

A TÉCNICA DA FUSÃO DO COBRE PARA PEÇAS FUNDIDAS ⁽¹⁾

ISAAC BEREZIN ⁽²⁾

RESUMO

Descreve-se a técnica usada pelo autor na produção de peças fundidas de cobre em moldes de areia no Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Depois de se fazer algumas considerações teóricas em relação aos problemas de gases e matéria prima, passa-se à parte experimental de estudo da influência da proteção do banho por carvão vegetal, seguida da desoxidação e borbulhamento com nitrogênio, antes do vazamento nos moldes.

1. INTRODUÇÃO

O cobre é usado em diversos setores da indústria elétrica, principalmente na forma trabalhada (forja, laminação, etc.). A demanda de peças fundidas em cobre, neste campo, tem sido restrita devido aos problemas inerentes à sua fundição.

A fundição de cobre requer uma técnica muito rigorosa e exata, não só pelas dificuldades de fundição, mas também porque o cobre, no estado bruto de fusão, apresenta baixas propriedades mecânicas, inferiores mesmo às de suas ligas, isto é, os bronzes e os latões. Por êstes motivos, somente no casos em que se exige alta condutividade e quando as peças só podem ser produzidas por fundição, é que se deve considerar a fundição do cobre.

O objetivo do trabalho é estudar a técnica da fusão a ser seguida na fundição do cobre, de modo a se ter peças isentas de porosidade devida a gases. Êstes são absorvidos pelo banho metálico durante o processo de fusão e liberados durante a solidificação. Considera-se apenas superficialmente, no desenvolvimento do trabalho, o problema da absorção dos gases do molde ou porosidade devida à retração do metal, durante o período de resfriamento da peça.

(1) Contribuição Técnica n.º 391. Apresentada ao XV Congresso Anual da ABM; São Paulo julho de 1960.

(2) Membro da ABM; Engenheiro responsável da Secção de Ligas Não-Ferrosas; Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

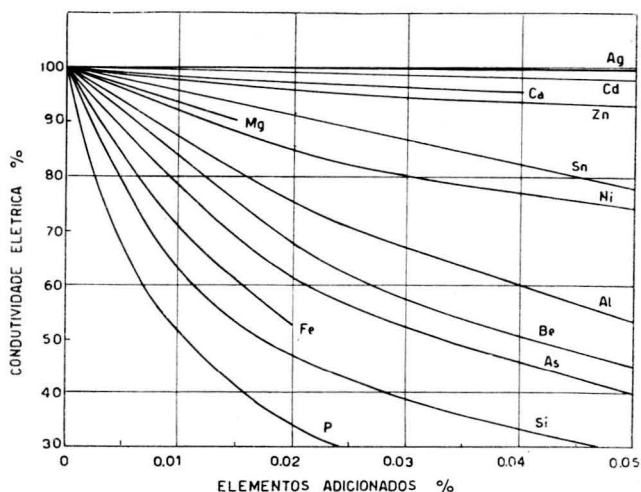


Fig. 1 — Influência dos teores dos elementos adicionados ao cobre sobre a condutividade elétrica.

2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Generalidades — Na confecção de peças fundidas em cobre puro, pode-se admitir que a carga seja sempre constituída de matéria prima nova; no caso de se utilizar sucata, é preferível se fazer o refino da mesma e utilizá-la posteriormente, a não ser no caso em que esta sucata seja da própria usina. Tal procedimento é justificado pelo fato de que as propriedades elétricas são afetadas por teores muito baixos de impurezas presentes. Na fig. 1¹ pode-se avaliar a influência dos diferentes elementos sobre a condutividade elétrica. No caso do fósforo, com cerca de 0,05% em solução sólida, a condutividade do cobre diminui de cerca de 30%.

Durante o período da fusão, tem-se a absorção dos gases da atmosfera em contacto com o banho metálico. Esta atmosfera depende do tipo de forno utilizado. No forno Detroit, seria constituída de uma mistura de O₂, N₂, CO, CO₂, H₂, H₂O. No forno Fischer, empregando óleo Diesel ou "fuel oil" como combustível, além daqueles gases já mencionados, poder-se-ia ter a presença de SO₂ e hidrocarbonetos. No caso do forno de indução, seria constituída pela mistura de O₂, H₂, H₂O, N₂. A maior ou menor absorção destes gases pelo banho de cobre será uma função da temperatura, da afinidade química dos mesmos pelo cobre e da proteção do banho.

Na tabela 1, adaptada do trabalho de Bailey², são apresentadas as composições químicas das atmosferas típicas de diferentes tipos de fornos, o nitrogênio constituindo o complemento.

TABELA 1

Composição das atmosferas encontradas em alguns tipos de fornos

Tipo de forno	Combustível	Composição % por volume				
		O ₂	CO ₂	CO	H ₂	Hidrocarbonetos
Forno de cadinho	Gás	0- 4,5	6,7-10,8	1,9- 6,3	0,7- 6,3	0,3-5,4
Forno de cadinho	Óleo	2-12,6	6,4-14,5	—	0,0- 0,4	0 -0,5
Detroit	Elétrico	0- 7,6	0 - 8,4	16 -42,8	0 -28,6	0 -0,3
Reverbero ..	Óleo	0- 5-8	8,7-12,8	0 - 7,2	0 - 0,2	—

A matéria prima também constitui uma fonte de gases; por exemplo o caso de cobre "Tough Pitch", que apresenta teores residuais de hidrogênio (entre 0,03 — 0,06). Proporções relativamente elevadas de unidades podem ser introduzidas, seja em sucatas não tamboradas, seja por cavacos de usinagem que não tenham sido sêcos previamente.

A ocorrência de porosidade em peças fundidas de cobre poderá ser de dois tipos: a) devido à retração do metal, sendo neste caso um problema de alimentação; b) porosidade por gases, ocasionada como já foi dito pela liberação, durante a solidificação, de gases absorvidos pelo banho metálico, no período de fusão ou absorvidos do molde devido à reação molde-metal líquido. Entre os gases absorvidos, aqueles que mais interessam do ponto de vista prático, são: oxigênio, hidrogênio, vapor d'água.

