

PRÁTICA MODERNA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS (*)

Traduzido por autorização especial da revista "STEEL", (Magazine of Metalworking and Metalproducing) Setembro, Outubro — 1945

Arnald P. Seasholtz
Engenheiro Metalurgista
Lancaster, Penna.
Seasholtz Metallurgical Service

3.^a PARTE

Estudo de três sistemas de têmpera interrompida na obtenção de melhores propriedades físicas com o mínimo de mudanças de dimensões, distorsão, empenamento e tensões residuais bem como superfície livre de oxidação. Como tópico adicional de grande interêsse é estudado o recozimento cíclico.

Poucos aços aplicam-se diretamente sem um tratamento térmico adequado. Êsses tratamentos incluem amolecimento para estampagem ou usinagem, obtenção de boas propriedades a tração e valores elevados de fadiga e resiliência, dureza suficiente para que o aço possa, depois de tratado, ser utilizado no trabalho de outros aços.

Especificamente os objetivos são os seguintes: 1) propriedades físicas melhores; 2) mínimo de variação em dimensões; 3) mínimo de tensões residuais com o objetivo de elevar o limite de fadiga e a resiliência; 4) técnica de tratamento térmico que produza peças livres de óxidos, descarbonetação superficial; e 5) partes que possam ser usinadas e então tratadas termicamente para melhores propriedades físicas, mantendo-se entretanto as peças com tolerâncias rígidas nas dimensões.

Antes que possa ser determinado o tratamento térmico adequado à obtenção de melhores propriedades mecânicas para um aço determinado, deve-se ter em mente o ciclo de aquecimento, o ciclo de esfriamento e o elemento tempo a uma ou mais temperaturas.

O ciclo de aquecimento inclui não só a elevação de temperatura como também a manutenção a elevadas temperaturas. O primeiro objetivo em martêmpera e austêmpera, ou qualquer tipo de têmpera, é

(*) Tradução do Eng.º João Mendes França, Chefe da Sub-seção de Ensino Experimental da Divisão de Metalurgia do I.P.T.

o aquecimento do material seja na zona crítica ou acima dessa zona, afim de que se obtenha transformação de ferro alfa em gama e que o aço esteja austenítico. O carbono e outros elementos de liga estarão então em solução sólida no ferro gama, formando austenita homogênea, si as condições de tempo e temperatura forem adequadas. A solução desses elementos pode ser completa ou parcial, dependendo do ciclo tempo-temperatura. Difusão completa em austenita homogênea é um processo que exige tempo.

Durante o ciclo de aquecimento haverá mudança definidas de dimensão e de microestrutura na passagem pela temperatura crítica. A proporção que o aço é tratado dá-se a expansão térmica contínua com a elevação da temperatura até que a temperatura crítica é atingida, haverá então contração em volume acompanhando a absorção de calor na passagem do metal por aquela temperatura. Diferenças da velocidade de elevação de temperatura ou diferenças no instante em que é atingida a temperatura de transformação — como se dá entre secções transversais variáveis — causam distorção, empenamento e diferenças de tamanho de grão austenítico. Entretanto, a velocidade de aquecimento não é tão importante quanto a obtenção de uma temperatura de austenitização uniforme, a determinação da temperatura máxima adequada e o tempo certo de manutenção àquela temperatura.

Manutenção a alta temperatura.

O tempo necessário à difusão afim de que se obtenha austenita homogênea varia, dependendo da composição química. Vários aços ligas são lentos na transformação e exigem maior tempo de manutenção na temperatura de austenitização, sendo frequentemente possível a elevação da temperatura com o objetivo de apressar a difusão sem crescimento inadequado da granulação.

A temperatura real do aquecimento deve ser alguma coisa acima de $A_{3,2}$, temperatura crítica superior afim de ser assegurada homogenização da austenita. Quando aquecida muito tempo depois da solução completa poderá resultar um aumento de tamanho de grão. Temperaturas mais elevadas que o necessário terão o mesmo efeito, enquanto que em aços de grana fina (que são na realidade aços que iniciam o crescimento do grão a temperaturas relativamente altas) isso é menos prejudicial do que tratamento a uma temperatura excessivamente baixa. Austenitização completa não é forçosamente necessária em aços hipereutetóides, mas a perlita deve sempre ser transformada em austenita tão homogênea quanto possível. Auste-

nita uniforme põe o aço em condições adequadas para responder ao esfriamento. Está então pronto para ser temperado.

Para que se compreenda o que acontece quando o aço é esfriado e o efeito das diferentes velocidades de esfriamento, é necessário que se conheça o tempo necessário para a decomposição da austenita a várias temperaturas, e quais os microconstituintes resultantes. Esse estudo já foi sumarizado na discussão da construção e uso das curvas em S, na primeira parte desse trabalho.

O trabalho de Carpenter e Robertson na Inglaterra, (Metals), mostrou que indiscutivelmente a austenita se transforma em martensita a proporção que a temperatura baixa num intervalo que é característico para a maioria dos aços carbono comerciais e aços ligas tratáveis termicamente. Quando o aço é temperado com velocidade que exceda a velocidade crítica — isto é, uma velocidade em que a austenita não tenha tempo para se transformar (entre 450° e 600°C — a região do cotovelo da curva em S), é suspensa a transformação até que seja atingido o ponto M_s ; a formação da martensita então se inicia e continua a proporção que o esfriamento prossegue. Quando se atinge o ponto M_f a austenita está praticamente transformada em martensita. Em alguns aços ferramentas e aços de alta liga uma certa quantidade de austenita é mantida sem transformação.

Si, no processo de têmpera, o esfriamento é interrompido a uma temperatura dentro do intervalo de transformação em martensita, a transformação cessa. Si se mantém temperatura constante, inicia-se transformação isotérmica depois de um tempo curto e progride lentamente, mas o tempo necessário para transformação completar-se seria excessivamente longo para se enquadrar dentro de um processo prático de tratamento térmico. Si, depois de interrompida a têmpera, o esfriamento é continuado, a austenita novamente continua a se transformar em martensita até que se complete a transformação.

Aços esfriados pela têmpera usual em óleo ou água são transformados durante o esfriamento. Eles não se transformam ao mesmo tempo e velocidade, da superfície para o centro, como ocorre na manutenção a uma temperatura constante, transformação isotérmica. Foi verificado por Grange e Keefer que a transformação durante esfriamento contínuo e a transformação isotérmica guardam entre si uma relação definida que pode ser avaliada si se superpõe transformações a esfriamento contínuo e isotérmica; as curvas representando

início e fim de transformação durante esfriamento contínuo em têmpera comercial estarão um pouco abaixo e a direita da curva isotérmica.

Uma vez que está perfeitamente determinado que há uma relação definida entre os dois tipos de esfriamento, os diagramas isotérmicos podem ser usados com precisão razoável na previsão do ciclo tempo-temperatura e produto resultante. Liedholm apresentou um método pelo qual um diagrama de esfriamento contínuo pode ser construído de uma série de ensaios Jominy de têmpera pela base.

A fig. 12 é o diagrama de Grange e Keefer mostrando o início e fim de transformação do aço SAE 4340. Revela a relação re-

Diagrama indicativo da transformação da Austenita com esfriamento contínuo em velocidade dada (Derivado do diagrama isotérmico) Aço S.A.E. 4340

