

DEFINIÇÕES. DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO Fe-C. EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA SÔBRE AS LINHAS DE TRANSFORMAÇÃO

1 — **Definições** — A definição de aço não é simples, porque, apesar dos principais elementos de liga que entram na sua composição serem o Fe e o C, aparecem sempre outros elementos secundários que, mesmo em teores pequenos, influem na sua estrutura e nas suas propriedades. A definição adotada nas presentes notas é a seguinte:

«Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,006 % até 2,0 % de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação».

O limite inferior 0,006 % corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,0 % corresponde à máxima solubilidade de carbono no ferro e que ocorre a 1130° C. Essa quantidade máxima de 2,0 % de carbono depende, por outro lado, da presença ou não nos aços de elementos de liga ou da presença dos elementos residuais em teores superiores aos normais. Nessas condições, será necessário, para se ter uma definição mais precisa, considerar dois tipos fundamentais de aço:

— **aço-carbono** ou «liga Fe-C contendo geralmente 0,006 % até 2,0 % de carbono além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação»;

— **aço-liga** ou «aço-carbono que contém outros elementos de liga ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais».

É imprescindível para o conhecimento perfeito dos aços, o estudo do seu **diagrama de equilíbrio**. A figura 1 mostra o diagrama da liga binária Fe-C para teores de carbono até 6,7 %. Esse diagrama é geralmente representado até 6,7 % de C porque o carbono forma com o ferro o composto Fe_3C que contém aproximadamente 6,7 % de carbono. Por outro lado, pouco ou nada se conhece acima desse teor; na realidade, acima de 4,0 a 4,5 % de C essas ligas apresentam pequena ou nenhuma importância comercial.

O diagrama representado na fig. 1 é simplificado, pois não mostra uma reação de natureza especial (chamada peritética) que ocorre nas vizinhanças do ponto de fusão do ferro, quando este se encontra no estado alotrópico delta (δ). Essa reação não apresenta qualquer importância comercial, por isso foi omitida.

As considerações iniciais a serem feitas sôbre o diagrama de equilíbrio Fe-C são as seguintes:

— os aços comerciais não são de fato ligas binárias Fe-C, pois nelas estão sempre presentes, devido aos processos comuns

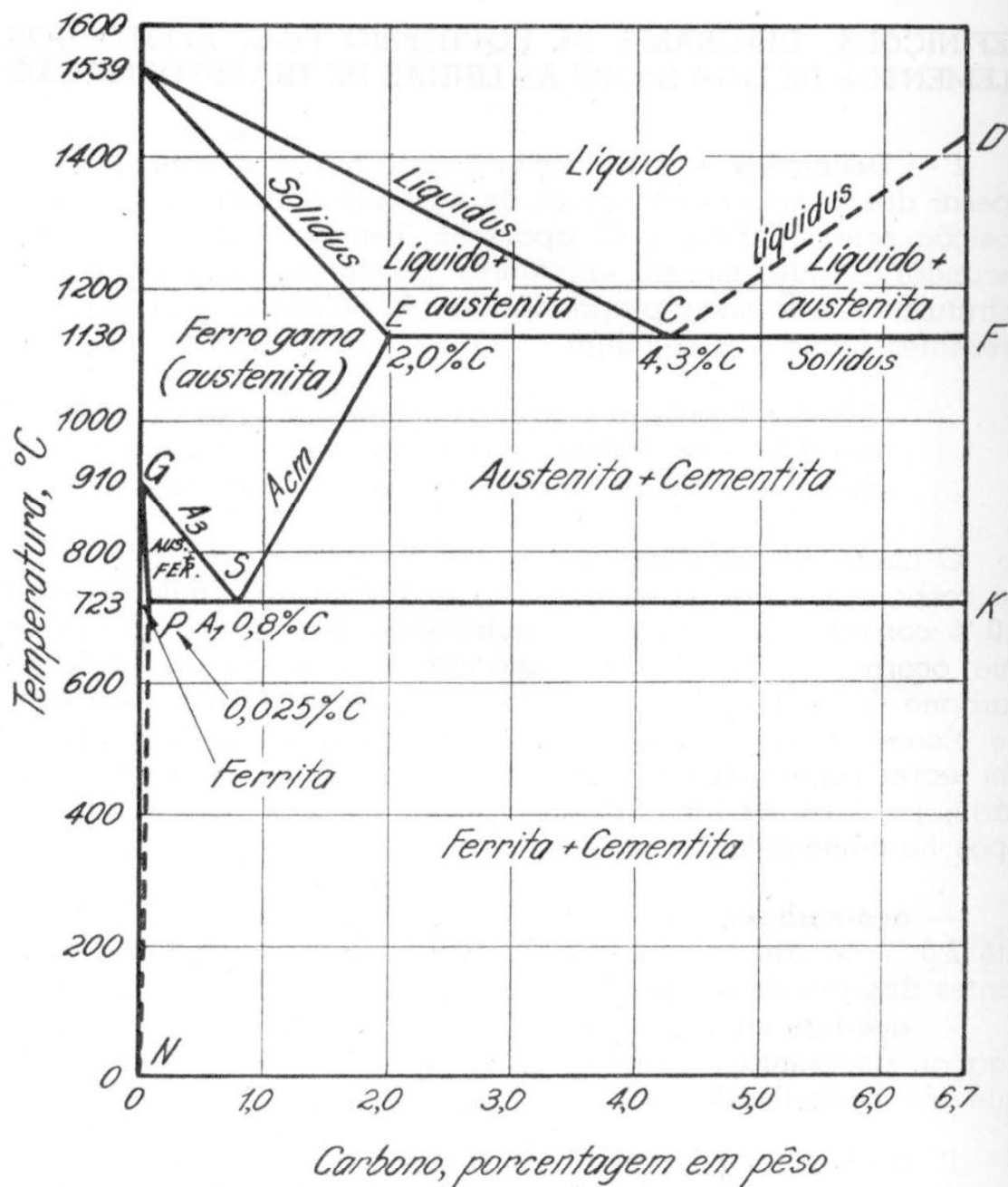


FIG. 1 — Diagrama de equilíbrio da liga Fe-C.

de fabricação, entre outros, os elementos fósforo, enxofre, silício e manganês. Entretanto, nos teores normais, êsses elementos pouco afetam o diagrama Fe-C;

— o diagrama de equilíbrio em questão é, na realidade, um diagrama Fe-Fe₃C. Por outro lado não se trata, a rigor, de um diagrama de equilíbrio estável, porque neste caso não deveria ocorrer qualquer mudança de fase com o tempo. Entretanto essa mudança ocorre, ainda que muito lentamente, tendo sido verificado que, após muitos anos e em condições especiais (altas temperaturas, silício elevado), mesmo em aços de muito baixo teor de carbono, o Fe₃C pode se decompor em ferro e carbono, êste último na forma de grafita. Nessas condições, o diagrama Fe-Fe₃C deve ser considerado de equilíbrio metaestável;

