

FUNDIÇÃO DE PEÇAS DE FERRO FUNDIDO DE ALTO SILÍCIO, COM ELEVADA RESISTÊNCIA À CORROSÃO, PARA INDÚSTRIAS QUÍMICAS ⁽¹⁾

CYRO GUIMARÃES ⁽²⁾
MORIYUKI SUGIYAMA ⁽³⁾

RESUMO

Com a grande experiência no ramo da Divisão de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, os Autores recapitulam as propriedades físicas, mecânicas e de resistência à corrosão dos ferros fundidos de alto silício. Apresentam as condições gerais de obtenção de peças fundidas nesse ferro fundido especial, de difícil manuseio. Trata-se de contribuição muito importante para a montagem e manutenção de máquinas de ácidos e de produtos químicos altamente agressivos.

1. INTRODUÇÃO E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As peças de ferro fundido contendo alto teor de silício (de 14% a 16%) vêm sendo produzidas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas desde há 20 anos, com êxito. Após essa ação pioneira, houve notícias de iniciativas particulares no ramo; certo desinteresse veio das dificuldades existentes nas técnicas de fundição desse ferro especial e pelo baixo rendimento obtido em peças boas.

Ficou portanto o IPT praticamente sozinho nesse campo, enfrentando dificuldades técnicas e arrostando os prejuízos de muitas corridas experimentais.

Assim, com técnica mais amadurecida e dois lustros após a publicação do primeiro trabalho a respeito ³, nos é dado agora recapitular toda a experiência acumulada, pondo-a ao alcance de qualquer firma interessada.

(1) Contribuição Técnica n.º 504. Apresentada ao XVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Belo Horizonte, julho de 1963.

(2) Membro da ABM e Engenheiro Assistente da Seção de Ferros Fundidos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

(3) Sócio Estudante da ABM; do Curso de Metalurgia da EPUSP; Assistente aluno da Seção de Ferros Fundidos do IPT; São Paulo, SP.

Continuamos a produzir as peças especiais que a indústria reclama, mas também estamos levando avante pesquisas, para elucidar problemas dessa fundição especializada e melhorá-la.

Os ferros fundidos de alto silício, extensivamente empregados nas indústrias químicas, representam uma liga de ferro contendo entre 14% e 16% de silício, além de pequenas quantidades de outros elementos, tais como carbono, manganês, fósforo, enxôfre, níquel e molibdênio. Atribui-se sua descoberta, em 1908, ao metalurgista francês Jouve; suas propriedades e processos de fundição foram depois estudados por Rossi, na Itália, e outros.

A Lennox Foundry, de Londres, talvez tenha tido a primazia na fabricação em escala industrial de peças de alto silício; as peças que apareceram em 1912 nos E.E. UU. sob a marca "DURIRON", eram fundidas com gusa provindo de Londres, com 15% de silício. Dessa época em diante, encontramos, sob vários nomes comerciais, inúmeras peças vitais para as indústrias químicas e para as que lidam com agentes fortemente agressivos, fabricadas com êsse ferro fundido especial. A tabela I resume as principais marcas comerciais com as respectivas composições médias; como se vê, os teores dos elementos fundamentais oscilam pouco. Algumas peculiaridades de fabricação são cobertas por patentes.

TABELA I (1)

Ferros fundidos de alto silício; marcas comerciais e composições químicas em %

Marca	Si	Ct	P	S	Mn	Ni	Cu
Hypersilid	14,50	0,65	0,15	0,02	0,05	0,25	0,01
Duriron	14,75	0,85	0,12	0,03	0,66	—	—
Corrosiron	14,60	0,95	0,08	0,04	0,37	—	—
Tantiron	15,00	0,70	0,20	0,05	0,30	—	—
Ironac	15,00	0,80	0,85	0,05	0,40	0,05	0,03
Isil	14,80	0,72	0,90	—	0,31	—	0,03
Thermisilid	15,50	0,55	0,13	0,02	0,57	—	—
Mitillure	15,20	0,60	0,08	—	0,90	—	—

A tabela mostra mais que os ferros fundidos de mais acentuada resistência aos ácidos fortes são os que contêm de 14% a 16% de silício; dentro dessa faixa, êsses ferros apresentam

boas propriedades mecânicas e ótima resistência à corrosão. A adição de alguns outros elementos pode melhorar ainda mais outras propriedades.

2. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

As propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos ao silício podem melhor ser estudadas se as compararmos com as do ferro fundido cinzento e as dos materiais cerâmicos, estes últimos aplicáveis até certos limites nas indústrias químicas. Da tabela II verifica-se as fracas propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos; que para elas, o ferro fundido cinzento supera o de alto silício, mas que, contudo, este é muito resistente às agressões corrosivas, se bem que guardando ainda características mecânicas satisfatórias.

TABELA II (1)

Cotejo das propriedades do ferro silício, do ferro fundido cinzento comum e de materiais cerâmicos para indústrias químicas

Propriedades	Ferro-Silício	Fo. Fo. cinz.º comum	Cerâmica
Pêso (em kg/dm ³)	6,85	7,12	2,18
Densidade em g/cm ³ ..	7,0	7,3	2,2
Ponto de fusão °C	1.250	1.200	1.450
Calor específico	0,130	0,115	0,20
Coefficiente de expansão (× 10 ⁻⁶)	12,0	12,1	4,5
Condutividade térmica (cal/cm/seg.)	0,078	0,110	0,0023
Resistência elétrica (mi- cro ohms/ml)	50	45	—
Dureza Brinell	450	180	—
Resistência à tração (kg/mm ²)	15,75	23,62	1,58
Resistência transversal (kg/mm ²)	28,35	47,25	—
Módulo de elasticidade (E = kg/mm ² × 10 ⁴)	1,19	1,33	—

A densidade (ou o peso específico) das ligas de Fe-Si baixa com a elevação do conteúdo de silício; os ferros silício resistentes aos ácidos são mais leves que os ferros cinzentos. O ponto de fusão desses ferros é cerca de 50°C mais alto que um ferro típico para a mesma finalidade, devido ao teor mais baixo de carbono. Os ferros ao silício possuem uma capacidade de absorver calor maior que os ferros cinzentos, porém, seu calor específico não é mais alto que o dos produtos cerâmicos.

Pela tabela II, vê-se que esses ferros tem um coeficiente de expansão similar ao do ferro comum (cerca de 12×10^{-6}). Apesar de se encontrar vários números para esse valor, o indicado representa o mais exato; foi fundado em estudos do National Bureau of Standards, homologado com estudos prévios feitos pelo National Physical Laboratories.

A expansão dos ferros fundidos ao silício, mantém-se mais ou menos regular em torno de 1.000°C, não havendo aí as anormalidades que são ocasionadas por mudanças de fase no metal. A velocidade de expansão vai aumentando gradualmente com a elevação de temperatura; o coeficiente médio de expansão varia de $12,1 \times 10^{-6}$ (a 20°C) até $16,5 \times 10^{-6}$ (a 700°C), sendo que, em torno de 1.000°C, mantém-se mais ou menos regular devido à já mencionada inexistência de anormalidade causadas pelas mudanças de fase.

Condutividade térmica — A adição de silício ao ferro fundido abaixa sua condutividade térmica, e, em termos de comparação, o ferro fundido resistente à corrosão ácida apresenta uma condutividade de 0,078 cal/cm/seg, enquanto que um ferro fundido cinzento comum apresenta 0,110 cal/cm/seg, em temperaturas variando de 0 a 200°C.

A condutividade elétrica desses ferros fundidos ao silício é também mais baixa que os ferros comuns, em cerca de 10%.

Dureza — Os valores cotados para os ferros de alto silício, mostram a tendência de se apresentarem mais baixos que a dureza intrínseca (real) da liga, devido à micro porosidade comumente presente e oriunda de chupagens e gases internamente retidos. Uma média de dureza típica, de peças comerciais é de 450 DB, porém a dureza Brinell de um lingote, cuidadosamente desgaseificado, fundido a vácuo, em fornos de alta frequência e resfriados lentamente, é de 520 Brinell.

Resistência e módulo de elasticidade — A dureza dos ferros fundidos de alto silício, afeta os resultados de resistência à tração, causando erros devido à dificuldade de assegurar um alinhamento.

mento perfeito nas garras da máquina; a resistência média desses ferros fundidos é da ordem de $15,75 \text{ kg/mm}^2$, sendo de cerca de metade a um terço das atingidas pelos ferros cinzentos comuns. Os ensaios de resistência transversal, podem ser executados em barras de seção circular ou quadrado e dão resultados bem precisos. Um valor médio típico é de $28,35 \text{ kg/mm}^2$. O módulo de elasticidade pode ser medido por observações de carga-deflexão, em barras sob solicitação de carga transversal, dando resultados representativos médios de cerca de $1,19 \text{ kg/mm}^2 \times 10^4$, para um módulo de elasticidade de ferro fundido cinzento, tomado como comparação e feito pelo mesmo método de $1,33 \text{ kg/mm}^2 \times 10^4$.

3. RESISTÊNCIA À CORROSÃO

O grau de resistência à corrosão das ligas ferro-silício varia de acordo com o seu conteúdo de silício; atinge altos valores com porcentagens de silício acima de 13%. Como padrão de referência, ao se comparar a resistência à corrosão desses ferros fundidos¹ tem sido normal aceitar como limite de corrosão tolerável, uma penetração em ácido de $0,10 \text{ mm/ano}$. Se o ataque for maior, o material é considerado impróprio.

1. *Resistência ao ácido sulfúrico* — Com cerca de 14,5% de silício, as ligas ferro-silício têm suficiente resistência à corrosão ao ácido sulfúrico em todas as concentrações e sob todas as temperaturas, até o ponto de ebulição normal da solução ácida. O maior ataque é constatado com soluções à ebulição, contendo de 20-30% de $\text{H}_2 \text{SO}_4$, por peso. O aumento de corrosão, do ferro-silício resistente a ácido, ao ácido concentrado, é nulo até mesmo a 250°C . A frio o efeito do ácido sulfúrico é menor ainda que em temperaturas elevadas. Com todas as soluções de ácido sulfúrico, a proporção inicial de ataque vai se reduzindo consideravelmente e assume um nível baixo e estável depois de um período de várias semanas.

2. *Ácido nítrico* — Com este ácido, a velocidade de ataque não é tão apreciavelmente menor, no tempo, quanto para o ácido sulfúrico. O teor de silício requerido para obter uma liga não afetada pelo HNO_3 deve ser mais alto do que 14%. O maior ataque ocorre com soluções de ácido fraco (v. g. 5%, no ponto de ebulição) e a velocidade de corrosão diminui com soluções de maior concentração, até que é atingido o limite de segurança de $0,1 \text{ mm/ano}$, de penetração, com uma solução concentrada de 50%, por peso. Para uma completa resistência a soluções quentes de ácido diluído, o teor adequado de silício é maior que 16%. Para soluções contendo mais que

50%, as composições normais desses ferros fundidos são satisfatórias. O ácido nítrico, em qualquer concentração, à temperatura normal ambiente, tem ação negligível sobre os ferros normais com 14,5% de silício.

