

## AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PERFURAÇÃO DURANTE A VIDA DE UM ALTO-FORNO<sup>1</sup>

Júnio Augusto Rodrigues Pasqua<sup>2</sup>  
Josué George Drury<sup>3</sup>  
Paulo Santos Assis<sup>4</sup>

### Resumo

Durante o processo de redução de minério de ferro para produção de ferro-gusa os altos fornos são alvo de atividades constantes e altamente destrutivas na região do cadinho como alta temperatura, pressão da zona granular, de amolecimento e fusão e de combustão, bem como o ataque resultante das reações químicas necessárias ao processo produtivo. O refratário que compõe toda a região interna do cadinho é o bloco de carbono, esse material é o indicado para as situações acima mencionadas e que sofre ataques diretos. Uma avaliação adequada dos fatores responsáveis pela redução da vida útil deste refratário, fatores esses que acabam influenciando na vida útil do forno todo, pode gerar economia significativa, principal meta a ser alcançada pelas empresas. Uma boa ferramenta no acompanhamento da vida útil do cadinho é a modelagem matemática. Neste trabalho é feita uma avaliação da influência da perfuratriz na vida útil de um forno. Avalia-se seu impacto durante a abertura do alto forno assim pode-se estabelecer um padrão operacional a ser aplicado naquela região a fim de evitar que a boca do forno seja atingida por uma pressão desnecessária, fato que pode reduzir a vida útil do equipamento.

**Palavras-chave:** Alto forno; Cadinho; Bloco de carbono; Perfuração.

### EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DRILLING IN THE LIFETIME OF A BLAST FURNACE

#### Abstract

During the process of reduction of iron ore to pig iron the blast furnaces are targets of constant and highly destructive activities in the region of the crucible, as high temperature, pressure of the granular zone, softening and fusion zone and combustion zone as well as chemical attack resulting from chemical reactions necessary for the production process. The refractory that comprises all the entire region of the crucible is the carbon block, the most appropriate material for the above mentioned situations and that suffers direct attacks. An appropriate evaluation of the factors responsible for reducing the lifetime of the refractory, factors that ultimately influence the whole life of the furnace, can produce significant economy, goal relentlessly searched by companies since the early history of metallurgy. In this work we will evaluate the influence of drilling in the lifetime of a crucible, evaluate its impact while opening of the furnace in that region, this way we can establish a standard of pressure being applied in the region of the hole of pig in order to avoid that the mouth of the furnace won't achieved by drilling with a very high pressure that might damage the same, which may cause decrease in time of a blast furnace campaign.

**Key words:** Blast furnace; Crucible; Carbon block; Drilling.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM e AIST, Graduando em Engenharia Metalúrgica, Diretor de Projetos do Chapter School of Mines, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Prof. Dr. Titular, Escola de Minas, Redemat e Pesquisador do CNPq UFOP, MG, Brasil; Prof. Honorário, Universidade de HUST, China; Membro da ABM; Membro do Conselho da EcoEnviroX Ltd.

## 1 INTRODUÇÃO

Durante a campanha de um alto-forno, um dos principais objetivos a serem alcançados é que esse dure o máximo de tempo possível. Cada vez mais empresas buscam campanhas mais longas e com o menor número possível de paradas para manutenção. As empresas que conseguem alcançar esses objetivos se orgulham e são tidas como exemplo para outras. As campanhas de altos fornos, atualmente, duram em média 27 anos,<sup>(1)</sup> obviamente, com espaço para exceções de tempos de campanhas que duraram muito além do que os próprios fabricantes de fornos sonhavam estimar. Vários são os fatores que influenciam na estimativa de vida e de prolongamento da vida de um alto forno. A Figura 1 ilustra um esquema que mostra alguns fatores de extrema importância na vida útil do redutor. Nela fica clara a importância tanto da abertura do forno quanto do seu tamponamento no bom andamento das atividades do equipamento. Os danos causados pelo mau acompanhamento dos parâmetros relacionados à abertura e ao fechamento do forno podem provocar paradas emergências de manutenção do forno e quanto mais grave for o problema mais tempo o forno pode ficar em manutenção e quanto mais tempo em manutenção mais prejuízo a empresa tem.

A falta de preocupação com a influência da perfuratriz no refratário da boca do forno é prática comum em siderúrgicas. Um acompanhamento voltado para a influência da perfuratriz na vida útil do forno pode ser uma ferramenta a mais para se garantir o cumprimento das metas de campanha do reator, ou talvez até ajudar no prolongamento de campanhas.

