

FERROS FUNDIDOS MALEAVEIS

2.^a PARTE

Manoel A. Moraes (1)

Renato Refinetti (2)

3 — ESTUDO TEÓRICO DA MALEABILIZAÇÃO

Dois processos de maleabilização se desenvolveram paralelamente: o processo europeu (maleável de núcleo branco) derivado dos trabalhos de Reaumur Fig. 40 e o processo americano (maleável de núcleo preto) Fig. 41, derivado acidentalmente do primeiro e de muito maior importância no momento atual.

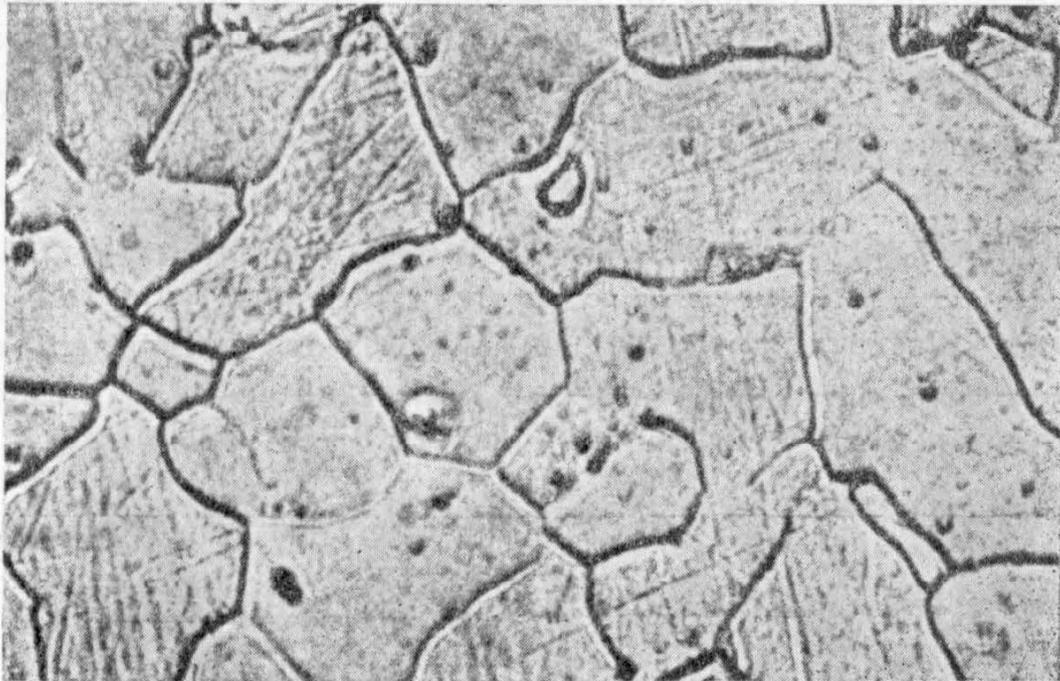


Fig. 40 — Maleável de núcleo branco

Em ambos os processos as peças são vazadas com ferro branco, rico em carbonetos e portanto frágil.

(1) e (2) — Engs. do Departamento de Metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, S. Paulo.

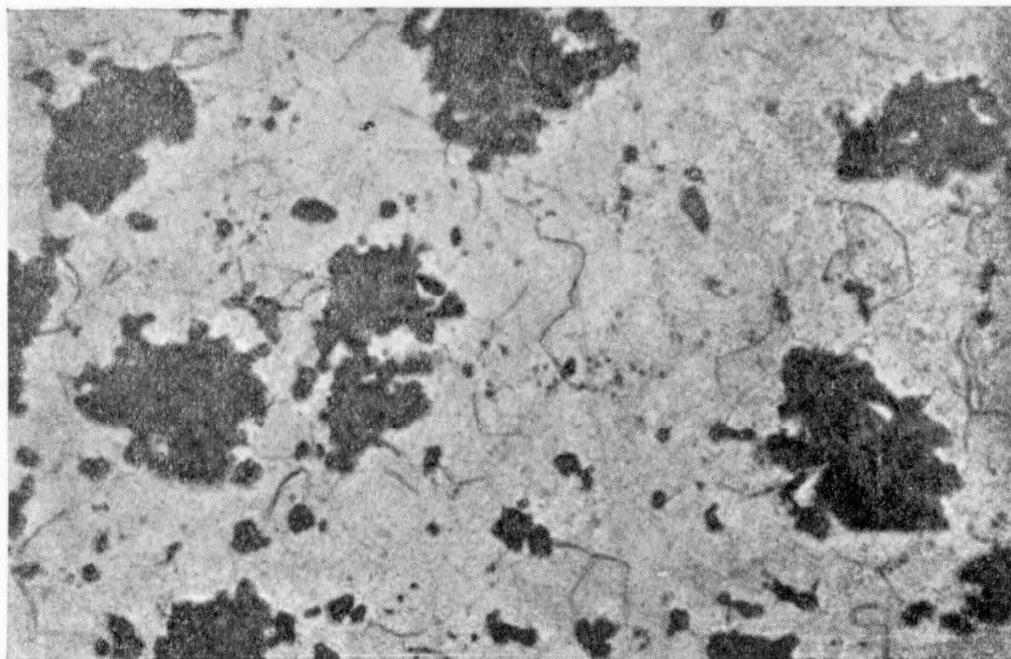


Fig. 41 — Maleável de nucleo preto

No processo americano, um tratamento térmico faz passar o ferro do estado de equilíbrio metaestável, ferro-cementita, ao estado de equilíbrio estável, ferro-grafita. Depois do recozimento o metal deve ser constituído unicamente de matriz de ferrita contendo grafita sob forma nodular.

No processo europeu o carbono é eliminado por um processo *oxidante*. Para peças finas ou para peças de espessura média depois de recozimento prolongado a estrutura obtida é inteiramente ferrítica.

Na prática porém, a diferença entre os dois processos não é tão grande. De um lado, o fenômeno de descarbonetação superficial exerce uma grande influência no recozimento do maleável a núcleo preto e influe grandemente nas suas propriedades; de outro lado na maleabilização pelo processo europeu intervém sempre uma grafitização pelo menos parcial do carbono.

É possível pois fabricar uma série completa de maleáveis de tipo intermediário em parte grafitizados e em parte descarbonetados.

Teoria da grafitização.

Para o estudo da grafitização, seja um maleável americano de composição química corrente: C = 2,5; Si = 1,0; manganês em pequeno excesso sobre a quantidade necessária à neutralização do enxôfre e fósforo inferior à 0,20%. O metal será seguido desde o estado líquido antes da moldagem até o resfriamento completo depois do recozimento.

Diagrama de Equilíbrio Fe-C

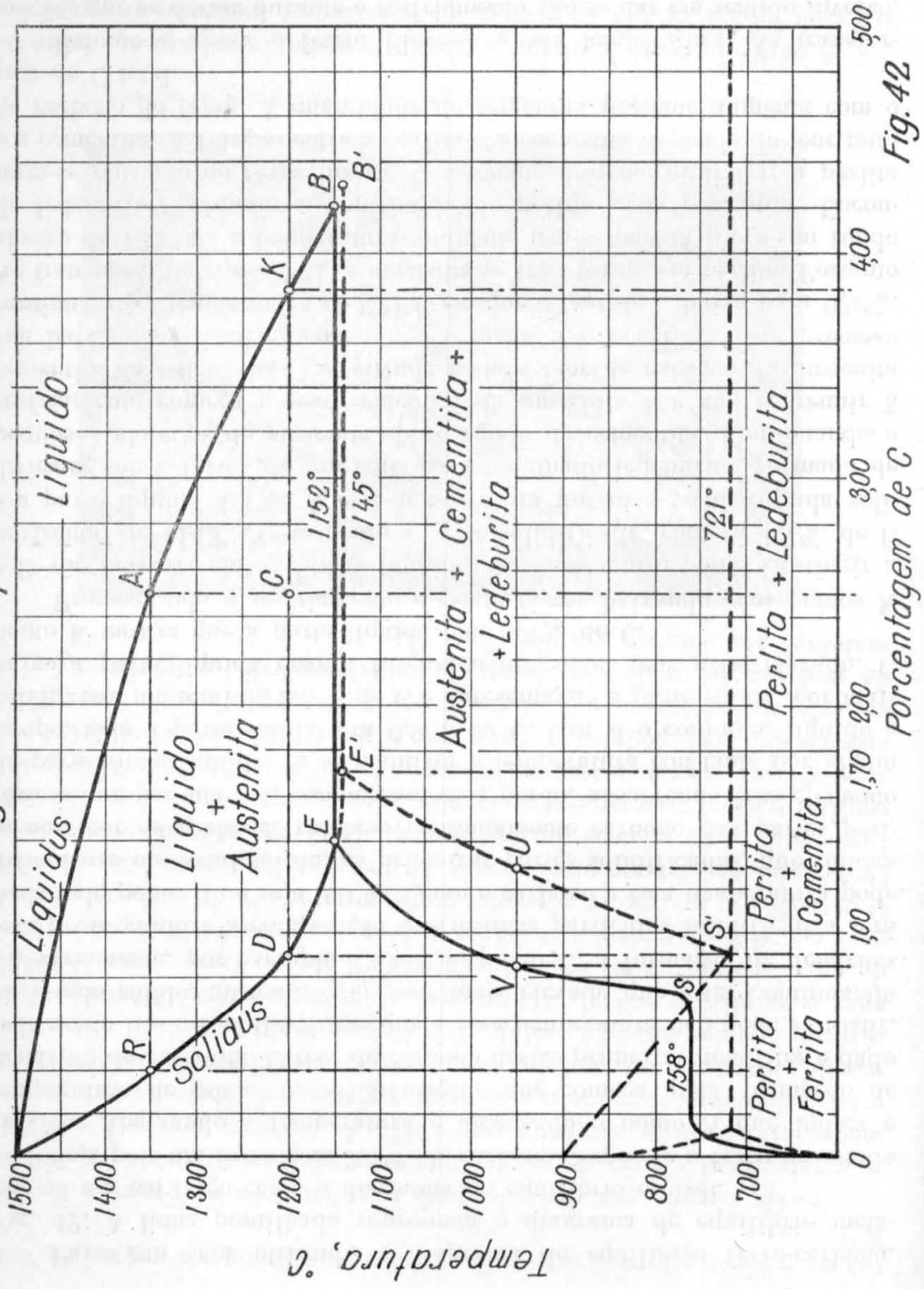


Fig. 42

Para isto será utilizado o diagrama de equilíbrio ferro-carbono. Fig. 42. A linha pontilhada representa o diagrama de equilíbrio metaestável e a em traço cheio o diagrama do equilíbrio estável.

Seja pois um ferro com 2,5% de carbono. Supõe-se o ferro no estado líquido. Abaixando a temperatura é alcançado o ponto A que indica a temperatura de início de solidificação, que começa pela formação de dendrites de austenita. O teor de carbono destas primeiras dendrites é dado pelo ponto R, ou seja 0,4%, porque a essa temperatura não pode subsistir, no estado sólido, austenita com teor mais elevado que este. Continuando o resfriamento, por exemplo 1200°, no ponto C, a formação de dendrites terá prosseguido e a composição das últimas partículas solidificadas será dada pelo ponto D ou seja 0,9%. Como o carbono a esta temperatura pode difundir-se no metal sólido, as primeiras partes solidificadas, que tinham menor teor de carbono, recebem continuamente carbono das partes periféricas que por sua vez, compensam essa perda, absorvendo esse elemento da parte ainda líquida. Si se mantiver a temperatura constante por algum tempo, toda a parte sólida terá 0,9% de C. Ora si o conjunto, líquido e sólido, tem um total de 2,5% de C e apresentando a parte sólida teor mais baixo a parte líquida deverá forçosamente conter teor mais elevado. O ponto K mostra que a parte líquida tem 3,8% de C.

