

IV

TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS: RECOZIMENTO, NORMALIZAÇÃO, TÊMPERA E REVENIDO; COALESCIMENTO

1 — **Tratamentos térmicos dos aços** — A comissão conjunta AFA-ASM-ASTM-SAE (*) adotou para tratamento térmico a seguinte definição:

«Combinação de operações de aquecimento e resfriamento aplicadas em determinado período de tempo aos metais e ligas metálicas, no estado sólido, de modo a produzir desejadas propriedades».

A importância do tratamento térmico é evidenciada pela simples enumeração de alguns dos objetivos visados: remoção de tensões internas, aumento da dureza, aumento da resistência ao desgaste, aumento da resistência à tração, aumento da ductilidade, aumento da usinabilidade, melhora das propriedades de corte, melhora da resistência à corrosão, melhora da resistência ao calor e modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. É necessário, pois, que o tratamento térmico seja escolhido e realizado adequadamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo.

A modificação ou obtenção de determinadas propriedades pela aplicação de tratamentos térmicos é devida a modificações estruturais que se produzem nos aços. Não se verifica, pela simples aplicação de um tratamento térmico, qualquer alteração da composição química do aço.

Há casos, entretanto, em que interessa somente uma modificação parcial de certas propriedades mecânicas; por exemplo, melhorar superficialmente a dureza do aço. Tal efeito é conseguido pela alteração parcial da composição química do material. Tais tratamentos, em que a combinação de operações de aquecimento e resfriamento é realizada em condições tais que produzam uma mudança parcial da composição química da liga e, conseqüentemente, uma modificação parcial de suas propriedades mecânicas, serão chamados, nestas notas, de «tratamentos termo-químicos».

Os tratamentos térmicos usuais dos aços são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, coalescimento e os tratamentos isotérmicos.

(*) AFA — American Foundrymen's Association.
ASM — American Society for Metals.
ASTM — American Society for Testing Materials.
SAE — Society Automotive Engineers.

2 — **Recozimento** — É o tratamento térmico que é realizado com o fim de se alcançar um ou vários dos seguintes objetivos: remover tensões, diminuir a dureza, alterar propriedades mecânicas como resistência, ductilidade, etc., modificar os característicos elétricos e magnéticos, ajustar o tamanho de grão, regularizar a textura bruta de fusão, remover gases, produzir uma microestrutura definida, eliminar os efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tiver sido anteriormente submetido.

O tratamento genérico recozimento abrange os seguintes tratamentos específicos:

— **Recozimento total ou pleno**, que consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica, durante o tempo necessário e suficiente para se ter solução do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguido de um esfriamento muito lento, realizado ou mediante o contróle da velocidade do resfriamento do forno ou desligando o forno e deixando que o aço sob tratamento e o forno esfriem conjuntamente. O recozimento total ou pleno está representado esquematicamente na fig. 30.

A temperatura para recozimento pleno é de mais ou menos 50° C acima do limite superior — linha A_3 — da zona crítica,

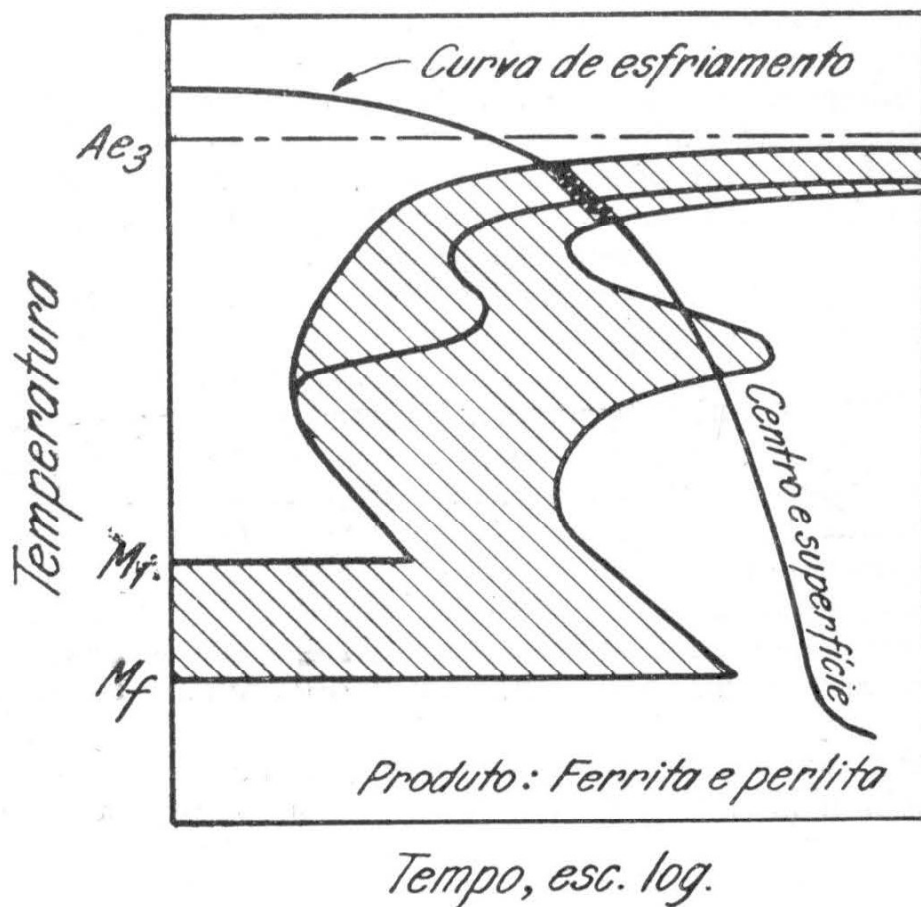


FIG. 30 — Diagrama esquemático de transformação para recozimento total.

para aços hipoeutetoides e acima do limite inferior — linha A_1 — para os hipereutetoides. Para estes aços, não se deve ultrapassar a linha superior A_{c_m} porque, no resfriamento lento posterior, ao ser atravessada novamente essa linha iria formar-se nos contornos dos grãos da austenita, um envólucro contínuo e frágil de carbonetos, o qual iria conferir excessiva fragilidade aos aços. Já na normalização, tratamento que implica num resfriamento ao ar, não se tem formação desse envólucro de carbonetos, justamente porque o resfriamento sendo mais rápido não dá oportunidade a tal precipitação dos carbonetos. Nessas condições, o aquecimento para a normalização de aços hipereutetoides pode ser levado a temperaturas acima da linha A_{c_m} .

