

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE CARGA INATIVA NO ALTO-FORNO “A” DA ARCELORMITTAL MONLEVADE¹

*Maurício Bittencourt Marques²
Luiz Fernando Andrade de Castro³
Wander de Oliveira Borges⁴
Thiago Públis Rocha Teixeira⁵
Fabiano Cristeli de Andrade⁶*

Resumo

Um dos principais problemas operacionais que pode ocorrer em altos-fornos é a formação de carga inativa. Esse tipo de formação pode se apresentar de formas diferentes e com causas diversas. Ela ocasiona a perda de volume útil do reator com consequente perda de produtividade, elevação do consumo de combustível e instabilidade operacional. O Alto-Forno “A” da ArcelorMittal Monlevade teve o início da sua campanha em dezembro de 1999. Desde então, foram observadas algumas formações de cargas inativas no equipamento. O presente estudo tem por objetivo analisar a formação de cargas inativas em altos-fornos, traçando um paralelo com a experiência vivida no Alto-Forno “A”. A análise se baseia no estudo dos dados de caracterização do material aderido e dos dados de processo. Um foco especial é dado ao impacto da inatividade do homem morto na formação de cargas inativas.

Palavras-chave: Alto-forno; Carga inativa; Homem morto.

SCAFFOLD FORMATION IN ARCELORMITTAL MONLEVADE BLAST FURNACE “A”

Abstract

One of the most laborious events a blast furnace team can face is scaffold formation. This type of accretion formation presents different morphology from several motivations. It reduces the inner volume of the reactor leading to low productivity, high reductant agent consumption and operational instability. ArcelorMittal Monlevade Blast Furnace “A” blow in was 1999. It could be seen some accretion formation on its walls. The present paper aims to analyze blast furnace accretion formation from the perspective of this thirteen years of Blast Furnace “A” operation. It was based on data obtained from scaffold samples, and process data. A special focus is given to deadman inactivity impact on scaffold formation.

Key words: Blast furnace; Scaffold; Accretion; Deadman.

¹ *Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro metalurgista, Eng. de processo do Alto-Forno “A”, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

³ *Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, MG, Brasil.*

⁴ *Engenheiro eletricitista, Eng. de processo do Alto-Forno “A”, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

⁵ *Engenheiro metalurgista, Especialista em redução de minério de ferro, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

⁶ *Engenheiro metalurgista, Gerente de área do Alto-Forno “A”, ArcelorMittal Monlevade, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um reator que opera em contracorrente gás/sólido e tem a função de reduzir óxidos metálicos pela ação de um agente redutor em alta temperatura. O objetivo principal de um equipamento como esse é garantir uma alta produtividade do metal em questão a um custo baixo.

Apesar de também poder ser utilizado para produzir outros metais, os altos-fornos são, em sua grande maioria, utilizados para a produção de ferro-gusa, que é uma liga de ferro-carbono com aproximadamente 94% de ferro e 4,5% de carbono. Outros elementos também estão presentes como o silício, o manganês, o fósforo e o enxofre.

As matérias-primas utilizadas para a produção do gusa podem ser divididas em dois grupos: i) a carga metálica, portadora de ferro (óxidos de ferro, na grande maioria dos casos), e óxidos diversos (destacando-se a sílica, a alumina, o CaO e o MgO) e ii) os redutores, que são normalmente fontes de carbono (coque, carvão mineral pulverizado, carvão vegetal, antracito, entre outros) ou fontes de carbono e hidrogênio, como gás natural e o óleo mineral.

O fato de o alto-forno ser um equipamento de capital intensivo, de operação contínua e à alta temperatura, dificulta a atuação e correção do processo, em casos de ocorrências de problemas operacionais.

Um dos principais problemas operacionais que pode ocorrer em altos-fornos é a formação de carga inativa. Esse tipo de formação pode se apresentar de formas diferentes e com causas diversas. Ela ocasiona a perda de volume útil do reator, com consequente perda de produtividade, elevação do consumo de combustível, piora da permeabilidade, causando instabilidade operacional. A sua remoção pode provocar problemas ainda mais graves, como dano ao revestimento interno da rampa, ventre e cuba do alto-forno e/ou marcha fria.

