

Revestimentos Refratários para Fornos Elétricos de Redução⁽¹⁾

EMILE ALBERT SCHARLÉ⁽²⁾
 RUBENS CORRÊA DA SILVEIRA⁽³⁾
 MANOEL BENITES GASQUES⁽⁴⁾
 DENIZ VALLE NETTO⁽⁵⁾

RESUMO

Fatores a serem considerados na execução de projetos de revestimentos para fornos elétricos de redução na produção de ferro gusa. Análise sobre revestimentos carbônicos, sílico-aluminosos e básicos. Resultados obtidos na Companhia Siderúrgica Mannesmann.

1. INTRODUÇÃO

O revestimento refratário mais em uso para os fornos elétricos de redução é o constituído por blocos ou pasta de carbono e tijolos sílico-aluminosos, conforme figura 1 e tabela I, colunas 1 e 2.

Na fabricação de ferro gusa, o revestimento refratário, em condições normais, deverá suportar:

- ataque pelo gusa não saturado em carbono (blocos ou massa carbônica);
- ataque pela escória que poderá ser ácida ou básica (refratários básicos ou ácidos);
- ação corrosiva (erosão) devido aos movimentos eletrodinâmicos do banho. Esta ação eletrodinâmica seria proporcional ao quadrado da intensidade de corrente¹;
- variações amplas na conformação e dimensões da zona de fusão (preparo e distribuição da carga ou uso de diferentes voltagens);

- em casos particulares, à ação dos álcalis (uso de carvão vegetal com recirculação de escória dos próprios baixos fornos);
- ataque pelo gás (altamente redutor);
- descontinuidades térmicas (zonas superaquecidas).

Não se têm dados efetivos sobre a durabilidade dos revestimentos refratários em fornos elétricos de redução na produção de gusa e, as informações que dispomos não são suficientes para definir qual tipo é o melhor entre os vários até hoje propostos e experimentados.

A presente contribuição técnica tem como finalidades principais, indicar um método simples para acompanhar o desgaste refratário e orientar a execução de futuros projetos de revestimento.

2. CONTRÔLE DO ESTADO DO REVESTIMENTO

Na Companhia Siderúrgica Mannesmann, este contrôle, é feito por medidas de temperatura e sondagens.

As temperaturas são medidas por meio de pares termoeletrônicos instalados nas paredes laterais e no fundo do revestimento, nas regiões normalmente mais solicitadas. Medidas periódicas da temperatura do invólucro metálico do cadinho, sob as mesmas condições, fornecem também indicações sobre o estado do revestimento².

Para as mesmas condições de operação, uma variação gradual crescente da temperatura indi-

(1) Apresentado ao Simpósio sobre Eletrosiderurgia; Salvador, BA; setembro de 1968.

(2) Membro da ABM. Engenheiro de Minas e Metalurgista; Chefe do Departamento de Ferro Gusa da Companhia Siderúrgica Mannesmann; Belo Horizonte, MG.

(3) Membro da ABM. Engenheiro Civil, de Minas e Metalurgista; Chefe dos Serviços de Alto-Forno e Baixos-Fornos da Companhia Siderúrgica Mannesmann; Belo Horizonte, MG.

(4) Membro da ABM. Engenheiro de Minas e Metalurgista; Assistente do Serviço de Baixos-Fornos da Companhia Siderúrgica Mannesmann; Belo Horizonte, MG.

(5) Membro da ABM. Engenheiro Civil e de Minas; Chefe do Serviço de Assistência Técnica da Magnesita S. A.; Belo Horizonte, MG.

caria um desgaste normal do revestimento refratário. Por outro lado, variações bruscas de temperatura, na mesma situação, indicariam destruição repentina do revestimento, infiltração de gusa, escória, ou gás quente no ponto em questão. Por vezes, nos fornos elétricos de redução ocorrem pontos quentes ou manchas rubras no invólucro metálico, causadas por correntes parasitas que contudo, depois de um certo tempo, desaparecem ².

As figuras 2a, 2b e 2c nos mostram as temperaturas do revestimento durante a 5.^a campanha do FER I. A evolução da temperatura, pirômetros 5 e 6, indica revestimento pouco espesso na região dos furos de corrida. Os pirômetros 1, 4, 7 e 8, colocados próximos da linha de separação dos sílicos-aluminosos da massa de carbono socada, a partir do sexcentésimo dia acusaram uma elevação acentuada de temperatura, particularmente os de número 4 e 7 mais próximos dos furos de corrida ².

A figura 3 no mostra as temperaturas do invólucro metálico, no último dia de operação, três horas após ter sido deligada a refrigeração externa. Elas indicam revestimento pouco espês-

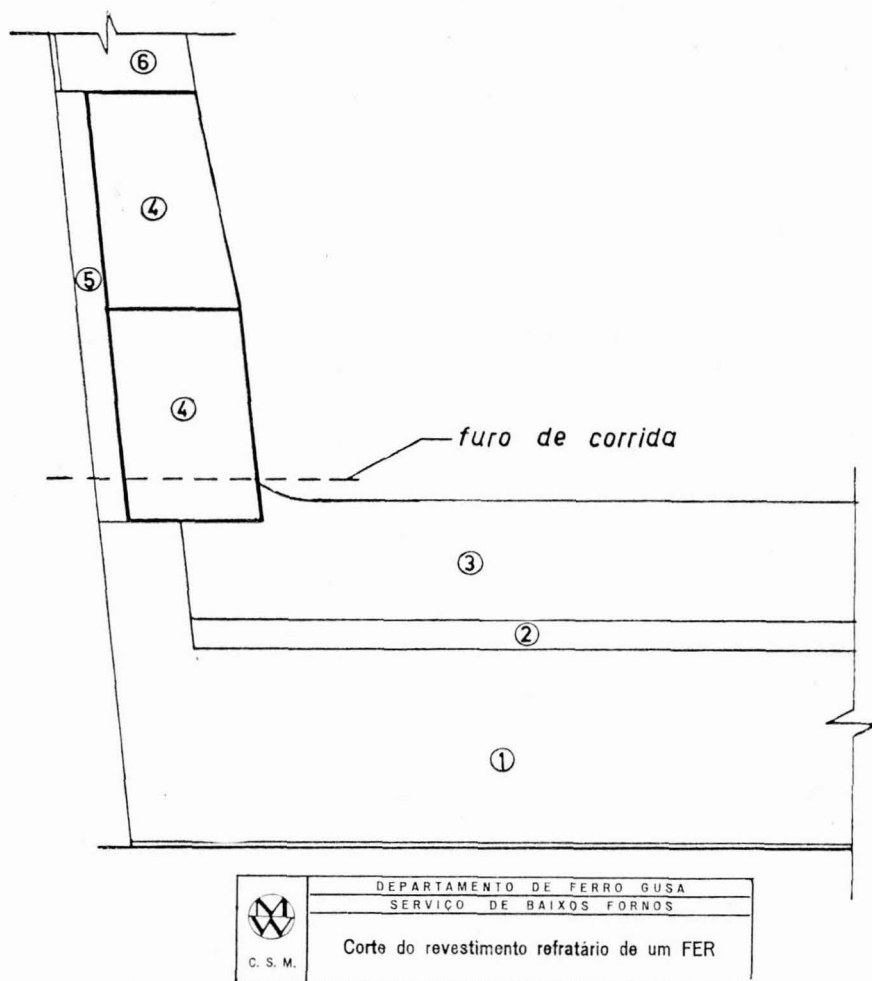


Fig. 1 — Revestimento de um forno elétrico de redução.

Posição	TABELA I - REVESTIMENTOS REFRAATÓRIOS PARA FER				
	1	2	3	4	5
1	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso
2	Blocos de Carbono	Pasta Carbônica	Pasta Carbônica	Cicon-P	Cicon-P
3	Blocos de Carbono	Pasta Carbônica	Dolomita	Dolomita	Dolomita
4	Blocos de Carbono	Blocos de Carbono	Blocos de Carbono	Blocos de Carbono	Blocos de Carbono
5	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Magnesita	Placa de Sílico-Aluminoso
6	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso	Sílico-Aluminoso

so na região dos furos de corrida e junto ao eletrodo "T" (120° do centro dos furos, sentido anti-horário) ².

As sondagens são feitas com o forno desligado e nos permitem ter idéia apenas da espessura da sola. Medidas executadas por este processo acusaram, após o sexcentésimo dia, desgaste total da sola carbônica ².

