

APLICAÇÕES DA METALOGRAFIA AOS AÇOS COMUNS E ALGUNS TIPOS DE AÇOS-LIGA TERNÁRIOS

Jarbas Oliveira Nascimento (1)

INTRODUÇÃO

As notas que se seguem, constituem um apanhado geral de noções conhecidas e tem por finalidade principal mostrar sucintamente ao leitor, as relações aproximadas que existem entre os aspectos microscópicos apresentados pelos aços comuns (*) e de liga e a sua composição química.

Definiremos os segundos como sendo ligas ferro-carbono, tendo além dos elementos usualmente presentes em pequenas quantidades, outros elementos de liga, intencionalmente adicionados, como o cromo, níquel, vanádio, manganês, tungstênio e outros.

Com os elementos de liga, consegue-se obter certas propriedades valiosas, inexistentes nos aços comuns.

Com sua aplicação judiciosa, é possível, a melhoria de propriedades mecânicas como a resistência, tenacidade, plasticidade, resistência ao desgaste, capacidade de corte, etc., quer à temperaturas muito altas ou muito baixas.

Entre as propriedades eletro-magnéticas, consegue-se com a adição de certos elementos aumentar a permeabilidade, a máxima indução ou diminuir a perda histerética.

Dentre as propriedades químicas, tais elementos facultam a obtenção de aços resistentes à oxidação por umidade, por ataque à temperaturas elevadas ou corrosão por meio de compostos químicos.

A experiência nos tem mostrado que o diagrama de equilíbrio ferro-carbono permite a determinação dos pontos críticos de transformações para

(1) Engenheiro assistente na seção de Metalografia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

(*) Aços carbono.

os aços comuns. Êstes pontos nos habilitam a tratar termicamente os aços, obtendo dêles propriedades mecânicas esperadas. Todavia, é bem verdade que os aços comuns não são ligas ferro-carbono, exclusivamente; nêle estão sempre presentes como impurezas nocivas, o fósforo e o enxofre se bem que em percentagens mínimas especificadas. Além destes, conta como impurezas não nocivas o manganês, o silício, o cobre às vezes, todos em pequenas quantidades, além de traços de numerosos outros elementos.

Cada um destes elementos tem, porém, muito pouca influência nos pontos de transformação do aço, por dois motivos principais: primeiro, porque suas quantidades, em se tratando de aços-carbono-tipo, não podem ultrapassar um máximo especificado; e segundo porque, dado o fato de serem as influências dos elementos sem sentidos dissemelhantes, até certo ponto se neutralizam.

Convém frisar, entretanto, que a influência das impurezas dissolvidas num aço comum depende da sua natureza, quantidade e distribuição.

O diagrama de equilíbrio para as ligas ferro-carbono constitue uma aproximação à realidade. Isso porque as transformações e mudanças de estado (e alotrópicas), levam um certo tempo para se realizar, não são instantâneas. De tal forma que as linhas que dividem as zonas do diagrama constituem o lugar médio de linhas reais de transformação, determinadas no aquecimento e no resfriamento lento das ligas de diversos teores. Nestas condições, vê-se que as transformações citadas sofrem histerésis, isto é, dependendo da velocidade de aquecimento e esfriamento podem se dar à temperaturas diferentes.

Considerando-se agora os elementos de liga, não como impurezas mas como participantes intencionais no aço, teremos, no mínimo, ligas ternárias do tipo Fe — C — M (*). Grande número de aços-liga são, porém, quaternários ou mais complexos ainda.

O estudo racional destes aços deve ser feito a partir do estabelecimento dos seus diagramas de equilíbrio cuja determinação, como é fácil prever, é complexa. Acresce além do mais uma grave complicação; a maior parte dos elementos liga comunica às transformações, um aumento na histerésis o que torna impossível em certos casos o estabelecimento de um equilíbrio físico-químico perfeito.

Considerando uma liga Fe — C, de percentagem constante em carbono, a adição de um elemento liga pode ter nela uma dupla influência; quer deslocando a temperatura de equilíbrio de transformação, quer modificando a histerésis.

(*) Metal ou metalóide.

Êsses dois fatores agem simultâneamente para alterar a posição dos pontos de transformação no aquecimento e no esfriamento. As temperaturas de equilíbrio, como o próprio nome indica, são de determinação direta praticamente impossível. Para o estudo e caracterização das ligas vamos lançar mão dessa histerésis e da posição dos pontos de transformação no aquecimento e resfriamento, a uma dada velocidade de variação térmica.

AÇOS COMUNS — CONSTITUIÇÃO DAS LIGAS

Consideremos o diagrama ferro-carbono, ou melhor, ferro — carboneto de ferro (fig. 1).

Com auxílio deste, podemos identificar os constituintes dos aços comuns (*). Esta caracterização é de prática bastante simples, bastando para tanto a seleção das ligas, preparo de corpos de prova ou amostras e observação ao microscópio.

Tomemos por exemplo um aço com 0,4% de carbono e vejamos quais os constituintes que pode apresentar. Vamos então, depois de aquecê-lo, seguir o resfriamento dêsse aço, a partir da temperatura 1000°C (**) (fig. 1). Nessa temperatura será constituído todo êle de grãos mais ou menos uniformes de uma solução sólida denominada *austenita*. Essa austenita é uma verdadeira solução de carboneto de ferro no ferro gama — fôrma alotrópica do ferro nessa alta temperatura. — Se nos fôsse dado examinar a austenita a 1000°C veríamos que ela apresentaria um aspecto microscópico bem característico, com a presença frequente de maclas nos seus grãos.

Resfriando-se o aço lentamente, (***) dentro de um forno, ao atingirmos a linha A_3 do diagrama (780°), inicia-se a transformação alotrópica ferro-gama — ferro-alfa; como o ferro-alfa não pode, porém, manter em solução sólida o carboneto de ferro, dá-se a separação do ferro-alfa e da austenita cujo teor em carbono irá crescer à medida que prossegue a separação. Essa separação continua até que ao atingir a linha A_1 (733°), todo o ferro-gama se terá transformado em ferro-alfa, ao mesmo tempo que a austenita remanescente terá o seu teor de carbono chegado a 0,83% (ponto S).

(*) Não consideramos os ferros fundidos.

(**) Não iremos discutir as mudanças de estado.

(***) O resfriamento lento é chamado Recozimento.

Diagrama de equilíbrio ferro, carboneto de ferro
(Diagrama aproximado ferro-grafita, em pontilhado)

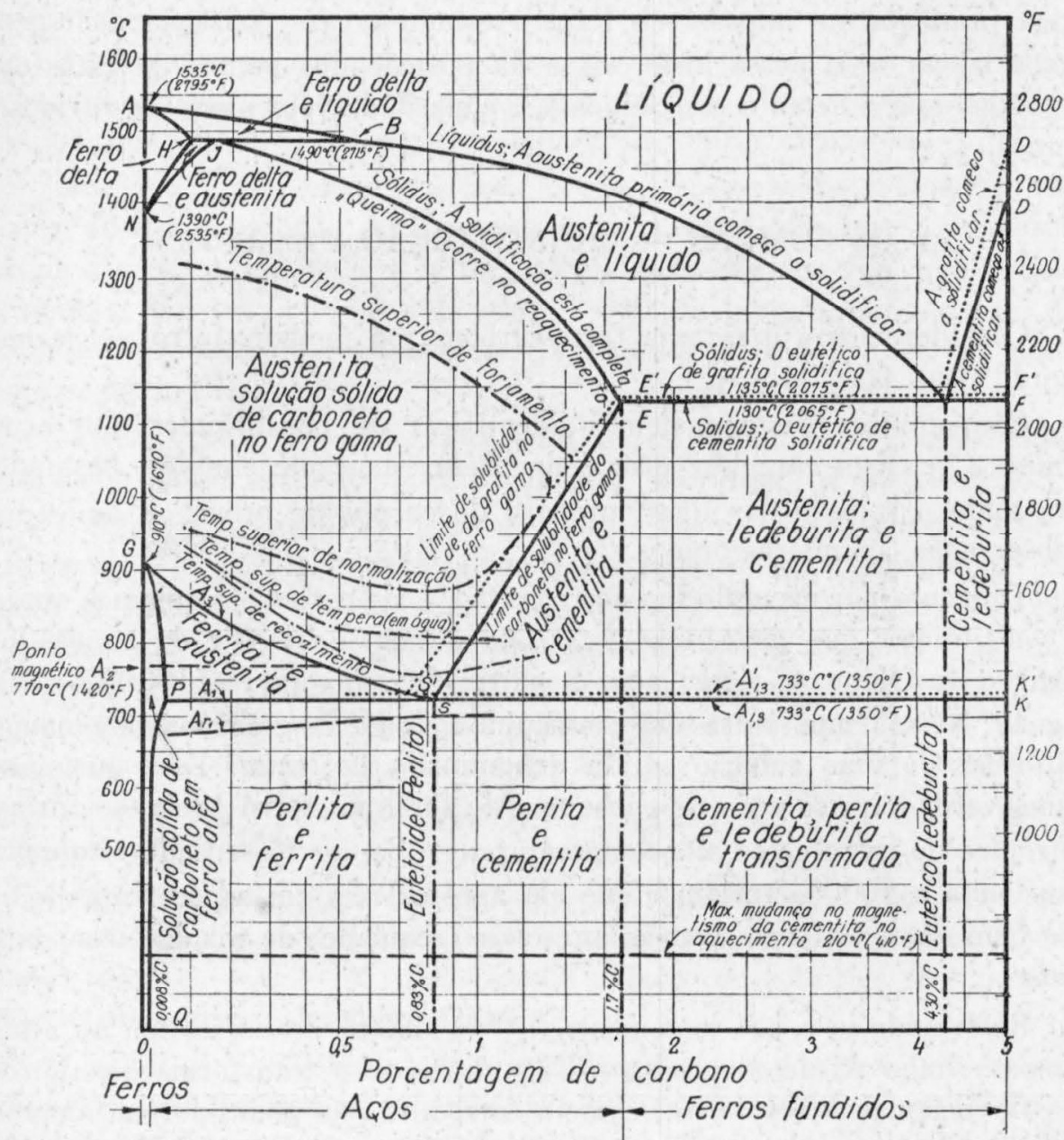


FIG. 1

Do livro "Metalurgia do Ferro e do Aço" de Robert. F. Mehl. Gentileza da E. P. U. S. P.

Nessa temperatura (733°) a austenita se transformará então em outro constituinte bem definido dos aços comuns, a *perlita* cuja textura se manterá até à temperatura ambiente. A perlita vista ao microscópio é constituída por lamelas justapostas de ferro-alfa (também denominado *ferrita*) e de carboneto de ferro (também denominado *cementita*). No aquecimento, essas transformações se dão em sentido inverso.

Na fig. 2 vê-se o aspecto microscópico de um aço com o teor de carbono citado e onde estão indicados os constituintes referidos. Quando o resfriamento não é feito dentro de um forno, mas ao ar (*), a queda de temperatura é mais rápida, resultando daí um afastamento menor para as lamelas de cementita e ferrita. A sua separação pode ser tão pequena que se torna indiscernível mesmo com ampliação de 1000 vezes (**). Neste caso, costuma-se denominar tal constituinte, troosto-perlita.