Os constituintes estruturais que resultam do recozimento pleno são: perlita e ferrita para os aços hipoeutetoides, cementita e perlita para os aços hipereutetoides e perlita para os aços eutetoides.

— **Recozimento isotérmico ou cíclico**, que consiste no aquecimento do aço nas mesmas condições que para o recozimento total, seguido de um esfriamento rápido até uma temperatura situada dentro da porção superior do diagrama de transformação isotérmico, onde o material é mantido durante o tempo neces-

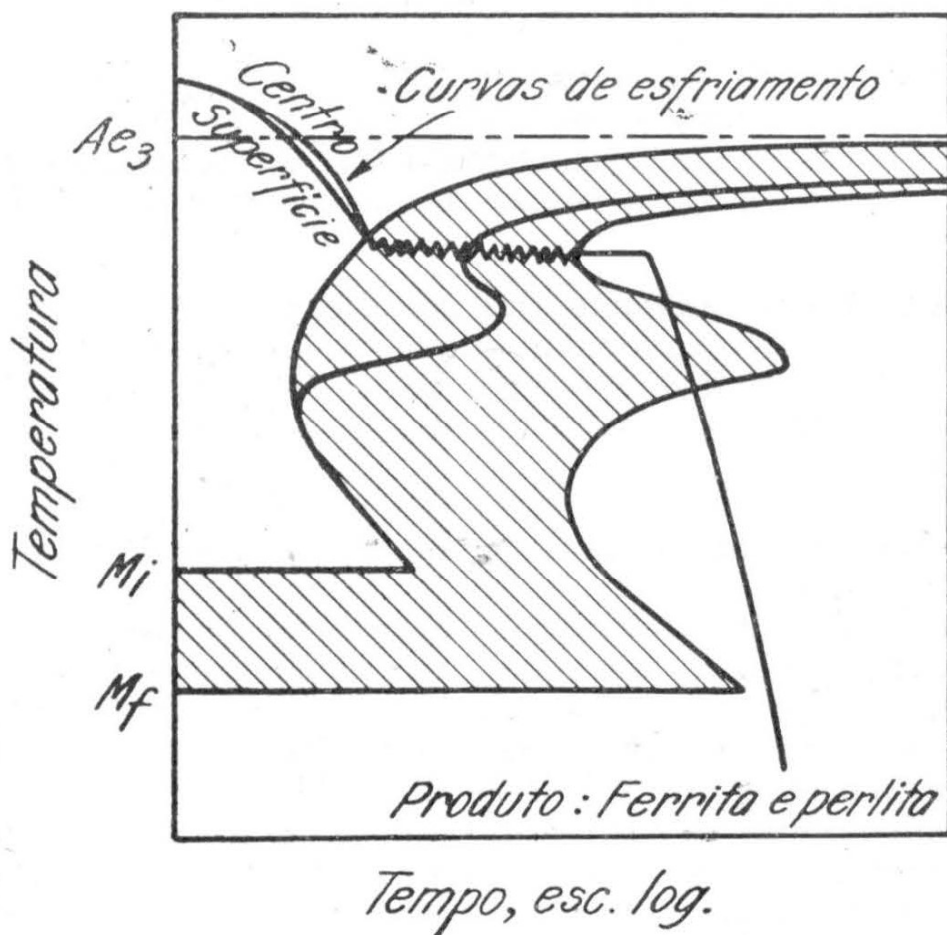


FIG. 31 — Diagrama esquemático de transformação para recozimento isotérmico ou cíclico.

sário a se produzir transformação completa. Em seguida, o esfriamento até a temperatura ambiente pode ser apressado como mostra o diagrama da fig. 31. Os produtos resultantes desse tratamento são também perlita e ferrita, perlita e cementita ou só perlita. A estrutura final, entretanto, é mais uniforme que no caso do recozimento pleno. Além disso, o ciclo de tratamento pode ser encurtado sensivelmente; nesse sentido, cita-se um caso em que, para uma determinada ferramenta, o tempo total do recozimento foi reduzido de 16 a 8 horas, ao passar-se do recozimento comum ao recozimento isotérmico.

— **Recozimento para alívio de tensões**, que consiste no aquecimento do aço a temperaturas inferiores à do limite inferior da zona crítica. O objetivo desse tratamento é aliviar as tensões originadas em operações de transformação mecânica a frio, como estampagem profunda, ou em operações como endireitamento, corte por chama, soldagem ou usinagem. Essas tensões começam a ser aliviadas a temperaturas pouco acima da ambiente; entretanto, é aconselhável aquecimento lento até, pelo menos, 500°C , para garantir completo alívio de tensões. De qualquer modo, a temperatura de aquecimento deve ser a mínima compatível com o tipo e as condições da peça, para que não se modifique a sua estrutura interna assim como não se produzam alterações sensíveis nas suas propriedades mecânicas.

— **Recozimento em caixa**, que consiste no aquecimento, a temperaturas que variam de 600 a 750°C , de peças de aço, tais como tiras e chapas laminadas a frio, em recipientes metálicos fechados de modo a reduzir ao mínimo a possibilidade de oxidação.

— **Recozimento brilhante**, que consiste num recozimento em fornos com atmosfera controlada (nitrogênio, hidrogênio, propana, butana, etc.), reduzindo apreciavelmente a oxidação superficial ou a descoloração e resultando uma superfície relativamente brilhante.

3 — **Normalização** — Consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de esfriamento ao ar. Esse tratamento está esquematizado na fig. 32. Para os aços hipoeutetoides a temperatura de aquecimento ultrapassa a linha A_3 e para os hipereutetoides ultrapassa a linha A_{cm} , sem os inconvenientes, neste último caso, no esfriamento ao ar que se segue, da formação do envólucro fragil de carbonetos.

A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço fundidas principalmente; frequentemente, e com o mesmo objetivo, a normalização é aplicada em peças depois de laminadas ou forjadas. Esse tratamento melhora também a uniformidade da microestrutura. A normalização é ainda usada como tratamento preliminar à têmpera e revenido justamente para pro-

duzir estrutura mais uniforme, além de reduzir o empenamento e facilitar a solução de carbonetos e de elementos de liga. Os constituintes que se obtêm na normalização são ferrita e perlita fina, perlita fina e cementita ou perlita fina. Eventualmente, dependendo do tipo de aço, pode-se obter bainita, como a figura 32 mostra.

