

# PROLONGAMENTO DA CAMPANHA DO REVESTIMENTO DO ALTO-FORNO 2 DA CSN ATRAVÉS DA APLICAÇÃO ROBOTIZADA DE CONCRETO POR *SHOTCRETE*<sup>1</sup>

Sidiney Nascimento Silva<sup>2</sup>  
Giancarlo Sterhling Barbosa<sup>3</sup>  
Carlos Roberto Silva<sup>4</sup>  
Marco Polo da Silva Peixoto<sup>5</sup>  
Sebastião Jorge Xavier Noblat<sup>6</sup>  
Fernando Vernilli Junior<sup>7</sup>  
Eduardo Saito<sup>8</sup>  
Henrique Varella Ribeiro<sup>9</sup>  
Achyles Bertoldo<sup>10</sup>

## Resumo

O trabalho descreve a metodologia empregada para a seleção e implantação da tecnologia de aplicação robotizada de concreto refratário por *shotcrete* para preservação do revestimento e prolongamento da campanha do Alto-forno 2 da CSN no período de 2004 - 2009. Em adição, apresenta-se também as vantagens técnicas, operacionais e econômicas da tecnologia de *shotcrete* em comparação à técnica de *gunning*, utilizada no período inicial da campanha do forno.

**Palavras-chave:** Alto-forno; Refratário; *Shotcrete*.

## PROLONGING OF CSN BF 2 CAMPAIGN BY ROBOTIC SHOTCRETING

### Abstract

The paper describes in detail the methodology used for assessment and implementation of the technology of robotic shotcreting to preserve the refractory lining and prolonging CSN BF 2 campaign in 2004 – 2009 period. In addition, the main advantages of the shotcreting technology – technical, operational and economical ones, compared to the gunning technique, employed in the first period of the campaign, are also presented.

**Key words:** Blast furnace; Refractories; Shotcrete.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

<sup>2</sup> Eng. Civil, Ph.D., Gerente de Processos da Metalurgia da CSN.

<sup>3</sup> Téc. Especialista da Gerência de Refratários da CSN.

<sup>4</sup> Téc. de Desenvolvimento da Gerência de Refratários da CSN.

<sup>5</sup> Eng. Metalúrgico, Engenheiro Sênior da Gerência do Alto Forno # 2 da CSN.

<sup>6</sup> Eng. Metalúrgico, Coordenador de Tecnologia da Gerência de Processos Metalúrgicos da CSN.

<sup>7</sup> Eng. Químico, Ph.D., Professor da Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP.

<sup>8</sup> Químico, Mestrando em Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP.

<sup>9</sup> Eng. de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena – EEL/USP.

<sup>10</sup> Eng. Metalúrgico, Representante de Vendas no Brasil da Magneco-Metrel, USA.

# 1 INTRODUÇÃO

Os Altos Fornos são equipamentos de elevado investimento e a gestão desses ativos exige um plano de manutenção adequado, com ações de curto, médio e longo prazos, visando a prolongar a sua campanha o máximo possível, sem riscos à segurança dos operadores e prejuízos operacionais. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as principais características de projeto e um resumo da 5.<sup>a</sup> campanha do Alto Forno # 2 da CSN.

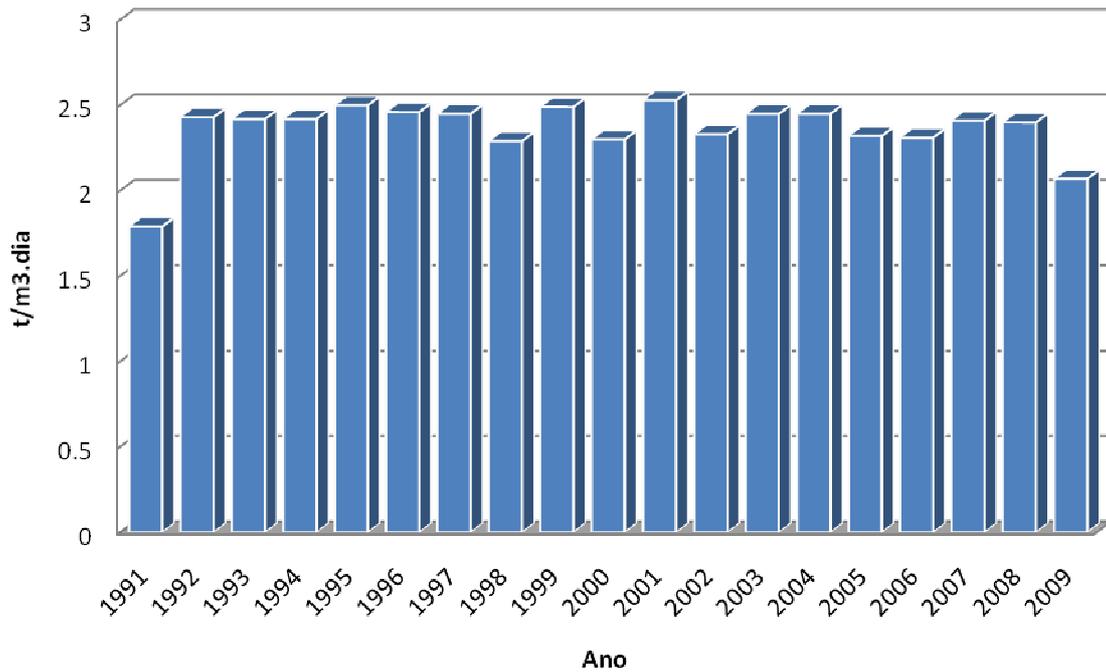
**Tabela 1** – Principais características de projeto do alto forno # 2 da CSN

