

# OBTENÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS A PARTIR DE GUSA NIQUELÍFERO E CROMITA, POR ADAPTAÇÃO DA TÉCNICA L-D <sup>(1)</sup>

HUGO MONTEIRO DE BARROS CARL <sup>(2)</sup>

LUIZ C. CORRÊA DA SILVA <sup>(3)</sup>

## RESUMO

*Com base em experiência previamente adquirida, foram realizadas, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, pesquisas visando o desenvolvimento de uma técnica simples que permita a produção de aços inoxidáveis em fundições de ferro fundido. Descreve-se o equipamento utilizado, a técnica de operação desenvolvida e os resultados obtidos em 11 experiências realizadas, nas quais se comprovou ser tecnicamente viável a produção de lingotes e peças daqueles aços, em pequena escala.*

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Trabalhos anteriores realizados no IPT de São Paulo (refs. 1 e 2) indicaram as possibilidades de adaptação e simplificação da técnica L-D, de modo a permitir sua utilização em pequena escala, com equipamentos muito simples, seja para o refino de gusa níquelífero, seja para produção de pequenas quantidades de lingotes e peças em fundições de ferro fundido.

Como já mencionado naqueles trabalhos, conta o Brasil com centenas de fundições de ferro fundido e com apenas cerca de dez fundições de aço. Mesmo entre estas últimas,

---

(1) \* Contribuição Técnica nº 512. Apresentada ao XVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Belo Horizonte, MG, julho de 1963.

(2) Sócio Estudante da ABM; Aluno do Curso de Metalurgia da Escola Politécnica da USP; Assistente Aluno da Secção de Aços do IPT; São Paulo, SP.

(3) Membro da ABM; Chefe da Divisão de Metalurgia do IPT de São Paulo; Professor de Siderurgia e de Físico-química Metalúrgica; Escola Politécnica, SP.

nem tôdas estão em condições de atender normalmente a pedidos de peças de aço inoxidável. Assim sendo, pareceu interessante prosseguir os trabalhos anteriores e tentar desenvolver uma técnica simples que permitisse a qualquer fundição de ferro fundido, com um mínimo de equipamento e usando matérias-primas disponíveis no Brasil, produzir pequenas quantidades de lingotes ou peças de aço inoxidável.

## 2. OBJETIVOS DAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS

Nas pesquisas aqui relatadas, realizadas em fins de 1962 e em 1963 na Divisão de Metalurgia do IPT, teve-se como objetivo principal a verificação das possibilidades de produção de aços inoxidáveis do tipo austenítico (com Cr e Ni), aproveitando a experiência anteriormente adquirida no refino de gusa níquelífero. Têm êsses aços um vasto campo de aplicação e, além do mais, era evidente que, desenvolvida uma técnica para sua produção, não haveria problemas especiais para a produção de aços inoxidáveis dos tipos ferrítico e martensítico, que não contêm níquel em sua composição.

A idéia básica que serviu de ponto de partida para as experiências foi a seguinte:

- 1 — Fundir uma mistura adequada de gusa comum e gusa níquelífero.
- 2 — Refinar essa mistura por oxigênio, obtendo liga Fe-Ni com baixo teor de outros elementos.
- 3 — Retirar a escória formada.
- 4 — Adicionar uma mistura aluminotérmica constituída por cromita, alumínio granulado e os aditivos eventualmente necessários para assegurar uma boa reação de redução do cromo (com a incorporação dêste ao banho metálico).
- 5 — Vazamento de lingotes ou peças.

As experiências realizadas tiveram os seguintes objetivos principais:

- Estabelecer a proporção adequada de gusa comum e de gusa níquelífero a fundir e refinar por oxigênio, de modo a se obter um teor conveniente de níquel no final da oxidação.
- Determinar qual a mistura aluminotérmica mais adequada para adição ao metal líquido, de modo a permitir que todo o cromo necessário seja introduzido no banho por redução de cromita (prescindindo do uso de ferro-cromo de baixo carbono).

- Verificar o grau de contrôle da composição (especialmente de C, Si, Cr e Ni) possível de ser conseguido nas condições das experiências (pequena escala; impossibilidade de análise durante a operação; etc.).
- Obter indicações preliminares sôbre as características principais dos lingotes e peças produzidos (forjabilidade, defeitos, etc.).

### 3. COMPOSIÇÕES DOS AÇOS QUE SE DESEJAVA PRODUZIR

Para referência, as composições de alguns tipos comuns de aços austeníticos (especificação A.I.S.I.) estão indicadas na Tabela I.

TABELA I — Algumas composições especificadas pelo A.I.S.I. (American Iron and Steel Institute) para aços inoxidáveis do tipo austenítico (ref. 7)

Classe A.I.S.I.	C (max)	Cr	Ni	Si (max)	Mn (max)	P (max)	S (max)
302	0,15	17-19	8-10	1,00	2,00	0,045	0,030
302B	0,15	17-19	8-10	3,00	2,00	0,045	0,030
304	0,08	18-20	8-12	1,00	2,00	0,045	0,030

É de se notar que nas experiências realizadas não se objetivou pròpriamente a produção dêste ou daquele tipo de aço, com rigorosa obediência às especificações. Tratando-se de experiências preliminares, a intenção principal foi a de se verificar a validez da idéia básica já exposta em item anterior e obter dados essenciais que permitam o posterior desenvolvimento da técnica e eventual aplicação industrial.

Foi dada atenção especial à incorporação dos elementos liga mais caros, ou sejam, o Cr e o Ni.

### 4. EQUIPAMENTOS E MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

Tal como em experiências anteriores, procurou-se utilizar equipamentos extremamente simples e disponíveis ou fã-

ilmente obteníveis nas pequenas fundições de ferro fundido. Na escolha desses equipamentos os fatores preponderantes foram: a simplicidade, a facilidade de obtenção e o baixo custo.

Do mesmo modo, na escolha das matérias-primas procurou-se lançar mão de materiais de fácil aquisição e do mais baixo custo possível. Para suprir o cromo necessário pareceu interessante partir da cromita nacional, promovendo a sua redução por meio de reação aluminotérmica, diretamente na panela utilizada para a operação. Para suprir o níquel necessário pareceu interessante partir do gusa níquelífero normalmente produzido no Brasil há mais de 20 anos.