Prosseguindo o resfriamento o ponto C vai baixando e os pontos K e D vão percorrendo as linhas liquidus e solidus até o ponto C atingir a horizontal de 1145°. Neste ponto a parte solidificada, conterá 1,7% de C e a parte líquida 4,3%. A essa temperatura porém a parte líquida solidifica-se sob a forma de um eutético denominado ledeburita, formado de pequenos glóbulos de austenita sobre fundo de cementita. Continuando o resfriamento começa a sair cementita da austenita que vai se reunir à cementita da ledeburita. Em virtude disto o teor de carbono da austenita vai baixando gradativamente e percorrendo a curva E'S'. Este processo continua até a temperatura de 721°C em que o teor de C baixa para 0,9%. Ao transpor a linha dos 721° a austenita se transforma em perlita. Portanto abaixo de 721° até a temperatura ambiente tem-se perlita sobre um fundo de ledeburita, secundária, constituída de perlita mais cementita. Encontram-se portanto no ferro branco unicamente dois constituintes: a perlita e a cementita. A relação entre a perlita e a cementita depende do teor total de carbono do ferro. A quantidade de cementita presente aumenta com o teor de C total.

Retome-se agora o ferro. Eleve-se a sua temperatura. As transformações que se deram durante o resfriamento vão se dar em sentido inverso.

Ao atravessar a horizontal de 721°C a perlita se transforma em austenita. Aumentando a temperatura a austenita vai absorver parte da cemen-

tita do eutético elevando o teor de carbono gradativamente segundo a linha E'S'.

Si fôr tomado, por exemplo, para recozimento a temperatura de 950° se estabelecerá depois de algum tempo o equilíbrio segundo o sistema metaestável tendo-se austenita com 1,3% de C como mostra o gráfico e o resto da massa formado por cementita. Sob a influência da temperatura mantida constante durante um longo tempo, a cementita se decompõe em carbono nodular e solução sólida, isto é passa-se do equilíbrio metaestável para o equilíbrio estável. A passagem ao sistema estável é acompanhada de um abaixamento de solubilidade do carbono no ferro gama. A 950°C para o equilíbrio estável a austenita poderá ter somente 0,85% de carbono. O carbono em excesso se precipita também no estado de carbono nodular. Os nódulos de carbono provenientes da decomposição inicial da cementita funcionam como núcleos de grafitização. Uma vez atingido o estado de equilíbrio não é mais necessário manter o ferro a esta temperatura. O metal antes do resfriamento estará pois constituído por austenita com 0,85% de C entremeada com nódulos de grafita. A diminuição da solubilidade do carbono no ferro gama e a migração do carbono precipitado aos nódulos de grafitização pode ser mostrada interrompendo a grafitização do maleável por têmpera em óleo Fig. 43.

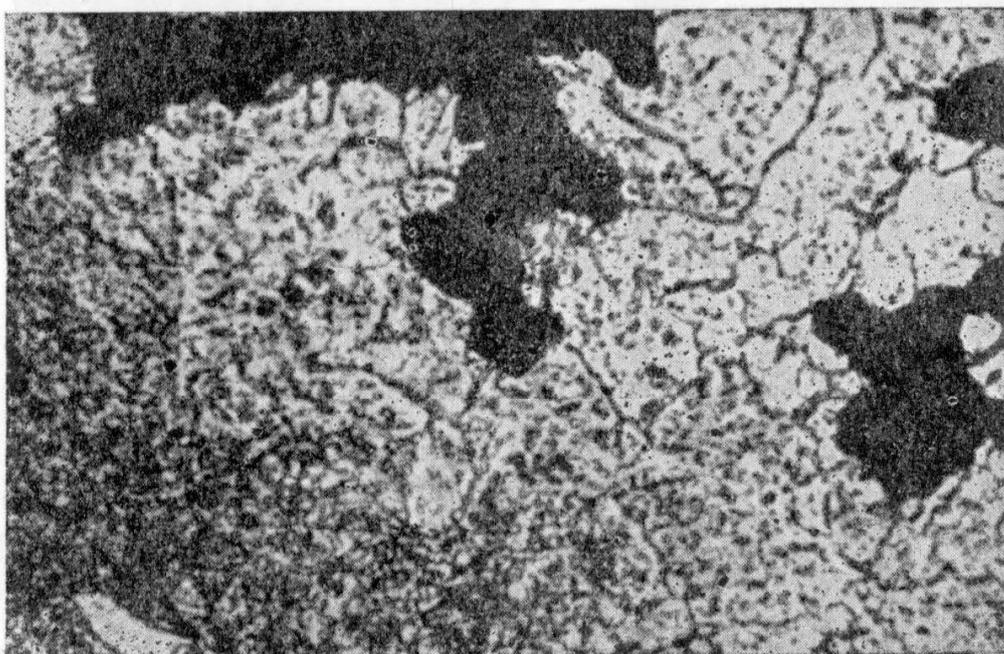


Fig. 43 — Migração do carbono precipitado aos nódulos de carbono

A partir do ponto V em que o metal é constituído unicamente de austenita com 0,85% de C e de grafita, ao resfriar-se a austenita precipita seu carbono em excesso segundo a linha E. S., até atingir no ponto S a concentração de 0,7% de carbono.

Uma vez atingido o ponto S pode-se agir de 2 modos:

- 1) Mantendo-se o metal algum tempo a uma temperatura pouco abaixo do ponto crítico, a cementita da perlita devido a sua tendência a se decompor vai depositando a sua grafita nos nódulos originais de grafitização. A Fig. 44 mostra esta estrutura intermediária.

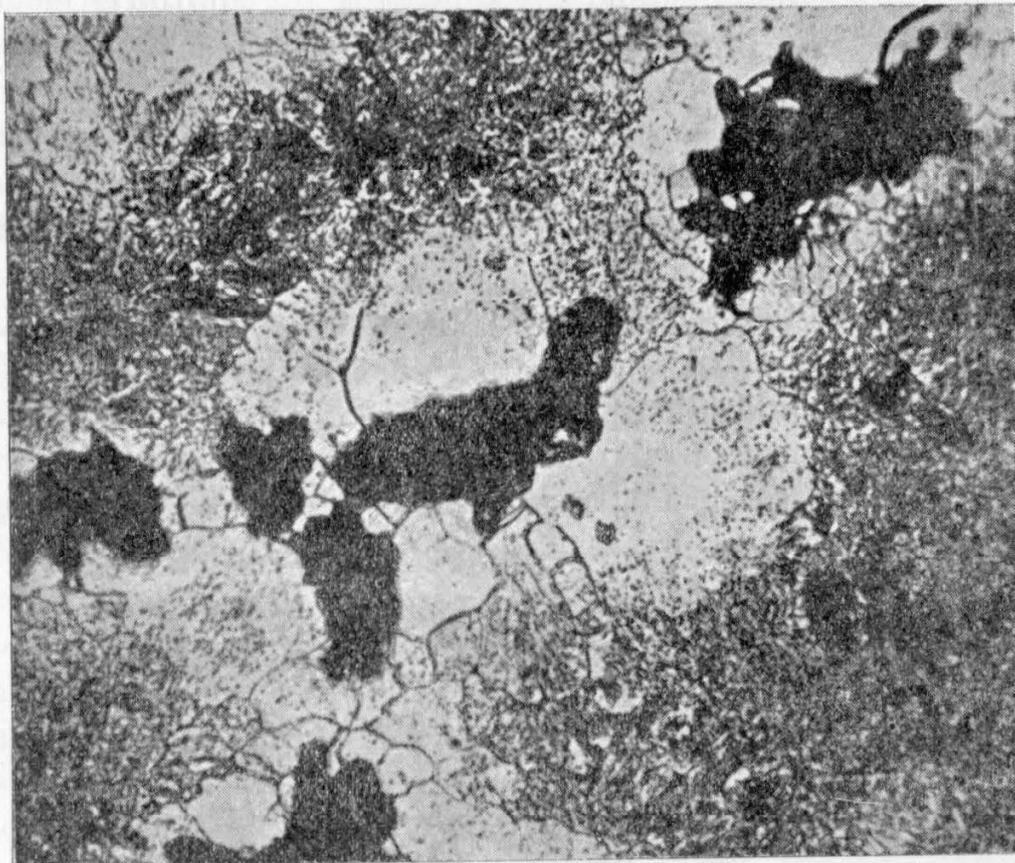


Fig. 44 — Estrutura intermediária na confecção de maleável de nucleo preto

- 2) Si o resfriamento fôr lento nas vizinhanças do ponto S há oportunidade para que o carbono que está dissolvido no ferro gama, formando uma solução sólida, se precipite dando ferro e grafita. A grafita se deposita novamente nos nódulos originais que então ficam envolvidos por um anel de ferrita formando o olho de boi (“bull’s eye”) como se vê na Fig. 45. O processo pode ser conduzido de modo suficientemente lento para que os olhos de boi formados sejam tão largos para permitir completa grafitização e impedir a formação de perlita lamelar.

O resultado final em ambos os casos é visto na Fig. 46.

