

REFUSÃO DE FINOS METALÚRGICOS VIA  
PLASMA TÉRMICO

L.C. Vicente  
J.B.F. Neto  
O.W. Bender  
M.P. Collares

São Paulo, 1992

36286  
IPT  
Pub. 1969  
e.2  
013325.06

L

**We regret that  
some of the pages  
in this report may  
not be up to the  
proper legibility  
standards, even  
though the best  
possible copy was  
used for scanning**

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT  
Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira - Butantã - CEP 05508 - São Paulo-SP  
Caixa Postal 7141 - CEP 01051 - Endereço Telegráfico TECNINST - Telex (11) 80934 e  
(11) 83144 INPT BR - Telefax (011) 869-3353 - Telefone (011) 268-2211

Divisão de Metalurgia  
Coordenador: Claudio Luiz Marotto

Trabalho publicado nos Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo : ABCM, 1991, p. 397-400.

A série "Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos ou publicados em revistas especializadas, sendo seu conteúdo de responsabilidade da respectiva área técnica.

#### AGRADECIMENTOS

À Diretoria Executiva do IPT pelo apoio e incentivo ao projeto e à FINEP pelo apoio financeiro para a implantação do Laboratório de Plasma Térmico. Aos técnicos das oficinas mecânicas do Laboratório de Tecnologia de Fabricação e Seção de Desenvolvimento de Equipamentos Industriais da Divisão de Mecânica e Eletricidade, pela ajuda na construção e montagem do forno e tochas a plasma.

#### ABSTRACT

A plasma furnace was developed for remelting of ferroalloys and silicon fines. The furnace capacity was about 4 kg of silicon and power about 50 kW. The fine (20 to 100 mesh) was fed into the furnace directly at the high temperature zone. This system was tested for remelting silicon fines and the results in the recovery of silicon was about 95% and it took place a refine of aluminium and calcium.

## RESUMO

Foi desenvolvido um forno a plasma visando a refusão de finos de ferroligas ou silício. O forno tem capacidade para processar até 4 kg de silício com potências de até 50 kW. O fino metalúrgico foi fornecido em forma de pó com uma faixa de granulação de 20 a 100 mesh, sendo injetado diretamente na zona de alta temperatura do forno. Foram realizadas várias corridas com finos de silício grau metalúrgico, onde obteve-se uma recuperação de até 95% do metal e refino nos teores de cálcio e alumínio do silício original.

## INTRODUÇÃO

A tendência da tecnologia moderna, aplicada a processos metalúrgicos e químicos, é de utilizar completamente todo o minério bruto, desenvolvendo processos sem perdas, aumentando o nível de produção e qualidade e diminuindo a poluição ambiental.

A tecnologia de plasma térmico tem sido aplicada na metalurgia com relativos sucessos em processos de redução, decomposição térmica, refusão e refino, principalmente na obtenção de metais especiais de alto valor agregado e ferroligas. Somente nos últimos anos foi dada especial atenção ao uso desta tecnologia em processamento de materiais de baixo valor, como por exemplo, finos metalúrgicos. Boa revisão é descrita por Hamblin (1977), Rykalin (1980) e MacRae (1987).

O Brasil, 7º produtor mundial de ferroligas e 3º de silício grau metalúrgico (SIGM), produz considerável quantidade de finos metalúrgicos, partículas menores do que 10mm, procedentes da britagem dos lingotes produzidos. Estes finos, quando encontram posição no mercado, são vendidos a preços muito inferiores do produto em forma de pedras (normalmente entre 25 e 100 mm).

Processos convencionais não conseguem processar diretamente estes finos gerados. Uma alternativa seria fazer sua aglomeração, utilizando-os como carga suplementar no processo de redução em fornos a arco submerso. No entanto, isto acarretaria problemas na operação do forno e um acréscimo no custo do produto final.

A aplicação da tecnologia de plasma térmico na refusão de finos metalúrgicos vem obtendo resultados animadores, pelo menos a nível piloto, como mostrado por Schoukens e Curr (1984) e MacRae (1984).

## SISTEMA DE PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO

O processo via plasma térmico faz uso do estado de plasma da matéria, que pode ser gerado pela passagem de uma corrente elétrica através de um gás, conhecido também como descarga gasosa. Uma compreensiva revisão sobre fundamentos e física do plasma térmico pode ser encontrada em Dresvin (1977) e Pfender (1978).

