

# ELEMENTOS DE LIGA EM FERRO FUNDIDO PERLÍTICO PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA <sup>(1)</sup>

ANTONIO AUGUSTO DA SILVA <sup>(2)</sup>

## RESUMO

*O autor dá definições e as razões para adições de ligas. Faz considerações fundamentais das características das várias fases de um ferro fundido ligado; indica processos metalúrgicos envolvidos na formação de estruturas produzidas quando adicionadas ferro-ligas.*

*Com a técnica já desenvolvida e com equipamentos instalados em algumas fundições de nossa terra, já se pode obter, em produções de rotina, ferros fundidos ligados atendendo a tôdas as exigências da indústria de veículos automotores, com altos índices de rendimento e qualidade.*

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação da indústria de automóveis trouxe, como consequência, normas a serem atendidas.

Não existem especificações gerais fixadas, tipo SAE, tratando de ferros ligados. Entretanto, os grandes consumidores geralmente estabelecem limites, criam especificações para determinada peça ou grupo de peças, de modo a estabelecer critério de recepção entre fornecedor e comprador.

Era técnica corrente usarem-se largas percentagens de sucata de aço para se obter ferro de alta resistência. Hoje, esta prática foi substituída pela adição de elementos de liga e pela inoculação.

Os metalurgistas de antigamente, só sabiam fazer ferros de alta resistência abaixando o teor de carbono e adicionando 50%

---

(1) Contribuição Técnica n.º 410. Apresentada na Reunião Aberta sobre «Produção de peças de ferro fundido de alta qualidade» do XV Congresso Anual da ABM; São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista; São Paulo, SP.

até 60% de sucata de aço, para se obter o teor de carbono em torno de 2,8% (ou menos). A composição de carga com gusa (ou sucata de ferro fundido) dá, em geral, o teor de carbono de 3,4% ou mais.

Os metalurgistas que aprenderam usar aço nas cargas, para obtenção de baixo carbono, conseguiam ferros às vezes com alta e outras com baixa resistência à tração; dependendo do tipo de grafita final, se A ou D. Os estudos mais aprofundados conduziram-nos a adotar a técnica da inoculação, permitindo o controle da forma de grafita, e eliminando a ocorrência da do tipo D. Os ferros assim obtidos, perlíticos e mesmo de baixo teor de carbono, davam (ou dão) resistência entre 29 e 32 kg/mm<sup>2</sup>. No entanto, com o uso racional de elementos de liga (como níquel, molibdênio, cromo, cobre e vanádio), obtém-se facilmente ferros com resistência de 42 a 45 kg/mm<sup>2</sup>, perlíticos, com grafita A e B e sem pontos duros.

Do mesmo modo, prevalecem dificuldades em relação à dureza, quando se trata de ferros comuns. A faixa normal é de 220 a 241 Brinell; além destes valores, é difícil a obtenção sem ocorrência de pontos brancos e sacrifício da usinagem. Entretanto, os ferros fundidos ligados podem apresentar valores da ordem de 292 Brinell, com usinabilidade normal, com grafita A e B e totalmente perlíticos.

Em face da importância do exposto, o autor analisa as diversas influências dos elementos de liga no ferro fundido perlítico para uma aplicação mais exigente, considerando melhores efeitos ou resultados quando o trabalho é feito em fornos elétricos. Ao expor este trabalho, cita o autor algumas especificações fixadas para certas peças vitais de autoveículos.

## 2. PRINCÍPIOS METALÚRGICOS

*Ferro fundido comum* — É, essencialmente, uma liga de ferro e carbono, no qual o carbono está em excesso da quantidade em que ele pode ser retido em solução sólida na austenita, na temperatura do eutético.

*Ferro-fundido com ligas* — É aquele que contém um ou mais elementos especialmente adicionados, em quantidades suficientes para produzir sensíveis alterações nas propriedades físicas e mecânicas das peças fundidas.

*Razões para adições de ligas* — Os elementos de liga são adicionados ao ferro fundido com várias finalidades, sendo duas as mais importantes: para melhorar as propriedades físicas e para conferir uma especial característica, como por exemplo resistência ao calor ou ao desgaste.

O engenheiro, pela sua observação quotidiana, é quem pode verificar características (como fluidez, contração e porosidade) e determinar como são afetadas estas propriedades quando se adiciona elementos de liga no metal. Estes mesmos elementos exercem importante influência na microestrutura das peças produzidas. Comparando-se peças fundidas com ferro comum com aquelas fundidas com ferro ligado, dentro de condições idênticas, pode-se observar modificações na microestrutura. Em alguns casos, com alguma dificuldade.

De uma maneira geral, pode-se dizer que, na produção de ferro fundido com ligas, os materiais constituintes da carga devem ser primeiramente homogeneizados através de unidades de fusão apropriadas. Este metal homogêneo vazado nos moldes, esfria e torna-se um sólido heterogêneo. O grau, o tipo da heterogeneidade e a característica dos vários componentes sólidos, são controlados pela composição, prática de fusão, velocidade de esfriamento e posterior tratamento térmico.

De uma maneira geral, pode-se dizer que, na produção de ferro fundido pelo tipo de dispersão e pela relativa proporção e característica de várias fases do metal sólido.

Havendo muitas variáveis na produção de ferro fundido, a aplicação dos princípios fundamentais da metalurgia poderia, à primeira vista, ser obscura. No entanto, a técnica progrediu de tal modo, que é perfeitamente possível estudar um fundido dentro de um ponto de vista elemental. Teve o autor a oportunidade de fundir vários tipos de peças, em produção seriada, adicionando elementos de liga; pôde observar, através de sistematização e controle, os ótimos resultados da aplicação dos elementos.

*Fases, reações e microconstituintes* — As partes principais que compõem um ferro fundido são: 1) carbono; 2) ferro em solução sólida e 3) compostos intermetálicos. A maneira segundo a qual estas partes se associam, através de várias reações, depende, sobretudo, da temperatura em que tem lugar estas reações. Dentro de certos limites, prescritos por condições de equilíbrio, a quantidade relativa de fases depende, principalmente, do tempo passado nas várias faixas de temperatura.

Assim, pode-se observar a modificação de propriedades do ferro, operada em função da velocidade de esfriamento a partir da temperatura de vazamento. Como a velocidade de esfriamento controla a temperatura na qual a reação de estrutura principia, e controla o tempo de permanência naquela faixa de temperatura, ela determina também a microestrutura e as propriedades físicas do ferro.

As reações em que as fases se formam ou transformam podem ser associadas com os processos físicos de: 1) solidificação; 2) grafitação; 3) precipitação e solução; 4) transformação crítica e 5) difusão.

Os microconstituintes resultantes e conhecidos são: a) grafita; b) solução sólida da ferrita; c) carboneto de ferro e compostos intermetálicos; d) austenita; e) ledeburita; f) martensita; g) bainita; h) sorbita; i) perlita; j) esteadita; k) inclusões.

#### EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA NAS REAÇÕES

*Solidificação* — De um estado líquido homogêneo a um estado sólido heterogêneo, exercem as ligas suas influências em fatores que determinam o caráter do fundido. Um primeiro fator importante é o deslocamento do eutético, quando da adição de ligas. Também e pela mesma razão, sofre modificação a temperatura do eutético, assim como a temperatura de solidificação. A composição do primeiro sólido que se forma é, sempre, diferente daquela do líquido. A solubilidade dos gases, seja no estado líquido ou no estado sólido, pode-se modificar a ponto de exercer uma acentuada influência no mecanismo de solidificação.

A estabilidade do carboneto de ferro, tanto no estado líquido, como no sólido, pode ser controlada com a adição de ligas

*Grafitação* — A grafitação se inicia durante, ou imediatamente após, a solidificação. Em um dado ferro, a presença de liga pode acelerar ou retardar o processo de grafitação. É o tamanho, forma e dispersão dos veios de grafita geralmente são diferentes de um ferro fundido sem liga, usado para o mesmo fim e nas mesmas condições. Há casos de ferro fundido com ligas que não apresentam tendência para grafitar, outros, no entanto, grafitam quase que completamente logo após a solidificação final.