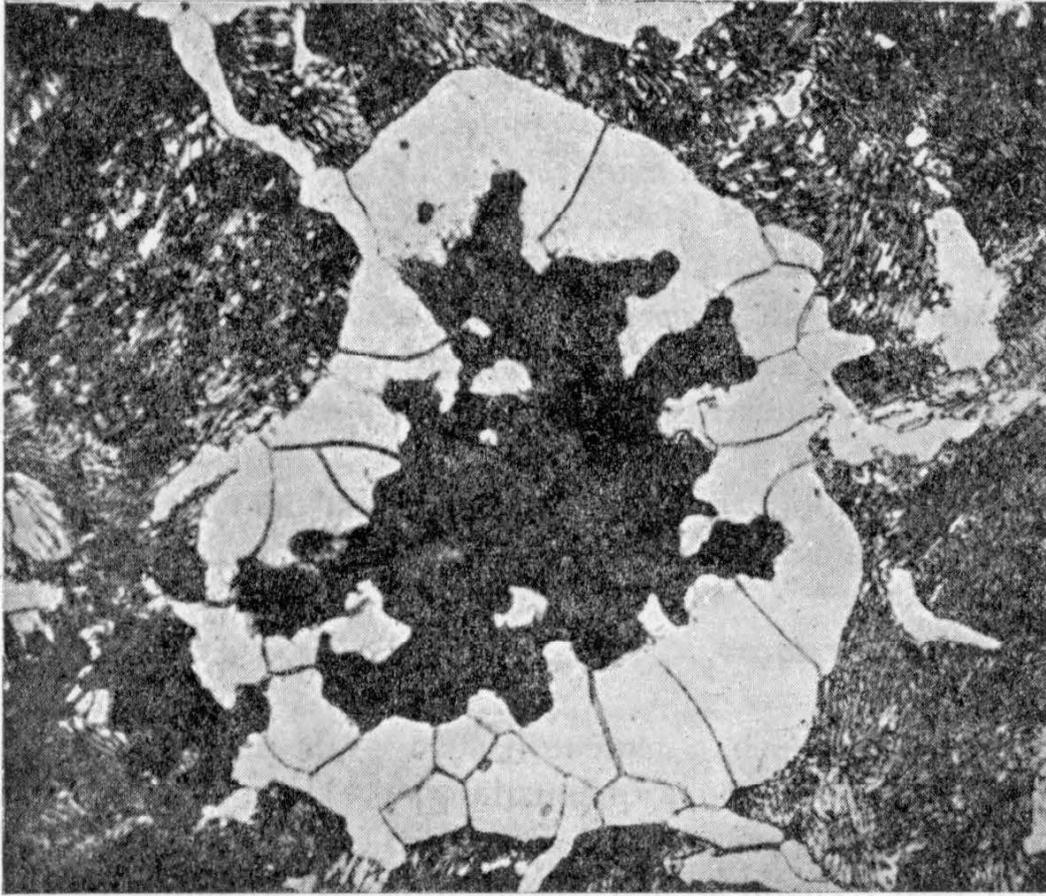


Fig. 45 — Olho de Boi

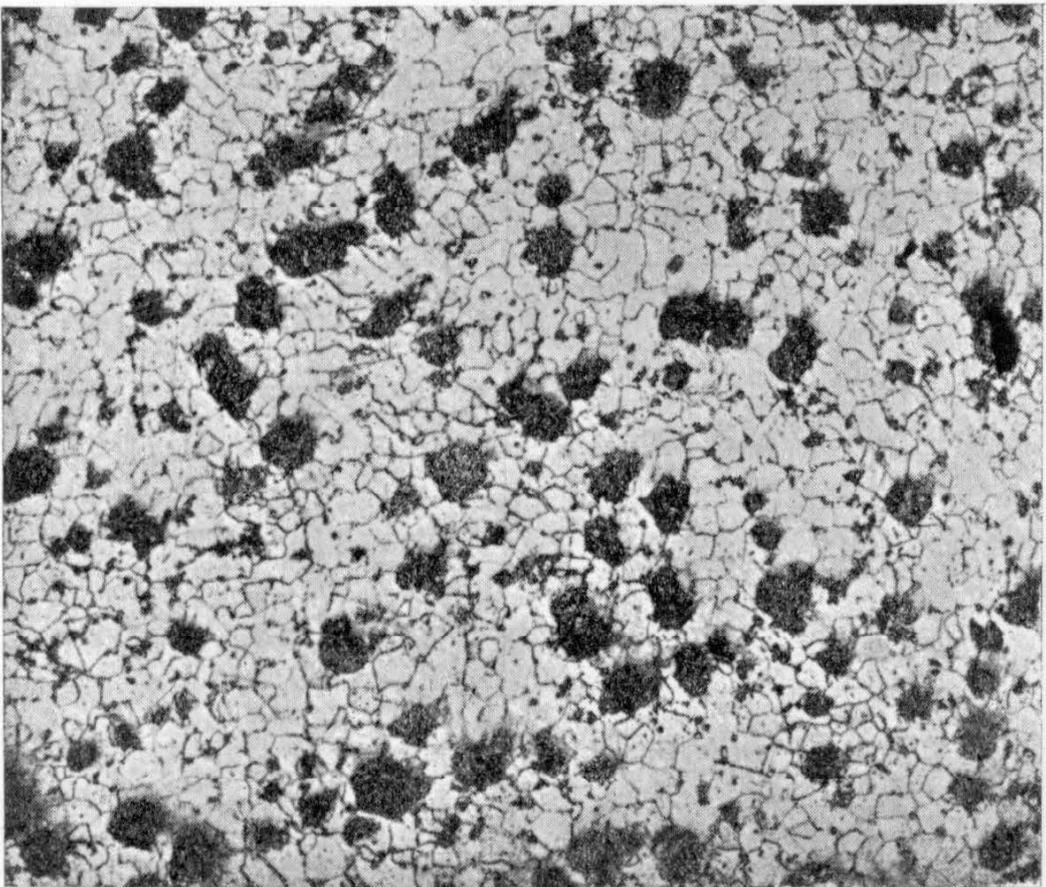


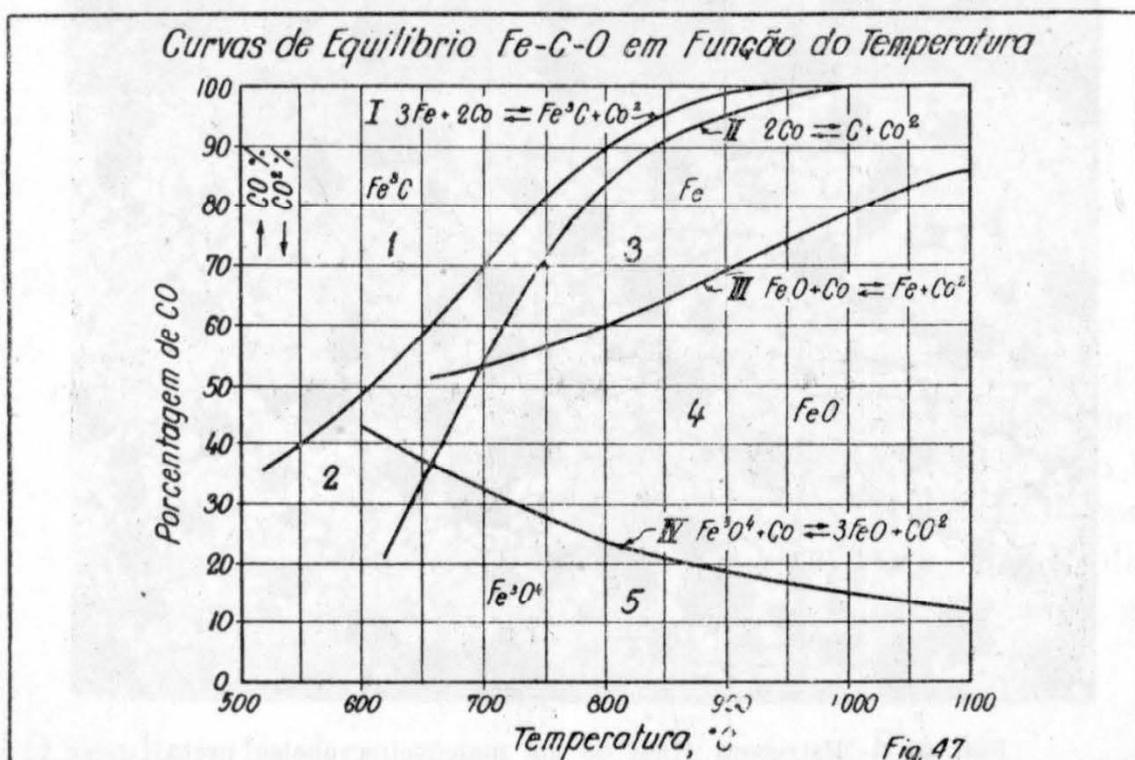
Fig. 46 — Estrutura final de um maleável a nucleo preto

Os núcleos de grafitação se formam sempre na superfície da cementita e a probabilidade de ter um grande número deles aumenta quando a cementita no ferro original é finamente dividida.

Quando um ferro branco é aquecido a 1700° ou 1800°F e rapidamente resfriado, observa-se que a distribuição da cementita não muda mas esta adquire uma granulação muito mais fina. Isto é, há um grande aumento no número de grãos de cementita. Como os núcleos de grafitação se formam nos contornos dos grãos de cementita o pré-aquecimento aumenta muito o número de núcleos que irão aparecer durante a maleabilização. Aumentando o número de núcleos diminui-se o tempo necessário para o recozimento. Isto explica porque o pré-aquecimento encurta o ciclo de maleabilização para um mesmo ferro.

Teoria da descarbonetação.

No processo europeu a maleabilização é obtida principalmente por descarbonetação. O carbono é queimado pelo oxigênio com formação de CO^2 que reage sobre o carbono para dar CO. O equilíbrio seria rapidamente atingido em vaso fechado se não fossem tomadas providências para restituir aos gases que envolvem os moldes o seu poder oxidante. Na prática essa regeneração é feita por meio da adição de um minério de ferro, geralmente a hematita Fe_2O_3 , que, em contato com o CO a alta temperatura perde seu oxigênio regenerando CO_2 . Êste processo de combustão do carbono do ferro pelo CO_2 com formação de CO, regeneração do CO_2 pelo

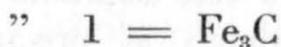
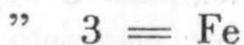
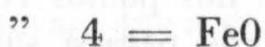
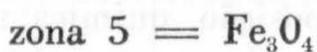


oxigênio do minério prossegue até o desaparecimento quase completo do carbono. Nas peças de pequena espessura a eliminação pode ser completa, mas nas peças de maior espessura isto só seria obtido após aquecimento por demais prolongado.

Para compreender melhor as reações e condições de equilíbrio é necessário estudar as curvas de equilíbrio do ferro, carbono e oxigênio em função da temperatura. Fig. 47.

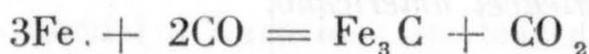
As reações indicadas no diagrama para cada curva se darão da esquerda para a direita quando as condições de temperatura e de composição da mistura gasosa são representadas por um ponto acima da referida curva. Inversamente elas se darão da direita para a esquerda para pontos abaixo da curva.

Os produtos estáveis nas várias zonas são:



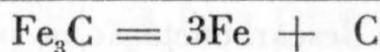
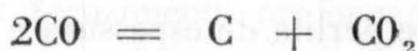
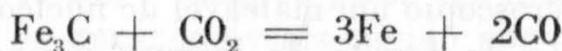
O recozimento do ferro póde ser feito em 3 zonas:

1) Acima da linha I.



Nesta zona um pedaço de ferro absorve carbono por cementação. O equilíbrio porém é rapidamente atingido.

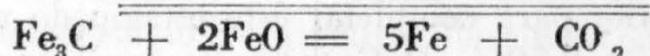
2) Entre as curvas I e II as reações que se produzem são:



Nesta região não se produz pois nem carbonetação nem descarbonetação, mas simplesmente decomposição da cementita em C e Fe.

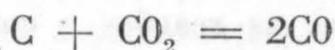
É a região do maleável a núcleo preto.

3) Abaixo da linha II na zona 3:



O OFe, que se origina da hematita a alta temperatura vae oxidar o C da cémentita dando ferrita e CO₂.

Tem-se ainda, mas em menor escala, a oxidação diréta da grafita secundária pelo CO₂.



É na zona 3 que se dá a descarbonetação.

Estas curvas de equilíbrio explicam: 1) o mecanismo da regeneração pelos óxidos de ferro dos gases carregados de CO pela combustão; 2) que o carbono sob forma combinada pode ser oxidado; 3) que sob esta forma êle é mais facilmente eliminado que sob a forma livre.

Admite-se que a ação oxidante dos gases é sobretudo superficial. Sob esta ação a superfície da peça se descarboneta. O núcleo do metal ficando mais rico em carbono, a composição química tende a se igualar por migração do carbono em solução dos pontos ricos para as partes pobres neste elemento. Êste carbono levado para a superfície se acha sujeito à ação dos gases e se oxida por sua vez, enquanto que no âmago a cémentita e depois eventualmente, o carbono já precipitado pelo aquecimento, continua a se dissolver.

Descarbonetação do maleável americano.

Verifica-se na prática que o maleável a núcleo preto sofre uma descarbonetação parcial e que o maleável a núcleo branco sofre uma grafitização parcial.

Observando ao microscópio um maleável de núcleo preto vê-se a partir da superfície uma zona de ferrita de largura variável seguida para o interior de uma zona de perlita de espessura e densidade também variáveis seguida pela estrutura ferro-carbono.

Deve-se considerar a descarbonetação no primeiro estágio (manutenção a alta temperatura) e no seundo estágio (resfriamento lento).

Durante o primeiro estágio a descarbonetação não tem nenhum efeito benéfico. Pelo contrário, ela prolonga o segundo estágio. Algumas considerações mostrarão como isto se dá.

Um ferro de alto teor em carbono é recozido muito mais rapidamente no primeiro estágio que um ferro de baixo teor de carbono. Isto é, um ferro contendo 2,70% de carbono é recozido completamente (primeiro estágio) num tempo curto. Mas se êle tiver 1,70% de carbono necessitará de um tempo muito maior para completar êste estágio do recozimento. Si o núcleo da peça contém 2,70% de C enquanto que a periferia contém

somente 1,70% de C, que é o resultado da descarbonetação durante os estágios iniciais do tratamento térmico, é claro que a periferia da peça não pode ser recozida com a mesma velocidade que o núcleo, e que esta condição se estenderá na direção do centro até um ponto onde o teor de C corresponde à temperatura do limite de crescimento. Se o metal fôr conservado à temperatura por um tempo suficientemente grande para recozer o mais baixo C produzido pela descarbonetação ocorrida então a tempo requerido para o segundo estágio não será afetado.

De um modo geral, na prática, o grau de descarbonetação excede o tempo limite dos ciclos usuais e portanto é levada para o segundo estágio uma película pouco grafitizada que vai requerer um tempo muito longo para recozimento completo. Uma vez que o segundo ciclo usual não é suficientemente longo para contrabalançar isto haverá uma camada de perlita na peça.

Estas considerações provam que a descarbonetação durante a primeira parte do ciclo de recozimento é coisa que deve ser evitada o mais possível uma vez que ela prolonga o tempo total de recozimento.

No fim do primeiro estágio o metal tem uma matriz que contém uma grande porção de C sendo a êste respeito equivalente à um aço de alto carbono.

Na prática comercial o ferro não tem teor de C uniforme desde o interior até a superfície. Usualmente acha-se que o carbono é mais baixo nas partes próximas da periferia.

O carbono poderá ser removido da matriz por grafitização ou por oxidação. É concebível que o carbono possa ser removido das partes periféricas da estrutura de um modo mais rápido por oxidação da superfície do que por grafitização por recozimento prolongado, como o requerido pelas áreas de baixo carbono como foi mostrado. Foram observados casos onde uma camada descarbonetada na peça recozida, consiste de um todo de ferrita envolvendo uma estrutura de perlita que desaparece no núcleo completamente recozido. A explicação disto parece ser que durante o primeiro estágio houve uma forte ação descarbonetante que produziu o que, por recozimento ordinário, seria uma borda de perlita, mas esta borda foi removida da periferia por oxidação durante o segundo estágio. Portanto a perlita restante está localizada profundamente e é inadmissível sob o ponto de vista da trabalhabilidade. Êstes fatos parecem sugerir que seja possível por meio de artifícios escolher uma atmosfera carbonetante durante o primeiro período e ao mesmo tempo bastante descarbonetante durante o segundo estágio para retirar da superfície do metal os efeitos indesejáveis do primeiro estágio incompleto.

