

INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE GAS E SUAS INFLUÊNCIAS SOBRE O CONTROLE DE ESCOAMENTO DE LÍQUIDOS NOS ALTOS FORNOS DA TKCSA*

André Wulff Hirano¹
Bruno Pinheiro da Silva²
Fernando Kaoru Fujihara³

Resumo

Os Altos Fornos da ThyssenKrupp CSA em sua classe acima 3000 m³ de volume útil têm uma configuração de perfil diferenciada, o que impõe diferente compreensão sobre a condição do cadinho. Desse modo, o fluxo de líquidos no cadinho tem grande influência sobre fenômenos de transporte e flutuações na descida de carga. Assim, o escoamento não convencional deve ser avaliado, a fim de controlar a temperatura e desgaste. A compreensão destes efeitos é muito importante para o desempenho do Alto Forno e sua vida útil. Por isso, foram tomadas medidas para mudar a filosofia de distribuição de carga com um foco no controle do fluxo periférico. Este artigo apresenta uma revisão dos fenômenos do cadinho e os resultados observados nos Altos Fornos da TKCSA.

Palavras-chave: Fenômeno de cadinho; Escoamento; Distribuição de carga.

INFLUENCE OF GAS FLOW DISTRIBUTION AS AN APPROACH TO THE BLAST FURNACE HEARTH PHENOMENA

Abstract

ThyssenKrupp CSA Blast Furnaces are 3000m³ class furnaces that have an unique profile configuration, which imposes different understandings of hearth conditions. Thereby liquid flow in the hearth has great influence on transport phenomena and fluctuations on the burden descent. Thus, unusual flow should be evaluated in order to control temperatures and wear. The understanding of these effects is very important to the BF performance and life span. Therefore, measures to change the philosophy of burden distribution were taken with a focus on control of peripheral flow. This paper shows a brief hearth phenomena review and the results noticed at TKCSA's Blast Furnaces.

Keywords: Hearth phenomena; Drainage; Burden distribution.

¹ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processo, Unidade Técnica da Redução, TKCSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduando em Engenharia química, Unidade Técnica da Redução, TKCSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Especialista de Processo, Fergus Consult, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Sendo um reator em contra corrente, a eficiência do processo de um Alto Forno é bastante influenciada pelo padrão de fluxo de gás, o qual é ditado pelo perfil de carga. O desempenho das reações de redução do minério de ferro em gusa é definido pela abrangência das trocas térmica entre o gás redutor e as camadas de minério, dependendo também da distribuição do fluxo de gás ao longo do leito. Assim, o controle da distribuição de carga é um dos mais importantes recursos para otimizar os fenômenos de transporte dentro do reator e, levando a grande impacto nos resultados operacionais, tais como: produtividade, consumo de combustíveis e estabilidade de operação [1].

Os mecanismos físicos que governam o escoamento de líquidos no cadinho têm sido identificados, em trabalhos anteriores, referindo-se que gusa e escória escoam simultaneamente através da coluna de coque no cadinho durante o processo de drenagem. Porém, estudos também consideram que ocorre a influencia da vazão de gás saindo da zona de combustão, no formato da superfície de escória que varia em função do nível médio de líquidos, conforme figura 1 [2].

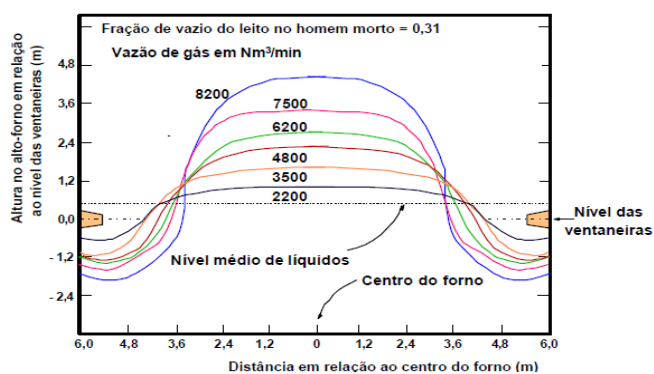


Figura 1. Efeito da vazão de gás que sai da zona de combustão sobre os níveis de escória ao longo do raio do forno, segundo Hatano *et al.*, citado por Figueira *et al.*

O fluxo gasoso em um leito é, na prática, não uniforme e seus efeitos em variações localizadas levam a distúrbios na permeabilidade, perda térmica e qualidade do gusa. Conforme a experiência de muitos, as flutuações de processo no Alto Forno podem ser explicadas pelo acúmulo de líquidos no cadinho. Este por sua vez, tem um papel crucial uma vez que pode determinar a condição de desgaste do refratário e, conseqüentemente, decisivo para a campanha do forno.