<b>Alto Forno # 2</b>	<b>Características de Projeto</b>
Volume Interno	1653 m <sup>3</sup> .
Distribuição de Carga	Calha Rotatória (Paul Wurth).
Carregamento	Peneiramento de Sinter, Minério de Ferro e Coque. Correia Transportadora. 2 Silos de Carga. 3 Sondas de Nível de Carga. Equalização com Gás Semi-Limpo e Nitrogênio.
Regeneradores	3 Unidades com Câmara de Combustão Interna. Temperatura de Sopros: 1.100°C.
Sistema de Refrigeração	Placas de Refrigeração: Cuba, Ventre e Rampa "Spray": Cadinho.
Limpeza de Gás	Controle de Pressão do Topo: Sistema "Bischoff" (1,100 kgf/cm <sup>2</sup> ). Lavagem de Gás: "Venturi".
Casa de Corrida	2 Furos de Gusa. Granulação de Escória Convencional. 24 Ventaneiras. Diâmetro do Cadinho: 9m. Sistema de Injeção de Gás Natural. PCI (Desde Junho de 1997): 200 kg/t.
Sistemas de Controle	Análise do Gás do Topo: CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> . Temperatura das Pernas de Gás. Temperatura do Gás do Topo: Sonda Fixa. Temperatura da Goela: "Skin Flow". Temperatura e Análise do Gás da Cuba: Sonda Penetrante. Temperatura do Revestimento Refratário: Cuba, Ventre, Rampa e Cadinho. Tomadas de Pressão: 11.

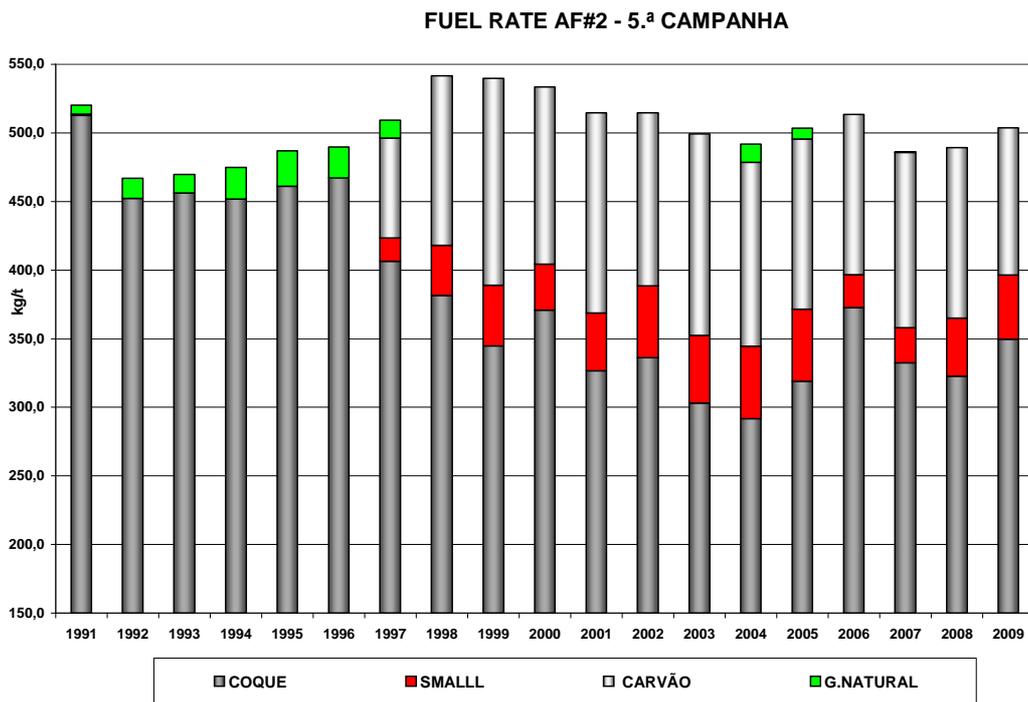
**Tabela 2** – Resumo da 5.<sup>a</sup> Campanha do Alto Forno # 2 da CSN

<b>Parâmetros de Avaliação</b>	<b>Campanha</b>					
	<b>1.<sup>a</sup> Fase: fev.91 – nov.00</b>		<b>2.<sup>a</sup> Fase dez.00 – mar.09</b>		<b>Total</b>	
	<b>Progr.</b>	<b>Realiz.</b>	<b>Progr.</b>	<b>Realiz.</b>	<b>Progr.</b>	<b>Realiz.</b>
<b>Campanha (anos)</b>	10	10	4	8	14	18
<b>Produção (Mt gusa)</b>	12	12,5	6	13,5	18	25

Os resultados operacionais da 5.<sup>a</sup> campanha do Alto Forno # 2 (Figuras 1 e 2), superaram completamente os parâmetros de projeto, apresentando índices operacionais comparáveis aos melhores Altos Fornos do mundo (produtividade expressa em m<sup>3</sup> de volume interno).