A seguir estão indicados os dados principais relativos aos equipamentos e matérias-primas empregados:

*Recipiente para o preparo do aço* — Como recipiente para refino e elaboração do aço foi utilizada uma panela comum de fundição, com capacidade nominal de 80 kg de ferro fundido ou aço. Não foi utilizada nenhuma tampa ou cobertura, visto que se desejava ter boa visibilidade durante o transcorrer das operações (para melhor controlar o andamento das reações, a posição e o desgaste da lança, etc.). No entanto, o uso de uma cobertura adequada (ver ref. 1) é aconselhável, visto que, em certas condições, podem ocorrer projeções de metal ou escória líquida. Além disso, o uso de uma cobertura contribuirá para evitar perdas térmicas, particularmente indesejáveis nas operações em pequena escala.

*Lanças* — As lanças usadas eram do mesmo tipo já descrito em trabalhos anteriores. Consistiam de tubos de aço (condutes) revestidos com camada de refratário, no caso uma mistura à base de magnesita. Em trabalho anterior encontram-se indicações bastante detalhadas sobre o modo de confeccioná-las (ref. 1 e 2). Nas experiências desta série aproveitaram-se lanças grandes normalmente empregadas para injeções no forno elétrico do IPT, as quais eram constituídas por um conduíte com diâmetro interno de cerca de 17 mm, conduíte este revestido com magnesita (diâmetro externo da lança revestida: 80 mm). A lança, durante a operação, era suspensa verticalmente sobre o banho, podendo ser abaixada ou levantada por meio de um sistema muito simples de roldana e tirante.

*Gusa comum* — O gusa comum utilizado para compor a carga inicial era do tipo correntemente usado nas fundições, com a análise seguinte: 3,71% C; 1,66% Si; 0,22% Mn; 0,37% P; 0,028% S. Seria recomendável, para as fundições que queiram reproduzir a técnica aqui descrita, o emprêgo de um gusa de mais baixo teor de fósforo e, talvez, silício mais elevado, para aumentar a disponibilidade de calorías durante o refino de pequenas cargas.

*Gusa níquelífero* — Usou-se gusa níquelífero produzido correntemente no país, com a análise aproximada seguin-

te: 2,60% C; 2,20% Si; 0,15% Mn; 0,18% P; 0,03% S; 25% Ni e 1,8% Cr.

*Cromita* — Usou-se cromita moída a -10 mesh, com a seguinte composição média: 41,3%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; 24,6% Feo; 11,8%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 11,6% MgO; 1,89%  $\text{SiO}_2$ . Existem, no mercado, cromitas mais ricas, que deveriam, evidentemente, ser preferidas; usamos uma cromita de que dispúnhamos.

*Alumínio* — Para o preparo de alumínio granulado para as misturas aluminotérmicas partiu-se de alumínio puro, comercial, em lingotes, com 99,5% Al.

*Nitrato de sódio* — Usou-se "salitre do Chile", comercial, granulado, com granulometria -6 mesh. Esse produto não foi analisado nas experiências realizadas.

*Oxigênio* — O oxigênio usado foi o oxigênio comercial, em tubos de  $6,6 \text{ m}^3$ . Para a escala das experiências realizadas um tubo era suficiente para o refino de uma carga.

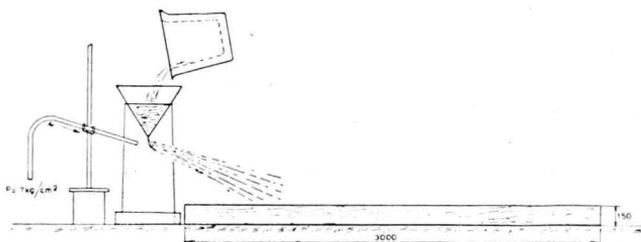


Fig. 1 — Esquema do aparelho usado para o preparo do alumínio granulado necessário para as misturas aluminotérmicas com cromita. Partiu-se do alumínio comercial, em lingotes, com 99,5% de Al.

## 5. PREPARAÇÃO DO ALUMÍNIO GRANULADO NECESSÁRIO PARA AS MISTURAS ALUMINOTÉRMICAS COM CROMITA

Para preparar as misturas aluminotérmicas com cromita, necessárias para introdução do cromo no banho diretamente a partir do minério (em lugar de usar ferro-cromo de baixo carbono), era necessário contar com Al de granulometria adequada. Diversas técnicas de granulação são conhecidas. Para as experiências aqui relatadas foi decidido usar a seguinte, que pareceu bastante simples e facilmente exequível:

— Fundir o Al; vertê-lo lentamente num funil metálico apropriado.

- Aplicar um jato de ar perpendicularmente ao jato de Al líquido que sai pelo bico do funil.
- Receber o Al granulado (ainda líquido ou parcialmente solidificado) em um tanque de água, evitando sua aglomeração.
- Secar o material granulado obtido. Separar por peneiramento a fração granulométrica desejada.

Essa técnica provou ser plenamente satisfatória. São apresentados, a seguir, dados mais detalhados sobre a prática desenvolvida durante o estudo:

1) O Al era fundido em forno a óleo, tipo Fisher, em cargas de 15 a 20 kg. O aparelho de granulação está ilustrado na fig. 1. Consistia de funil e tanque de chapa de aço, e de um suporte para a mangueira de ar comprimido.

2) O ar comprimido usado era fornecido pela instalação geral, com pressão da ordem de  $5 \text{ kg/cm}^2$ . A intensidade do jato (vazão) era regulada por um registro, de modo a se obter uma dispersão satisfatória do Al líquido. O jato de ar era orientado ligeiramente para baixo (mas com tanques maiores poderá ser horizontal). O bico de saída do ar comprimido era um tubo de 17 mm de diâmetro, achatado na ponta, de modo a fornecer um jato de maior capacidade de dispersão.

3) O tanque de água tinha cerca de  $1 \times 3 \text{ m}$  e apenas cerca de 10 cm de água. O funil tinha um bico de cerca de 1 cm de diâmetro.

4) Mesmo com o equipamento simples aqui descrito, foi possível preparar facilmente lotes de 15 a 40 kg de alumínio granulado. Para processar uma carga de 15 kg de alumínio (correspondendo aproximadamente à capacidade do cadinho do forno utilizado) eram necessários cerca de 30 minutos. O tanque usado não permitia a acumulação de mais do que 100 kg de alumínio granulado.