A ArcelorMittal Monlevade possui atualmente em operação um alto-forno, o Alto-Forno "A" (AF-A), que entrou em operação em dezembro de 1999. O projeto inicial previa uma operação com coque e 160 kg/t de injeção de finos de carvão mineral, com uma produção de 3.000 t de gusa por dia. Em 2008 iniciou-se a injeção de moinha de carvão vegetal em conjunto com o carvão mineral e em 2011 o gás natural começou a ser utilizado como combustível de injeção. Ao longo dos seus 13 anos de operação houve formações de cargas inativas no AF-A, em diferentes posições e por motivos diferentes.

O objetivo do presente trabalho é apresentar a metodologia de detecção da formação de carga inativa no AF-A, analisar a formação de cargas inativas em altos-fornos, traçando um paralelo com a experiência vivida no Alto-Forno "A". A análise se baseou no estudo dos dados de caracterização do material aderido e dos dados de processo. Um foco especial é dado ao impacto da inatividade do homem morto na formação de cargas inativas.

1.1 Mecanismos de Formação de Carga Inativa

A formação de carga inativa pode ter mecanismos diversos e causas variadas.⁽¹⁾ Porém, para que a carga inativa se desenvolva e se mantenha aderida à parede do alto-forno, alguns pré-requisitos são necessários.⁽²⁾ Os materiais que normalmente representam a maior parcela em massa da carga inativa são os finos das matérias-primas. Esses finos são provenientes da carga metálica e do coque enforado. Eles podem estar presentes no processo devido a um peneiramento deficiente, baixa

qualidade física e metalúrgica da carga ou alta umidade das matérias-primas, carregando finos aderidos para o reator. Observa-se também em alguns casos a presença de escória na formação da carga inativa, podendo ser atribuída à solidificação da zona de amolecimento e fusão em contato com partes mais frias do forno.

Para que ocorra a aglomeração desses finos é necessária a presença de zinco e/ou compostos de sódio ou potássio (álcalis). Eles funcionam como ligantes compondo a matriz principal da carga inativa formada. Tanto o zinco quanto os álcalis são volatilizados na região inferior do forno à alta temperatura e tendem a se depositar em regiões mais frias do forno como a parede, elementos refrigerados ou na própria carga descendente, recirculando dentro do reator. Porém, parte dos álcalis não é reduzida sendo removida do alto-forno pela escória.

Os mecanismos que irão fazer com que a massa de finos aglomerada com álcalis e zinco permaneça ou não aderida à parede do alto-forno são os mecanismos de abrasão, pressão e força da gravidade.

A abrasão entre a carga do forno, principalmente o coque, e a carga inativa promove um desgaste da massa de material. Caso não haja mais finos e aglomerantes alimentando a região, a tendência é de desgastar e eliminar a carga inativa. Portanto, um pré-requisito para que a carga inativa se mantenha estável é o suprimento contínuo de finos, álcalis e/ou zinco.⁽³⁾

A abrasão é dependente da velocidade de descida de carga na região de formação da carga inativa. Na região da rampa essa velocidade pode ser afetada pela erosão do refratário que sobrepõem os staves, o que muda o ângulo da rampa, aumentando o volume do forno na região, mas formando uma área estagnante próxima à parede na parte inferior da rampa, conforme Figura 1.⁽⁴⁾ Esse comportamento aumenta consideravelmente a velocidade das partículas logo à frente na região de estagnação, alterando a zona coesiva e formando o que se chama de “hanging cohesive zone” (ou “W”) conforme comprovado por Ichida et al.⁽⁴⁾