A fim de que se obtenha propriedades estáveis, é o controle da grafitização, provavelmente, o fator mais importante do que qualquer outro. Na maioria dos casos, a grande facilidade para controlar ou regularizar a grafitização, com ferro-ligas, justifica completamente o seu uso.

*Reações de precipitação e solução* — As reações de precipitação e solução, que ocorrem no ferro fundido, podem ser alteradas, em relação ao solvente ou ao soluto, pela adição de ligas. O precipitado pode ser modificado, em tipo, em tamanho da partícula e em composição. A velocidade da precipitação pode ser acelerada ou atrasada. Em reações de solução, a velocidade de solução pode ser materialmente afetada tanto quanto a solubilidade específica. Em muitos casos, os limites de solubilidade são deslocados, resultando novas condições de equilíbrio, muitas vezes evidente na microestrutura e características.

*Transformação crítica* — Ainda que sejam semelhantes àqueles que ocorrem com os aços, os efeitos das ligas nas zonas de transformação do ferro fundido nem sempre recebem o destaque que merecem. Com todos os outros fatores constantes, assim como um ciclo de esfriamento determinado, o tipo de estrutura da matriz pode ser totalmente determinado pela adição de ligas.

Tratando-se de microconstituintes do ferro fundido, pode-se ver como a adição de ligas controla a temperatura crítica de transformação e produz modificações de estrutura, que não são obtidas em ferro fundido comum, mesmo com práticas de tratamento bem complexas.

A adição de liga ao ferro fundido invariavelmente sobe ou abaixa a faixa de temperatura crítica. No entanto, mais significativo é a modificação de proporção segundo a qual ocorre a transformação. O efeito da adição de liga pode ser de tal magnitude que alguma transformação possa ser impedida, porém mesmo em ciclo normal do fundido, as ligas agem em alto grau de importância.

*Difusão* — As reações se processam em estado sólido somente quando as constituintes possuem mobilidade. E ela depende, sobretudo, da temperatura e do meio. A adição de ligas modifica a difusão dos constituintes, criando outro fator para promover ou retardar a estabilidade estrutural.

## EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA SOBRE OS MICROCONSTITUINTES

*Grafita* — Referiu-se, linhas atrás, sobre a grafita. Pode-se dizer ainda mais que, estando as características físicas relacionadas com a formação da grafita, não tendo elas nenhuma resistência à tração e ao escorregamento, permite-se supor que, no ferro fundido, o volume ocupado pelo veios de grafita equivalem a vazios.

Dentro das mesmas condições, o tamanho, forma e distribuição da grafita no ferro fundido, varia com o uso de ligas.

*Solução sólida na ferrita* — A ferrita no ferro fundido, contém invariavelmente apreciável quantidade de silício e manganês e pouco carbono, fósforo e enxôfre. Assim é a ferrita, de composição complexa, ainda que um tipo simples de solução sólida.

A adição de elementos de liga resulta sempre numa mudança definida de propriedades da ferrita. Primeiramente, ela se torna mais dura e resistente, sem perda da tenacidade. Modificações em tôdas as outras características ocorrem, em proporção à quantidade de liga adicionada. As mais importantes, entre elas, são a resistência à corrosão e a resistência à tração a elevada temperatura.

*Cementita e compostos intermetálicos* — A cementita, um composto definido de ferro e carbono, torna-se um composto complexo com adição de ligas, formando o que se denomina de carboneto duplo. Com a formação dêste carboneto duplo, ocorrem modificações apreciáveis nas propriedades da estrutura do carboneto. O novo composto pode ser bem mais duro e frequentemente contribui para aumentar a resistência do ferro ao desgaste.

As ligas que não entram em combinações diretas com os carbonetos, não reagem com êles no sentido de produzir uma modificação em sua quantidade e sua dispersão.

Os carbonetos podem dissolver apreciáveis quantidades de ligas e assim afetar a estrutura e características do ferro.

*Austenita* — A solução sólida do carbono no ferro gama, pode dissolver rapidamente quantidades de liga, e, de acôrdo com o elemento dissolvido, suas propriedades variarão dentro de larga faixa. As ligas também modificam os limites de temperaturas nas quais podem existir a austenita. Suplementando

a modificação de estabilidade da fase, o mais importante efeito das ligas na austenita está na resistência à corrosão.

*Produtos de decomposição da austenita* — Os produtos primários obtidos da transformação da austenita são: a martensita, a bainita e a perlita. As estruturas, ditas secundárias, obtidas pelo revenido, são chamadas sorbita e cementita esferoidal. Depende, sobretudo, da temperatura de decomposição da austenita para se saber qual destes elementos predominará para uma determinada composição.

A modificação na proporção de transformação com a adição de ligas, e o conseqüente controle da temperatura de decomposição, é mais importante, na determinação da estrutura e propriedades, do que qualquer troca na composição do produto final.

As reações que ocorrem durante a decomposição da austenita nos ferros fundidos se assemelham àquelas que ocorrem com os aços.

Os estudos de Bain e Davenport mostram que, em altas temperaturas de transformação, a austenita se decompõe em perlita lamelar. Assim que a temperatura de transformação diminui, as lamelas tornam-se mais finas, com modificação gradual nas propriedades do eutetóide.

Quando a temperatura de transformação atinge a metade da faixa, a austenita remanescente não forma perlita e sim uma estrutura acicular, denominada bainita.

Se a austenita é retida até que a faixa inferior de temperatura seja atingida, a decomposição da austenita dá, em conseqüência, o que conhecemos como martensita.

As propriedades e a aparência destes constituintes são típicas e independentes da composição usada para promover a sua formação. A dureza, a resistência e a fragilidade inerentes à martensita são bastante conhecidas, assim como a resistência e tenacidade da perlita.

A bainita é intermediária na dureza e tem uma melhor combinação de resistência e tenacidade do que aquelas obtidas pelo revenido da martensita.

O significado real de contribuição das ligas para a formação da estrutura e propriedades do ferro fundido já é reconhecido através das suas habilidades para controlar a decomposição da austenita.

Abordamos rapidamente os princípios metalúrgicos fundamentais, aplicados aos ferros fundidos ligados, como eles são hoje compreendidos e geralmente aceitos. O autor tratará, em seguida, da influência de cada elemento de liga, pois cada um tem o seu efeito fundamental; considerando só aqueles elementos de uso mais comum.

### 3. EFEITOS NA ESTRUTURA

*Cromo* — É um dos mais fortes estabilizadores de carbonetos conhecido. Adicionado ao ferro fundido, forma um complexo ferro-cromo-cementita, o qual, seja em forma maciça, ou como componente da perlita, é bastante estável, mesmo em condições de alta temperatura.

Mesmo em pequenas quantidades, provoca modificações de estrutura.

O tamanho das lamelas de grafita é sempre mais uniforme, principalmente nos casos onde os ferros fundidos comuns dariam áreas de grafita eutética, tipos D e E; e o grão do ferro é sempre mais fino.

*Cobre* — Age primeiramente como elemento formador de grafita. Sua ação grafitizante é de 1/10 a 1/5 da do silício. É por isso recomendada a sua maior adição, para evitar a formação de ferrita livre.

Os ferros fundidos com cobre não têm o ponto do eutóide modificado, mas o eutético se forma no sentido de menos carbono. Em excesso do seu limite de solubilidade sólida, o cobre se dispersa no ferro, em forma de partículas microscópicas ou submicroscópicas. Refina a perlita e os veios de grafita, além de torná-los mais uniforme. Não tem efeito marcante no coquilhamento, exceto em secções bem finas, onde êle o reduz. E tem uma razoável influência na sensibilidade da estrutura em relação à secção da peça. É usado em percentagens até 3,0% para aumentar a resistência ao desgaste em superfícies de atrito, como em painéis de breque e camisas de motores e, ainda, para melhorar a resistência à corrosão em condições atmosféricas ligeiramente ácidas. A maioria dos ferros fundidos contém cobre como elemento residual.