3. *Ácido clorídrico* — A resistência dos ferros-silício, de composição usual, não é tão completa para ácido clorídrico quanto para ácidos sulfúrico e nítrico. O ataque de soluções, em tôdas as concentrações, a frio, é fraca, mas, a temperaturas elevadas, especialmente para soluções entre 20-30%, é rápida. Deve-se elevar substancialmente o teor de silício para cêrca de 17%. Essa elevação corresponde, em efeito, praticamente, à mesma que é obtida pela introdução de 3,5% a 4% de molibdênio em ferros de 14,5% de silício. Esse tipo de ferro ao silício é aplicado em quase tôdas as operações com ácido clorídrico.

4. *Ácido fosfórico* — À temperatura ambiente, o ataque pela imersão desses ferros fundidos em soluções diluídas ou concentradas, é negligível. A temperaturas elevadas (v. g., no ponto de ebulição), o ataque mantém-se baixo, na mesma proporção que um ácido sulfúrico de 20%; sob tais condições (0,1 mm de penetração/ano) os ferros fundidos ao silício, de teor não inferior a 14,5% de silício, podem ser aplicados para ácido fosfórico, em tôdas as concentrações, até 300°C.

4. RESISTÊNCIA AOS ÁCIDOS, SAIS E SUAS MISTURAS DO FERRO FUNDIDO DE ALTO SILÍCIO

É extremamente difícil de se estabelecer uma lista completa, onde as mais variadas condições de corrosão industrial possam ser encontradas, ainda mais devido a que, em muitos casos, os ferros fundidos de alto silício ainda não foram aplicados. Até onde se conhece, as tabelas seguintes de números III a VIII, resumem as mais divulgadas. Nessas tabelas, o grau de ataque é simbolizado por letras, com os seguintes significados próprios:

A = Inatacado (perda por corrosão menor que 0,00001 g/cm.2/hora).

B = Ataque muito leve (perda por corrosão entre 0,00001 — 0,0001 g/cm.2/hora).

C = Algum ataque (perda por corrosão entre 0,0001 — 0,001 g/cm.2/hora).

D = Ataque definido (maior que 0,001/cm.2/hora).

TABELA III (1)

Resistência aos ácidos

Ácido	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Acético	Solução 0,5 %	P.Eb. (*)	A
Acético	Solução 20 %	P.Eb.	A
Acético	Solução 25 %	15°C	A
Acético	Solução 80 %	P.Eb.	A
Acético	Puro 100 %	15°C	A
Acético	Puro 100 %	P.Eb.	A
Acético (Éter)	Puro	P.Eb.	A
Acético (anidrido) ..	Puro	15°C	A
Bórico	Solução 25 %	P.Eb.	A
Cítrico	Solução 10 %	15°C	A
Clorídrico	Solução 5 %	15°C	A
Clorídrico	Solução 5 %	90°C	A
Clorídrico	Solução 35 %	15°C	B
Clorídrico	Solução 35 %	90°C	C
Clorídrico	Solução 35 %	P.Eb.	D
Clorosulfônico	Concentrado	15°C — 70°C	A
Crômico	Solução 5 %	15°C	A
Crômico	Solução 50 %	15°C	A
Crômico	Solução 50 %	P.Eb.	B
Fosfórico	Em tôdas concentr.	15°C — P.Eb.	A
Fluorídrico	Solução 70 %	15°C	D
Gálico	Solução 10 %	P.Eb.	A
Hidrobrômico	Solução 10 %	15°C	A
Hidrobrômico	Densidade 1,45	15°C	B
Hidrobrômico	Densidade 1,45	P.Eb.	D
Nítrico	Sol. acima 50 %	P.Eb.	A
Nítrico	Em tôdas concentr.	15°C	A
Nítrico	Sol. abaixo 50 %	P.Eb.	B
Oxálico	Solução 20 %	15°C e P.Eb.	A
Oleum	+ 20% de SO ₃	80°C — 100°C	C
Picrico	Sol. sat. em álcool	15°C	B
Sulfúrico	Em tôdas concentr.	15°C — P.Eb.	A
Sulfuroso	Solução saturada	15°C	A
Tartárico	Solução 25 %	15°C — P.Eb.	A

* P.Eb. = Ponto de ebulição.

TABELA IV (1)

Resistência à mistura de ácidos

Ácidos misturados	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Acético e butírico	Concentrado	P.Eb.	B
Clorídrico e sulfúrico	10% HCl + 20% H ₂ SO ₄	70°C	A
Nítrico e sulfúrico	Tôdas as misturas	15°C — 120°C	A
Fosfórico e sulfúrico	15% de H ₂ SO ₄	110°C	B

TABELA V (1)

Resistência aos alcalis

Alcali	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Amônio (hidróxido)	Solução saturada	15°C	A
Potássio (hidróxido)	Solução 50%	15°C	A
Potássio (hidróxido)	Solução 50%	130°C	B
Potássio (hidróxido)	Fundido	360°C	D
Sódio (carbonato)	Fundido	900°C	D
Sódio (hidróxido)	Solução 30%	15°C	A
Sódio (hidróxido)	Solução 30%	120°C	B
Sódio (hidróxido)	Fundido	318°C	D

TABELA VI ⁽¹⁾
Resistência aos sais

Sal	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Alumem	Solução saturada	P.Eb.	A
Alumem	Fundido	200°C	A
Alumínio (sulfato)	Solução aquosa em tôdas as concentrações	Até o P.Eb.	A
Amônio (cloreto)	Solução saturada	15°C	A
Amônio (cloreto)	Solução aquosa em tôdas as concentrações	Até o P.Eb.	A
Amônio (nitrato)	Solução saturada	Até o P.Eb.	A
Amônio (nitrato)	Sal puro fundido	Fusão	A
Amônio (sulfato)	Solução saturada	Até o P.Eb.	B
Amônio (persulfato) ..	Puro	P.Eb.	A
Cálcio (cloreto)	Densidade = 1,43	P.Eb.	B
Cálcio (hipoclorito) ...	Solução saturada	15°C	A
Cobre (sulfato)	Solução saturada	15°C — 100°C	A
Cobre (cloreto)	Solução 10%	P.Eb.	C
Cromo (alumem)	Solução saturada	P.Eb.	A
Ferrico (cloreto)	Solução 50%	50°C	D
Ferrico (sulfato)	Solução saturada	15°C	A
Manganês (cloreto) ...	Solução 1%	15°C	A
Manganês (cloreto) ...	Solução saturada	P.Eb.	B
Manganês (sulfato) ...	Solução 5%	15°C	A
Mercúrico (cloreto)	Solução saturada	20°C	A
Potássio (bitartarato) .	Solução saturada	P.Eb.	C
Potássio (clorato)	Solução saturada	P.Eb.	A
Potássio (cloreto)	Solução saturada	P.Eb.	A
Sódio (bisulfato)	Fundido	200°C	A
Sódio (cloreto)	Solução 20%	15°C	A
Sódio (hipoclorito)	Solução saturada	20°C	A
Sódio (sulfato)	Solução 10%	15°C	A
Zinco (cloreto)	Solução 30%	15°C	B
Zinco (cloreto)	Solução 30%	P.Eb.	D
Zinco (sulfato)	Solução 25%	20°C	A

TABELA VII (1)

Resistência a misturas ácido + sal

Reagente	Composição da mistura	Temperatura	Grau de ataque
Ácido nítrico + Bicromato de sódio	H NO ₃ , sol. 20% / volume + Na ₂ Cr ₂ O ₇ ; 50 g/lit	15°C	A
Ácido sulfúrico + Bicromato de sódio	Em tôdas as concentrações	60°C — 90°C	A
Ácido sulfúrico + cloreto de sódio	H ₂ SO ₄ , sol. 5%; Na Cl, sol. 10%	50°C	A
Ácido sulfúrico + sulfato de amônio	H ₂ SO ₄ , sol. 10%; (NH ₄) ₂ SO ₄ , sol. saturada	70°C	A
Ácido sulfúrico + sulfato de cobre	Em tôdas as concentrações	Até 100°C	A
	+ Ca Cl ₂ (5%)	100°C	A
Ácido sulfúrico + sulfato de sódio	Em tôdas as concentrações	Até 100°C	A

TABELA VIII (1)

Resistência a vários reagentes químicos

Reagente	Composição	Temperatura	Grau de ataque
Alumínio, fundido	Alternância de úmido e seco	Até 100°C	A
	Idem	700°C	D
	Condições atmosféricas	Normais	A
Bromo	Vapor úmido	15°C	B
	Líquido, puro	15°C	B
	Líquido, puro	70°C	D
Água de Bromo	Saturada	15°C	A
Cloro, gasoso	Puro	20°C	A
Água de Cloro	Saturada	15°C	A
Peróxido de Hidrogênio	20 volumes	15°C	A
Iôdo	Gasoso	100°C	A
Fenol	Pureza 90%	P.Eb.	A
Água corrente	Aerada	15°C	A
Vapor	—	Até 300°C	A
Vapor + Oxigênio	5% de O ₂	100°C	A
Urina	Variável	15°C	A
Vinagre	Concentr. comercial	15°C	A
Zinco fundido	—	500°C	D

Ilustram-se, ainda, as variações de corrosão, com diagramas de corrosão de ferros fundidos contendo 15% de silício, para ácido sulfúrico (fig. 1); ácido nítrico (fig. 2); ácido clo-

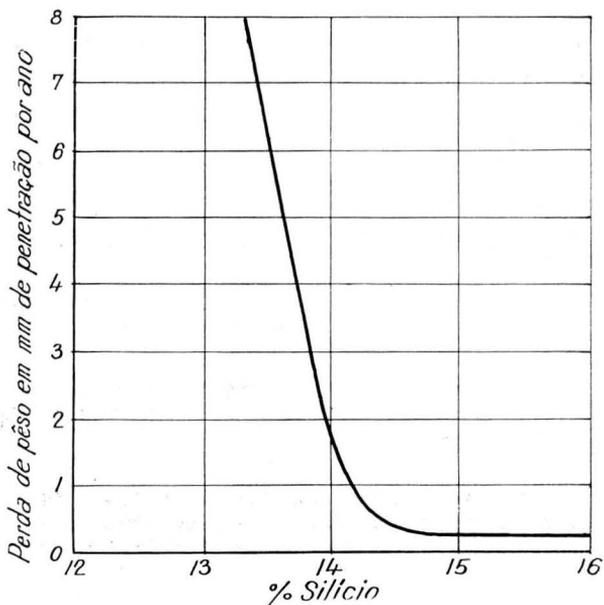


Fig. 1 — Diagrama da corrosão de ferros fundidos de alto silício em ácido sulfúrico a 20%, em ebulição⁴.