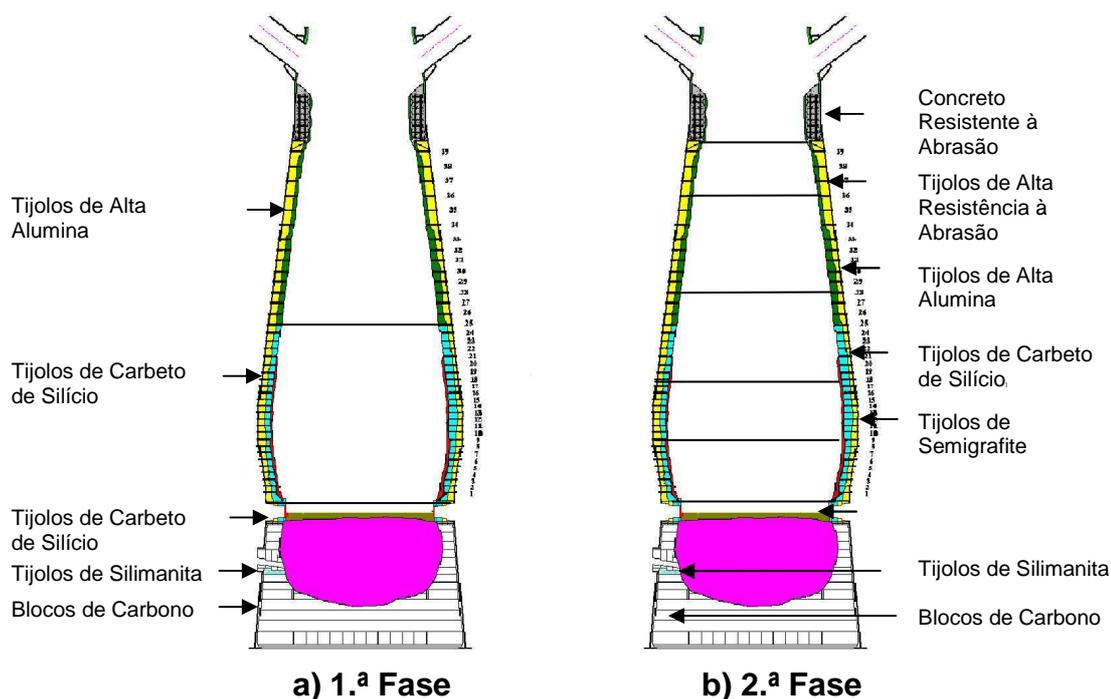


**Figura 1** – Produtividade da 5.ª Campanha do Alto Forno # 2 da CSN.



**Figura 2** – Fuel Rate da 5.ª Campanha do Alto Forno # 2 da CSN.

A Figura 3 mostra esquematicamente os projetos de revestimento refratário das 1.ª e 2.ª fases da campanha. Como política de preservação da carcaça metálica foi estabelecida uma espessura residual mínima do revestimento refratário de 390 mm, com o objetivo de manter a integridade da última fiada de tijolos próxima à carcaça, evitar a queda do revestimento por efeito “dominó” e a ocorrência de “pontos quentes”.



**Figura 3** – Projeto de revestimento refratário antes e após a reforma do alto forno # 2.

A partir de 1997, após o *start up* da Planta de PCI, o forno passou a apresentar o fenômeno de formação de cascão nas regiões da cuba inferior e ventre, afetando os resultados operacionais.<sup>(1)</sup> Isso exigiu o desenvolvimento e implantação de procedimentos operacionais especiais, com a finalidade de regularizar a descida da carga e remover os cascões aderidos ao revestimento refratário. Esses procedimentos operacionais de limpeza de cascão tiveram como efeito colateral negativo o desgaste acelerado do revestimento refratário. Durante a remoção, o revestimento refratário aderido aos cascões também é parcialmente removido.

No período de 1997 a 2000, final da 1.ª fase da campanha, a estratégia de manutenção refratária consistiu em realizar reparos anuais de projeção manual de concreto refratário, “*gunning* manual a frio”, do topo à região das ventaneiras. Nesse tipo de reparo, a questão do índice de rebote não era decisiva, uma vez que era possível a remoção de todo o material rebotado através da abertura das ventaneiras. A Tabela 3 apresenta as principais características desses reparos de “*gunning* a frio”.

**Tabela 3** – Principais características dos reparos de “*gunning* manual a frio” do alto forno # 2 – período 1997 – 2000

Área Reparada	Período	Duração	Observações
Topo à região das ventaneiras	abril 1997	9 dias	Sem corrida da salamandra
Topo à região das ventaneiras	abril 1998	15 dias	Sem corrida da salamandra

Na 2.ª fase da campanha, no período de 2003 a 2006, a estratégia de manutenção refratária compreendeu a realização de reparos semestrais de projeção robotizada de concreto refratário, “*gunning* robotizado a quente”, do topo à região da cuba inferior. As regiões do ventre, rampa e ventaneiras, revestidas com tijolos de semigrafite, de alta condutividade térmica, solução térmica,<sup>(2)</sup> com o perfil de

desgaste praticamente “estabilizado”, não demandavam reparos. Nesse tipo de reparo, não é possível a remoção do material rebotado, de alta concentração de alumina,  $Al_2O_3$ , e elevado ponto de fusão. Esse fato torna a questão do índice de rebote crucial, limitando a quantidade máxima de material a ser aplicada, em função dos riscos envolvidos durante o retorno do forno à operação. Considerando-se uma aplicação de 80 toneladas de material refratário, com 60% de alumina, e índice de rebote de 15%, resulta numa deposição de 7,2 toneladas de  $Al_2O_3$  sobre a carga do forno. Além disso, a seleção da tecnologia de aplicação robotizada também foi decidida em função da priorização da segurança, permitindo eliminar totalmente o acesso de pessoal ao interior do forno. Trata-se de espaço confinado e com riscos da presença de CO e temperatura elevada. Por melhor que seja a qualidade do isolamento térmico aplicado sobre a carga do forno (“rolha refratária”), esses riscos sempre persistem. A Tabela 4 apresenta as principais características desses reparos de “*gunning* robotizado a quente”.

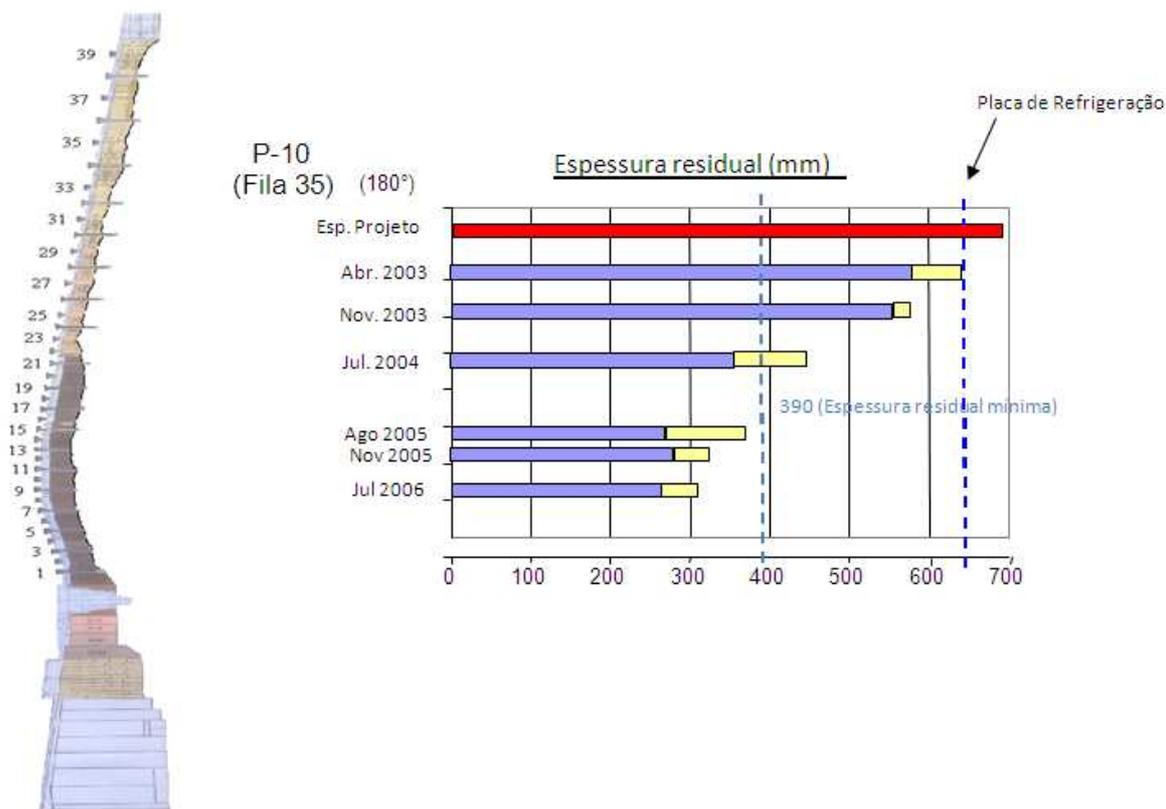
**Tabela 4** – Principais características dos reparos de *gunning* robotizado a quente do alto forno # 2 – período 2003 – 2006