A Tabela IV permite comparar as propriedades mecânicas de aços de vários teores de carbono, nos estados recozido e normalizado

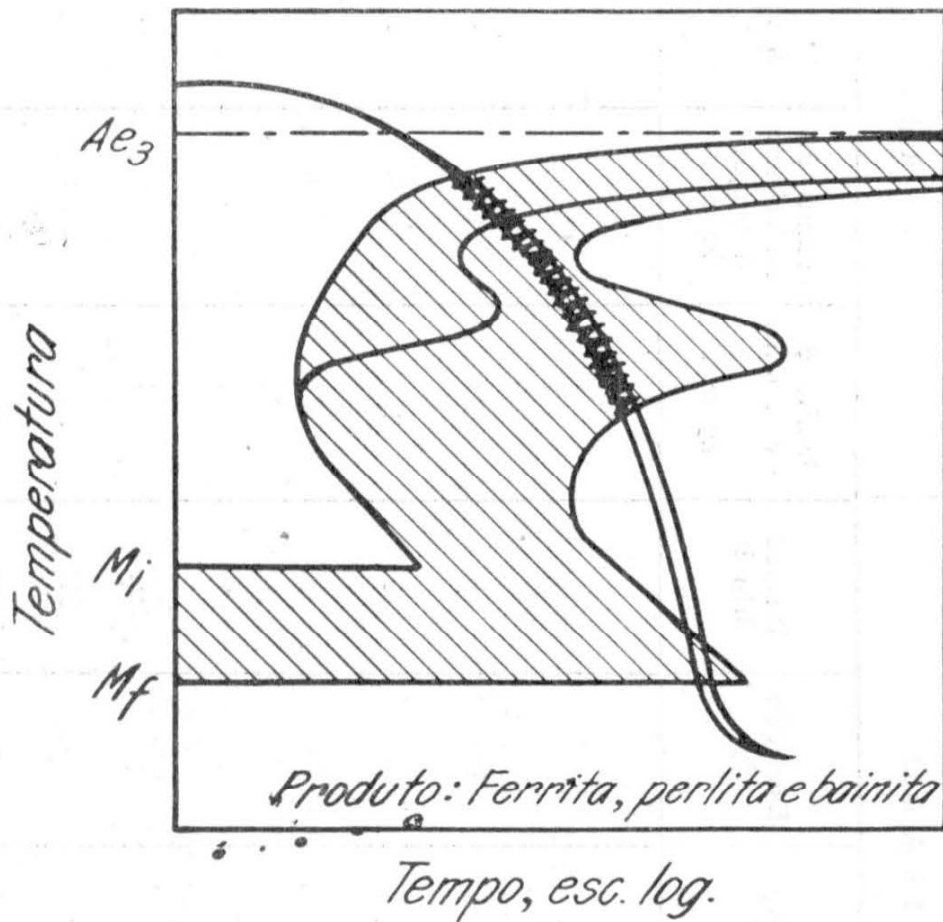


FIG. 32 — Diagrama esquemático de transformação para normalização.

4 — **Têmpera** — Consiste no esfriamento rápido do aço de uma temperatura acima da sua temperatura crítica (mais ou menos 50°C acima da linha A_3 para aços hipoeutetoides e acima da linha A_1 para os hipereutetoides), em um meio como óleo, água, salmoura ou mesmo ar. A fig. 33 esquematiza a operação de têmpera. O objetivo que se visa com a têmpera é a obtenção da estrutura martensítica, devendo-se, pois, evitar que a curva de esfriamento toque no cotovelo da curva em C, para que não haja transformação da austenita. Assim sendo, a velocidade de esfriamento dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças.

TABELA IV
Propriedades Mecânicas de Aços Normalizados e Recozidos

% C	N O R M A L I Z A D O						R E C O Z I D O					
	Limite de escoamento kg/mm ²	Limite de resistência à tração kg/mm ²	Along. %	Estricção %	Dureza Brinell	Limite de escoamento kg/mm ²	Limite de resistência à tração kg/mm ²	Along. %	Estricção %	Dureza Brinell		
0,01	18,0	31,5	45	71	90	12,5	29,0	47	71	90		
0,20	31,5	45,0	35	60	120	25,0	41,0	37	64	115		
0,40	35,5	59,5	27	43	165	31,0	52,5	30	48	145		
0,60	42,0	76,5	19	28	220	34,5	67,0	23	33	190		
0,80	49,0	94,0	13	18	260	36,5	80,5	15	22	220		
1,00	70,0	106,5	7	11	295	36,5	75,5	22	26	195		
1,20	70,0	107,0	3	6	315	35,5	71,5	24	39	200		
1,40	67,0	103,5	1	3	300	35,0	69,0	19	25	215		

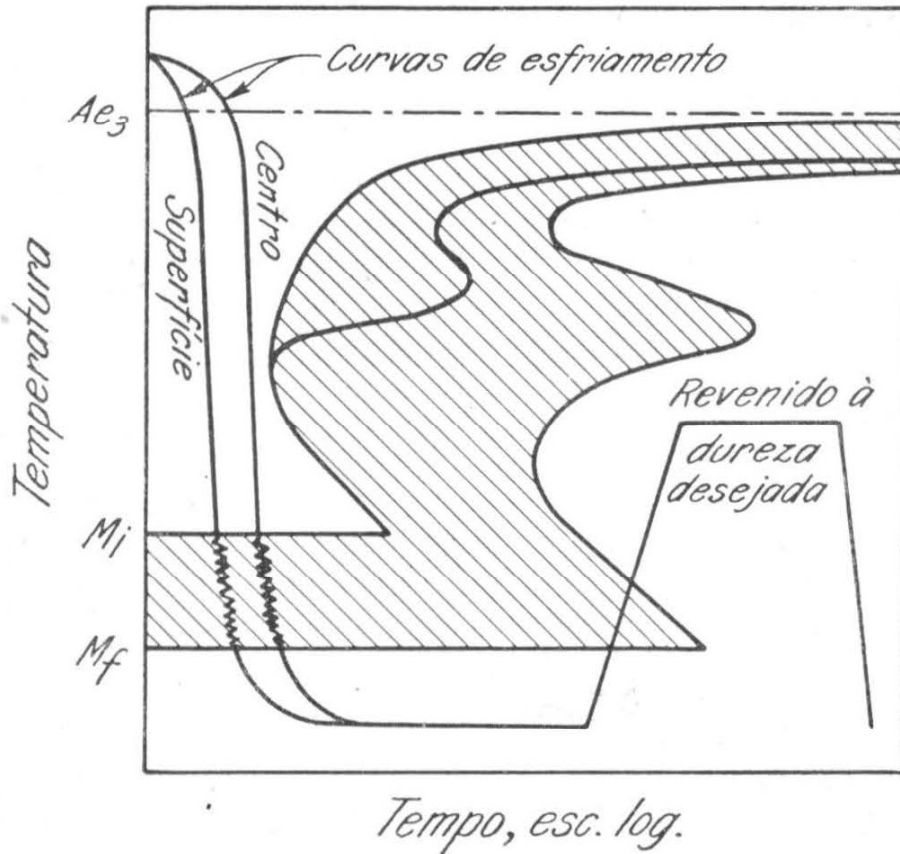


FIG. 33 — Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.