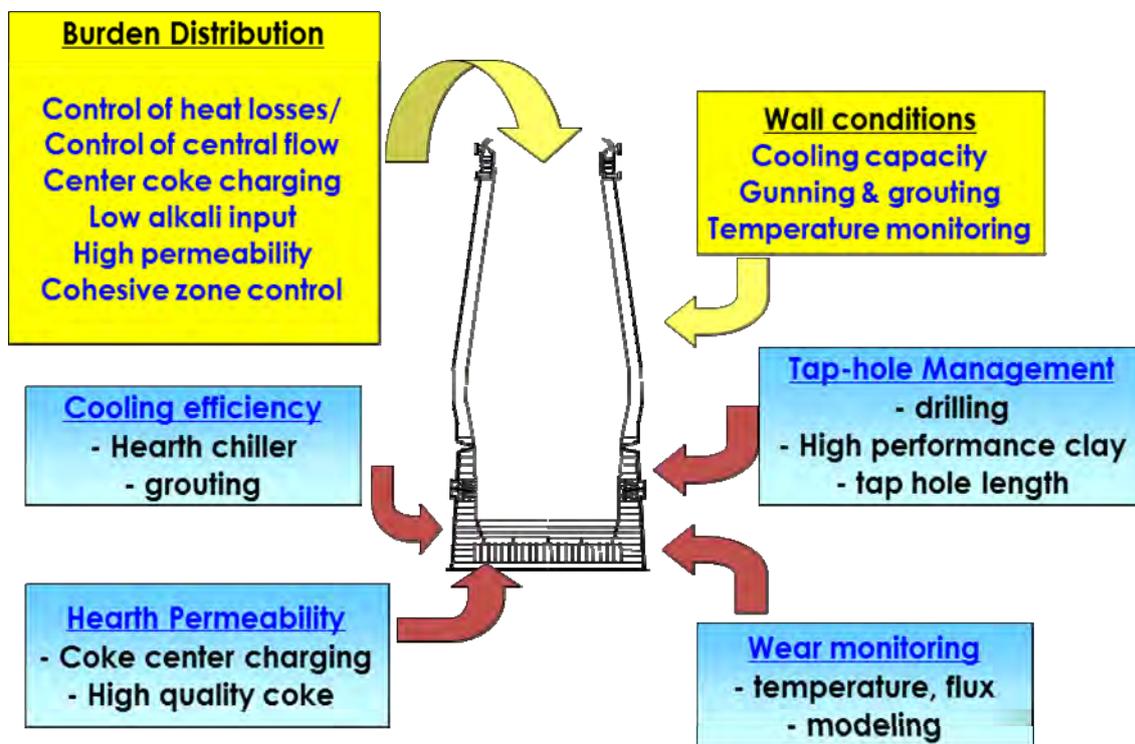


Figura 1. Conceitos para prolongamento da vida de campanha.<sup>(1)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As novas tecnologias de troca térmica como *staves* ou melhorias nas tecnologias já existentes proporcionam aumento significativo na vida útil do forno. Com isso a

região que, sem dúvida, passou a responder diretamente pelo tempo de operação de um alto forno foi o cadinho, pois é nessa região que o redutor tem sua etapa mais agressiva. O cadinho é feito de carbono que é o material mais adequado para as condições agressivas que são comuns a essa região.<sup>(2)</sup> A Tabela 1 mostra propriedades dos materiais refratários do cadinho de um alto-forno.

**Tabela 1.** Propriedades de alguns materiais do cadinho<sup>(3)</sup>

Classificação do produto	Temperatura de queima °C	Partículas	Ligante
Carbono	800-1400	carbono	Carbono
Carbono prensado a quente	< 1000	carbono	Carbono
Grafita	2400-3000	grafita	Grafita
Semi-grafita	800 – 1400	grafita	Grafita
Semi-grafita prensada a quente	< 1000	grafita	Carbono
Semi-grafitizado	1600-2000	Carbono semi-grafitizado	Carbono semi-grafitizado

Por outro lado a Tabela 2 mostra o avanço na melhoria das propriedades do bloco de carbono do cadinho.

**Tabela 2.** Avanço da qualidade das propriedades do bloco de carbono através dos anos<sup>(3)</sup>

Bloco de carbono	BC-5	CBD-1	CBD-2	CBD-2RG	CBD-3RG	CBD-GT1
Ano de Desenvolvimento	1965	1975	1981	1985	1994	2001
Densidade aparente	1,56	1,58	1,59	1,71	1,76	1,96
Resistência de compressão (MPa)	40,5	43,0	45,1	66,9	63,0	76,2
Condutividade Térmica (W/m k)	17,1	13,2	13,8	23,3	33,3	37,0
Poros com diâmetro maior que 1µm	16%	11%	2,7%	1%	0,2%	0,15%
Índice de resistência à corrosão	100	140	140	170	250	500

Cada região do cadinho tem um comportamento diferente, têm-se temperaturas mais amenas no centro do homem morto e na região oposta ao furo de corrida; têm-se altas velocidades do banho na região do furo de gusa; onde altos índices de corrosão na região de encontro das paredes internas do cadinho com a soleira podem ser observados, entre outras diferenças. Por isso é necessário utilizar material refratário de carbono com algumas características específicas em cada parte do cadinho. A Figura 2 mostra modelos típicos de montagem de um cadinho.