A) *Efeito do oxigênio* — No diagrama de equilíbrio do sistema cobre-oxigênio³ (fig. 2), os seguintes pontos são de grande importância para se compreender a influência do oxigênio durante a solidificação: a) no intervalo de temperaturas 1.100-1.300°C, o banho metálico é constituído de uma solução líquida L₁, de oxigênio em cobre; b) na isoterma de 1.065°C ocorre a reação eutética L₁ \longleftrightarrow $\alpha + \beta$, onde a fase α é uma solução sólida de Cu₂O no cobre e a fase β constituída por Cu₂O; c) o limite máximo de solubilidade do oxigênio é extremamente baixo, isto é, 0,0037% O₂ à 1.065°C (fig. 2a).

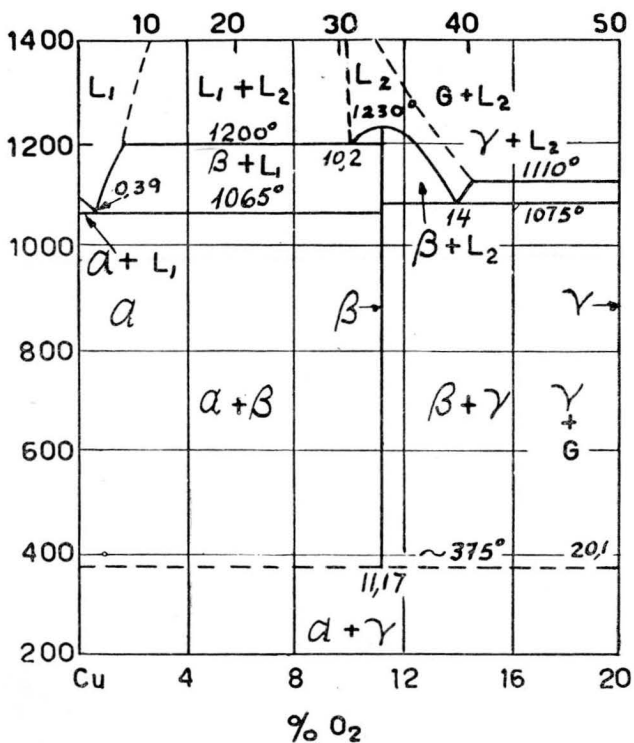


Fig. 2 — Diagrama de equilíbrio do sistema cobre-oxigênio.

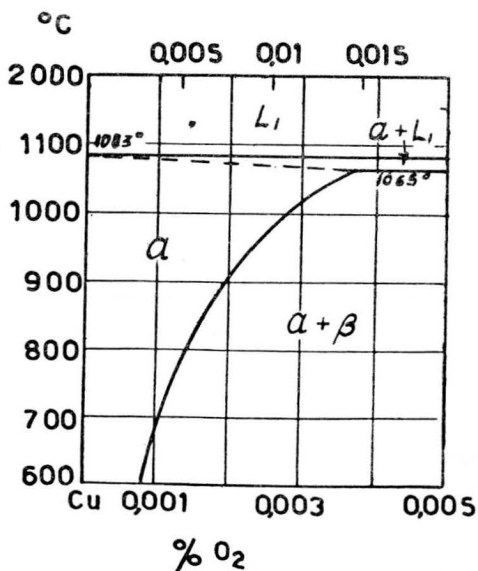


Fig. 2a — Sistema cobre-oxigênio mostrando em detalhe a linha solvus.

Na solidificação da liga hipoeutética, que é o caso prático, à medida que se separa a fase de ponto de fusão mais alto, o líquido residual enriquece-se em oxigênio. Atingida a temperatura eutética, o oxigênio do óxido cuproso passa a fazer parte do eutético; o limite de solubilidade do oxigênio sendo muito baixo, praticamente todo o oxigênio dissolvido na fase líquida é encontrado na fase sólida sob essa forma.

O efeito do oxigênio sobre a porosidade é então nulo, pois não se liberando durante o período de solidificação não promoverá o aparecimento de porosidade. O seu efeito direto faz-se sentir sobre as propriedades mecânicas, baixando a ductilidade, e sobre as propriedades elétricas, baixando a condutividade. O efeito mais importante é indireto e será tratado adiante.

B) *Efeito do hidrogênio* — Sòmente na forma atômica, o hidrogênio é solúvel no cobre; Frear⁴ demonstrou isto fazendo borbulhar o hidrogênio molecular no banho de cobre sem observar qualquer efeito adverso. O hidrogênio atômico é introduzido pela decomposição de substâncias orgânicas, como por exemplo, óleo contido na sucata, hidrocarbonetos presentes na atmosfera do forno devido à queima do combustível, ou então, pela decomposição do vapor presente na atmosfera do forno. Segundo alguns autores, o hidrogênio seria encontrado no banho, sob a forma de um hidreto de cobre⁵.

A porosidade em peças fundidas de cobre devido ao hidrogênio dissolvido no banho metálico, pode resultar de dois mecanismos diferentes.

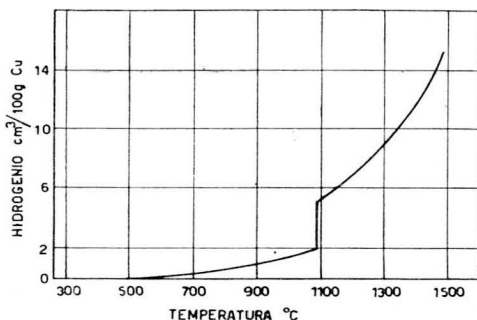


Fig. 3 — Variação do limite de solubilidade do hidrogênio no cobre em função da temperatura.

O primeiro mecanismo é indicado pela curva da solubilidade do hidrogênio no cobre da fig. 3^a. Segundo o gráfico, com a elevação da temperatura, aumenta gradualmente o teor do hidrogênio absorvido pelo metal sólido; ao alcançar o ponto de

fusão há um aumento brusco da solubilidade do hidrogênio; a partir dêste ponto a absorção de hidrogênio cresce acentuadamente com a temperatura.

Do gráfico resulta que o cobre, no ponto de solidificação, é capaz de reter $5 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/100 \text{ g Cu}$ e que, no estado sólido, esta quantidade decresce a valores da ordem de $2 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/100 \text{ g Cu}$. Entre o início e o fim da solidificação tem-se, assim, a liberação de cêrca de $3 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/100 \text{ g Cu}$. Desde que as condições de resfriamento da peça vazada permitam, esta rápida liberação de hidrogênio, durante a solidificação, dá origem à porosidade gasosa.