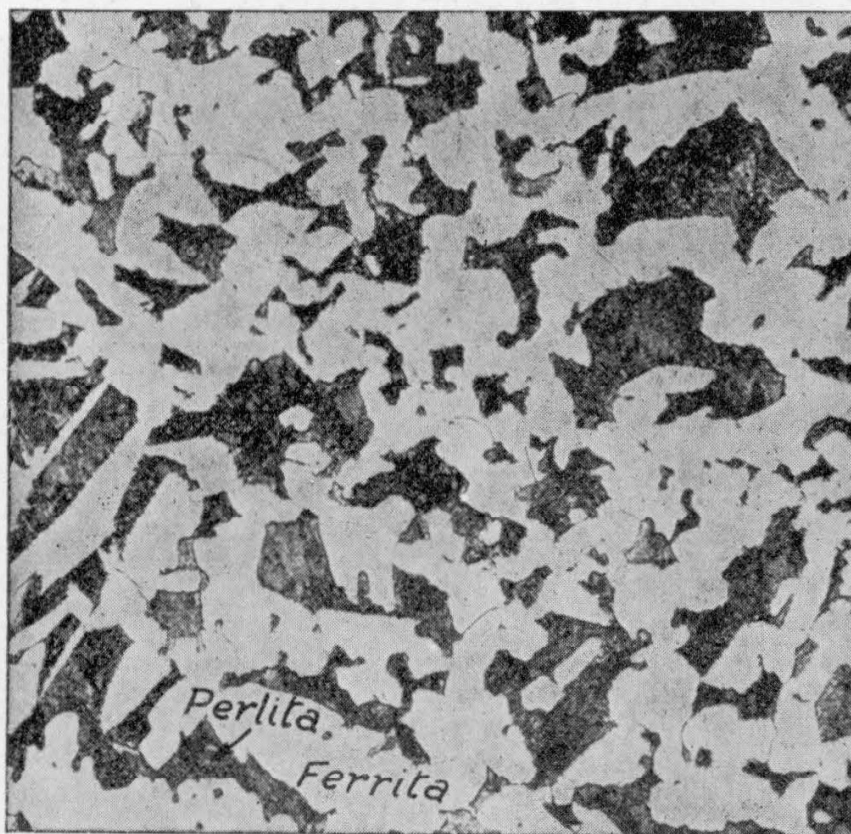


FIG. 2 (m. 7340 — IPT) 150 X

A caracterização dos constituintes dos aços vistos ao microscópio se faz mediante o ataque (em uma superfície polida especularmente) por meio de um reativo adequado. No caso examinado, o reativo é uma solução alcoólica de ácido nítrico a 1%.

Examinando-se um aço com 0,83% de carbono, esfriado lentamente, à temperatura ambiente teremos por constituinte único desse aço, a perlita. Neste caso, tal aço é denominado eutetóide (***) (fig. 3). Se exa-

(*) O resfriamento ao ar denomina-se normalização.

(**) Verifica-se com aumentos maiores a estrutura lamelar na troosto-perlita.

(***) Com menos de 0,83% será hipoeutetóide e com mais de 0,83% (até 1,7%) será hipereutetóide.

minarmos um aço com mais de 0,83% de carbono, nas mesmas condições anteriores, veremos que será constituído por grãos de perlita rodeados por uma rede de cementita (fig. 4).

Martensita — Temos considerado até aqui, o resfriamento lento. Tomemos uma amostra de aço com 0,4% de carbono e aqueçamo-la até uns 50° acima da temperatura 780°, determinada pela linha A₃. Se este aço fôsse resfriado lentamente, apresentaria uma estrutura microscópica constituída de grãos de ferrita e de perlita. Para a obtenção destes dois

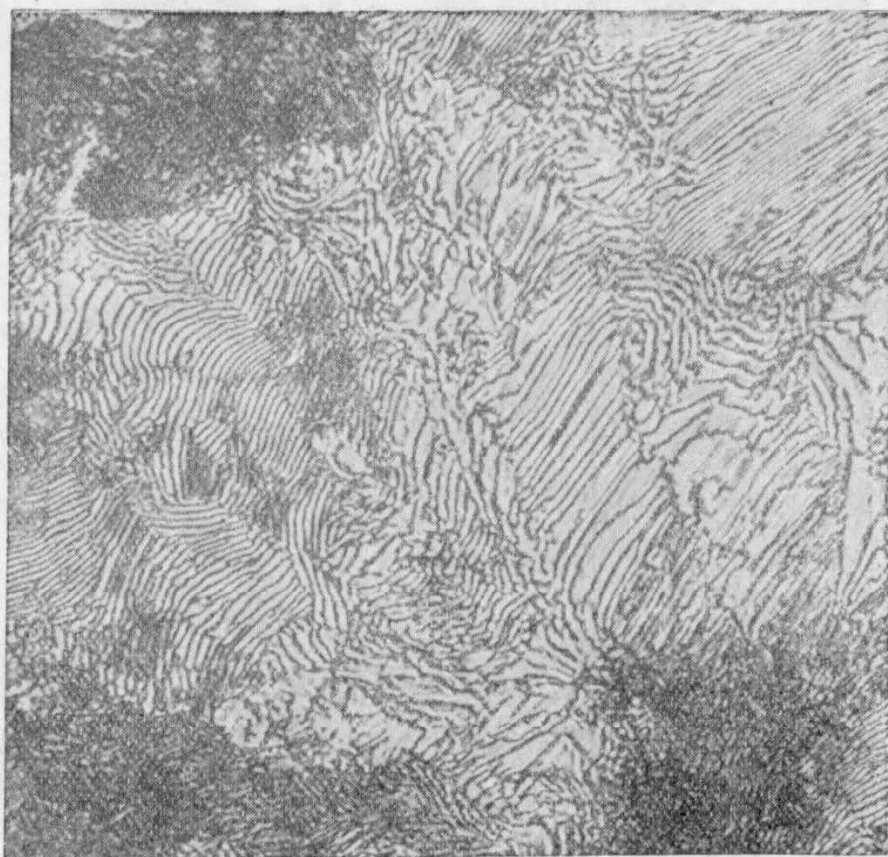


FIG. 3 (m. 1472 — IPT) 800 X

constituintes impõe-se como condição, o resfriamento lento, porque a separação do carboneto de ferro e do ferro-alfa só se dá mediante o decurso de um certo tempo às temperaturas favoráveis à transformação. Se resfriarmos então esse aço, a partir da temperatura inicial citada, rapidamente, (em água fria por exemplo), não daremos tempo para se efetuar a separação. Teremos realizado dessa forma um tratamento térmico denominado têmpera violenta do qual resulta para o aço uma estrutura típica. Se observarmos o material tratado ao microscópio, notaremos um aspecto como a da figura 5. Tal constituinte não se confunde com os anteriores e é denominado *martensita*.

Troostita — Se o resfriamento anterior fôsse feito em óleo, o tratamento seria uma têmpera branda ou lenta. Diferente tratamento térmico com o mesmo aço corresponde a obtenção de estrutura diferente. Teremos, neste caso, um aspecto como o da figura 6. A velocidade de resfriamento sendo menor, permitiu que parte do material se transformasse. Na figura citada, os grãos ou áreas escuras indicam uma precipitação incipiente do carboneto de ferro. Tal constituinte é denominado troostita; o outro presente na micro-fotografia é a martensita.

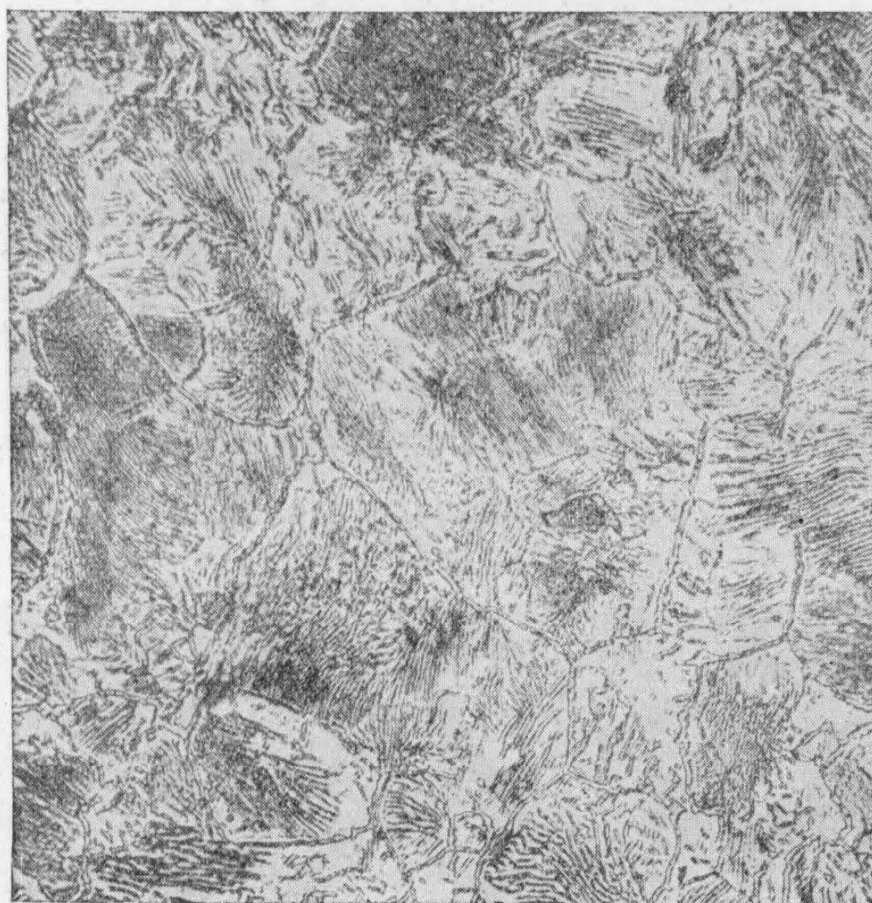


FIG. 4 (m. 878 — IPT) 200 X

Carboneto globular — A martensita vista à figura 5 é pela sua origem, um constituinte muito instável às variações da temperatura, além de 100°. Se reaquecermos o aço a uns 500°, essa martensita se altera resultando outro constituinte definido, apresentado na figura 7 e denominado *sorbita*. O tratamento térmico de reaquecer uma estrutura de têmpera denomina-se *revenido*.

Observando-se a micro-fotografia 7 podemos notar, além do fundo de aspecto pouco nítido, grãos que nêle se destacam. Considerando que a ampliação é em tal caso de 500 aumentos, êstes grãos (carboneto de ferro) se distribuem sob uma fórmula quase que coloidal.