— o ponto A corresponde ao ponto de fusão do ferro puro, isto é, 1539°C e o ponto D, ainda impreciso, ao de fusão do Fe_3C ;

— a parte superior do diagrama, constituído pelas linhas AC, CD, AE, ECF e DF corresponde às reações que ocorrem na passagem do estado líquido ao sólido; examinando-se, agora, a parte inferior do diagrama constituída pelas linhas GS, SE, GP, PSK e FK, verifica-se a sua semelhança com a porção superior. Essa parte do diagrama corresponde às reações que ocorrem no estado sólido;

— o ponto C, na porção superior do diagrama, a 1130°C , indica a presença de uma liga eutética, com 4,3 % de carbono que é, portanto, a de mais baixo ponto de fusão ou solidificação;

— existe correspondência visível entre os pontos C e S, éste último da porção inferior do diagrama. Por êsse motivo, o ponto S é chamado **ponto eutetóide**. Como se vê, S corresponde a 0,8 % de carbono; as ligas com essa composição são chamadas **eutetóides**;

— o ferro puro, como se sabe, apresenta-se até 910°C sob a forma alotrópica alfa e a partir de 910°C até 1390°C no estado alotrópico gama. Essas formas alotrópicas se caracterizam por apresentarem reticulados cristalinos diferentes. A principal consequência dêsse fenômeno, de grande importância prática nos tratamentos térmicos dos produtos siderúrgicos, é a seguinte: **o ferro gama pode manter em solução o carbono ao passo que o ferro alfa não**. A solução sólida do carbono em ferro gama é chamada **austenita**. Êste constituinte, portanto, no diagrama de equilíbrio da liga normal Fe-C aparece a temperaturas elevadas somente. Por outro lado, o carbono afeta a temperatura relativa à transformação alotrópica gama-alfa (e, portanto, a temperatura de existência da austenita): um aumento de carbono abaixa a temperatura dessa transformação até 723°C , exatamente para 0,8 % de carbono. Abaixo de 723°C , nas condições de esfriamento muito lento para o diagrama normal Fe-C, em nenhuma hipótese existirá ferro gama e, portanto, austenita. No gráfico da fig. 1, tal fato é indicado pela linha PSK. Assim, a linha GS marca o início da transformação do ferro gama em ferro alfa e a linha PS o seu fim. Entre GS e PS tem-se simultaneamente as duas fases, gama e alfa;

— entretanto, a solubilidade do carbono no ferro gama não é ilimitada. Ela é máxima a 1130°C e corresponde a 2,0 % de carbono exatamente. À medida que cai a temperatura, a partir de 1130°C , a quantidade de carbono que é solúvel no ferro gama é cada vez menor, até se atingir o valor de 0,8 % de carbono, correspondente a 723°C . No diagrama da fig. 1 êsse fato é indicado pela linha SECF. Assim, na faixa compreendida entre a linha SECF e a linha SK estão presentes duas fases: ferro gama e carbono, éste último sob a forma de carboneto de ferro (chamado **cementita**). O teor de carbono 2,0 % correspondente

ao ponto C, é adotado como separação teórica entre os dois principais produtos siderúrgicos:

aços — teores de carbono até 2,0 %

ferros fundidos — teores de carbono acima de 2,0 %

— por outro lado, a solubilidade sólida do carbono em ferro alfa não é nula. À temperatura ambiente, cerca de 0,006 % de carbono se dissolvem no ferro alfa e essa quantidade aumenta com a temperatura até que a 723° C, 0,025 % de carbono podem se dissolver no ferro alfa. Dessa temperatura até 910° C, há decréscimo novamente da solubilidade sólida do carbono no ferro alfa. Esses fatos são representados no gráfico da fig. 1 pelas linhas NP e PG. Devido a essa solubilidade sólida do carbono no ferro alfa, costuma-se considerar aços, as ligas ferro-carbono com carbono de 0,006 % até 2,0 %. Até 0,006 % de carbono, o produto siderúrgico é **ferro** chamado **comercialmente puro**:

— a linha GS que, no esfriamento, indica a passagem do ferro gama a ferro alfa é representada pela letra A_3 ; a linha PSK, abaixo da qual não pode existir ferro gama, é representada por A_1 ; a linha ES, indicativa da solubilidade máxima do carbono no ferro gama, é representada por A_{cm} . Essas linhas são chamadas também **linhas de transformação**, porque ao serem atingidas, quer no esfriamento, quer no aquecimento, têm início ou terminam importantes transformações estruturais no estado sólido. A zona limitada por essas linhas é, por essa mesma razão, chamada de **zona crítica**:

— em resumo: entre as linhas AG, GS, SE e EA a fase sólida que está presente é ferro gama ou **austenita**; entre as linhas GO, GP e PN, a fase sólida presente é ferro alfa (também chamado **ferrita**); entre as linhas GS, GP, e PS de um lado e SE, ECF e SK de outro, existe mais de uma fase sólida em processo de transformação; e abaixo da linha PSK até a temperatura ambiente, estão presentes as fases sólidas resultantes das transformações verificadas na zona crítica e formadas em caráter definitivo.

Como se processam essas transformações e quais as fases resultantes no caso das ligas até 2,0 % de carbono?

Para esse estudo, é conveniente no diagrama da fig. 1 aumentar a escala da zona correspondente aos aços (fig. 2).

2 — Transformações que ocorrem entre 0 e 2,0 % de carbono — Os aços com 0,8 % de carbono são chamados **eutetoides**; os que apresentam carbono abaixo de 0,8 % são chamados **hipoeutetoides** e os que apresentam carbono entre 0,8 e 2,0 % são chamados **hipereutetoides**.

