

VÁCUO METALURGIA DOS METAIS REATIVOS

Arno Müller(º)

R E S U M O

Os "metais reativos" são os metais que possuem elevada avidéz de reação com os gases da atmosfera. Caracterizam-se pela sua refratariedade elevada, o que implica no desenvolvimento de novas técnicas para a sua elaboração e transformação.

O autor faz uma descrição dos fornos à vácuo a arco e dos de bombardeamento eletrônico, examinando as suas características quanto à pressão de trabalho, temperaturas atingidas e emprêgo. Finaliza, descrevendo sumariamente as experiências realizadas neste campo no Departamento de Materias, com o forno a arco ali instalado.

- (º) - Engenheiro Metalurgico, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS - 1962 - Pesquisador do Depto de Materiais do IPD Centro Técnico de Aeronáutica - São José dos Campos-S.P.

1. INTRODUÇÃO

A filosofia da indústria aero-espacial moderna, tanto civil como militar, se baseia na produção de engenhos com velocidades cada vez maiores. Ainda não voou o primeiro avião supersônico comercial* e já se pensa no transporte hipersônico. A construção de tais tipos de aeronaves traz consigo vários problemas de aquecimento da estrutura de um avião, devido ao atrito com a atmosfera rarefeita em que voam, que não são de fácil solução. Enquanto que um avião supersônico normal (Mach 1), utiliza ligas de alumínio convencionais na sua parte estrutural, um avião de velocidade hipersônica (Mach 5,5) (Tabela I), deverá ser construído de superligas ou metais refratários ou mesmo de elementos cerâmicos, para suportar as temperaturas que atingem a 900°C ou mais.

(Fig. 1).

TABELA I

Intervalos de temperatura de utilização dos diversos tipos de ligas metálicas aeronáuticas em função da velocidade (Nºs de Mach). (Lena, A.J. Reynolds, EE - High Strength Steel for Aircraft Applications - Blast Furnace and Steel Plant, OCT 58 pg 1081)

T, °C	Nºs Mach	Ligas Utilizadas
25 a 180	1 - 2,5	Alumínio Titânio
180 - 540	2,5 - 4,2	Aços Inox Aços Ferramentas
540 - 900	4,2 - 5,5	Superligas Superligas
Acima de 900	Acima de 5,5	Metais Refratários Cerâmicas

* O primeiro avião supersônico comercial "Concorde" deverá efetuar seu primeiro vôo em fevereiro de 1968.

Não somente as estruturas das aeronaves são cada vez mais aquecidas, como também e principalmente os motores que as propulsionam. Sabe-se que o rendimento térmico de um motor à reação, aumenta sensivelmente com um pequeno acréscimo na sua temperatura de trabalho. Os motores modernos estão projetados para funcionar acima de 1000°C, com rotações elevadíssimas, o que significa esforços de centrifugação consideráveis.

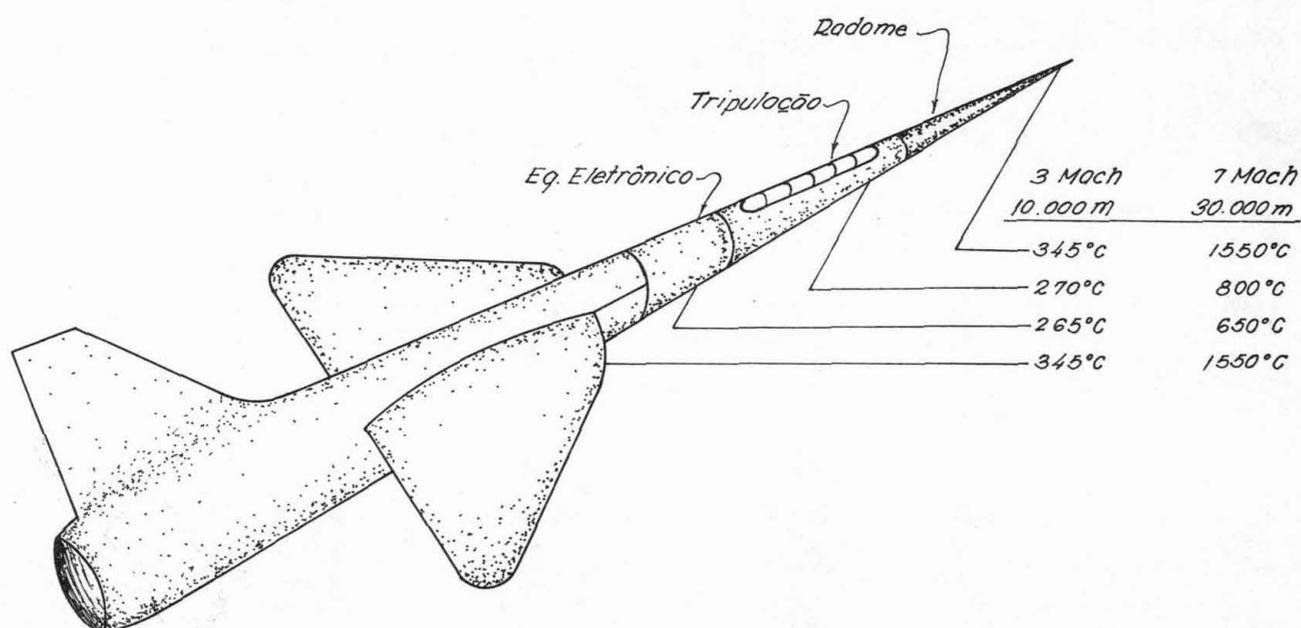


Fig. 1 - Aquecimento provocado pelas velocidades sobre a estrutura de um avião, voando a 3 Mach e 7 Mach.

Por outro lado, a indústria espacial, também tem os seus problemas com aquecimento e altas velocidades, principalmente na reentrada na atmosfera de uma cápsula espacial.

Os técnicos dos programas aero-espaciais, já logo depois da II Guerra Mundial, pressentiam que as soluções para tais problemas, deveriam ser encontradas não somente nas ligas ferrosas e não

ferrosos existentes naquela época, mas se tornavam urgentes as pesquisas no campo inexplorado dos chamados "metais novos" que possui o Tuñgstênio (Tab. II), como elemento mais refratário. Até então, muitos desses metais não tinham sido sequer obtido no seu estado puro a fim de serem avaliadas as suas propriedades mecânicas.

<u>TABELA II</u>		
Pontos de fusão e densidades de alguns "metais novos"		
Metal	Ponto de Fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)
W	3380	19,3
Ta	2996	16,6
Mo	2620	7,0
Nb	2468	8,57
Hf	2220	13,09
V	1860	6,1
Cr	1850	7,19
Zr	1850	6,5
Th	1750	11,66
Ti	1660	4,5

Êstes metais apesar de conhecidos, alguns há vários séculos, e abundantes, não eram cogitados para fabricação comercial de vido à complexidade de sua extração. Não tinha havido ainda um processo comercial simples de extração, para o seu emprêgo maciço.

Isto se devia, principalmente à extrema avidez que possuem êstes metais para com os gases da atmosfera, os quais presentes em pequenas quantidades, tornam êstes metais extremamente frágeis (Fig. 2) e duros.

A avidez pelo oxigênio por exemplo, é tão grande que podem mesmo sofrer um processo de combustão se a temperatura se aproximar muito do ponto de fusão. (Fig. 3)

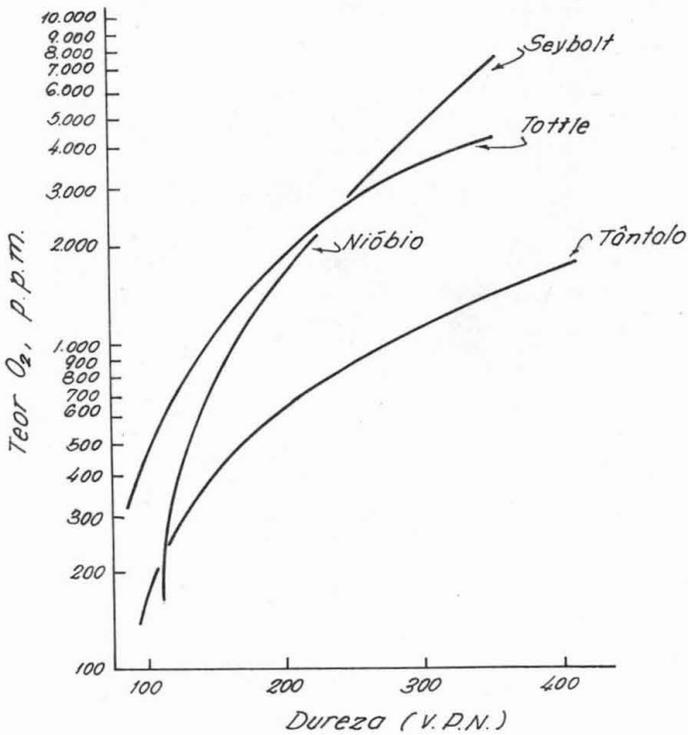


Fig. 2 - Relação entre o teor de O_2 e a dureza do Nb e Ta (Ref (1) pg. 166)

