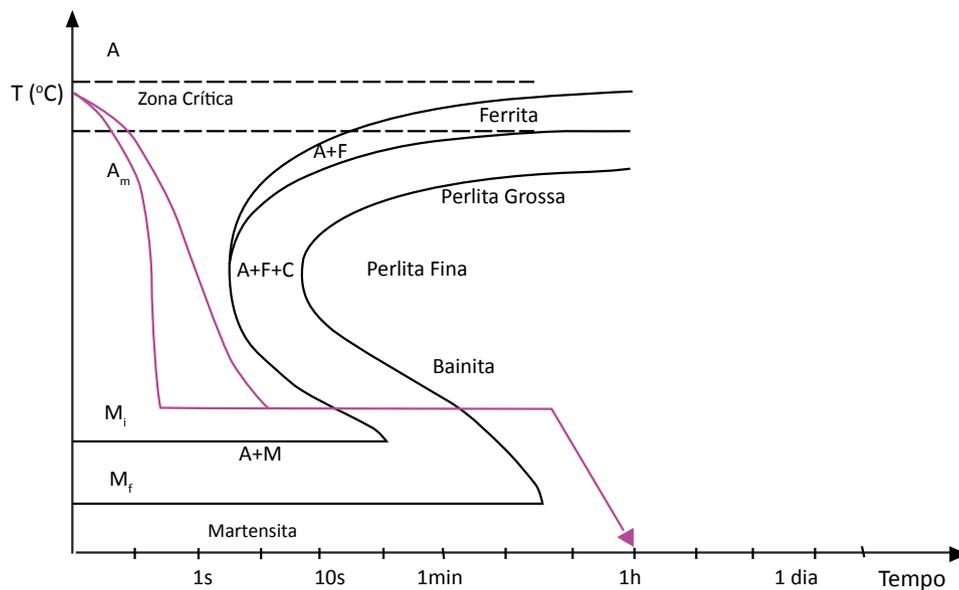
Color	Celsius
Lightest Yellow	216°
Light Yellow	221°
Yellow	227°
Light Orange	232°
Yellow-Orange	238°
Orange	243°
Light Red	249°
Orange-Red	254°
Red	260°
Dark Red	266°
Red-Orange	271°
Red	277°
Dark Red	282°
Red-Orange	288°
Red	293°
Dark Red	299°
Dark Red	310°
Dark Red	321°
Dark Red	332°
Dark Red	338°
Dark Red	343°



Austêmpera

A austêmpera é também, um tratamento térmico para endurecimento de aços. Na austêmpera, após austenitização feita de maneira semelhante àquela realizada para têmpera convencional, o aço é mergulhado em um banho constituído de uma mistura de sais fundidos, mantido a temperatura constante, entre 250 e 450 °C. O resfriamento feito em banho de sais visa evitar a formação de ferrita e perlita e induzir a formação de bainita nas peças.

A bainita é uma estrutura que tem dureza semelhante à da martensita revenida, porém, maior tenacidade. Se compararmos duas barras de um mesmo aço, uma temperada em óleo e revenida a 200 °C e outra austemperada a 325 °C, ambas com a mesma dureza de 54 HRC, a barra temperada apresenta menor valor de energia absorvida no ensaio de impacto que a barra austemperada, portanto menor resistência ao impacto.



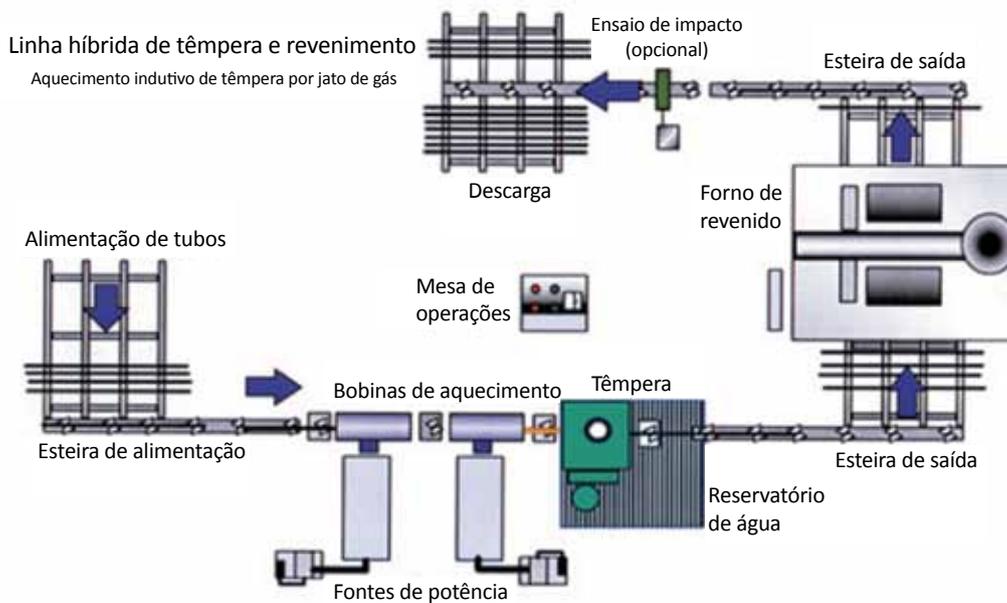
Na Figura abaixo se vê uma peça sendo introduzida em banho de sais fundidos para tratamento de austêmpera



Têmpera por indução

A têmpera por indução é uma técnica de endurecimento superficial bastante utilizada em aços. O aquecimento da peça é feito superficialmente por indução. Uma ou mais bobinas, alimentadas por fontes de potência induzem correntes elétricas na superfície do aço a ser tratado. As correntes aquecem o aço por efeito resistivo. Atingida a temperatura de austenitização o aço é resfriado por jatos de água ou de gás (nitrogênio) de modo a garantir a formação de martensita em sua superfície.