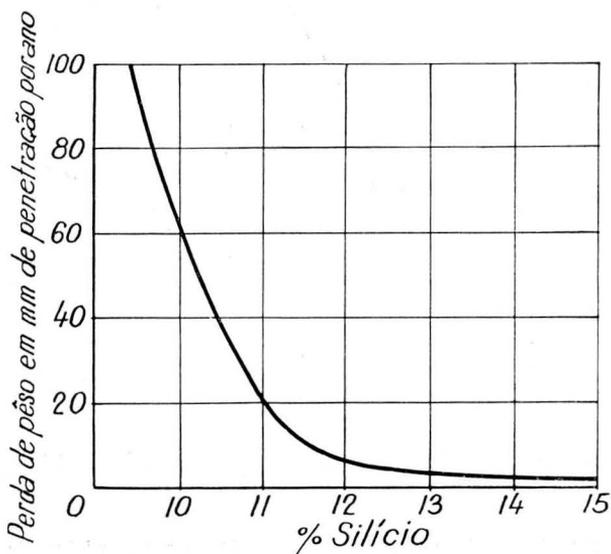


Fig. 2 — Diagrama da corrosão de ferros fundidos de alto silício em ácido nítrico a 70%, em ebulição⁴.

rídrico, a frio e a quente, em várias concentrações (fig. 3); em ácido clorídrico a ebulição (fig. 4) e ácido fosfórico (art. 5).

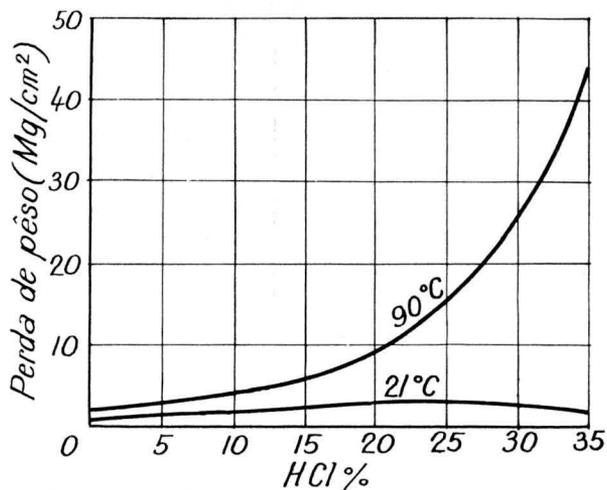


Fig. 3 — Ação do ácido clorídrico, a quente e a frio, com várias concentrações, sobre ferros fundidos de alto silício. Ensaio sob agitação durante 8 horas⁴.

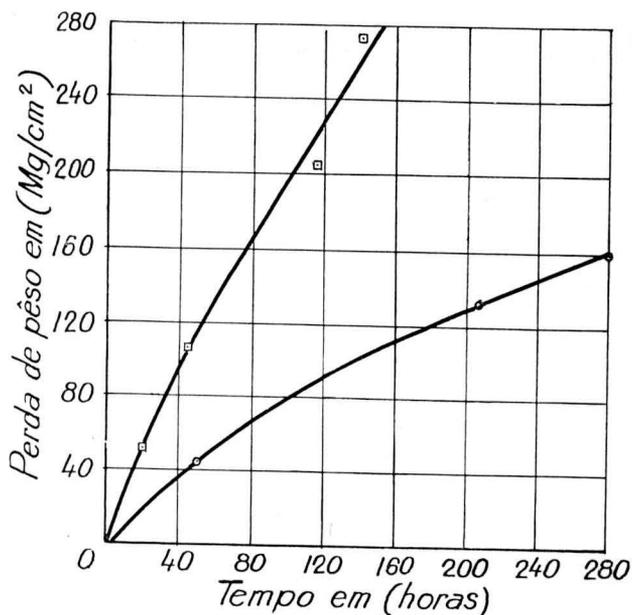


Fig. 4 — Diagrama de corrosão de ferros fundidos de alto silício em ácido clorídrico a 70%, em ebulição:

□ = 15% silício; ○ = 15% Si + 3,5% Mo.

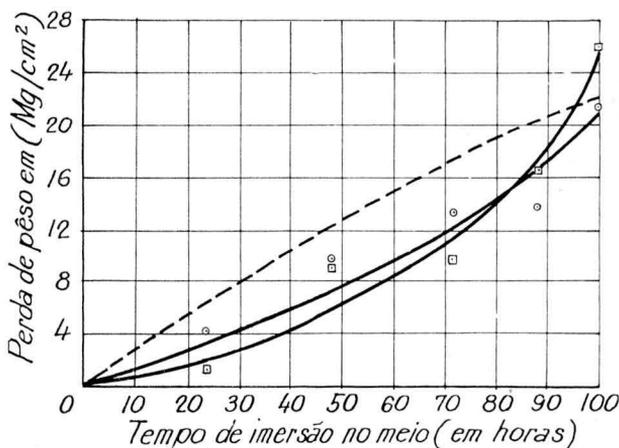


Fig. 5 — Diagrama de corrosão de ferros fundidos de alto silício em ácido fosfórico. Imersão em períodos de até 100 horas:

- = ácido fosfórico concentrado e em ebulição.
- = ácido fosfórico 20% em ebulição.
- = ácido sulfúrico 20% em ebulição.

5. CONDIÇÕES GERAIS DE OBTENÇÃO DE PEÇAS FUNDIDAS

Importância do conteúdo de carbono — Os ferros fundidos de alto silício contêm carbono e, como no caso de ferros cinzentos, o conteúdo de carbono tem marcada influência nas pro-

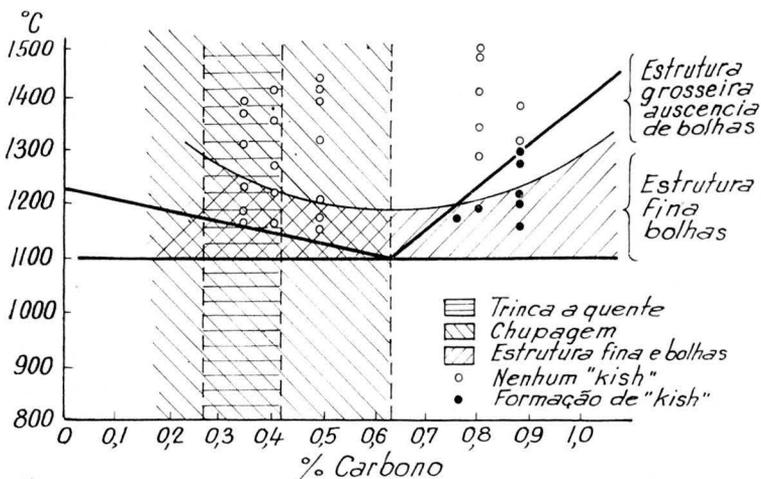


Fig. 6 — Diagrama de equilíbrio dos ferros fundidos de alto silício comerciais; liga contendo 15% Si e 0,65 Mn⁴.

priedades de fundição da liga. A presença de carbono no ferro-silício nos teores usuais, leva a liga ao ponto eutético. Dos resultados experimentais, na fundição, foi estabelecido um diagrama de equilíbrio aproximado, que corresponde a uma secção plana de sistema ternário mais complexo, porém, serve para indicar os resultados práticos de maior importância. A figura 6 apresenta tal diagrama.

Neste diagrama vê-se que as condições de equilíbrio alteram-se, para um ferro contendo 15% de silício e 0,65% de manganês, numa faixa de conteúdo de carbono de 0,3% a 0,9%. A aparência da grafita, no ferro-silício, representa uma boa indicação para se saber se a liga é hipo ou hiper-eutética. As ligas hipo-eutéticas, apresentam uma "liga fina", tipo de estrutura já bem conhecida e enquadrada na classificação ASTM como tipo D e E, tamanhos 5 e 6.

A quantidade de grafita vai aumentando à proporção que se atinge o ponto eutético. Os ferros fundidos hiper-eutéticos contém, em adição à grafita fina, uma certa quantidade de grafita primária ou em flocos tipos ASTM B e C n.ºs 4 e 5. Se uma liga fundida, hiper-eutética, fôr agitada enquanto esfria, separa-se um "kish" (*) e o restante do material apresentar-se-á mais baixo em carbono. Os flocos, de grafita, no ferro agitado, aparecem levemente menores, porém, foi observado que o teor de carbono, não ficou reduzido completamente ao valor eutético.

Com as ligas dêsse conteúdo de silício e manganês, e com carbono entre 0,5-0,6%, obtém-se uma maioria de peças "sãs" e com menor tendência a defeitos como trinca a quente ("hot tear"), etc.

*Manganês*² — Encontra-se nos ferros fundidos de alto silício usuais, em porcentagens que vão de 0,30% a 0,90%, do que não resulta separação de fase. Tem, entretanto, alguma influência na estabilidade de carbonetos e, um alto teor de manganês, produz um aumento gradual da quantidade de carboneto residual na liga fundida, que são porém, decompostos por tratamento térmico (recozimento). O manganês influi, outrossim, para a melhoria das propriedades mecânicas, sendo que o seu valor adequado é o de 0,60%.

Fósforo — Apresenta-se na forma de áreas de fosfetos de ferro, associadas com a fase de carboneto residual (se presente); parece exercer uma influência estabilizadora neste último. A

(*) "Kis" é uma concentração de grafita, que se pode dar não só nesses ferros de alto silício, como em ferros de alto carbono. Resulta num ponto escuro no campo da micro ou da macrografia, segundo o tamanho do "kis". São fenômenos de resfriamento, que redundam numa concentração de carbono.

fase fosfeto, em contraste com a fase carboneto, sobrevive ao tratamento térmico (recozimento), o que será discutido no capítulo reservado ao tratamento térmico. Teores de fósforo até 1,4% não apresentam efeitos adversos sobre um ferro fundido com 15% de silício e 0,6% de carbono, mas desde que tem efeito estabilizador sobre os carbonetos, não se deve tê-lo nessa ordem.

Um valor adequado de fósforo é da ordem de 0,30%. Com teores maiores de 1,4%, os ferros fundidos alto silício, começam a ficar acentuadamente mais quebradiços e apresentam um aumento no grau de microporosidade. A fluidez do metal eleva-se levemente pela adição de fósforo, o que significa que as peças podem ser vazadas em temperatura mais baixa. Um defeito típico e representativo da menor fluidez do metal é apresentado pela figura 7, onde se vê o mau enchimento da peça ("misrun") devido a essa razão. Para corrigi-lo deve-se imediatamente verificar a composição da liga, a temperatura de vazamento, o número e dimensionamento dos canais e até, se necessário, aumentar a secção da peça para fundição.

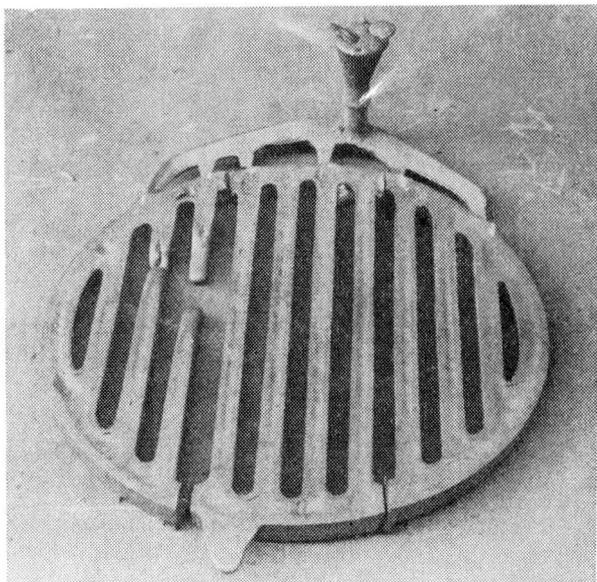


Fig. 7 — Peça de alto silício com defeito de mau enchimento, oriundo da baixa fluidez do metal.