No problema do maleável deve sempre ser levada em conta a trabalhabilidade da peça fundida o que é de capital importância. Uma camada profunda de perlita nas peças fundidas tende a embaraçar as ferramentas de corte causando a queima das mesmas e o rachamento do metal. Si a superfície da peça maleável pudesse ser tão facilmente trabalhada como a parte central, teríamos um ótimo resultado sempre desejável. Si na superfície houver também nódulos de grafita como no interior, êstes nódulos funcionarão como lubrificante permitindo uma boa usinagem da ferrita. Um produto dêstes seria certamente um ferro maleável de qualidades superiores. Para produzir metal com estas características é necessário evitar todos os traços de descarbonetação durante o primeiro estágio de recozimento. Isto é impossível empregando seja qual fôr o material de enchimento. Qualquer material, livre dos óxidos de ferro, absorverá oxigênio suficiente para retirar carbono da superfície das peças. O único meio conhecido para fazer isto é o emprêgo de atmosfera especialmente preparada para êste fim. Para evitar a descarbonetação do ferro deve-se usar atmosfera carbonetante. Há porém limitações práticas a êste emprêgo.

Depois do ferro ter atingido a mais alta temperatura, a grafitização do carbono combinado se dá rapidamente e, portanto, depois de pouco tempo o carbono da matriz é muito reduzido. Quando estas reações se dão em presença de uma atmosfera rica em hidrocarbonetos, virá um momento em que ela cessa de ser unicamente protetora, no sentido de não permitir a perda de carbono do metal, e começará a carbonetar o ferro particularmente quando a quantidade de carbono da matriz torna-se muito baixa de modo a permitir que a reação prossiga. Si essa atmosfera fôr mantida durante todo o primeiro estágio de recozimento, as superfícies da peça poderão ficar com uma capa de metal carbonetado de uma forma tal que impossibilite a grafitização. Êste fato deve ser reconhecido como uma limitação importante no emprêgo dos hidrocarbonetos ou gases similares como atmosferas protetoras. Na prática êste inconveniente é facilmente contornado. Se o fluxo dêstes gases fôr contínuo desde o momento em que o metal atingiu a temperatura máxima por um período de 2 horas mais ou menos, não haverá nenhum efeito nefasto e êste tempo é suficiente para proteger a peça contra qualquer descarbonetação. Isto reterá o carbono original na superfície do metal.

Quando isto fôr feito se terá como resultado um tempo necessário para o primeiro estágio muito reduzido e um metal que responderá mais rapidamente ao segundo período de recozimento, resultando um tempo total de recozimento muito inferior ao empregado normalmente.

4 — CICLOS DE RECOZIMENTO

Deve-se distinguir, segundo o tipo de ferro a maleabilizar, os recozimentos para maleável a núcleo branco e para maleável a núcleo preto.

Na Europa é o processo descarbonetante quase que o único empregado sendo por isto o maleável a núcleo branco chamado de maleável europeu.

Na América do Norte emprega-se o recozimento grafitizante, donde o nome de maleável americano dado ao de núcleo preto. Será visto primeiro o recozimento do maleável europeu.

Como durante o recozimento procura-se descarbonetar as peças, é evidente que as peças finas serão mais rapidamente descarbonetadas que as peças grossas e que a duração do recozimento deverá ser tanto mais longa quanto mais espessas forem as peças. Como a maior parte das fundições não fabrica unicamente peças da mesma espessura, elas são obrigadas a fazer funcionar os seus fornos segundo ciclos diversos conforme a espessura das peças. É por isto que as peças fundidas são divididas em 3 grupos: finas, médias e espessas, tendo cada uma delas um ciclo de recozimento próprio.

Para a composição dada, para peças finas de espessura de 4 a 8mm são necessárias apenas 38 horas à temperatura de 950°C. Tem-se então o ciclo I, fig. 48.

Para peças médias de 8 a 10 mm de espessura a temperatura à atingir deve ser de cerca de 980°C e o aquecimento deve ser mantido durante 62 horas. Ciclo II, fig. 49.

Para peças espessas de 15 a 25 mm a temperatura seria de 1000°C durante 96 horas ou mais. Ciclo III, fig. 50.

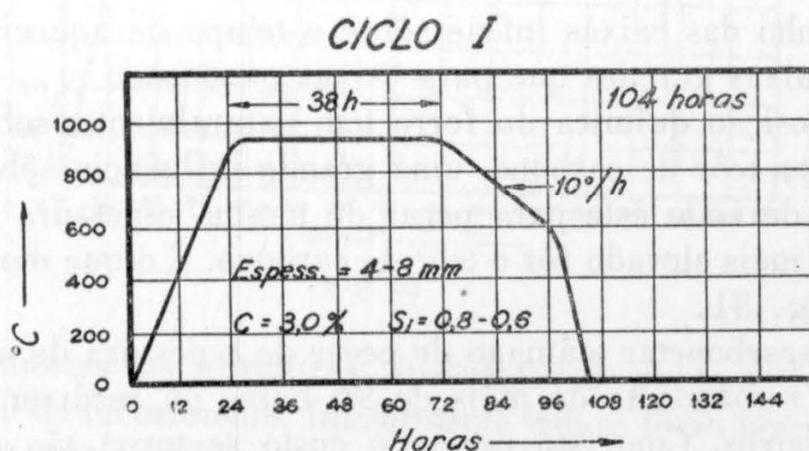


Fig. 48

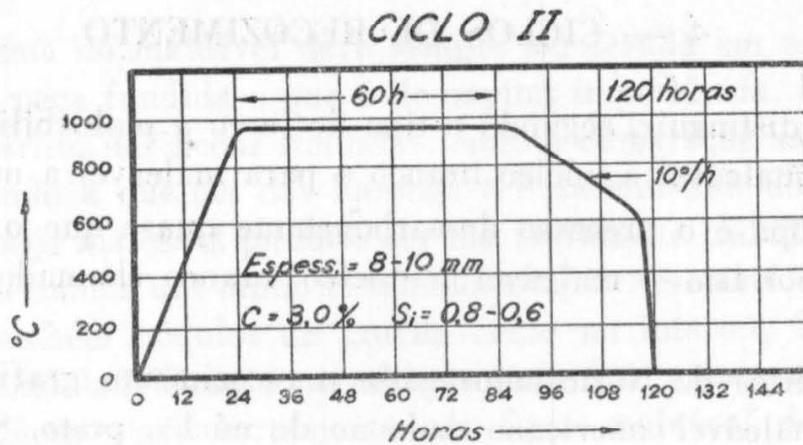


Fig. 49

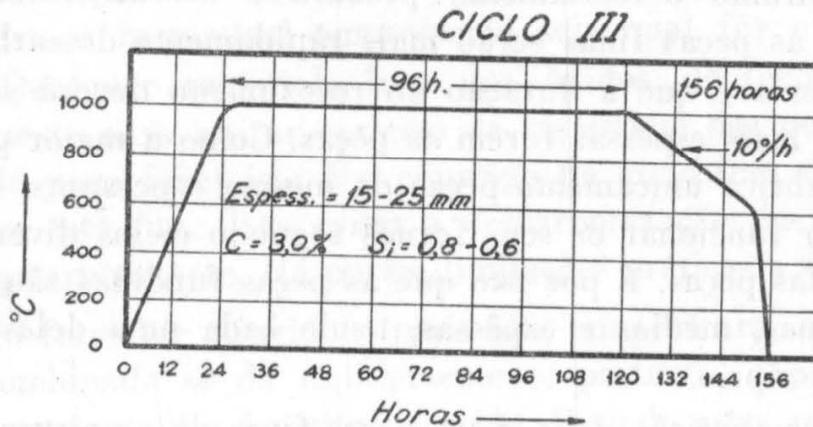


Fig. 50

A temperatura máxima de 1000° não deve ser ultrapassada pois com isto aumenta o perigo de incidentes de fabricação. O material de enchimento contém constituintes que fundem a 1000° aderindo à superfície das peças donde só poderá ser retirado com grande trabalho. Enfim o desgaste das caixas de recozimento aumenta rapidamente com a temperatura, de modo que o recozimento a alta temperatura é mais caro, mesmo não considerando o consumo de combustível.

O tamanho das caixas influe sobre o tempo de aquecimento. É mais longo para caixas grandes que para caixas pequenas.

A composição química do ferro tem naturalmente, sobretudo no que diz respeito ao teor de carbono, uma grande influência sobre o tempo de recozimento, devendo este para peças de mesma espessura ser tanto mais longo quanto mais elevado for o teor de carbono. É o que mostram os ciclos IV, V, VI, fig. 51.

Para descarbonetar o âmago de peças de espessura de mais de 20 mm é necessário recozimento de mais de 96 horas ou recorrer a dois recozimentos sucessivos. Com isto porém o custo se torna tão elevado que o processo oxidante não tem mais interesse.

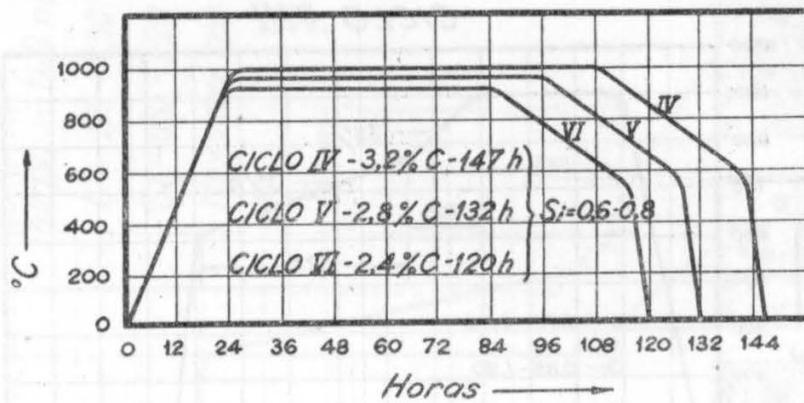


Fig. 51

Para o ferro maleável de núcleo preto o ciclo apresenta um aspecto bem diferente.

Inicialmente temia-se que um resfriamento rápido desde 950° até 750° pudesse dar martensita. Por isto os primeiros ciclos tinham o aspecto do ciclo VII, fig. 52. Consiste em: aquecimento até 900°; manutenção a essa temperatura durante cêrca de 36 a 40 horas; resfriamento lento a razão de 6° a 3° por hora até 600 a 650°C.

Verificou-se depois que a martensita só se forma quando a velocidade de resfriamento fôr muito grande, além dos limites práticos. Pude-se então modificar o ciclo.

Atualmente nas indústrias americanas emprega-se o ciclo VIII fig. 53.