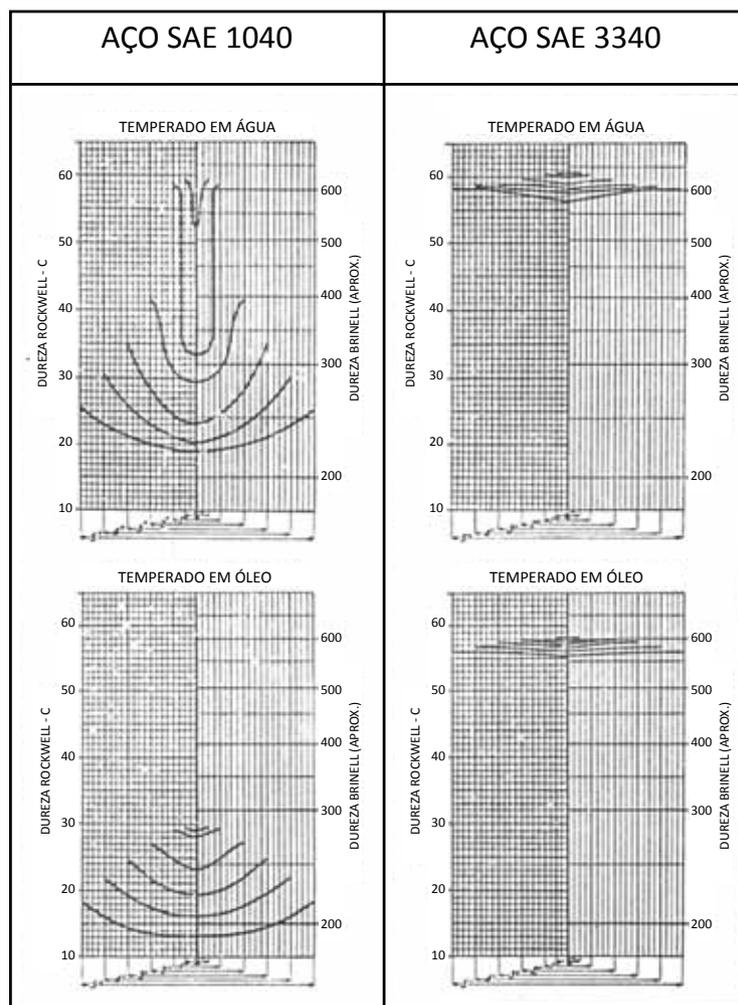
O tratamento pode ser feito em fornos e sistemas de resfriamento contínuos, como o mostrado no esquema abaixo, referente a uma instalação de têmpera de tubos mecânicos.



Temperabilidade

Quando fazemos a têmpera de peças de aço, principalmente de peças de médias ou grandes dimensões, resultam diferenças de dureza entre a superfície e o núcleo, em consequência das diferenças de velocidades de resfriamento.

Uma maneira de avaliar diferenças de dureza existentes em peças de diferentes dimensões é fazer o ensaio de curvas em U em que cilindros de diferentes diâmetros, fabricados a partir de um mesmo aço, são temperados no mesmo meio de têmpera. Após a têmpera os cilindros são cortados transversalmente e submetidos a medições de dureza ao longo de seu diâmetro. A superfície temperada apresenta maior dureza enquanto o núcleo, submetido a velocidades de resfriamento menores fica mais mole. A transição entre a região 100% temperada (100% de martensita) para o núcleo não temperado é gradual e a curva em U mostra essa variação. Para cilindros muito espessos as velocidades de resfriamento superficiais são muito lentas não sendo possível atingir a dureza máxima mesmo na superfície do aço utilizado.