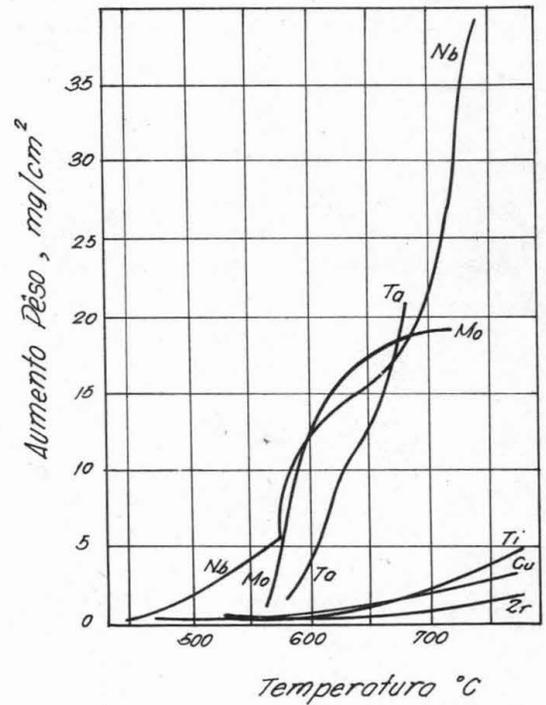


Fig. 3 - Relação entre a temperatura e o ganho de peso por oxidação. Atmosfera de oxigênio, $p_{O_2} = 7 \text{ Kg/cm}^2$; aquecimento: 5°C/min . (Ref (2) pg 21)

Os gases, portanto são as primeiras impurezas a serem combatidas, na fabricação desses metais. A produção de Ti dúctil pela 1ª vez em 1945-46 pelo USB of Mines por um processo que levou o nome de Processo Kroll e aperfeiçoado no mesmo Instituto por Wartman, abriu as perspectivas de produção dos demais metais, usando extensivamente, as atmosferas protetoras de argônio, hélio ou vácuo.

A partir daí, iniciaram-se os estudos em larga escala dos demais que atualmente são produzidos comercialmente com teores comerciais de impurezas (Tab. III) bastante baixos.

TABELA III

Teores de impurezas normais, presentes nos metais reativos industriais e de laboratórios.

Metal	Metais Comerciais		Laboratórios PPm
	PPm	Iodetos, PPm	
O ₂	2000	100 - 300	1 - 5
N ₂	1000	10 - 100	1 - 5
H ₂	150	10	1
C	700	100 - 300	1 - 5
Si	1000	200	1 - 5
Fe	1000	50	não detectado
Mg	100	50	"
Cu	100	50	"
Ni	100	50	"
Co	100	50	"
Al	100	50	"

Graças aos processos de proteção desenvolvidos e que cor porificam o que hoje se passou a denominar de Vácuo-metalurgia, é que foi possível obter êstes "metais reativos" em quantidades industrialmen te importantes.

2 - PRINCÍPIOS BÁSICOS DA VÁCUO-METALURGIA

Um processo metalúrgico qualquer (purificação, redução , oxidação, etc.) é assemelhável a um sistema termodinâmico.

Sabe-se da Termodinâmica, que um sistema fica definido por três parâmetros: temperatura, pressão e composição.

A metalurgia em vácuo, procura favorecer ou inibir as rea ções possíveis de um sistema, aplicando sôbre o mesmo pressões reduzi- das e temperaturas normalmente elevadas, a fim de obter a composição de sejada.

São as seguintes, as principais reações que ocorrem nos sistemas vácuo-metalúrgicos:

- a. Extração de gases diatômicos
- b. Decomposição de compostos gás-metal
- c. Redução de óxidos metálicos
- d. Vaporização de impurezas

Estas reações são válidas para a obtenção industrial de somente alguns metais, que reúnem condições termodinâmicas mais favoráveis. Entretanto, são tidos como exemplos clássicos de reações estimuladas pelos processos vácuo-metalúrgicos e que são interessantes conhecer.

a. Extração de gases diatômicos

A quantidade de gases diatômicos, presentes num metal, é função da pressão que age sobre o sistema e é expressa pela relação de Sieverts:

$$m = K \sqrt{p}$$

onde: m = massa de gas no metal

K = constante

p = pressão parcial sobre o sistema

Este princípio é aplicável industrialmente para obter a eliminação do hidrogênio de metais como Ti e outros; através de um aquecimento prolongado sob uma atmosfera rarefeita, consegue-se eliminá-lo quase que totalmente do metal.

b. Decomposição de compostos gas-metal

Este tratamento é mais difícil de ser realizado do que o anterior devido à maior força de ligação entre os átomos.

Só é possível decompor as ligações que se enfraqueçam com um aumento de temperatura, possibilitando a formação de uma atmosfera gasosa livre sobre o metal, que é extraído por um sistema de vácuo. A previsão desta decomposição pode ser feita, analisando-se a evolução da energia livre em função da temperatura da reação passível de decomposição. Na Fig. 4, pode-se ver que é o Cobre o elemento mais sensível à desoxidação pois possui a 1500°C uma significativa diferença negativa de energia livre contra o oxigênio, a 10⁻⁶ atmosferas.

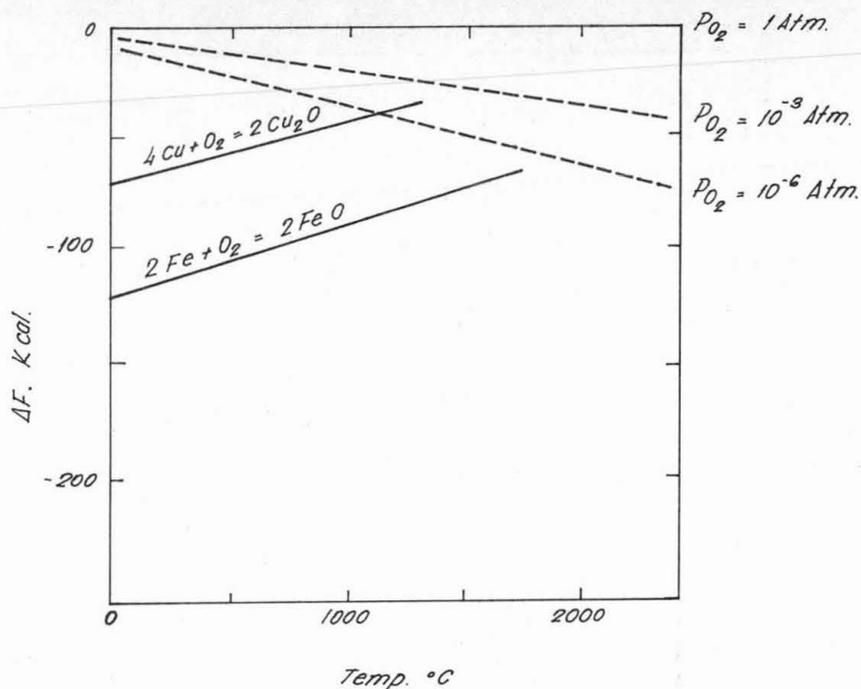


Fig. 4 - Energia livre de decomposição de óxidos x Temperatura, para diversas pressões de oxigênio. (Ref. 3, pg 95).

No caso de sistemas Metal (líquido) + Subóxido Metálico (deficiência de oxigênio), a tendência à desoxidação pode ser avaliada pela relação entre a pressão de vapor do metal e a do seu subóxido. A Tab IV, nos dá a relação dos principais metais "desoxidáveis" por possuírem a relação de pressões de vapores maior do que a unidade, fator considerado básico para o processo (4).

À direita estão os metais "não desoxidáveis" por possuírem relações de pressões de vapor inferiores à unidade.

<u>TABELA IV</u>	
Avaliação da tendência à (2000 ^o K) desoxidação dos metais em relação aos seus subóxidos.	
$\frac{M_o O}{M_o} = 10^{0,5}$	$\frac{TiO}{Ti} = 1$
$\frac{CbO}{Cb} = 10$	$\frac{VO}{V} = 10^{-2}$

continua

$\frac{BO}{B} = 10^2$	$\frac{BeO}{Be} = 10^{-3}$
$\frac{Wo}{W} = 10^2$	
$\frac{ZrO}{Zr} = 10^2$	$\frac{CrO}{Cr} = 10^{-4}$
$\frac{ThO}{Th} = 10^3$	$\frac{MnO}{Mn} = 10^{-5}$
$\frac{HfO}{Hf} = 10^4$	$\frac{FeO}{Fe} = 10^{-6}$
$\frac{TaO}{Ta} = 10^4$	$\frac{NiO}{Ni} = 10^{-7}$
$\frac{YO}{Y} = 10^5$	
Desoxidáveis	Não desoxidáveis

C. Redução dos óxidos

No caso do Nb, que é obtido de cloreto ou oxioloreto, e existem sempre pequenas quantidades de oxigênio que o tornam imprestável para qualquer emprêgo, usa-se purificá-lo através da adição estequiométricamente dosada, de carbono, e fundi-lo sob vácuo, para ocorrer a seguinte reação:



O cálculo termodinâmico, mostra que o equilíbrio deste sistema se desloca para a direita, (produção de CO) à partir de uma pressão inferior a 2,28 Torr(9) pressão esta facilmente obtida nos fornos industriais normais.