5) O alumínio granulado obtido era retirado do tanque e secado em estufa, a cerca de  $200^\circ\text{C}$ , durante meia hora. Também é possível secá-lo facilmente espalhando-o sobre uma chapa e aquecendo por fogo de lenha.

6) A classificação do Al granulado foi feita em três frações: fina, abaixo de 10 mesh; média, entre 6 e 10 mesh; grossa, para refusão, acima de 6 mesh.

Na Tabela II acham-se indicados os resultados de algumas "corridas" típicas para o preparo de Al granulado.

TABELA II — Resultados de algumas “corridas” típicas para o preparo de Al granulado

Corridas (exemplos)	A	B	C	D
Pêso total de Al fundido (kg) ....	15,5	18	25	30
Pêso de Al granulado obtido (kg)	15,0	17,2	24	29
Pêso de Al -10 mesh (kg) .....	12,2	13	17	20
Pêso de Al entre 6 e 10 mesh ....	1,3	2,7	4,0	5,5
Pêso de Al grosso não aproveitado (refusão) .....	1,6	1,5	2,5	3,5
Perda (%) .....	3	5	4	3
% Al (-) 10 mesh .....	79	72	70	67
% Al entre 6 e 10 mesh .....	8	15	16	18
% Al para refusão .....	10	8	10	11
% Al aproveitável .....	87	87	86	85

## 6. EXPERIÊNCIAS PRELIMINARES COM MISTURAS ALUMINOTÉRMICAS

A reação aluminotérmica para redução de cromo a partir de cromita requer, para que se dê a partir de reagentes frios, a adição de oxidantes especiais (vide refs. 4, 5 e 6). Além disso, no caso das experiências planejadas, desejava-se utilizar misturas com ingredientes baratos, facilmente disponíveis. As misturas também deveriam ser de fácil preparação e adição à liga Fe-Ni líquida.

Para experimentar misturas diferentes, foi realizada uma série preliminar de experiências em escala diminuta, consistindo em: preparo de diferentes misturas aluminotérmicas; verificação da sua reatividade (facilidade para o início e propagação da reação); composição do metal produzido; efeito da adição de diferentes oxidantes auxiliares. Estas experiências foram realizadas em cadinhos pequenos. A ignição das misturas era feita, como é costume, por meio de uma fita de magnésio.

Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela III.

TABELA III — Resultados das experiências preliminares com misturas aluminotérmicas

Experiência		A	B	C	D	E	F	G	H
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de cromo)	Pêso (g)	20	20	20	—	—	—	—	—
	%	38	42	47	—	—	—	—	—
Cromita	Pêso (g)	—	—	—	20	1000	45	20	40
	%	—	—	—	40	40	45	49	47
Alumínio	Pêso (g)	25	20	15	20	1000	45	8	20
	%	47	42	35	40	40	45	20	23
Nitrato de sódio	Pêso (g)	4	4	4	5	250	5	8	25
	%	7,5	8	9	10	10	5	20	30
Ácido crômico (CrO <sub>3</sub> )	Pêso (g)	4	4	4	5	250	5	5	—
	%	7,5	8	9	10	10	5	11	—
Ferro-cromo obtido	% Cr	42,5	58,8	68,1	36,5	39,5	50,8	55	52
	% C	0,1	0,11	0,15	0,10	n.a.	0,16	n.a.	n.a.
	% Si	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,88	1,89

Os resultados obtidos indicam que:

1 — Não é necessária a adição de Al em excesso; deve-se usar o alumínio em percentagem próxima da estequiométrica.

2 — Não é necessário recorrer a aditivos oxidantes caros, como o  $\text{CrO}_3$  ou o peróxido de bário; é perfeitamente possível o uso de "salitre do Chile" industrial ( $\text{NaNO}_3$ ), muito mais barato.

3 — A melhor relação de cromita para Al é de 2,5 a 2,8. No decorrer das experiências posteriores, de produção de aço inoxidável, foram usadas misturas do tipo "H", variando-se ligeiramente as percentagens de Al e nitrato de sódio, com o objetivo de obter melhores rendimentos.

4 — Mesmo em pequena escala, as misturas do tipo "H" da Tabela III permitem obter ferro-cromo satisfatório.

## 7. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS E SEUS RESULTADOS

Os resultados obtidos em 11 experiências realizadas, visando a produção de aço inoxidável do tipo austenítico, estão resumidos na Tabela IV. Nela estão indicados os dados essenciais relativos à carga metálica inicial de gusa comum e gusa níquelífero; as misturas aluminotérmicas adicionadas ao metal líquido após o refino com oxigênio; o consumo de oxigênio; o aço inoxidável obtido; a escória produzida; as peças e lingotes produzidos.

É de notar que se trata de experiências em pequena escala, com tôdas as dificuldades decorrentes do pequeno volume térmico e físico-químico. São maiores as dificuldades de operação e percentualmente maiores as perdas. É de se crer que a operação em maior escala conduza a resultados bem melhores, do ponto de vista dos rendimentos.

Sobre os dados apresentados na Tabela IV cabem os seguintes comentários:

1) Almejou-se, nas experiências, a produção de cargas de 20 kg de aço inoxidável líquido.

2) As cargas de partida, de gusa comum e gusa níquelífero (18-20 kg), foram fundidas em forno de indução. Em fundições interessadas em utilizar a técnica aqui descrita a fusão poderá ser feita em cubilô ou forno tipo "Detroit".

3) A carga fundida era vazada diretamente na panela de refino, e esta transportada ao local onde se fazia a injeção de oxigênio e as adições. Colocada a panela no local

apropriado baixava-se a lança e iniciava-se a insuflação com oxigênio. Esta insuflação durava cêrca de 7 a 9 minutos.

4) Seria desejável o uso de uma escória básica, durante o refino com oxigênio, para permitir uma eliminação do fósforo existente nos gusas de partida. Nas experiências realizadas, porém, não houve preocupação com êste ponto, pois os objetivos eram, essencialmente, o da incorporação do Ni e do Cr em proporções adequadas.