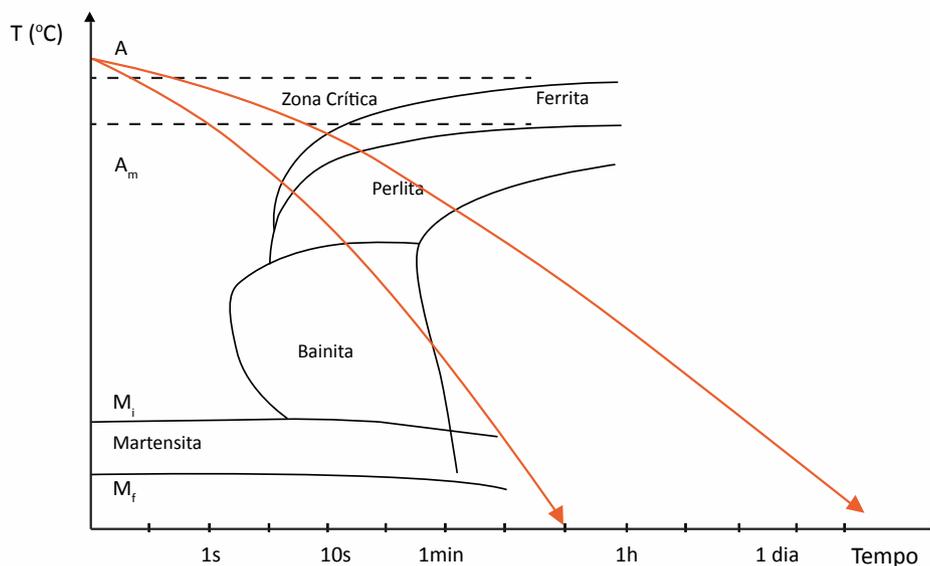


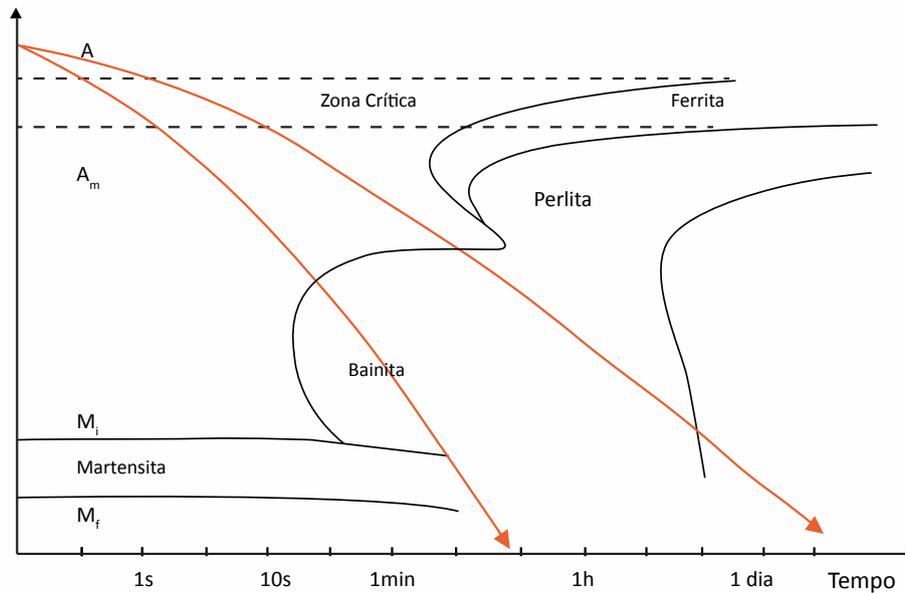
Na figura acima é possível observar as curvas em U de dois aços contendo 0,4% C (1040 e 3340) temperados em água e em óleo. A dureza máxima conseguida para os dois aços é de 59 a 60 HRC, para cilindros de pequeno diâmetro. Apesar de o aço 3340 ter quantidades apreciáveis de elementos de liga a dureza máxima atingida na têmpera é praticamente a mesma que a do aço carbono. De uma maneira geral pode-se afirmar que a dureza máxima que se pode atingir em um aço temperado depende somente do teor de carbono

Observa-se na figura, também, que a penetração de dureza no interior do cilindro do aço ligado é muito maior que a do aço 1040. Os elementos de liga, presentes no aço, aumentam a profundidade de endurecimento por têmpera, chamada de temperabilidade. A temperabilidade é a capacidade de um aço endurecer por têmpera até uma certa profundidade.

A temperabilidade é uma propriedade associada à profundidade atingida por endurecimento na têmpera. A temperabilidade não pode ser associada à máxima dureza do aço. A principal razão pela qual se adicionam elementos de liga aos aços é aumentar a temperabilidade, ou seja, a profundidade capaz de endurecer por têmpera.

A título de exemplo podemos analisar o caso de um eixo de ponte rolante de grande porte, com diâmetro 180 mm. Se fabricarmos o eixo com aço 5140, contendo 0,4% C e 1% Cr, ao se fazer a têmpera em óleo obtém-se, antes de revenir, no máximo 30 HRC de dureza na superfície e 20 HRC a menos de 30 mm da superfície. O mesmo eixo pode ser fabricado em aço 4340. Neste caso a dureza máxima é de 50 HRC na superfície e cai para 45 HRC no núcleo da peça. A microestrutura, nesse caso é 100% bainítica.

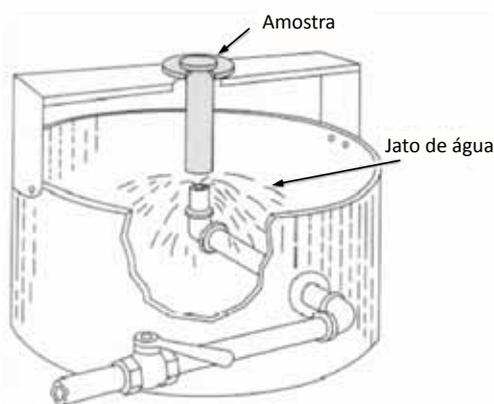




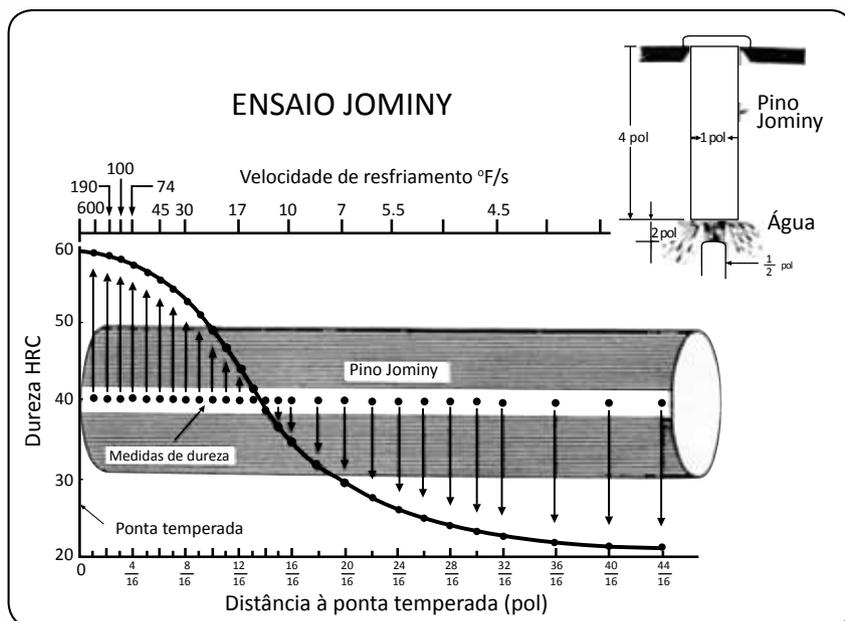
Comparando as curvas RC dos dois aços observa-se que a principal diferença está na distância das curvas ao eixo das ordenadas. Selecionar aços com maior teor de elementos de liga equivale a trabalhar com curvas RC deslocadas para a direita. Os aços de maior temperabilidade podem ser temperados para valores elevados de dureza utilizando meios de resfriamento mais brandos, minimizando desta forma as distorções e as tensões residuais.