Enxôfre — Cobre — Cromo — São encontrados normalmente como elementos residuais; nas porcentagens apresentadas, não têm influência apreciável nas propriedades dos ferros fundidos de alto silício.

Molibdênio — Níquel — Como já referido (item Resistência à corrosão — em HCl), o molibedênio (cêrca de 3,5%) eleva a resistência à corrosão, bem como melhora as propriedades mecânicas, a frio e quente, notadamente a resistência ao choque, dêstes ferros fundidos. O níquel, na base de 2%, entra como refinador de grana, melhorando portanto as características mecânicas das peças.

6. MODELOS DE PROJETO

Não é sòmente o conhecimento dos característicos físicos e mecânicos da liga que dão ao projeto uma garantia de aplicação plena dos ferros fundidos de alto silício. É, também, necessário de se anotar certos dados empíricos que vão sendo acumulados da prática. São êstes dados relativos, empregados na fundição, que ditam, na maioria, as modificações que serão introduzidas no projeto e relacionadas com os detalhes mais importantes para melhor êxito da fundição.

A alta contração de solidificação do metal (cêrca de 2%) e a sua fragilidade, devem sempre ser consideradas quando se projetam as peças. Deve-se, sempre que possível, evitar peças (como tubos, por exemplo) con grandes flanges em cada extremidade, que servem para reter a contração axial, livre. Outras vêzes, a retenção, de contração se dá por um projeto errado de canais. As figuras 8 e 9 mostram um defeito muito comum, conhecido como trinca a quente ("hot tear"), que é motivado por essa retenção de contração que, geralmente, se processa quando o metal solidifica. O fator de maior importância, causador dêsse defeito que, aliado a essa contração anormal, que é causada pelos moldes, machos e armações, é geralmente o projeto.

Podem ainda influir as tensões residuais que são causadas pela desmoldagem muito antecipada e conseqüente resfriamento rápido ao ar, sem a transferência, na temperatura certa, para o forno de tratamento térmico, como será indicado. Evita-se êsse defeito, por meio de emprêgo duma areia mais fraca, pelo imediato afrouxamento do molde e machos logo após ao vazamento e, como será descrito, pela transferência para o forno de recozimento. Quando, em certas fundições, não fôr possível o tratamento térmico, deve-se pelo menos tomar a precaução do afrouxamento de molde e macho e, quando a peça permite, introduzir-se uma quantidade adequada de carvão vegetal, internamente, deixando-o queimar lentamente, com a caixa semi-aberta, e

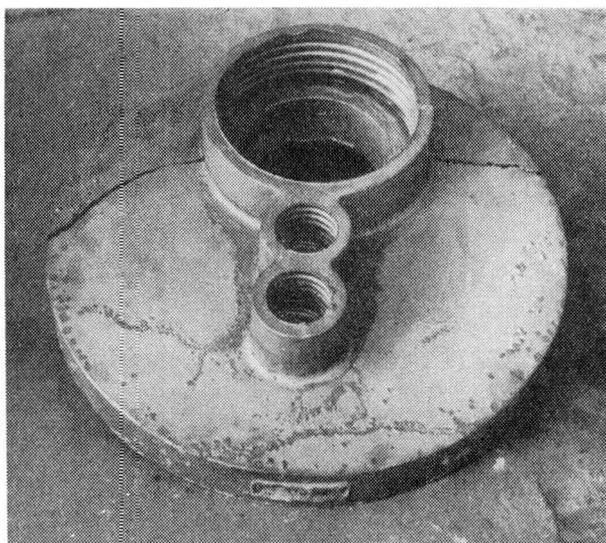


Fig. 8 — As duas orlas da peça, a superior e a inferior, mais rígidas, contiveram a contração da parede mais fina, a qual se trincou, a quente.

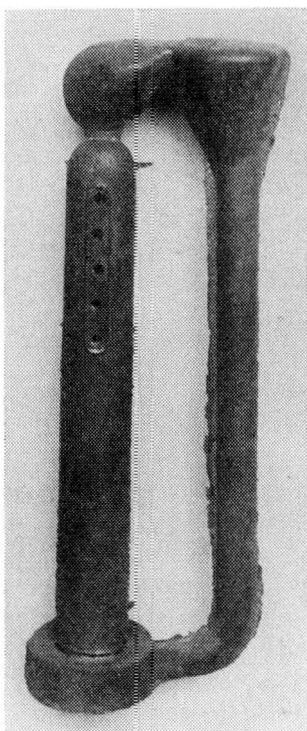


Fig. 9 — Outro exemplo de trinca a quente, causada pela retenção da contração axial livre sob a ação dos canais de alimentação.

para manter uma temperatura de resfriamento lenta o mais possível que tenta substituir o resfriamento no forno.

A fabricação de chapas finas, de grande área, apresenta sérias dificuldades; na prática, o comprimento deve ser de duas a três vezes sua largura, com espessura de cerca de 1/15 a 1/10 da dimensão mais curta da chapa, dentro de certos limites. Ao fundir placas circulares, deve-se introduzir perfurações, em certo número. É preferível, neste caso, fundir a peça em duas metades, se possível.

Com superfícies planas, constitui uma vantagem se o centro da peça puder ser reduzido, em espessura, a 65%, em relação à sua periferia. Os recipientes (como cadinhos, vasilhames, etc.), devem sempre ter rebordos ou nervuras, reforços ou alêtas, em torno da sua extremidade superior, o que dá maior espessura de metal, no aro, de cerca de duas vezes aquela do resto da peça. Os furos para pinos, ou saídas, ou outros com o mesmo propósito, devem ser os mais largos possíveis, devido a tendência dos pequenos machos de areia de se sinterizar quando em contacto com as secções mais grossas do metal quente. Não se pode empregar chapelins como suporte, sendo portanto, de grande valia se o modelista ou projetista prever uma colocação adequada de tubos de saída, furos dos pinos e extremidades abertas, que dão pontos suficientes para suportes dos machos. Um apuro, neste caso, redundaria em substancial barateamento nas peças e reduzem o perigo de perdas, além de tornar desnecessário uma marcação extra no modelo.

As peças de ferros fundidos ao silício devem ser cerca de 25% mais grossas que as normalmente especificadas para ferros cinzentos comuns, em vista da diferença de resistência mecânica. Deve-se evitar variações bruscas de secção; se absolutamente necessárias, deve-se reservar lugar adequado para permitir, ao fundidor, a colocação de resfriadores, coquilhas, etc., quando da moldagem.

7. MOLDAGEM

Devido à susceptibilidade, dos ferros fundidos alto silício, ao hidrogênio, todos os moldes, de certa envergadura, devem ser feitos em areia estufada. Devem-se evitar areias com resistência elevada, a fim de permitir uma rápida quebra na desmoldagem e razoável colapsibilidade durante o vazamento. Em outras palavras: deve-se escolher uma areia que dê o melhor balanceamento entre uma alta colapsibilidade e uma razoável resistência antes da peça ser vazada. Uma areia típica, para êsse propósito, empregada no IPT, é dada na tabela 9, seguinte:

TABELA IX (1)

Areias típicas usada no IPT de São Paulo para moldagem de ferros fundidos alto silício

Componentes	Areia para faceamento (a verde)	Areia para machos	
		A	B
Areia de São Vicente — Módulo 90-100 (g)	1.000	2.000	2.000
Areia usada (g)	1.000	—	—
Argila Jaçanã, pó (g)	100	100	200
Óleo oiticica (g)	—	10	10
Dextrina (g)	—	40	40
Mogul (g)	—	—	—
Água (ml)	100	100	100
<i>Característicos</i>			
Umidade (%)	4,0	4,2	4,8
Permeabilidade (AFS)	50	43	36
R. à compressão (kg/cm ²)	0,50	0,09	0,30
Deformação (%)	4,0	2,6	3,1
Escoabilidade (AFS)	78	86	82
Após estufagem durante 3 h a 110°C e a 220°C, respectivamente.			
Permeabilidade (AFS)	—	70	70
R. à compressão (kg/cm ²)	12,65	8,44	11,25
Dureza (AFS)	—	82	76

Observações:

1. Recomenda-se pintar os moldes com tinta à base de grafita, a fim de protegê-los durante o vazamento. Uma tinta empregada com êxito, no IPT, é: Grafita (95% de carbono, mínimo) = 40 partes em peso; Argila coloidal = 2 partes em peso; Dextrina = 2 partes em peso; Água = 100 partes em peso. O «Navy Research Laboratories» dos EUA, recomenda a seguinte composição: Bentonita = 0,8%; Dextrina = 1,3%; Grafita = 31,1%; Benzoato de sódio = 0,1% e Água = 66,7%. Esta tinta deve apresentar uma Densidade Baumé = 30°C. É aplicada por pincelamento ou «sprayer».
2. A colapsibilidade do macho pode ser aumentada pela adição de 0,5% de serragem.
3. Uma maior permeabilidade pode ser conseguida pela utilização de uma areia base mais grossa (módulo de finura AFS = 60-70).

Os moldes são assentados em estrados metálicos, em bêrço de areia de fundição; o conjunto é levado à estufa para secagem a 250°C, de preferência à noite. Pequenas peças podem, às vêzes, ser fundidas a verde.

A alta contração de solidificação dêesses ferros fundidos, obriga um projeto para os machos que permita uma rápida colapsibilidade, a fim de prevenir tensões na peça, ao solidificar, que produzem, tanto como já referido na composição química, as trincas a quente (“hot tear”).

Para machos retos, axiais, emprega-se barro moldado sôbre uma fundação feita de corda de palha enrolada num cilindro de aço, perfurado em todo seu comprimento e superfície, para ventilação. O macho é moldado até sua forma final, assentando-se-o numa bancada e fazendo-o passar por um gabarito desbastador (por torção). Para cotovelos e outros machos não axiais, usa-se as areias indicadas, moldadas em caixas de machos comum, de madeira. Os machos de barro, são sêcos em estufa a 150°C.

Tubos longos — A fundição de tubos longos, de pequeno e médio diâmetro, apresenta-se sobremaneira dificultosa, devido a necessidade de se evitar os “*chapelins*” que, normalmente, não caldeando com o material, dariam falhas e porosidade. Neste caso, o macho tem de ser suportado nas suas extremidades por marcações de macho muito mais extensas que as empregadas para machos de ferro fundido comum ou mesmo aço. Dependendo do diâmetro, sendo o comprimento excessivo, é preferível se fundir os tubos em várias secções, e depois, juntá-las por meio de solda. Quando se trata de tubos fechados em uma extremidade, se pode, também, fundí-los abertos e, posteriormente, fechá-los por meio de solda. Para peças, em geral, deve-se aplicar resfriadores nos pontos onde o metal é mais fino, tomando como base, a média de espessuras da secção transversal da peça. O emprêgo de canais finos, de distribuição e, principalmente, de ataque (entrada), representa regra geral para a fácil e espontânea separação dos mesmos e dos maçalotes, mesmo no resfriamento do metal. A figura 10, mostra um defeito causado por um canal mal dimensionado que facilitando a saída dos gases do macho, em peça de parede fina, provoca ao ser retirado, um furo como na figura.