CICLO VII

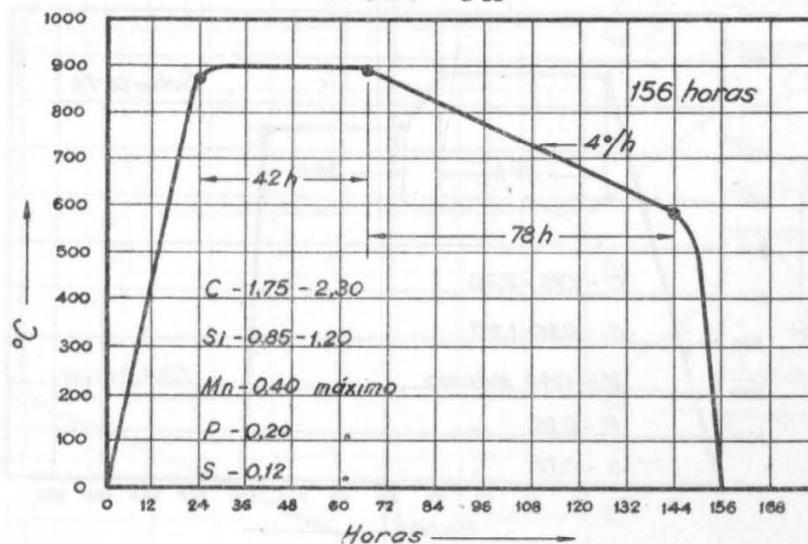


Fig. 52

A fig. 54 mostra as estruturas apresentadas por um ferro branco durante êste ciclo de recozimento. Inicialmente tem-se ferro branco formado de perlita e cementita. Elevando-se a temperatura logo acima de 721° começam a se formar áreas de austenita e a 950° tem-se cementita e grandes

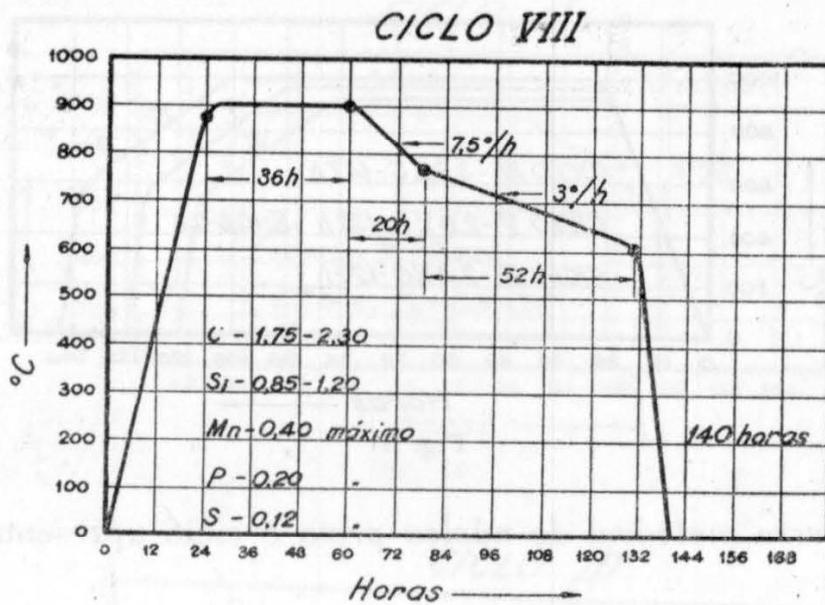


Fig. 53

áreas de austenita. Mantendo durante algum tempo a temperatura de 950° a cementita se decompõe. Tem-se então unicamente cristais de austenita com nódulos de grafita. Pelo resfriamento rápido a austenita liberta seu carbono e no fim deste período encontra-se austenita com 0,7 de C e nódulos de grafita. Pelo resfriamento lento através da zona crítica tem-se a princípio ferrita, perlita e grafita e finalmente somente ferrita e grafita. De 600° até a temperatura ambiente não há modificação de estrutura.

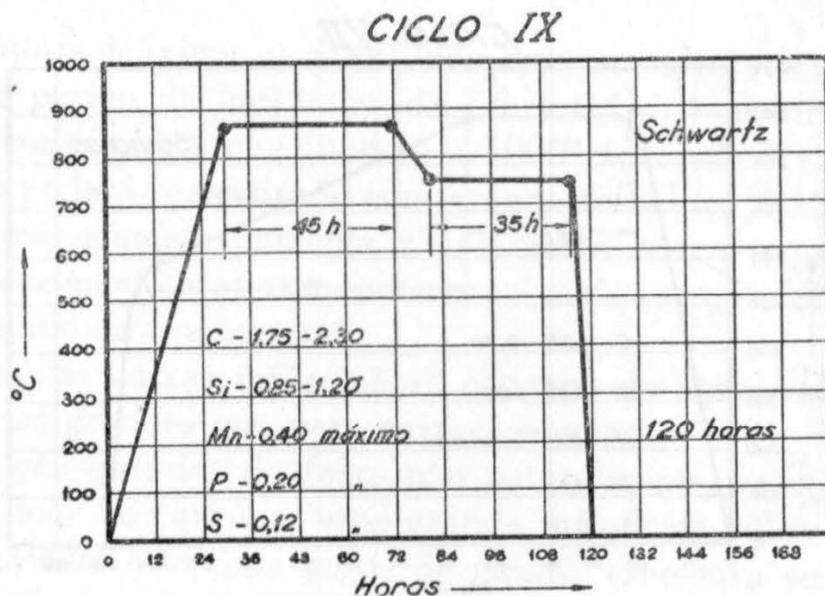


Fig. 54

O especialista americano Schwartz indica para recozimento o ciclo IX, fig. 55. Consiste: elevação da temperatura durante 30 horas até atingir 870° ; retenção a esta temperatura durante 45 horas; retirada do material do forno e colocação em outro a temperatura mais baixa, 750° ; retenção a

CICLO DE RECOZIMENTO PARA MALEÁVEL TIPO AMERICANO

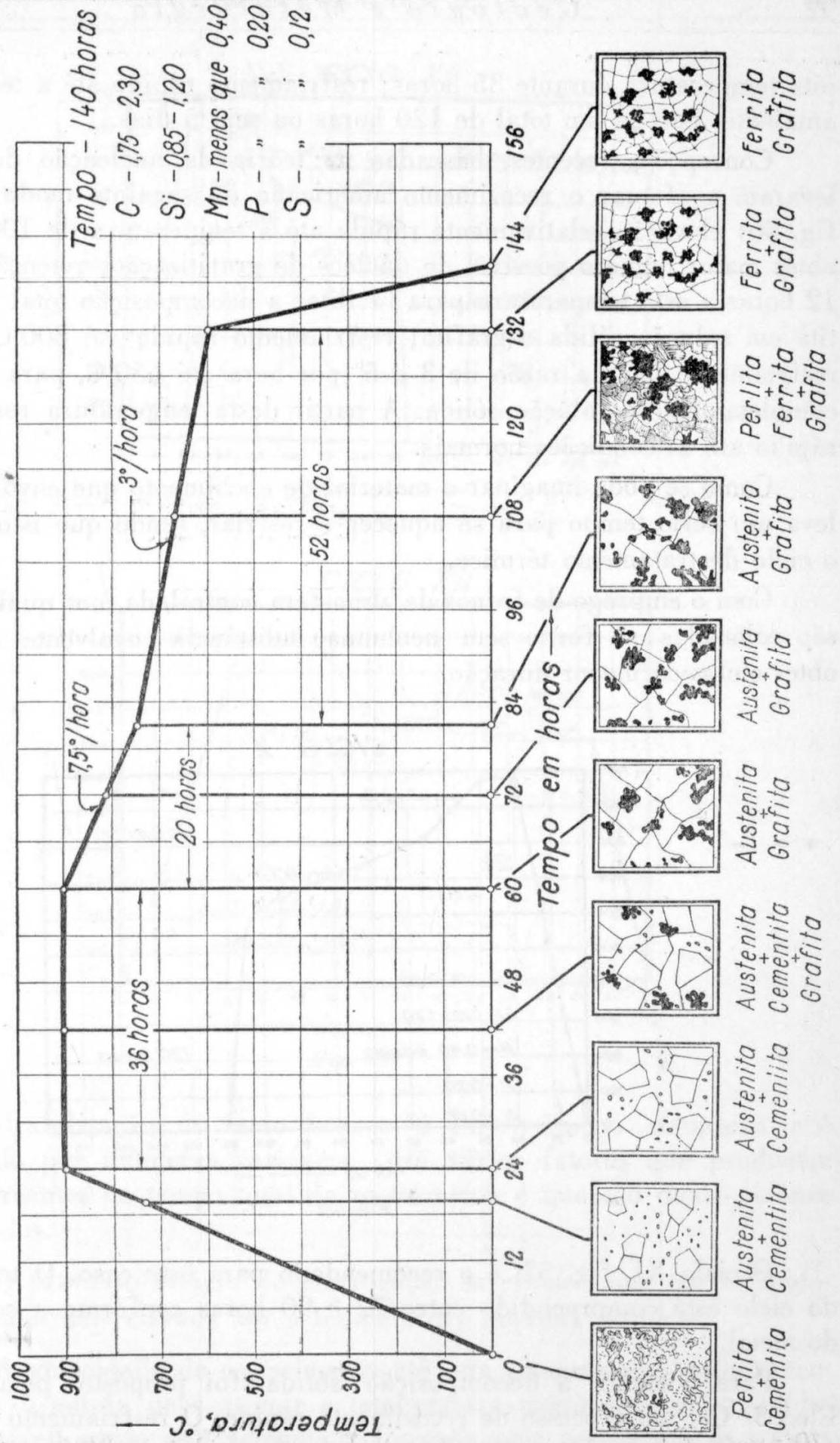


Fig. 55

esta temperatura durante 35 horas; resfriamento rápido até a temperatura ambiente. Isto dá um total de 120 horas ou seja 5 dias.

Concepções recentes, baseadas na teoria da nucleação de Tamann levaram a efetuar o recozimento americano do seguinte modo: ciclo X, fig. 56: elevação relativamente rápida até a temperatura de 1000°C para obter maior número possível de núcleos de grafitização; retenção durante 12 horas a esta temperatura para facilitar a decomposição total da cemen-tita em solução sólida e grafita; resfriamento rápido até 800°C e depois resfriamento lento a razão de 3 a 5° por hora até 650°C, para decompôr completamente a solução sólida. A partir desta temperatura resfriamento rápido até as condições normais.

Como se pode imaginar o material de enchimento que envolve a peça leva um certo tempo para se aquecer e resfriar, sendo que isto prolonga o ciclo de tratamento térmico.

Com o emprêgo de fornos de atmosfera controlada, nos quais as peças são colocadas no forno sem nenhuma substância envolvente é possível obter ciclos de menor duração.

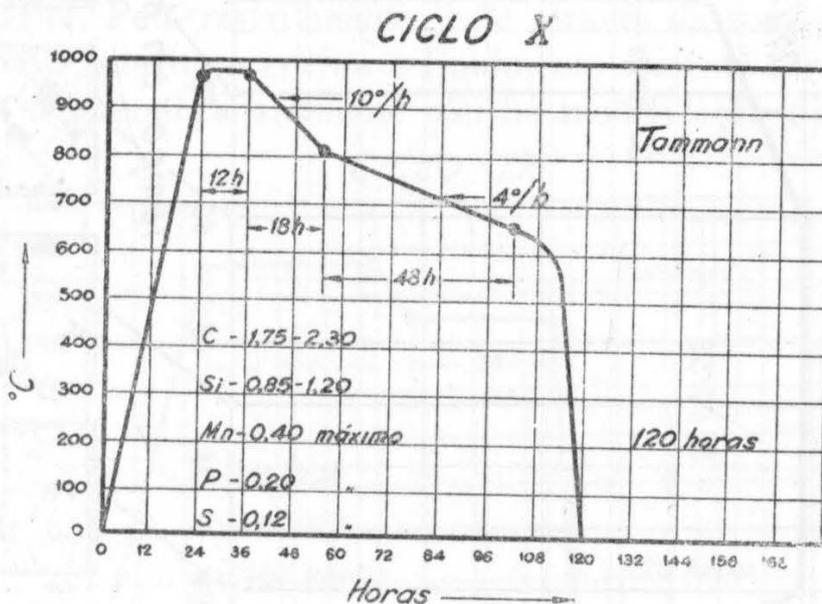


Fig. 56

O ciclo XI, fig. 57, é o recomendado para êste caso. O tempo total do ciclo está compreendido entre 72 e 90 horas conforme a composição do metal.

Para acelerar a decomposição sólida foi proposto pela General Electric Co. um processo de recozimento rápido. O resfriamento no campo perlítico é feito em 2 patamares. A duração total é de 30 horas. É o que nos mostra o ciclo XII, fig. 58.