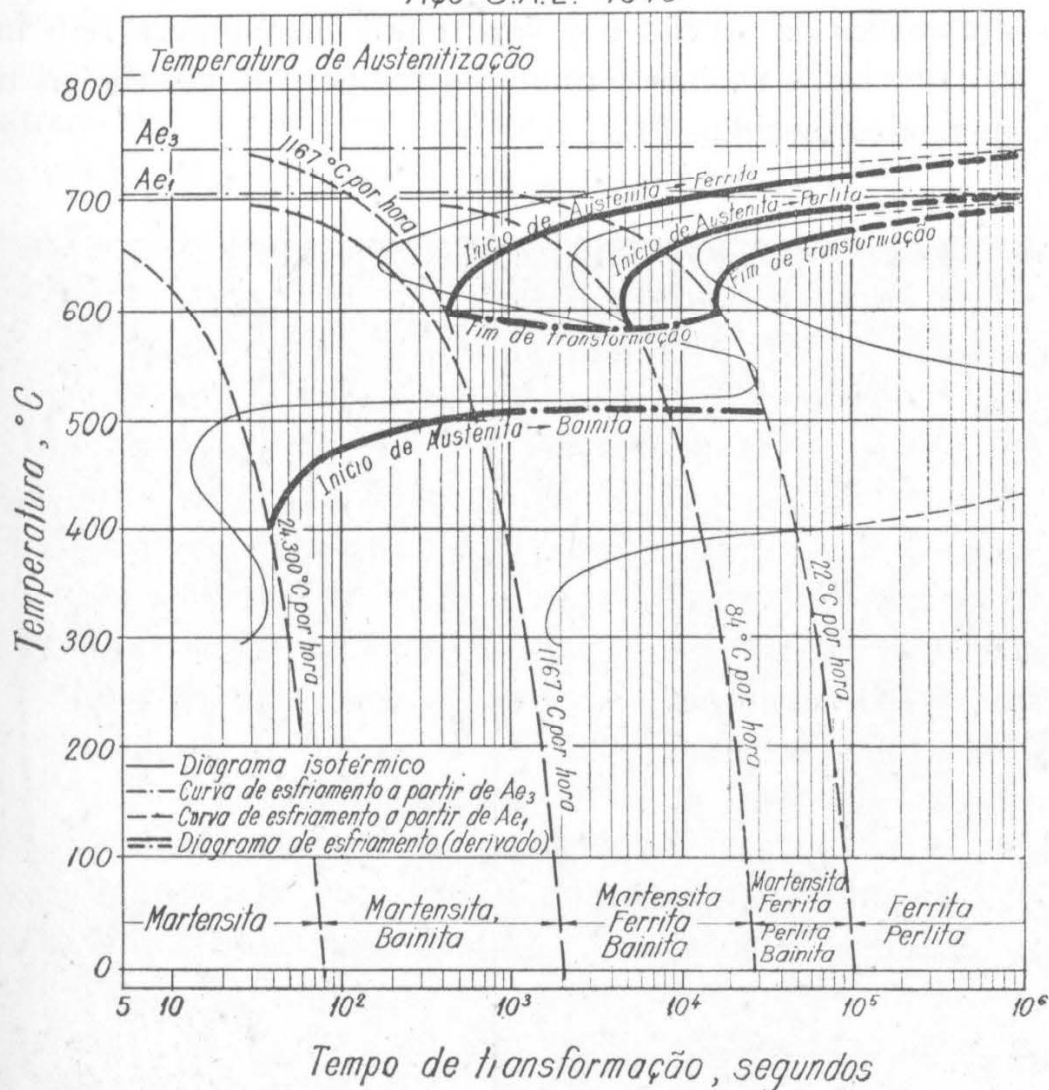


Fig. n.º 12 — Início e fim de transformação para o aço SAE 4340. Curvas em S (em linhas finas para o 4340) foram feitas na base de esfriamento instantâneo a temperaturas determinadas e manutenção constante e essas temperaturas.

ferida acima entre transformação durante esfriamento contínuo e isotermicamente. A velocidade crítica mais lenta dos aços liga traz muitas vantagens, uma vez que dureza máxima pode ser obtida com meios de têmpera menos drásticos, peças maiores podem ser temperadas com maiores valores de fadiga, resistência à tração e tenacidade.

Deve-se ter permanentemente em consideração a influência da secção transversal da peça, quando se considera qualquer tipo de tratamento térmico. A microestrutura produzida está, em grande parte, relacionada à velocidade de esfriamento e é evidente que, sob dadas condições, secções maiores esfriam com velocidade menor que secções finas. Estruturas finais e equivalentes só podem ser obtidas mudando-se para um meio de têmpera mais baixo ou adotando-se um aço de velocidade crítica mais lenta.

As dimensões da secção e a severidade de têmpera têm influências na ocorrência de rachas comuns de têmpera e nas rachas microscópicas, menos conhecidas (fig. n.º 13).



Fig. n.º 13 — Micrografia mostrando rachas de têmpera em peças cementadas e temperadas em água — 1000X.

Efeito do meio de têmpera.

Curvas de esfriamento da superfície e do centro de peças semelhantes, temperadas em águas, óleo, ar e sal e o processo de transformação por êsses vários meios de têmpera são estudados esquematicamente na fig. n.º 14. Em cada caso a velocidade de esfriamento excede a velocidade crítica do aço a ser temperado, o que só torna possível a formação de martensita. As velocidades de têmpera são afetadas severamente por uma lei natural relativa à massa da peça, que faz com que a parte interior se atrase no esfriamento, esfriando-se mais lentamente que a superfície. Quanto mais rápida a velocidade de têmpera tanto maior a diferença de temperaturas, num dado instante, entre a superfície exposta ao meio e o centro.

Com uma têmpera muito rápida tal como a representada pela curva observada para a têmpera em água, há uma diferença notável em temperatura entre a superfície e o centro, medida pela diferença entre as curvas em qualquer ordenada. Quando a superfície da peça atinge o ponto M_s , a transformação da austenita se inicia e progride para completar-se no ponto M_f . Vê-se facilmente que na têmpera em água da peça em questão, a superfície está completamente transformada quando existe ainda uma boa porção do centro ainda austenítica e acima da temperatura M_s ; em outras palavras, aparecerá um grande volume de austenita instável envolvida por um anel de martensita dura e frágil. Posteriormente, a proporção que o centro esfria dentro do intervalo de transformação em martensita, a austenita envolvida se transforma. Isso não seria prejudicial se a transformação da austenita para martensita não se desse com aumento de volume. É essa expansão interna dentro de um anel duro que causa tensões residuais excessivas e rachas de têmpera, distorção e baixa ductilidade.

As curvas para têmpera em óleo mostram uma velocidade de esfriamento mais lenta e uma diferença menor de temperatura entre a superfície e o centro, resultando em maior quantidade de transformação e conseqüente expansão do centro antes que a superfície atinja o ponto M_f e forme um anel de martensita frágil. Têmpera em óleo portanto resulta num menor aumento de volume uma vez que haverá menor transformação no núcleo depois que a mesma completou na superfície.

Aços que temperam em um meio ainda mais lento, como é o caso do ar parado, são utilizados para materiais de forma complicada por que se transformam (como se observa nas curvas da fig. n.º 14) ao mesmo tempo em tôdas as partes, e assim terão um mínimo de tensões residuais e possibilidade de rachas de têmpera. Quando há têmpera ao ar, a diferença de temperatura entre a superfície e o centro é pequena e a transformação em martensita se dará a proporção que a temperatura baixa na zona de transformação com velocidade praticamente uniforme através da matriz austenítica. Além disso há frequentemente uma quantidade apreciável de austenita retida no fim da têmpera e êsse constituinte, relativamente mole, amortece ou ajusta as tensões de modo a se ter um mínimo de tensões internas.

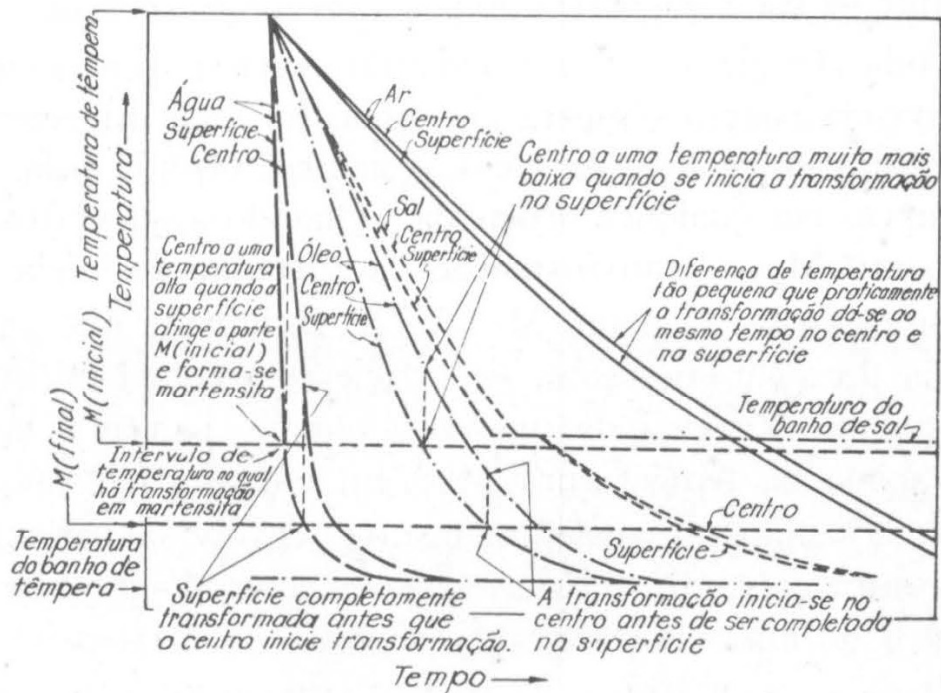


Fig. n.º 14 — Curvas de esfriamento na superfície e centro de um cilindro de aço, temperado em água, óleo, sal aquecido e ar.

Martêmpera.

Martêmpera (o nome indica que a formação de martensita é o principal objetivo) consiste em temperar o aço aquecido em um banho de sal líquido a uma temperatura elevada acima do ponto M_s , mantendo-se no banho tempo suficiente para a peça torna-se completamente uniforme em temperatura, sendo depois esfriada ao ar, seguindo-se revenido habitual, se necessário. Êsse método de têmpera interrompida produz martensita com deformações residuais baixas.

Martêmpera inclui assim a têmpera de uma temperatura de austenitização em um banho de sal a uma temperatura próxima do ponto M_s e manutenção durante um certo tempo nesse banho seguido de esfriamento ao ar com velocidade moderada, de modo a que não haja grande diferença de temperatura entre a superfície e o centro da peça durante a zona de transformação para martensita. A formação de martensita ocorre então com velocidade praticamente uniforme em inúmeros pontos da matriz de austenita mais mole. Um excesso de tensões residuais é então evitado por êsse processo de equalização.

Como foi visto, a temperatura do banho de têmpera deve estar próximo do ponto M_s ; si estiver muito abaixo dessa temperatura se formará martensita em quantidades apreciáveis, inutilizando os objetivos do processo. Êsse ponto M_s varia para aços diferentes e pode ser avaliado pela formula de Carapella, estudada na primeira parte desta série. Entretanto 200°C tem sido considerado uma temperatura satisfatória para martêmpera dos aços SAE de baixa liga e alto carbono e aços ferramentas de baixa liga.