TABELA IV — Resultados das experiências realizadas

	Material	LD-41	LD-42	LD-43	LD-44	LD-45	LD-46	LD-47	LD-48	LD-49	LD-50	LD-51	
Carga Metálica (kg)	Gusa Ni	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	
	Gusa C.	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	10,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	
Oxigênio	Pressão	3 a 5	3 a 5	2 a 4	2 a 4	2 a 4	2 a 4	2 a 4	2 a 4	2 a 4	2 a 3	2 a 3	
	Tempo (min)	7	7	8	8	9	8	8	9	5	8	9	
	Total(m <sup>3</sup> )	4,1	3,9	4,1	4,4	4,5	4,6	4,8	4,4	3,0	4,0	4,2	
Adições (kg)	Cromita	17,2	17,5	17,5	17,2	22,0	23,0	20,5	20,5	19,2	19,2	20,5	
	Alumínio	7,2	7,4	7,5	7,3	11,5	10,0	8,5	8,5	8,0	8,0	8,5	
	Nitrato	5,2	6,0	6,0	6,0	8,0	8,2	5,0	5,1	5,0	5,0	5,1	
	Cal	-	-	-	1,0	1,0	1,5	2,0	2,0	2,0	1,5	2,5	
	Alcatrão	1,0	0,9	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Fluorita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	
Sílica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-		
Cr e Fe na Cromita (kg)	Cr	5,2	5,3	5,3	5,2	6,6	6,9	6,2	6,2	5,8	5,8	6,2	
	Fe	3,3	3,3	3,3	3,3	4,2	4,4	3,9	3,9	3,7	3,7	3,9	
Metal introd.	Pêso total(kg)	27,5	27,6	27,6	27,5	29,8	31,3	28,1	28,3	27,5	27,5	28,1	
Aço inoxidável obtido (kg)	C	0,38	0,27	0,19	0,05	0,05	0,07	0,08	0,13	n.a.	0,09	0,13	
	Cr	15,7	12,7	10,9	13,1	19,6	20,4	17,4	18,8	31,4	11,5	14,7	
	Ni	7,03	9,44	9,15	7,79	6,95	7,56	9,40	8,06	4,19	11,3	9,87	
	Al	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2,52	0,16	0,15	n.a.	n.a.	n.a.	
	Si	n.a.	0,83	0,71	1,40	5,24	3,16	2,67	4,05	6,74	2,95	1,22	
	P	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,10	0,13	n.a.	0,16	0,16	
	S	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,022	n.a.	n.a.	n.a.	
	Mn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,23	0,25	0,12	n.a.	
	Pêso(kg)	10	18	19	21	21	22	21,5	21	15	22	22	
	Escória obtida (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47,2	n.a.	n.a.	62,5	69,2	72,5	31,1	58,7	63,6	51,2	12,3
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,61	n.a.	10,0	25,4	9,8	10,0	19,7	9,42	7,63	13,1	32,8
CaO		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	2,42	3,32	4,23	4,18	13,8	8,08	n.a.	
SiO <sub>2</sub>		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8,80	n.a.	16,1	7,55	10,2	18,5	45,2	
Na <sub>2</sub> O		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,18	0,08	0,05	n.a.	n.a.	n.a.	
Pêso(kg)		25	26	27	20	19	20	17	18	17	19	16	
Rendimento	Cr	30%	43%	39%	53%	63%	65%	61%	64%	79%	47%	52%	
Rendimento	Ni	n.c.	86%	87%	82%	74%	67%	80%	69%	39%	84%	80%	
Rendimento	Metálico total	-	65%	69%	77%	71%	70%	76%	75%	58%	77%	78%	
Peças	Aspecto	-	-	-	-	-	ruins	ruins	ruins	-	boas	boas	
Lingotes	Foriab.	-	n.forj	n.forj	forj.	forj.	forj.	forj.	forj.	-	-	-	

Observações — Gusa C = gusa comum; pressão de oxigênio = kg/cm<sup>2</sup>; n.a. = não analisado; n.c. = não calculado.

5) Após o refino por oxigênio, seria desejável a retirada da escória produzida, para evitar retôrno do fósforo ao banho. Como já explicado no item anterior, não houve preocupação com a eliminação daquele elemento e, por isso, também não houve necessidade de retirar a escória oxidada formada. Sòmente nas quatro primeiras experiências foi retirada a escória oxidada.

6) Terminada a injeção de oxigênio, adicionava-se a mistura aluminotérmica. Nas primeiras experiências a mistura aluminotérmica foi briquetada, pensando-se, com isso, melhorar as condições de reação. A briquetagem (6 cm de diâmetro por 12 cm de altura) revelou-se, porém, desnecessária. As adições podem ser feitas na forma de misturas dos pós ou grânulos, por meio de uma calha ou colher. As misturas também podem ser empacotadas em sacos de papel (de 4 a 6 kg), o que facilita a adição.

7) A reação da mistura aluminotérmica se dá imediatamente após o seu lançamento na panela. O calor liberado é suficiente para compensar perdas térmicas durante o período de adição, que durava cêrca de 6 a 8 minutos.

8) Adições que aumentem a fluidez da escória final, muito rica em alumina, são aconselháveis. Em algumas experiências foram feitas pequenas adições de cal, sílica ou fluorita, com êsse objetivo. Outras adições serão estudadas futuramente.

9) Terminadas as reações aluminotérmicas, retirava-se a escória e vazava-se o aço em lingoteiras ou nos moldes, conforme os objetivos da experiência. Mesmo na pequena escala das experiências realizadas não houve problema com a temperatura; o calor liberado na reação aluminotérmica é mais do que suficiente para a manutenção de temperatura elevada.

10) O calor da reação aluminotérmica é tão grande que acreditamos que, em escala um pouco maior, no caso da utilização industrial da técnica, seria perfeitamente possível fazer adições de sucata de inoxidável, de corridas precedentes, ao banho metálico.

11) Não foi possível conseguir um perfeito contrôle da composição do aço obtido devido à pequena escala das experiências, conforme já apontado.

12) O comportamento dos diferentes elementos durante a corrida pode ser assim resumido: o carbono é facilmente baixado a teores da ordem de 0,05 a 0,08% ; o fósforo poderá

ser eliminado com escórias básicas na primeira fase do processo (vide ref. 2); o *enxôfre* depende dos gusas de partida; o *manganês* pode ser facilmente adicionado, seja como minério, nas misturas aluminotérmicas, juntamente com a cromita, seja como ferro-manganês de baixo carbono, no final da operação; o *silício* aparecerá no aço final pela redução de sílica presente por Al, e a obtenção de um baixo teor de silício dependerá da eliminação da escória inicial (vide LD-42, LD-43, LD-44, em que isso foi feito) e do uso de uma cromita com baixo teor de sílica; o cromo é função, evidentemente, da quantidade e do teor da cromita empregada nas misturas aluminotérmicas; o *níquel* é função da proporção de gusa níquelífero inicialmente fundido com o gusa comum.