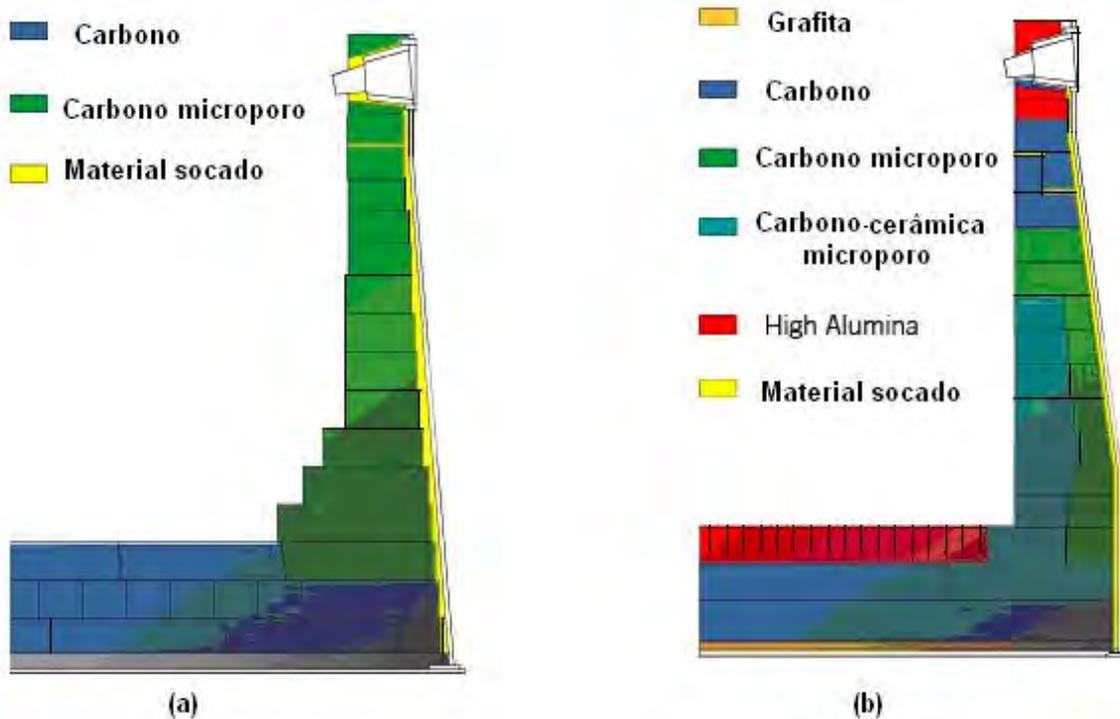


Figura 2. Construções típicas do revestimento refratário do cadinho de um alto-forno.<sup>(3)</sup>

Existem também características que são específicas para cada forno, pois estes possuem comportamentos particulares (Figura 3).