Em princípio, o plasma é uma fonte de altas temperaturas, possível de ser utilizada em processos metalúrgicos. Muitos tipos de tochas a plasma tem sido desenvolvidas para esta finalidade, como mostra Eschenback et al (1987).

Neste trabalho optou-se pela utilização de um

sistema de plasma de arco transferido com Catodo de Grafite Furado (CGF). Este sistema é composto por bocal de grafite, rosqueado em um suporte refrigerado com entrada independente do gás de plasma, argônio no caso. Uma descarga em arco elétrico é gerada entre o bocal de grafite (catodo) e o banho de metal líquido (anodo) e mantida por uma fonte de potência, como mostrado no esquema apresentado na figura 2.

O sistema de plasma desenvolvido fornece potências de 6 kW a 40 kW (figura 1), dependendo da corrente (I), vazão do gás (G) e distância catodo-anodo (D), usando argônio como gás de trabalho. Além disso, estas variáveis têm uma forte influência na distribuição da energia térmica no interior do forno. Segundo Bender et al (1990), no caso do argônio, é válida as seguintes proposições:

- 1º) a energia térmica fornecida para o banho líquido (anodo) é crescente para distâncias até 15 cm, variando de 85% a 50% da potência total fornecida, dependendo da corrente e fluxo do gás. Para distâncias acima deste valor a energia entregue para o banho permanece constante.
- 2º) a energia térmica devido a radiação/convecção absorvida pelas outras partes do forno é sempre crescente e diretamente proporcional a corrente do arco e a distância catodo-anodo.

Portanto, o pré conhecimento do comportamento do sistema de plasma tornou-se possível definir os parâmetros para cada etapa na refusão de finos metalúrgicos, que são apresentados mais adiante.

## FORNO DE FUSÃO

O forno para fusão de finos é composto de uma carcaça de chapa de aço e uma tampa, revestidos com material refratário. O fundo do forno é revestido de pasta de carbono até a linha limite de armazenamento de 4 kg de silício. No socamento é colocado um eletrodo de soleira de grafite, servindo inicialmente como anodo e depois contato elétrico com o banho de metal líquido. Acima da camada limite de silício, o forno foi socado com massa refratária aluminosa (90%  $Al_2O_3$ ) para melhorar o isolamento térmico e resistir a elevada radiação térmica da descarga de plasma que incidia diretamente sobre ela. O forno contém ainda uma bica lateral na qual ao final de cada corrida era vazado, por basculamento, o metal líquido em lingoteiras.

## SISTEMA PARA FORNECIMENTO DE FINOS

No processo de refusão de finos metalúrgicos

uma injeção lenta e contínua seria "teoricamente" uma forma otimizada de se transferir calor para as partículas. Para tal, foi desenvolvido um sistema para o fornecimento de finos composto de um funil de separação tipo pera, para conseguir um ambiente com atmosfera

controlada, sendo que na tampa deste funil de separação foi feito o fornecimento de pó no sistema, como também a introdução do gás de arraste do pó (argônio).

O tubo para introdução do argônio era longo o suficiente para que sua extremidade ficasse junto à saída do pó. Isto garantiu que o gás de arraste do pó fosse essencialmente argônio. A vazão de operação foi de 3Nℓ/min e a vazão do pó, na faixa de granulação de 20 a 100 mesh, variava entre 60 e 500 g/min apenas variando a altura do tubo de introdução do argônio, com relação à saída do pó.

Na saída do funil de separação foi colocada uma mangueira a qual levava o pó para dentro do forno paralelamente ao sistema de plasma com CGF via um tubo de alumina.