Entre as condições de resfriamento a serem consideradas, destacam-se: espessura máxima da peça, condutividade do molde e temperatura de vazamento. Assim, no caso de se vaziar metal fundido gaseificado em tarugos $\varnothing 2,5 \text{ cm}$, seja em areia estufada ou verde ou seja em coquilha, com certeza o tarugo no primeiro caso será poroso, pois se deu tempo para ocorrer a nucleação de bolhas gasosas; enquanto que no caso da coquilha, pela alta condutividade térmica que a mesma apresenta, ter-se-á como consequência uma velocidade de solidificação elevada, que não dá tempo para a formação de nucleos gasosos. No entanto, vazando o mesmo metal em uma coquilha de maior diâmetro, apesar da velocidade de solidificação ser a mesma, o tempo de resfriamento será maior, criando condições para que o valor da energia de ativação de formação do gás dissolvido seja ultrapassada. Conseqüentemente poder-se-á ter o aparecimento de porosidade.

O segundo mecanismo, considerado mais importante, baseia-se em que a porosidade é devida à ação indireta do oxigênio, isto é, à combinação de oxigênio com o hidrogênio, dando a formação de vapor d'água, que se libera durante a solidificação.

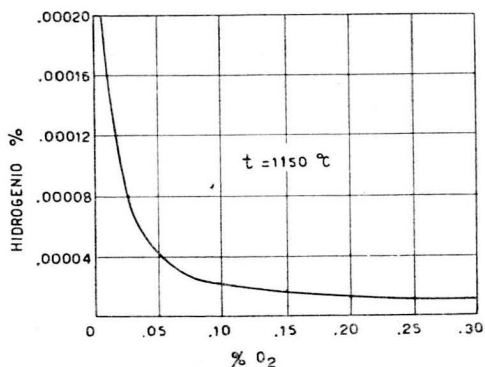


Fig. 4 — Variação dos teores de hidrogênio com os teores de oxigênio a 1.150°C .

Como já foi visto, o oxigênio encontra-se presente no banho metálico na forma de óxido cuproso; o oxigênio e hidrogênio podem coexistir no banho metálico em condições de equilíbrio, em teores que dependem da temperatura do banho. No gráfico (fig. 4)⁶ tem-se a variação do conteúdo do hidrogênio com os teores de oxigênio a 1.150°C. Durante o resfriamento as condições de equilíbrio da reação $H_2 + Cu_2O \rightleftharpoons 2 Cu + H_2O$ são modificadas.

Na solidificação de uma peça vazada com metal contendo hidrogênio e oxigênio em solução, tem-se inicialmente o aparecimento dos cristais de α . À medida que se vão formando novos cristais de α , o líquido residual vai-se enriquecendo em óxido cuproso que se encontra dissolvido no banho metálico. Ao mesmo tempo, devido à queda de temperatura, o hidrogênio vai sendo liberado do líquido remanescente em que se encontrava em solução; a reação ocorre no sentido da flexa superior, até que as condições de equilíbrio sejam novamente alcançadas. O vapor d'água, não sendo solúvel no banho metálico, é liberado nos interstícios das dendritas primárias, isto é, nos lugares onde o líquido residual se solidifica em último lugar.

C) *Desoxidantes* — Na fundição de peças de cobre para alta condutividade elétrica, especial atenção deve ser dada aos efeitos causados pelos teores residuais dos elementos desoxidantes. Do gráfico da fig. 1 tem-se uma idéia da influência desses teores residuais sobre a condutividade elétrica.

Na escolha de um desoxidante, deverá ser dada preferência àquele que afete menos a condutividade; quando este não puder ser empregado por qualquer outro motivo, que só se use quantidades mínimas dos outros, para não afetar sensivelmente a condutividade.

Dentre os desoxidantes que tem sido utilizados, destacam-se o *fósforo*, o *silício*, o *lítio*, o *cálcio*, o *alumínio* e o *magnésio*.

Fósforo — O desoxidante mais empregado, por razões econômicas, é o fósforo, se bem que êle afete sensivelmente a condutividade. É utilizado na forma de uma liga auxiliar cobre-fósforo com 15% P. Com técnica aperfeiçoada podem resultar teores residuais menores do que 0,015% P, o que acarreta perdas na condutividade de cerca de 10%, valor que satisfaz a maioria das especificações. É certamente o único desoxidante a ser considerado, quando a máxima condutividade não é a propriedade principal.

Silício — Depois do fósforo, o silício é o segundo elemento a atuar negativamente em relação à condutividade no cobre. A adição é feita através de uma liga Cu-Si com 15% S. O silício reduz o óxido de cobre dando a formação de sílica que irá aparecer na escória. Phillips⁹ recomenda a adição de 0,02% Si, na forma de liga auxiliar Cu-Si com 15% Si.

Lítio⁷ — É o desoxidante ideal na fundição de cobre. Apresenta a vantagem de ser ao mesmo tempo desoxidante e deshidrogenante, isto é, reage com o oxigênio e hidrogênio formando Li_2O e LiH , que são estáveis. É utilizado na forma de ligas auxiliares Cobre-Lítio com 8% Li e Lítio-Cálcio contendo 50:50 e 30:70 respectivamente, sendo preferido o tipo de liga Li-Ca que é mais eficaz e econômico do que Cu-Li. Cerca de 0,01% de lítio residual no banho protege o mesmo contra uma subsequente oxidação, sendo que ensaios têm confirmado que este teor residual não tem qualquer efeito sobre as características do cobre. Recomenda-se a adição de 0,025% de uma liga lítio-cálcio 50:50 antes do vazamento. Como desvantagem, o lítio pode reduzir alguns óxidos do refratário impurificando o banho.

Cálcio⁸ — O uso de cálcio na desoxidação do cobre apresenta a vantagem de que o excesso de cálcio presente não se dissolve no cobre, tendo portanto pequeno efeito sobre a condutividade elétrica. Até 0,2%, cada 0,05% de cálcio residual no cobre reduz a condutividade de aproximadamente 1%.

Alumínio e Magnésio — São indubitavelmente excelentes desoxidantes para o cobre, mas os produtos da desoxidação não são facilmente removíveis do banho e tendem a diminuir sua fluidez; por outro lado com quantidades excessivas, aparece o problema de fundição, devido à formação de drosses durante o vazamento.