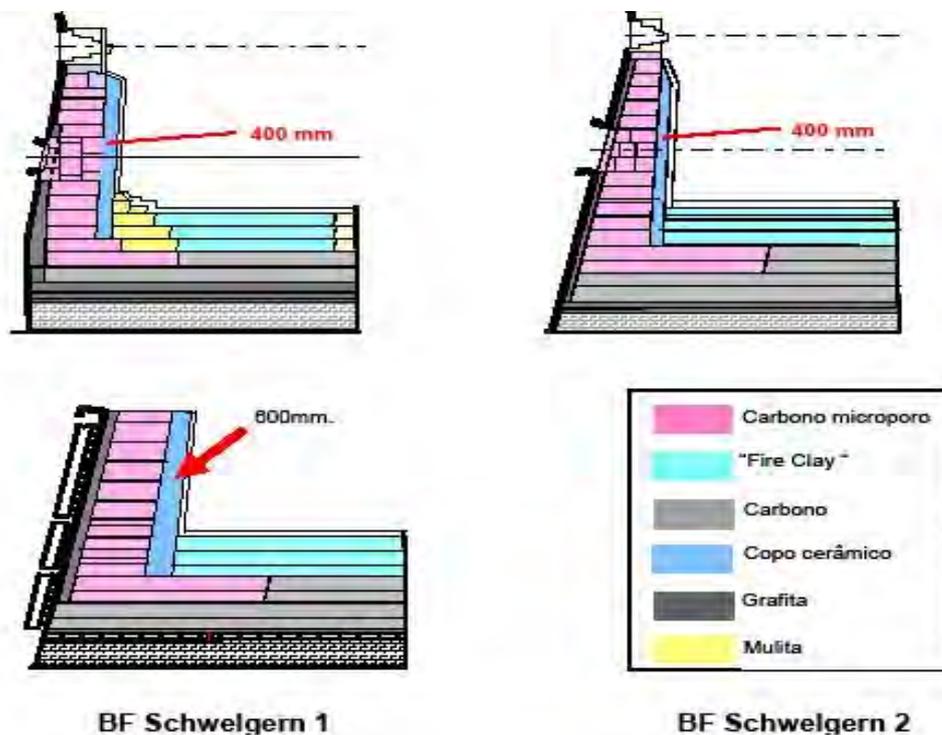


Figura 3. Mudanças no projeto do cadinho dos altos-fornos da Thyssen segundo Ruther et al.<sup>(3)</sup>

Devido ao seu papel fundamental na vida útil do forno é preciso fazer um monitoramento criterioso para minimizar ao máximo a ação de agentes nocivos ao cadinho. Caso não haja um acompanhamento criterioso sobre as agressões sofridas

no cadinho para minimizá-las, essas reduzirão drasticamente a vida útil do refratário do cadinho e, conseqüentemente, do forno.

Dentre as agressões que são mais nocivas a vida útil de um cadinho tem-se aquelas provocadas pelas altas temperaturas que dominam essa região.

- Já no início do cadinho tem-se a zona de combustão, onde ocorre o contato direto de carbono proveniente do carvão vegetal ou coque com oxigênio que provem do ar injetado pelas ventaneiras, criando assim um ambiente de altas temperaturas bem próximo à região de acúmulo de gusa e escória. As altas temperaturas juntamente com os movimentos constantes de gusa, escória, gases e carvão que ocorrem no cadinho provocam erosões e corrosões no material refratário de carbono (Figura 4).

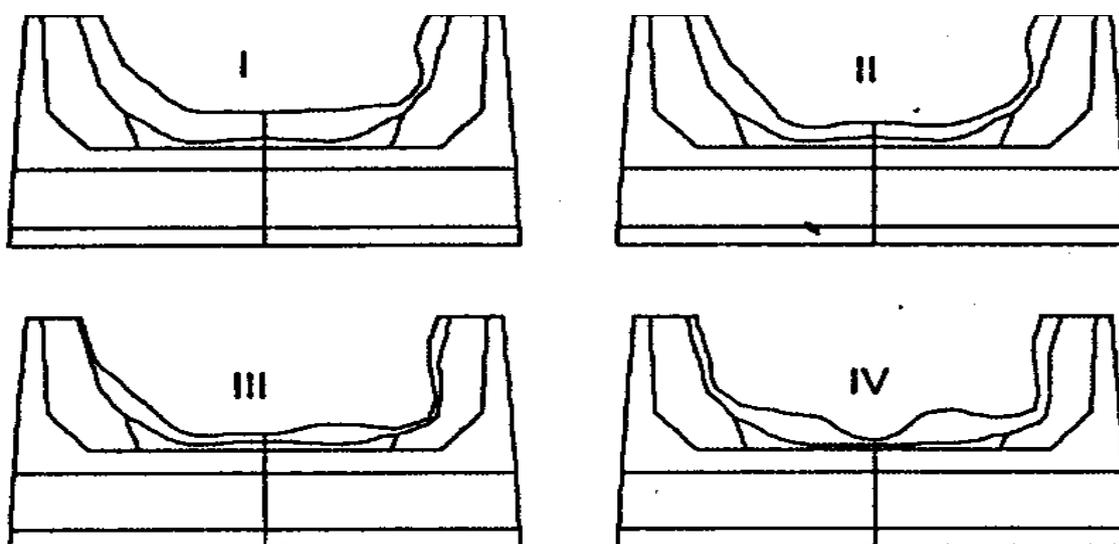


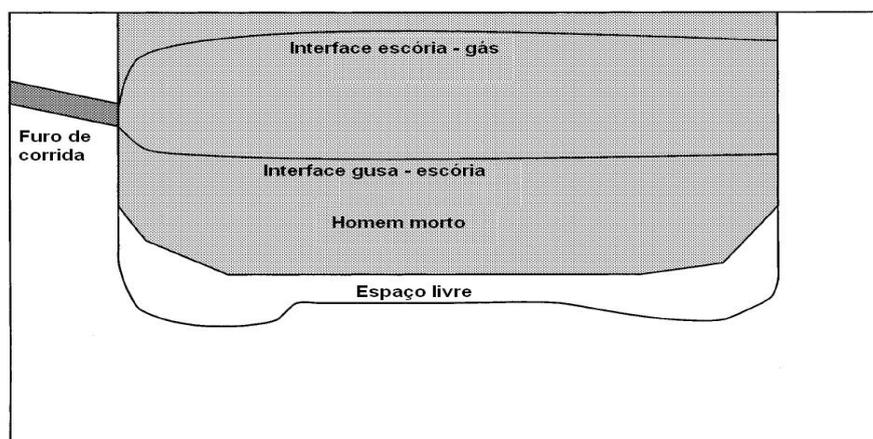
Figura 4. Perfis de erosão e crescimento de agregação no cadinho por um período de 15 dias.<sup>(4)</sup>