Por outro lado, um excessivo acúmulo de cascão ou “sujeira” nas paredes e fundo do cadinho pode reduzir o volume efetivo, limitando desse modo as possibilidades de se manter uma elevada produtividade. E, além disso, pode conduzir a distúrbios nas linhas de fluxo de líquidos e se configurar como potencial causa de instabilidades de processo [3].

Referindo-se ao interior do cadinho, abaixo da zona de amolecimento e fusão, a única carga sólida existente é o coque. Na zona de gotejamento, o coque se move para ser queimado em frente às ventaneiras sendo assim denominada zona de coque ativo. Ocupando a parte mais central, abaixo da zona de coque ativo, encontra-se a zona de coque estagnante, que praticamente não reage e que confere permeabilidade ao fluxo de líquidos. Nesta região o coque é denominado de *deadman* (ou homem morto). Caso o *deadman* perca sua atividade ou fique com baixa permeabilidade, isso ocasiona conseqüências como descida de carga irregular, má qualidade do gusa ou mesmo um desgaste localizado no cadinho.

A identificação de *deadman* inativo pode ser rastreado em função de sintomas como: temperaturas do fundo em queda e parede em elevação, potencial de oxigênio em elevação, deficiência na dessulfuração do gusa, carbono do gusa, impactos no escoamento de escória, encurtamento do furo de gusa e instabilidade no controle térmico do forno [3].

Trabalhos publicados sobre maneiras de monitorar as condições do cadinho sugerem o índice DCI (*Deadman Cleanliness Index*) [4]. Trata-se de um indicador que pelos estudos do autor sugere avaliar as condições do empilhamento de coque do *deadman*. O grau de carbono saturado no gusa é a principal variável de entrada do índice e refletiria a magnitude de interação entre o metal e o carbono dentro da camada de coque do *deadman*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os Altos Fornos da CSA possuem 3284 m³ de volume interno com “sump” de 283m³. Com capacidade de produção de 7500 t/d possui 32 ventaneiras para sopro de 4900 Nm³/min a 5,0% de enriquecimento de O₂ e 1200° C de temperatura. Com 12 m de diâmetro de cadinho, possui 2 furos de gusa com 6 ° de inclinação. A figura 2 mostra a configuração do cadinho.

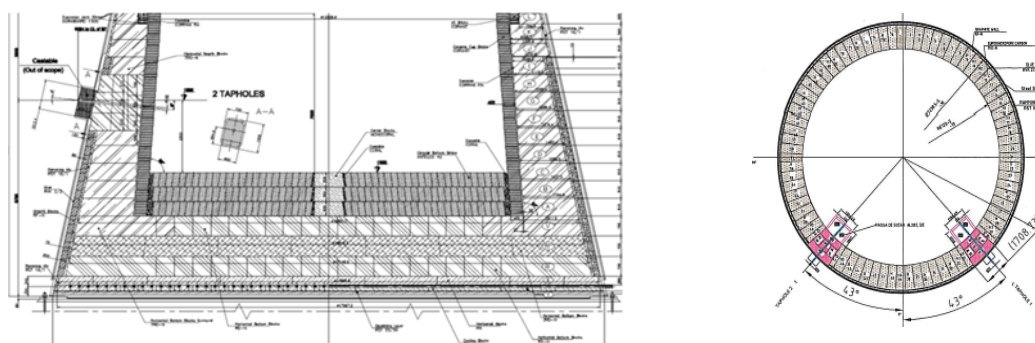


Figura 2. Projeto do Cadinho do Alto Forno da TKCSA

O uso de apenas uma casa de corridas leva a comportamentos característicos de escoamento, como será descrito adiante.