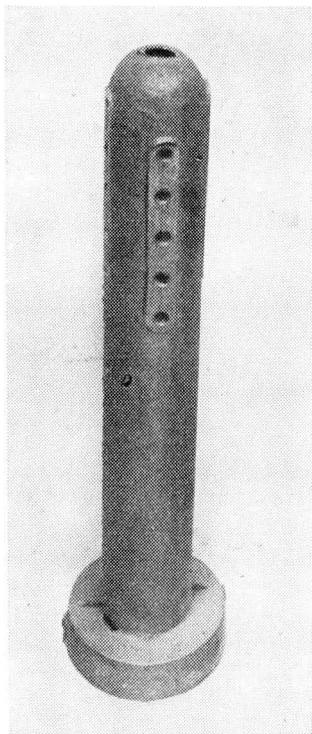


Fig. 10 — Defeito causado pelo dimensionamento defeituoso do canal de alimentação.

S. FUNDIÇÃO

1.ª e 2.ª fusões — Para garantir a homogeneidade do material, evitando um excesso de grafita, de silício, ou de gases retidos, recomenda-se sempre um processo de dupla fusão, ou seja, de se fazer uma lingotagem preliminar da carga, a qual é, posteriormente, refundida, feitas as correções necessárias na composição química, para vazamento no molde³.

Essa técnica, entretanto, devido às condições oxidantes que predominam no forno (forno elétrico), onde se faz a primeira fusão, não dá resultados compensadores, pois, além da descarbonetação, existe um descontrôle no teor de silício, obrigando um acerto, antes da segunda fusão, que resulta muito oneroso.

Tentando melhorar as condições de primeira fusão, conseguiu-se ótimos resultados por meio de controle da atmosfera do forno, mantendo-a redutora, com a adição de óleo combustível. O óleo é gotejado, durante toda a operação, no banho líquido; a sua combustão propicia o ambiente redutor desejado.

A quantidade de óleo empregado, num forno elétrico trifásico, a arco, de 1 tonelada de carga sólida, para uma carga de 600 a 800 quilos, tem sido de 10 litros de óleo/hora.

Nestas condições, o ferro fundido alto silício obtido (cuja composição média calculada foi de $Ct = 0,98$; $Si = 14,3\%$; $Mn = 0,70$ e deu uma composição final (de 1.^a fusão) de $Ct = 0,65$; $Si = 15,3$ e $Mn = 0,80$) mostra uma composição plenamente adequada para o uso imediato, quase dispensando uma segunda fusão. Entretanto, devido à retenção de teores ponderáveis de gases, o material apresenta-se poroso e mesmo com aparência heterogênea e de grana que revela material de baixa qualidade. Já isto não se observa depois da 2.^a fusão, quando a fratura de um lingote mostra homogeneidade, quase completa ausência de bolhas, próprio de material de boa qualidade. Este material, de segunda fusão, apresentou um $Ct = 0,56$; $Si = 15,3$ e $Mn = 0,70\%$, do que se conclui que praticamente não houve alteração em relação com a composição de 1.^a fusão.

Com essa técnica, reafirma-se que praticamente não se teve de fazer adições para correção na composição química, o que evidentemente proporcionou, além da economia das adições, uma melhoria substancial na qualidade do material, apesar de ser levemente onerado o custo por um pequeno gasto de óleo. Os clichês da figura 11 mostram uma secção de lingotes de 1.^a e

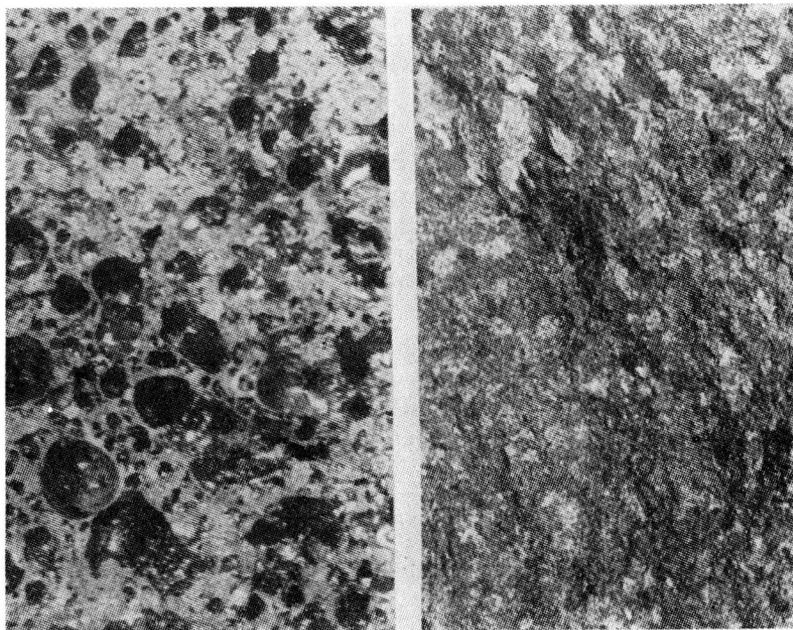


Fig. 11 — O bloco de 1.^a fusão apresenta-se poroso, aparência heterogênea, surgindo material de má qualidade. Na segunda fusão, praticamente com a mesma composição, o bloco aparece homogêneo, sem bolhas. Os Autores sugerem uma técnica para essas fusões.

2.^a fusão. Nota-se que a simples refusão já contribui para a homogeneização do metal.

Importância da temperatura de vazamento — A velocidade de esfriamento, na faixa de solidificação, tem efeito profundo sobre o tamanho de grão de qualquer metal ou liga; influi decisivamente nas suas propriedades mecânicas e físicas. Deduz-se, daí, que a temperatura de fundição tem uma influência importante na velocidade de esfriamento, o que torna obrigatório controlar essa temperatura, dentro de limites próprios, se desejarmos uma uniformidade no tamanho de grão na peça.

Já ficou demonstrado que se empregamos alta temperatura de vazamento, há a tendência da formação de cristais colunares, grandes. De outro lado, uma temperatura muito baixa produz cristais muito finos. Na temperatura intermediária tem-se cristais de grão moderadamente fino, com bons resultados para as peças obtidas. A temperatura adequada, para os ferros fundidos de alto silício, varia entre 1220°C a 1280°C (medida com pirômetro ótico, de filamento, sem correção), sendo que a temperatura mais exata depende do tamanho e secção transversal da peça.

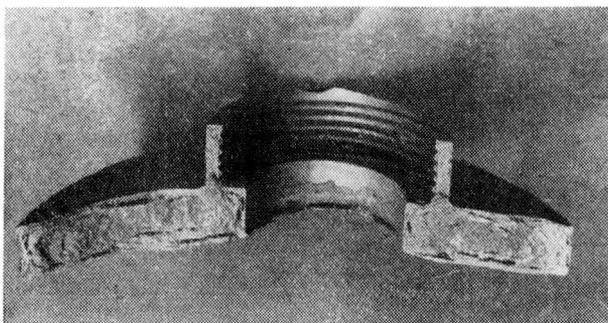


Fig. 12 — Exemplo de contração interna produzida por variação de temperatura e má alimentação do molde. Partes da peça eram destacáveis, em placas.

A figura 12 apresenta um defeito muito comum em peças desse tipo de ferro fundido, proveniente de uma contração desigual, produzida por uma variação de temperatura e de alimentação do metal no molde, que dá ocasião à formação de cristais colunares oriundos de uma rápida solidificação do metal líquido.

Este defeito é mais freqüente em peças mais finas, que são vazadas de temperatura relativamente alta em moldes que apresentam efeito coquilhante (ou que dão resfriamento brusco), e

também quando se usa moldes a verde. Aparecem como uma fratura, através de um plano, associado com a junção de duas ou mais frentes de cristais colunares. O plano referido pode incluir ainda uma cavidade de contração do tipo interdendrítica, devido ao crescimento dos cristais, no ponto de solidificação, que evita o enchimento completo e uniforme do molde. Deve-se corrigir imediatamente a temperatura de vazamento ou a velocidade de vazamento no molde.

Reduz-se a possibilidade de coquilhamento do molde, por meio de seu revestimento adequado (tintas, etc.). Deve-se ainda empregar areia estufada e uma verificação de melhoria do projeto e modelos, no sentido de melhorar as condições de alimentação. Em última providência, examina-se a liga quanto a impurezas que possam estar influenciando para tal defeito.

Importância do conteúdo de gases — Um dos piores problemas, para a produção de peças “sadias”, é o representado pelo conteúdo de gases dissolvidos. Nas ligas de ferro fundido alto silício, como em outras ligas ferrosas e não-ferrosas, a solubilidade dos gases é muito maior no estado de fusão do metal do que no seu estado sólido; nas temperaturas de solidificação, êsses gases são liberados. Se isso ocorrer na temperatura de solidificação do metal, no molde, o gás estará muito mais sujeito a ser retido nesses ferros fundidos de alto silício, visto êstes serem diferentes da maioria das outras ligas fundidas, por possuírem uma variação de solidificação muito mais estreita. Lembre-se que as curvas *liquidus-solidus* do sistema binário Fe-Si são quase coincidentes nas porcentagens significativas de silício. Julga-se ser, provávelmente, essa estreita variação de solidificação o fator inibidor mais importante de liberação dos gases dissolvidos, durante o resfriamento.

Várias experiências já realizadas têm demonstrado que a porosidade, devida a gases nas peças, é produzida por um efeito combinado de monóxido de carbono e hidrogênio, sendo êste último a causa primária do mencionado efeito. O volume de CO desprendido de um corpo de prova retirado de uma peça sólida, submetido a uma análise por fusão fracionada, a vácuo, foi da mesma ordem que o volume de hidrogênio, concluindo-se que ambos coexistem em descontinuidade no metal. Ficou demonstrado que peças “sadias” têm, invariavelmente, conteúdos de hidrogênio inferiores a 2 ml/100 g, enquanto que, aquelas que apresentam porosidade evidente, dão valores que atingem, em muitos casos, entre 10 a 12 ml/100 g.

10. ABSORÇÃO DE HIDROGÊNIO

Analisando-se os fatores prováveis que influem no aumento do conteúdo de hidrogênio no metal deve-se ressaltar o seguinte:

A *sucata de aço*, limpa e sêca, uma das matérias primas empregadas, tem um conteúdo do hidrogênio de cêrca de mas empregadas, tem um conteúdo de hidrogênio de cêrca de 6 ml/100 g. Os *ferros-ligas*, podem ter até 9 ml/100 g. Mesmo usando-se matérias primas limpas e sêcas, tem-se um excesso, na carga, de um máximo de 3 ml/100 g, além do máximo aceitável que são os 2 ml/100 g, já indicados. Pode-se ainda ter-se absorção de hidrogênio da umidade remanescente nos revestimentos dos fornos e panelas, e nos moldes imprôpriamente sêcos. Daí o cuidado especial a ser dado às matérias primas, etc., e ao refino no forno para assegurar um metal livre, o mais possível, de concentrações deletêrias de gás.