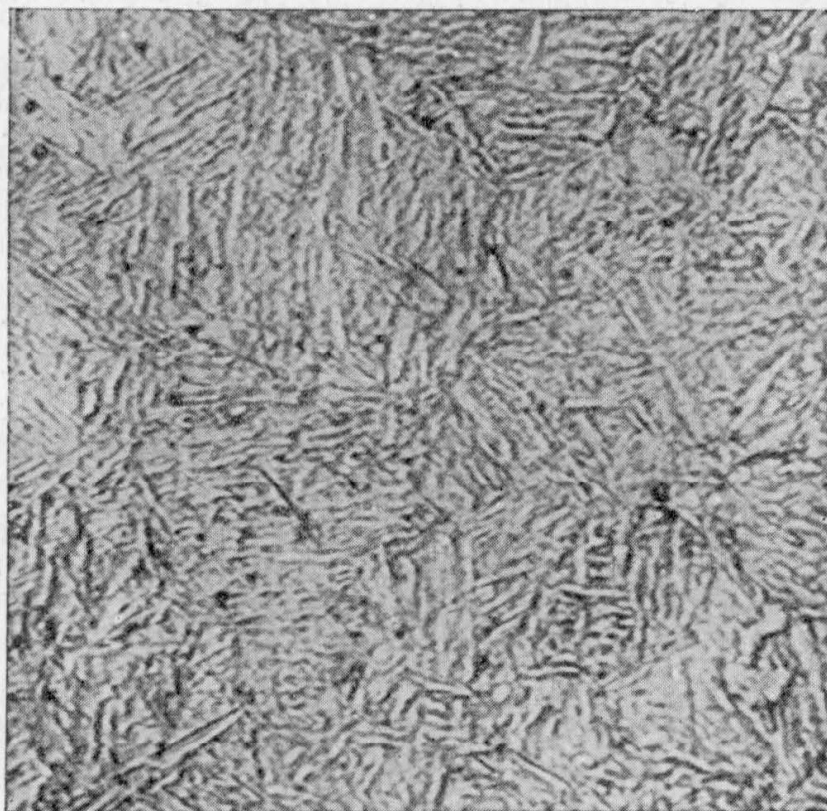


FIG. 5 (m. 4855 — IPT) 1000 X

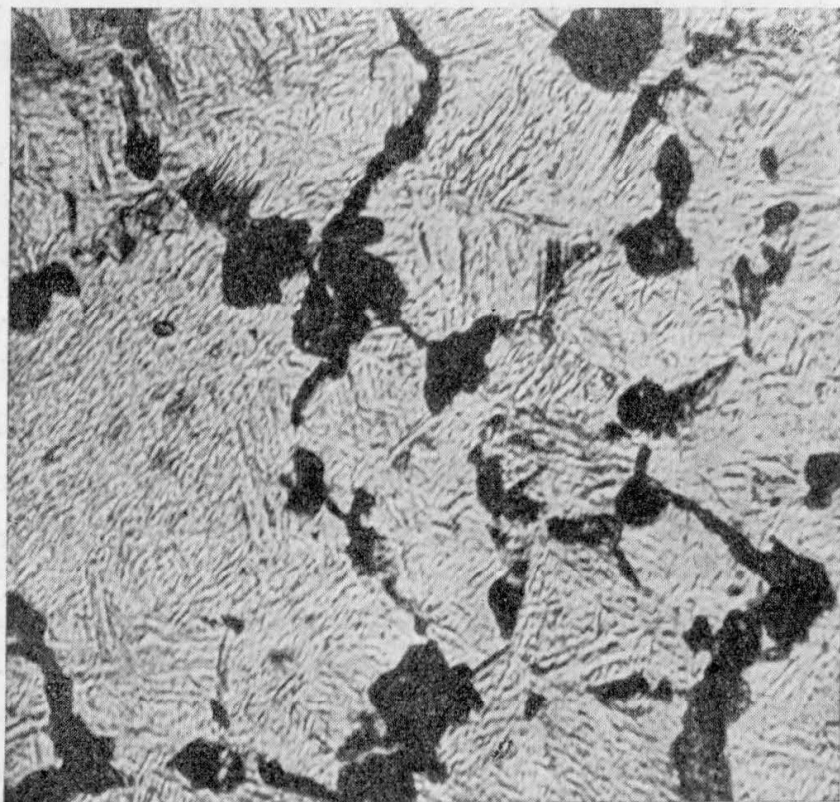


FIG. 6 (m. 2213 — IPT) 500 X

Poderemos ter ainda o carboneto de ferro globular sob uma forma bem mais nítida como no caso da micro-fotografia da figura 8. Aquí o fundo branco é ferrita onde estão engastados os glóbulos de cementita. Tal estrutura é característica de aço com teor de carbono da ordem de 1% e que sofreu um tratamento térmico denominado *coalescimento* (*), cuja finalidade é amolecê-lo ao máximo.

PROPRIEDADES FÍSICAS

Vimos então que um mesmo aço, diferentemente tratado, pode apresentar os vários aspectos estruturais discutidos atrás.

Assim é que, para o mesmo material, a cada estrutura apresentada, corresponde um conjunto de propriedades físicas definidas. O carboneto de ferro ou cementita é muito duro e frágil enquanto que a ferrita ou ferro-alfa é relativamente bem mais mole e dúctil.

Como a quantidade de carbono no aço, condiciona a quantidade de carboneto, conclue-se que aços com mais carbono, são mais duros e frágeis do que aços com menos carbono.

Estruturalmente falando, para aços esfriados lentamente, mais duro é frágil será aquele que tiver mais perlita e menos ferrita (**).

A martensita é um constituinte dotado de dureza muito grande, — podendo até riscar o vidro, — porém, de uma fragilidade notável. Peças que devem resistir à penetração sem choques, devem ter estrutura martensítica. Do revenido na martensita resulta uma estrutura sorbítica, cuja propriedade mais interessante é a grande elasticidade. Tal estrutura deve ser característica das molas.

Uma estrutura de carboneto globular sobre fundo de ferrita, (coalescida) apresenta como principal característica a mínima dureza para o mesmo teor de carbono.

Considerações gerais — Mesmo para os aços carbono, a histerésis é evidente; dela tiramos partido para obter as diferentes características num mesmo material.

Quando adicionamos ao aço um elemento de liga, esta histerésis passa a valores completamente diferentes. Isto acontece porque o dito ele-

(*) O coalescimento pode ser assimilado a um revenido prolongado à temperaturas oscilantes em torno de 730°C.

(**) Todavia, para aços com diferente distribuição e forma dos grãos de perlita e ferrita, mesmo para teores iguais de C, podem corresponder propriedades mecânicas diferentes.

mento vai intervir nas transformações alotrópicas, juntamente com o carbono. Tal interferência acarretará um acréscimo no decurso de tempo mínimo, para uma transformação se dar a uma certa temperatura; de tal forma que mesmo resfriados lentamente (dentro do forno) certos aços-liga apresentam estrutura austenítica, martensítica ou outra, impossível de se obter com aço comum, nas mesmas condições.

Estudando a variação de histerésis, é possível classificar, aproximadamente, os aços-liga, relacionando a sua estrutura ao microscópio com as percentagens de elemento liga. Os princípios da classificação deste tipo, foram enunciados por Osmond; a representação dilatométrica, como exposta a seguir, foi idealizada por Grenet. Porém, foi Léon Guillet que construiu os diagramas de constituição para os aços-liga.

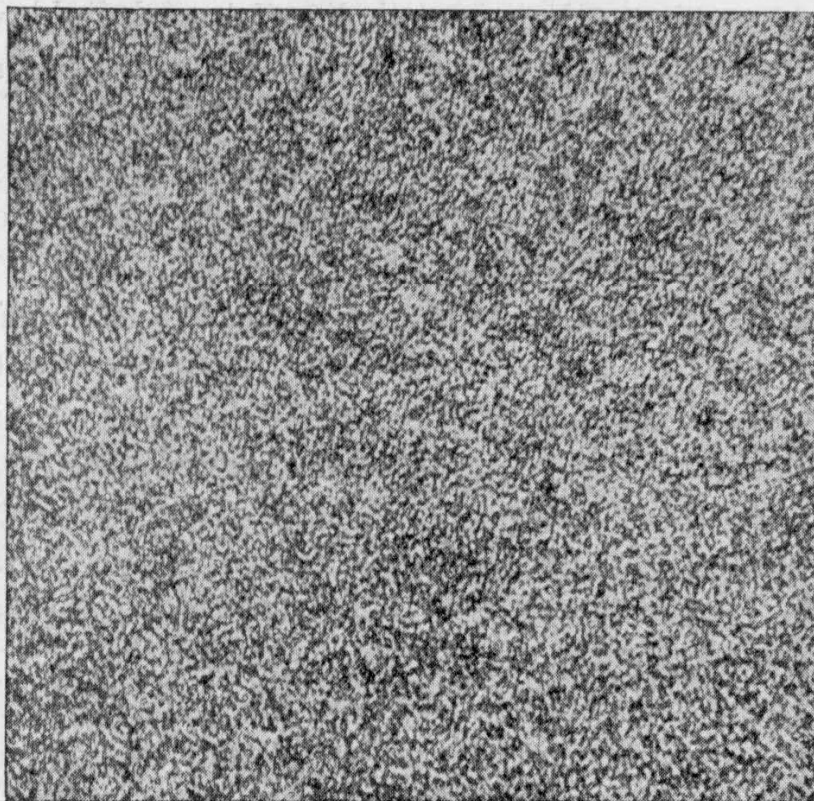


FIG. 7 (m. 876 — IPT) 300 X

Antes de entrar na discussão de tais diagramas, cabem algumas considerações de ordem metalográfica.

Do exposto, conclue-se que o microscópio presta ao metalógrafo e metalurgistas inestimáveis serviços. A prática metalográfica constitui um dos mais eficientes meios de exames em metalurgia.

Em se tratando da observação dos aços comuns, exclusivamente com o microscópio, pode-se saber o seu teor aproximado de carbono; saber as

características mecânicas de determinado aço; saber a espécie de tratamento térmico, por êle sofrido; saber da distribuição de impurezas nocivas, além de outras indicações específicas valiosas.

Assim é que se examinarmos ao microscópio, aços comuns esfriados lentamente, pode-se, pela quantidade ou percentagem de grãos de perlita, num campo médio de exame, saber o seu teor aproximado de carbono. Pela forma e distribuição desses grãos, também pode-se apreciar ao microscópio, como foi feito seu resfriamento.

Em certos casos, a observação metalográfica é suficiente para identificar e caracterizar determinados materiais, dispensando a análise química ou ensaios mecânicos.



FIG. 8 (m. 6514 — IPT) 1000 X

Ao examinar, porém, aços com elemento de liga, o microscópio também fornece, na maior parte dos casos, indicações características. A interpretação metalográfica para tais aços se torna difícil frequentemente, porquanto os constituintes não são apenas uns poucos, como no caso dos aços comuns, mesmo que tenham aspectos semelhantes. Soluções sólidas complexas, compostos mixtos de natureza indefinida são comumente encontrados quando se observam os aços-liga ao microscópio. Nestes casos a sim-

ples observação metalográfica pode se tornar insuficiente para diagnosticar; é quando se recorre à análise química.

Aliás, os diagramas de constituição que veremos adiante, relacionam a estrutura metalográfica e a composição química dos aços-liga. Serão considerados apenas os aços-liga com predominância de um elemento de liga além do carbono.

CURVAS DILATOMÉTRICAS — HISTERÉSIS

Apreciemos como varia a histerésis nos aços comuns com a mudança da velocidade da variação térmica.