2.1 Evolução da Distribuição de Carga

Ao longo de 5 anos de operação dos fornos da CSA, a estrutura de distribuição de carga passou por uma série de etapas e fases de aprendizado. Até meados de 2013, a incidência de eventos de empenamento de ventaneiras ocorria com considerável frequência. Sendo assim, de forma gradativa buscou-se a reformulação na estrutura do perfil de carga a partir da necessidade de amenizar as variações de nível térmico, buscando melhor aproveitamento gasoso e elevação de produção. O foco se orientou na direção de elevar a marcha periférica (figura 3), acreditando-se que o abafamento da marcha periférica acarretava em um abaixamento excessivo da raiz da zona de coesão. Assim, por tal fato levando a instabilidades do gás nas proximidades da cuba inferior do forno, bem como ocorrências de inclinação de ventaneiras. Ou seja, o princípio foi a liberação controlada do fluxo gasoso, visando obter melhor rendimento de gás e menos escapes na carga térmica.

Observe-se que apesar do aumento da marcha periférica não ocorre um aumento correspondente da carga térmica ou das temperaturas dos *staves*, o que é facilmente explicado pelo fato de ocorrer uma estabilização, levando a uma redução dos 'picos e conseqüentemente à redução do valor médio das temperaturas na parede do forno.

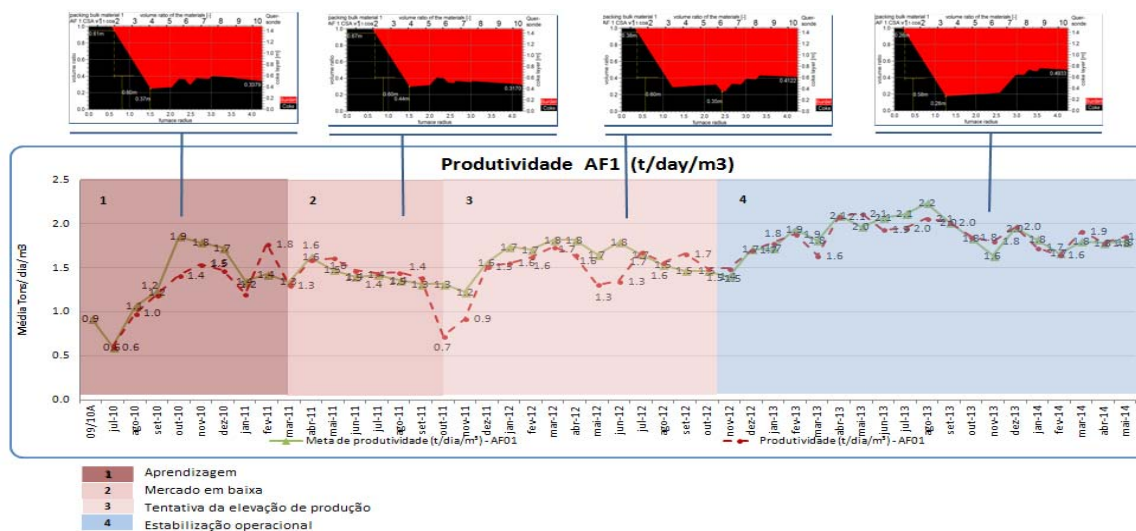


Figura 3. Curva de elevação de produtividade desde o início de operação do AF01 e evolução da distribuição de carga.

As temperaturas do cadinho apresentam comportamentos característicos associados a movimentos específicos dos líquidos no seu interior. A temperatura em determinado ponto (fundo ou lateral) está diretamente ligado ao fluxo térmico que lhe atinge. Assim, supõe-se que o aumento de produtividade do Alto Forno irá elevar as temperaturas de um modo geral, que pode ser claramente observado.