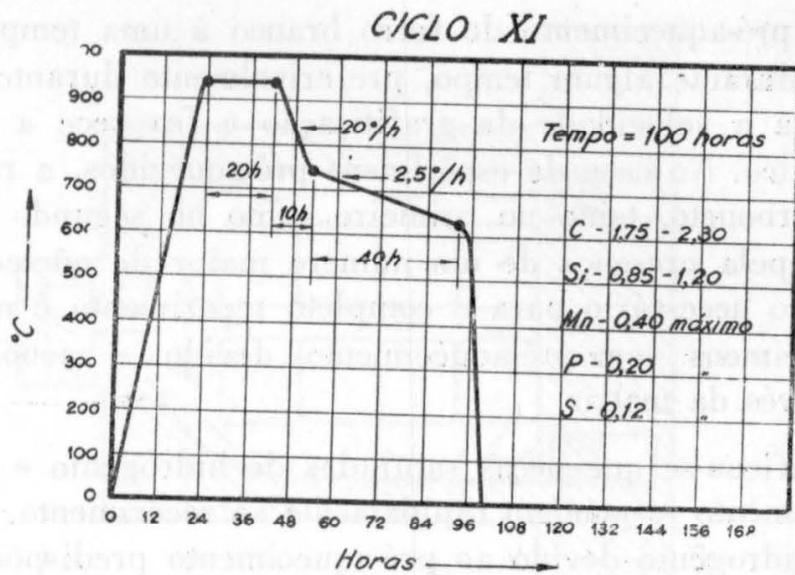


Fig. 57

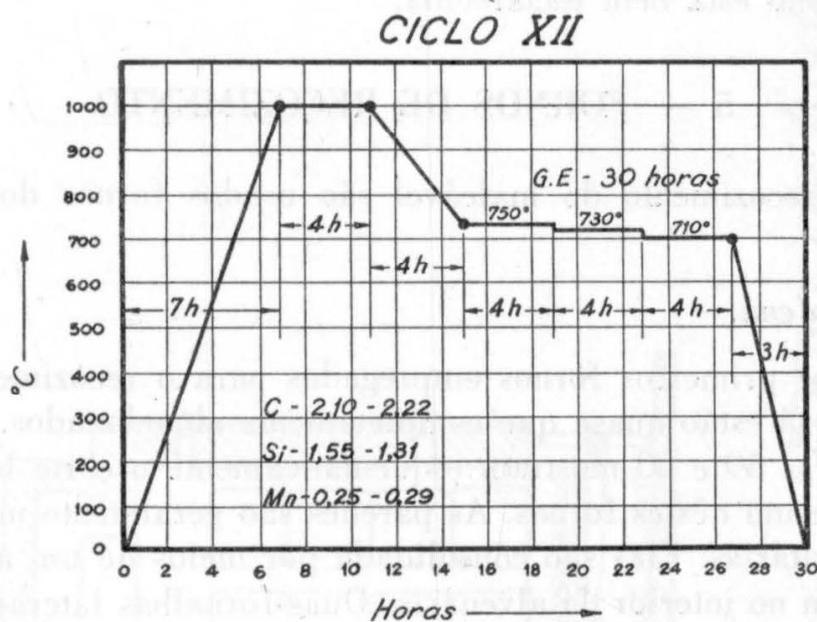


Fig. 58

A maleabilização do ferro branco é um fenômeno complexo e é influenciado por inúmeras variáveis. Há vários fatores que produzem efeitos marcantes no tempo total de recozimento e que são quase sempre desconhecidos.

a) O primeiro estágio de grafitização se efetua tanto mais rapidamente quanto mais elevada fôr a temperatura máxima do ciclo.

b) A velocidade de aquecimento até esta temperatura também tem influência. A estufa deve atingir a temperatura máxima o mais rapidamente possível, sendo esta velocidade limitada pela resistência às trincas da caixa e das peças.

c) Um pré-aquecimento do ferro branco à uma temperatura entre 600 e 750°F durante algum tempo, preferivelmente durante mais de 10 horas, aumenta a velocidade de grafitização e favorece a formação de carbono grafítico. No caso de espécimens pré-aquecidos, a rápida decomposição do carboneto, tanto no primeiro como no segundo estágio pode ser explicada pela presença de um número maior de núcleos de grafitização. O tempo necessário para o completo recozimento é menor que no caso de espécimens sem pré-aquecimento devido a menor distância a percorrer através da matriz.

d) Verificou-se que peças saturadas de hidrogênio e submetidas a um pré-aquecimento respondem rapidamente ao recozimento. Supõe-se que o escape de hidrogênio devido ao pré-aquecimento predispõe a formação de um número maior de núcleos de grafitização. Esta influência do hidrogênio ainda não está bem esclarecida.

5 — FORNOS DE RECOZIMENTO

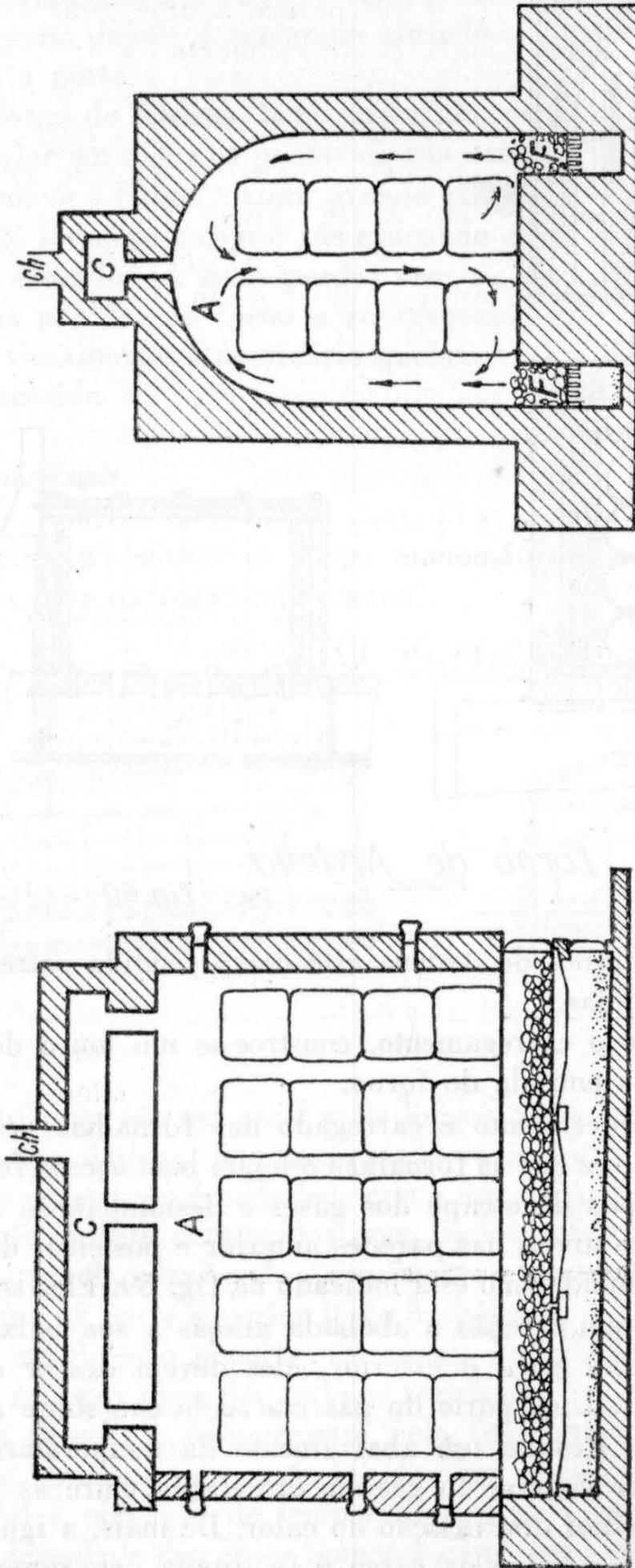
Para o recozimento do maleável são usados fornos dos tipos mais variados.

Forno de Ardena.

Foram os primeiros fornos empregados para o recozimento do ferro branco. Hoje já estão quase que completamente abandonados.

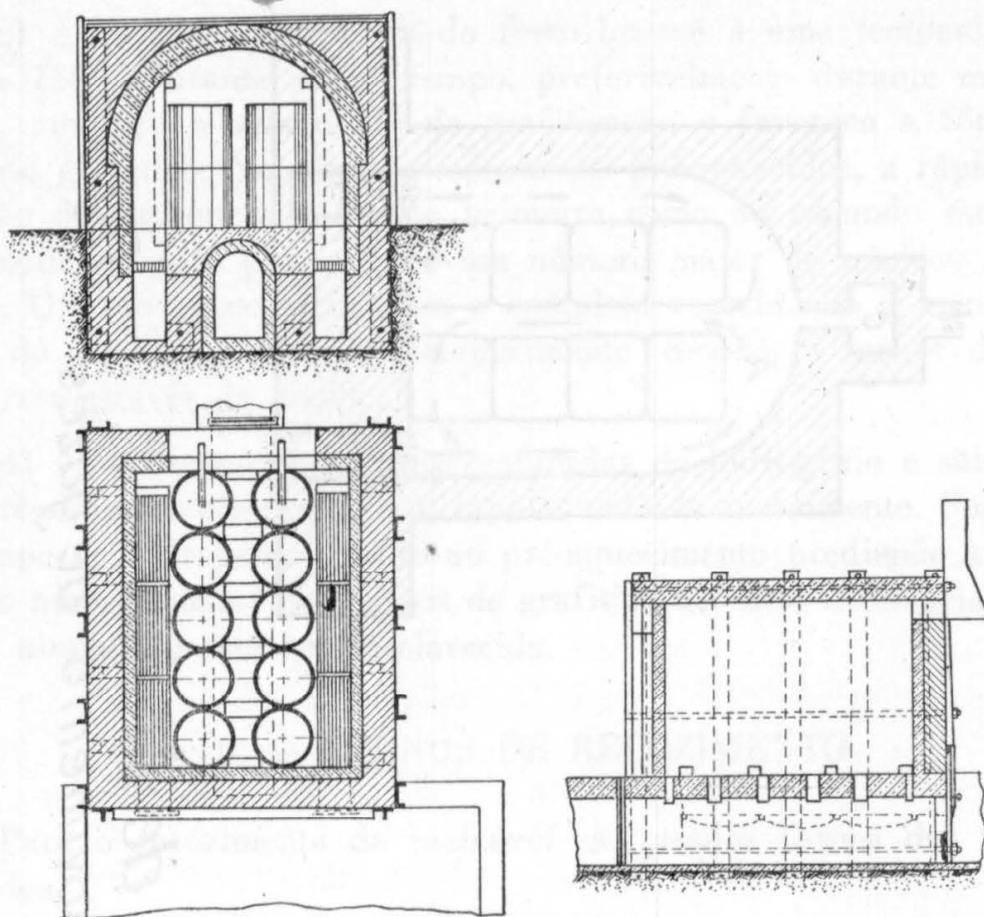
As figuras 59 e 60 mostram esquematicamente o corte longitudinal e transversal de um destes fornos. As paredes são geralmente muito espessas mas não refratárias. Elas são consolidada por meios de um a armação de ferro colocada no interior da alvenária. Duas fornalhas laterais com grelha atravessam a câmara de aquecimento A em toda sua extensão. Elas estão colocadas abaixo do nível da sola. Acima da abóbada uma câmara C serve para o escape dos gases queimados.

As peças são colocadas no interior do forno, com uma mistura em proporções convenientes de hematitas novas e usadas, em potes de ferro fundido que são em seguida cuidadosamente fechados com argila ou areia. As pilhas, de quatro ou cinco potes, têm raramente uma altura inferior a 2 metros. Os potes são redondos, quadrados ou retangulares. Os potes redondos se deformam menos facilmente a quente; os quadrados ou retangulares apresentam, para um volume dado, uma superfície de aquecimento maior. Como a transmissão de calor por condução através do material de enchimento é relativamente lenta, há interesse, quando se deseja diminuir o tempo de recozimento, em não empregar caixas de dimensões exageradas.



Forno de Ardena
Esquema do movimento de gases

Fig. 59



Forno de Ardena

Fig. 60

A capacidade dos fornos de Ardena está compreendida entre 5 e 12 toneladas de peças fundidas.

Uma vez terminado o carregamento, constroem-se um muro de tijolos refratários para fechar a entrada do forno.

O coque para o aquecimento é carregado nas fornalhas pela parte posterior do forno. Uma vez que as fornalhas estejam bem acesas fecham-se progressivamente os canais de escape dos gases e destampam-se as aberturas feitas em diferentes níveis nas paredes anterior e posterior do forno.

Os gases circulam então como está indicado na fig. 59. Eles se elevam a princípio diretamente em direção à abóbada graças a sua baixa densidade. Depois para escapar para o exterior, eles devem descer entre as pilhas cedendo seu calor. Uma parte do gás resfriado cae sobre a sola e se dilue por combustão. Resulta um abaixamento da temperatura sob a abóbada, um aumento de volume do gás em circulação entre as pilhas e por conseguinte, uma melhor distribuição do calor. De mais, a igualização das temperaturas de alto a baixo da carga é facilitada pelo aquecimento direto dos potes inferiores por radiação e condução do calor das fornalhas.