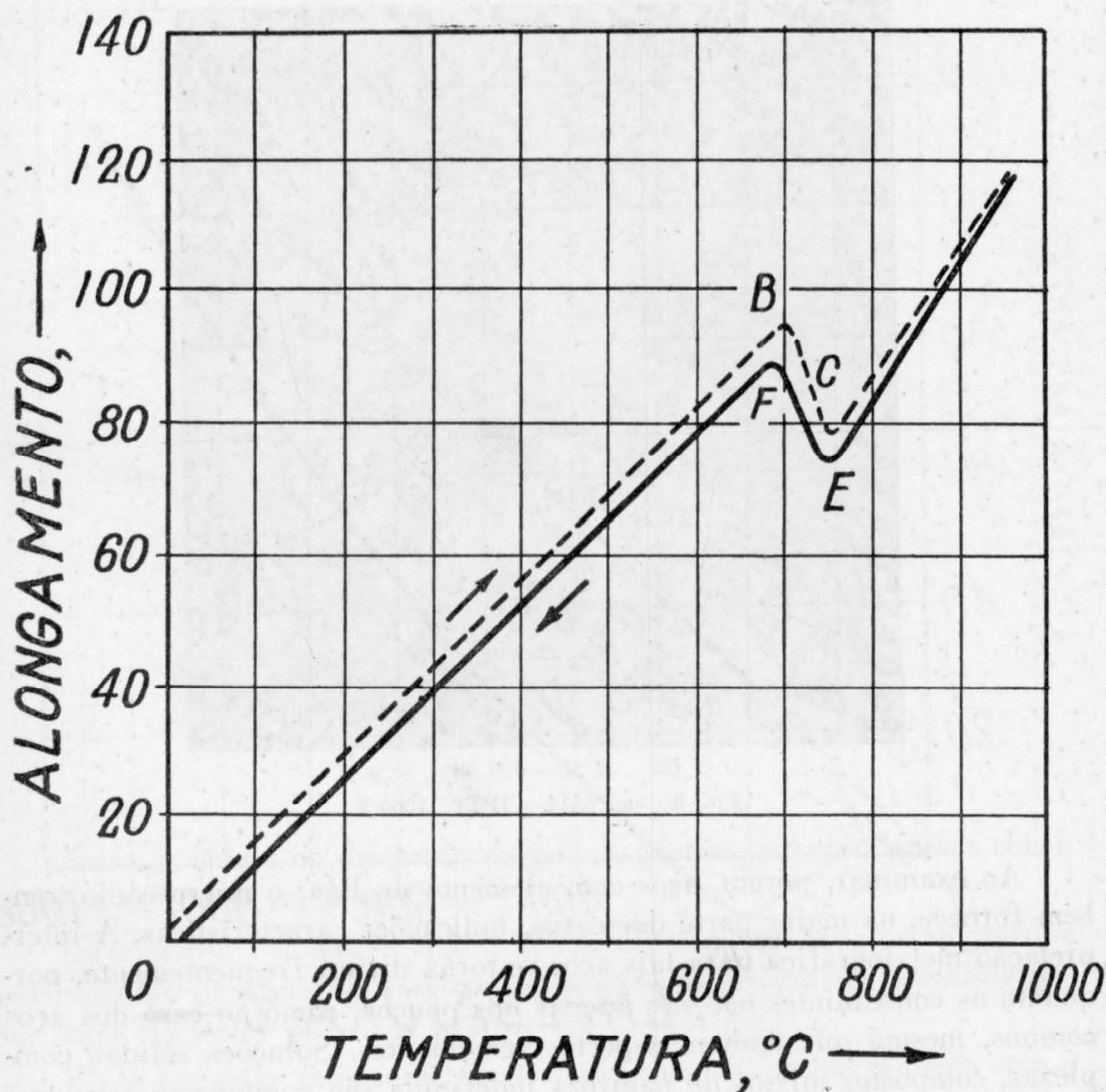


FIG. 9

Considerando-se um aço comum, ao observar como varia sua dilatação com o variar da temperatura nota-se que aquela é diretamente proporcional aos acréscimos de temperatura até que esta não seja da ordem das temperaturas críticas (*). Nestas, haverá transformações intrínsecas na liga, dando-se então uma contração, tal como se observa no trecho BC da figura 9; ao atingir a temperatura em C, a transformação alotrópica terminou e a variação da dilatação torna-se novamente proporcional à variação de temperatura, desde que não atinja novos pontos críticos (de mudança de estado). Se esfriarmos lentamente a liga, a partir da temperatura indicada no gráfico (curva cheia), verifica-se que o fenômeno não

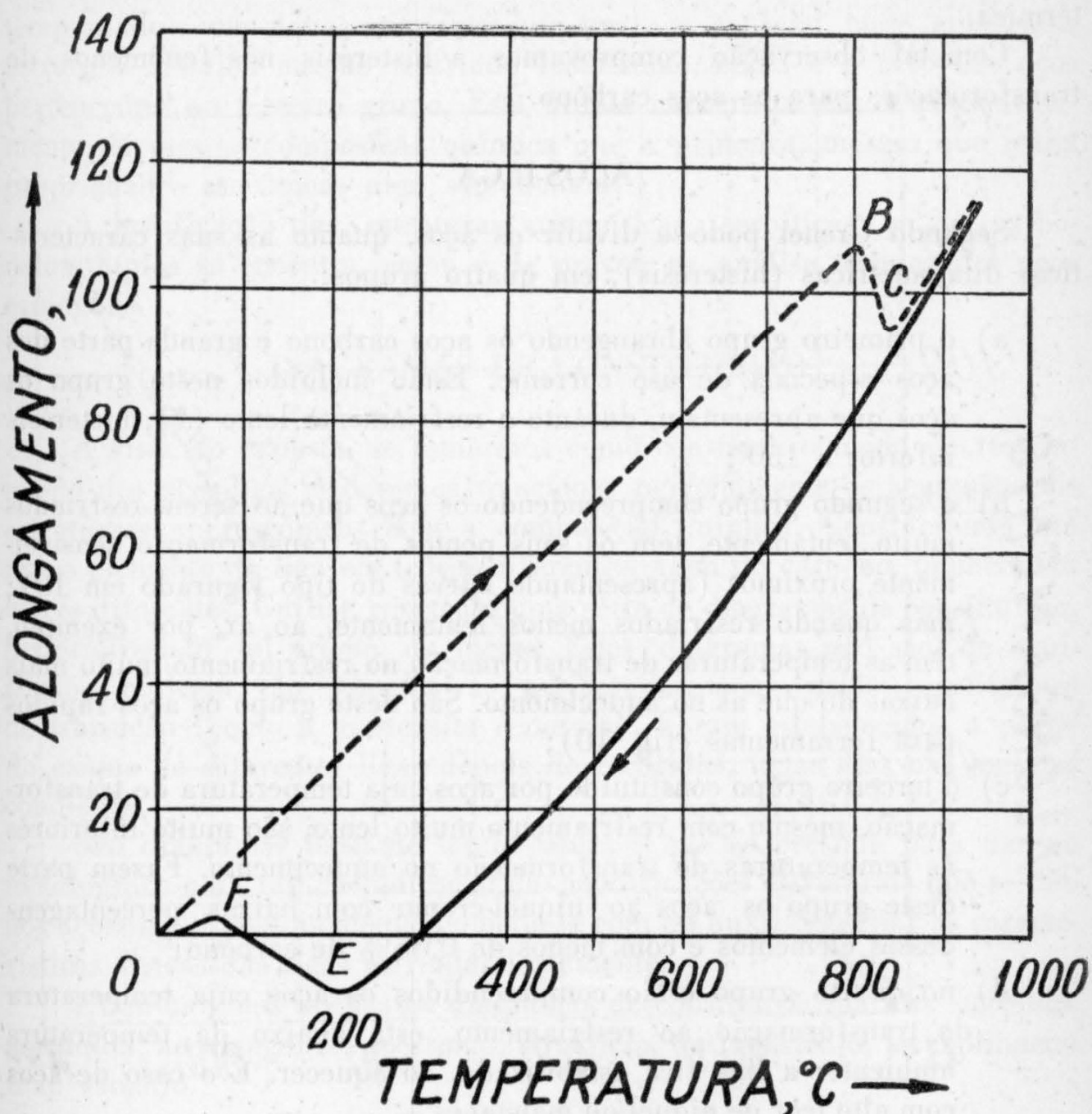


FIG. 10

(*) Temperaturas às quais se dão as transformações alotrópicas ou de estado.

é reversível, isto é, a curva de contração não se superpõe à de dilatação: assim, as transformações durante o resfriamento lento se dão à temperaturas que não são iguais durante o aquecimento (trecho EF). Porém, para os aços carbono, podemos com determinadas precauções no aquecimento e resfriamento, fazer com que as zonas críticas de temperaturas BC e EF estejam sensivelmente próximas.

No caso do aquecimento e resfriamento serem feitos mais depressa, teremos então curvas dilatométricas do tipo da figura 10. O afastamento das zonas críticas de temperaturas, no aquecimento e resfriamento, é nitido e será tanto maior quanto maior for a velocidade de variação térmica.

Com tal observação comprovamos a histerésis nos fenômenos de transformações para os aços carbono.

AÇOS-LIGA

Segundo Grenet pode-se dividir os aços, quanto as suas características dilatométricas (histerésis), em quatro grupos:

- a) o primeiro grupo abrangendo os aços carbono e grande parte dos aços especiais de uso corrente. Estão incluídos neste grupo os aços que apresentam, durante o resfriamento lento (*), histerésis inferior a 150°;
- b) o segundo grupo compreendendo os aços que ao serem resfriados muito lentamente, têm os seus pontos de transformação sensivelmente próximos (apresentando curvas do tipo figurado em 10); mas quando resfriados menos lentamente, ao ar, por exemplo, têm as temperaturas de transformação no resfriamento muito mais baixas do que as no aquecimento. São deste grupo os aços rápidos para ferramentas (fig. 10);
- c) o terceiro grupo constituído por aços cuja temperatura de transformação, mesmo com resfriamento muito lento, são muito inferiores às temperaturas de transformação no aquecimento. Fazem parte deste grupo os aços ao níquel-cromo com baixas percentagens desses elementos e com menos de 0,65% de carbono;
- d) no quarto grupo estão compreendidos os aços cuja temperatura de transformação ao resfriamento, está abaixo da temperatura ambiente; a liga fica estabilizada, ao aquecer. É o caso de aços com alto teor de níquel ou manganês.

(*) Entendendo-se aqui por resfriamento lento aquele que corresponde a uma queda de temperatura de 100° cada quinze minutos.

Mesmo que os constituintes microscópicos destes aços-liga sejam de composição química diferente dos que se notam nos aços ao carbono, êles apresentam certos aspectos comuns, de tal maneira que a nomenclatura empregada para os constituintes destes últimos, se adapta perfeitamente aos primeiros. Convém frisar, entretanto, que aspectos microscópicos semelhantes não correspondem obrigatoriamente à composições químicas e propriedades idênticas.

As estruturas dos aços estão condicionadas ao seu resfriamento e à composição química.

Podemos assim obter uma estrutura martensítica para um aço comum, temperando-o em água, enquanto que um aço especial pode apresentar estrutura idêntica mesmo resfriado lentamente, como é o caso dos aços pertencentes ao terceiro grupo. Esta última martensita não será evidentemente da mesma composição química que a primeira, mesmo que tenha propriedades mecânicas algo semelhantes.

A justificação das estruturas austeníticas, sorbíticas ou de carbonetos duplos se encontra, como é de prever, na análise térmica dos aços estudados.

DIAGRAMAS DE CONSTITUIÇÃO

À vista do exposto, se tomarmos como constante o modo de resfriamento dos aços-liga, poderemos relacionar perfeitamente os seus aspectos estruturais microscópicos com a composição química. Considerando um único elemento de liga em teores diferentes, além do carbono, também em teores diferentes, Guillet, construiu uma série de diagramas de constituição, materializando tal ordem de idéias. Êstes diagramas não são de equilíbrio; indicam tão somente as regiões ocupadas pelos constituintes de transição (como a martensita e outros). Foram estabelecidos a partir do exame de diferentes ligas depois de recozidas, tôdas elas nas mesmas condições.

São diagramas bastante interessantes e que se prestam para dar ao metalógrafo uma rápida indicação das modificações estruturais que se dão nos aços-liga. Consequentemente, pode-se com tal auxílio avaliar as características físicas das ligas esfriadas lentamente.

Examinaremos apenas os diagramas de constituição para os aços-liga ao níquel, ao manganês, ao cromo, ao silício, ao tungstênio, ao molibdeno e ao vanádio.

Aços níquel — Êstes aços foram dos primeiros a serem fabricados. O principal efeito do níquel é aumentar a resistência e tenacidade da ferrita. Por exemplo: uma aço-liga com 0,25% de carbono e 3,50% de níquel

tem a mesma resistência e maior ductilidade do que um aço comum, com 0,45% de carbono nas mesmas condições.

O níquel abaixa as temperaturas de transformação e aumenta a histerésis; assim, aços ao níquel são tratáveis termicamente à temperaturas mais baixas do que as dos aços comuns. Além disso, favorece a obtenção de peças maiores, temperáveis integralmente; isto é, peças de mesmas seções, feitas com aço comum, não adquirem têmpera, ao passo que com aço níquel, adquirem.

O níquel entra em solução na ferrita e tem pouca tendência para formar carbonetos. Diminui o tamanho dos grãos e torna a perlita mais fina.

Esse metal não estabiliza o carboneto e não impossibilita o revenido da martensita ou troostita. Tem influência favorável sobre a resistência à corrosão atmosférica e comunica ao aço grande resistência ao choque, mesmo à baixas temperaturas.