Não só o Nb como também o Mo são purificados desta forma.

d. Vaporização de impurezas

As altíssimas temperaturas atingidas nos fornos a vácuo (vide "Temperatura"), permitem a purificação de metais reativos, como o W, pela evaporação pura e simples de algumas impurezas com pressão de vapor maiores que o metal no seu ponto de fusão. Por exemplo, na fu

(9) - Torr = 1 mm Hg de pressão

são do W, ocorre a eliminação do Zr e do ZrO, segundo a equação:



com a qual se obtém um metal de altíssima pureza.

3 - MÉTODOS DE FUSÃO

Devido a elevada reatividade dos metais refratários, já citada, e tendo em vista as demais características dos processos de purificação, cumpre existirem as seguintes condições básicas para uma fusão ou tratamento dos mesmos:

- Baixas pressões (vácuo) ou atmosfera de gases inertes, evitam a reação com os gases e auxiliam a purificação;
- Altas temperaturas: auxiliam certos processos de purificação e são necessárias, em vista da refratariedade dos metais em causa;
- Cadinho e lingoteiras metálicas: normalmente de cobre desoxidado, refrigerado abundantemente com água. Os cadinhos cerâmicos introduzem oxigênio no banho.
- Matéria prima: eletrodos (feitos do próprio metal) consumíveis ou sucata.

Os únicos tipos de fornos que preenchem estes pré-requisitos são: os fornos a arco e os de bombardeamento eletrônico (Electron Beam).*

a. Fornos à arco

Estes fornos, utilizam a temperatura gerada na abertura de um arco voltáico que se mantém facilmente tanto em atmosfera de argônio ou hélio, como no próprio vácuo. Existe uma zona de instabilidade do mesmo em função da pressão residual que se deve ser evitada para não ocorrer possíveis explosões no sistema.

As principais características desses fornos são as seguintes:

* Nota: -

Inúmeras tentativas tem sido realizadas para o emprego dos fornos de indução na produção de metais reativos tendo sido entretanto até agora infrutíferas, devido às necessidades de se utilizar cadinhos cerâmicos que são atacados pelo banho metálico, contaminando-o.

O desenvolvimento de um forno à indução com cadinho metálico refrigerado tentado muitas vezes parece não ter tido aceitação industrial.

Sistema de Fusão

Pode ser com eletrodo consumível ou permanente.

A fusão com eletrodo consumível, emprega, ou um eletrodo previamente fundido, ou um compactado e soldado, e desintegra-o numa coquilha refrigerada (Fig. 5.a) formando um lingote por deposição de camadas sucessivas que se resfriam instantaneamente.

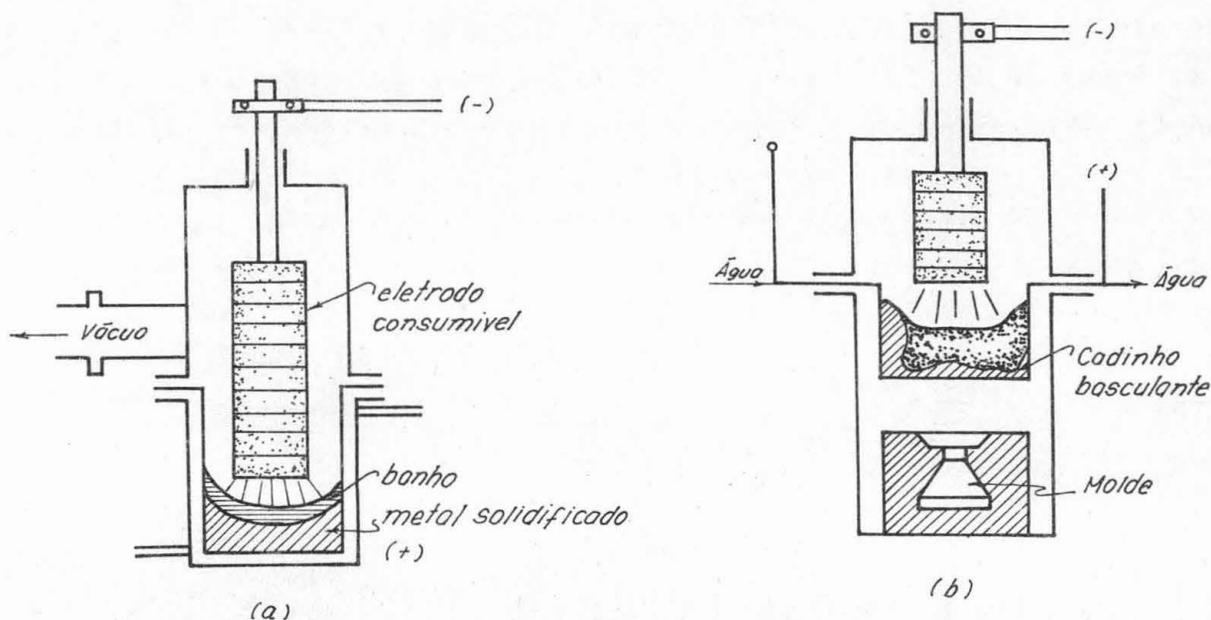


Fig. 5 - a. Esquema de um forno à arco à vácuo de eletrodo consumível em coquilha.
b. Idem, com eletrodo consumível em cadinho para fundição.

Na fusão com eletrodo permanente de W ou C, o material é introduzido sob a forma de sucata, seja dentro de um cadinho para a fundição de peças (Fig. 5, b) ou numa coquilha, onde é alimentado continuamente.

Ao forno são conectadas bombas de vácuo mecânicas, de difusão ou ejetores de vapor.

Temperatura

As temperaturas extremamente elevadas constatadas nos arcos voltaicos, tornam a medição uma tarefa muito difícil e por isso mesmo com valores contraditórios. Os valores mais recentes foram publicados por Cremers, ⁽⁵⁾ Fig. 6, estudando o arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de W é uma base de cobre refrigerada alimentada com corrente contínua e na atmosfera normal. Estes valores diferem bastante dos apresentados por Gibbs ⁽⁶⁾, que avalia em aproximadamente 5000 a 6000°C a temperatura máxima.

A temperatura máxima do arco não é utilizada totalmente, pois é função do material a ser fundido, como pode ser visto na Fig.7, onde a temperatura do anodo na fusão do Fe é a metade, da de fusão do W.

Além disso, existe um gradiente severo de temperatura nas zonas contíguas ao arco (Fig. 8).

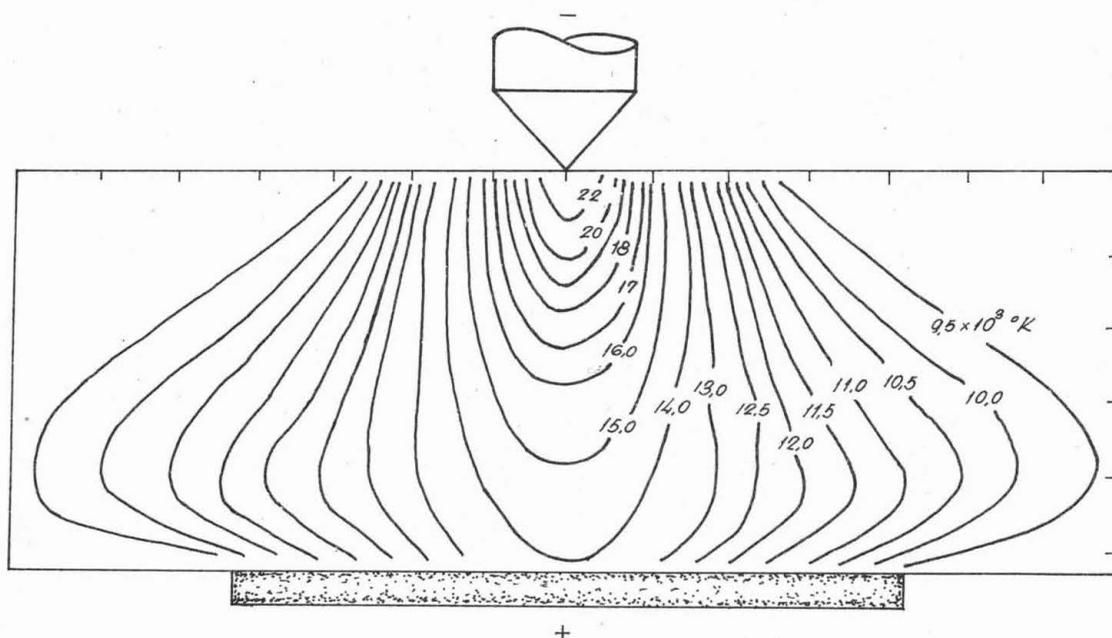


Fig. 6 - Distribuição de Temperatura em um arco voltaico, em polaridade direta e em pressão atmosféricas (5)