<b>Ano</b>	<b>2003</b>		<b>2004</b>	<b>2005</b>		<b>2006</b>
<b>Mês</b>	<b>abr.</b>	<b>nov.</b>	<b>jul.</b>	<b>ago.</b>	<b>nov.</b>	<b>jul.</b>
<b>Material Aplicado (t)</b>	40	77	81	87	83	45
<b>Taxa de Aplicação (t/h)</b>	3,51	3,85	4,26	4,95	3,95	4,09
<b>Índice de Rebote (%)</b>	18	17	15	16	18	16

Em 2005, o mercado aquecido levou ao descumprimento da Política de Preservação do revestimento – aplicação semestral de material. Após um intervalo de 13 meses da última aplicação, o perfil de desgaste em condição crítica, com espessuras residuais localizadas inferiores a 390 mm, exigia a aplicação de grande quantidade de material, ao redor de 120 t, para a completa recuperação do revestimento. Todavia, o elevado índice de rebote da tecnologia empregada naquela época, “*gunning* robotizado a quente”, de 10% a 15%, restringia a quantidade máxima de material a ser aplicada, em função da dificuldade de escorificação da alumina depositada sobre a carga. Isso exigiu uma maior frequência de paradas do forno para aplicação de material até à completa recuperação do revestimento – aplicações em ago. – nov. de 2005 e jul. de 2006 (Tabela 4).

A Figura 4 ilustra a evolução do perfil de desgaste do revestimento no período 2003 – 2006, tomando-se como referência a região da Cuba Superior, elevação da fila de placas de refrigeração 35. O desgaste dessa região tem um impacto negativo sobre a distribuição de carga do forno.

Nesse contexto, a nova tecnologia de aplicação de concreto refratário por *shotcrete*, bastante difundida na América do Norte, Europa e Ásia,<sup>(3)</sup> adequava-se perfeitamente às necessidades particulares da CSN. A Tabela 5 apresenta uma comparação das tecnologias de aplicação por *gunning* e *shotcrete*.



**Figura 4** – Evolução do perfil de desgaste do revestimento refratário da cuba superior na elevação da fila de placas 35 (ref.: período 2003 – 2006).

**Tabela 5** – Comparação das Tecnologias de Aplicação Robotizada de Concreto Refratário por *Gunning* e *Shotcrete* em Alto Forno

PARÂMETRO DE AVALIAÇÃO	<i>GUNNING</i>	<i>SHOTCRETE</i>
Custo do Equipamento para Aplicação.	Baixo (mais simples).	Elevado (mais robusto).
Bombeamento do Material	A seco.	A úmido.
Índice de Rebote (%).	10 - 15	3 - 5
Taxa de Aplicação (t/h).	3 - 4	8 - 12
Desempenho do Material (meses).	6 - 12	12 - 18

## 2 OBJETIVO

Num cenário de mercado aquecido, o aumento das perdas de produção decorrentes da maior frequência de parada do forno para aplicação de material, lucro cessante, levou à implantação da tecnologia de aplicação por “shotcrete” com os seguintes objetivos:

- recuperar o perfil do revestimento refratário sem riscos operacionais no retorno do forno à operação – baixo índice de rebote; e
- viabilizar o prolongamento da campanha do forno, com baixa frequência de paradas para manutenção refratária – minimizar perdas de produção.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Avaliação da Viabilidade Técnica e Econômica da Tecnologia de Shotcrete

O primeiro passo no sentido de uma avaliação técnica preliminar foi a realização de visita técnica à Magneco-Metrel, USA, fabricante de concretos refratários ligados com sílica coloidal, aplicados por *shotcrete*, para aprofundar o conhecimento sobre a nova tecnologia – levantamento dos recursos necessários, desempenho do material etc., e acompanhar a sua aplicação em Alto Forno de grande porte.

No âmbito da América do Sul, tratava-se da primeira aplicação por *shotcrete* de concreto ligado com sílica coloidal em Alto Forno de grande porte. A operacionalização desse projeto exigiu então o desenvolvimento de uma parceria entre a Magneco-Metrel, USA, fabricante do material e detentora da tecnologia, e a Calorisol, Brasil, empresa prestadora de serviços de montagem e aplicação de refratários. Como parte integrante do pacote de investimentos realizados pela Calorisol, foram importadas duas máquinas de bombeamento Allentown, modelo 3300, de comprovada eficiência, e montados no Brasil dois robôs, conforme projeto da Magneco-Metrel, com todos os componentes críticos importados. Após a sua fabricação, foram realizados testes a frio para avaliação de funcionamento e desempenho.