Os álcalis também são grandes inimigos dos materiais refratários, tanto na região do cadinho quanto nas regiões acima das ventaneiras. Quando os gases contendo álcalis entram em contato com o material refratário provocam danos que podem ser irreparáveis, o local onde ocorre o ataque é reduzido a um espaço vazio, pois o refratário que existia ali é transformado em pó. Os álcalis mais comuns ao processo de redução de minério de ferro em altos fornos são o  $K_2O$  e o  $Na_2O$ . Eles são responsáveis por provocar desgastes prematuros nos refratários da parede do forno (cuba, ventre e rampa), bem como no cadinho, além de provocar aumento no aparecimento de cascões, o que leva a disritmia na “marcha” do forno. Acúmulo de álcalis no fundo do cadinho causa o aparecimento de trincas, essas trincas podem ser preenchidas por gusa provocando o deslocamento desses blocos refratários ou também facilitando o contato do material refratário de carbono com outros elementos (enxofre e zinco, por exemplo) que circulam pelo cadinho na forma de gases igualmente prejudiciais a essa região. Essas trincas também podem ser preenchidas por escória que em contato direto com o bloco de carbono provocam danos terríveis a este material refratário, devido às reações químicas que ocorrem durante esse contato. A Figura 5 mostra os efeitos da ação dos álcalis.



**Figura 5.** Efeito da degradação de componente do cadinho por ação de álcalis.<sup>(2)</sup>

A carga que é suportada pelo material refratário de carbono provoca uma elevada pressão neste material. Essa pressão juntamente com o movimento circular do banho durante a abertura e fechamento do forno causam desgastes graves e irreparáveis ao material refratário de carbono do cadinho. O tipo de desgaste mais comum na região do cadinho do alto forno é a “pata-de-elefante”, este desgaste é causado pela erosão e pressão das cargas que são sustentadas. Esse tipo de desgaste deteriora a região de encontro do fundo do cadinho com a parede e a região central do cadinho. O movimento do gusa que gera o desgaste nessas regiões também provoca desgaste na boca do forno, pois esse movimento circular é mais veloz na região do furo de corrida, provocando assim mais erosão nessa região que em outros lugares. A Figura 6 mostra o desgaste do tipo pata-de-elefante.



**Figura 6.** Níveis de escória e de gusa no cadinho, explicitando a zona livre de coque sob a base do homem morto e o desgaste tipo pata-de-elefante.<sup>(3)</sup>

Existem diversos outros agentes responsáveis por reduzir o tempo de uso do material refratário do cadinho, como o movimento de subida e descida do homem morto (assentado ou flutuante) durante a abertura e fechamento do forno e o movimento circular do banho durante a drenagem do cadinho, que é provocado pela impossibilidade de passagem deste banho pelo centro do homem morto. Estes agentes, além de provocar desgastes na base interna do cadinho, também têm seus efeitos na região do furo de corrida. No entanto, o furo de corrida sofre ações degenerativas que são exclusivas dessa parte do forno. Durante a drenagem do forno, o furo de gusa é a região onde o banho metálico tem maior velocidade,

conseqüentemente a agressão desse movimento é mais sofrida ali. A irregularidade na descida da carga do forno, provocada por queda de cascões, problemas de carregamento, alta concentração de finos ou baixa permeabilidade, pode desestruturar o banho metálico causando aumento do aparecimento de gases, esses gases ao sair do forno provocam elevações anormais da temperatura do furo de corrida.

Outro grande responsável pela queda na vida útil do furo de gusa é a perfuratriz. Esse equipamento é usado para desobstruir a boca do forno e possibilitar a saída do gusa e da escória que foram acumulados no cadinho durante um determinado tempo.

Esse trabalho pretende avaliar o impacto da atuação da perfuratriz no refratário que se encontra na região do furo de gusa, durante a abertura do alto forno. Assim será possível verificar se as especificações utilizadas pela perfuratriz na abertura do furo de corrida estão de acordo ou se a pressão utilizada para abrir o forno esta provocando uma deterioração desnecessária na boca do forno, causando, por conseguinte redução na vida útil do material refratário dessa região.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A perfuratriz citada neste trabalho é um equipamento pneumático, semi-hidráulico ou hidráulico que possui uma broca acoplada a ele, a qual entra em contato com a massa de tamponamento que obstrui o furo de corrida. As Figuras 7 e 8 mostram imagens de perfuratriz e brocas usadas na desobstrução do furo de gusa.