3. BLOCOS DE CARBONO

Experiências efetuadas com blocos de carbono indicam que principalmente quando se trabalha produzindo gusa de baixo carbono, em função do tempo, ocorre uma dissolução gradual dos blocos, que resulta na formação de um depósito de gusa no fundo dos fornos (salamandra) ³. Isto se dá

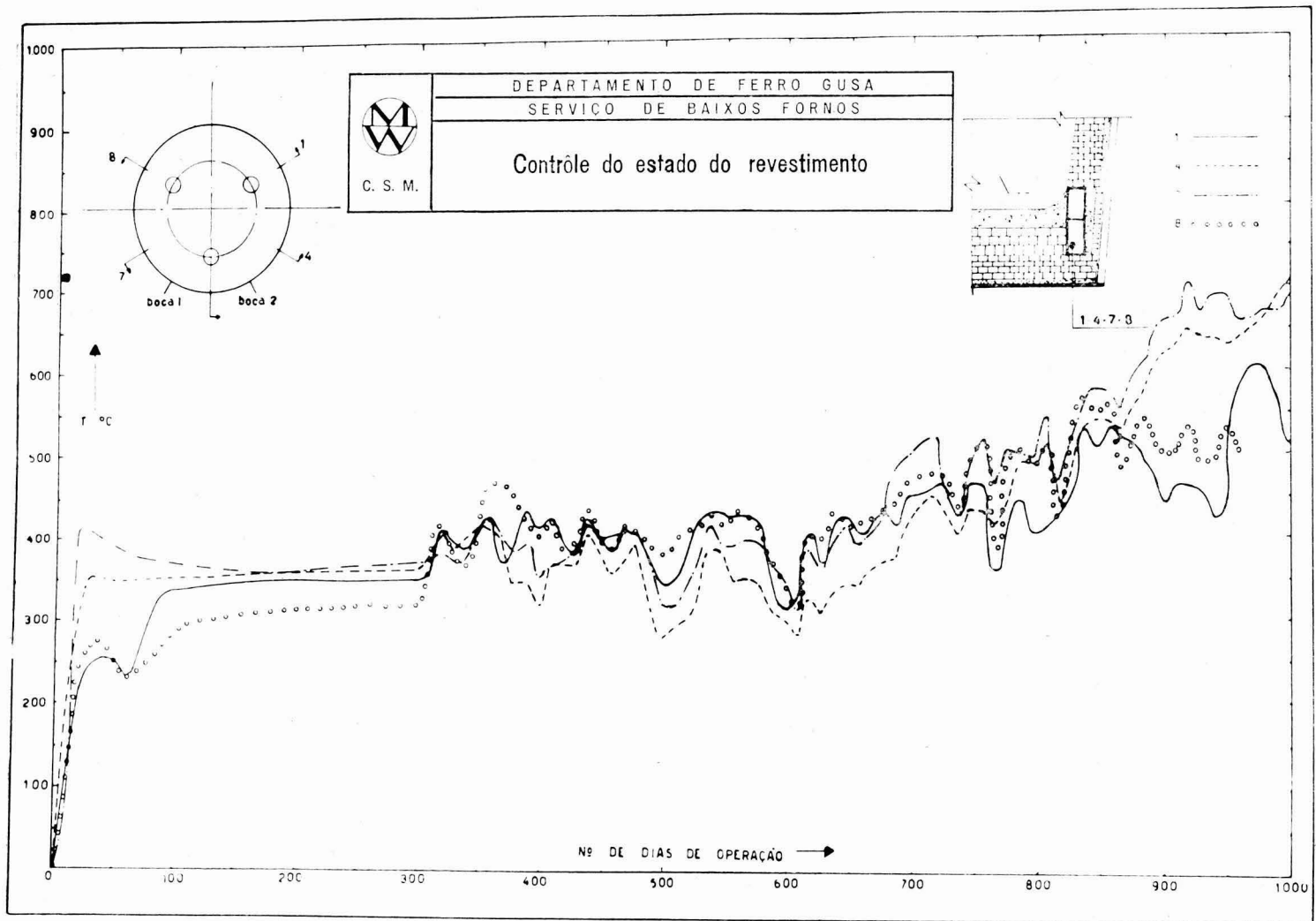


Fig. 2a — Contrôle do estado do revestimento por meio de medidas de temperatura.

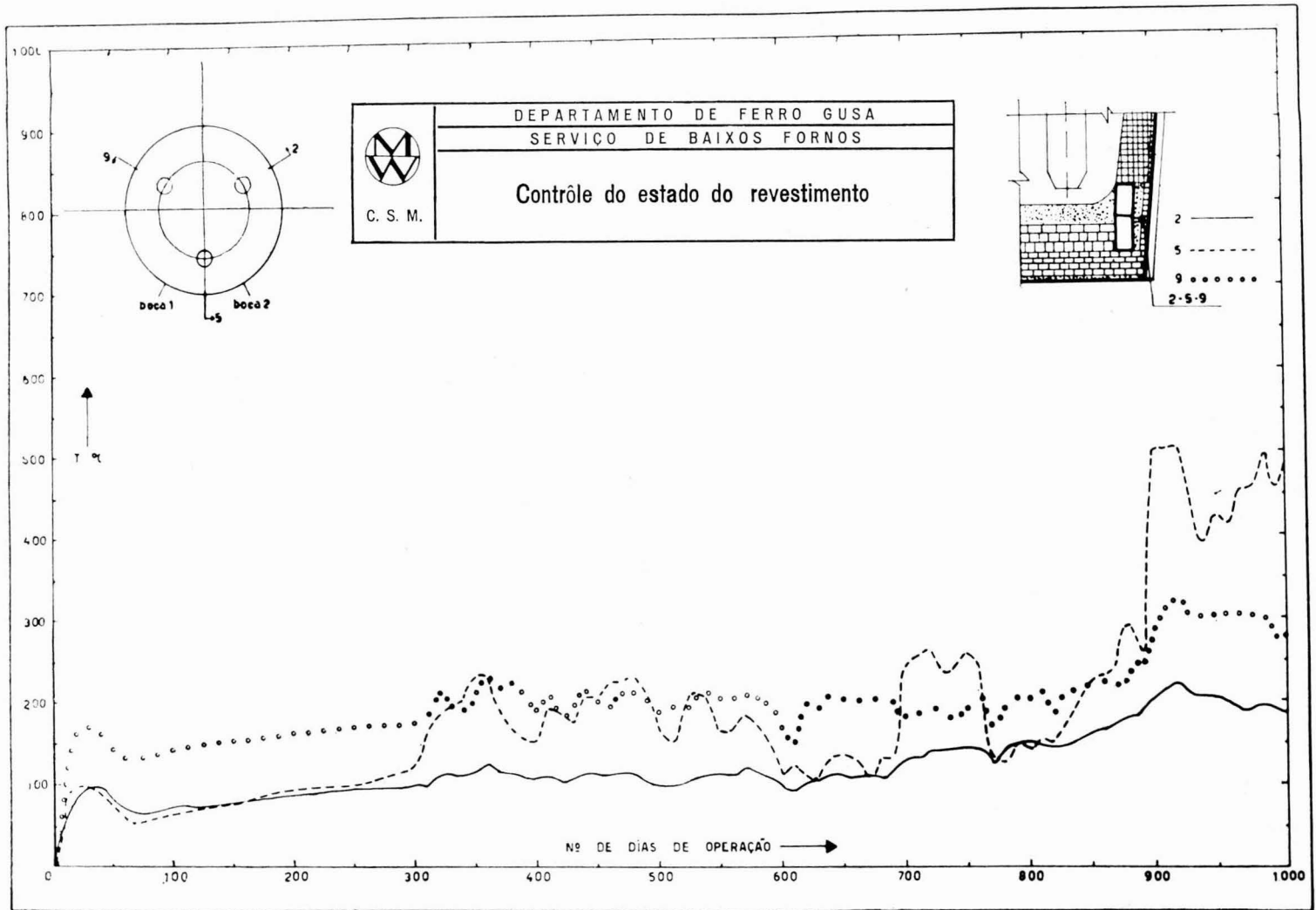


Fig. 2b — Contrôle do estado do revestimento por meio de medidas de temperatura.