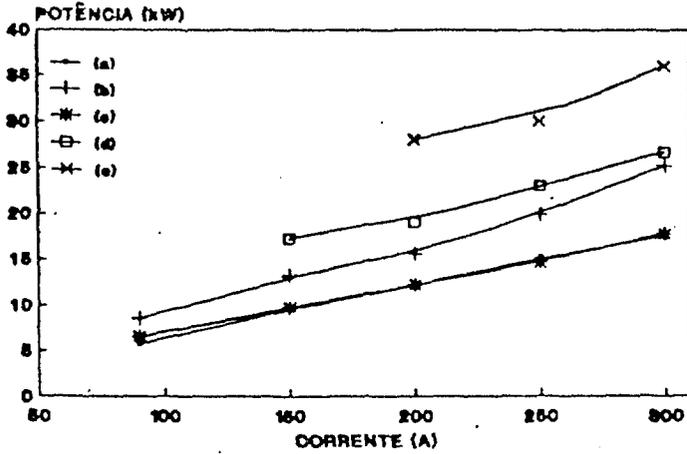


Figura 1. Potência fornecida pelo sistema de plasma com CGF desenvolvido versus corrente do arco em função da vazão do gás (G) e distância catodo-anodo (D), sendo:  
 (a) G=10 Nℓ/min, D=5cm; (b) G=10 Nℓ/min, D=10cm  
 (c) G=20 Nℓ/min, D=5cm; (d) G=20 Nℓ/min, D=10cm  
 (e) G=20 Nℓ/min, D=15cm

### MONTAGEM EXPERIMENTAL

A figura 2 mostra esquematicamente a montagem geral para a execução dos ensaios, composta de sistema de plasma com CGF, forno de fusão, fornecimento de finos e instrumentação para controle do processo. Nas experiências realizadas foram seguidas quatro etapas: pré-aquecimento do forno, injeção de finos, aquecimento do banho e vazamento.

A definição dos parâmetros operacionais para cada etapa são apresentados na Tabela 1 e foram obtidos após análise do comportamento do sistema de plasma, como discutido anteriormente.