3. PARTE EXPERIMENTAL

A) *Corpo de prova* — O corpo de prova adotado (fig. 5) devia apresentar duas características importantes: a) não ter porosidade devido à retração do metal líquido no molde; b) oferecer condições para a fácil liberação de gases. A massa de material existente na parte superior do corpo de prova garante uma alimentação adequada na zona onde está situada a secção crítica, reduzindo ao mínimo a porosidade devida à retração. A segunda condição também é satisfeita, pois, devido à massa do massalote e a forma do corpo de prova, têm-se solidificação direcional da parte inferior para a parte superior, dando tempo para a liberação de gases dissolvidos no metal. Caso a velocidade de resfriamento seja elevada, isto é, rápido o intervalo de solidificação, os resultados poderiam ser mascarados pela retenção dos gases em solução sólida.

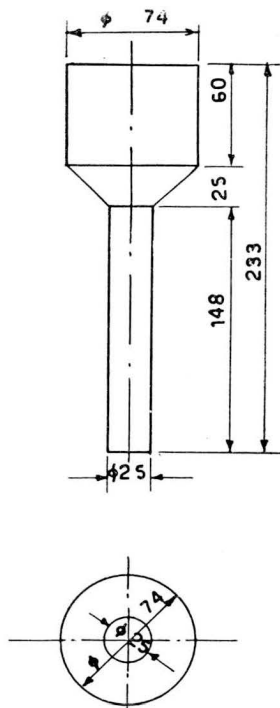


Fig. 5 — Corpo de prova adotado, com suas dimensões.

B) *Avaliação da porosidade* — A porosidade proveniente da retenção dos gases no metal foi determinada em função da densidade média do corpo de prova. Depois de fundido, o massalote é seccionado, restando um tarugo de 2,5 cm de diâmetro. O tarugo foi torneado até 2 cm de diâmetro de modo a se eliminar qualquer vazio, que pudesse ser mascarado pela película superficial de óxido, a qual se forma junto à interface de contacto, molde-corpo de prova, a qual poderia afetar os resultados.

Nos tarugos assim torneados foram determinados os valores das densidades. A densidade foi medida calculando o empuxo, isto é, o corpo de prova é pesado fora e dentro da água: a diferença das massas dá o empuxo, que é igual ao volume de corpo de prova empregado. A relação massa inicial/volume dá o valor da densidade. Na tabela 2, são apresentados os valores determinados.

C) *Fusão e vazamento* — Foram realizados os seguintes tipos de corrida: a) fusão em presença da atmosfera, sem qualquer adição de desoxidantes; b) fusão protegida com carvão vegetal; c) fusão protegida com carvão vegetal e adição de cobre-fósforo com 15% P; d) fusão protegida com carvão vegetal, borbulhamento de nitrogênio e adição de cobre-fósforo com 15% P.

Operou-se com forno de alta frequência tipo Ajax de 100 kW, utilizando-se cadinho de zirconita. Qualquer que fosse o tipo de corrida, foram sempre carregados 18 quilos de cobre "Tough Pitch". O carvão é carregado no fundo do cadinho, formando uma cama sobre a qual é carregado o cobre, seguindo-se novas adições de carvão seco durante o período de fusão. A quantidade de carvão carregada variava de 1 a 2 quilos, de modo a sempre se ter uma espessura de carvão, de cerca de 2 cm na superfície do banho.

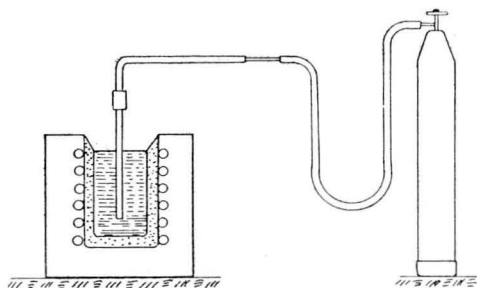


Fig. 6 — Esquema do sistema empregado no borbulhamento de nitrogênio.

Para borbulhar o nitrogênio no banho metálico e a fim de evitar a contaminação do banho, empregou-se um tubo de grafita. A conexão desse tubo de grafita com o torpedo de nitrogênio é apresentada no esquema da fig. 6. O tempo de borbulhamento variava de 5 a 10 minutos.

O desoxidante é adicionado 5 minutos antes do vazamento, sendo este feito, diretamente do forno para o molde, evitando-se assim o uso da panela de vazamento. A medida da temperatura foi feita por um pirômetro ótico, sendo os corpos de prova vazados no intervalo 1.800°C a 1.250°C. Os resultados dos diferentes tipos de corridas executadas encontram-se na tabela II.

TABELA 2

Resultados experimentais dos diferentes tipos de corrida

N.º	Desoxidante adicionado	Observação	Densidade g/cm ³	% Final desoxidante
1	Nenhum	Fusão em presença da atmosfera	7,314	—
2	Nenhum	Idem	7,410	—
3	Nenhum	Fusão protegida com carvão vegetal	8,43	—
4	0,22	Idem	8,88	0,20
5	0,08		8,899	0,071
6	0,02		8,88	0,015
7	0,06	Fusão protegida com carvão vegetal; borbulhamento de nitrogênio	8,92	0,048
8	0,027	Idem	8,923	0,021
9	0,02	Idem	8,91	0,019

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

A) *Fusão em presença da atmosfera, sem qualquer adição de desoxidantes* — Os valores das densidades, obtidos nas corridas “1” e “2” mostram, seguramente, os efeitos causados pela

presença do hidrogênio e oxigênio no banho metálico. O masalote do corpo de prova "2" (fig. 7) dá uma idéia do que pode acontecer a uma peça fundida nas condições da experiência.

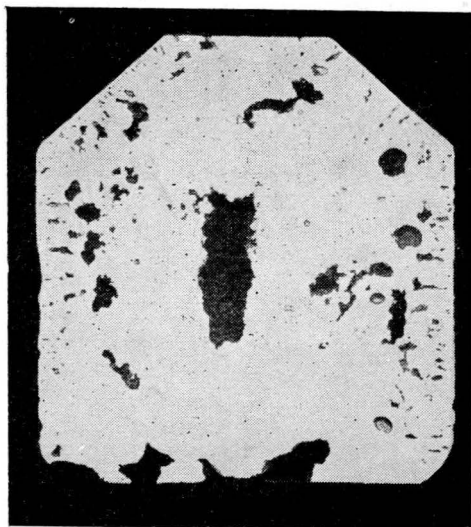


Fig. 7 — Cabeça do corpo de prova proveniente da corrida 4.841.

As seguintes hipóteses são admitidas para explicar a presença desses vazios: I — Sòmente absorção de hidrogênio; II — Sòmente absorção de oxigênio; III — Absorção de hidrogênio e oxigênio.