A operação é comercialmente prática, pois as peças podem ser mantidas em banho de sal por períodos de tempo consideráveis, depois de igualadas em temperatura, sem efeito nos resultados. As curvas em S mostram que a austenita não inicia a sua transformação dentro de uma fração apreciável de hora, quando mantida a 200°C.

O poder de esfriamento do sal a temperaturas elevadas tem sido subestimado, mas verificou-se que sal agitado a 200°C tem um poder esfriador tão violento como um óleo comum de têmpera. Essa conclusão foi obtida de gráficos publicados por Lueg e Pomp, no Stahl und Eisen, 1941, pg. 206. Foram medidas velocidades de esfriamento em esferas de aço de 1/2" de diâmetro, temperadas de 800°C em óleo a temperatura ambiente e banhos de sal a várias temperaturas. As velocidades de esfriamento a 540°C, aproximadamente no cotovelo da curva — podem ser lidas na Tabela II.

TABELA II
VELOCIDADES DE ESFRIAMENTO A 540°C

	Por segundo
Óleo mineral a 21°C	55 a 92°C
Sal fundido a 200°C	62°C
Sal fundido a 260°C	52°C

A agitação do sal fundido levará o poder esfriador até o valor correspondente ao do óleo mineral sem agitação a temperatura ambiente, e suficientemente alto para temperar vários aços liga até 100% de martensita. Observado sob outro ponto de vista, a velocidade de esfriamento de sal agitado a 200°C tem um H de 0,25 a 0,20 (equivalente a óleo sem agitação) em peças que tenham uma superfície trabalhada. Com materiais com ligeira casca de óxido, a velocidade de esfriamento é menor, aproximando-se H do valor 0,20, equivalente a óleo aquecido.

Secções mais pesadas podem ser temperadas pelo processo de martêmpera com um mínimo de tensões residuais. A velocidade de esfriamento do banho não deve ser subestimada; obviamente quanto mais baixa a temperatura do banho de sal, tanto mais rápida é a velocidade de esfriamento.

O processo de martêmpera tem sido usado comercialmente na melhora da qualidade e produção de um grande número de peças. Alguns exemplos são:

1. Pequenas ferramentas como lâminas de serra, talhadeiras, punções de aço carbono, bem como ferramentas do mesmo tipo feitas de aço liga, eliminando possíveis rachas de têmpera e permitindo dureza elevada sem lascamento das pontas.

2. Engrenagens de liga, mancais comuns, esferas de rolamentos, com o objetivo de se obter alta dureza com mínimo de distorção ou mudanças de dimensão, maior resistência a fadiga e ao choque.

3. Molas de aço sendo temperadas com um mínimo de distorção e resiliência muito elevada. Molas e lâminas de faca têm sido martemperadas para maior dureza e então revenidas para a mesma dureza da têmpera e revenido convencionais, com melhor resiliência, resistência ao choque e limite de fadiga.

4. Miscelaneas que devem ser usinadas e depois tratadas termicamente para maior dureza com um mínimo de distorção e superfície acabada limpa e livre de oxidação.

5. Bolas de moinho, tornando-se assim livres de rachas, seja como resultado de tratamento térmico seja como efeito de serviço.

Austêmpera.

Austêmpera é uma têmpera interrompida que consiste em mergulhar o aço em banho fundido, habitualmente sal, mantido a tempe-

ratura constante entre 200 e 450°C, frequentemente nas proximidades do limite superior dêsse intervalo, o que reduz o tempo necessário para transformação. A austenita transforma-se isotermicamente em bainita ou estruturas intermediárias. Esse processo é utilizado na obtenção de dureza entre 48 e 55 RC, acompanhando as características desejadas de ductilidade e tenacidade. Comercialmente é aplicado a arames tratados termicamente, talhadeiras, pequenas molas, refôrço de aço de ponta de sapato, bem como várias outras aplicações que devem ser mencionadas como adequadas para esse processo.

A Tabela III mostra os tétos de dureza e tamanhos máximos requeridos para peças austemperadas para varios aços carbono e liga, tal como recomendadas pelas American Steel and Wire Co, uma subsidiária da United States Steel Corp a quem pertence a patente.

Um desenvolvimento na têmpera interrompida é uma modificação da austêmpera. O processo desenvolve-se em três ciclos: (a) — aquecimento para austenitização; (b) — têmpera imediata num banho de sal agitado a 250°C ou acima e manutenção a essa temperatura afim de se permitir transformação isotérmica; (c) — imersão em um terceiro banho mantido a alta temperatura para revenir. Esse método permite transformação isotérmica a baixa temperatura com o objetivo de produzir dureza elevada, e depois revenido para as propriedades físicas desejadas. Dessa maneira, secções mais pesadas da peça podem ser melhor tratadas que no processo convencional de austêmpera.

Em resumo, os vários tipos modernos de têmpera interrompida projetados com o objetivo de eliminar ou reduzir materialmente rachas de têmpera, distorção e mudanças nas dimensões, incluem martêmpera, austêmpera, e suas modificações. Os esquemas dos vários processos estão representados em conjunto na fig. n.º 15. Em todos êles é possível obter-se bons resultados mesmo com homens que são relativamente novos na prática de tratamentos térmicos.

Recozimento cíclico.

Até agora tem sido discutidos os processos de têmpera do aço, mas existem várias aplicações onde se exige estruturas menos duras. Aços ferramenta de alto carbono e aços liga devem ser frequentemente amolecidos para usinagem ou deformação a frio. A definição de re-

TABELA III

LIMITES DE DUREZA E DIMENSÕES MÁXIMAS PARA PEÇAS AUSTEMPERADAS

Tipo de aço	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Této de dureza Rc	Máximo diâmetro (ou área equivalente) mm
Carbono	0.95-1.05	0.30-0.50	—	—	—	57-60	3.76
Carbono (alto Mn)	0.95-1.05	0.60-0.90	—	—	—	57-60	4.75
Carbono	0.80-0.90	0.30-0.50	—	—	—	55-58	3.96
Carbono (alto Mn)	0.80-0.90	0.60-0.90	—	—	—	55-58	5.55
Carbono	0.60-0.70	0.60-0.90	—	—	—	52-55	4.75
Carbono (alto Mn)	0.60-0.70	0.90-1.20	—	—	—	53-56	7.15
Carbono (Mn muito elevado)	0.60-0.70	1.60-2.00	—	—	—	53-56	15.85
Liga (C-Co)	0.65-0.75	0.75-0.95	—	—	—	53-56	15.85
Liga (C-Cr)	1.00	0.40-0.60	0.40-0.60	—	0.25	57-60	7.90
Liga (SAE 4150)	0.45-0.55	0.60-0.90	0.80-1.10	—	0.15-0.25	52	12.70
Liga (SAE 5365)	0.60-0.70	0.50-0.80	0.50-0.80	1.50-2.00	0.30-0.40	54	25 ou maior

cozimento pleno, tal como foi dado pela American Society for Testing Materials, 1942, Committee E-8, é: “um processo de amolecimento

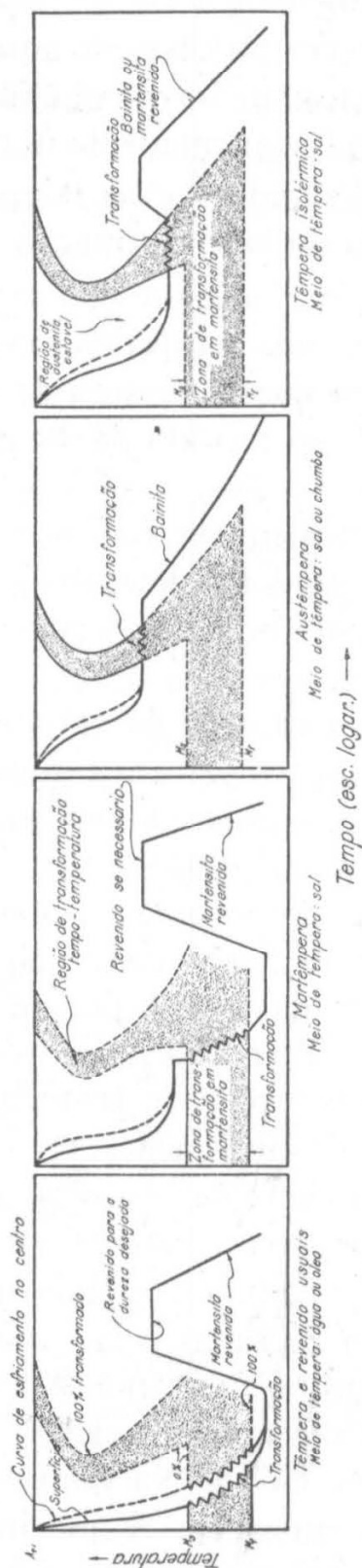


Fig. n.º 15 — Diagrama de quatro processos de têmpera.

em que uma liga a base de ferro é aquecida a uma temperatura acima da zona de transformação e depois de mantida por tempo adequado a essa temperatura é esfriada lentamente a uma temperatura abaixo da

zona de transformação. As peças habitualmente são esfriadas no forno, ainda que possam ser retiradas e esfriadas num meio que reduza a velocidade de esfriamento.

Coalescimento — qualquer processo de aquecimento e esfriamento de aço que produza carbonetos em forma globular ou arredondada. Os processos de coalescimento frequentemente usados são:

1) Aquecimento prolongado a uma temperatura logo abaixo do limite inferior do intervalo de transformação com esfriamento lento subsequente.