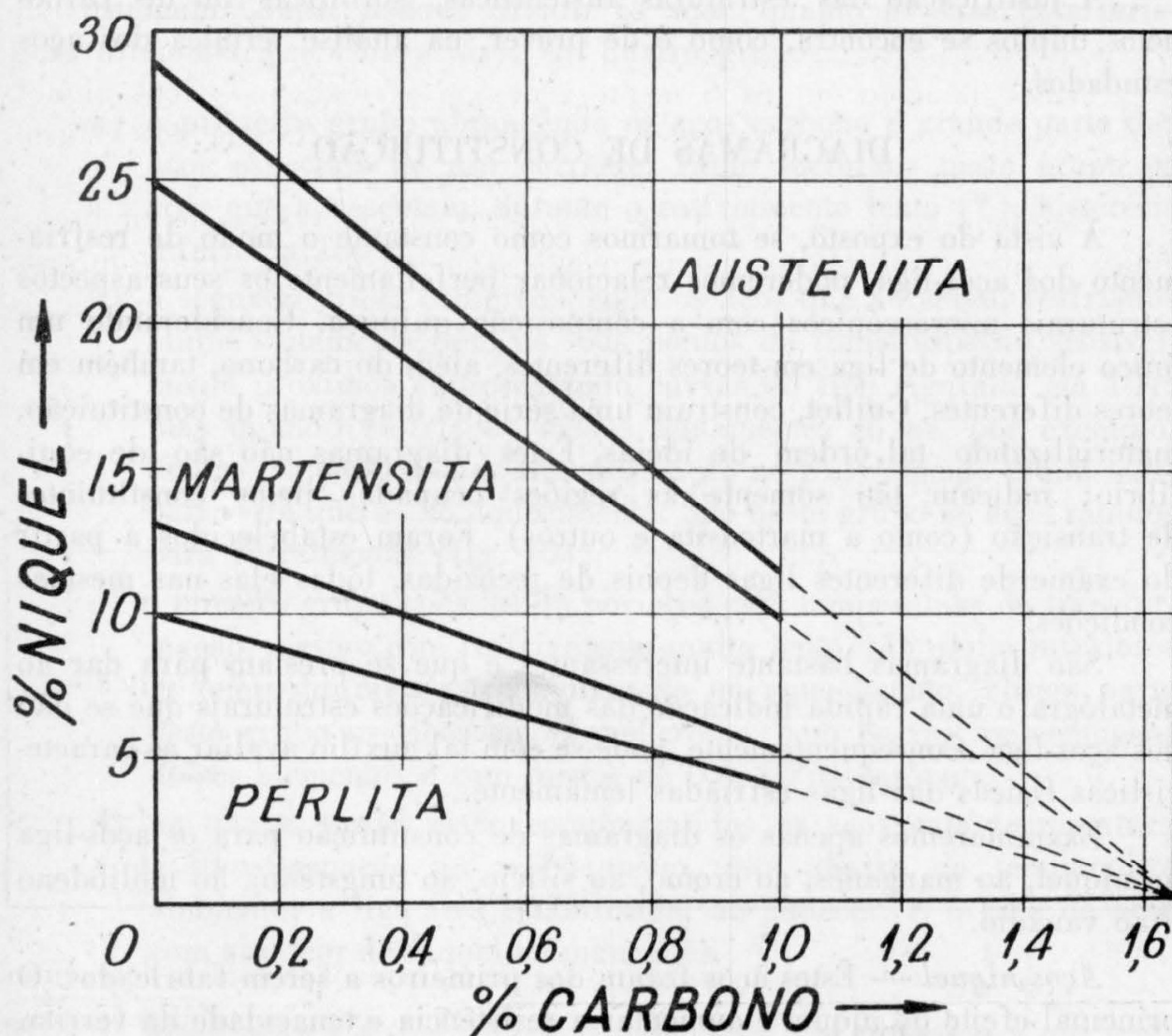


FIG. 11

Uma propriedade importante dos aços níquel é a dilatação. O coeficiente de dilatação para aços com pouco carbono (0,2%) apresenta variações consideráveis quando o níquel varia de 28% a 45%. O mínimo desse valor ocorre com liga, tendo 36% de níquel. Este aço-liga tem largo emprego em instrumentos de precisão e é denominado invar.

Micro-estrutura — São perlíticos os aços níquel que possuem como constituintes a perlita com ferrita ou cementita (segundo o teor de carbono); estes aços podem ter ainda estruturas austeníticas ou martensíticas conforme indica o diagrama de constituição figurado em 11.

Neste diagrama estão definidas as regiões de estruturas das ligas com teores variados de níquel e carbono. A passagem de um tipo a outro se faz gradualmente, tendo-se assim, zonas com a presença simultânea de perlita e martensita e austenita.

Pela têmpera, os aços níquel perlíticos se tornam martensíticos, os martensíticos se conservam ou se tornam austeníticos; os austeníticos não se alteram, salvo quando os teores de níquel e carbono os coloquem próximo às zonas de transição.

O encruamento ou resfriamento enérgico, efetuado nos aços níquel, não magnéticos, os tornam magnéticos porque por tais tratamentos a austenita (não magnética) se transforma em martensita.

De modo geral, os aços níquel martensíticos têm carga de ruptura e limite elásticos muito altos, alongamentos pequenos e uma grande dureza.

Aços manganês — O manganês tem tanto o efeito de dar maior resistência à ferrita (nela entrando em solução) como o de formar carbonetos.

Ele se divide entre esses dois constituintes; abaixa os pontos de transformação dos aços e aumenta consideravelmente a histerésis.

Pela tabela seguinte, pode-se apreciar tal fato (Dumas).

C	Mn	Pontos de Transformação	
		No aquecimento	No resfriamento
0,35	3,09	672°	425°
0,07	8,29	660°	175°

O abaixamento rápido do ponto de transformação, com o acréscimo do teor de manganês, faz prever que se obterão, com percentagens crescentes primeiro, aços martensíticos e depois aços austeníticos (quando o

ponto de transformação esteja abaixo das temperaturas ordinárias). É isto, aliás, que se pode apreciar no diagrama da figura 12.

O manganês abaixa o teor de carbono eutetóide, isto é, aços com menos de 0,83% de carbono e com pequenas percentagens de manganês já são constituídos só de perlita.

O revenido da martensita e troostita não é afetado pela presença de manganês, porém, este tende a aumentar levemente a resistência dos aços a altas temperaturas.

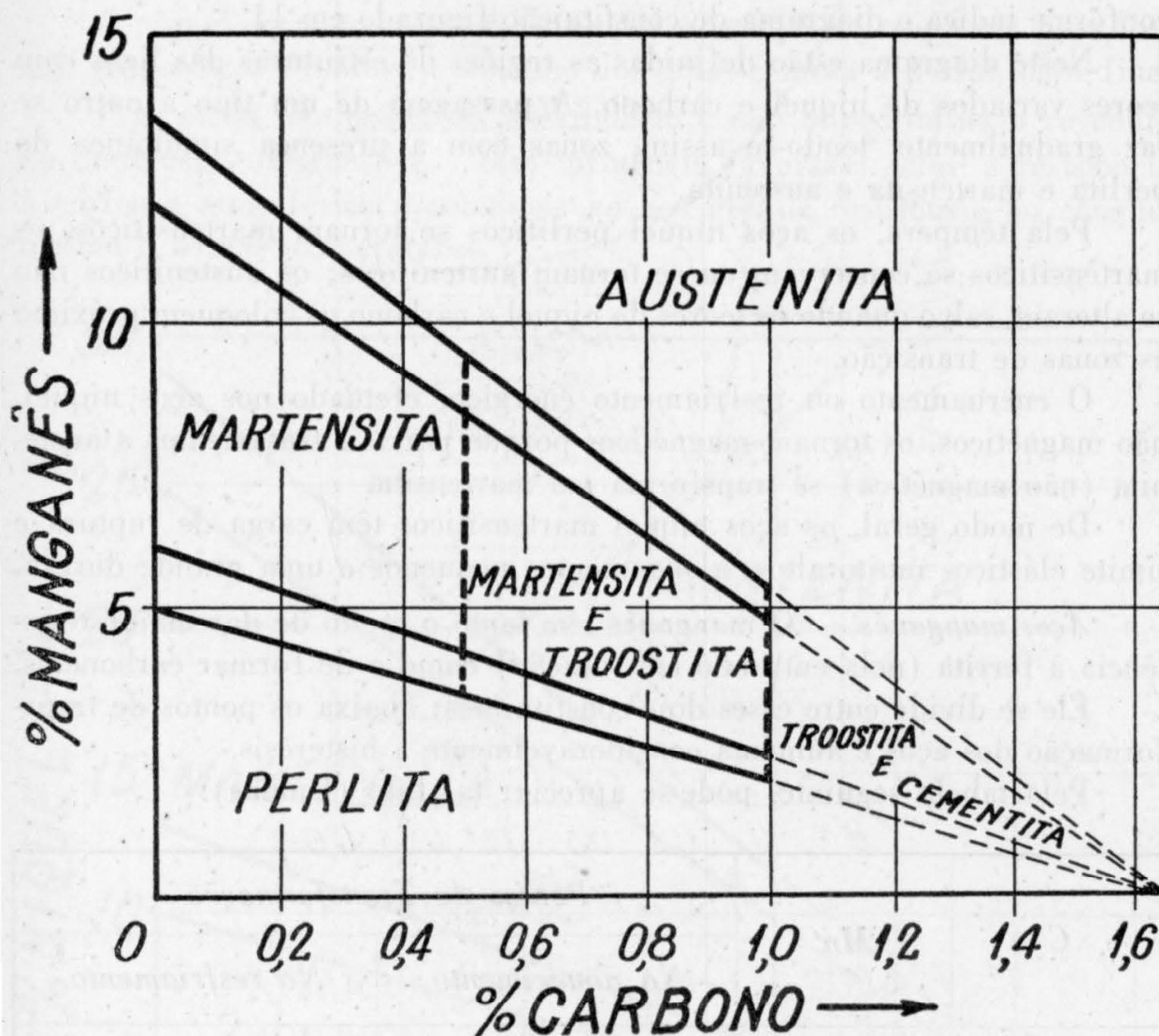


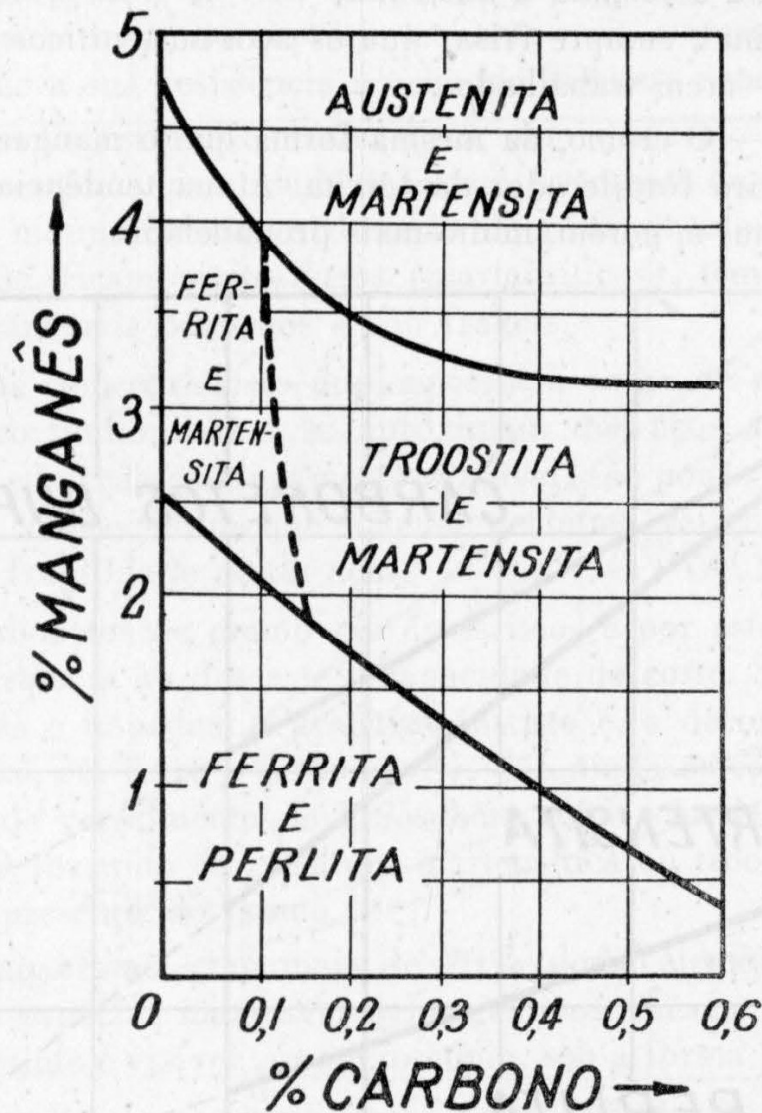
FIG. 12

Todavia, o manganês tem dois inconvenientes: comunica fragilidade ao aço e favorece o crescimento (*) dos grãos à temperatura não muito altas. Controla-se a fragilidade balanceando convenientemente os teores de carbono e manganês e o crescimento dos grãos, adicionando-se vanádio ou titânio.