Fig. 13 — Uma das dificuldades da fundição de peças de alto silício é a da formação de cavidades e bolhas pelos gases retidos; êsses defeitos chegam a aflorar na superfície. A foto mostra um exemplo dêsses defeitos, evitáveis mediante técnicas de desgaseificação.

A figura 13, mostra a fratura de peça onde se vêem cavidades causadas por gases.

Técnica de desgaseificação — O meio mais efetivo de se evitar essa influência nociva dos gases seria o da desgaseificação, que consiste em aplicar, no material fundido, o borbulhamento de gases inertes quanto ao metal (como o cloro, o nitrogênio, o monóxido de carbono e/ou a mistura de nitrogênio-monóxido de carbono); toma-se como base de comparação o mesmo metal obtido sem desgaseificação e o material fundido sob vácuo. A fundição sob vácuo produz um material suficientemente desgaseificado, mas requer não só a respectiva bomba de vácuo como também forno de indução adequado, inclusive

para permitir a colocação de uma campânula própria para se produzir o vácuo necessário. Trata-se, pois, de operação dificultosa e de aplicação prática pouco efetiva.

Em cada experiência, referente a desgaseificação por um determinado gás, aplicou-se três tipos de moldes, ou seja, feitos com refratários; moldes de areia estufada; moldes feitos com areia a verde. Cada borbulhamento foi executado com dois tempos diferentes, ou sejam: com 5 e com 10 minutos, tomando-se como base um volume constante de gás borbulhado. A comparação entre os três moldes diferentes é justificada pelo fato de que os moldes de refratário seriam livres de gases, desde que são feitos com tijolos refratários e rejuntados com massa plástica inorgânica, perfeitamente secos em estufa a cerca de 250°C. Os moldes de areia, estufados, contêm uma quantidade de umidade baixa, quase nula; os gases gerados no vazamento serão os de decomposição dos aglomerantes orgânicos presentes na areia, os quais geralmente exercem sua influência na fundição normal e podem ser absorvidos pelo metal líquido. Os moldes feitos com areia verde, além de possuírem os mesmos gases que os estufados, têm ainda um grau de umidade tal que pode fornecer uma maior quantidade de hidrogênio, etc., reproduzindo portanto, as piores condições para vazamento do metal. Evidentemente a comparação feita com o material vazado nas mesmas condições, mas que não foi desgaseificado, nos mostra a influência dos gases do metal; a fundição feita sob vácuo, nos dá a comparação com um metal nas melhores condições de desgaseificação. Estas duas últimas condições representam condições padrões de comparação.

A técnica de produção e borbulhamento de gases foi executada, servindo-se de: Cloro — em torpedo; Nitrogênio — em torpedo; CO — obtido em gerador de CO, conforme projeto do IPT; CO + N₂ — gerador de gás, tipo gasogênio.

Os métodos de medida de vazão de gás, foram feitos por meio de manômetros, adaptados diretamente na tubulação de saída dos torpedos ou dos geradores de gás, a fim de se ter uma quantidade constante (volume) de gás, para cada gás, borbulhando no metal líquido. Essa vazão correspondeu a 1.416 litros de gás/hora ou 23,6 litros/minuto.

A medida de temperatura de fusão e vazamento da liga, foi feita com pirômetro ótico e, para todos os casos, foi mantida em: Fusão no forno antes do vazamento = 1.380°C; Vazamento no molde = 1.260°C.

A composição química da liga, feita por cálculo de carga, foi controlada por análise química.

Para a série de experiências, foram estabelecidos corpos de prova com as seguintes dimensões: espessuras 10, 30 e 50 mm; largura = 50 mm; altura = 140 mm. Assim foi feito para que êsses c. de p. reproduzissem as variações mais usuais das peças (máximas, médias e mínimas), bem como para caberem na máquina de ensaio de dobramento, existente no IPT onde eram fraturados posteriormente. As superfícies fraturadas foram retificadas e polidas, como para macrografia, para observação e divulgação.

Devido à impossibilidade momentânea de se medir o teor de gases retidos, por análise gasométrica no metal, usamos controlar a desgaseificação por comparação, entre corpos de prova, da sua superfície. Entretanto, anteriormente já havíamos dosado gases em ferros fundidos alto silício, no estado bruto de fusão, que revelaram em média de 4,9 a 6,6 ml/100 g H_2 . Isto nos deu a indicação de que partíamos de materiais já com relativo baixo índice de gaseificação, porém acima dos 2 ml/100 g aceitáveis.

As experiências executadas revelaram que para melhores conclusões deveremos gaseificar propositadamente o material para podermos ter uma observação melhor, desde que não podemos realizar a análise química. Outro ponto revelado pela experiência é que o cloro não age como desgaseificante eficaz.

Dos outros gases, o N_2 , o CO e a mistura CO + N_2 , mostraram-se equivalentes em capacidade de desgaseificação; o último parece ser mais econômico, devido a sua fácil obtenção por meio de um gasogênio comum. Outra conclusão é que os tempos de borbulhamento (de 5 e 10 minutos) são equivalentes em eficiência; podendo-se, portanto, adotar 5 minutos como mais econômico. A vazão de gás pode ser aumentada, produzindo-se um borbulhamento mais intenso, porém, a prescrita já dá resultados satisfatórios, além de garantir uma segurança de operação, sem o perigo de projeções de metal líquido para fora do forno.

Outro ponto a salientar é o de que, na proporção em que a espessura da peça diminui, a desgaseificação resulta mais eficiente; com espessuras da ordem de 10 mm, temos conseguido, em todos os casos, peças aparentemente isentas de gases.

A figura 14 mostra o aspecto dos 5 corpos de prova dos ensaios de desgaseificação. Os de números 3, 4 e 5 confirmam a boa desgaseificação pelo N_2 , pelo CO e pela mistura CO + N_2 , respectivamente.

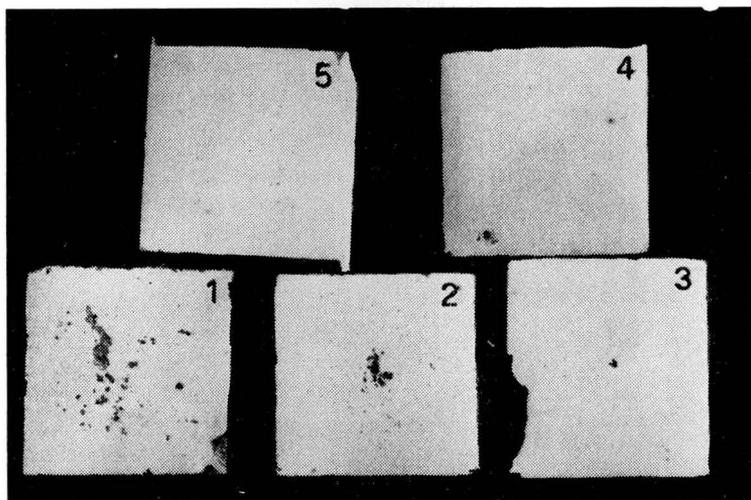


Fig. 14 — Seções dos corpos de prova das experiências de degaseificação. 1) material sem degaseificação; 2) material sujeito a borbulhamento com cloro; 3) material degaseificado com nitrogênio; 4) material degaseificado com monóxido de carbono; 5) material degaseificado com CO + N₂.

11. TRATAMENTOS TÉRMICOS

a) *Introdução* — A resistência à tração dos ferros fundidos de alto silício é bem mais baixa do que a do aço doce; sua ductilidade, medida em alongamento e redução de área, é praticamente nula, tudo a temperatura normal. Como, doutro lado, sua contração na solidificação é elevada, da mesma ordem da do aço, pode-se antecipar que o resfriamento produzirá tensões altas nas peças, o que as torna suscetíveis de trincas. Para atenuar essas tensões é que se processa a desmoldagem dessas peças a quente, e se as submete a tratamentos térmico, que assegura a anulação de tensões residuais.

b) *Recozimento* — Do diagrama de equilíbrio binário das ligas Fe-Si resulta que, para os ferros fundidos resistentes à corrosão pelos ácidos, na região em torno de 15% de silício, não se processa nenhuma mudança de fase na liga sólida. Enquanto não fiquem plenamente esclarecidos os estudos sobre o sistema ternário Fe-C-Si, todo o trabalho experimental até agora feito mostra que, nas ligas homogêneas, a única fase de silício é a fase α (alfa).

Considerando-se este aspecto, a finalidade do recozimento fica sendo um tanto obscura, a não ser como um simples tratamento de alívio de tensões. Várias experiências relatadas na

literatura, com o fito de examinar as propriedades mecânicas de deflexão de ferros alto silício, nas temperaturas de recozimento, mostram que a deflexão inicia-se a 650-750°C e é progressivamente maior com temperaturas mais elevadas; elevando-se rapidamente neste início e diminuindo depois de um certo tempo, apresentando uma anomalia a 700°C, onde a barra dobra em direção oposta à carga aplicada. Esse resultado foi interpretado como evidência de tensões internas no material bruto de fusão. A deflexão permanente, devida à tensão aplicada, nas temperaturas de recozimento, em vez de ser uniforme, em quantidade, na direção da força aplicada, foi acrescida ou diminuída de uma quantidade adicional devida às tensões internas. Sob essas circunstâncias, a magnitude dessa tensão interna foi suficiente para apresentar a deflexão negativa.

Os mesmos pesquisadores mostram que, à temperaturas mais altas que 700°C, os ferros fundidos em questão, apresentam um alto grau de plasticidade e resiliência, tomado como termo de comparação com os característicos próprios a temperatura ambiente normal. A temperaturas mais altas que 800°C, revelam um amolecimento excessivo, que possibilita uma distorção das peças. A resiliência dos ferros alto-silício, em tais temperaturas, nos dá uma indicação para seu manuseio, quando se o desmolda para levá-los aos fornos de tratamento térmico.

*

Os ferros alto silício apresentam pequenas quantidades duma fase de um carboneto, disperso ao acaso através de toda a secção transversal das peças (fig. 18), que é instável e facilmente decomponível pelo tratamento térmico. A presença dessa fase, nas peças, foi reconhecida como fator principal de possibilidade de trincas em serviço.

A adoção dum recozimento é imprescindível para a eliminação de tensões internas, bem como para a eliminação desses carbonetos instáveis. Neste tratamento, as peças são removidas dos moldes, quando ainda sólidas, porém, ao rubro (600-700°C) e antes que as tensões de contração tenham tempo de se manifestar completamente. Falhas ou erros nesta regra, dão geralmente peças trincadas. É importante remover-se os maçalotes e afrouxar ou remover os machos, eliminando ao máximo a areia, antes que a temperatura desça a 800°C. Imediatamente as peças são colocadas em um forno elétrico (ou a óleo) mantendo-se-as a 800°C por 4 a 5 horas, seguido de um resfriamento lento no forno até à temperatura ambiente, num período de 30 horas, o que dá aproximadamente uma queda de 20-30°C/hora.