Considere-se o esfriamento de um aço hipoeutetoide — com 0,3 % de carbono por exemplo. Ao atravessar a linha solidus, está inteiramente solidificado, na forma de uma solução sólida perfeita — **austenita** — e assim permanecerá até atingir o limite

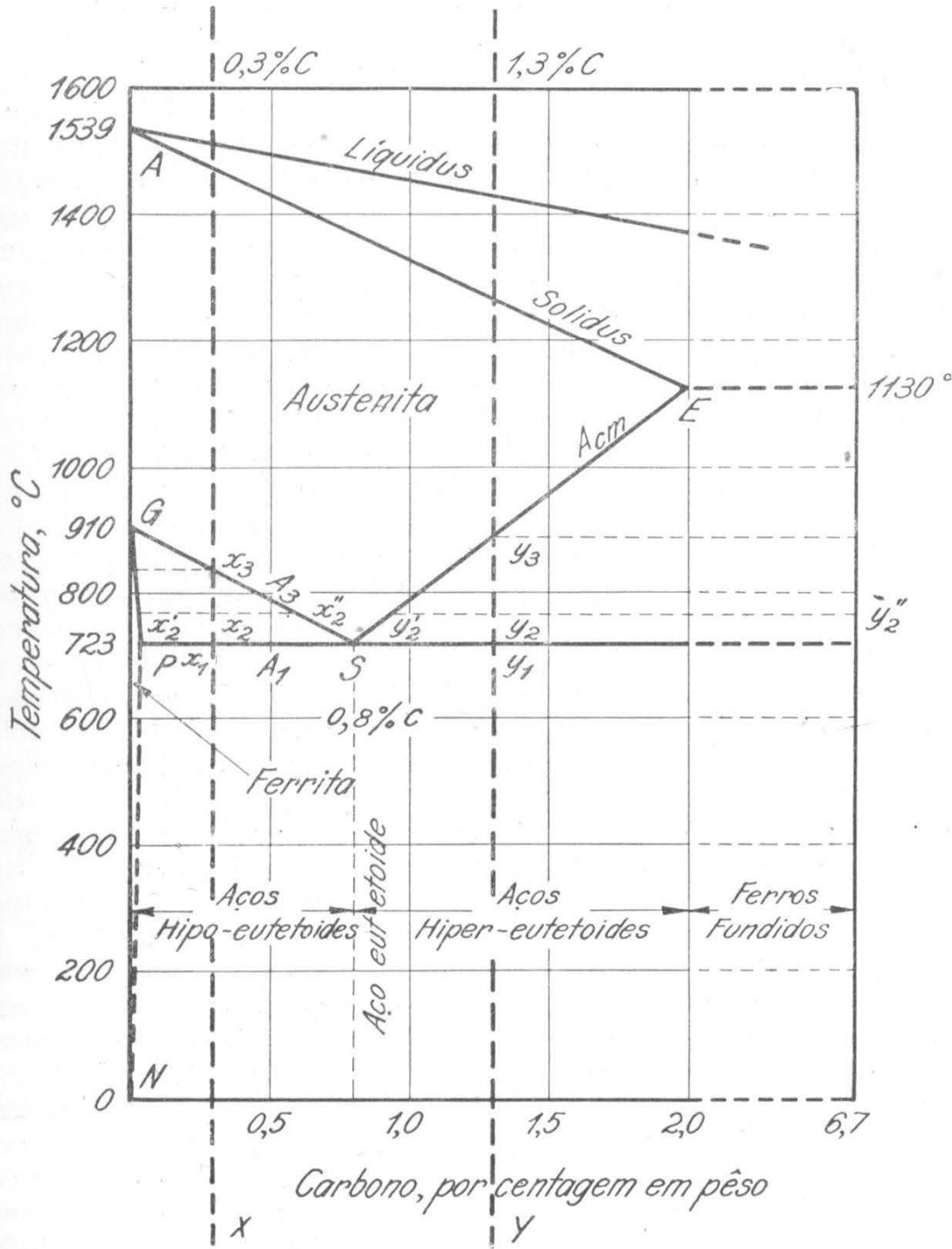


FIG. 2 — Diagrama de equilíbrio Fe-C para teores de 0 a 2.02 de carbono.

superior da zona crítica, linha A₃, no ponto x₃. Essa austenita conterá 0,3 % de carbono dissolvidos no ferro gama e se apresentará na forma de cristais com reticulado cúbico de face centrada. Se fosse possível seu exame ao microscópio êsse constituinte se apresentaria parecido com o ferro puro. Ao atingir o ponto x₃, parte do ferro gama passa a alfa e como êste não pode manter em solução sólida se não um teor mínimo de carbono, êle se separa, ocasionando, em consequência, um enriquecimento de carbonô na austenita remanescente não transfor-

mada. Para que ocorra nova mudança desta austenita não transformada será, portanto, necessário um abaixamento ulterior de temperatura. Suponha-se que se tenha atingido o ponto x_2 . Nesse ponto, mais ferro gama terá se transformado em alfa, que se separa ocasionando ainda maior enriquecimento de carbono da austenita remanescente. A exata composição das duas fases existentes à temperatura correspondente ao ponto x_2 é dada pela intersecção da horizontal passando por x_2 com as linhas GP de um lado e GS do outro. Vê-se claramente que o ferro alfa (ou **ferrita**) separado apresenta só pequena porcentagem de carbono, ao passo que a austenita restante se enriquece paulatinamente de carbono. À medida que o esfriamento prossegue, separa-se cada vez mais ferrita, cuja composição percorre a linha GP e a austenita restante se enriquece de carbono, percorrendo a linha GS. A 723°C , no ponto x_1 da linha inferior A_1 da zona crítica, o aço consistirá de uma certa quantidade de ferro alfa ou ferrita e de uma certa quantidade de austenita residual com teor de carbono igual a 0,8 %. Em outras palavras, a 723°C , o aço com 0,3 % de carbono apresentará a máxima quantidade de ferrita que podia se separar e o restante será constituído de austenita, com 0,8 % de carbono. Nesse instante, entretanto, o ferro gama da austenita passa a ferro alfa pois abaixo de 723°C não pode mais existir ferro na forma alotrópica gama. A transformação ferro gama a ferro alfa dá-se agora de modo brusco e repentino evidentemente, de modo que os constituintes que resultam da transformação, ferro alfa ou ferrita de um lado, e carbono na forma de Fe_3C , do outro, não têm tempo de assumirem posições perfeitamente distintas: a ferrita e o Fe_3C (**cementita**) que nessas condições se formam, se dispõem de um modo característico, em lâminas extremamente delgadas, distribuídas alternadamente, muito próximas umas das outras e perceptíveis ao microscópio somente mediante grandes ampliações. Origina-se assim um novo constituinte de forma lamelar típica, chamado **perlita**. Abaixo de 723°C , até a temperatura ambiente, prosseguindo-se no esfriamento lento, não se nota mais qualquer alteração estrutural. Em resumo, os aços hipo-eutetoides ou com teor de carbono até 0,8 % são constituídos à temperatura ambiente de ferrita e perlita. (fig. 3). Haverá tanto maior quantidade de ferrita quanto menos carbono o aço apresentar e tanto maior quantidade de perlita quanto mais se aproximar o aço do ponto eutetoide. Aliás, para se estimar a constituição estrutural dessa liga com 0,3 % de C, bastará aplicar-se a conhecida «regra da alavanca» :

$$\begin{aligned} \% \text{ de ferrita} &= 100 \times \frac{0,80 - 0,30}{0,80 - 0} = 62,5 \% \\ (\text{chamada pro-eutetoide}) & \\ \% \text{ de perlita} &= 100 \times \frac{0,30 - 0}{0,80 - 0} = 37,5 \% \end{aligned}$$