O resfriamento até 700°C é feito geralmente com as portas fechadas. O resfriamento depois é acelerado abrindo-se tôdas as aberturas e depois demolindo a porta.

Um forno de Ardena, bem conduzido, permite obter um aquecimento muito regular em todos os pontos de sua carga. Por outro lado, seu rendimento térmico é baixo. Uma grande parte das calorias disponíveis no combustível se perdem com o gás evacuado cujos calores sensível e latente são muito elevados. A estas perdas vem se juntar as devidas à condução através das paredes do forno e ao reaquecimento destas paredes a cada operação. Geralmente é necessário queimar 1 kg. de coque para cada kg. de peça recozida.

Forno Americano

A figura 61 mostra os cortes esquemáticos de um forno americano com grelha para carregamento manual.

Forno Americano (Carvão)

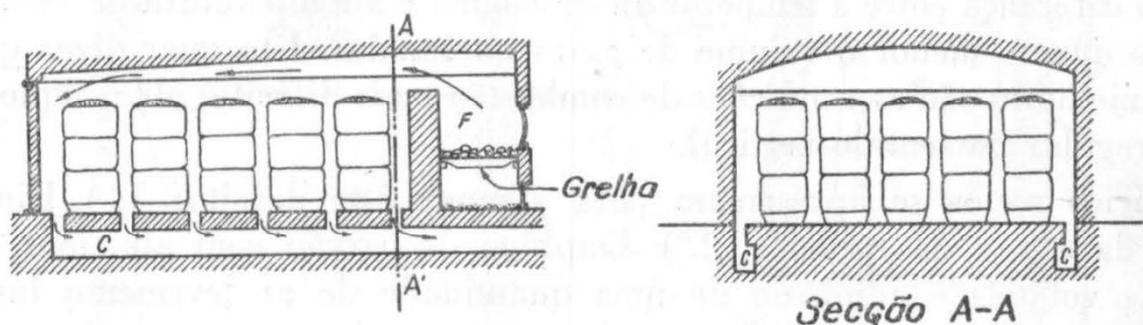


Fig. 61

Êstes fornos são em geral mais longos, mais largos e menos altos que os fornos tipo Ardena. Sua capacidade varia entre 20 e 40 toneladas de peças. Sua construção é mais leve que a dos de Ardena. Os mais modernos são cuidadosamente construídos com tijolos refratários. A fornalha está colocada atrás da câmara de aquecimento e comunica com esta por meio de aberturas na parte superior junto à abóbada. A abóbada é ligeiramente inclinada em direção a porta. Os canais de evacuação dos gases desembocam na sola por meio de orifícios reguláveis.

Êstes fornos se caracterizam pelo fato que a circulação dos gases queimados através da carga se faz de cima para baixo. Demonstra-se que é favorável a obtenção de temperaturas iguais no sentido horizontal do forno. A densidade dos gases aumenta com efeito quando sua temperatura abaixa.

Sejam A,B,C, três pilhas de potes vizinhos dentro de um forno; I e I' os intervalos entre estas pilhas. Si num momento dado, a temperatura média dos gases em I é inferior a do gás em I', êstes gases mais pesados, descerão mais rapidamente em direção a sola. Por unidade de tempo e de seção, a vazão dos gases quentes em I será maior que a vazão correspondente em I'; uma maior quantidade de calor será cedida por convenção às superfícies que envolvem I e se transmitirá por condução à carga dos potes. Esta ação continuará até a igualização das temperaturas I e I'.

Teòricamente, portanto, num forno aquecido por circulação de gás do alto para baixo as temperaturas tendem a se igualizar no sentido horizontal.

No sentido vertical é impossível realizar, nestes fornos, a igualização da temperatura. A parte superior das pilhas, em contato dirêto com a chama, tende a atingir a temperatura desta, muito superior à temperatura de recozimento desejada. Os potes inferiores, aquecidos pelos gases parcialmente resfriados e por condução lenta do calor dos potes superiores através da carga, não podem alcançar uma temperatura tão elevada como os potes superiores. Esta diferença de temperatura é tanto mais importante quanto maior a diferença entre a temperatura da chama e a temperatura de recozimento e quanto menor o volume de gases queimados. Isto quer dizer que quanto melhores são as condições de combustão mais difícil é obter aquecimento regular no sentido vertical.

Vários meios se apresentam para atenuar êste defeito: 1.º) Diminuição da altura das pilhas. 2.º) Emprêgo de carvão com alto teôr de matérias voláteis e admissão de uma quantidade de ar levemente insuficiente. A temperatura da chama abaixa e a combustão lenta prossegue no meio da carga. Teremos com isto um fraco rendimento térmico. 3.º) Admissão de um grande excesso de ar. A temperatura de combustão permanece muito elevada. O volume gasoso aumentando a transmissão de calor por convenção é facilitada. Com isto corre-se o risco de oxidar as caixas. 4.º) Aumento do volume gasoso e baixamento da temperatura da chama por mistura do ar de combustão com gases inertes. Êste processo deu notáveis resultados. 5.º) Por mistura dos produtos de combustão com uma parte dos gases frios no interior do próprio forno.

Os fornos americanos podem também ser aquecidos a óleo e a carvão pulverizado. Neste caso deve-se ter um injetor que estará colocado na parte posterior do forno e junto a abóbada.

A figura 62 mostra o esquema de um dêstes fornos.

Ultimamente vem tomando grande impulso os fornos de *sola móvel*.

A figura 63 mostra um esquema dêste tipo de forno.

Forno Americano (Oleo)

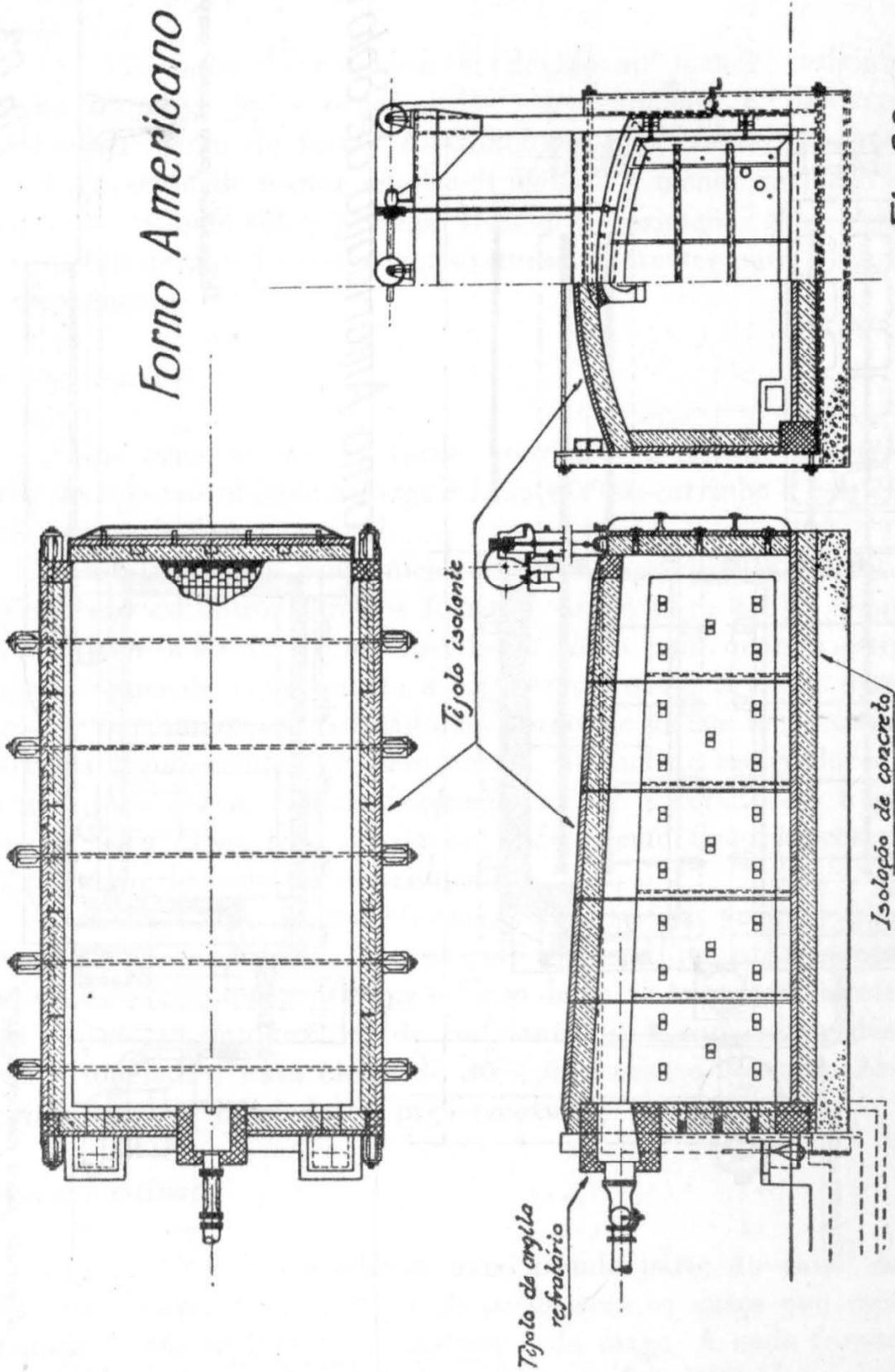


Fig. 62

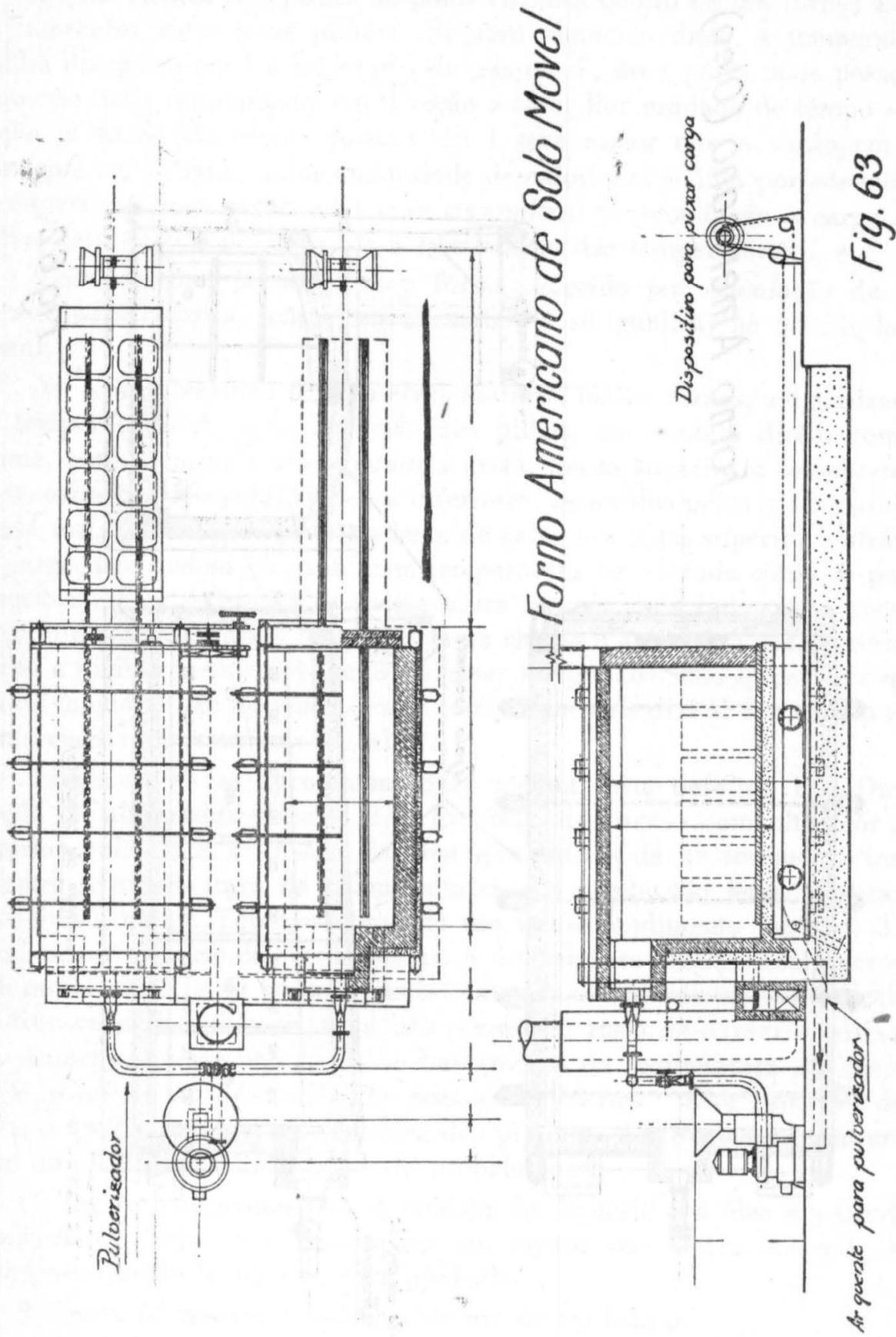


Fig. 63

Com êste sistema a retirada do forno pode ser efetuada logo que a grafitização esteja terminada a 650°C. Si se dispuser de várias plataformas, o forno pode imediatamente ser recarregado.