(*) Aços com granulação grosseira têm propriedades mecânicas inferiores.

O manganês, dado o seu baixo preço em relação aos outros, constitui um dos principais elementos de liga nos aços. É usado principalmente para peças fundidas. Combina-se com o enxôfre e atenua as más propriedades que êste comunica ao aço.

Para comparação, apresentamos outro diagrama de constituição, êste fornecido pela A.S.M. Handbook e figurado em 13. Nota-se neste dia-



AÇOS NORMALISADOS A PARTIR DE 950°C (A.S.M. HANDBOOK)

FIG. 13

grama, divergências com o da figura 12, mas que podem ser devidas ao modo de resfriamento das ligas. O diagrama de Guillet foi construído mediante a observação de aços esfriados lentamente (no forno) enquanto que o da fig. 13, o foi com aços normalizados, isto é, esfriados ao ar, mais depressa por tanto.

À vista desses diagramas constata-se que a observação dos aços manganês é mais delicada que a dos aços níquel de vez que temos constituintes mais complexos, simultaneamente presentes. Além disso, os aços manganês são mais difíceis de ser atacados, pois o manganês provoca da parte do reativo, colorações e oxidações rápidas e desiguais bem como imagens menos nítidas. Os aços manganês troostíticos dão por tempera a martensita, pura ou associada à austenita.

Como nota final, cumpre frisar que os aços-austeníticos são extremamente difíceis de serem trabalhados.

Aços-cromo — O cromo, da mesma forma que o manganês, funciona como um verdadeiro fortalecedor da ferrita. A sua tendência para a formação de carbonetos é, porém, muito mais pronunciada.

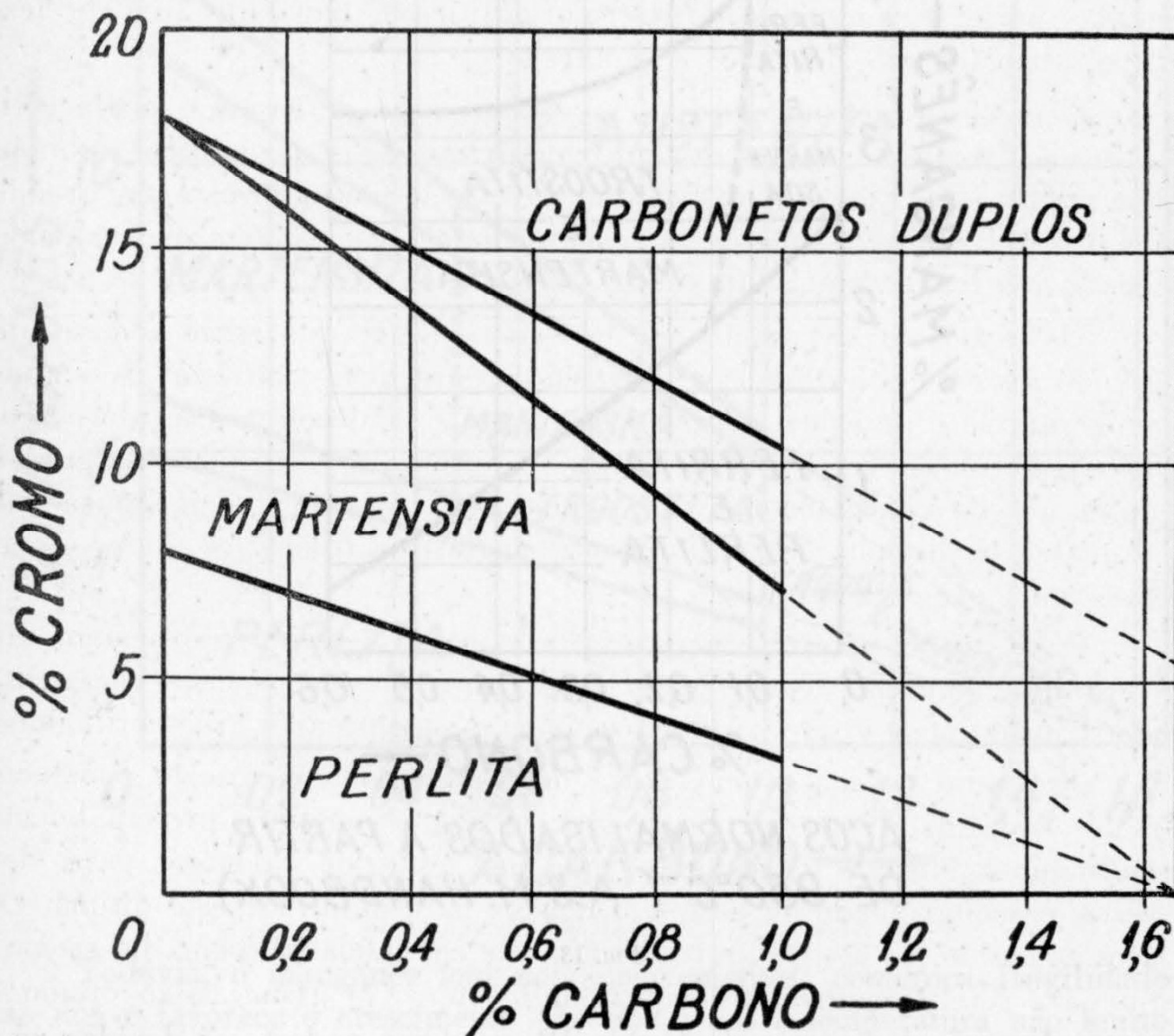


FIG 14

O cromo comunica mudanças, principalmente nos pontos de transformação ao resfriamento, influenciados estes pela temperatura de aquecimento. Em geral ele retarda as transformações.

Até certo ponto os aços-cromo constituem um tipo intermediário entre os aços níquel e manganês, de um lado, e os aços tungstênio e molibdeno, de outro; isto porque há aços com estrutura perlítica ou martensítica (como os ao níquel e manganês) e com estrutura de carbonetos (como os aços tungstênio e molibdeno).

O diagrama de constituição está apresentado na figura 14.

Os aços perlíticos têm propriedades análogas aos aços comuns; todavia, a sua carga de ruptura aumenta com a percentagem de cromo enquanto que a sua resistência ao choque diminui notavelmente.

Os aços de estrutura martensítica, com o mesmo teor de carbono, à medida que cresce a quantidade de cromo, se tornam de mais difícil ataque. Estes aços, mesmo quando a duração de resfriamento (ao recozer) é de muitas horas, ficam muito duros (martensíticos), têm altos limites elásticos, alongamentos pequenos e são frágeis.

Os aços com carboneto duplo possuem carga de ruptura média e limite elástico muito baixo; se aproximam dos aços austeníticos, porém, têm grande estrição e alongamento razoável; são pouco duros e têm grande fragilidade. Vê-se assim que não há nenhuma relação entre os alongamentos e a fragilidade nestes aços.

Os carbonetos de cromo são duríssimos e por esta razão comunicam grande resistência ao desgaste e capacidade de corte. São estáveis a altas temperaturas e impedem a grafitização, isto é, a decomposição do carboneto de ferro, em ferro e carbono (*). São ainda os carbonetos de cromo, inibidores do crescimento de grãos bem como são de difícil solução na austenita. O revenido da estrutura martensítica ou troostítica é algo retardado pela presença do cromo.

Aços ao cromo, com mais de 20% desse elemento apresentam um constituinte especial inatacável pelos reativos, mesmo os mais enérgicos; esse constituinte é visível, ao microscópio, sob a forma de grãos brilhantes.

Em geral os aços-cromo, para dada resistência à tração, possuem maior fragilidade que outros aços-liga. O cromo comunica principalmente mais dureza do que tenacidade, sendo por isso, que na maior parte das vezes, é acompanhado de outros elementos para aumentar esta última. Os aços ao cromo são usados preferencialmente em cutelaria (com alto cromo) ou para serem endurecidos superficialmente (**) (com baixo cromo e carbono).

(*) Sob a forma de grafita. Outro elemento de liga que favorece a grafitização com maior intensidade é o silício.

(**) Tratamento denominado cementação.

Certos aços-cromo, possuem ótimas características de indeformabilidade por ação dos tratamentos térmicos; é por essa razão que são utilizados largamente na confecção de matrizes e ferramentas.

Com teores elevados de cromo conseguem-se aços altamente resistentes à corrosão e abrasão, propriedade esta, específica de tais aços. Os aços ao cromo austeníticos são geralmente dotados também de níquel; citamos como exemplo o conhecidíssimo aço 18-8, isto é, 18% de cromo e 8% de níquel, cuja inoxidabilidade é característica.