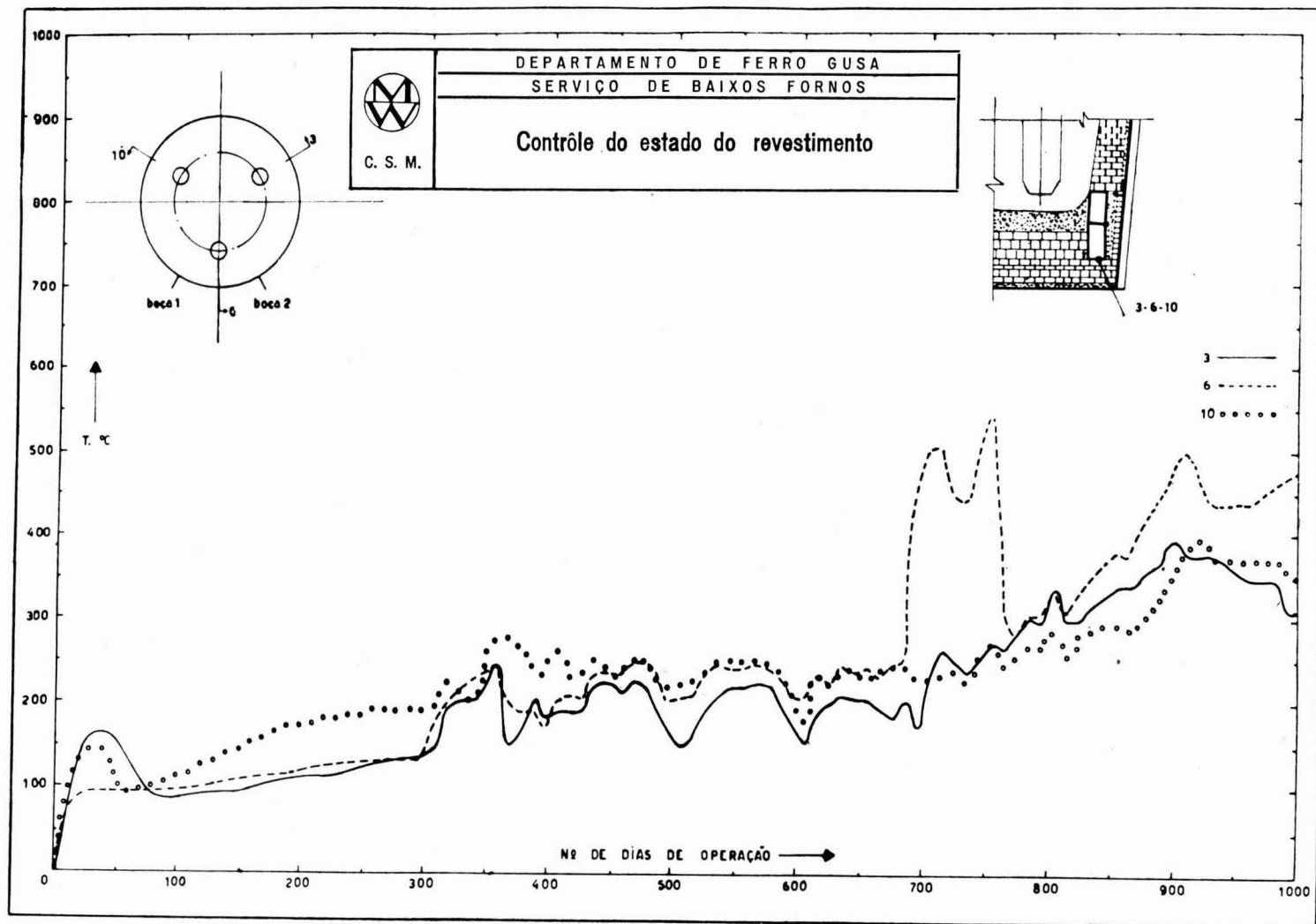


Fig. 2c — Contrôle do estado do revestimento por meio de medidas de temperatura.

devido às altas temperaturas que normalmente temos no cadinho e, onde o gusa, em estado de insaturação na faixa de temperatura de 1400°C — 1600°C, entra em contacto com os blocos do revestimento. A dissolução do carbono no gusa teria lugar quando o bloco de carbono, atingisse a temperatura do gusa. Ensaio de laboratório têm confirmado esta hipótese e, por este motivo, é de grande importância para a durabilidade dos revestimentos carbônicos o controle do grau de saturação do ferro gusa e da temperatura dos blocos por meio de refrigeração ³.

As figuras 4a e 4b nos mostram o desgaste do revestimento, blocos e massa carbônica, na 5.^a campanha do FER I. Pode-se observar perfeitamente o desgaste em forma de trevo (figura 4a) e de anel, no nível do banho (figura 4b) ².

Foram tiradas diversas amostras dos blocos de carbono e analisadas quimicamente para comparação com aquela do bloco original. A tabela II apresenta o resultado destas análises, podendo-se observar um sensível aumento no teor de cinzas do bloco mais atacado. Isto ocorre devido à dissolução do carbono pelo gusa e à infiltração de gusa, escória e principalmente dos óxidos alcalinos através dos poros dos blocos. Estes óxidos possuem excelente difusividade e, pode-se constatar pela análise das cinzas, um aumento de cerca de 25% de óxidos alcalinos em sua composição. Os óxidos alcalinos provêm, em nosso caso, das cinzas dos redutores, particularmente do carvão vegetal, e da escória dos próprios baixos fornos que é recirculada.

O exame cuidadoso dos blocos, juntamente com o controle das análises, permitiu-nos concluir que a infiltração era mais de superfície e, que o efeito dos óxidos alcalinos não é aqui tão danoso quanto nos sílico-aluminosos ².

4. SÍLICO-ALUMINOSOS

Os sílicos-aluminosos normalmente não teriam contacto com gusa ou escória, salvo se estiverem completamente gastas as paredes laterais ou sola carbônica (caso do revestimento carbônico) ou se o cadinho, a propósito, tivesse sido feito com aqueles tijolos.

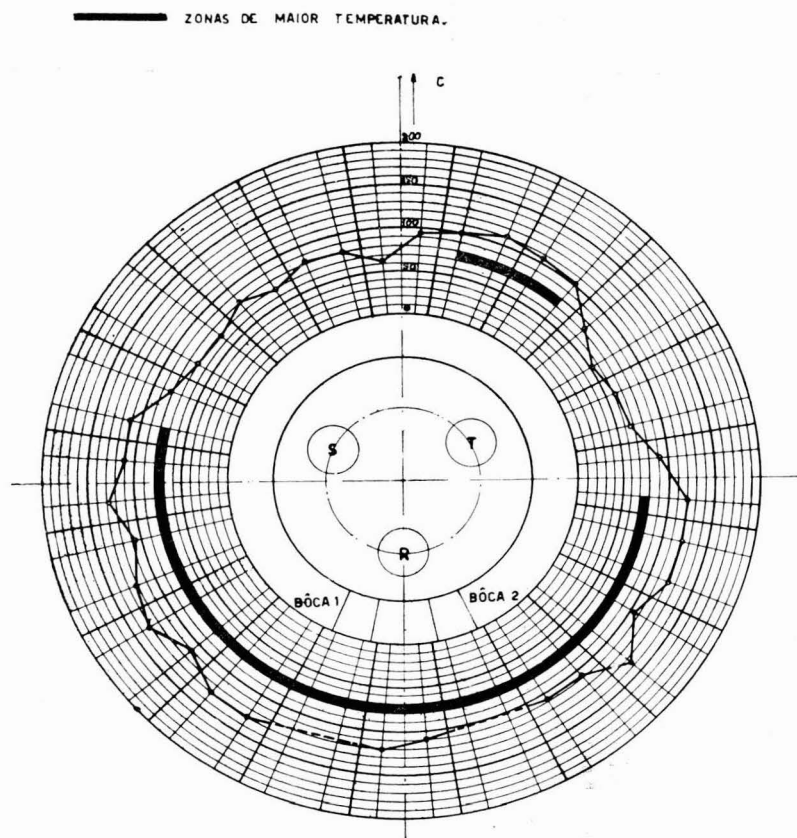


Fig. 3 — Temperatura do invólucro metálico do cadinho.

A escória dos fornos elétricos de redução da CSM tem em média 1 a 2% de óxidos alcalinos e a relação CaO/SiO_2 variável de 1,0 a 1,2. Por estes motivos aliados, o contacto escória sílico-aluminosos deve ser evitado a todo custo.

O efeito dos álcalis é aqui bastante sensível pois, difundindo-se nos sílico-aluminosos ainda quentes, provocam a formação de compostos de baixo ponto de fusão com efeito destrutivo sobre os tijolos ³.

Durante a 5.^a campanha do FER I, os tijolos sílico-aluminosos do fundo do forno trabalharam em contacto direto com o gusa durante um período aproximado de 300 dias. Quando da limpeza do cadinho, após esta campanha, foi verificado que o estado geral dos sílico-aluminosos era bom e, apenas a primeira fiada de tijolos, originalmente logo abaixo da sola carbônica, formava um bloco único e foi então retirada ².

5. REVESTIMENTOS BÁSICOS

O revestimento básico poderia ser normalmente utilizado em contacto com gusa sem os problemas da dissolução (blocos ou pasta carbônica) ou da formação de compostos de baixo ponto de fusão (sílico-aluminosos).

Com a finalidade de verificar a possibilidade de utilização de revestimento com magnesita ou dolomita sinterizada pichada, foram executados pela Magnesita S. A., através de seu Departamento de Pesquisas, ensaios de ataque em tijolos pichados, pela escória dos fornos elétricos de redução da Companhia Siderúrgica Mannesmann. As análises das escórias empregadas nos ensaios são dadas pela tabela III. Foram prensados 15 tijolos de dolomita sinterizada pichada e 15 de magnesita à temperatura de 130°C-140°C. A temperatura da mistura era de 170°C e a dimensão dos tijolos 9" × 4 1/2" × 2 1/2". As características médias dos tijolos, após prensagem e resfriamento, são mostradas na tabela IV. Os tijolos de dolomita trincaram, o que foi atribuído à hidratação no