Ensaio jominy

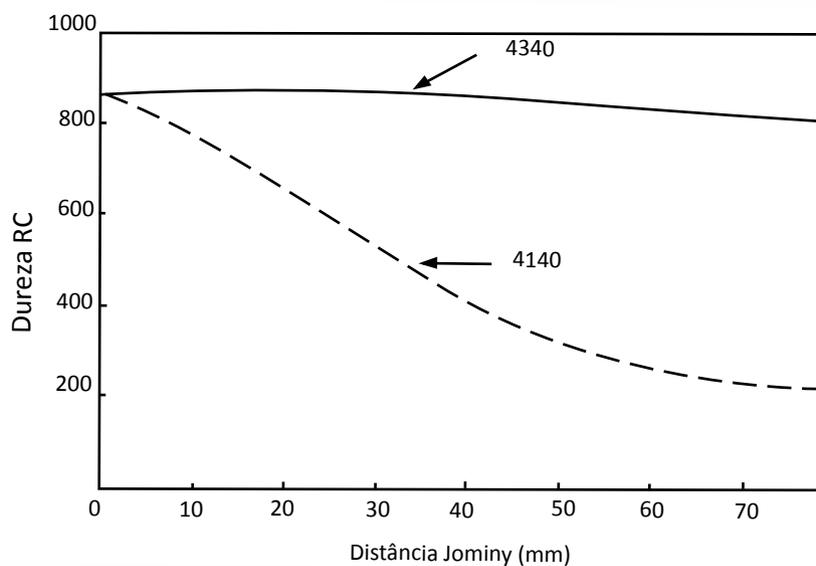
Um ensaio de execução bem mais simples e que permite avaliar a temperabilidade dos aços é o ensaio Jominy. Um corpo de prova cilíndrico com aproximadamente 10 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro é submetido à têmpera em sua ponta. Da ponta temperada até a outra extremidade estabelece-se um gradiente de velocidades de resfriamento, representativas das velocidades de resfriamento encontradas em sessões espessas de peças temperadas.



O pino é austenitizado, retirado do forno e imediatamente colocado em um suporte. Neste momento abre-se um registro que faz com que um jato de água incida na ponta do pino temperando-o. O pino permanece resfriando no dispositivo até a temperatura ambiente. Após retificação de duas faces paralelas, fazem-se medidas de dureza em intervalos regularmente espaçados de 1/16" avos de polegada, determinando-se a curva de variação de dureza em função da distância Jominy.



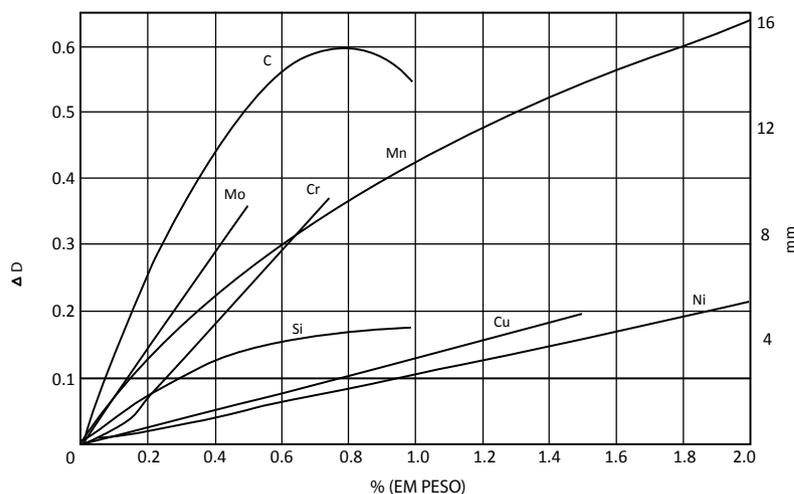
Pinos de aços ligados de alta temperabilidade apresentam variação muito pequena de dureza ao longo da distância à extremidade temperada (1). Pinos de aços carbono e outros aços de baixa temperabilidade apresentam curvas Jominy com variação acentuada de dureza próximo da extremidade temperada (2).



Quando se deseja obter camadas temperadas espessas, homogeneamente constituídas de 100% de martensita ou peças que contenham 100% de martensita ao longo de toda a seção transversal é necessário utilizar aços de alta temperabilidade.

Efeito dos elementos de liga na temperabilidade dos aços

Os elementos de liga C, Mo, Mn, Cr, Si e Ni têm efeito acentuado sobre a temperabilidade dos aços, como se vê no gráfico abaixo, em que ΔD é o aumento do diâmetro temperável. O carbono é o elemento químico que tem o maior poder de aumentar a temperabilidade dos aços. E é, também, o mais barato. Infelizmente o aumento do teor de carbono causa uma diminuição acentuada de tenacidade. Aços de mais alto teor de carbono temperados são muito duros, porém, muito frágeis. O elemento de liga mais efetivo para aumentar a temperabilidade dos aços é o Mo. Esse elemento, entretanto, é muito caro sendo cotado em 2011 a US\$ 40,00 por quilo. Nos últimos anos seu uso tem sido considerado proibitivo. O elemento químico, que apresenta a melhor relação custo/benefício no aumento da temperabilidade dos aços é o Mn.



Aumentar a temperabilidade de um aço equivale a deslocar a curva TTT ou RC dos aços para a direita, permitindo que sejam resfriados com menores velocidades, diminuindo as distorções e propensão dos mesmos a trincar durante a têmpera.