Aços tungstênio — Os aços tungstênio normais, podem ser de dois tipos: os perlíticos e os de carbonetos duplos conforme indica o diagrama

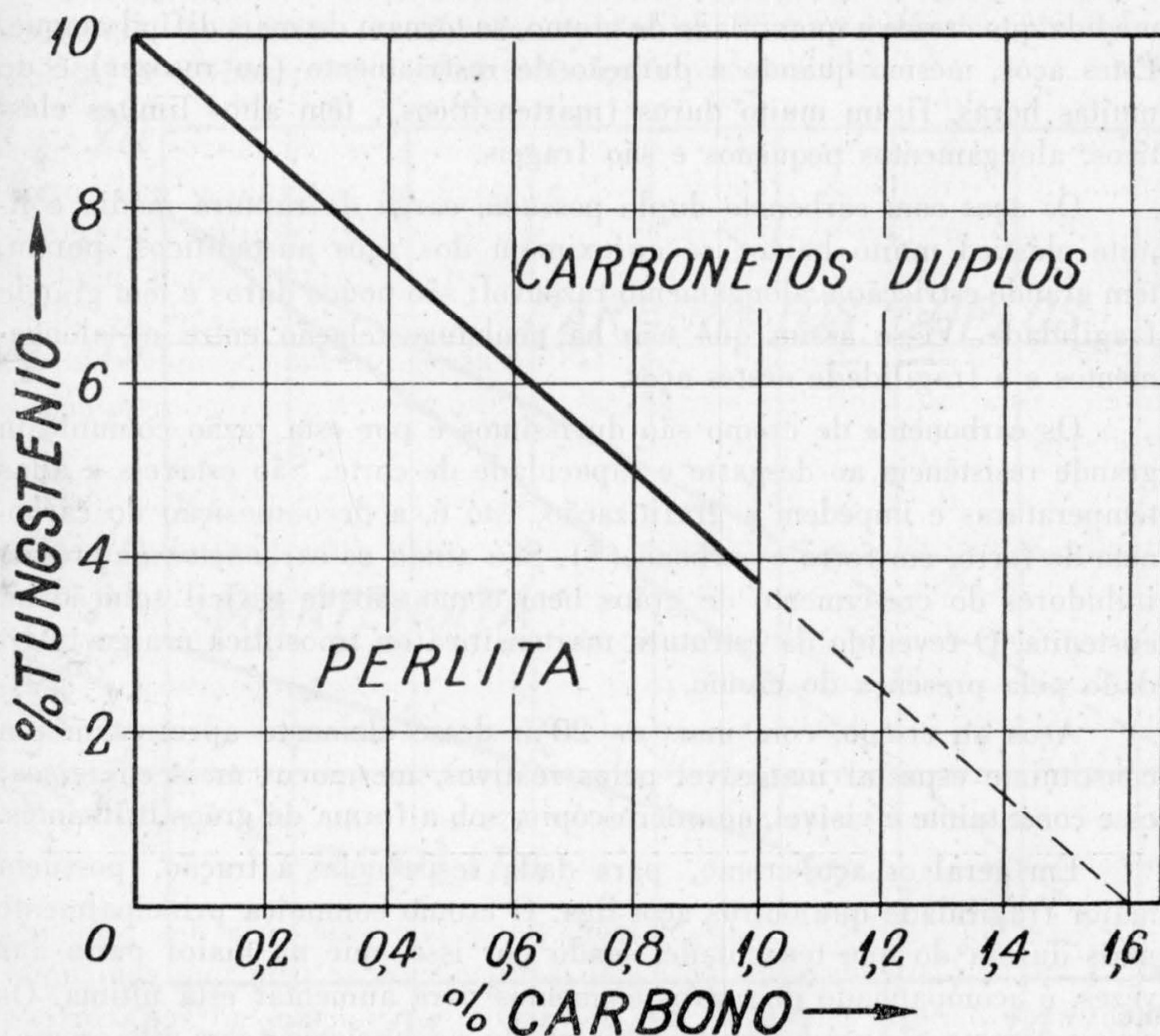


FIG. 15

de constituição da figura 15. Os carbonetos duplos são constituintes pontilhados e arredondados ou filamentosos; são atacáveis pelos reativos comuns e desaparecem por resfriamento no forno à medida que a temperatura de aquecimento aumenta.

A posição dos pontos de transformação ao resfriamento dos aços tungstênio, depende muito das condições do aquecimento e resfriamento.

O tungstênio eleva as temperaturas de transformação e, como o cromo, introduz no diagrama de equilíbrio ferro-carbono, novas áreas de transformação. Além disso, entra em solução na ferrita e forma carbonetos por cuja presença, as temperaturas de normalização ou têmpera são mais altas. Estes carbonetos, também como os de cromo, molibdeno e vanádio, são dificilmente solúveis na austenita e ordinariamente tendem a impedir o crescimento dos grãos. Para teores maiores de carbono, formam-se carbonetos duplos nos aços tungstênio.

Tanto os carbonetos de tungstênio como os de molibdeno, especialmente os carbonetos duplos são duríssimos, resistentes à abrasão e estaveis a altas temperaturas; por essa razão o tungstênio e molibdeno são os elementos de liga básicos para a fabricação dos aços, chamados de corte rápido. A estabilidade referida é evidenciada no revenido o qual deve ser feito à temperaturas muito altas (*). Aliás, os aços tungstênio ao serem reaquecidos, depois de temperados, apresentam características interessantes: a estrutura de têmpera é levemente amolecida acima de 380° enquanto que desta temperatura até 600° nota-se aumento pronunciado na dureza. Esta característica particular corresponde a um endurecimento secundário, denominado pelos norte-americanos "red-hardness".

Por esta razão os aços tungstênio são temperáveis (**) facilmente, mesmo quando em peças de seções grandes. Além disso, têm tamanho de grão estável. Note-se, porém, que o tungstênio é raramente usado em aços empregados para peças de máquinas ou de construção. Aços com 1 a 2% de tungstênio são empregados para trabalho a alta temperatura e com teores de 0,20% a 0,50% em aços ferramenta; com teores mais elevados (18% W) do que os citados encontramos ainda aços para fins específicos em mecânica como sejam para matrizes (trabalhando a quente) e ferramentas especiais.

Aços molibdeno — O molibdeno, sob o ponto de vista das propriedades mecânicas e térmicas age como o tungstênio se bem que com uma intensidade maior. Uma parte de molibdeno adicionada ao aço corresponde a mais de duas partes de tungstênio para obtenção de análogo efeito. Sempre que não hajam diferenças marcantes de propriedades, o molibdeno é normalmente o escolhido. O comportamento dos dois é tão seme-

(*) Em relação às usadas para os aços comuns.

(**) Capazes de adquirir têmpera.

lhante que são melhor aproveitados quando juntos, tal como sucede na maioria dos aços deste grupo.

A microestrutura dos aços ao molibdeno é semelhante à dos aços tungstênio; o diagrama constitucional da figura 16 o confirma e dispensa comentários.

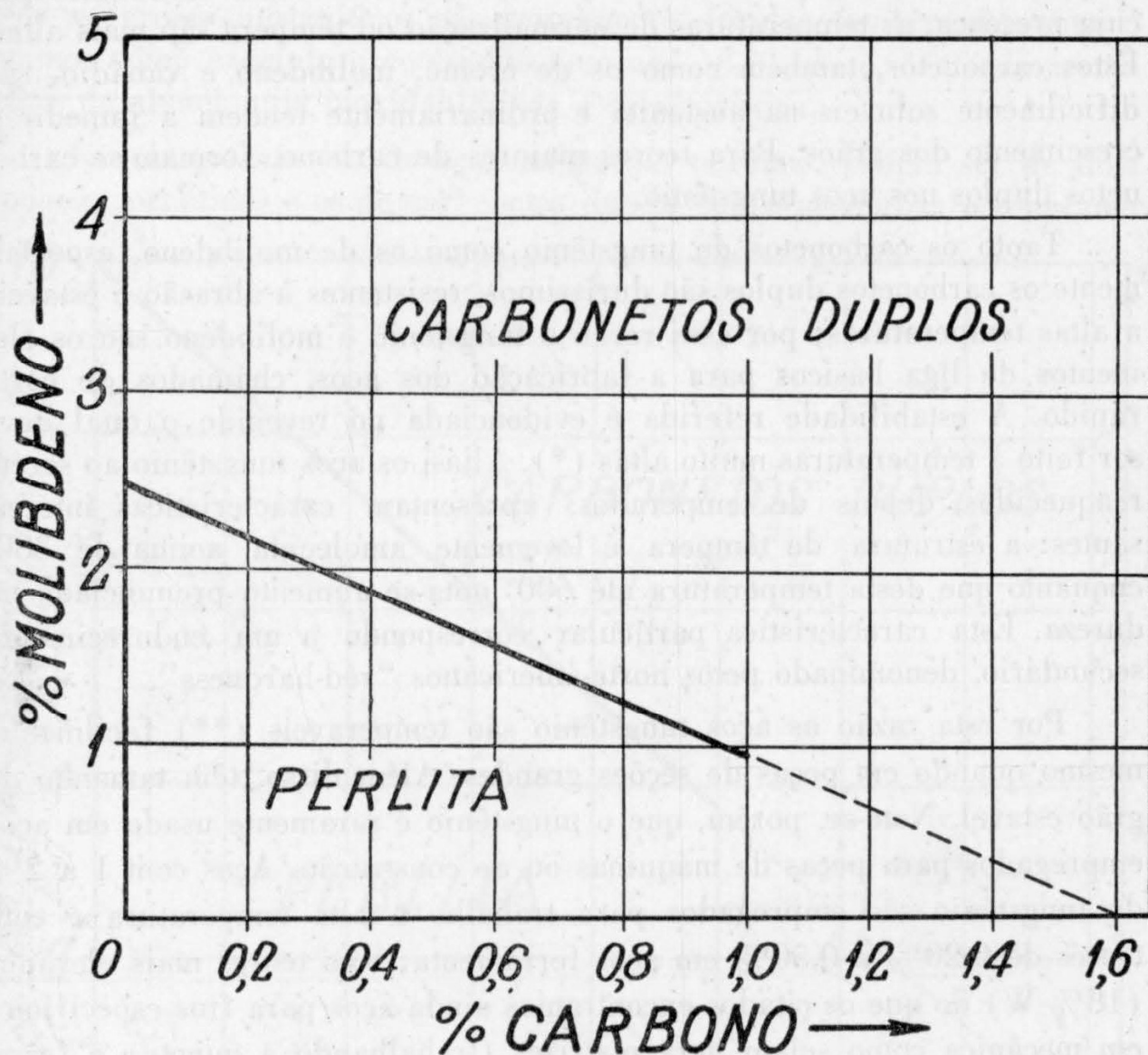


FIG. 16

Êstes aços podem ser perlíticos ou com carbonetos, havendo-se a notar que a perlita dos aços molibdeno é muito fina.

O molibdeno, ao contrário do tungstênio, encontra larga aplicação nos aços para construções; assim é que tubos de paredes finas de grande emprego em construções aeronáuticas são fabricados com aços especiais ao cromo-molibdeno.

O molibdeno é aplicado invariavelmente com outros elementos de liga, não havendo assim um aço-liga catalogado, para usos gerais, só com molibdeno.

Aços com cerca de 0,20% de molibdeno, são do tipo para construção; com menor quantidade, para alta resistência; com 0,50% a 1,50% para aços resistentes ao calor e com mais de 9% para aços ferramentas.

Aços vanádio — Quando um aço contém pouco vanádio, este entra em solução na ferrita a qual se colore pelos reativos tanto mais facilmente