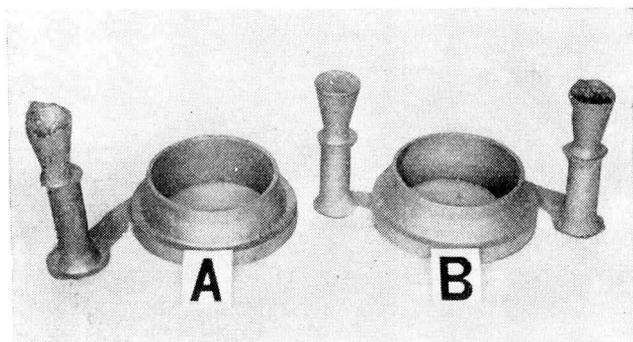


Fig. 2 — Peças fundidas de aço inoxidável. Ver dados da tabela IV.

13) Quanto ao silício é de notar que seu contrôlo ainda depende da proporção de alumínio usado, um excesso de alumínio favorecendo a redução da sílica porventura existente. A energia livre de formação da alumina é maior (mais negativa) que a energia de formação da sílica e, controlando as quantidades presentes de Al e de sílica é possível obter silício dentro da especificação. No caso das experiências realizadas não houve preocupação especial com êsse contrôlo.

14) A incorporação de Al depende essencialmente da proporção de alumínio utilizado nas misturas aluminotérmicas. Os resultados obtidos nas experiências LD-47 e LD-48 indicam que é perfeitamente possível a obtenção de teores baixos desse elemento. Também não houve preocupação especial, nas experiências realizadas, em controlar rigorosamente o teor de Al do aço obtido. Das experiências realizadas

pareceu razoável concluir que uma granulometria mais fina do Al dificulta sua incorporação ao banho, sendo desejável (80% a -10 mesh, pelo menos).

15) O rendimento em Cr foi da ordem de 65%, incluídas tôdas as perdas de processamento. Acreditamos que em operações em maior escala êsse rendimento possa ser melhorado.

16) O rendimento metálico do níquel não difere muito do já obtido em pesquisas anteriores (ref. 1).

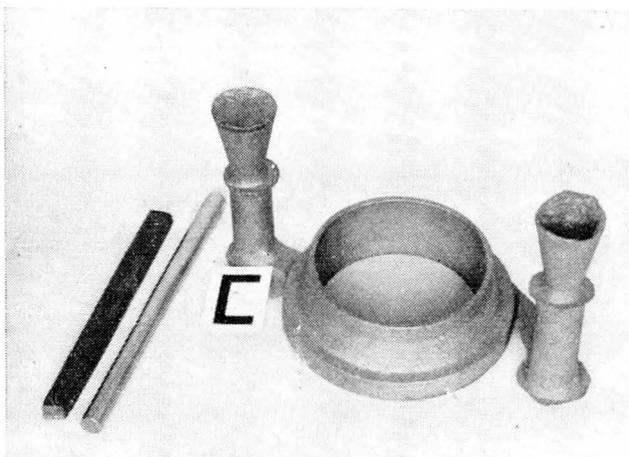


Fig. 3 — Peca fundida, lingote forjado e barra torneada de aço inoxidável.

17) O tempo total gasto na obtenção de uma carga de 20 kg de aço inoxidável é da ordem de 17 a 25 minutos, assim distribuídos: enchimento da panela com o gusa líquido e transporte até o local de refino — 1 a 2 min.; refino com oxigênio e retirada da escória — 8 a 12 min.; período de adição da mistura aluminotérmica (inclui paradas para agitar o banho) — 6 a 8 min.; vazamento em lingoteiras ou em peças — 2 a 3 min.

18) As escórias resultantes das reações aluminotérmicas têm, forçosamente, elevado teor de alumina, resultando muito alto ponto de fusão. Para melhor desenvolvimento das reações e melhor incorporação ao banho dos glóbulos metálicos ricos em cromo é interessante conseguir escórias

fluidas. Para isto é necessário fazer adições especiais durante o período de mistura, visando aumentar a fluidez. Nas experiências realizadas não foi possível realizar completo estudo deste ponto, porém foi verificado o efeito benéfico dessas adições. Em vista das restrições ao teor de sílica desejável na escória convém usar cal ou fluorita.

19) Em duas experiências (LD-50 e LD-51) foi feita uma injeção suplementar de oxigênio após a adição aluminotérmica, com o objetivo de verificar a possibilidade de uma eliminação do silício (presente devido à redução por Al). Como já se esperava, a diferença de energia livre de oxidação entre Si e Cr sendo pequena, e a concentração de cromo sendo muito mais alta, resultou uma perda de cromo apreciável, não sendo interessante controlar o silício desta maneira.

20) O teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  na escória final deve, evidentemente, ser o mais baixo possível. Nas experiências realizadas conseguiu-se chegar até cerca de 8%. Acreditamos que em experiências em maior escala seja possível regular as condições de operação de modo a baixar ainda mais esse teor.

21) As peças fundidas e os lingotes obtidos, exceto por defeitos eventuais normais nas fundições e nas aciarias, foram satisfatórios na maioria dos casos. Os lingotes mostraram boa forjabilidade.

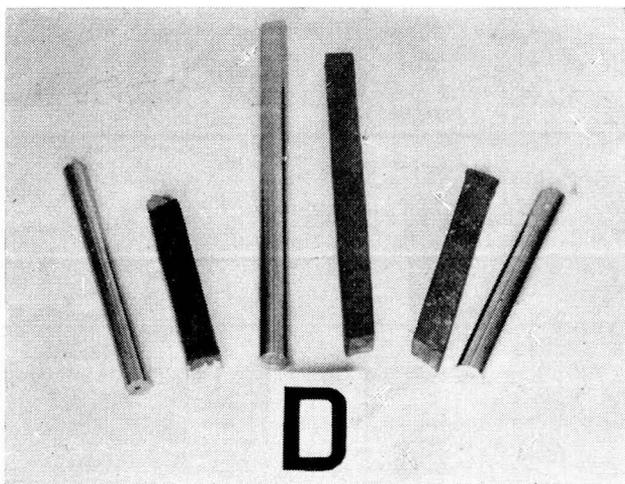


Fig. 4 — Lingotes forjados e barras torneadas de aço inoxidável.