A liga com teor de carbono entre 0 e N, ou o ferro comercialmente puro, após a solidificação apresentará a solução sólida austenita até atingir a linha de transformação A_3 . Até a linha GP o ferro comercialmente puro será constituído de austenita e

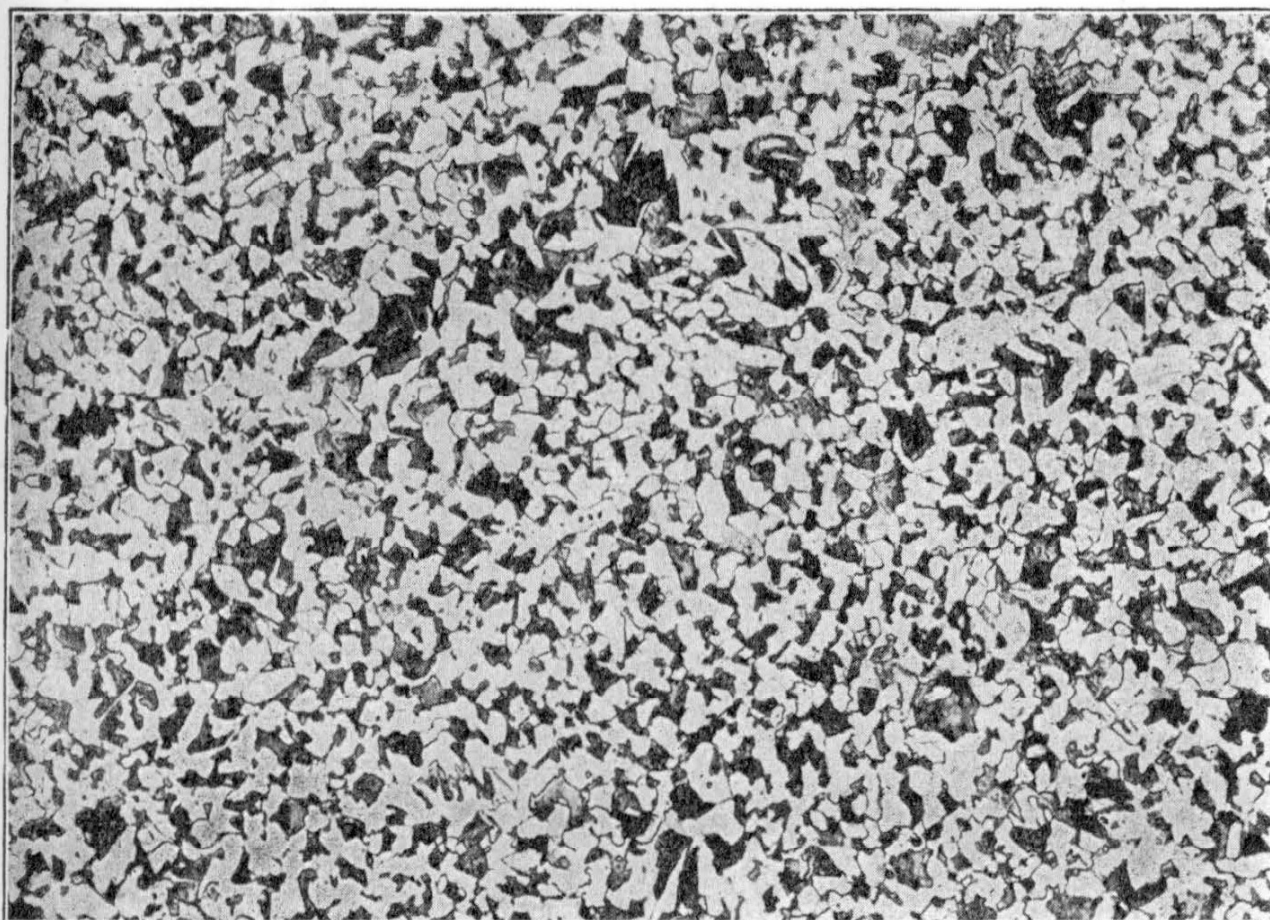


FIG. 3 — Aspecto micrográfico de um aço hipo-eutetoide esfriado lentamente. Ataque: ácido nítrico 150 x.

ferrita e da linha GP até a temperatura ambiente exclusivamente de ferrita.

Suponha-se, agora, o esfriamento de um aço hiper-eutetoide, por exemplo com 1,3 % de carbono. Esse aço também será exclusivamente constituído de austenita, depois de atravessar a linha solidus, até atingir o limite superior da zona crítica, linha A_{cm} no ponto γ_3 . Essa linha, como se viu, marca o limite da solubilidade sólida do carbono no ferro gama. Portanto, ao atravessar a linha SE ou A_{cm} começa a haver separação de carbono, na forma Fe_3C (**cementita**) com 6,7 % de carbono; essa cementita vai se localizar nos contornos dos grãos de austenita. Esta, em consequência se empobrece de carbono, de modo que para que haja ulterior separação de Fe_3C é necessário um abaixamento de temperatura. A uma temperatura correspondente ao ponto γ_2 (fig. 2) verifica-se que as fases em equilíbrio são cementita (ponto γ''_2) e austenita com a composição correspondente ao ponto γ'_2 . À medida, pois, que o esfriamento prossegue, verifica-se contínua separação de cementita e a austenita res-

tante percorre a linha ES empobrecendo-se constantemente em carbono. Ao atingir-se, no esfriamento, a temperatura 723°C , tem-se um lado Fe_3C e de outro austenita com composição equivalente ao ponto eutetóide, isto é, 0,8 % de carbono. Neste



FIG. 4 — Aspecto micrográfico de um aço hiper-eutetoide esfriado lentamente. Ataque: ácido nítrico 200 x.

momento, todo o ferro gama passa brusca e repentinamente a alfa e a austenita restante adquire a forma lamelar da perlita. Assim, abaixo de 723°C , até a temperatura ambiente, os aços hiper-eutetoides serão constituídos de perlita e cementita (fig. 4). Também aqui, aplicando-se a «regra da alavanca» ter-se-á a composição estrutural seguinte :

$$\% \text{ perlita} = 100 \times \frac{6,67 - 1,30}{6,67 - 0,80} = 91,5 \%$$

$$\% \text{ cementita} = 100 \times \frac{1,30 - 0,80}{6,67 - 0,80} = 8,5 \%$$

(chamada pro-eutetoide)

Finalmente, um aço eutetoide, depois de inteiramente solidificado não sofrerá qualquer transformação até atingir a temperatura de 723°C , momento em que toda a austenita passará

bruscamente a perlita. Assim, um aço com composição correspondendo exatamente à do ponto eutetoide será constituído à temperatura ambiente exclusivamente de perlita (fig. 5).