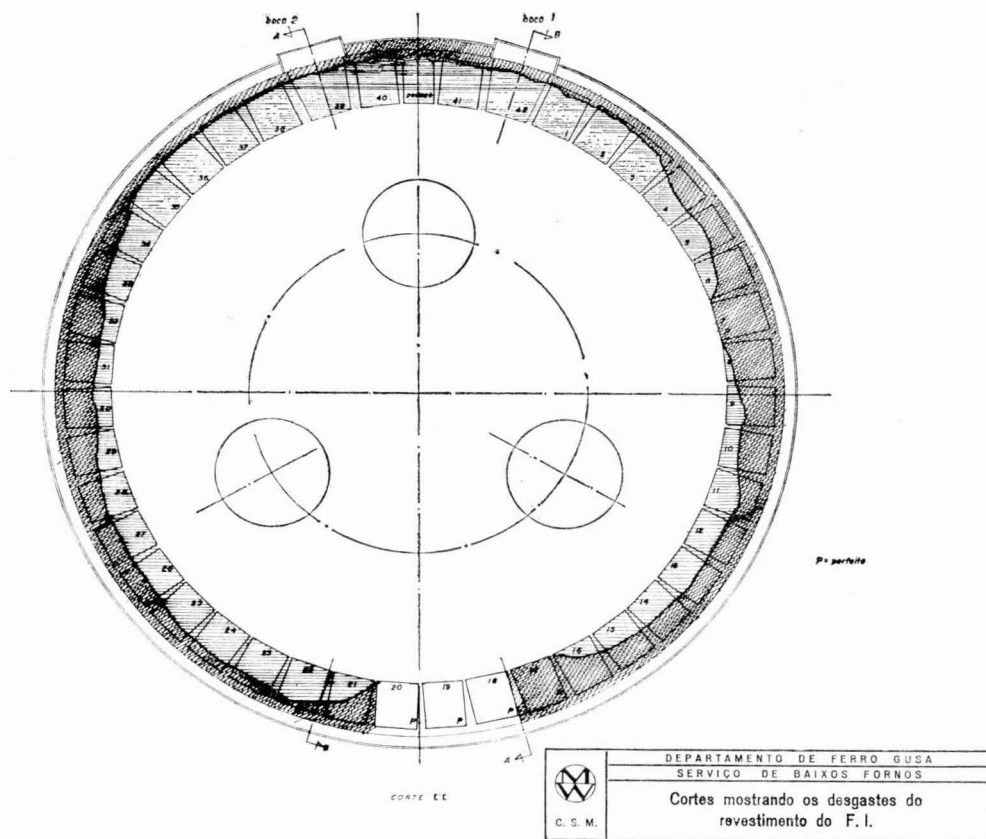


Fig. 4a — Corte transversal mostrando o desgaste do revestimento (fiada inferior dos blocos de carbono).

TABELA II — Revestimentos

Nº Amostra	MATERIAL	COMPOSIÇÃO EM %											OBSERVAÇÃO					
		C	S _t	MV	Cinzza	Mn	P	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	CaO		MgO	Na ₂ O	K ₂ O		
1.a	Bloco de carbono	90,75	1,15	0,80	6,30													Bloco Original
b	Cinzza					0,38	0,44	0,50	38,10	13,82	25,08	4,35	1,81	+	+			"
2.	Cinzza					1,71	0,14	0,98	31,50	18,39	10,15	26,60	0,72	0,84	2,40			Bloco pouco gasto
3.a	Bloco de carbono	73,47	0,72	1,10	24,70													Bloco pouco gasto
b	Cinzza					0,49	0,18	0,50	21,01	15,06	11,28	-	-	1,79	26,30			"
4.a	Pasta das juntas	79,28	0,85	15,41	4,46													Sem desgaste
b	Cinzza					1,14	0,94	0,65	32,80	18,39	22,56	10,19	0,72	0,84	1,43			"
5.a	Pasta das juntas	83,60	1,0	0,95	14,45													Com desgaste
b	Cinzza					1,33	0,18	0,11	25,40	15,47	8,93	37,36	0,72	0,61	0,49			"
6.a	Sílico-Alumínico					2,87	0,57	-	50,34	40,55	5,61							Original
b	"					0,08	0,10	0,05	49,30	40,55	2,74			+	+			Farede Lateral
c	"					0,08	0,07	0,05	44,80	37,62	8,64			+	+			Fundo do cadinho.

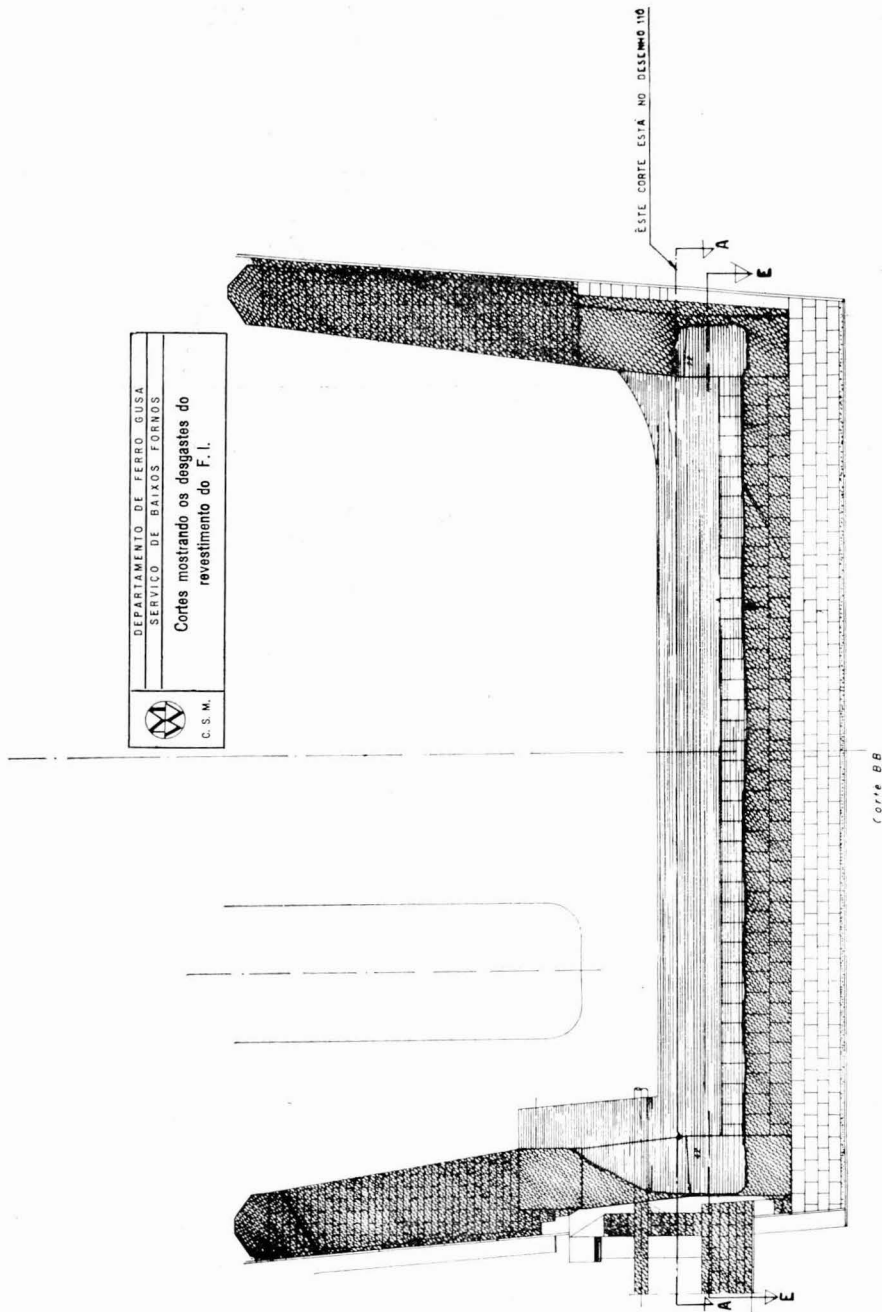


TABELA III - ANÁLISE DAS ESCÓRIAS DOS BAIXOS FORNOS EMPREGADAS NOS TESTES

TABELA III											
AM.	P.F.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
1	0,67	32,44	0,20	14,64	0,25	0,84	1,61	42,27	5,89	0,55	0,49
2	0,03	31,87	0,25	15,51	0,25	0,58	1,07	43,66	5,38	0,61	0,60
3	0,36	32,05	0,25	14,83	0,35	0,49	1,42	43,25	5,28	0,61	0,60

**TABELA IV - CARACTERÍSTICAS MÉDIAS
DOS TIJOLOS APÓS PRENSAGEM E RESFRIAMENTO**

TABELA IV			
Material	g.cm ⁻³	kg.cm ⁻²	CR% +
Magnesita	2,88	508	2,4
Dolomita	2,85	398	1,8

+ CR = Carbono residual.

resfriamento, e os de magnesita permaneceram perfeitos. Em ambos os casos, o ataque pela escória foi desprezível ⁴.

Os resultados obtidos merecem restrições por se tratar de ensaios estáticos e portanto de valor limitado, no entanto, serviram-nos como sugestão para substituição de blocos de carbono por revestimentos básicos.

Paralelamente a êstes estudos, o FER II da CSM estava em operação com uma sola constituída por dolomita sintetizada pichada, isolada dos sílico-aluminosos por uma camada de pasta carbônica, conforme nos indica a figura 1 e tabela I, coluna 3. Ao ser esvaziado o cadinho, após três anos de operação, pôde ser observado que o ataque acentuado do gusa sôbre os blocos de carbono das paredes laterais, permitiu a infiltração do metal até a camada de pasta carbônica, abaixo da dolomita, destruindo-a parcialmente (absorção do carbono da pasta pelo gusa não saturado em carbono). Tendo em vista o sucedido, tornou-se óbvio que nos próximos revestimentos, a camada carbônica deveria ser substituída por outro material neutro. Nesta mesma oportunidade foi verificado que a sola de dolomita em si, apresentava-se em perfeito estado.