## 8. CONCLUSÕES

Além das conclusões relativas a detalhes da operação e características dos materiais usados ou produzidos, conclusões essas apresentadas no texto do trabalho, convém destacar as seguintes conclusões mais gerais:

1 — É tènicamente viável a produção de pequenas quantidades de aço inoxidável do tipo austenítico (lingotes ou peças) em fundições de ferro fundido, pela técnica desenvolvida na Divisão de Metalurgia do IPT de São Paulo e descrita neste trabalho.

2 — O equipamento necessário para a produção de aços inoxidáveis pela técnica descrita é extremamente simples e de baixo investimento.

3 — As matérias primas necessárias para o processo aqui descrito são disponíveis no Brasil e são de preço relativamente baixo (quando comparados aos preços das matérias-primas normalmente usadas nas aciarias que produzem aços inoxidáveis).

4 — Parece justificável afirmar que a técnica poderá vir a ser empregada com êxito nas fundições de ferro fundido brasileiras (e, talvez, também nas aciarias que disponham de gusa líquido).

\*

Os autores agradecem a colaboração dos funcionários da Secção de Aços, em especial aos Srs. Reynaldo Spolidorio e Phinistauro D'Abruzzo e à Secção de Análises de Produtos Metalúrgicos do IPT, nas pessoas do Eng. Arthur Silva Oliveira e do Químico Ângelo Marcillo, pela colaboração prestada na análise de grande número de amostras de metal e escória.

## BIBLIOGRAFIA

1. EGBERTO FRANCO & LUIZ C. CORRÊA DA SILVA — *Operação de pequeno conversor L-D e sua aplicação ao refino de gusa níquelífero*. ABM-Boletim, nº 62, vol. 17.
2. SÈRGIO BENFICA & LUIZ C. CORRÊA DA SILVA — *Produção de pequenas quantidades de aço pela técnica L-D em fundições de ferro fundido*. ABM-Boletim, nº 63, vol. 18.
3. THUM, ERNEST — *The Book of Stainless Steels*.
4. EROS OROSCO — *Aluminotermia de minérios e metais nobres*. ABM-Boletim, nº 17, vol. 5 — outubro de 1949.
5. SULLY, A. H. — *Metallurgy of the Rarer Metals: Chromium*.
6. DALCY HORTA MACHADO — *Produção de ferro-cromo e de ferro-tungstênio aluminotérmicos*. ABM-Boletim, nº 37, vol. 10.
7. *Metals Handbook* — A.S.M. — 1961.

## DISCUSSÃO

**H. Schlacher** <sup>(1)</sup> — Querida indagar sobre o fenômeno da reação entre a mistura aluminotérmica e o refratário da panela experimental. Acredito que a temperatura que se forma durante essa reação seja para isso suficientemente alta.

**L. C. Corrêa da Silva** <sup>(2)</sup> — Nas condições em que foi realizada a experiência, com pequenas quantidades de adição, controlada para evitar a elevação instantânea de temperatura, não foi notado desgaste excessivo de refratário. Contrariamente, houve tendência da escória se depositar na panela, porque, com teor de alumínio extremamente elevado, tende a se solidificar nas paredes. Acredito que, em escala maior, o problema poderá surgir. Aí, talvez, seja necessário estudar um refratário adequado para essa operação.

**H. Schlacher** — Entretanto existe um processo para produzir magnésio metálico, baseado na reação de magnesita com alumínio. Não haveria nenhuma dificuldade devido a isso?

**L. C. Corrêa da Silva** — Não notamos. Em primeiro lugar, é de se observar que a mistura é de grânulos de alumínio com grânulos de cromita e grânulos de pó de salitre do Chile. De modo que, nas paredes, não haverá alumínio puro em contacto com o refratário da panela. É uma mistura pulverulenta, dando-se a reação entre os grânulos da mistura. Em escala maior, é possível que surjam alguns problemas que deverão ser estudados.

**H. M. de Barros Carl** <sup>(3)</sup> — O processo que o Eng. Schlacher cita é o processo Intal de produção de magnésio, feito a vácuo, em condições bem diferentes das do nosso, de modo que não ocorre essa reação com o refratário.

**J. Vecchiatti** <sup>(4)</sup> — Qual é o refratário da panela usado?

**L. C. Corrêa da Silva** — Em geral usamos a magnesita. Devo dizer que se fôsse sílico-aluminoso, não seria notada grande diferença para a escala das experiências realizadas, porque em trabalhos anteriores realizamos refino por oxigenação de gases; empregamos ferro fundido comum e usamos painéis com revestimento sílico-aluminoso também.

**M. Kaiser** <sup>(5)</sup> — O revestimento de magnesita da lança é um fator necessário para as condições de trabalho, ou poderia ser refrigerada com água?

**L. C. Corrêa da Silva** — Poderia ser refrigerada com água. Estamos tentando desenvolver técnicas que possam ser realizadas em peque-

- 
- (1) Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista da CSBM; Monlevade, MG.
  - (2) Membro da ABM e co-Autor do trabalho; Engenheiro e Doutor em Metalurgia; Chefe de Divisão de Metalurgia do IPT; São Paulo, SP.
  - (3) Sócio Estudante da ABM e co-Autor do trabalho; Assistente da Seção de Aços do IPT; São Paulo, SP.
  - (4) Membro da ABM; Engenheiro da INOX Indústria e Comércio de Aços S.A.; São Paulo, SP.
  - (5) Membro da ABM e Engenheiro da Magnesita S.A.; Belo Horizonte, MG.

nas fundições; ora, a confecção de uma lança refrigerada a água exige sempre um pouco mais de *know how*. De modo que tentámos fazer essas experiências com o mínimo de equipamento possível.

**M. Kaiser** — O ataque motivado pelo alumínio poderia ser notado na lança, porquanto ela está mais perto da zona de reação?