O ciclo de tratamento térmico é crítico, como já referido, para as propriedades físicas e mecânicas do material. Experimentalmente já temos aplicado velocidades de resfriamento maiores que vão até 40°C/hora, com resultados satisfatórios. Em segundo plano, parece existir uma concentração dupla em torno das temperaturas de 200-400°C (mais exatamente 280°C), onde o material apresentaria 2 picos de contração diferencial, o que obrigaria a um resfriamento bem lento nessa faixa de temperaturas. São duas experiências que se pretende realizar: a) Verificar qual a queda crítica de temperatura de resfriamento; b) Verificar onde se localizam êsses picos de dupla concentração.

Do outro lado, o tratamento térmico dita a manutenção por 4-5 horas no forno e a literatura experimental é omissa se o tratamento térmico pode ser feito em 1 ou mais horas, em função da espessura da peça tratada. Temos feito tratamento de 1 e 2 horas, com resultados perfeitamente satisfatórios, em peças de secções as mais variadas. Daí, necessitarmos estudar mais em detalhes êsse tempo que, obviamente, afeta diretamente a economia do processo de tratamento.

12. LIMPEZA, REBARBAÇÃO, USINAGEM E SOLDA

As peças em ferro fundido alto silício se apresentam geralmente razoavelmente limpas de areia; em alguns casos é necessário submetê-las a limpeza por jato, inclusive para melhoria de acabamento superficial. A rebarbação se processa normalmente, com os esmeris adequados, não representando maiores dificuldades. Devido à sua alta dureza, é prática geral executar algumas operações de usinagem por meio de retífica, com máquinas e ferramentas adequadas, como, por exemplo, carbono. As operações de torneamento, acabamento de furos e faceamento podem ser feitas, rapidamente, por qualquer método, com o devido equipamento, devendo-se porisso, prever as furações, etc., por meio de machos, na fundição⁴.

Os ferros fundidos alto silício têm boa capacidade de solda, o que representa uma vantagem para se poder adaptá-los às exigências dos projetos e de montagem das peças. Deve-se dar preferência à solda oxi-acetilênica, obedecendo à seguinte técnica de operação:

Preaquecimento — Aquecer a peça a 700°C, antes do início da solda. Essa temperatura deve ser mantida em torno da solda até ser completada.

Fluxo — Consiste numa mistura, em partes iguais, de ferro-silício, ferro-manganês e borax.

Chama — Levemente oxidante. Evitar chama neutra ou redutora, a fim de não introduzir hidrogênio no metal fundido.

Eletrodos — De ferro fundido alto silício, produzidos na fundição, obtidos em molde de areia.

Recozimento — Depois de completada a solda, a peça deve, obrigatoriamente, ser mantida em forno de recozimento, 700-800°C, por uma hora e esfriada lentamente, no forno, até a temperatura ambiente, a fim de evitar trincas devidas a tensões residuais.

13. ANÁLISE QUÍMICA

Devido à alta importância que tem o teor de silício para a resistência à corrosão ácida, a sua determinação deve ser cuidadosamente procedida. O método seguinte, tem sido empregado com sucesso; é o adotado pelo nosso laboratório:

Pesar 0,9344 g de amostra e transferir para um bequer de 150 ml. Adicionar cerca de 1 g de clorêto de amônio e 10 a 15 ml de reagente bromo-ácido bromídrico (1:10). Manter o bequer por 30 minutos no banho-maria e mantê-lo aí até completa evaporação. Depois de sêco por mais 1 hora, adicionar 15 a 20 ml de ácido clorídrico, agitar o conjunto, deixando a sílica decantar e filtrar então em papel Whatman 40 de 12,5 cm de \varnothing . Reservar o filtrado. Lavar o papel e a sílica, com ácido clorídrico quente (sol. 40%) e depois com água quente, até livre de ferro.

O precipitado e o papel são transferidos para um cadinho de platina, calcinados e a pureza da sílica residual é determinada por meio de ácido fluorídrico em presença de ácido sulfúrico. O filtrado que foi reservado é evaporado à secura em banho-maria e o resíduo é misturado com 20 ml de água destilada e o bromo eliminado por meio de excesso de ácido nítrico. Depois de eliminado todo o bromo, adicionar 25 ml de ácido perclórico (a 60%), cobrir o bequer com vidro de relógio e aquecer a fumos brancos, mantendo por 30 minutos. Resfriar, diluir com 150 ml de água fria, filtrar, recuperando toda a sílica residual, tratando-a da mesma maneira que o precipitado. Qualquer sílica residual deve ser adicionada à primeira sílica precipitada.

14. MICRO-ESTRUTURA DOS FERROS FUNDIDOS ALTO SILÍCIO

A micro-estrutura dos ferros fundidos alto silício, como se prevê pelo diagrama binário Fe-Si, deve apresentar uma única fase constituída de uma solução sólida de silício na ferrita, ou seja uma fase alfa ou silício-ferrita, conforme a figura 15⁵. O

carbono na liga apresenta-se na forma de grafita que, como já referido, pode ser em flocos, de tamanhos variados, ou finamente dividida, de tipo reticular, normalmente classificada como grafita de superesfriamento, ou ainda, na forma acicular ou em bastonetes, conforme ilustrados respectivamente nas figuras 15, 16 e 17. No caso de ligas de carbono relativamente mais alto (que o normal), durante a solidificação, a grafita em excessos sobrenada a superfície do metal líquido na forma de "kish", aliás como apontado na figura 6 (diagrama de equilíbrio). Com teores menores, tal separação não se dá.

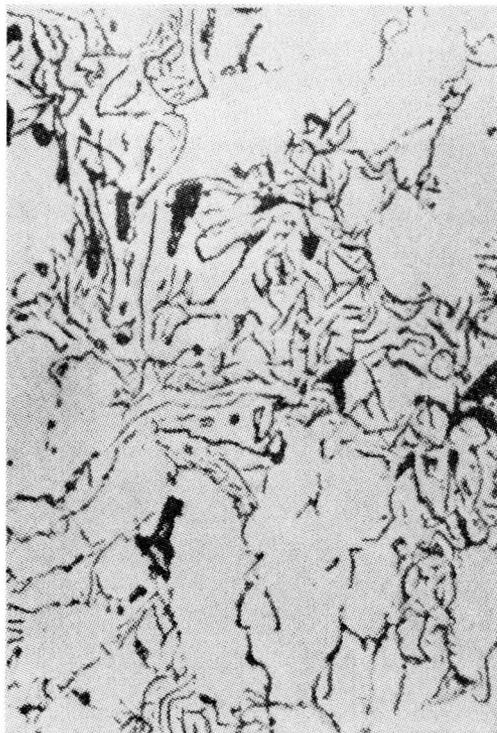


Fig. 15 — Micrografia de um ferro fundido de alto silício; apresenta a fase alfa (de sílico-ferrita) e grafita em flocos. 120 ×.

Os ferros fundidos em questão, podem apresentar uma segunda fase cujo exemplo típico é apresentado na figura 18; tem a aparência de cementita, distribuindo-se ao acaso, no sentido da espessura da peça. Essa fase, como mencionado no item de tratamento térmico, desaparece por um recozimento a

800°C, durante 1-2 horas. Um resfriamento rápido, através da faixa de variação de solidificação, parece contribuir para o aumento dessa fase-carboneto.

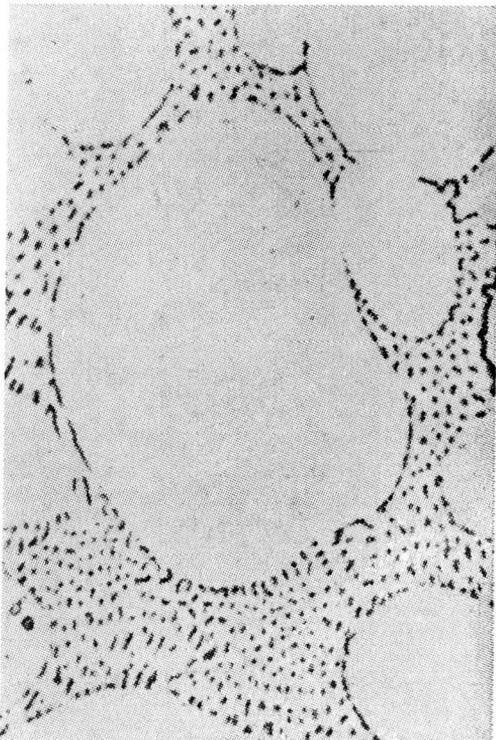


Fig. 16 — Micrografia de um ferro de alto silício ilustrando o tipo de grafita reticular. 600 ×.

A figura 19 ilustra um ferro fundido com 17% de silício, apresentando uma estrutura dupla.

Os ferros fundidos contendo alto teor de fósforo, mostram ainda uma terceira fase-fosfeto, que, como já referido, não é decomposta pelo tratamento térmico e é ilustrada na figura 20.

Devido à dificuldade de se atacar, metalograficamente esse carboneto, pelo reagente normal empregado para o ataque de cementita, ou seja, a picrato de sódio a quente, a literatura⁵ refere-se a um método de identificação destes, por meio de análise química, desde que um recozimento os decompõem em grafita, a qual pode ser facilmente avaliada pela análise.

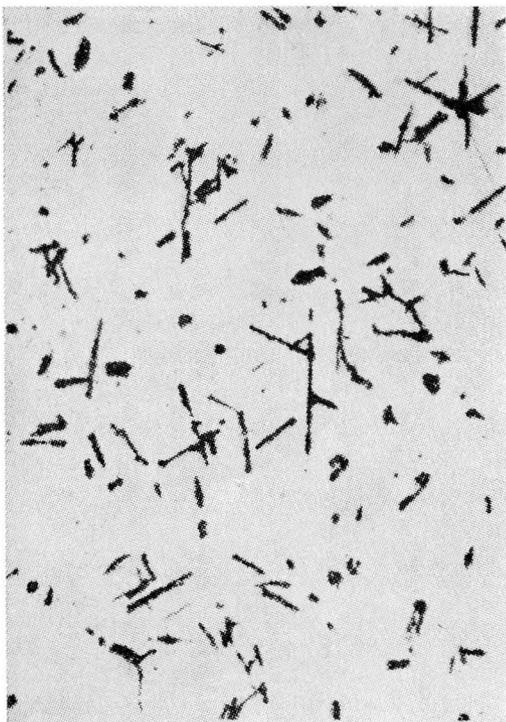


Fig. 17 — Micrografia de um ferro de alto silício mostrando o tipo de grafita acicular, ou de bastonetes. 120 \times .

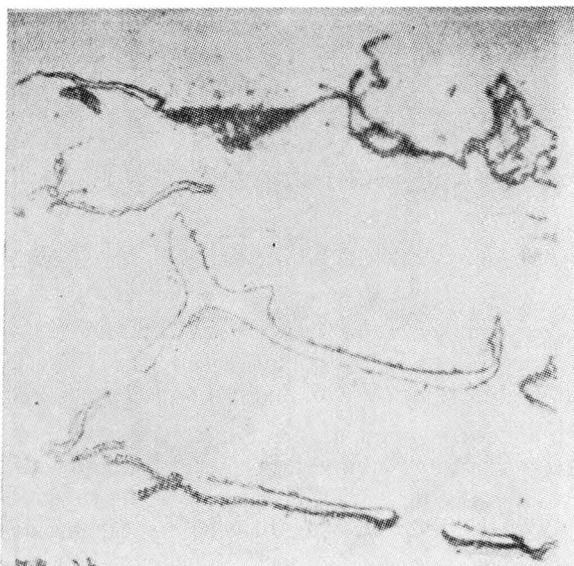


Fig. 18 — Exemplo de uma segunda fase, carboneto, num ferro de alto silício; tem aparência de cementita e se distribui ao acaso na espessura da peça. É removível por tratamento térmico. 600 \times .