Experiências com magnesita sinterizada pichada, em um dos furos de corrida do FER I, apresentou excelente resultado ao nível do banho metálico, contudo não resistiu ao ataque pela escória.

Características e aplicação da Massa Dolomítica — O material básico atualmente empregado na sola dos fornos elétricos de redução da CSM é o Doldam, ou seja, uma massa dolomítica pichada com granulometria controlada, segundo curva de Wilhelmi, para apresentar depois de compactada, péso máximo por volume. A dolomita sinterizada empregada na fabricação do Doldam, atende à seguinte especificação:

SiO ₂	<	2%;
R ₂ O ₃	<	3,5%;
CaO + MgO	>	94%;
Bulk density		2,9 g/cm ³ .

A sub-sola deve ser construída em tijolos sílico-aluminosos da categoria SA 1, em peças de grandes dimensões para diminuir o número de juntas; entre as camadas sucessivas da sub-sola prevê-se o desencontro das juntas.

A última fiada de tijolos deve ser assentada com CICON-P, cimento neutro úmido, de pega ao ar, à base de cromita. A superfície superior da última fiada de sílico-aluminosos deverá ser também pintada com CICON-P, com a finalidade de impedir o contato do Doldam com aqueles tijolos. Pretende-se com esta providência evitar uma possível reação em alta temperatura entre Doldam e os tijolos sílico-aluminosos.

A temperatura ideal de compactação do Doldam, é de 80°C. No caso das solas dos fornos da CSM, dadas as circunstâncias especiais, devido à proximidade das instalações da Magnesita S. A. e, do programa de socagem e preparação da massa estabelecido, esta última foi fornecida quente e a granel. No caso de massa fria, torna-se necessário aquecê-la por qualquer dos métodos conhecidos, dependendo, naturalmente, das condições que para isto dispuser a usina que vai aplicá-la.

A massa aquecida deve ser distribuída sôbre a sub-sola de tal modo que a camada antes da compactação tenha espessura não superior a 20 cm.

Após a operação anterior, promover a acomodação da massa por intermédio de ferros ponteados até que sua penetração torne-se difícil. A partir dêste ponto, compactar com socadores pneumáticos de "cabeça chata" e, terminada a compactação de uma camada, escavá-la superficialmente, antes de adicionar mais massa. Caso ocorra interrupção muito prolongada entre o término da compactação de uma camada e início da seguinte, a superfície superior da última camada compactada deverá ser pintada com piche desidratado antes de se adicionar mais massa.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos na CSM com o emprêgo dos diversos refratários podem ser resumidos como se segue:

- sola carbônica — integralmente destruída pelo gusa durante cada campanha;
- sola com sílico-aluminosos atacada parcialmente, embora tenha trabalhado em tórno de 300 dias em contato com o gusa;
- sola dolomítica — não sofreu alterações sensíveis ao final de três anos de operação.

As paredes laterais do cadinho, constituídas invariavelmente com blocos de carbono e sílico-aluminosos (entre o invólucro metálico e blocos), normalmente não resistiram ao ataque pelo gusa e sempre determinaram a duração da campanha.

7. DISCUSSÃO

Nos fornos elétricos de redução, o consumo de redutor e, normalmente, o volume de escória por tonelada de gusa, são menores e maiores, respectivamente, que no alto-forno. Por outro lado, aqueles fornos podem ser operados com os mais variados redutores ou misturas destes. Isto equivale dizer que a escória produzida poderá tanto ser básica, como neutra ou ácida. A figura 5 nos mostra, por sua vez, como pode variar o grau de saturação do ferro gusa em função de sua temperatura e composição química^{5, 6}. Va-

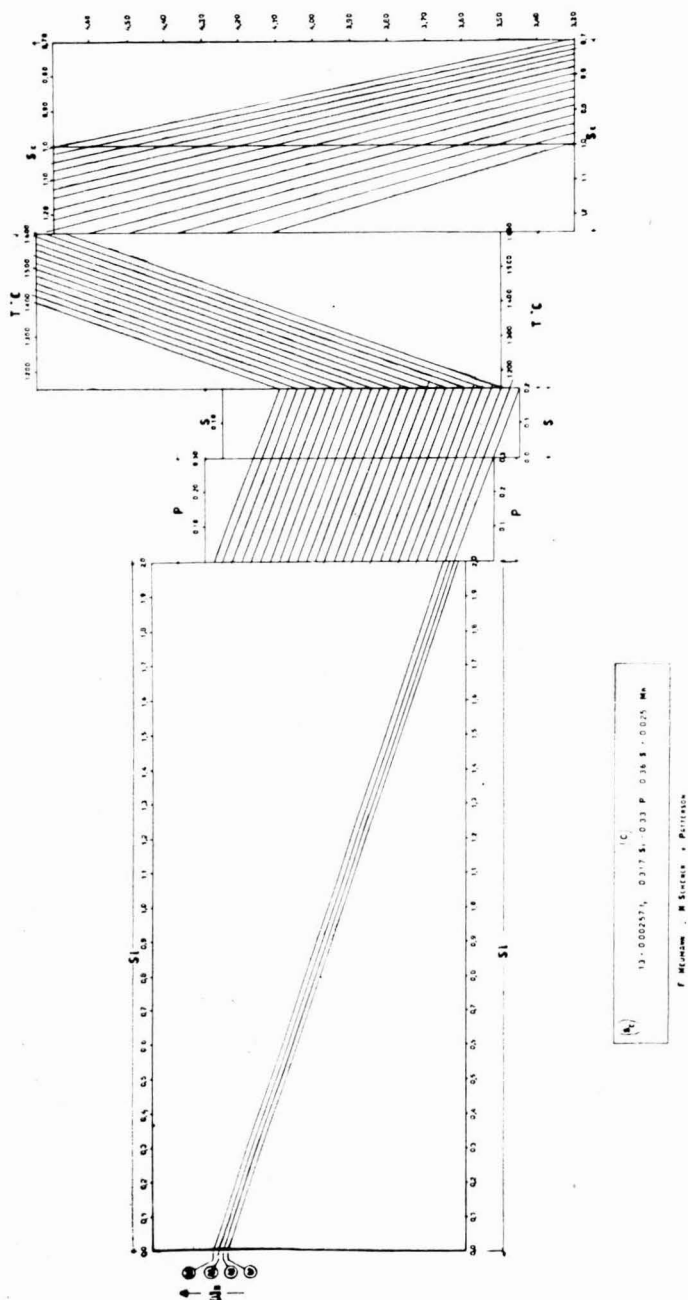


Fig. 5 — Gráfico para determinação do grau de saturação do ferro gusa.

riando normalmente os teores de fósforo e enxôfre dentro de estreitos limites, verifica-se que dos elementos que compõem o gusa, o silício é o que maior influência poderá exercer sobre seu grau de saturação em carbono. Pode observar-se também, que para as faixas comuns de análise química e temperatura do gusa, este resulta sempre insaturado. Depreende-se do exposto, que um revestimento ideal deveria ser constituído por dolomita ou magnesita sinterizada pichada na sola e até o nível de metal, e carbono no nível de escória. Na prática, tem-se sempre, em contato com os refratários uma mistura de metal-escória, devido à agitação do banho. Por outro lado os supostos níveis para o metal e a escória deslocam-se entre corridas. Por estes motivos, torna-se necessário prever a ocorrência de duas hipóteses:

- gusa em contato com o carbono momentos antes das corridas;
- escória em contato com o revestimento básico momentos após a corrida. O esgotamento total do forno, após cada corrida, pode ser também prejudicial por permitir a aproximação dos eletrodos da sola (ação do arco).

A segunda hipótese pode ser eliminada construindo-se a sola em nível inferior ao furo de corrida, porém a primeira é praticamente inevitável. Nestas condições, a durabilidade dos blocos de carbono ficaria condicionada a uma eficiente refrigeração dos mesmos e ao grau de saturação em carbono do ferro gusa.

Para uma dada especificação de gusa, compreendendo naturalmente composição química e temperatura, o valor do grau de saturação praticamente fica fora de nosso controle e, assim sendo, resta-nos unicamente a alternativa de procurar um eficiente resfriamento para os blocos de carbono.

As figuras 6³ e 7⁷ nos mostram a condutibi-

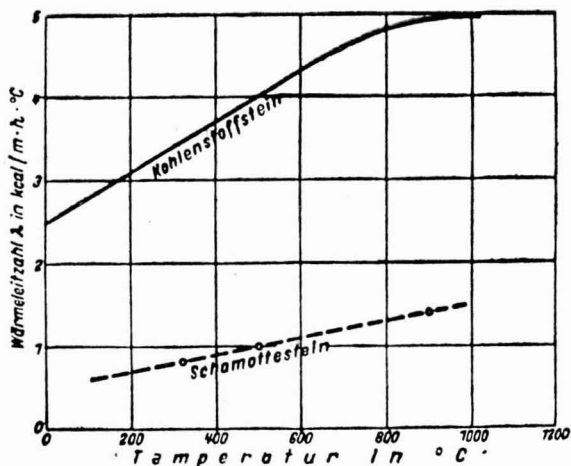


Fig. 6 — Condutibilidade térmica dos tijolos de carbono e silício-aluminosos (3).