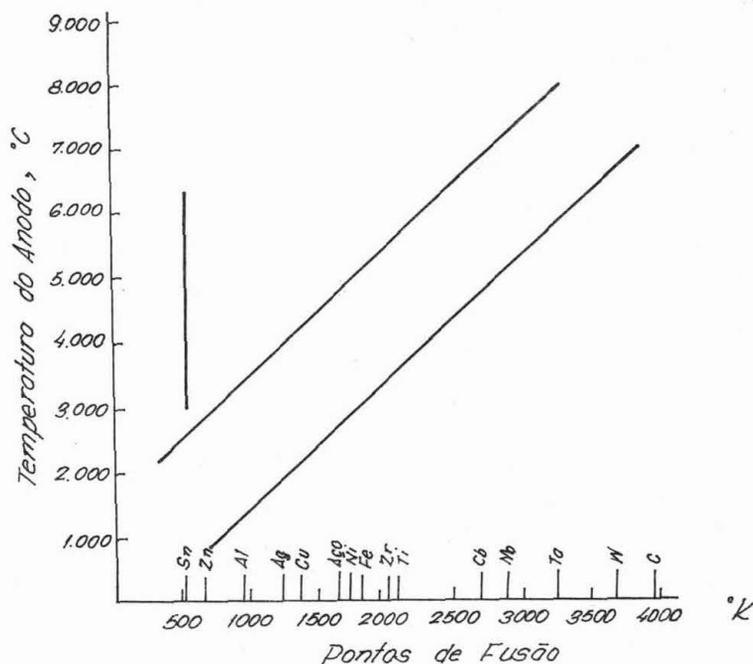


Fig. 7 - Gráfico das temperaturas dos anodos x ponto de fusão dos metais (7).

Êstes fornos utilizam os dois tipos de corrente: contínua ou alternada. Entretanto, a contínua oferece maiores vantagens porque favorece um superaquecimento do banho ou do eletrodo conforme o caso, ao qual se liga propositadamente o polo positivo que recebe $\frac{2}{3}$ da energia calorífica total (Fig.9) e (Fig. 10).

Em corrente alternada esta distribuição é de 50% para cada polo.

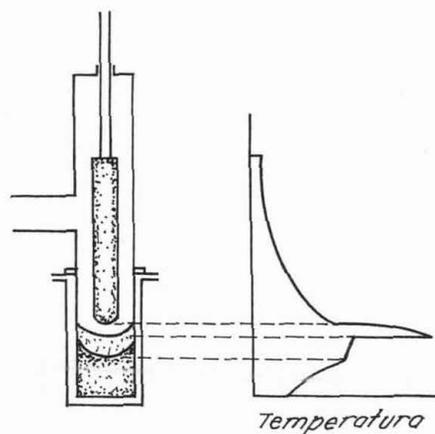


Fig. 8 - Gradiente de temperatura em um forno à vácuo de eletrodo consumível (3).

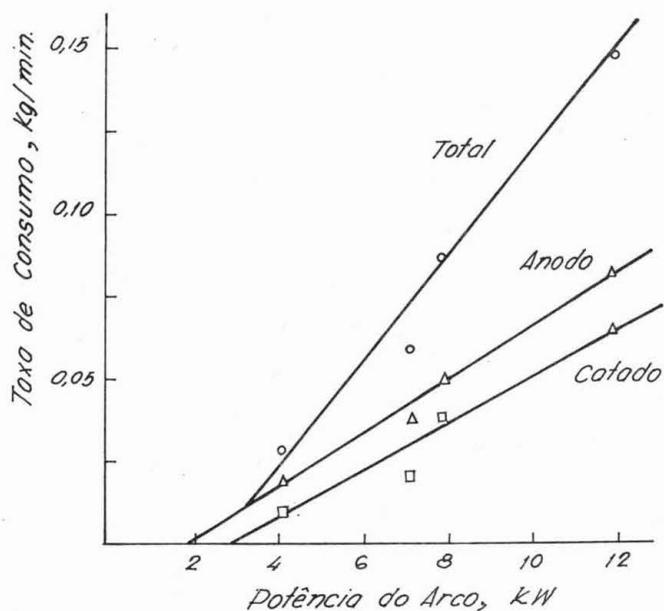


Fig. 9 - Taxas de consumo de eletrodos de Ti sob 1 atm argônio.
(Ref.(1) pag. 110)

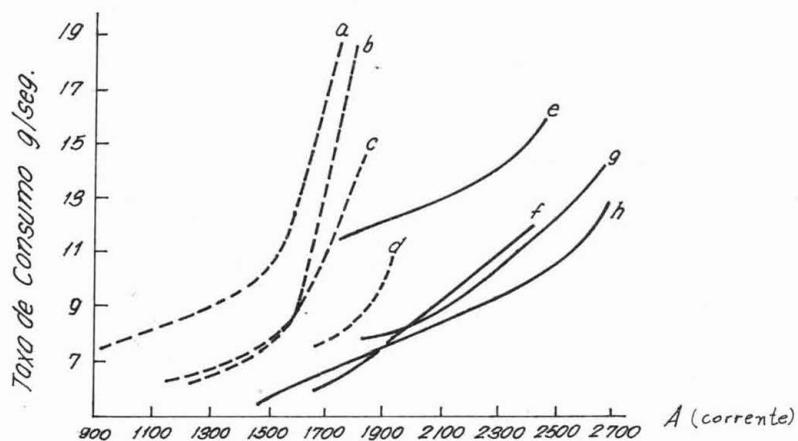


Fig. 10 - Taxas de consumo de eletrodos de 3/8" em vácuo: (a) Nb, d.c., direta (b) Ta, d.c., direta; (c) Mo, d.c., direta; (d) W, d.c., direta; (e) Ta, a.c., (f) Nb, a.c.; (g) W, a.c.; (h) Mo, a.c. (8)

Vácuo

A pressão mantida nos fornos a arco, varia entre 10 a 10^{-2} Torr sendo mesmo de 300 Torr na fusão sob gas inerte. Da mesma forma que a temperatura, a pressão também varia bastante no interior de um forno a arco.

Na fig. 11, pode ser visto que a variação atinge de 1 a 3 vezes o valor nominal lido no instrumento colocado longe do arco. Isto deve ser levado em conta quando pelo cálculo teórico seja necessária uma determinada pressão, na realidade ela será bem maior, na zona do arco, do que se supõe.

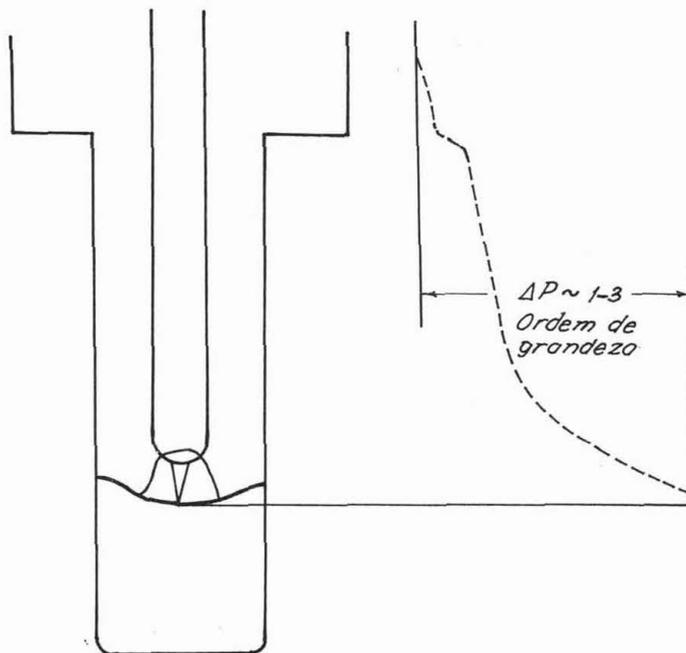


Fig. 11 - Distribuição das pressões no interior de um forno a arco (Ref. (1) pag. 83.

A evolução de gases do banho faz também que a pressão residual varie constantemente ao longo de uma fusão (Fig. 12) dependendo da velocidade de consumo do material. As bombas deverão ter capacidade de sucção suficientes para atender aos picos de pressão do sistema.