Os meios de esfriamento mais comumente utilizados na têmpera são óleo, água, salmoura; utilizaram-se também ar, sais e metais fundidos. O mais drástico é salmoura e o mais branco é metal ou sal fundido e mantido a uma determinada temperatura. A eficácia relativa de alguns meios de têmpera, tomando água à temperatura ambiente como unidade é a seguinte:

Ar	0,02
Óleo	0,3
Água	1,0
Salmoura	2,0

Esses dados são relativos às velocidades de esfriamento na faixa de temperaturas entre 720° C e 550° C que, como se sabe, corresponde à parte crítica da curva TTT. Pelo exame dos dados acima, verifica-se que as soluções aquosas (salmoura), constituem os meios de têmpera mais eficientes. Entre essas soluções aquosas, as mais comuns são as soluções de água com 10 % de hidróxido de sódio, ou 10 % de cloreto de sódio, ou 10 % de carbonato de sódio. A água aquecida apresenta uma velocidade de esfriamento que se localiza entre o óleo e o ar. Esse fato deve ser levado em conta ao se utilizar água como meio de esfriamento, pois se o seu volume não é suficiente, ela se aquecerá excessivamente e sua eficácia como meio de esfriamento ficará grandemente diminuída. Evita-se esse inconveniente

pelo resfriamento contínuo da água, ou pelo uso de água corrente em vez de água tranquila. No caso do óleo, êsse efeito da temperatura não é tão sensível, mas por garantia pode-se evitar que sua temperatura suba muito, resfriando-se por meio de um sistema de circulação.

Outro fator a ser levado em conta é a agitação do meio de esfriamento ou do movimento da peça no interior dêsse meio. De fato, nessas condições, o esfriamento é mais rápido e, além disso, tem-se maior garantia de um melhor contáto entre todas as partes da peça e o meio de esfriamento.

A têmpera do aço tem como principais objetivos o aumento de sua dureza e de seu limite de resistência à tração. Na realidade, com a têmpera visa-se obter uma determinada dureza a uma profundidade desejada, resultando também baixa ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), além de elevadas tensões internas. Êstes inconvenientes — fragilidade e tensões internas — serão eliminados pelo revenido.

Para que a têmpera seja bem sucedida vários fatores devem ser levados em conta. Em primeiro lugar, a velocidade de esfriamento deve ser tal que impeça transformação da austenita nas temperaturas mais elevadas, em qualquer parte da peça que se deseja endurecer. De fato, as transformações da austenita nas altas temperaturas podem dar como resultado estruturas mistas as quais ocasionam o aparecimento de pontos moles além de conferirem ao aço baixos valores para o limite de escoamento e para a resiliência. Assim sendo, as dimensões das peças a serem temperadas constituem um fator importante porque podem determinar diferenças de esfriamento entre a superfície e o centro. Em peças pequenas ou de pequena espessura, essa diferença é desprezível. O mesmo, entretanto, não se dá com peças de grandes dimensões, no centro das quais a velocidade de esfriamento é menor do que na superfície, resultando estruturas de transformação mistas, a não ser que o teor de elemento de liga do aço seja suficiente para impedir essa transformação e produzir somente a estrutura martensítica.

Às vezes, por outro lado, é conveniente um núcleo mais mole e, então, escolhe-se um aço e uma velocidade de esfriamento que produzam superfícies duras e núcleos naquelas condições.

A razão da alta dureza da martensita já foi estudada. Para maior clareza, será repetida e ampliada a seguir:

— O carbono dissolve-se prontamente no ferro gama, mas é praticamente insolúvel no ferro alfa. Os átomos de carbono no ferro gama se distribuem nos espaços entre os átomos de ferro, isto é, no interior das unidades cúbicas da face centrada. Entretanto, os espaços entre os átomos de ferro no reticulado cúbico centrado do ferro alfa são incapazes de acomodar átomos de carbono sem que se produza considerável deformação do reticulado. Êsse é o motivo da baixa solubilidade do carbono no

ferro alfa. Quando a austenita é resfriada a uma temperatura em que não é mais estável, o ferro gama passa a alfa e o carbono é expulso da solução sólida combinando-se com o ferro de modo a formar o carboneto Fe_3C . Este Fe_3C possui um reticulado complexo com poucos planos de escorregamento e é extremamente duro. Com o ferro alfa forma, como se sabe, o constituinte lamelar perlita. Quando se aumenta a velocidade de esfriamento da austenita, pode-se chegar a uma velocidade tão alta que não permite a expulsão do carbono da solução sólida para formar o Fe_3C , verificando-se somente passagem da forma alotrópica do ferro de gama a alfa. Tem-se, então, uma solução sólida super-saturada de carbono em ferro alfa, constituindo a **martensita** (fig. 34) cuja extrema dureza deve ser atribuída à distorção do reticulado cúbico centrado causada pela supersaturação. Admite-se hoje que a martensita apresente uma estrutura tetragonal centrada e não cúbica, formada por um movimento de átomos em planos específicos da austenita. Essa estrutura está também sujeita a micro-tensões elevadas e se apresenta também supersaturada de carbono ou contém partículas grandemente dispersas de carbonetos.