**Figura 7.** Imagem Perfuratriz.<sup>(5)</sup>



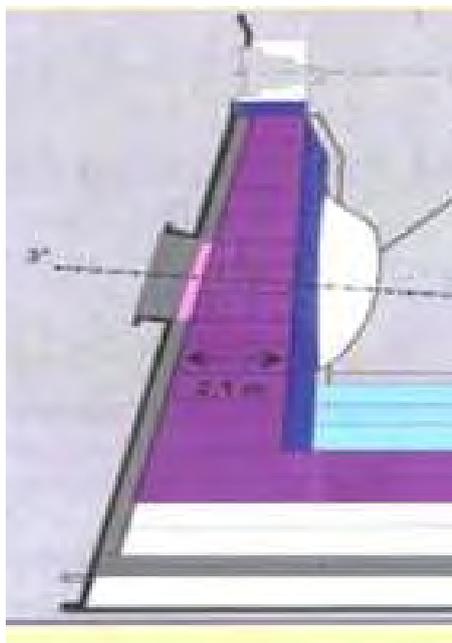
**Figura 8.** Imagem brocas utilizadas na perfuratriz.<sup>(5)</sup>

O tamanho da broca utilizada depende de dois fatores fundamentais: o primeiro é o comprimento do bloco de carbono que compõe a parede do forno naquela região e o segundo é a quantidade de massa de tamponamento injetada durante o fechamento do forno.

Quando o nível de gusa e escória, dentro do forno, chega a um patamar satisfatório a perfuratriz que se encontra em um ponto fixo próximo ao forno é acionada. A broca que está presa ao encaixe da perfuratriz se encontra com a mesma inclinação do furo de gusa.

A perfuratriz é rotacionada sobre seu eixo até a ponta da broca chegar à posição exata de encontro com o furo de gusa, em seguida, o equipamento recebe o comando e promove batimentos seguidos no furo até completar todo processo de perfuração da massa de tamponamento ocasionando assim o vazamento do líquido acumulado dentro do reator.

A massa de tamponamento é um material refratário utilizado exclusivamente para preencher a boca do forno após o fim da corrida, o procedimento é feito por um equipamento chamado canhão de tamponamento. Essa massa quando injetada forma uma camada protetora no furo de gusa chamada cogumelo. O cogumelo influencia na produtividade do forno, proporcionando segurança e estabilidade na operação do mesmo, além de proteger o cadinho, dentre outros benefícios. A Figura 9 mostra o cogumelo formado pela injeção de massa de tamponamento.



**Figura 9.** Cogumelo formado pela injeção de massa de tamponamento.<sup>(5)</sup>

A pressão exercida pela perfuratriz deve ser suficiente para vencer a rigidez do material que é perfurado juntamente com a pressão interna do forno. No entanto, não são somente esses dois fatores que determinam a pressão a ser utilizada pela perfuratriz na abertura do forno. Existem outros parâmetros que levam a variações na pressão dentro do forno e também levam a variações na resistência do material do furo de gusa, esses são chamados parâmetros operacionais. As atividades durante o fechamento de corrida anterior também são fundamentais para que a abertura seguinte ocorra sem excessos com relação à atuação da perfuratriz. Um bom exemplo é o esgotamento do forno: caso seja feito um mau esgotamento na corrida anterior, os efeitos negativos que esse mau procedimento possa vir a causar serão sentidos na próxima abertura de corrida. Na Figura 10 temos a variação volumétrica da massa de tamponamento de acordo com o aumento da temperatura.

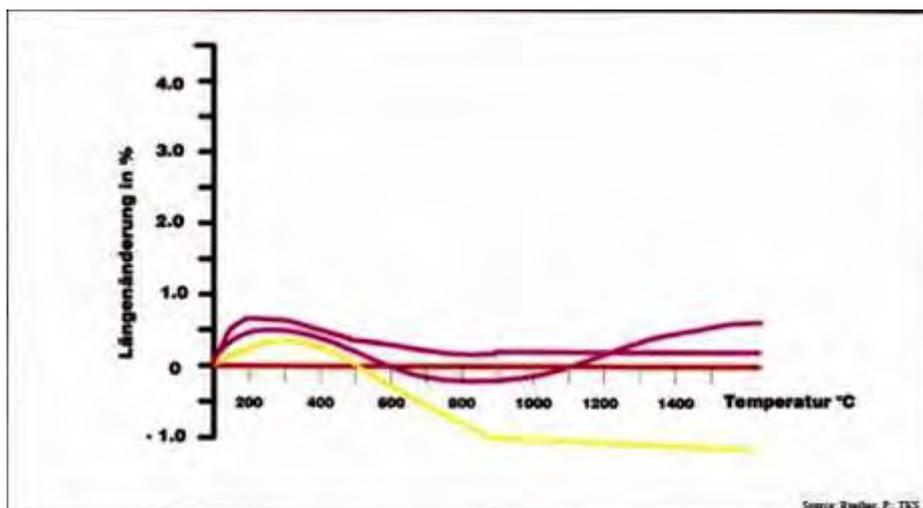


Figura 10. Massa de Tamponamento Estabilidade Volumétrica X temperatura.<sup>(5)</sup>