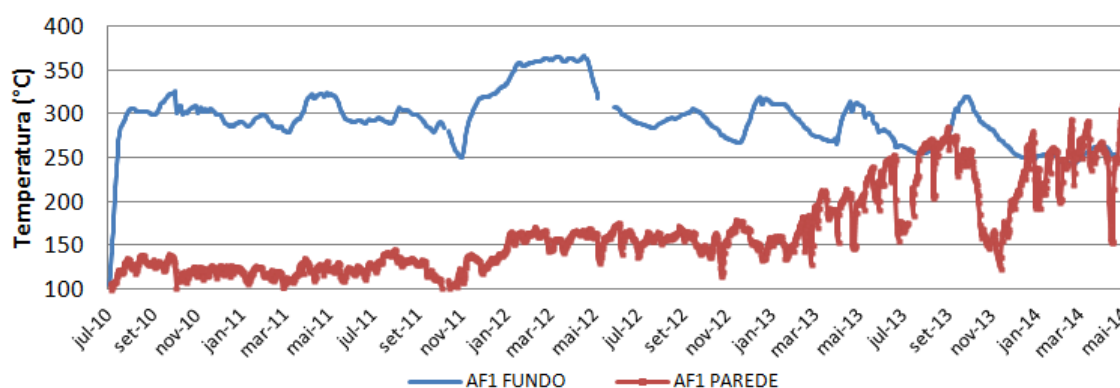


Figura 4. Curva de evolução das temperaturas do cadinho desde o início de operação do AF01

Por outro lado essa regra não é tão fielmente seguida, havendo ocasiões que as temperaturas se mostram independentes: fundo x paredes x produtividade, conforme observado na figura 4. A elevação da produtividade associa-se a uma elevação da temperatura da parede, com o fundo mantendo modesta oscilação. Imagina-se que essa elevação esteja associada ao desgaste do *ceramic cup*.

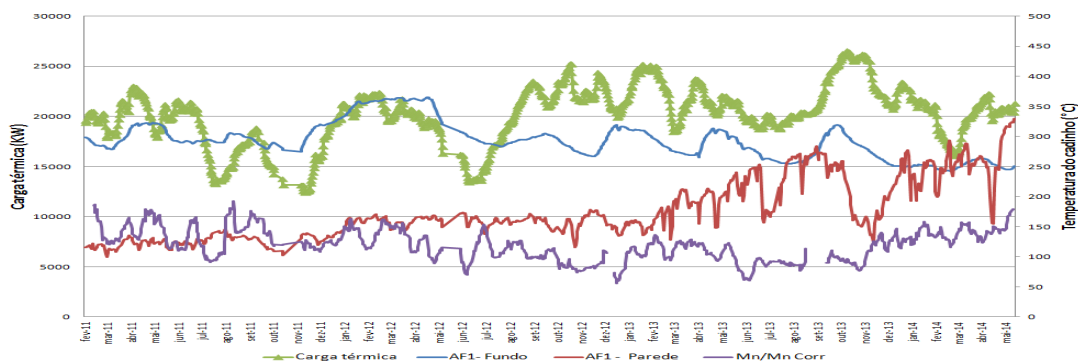


Figura 5. Carga térmica após jan/13 mostrando equilíbrio com temperatura da parede do cadinho.

Cabe ressaltar que as temperaturas estabilizam-se com a estabilização da produtividade, levando a crer que o fluxo de térmico tenha encontrado o equilíbrio com a capacidade de refrigeração. Encontrado esse equilíbrio visto na figura 5, as oscilações de temperatura irão ocorrer de acordo com o fluxo de líquidos no interior do cadinho.

2.2 Controle de Escoamento de Líquidos no Cadinho

O fluxo de líquidos é determinado pela permeabilidade do coque “estagnado”, que preenche o cadinho. Essa permeabilidade é definida pela granulometria do sólido e pela viscosidade dos líquidos. Porém, a viscosidade deve ser entendida não apenas pela definição clássica, envolvendo atração intermolecular, mas também pelo aspecto da formação de fases pastosas devido ao processo de solidificação.

Assim, esse escoamento torna-se um tanto relevante, pois o gusa líquido se responsabiliza por trazer calor para a coluna de coque, que somente poderá ser aquecido se houver permeabilidade para a passagem dos líquidos. Então, torna-se importante que haja uma renovação constante desse coque que irá garantir uma boa permeabilidade, sem interferência de líquidos “solidificados” em seus interstícios, eliminando-se a imagem de coque estagnado e surgindo um *deadman* reativado. Como pode ser visto na figura 6, que retrata esquematicamente a perda gradativa da permeabilidade *deadman* que leva a evolução de temperaturas do cadinho característica.