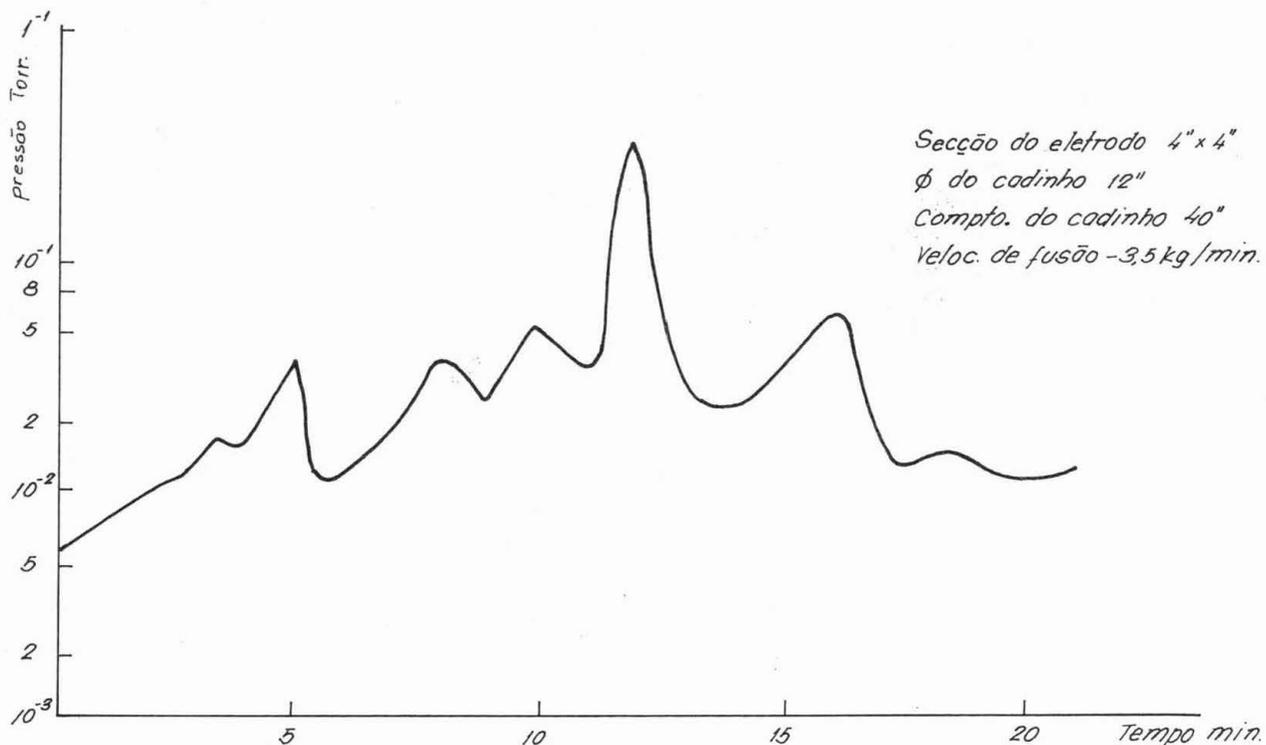


Fig. 12 - Variações na pressão interna de um forno a arco na fusão de Ti (3,5 Kg/min). (Ref. (1), pg 146)

Hoje em dia estão se desenvolvendo fornos a arco com pressões cada vez mais baixas para aumentar a eficiência na purificação dos metais. Na Tab. V, estão alguns valores obtidos por Noesen, com um forno especial trabalhando a pressões baixíssimas.

b - Fornos de bombardeamento eletrônico

Enquanto os fornos à arco são assemelháveis à gigantescas máquinas de solda, os fornos de bombardeamento eletrônico são comparáveis à enormes aparelhos de R-X que aproveitam a energia de um feixe eletrônico produzido por um tubo de R-X convenientemente concentrado num alvo onde se situa o metal a fundir (Figs. 13,14).

Tab. V - Metais de pureza elevada fundidos em forno a arco especial (fusão simples) (7)

*	T, anodo, °C	V consumo Kg/min.	Pressão μ Hg	O ₂ , PPM		N ₂ , PPM		H ₂ , PPM		C %	
				Eletro- do	Lingo- te	Eletro- do	Lingo- te	Eletro- do	Lingo- te	Eletro- do	lingo- te
Cu (S-22)	2750	2,7	1,3	1	1	15	2	1	1		
Aço CrMoNi (S-5)	3350	2,63	1,2	50	14	27	13	1	1	0,300	0,320
Nb (S-20)	4850	1,28	2,5	104	98	38	33	1	1	0,004	0,006
Mo	4850	3,18	1,3	63	1	2	1	1	1	0,004	0,002
Ta	6500	1,63	4,4	2000	117	50	17	32	1	190	10
W	7500	1,98	1,0	9	1	3	1	1	1	0,005	0,001



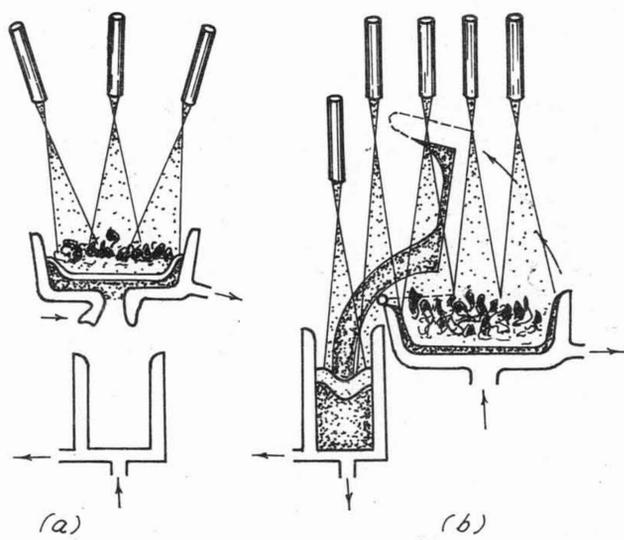


Fig. 13 - Variantes dos fornos de Bomb. Eletr. de Fundição

- a - Com vazamento pelo fundo. O canhão intermediário é ligado no instante do vazamento pelo fundo
- b - Com cadinho basculante. Aquecimento simultâneo do jato e do metal vazado na coquilha.

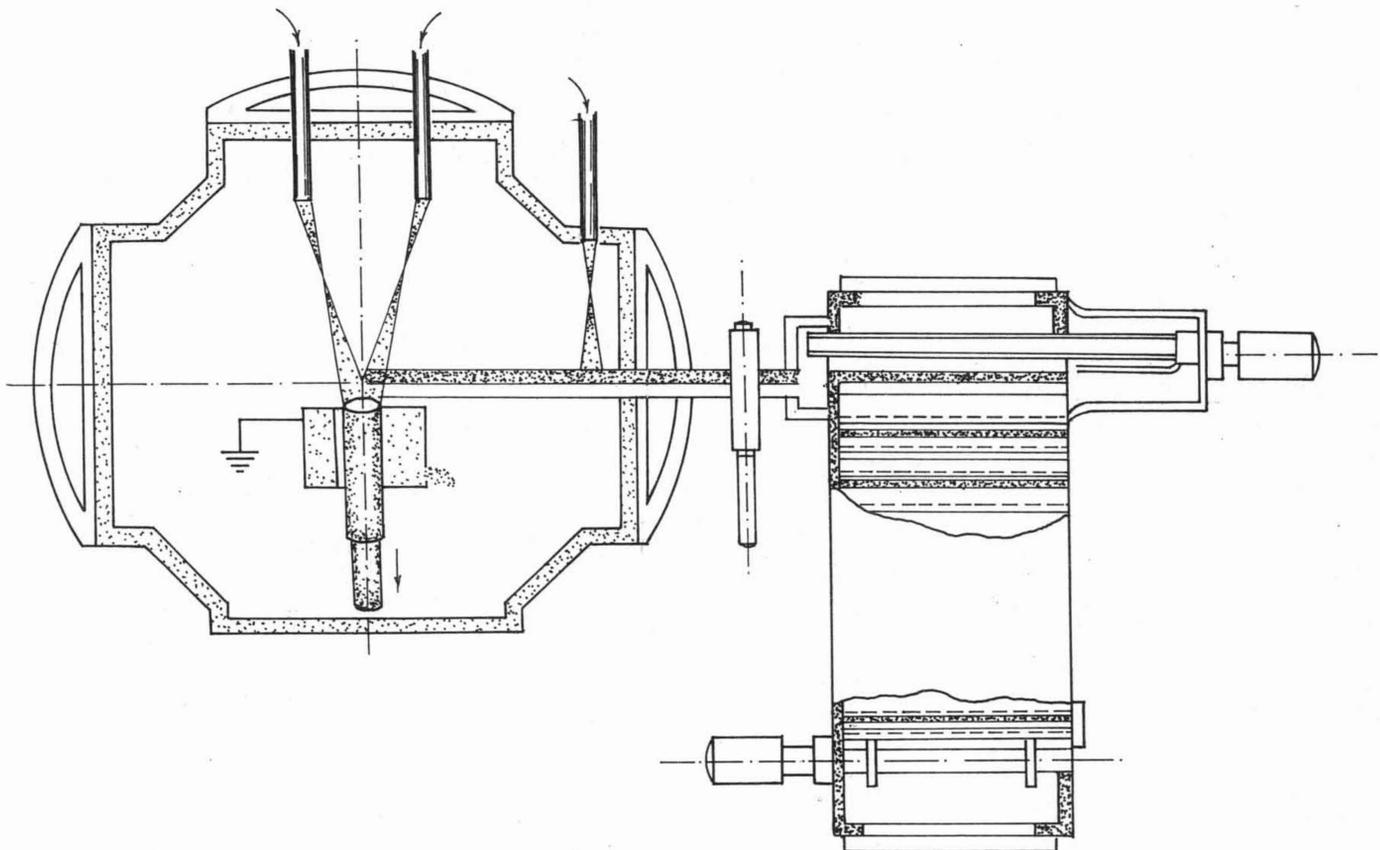


Fig. 14 - Sistema de carregamento horizontal de eletrodos consumíveis de um forno de bombardeamento eletrônico de fundição.