A hipótese I seria viável só no caso de haver atmosfera controlada de H_2 ou mistura de $H_2 + N_2$. Na hipótese II, admitindo unicamente absorção de oxigênio, o resultado a ser esperado seria uma "chupagem" no corpo de prova. Para provar tal efeito oxidou-se propositalmente uma corrida, vazando-a em lingoteiras bem sêcas. A secção do lingote apresentou o aspecto dado na fig. 8. A depressão central e o aspecto da massa do material indicam, microscòpicamente, ausência completa de gases liberados durante o período de solidificação. Na micrografia (fig. 9), retirada desse mesmo lingote, observa-se ausência de qualquer porosidade nas regiões interdendriticas, demonstrando que, realmente, o efeito do oxigênio sòbre a porosidade gasosa é indireto.

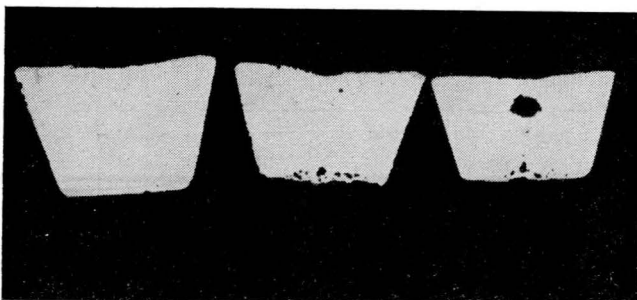


Fig. 8 — Aspectos das secções obtidas a partir do cobre vazado em lingoteiras abertas.

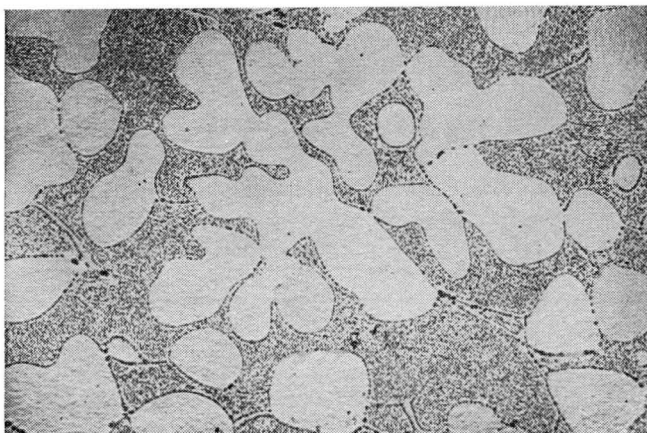


Fig. 9 — Micrografia referente ao cobre vazado em lingoteira aberta. Polimento eletrolítico; ataque H_2O_2 ; $50\times$.

Vazando-se uma corrida, propositalmente oxidada, em molde de areia verde ou estufada, os massalotes aparecem completamente porosos (fig. 10). A presença de vazios no corpo de prova, poderia então ser provocada por uma reação com o molde, isto é, a umidade do molde constitui-se em fonte de hidrogênio que é absorvido pelo metal durante o vazamento. No período de solidificação o hidrogênio reage com o oxigênio dando liberação de vapor d'água. A micrografia da fig 11, indica que esta região ocorre no líquido residual, isto é, nos espaços interdendríticos.

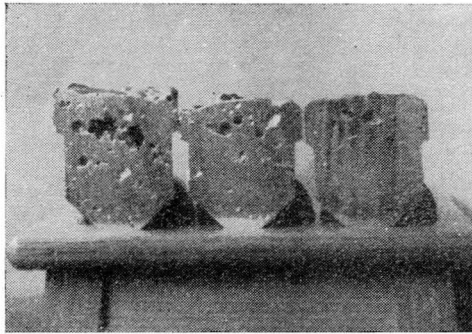


Fig. 10 — Cabeças dos corpos de prova vazados em areia, com cobre propositalmente oxidado.

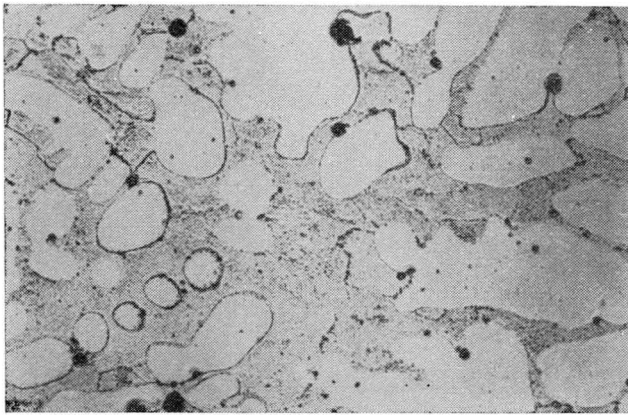


Fig. 11 — Micrografia referente à corrida 4.841. Polimento eletrolítico; ataque H_2O_2 ; 50 \times .

Na hipótese III, que corresponde às condições usuais de fusão, há absorção de hidrogênio e oxigênio da atmosfera durante o período de fusão. Durante a solidificação o líquido residual enriquece-se em óxido cuproso e ao mesmo tempo, pela queda da temperatura, o hidrogênio vai sendo liberado, modificando as condições de equilíbrio da reação com o conseqüente desprendimento de vapor d'água. Existe a possibilidade, ainda neste caso, que parte do hidrogênio e oxigênio sejam fornecidos pelo molde.

B) *Fusão protegida com carvão vegetal* — O efeito da ação protetora do carvão é dado nos resultados da corrida "3". A densidade aumentou para 8,43 g/cm³ e a figura 12 dá uma idéia material do volume de vazios. A presença do carvão teve influência nos seguintes pontos: a) formação de uma atmosfera de contacto redutora; esta atmosfera, constituída de uma mistura de CO + CO₂, evita a oxidação do banho metálico além de diminuir a absorção de hidrogênio devido à menor quantidade de vapor d'água presente na atmosfera do forno; b) redução do oxigênio em solução no banho metálico. A reação é dada pela equação $C_2 + Cu_2O \rightleftharpoons CO + 2 Cu$, que ocorre na interface banho metálico-superfície protetora. A condição de equilíbrio é deslocada para a direita devido à liberação de CO que é insolúvel no banho metálico. Esses efeitos podem ser resumidos em um só, isto é, diminuição da concentração dos teores de oxigênio no banho metálico.