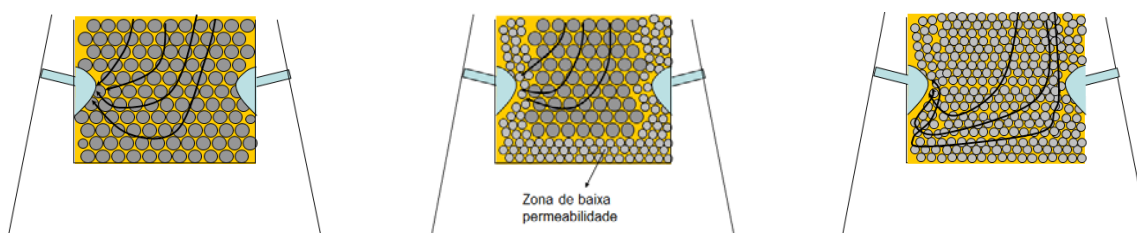


Figura 6. Esquema de perda da eficiência de permeabilidade do cadinho.

Quando há uma renovação adequada do *deadman*, mantém-se uma boa permeabilidade e com isso o fluxo de gusa e escória ocorre por dentro do mesmo, e conseqüentemente, longe das paredes (fundo e lateral do cadinho). É interessante observar que nesse caso as temperaturas equilibram-se em patamares mais baixos assim como o próprio valor de DCI.

Essa renovação do *deadman* é feito através do uso de coque central [7], porém isso leva a uma perda gradativa da marcha periférica e assim a um abaixamento da zona de coesão, causando uma perda gradativa da permeabilidade do cadinho a partir

das paredes. Esse fenômeno estaria associado a uma descida de material não elaborado por meio da periferia do Alto Forno devido à aproximação da raiz da zona de coesão ao *raceway*. A continuidade desse fenômeno levaria a um deslocamento do fluxo de líquidos para as paredes do cadinho, potencialmente mais permeável devido à sua maior superfície. A figura 7 mostra de forma simplificada a interferência da distribuição de carga na evolução das temperaturas [7].

Figura 7 – Esquema de perda da eficiência de permeabilidade do cadinho.

Na ocorrência de perda de permeabilidade do *deadman*, com o fluxo de líquidos se aproximando das paredes, a existência de um espaço livre de coque no cadinho irá determinar as condições de temperaturas como pode ser observado na figura 8 [6], caso 1. Nesta condição, esperam-se temperaturas elevadas nas laterais e mais baixas no fundo do cadinho. Uma situação contrária encontraríamos na simulação do caso 2.

Figura 8 – Esquema de interferência nos vetores de fluxo devido a perda de permeabilidade.

Já a configuração mostrada no caso 3 da figura 8, para um cenário de “*coke free space*” ou baseado em intersticiais, igualmente distribuído entre fundo e lateral. Situação sugere trazer melhores condições de fluxo de líquidos, semelhantemente ao caso de alta permeabilidade do *deadman*. Porém, com as temperaturas das paredes e laterais mais elevadas, mesmo com maior área de transporte de calor as temperaturas naquela região não irão se elevar em excesso. Certos autores consideram essa condição como “*floating deadman*”.

Cabe ressaltar que no caso dos Altos Fornos da TKCSA essa condição do fluxo de líquido é relevantemente acentuada, uma vez que a produção do forno (7500 t/d) é escoada pelo mesmo lado do cadinho e a repetição da configuração dos vetores de velocidade repetem-se continuamente, sem interrupções (intervalos de corrida) ou inversões (quando há casas de corridas opostas), potencializando vícios e virtudes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Controle das Temperaturas do Cadinho

Com base na fundamentação técnica já mencionada, as necessidades para as temperaturas do cadinho ficam claras, porém o controle propriamente dito não é feito

tão diretamente. O entendimento da influência da distribuição de carga passa a ser a peça chave, uma vez que será a determinante para o modo que a carga chegará ao cadinho.