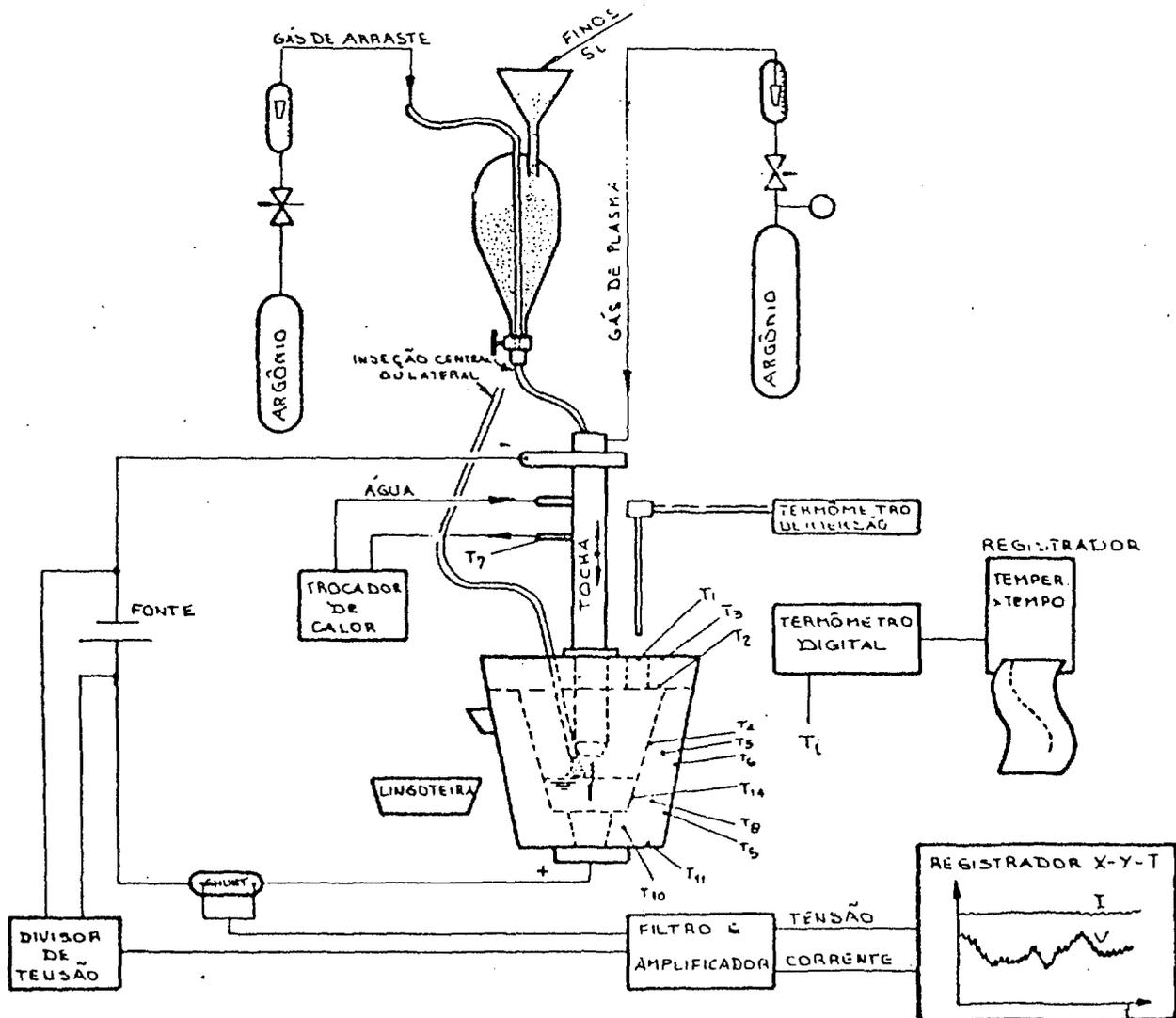


Figura 2. Montagem experimental

Tabela 1. Parâmetros operacionais para o processo de refusão de finos de silício grau metalúrgico

ETAPA	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (kW)	DISTÂNCIA (cm)	VAZÃO GÁS PLASMA (Nℓ/min)	VAZÃO GÁS ARRASTE (Nℓ/min)	TAXA INJEÇÃO FINOS (g/min)
Pré-aquecimento	300	30	16	8	-	-
Fusão de Finos	300	~20	10-16	8	3	80-115
Aquecimento Banho	300	~18	8	8	-	-
Vazamento	Temperatura do Banho ~1500 °C					

### REFUSÃO DE FINOS METALÚRGICOS

O forno a plasma foi testado usando finos de SIGM, realizando-se várias corridas segundo o procedimento já descrito. As figuras 3 e 4 mostram a variação da potência e a evolução da temperatura da parede interna do forno (T14) ao longo de uma corrida.

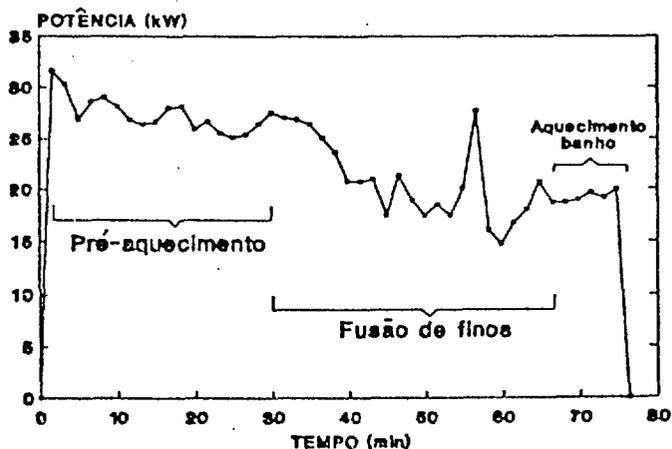


Figura 3. Potência fornecida em função do tempo ao longo de uma corrida

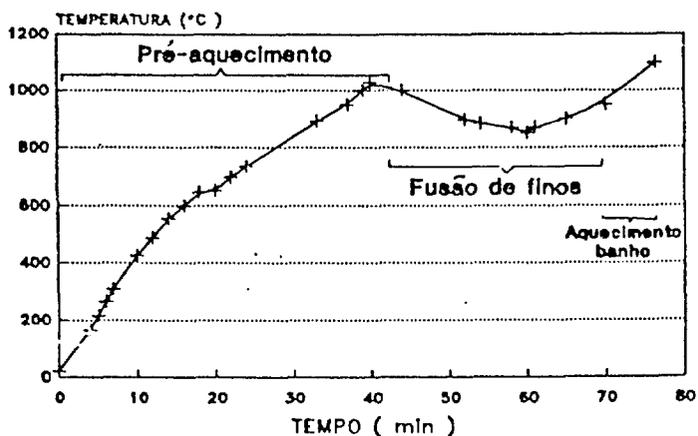


Figura 4. Temperatura do forno (T14) em função do tempo ao longo de uma corrida

A análise sobre o desempenho do sistema de plasma com CGF no processo de refusão de finos foi satisfatória, como pode ser observado pelos resultados apresentados na Tabela 2. Os valores referentes às análises químicas são expressos em percentagem por massa, e as grandezas ZI e Z Si correspondem a eficiência de eliminação da impureza l e o rendimento de recuperação do produto, respectivamente. O valor médio da energia consumida, obtida pela integração da potência fornecida em relação ao tempo e dividindo-se pela massa do produto recuperado, foi de 3,5 kWh/kg.