Durante a abertura do alto forno a pressão necessária para desobstruir um furo de gusa pode se modificar devido às variações comportamentais do bloco de carbono que envolve o furo de corrida e variações na massa de tamponamento que veda esse orifício. Essas variações podem ser causadas por diversos fatores operacionais, como mau esgotamento do forno, falta de permeabilidade, entre outros.

Um fator que pode ser usado como exemplo das possíveis alterações que ocorrem nos materiais refratários é a variação de temperatura do forno: dependendo do material refratário que se usa para tamponar o forno, uma maior variação da temperatura do banho metálico leva a variações volumétricas da massa de tamponamento, com isso pode ocorrer que a pressão usada como padrão para abertura do forno seja excessiva ou talvez ela seja baixa para o grau de instabilidade vivido no cadinho naquele momento.

Já a Figura 11 faz um comparativo das propriedades da massa de tamponamento com a dificuldade de furação da mesma na abertura do forno.

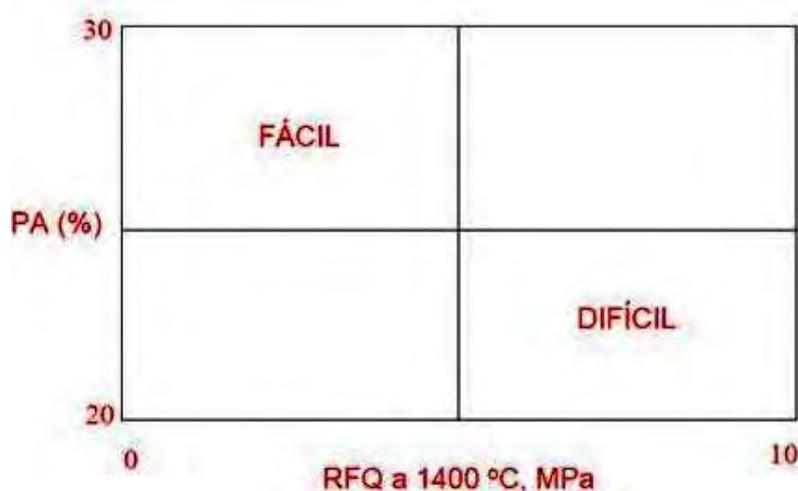
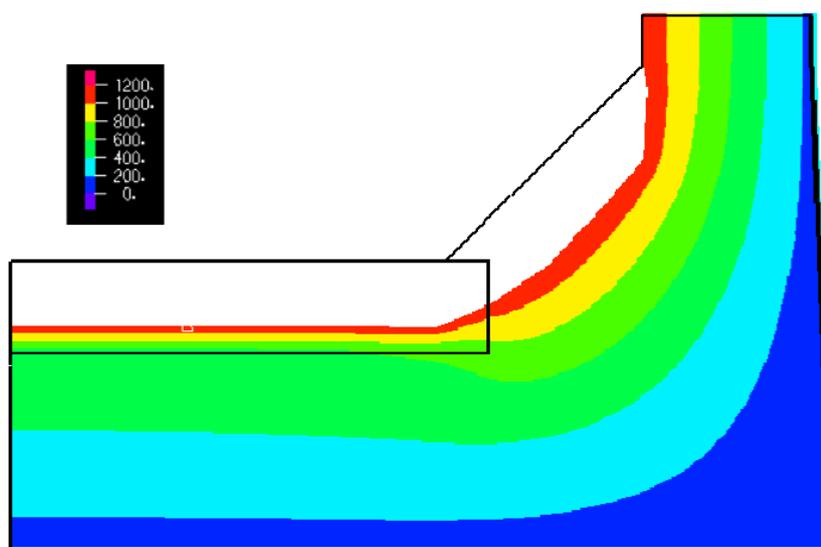


Figura 11. Dificuldade de Furação x Propriedades da Massa de Tamponamento.<sup>(5)</sup>