#### 3.2 Materiais Refratários

A tecnologia de concretos ligados por sílica coloidal é baseada na eliminação do cimento de aluminato de cálcio (CAC) na mistura e utilização da tecnologia sol-gel.

##### 3.2.1 Concretos ligados com cimento

A maioria dos concretos e massas refratárias utilizam o cimento de aluminato de cálcio (CAC) como ligante dos agregados. A quantidade de CAC pode variar de quantidades relativamente baixas a 10% ou mais, dependendo do fabricante e do produto. A presença do CAC é evidenciada pela presença de CaO na composição química do material. Para a maior parte dos produtos ligados a CAC, o teor de CaO varia de 0,8% a 3,0%. Esses concretos e massas são misturados com água a uma consistência apropriada e instalados. A água adicionada reage com o CAC, formando fases hidratadas, responsáveis pela ligação do material a baixas temperaturas. Essas fases formadas dependem da temperatura de cura (Tabela 6).

**Tabela 6** – Produtos de reação de hidratação dos cimentos de aluminato de cálcio<sup>(4)</sup>

Temperatura de Cura (°C)	Produtos de Hidratação
< 21°C	CAH <sub>10</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> gel
21°C – 35°C	C <sub>2</sub> AH <sub>8</sub> + AH <sub>3</sub> gel*
35°C	C <sub>A</sub> AH <sub>6</sub> + AH <sub>3</sub> cristalino

\*Gel cristaliza entre 27°C e 32°C.

A baixas temperaturas, os concretos ligados a CAC são muito densos e apresentam permeabilidade muito baixa. À medida que essas fases hidratadas são decompostas e a água ligada quimicamente é eliminada, a resistência da ligação diminui e a permeabilidade e a porosidade do material aumentam, até que toda a água seja removida.

### 3.2.2 Concretos bombeáveis ligados com sílica coloidal

Os concretos refratários bombeáveis baseados na tecnologia de ligação sol-gel são isentos de cimento de aluminato de cálcio. Esses concretos bombeáveis utilizam um ligante de sílica coloidal, sem água, que é misturado no canteiro de obras, antes da aplicação, com um aditivo acelerador de pega à base de MgO. Esse aditivo acelerador de pega transforma o concreto bombeável em gel e desenvolve a pega do material a uma taxa controlada. Essa geleificação é devido à reação de condensação (Figura 5), que envolve a liberação de água. Contrariamente à ligação de CAC, que envolve a formação de água ligada quimicamente, os materiais ligados com sílica coloidal liberam a água. Portanto, a ligação de sílica envolve uma ligação química que não é quebrada com a desidratação do material quando é aquecido. Uma vez que a água não está ligada quimicamente, a maior parte da água na estrutura do gel está livre para ser liberada a temperaturas muito baixas (100°C). Todavia, uma pequena quantidade de água na forma de grupos de hidroxilas pode ainda ser liberada a temperaturas muito mais altas. A liberação da água, embora quase não detectável, resulta na formação de ligações adicionais Si-O-Si que melhoram ainda mais o desenvolvimento da resistência.

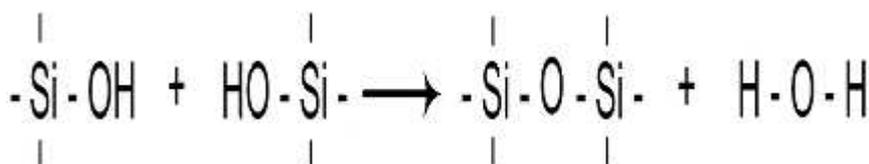


Figura 5 – Reação de condensação produzindo ligações Si-O-Si.<sup>(4)</sup>

Para a aplicação industrial no Alto Forno 2 da CSN foram selecionados concretos refratários bombeáveis, aluminosos, com sistema de ligação à base de sílica coloidal (“sol-gel”), aplicados por *shotcreting*, com acelerador de pega isento de álcalis e compatível com o uso de produtos ligados com sílica coloidal. A Tabela 6 apresenta as principais propriedades físico-químicas dos concretos refratários aplicados no Alto Forno 2 da CSN.

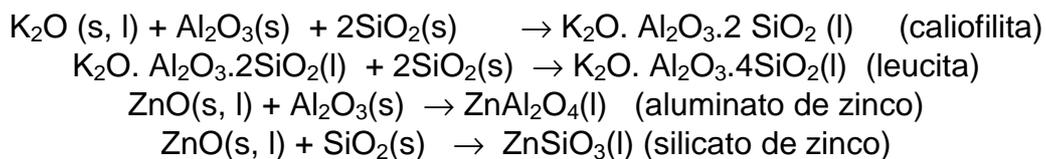
Tabela 5 – Principais propriedades físico-químicas dos concretos refratários aplicados no alto forno 2 da CSN

Propriedades	Região de Aplicação (Cubas)	
	Inferior e Média	Superior
Composição Química(%)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	73,9	64,6
SiC	17,4	-
SiO <sub>2</sub>	6,3	32,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	0,7
TiO <sub>2</sub>	2,0	1,4
CaO	0,1	0,1
Álcalis	-	0,4
Propriedades Físicas (após secagem a 110°C):		
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,76 – 2,84	2,39 – 2,50
Porosidade aparente (%)	16,6 – 19,7	12,8 – 17,0
Resistência à flexão (MPa)	4,1 – 7,2	5,5 – 10,0
Resistência à compressão (MPa)	22,1 – 29,7	24,8 – 44,8
(após queima a 1.400°C):		
Variação linear permanente (%)	0,0 – 0,4	-0,2 – 0,3

### 3.2.3 Ataque de álcalis

O uso de sílica coloidal tem sido utilizado em concretos refratários aluminosos pela eficácia que apresentam no empacotamento, reologia, devido ao tamanho e sua forma arredondada, e ainda pela possível formação de mulita *in situ* através da reação com alumina.<sup>(5)</sup> A mulita quando formada *in situ* proporciona resistência superior à corrosão e excelente resistência ao dano por choque térmico em concretos refratários.<sup>(6)</sup> Um aspecto de interesse tecnológico é a obtenção da mulita em temperaturas inferiores às normalmente observadas, próximas de 1.400°C, com o uso de precursores como partículas nanométricas e, portanto, mais reativas.