Utilização de curvas RC para selecionar aços e tratamentos térmicos

Existem programas computacionais que permitem construir as curvas RC para uma grande variedade de aços para construção mecânica e simular tratamentos térmicos em peças simples com seção circular (cilindros) ou retangular (chapas, placas, tarugos) de diferentes dimensões. Sobre as curvas RC são superpostas as curvas de variação de temperatura com o tempo, correspondentes ao resfriamento da superfície e do núcleo, em diferentes meios de têmpera. Nesses programas há também um módulo que prevê as microestruturas formadas após tratamento térmico desde a superfície até o centro da peça, bem como as durezas correspondentes, como mostram as figuras abaixo. É uma ferramenta muito útil para especificação de tratamentos térmicos e seleção de materiais.

Na figura vamos avaliar o que ocorre quando temperamos uma barra de aço 1050 com 30 mm de diâmetro, austenitizado a 843 °C por 100 min em óleo a 49 °C sem agitação. O tamanho de grão do aço nesse caso é ASTM 7.

```

AC3
SELECT OPERATION
HARD  STRUC  CCT  MATL  GEOM  AUST  QUENCH  TEMPER  PRES  DISK  EXIT

MATERIAL - LIBRARY  1050          GEOMETRY
BASE %C   - 0.50          RULING SECTION (mm) - 30.00
%Mn       - 0.75
%Ni       - 0.05
%Cr       - 0.05
%Mo       - 0.05
%Si       - 0.03
*%Cu      - 0.05
*%Al      - 0.050
*%P       - 0.000

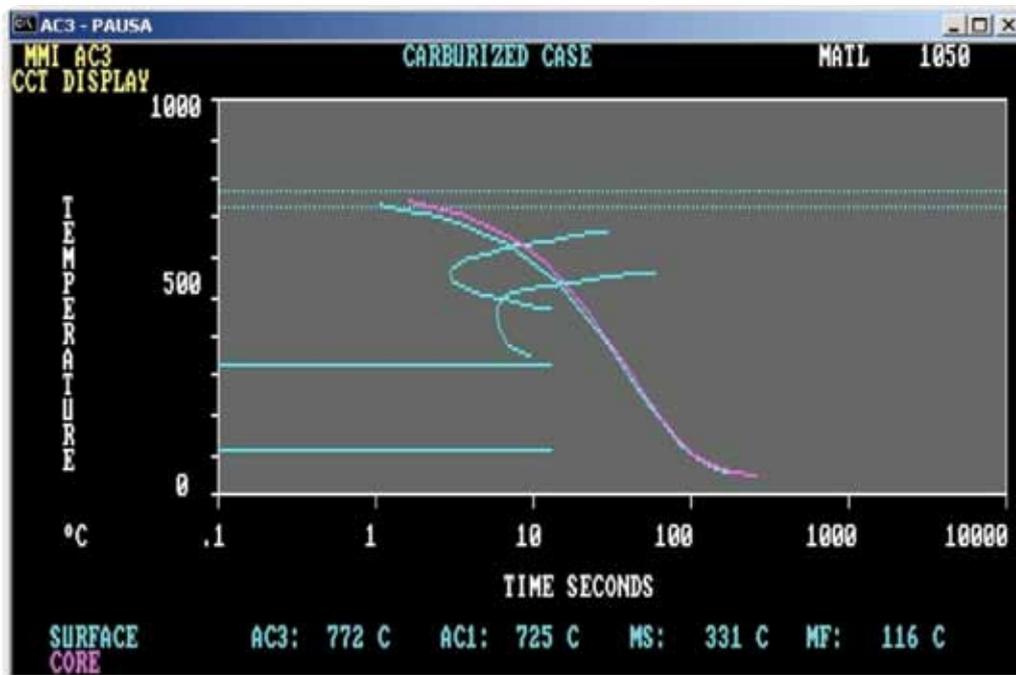
AUSTENITIZING
GRAIN SIZE - ASTM 7
TEMPERATURE - 843 C
TIME (MIN)  - 100

QUENCH
QUENCHANT   - OIL
HT COEF.    - 0.019
TEMPERATURE - 49 C
AGITATION (cm/s) - 0.00
FINAL AMBIENT - 49 C

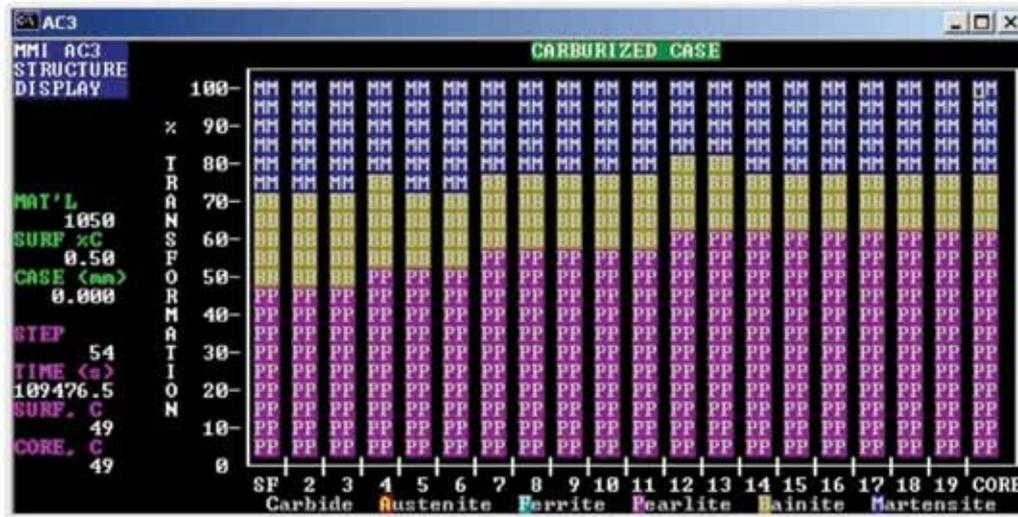
PRESENTATION
HARD. TYPE  - RC
HARD. SCALE MAX - 70
%C SCALE MAX - 1.50
TITLE - CARBURIZED CASE

TEMPER
TEMPERATURE - 177 C
TIME (MIN)  - 60
  
```

Nas curvas RC é possível obter as temperaturas Ac3, Ac1 de transformação do aço, que delimitam a zona crítica, além de Mi (em inglês Ms) e Mf. A curva azul é a curva de resfriamento da superfície do cilindro e a curva vermelha a curva de resfriamento do núcleo. As duas curvas azuis de transformação correspondem à formação de perlita e de bainita. Observando a figura sabemos que a peça deverá apresentar perlita e bainita além de martensita na microestrutura.