*Níquel* — Tem êle ação grafitizante e, à semelhança do silício, atua na decomposição da cementita. Age efetivamente diminuindo o coquilhamento, a ocorrência de manchas de carbonetos, cantos coquilhados e áreas mescladas. Esta redução na



tendência de coquilhamento é conseguida sem o engrossamento da estrutura grafitica e, conseqüentemente, sem diminuir a resistência à tração, mesmo com maiores adições de silício.

Em percentagem de 0,10% a 1,0% é êle muito ativo, refinando grãos e diminuindo o tamanho dos veios de grafita. No entanto, em quantidades maiores de 1,0%, é necessário que se tenha uma percentagem adequada do silício.

O níquel pode substituir ou suplementar o elemento silício na fabricação de peças fundidas. Duas partes de níquel são, em geral, equivalentes a uma parte de silício, para efeito de diminuição do coquilhamento, enquanto que, com a percentagem de silício, menor de 1%, a proporção é de 3 a 4 partes de níquel para uma de silício.

Em muitos casos, a adição de níquel é preferível ao acréscimo de silício, pois o aumento de sua percentagem pode resultar em perda de características físicas, grãos maiores e grande tendência à porosidade e chupagem.

As percentagens de níquel adicionadas, até 1,5%, reduzem ligeiramente o carbono combinado da perlita. Em quantidades maiores, o carbono combinado da perlita aumenta progressivamente até 0,80%, percentagem do eutetóide.

É o níquel um dos elementos de liga que melhores e mais amplas características empresta ao ferro fundido.

Os bons resultados atingem ao máximo quando o ferro fundido em que êle é adicionado é perlítico, ou seja, quando o carbono combinado é da ordem de 0,60% a 0,80%. Ao se adicionar níquel, é preciso ter em conta a necessidade de se ajuntar outro elemento, que favoreça o aumento de carbono combinado, pois só o níquel não o faria, em percentagens menores do que 1,5%. Há casos em que é suficiente diminuir o carbono ou o silício, ou ambos os elementos para se conseguir tais resultados. A melhor prática, principalmente para secções maiores, é adicionar cromo ou molibdênio, ou ambos, em combinação com o níquel. De maior uso é o cromo, e de menor, o vanádio.

Um melhor ferro para ser tratado tèrmicamente, deve ter os veios de grafita finos e distribuídos a esmo e uniformemente; uma matriz livre de carbonetos, uma estrutura totalmente perlítica ou sorbítica e um carbono combinado de 0,60% a 0,80% em tôda a secção ou secções.

Uma estrutura dêste tipo é conseguida com facilidade e com constância de características, por adições de níquel a um ferro básico, baixo em silício e em carbono total, ou por adições, em

relações apropriadas, de níquel-cromo ou níquel-molibdênio, a um próprio metal base.

*Níquel-cromo* — A prática recomendada é adicionar níquel com cromo, em tal proporção que êles, mutuamente, neutralizem a respectiva influência grafitizante e coquilhante de cada um dêles. Usando somente cromo, a proporção não deve ser mais do que 3,0% de níquel para 1,0% de cromo.

*Níquel-molibdênio* — Há casos em que o cromo substitui integralmente ou em parte o molibdênio, principalmente quando o máximo de resistência e tenacidade é exigida com a melhor usinabilidade. Como regra, 2,0% de níquel para 1,0% a 1,25% de molibdênio. A relação de um por um, é a mais usada para secções grandes.

Um ferro assim ligado, terá a mesma tendência de coquilhamento do aquêle ferro básico onde foram adicionadas as ligas. E os fundidos terão melhor usinabilidade do que aquêles de ferro-molibdênio, sem nenhuma prática especial de operação,

O refinamento do grão, o endurecimento da matriz e os efeitos na resistência, de cada elemento de liga, são conservados e estas qualidades são refletidas na estrutura do ferro ligado.

*Níquel com cobre* — A combinação de níquel com cobre é usada em ferros fundidos para o fim que estamos tratando; geralmente, em combinação complementativa na proporção de um por um, quando em peças que não serão tratadas termicamente.

*Molibdênio* — O molibdênio é um moderado formador de cementita e não age nunca como grafitizante. As melhores características de um ferro fundido são conseguidas com a adição de ferro-molibdênio, sem nenhuma prática especial de operação, quer nos fornos, quer nas cargas.

*Vanádio* — Sendo um dos mais fortes formadores de cementitas, serve primeiramente para estabilizar a cementita e restringir a formação de grafita. Em seguida, reage com o oxigênio ou nitrogênio ou seus compostos, se êles não foram ainda eliminados por outros meios.

Do mesmo modo, como acontece com os aços, êle age no sentido de manter a matriz do ferro fundido em estado sorbitico.

Diminui o tamanho do grão da matriz e a intensidade da formação de dendritas e a possibilidade de perder dureza em

altas temperaturas, seja em ferro cinzento ou coquilhado. Isto, conseqüentemente, traduz melhores propriedades mecânicas.

Alguns observadores têm verificado que adições de vanádio de 0,5% a 0,15%, quando feitas a ferros com pequena percentagem de liga, particularmente molibdênio e níquel, dão, como conseqüência, redução de dureza e a eliminação da estrutura acicular em favor de perlita lamelar.

Uma das mais destacadas influências do vanádio no ferro fundido é sobre a uniformidade do tamanho da grafita e sua distribuição; sendo menores as lamelas de grafita do que naqueles ferros onde não se adicionou vanádio.

Ainda outra importante característica do vanádio é evitar a formação de grafita circundada por áreas maciças de ferrita; nota-se, também, com a adição de vanádio, em peças de secções grandes, ausência completa de ferrita maciça, seja na superfície ou próximo à superfície destas peças.

Em ferro onde haja vanádio, com níquel ou cobre não há formação de dendritas macroscópicas.

*Fósforo* — É um dos cinco principais elementos no ferro fundido. De um modo geral, em sua percentagem comum, não é considerado elemento de liga.

Em peças, como blocos de motor, existem restrições rígidas quanto ao seu máximo. Em outros, como certos tipos de camisas, o fósforo é adicionado propositadamente para atender certas características. Existem especificações européias e americanas para a produção de camisas. Aquelas com teor de fósforo mais baixo (entre 0,60% e 0,90%), e estas entre 1,00% e 1,50%. É interessante notar que estas peças são fundidas com o elemento fósforo em valor elevado, assim como também o manganês, numa estrutura com grafita tipo A, predominante.

O aumento do teor de fósforo produz uma forte rede de esteadita, que concorre para aumentar a resistência ao desgaste e engripamento. O aumento do teor de manganês favorece a formação de uma matriz de perlita fina e sorbítica, eliminando praticamente a presença de ferrita livre. Estes fundidos, assim, com maior percentagem destes dos elementos, têm uma dureza mais alta que aqueles perlíticos normais. Têm, porém, regular usinabilidade.

É notória a melhor performance destas peças em relação ao desgaste e engripamento do que aquelas feitas com ferro fun-

dido perlítico normal e sem necessidade de tratamento térmico, para se conseguir uma estrutura martensítica.

Com esta composição não fica excluída a possibilidade de tratamento térmico para as referidas resistências elevadas.

Um particular digno de menção é o controle que se faz das características físicas e mecânicas dos anéis de pistões, observando a malha de esteadita formada, graças à presença do fósforo na percentagem em torno de 0,30%. A micrografia da figura 1 revela a malha característica do fosfeto.