2) A peça é sujeita a uma temperatura que é elevada e abaixada alternadamente entre um ponto no interior e outro logo abaixo da zona de transformação. Esse método dá bons resultados com peças pequenas de baixo carbono.

3) Aços ferramenta podem ser coalescidos por um aquecimento a uma temperatura acima da zona de transformação e então, depois de manutenção por tempo suficiente, esfriamento muito lento no forno.

4) Aços ferramenta com rêsde de carbonetos podem ser coalescidos por têmpera em óleo da temperatura mínima a partir da qual todo o carbono está dissolvido, seguido de um reaquecimento a uma temperatura ligeiramente abaixo da zona de transformação.

Em geral os tipos de recozimento podem ser melhor descritos definindo-se a microestrutura resultante. (a) A estrutura lamelar é preferida para a maioria das operações de usinagem em aços médio carbono e aços liga de construção. (b) A estrutura coalescida é geralmente exigida para operações de trabalho a frio.

Os princípios de recozimento cíclico tal como desenvolvidos por Peter Payson, metalurgista chefe de pesquisas da Crucible Steel Co of American, são cobertos por várias patentes obtidas pelo autor e pertencentes à companhia. Entretanto, crendo que seriam de utilidade geral as informações foram liberadas pela Crucible Eteel à todos aqueles que delas se quisessem utilizar durante os anos de guerra.

O princípio básico de recozimento cíclico é obtido da construção das curvas em S ou curvas TTT. Na têmpera do aço interessa primordialmente a porção da curva em S que indica o tempo e a temperatura para o início da transformação afim de se evitar as estruturas mais moles que se formam a altas temperaturas. No recozimento cíclico o principal objetivo é a temperatura e o tempo necessários para a formação das estruturas mais moles, na zona de temperaturas

entre o cotovelo da curva em S (550°C) e a temperatura crítica inferior, Ae_1 . Si a transformação tem lugar dentro dêsse intervalo, quanto mais alta a temperatura de transformação, tanto mais grossa e mais mole a estrutura.

A curva representando o fim de transformação indica quão lentamente deve a peça ser esfriada, para que se evite estruturas mais duras, e quando o esfriamento pode ser feito sem perigo. A temperatura varia com o tipo de aço, de acôrdo com as diferenças de forma da curva isotérmica de transformação. Na vizinhança de 700°C. no caso da maioria dos aços carbono e liga, está o tempo mínimo para fim de transformação; continuação de esfriamento lento abaixo dessa temperatura é perda de tempo.

De acôrdo com Payson, o ciclo de recozimento mais curto seria o de esfriamento mais rápido possível a uma temperatura predeterminedada abaixo da temperatura crítica inferior, pelo tempo indicado pela curva em S para a transformação completar-se, e entro esfriamento completo pelo modo mais conveniente. Deve-se tomar precauções quando se utiliza dados de uma curva em S de um aço determinado, pois essa representa uma corrida determinada de um aço. Corridas diferentes, embora de análise semelhante, variam em endurecibilidade, o que por sua vez modifica a localização da curva.

E' possível construir uma curva em S para qualquer aço, como objetivo da determinação do tempo e temperatura necessárias a um recozimento cíclico; para aços de uso comum, tais curvas já foram desenvolvidas e estão disponíveis.

O recozimento cíclico é de aplicação prática no recozimento de aços de alto carbono e liga quando o tempo é um fator inportante. O método preferido para recozimento cíclico é o esfriamento rápido de temperatura de austenitização à temperatura de recozimento e manutenção na mesma durante tempo suficiente para permitir transformação isotérmica. Entretanto o esfriamento contínuo lento produzirá aproximadamete os mesmos resultados.

4.^a PARTE

E' estudado o objetivo da cementação e descrito como uma superfície dura pode produzida numa peça, permanecendo um núcleo tenaz e dúctil.

A cementação pelo carbono é uma dos processos metalúrgicos mais antigos. Foram descobertos nos túmulos egípcios, 1200 a 200 anos antes de Cristo, facas cementadas, talhadeiras e outras ferramentas. O século 17 foi propriamente o início da cementação na manufatura de aço. O objetivo do processo era aumentar o teor de carbono de ferro pudlado de 0.05 para cêrca de 2.0% de carbono. Frequentemente durante a carburação havia formação de monóxido de carbono através do óxido de ferro, com o aparecimento de poros. Por essa razão o aço era chamado aço poroso. Posteriormente a superfície das armaduras era cementada. Hoje o processo foi desenvolvido a um ponto que é de importância comercial e tem enorme aplicação na indústria.

O objetivo da carburação ou endurecimento superficial é a formação de uma superfície dura com um núcleo tenaz e dúctil. O anel exterior pode ser de qualquer profundidade, controlando-se tempo e temperatura do ciclo de cementação. Por tratamento térmico posterior à cementação a peça terá um anel exterior de alta resistência a fadiga e ao desgaste com núcleo de propriedades variáveis num intervalo bastante grande. E' empregado onde dureza elevada, alta resistência a tração e ao desgaste são necessárias na superfície e é necessário um núcleo que seja tenaz para resistir a choque e mole para permitir usinagem. Engrenagens, eixos de comando de válvulas, mancais, esferas de rolamento são peças que têm superfície cementadas.

A cementação para endurecimento superficial é feito por três métodos: (1) — cementação sólida ou em caixa, (2) — cementação a gás, e (3) — cementação em banho de sal líquido.

A cementação em caixa é dependente de ação de mistura de CO e CO₂ com o aço; na cementação a gás o agente pode ser qualquer um dos hidrocarbonetos com a presença de CO. Na cementação em banho de sal líquido, o carbono é obtido por reação com sais ativados.

Aços para cementação devem ter capacidade para absorver o carbono uniformemente, nas temperaturas usuais de cementação, e temperar satisfatoriamente num meio de têmpera adequado. A presença de óxido de ferro e inclusões não metálicas, que aparecem, por exemplo, em aços Bessemer para parafuso, aços efervescentes ou semi-acalmados, afetam bastante a capacidade do aço adquirir aqueles requisitos. A capacidade de cementação é controlada na manufatura do aço. Uma vez que os de baixo carbono são *acalmados*, *semi-acalmados* e *efervescentes*, é importante especificar-se a fonte do material quando

o aço deve ser usado para cementação. Aços para cementação, de boa qualidade, devem ser completamente acalmados e ter uma estrutura de grãos normal.

Em 1922 McQuaid e Ehn verificaram que os aços cementados que apresentavam pontos moles na superfície endurecida, quando tratados termicamente, tinham uma rede de carbonetos no contorno dos grãos diferente daquele obtida num aço endurecido satisfatoriamente. A estrutura satisfatória foi denominada normal e aquela não adequada anormal. O anel exterior hipereutetóide de um aço normal, quando es-

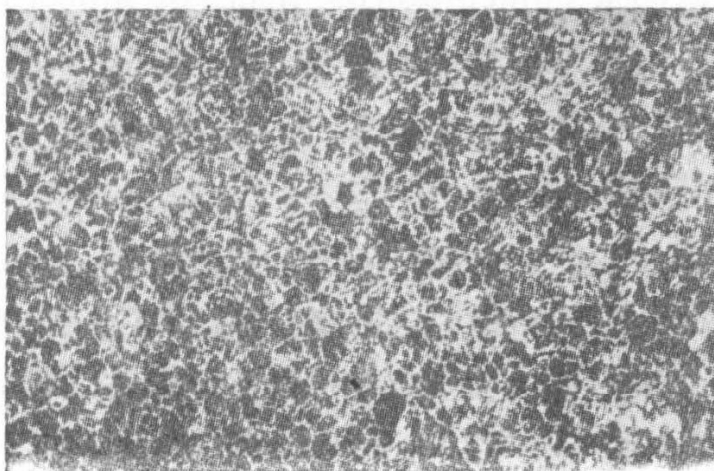


Fig. n.º 16 — Aço de grama fina, de acôrdo com o ensaio McQuaid-Ehn Nital 100X.

friado lentamente da temperatura de cementação, tem colônias de perlita fina envolvidas por uma rede fina de cementita hipereutetóide.

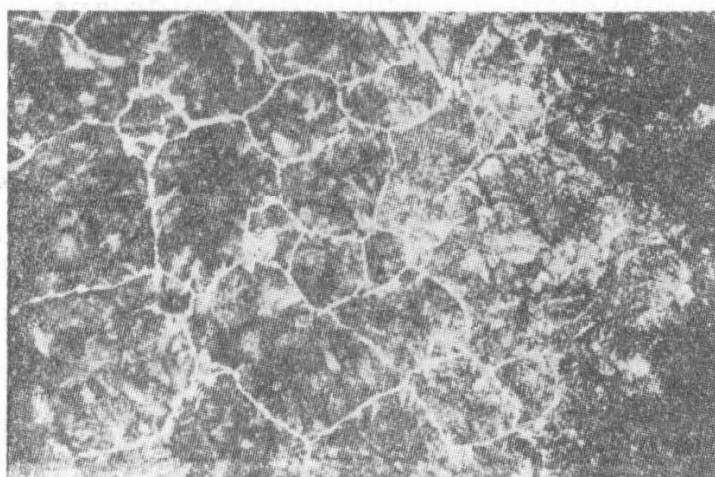


Fig. n.º 17 — Aço de grama grossa, 100X, mesmo ensaio.

de. (fig. 16 e 17). O aço normal é identificado quando a colônia de perlita é envolvida por ferrita livre com envoltório irregular de ilhas de cementita hipereutetóide.