**H. M. Barros Carl** — Temos duas etapas distintas no processo: na primeira temos o refino do gusa níquelífero; depois, a panela será deslocada de alguns metros de distância, e será iniciada a segunda etapa. Quer dizer, a lança nada mais tem a ver com a etapa aluminotérmica posterior. As lanças que usámos são constituídas de um conduíte com diâmetro interno de 17 mm, conduíte êsse revestido com magnesita (diâmetro externo da lança revestida: 80 mm). Êsse diâmetro não é crítico. As lanças já eram usadas para injeções no forno elétrico do IPT.

**W. Pimentel** (6) — Os autores falaram sobre a agitação do banho; em pequena escala isso não oferece maior problema. Numa experiência de maior porte, numa escala industrializada, êsse problema não poderia ser maior?

**H. M. Barros Carl** — Essa agitação foi feita tendo em vista experiências em pequena escala. Se operássemos em maior escala, com escória adequada e um volante térmico maior, essa agitação seria desnecessária. Com cargas de 20 kg, a possibilidade de solidificação é muito rápida; tudo tem que se processar com grande rapidez. Daí a necessidade de uma agitação.

**H. Motta Haydt** (7) — De acôrdo com a tabela II, foi encontrado cerca de 72% de alumínio de menos de 10 mesh. Os autores conhecem qual foi a quantidade em menos de 10 mesh?

**H. M. Barros Carl** — Fizemos, preliminarmente, pesquisas aluminotérmicas e verificamos que uma granulometria de 20% de alumínio entre 6 e 10 mesh e 80% de alumínio de menos de 10 mesh era perfeitamente satisfatória. Não fizemos um estudo detalhado das granulometrias inferiores. Acreditamos, entretanto, que nessa parcela de cerca de 70% de alumínio menos 10 mesh se encontre um alto teor, digamos 40% de alumínio menos 70 mesh.

**H. Motta Haydt** — Como estou sempre no IPT, pediria aos autores, tendo em vista que o material que necessitamos é importado, a possibilidade de se obter 100 mesh. Qual a composição dêsse alumínio?

**H. M. Barros Carl** — Usamos o alumínio 99,5% comercialmente denominado 2S.

**D. Horta Machado** (8) — Há cerca de 5 anos, fizemos um trabalho com liga de baixo teor de carbono, em «Aços Villares», acrescentando alumínio e oxidantes, como o ácido cromítico. Depois deixámos de fabricar essa liga, porque a produção de ferro-cromo por êsse processo é muito cara. Conseguimos importar ferro-cromo do Japão e da Europa por preço muito mais em conta do que utilizando êsse processo aluminotérmico. Em vista disso, passámos a usar os aços inoxidáveis

(6) Membro da ABM; Engenheiro da CSBM; Sabará, MG.

(7) Membro da ABM; Engenheiro da CSN; Volta Redonda, RJ.

(8) Membro da ABM e Engenheiro de Aços Villares; São Caetano do Sul, SP.

com êsse ferro-cromo importado. Portanto, essa liga de ferro-cromo, no momento, não está sendo feita em nossa emprêsa.

Quanto ao trabalho apresentado, acho que sua técnica é perfeitamente viável no caso de pequenas quantidades de aço inoxidável. Porém, numa produção industrial, teríamos problemas mais sérios. Por exemplo, dificuldade na obtenção de um aço perfeito dentro de uma dada especificação, mesmo porque, variando essa redução aluminotérmica, o seu tamanho, sua velocidade, os senhores poderiam ter alumínio até mais alto do que 0,15, indicado no estudo. Acho bastante exagerada essa possibilidade de alumínio 0,15 no aço inoxidável.

No caso da função de peças maiores, por exemplo, acredito que os senhores teriam um problema sério. As propriedades mecânicas estariam sendo afetadas por essa especificação que os senhores apresentaram no quadro negro. Mas, de maneira geral, acho que para pequenas quantidades o processo é perfeitamente viável.

Desejaria perguntar: êsses briquetes de cobre, de cromita, foram aglutinados com algum material mecânico?

**L. Corrêa da Silva** — Os briquetes são desnecessários. Só foram usados nas quatro primeiras experiências; depois, a mistura foi sempre utilizada granulada. Quanto à questão da possibilidade do controle da composição do aço obtido em experiências em maior escala, é preciso ser verificada. Creio que não podemos dizer se é possível ou não. É questão de rotinizar as operações, procurar exercer um controle similar ao que se usa em outras operações metalúrgicas, para procurar encaixar êsse aço dentro dessas especificações. Não creio que isso seja muito difícil, a não ser no caso do alumínio. Trata-se de pesquisa feita em condições especiais, porque, quanto aos outros elementos, chamamos a atenção dos senhores para o fato de que não nos preocupamos com a eliminação do fósforo. Procuramos atingir, o mais rapidamente possível, nosso objetivo essencial, que era a obtenção de um aço inoxidável tão próximo quanto possível do final, mas sem a preocupação de todos os detalhes do acerto da composição. Aqui foram relatadas apenas 11 experiências. Mas para que pudéssemos chegar a um controle definitivo da operação, era preciso fazer mais experiências e em escala maior.

Quanto à questão do preço, note-se que não estamos tentando competir, por êsse processo, com o do ferro-cromo importado. O essencial é que, introduzindo cromo em meios aluminotérmicos, uma fundição pode produzir aço inoxidável mais facilmente, sem outra preocupação.

Se numa fundição de ferro fundido o senhor refinar gusa até obter a liga ferro-níquel, e depois adicionar ferro-cromo de baixo carbono, frio mesmo, que seja mais barato, provavelmente solidificará o banho. Nosso objetivo não é baixar o custo, mas conseguir tècnicamente a realização do processo.

**D. Horta Machado** — O senhor frisou bem essa questão do aço inoxidável numa fundição que está acostumada a fazer ferro fundido. Deixar, por exemplo, essas fundições se abastecerem de aço inoxidável de grandes usinas que estão capacitadas a fazer isso. Verifico que êsse processo é perfeitamente viável para peças pequenas; mas se tiver que ser fornecido aço inoxidável para a Petrobrás, por exemplo, onde as qualidades exigidas são tremendas, não só nas características mecânicas e físicas, como também na parte intrínseca do metal, êsse processo daria grande quantidade de alumina no metal.

**L. Corrêa da Silva** — Quem disse?

**D. Horta Machado** — Não temos dados a respeito do teor da alumina.

**H. Schlacher** — Conforme o Prof. Corrêa da Silva mencionou, poder-se-ia adicionar ferro-cromo no fim da secagem.

**D. Horta Machado** — Em quantidade pequena, isso é viável. Mas numa produção de 3 t, numa escala industrial, o senhor teria heterogeneidade no banho, porque produziria ferro-cromo diretamente no metal.