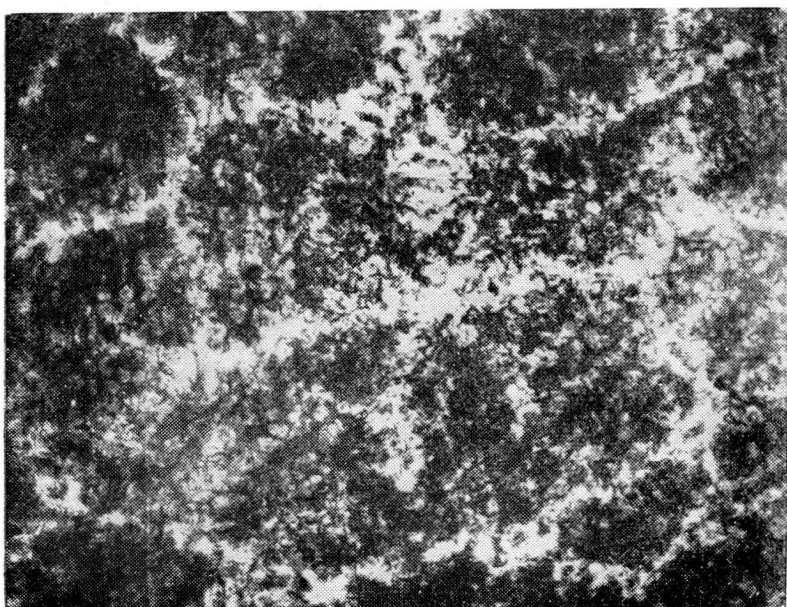


Fig. 1 — Malha característica da esteadita em ferro fundido cinzento, devida à segregação durante o esfriamento. «Principles of Metal Casting», página 440.

*Silício* — Nos ferros fundidos, que podem ser considerados como liga de ferro e silício com alta percentagem de carbono, o silício age decompondo o carboneto de ferro, dando, em consequência, carbono livre e grafita. Esta grafita, depositada como resultado da grafitização do silício, destrói a continuidade da

liga ferro-silício, dando, como conseqüência, valores menores de resistência do que aquêles de ferros similares com carbono mais baixo.

A velocidade de grafitização e a quantidade de grafita produzida dependem sobretudo da percentagem do carbono e silício, temperatura e tempo à temperatura de transformação. A velocidade de esfriamento do fundido, que por sua vez é afetado pela secção da peça, determina a grafitização.

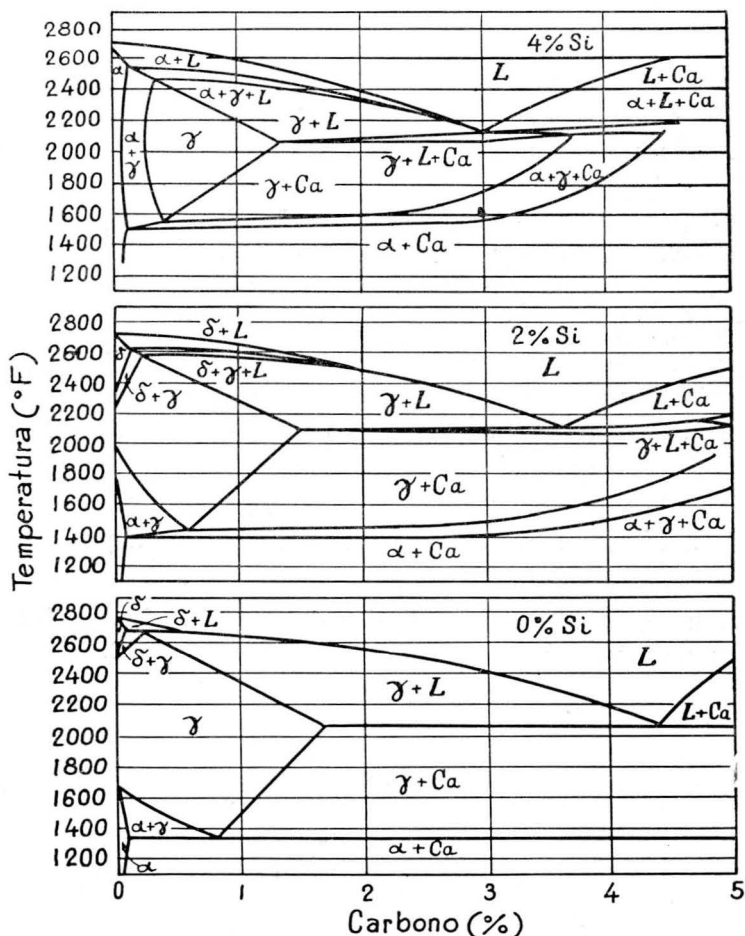


Fig. 2 — Efeito da percentagem do silício no diagrama ferro-carbono, segundo Gueiner Marsh & Stanghton em «The fundamentals of iron and steel castings», página 36.

O efeito grafitizante do silício pode ser retardado ou acelerado, dependendo da natureza dos outros elementos adicionados, sejam do tipo formadores de carbonetos ou sejam do tipo grafitizante.

A figura 2 mostra a influência da percentagem de silício na liga ferro-carbono. O aumento desta percentagem desloca o ponto eutético da liga e também o eutetóide para a esquerda. Em peças, como anéis de pistões, uma maior ou menor variação na percentagem deste elemento, produz modificações enormes no módulo de elasticidade e ruptura, sendo em muitos casos, causa de rejeição das peças.

*Manganês* — O manganês não é considerado elemento de liga a não ser em percentagens superiores a 1,00%, pois, em sua percentagem normal de 0,40% a 1,00%, não tem influência sensível nas propriedades do ferro. Isto porque êle, combinado com o enxôfe, tem o seu efeito mascarado.

O aumento do teor de manganês cria condições de transformação da matriz ferrítica em perlítica e estabiliza a cementita da perlita. Com seu teor em tôrno de 2,00%, a tendência é para formação de matriz martensítica, mesmo com resfriamento a ar.

Com aumento progressivo dos teores de manganês, pode-se ter matrizes sorbíticas, martensíticas e austeníticas. Em percentagens maiores do que 2,50%, é difícil o seu emprêgo na indústria de auto-peças. Nas camisas de alto fósforo a percentagem especificada do manganês é de 1,50% a 2,50%.

A tabela 1 dá um resumo das diversas influências dos elementos de liga. O autor, transcrevendo a tabela 2, dá as diversas percentagens das ligas e o local de suas adições. Acha, no entretanto, que o lugar certo de se adicionar as ligas é no forno.

Existem outros elementos de liga que se adicionam ao ferro fundido, como o titânio, cobalto, bismuto, alumínio e zircônio. Não sendo comum e de importância sensível para a finalidade em aprêço, o autor deixa de mencionar suas influências ou características, por serem encontráveis em compêndios especializados.

TABELA 1

Efeitos na estrutura de um ferro fundido por adições de elementos de liga, segundo «Alloy cast iron», página 48

	Porcentagens usadas em fººº perl	Coquilhamento	Efeitos sobre			
			os carbonetos (alta temp)	a grafite	o carbono comb. da perl	a matriz
<b>ELEMENTOS COQUILHANTES</b>						
<b>Cromo</b>	0.15-1.25	Aumenta	Est. fortemente	Refina moderadamente	Aumenta	Refina a perlita e endurece
<b>Vanadio</b>	0.15-0.50	Aumenta	Est. fortemente	Refina	Aumenta	Refina a perlita e endurece
<b>ELEMENTOS MOD. COQ.</b>						
<b>Manganês</b>	0.30-1.25	Aumenta moderadamente	Estabilisa	Refina moderadamente	Aumenta	Refina a perlita e endurece
<b>Molibdenio</b>	0.15-1.00	Aumenta moderadamente	Neutro	Refina fortemente	Aumenta moderadamente	Refina a perlita e aumenta a resist.
<b>ELEMENTOS LIMITADORES DO COQUILHAMENTO</b>						
<b>Carbono</b>		Impede fortemente	Diminui a estabilidade	Engrossa	Decresce fortemente	Produz ferrita e amolece
<b>Silício</b>		Impede fortemente	Diminui a estabilidade	Engrossa	Decresce fortemente	Produz ferrita e amolece
<b>Cobre</b>	0.50-3.50	Impede	Diminui fracamente	Refina moderadamente	Decresce moderadamente	Refina a perlita e endurece
<b>Niquel</b>	0.10-3.00	Impede	Diminui fracamente	Refina moderadamente	Decresce moderadamente e estabilisa no eutetóide	Refina a perlita e endurece

TABELA 2

Elementos de liga para adições em ferro fundido; ver «Alloy cast iron», página 224.