O programa permite avaliar quantitativamente quanto de cada um destes constituintes há no interior do material. No caso analisado temos 45% de perlita, 25% de bainita e 30% de martensita na superfície e 60% de perlita, 15% de bainita e 25% de martensita no núcleo.



As microestruturas formadas resultam em valores de dureza que podem ser observados na figura abaixo. Na superfície a barra cilíndrica terá 42 HRC após a têmpera e cerca de 37 HRC após revenido a 177 °C por 1 hora.

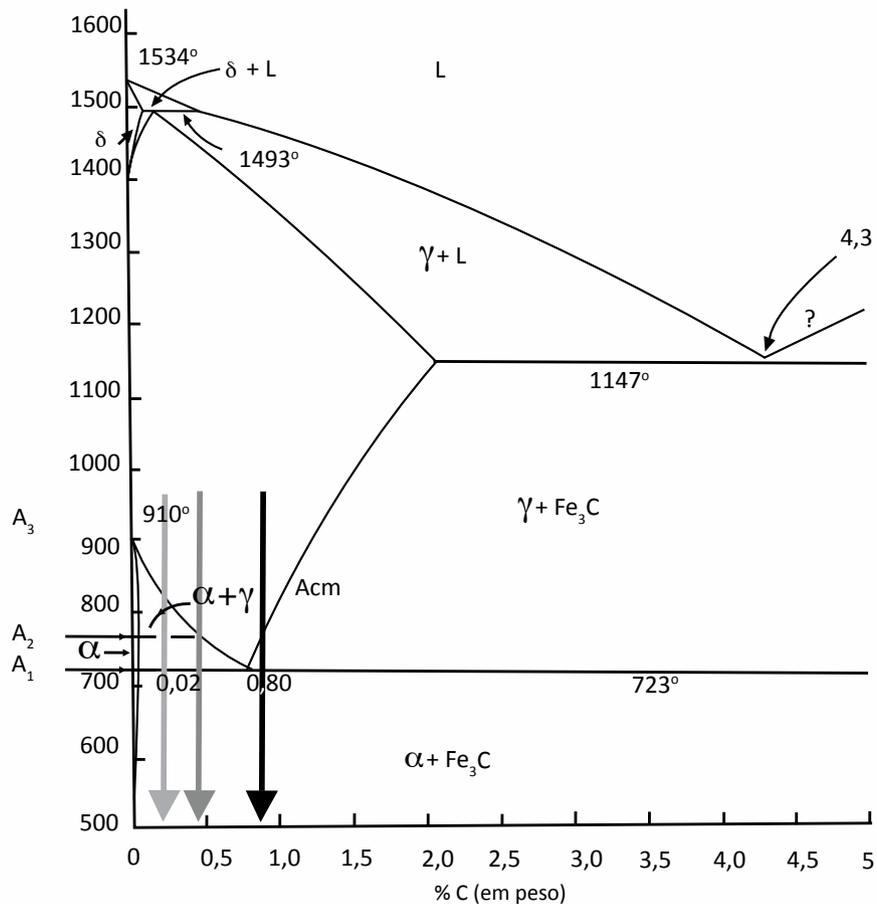


Cementação

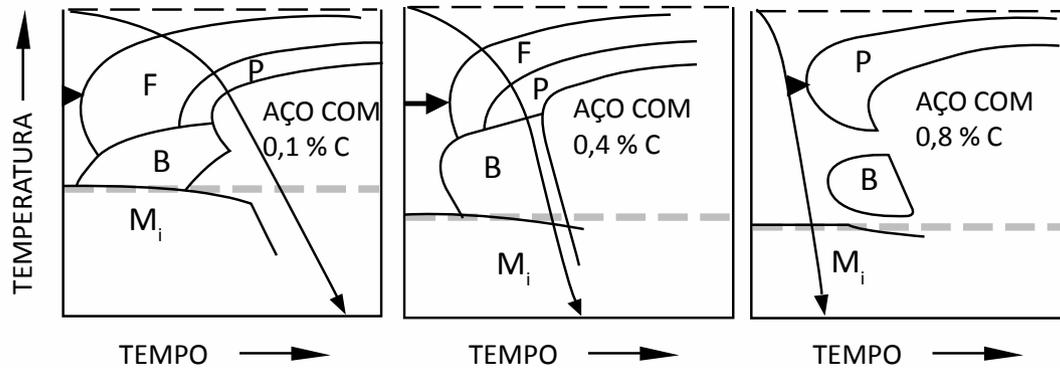
A cementação é um tratamento termoquímico feito para enriquecer a superfície da peça em carbono. Um aço cementado é um aço de baixo carbono (no máximo 0,2 %C), contendo ou não elementos de liga, tratado termoquimicamente de forma a se obter teor de carbono próximo de 0,8% na superfície. A espessura de camada pode variar de 0,5 a 2,0 mm. Engrenagens de caixas de câmbio e sistemas de transmissão são geralmente cementadas.