A formação da fase mulita é desejável do ponto de vista da prevenção da corrosão alcalina. De acordo com a literatura,<sup>(7)</sup> é especialmente através da sílica livre que ocorre a incorporação dos álcalis e zinco no revestimento refratário dos Altos Fornos. Os depósitos de álcalis e zinco são formados essencialmente na região próxima à isoterma de 800°C, como resultado do fenômeno de condensação dos vapores alcalinos e de zinco. O ataque alcalino é especialmente importante nas regiões das cubas média e inferior dos Altos Fornos, que operam numa faixa de temperatura entre 700°C e 1.100°C. Os álcalis e zinco reagem com a alumina e sílica presentes no material, levando à formação de alumino-silicatos, fases de baixa densidade e baixo ponto de fusão:



O elevado volume de fase líquida formado, próximo à isoterma de 800°C, provoca o colapso da microestrutura do material por spalling estrutural, resultando na sua completa desintegração, tornando-o pulverulento (zona frágil).

Os materiais selecionados para o Alto Forno # 2 da CSN, Tabela V, são aplicados simultaneamente com um aditivo acelerador de pega à base de MgO, em suspensão com água, com 30% em massa. O ligante do referido concreto é uma suspensão aquosa de sílica coloidal. Na suspensão, a sílica coloidal corresponde a 40% em massa. Para efeito da investigação da formação da alumina *in situ* foram preparadas misturas da fração super fina, abaixo de 45 µm (peneira de 325 mesh), do concreto aplicado nas regiões das Cubas Inferior e Média (Tabela V), com 12% de ligante e 1% do acelerador de pega, em peso. Após a preparação, as misturas foram tratadas a temperatura de 800°C, 900°C, 1000° C, 1100°C, 1200°C e 1300°C e analisadas por DR-X.

### 3.3 Avaliação da Aplicação do Material

A avaliação da aplicação do material envolveu a medição da taxa de aplicação (t/h) e do índice de rebote (%). O índice de rebote foi determinado através do balanço de massa de alumina, levando-se em consideração o seguinte pacote de materiais (sandwich):

- as três últimas cargas antes da parada do forno;
- a carga de abafamento (“rolha”), adicionada antes da parada do forno;
- os concretos refratários aplicados (rebote);
- as três primeiras cargas após a aplicação do material refratário; e

- escória das primeiras corridas após o retorno do forno à operação, até à sua normalização ( $\%Al_2O_3 < 13$ ).

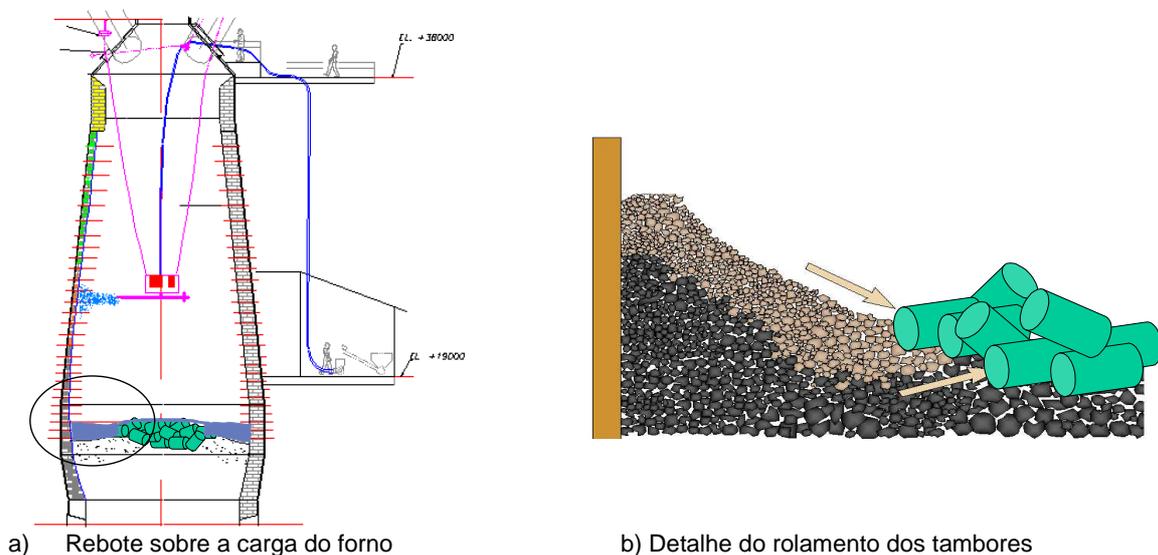
### 3.4 Minimização dos Riscos Operacionais no Retorno do Forno à Operação

#### 3.4.1 Procedimento anterior

Antes do início da aplicação do material, tambores metálicos eram adicionados sobre a carga de abafamento (“rolha”), com o objetivo de evitar a formação de uma camada contínua de concreto rebotado (“laje”). Todavia, esse procedimento era ineficaz, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 6. Os tambores metálicos tendiam a rolar para o centro do forno, em função da elevação mais baixa da carga naquela região, enquanto que o material rebotado caía na periferia do forno, próximo à carcaça. Por outro lado, a compactação posterior desses tambores, sob a ação da carga de enchimento do forno, levava realmente à formação de uma camada contínua, impermeável e de alto ponto de fusão, resultando na elevação da pressão do forno e arriamentos de carga durante o retorno à operação.

#### 3.4.2 Procedimento novo

O último material carregado no topo da carga de abafamento (“rolha”) é uma camada de quartzito, com 98% de  $SiO_2$ , sílica. Dessa forma, o material rebotado, rico em  $Al_2O_3$ , alumina, entra diretamente em contato com a sílica, facilitando as reações de escorificação. Esse procedimento substitui a rolha refratária convencional – aplicação de concreto refratário rico em sílica, 73% – 78%, sobre a carga do forno, reduzindo os custos com materiais e tempo de aplicação.