	Níquel F em bol.	Cromo esp para Fun.	Fe-Si	Fe-Mn	Fe-Mo (Mo 58-63)	Fe-V (V 35-40)	Cromo-X	Sil X
Carbono %	0.20-0.30	7.00 max.	.....	6.0-7.0	0.10-1.50	2.0-3.5	4.5-7.0	.....
Silício %	5.00-6.00	7.0-10.0	79.0-89.0	Men. de 1.	0.50-1.50	10.0-12.0	.....	50.0 ap.
Manganês %	.....	0.2-0.3	.....	78.0-82.0	Nada	Nada	.....	.....
Níquel %	Media 92.0	.....	.....	.....	Nada	Nada	.....	.....
Cromo %	.....	60.0-66.0	.....	.....	Nada	Nada	45.0	.....
Fosforo %	.....	0.05 max.	.....	Men. 0.25	0.05 max.	0.05 max.	.....	.....
Enxofre %	0.025	0.12 max.	.....	.....	0.05 max	0.05 max	.....	.....
Ferro %	1.00-2.00	Dif.	10.0-20.0	Dif.	Dif.	Dif.	30.0 ap.	40.0 ap.
Tamanho	6 mm dia. max.	Malha 20	Gran.	Gran.	Malha 20	Malha 8-20	Briquete ou gran.	Briquete ou gran.
Metodo de adição	Forno ou panela	Panela	Forno ou panela	Forno ou panela	Forno ou panela	Forno ou panela	Forno ou panela	Forno ou panela
Temperatura de fusão ou solução	1259° C	1259° C	1176° C	1259° C	1486° C	1486° C	.....	.....



TABELA 3

Aplicações específicas de ferros fundidos com ligas. Tabela transcrita de «Alloy Cast Iron Handbook», páginas 240 a 252

PEÇAS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA EM %											Sec - ção peça mm	Peso médio kgs	Dure- za Bri- nell	Res. tra- ção kgs/ cm <sup>2</sup>	Transv.		OBSERVAÇÕES
	Ct	Cc	Cg	Si	S max	P max	Mn	Ni	Cr	Mo	Outro					Car- ga kgs	Def. mm	
Anéis para motores diesel e a gasolina	3,6 3,7	,45 ,55	3,0 3,3	2,6 2,8	,06 ,08	,30 ,40	,60 ,80		,15 ,25	,15 ,25		3,2 4,8	0,05 0,11	4 40 45	15,4 13,3			Usada para se obter melhor resistência do que aquela obtida com metal sem liga. Tem boa usinabilidade. + Dureza Rd.
Anéis para motores diesel, tanques e a- vios.	3,7 3,8	,65 ,75	3,0 3,1	2,7 2,9	,10	,40 ,50	,60 ,70	,45 ,55	,07 ,12	,45 ,55	Cu ,80	3,2 7,9	0,05 0,11	102 103	20,5 23,5			Usada para manter tensão em anéis submetidos a condições severas de calor e desgaste. + Dureza Rd.
Bloco de motor a gaso- lina, para automove- is.	3,2 3,4	,60 ,80	2,6 2,8	1,8 2,0	,12 ,15	,16 ,20	,70 ,90		,15 ,20	,15 ,20		4,8 50,8	127 231	212 231	26,5 28,8	2100 2280	3,7 4,2	Usada para se obter dureza alta nos cilindros boa usinabilidade; alta resistência sem tendência a trincas.
Bloco de motor a gaso- lina para caminhões e ônibus-tamanho grande.	3,1 3,4	,50 ,70		2,25 2,45	,10	,20	,60 ,80	,10 ,30	,20 ,40	,20 ,40		6,4 19,0	91 97	163 207	22,4 33,5	1230 1580	6,8 9,7	Usada para boa usinabilidade e resistência.
Bloco de motor para caminhões e ônibus grandes, com válvula na cabeça.	3,1 3,4	,50 ,70	2,6 2,8	2,25 2,45	,08	,16	,60 ,80	,10 ,30	,20 ,40	,20 ,40		4,8 19,0	90 100	163 207	23,0 31,5	1260 1500	7,4 8,8	Usada para alta resistência; boa fundição e excelente usinabilidade. Performance em serviço excelente. Nestes blocos usam-se camisas.
Cabeçote para motores diesel.	3,3 3,4	,60 ,70		2,0 2,2	,10	,15 ,20	,70 ,80		,35 ,50	,50 ,60		16,0 38,1	205 230	210	24,5 26,0	1140 1230	6,4 7,6	Usada para resistir choque e alta temperatura e satisfatória em uso durante três anos.
Cabeçote para motores a gasolina para caminhões médios e grandes.	3,0 3,15	,65 ,75		2,05 2,2	,08	,15	,60 ,75	,25 1,00	,20 ,60	,50 ,60	Cu ,40	6,3 19,0	41 48	223 243	34,0 38,0	1280 1510		Usada como liga de alta resistência
Camisas para cami- nhões e ônibus.	3,2 3,4	,75 ,90	2,4 2,6	1,9 2,1	,10	,20	,55 ,75	1,30 2,20				9,5 11,0	6,4 8,2	480 520	26,0 29,5	1080 1260	5,2 7,6	Usada com ótima característica de temperabilidade. Vida média entre retificações acrescidas de 2,5 vezes comparada a do bloco, com dureza de 229 a 241. Estas peças dão dureza de 212 a 241, quando fundidas.
Camisas para motores a gasolina para tratores e caminhões.	3,3 3,6			1,9 2,2	,13	,25	,55 ,75		,50 ,70		Cu 1,0 1,5	9,6 16,0	7,3 11,0	217 235	26,0 min.	1040	5,2 7,6	Usada para peças que serão temperadas e que deverão dar durezas de 42 a 46 Rc.
Camisas para motores diesel	2,9 3,3			2,7 3,1	,10	,70 ,90	,60 1,20		,60 ,80					12,0 16,0	245 290			Usada com ótimos resultados em processo de centrifugação.
Disco de fricção para automoveis.	2,9 3,2	,60 ,80	2,4 2,6	2,0 2,3	,08 ,10	,15 ,20	,60 ,70		,15 ,25	,35 ,45	Ti ,05 ,10	12,7 19,0	6,0	223 248	23,0 33,8	1260 1360	8,4 9,5	Usada para dar boa resistência à tração, ao desgaste e boa usinabilidade.
Disco de fricção para caminhões e ônibus.	3,2 3,4	,60 ,70	2,6 2,7	1,9 2,1	,10	,20	,50 ,70	1,15 1,55	,55 ,75			12,7 15,6	3,6 6,8	207 241	26,6 29,4	1140 1310	6,1 8,1	Usada por escolha entre vários ferros testados em serviços. Performance considerada ótima. Estrutura perlítica, com grãos esparsos de cementita.
Eixo comando de válvula.	3,0 3,2	,60 ,70	2,4 2,6	2,0 2,2	,08 ,10	,08 ,10	,70 ,90	,40 ,60	,30 ,60	,40 ,60		25,4 50,8	9,0 16,0	286 311	35,0 42,0	2560 2800		Usada para dar peças resistentes, duras e tenazes. Material superior ao aço SAE 1020 cementado, em testes de fadiga. Resistência à fadiga muito boa.
Tambor de freio para caminhões.	3,2 3,3	,60 ,70		1,8 2,0	,11	,20	,50 ,70	1,2 1,4	,40 ,60			2,4 25,4	18,0 22,0	217 255	33,5 37,0	1500 1650	7,1 7,9	Usada para resistir ao desgaste e à distorção.
Tambor de freio para automoveis.	3,15 3,30	,60 ,70		2,1 2,3	,10	,27 ,33	,60 ,80	,15 ,30	,05 ,10			6,4 12,7	2,5 7,5	180 223	1560 1740	2,8 3,2		Usada para se obter boa performance.
Tubo de admissão	2,75 3,3			2,0 2,25	,12	,20	,65 ,90		,25 max	,50 max		4,8 12,7	24,0	255 max	33,0 35,8	1920 2100		Usada para se obter resistência à tração mais alta do que aquela de ferros sem liga.
Volante	3,3 3,6			1,4 1,8	,10	,17 ,22	1,0 1,25			,50 ,75		12,7 38,0	11,4 28,0	187 223	15,20 1700	2,6 3,0		

-TABELA TRANSCRITA DE "ALLOY CAST  
IRON HANDBOOK -pg. 240 à 252.