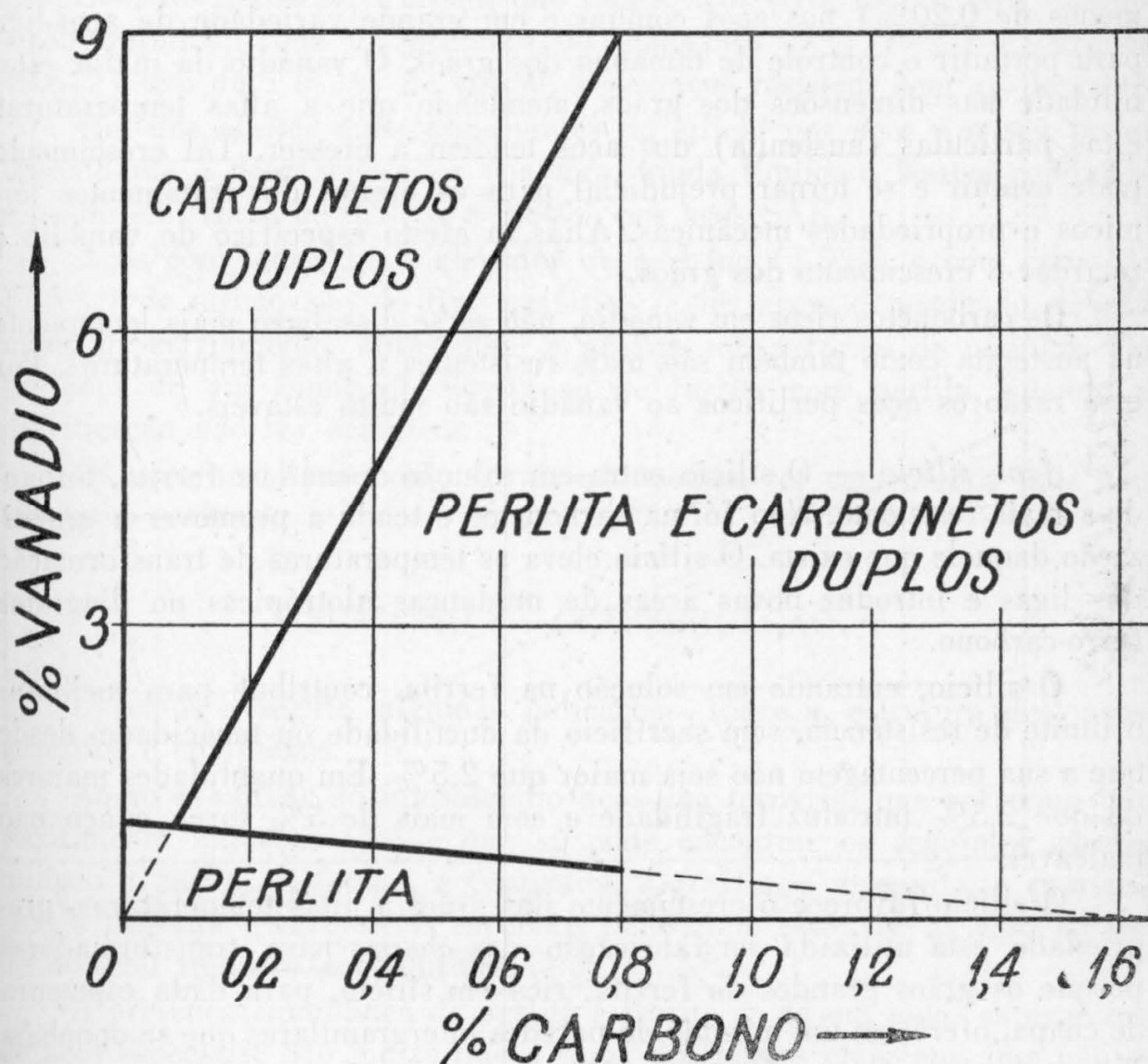


FIG. 17

quanto mais vanádio tiver; esta solução sólida se satura, entretanto, a partir de certo teor e o vanádio substitue o ferro no carboneto, aparecendo na perlita, grãos brancos visíveis em relevo, mesmo sem ataque. Com o aumento do teor de vanádio, estes grãos brancos aumentam, ao mesmo tempo que a perlita diminui até desaparecer.

O diagrama de constituição dos aços vanádio apresenta-se à figura 17. Os aços perlíticos, têm cargas de ruptura, que aumentam com o crescer do

teor em vanádio; os aços com perlita e carbonetos, têm cargas de ruptura que diminuem com o acréscimo de vanádio. A fragilidade aumenta nesses aços proporcionalmente ao teor de vanádio.

Quanto aos aços de carboneto, a fragilidade é muito grande, carga de ruptura pouco elevada e limite elástico muito baixo.

O vanádio é empregado em pequenas quantidades (normalmente menos de 0,20%) nos aços comuns e em grande variedade de aços-liga para permitir o controle de tamanho dos grãos. O vanádio dá maior estabilidade nas dimensões dos grãos, atendendo que a altas temperaturas estas partículas (austenita) dos aços tendem a crescer. Tal crescimento pode evoluir e se tornar prejudicial para os efeitos dos tratamentos térmicos e propriedades mecânicas. Aliás, o efeito específico do vanádio é retardar o crescimento dos grãos.

Os carbonetos ricos em vanádio, não só se dissolvem mais lentamente na austenita como também são mais resistentes a altas temperaturas. Por essa razão os aços perlíticos ao vanádio são muito estáveis.

Aços-silício — O silício entra em solução apenas na ferrita, tornando-a mais resistente. Não forma carbonetos e tende a promover a grafitação daquele que exista. O silício eleva as temperaturas de transformação das ligas e introduz novas áreas de mudanças alotrópicas no diagrama ferro-carbono.

O silício, entrando em solução na ferrita, contribui para melhorar o limite de resistência, sem sacrifício da ductilidade ou tenacidade, desde que a sua percentagem não seja maior que 2,5%. Em quantidades maiores do que 2,5% introduz fragilidade e com mais de 5% torna o aço não maleável.

O silício favorece o crescimento dos grãos a altas temperaturas, propriedade esta utilizada na fabricação das chapas para transformadores porque os grãos grandes de ferrita, rica em silício, para dada espessura de chapa, oferecem um mínimo de paredes intergranulares que se oponham à passagem de fluxo. Aços com 4% de silício são grandemente empregados para a construção de chapas de transformadores, de vez que possuem ótima permeabilidade e pequena perda histerética.

Como constituintes microscópicos desses aços, notamos um único, tal seja a ferrita rica em silício; o teor em carbono é sempre baixo (*) e quando aumenta, estará precipitado sob a forma de grafita.

Outros aços silício com menor quantidade desse elemento, são empregados também em aparelhos elétricos, como dinamos e outros: estes aços

(*) Da ordem de milésimos por cento.

ao silício empregados em eletrotécnica devem ter muito pouco carbono para evitar as soluções de continuidade que acarretaria a presença deste metalóide, sob a forma de grafita.

Em alguns aços complexos o silício é adicionado para melhorar a resistência à oxidação a altas temperaturas bem como para melhorar as propriedades elásticas; é assim que temos aços para molas, cuja composição química, além da presença do manganês (**) (1%) e carbono (0,6%) tem de 1 a 2% de silício. Êsses aços resistem bem ao desgaste.

Um dos efeitos mais importantes do silício nos aços é o seu poder desoxidante e desgaseificador (na liga, ainda líquida). Nestas condições é usado em teores de 0,10% a 0,30% nos aços SAE.

Aços com teores mais elevados de carbono (1,5%) e com cerca de (1,5%) de silício são do tipo grafítico. Êstes aços, dependendo de seu modo de esfriamento, apresentam a grafita sob a forma de nódulos, em presença de um fundo de ferrita ou de ferrita com perlita, quando a grafitação não for completa.

Os aços ao silício como se vê, não podem ser cementados pois não absorvem carbono.

SUMÁRIO — CLASSIFICAÇÃO

Daremos a seguir algumas indicações sôbre a estrutura dos aços ternários e complexos.

Ao se examinar ao microscópio aços-liga ternários que sofreram um recozimento industrial, vê-se que se pode encontrar os seguintes constituintes: a perlita, a ferrita, a cementita, a grafita, a austenita, a martensita, a troostita e carbonetos especiais bem como observar as associações de dois ou três dos constituintes.

A presença simultânea de perlita e ferrita se dá em tôdas as espécies de aços especiais; isto indica que a soma dos outros elementos que não o ferro e o carbono, não é elevada, porém, não caracteriza a presença de um elemento especial.

Por outro lado, a existência após o recozimento, de um dos constituintes: austenita, martensita, troostita, grafita, ou a presença de carbonetos duplos indica a presença de um aço-liga; em certos casos pode-se mesmo pela microestrutura, encontrar um dos elementos especiais ou restringir esta procura a um pequeno número de elementos possíveis. É assim que:

(**) Para contrabalançar o efeito grafitizante do Si.

A grafita indica como elemento especial a presença do silício.

Os carbonetos indicam teores muito elevados de um ou de vários elementos como o cromo, tungstênio, o molibdeno e o vanádio.

A martensita indica a presença de um ou vários elementos como o níquel, o manganês, o cromo.

A existência simultânea de martensita e carbonetos indica aço-liga pelo menos quaternário, contendo níquel (aços níquel-cromo, níquel-tungstênio, níquel-molibdeno, níquel-vanádio) ou manganês (aços manganês-cromo, manganês-tungstênio, manganês-molibdeno, manganês-vanádio) ou cromo (aços cromo-tungstênio, cromo-molibdeno, cromo-vanádio).

A existência simultânea da austenita e carbonetos indica tratar-se de um aço contendo juntos, níquel ou manganês em forte proporção e cromo, tungstênio, molibdeno ou vanádio.

A presença simultânea de grafita e de austenita indica tratar-se de aços níquel-silício e manganês-silício com alto teor em níquel ou em manganês e contendo quantidades muito grandes de silício.

Classificação — Antigamente cada fabricante de aço caracterizava seus produtos de modo particular; enquanto o número dos tipos de aço era pequeno, tal modo de classificar não oferecia maiores dificuldades. Tendo havido, porém, um imenso progresso na arte de utilizar os mais diferentes elementos nas ligas ferro-carbono, aquele pequeno número de aços-liga, cresceu de modo inesperado. Com isso a dificuldade de obtenção de certo aço-liga, residia quase que tão somente, na sua busca em diferentes usinas para confronto de características e preços.

Urgia uma normalização para classificar; foi assim que os Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha e outros países estabeleceram critérios de classificação local. Se bem que não exista uma classificação universal o avanço já realizado constitui uma solução satisfatória para o problema.

Os aços podem ser classificados segundo os seguintes critérios:

- a) em função dos processos e métodos de manufatura (espécies de aços);
- b) de acordo com os seus usos (classes de aços);
- c) em função da composição (tipos de aços);
- d) em função das qualidades.

Como exemplo de classificação dos aços pode-se citar a proposta pela Society of Automotive Engineers (S.A.E.) e que é adotada nos Estados Unidos. Essa classificação é baseada inteiramente na composição química e todos os aços são considerados como ligas de ferro e classificados de acordo com os elementos de liga.

Os diferentes aços S.A.E. são designados por números, cada um indicando a composição do aço especificado. Por êste sistema, o primeiro dígito de um número indica a espécie ou classe de aço, o segundo dígito a percentagem do elemento predominante e os últimos dois dígitos o teor de carbono em centésimos de um por cento.

ESQUEMA DA CLASSIFICAÇÃO NUMÉRICA DA SAE

(*Society of Automotive Engineers, Inc.*)

Tipos de aço	Classificação SAE
<i>Aços carbono</i>	1xxx
Comuns	10xx
De corte fácil (barras p/ parafusos)	11xx
De corte fácil (com manganês)	13xx
<i>Aços manganês</i> (até 1,9% Mn)	13xx
<i>Aços níquel</i>	2xxx
3,5% de níquel	23xx
5,0% de níquel	25xx
<i>Aços níquel cromo</i>	3xxx
1,25% de níquel 0,60% de cromo	31xx
1,75% de níquel 1,00% de cromo	32xx
3,50% de níquel 1,50% de cromo	33xx
3,00% de níquel 0,80% de cromo	34xx
Aços resistentes à corrosão e à temperatura	30xxx
<i>Aços molibdeno</i>	4xxx
Com cromo	4xxx
Com cromo e níquel	41xx
Com níquel	46xx e 48xx
<i>Aços cromo</i>	5xxx
Baixo teor de cromo	51xx
Médio teor de cromo	52xxx
Aços resistentes à corrosão e à temperatura	51xxx
<i>Aços cromo vanádio</i>	6xxx
<i>Aços silício manganês</i>	9xxx

NOTA: — O símbolo X é usado frequentemente para denotar variações na quantidade dos elementos.

BIBLIOGRAFIA

BULLENS, D. K. — *Steel and its heat treatment. Fourth edition. New York, John Wiley, 1939.* ..

CAMP, J. M. and FRANCIS, C. B. — *The Making, Shaping and Treating of Steel — Fifth edition. Pittsburgh, Carnegie Illinois Steel Co. 1940.*

GUILLET, LEON et PORTEVIN, ALBERT — *Précis de métallographie microscopique et de macrographie. Deuxième édition. Dunod. 1942.*

SAE HANDBOOK — SAE STANDARDS — *1944 Edition. Society of automotive engineers, Inc. New York.*

TEICHERT, Ernest J. — *Introduction to ferrous metallurgy. Second edition. New York. Mac Graw-Hill Book Co. Inc., 1944.*