Apesar de seu princípio ser aplicado há já muito nos aparelhos de R-X, somente modernamente foi aproveitado para a fusão de metais, o que torna difícil obter informações completas sobre o seu desempenho.

As principais características são:

Vácuo : altíssimo, da ordem de 10^{-3} a 10^{-5} Torr condição esta indispensável ao funcionamento da fonte de eletrons.

Temperatura: altíssimas, podendo sublimar a maioria dos metais, não se sabendo entretanto o seu valor.

Fusão: com eletrodo consumível ou sucata em cadinhos metálicos, não utilizando eletrodo permanente.

Êstes fôrnos têm sido largamente utilizados na purificação de metais por evaporação das impurezas e redução dos óxidos de Nb, Mo, W, Ze e outros.

Com a experiência ganha no campo dos metais refratários, os técnicos de várias companhias produtoras desses fornos, já visualiza o seu emprêgo na fusão de materiais convencionais inclusive aços ao Carbono, à semelhança do que ocorre com os fornos a arco, o que possivelmente baixará o seu preço que atualmente é bem maior do que o dos fornos a arco.

4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS PROCESSOS

Ambos processos possuem vantagens e desvantagens. Apesar de que o número de fornos à arco instalado atualmente no Mundo ser bem maior do que os de bombardeamento eletrônico, êste último tem aplicações muito especiais e por isso importantes.

Gruber (5), fez a seguinte comparação entre os dois processos:

	E. B.	E. C.	Obs:
Matéria prima	Eletrodos, sucata, esponja, pós, grãos, etc Teor de gases baixos.	Eletrodo e sucata.	E.B. muito me- lhor
Tamanho do Lingote	Lingotes pequenos e médios com comprimento bastante grande.	Qualquer tamanho é fácil obter	E.C. muito me - lhor

Tamanho do Lingote	Lingotes maiores im- praticáveis economi- camente; instalações de vácuo exageradas.	Qualquer tamanho é fácil obter.	E.B. muito me - lhor
Energia neces- sária por Kg.	Velocid. de fusão é intrinsecamente baixa e calor radiação ele- vado. Consumo maior.	Energia mínima necessária.	E.C muito me - lhor
Pressões necessárias no processo	Normalmente entre 3×10^{-4} e 10^{-5} Torr	Pressões 5×10^{-2} e 10^{-3} Torr Pressões meno- res: desnecessá- rias.	
Tempo de Tatamento.	Médio	Mínimo	Vantagem P/ E.C.
Produção Anual	Média	Máxima	Vantagem P/ E.C.
Purificação do metal	Ótima	Ruins	Vantagem P/ E.C.
Tamanho do grão	Estremamente grandes	Grandes	-

Nota: E.C. - eletrodos consumível, E.B. - electron beam

5 - EXPERIÊNCIAS REALIZADAS NO PMR - IPD/CTA

O Departamento de Materiais (PMR) do IPD/CTA, possui ins-
talado há mais de dois anos, um forno à arco a vácuo, com pequena capa-
cidade. Até esta data, já foram realizadas, mais de 70 fusões, obedecen-
do a uma programação de treinamento da equipe para a Pesquisa e Produ-
ção de Metais Reativos.

O forno é do tipo misto, pois pode não somente produzir
lingotes com eletrodo consumível mas também fundir peças sob vácuo u-
sando um cadinho de cobre basculante usando sucata-eletrodo permanente
ou eletrodo consumível (fig. 20)

- Produção de Lingotes

Esta técnica que é a mais divulgada, usa uma lingoteira de cobre refrigerado na qual se faz consumir um eletrodo fundido previamente ao ar (se possível) ou então compactado e soldado a partir da esponja ou sucata.

Para isso o PMR, possui um forno a arco à vácuo com as seguintes características:

Potência máxima : 240 Kw (8.000 A em 30 V)

Corrente: contínua (Retificadores de Silício)

Bomba mecânica à vácuo: 100 l/min

" difusão à óleo : 100 l/min

Contrôle: automatizado

Lingoteira de cobre para consumível: \varnothing 3"

Cadinho de cobre para fundição : \varnothing 18 cm

altura 18 cm

Capacidade: 20 kg de aço ou

10 kg de Ti

Vácuo normal de trabalho : 10^{-1} Torr (ou pressão parcial de argônio)

Para a fusão consumível de aço doce foram necessário em média de 0,62 Kwhr/kg de produto fundido.

O tempo de fusão é normalmente de 30 min para um eletrodo de 20 kg (3" \varnothing).

Para dar início ao arco, usa-se um "batente" feito do mesmo material, colocado no fundo da lingoteira.

O eletrodo se consome com uma velocidade proporcional à potência aplicada e o lingote se forma por deposição de camadas contínuas de metal, evitando desta forma o rechupe e a segregação no mesmo.

Para que o arco se mantenha sempre estável e orientado para impedir os arcos "vagabundos" que se movimentam em todas as direções podendo atingir a coquilha, usa-se contorná-lo com um "stirring coil" (campo magnético concentrador) que além disso produz um refinamento dos grãos por efeito giratório sobre o banho dos metais magnéticos.

O eletrodo está suspenso num porta-eletrodo que é movimentado automaticamente nos seus movimentos de compensação a fim de estabelecer uma voltagem constante entre o eletrodo e o banho. Usando esta

técnica, já foram produzidos alguns lingotes de aço.

As Figs. 15, 16, ilustram a influência da polaridade do eletrodo em relação ao banho. Quando a polaridade é direta (eletrodo negativo) o restante do eletrodo fica com uma forma convexa. Com polaridade inversa, êle fica côncavo.

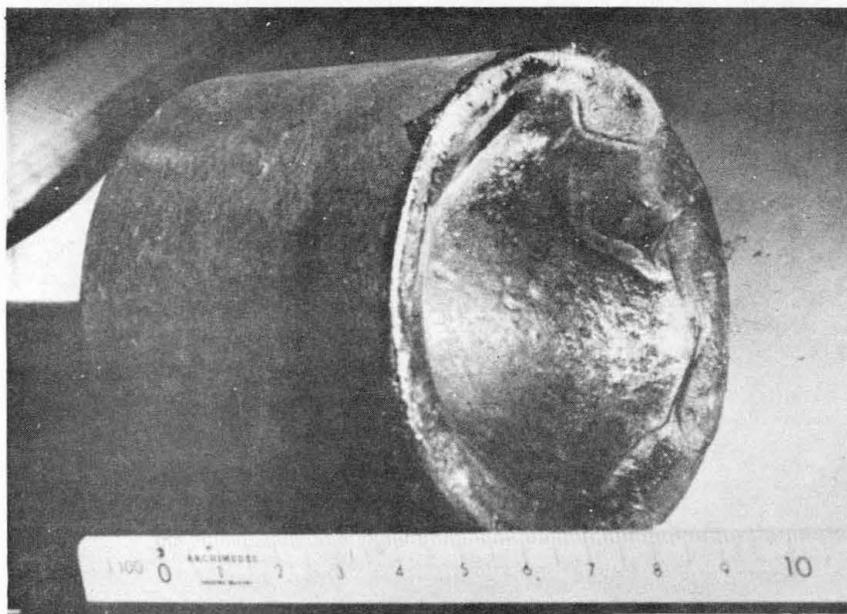


Fig. 15 - Aspecto do restante do eletrodo fundido com polaridade reversa. Amperagem: 1500 A;
 Voltagem: 30 V;