#### 4. EFEITOS SÔBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

*Cromo* — Por causa de seu efeito sôbre a estrutura, conforme já se mencionou, mesmo em pequenas quantidades, o cromo aumenta a resistência, a dureza, a altura de coquilhamento, resistência ao calor e ao desgaste com perda de usinabilidade.

A percentagem comum varia de 0,15% a 0,90%; às vêzes, é usado só e comumente com os outros elementos. A adição de cromo aumenta o limite de resistência e cisalhamento até que a percentagem de carbono combinado atinja a 0,70%.

A quantidade de cromo que produz esta percentagem de carbono combinado varia com a composição do metal básico; em um ferro de alto silício e alto carbono necessita-se maior adição de cromo. Nos ferros comuns, com cêrca de 0,50% de cromo, conseguem-se valores maiores de resistências, graças à substituição de ferrita pela perlita e redistribuição da grafita.

A dureza cresce diretamente com aumentos do teor de cromo, primeiro pelo acréscimo do teor de carbono combinado e segundo pela formação de carbonetos livres, dependendo, todavia, de ferro básico e da secção do fundido.

Em metal para peças com dureza Brinell entre 145 e 165, cada 0,10% de cromo adicionado corresponderá a um acréscimo de dureza de 8 a 10 pontos. Acontece, entretanto, que com metal para peças com 200 Brinell, o efeito da adição de cromo já não é tão marcante. Acima da percentagem máxima permisivél pelos teores de carbono e silício, qualquer adição de cromo provoca a formação de carbonetos livres, que são muito duros.

Peças de secção grande exigem maiores adições de cromo, pois elas, em face da menor velocidade de esfriamento, têm tendências a dar porosidade e grafita bem grosseira.

Os resultados da adição de cromo, em relação à deflexão, são contraditórios. Em certos casos há ligeiro acréscimo com 0,25% de cromo. Em outros, não há aumento. E, finalmente, constatou-se decréscimo de deflexão com adições de cromo acima de 0,50%.

A resistência ao impacto não foi ainda determinada definitivamente.

Um dos fenômenos interessantes a considerar é o da usinabilidade. Considera-se a dureza Brinell como o índice indireto de usinabilidade, pois ela, prôpriamente, não tem uma medida.

Sabe-se, no entretanto que, em função da experiência do cliente, em relação às características de um determinado fundido, pode-se ter os índices de dureza como indicativos. Há peças que têm boa usinabilidade em tórno de 180, outras de 240 e outras de 280 Brinell. Dois fatores são de máxima importân-

cia, em relação à usinagem: 1) composição do ferro básico; 2) secção do ferro fundido.

A resistência ao desgaste é aumentada com o cromo, pois a percentagem de carbono combinado é maior, bem como a dureza. As percentagens usuais variam de 0,20% a 0,70%, com ou sem outros elementos de liga, de acordo com as características exigidas, de resistência e usinabilidade. As peças de auto-veículos sujeitas ao desgaste têm sempre percentagens apropriadas de cromo e/ou outros elementos de liga.

A adição de cromo é também benéfica à resistência ao calor, por formação de carbonetos estáveis; com a sua presença, estes não se decompõem quando submetidos a temperaturas altas. Retarda ou evita o crescimento da peça à temperatura alta, como também auxilia na retenção da resistência. A resistência ao calor é proporcional à percentagem do cromo na peça.

Na percentagem de 0,60% evita-se a distorção e o crescimento da peça. A resistência à corrosão é melhorada com a adição, mesmo em pequenas percentagens, de cromo. Uma proporção de 0,50%, com percentagem adequada de cobre, é usada para evitar corrosão.

Nas percentagens que estamos considerando, o efeito do cromo na fluidez do metal não é sensível; porém, acima de 1,00%, diminui a fluidez. Do mesmo modo, não influi, de maneira apreciável, na contração.

Finalmente, o elemento cromo influi na altura do coquilhamento, dependendo naturalmente do ferro básico e da secção da peça.

*Cobre* — As propriedades mecânicas, como resistência à tração, ao cisalhamento e dureza, aumentam linearmente com a percentagem de cobre usado; os resultados são melhores, para o ferro de carbono mais baixo. A tenacidade também melhora com o cobre. Com a adição de cobre e sua solução na ferrita, aumenta-se a resistência da matriz perlítica, dando, como consequência, maior resistência ao fundido.

Este aumento de resistência é ainda mais sensível quando se inocula o cobre na panela. Sendo ele um agente grafitizante, age neutralizando as possíveis formações de pontos de cementita. É interessante notar que o cobre age como elemento de endurecimento e como elemento de formação de matriz mais mole, dependendo do ferro básico.

Se o metal básico tem a tendência ao coquilhamento e à formação de pontos de cementita, a adição do cobre age no sentido de diminuir a dureza. Entretanto, em metal básico normal, a adição do cobre aumenta a dureza.

*Cobre e outros elementos de liga* — A sua ação é mais acentuada quando usada com os agentes formadores de carbonetos. Existem as seguintes combinações principais de ligas: cobre-cromo; cobre-cromo-molibdênio; cobre-molibdênio; cobremanganês e cobre-vanádio.

Com o intuito de se obter a máxima dureza e resistência, sem sacrifício da usinabilidade e tenacidade, é importante que haja uma perfeita proporção entre o cobre e os elementos estabilizadores. A proporção ótima é de 3 a 4 partes de cobre para uma parte de cromo, se o teor de carbono fôr superior a 3,00% e de 4 a 6 partes de cobre para uma de cromo, se o carbono fôr menor do que 3,00%.

Manganês e molibdênio são igualmente proporcionais ao cobre, enquanto que 10 partes de cobre são necessárias para 1 de molibdênio.

Com o intuito de aumentar a resistência ao desgaste, deve-se adicionar cobre; em painéis de freio, onde há deslizamento por fricção, é capital o seu uso, pois melhora as propriedades de anti-fricção e resistência ao choque.

A resistência ao calor é melhorada com a adição de cobre. É resistente a dar escamas ou a oxidação em atmosfera redutora, em alta temperatura e em combinação com o cromo.

O cobre é o principal elemento adicionável para se combater a corrosão. A resistência em atmosfera normal ou industrial é acentuadamente melhorada pela adição de cobre, com o máximo de ganho, na gama de 0,25% a 1,0%.

A adição de cobre ao metal se faz sem nenhuma dificuldade ou perda por oxidação. A percentagem a adicionar é limitada pela solubilidade do cobre no metal líquido, que tem o seu máximo em 3,75%, de acôrdo com os teores de carbono e silício. Pode-se aumentar esta percentagem se houver adição de níquel, por exemplo.

A fluidez do metal é aumentada e os característicos de fundição são melhorados com a adição do cobre.

*Manganês* — A adição de manganês concorre para aumentar a resistência, a dureza, o coquilhamento, a resistência ao desgaste e diminuir a usinabilidade — quando acima de 1,25% — podendo, no entanto, melhorar a usinabilidade entre 0,40% e 1,00%.