**Figura 6** – Ilustração esquemática dos tambores adicionados sobre a carga de abafamento (“rolha”).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Testes de Funcionamento e Desempenho dos Robôs

Os testes a frio para avaliação do funcionamento dos robôs (Figura 7), consistiram na projeção de concreto em “maquete” de madeira, simulando a aplicação industrial em fornos refrigerados com “staves” ou placas de refrigeração. O

desempenho dos robôs, a taxa de aplicação de material e o índice de rebote obtidos nesses testes a frio foram considerados satisfatórios.



a) Máquina de Bombear



b) Robô

**Figura 7** – Testes a frio de funcionamento dos robôs.

## 4.2 Aplicação de Concreto Robotizada por *Shotcrete*

A Tabela 6 apresenta o histórico de aplicação robotizada de concreto por *shotcrete* no Alto Forno 2 da CSN no período final da 2.<sup>a</sup> fase da campanha, 2006 - 2009. Na primeira aplicação, em setembro de 2006, apesar da elevada quantidade de concreto aplicado, 101 toneladas, houve uma série de problemas, que comprometeram o seu desempenho final:

- baixa taxa de aplicação (5,53 t/h): elevada frequência de parada das máquinas de bombeamento por obstrução dos filtros devido à utilização de óleo combustível contaminado com impurezas; e
- elevado índice de rebote (13,2%): máquina de bombear aditivo operando com ligação invertida, sucção, nas duas primeiras horas de aplicação e não execução da troca da lança do robô, mais curta, na região da Cuba Superior.

Com o avanço do processo de aprendizagem, o desempenho das aplicações seguintes foram cada vez melhores. Em julho de 2008, 4.<sup>a</sup> aplicação, os resultados atingidos foram comparáveis com os melhores obtidos mundialmente e ficaram compatíveis com a tecnologia utilizada: taxa de aplicação de 12,0 t/h e índice de rebote de 3,75%.

**Tabela 6** – Histórico de aplicação de concreto por *shotcrete* no alto forno 2 da CSN (período: 2006 – 2008)

Ano Mês	2006	2007		2008
	set.	ago.	out.	jul.
<b>Material Aplicado (t)</b>	101	60	36	102
<b>Taxa de Aplicação (t/h)</b>	5,53	7,50	6,00	12,00
<b>Índice de Rebote (%)</b>	13,02	6,74	6,40	3,75
<b>Abaixamento da carga (m)</b>	19	19	7	19
<b>Espessura do Material Aplicado:</b>				
Máxima	177	100	200	225
Média	74	71	118	142
Mínima	27	28	34	81

## 4.2 Monitoramento do Perfil de Desgaste

O Alto Forno # 2 da CSN opera normalmente com 12% de pelota na carga para prevenir a formação de cascão. Todavia, nos períodos de out. – dez. de 2007 e fev. – maio 2008, o forno operou sem pelota. Como consequência, houve um aumento na frequência de formação e remoção de carga inativa, aderida ao revestimento refratário. Isso acelerou a taxa de desgaste do revestimento. A Tabela VII mostra o efeito da ausência de pelota na carga do forno sobre a taxa de desgaste do revestimento refratário.

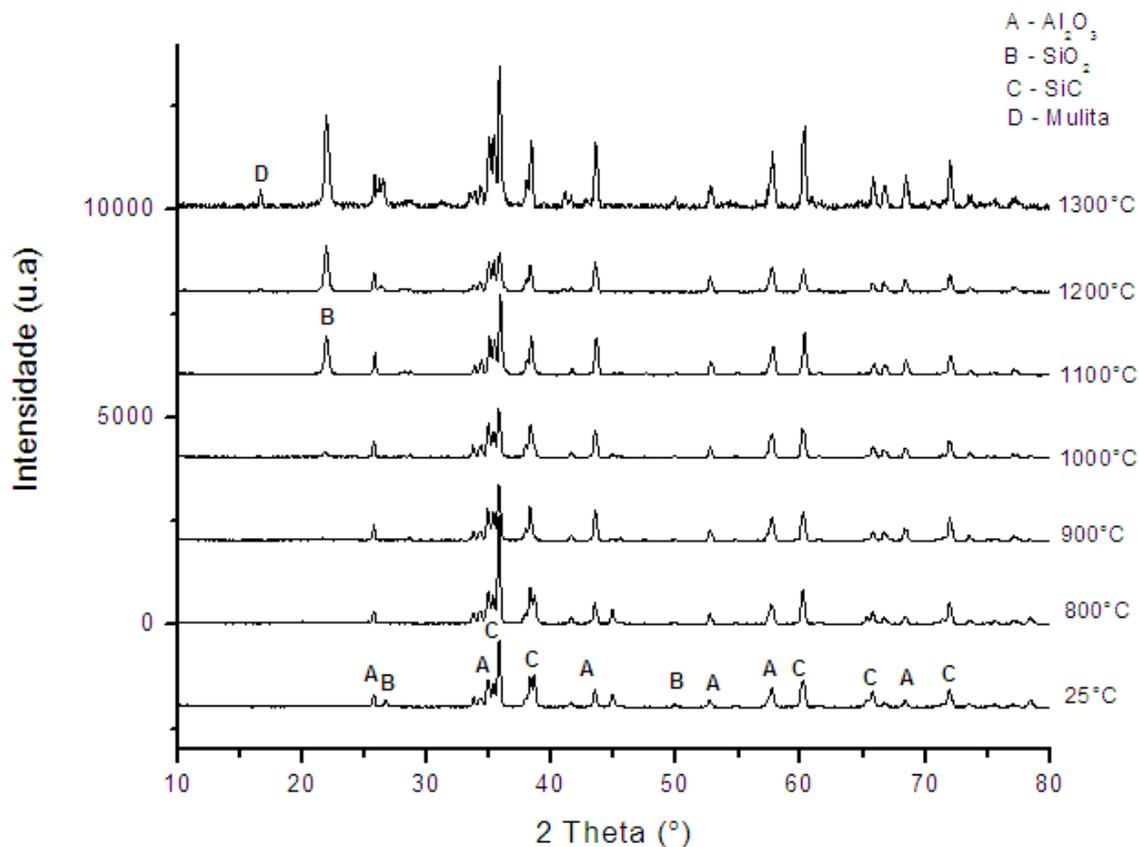
**Tabela 7** – Evolução da taxa de desgaste do revestimento refratário do alto forno # 2 (Período 2006 – 2008)