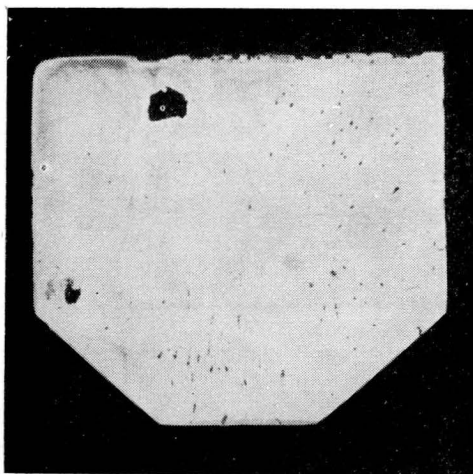


Fig. 12 — Cabeça do corpo de prova proveniente da corrida 4.842.

As três hipóteses seguintes podem ser aventadas, para explicar a presença de porosidade, quando se tem o banho protegido com uma camada de carvão.

- I — Teor residual de hidrogênio acima do limite de solubilidade, com os teores de oxigênio abaixo de 0,02%. Com o decréscimo da temperatura, a solubilidade do hidrogênio diminui, liberando o excesso. Caso haja reação com o molde, deve-se somar o efeito da reação do vapor d'água, devido à absorção de oxigênio.

- II — Teor residual de hidrogênio abaixo do limite de solubilidade e teores de oxigênio no mesmo nível que anteriormente. A liberação neste caso somente ocorre caso haja reação com o molde, isto é, absorção de oxigênio e hidrogênio.
- III — Teor residual de hidrogênio e de oxigênio maior que 0,02%. A porosidade seria causada pela reação de formação de vapor d'água. Neste caso o oxigênio presente não foi completamente reduzido pelo carvão. A êsse efeito também deve ser somado o efeito da reação com o molde.

Conforme exposto acima, o principal problema na obtenção de peças fundidas sãs está na eliminação do oxigênio dissolvido no metal. Eliminando-se o oxigênio o problema fica circunscrito unicamente à presença de hidrogênio, pois não havendo oxigênio não haverá formação de vapor d'água.

C) *Fusão protegida com carvão vegetal e adição de cobre-fósforo com 15% de fósforo* — Nas corridas “4”, “5” e “6”, os valores das densidades do corpo de prova elevaram-se para 8,89 g/cm³. Além de se usar carvão como proteção fez-se a adição de cobre-fósforo a fim de se obter uma desoxidação quase completa.

D) *Fusão protegida com carvão vegetal, borbulhamento de nitrogênio e adição de desoxidante* — As corridas n.ºs “7”, “8” e “9”, onde se borbulhou nitrogênio, apresentam valores mais elevados de densidade, indicando realmente o efeito do nitrogênio na expulsão do hidrogênio. A eliminação de hidrogênio é feita por arrastamento, isto é, as bolhas de nitrogênio no interior do banho, formam regiões de pressão parcial menor do que a pressão parcial do hidrogênio dissolvido no banho. O hidrogênio libera-se, nestas regiões sob a forma molecular e é arrastado através da superfície do banho.

Nas corridas onde o metal foi vazado nos moldes de areia, sem uma completa degaseificação, além da influência dos gases do metal se tomou, também, em consideração o efeito dos gases provenientes do molde. Por outro lado, verificou-se que com o metal bem degaseificado, o molde praticamente não contribui com quantidade sensível de gases.

A interpretação dada é que, utilizando-se o fósforo como desoxidante, apesar do banho absorver oxigênio, o mesmo reage preferencialmente com o fósforo, formando P₂O₅, que é insolúvel no banho. O teor residual de fósforo garante, pois, teores mínimos de oxigênio no banho, evitando que se dê a reação de formação do vapor d'água, ficando o problema restrito, unicamente, ao controle do hidrogênio. Êsse deve ser mantido em teores abaixo do limite de solubilidade, à temperatura de solidificação, o que é feito pelo borbulhamento de nitrogênio sêco.

Mesmo que haja absorção de gases do molde, esta quantidade será mínima, não chegando a atingir um grau de saturação, ficando os mesmos retidos no metal na forma de solução sólida.

Quando porém, o metal não é completamente degaseificado, a absorção dos gases do molde determina um estado de supersaturação, favorecendo a nucleação dos gases, que se liberam dando bôlhas.

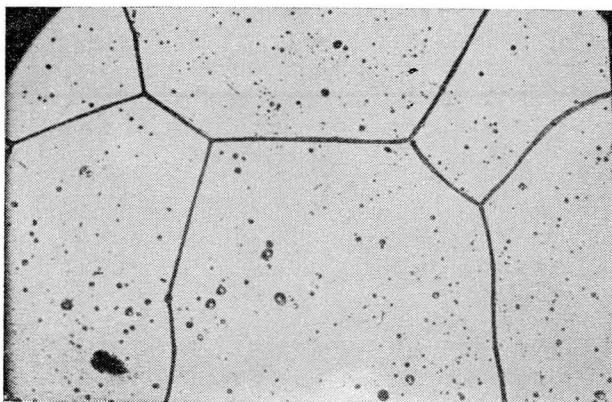


Fig. 13 — Micrografia referente à corrida 4.093. Polimento eletrolítico; ataque H_2O_2 ; 50 \times .

Na micrografia (fig. 13) referente à corrida n.º “9”, verifica-se completa ausência de porosidade, comprovando o que foi dito acima. Os pontos que se observam são oriundos do polimento eletrolítico do corpo de prova.

5. CONCLUSÕES

1 — Na produção de peças fundidas em cobre de alta condutividade pelos processos comuns, é necessário um controle rígido dos teores residuais de hidrogênio e elemento desoxidante.

2 — A proteção do banho de cobre por carvão vegetal reduz a absorção de oxigênio.

3 — A concentração de hidrogênio absorvido pelo banho metálico, decresce quando se faz o borbulhamento de nitrogênio seco.

4 — Pelo uso de carvão como proteção do banho, e adição de fósforo antes do vazamento, consegue-se reduzir os teores de oxigênio a menos de 0,02%.

5 — A reação com o molde é evitada desde que o metal vazado apresente teores residuais do elemento desoxidante e que os teores de hidrogênio e oxigênio tenham sido suficientemente abaixados no banho.

6 — A seqüência a ser seguida no processo de modo a se ter peças sãs, isto é, com densidades entre 8,89-8,93 g/cm³, e teores residuais de fósforo abaixo de 0,02%, é o seguinte: a) fusão do cobre em presença de carvão; b) borbulhamento de nitrogênio; c) adição de 0,02% de cobre-fósforo com 15% fósforo.