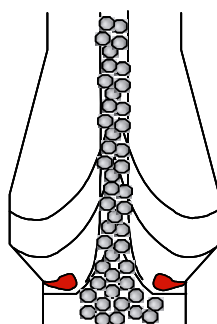


Figura 9 – Esquema de carregamento de coque central e alimentação do *deadman*.

Manter-se uma quantidade adequada de coque central (figura 9) irá garantir a renovação do *deadman*, porém a definição dessa quantidade passa a ser a grande dificuldade, uma vez que depende das condições operacionais (produtividade, fuel rate, injeção de carvão) além, da qualidade do coque, notadamente pelo CSR (Coke Strength after Reaction). Dessa forma, essa adequabilidade somente será confirmada através da evolução do fluxo dos líquidos.

A necessidade do uso de coque central é notória, pois se deseja um coque não reagido no cadinho, de modo que parte do gás gerado nas ventaneiras (CO) irá ser deslocado para o centro do AF “roubando” calor do processo e não gerando calor através da reação para CO₂. Assim, gradativamente a zona de coesão vai descendo, se aproximando do *deadman* ou do *raceway*, uma vez que se diminui o gás na periferia do forno. Foi observado que o aumento da marcha periférica contribui na redução das temperaturas da parede do cadinho de conforme a Figura 10.

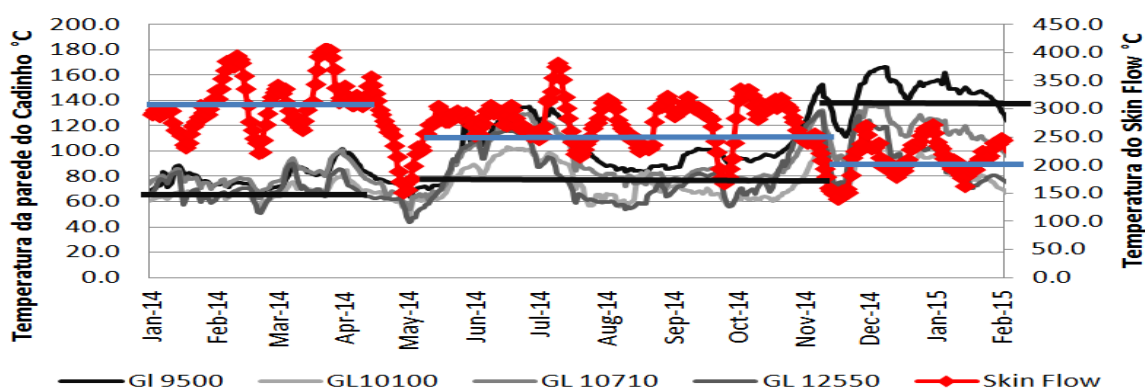


Figura 10 – Relação entre temperatura na cuba superior (skin flow) com níveis da parede do cadinho.

Isso seria explicado pela presença de materiais não reduzidos no cadinho, substancialmente identificada pela elevação da presença de FeO na escória, interferindo na fluidez dos líquidos localizadamente. E tal fato, levando a uma perda da permeabilidade da região deslocando essas linhas de fluxo para a parede do cadinho.

Pode ser observado pela evolução do DCI cujo aumento leva a um aumento das temperaturas das paredes. Pelo conceito desenvolvido pelo autor [4] o DCI representaria uma facilidade de escoamento pelo *deadman*, indicando o seu grau de

limpeza e assim não haveria tempo para incorporação de C pelo gusa. Porém, tem sido observado, em tempos após do uso de carvão pulverizado, em que a prática de uso de coque central tornou-se frequente. Assim, a elevação do potencial de oxigênio no cadinho, indicado pela relação (Mn)/[Mn], acarreta em elevação do DCI, e o aumento das temperaturas nas paredes do cadinho, visto na figura 11.