Há certa diferença na facilidade com que o carbono é absorvido nos aços para cementação, tanto nos tipos padrão como fora deles. Os aços NE 8620 estão acima da média para os aços liga, em consequência não mostram tendência para alta concentração em carbono na superfície, como é o caso dos SAE 4120, 5120 e 6120. Manganês, cromo, níquel e molibdênio em várias combinações são adicionados ao aço para aumentar a resistência e a dureza do núcleo e auxiliar a obtenção de anéis exteriores muito duros e resistentes ao desgaste. Os aços ao manganês foram anteriormente considerados como de grana grossa e quebradiços, mas por adições controladas na panela podem ser refinados com ótimos resultados sobre a fragilidade.

Cementação em caixa.

Materiais comerciais para cementação utilizados em cementação em caixa variam em composição, resultando em cada tipo velocidade diferente de penetração do carbono. A base de mistura carbonetante pode ser carvão de madeira, coque, ou uma mistura dos dois combinada com algum tipo de ativador.

No sumário de G. K. Manning (1942) apresentando à ASM, "Carburizing Characteristics of 0.20 Per Cent Carbon Alloy and Plain Carbon Steels", recomenda-se: "Elemento de liga, quando presente em quantidade geralmente achadas nos aços para cementação, não tem praticamente efeito na profundidade do anel exterior. A presença de cromo leva ao extremo de carburação na superfície. O níquel tende a modificar, até certo ponto, a ação do cromo. A velocidade de esfriamento não tem efeito apreciável no teor de carbono superficial. Quanto mais longo o tempo, mais alto é o teor de carbono superficial e mais profundo o anel, desprezando-se a camada descarbonetada de 0.008 a 0.025 de milímetro, depois de 10 horas a 925°C. Para tempo constante, quanto mais alta a temperatura, tanto mais alto o carbono da superfície e tanto mais profundo o anel exterior, admitindo-se novamente que a película descarbonetada superficial foi desprezada.

Tem-se desenvolvido rapidamente, durante os últimos dez anos, o processo de cementação a gás tanto no processo contínuo como no tipo de forno comum. Esse processo depende da introdução no forno de gases de hidrocarbonetos, tais como gás natural, butana, propana e

frequentemente gases da cidade. Carbonetos líquidos de óleos, quando volatilizados pela temperatura da câmara do forno, são também usados.

Os aços cementados por misturas sólidas são adaptados igualmente para cementação a gás. A profundidade total do anel, gradiente de carbono da superfície para o núcleo, são função da temperatura, tempo e características da mistura usada.

Cementação líquida em banho de sal.

Os sais para cementação são uma mistura de sais ativados, compostos de sais neutros com cianetos. Na superfície do banho é colocada uma mistura de carbono formando uma crosta capaz de dissolver-se no banho, mantendo-o supersaturado de carbono, com um mínimo de queima ou consumo. Esse método de cementação líquida é capaz de produzir penetração da ordem de 3mm. A velocidade de penetração varia um pouco com o tipo de aço e com a temperatura de cementação, a profundidade de penetração é uma função do tempo e da temperatura como se observa na tabela IV.

TABELA IV

CEMENTAÇÃO EM BANHO LÍQUIDO — VALORES DE PENETRAÇÃO (mm)

Minutos	°C			
	815	840	870	910
30	0.15-0.20	0.17-0.22	0.22-0.28	0.25-0.31
60	0.20-0.25	0.25-0.33	0.33-0.38	0.41-0.46
90	0.25-0.33	0.36-0.43	0.43-0.50	0.50-0.58
120				0.64-0.69
180				0.79-0.85
240				1.02-1.07

O tempo para cementação é muito reduzido quando o sal líquido substitue a antiga cementação em caixa, especialmente quando são necessárias várias horas para elevar a temperatura do banho, dependendo do tipo e tamanho das peças. As peças são aquecidas muito mais rápida e uniformemente num banho de sal fundido. Analogamente o tempo total é reduzido, comparativamente à cementação a gás. Uma das principais vantagens do tratamento térmico em banhos de sal é a uniformidade de aquecimento. Peças tratadas em banho de sal sofrem somente um mínimo de distorção. Isso é verdade tam-

bém para peças tais como engrenagens de transmissão e de diferenciais, etc.

Peças cementadas em banho líquido podem ser temperadas em água, salmoura ou óleo de acôrdo com os resultados desejados. Peças temperadas em água ou salmoura ou não necessitam limpeza depois da operação ou quando muito exigem um banho de água quente. Usa-se um alcalino quando se quer limpar a peça depois de um banho de óleo. As peças permanecem com o acabamento original, a não ser uma aparência de superfície ondulada, com ligeira variação de coloração que houve tratamento térmico.

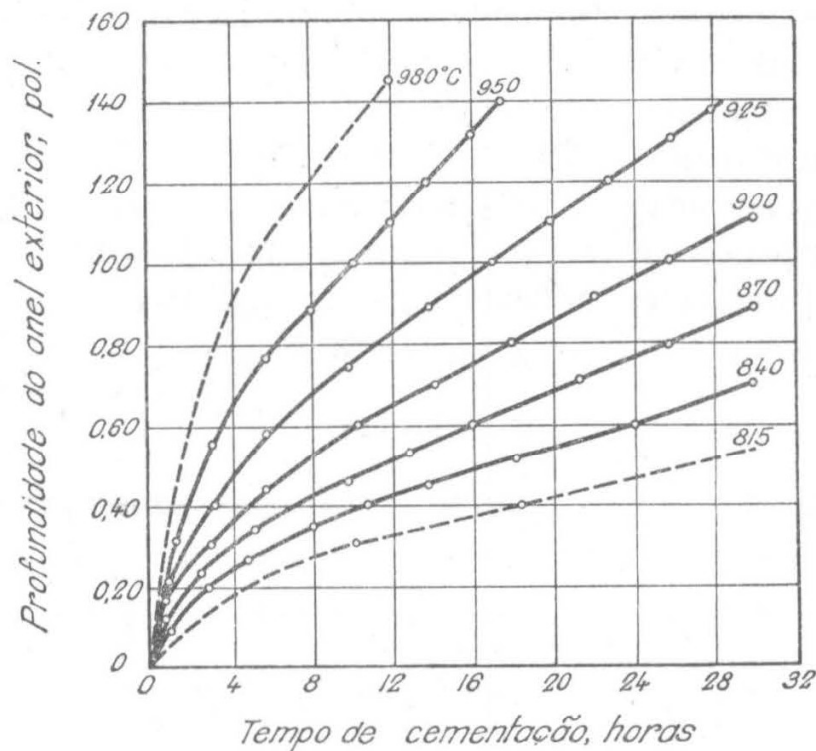


Fig. n.º 18 — Efeito da temperatura na profundidade do anel exterior de um aço SAE 3115, cementado em gás natural. As curvas para cementação em caixa seriam aproximadamente as mesmas para tempos iguais à mesma temperatura.

Os aços para cementação são fornecidos seja com grana fina seja com grana grossa. Aços de grana grossa, são geralmente usados pela maior facilidade de usinagem e maior temperabilidade. Aços de grana fina não aumentam de grão à temperatura de cementação, resultando em peças muito mais tenazes quando temperadas diretamente daquela temperatura. Geralmente um aço de grana grossa requer tratamento duplo para maior tenacidade. As temperaturas variam de 860 a 910°C e podem ser controladas dentro dos limites de erro do pirômetro. Dentes de engrenagem, representando secções

relativamente finas, aquecem mais rapidamente que a massa do metal do cubo; um aquecimento uniforme em banho de sal reduzirá as distorções a um mínimo.

A elevação do carbono da superfície abaixa a temperatura crítica do aço. O anel cementado portanto exigirá temperatura relativamente baixa para endurecer, enquanto o núcleo exigirá temperatura mais elevada. Essa diferença permite grande variação no tratamento térmico a ser escolhido depois da cementação, podendo-se obter uma faixa larga de propriedade no núcleo e na periferia. É também importante que se leve em conta, na determinação do tratamento térmico adequado, que o tamanho de grão é um fator considerável na obtenção do máximo de ductilidade e tenacidade para resistência ao choque.

Para que se compreenda a importância do controle do tamanho de grão deve-se seguir as mudanças que se processam em uma peça de aço carbono comum para cementação, com 0,15% de carbono por exemplo. Antes do aquecimento ele tem a estrutura produzida pela laminação ou forjamento. A proporção que a temperatura se eleva, o tamanho de grão mantém-se o mesmo até que se atinge a temperatura crítica inferior ou A_{c1} , quando então se inicia a transformação para austenita. O tamanho de grão mínimo é obtido na temperatura A_{c3} .