**L. Corrêa da Silva** — O senhor teve oportunidade de ver as nossas barras forjadas e torneadas? Estão bastante boas.

Acho que há facilidade muito grande para a incorporação de partículas não metálicas à escória. Durante a reação aluminotérmica não há agitação violenta do banho que inclua partículas de escória no interior do metal. Esse sai bastante limpo, devido à alta temperatura. Quanto à dimensão do lingote, não há dúvida de que era pequena. E não estamos dizendo que seja esta a solução para uma escala maior, mas também não se pode dizer que não seja.

**D. Horta Machado** — Eu não disse que o processo só funcionaria em escala pequena. Tenho minhas dúvidas quanto à sua aplicação em escala industrial.

**L. Corrêa da Silva** — Também temos. Desejava prestar alguns esclarecimentos adicionais. Em primeiro lugar, lamentamos não ter sido possível a distribuição de cópias completas e em número suficiente para todos os presentes. No Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo temos restrições sérias no nosso orçamento; de modo que não nos foi possível senão mimeografar um resumo e tirar apenas 50 cópias de cada trabalho apresentado.

Neste trabalho há um tabela completa com todos os dados experimentados, tabulados, e outras figuras que não foram exibidas, mostrando peças e barras forjadas e usinadas, bem como peças fundidas.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, criada pela Constituição Estadual, interessou-se pela divulgação entre as fundições paulistas, inicialmente, dessas técnicas desenvolvidas no IPT, que permitem a qualquer fundição de ferro fundido, seja em Bauru, Ribeirão Preto ou em qualquer cidade do Interior, produzir aços comuns a carbono ou aço inoxidável em pequena escala, para resolver um problema imediato. Muitas vezes não é possível a um fabricante encomendar suas peças de aço inoxidável nas grandes aciarias, eis que o prazo de entrega é de muitos meses, para não falarmos no preço. Enfim, nossa intenção foi simplesmente permitir a qualquer fundição — devemos lembrar que há centenas de fundições de ferro fundido no Brasil e apenas meia dúzia de fundições de aço — a possibilidade de, quando necessário, fazerem aço carbono ou aço inoxidável. Indicamos, em trabalho apresentado no Congresso anterior, a possibilidade de se fazer aço comum. Neste Congresso indicamos a possibilidade de se fazer aço inoxidável austenítico; segue-se que se pode fazer aço ferrítico, usando o gusa comum. (\*)

A Fundação já citada resolveu subsidiar demonstrações, por técnicos do IPT, da produção de aço em fundições de ferro fundido do Estado de São Paulo, com recursos mínimos disponíveis. Esta é a nossa intenção essencial.

Quanto às limitações do trabalho, evidentemente existem, e as conhecemos. Deve-se, porém, compreender que se trata de trabalho de pesquisa em pequena escala, e só foi possível em proporções pequenas. No futuro, pretendemos continuar nessa série de trabalhos e talvez rea-

(\*) Ver trabalhos citados na bibliografia, referências 1 e 2.

lizar experiências em escala maior, inclusive em indústrias, pois hoje há indústrias interessadas nisso. Então, poderemos acertar outros detalhes.

O Eng. H. Schlacher emitiu a opinião de que é possível realizar essas experiências em escala industrial. Gostaria que comentasse alguns problemas que podem aparecer.

**H. Schlacher** — Acho perfeitamente possível fazer em escala maior; talvez seja mais interessante separar os dois processos: formar ferro-cromo numa instalação, e depois adicionar o ferro-cromo produzido aluminotêrmicamente, durante a insuflagem da corrida. Isso traria a vantagem de que se poderia tirar tôdas as impurezas, seja alumínio, silício e tôdas as inclusões que sempre existem na escória durante a refinação. Há um processo similar nas aciarias alemãs, principalmente numa delas, que está produzindo aço com certo teor de cromo, não inoxidável. Eles usam ferro-cromo com teores bastante altos de carbono, a preço relativamente barato. Esse adicionamento é feito durante os últimos 4 a 5 minutos da insuflagem, o que permite ainda fundir o ferro-cromo.

**C. Dias Brosch** <sup>(9)</sup> — Queria apenas sugerir que, possivelmente, se devesse completar o estudo com uma variante, que é o uso do ferro-cromo adicionado a uma mistura exotérmica.

**L. Corrêa da Silva** — Creio que realmente há outras variantes e outras possibilidades a serem exploradas. Inclusive na reação aluminotérmica, a quantidade de calor gerada é muito grande; talvez pudéssemos substituir parte do alumínio por silício, quer dizer, fazer uma reação mista, silício-aluminotérmica de um lado, e também adicionar carbono, pois, a alta temperatura, o carbono tem mais afinidade ao oxigênio do que ao cromo. Poderemos, portanto, ter produção de carbono durante o curso da experiência. No final, em razão das altas temperaturas exigidas, o carbono deveria ser eliminado devido ao oxigênio.

**S. L'Abbate** <sup>(10)</sup> — Nesse tipo de panela que foi apresentado, por ocasião do vazamento do lingote, a escória não trouxe problema?

**H. M. Barros Carl** — Em geral, retirávamos a escória formada. Em algumas experiências, vazamos o aço dessa panela para outra de bico de chaleira, e nenhum problema houve na fundição de peças. Obtivemos peças perfeitas, como nos mostram as figuras, sem dificuldades maiores na fundição.

**A. Lima e Silva** <sup>(11)</sup> — Prof. Corrêa da Silva, o senhor falou sobre a eliminação do fósforo. Conseguiram eliminar esse elemento do processo?

**L. Corrêa da Silva** — Em experiência anterior, do mesmo tipo, pudemos, no aço comum, eliminar o fósforo. O trabalho foi publicado pela ABM.

**A. Lima e Silva** — Qual a percentagem?

**L. Corrêa da Silva** — Mais ou menos a quinta parte.

(9) Membro da ABM; Engenheiro e Doutor em Metalurgia; do IPT de São Paulo, SP.

(10) Membro da ABM; Engenheiro da firma S. L'Abbate & Cia.; São Paulo, SP.

(11) Membro da ABM; Engenheiro da CSBM; Monlevade, MG.