Êste tipo de forno apresenta as seguintes vantagens sôbre os fornos de *sola fixa*.

- 1) Economia de combustível devido ao menor resfriamento das paredes durante as operações de carregamento e descarregamento.
- 2) Fadiga menor do forno. As dilatações e as contrações sucessivas da construção serão de menor amplitude devido à menor variação de temperatura.
- 3) Ganho sôbre o tempo total de recozimento.
- 4) Possibilidade de emprêgo de dois fornos a temperaturas diferentes para os dois estágios de recozimento.

Fornos elétricos

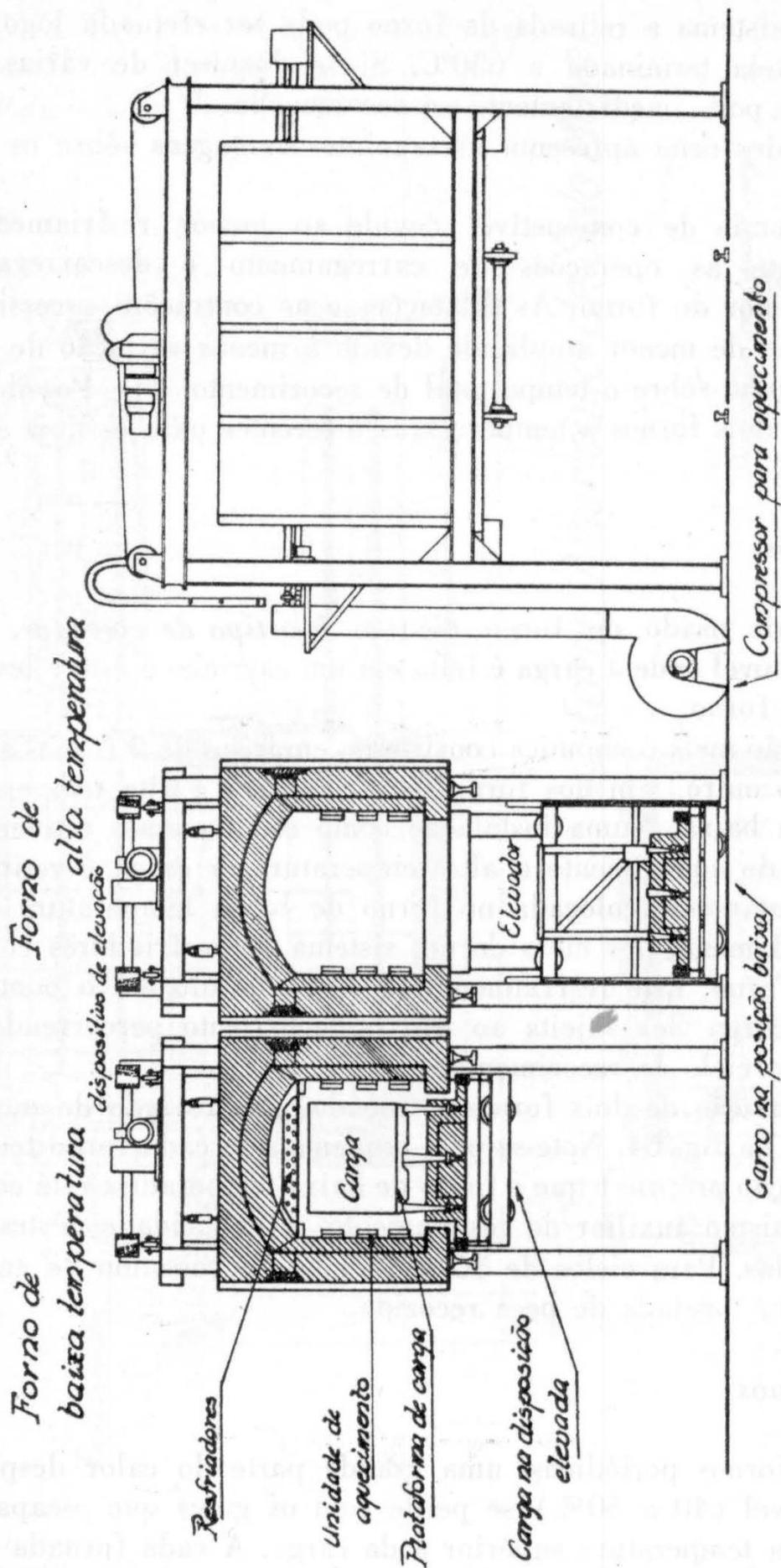
O tipo mais usado de forno elétrico é o *tipo de elevador*. É um forno de *sola* móvel onde a carga é feita em um carrinho e êste é levantado para dentro do forno.

A instalação mais econômica consiste no emprêgo de 2 fornos situados um ao lado do outro. Um dos fornos é usado para a alta temperatura e o outro para a baixa. Numa instalação como esta, quando estiver terminado o tempo de aquecimento a alta temperatura, a carga é retirada do forno e imediatamente colocada no forno de baixa temperatura onde é resfriada rapidamente por meio de um sistema de resfriadores colocados no teto dêste forno. Êste resfriamento rápido é levado até o ponto desejado e daí a carga fica sujeita ao resfriamento lento percorrendo então o 2.º estágio do ciclo de recozimento.

Uma instalação de dois fornos, colocados um ao lado do outro está esquematizada na fig. 64. Note-se pelo esquema que cada forno tem o seu motor de elevação próprio e que o forno de baixa temperatura está equipado com um mecanismo auxiliar de resfriamento. A capacidade dêstes fornos é de 3 toneladas. Para ciclos de 36 a 42 horas o consumo de energia é de 400 kwh por tonelada de peça recozida.

Fornos contínuos

Com os fornos periódicos, uma grande parte do calor despreendido pelo combustível (40 a 50%) se perde com os gases que escapam pela chaminé a uma temperatura superior a da carga. A cada fornada o aquecimento do revestimento absorve inutilmente 5 a 10% das calorias produzidas. As variações contínuas de temperatura provocam dilatações e



Fornos Elétricos Conjugados

Fig. 64

contrações alternadas de tôda a estrutura do forno o que provoca avarias que exigem constantes reparações. Com o forno em tunel de funcionamento contínuo pode-se evitar êstes inconvenientes, permitindo ainda manter o ciclo de um modo mais constante.

Um forno dêste tipo compreende geralmente:

1.º) Uma câmara de introdução, destinada a impedir a entrada de ar frio no forno. Ela tem duas portas, uma comunica com o exterior e a outra com o interior do forno. Em intervalos regulares, um dos vagonetes sôbre os quais estão empilhados os potes é colocado nesta anticâmara e depois empurrado para dentro do tunel por meio de um pistão movido hidraulicamente. 2.º) Uma zona de pré-aquecimento, na qual os gases queimados circulam em sentido inverso dos vagonetes, cedendo à carga uma grande parte do seu calor antes de sair pela chaminé. 3.º) Uma zona de aquecimento. 4.º) Uma zona de resfriamento. Nesta última zona consegue-se acelerar a queda de temperatura fazendo circular ar nas paredes do forno. Algumas vêzes empregam-se maçaricos auxiliares para interromper esta queda de temperatura si necessário.

Os fornos tunel mais conhecidos são os *fornos Dressler*.

Outro tipo de forno contínuo muito usado é o *elétrico*.

A carga é colocada em carrinhos. Êstes carrinhos entram na câmara de alta temperatura. Temos unidades de aquecimento no teto e no fundo desta zona. Vem em seguida a zona de resfriamento rápido com seus tubos de resfriamento. Tem a seguir a câmara de baixa temperatura, a câmara de resfriamento e a porta de descarga.

Há ainda tipos de fornos contínuos intermediários entre os dois vistos. São parcialmente elétricos e parcialmente a gás. Geralmente a câmara de pré-aquecimento é aquecida a gás, e o resto é aquecido eletricamente.

Além das vantagens já vistas, os fornos contínuos permitem diminuir a mão de obra e aumentar muito a vida dos potes.

BIBLIOGRAFIA

- 1) *Tratado de la fundicion del hierro y del acero.*
por Bernardo Osann
Editora Gustavo Gili — Barcelona — 1926
- 2) *La Malléable*
por Maurice Leroyer
- 3) *La Fonte Malléable*
por E. Schüz e R. Stotz
- 4) *Le recuit de la fonte Malléable a coeur noir*
por G. Mazzoni
Rev. Fond. Mod. 1931 — pg. 490

- 5) *The malleablization of white cast iron*
por R. Schneidewind e A. E. White
Publicado por: Department of engineering Research University of Michigan
Ann Arbor — Agosto de 1933
- 6) *A Contribution to the Study of Fluidity of Cast Iron*
Transactions of the American Foundrymen's
Association — Vol. XLII — 1934 — pg. 589
- 7) *The heat treatment of Malleable Iron*
por R. J. Cawan
Transactions A. F. A. — 1940 — pg. 283
- 8) *Atmospheric Pressure and the Steel Casting. A New Technique in Gating and Riserling.*
por Howard F. Taylor e Edward A. Rominsky
Transactions A. F. A. — Vol. 50 n.º 1 — pg. 215.
- 9) *Malleable Casting*
por Hyman Borsntein
- 10) *The Principles of graphitization*
por H. A. Schwartz
Transactions A. F. A. — Julho de 1942 — pg. 1
- 11) *Periodic Malleable Annealing Furnaces*
por W. R. Bean e W. R. Jaesehké
Transactions A. F. A. — Julho de 1942 — pg. 39.
- 12) *Some effects of hydrogen on the time of malleablization*
por C. H. Larig e M. Samuels
Transactions A. F. A. — Julho de 1942 — pg. 107.
- 13) *Modern Core Practice and Theories*
por H. W. Dietert
- 14) *Atmosphere and the annealing of malleable iron*
por R. J. Cawan
Transactions A. F. A. — Julho de 1942 — pg. 95
- 15) *Factors Influencing the Fluidity of Cast Iron*
por G. Burges
Foundry Trade Journal — 11 de Março de 1943
- 16) *Some Aspectos of the Production of Malleable Iron Castings*
Foundry Trade Journal — 26 de Agosto de 1943 — pg. 341
por J. Roxburgh.
- 17) *Melting Malleable Iron with Oil in the Air Furnace*
por A. Van Lantschoot
Transactions A. F. A. — Vol. 51 n.º 2
- 18) *Cupola-Electric Furnace Duplexing of Malleable Iron*
por Charles Morrison
Transactions A. F. A. — Vol. 51 n.º 2
- 19) *Melting Cupola Malleable Iron*
por H. W. Moack
Transactions A. F. A. 1943 — pg. 377
- 20) *Measuring and Controlling Pouring Temperatures and Fluidity*
por Carl F. Joseph
Transactions A. F. A. — Vol. 53

- 21) *The Cast Metals Handbook...*
Edição de 1944
Publicado por American Foundrymen's Association
- 22) *Gating Malleable Castings*
por D. E. Dobson
Transactions A. F. A. — Vol. 52 pg. 632 — 1944
- 23) *Gating and Feeding of Malleable Iron Castings*
por A. T. Jeffery
Transactions A. F. A. — Vol. 52 — pg. 623 — 1944
- 24) *Heading and Gating Malleable Castings*
por E. F. Waterbor
Transactions A. F. A. — Vol. 52 — pg. 643 — 1944
- 25) *Gates and Risers for Castings*
por Pat Dwyer
Cleveland — 1945
- 26) *The sand in your foundry*
por H. W. Dietert
Editado por: Dietert, Company, Michigan — 1945
- 27) *Ferrous Metallurgy. — Volume I*
por Ernest J. Teichert.