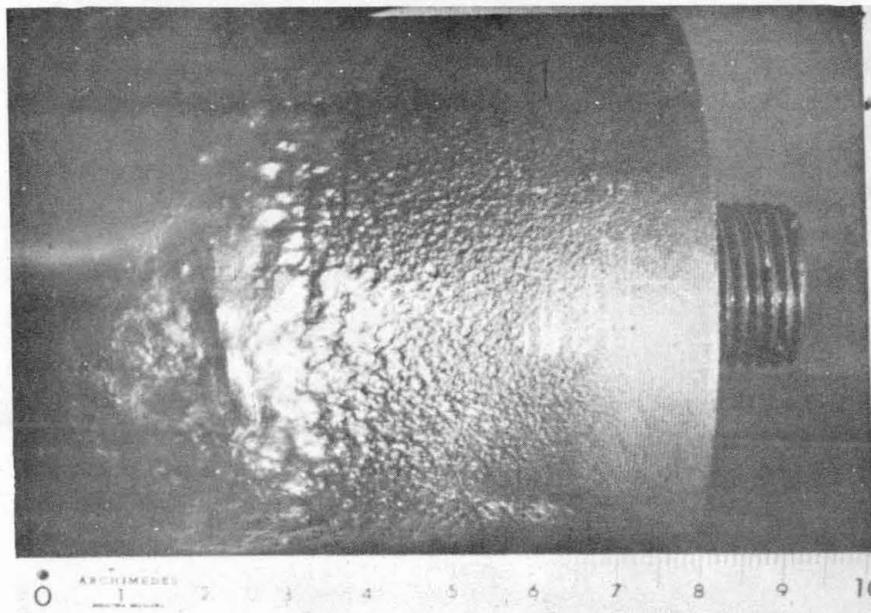


Fig. 16 - Aspecto do restante do eletrodo fundido com polaridade direta. A = 500A
 V = 30V

Fundição à Vácuo

A técnica de fundição à vácuo, usa um cadinho maciço de cobre refrigerado que abriga o metal liquefeito. Uma porção do metal líquido solidifica-se instantaneamente ao entrar em contacto com a parede do molde de forma a formar uma "carcaça" (skull) protetora. O volume de metal líquido depende da potência introduzida e do volume da água de refrigeração. Procura-se obter uma "carcaça" mais leve possível para obter o máximo rendimento de metal fundido. Na hora do vazamento, corta-se a corrente e o porta-eletrodo sobe automaticamente permitindo o vazamento do metal através de uma alavanca solidária ao eixo de rotação do cadinho. Esta operação deve ser extremamente rápida, pois uma vez cortada a corrente o banho metálico resfria na proporção de lkg em cada 4 seg (aço).

Os moldes para a fundição, são geralmente metálicos (cobre) e grafite (desgazeificado).

Para a realização das experiências no PMR, possuía-se apenas dois eletrodos permanentes de $1/2''\phi$ de W, importados com o equipamento. A vida desses eletrodos foi bastante pequena: o primeiro se consumiu em cerca de 15 fusões e o segundo por motivos ainda não bem explicados, em apenas uma fusão de Ti sucitado na forma de chapa que não chegaria a demorar 3 minutos. A causa está relacionada ao elevado teor de cloretos e outros sais existentes na sucata que era proveniente de um cadinho de tratamento térmico que utilizava banhos de sais.

Ficou comprovado que os eletrodos de W com $1/2''$ de ϕ consomem-se rapidamente depois de se atingir 3000 A.

Para substituir os eletrodos de W, empregou-se grafite normal de eletrodo de forno elétrico. Os resultados tem sido bons quando não se ultrapassam os 2800 A, depois dos quais a erosão se torna muito intensa contaminando o banho.

As peças de Titânio produzidas (Fig, 17,18,19), foram todas obtidas por fundição de esponja importada, com um eletrodo de grafite.

A fundição de Ti com eletrodo consumível será o próximo passo da vácuo-metalurgia no PMR, pois depende do desenvolvimento da tecnologia de compactação da esponja em pastilhas e a sua soldagem formando um eletrodo.

CONCLUSÕES

As conclusões que podem ser tiradas se referem somente

às experiências realizadas nos Laboratórios do PMR e são as seguintes:

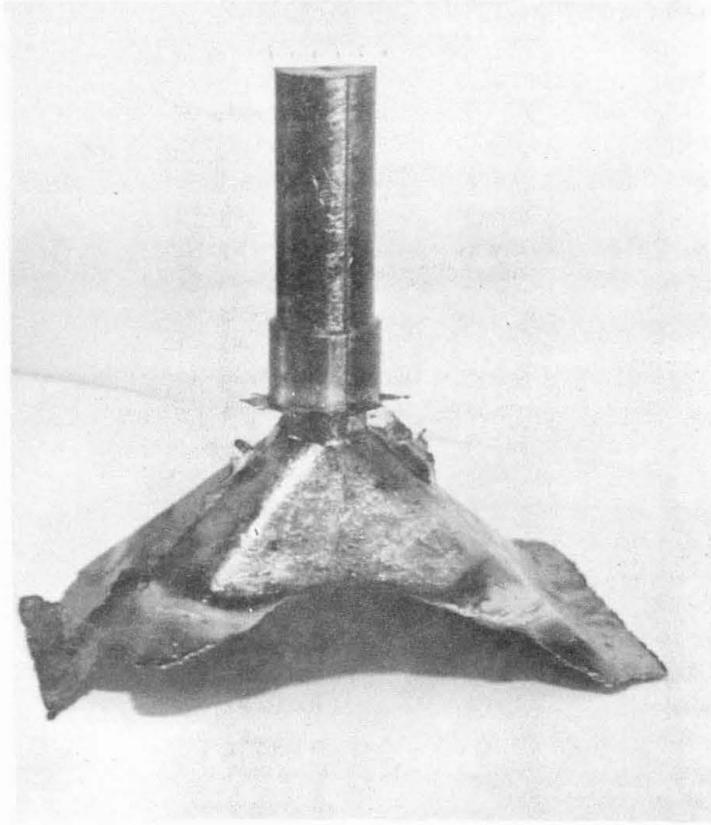


Fig. 17 - Peças de Ti fundida no forno à vácuo (Estado bruto de fusão)



Fig. 18 - Peça semiacabada de Ti

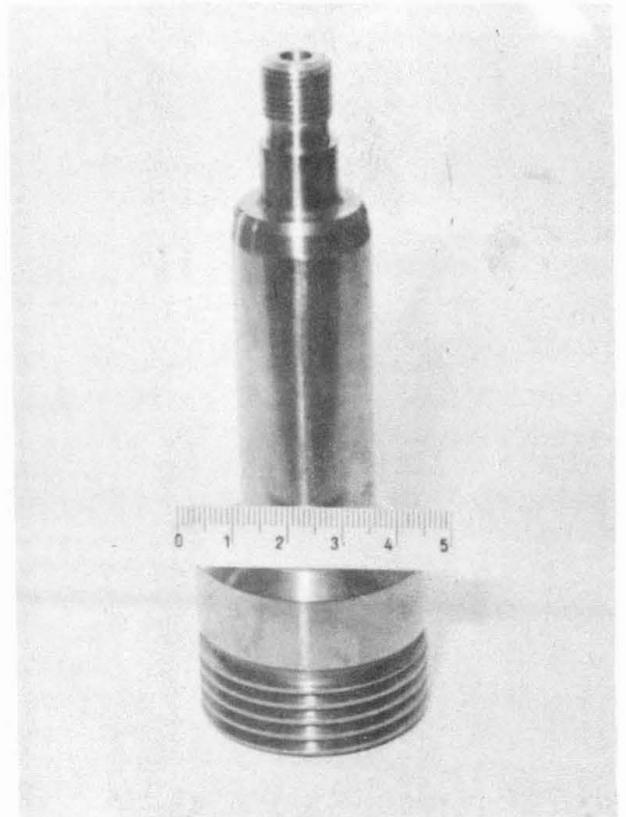
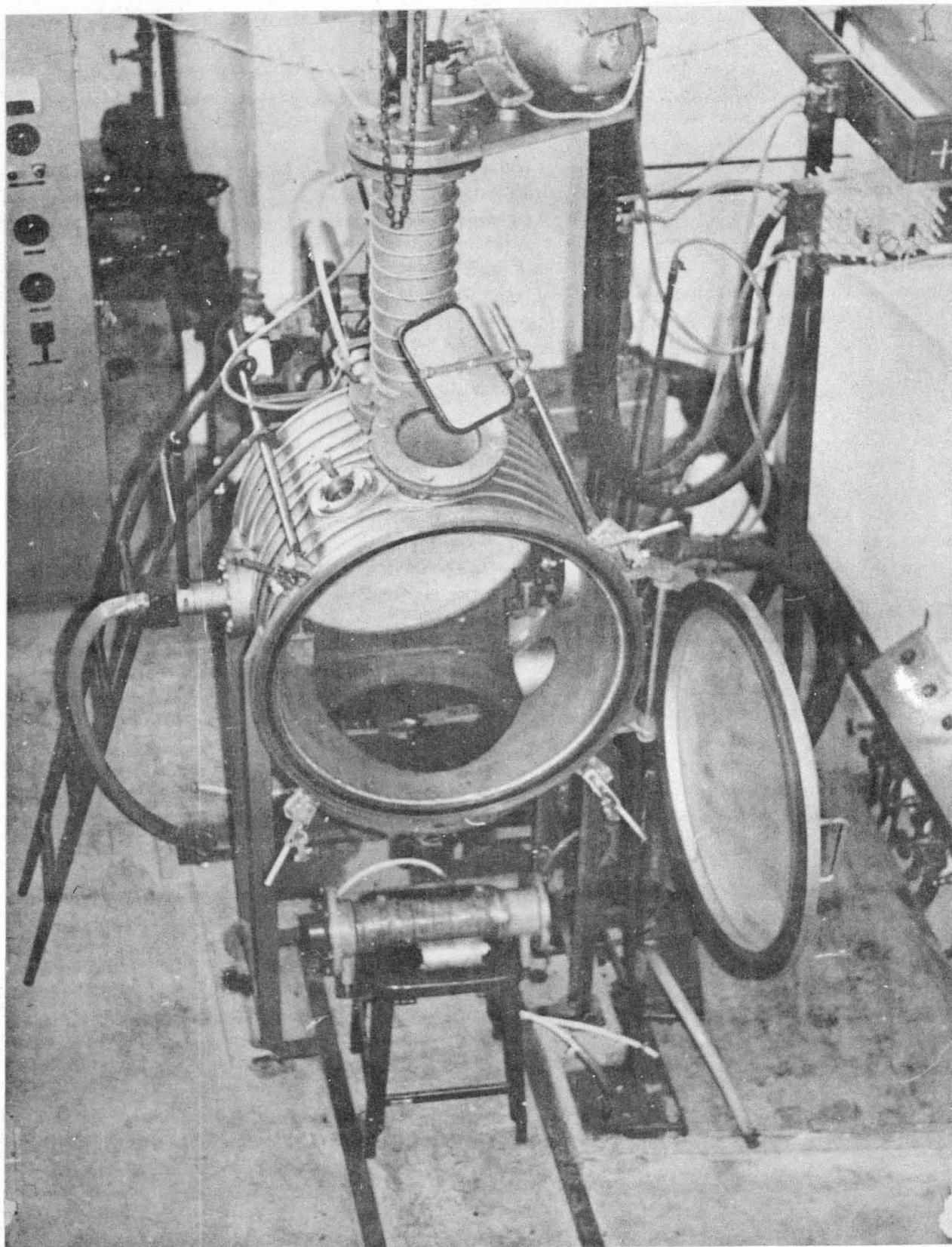