BIBLIOGRAFIA

1. NEU, H. G. — Metal Industry, 31 August 1956, pág. 164.
2. BAILEY, G. L. — Metal Industry, 23 June 1939, pág. 669.
3. Metals Handbook, American Society for Metals, 1948, pág. 1.199.
4. FREAM, C. L. — Foundry, 1948, pág. 76.
5. BRADASCHIA, CLOVIS — Associação Brasileira de Metais, n.º 11, vol. 4, 1948, pág. 126.
6. MILLER, H. J. — Institute of British Foundrymen — Paper n.º 679, 1938-39, pág. 238.
7. OSBORG, HANS — Transactions of the Electrochemical Society, vol. 66, 1934, pág. 91.
8. SCHUMACHER, E. — Idem, vol. 61, 1932, pág. 91.
9. PHILLIPS, A. J. — Institute of British Foundrymen — 38, 1937, pág. 471.



DISCUSSÃO (1)

Maurício Grinberg (2) — Acabamos de ouvir a palavra autorizada do Eng. Isaac Berezin sobre este palpitante assunto, que é o da fundição de cobre. Está em discussão o trabalho apresentado.

Francisco Homem da Costa (3) — Sabemos que a fundição de peças de cobre de alta condutividade é problema complexo. Gostaria que o A. pudesse dar-nos mais alguns esclarecimentos a respeito, o que poderia ajudar aos que estão fundindo essas peças. Gostaríamos de saber, por exemplo, se o A. fundiu peças de cobre ou se o seu estudo se refere a pesquisas de laboratório.

Isaac Berezin (4) — Este trabalho foi consequência de uma solicitação para confecção de ventaneiras para alto forno. Devido as dificuldades iniciais na obtenção de peças sãs, fez-se então um estudo sistemático, a fim de coligirmos dados que nos permitissem aplicação na con-

(1) Contribuição discutida na Comissão «H» do XV Congresso da ABM. São Paulo, julho de 1960.

(2) Membro da ABM e Presidente da Comissão. Engenheiro e Superintendente da Cia. Fabricadora de Peças «COFAP»; São Paulo, SP.

(3) Membro da ABM; Engenheiro da Usina de Volta Redonda da CSN; Volta Redonda, RJ.

(4) Membro da ABM; Engenheiro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas; São Paulo, SP.

fecção de peças fundidas em cobre. Posteriormente a êstes estudos, os resultados obtidos na fundição de ventaneiras, discos e camisas para fornos elétricos foram excelentes.

F. H. da Costa — Nessas variadas peças, o A. não encontrou o problema da trinca devido à fragilidade a quente na fundição do cobre?

I. Berezin — Não encontramos o problema da fragilidade a quente na fundição do cobre, uma vez que o teor de oxigênio reduz-se a traços quando trabalhamos dentro dessa técnica. Sabe-se que esta fragilidade a quente, no cobre, é causada pela reação de formação de vapor d'água no intervalo de 400-900°C, sendo o hidrogênio absorvido por difusão.

Usamos a areia comumente empregada no IPT, a que se referiu o Eng. Cyro Guimarães. Usamos areia do mar, adicionando-lhe 2% a 4,5% de argila.

No caso das ventaneiras que produzimos, a espessura era de 12 mm. No caso de discos, a espessura máxima que produzimos foi de 30 mm. No caso de camisas para fornos, a espessura foi de 10 mm.

Conforme descrevi no trabalho, não usámos fluxo, porque partimos de matéria prima bem conhecida, que é o cobre «Tough Pitch». Foi usada uma atmosfera redutora, cobrindo-se o banho com carvão vegetal.

Romeu Maroco (5) — O Autor se referiu a ventaneiras, em cuja fundição há dificuldades técnicas. Quanto ao desoxidante, como o gráfico nos mostrou, o problema seria que o P, na porcentagem de 0,01, tinha uma queda de 10%. Queriria saber se esta queda é sobre a condutividade térmica ou elétrica?

I. Berezin — Elétrica.

R. Maroco — Quanto ao problema da temperatura de vazamento, pelo que compreendi, o que se deve procurar evitar é o superaquecimento, devido à influência do oxigênio e do hidrogênio. Gostaria de ter alguns dados de temperatura de vazamento em peças como ventaneiras de 1,5 cm de espessura.

I. Berezin — A temperatura de vazamento que estamos utilizando é da ordem de 1.200°C. Esta é a temperatura mantida na panela. No forno, a temperatura está entre 1.250°C e 1.300°C. Se tivermos uma peça de maior espessura, a tendência será baixar mais essa temperatura.

R. Maroco — A terceira pergunta que desejo fazer refere-se à velocidade de resfriamento. O senhor citou 3 peças, sendo que a mais fina tinha 15 mm e a mais grossa 30 mm de espessura. Gostaria de saber a influência da velocidade de resfriamento sobre microporosidades.

I. Berezin — No caso de porosidade devido a gases, se trabalharmos dentro dessa técnica, não existe o problema. O problema da porosidade interdendrítica que pode aparecer é mais um problema de alimentação da peça, isto é, uma questão do projeto dos canais da peça. A velocidade de resfriamento tem importância, mas pode ser controlada pelo sistema de alimentação empregado.

M. Moraes (6) — E no caso das peças fundidas que não requeriam características elétricas, foi feita a desoxidação com P ou não?

(5) Membro da ABM; Engenheiro da «Fundição de Não-Ferrosos Limitada»; Barra Mansa, RJ.

(6) Membro da ABM; Engenheiro da COFAP; São Paulo, SP.

I. Berezin — Nesses trabalhos fizemos a desoxidação com P. No caso de ventaneiras, preferimos usar estanho. A técnica de fusão foi aquela já descrita. Depois do banho estar fundido, mergulhamos o estanho com uma tenaz no fundo do cadinho, sendo que a introdução do estanho é feita depois do borbulhamento de nitrogênio.

M. Moraes — No material que exige alta condutividade elétrica, como é feita essa desoxidação?

I. Berezin — Usamos fósforo e procuramos manter o teor abaixo de 0,02%. O certo seria empregar o lítio ou o cálcio como desoxidantes no caso de peças que exigem alta condutividade elétrica.

M. Moraes — Peço desculpas, mas durante a descrição do seu trabalho havia citado o emprêgo de nitrogênio. Gostaria de obter um esclarecimento a respeito disso.