Impacto do uso de pelota	Período					
	set.06 ago.07	ago.07 out.07	out.07 dez.07	dez.07 fev.08	fev.08 maio 08	maio 08 jul.08
<b>Aplicação de Shotcrete</b>	Set.06	Ago.07	Out.07			Jul.08
<b>Tx. Desg. (mm/t gusa)x10<sup>-5</sup></b>	6,84		27,23	7,47	16,97	7,69
<b>Pelota na carga</b>	Sim		Não	Sim	Não	Sim

## 4.3 Formação de Alumina *in situ*

A Figura 8 mostra o difratograma de raios-x da mistura da fração super fina do concreto aplicado nas regiões das Cubas Inferior e Média com 12% de ligante e 1% do acelerador de pega, em peso, após tratamento térmico. A formação da mulita *in situ* ocorre apenas a temperaturas da ordem de 1.300°C. Esses resultados são confirmados por estudos realizados por Gerotto, Pileggi e Pandolfelli.<sup>(8)</sup> Como os álcalis e zinco são depositados no revestimento refratário dos Altos Fornos na isoterma ao redor de 800°C, então toda a sílica livre presente no material continuará disponível para as reações de ataque alcalino e zinco. Paradoxalmente, o material aplicado no Alto Forno # 2 da CSN apresentou um desempenho satisfatório, com campanha de cerca 12 meses. Isso pode ser explicado pelos seguintes fatos:

- a deposição e acumulação de álcalis e zinco no revestimento refratário dos Altos Fornos é um fenômeno de longo prazo; e
- a isoterma de 800°C desloca-se em direção à face fria, na direção do revestimento residual, à medida que avança o desgaste do material aplicado.



**Figura 8** – DR-X da mistura da fração super fina do concreto aplicado nas regiões das cubas inferior e média com 12% de ligante e 1% do acelerador de pega, em peso, após tratamento térmico.

#### 4.4 Estudo de Viabilidade Econômica

A Tabela 8 apresenta as premissas consideradas para efeito de comparação, do ponto de vista econômico, do emprego das tecnologias de *shotcrete* e *gunning* para prolongamento da campanha do Alto Forno # 2 da CSN. O valor presente líquido (VPL) resultante da diferença entre os fluxos de caixa das referidas tecnologias no período de 2004 – 2009 é de cerca de US\$ 870 mil, favorável à aplicação por “*shotcrete*”. A taxa de aplicação superior reduz consideravelmente as perdas de produção e, por conseguinte, o lucro cessante, principal componente na matriz de custo. Essa análise é especialmente válida para cenários de mercado aquecido.

**Tabela 8** – Premissas consideradas para efeito de comparação econômica das tecnologias de *shotcrete* e *gunning* para prolongamento da campanha do alto forno # 2 da CSN

Premissas	<i>Gunning</i>	<i>Shotcrete</i>
Desempenho do Material (meses)	6	12
Nº Aplicações de Material / ano	2	1
Quantidade de Material (t)	80 (2 x 40)	80 (1 x 80)
Taxa de Aplicação (t/h)	4	8

## 5 CONCLUSÃO

A implantação da tecnologia de *Shotcrete* para preservação do revestimento refratário do Alto Forno # 2 em substituição à técnica de *Gunning* robotizado foi viável técnica e economicamente:

- alta taxa de aplicação: 8 - 12 t/h;
- baixo índice de rebote: 3% - 5%;
- desempenho superior do material: 12 meses – 18 meses; e
- redução dos custos de manutenção refratária da ordem de US\$ 870 mil (VPL) no período 2004 - 2009.

A eliminação da adição de tambores sobre a carga de abafamento e o contato direto do rebote com o quartzito reduziram os riscos operacionais do retorno do forno à operação:

- eliminação da elevação da pressão do forno e arriamentos de carga;
- maior facilidade de escorificação do rebote; e
- eliminação da aplicação de “rolha” refratária e menor tempo de reparo.

## Agradecimentos

Agradecimento especial a todas as empresas envolvidas no desenvolvimento desse projeto, direta ou indiretamente, e às Gerências da CSN que contribuíram para o sucesso da sua implantação: Magneco-Metrel, USA, Calorisol, Gerência dos Altos Fornos, Gerência de Manutenção dos Altos Fornos, Gerência de Compra de Matérias Primas (GPS) e Gerência de Contratação de Serviços e Importação.

## REFERÊNCIAS

- 1 Silva, S. N. et al. Successful Reline and Start Up of CSN Blast Furnace # 2, p. 563 – 578, **1st International Meeting on Ironmaking, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, September 2001.
- 2 Spreij, M. et al. Quantitative Selection of Blast Furnace Hearth Refractories. **UNITECER '95**, p.167-175 (1995).
- 3 Rorick, F. C. et al. Ironmaking in North America. **3<sup>rd</sup> ICSTI**, Dusseldorf, Germany, June 2003.
- 4 Colloidal Silica vs. Cement Bonded Refractories. **Magneco-Metrel Inc.**, USA, January 2001.
- 5 B. Myhre, A.M. Hundere, Microstructure development in AlN(YF<sub>3</sub>) ceramics. In **Proceedings of 39th Int. Feuerfest-Koll**, Achen, Sep. 24-25 (1996)
- 6 A. J. Skoog, R. E. Moore, Refractory of the past for the future – Mullite and its use as a bonding phase. **Am. Cer. Soc. Bull.**, 67,7 (1988) 1180.
- 7 Silva, S. N. et al. Chemical Deposition of Titanium in Carbon-Containing Refractories of Blast Furnace Hearth to Prevent Corrosion. **Journal of the Technical Association of Refractories**, Japan, Vol. 27[1], 32 – 38 (2007).
- 8 M. V. Gerotto, R.G. Pileggi, V.C.Pandolfelli, Caracterização reológica de concretos refratários bombeáveis. **Cerâmica**, 46, 290 (2000)