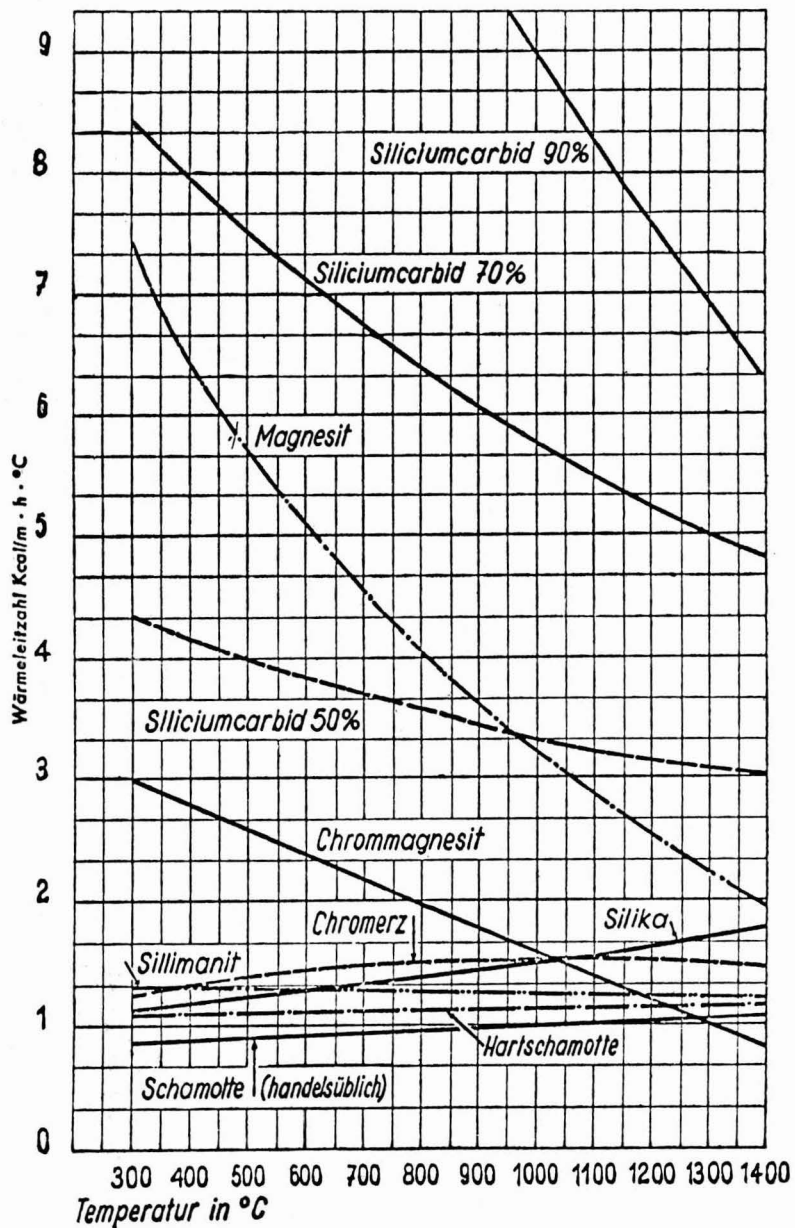


Fig. 7 — Exemplo de condutibilidade térmica de tijolos refratários (7).

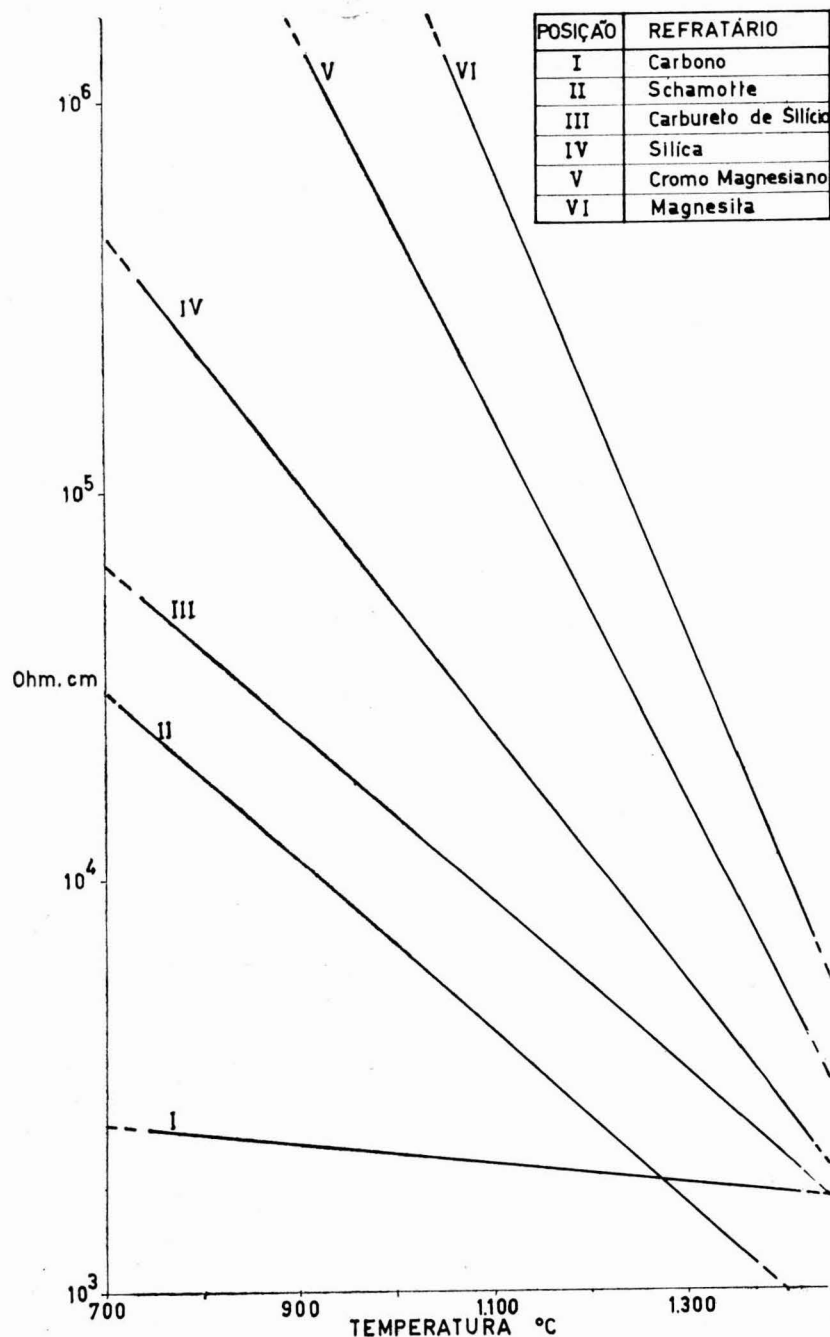


Fig. 8 - Variação da resistividade elétrica de alguns materiais refratários com a temperatura. (Baseado nos dados de Salmang, Harders e Kienow)

lidade térmica de diversos materiais refratários em dependência com a temperatura.

Na CSM, o resfriamento da parede refratária é feito, indiretamente, por um fluxo contínuo de água sobre o invólucro metálico. Únicamente sob o ponto de vista de resfriamento dos blocos de carbono, não nos parece indicado a colocação de sílico-aluminosos entre os blocos e o invólucro metálico, devido à baixa condutibilidade térmica daqueles tijolos. A figura 8 nos mostra a variação da resistividade elétrica de alguns materiais refratários em função da temperatura^{8,9}. Por razões elétricas, não seria indicado o uso de carbono, diretamente em contato com a chapa externa (bom condutor elétrico a altas temperaturas). A observação das figuras 6, 7 e 8 sugere-nos o emprêgo de magnetita entre os blocos e o invólucro metálico. Na hipótese de se conservar o sílico-aluminoso seria recomendado diminuir sua espessura.

A figura 1 e a tabela I, colunas 4 e 5, nos mostram, em resumo, o resultado de nosso estudo.

8. CONCLUSÕES

Seriam principalmente:

- a) a sola básica feita com os cuidados indicados (inclusive perfil) teria longa duração;
- b) no estado atual, a parede lateral do cadinho deverá normalmente determinar o tempo de duração dos revestimentos refratários nos fornos elétricos de redução;
- c) para uma dada especificação de gusa o aumento da durabilidade dos revestimentos deveria ser conseguido por meio de um eficiente resfriamento dos blocos.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem às Diretorias da Companhia Siderúrgica Mannesmann e da Magnesita S. A. pela autorização concedida para a publicação deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

1. DURRER, Dr. Ing. R. — *Trattamento Siderurgico dei Minerali di Ferro*; Trad. dei Dott. — Ingg. Carli e Repetti — Milano (1944).
2. SILVEIRA, Rubens C. — O revestimento do forno elétrico de redução n.º 1 da CSM — Relatório interno (1967).
3. SEND, A. — Características e durabilidade dos revestimentos refratários de altos-fornos — METALURGIA, vol. 21, n.º 88, mar. 1965, p. 195.
4. MENEZES, I. — Escorificação de tijolos pichados — Trabalho solicitado pelo SAT da MSA ao DEP da mesma firma (1967).