*Níquel* — As adições usuais de níquel variam de 0,25% a 5,00%. E, se não houver adições para compensar o seu efeito grafitizante, não há modificação sensível na resistência nas percentagens até 1,50%. Acima dêste valor, há um acréscimo ligeiro na resistência, assim como na dureza. Acontece no en-

tanto que, por correção de composição, especialmente na do silício, é possível aumentar a resistência de ferro fundido de 10% até 50% com adições de níquel na faixa citada.

A diminuição da percentagem de silício em ferros comuns, aumenta a resistência; no entretanto, a diferença entre secção fina e grossa fica mais sensível e com piores resultados, pois as secções finas tornam-se muito duras à usinagem.

Se, porém, houver diminuição da percentagem de silício com adição de níquel, conseguem-se maiores resistências, sem o perigo de pontas duras ou brancas.

O níquel entra em solução sólida na ferrita (ou perlita) aumentando a dureza da matriz progressivamente. Melhora a tenacidade do ferro, assim como influencia as características de expansão.

Peças em que se adicionou níquel, mesmo mais duras, mais resistentes e de melhor estrutura, têm mais usinabilidade do que peças de ferro fundido comuns, ou ainda mais usinabilidade com iguais características. Uma das mais importantes do níquel é aquela que permite, para uma percentagem adequada de silício, obter peças isentas de porosidade ou chupagens, principalmente com peças com secções acentuadamente diferentes. Pois, a ocorrência destes defeitos deve-se ao alto teor de silício.

Com percentagem de silício entre 1,00% a 1,50%, a adição de níquel concorre para evitar pontos duros e isto, indiretamente, concorre para reduzir a porosidade.

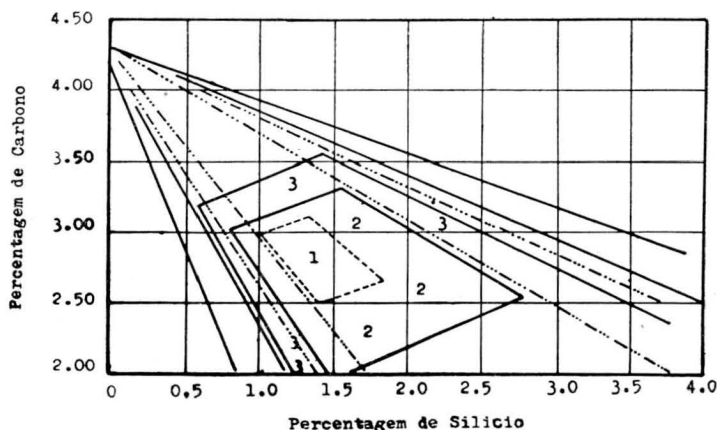


Fig. 3 — Diagrama constitucional e de resistência de um ferro fundido com 2,0% de níquel. «Alloy cast iron», página 59.

A figura 3 representa um diagrama constitucional e de resistência de um ferro fundido com 2% de níquel. As linhas pontilhadas indicam o diagrama original de Maurer; as linhas cheias a modificação devida à adição desta percentagem do níquel. A sua observação revela-nos que a adição de níquel abre mais a zona do ferro perlítico, querendo isto dizer que os ferros perlíticos podem ser produzidos com mais segurança e facilidade quando recebem adições de níquel. Esta característica deve ser aproveitada quando rigorosa fôr a especificação, limitando a percentagem de ferrita livre.

*Molibdênio* — O seu emprêgo, tanto com outros elementos de liga como só, é mais eficaz para aumentar a resistência. Este fenômeno é explicado, primeiro, por efeito direto na solução sólida e segundo, melhorando a distribuição da grafita. Conforme o ferro básico, pode-se aumentar até 50% de valor da resistência, por adição de molibdênio.

O módulo de elasticidade é aumentado com molibdênio, pois êle é proporcional à resistência à tração.

O aumento da dureza tem-se como resultado direto do efeito da solução sólida e do aumento carbono eutetóide do que da presença de carbonetos livres.

São de características recíprocas o cisalhamento e a deflexão, pois o aumento de um destes valores só se obtém com a diminuição do outro. No entretanto, com adição de molibdênio, aumenta-se o cisalhamento, sem perda da deflexão. É freqüente o aumento destes dois valores quando se adiciona o molibdênio. Este efeito do molibdênio sôbre o cisalhamento e a deflexão é encontrado, não sômente na mesma base de aumento da resistência, como também na uniformidade da estrutura.

O efeito do molibdênio persiste na presença dos outros elementos de liga, mesmo sendo êles fortes grafitizantes ou formadores de carbonetos.

Não existe evidência de que o molibdênio aumente ou diminua a relação de compressão à resistência à tração, que é uma característica de várias classes de ferros.

Relacionada diretamente com o acréscimo do cisalhamento e à deflexão, a resistência do impacto é consideravelmente aumentada por adição de molibdênio. A fadiga é melhorada de uma maneira evidente com êste elemento. E esta é a razão de seu emprêgo em virabrequins e em eixo de comando de válvulas.

A elevada temperatura, como nos aços, tem um pronunciado efeito mantendo a resistência. Anéis, como camisas especiais, são feitos com a adição de molibdênio. O molibdênio, com percentagens até 1%, não modifica o coeficiente de expansão, abaixo da temperatura crítica.

A melhor usinabilidade, por adição de molibdênio, deve-se à formação de uma estrutura uniforme e também porque êle evita a formação de carbonetos. Portanto, êle não melhora a usinabilidade por grafitização dos constituintes, como o silício.

Ao contrário do que se considera normalmente (que a usinabilidade é proporcional à dureza), os ferros com molibdênio são produzidos comumente com características comparáveis aos ferros fundidos sem liga, com 50 pontos de dureza Brinell mais baixa.

A estabilidade da fase dos carbonetos nos ferros com molibdênio é ligeiramente maior do que aquela dos ferros comuns; favorece, assim, a resistência ao calor, retardando o crescimento. Relativamente à resistência à corrosão, somente com outros elementos de liga deve-se considerar a influência do molibdênio.

Sabe-se que adições de aço promovem a uniformidade de propriedades em peças de secção grande. O molibdênio é o mais forte elemento de profundidade de dureza e sua capacidade é suplementada por uma boa prática de forno, para se obter propriedades uniformes em secções grossas.

A experiência de fundição tem demonstrado que a contração total dos ferros com molibdênio é menor do que a dos ferros sem liga. Esta característica deve ser aproveitada para peças que trincam quando fundidas com ferros simples.

As peças que se destinam à têmpera tem melhoradas, com molibdênio, as seguintes características:

- 1) Aumento de profundidade;
- 2) Isenção de trincas e distorções;
- 3) Ligeira estabilidade dos carbonetos.

No tratamento térmico dos ferros fundidos, o molibdênio é vantajoso quando um meio de têmpera brando produz resultados satisfatórios, assim como no aço. Êste efeito é suficientemente forte, de modo a se obter o endurecimento ao ar.

O fato de haver dificuldade de trincas deve-se à inércia da transformação crítica na matriz e êste efeito reduz o perigo de trincas por têmpera. Porque o ferro com molibdênio pode ser revenido em temperaturas mais altas do que os ferros comuns, sem perda da resistência e dureza, eliminando a tendência a trincas, em uso, das peças fundidas, devido às forças de tratamento térmico.

*Fósforo* — Quantidades pequenas de fósforo não afetam sensivelmente a resistência ao cisalhamento; no entretanto, quantidades grandes podem ser perigosas. Se considerarmos

constantes os outros elementos, a resistência e o cisalhamento do ferro aumentam com o acréscimo de fósforo até 0,40%. De 0,40% a 0,70%, o fósforo não tem marcante influência. Acima de 0,70%, o valor da resistência e do impacto caem, ligeiramente, quando constantes os outros valores. A dureza e a rigidez aumentam um pouco.