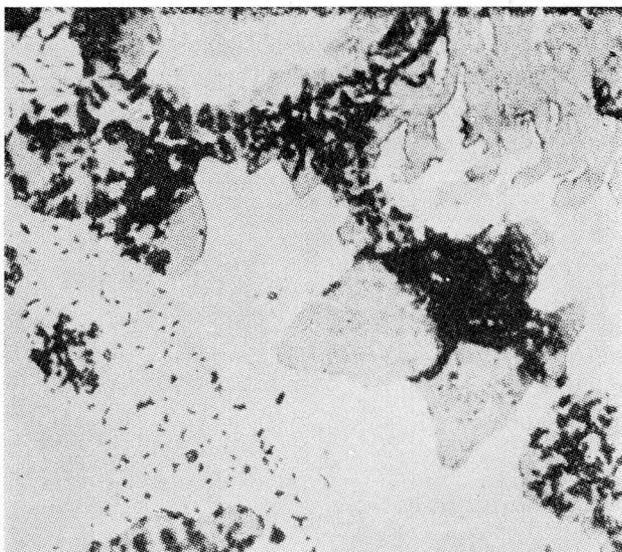


Fig. 19 — Ferro fundido com 17% de silício, mostrando a estrutura dupla. 600 ×.

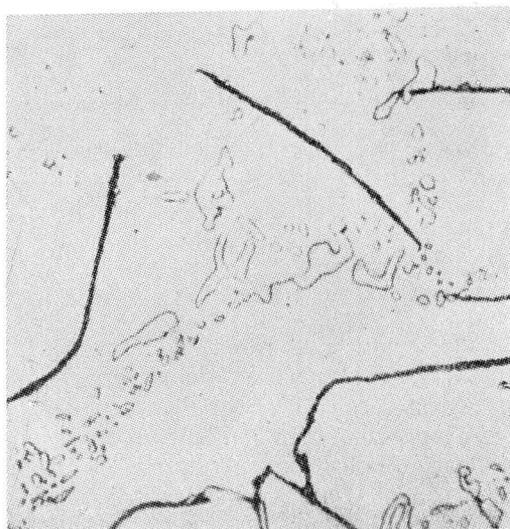


Fig. 20 — Micrografia num ferro fundido contendo alto teor de fósforo, mostrando uma terceira fase, a de um fosfeto, que não é redutível por tratamento térmico. 1.500 ×.

Um corpo de prova, temperado em água, foi analisado antes e depois de um recozimento a 800°C, por 2 horas; os resultados observados deram uma prova satisfatória de que a fase em discussão é um carboneto e que o produto de sua decomposição é grafita. Assim teve-se, em %:

Ct antes da têmpera em água	0,50
Cg antes da têmpera em água	0,12
Cg depois do recozimento	0,47

Como já mencionado e resumindo, têm-se as seguintes variáveis que influem na quantidade e distribuição da fase tipo carboneto ou do complexo carboneto-fosfeto:

- a) Velocidade de resfriamento do estado líquido — Aumento da quantidade.
- b) Conteúdo de carbono — Variação de quantidade com variação do conteúdo de carbono.
- c) Manganês — Efeito estabilizador de carboneto — Em porcentagem maior que 2% produz aumento considerável de carbonetos. O tratamento térmico decompõe o carboneto remanescendo fosfeto estável.
- d) Fósforo — Estabilizador de carboneto — Forma mistura eutética complexa de carboneto-fosfeto. O tratamento térmico decompõe os carbonetos remanescendo os fosfetos indecomponíveis.
- e) Molibdênio — Estabiliza os carbonetos.
- f) Níquel — Diminui a estabilidade dos carbonetos.

15. CONCLUSÕES

Pelo apresentado neste trabalho, podemos concluir:

1) O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos de alto silício, da sua finalidade de aplicação, da melhoria da técnica de trabalho e prática de fundição, já nos permite obter, com bom rendimento, peças de boa qualidade, para aplicação industrial. A figura 21, mostrando peças sãs, das mais variadas formas e envergaduras, traduz o êxito de nossa experiência no campo da fundição destes ferros fundidos especiais.

2) Na fundição de peças de ferros fundidos de alto silício é aconselhável observar as seguintes normas:

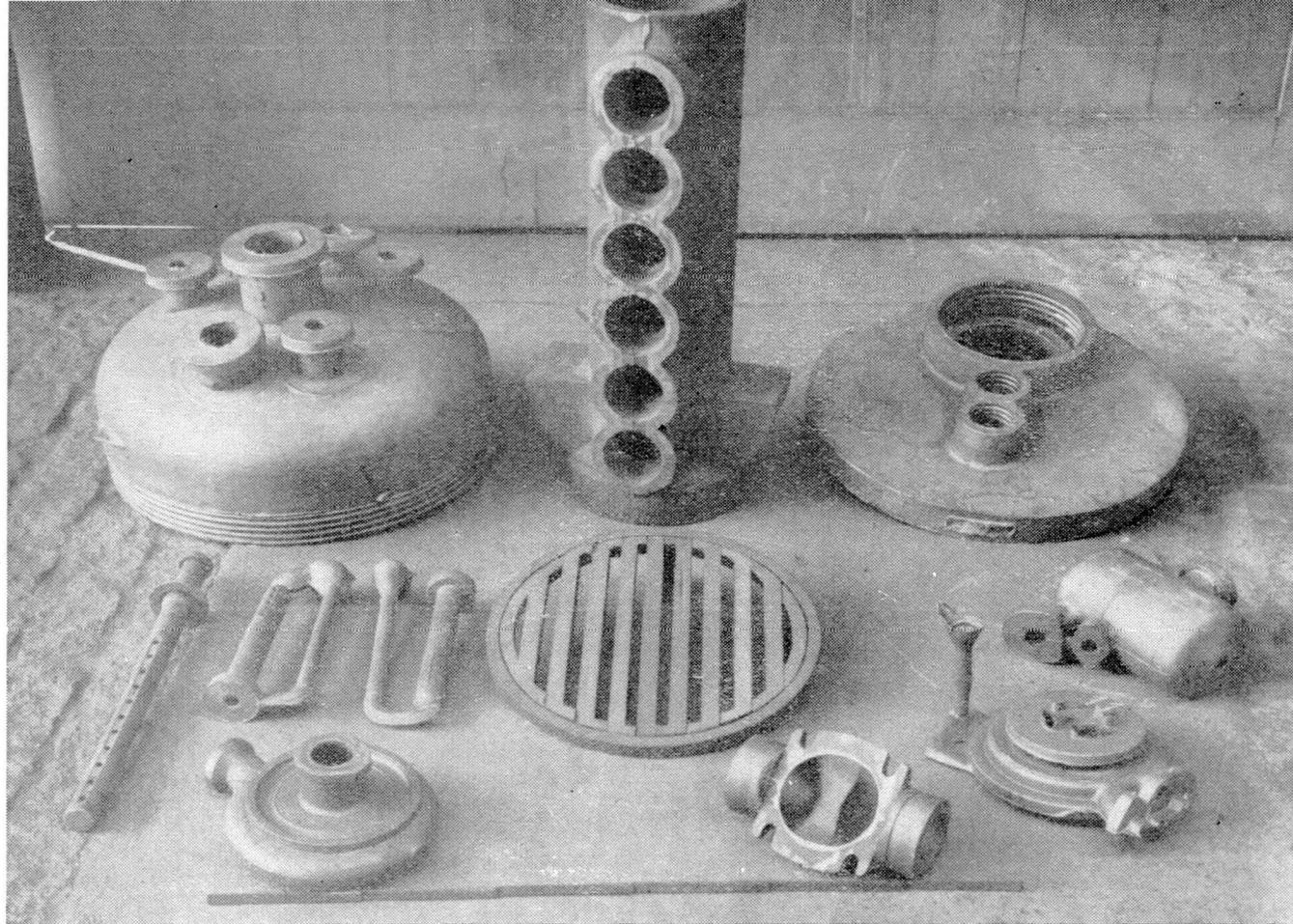


Fig. 21 — Com uma experiência acumulada de vinte anos, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo melhorou consideravelmente as técnicas de fundição de peças de alto silício. Como órgão de fomento desinteressado, o IPT põe essa experiência ao alcance dos interessados.

- a) Contrôles rígido e sistemático da composição química da liga.
- b) Aplicação da técnica de duas fusões, antes da fundição definitiva das peças.
- c) Estudo cuidadoso dos projetos e modelos das peças.
- d) Moldagem em areia apropriada; aplicação de canais de alimentação e de maçalotes bem dimensionados e convenientemente colocados.
- e) Contrôles rígido da temperatura de vazamento.
- f) Desgaseificação obrigatória.
- g) Desmoldagem a quente e esfriamento lento, em forno, segundo ciclo apropriado para decomposição dos carbo-netos e para impedir o aparecimento de tensões internas.

AGRADECIMENTOS

Apresentamos nossos agradecimentos ao Eng. Dr. Luiz Coelho Cor-rêa da Silva e Eng. Lino Afonso de Lacerda Santos, respectivamente Chefe da Divisão de Metalurgia e Chefe da Secção de Ferros Fundidos do IPT, pelas sugestões que apresentaram; ao Dr. Arthur da Silva Oli-veira, Assistente da Secção de Ensaio de Produtos Metalúrgicos, pelas análises químicas executadas; ao Sr. Phinistauro D'Abruzzo, Mestre de Refratários, pelos moldes que confeccionou e, particularmente, à Funda-ção de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela Bôlsa confe-rida a um dos co-autores do presente trabalho.

BIBLIOGRAFIA CITADA

1. R. O. F. (Explosives) Memorandum — *Silicon Iron — Properties and Manufacture*. Part I e II — *The Industrial Chemist and Chemical Ma-nufactures*, vol. 2, págs. 606-612, 649-654 — 1945.
2. DOAD, J. — *Microstructure and Notes on Acid-Resisting High Silicon Iron Casts*. *The British Foundryman*, vol. 54, Part 6, pág. 277 e segs. — Junh, 1961.
3. LACERDA SANTOS, LINO AFFONSO DE — *Fundição de Peças de Ferro Fundido de Alto Silício, Resistente à Corrosão*. *Boletim da Associação Brasileira de Metais*, vol. 10, n.º 34, págs. 35 a 42, 1954.
4. HURST, J. E. — *High-Silicon Acid-Resisting Cast Iron*. *Institute of British Foundrymen — Proceedings*, vol. 37, pág. B-46 e segs., 1943-44.
5. HURST, J. E. — *The Occurrence of the Carbide Phase in High-Silicon Iron-Carbon Alloys*. *The Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 149, n.º 1, págs. 213 e segs. — 1944.