A composição estrutural, da perlita também determinada pela «regra da alavanca» é a seguinte :

$$\begin{aligned} \% \text{ ferrita} &= 100 \times \frac{6,67 - 0,80}{6,67 - 0} = 88 \% \\ \% \text{ cementita} &= 100 \times \frac{0,80 - 0}{6,67 - 0} = 12 \% \end{aligned}$$

Em resumo, a constituição estrutural à temperatura ambiente das ligas ferro carbono de 0 até 2,0 % de carbono, esfriadas lentamente a partir de temperaturas acima da zona crítica, é a seguinte :

- ferro comercialmente puro — ferrita;
- aços hipo-eutetoides (até 0,8 % de carbono) — ferrita e perlita;
- aços eutetoides (0,8 % de carbono) — perlita;

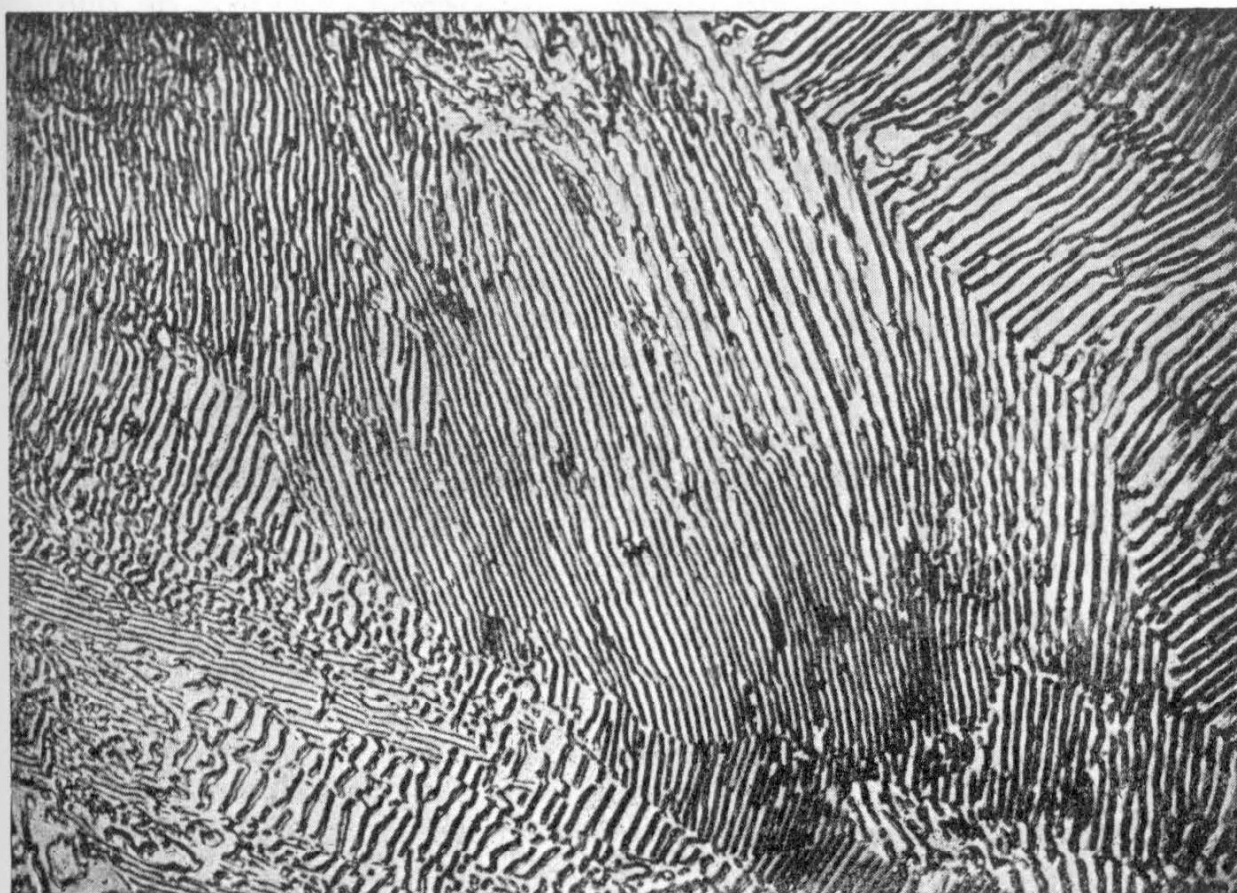


FIG. 5 — Aspecto micrográfico de um aço eutetoide esfriado lentamente.
Ataque: ácido nítrico 750 x.

— aços hiper-eutetoides (0,8 a 2,0 % de carbono) — perlita e cementita.

Os aços hipo-eutetoides apresentarão tanto maior quantidade de ferrita quando menos carbono contiverem e os aços hiper-eutetoides tanto maior quantidade de cementita quanto mais se aproximarem do teor 2,0 % de carbono.

3 — **Propriedades dos constituintes dos aços** — Os constituintes básicos dos aços são, pois, austenita, ferrita, cementita e perlita.

A **austenita** (do nome do metalurgista inglês Roberts-Austen), nos aços-carbono comuns, só é estável acima de 723° C; consta de uma solução sólida de carbono no ferro gama e apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade; é não-magnética.

A **ferrita** (do latim «ferrum») é ferro no estado alotrópico alfa contendo em solução traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração, cerca de 28 kg/mm², mas excelente resiliência e elevado alongamento.

A **cementita** (do latim «caementum») é o carboneto de ferro Fe₃C contendo 6,67 % de carbono; muito dura (na escala Moh's ocuparia aproximadamente o lugar do feldspato), quebradiça, é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade.

A **perlita** (nome devido à nuance de cores de madre-perla que esse constituinte frequentemente apresenta ao microscópio) é a mistura mecânica de 88 % de ferrita e 12 % de cementita, na forma de lâminas ou lamelas finas (de espessura raramente superior a um milésimo de milímetro) dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é, em média, 70 kg/mm². A proporção de perlita num aço cresce de 0 % para ferro puro até 100 % para aço eutetoide (0,8 % de carbono), de modo que um aço com 0,5 % de carbono, por exemplo, apresentará cerca de 62,5 % de perlita.