I. Berezin — O nitrogênio é empregado com o objetivo de degaseificar o banho.

F. H. da Costa — Gostaria de saber do A. se, usando-se a cobertura de carvão — suponho que seja carvão vegetal — deve-se ter o cuidado de secá-lo antes.

I. Berezin — Essa condição é necessária. Se não procedermos assim, há grande possibilidade de introdução de hidrogênio e oxigênio provenientes da umidade.

R. Maroco — Êsse tipo de disco é usado em soldagem de tubos?

I. Berezin — Certo.

R. Maroco — Poderia informar-nos que tipos de desoxidantes são usados?

I. Berezin — No meu trabalho cito uma série de desoxidantes. O ideal seria o cobre-lítio ou lítio-cálcio.

M. Grinberg — Complementando a pergunta do Eng. Romeu Maroco, desejava saber se êsses discos são ligas de cobre.

I. Berezin — Sim. O IPT tem-se especializado na liga cobre-cobalto-silício. Quando usamos essa liga não usamos desoxidantes porque o silício já é um desoxidante. O que se faz é adicionar um % maior de Si de modo que parte atua como desoxidante e parte como elemento de liga.

José Gomes Lemos (7) — Queria fazer uma pergunta ao A. a respeito não propriamente do material aqui citado, mas quanto à sua afirmação sobre ligas binárias para utilização em material elétrico e ou de condutibilidade elétrica. Estive fazendo algumas experiências com ligas binárias, como cobre-cromo, e encontrei grande dificuldade de assimilação do cromo. Em algumas experiências constatei até que nem os traços usuais de análise apareceram. É claro que a literatura sobre o assunto no País é muito restrita, mas não encontrei uma explicação para êsse fato. Queria saber, então, se o A. poderia dar-me uma explicação nesse particular e se o IPT fêz algum estudo a respeito.

(7) Membro da ABM; Engenheiro de R. Belincky S. A.; São Paulo, SP.

I. Berezin — Realmente, estamos ainda fazendo estudos sobre essas ligas no IPT. Mas eu ainda não tenho opinião formada para poder adiantar alguma coisa. Se o senhor não tem encontrado cromo na liga a única explicação seria a de que êle foi oxidado.

J. Gomes Lemos — Justamente por isso é que queria saber alguma coisa, pois elevando-se a temperatura o fenômeno de oxidação cresce vertiginosamente. Eu desejava saber qual a temperatura do banho, para que o cromo fôsse assimilado, isto é, teores entre 0,7% a 1% — e creio que 1% já é muito elevado. Mas a mim me foi difícil verificar essa temperatura, pois as condições de trabalho não o permitiram. Esse é um detalhe que gostaria de ver esclarecido.

I. Berezin — Acredito que no intervalo entre 1.200°C e 1.300°C.

J. Gomes Lemos — Trabalhei abaixo de 1.300°C. Tenho certeza disso, e a análise feita dêsse material não deu resultado satisfatório.

M. Grinberg — A respeito da liga cobre-cromo, a que o senhor está se referindo, tenho a certeza de que o IPT já tem experiências feitas.

I. Berezin — Estamos realizando experiências sobre o assunto; como ainda não tenho opinião formada a respeito deste problema, preferia não expôr conceitos práticos sobre a confecção dessa liga. No momento em que tivermos todos os estudos, tanto de fusão como de tratamento térmico, escreveremos um trabalho sobre êste assunto, que será publicado.

J. Gomes Lemos — Queria saber se o A. já fêz experiências de adição de silício e liga de cálcio-silício, por exemplo, porque o cálcio é um ótimo elemento desoxidante.

I. Berezin — Geralmente, quando usamos carvão como cobertura, e adição dêsses desoxidantes da liga lítio-cálcio, costumamos, em alguns casos, embrulhar êsses elementos numa pequena fôlha de cobre, de maneira que afundamos êsses desoxidantes dentro do banho de modo que êles queimam dentro do banho e não fora.

M. Grinberg — O senhor que tem experiência em fundição de peças de cobre, pode dizer que forno tem usado?

J. Gomes Lemos — O mais ingrato, o forno a óleo Diesel.

I. Berezin — Acredito que o forno a óleo é um dos ideais para a fundição de cobre, dependendo do volume de produção de peças fundidas.

J. Gomes Lemos — Acontece que a carga do forno passa a depender de forma absoluta do operador e do contrôle da chama. Trabalho com chama levemente oxidante. Aí é que está o perigo, porque êste «levemente oxidante» se afigura muito à «levemente redutora», e a redutora tem um perigo ainda maior. Mas em produção seriada, de pequena indústria, isto já não é possível. A produção seriada é mais ou menos acelerada, não é um trabalho refinado, em que o equipamento já se complica bastante.

M. Grinberg — Tendo em vista a sua experiência, Eng. Berezin, e a dos seus colegas do IPT — a que o senhor há pouco se referiu — na sua opinião qual seria o tipo de forno mais recomendável, para a fusão de peças de cobre?

I. Berezin — Vamos tomar em consideração a capacidade de produção. Se essa capacidade de produção fôr muito grande, recomendo o forno do tipo «Detroit», ou o forno de indução de baixa freqüência. No

caso de uma fábrica ter pequena produção, ou seja, as corridas serem da ordem de 200 quilos para baixo, acredito que o forno «Fischer», a óleo; desde que trabalhando com óleo isento de enxofre, tipo Diesel, dá resultados excelentes, além de apresentar um investimento baixo. Nos Estados Unidos, recentemente, visitei várias fundições de cobre, e esse fato se aplica. Em fundição com corridas acima de 200 quilos eles usam o forno «Detroit. Na «Westinghouse» eles preferem usar fornos de indução de baixa frequência para corridas acima de 500 quilos. Para corridas pequenas, abaixo de 200 quilos, eles trabalham com o tipo «Fischer», mas em vez de óleo como combustível empregam gás de petróleo. Aliás, em todas as firmas que visitei, o tipo de combustível empregado sempre era gás de petróleo.

M. Grinberg — E esses fornos são convencionais ou têm alguma característica especial pelo fato de serem usados para fundição de cobre?

I. Berezin — São fornos convencionais.

M. Grinberg — Nos de baixa frequência, o senhor teria observado se usam uma atmosfera especial?

I. Berezin — Isto seria mais um aperfeiçoamento técnico. No IPT, com a contribuição do Dr. Luiz Corrêa da Silva e do Eng. Lino Afonso de Lacerda Santos, foi construída uma campânula a vácuo. Mas isto, naturalmente, já são detalhes de operação.