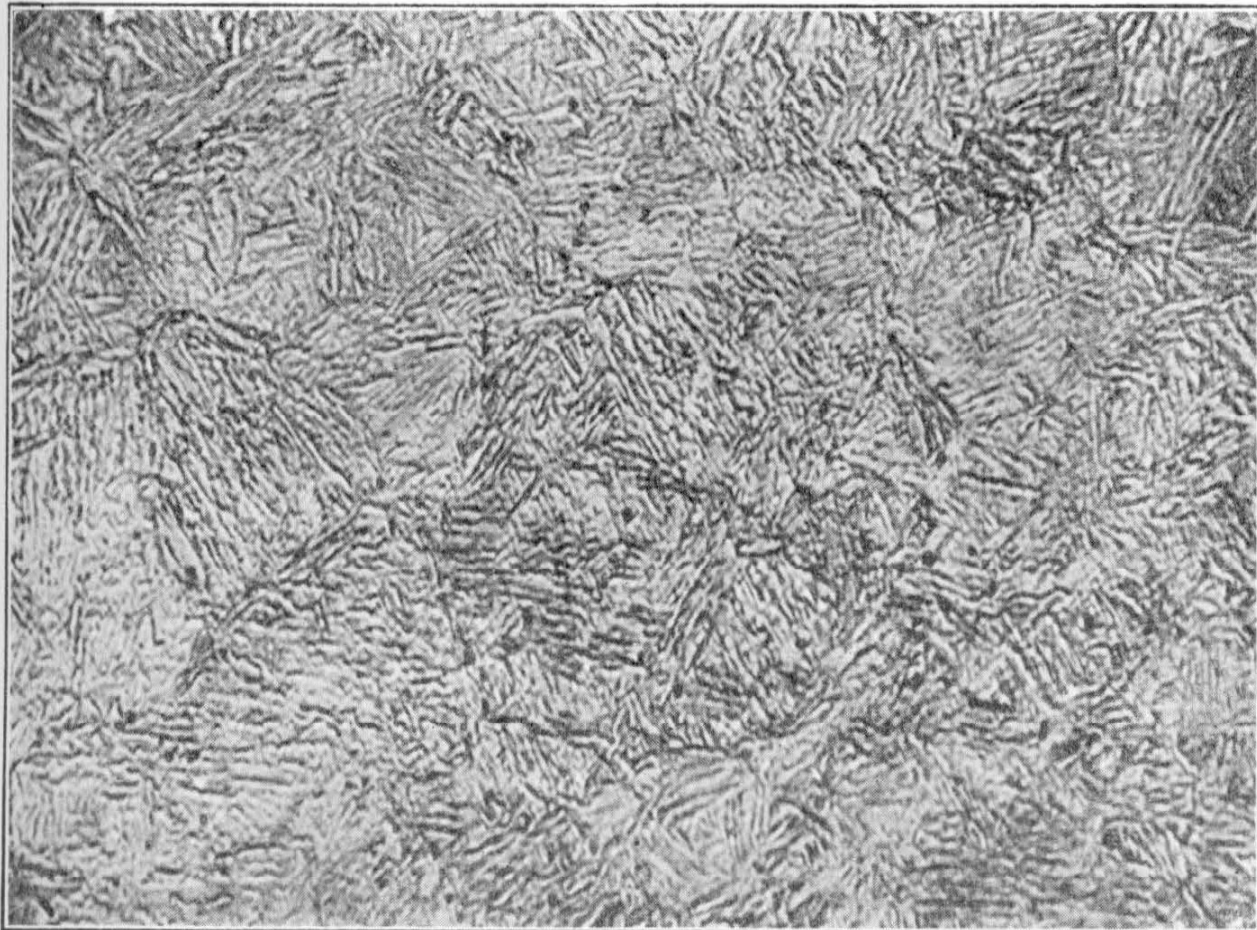


FIG. 34 — Aspecto micrográfico de aço temperado: martensita.
Ataque: ácido nítrico 750 x.

Do que foi acima exposto, resulta que a estrutura martensítica se caracteriza pela excessiva dureza e por apresentar tensões internas apreciáveis.

Esses inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo aquecimento da martensita, ou seja, do aço temperado, a temperaturas determinadas. Essa operação constitui o **revenido**.

5 — **Revenido** — O revenido é um tratamento térmico que, normalmente, sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de remover as tensões internas, diminui a dureza e aumenta a ductilidade e a tenacidade (fig. 35).

O aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável desta ao reticulado estável cúbico centrado, produz reajustamentos internos que aliviam as tensões e, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que crescem e se aglomeram, conforme a temperatura e o tempo.

Conforme a temperatura de revenido, verificam-se, pois, as seguintes transformações:

— **Entre 150° e 230° C**, o reticulado tetragonal torna-se cúbico, qualquer austenita residual se transforma, verifica-se certa precipitação de carbonetos, o que produz uma estrutura que, ataca-