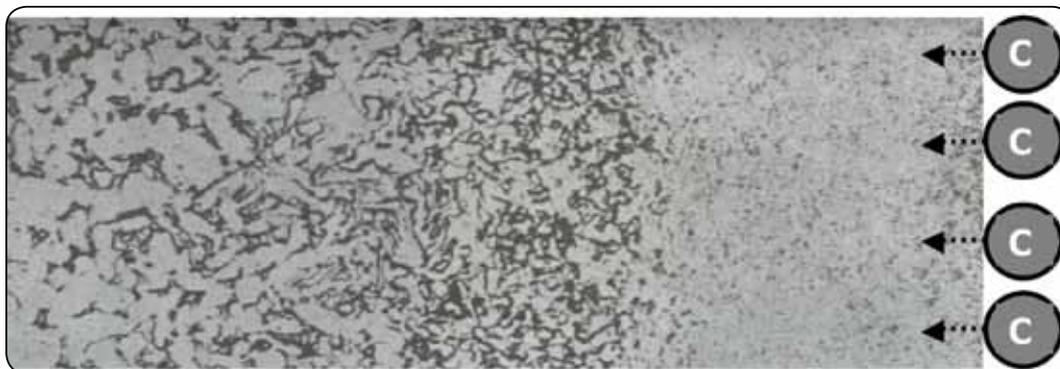
Como o teor de carbono não é homogêneo, ao longo da seção transversal da peça, a análise do que ocorre no tratamento térmico é um pouco mais complicada.



Cada região no interior do material tem teor de carbono diferente e sofre diferentes transformações. A temperatura de austenitização para cada uma das regiões do material é diferente. Além disso, o carbono desloca a curva RC para direita e ao mesmo tempo abaixa a temperatura M_i .



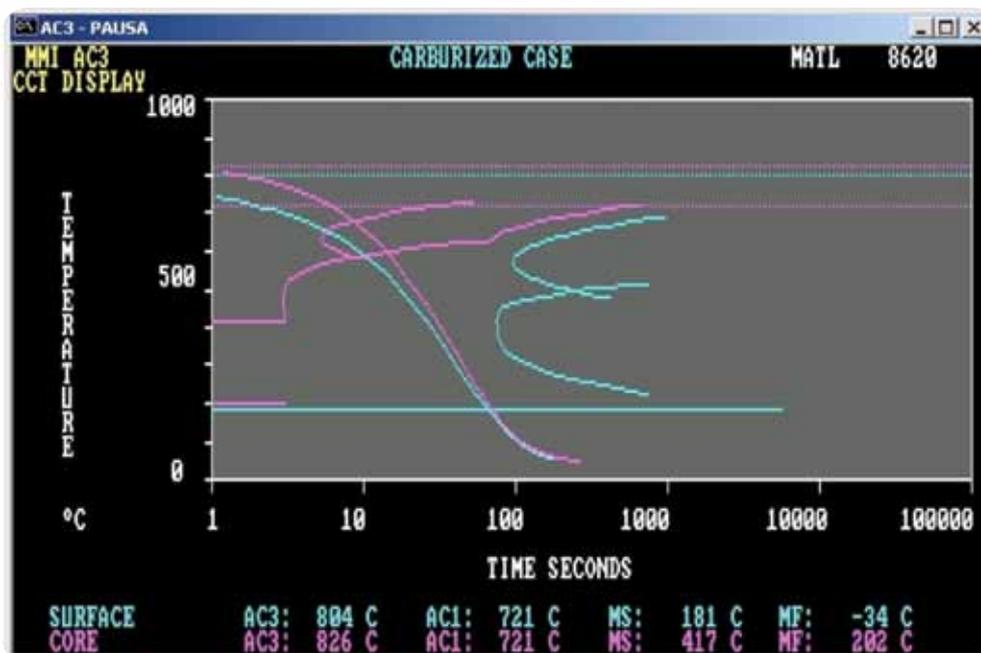
Consequentemente as estruturas resultantes da têmpera são bastante diferentes.



Pode-se utilizar o programa de construção de curvas RC para estimar as características de transformação do aço cementado conforme exemplo ilustrado na página seguinte.

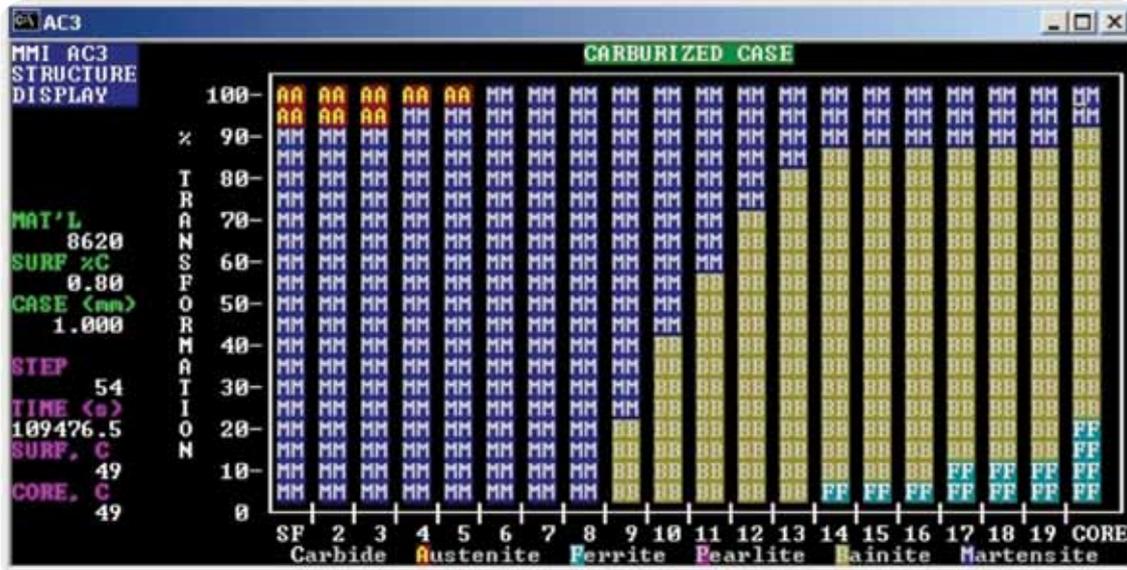


Um barra de aço 8620, contendo 0,5 %Cr, 0,5 %Ni e 0,2 %Mo, com 30 mm de diâmetro, cementado para 0,8 %C na superfície, austenitizado na temperatura de 843 °C, por 100 min, após têmpera em óleo sem agitação a 49 °C, apresenta curvas RC e de resfriamento como mostra a figura seguinte.