Admitamos um tamanho de grão 6 a 8. A temperatura A_{c3} para um aço de 0,15 de carbono é cerca de 855°C . Si aço é aquecido a uma temperatura mais alta observa-se que o crescimento do grão se inicia imediatamente. Existe um intervalo de temperatura em que o tamanho de grão permanece constante. Admitamos que esse tamanho de grão 6 a 8 permanece desde o momento em que se transforma em austenita a 855°C até que atinja a temperatura de 875°C . Quando aquecido acima de 875°C inicia-se o crescimento. Uma parte dos grãos começa a crescer, enquanto a maioria está ainda no tamanho de grãos original 6 a 8. Essa mistura de tamanho (fino e grosso) é chamada estrutura duplex e é indesejável para obtenção de boas propriedades mecânicas, tendendo a produzir distorção no tratamento térmico. Um aquecimento ainda mais alto a uma temperatura de cerca de 925°C produzirá um crescimento ainda maior para tamanho de grão 1 ou 2, com alguns ainda tipo 6 ou 8. Acima dessa temperatura os últimos grãos menores desaparecerão e o aço estará completamente de grão grosso.

Os aços que têm temperatura de crescimento abaixo de 925°C são considerados de grão grosso, enquanto que aços que retêm um grão austenítico 5 a 8 à temperatura de 925 ou acima são considerados de grão fino. O ensaio de McQuaid-Ehn mostra se a temperatura de crescimento do anel exterior está acima ou abaixo de 925°C. O ensaio estandarde adotado consiste em aquecimento da amostra de aço em uma mistura carbonetante durante 8 horas a temperatura de 925°C e então esfriamento lento na caixa de cementação. Depois do tratamento de cementação, a peça é cortada, polida, e atacada para aparecimento dos contornos dos grãos e é verificado no anel cementado o tamanho e a normalidade. Tamanhos de grão 1 a 5, padrão ASTM, são classificados como grão grosso, enquanto que tamanhos 5 a 8 são considerados como grão fino.

Vários dos tratamentos mais importantes estão graficamente representados na fig. 19, relativamente à temperatura de transformação do núcleo e da periferia e às propriedades desenvolvidas. Em todos, exceto os tratamentos E e F, admitem-se um esfriamento final em caixa. Êsses tratamentos e as principais características dos produtos resultantes são descritos nos parágrafos seguintes:

Tratamento A — Reaquecer até imediatamente acima da zona crítica do anel exterior e temperar. Uma vez que o aquecimento é abaixo da temperatura para endurecimento do núcleo, êle reterá o tamanho de grão resultante do prolongado aquecimento à temperatura de cementação. Assim êsse tratamento é melhor indicado para aços que retêm grão fino no ensaio McQuaid-Ehn.

Uma vez que a concentração em carbono do anel exterior é mantida baixa (sem cementita hipereutetóide presente), obtem-se um anel periférico duro, de grana fina, o que é indicativo de boa resistência ao desgaste. As vantagens, aplicadas a aços de grana fina, são que o núcleo e partes não cementadas da peça permanecem em condição de boa usinabilidade e eleva-se ao mínimo a distorção na têmpera pelas baixas temperaturas de operação. Entretanto, as peças em conjunto não terão as melhores condições de tenacidade e resistência ao choque.

Tratamento B — Si a temperatura de reaquecimento do tratamento A é ligeiramente elevada, obtem-se um resfriamento e endurecimento parcial do núcleo. O tratamento B, quando feito a temperaturas adequadas, produz um anel periférico, nos aços de grão fino, com pequeno aumento de granulação e um núcleo de resistência elevada.

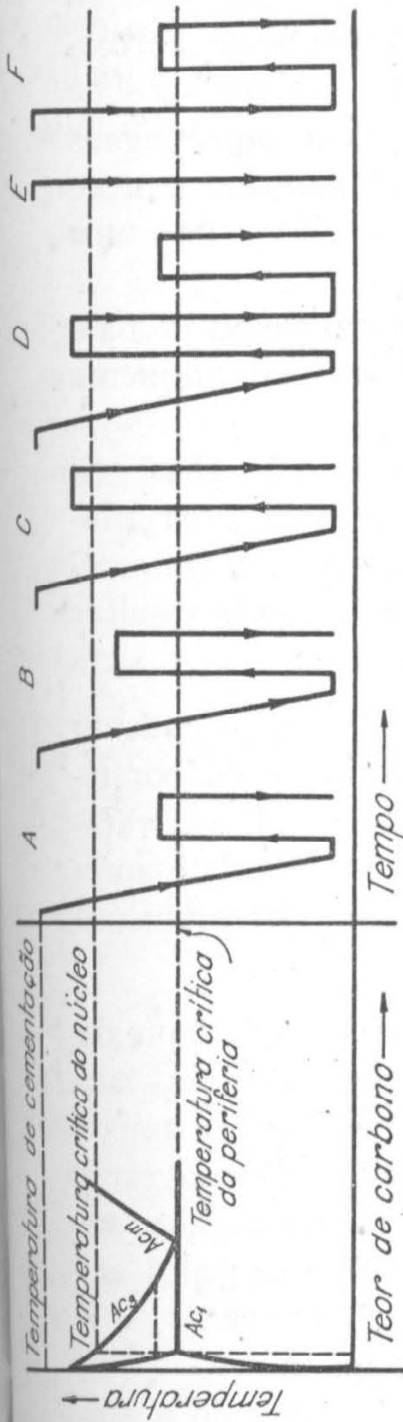


Fig. n.º 19 — Representação esquemática de vários tratamentos para endurecimento de aços cementados e resumo das propriedades do anel exterior e do núcleo.

Treatment	Outer Ring	Core
A (best for fine grain steels)	Refined; carbonates in excess not dissolved.	Not refined, soft and malleable.
B (best for fine grain steels)	Slight grain growth; partial solution of carbonates in excess.	Partially refined; more resistant and tough than (A).
C (best for fine grain steels)	Some grain growth; favors solution of carbonates; retention of austenite in high alloy steels.	Refined; maximum ductility and hardness. Best combination of resistance and ductility than (B).
D (best treatment for coarse grain steels)	Refined; favors solution of carbonates in excess; minimum retained austenite.	Refined; soft and malleable maximum ductility and resistance to shock.
E (indicated only for fine grain steels)	Not refined with excess carbonates; austenite retained; minimum distortion; test with high carbon.	Not refined, but hardened.
F (indicated only for coarse grain steels)	Refined; favors solution of carbonates in excess; minimum retained austenite.	Not refined; ductility high.

Nesse caso, uma quantidade modernada de carbono hipereutetóide será dissolvida, considerando-se as temperaturas intermediárias de têmpera.

Tratamento C — Quando a temperatura de reaquecimento é elevada acima da temperatura crítica do núcleo, haverá algum crescimento de grão na estrutura do anel exterior, mas haverá resfriamento completo no núcleo, que endurecerá por têmpera produzindo-se aproximadamente a mais alta resistência que se possa desejar em aços de baixo carbono. É esse tratamento bastante usado para engrenagens de automóvel. Fornece um produto no qual o anel exterior tem no núcleo endurecido um refôrço em trabalhos pesados. Só se usa uma têmpera e distorção na operação é tornada mínima.

Si o carboneto em excesso não é suficiente para elevar a temperatura A_{cm} do anel exterior, acima de A_{c3} do núcleo, o tratamento C dissolverá completamente êsses carbonetos.

Êsse tratamento é melhor indicado para aços de grão fino. Si usado em aços com têmpera ao ar, devido à presença, em proporções relativamente elevadas, de elementos de liga, a alta temperatura de têmpera, que favorece a retenção de austenita, pode resultar em ligeira redução da dureza do anel periférico.

Tratamento D — Si o tratamento C é seguido por reaquecimento para refino do anel e novamente temperado, será obtida a melhor tenacidade e ductilidade possíveis em aços cementados. Êsse tratamento completo é indicado para aços de grão grosso, onde existe apreciável crescimento da granulação do anel exterior com o tratamento C.

Tratamento E — Si o aço cementado é temperado diretamente da caixa de cementação, sem qualquer esfriamento intermediário, não será obtido refino algum, nem no núcleo nem o anel periférico, ambos porém serão endurecidos. Êsse tratamento dá condições favoráveis à retenção de austenita e, com concentração suficientemente alta em carbono, a experiência mostra que o núcleo, embora mole pelos ensaios comuns de dureza por penetração (rokwell, shore, etc.), é a prova de lima e exhibe alta resistência à fadiga e desgaste.

As outras vantagens incluem retenção em solução de todo o carboneto em excesso, diminuição de distorção devida à retenção da austenita e economia devida à eliminação do reaquecimento para nova têmpera. O tratamento exige cuidados consideráveis na seleção do aço e determinação das condições de carburação. Uma vez que não há refino subsequente tanto do núcleo como do anel exterior,

ambos serão caracterizados pelo tamanho de grão existente no fim do ciclo de cementação. Isso restringe o método a aços que exibem estruturas de grão fino no ensaio McQuaid-Ehn.

O tratamento E está agora sendo aplicado mais extensivamente na manufatura de engrenagens de automóveis, depois da técnica de cementação regulada de modo a se obter anéis de alto teor de carbono (1,10 a 1,40 por cento em aços de grão fino n.ºs 5 a 8).

Tratamento F — Si o tratamento E é seguido de um reaquecimento logo acima da zona crítica para refino do anel e novamente temperado, obtém-se máximo de tenacidade e ductilidade do anel.

Uma vez que o reaquecimento é abaixo da temperatura de têmpera do núcleo ele permanecerá mole e não sofrerá refino na estrutura, mas reterá o tamanho do grão obtido por aquecimento prolongado a temperatura de cementação. Por essa razão só é adaptado para aços de grão fino.