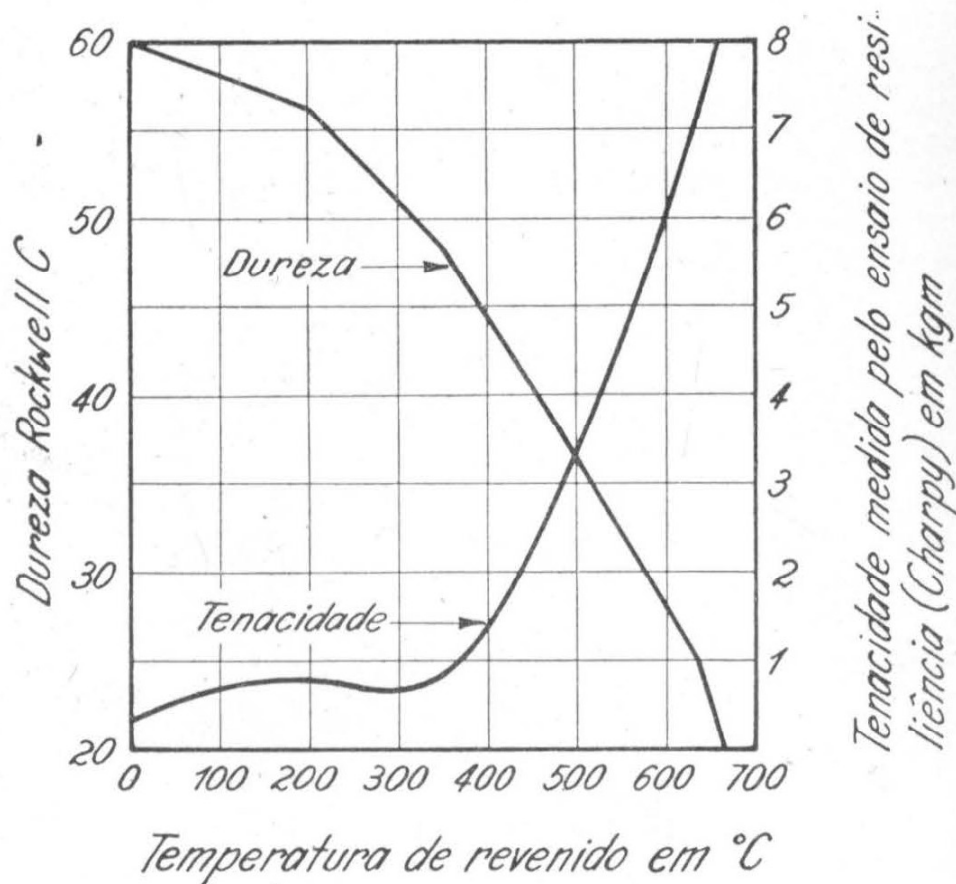


FIG. 35 — Efeito do revenido sobre a dureza e a tenacidade de um aço SAE 1045 temperado (Figura extraída do livro «Principles of Heat Treatment» de M.A. Grossmann).

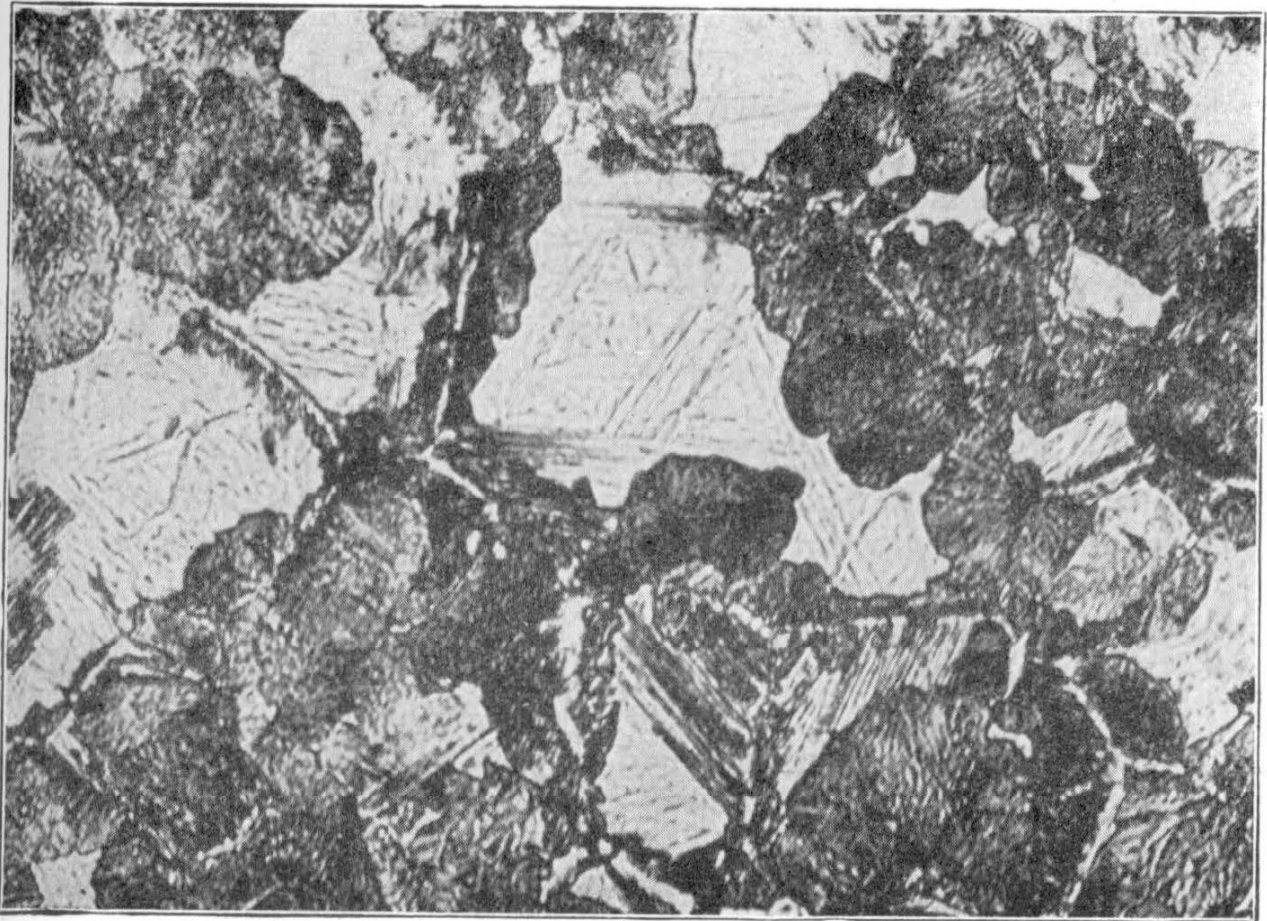


FIG. 36 — *Aspecto micrográfico de um aço temperado. Estrutura mista troostita-martensita. Ataque: níttrico 750 x.*