5. WENZEL, W. — Reaktions ablauf zwischen Roheisen schmelzen und CaO-SiO₂ — A₁₂O₃ Schlacken bei hohem Anteil «direkter» Reduktion — Neue Hütte (1965).
6. SILVEIRA, Rubens C. & GASQUES, M. Benites — Representação gráfica do grau de saturação em carbono do ferro gusa — Não publicado (1966).
7. DIDIER, Werke — *Fuerfeste Baustoffe und ihre Eigenschaften*.
8. SALMANG, Prof. Dr. H. — *Die Keramik-Springer* — Verlag (1958).
9. HARDERS, Dr. phil. Dr. — Ing. H.; KIENOW, Dr. phil. S. *Feuerfestkunde* — Springer — Verlag (1960).

DISCUSSÃO

FELIPPE J. V. FRANCESCHINI⁽¹⁾ — Desejo congratular-me com os autores de trabalho tão interessante e tão instrutivo para todos. Parece que o problema da soleira já tem um equacionamento seguro pelas observações que foram apresentadas neste Simpósio.

O problema de contenção do bode dos altos-fornos tem sido bem estudado e a tendência para soleira de relativa pequena espessura e alta condutibilidade, com refrigeração principalmente a ar, parece tornar-se um caminho mais ou menos obrigatório nos altos-fornos e, por extensão, também nos baixos-fornos. Neste último caso, indicam os autores do trabalho que ainda o problema precípuo reside nas paredes. Tem-se prestado muita atenção, ultimamente, na questão de perfis de equilíbrio dos revestimentos dos altos-fornos e, por extensão, acreditado que êsses trabalhos possam ser extrapolados para os casos dos baixos-fornos. A latitude da variação de escória parece que é muito maior no baixo-forno, do que no alto-forno, o que complica o problema. No caso dos grandes altos-fornos há, aparentemente, variações menores, e as soluções têm-se encaminhado para espessura de refratários cada vez menor, e maior condutividade, com refrigeração cada vez mais perfeita. Trabalhos recentes, especialmente feitos em Inland Steel, mostraram que uma refrigeração perfeitamente uniforme, colocada no interior da couraça, em contato íntimo com o refratário, tem permitido uma contenção do desgaste e um cálculo de desgaste do revestimento, que pode ser feito de maneira bastante apurada, através da variação da temperatura da água usada na refrigeração.

Gostaria de perguntar aos operadores de fornos aqui presentes se não seria possível — apondo externamente à carcaça uma caixa de água e medindo, o que não é difícil, a quantidade de calor da água que fôsse usada para refrigeração dessa zona obter um controle do desgaste do revestimento, do mesmo modo como está sendo feito atualmente com essas placas de ferro fundido, de refrigeração, colocadas dentro da couraça.

Agora, um comentário. Já em 1962, por ocasião da apresentação de um trabalho de autoria do Eng.º Fred Woods Lacerda (*), não me pareceu de forma nenhuma lógica a interposição de tijolos sílico-aluminosos. É uma aberração que não se justifica sob o ponto de vista de refrigeração do carbono, que é tão necessária. O caminho certo é esse que está sendo seguido agora: fazer paredes com materiais de alta condutividade, propiciar uma refrigeração eficiente e, de alguma forma, tentar medir a evolução ou involução do refratário, por meio de medidas de calor perdido através das paredes. Êsse

(1) Membro da ABM. Engenheiro Civil; Livre Docente da Escola Politécnica da USP e Diretor da Cerâmica São Caetano S. A.; São Paulo, SP.

(*) *Dolomita e sua Utilização como Refratário na Siderurgia* — ABM-BOLETIM, vol. 20, n.º 83, p. 341.

trabalho tem mais um mérito. Pela primeira vez, que eu saiba, em trabalho já feito no Brasil, encontram-se publicados dados de contaminação de álcalis nos tijolos utilizados. É de todos sabido que os álcalis, que são introduzidos em quantidade apreciável pelo carvão vegetal constituem um dos elementos de maior agressividade. É verdade que o mecanismo de ataque dos refratários pelos álcalis não está perfeitamente esclarecido. Aparentemente, os álcalis penetram nos refratários sob a forma de vapores metálicos e depois seriam encontrados sob a forma de óxidos alcalinos. Mas o fato é que se constituem em elementos contaminantes que reduzem de maneira muito grande a refratariedade e a capacidade de resistência à corrosão química dos refratários.

RUBENS CORRÊA DA SILVEIRA (2) — Gostaria que o Prof. Franceschini fizesse uma explanação sobre a questão das caixas.

F. J. V. FRANCESCHINI — A idéia fundamental se encontra nesse revestimento que foi tentado há uns quatro anos na Inland Steel, onde eles procederam de maneira extremamente lógica: colocaram placas de ferro fundido de grandes dimensões, com refrigeração interna; dentro da carcaça, elas entram em contato íntimo com os refratários. A solução, apresentada naquela empresa, há três anos foi a seguinte: colocaram na parte anterior, na rampa e depois na própria cuba, grandes placas de ferro fundido que tinham inicialmente 6" de espessura e depois passaram a 4"; nelas, a água penetra e faz um circuito dentro de tubos metálicos, de aço, que foram colocados por ocasião da fundição. Essa circulação de água é perfeitamente controlada, tanto a quantidade como as temperaturas de entrada e de saída. O revestimento dessas placas é feito em toda a periferia, sendo elas colocadas umas junto às outras. Uma das características desse sistema é que as placas são apertadas contra o revestimento refratário colocado no exterior, por meio de cabos de aço. Isso assegura contato íntimo entre o refratário e essas placas de refrigeração. Completa-se com o enchimento de um material isolante e compressivo, no caso, poliuretano, que é uma solução totalmente nova. Essa solução foi feita inicialmente num único forno, na rampa; depois na cuba; numa terceira prática, na cuba e na rampa. O sistema ocorre em mais de 25 altos-fornos, inclusive no forno da Ford, que muito contribuiu para o desenvolvimento desse sistema. Assim conseguiram, através da evolução da temperatura, da quantidade de calor retirado, medir de maneira bastante precisa a evolução ou a redução de espessura dos revestimentos. Nesse caso, esse enchimento é compressivo e isolante, o que pouco importa, porque a refrigeração é integral e interna ao revestimento. Diga-se de passagem que foi conseguido aqui um elemento de extraordinário interesse, qual seja não submeter o refratário a esforços muito grandes de compressão, principalmente por ocasião do primeiro aquecimento, quando a chapa ainda está fria. Eles não tiveram vida excepcionalmente boa, e os revestimentos estão, atualmente, entre 18 e 27", e está sendo feita uma experiência de colocação de concreto refratário de 4" de espessura diretamente em cima dessas placas, o que, em alto-forno, é sensacional. O resultado ainda não é conhecido de maneira definitiva.

A experiência seria, a partir dessa idéia promovida pela Inland Steel, colocar em algum ponto, da carcaça, ou em alguns pontos, caixas relativamente estreitas de refrigeração e que por um sistema qualquer fôsse conseguida uma eficiente compressão de água, com uma entrada e uma saída. Se fossem feitas as medidas das temperaturas da água e da sua quantidade, seria possível executar cálculos semelhantes a esses realizados pela Inland Steel e que se mostraram realmente efetivos. Num sequência teríamos a carcaça e o refratário sílico-aluminoso; teríamos, como lógica, a colocação desse

refratário e um enchimento de pasta carbônica de alta condutibilidade térmica. No caso desse revestimento de pasta carbônica, teríamos o material diretamente aposto à carcaça. Então, teríamos estas caixas colocadas na carcaça para que então se pudesse fazer uma medida de quantidade de calor retirado.

A pergunta que queria fazer é se isso seria julgado praticável pelos operadores presentes, que têm grande experiência. Isso permitiria um estudo mais simples do que o que vem sendo feito com rádioisótopo e algo semelhante, permitindo a verificação, dia a dia, da quantidade de calor roubada ou retirada, e, com cálculos simples, a evolução da espessura do revestimento.

R. CORRÊA DA SILVEIRA — Queria agradecer a explanação do Eng.º Franceschini; realmente é uma contribuição muito boa e muito grande para os nossos trabalhos que estão aqui sendo apresentados. Para mim é informação nova, muito interessante, sobre a qual acho — na minha opinião pelo menos — que deveríamos meditar, pensar sobre o problema e talvez verificar qual a possibilidade que existe em podermos utilizar esse método. À primeira vista, talvez seria realmente muito difícil emitir uma opinião.

JARDEL BORGES FERREIRA (3) — No trabalho apresentado, o desgaste maior foi na zona inferior, onde se têm blocos de carbono. Quer-me parecer que a sugestão do Eng.º Franceschini se refira à parede própria dita. Estou certo nesta dedução?

F. J. V. FRANCESCHINI — Este revestimento, essa refrigeração periférica que é feita, já é bastante antiga. É usada em alguns fornos dos Estados Unidos; em altos-fornos, há mais de 35 anos. Então, procurava-se refrigerar a soleira; essas placas eram colocadas refrigerando as soleiras externamente. Inclusive, há necessidade de se transplantar essas placas de refrigeração, da parte interna para a parte externa. Então, esse método de refrigeração intensa deve ser feito muito especialmente na zona de maior desgaste.