Devido aos característicos mecânicos dos constituintes dos aços, as propriedades mecânicas destes, quando esfriados lentamente, variam de acordo com a proporção daqueles constituintes. Assim, ferro comercialmente puro, constituído só de ferrita, apresenta-se mole, dútil, pouco resistente e muito resiliente; à medida que o teor de carbono cresce, aumentam os valores representativos da resistência mecânica, isto é, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e a dureza, ao passo que caem os valores relativos à ductilidade, como alongamento, estrição e resiliência. A tabela I dá valores obtidos para algumas propriedades mecânicas, em função do teor de carbono, de aços no estado recozido, isto é, esfriados lentamente de temperaturas acima da zona crítica.

TABELA I

Propriedades mecânicas de aços esfriados lentamente, em função do teor de carbono.

Carbono %	Limite de escoamento, kg/mm ²	Limite de resistência à tração, kg/mm ²	Alongamento %	Estricção %	Dureza Brinell
0,01	12,5	29,0	47	71	90
0,20	25,0	41,5	37	64	115
0,40	31,0	52,5	30	48	145
0,60	34,5	67,0	23	33	190
0,80	36,5	80,5	15	22	220
1,00	36,5	75,5	22	26	195
1,20	36,0	71,5	24	39	200
1,40	35,0	69,5	19	25	215

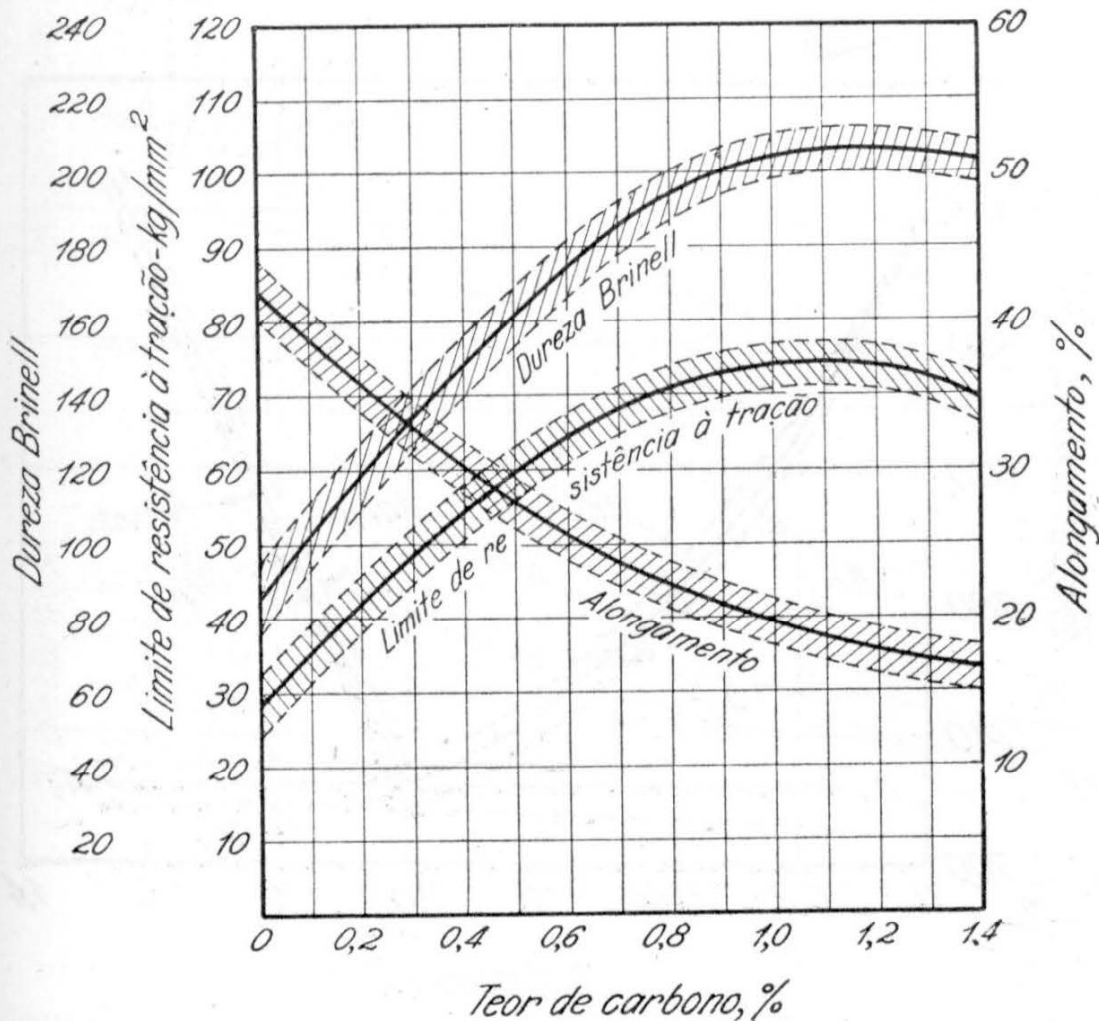


FIG. 6 — Influência do teor de carbono sobre propriedades mecânicas do aço esfriado lentamente.

Postos em gráfico os valores do limite de resistência à tração, alongamento e dureza Brinell que são os valores mais representativos das propriedades mecânicas dos metais, pode-se obter três curvas médias, como está indicado na fig. 6 que nos mostra, de um modo mais nítido, a influência do teor de carbono sôbre as propriedades mecânicas dos aços esfriados lentamente. Verifica-se que as curvas de dureza Brinell e de resistência à tração são aproximadamente paralelas. Evidentemente, as três curvas podem sofrer deslocamentos sensíveis para valores superiores e inferiores, pois muitos outros fatores além do teor de carbono entram em jôgo também. Esse fato é indicado na fig. 6 pelas áreas achuradas.

De acôrdo com o teor de carbono, costuma-se agrupar os aços em três grupos principais :

- aços doces, com carbono de 0,15 a 0,25 %;
- aços meio-duros, com carbono de 0,25 a 0,50 %;
- aços duros, com carbono de 0,50 a 1,40 %.