A principal finalidade do acréscimo do fósforo é aumentar a resistência ao desgaste. A malha do fosfeto, mais dura na matriz perlítica mais mole, dá a esta dupla estrutura uma favorável característica para mancais. A estrutura mais dura age como se o desgaste tivesse se espalhado na estrutura mais mole e pudesse se ajustar à medida que o desgaste fôsse continuando.

As propriedades (como condutividade térmica, resistência à corrosão, resistência ao calor e, principalmente, crescimento), são ligeiramente melhoradas pela adição de fósforo.

O fosfeto de ferro é um agregado duro; no entanto, em faixas já citadas e na prática comum, um aumento de fósforo reduz tão pouco a usinabilidade, que dificilmente se nota. Como resultado da temperatura de fusão mais baixa, forma-se o eutético de fosfeto. E, em consequência do abaixamento do ponto de fusão do ferro, pela adição de fósforo, a fluidez e as características de vazamento são beneficiadas ainda mais.

Os ferros com fósforo mais alto são mais empregados para peças finas e para aquelas em que o metal precisa "correr" melhor. Isto porque o fósforo, abaixando a temperatura em que os cristais começam a se formar, baixa também a temperatura final de solidificação; o metal com fósforo mais elevado permanece mais fluido em temperatura baixa, permitindo melhor fundição.

É sabido que cada tipo de peça tem uma composição química ideal. O carbono, seguido do silício, é talvez o elemento que mais precisa ser controlado, quando se quer evitar chupagens e porosidade. Ocorre, no entanto, que um aumento de fósforo exige, para se obter peça sã, que o carbono seja abaixado. É verdade que o defeito de uma peça quase sempre não é devido a um só elemento, mas sempre por um mau balanceamento dos componentes da liga, para um determinado fundido.

*Silício* — Combina com o ferro para formar uma solução sólida que aumenta de dureza com o acréscimo de silício. Em ligas de baixo carbono e silício, a ductilidade não é afetada até 2,5% de silício; no entretanto, a 4%, a liga fica quebradiça e sem possibilidade de alongação sem fratura. Nas percentagens usuais, o silício não tem efeito marcante além daqueles considerados.



*Vanádio* — A adição de vanádio aumenta a resistência à tração dos ferros, com resultados mais acentuados em ferros de 3,25% de carbono ou menos. Para um ferro com 3,20% de carbono, um aumento de 3,30 kg/mm<sup>2</sup> (de 24,00 a 27,30 kg/mm<sup>2</sup>) consegue-se com adição de 0,10%. Os resultados melhores da resistência à tração, são conseguidos quando a adição do vanádio é feita em associação a outros elementos de liga e com inoculação na panela.

O vanádio aumenta a dureza, exceto em certos casos, quando adicionado com outros elementos de liga ou com inoculação na panela, ou em ambos os casos. Sabe-se de reduções de dureza de 30 pontos Brinell, para 0,10% de vanádio, acompanhado de 0,75% de molibdênio. Sem este último, aquela mesma percentagem adicionada em ferros comuns (com 3,20% de carbono ou menos) aumenta de 20 a 25 pontos Brinell, mesmo em secções de 152 mm de espessura.

Neste mesmo ferro, o vanádio contrabalança o efeito de abaixamento de dureza pelo níquel, na proporção de 1 daquele para 10 deste, quando empregados simultaneamente. Pois o uso do vanádio, com elementos grafitizantes, dá melhores características e perfeito equilíbrio do que aquele obtido por acertos de carbono e silício em ferros comuns. E isto é mais notado, para pequenas diferenças de dureza, para peças com secções variáveis e com diferentes velocidades de esfriamento.

Estas mesmas modificações de dureza, devido ao vanádio, são observadas em peças tratadas termicamente. Assim, um ferro comum com 3,20%, tem sua dureza acrescida pe 200 a 440 Brinell por têmpera em óleo; este mesmo ferro, com 0,10% de vanádio em tratamento semelhante, passa de 220 a 500 Brinell. E esta diferença é mantida mesmo no revenido a 593°C.

O vanádio no ferro fundido muda o valor da curva obtida no ensaio de tração. Assim, ferros com 0,10% a 0,20% de vanádio, mesmo em peças de 75 mm de diâmetro, dão um acréscimo de 50% no comprimento da curva até o limite de proporcionalidade.

Este efeito de rigidez pelo vanádio persiste em ferros ao vanádio de maneira acentuada, mesmo com adições de elementos grafitizantes.

A usinabilidade do ferro com vanádio não é afetada, apesar da dureza mais alta.

A sua adição em ferros cinzentos ou mesclados influencia muito favoravelmente, aumentando a resistência ao desgaste. Deve-se este fato a seu efeito estabilizando a cémentita, mantendo o estado sorbítico ou a condição de perlita lamelar, e influenciando as propriedades mecânicas geralmente através de sua ação sobre a estrutura dendrítica.

Em vários testes repetidos de aquecimento e esfriamento, na faixa de temperatura superior à de transformação da matriz, mostrou-se que pequena percentagem de vanádio, como 0,10%, reduz o aumento da dimensão linear do ferro comum em cêrca de 50% e decresce a distorção, mesmo em percentagens maiores.

\*

Além da observância dos princípios metalúrgicos e das propriedades dos diversos elementos de liga, conforme acaba de relatar, acha o autor que uma especial atenção deve ser dada à faixa de temperatura de trabalho. Pois, várias dificuldades ou defeitos das peças são devidos a baixa temperatura de vazamento. Como norma, deve um técnico observar o seguinte:

- 1) Não deixar o metal no forno ou panela nenhum tempo a mais do que o necessário para a operação normal. Uma boa prática de adição de ligas, é aquela que é feita com tempo suficiente para atingir a temperatura de vazamento, logo após a completa dissolução dos elementos.
- 2) Os vazamentos devem se processar o mais rapidamente possível, evitando perdas de temperatura e a má operação de temperaturas mais altas, para compensar as demoras.
- 3) Evitar adições para abaixar temperaturas, principalmente de elementos coquilhantes.

## 5. CONCLUSÕES

Pode ser tornado de prática corrente o atendimento das especificações da indústria de auto-veículos, pelas fundições que:

- a) Tenham equipamento especial, principalmente fornos elétricos.
- b) Usam convenientemente a matéria-prima nacional, que é de muito boa qualidade.
- c) Tenham uma prática de operação, aprovada por experiência, incluindo a técnica de adições de ligas e a série de inspeções necessárias para o processo.
- d) Efetuem ensaios químicos, físicos, mecânicos e metalográficos para contrôlê de qualidade.
- e) Tenham contrôlê estatístico dos diversos ensaios.
- f) Tenham uma equipe de engenheiros, técnicos e operários especializados e capazes.

Finalmente, com justa satisfação registramos que já conta o Brasil com uma dezena de fundições em condições de atender qualquer demanda de ferro fundido perlítico com ligas, de ótima qualidade.

BIBLIOGRAFIA

- ALLOY CAST IRON COMITEE — Gray Iron Division, AFA, Alloy Cast Iron, 2nd. edition.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS — Metals Handbook, 1948 edition.
- COLPAERT, HUBERTUS — *Metalografia, macrografia e micrografia dos produtos siderúrgicos comuns*. ABM-Boletim da Associação Brasileira de Metais n.º 40.
- GAGNEBIN, ALBERT P. — *The fundamentals of iron and steel casting* — Copyright 1957. The International Nickel Company Inc.
- HEIN & ROSENTHAL — *Principles of Metal Casting A. F. S.*
- SAUVEUR, ALBERT — *The metallography and heat treatment of iron and steel*.
- SILVA, LUIZ COELHO CORRÊA — *Princípios Básicos de Metalurgia*.
- SILVA, ANTONIO AUGUSTO DA — *Ferro fundido perlítico, para a indústria automobilística*. ABM-Boletim da Associação Brasileira de Metais, n.º 54, vol. 15.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS INC. — 1960 SAE Handbook.
- NICKEL CAST IRON DATA — *Heat Treatment Fundamentals, section 3, n.º 7*. The International Nickel Company Inc.