Foi observado que o forno projetado tem uma elevada perda térmica, em torno de 80%, sendo que 26,2% era perdido para a refrigeração do sistema de plasma, e que a maior parte do calor era perdida na região do refratário em contato com o banho de metal líquido, como esperado.

Analisando a tabela 2, nota-se que houve um refino quanto aos elementos cálcio e alumínio, o qual pode ser atribuído à volatilização desses elementos nas regiões de altas temperaturas no interior do forno a plasma e principalmente através de processo de oxidação e fixação de seus óxidos em uma escória, do sistema  $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ .

A manutenção de condições oxidantes foi obtida devido a entrada de ar, pois o forno não é de todo estanque. Na realidade existe uma relação ótima do nível de oxidação no interior do forno, a fim de evitar excessiva perda de silício na forma de  $SiO$  (gás) e ao mesmo tempo propiciar o refino do mesmo através de uma escória de alto potencial de oxidação, a base de  $SiO_2$ . Desta forma, os óxidos de cálcio e alumínio seriam fixados por ela, segundo MacRae (1983).

Tabela 2. Resultados de análise química de duas corridas realizadas, com rendimento metálico

ENSAIO	Z CA	Z AL	Z SI (%)	
A	Finos	0,17	0,23	88,6
	Produto	0,0058	0,12	
	ZI (%)	96,7	47,8	
B	Finos	0,28	0,42	95,0
	Produto	0,007	0,096	
	ZI (%)	97,8	77,1	

### CONCLUSÕES

A montagem experimental, em escala laboratorial, composta do sistema de plasma com catodo de grafite furado, forno de fusão e fornecedor dos finos tiveram um bom desempenho, cujos resultados demonstram sua viabilidade técnica tanto no objetivo de recuperação de finos de silício através da refusão quanto ao seu refino, podendo se estender para diversos ferroligas, inclusive com possibilidade de realização da cofusão de finos (ex.: finos de FeSi e FeMn obtendo FeSiMn).

A continuidade deste trabalho será desenvolver em uma escala maior, uma montagem experimental com características mais próximas àquelas que poderiam ser utilizadas nas empresas de silício grau metalúrgico e ferroligas.

## REFERÊNCIAS

- .Bender, O.W., Collares, M.P. e Vicente, L.C. "Estudos de Transferência de Calor e Obtenção de Parâmetros Operacionais de Arco de Plasma Transferido", Relatório Técnico da Divisão de Mecânica e Eletricidade do IPT, 1990.
- .Dresvin, S.V., "Physics and Technology of Low-Temperature Plasmas", The Iowa State University Press AMES, 1977.
- .Eschenback, R.C., Barcza, N.A. and Reid, K.J., "Plasma Torches and Plasma Torch Furnaces", In Plasma Technology in Metallurgical Processing, editor Jerome Feinman, chapter 7, pp. 77-87, 1987.
- .Hamblin, S.M.L., "A Review of Applications of Plasma Technology with Particular Reference to Ferro-Alloy Production", National Institute for Metallurgy, Report nº 1895, 1977.
- .MacRae, D.R., "Application of Plasma Technology to Ferroalloy Processing", In Plasma Technology in Metallurgical Processing, editor Jerome Feinman, chapter 12, pp.147-161, 1987.
- .McRae, L.B., "The Refining of Silicon" Council for Mineral Technology, South Africa Pat.83/6819, 1983.
- .McRae, L.B., Barcza, N.A. and Curr, T.R., "The Application of Transferred-Arc Plasma to Melting of Metal Fines", Preprint Mintek 50, Sandton, South Africa, 1984.
- .Pfender, E., "Electric and Arc Gas Heaters", In Gaseous Electronics, editor M. Goldman and A. Goldman, Vol. I, chapter 5, pp. 291-391, 1978.
- .Rykalin, M.N., "Thermal Plasma in Extractive Metallurgy", Pure & Appl. Chem., Vol.52, pp.1801-1815, 1980.
- .Schoukens, A.F.S. and Curr, T.R., "The Production of Manganese Ferro-Alloys in Transferred-Arc Plasma Systems", Proceedings of the ISS/AME 42nd Electric Furnace Conference, Toronto, pp.161-171, 1984.