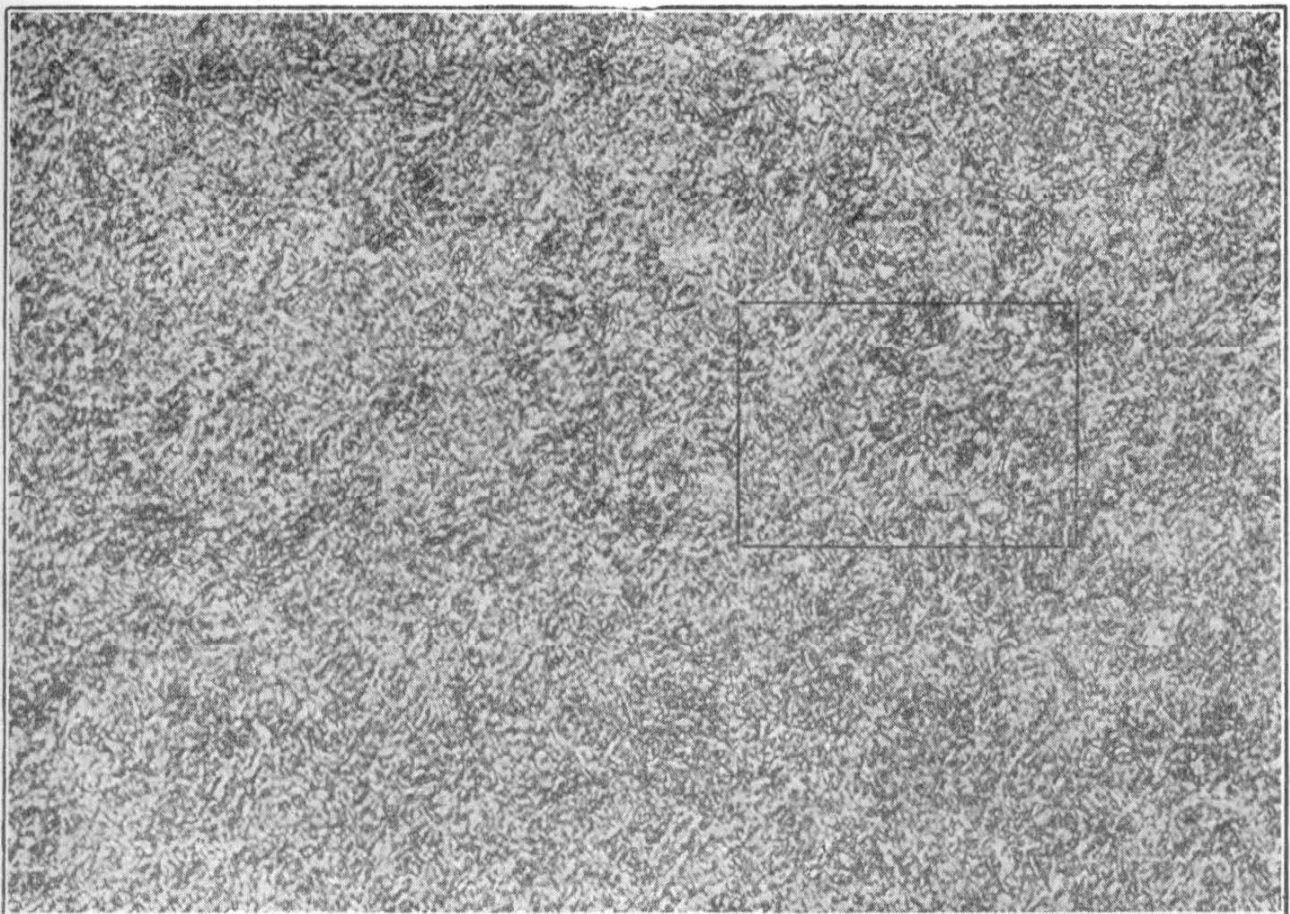


FIG. 37 — *Aspecto micrográfico de um aço temperado e revenido. Sorbita. Ataque: níttrico 200 x.*

da, aparece escura, donde a denominação de **martensita preta**; essa estrutura é também chamada **martensita revenida**. A dureza Rockwell cái ligeiramente — de 65 C a 60-63 C.

— **Entre 230° e 400° C**, prossegue a precipitação de carbonetos e seu crescimento se dá em forma globular. Tais glóbulos são ainda imperceptíveis ao microscópio. A estrutura perceptível ao microscópio é uma massa escura, chamada **troostita**. A dureza continua a cair — de cerca de 62 C a cerca de 50 C.

— **Entre 400° e 650° C**, prossegue o crescimento dos carbonetos em forma globular, tornando-se agora os glóbulos perceptíveis ao microscópio com grandes aumentos. As estruturas resultantes denominam-se **sorbita** e apresentam durezas variando de 20 a 45 Rockwell C.

— **Entre 650° e 723° C**, os carbonetos continuam a crescer e aparecem na forma de partículas globulares perfeitamente perceptíveis distribuídas num fundo ou matriz ferrítica contínua. A estrutura resultante é chamada **esferoidita** e sua dureza é muito baixa, variando de 5 a 20 Rockwell C. A esferoidita é muito tenaz.

Pelo que acaba de ser exposto, verifica-se que a temperatura de revenido pode ser escolhida de acôrdo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado.

As figuras 36 e 37 mostram, respectivamente, uma estrutura mista martensita-troostita e uma estrutura sorbítica.

Na operação de revenido, importa não só a temperatura do tratamento como também o tempo de permanência à temperatura considerada, o que pode ser comprovado pelo exame do gráfico da figura 38. A influência maior se verifica no início, diminuindo com intervalos de tempo maiores.

a — **Fragilidade de revenido** — Um fenômeno curioso, cuja causa é ainda incerta, tem sido verificado ocasionalmente em certos aços-liga, principalmente ao Ni-Cr (SAE 3140, etc.). Esses aços revenidos entre 500 e 680° C com esfriamento lento, mostraram no ensaio de resiliência grande fragilidade. Esfriados rapidamente a partir daquelas temperaturas apresentam-se dúteis, de acôrdo com a dureza correspondente ao revenido em questão. A esse fenômeno dá-se o nome de **fragilidade de revenido**. A fragilidade é somente revelada no ensaio de resiliência, pois tanto a microestrutura, como a resistência à tração, a dureza e outras propriedades mecânicas não são afetadas pela velocidade de esfriamento a partir das temperaturas de revenido.

Como foi dito, as causas são incertas. Sabe-se que o fenômeno é reversível, isto é, aços apresentando a fragilidade de revenido, aquecidos a 550° C e resfriados rapidamente apresentam a ductilidade esperada. Atribue-se a uma possível precipitação de carboneto da ferrita, devido ao decréscimo de solubili-