4 — Efeito do esfriamento e do aquecimento sôbre a posição das linhas de transformação — O diagrama visto (figs. 1 e 2)

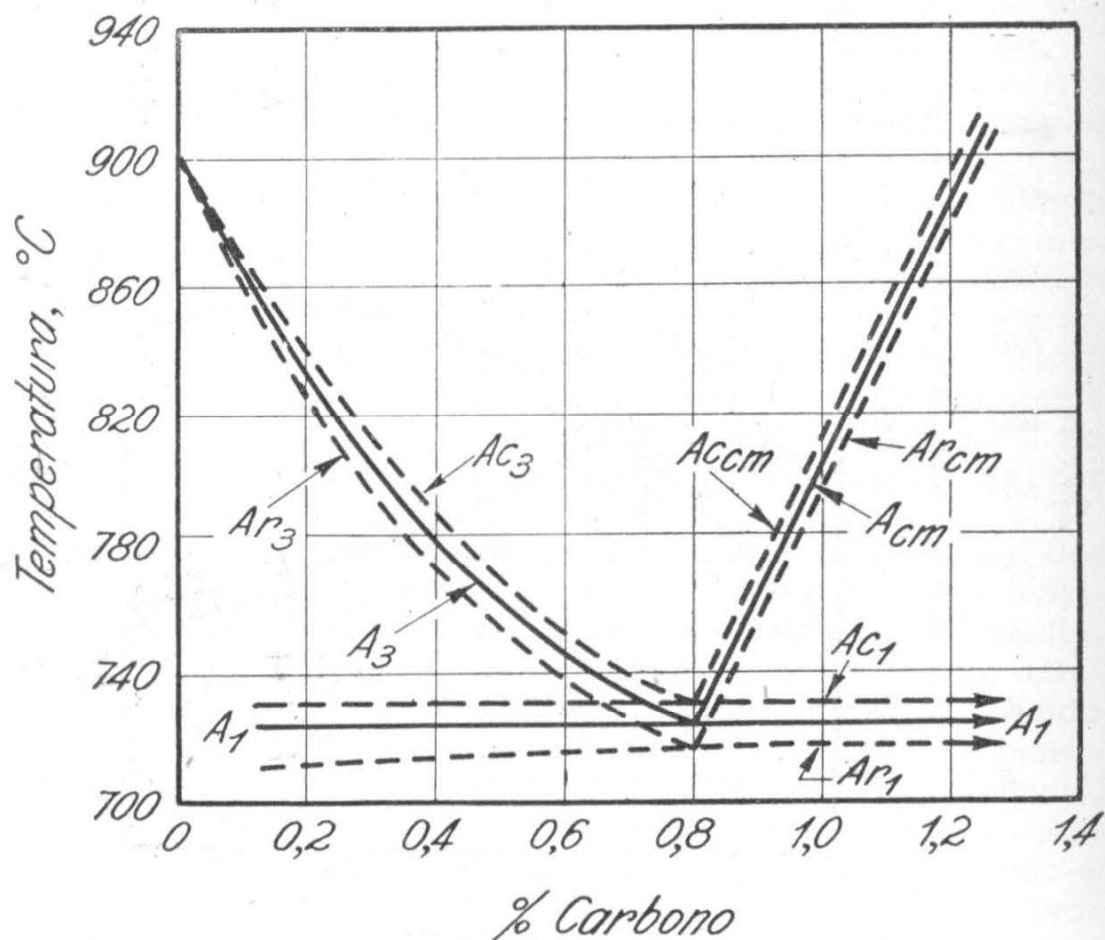


FIG. 7 — Influência do aquecimento e esfriamento a $\frac{1}{8}^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ sôbre as temperaturas de transformação na liga Fe-C. (Figura extraída do livro «Functions of the Alloying Elements in Steel» de E. C. Bain).

é para **esfriamento lento**; a posição das linhas de transformação é, entretanto, diferente quando se considera o **aquecimento lento**.

A figura 7 mostra os deslocamentos que ocorrem às temperaturas prováveis de equilíbrio, nas condições práticas de aquecimento e esfriamento. As designações Ac e Ar são originadas de:

- c = «chauffage», para ciclos ordinários de aquecimento;
- r = «refroidissement» para ciclos ordinários de esfriamento.

5 — Efeito dos elementos de liga sôbre o diagrama de equilíbrio Fe-C.

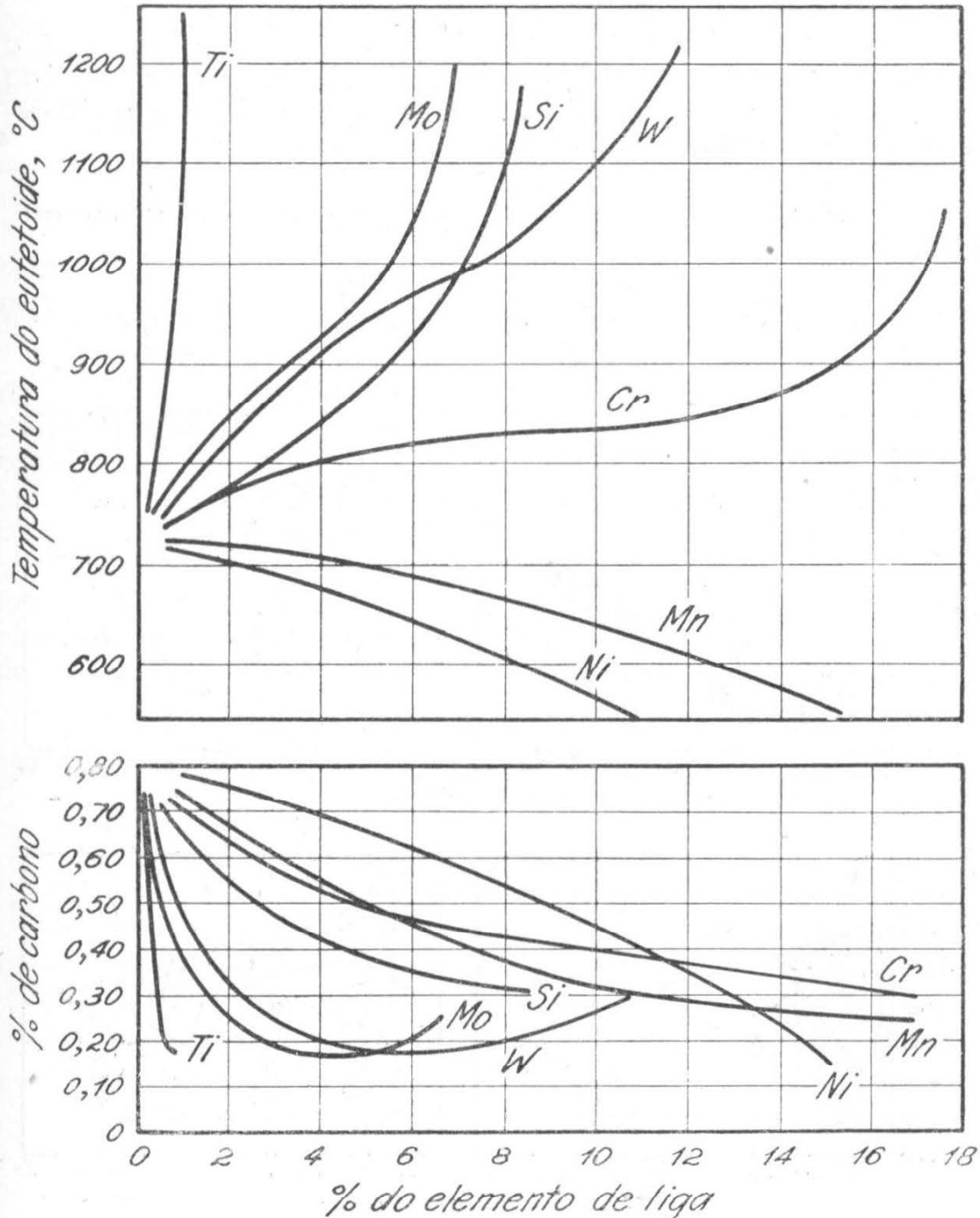


FIG. 8 — Influência dos elementos de liga sôbre o teor de carbono e a temperatura do eutetoide (Figura extraída do livro «Engineering Metals and Their Alloys» de C. H. Samans).