O tratamento F é preferido ao tratamento A quando as peças são esfriadas lentamente da temperatura de cementação. A temperatura da temperatura de cementação retém mais carboneto não dissolvido no anel periférico depois da têmpera final. Portanto, o anel terá menos carbonetos de contorno, com conseqüente aumento da resistência e tenacidade, bem como uma diminuição da probabilidade de rachas e descascamento na têmpera.

A seleção do meio de têmpera adequado dependerá da secção transversal da peça, a endurecibilidade do aço usado e os últimos resultados desejados. Para peças de secções irregulares deve-se escolher óleo em lugar de água devido à sua menor velocidade de esfriamento, com menor gradiente de temperatura entre as secções finas e as pesadas, tendendo a reduzir as rachas de têmpera e distorção. Quando se usa óleo como meio de têmpera, deve-se escolher um aço de maior teor em liga para obtenção de endurecibilidade desejada. Antigamente as peças cementadas eram sempre temperadas em óleo ou água, mas recentemente o processo de martêmpera tem provado com vantagens.

5.ª PARTE

Prática recomendada para o tratamento térmico de aço rápido.

E' essencial um tratamento térmico adequado na obtenção de maior resistência ao desgaste para máxima duração da ferramenta de corte, de formação ou de cisalhamento. O tratamento térmico da fer-

ramenta de aço rápido é uma das operações mais cuidadosas devido às altas temperaturas necessárias para têmpera — 1200-1300°C. Os pontos importantes a serem levados em consideração no tratamento térmico de ferramentas de aços rápidos são: (1) — Preaquecimento (velocidade, temperatura e tempo); (2) — atmosfera do forno; (3) — temperatura de têmpera e tempo à temperatura; (4) — meio de têmpera.

O endurecimento de ferramentas de aços rápidos tais como 18-4-1, 6-6-2, etc., exige cuidados especiais para prevenir descarbonetação, devida às altas temperaturas de trabalho. Êsse tipos descarbonetam facilmente, especialmente aços rápidos ao molibdênio. Há vários processos de preaquecimento e aquecimento à temperatura de têmpera. o banho de sal sendo provavelmente o método mais usado entre os tratadores comerciais e fabricantes de ferramenta. Os fornos de mufla, com atmosfera controlada, são usados com sucesso, com atmosfera neutra ou não oxidante mantida com cuidado. Quando se usa o tipo semimufla, usa-se bórax ou um pó comercial neutro para prevenção de descarbonetação.

O banho de sal oferece muitas vantagens no tratamento térmico de aço rápido. Com exclusão do ar, assegura-se um meio ou “atmosfera” controlada. Sal fundido aquece a peça a uma temperatura uniforme que é ligeiramente mais baixa que nos outros métodos e resulta em menor distorção. E’ meio simples e seguro para têmpera de aços rápidos, pois tratadores com menos experiências podem produzir peças de superior qualidade. Quando transferidos de um banho de sal para outro, a peça é protegida contra oxidação por um filme de líquido.

O banho de sal pode ser usado como meio de têmpera aquecido. Têmpera interrompida, pelos métodos de banho aquecido, têm sido tão eficientes no tratamento térmico de aços carbono comuns e aços liga para construção que é agora aplicado a ferramentas de aço rápido. Vários técnicos estudaram a cinética da decomposição da austenita. Em geral todos aconselham a mesma técnica, entretanto o resultado de suas pesquisas diferem no quanto de decomposição da austenita e a temperatura em que se inicia a formação da martensita.

As figs. 20 e 21 mostram curvas T-T-T para os aços 18-4-1 e 6-6-2, tais como apresentadas por Paul Gordon, Morris Coen e Robert S. Rose em seu artigo “The Kinetics of Austenite Decomposition in High Speed Steels”. Daquele trabalho tira-se as seguintes conclusões:

1) a cinética de decomposição da austenita nos aços rápidos 18-4-1 e 6-6-2 foi estudada e verificou-se que é praticamente idêntica.

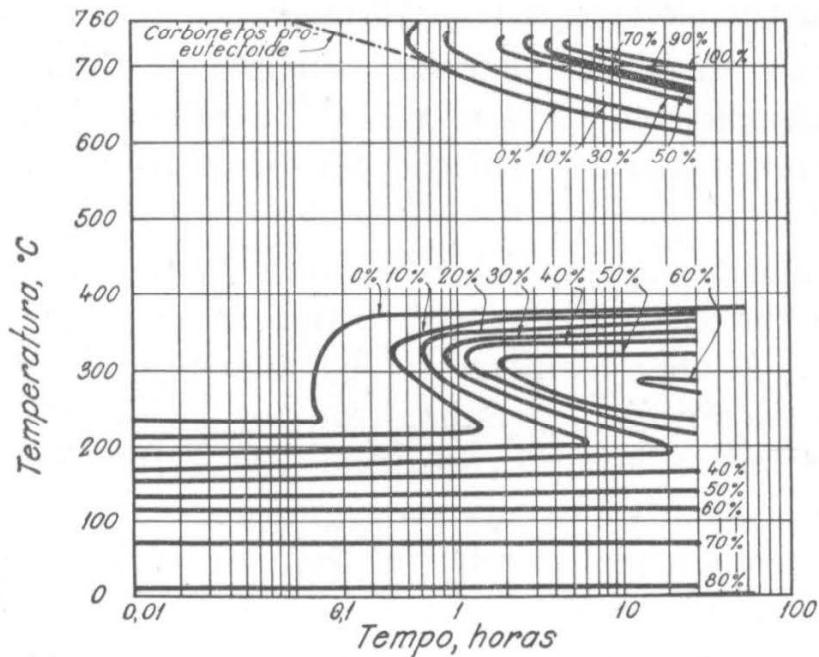


Fig. n.º 20 — Curvas de transformação para o aço rápido 18-4-1.

2) Os dois aços mostram dois intervalos de temperaturas de atividade isotérmica depois de períodos de incubação definidos. O produto de transformação isotérmica no limite superior (750° a 650°C) é perlita fina, precedida ou acompanhada por precipitação do

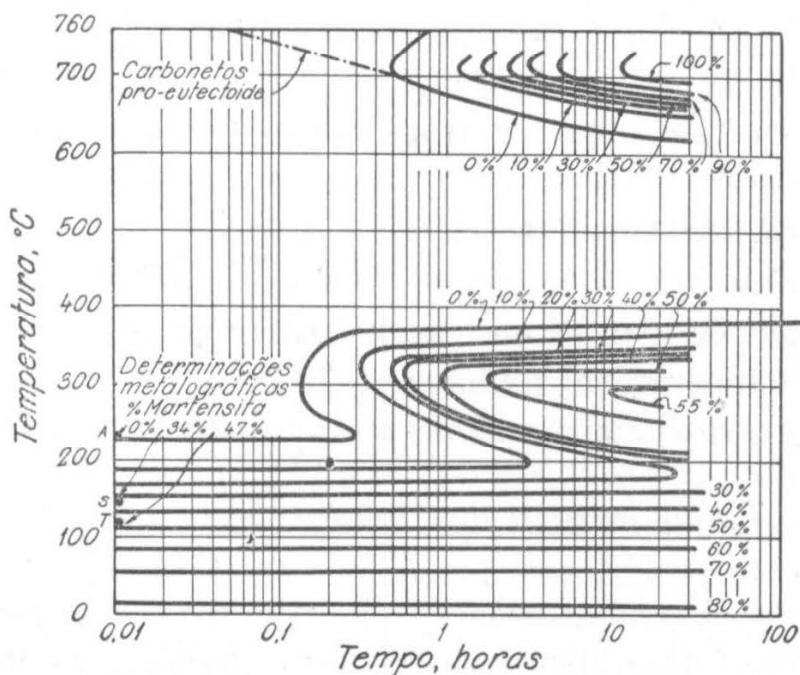


Fig. n.º 21 — Curvas de transformação para o aço rápido 6-6-2.

carbono. No limite inferior (350 a 180°C) o produto é bainita acicular. A transformação em perlita completa-se se o tempo de transformação é suficiente, mas a transformação cessa muito antes da austenita estar completamente transformada.

3) Para o caso particular de austenitização estudado, a transformação em martensita inicia-se a 215°C, sem período observável de incubação, anterior à transformação para martensita, uma vez atingido o ponto M.

4) Têmpera a quente a temperatura dentro da zona de transformação em martensita produz esta transformação durante o esfriamento do ponto M até a temperatura de manutenção seguida de formação da bainita isotérmica. A última transformação tem lugar em dois estágios; o primeiro estágio consistindo na formação de placas de distribuição ocasional de bainita na região da martensita e o segundo estágio ocorrendo posteriormente, com formação geral de bainita através de toda a estrutura.

5) Não há transformação observável na têmpera a quente na zona intermediária entre 370 e 590°C. Entretanto essa têmpera a quente, principalmente acima de 480°C, condiciona a austenita para formação de bainita, a custa da martensita durante o esfriamento subsequente. A transformação no esfriamento tem lugar em dois estágios, o produto do estágio superior sendo bainita e o inferior, martensita. A proporção que se aumenta o tempo de manutenção e a temperatura nessa zona de têmpera a quente, a quantidade de bainita formada durante o esfriamento aumenta e deixa menos austenita disponível para formação de martensita.

6) Por tratamentos a quente adequados pode-se obter, à temperatura ambiente, várias combinações de perlita, bainita, martensita e austenita retida nos aços 6-6-2 e 18-4-1.

7) É chamada a atenção sobre a relação existente entre o presente trabalho e a prática comum de têmpera a quente de aço rápido entre as temperaturas ambiente e 750°C.