Fig. 19 - Peça acabada de Ti



- Os eletrodos de W e 1/2" \varnothing se consomem rapidamente acima de 3000A
- As impurezas presentes na sucata (cloreto) são extremamente danosas à vida de um eletrodo de W metálico, podendo destruí-lo em poucos minutos.
- Os eletrodos de grafite comum de eletrodos de forno elétrico podem ser usados sem grande erosão, até 2500A.
- A energia dispendida na fusão de um eletrodo de aço consumível em cadinho de cobre refrigerado, é da ordem de 0,62 kwhr/kg de produto vazado.

AGRADECIMENTOS

O autor presta o seu agradecimento ao Eng. Bemides Peres e aos demais membros da equipe de vácuo do PMR, bem como aos demais colaboradores de confecção e montagem deste trabalho.

R E F E R Ê N C I A

- (1) - Vacuum Metallurgy, Ed. R.F. Bunshah, Reinhold Publishing Corp., US, (pg166) 1958
- (2) - Niobium, Tantalum, Molybdenum and Tungsten, Ed. A.G. Quarrel, Elsevier Publ. Co., Netherlands, (pg 21) 1961
- (3) - J. Suiter, "Vacuum Melting and Degassing" - Journal of the Australian Institute of Metals, Vol. 4, No 2 Aug. (pg 95) 1959
- (4) - H.R. Smith, C. d'A Hunt, C.W.Harocks - "Electron Beam Bombardment Melting" - Journal of Metals, Feb 1959
- (5) - Cremers, C.J., E.R. Eckert - "Temperature Field in an Arc", AIAA Journal, Oct 1965
- (6) - Gibbs, E.F., "A Fundamental Study of the Tungsten Arc", Metal Progress, Jul 1960
- (7) - Noesen, S.J., "Consumable Electrode Melting of Reactive Metals", Journal of Metals, Nov. 1960
- (8) - "Niobium, Tantalum, Molybdenum and Tungsten", Report of a Conference held in the University of Sheffield, Sept. 1960, Ed. A.S. Quarrel.
- (9) - H.Gruber, "Electron Beam Melting of Metals" - Metal Treatment and Drop Forging, April, May and June 1962.

VÁCUO METALURGIA DOS METAIS

REATIVOS

Arno Muller⁽¹⁾

DEBATE:

José C. D'Abreu⁽²⁾

- Eu gostaria de saber se foi calculada a eficiência desse forno em função da resistência térmica e resistência elétrica. Como foi?

Muller

- Nós levantamos dados experimentais. O forno já veio pronto e não foi projetado por nós. A literatura mundial sugere, 0,640 KWh/kilo de produto fundido. Nós fizemos as experiências em diversos níveis de amperagem, de voltagem para obter o produto fundido máximo. Chegamos a valores próximos de 0,65 KWh/kg. As conclusões não são muito boas, por isso que eu não reproduzi no trabalho. Mas em geral a conclusão é uma só: deve-se trabalhar no máximo de amperagem possível, para haver um superaquecimento do banho e, portanto, um maior aproveitamento da peça fundida.

D'Abreu

- Pelo seguinte, nesse tipo de forno nós temos circuito de baixa e nesse circuito de baixa quando eu abaxo a voltagem do forno eu aumento muito a resistência elétrica desse circuito de baixa voltagem. Eu estou perguntando isso, porque eu queria saber se foi considerado nesse forno.

Muller

- Nós nem cogitamos disso, porque o equipamento é importado e nós simplesmente o usamos, sem fazer nenhuma análise.

Rennó (3)

- Segundo a sua experiência mesmo, parece que com o alto vácuo o arco é um tanto errático. Isso deve acarretar dificuldades, e eu perguntaria, se nós substituíssemos o alto vácuo por um gas inerte, se não houvesse inconveniente, o Argônio, ou Hélio, e poderíamos vir até a pressão ambiente, como isso se comportaria.

Muller

- As experiências que nós conduzimos, a maioria foi sob Argônio. Não se utiliza a pressão atmosférica porque, devido ao aquecimento do ambiente poderia haver uma super pressão e então a estanqueidade do sistema estaria prejudicada. Nós trabalhamos da ordem de 1/3 de atmosfera de Argônio sem purificação prévia e os produtos de Titânio que tivemos obtido são excelentes, da ordem 120 Brinnell.

Rennó

- Na sua opinião, isso se enquadraria dentro da nomenclatura de metalurgia de vácuo?

Muller

- Sim, eu me esqueci de mencionar no trabalho, mas vácuo aqui é uma coisa muito lata, utilizando inclusive gases inertes, de pressões inferiores à atmosférica.

Bondesan (4)

- Eng^o Muller, eu gostaria de saber o seguinte: o Sr mencionou que o avião Concorde foi feito em Al, e o avião SST americano será feito em Titânio. O Sr teria uma idéia a respeito de comparação, uma comparação rápida a respeito da diferença de preços entre um e outro?

Muller

- O Concorde é muito mais barato por várias razões, não só porque usa liga de Al, que aliás, foi um detalhe, na minha opinião, muito sábio, adotado pelos projetistas

- francêses e inglêses, porque êles diziam que ligas de Al se conhece desde 1920; tem se elas tôdas catalogadas, sabe-se todos os desempenhos em tôdas as situações, enquanto que ligas de Ti ainda estão nascendo. Mas, devido às contingências da Europa, com distâncias pequenas, enfim, tôda a economia de vôo, fizeram com que êles projetassem um avião com velocidade um pouco menor e exatamente o limite de emprêgo das ligas de Al. Os americanos, devido à certa ociosidade das indústrias de Ti dêles, lançaram-se à meta muito maior, utilizando ligas de Ti com os riscos inerentes. Mas, outro fator de ser muito mais barato o Concorde, é o fato dêle ter menor capacidade do que o SST americano. Para se ter idéia do Concorde, por exemplo, uma pessoa bastante alta quase bate com a cabeça no teto dêle, e uma pessoa bastante alta sentada dentro dêle está quase que com o bagageiro na sua cabeça.

Lacaz (5)

- Praticamente estamos encerrando o I Simpósio de Metais Não Ferrosos. Quero agradecer a participação das Sras. e dos Srs. nesta última sessão e em especial aos Srs conferencistas e membros da mesa. A todos muito obrigado. Está encerrada esta última sessão do I SIMENFE.

- 1) Arno Muller
Engenheiro Metalúrgico pela UFRGS - 1962
Pesquisador do Depto de Materiais - IPD/CTA
São José dos Campos

- 2) José C. D'Abreu
Engenheiro Metalúrgico - IPEA

- 3) Dr. Mario Rennó Gomes
Prof. Catedrático de Metalurgia
dos Metais Não Ferrosos na Escola de Engenharia da UFMG
Engenheiro Tecnologista do Instituto de Tecnologia Industrial de
Minas Gerais.

- 4) Ciro Bondesan dos Santos
Pesquisador do Depto de Aeronaves - IPD/CTA
São José dos Campos

- 5) Francisco Antônio Lacaz Netto
Magnífico Reitor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos campos.