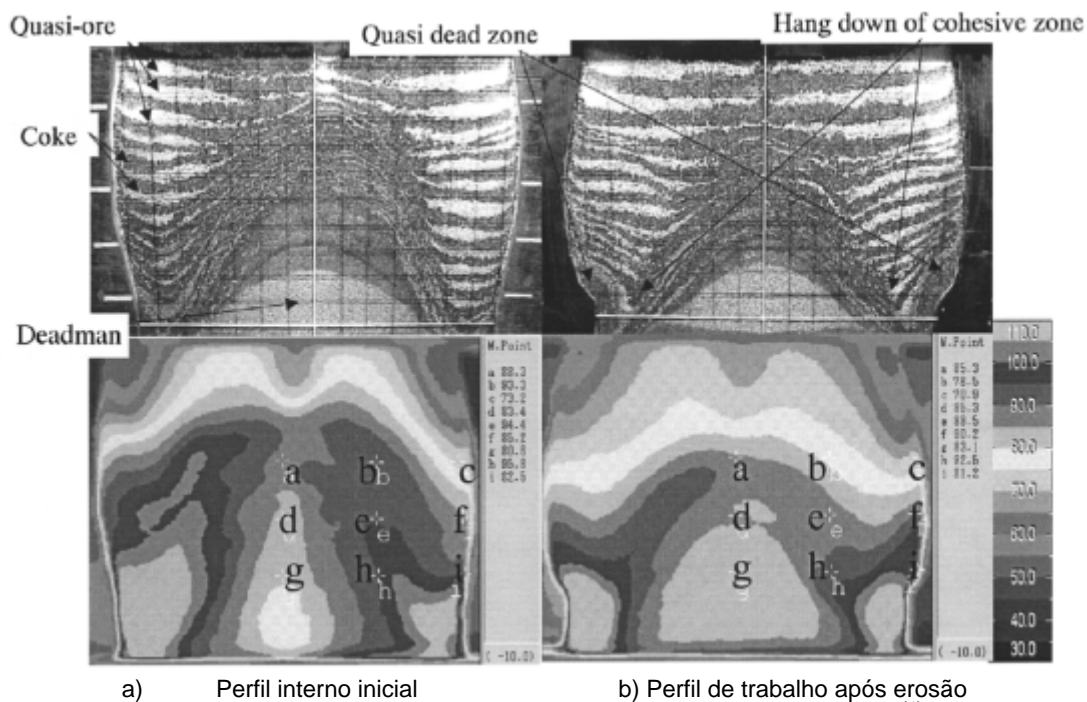


Figura 1. Resultados de simulação realizadas por Ichida et al.⁽⁴⁾

Assim como o desgaste da rampa, o tamanho e condição de permeabilidade do homem morto também causam efeito semelhante na zona coesiva. Um homem morto impermeável e grande o suficiente pode fazer com que o *raceway* se incline na direção ascendente, direcionando o fluxo gasoso na direção da rampa, levando a formação de uma zona coesiva com o perfil de “W”,⁽³⁾ conforme Figura 2.

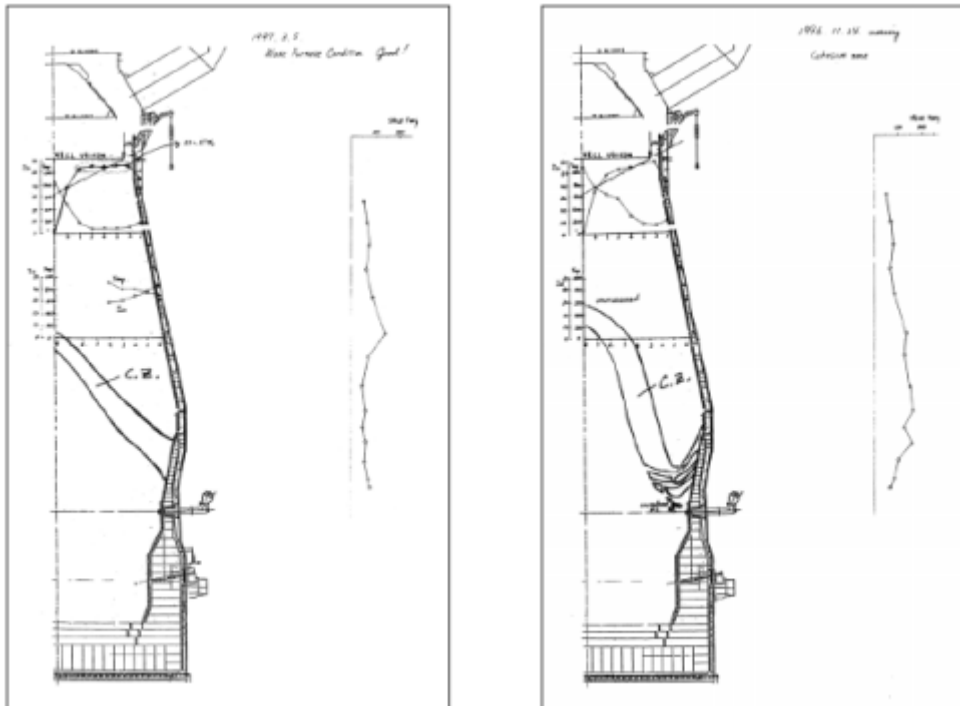


Figura 2. Formato da zona coesiva. Esquerda: operação normal com formato de “V” invertido. Direita: operação ruim com zona coesiva em forma de “W”.

A força de atrito ocorre pelo contato mecânico da carga inativa com as paredes do forno. Ela tem a sua intensidade aumentada com o equipamento em operação por efeito da pressão interna do reator. Essa força pode ter intensidade maior ou menor dependendo do formato do equipamento, tipo de material de revestimento da parede e grau de desgaste desse material. Outro mecanismo que pode ocorrer é a interação química entre o revestimento da parede e a carga inativa.