Explicação de falhas através das curvas.

As curvas de transformação do aço rápido para ferramentas explicam algumas das falhas que ocorrem quando temperado em óleo. Aços ferramenta, quando temperado em óleo e água, apresentam fre-

quentemente rachas e distorcem bastante na operação. Essas falhas podem ser atribuídas a diferença de temperatura, gradiente excessivo através da peça durante a transformação. Para se evitar esse tipo de perda é recomendada frequentemente remoção da peça do banho da temperatura, enquanto a mesma está ainda quente. A temperatura interrompida pode dar falhas e rachas si retirada do banho antes da transformação estar completada. A boa prática ensina que se deve esfriar o aço depois da temperatura interrompida de modo a que ele possa ser segurado a mão antes do revenido.

A prática recomendada para endurecimento do aço rápido para ferramenta em banho de sal é a seguinte:

— Preaquecimento a 815-840°C. Para produção bastante pesada dois preaquecimentos, 590-700°C e 815-870°C, podem ser vantajosos.

— Aquecimento a 1180°-1230°C.

— Temperatura em sal a 540°-590°C e manutenção até a peça estar com temperatura uniforme.

— Esfriamento ao ar até temperatura ambiente.

— Revenido a 510°-590°C.

— Pode ser dado um tratamento final para aumento da vida da ferramenta; esse pode consistir em duplo revenido ou preaquecimento em sal nitretado para aumento da dureza superficial. Tratamento abaixo de zero para transformação completa é um terceiro método sobre o qual ainda há bastante discussão.

As curvas nas figs. 20 e 21 mostram que a austenita nos aços rápidos não se transforma completamente à temperatura ambiente. Resultados obtidos por diferentes investigadores mostraram que a quantidade de austenita retida a temperatura ambiente pode ser da ordem de 5 a 20%.

Outro trabalho de Paul Gordon e Morris Cohen contribuiu com a seguinte informação:

1) Durante o esfriamento contínuo de 18-4-1 da temperatura de temperatura de 1290°C a 190°C a transformação inicia-se a 215°C e prossegue lentamente até a temperatura ambiente e cessa a aproximadamente a-100°C.

2) Esfriamento interrompido de 1290°C a temperatura ambiente, como no caso comum de operação de temperatura em óleo, faz cessar a transformação.

3) Envelhecimento de aço rápido endurecido a temperatura ambiente antes de esfriado a -150°C reduz a intensidade de transfor-

mação subatmosférica e baixa a temperatura a que a transformação cessa. Esse efeito estabilizador na austenita retida torna-se tanto mais pronunciado quanto mais longo o tempo de envelhecimento a temperatura ambiente.

4) A velocidade de esfriamento subzero e tempo de manutenção a -150°C não tem efeito na intensidade de transformação subatmosférica.

5) Si aço 18-4-1 endurecido é revenido a temperaturas entre 90° e 470°C , a austenita retida é suficientemente estabilizada do modo a que não haja transformação durante esfriamento de subsequente a -150°C . Temperaturas acima de 470°C , entretanto, produzem suficiente precipitação de carbonetos para abaixar sua estabilidade até o ponto onde a transformação novamente dá-se durante o esfriamento da temperatura de têmpera a -150°C .

6) Revenindo-se o aço 18-4-1 depois de temperado a temperaturas subzero, completa-se a transformação da austenita retida.

7) A elevação de dureza desenvolvida na têmpera subatmosférica do 18-4-1 mantém-se durante o revenido até temperaturas da ordem de 570°C .

8) As indicações são de que têmpera a temperatura subzero e revenido de aço rápido 18-4-1 produzem combinação de dureza, resistência e ductilidade que não podem ser obtidas pelo revenido e têmpera comuns.

Vários investigadores verificaram que o tratamento subzero aumenta a vida produtiva de uma ferramenta de corte. Existem diferenças no quanto de aumento de vida útil. Variam igualmente as opiniões quanto aos casos em que é conveniente a refrigeração durante o processo de endurecimento. Stewart M. De Poy, metalurgista da Delco Products Division, General Motors Corp, Dayton, Ohio, iniciou um programa de pesquisas intensivas sobre o efeito e processo de tratamento subzero dos aços rápidos. Os primeiros resultados mostraram aumentos notáveis na vida da ferramenta, sendo que dos quatro tratamentos empregados um destacou-se bastante.

Selecionando-se bites de aço ferramenta com a análise C — 0,84; Mn-0,32; Cr-4,00; W-5,28; Mo-4,26; Va-1,72; Poy submeteu-os aos seguintes tratamentos (No 3). Preaquecimento a 870°C , austenitização a 1225°C ; têmpera em sal a 505°C ; esfriamento ao ar até -75 a -100°C ; revenido a 565°C por 2 horas; a -80°C por 3 horas; revenido a 565°C por 2 horas.

Os bites foram ensaiados trabalhando em tórno a sêco, na redução do diâmetro de um tubo de aviação de um aço AMS 6380, com dureza de cêrca de 38-42 Rc. Êsse processo, n.º 3, permitiu uma produção média por torneamento de 8,3 unidades, contra 7,5 com o melhor tratamento térmico, e a produtividade aumentou de 45.7%, comparada com 31.5% obtida como o melhor tratamento imediatamente inferior. O mesmo processo aplicado a ferramentas de forma circular do mesmo tipo de material também provou bem aumentando o produtividade de 54.5%.

TABELA V

DADOS SÔBRE A VIDA DA FERRAMENTA DEPOIS DE TRATADA EM BANHO DE NITRETAÇÃO

<i>Tipo de Ferramenta</i>	Vida normal (não tratados) <i>Peças</i>	Vida depois do tratamento <i>Peças</i>
Mandriladora	700-1000	4000-4500
Formadora externa:		
Desbastadora	2000	4200
Acabadora	2000	7400
Broca furadora intermitente (13/16) .	9000	9400
Calisvar cônico (3/4")	1000	1995
Bedame	2000	4000

O tratamento térmico foi feito numa bateria de fornos elétricos com preaquecimento, altas temperaturas e saís para têmpera, revenido em forno Homo, refrigerado pela colocação de peças em mistura de gelo seco e metanol contidos numa unidade refrigerante operando a -50°C.

Ralph G. Kennedy Jr, Cleveland, Twist Drill Co, apresentou resultados de seus trabalhos no Metal Congress de 1944, e mostrou que o tratamento subzero, entre revenidos múltiplos, aumentou a produção de cêrca de 10%.

O acabamento final das ferramentas de aço rápido é frequentemente considerado como nitretação, ainda que isso seja assencialmente a explicação química do processo. O método de aplicação é inteiramente diferente do processo comum de nitretação onde se emprega amônia gasosa para formar a superfície nitretada de ferro nas peças de aço. A nitretação das ferramentas de aço rápido é um pro-

cesso mais simples e é aplicado por meio de um banho de sal fundido a temperatura ligeiramente acima daquelas recomendadas para o revenido do tipo de aço rápido tratado.

Antes da nitretação, é essencial que as ferramentas sejam tratadas corretamente, com superfícies nem carbonetadas nem descarbonetadas. Isso prejudicaria mais ou menos o objetivo do tratamento de nitretação, ainda que dos dois uma superfície ligeiramente descarbonetada seja preferível à segunda, pois a adição de nitretos à superfície do aço tende a neutralizar a superfície mole produzidos pelo processo de descarbonetação.

Variação no tempo de tratamento.

A temperatura usual é ou a temperatura final de revenido ou ligeiramente abaixo, e geralmente no intervalo 540-565°C. O tempo de tratamento varia de 10 a 90 minutos, a temperatura dependendo do tamanho e forma da ferramenta e também da operação em que a ferramenta vai ser empregada. Ferramentas sujeitas a choques — especialmente aquelas utilizadas em metais ferrosos — devem, para obtenção de melhores resultados, ser tratadas em períodos curtos de tempo, enquanto que em aços ferramentas utilizados na usinagem de metais não ferrosos, borracha dura ou plásticas, haverá vantagens em períodos mais longos de tratamento.

Em muitos casos, em fresas e cortadores de engrenagens, deve-se evitar um anel exterior extremamente pesado, pois embora o número de peças entre a operação de usinagem possa ser aumentada, o número total de usinagem por ferramenta diminuirá, devido às rachas mais profundas que resultam na perda da ferramenta.

A profundidade usual de penetração é de 0,025 a 0,05 mm para tratamentos de 30 a 90 minutos e abaixo de 0,0225 mm para tratamentos de 10 a 20 minutos. Essa camada superficial é extremamente dura e não pode ser medida pelo método comum de ensaio de dureza.

Numa ferramenta completamente revenida esse tratamento de nitretação não aumenta as dimensões da ferramenta. Existem vários ensaios onde foram determinadas medidas verificando-se que as dimensões da ferramenta estudada não variaram de 0,002 mm antes e depois do tratamento de nitretação.

O aumento da vida da ferramenta em várias operações resultantes de tratamento de nitretação, quando verificado em relação a fer-

ramentas tratadas corretamente, é evidente como pode ser observado pelos dados na Tabela V. As despesas de tratamento de nitretação para ferramentas de aço rápido são extremamente baixas. Os fabricantes de banhos de sal estudaram êsse problema e desenvolveram misturas que produzem resultados controláveis e uniformes na obtenção de camadas superficiais endurecidas.