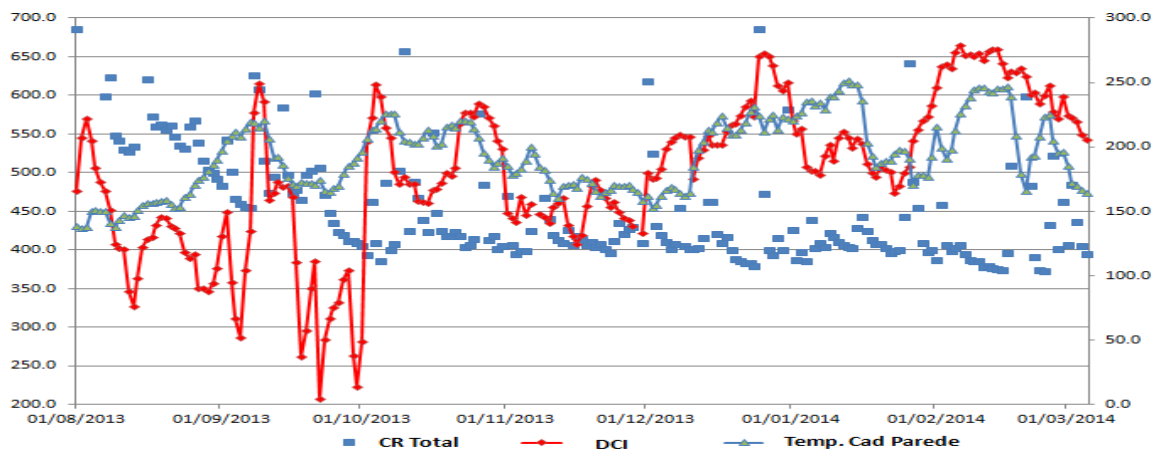


Figura 11 - Relação entre DCI e temperatura na parede do cadinho do AF01 da TKCSA.

A presença de óxidos inibe a incorporação de carbono pelo gusa, aumentando o DCI. Além disso, com o fluxo mais periférico no cadinho, a velocidade de escoamento aumenta e, conseqüentemente, reduzindo a incorporação. Por outro lado, com o fluxo mais interno ao *deadman*, maior é o contato do líquido ao coque, e com isso ocorre um fortalecimento na incorporação de carbono. Isso torna-se explicável quando se entende como *deadman* não mais como uma camada de coque estagnado, mas sim como um espaçador constantemente renovado.