Repare que a temperatura Mf do aço na superfície é de -34 °C. Ao temperarmos o aço em óleo aquecido a transformação martensítica não termina. Uma certa quantidade de austenita retida não se transforma, impedindo alcançar du-

reza máxima na superfície. Quanto mais alto é o teor de carbono na superfície do aço maior será o teor de austenita retida e menor será a dureza. A microestrutura resultante deste tratamento é constituída por 90% de martensita e 10% de austenita retida na superfície e 20% de ferrita, 75% de bainita e somente 5% de martensita no núcleo.



A dureza após a têmpera atinge 62 HRC na superfície, 64 HRC um pouco mais para dentro e depois começa a cair chegando a 32 HRC no núcleo.

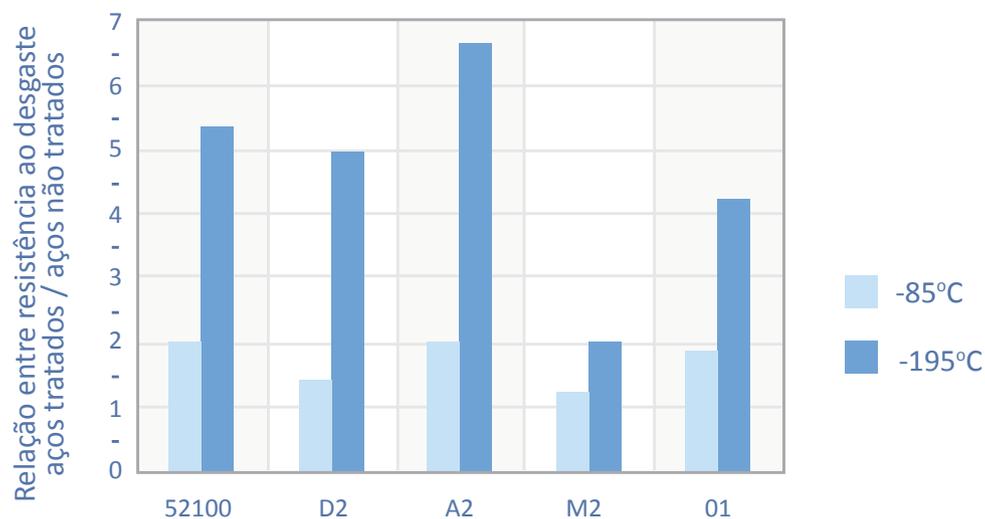


Tratamentos sub-zero

Existem tratamentos térmicos sub-zero feitos com o objetivo de promover a transformação da austenita retida para martensita e aumentar a dureza superficial do aço. O tratamento consiste em resfriar a peça já temperada em nitrogênio líquido (-197 °C) ou misturas de líquidos em temperaturas abaixo de zero graus, para que a temperatura M_f do aço seja cruzada, permitindo que ocorra 100% de transformação.



É um tratamento térmico freqüentemente aplicado aos aços de alto carbono, principalmente o aço ferramenta. A resistência ao desgaste aumenta muito após tratamento sub-zero, como pode ser visto no gráfico abaixo. Um aço para rolamento pode aumentar de 2 até 5 vezes sua resistência ao desgaste quando tratado sub-zero para eliminação de austenita retida.



Tratamento criogênico

Um tratamento térmico recentemente desenvolvido é o tratamento criogênico. Consiste em resfriar peças (mesmo que não tenham austenita retida em sua estrutura) até temperaturas sub-zero e mantê-las nesta temperatura por várias horas. Em seguida as peças são aquecidas até a temperatura ambiente em tempos prolongados de 8 a 20 horas. Posteriormente são revenidas entre 150 e 600 °C para baixar a dureza e aumentar a tenacidade.

São tratamentos demorados que trazem benefícios acentuados às propriedades mecânicas do material. Sabe-se que o jateamento com granalha é um tratamento de superfície muito importante para aumentar a resistência à fadiga de molas carregadas dinamicamente. Há relatos de que a realização de tratamentos criogênicos pode melhorar ainda mais a vida em fadiga destes componentes. Por exemplo, molas de válvula de carros de corrida podem perder até 10% de sua força no início de sua vida (período de amaciamento). Por esta razão molas de válvulas de motores de competição sofrem duplo jateamento por granalha, primeiro com uma granalha mais grossa e depois com granalha mais fina. O objetivo é criar tensões residuais de compressão na superfície que aumentam a vida em fadiga do material. Quando as válvulas sofrem tratamento criogênico após o jateamento observa-se um aumento na vida em fadiga de 5 a 7 vezes em relação ao material simplesmente jateado. Além disso a perda de força no período de amaciamento é reduzida para 3%.



Resumo de tratamentos térmicos

Os benefícios que podem ser conseguidos através da utilização de tratamentos térmicos em peças e perfis de aço são inúmeros. Existem tratamentos para amolecimento e para endurecimento de aços, além de tratamentos que promovem o refino de grão. Os tratamentos podem também ser classificados em tratamentos que alteram a estrutura e as propriedades da peça toda ou em tratamentos superficiais que condicionam propriedades somente na superfície.

O quadro abaixo resume os possíveis tratamentos térmicos e termoquímicos aplicados aos aços de construção mecânica.