FRED WOODS DE LACERDA (4) — Desejo trazer aqui uma informação que me permitiria expender uma opinião. Quando a ACESITA adquiriu da DEMAG o projeto do forno de redução, adquiriu integralmente, não só o projeto do forno, mas também o "know-how" que seria, no caso específico, o projeto do revestimento refratário inclusive. Esse projeto de revestimento refratário, logo de saída, causou estranheza praticamente geral, devido ao fato de que a principal qualidade do carbono, que seria a elevada condutividade térmica, não tinha sido absolutamente aproveitada. Não havia possibilidade alguma de mudança nas características do revestimento refratário, devido ao tempo e devido ao fato de que a DEMAG exigia completa obediência a esse projeto.

Isso nos permite dizer — seria opinião nossa — que o fabricante não levou na devida consideração outro fator, que seria a vida e o desempenho do revestimento refratário. O forno foi bastante estudado nos seus aspectos puramente de produção metalúrgica. Mas a consideração que foi dada ao refratário, nos pareceu, na época, insignificante. O fato é que quando publicamos o trabalho referido, nos detivemos exclusivamente nos aspectos de construção. Realmente, tivemos pela frente um tipo de construção bastante complicada: os blocos verticais eram de 1,80 m de altura e eram, para todos os

(3) Membro da ABM e na Orientação do debate. Engenheiro Civil, de Minas e Metalurgia; Vice-Presidente da ACESITA; Rio de Janeiro, GB.

(4) Membro da ABM e Presidente da CT de Refratários. Engenheiro Civil; Secretário Regional do IBS; Belo Horizonte, MG.

efeitos, blocos radiais, tinham de ter uma conformação, obedecer a uma técnica.

Quanto à soleira, ao contrário, não houve problema algum em fazê-la, porque foram previstas juntas de 5 cm, o que tornou praticamente inexistente o problema de adaptação desses blocos, mas que provavelmente traria problemas — como trouxeram — durante o funcionamento do forno.

Talvez a DEMAG achasse que, devido às condições do forno, de diâmetro bastante maior em relação à altura do banho térmico, esse problema fosse minimizado com o tempo. O fato é que na data da apresentação do nosso trabalho, o Diretor Industrial da Mannesmann, na ocasião, pôde reportar os problemas que na época a DEMAG já estava encontrando na Alemanha, exatamente no ponto em que se encontra até hoje, isto é, na parte periférica em contato com o banho, a parede sofria um desgaste bastante acentuado.

Embora o progresso que se tenha obtido com relação ao revestimento refratário de alto-forno tenha sido lento, pela própria natureza do funcionamento do forno é preciso um número elevado de anos para que se tenha uma série muito pequena de observações. Mas me parece que a correlação que poderia ter havido de início entre a experiência que já havia, e muito larga, sobre o desempenho de refratário em altos-fornos, não foi devidamente transferida. A nosso ver, sem um contato especificamente em refrigeração dos baixos-fornos, nenhum progresso posterior poderá ser obtido além daqueles que foram até agora alcançados. Por exemplo, essa substituição da soleira por material dolomítico é a mais interessante possível.

O Prof. Franceschini se referiu às experiências feitas pela Inland Steel. Tive oportunidade de estar lá há dois meses e, pude verificar o progresso que obtiveram e o último projeto que consideram como solução definitiva nos problemas de alto-forno, que consiste na soleira. Eu não gostaria de falar sobre a parede, porque o Prof. Franceschini já expôs bastante o assunto, mas com a soleira eles não terão mais problemas. Substituíram a parte superior com camada de tijolos silico-aluminosos, com espessura muito pequena. A segunda camada é composta de blocos de carbono, para transferir rapidamente o calor. Há uma terceira camada inferior de blocos de carbono, intensivamente refrigerada, o que vai acabar com os problemas que tinham na soleira, porque a primeira tentativa foi colocar o carbono em contato com o banho. Eles recuaram pelas mesmas razões com que sempre recuaram, nessa questão, na soleira do baixo-forno. A substituição de silico-aluminosos foi mais fácil, em virtude das pequenas variações e dos índices de basicidade que geralmente se encontram no alto-forno. A dolomita foi a resposta adequada para o baixo-forno. Minha opinião é que não há realmente grande coisa a fazer e, nem obstáculo muito grande, se numa próxima etapa fosse conseguido esse efeito de refrigeração o mais intenso possível. Sabemos que na parte da parede seria impossível colocar o carbono em contato com a carcaça. Devido às condições puramente de economia do forno, nada teria a obstar. O caminho lógico seria não a substituição de tijolos silico-aluminosos por um tijolo como de magnesita, que talvez dê uma transmissão de calor pouco maior, mas, a meu ver ainda absolutamente insuficiente.

Esse problema de desgaste periférico será encontrado permanentemente, porque o nível de temperatura em que se situam os blocos permite esse ataque das escórias.

F. J. V. FRANCESCHINI — Em alguns altos-fornos, nos Estados Unidos, tem sido tentada uma refrigeração interna integral, ou quase integral, com caixa de água, soldando cantoneiras na carcaça, cantoneiras essas, colocadas à distância bastante pequena umas das outras, formando quase que uma refrigeração contínua. Esse método parece muito mais eficiente do que apenas uma lavagem da carcaça metálica, embora esta também seja

feita — já citada no caso da ACESITA — e são colocadas calhas que garantem colagem melhor. O efeito seria, em primeiro lugar, de não poder ser, de forma mais ou menos razoável, calculada a quantidade de calor retirada, e depois a quantidade de água que se pode fazer passar; a quantidade de calor que pode ser absorvida é muito menor do que a que se consegue por uma caixa de refrigeração. Uma solução interessante seria colocar essas placas de refrigeração na soleira, a uma profundidade bastante grande. É uma solução antiga e eficiente que tem ido usada. Então, teríamos estas placas de refrigeração pelo lado interno da soleira, mas penetrando profundamente abaixo do nível da soleira.

Outra solução, em que é preciso muito mais coragem, é colocar essas placas de refrigeração dentro da carcaça. Realmente e o comentário não é meu, mas de Greeves, de MacKee — é preciso coragem para colocar dentro da carcaça placas de refrigeração, que embora muito eficientes são colocadas lá de maneira irreversível, impossível de serem retiradas. A experiência está sendo feita de forma cada vez mais ampla, em maior número de fornos, aparentemente sem qualquer inconveniente.

Outra solução ainda seria colocar cantoneira ou caixas externas, que poderiam ser justapostas umas às outras em toda a periferia, nesta zona crítica que parece existir nos altos-fornos. Repetindo o que foi dito pelo Eng.^o Lacerda, soluções como estas, de revestimento cada vez mais fino e refrigeração mais eficiente parecem ser o caminho definitivo para os altos-fornos e, acredito que para os baixos-fornos também.

R. CORRÊA DA SILVEIRA — Quero dar um esclarecimento adicional com respeito à colocação dessas caixas no interior do invólucro metálico. Na Companhia Siderúrgica Mannesmann, durante um longo período, utilizamos não caixas propriamente, mas serpentinas colocadas entre o silico-aluminoso e o bloco de carbono, entre os quais havia uma camada de aproximadamente 10 cm de pasta socada. Dentro dessa pasta socada, tínhamos ao nível do anel de desgaste, serpentinas com circulação de água. Nesse caso, a finalidade não seria a de fazer medidas em função da variação da temperatura para saber a perda de calor e o acompanhamento do desgaste do refratário, mas a colocação aí era no sentido de refrigerar. Os resultados do que foi feito não foram muito bons. O perigo que sempre pode ocorrer, pelo menos no caso da serpentina, devido, naturalmente, à dificuldade da difusão pelo ataque do gusa, é vazamento d'água. Acontecendo isso, o revestimento é completamente perdido. Com essa experiência e, principalmente depois que passamos a colocar dolomita na sola, e agora magnesita, não pareceria indicada, à primeira vista, a colocação das referidas serpentinas. Qualquer vazamento de água que houvesse, por pequeno que fosse, destruiria completamente o revestimento.

Então, retiramos a serpentina e partimos para outro revestimento nestas condições, agora com refrigeração externa, do lado de fora do invólucro. Se as experiências agora não forem boas, podemos voltar a caminhar no sentido de refrigerar de novo internamente.

Quanto ao acompanhamento do desgaste em si, parece-me que aquele que foi por nós feito, quer dizer, em função da variação da temperatura por parte do forno elétrico, colocado na zona de maior desgaste, é bastante razoável. Tem dado bons resultados e nos permite — isso está citado no trabalho — na quinta campanha, acompanhamento mais razoável, principalmente em função da condutividade térmica do bloco de carbono; com um simples cálculo, permite aproximadamente ter-se uma idéia do bloco em função da temperatura lida. O que está sendo realizado na Mannesmann é a substituição de experiência já feita com serpentina, que não foi boa. Partimos, então, para essa nova experiência. Se por acaso também não for boa, iremos enveredar para outra solução. Aí será estudada a possibilidade do emprego das referidas caixas.