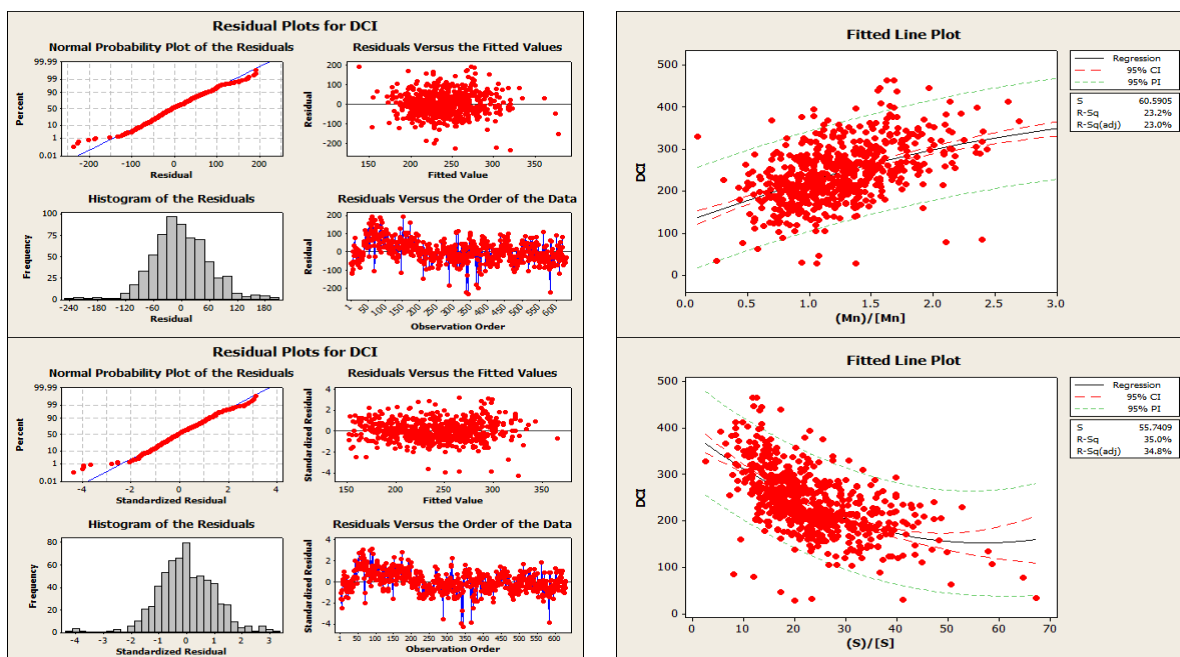


Figura 12 – Correlações envolvendo o poder de dessulfuração pelo processo de acordo com a evolução de limpeza do *deadman*, DCI.

Juntamente com a avaliação da presença de oxigênio no cadinho, pode-se relacionar a influência da estabilidade do processo por meio da relação $(Mn)/[Mn]$ e seus impactos na capacidade de dessulfuração do Alto Forno. A figura 12 busca demonstrar que a partir da razão $(S)/[S]$ tiramos como resultante positiva a melhor eficiência quanto menor for a presença de óxidos na região do *deadman*. E desta forma, trazendo influência na diminuição do DCI.

4 CONCLUSÃO

A evolução das temperaturas do cadinho associada à condição operacional, tais como produtividade e Fuel Rate ou mesmo condições da casa de corridas, têm sido estudada com o objetivo de estabelecer-se limites para a operação do Alto Forno e sua vida útil. Porém, observou-se que outros aspectos deveriam ser avaliados, uma vez que oscilações “inexplicáveis” estavam a ocorrer no AF da TKCSA.

Procurou-se, então, um ponto de vista diferente sobre os fundamentos que regem o escoamento de líquidos na operação dos Altos Fornos.

- I. A abordagem na forma de distribuição de gás mostra-se relevante em termos de controle de temperaturas do cadinho, especialmente, buscando preservação e operação de longo prazo;
- II. A elevação do potencial de oxigênio no cadinho $(Mn)/[Mn]$ mostra interferência no escoamento de líquidos, uma vez que há a mudança de fluxo devido perda de permeabilidade pelos óxidos no *deadman*;
- III. O aumento DCI mostrou-se ligado à queda das temperaturas da parede do cadinho, o que demonstra ser um indicador relevante para o controle de desgaste do cadinho;
- IV. O fluxo controlado de gás pela periferia mostrado pelo *Skin Flow* indicou importante relação com o as temperaturas da parede do cadinho.
- V. O uso do coque central, fundamental no controle operacional, mostra-se um importante *player* no controle do escoamento de líquidos no cadinho, devendo-se dessa forma estabelecer modelos para sua otimização.

REFERÊNCIAS

- 1 CHEN, J.; AKIYAMA, T.; YAGI, J. Effect of Burden Distribution Pattern on Gas Flow in a Packed Bed. ISIJ International, vol 32 (1992), No12, pp.1259-1267;
- 2 GANDRA, B.F. Desenvolvimento de Modelo Matemático do Fluxo de Líquidos no Cadinho do Alto Forno. 2006, pg.16-27;
- 3 RAIPALA, K. Deadman and Hearth Phenomena in the Blast Furnace. Scandinavian Journal of Metallurgy 2000;29: 39-46;
- 4 NIGHTINGALE, R.J.; TANZIL, F.W.B.U. Blast Furnace Hearth Condition Monitoring and Taphole Management Techniques. La Revue de Metallurgie 2001, 533-539.
- 5 TANZIL, W.B.U.; PINCZEWSKI, W.V. Blast Furnace Hearth Drainage: Physical Mechanisms. Chemical Engineering Science, 1987, vol.42, nº11, 2557-2567;
- 6 SHIBATA, K.; KIMURA, Y.; SHIMIZU, M. Dynamics of Deadman Coke and Hot Metal Flow in a Blast Furnace Hearth. ISIJ International, vol 30 (1990), nº3, 208-215;
- 7 FUJIHARA, F.K. Long Campaign Life of CST No 1 Blast Furnace. STAHL 2004
- 8 FUJIHARA, F.K. CST No 1 Blast Furnace - 22 years of Burden Distribution Control. 2005.