a) **Influência sôbre as transformações alotrópicas do ferro puro.**

A êsse respeito, os elementos de liga podem ser divididos em dois grupos:

— os que abaixam a transformação alfa-gama e elevam a transformação gama-delta, isto é, alargam a faixa dentro da qual o ferro gama é estável: **manganês, níquel e cobalto**; tais elementos são soluveis em apreciáveis quantidades, tanto no ferro gama como no ferro alfa;

— os que elevam a transformação alfa-gama e abaixam a transformação gama-delta, isto é, estreitam a faixa dentro da qual o ferro gama é estável: **silício, cromo, tungstênio, molibdênio, fósforo, vanádio, titânio, alumínio e enxofre**.

b) **Influência sôbre as linhas de transformação do diagrama Fe-C.**

— efeito dos elementos de liga sôbre a porcentagem de carbono e a temperatura do ponto eutetoide:

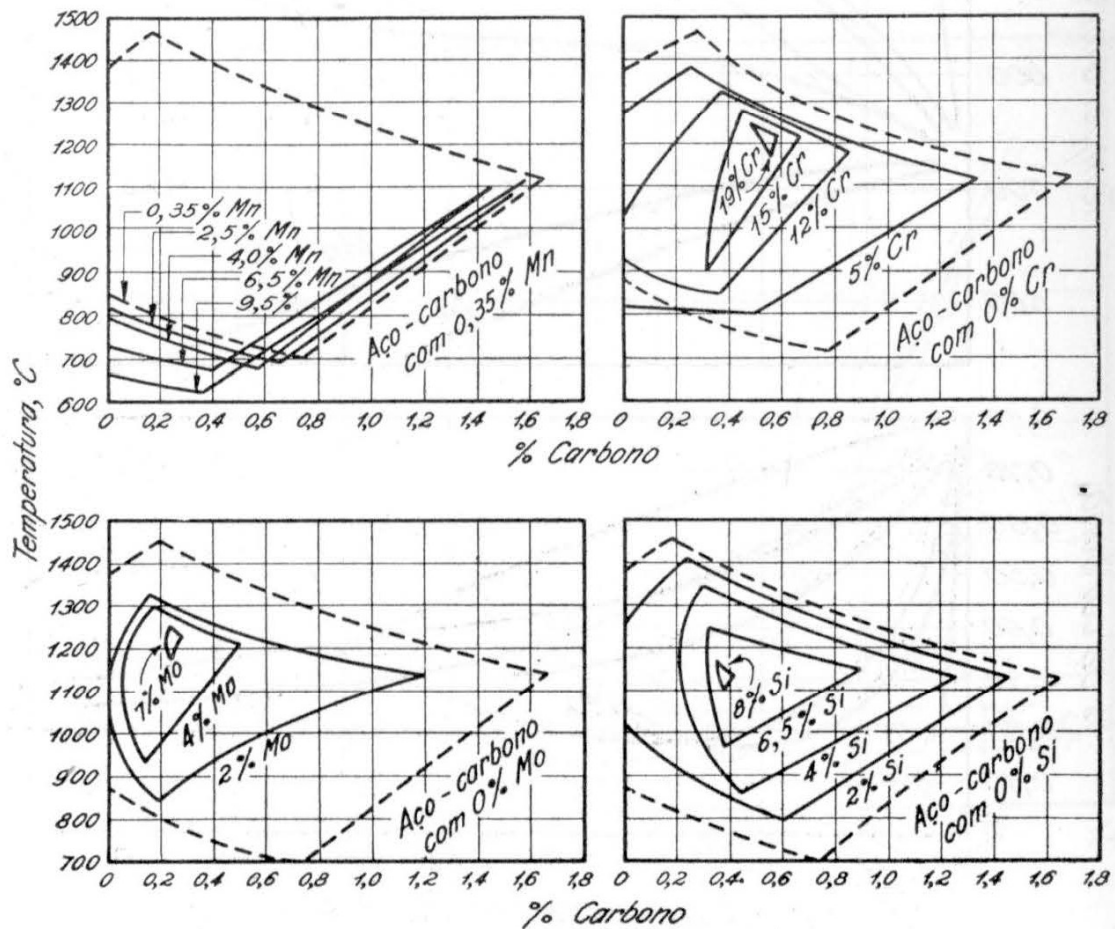


FIG. 9 — Efeito de certos elementos de liga sôbre o campo austenítico (Figura extraída do livro «Engineering Metals and Their Alloys» de C. H. Samans).

Tal efeito está esquematizado na fig. 8, onde se vê que todos os elementos de liga tendem a diminuir o teor de carbono do eutetoide, ao passo que, somente o níquel e o manganês tendem a diminuir a temperatura do eutetoide, os outros apresentando tendência oposta.

— efeito sobre o campo austenítico :

O efeito dos elementos manganês, cromo, molibdênio e silício está esquematizado na fig. 9. Verifica-se que o manganês, em teores crescentes, abaixa a temperatura do eutetoide, além de diminuir o seu teor de carbono; nota-se que com um teor adequado de Mn, poder-se-á obter estrutura inteiramente perlítica somente com cerca de 0,3 % de carbono. O cromo, o molibdênio e o silício se comportam de modo contrário ao manganês no que se refere à influência sobre a temperatura do eutetoide; quanto ao teor de carbono do eutetoide, a tendência é idêntica à do Mn. Todos eles, em resumo, com exceção do Mn, contraem o campo austenítico, tendendo a tornar o aço quasi que inteiramente ferrítico.

Convém observar que essa habilidade de certos elementos de liga, como o Mn, o Cr, o Mo, o Si, o Ni, o Ti etc. de produzirem uma estrutura eutetoide apresentando um teor de carbono comparativamente baixo é muito importante, visto que a liga mais resistente é a eutetoide. Como a dureza e a fragilidade crescem com a porcentagem de Fe_3C , é evidente que se se puder obter uma estrutura resistente, inteiramente perlítica, mediante a introdução de elementos de liga num aço com menor teor de carbono, essa estrutura será também mais mole e menos frágil do que a estrutura semelhante num aço-carbono comum.