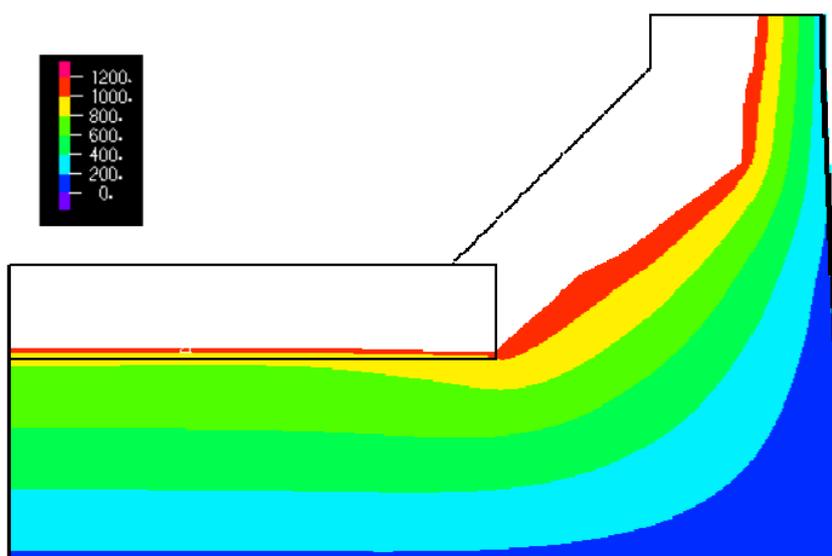
Com uma avaliação prévia dos tipos de variáveis que influenciam na qualidade da abertura do forno, tem-se uma ferramenta a mais com a finalidade de aumentar a vida útil da região do cadinho e, conseqüentemente, de todo o alto forno.

Fazendo um levantamento de quais são os parâmetros operacionais que mais influenciam na vida do refratário da boca do forno é possível que se tenha um padrão de acompanhamento dos sintomas negativos que podem vir a gerar danos na região do furo de gusa.

Assim como se faz necessária uma simulação computacional utilizando os parâmetros operacionais do forno para realizar o furo da salamandra no fim de uma campanha, um tipo de avaliação parecido seria interessante para verificar a real necessidade do forno quanto à pressão da perfuratriz na abertura do mesmo. Abaixo temos duas imagens mostrando a avaliação computacional do desgaste no cadinho. Esse método é chamado de avaliação indireta do perfil de desgaste, ou seja, não se faz necessária nenhuma intervenção física no cadinho para se estimar a situação dentro do mesmo.



**Figura 12.** Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3 do forno da Gerdau Açominas no ano de 1997.<sup>(6)</sup>



**Figura 13.** Perfil de temperatura na direção do furo de gusa 3.<sup>(6)</sup>

As empresas siderúrgicas não se preocupam com esses parâmetros durante a abertura de uma corrida, isso se comprova pelo fato delas não possuem variação de pressão da perfuratriz na abertura do forno. As perfuratrizes utilizadas por essas

empresas trabalham com um valor fixo de pressão durante toda a campanha do forno.

#### **4 CONCLUSÃO**

Com o trabalho realizado conclui-se que é preciso realizar uma avaliação criteriosa nas condições operacionais que podem influenciar durante a abertura do forno, como temperatura do banho, tamanho do traço de injeção de massa de tamponamento, irregularidades na descida da carga durante a redução do minério de ferro (fato que pode levar ao aumento de gases na boca do forno). Assim tem-se uma ideia do comportamento do forno durante a abertura do furo e pode-se atuar sobre perfuratriz a fim de que essa aplique a pressão necessária e adequada para a abertura do furo de corrida. Um modelo computacional de desgaste na boca do forno pode ser uma ferramenta importante na busca por uma região de furo de gusa com a maior vida útil possível.

#### **Agradecimentos**

Agradecemos a Deus pelas oportunidades e guiar nosso caminho. Aos membros do Chapter School of Mines - UFOP, aos engenheiros Cristhian Luis Gomes (Gerda Barão de Cocais), Guilherme Augusto de Faria e Raimundo Antero da Silva Junior (Usiminas - Ipatinga) pela ajuda durante a preparação deste artigo, bem como a Escola de Minas – UFOP.

#### **REFERÊNCIAS**

- 1 ASSIS, P.S. Notas de aula Siderurgia, 2012.
- 2 FRASER, B., CUMMINS, J., BROWN, G & DWIGHT, R. In-Service Performance of Micropore Carbon at Newcastle BF 3 , AISTech 2004 Proceedings - Volume I, p. 57-58
- 3 SILVA, I.A.; SILVA, C.A. Uma Análise sobre a Fenomenologia e os Mecanismos de Desgaste do Cadinho de um Alto-forno, Material didático, set. 2008.
- 4 TORRKULLA, J & SAXEN, H - Model of the State of the Blast Furnace Hearth ISIJ International, Vol. 40 (2000), No. 5, pp. 438–447.
- 5 DUARTE, A.K. Treinamento ala de corrida de altos fornos, 2011.
- 6 BASTOS, H. G. L. Modelo Multidimensional de Avaliação do Desgaste de Cadinho de Alto-forno. Dissertação de Mestrado UFMG. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, dez. 2007. p. 138.