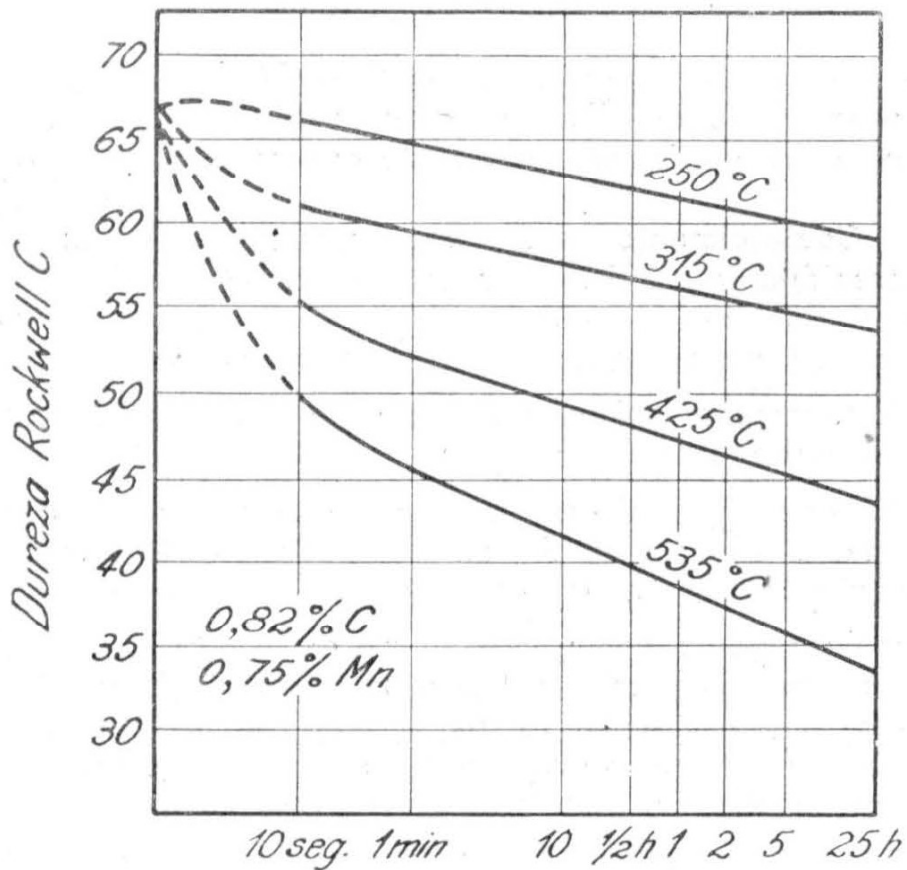


FIG. 38 — Influência do intervalo de tempo no revenido de um aço com 0,82% C, realizado a quatro temperaturas diferentes.

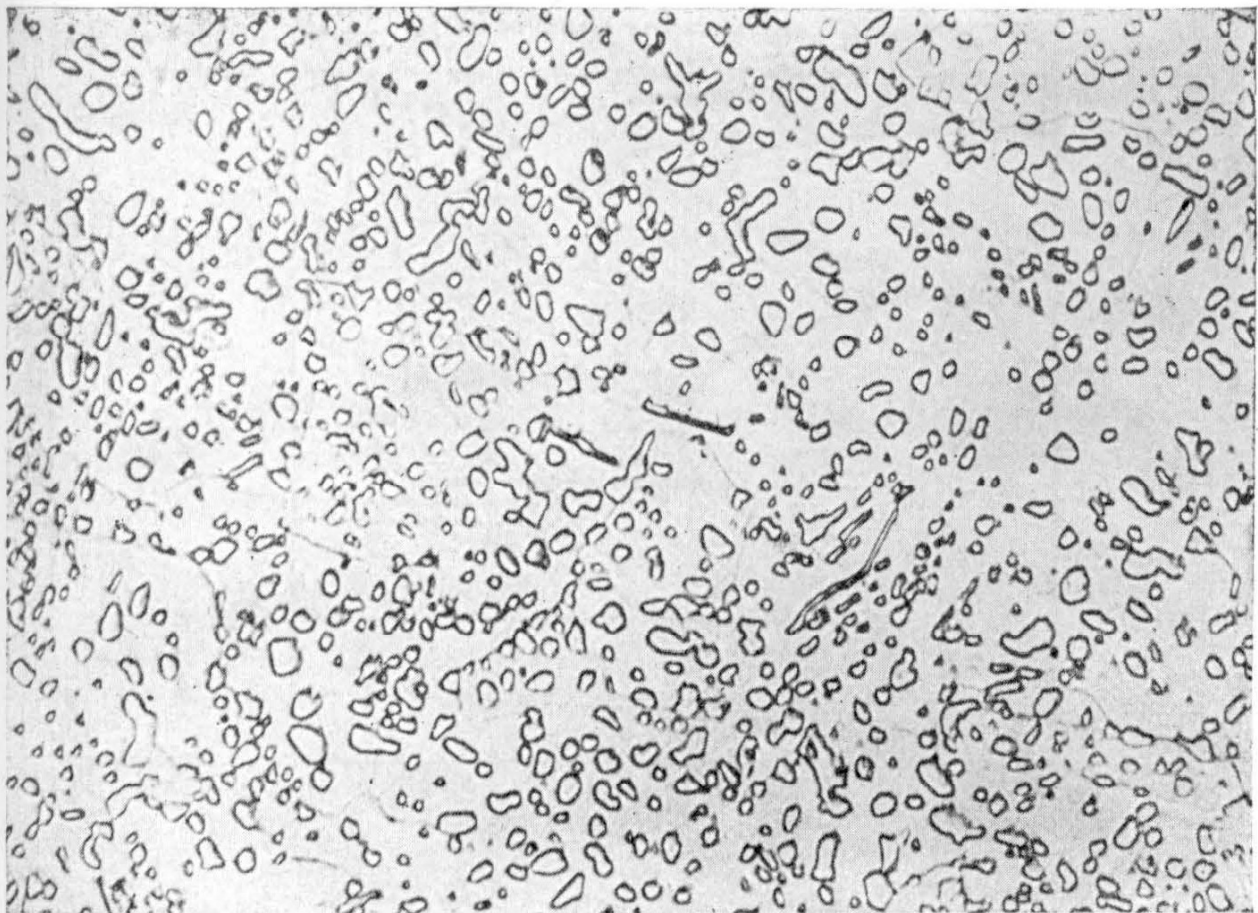


FIG. 39 -- Aspecto micrográfico de aço coalescido: esferoidita. Ataque: nítrico 750 x.

dade de 0,02 % de carbono a 600° C a 0,006 % de carbono à temperatura ambiente. Evita-se pelo resfriamento rápido, como se viu, ou pela adição de molibdênio em teores de 0,20 a 1,0 %.

6 — **Coalescimento** — Qualquer tratamento capaz de produzir **esferoidita** (fig. 39) é chamado de coalescimento. Esse tratamento é aplicado principalmente em aços hipereutetoides e pode consistir em qualquer das seguintes operações:

— Aquecimento prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica A_1 .

— Aquecimento e resfriamento alternados entre temperaturas logo acima e abaixo de A_1 ou seja, fazer a temperatura de aquecimento oscilar em torno de A_1 .

O coalescimento, originando a esferoidita, dá como resultado uma dureza muito baixa, normalmente inferior à que se pode obter com o recozimento. Nessas condições, objetiva-se com o coalescimento facilitar certas operações de deformação a frio e usinagem de aços de alto teor em carbono.