A posição de ocorrência da carga inativa e a sua morfologia dependem da qualidade da carga, tipo de material aglomerante, aspectos construtivos e operacionais do reator em questão. Quanto à sua morfologia, as cargas inativas se dividem em dois grupos. Um grupo é de carga inativa laminar, que consiste em uma crosta sólida de material na parte interna do alto forno e uma camada de finos da carga metálica entre a crosta e a parede do alto-forno. O outro tipo de carga inativa é aquela que não apresenta essa crosta de material laminar.

A Tabela 1 classifica a formação de carga inativa por região, apresentando os principais aspectos relacionados a cada uma delas e as principais causas fundamentais.

Tabela 1. Aspectos da formação e causa fundamental de carga inativa por região

Local	Aspectos da formação	Causa fundamental
Rampa e ventre	Local comum de formação e crescimento de carga inativa. Caso fique por muito tempo pode crescer rapidamente para região superior e causar distúrbios operacionais sérios, como rompimento de ventaneira e marcha fria. Zona de amolecimento e fusão solidifica em contato com elementos refrigerados. Zinco e álcalis condensam na superfície da parede e formam uma crosta dura com Fe, ZnO, K ₂ O e escória. Esse tipo de ocorrência pode também ocorrer na cuba. Zona de amolecimento e fusão com formato em W pode levar a sua formação.	<ul style="list-style-type: none">• Presença de finos.• Álcalis.• Paradas.• Instabilidade do processo.• Desgaste do refratário da rampa.• Tamanho e compactação do homem morto.
Cuba baixa e cuba média	Podem crescer rapidamente se mecanismos de abrasão não estiverem presentes. Podem ocorrer por dois processos distintos: a. Zona de amolecimento e fusão se solidifica em contato com elementos refrigerados durante parede ou instabilidade operacional. b. Precipitação de óxido de zinco e álcalis em associação com finos de carga metálica ou coque formando uma crosta sólida e dura.	<ul style="list-style-type: none">• Presença de finos.• Presença de álcalis ou zinco.• Variações de temperatura.• Paradas.• Instabilidade do processo.
Cuba superior	Difícil de remover pela fusão do material com uso de silicatos por se localizar em uma região muito alta do forno. Sua remoção ocorre normalmente pelo abaixamento do nível de carga.	<ul style="list-style-type: none">• Umidade da carga.• Entrada de água pelo topo.• ZnO.• Presença de finos.

1.2 O Homem Morto

O cadinho de um alto-forno é preenchido de coque e, nos espaços entre os sólidos, encontramos gases, gusa e escória. Por densidade, a escória sobrenada o gusa e este, advindo da região de gotejamento, afunda pela camada de escória em direção ao fundo do cadinho.⁽³⁾

O homem morto ou zona de coque estagnante de um alto-forno é composto por uma coluna de coque em contato com ferro-gusa e escória.⁽⁴⁾ Nessa região, o coque é consumido muito lentamente e conseqüentemente sua descida é extremamente lenta. O homem morto se localiza na região central do alto-forno desde o cadinho, passando pela região das ventaneiras até a rampa. Nesse local, o coque se encontra bastante compactado, sendo o índice de vazios da ordem de 0,35.⁽³⁾ Estudos revelam que a superfície do homem morto é composta não somente por coque e *char* (partículas não queimadas de carvão formadas por carbono e material mineral), mas também por partículas finas de escória, proveniente da ganga dos minérios e por cinzas do coque e carvão.⁽⁵⁾

O homem morto pode se encontrar assentado na soleira do cadinho ou flutuando no banho de gusa, dependendo da resultante de forças entre o peso da carga, o empuxo e o atrito entre a carga e o gás ascendente.

O cadinho de um alto-forno tem sido alvo de exaustivos estudos nos últimos anos. Parte disso se deve ao fato de que, com os recentes avanços nos materiais, controles e reparos desenvolvidos para as regiões entre as ventaneiras e o topo de um alto-forno,⁽⁶⁾ as campanhas têm se tornado cada vez mais extensas, aumentando as solicitações sobre os cadinhos. Além disso, o cadinho é operado em condições extremas de temperatura e pressão, o que impede a utilização de sensores capazes de operar e fornecer dados para estudo. Por esse motivo são utilizados parâmetros de medição indireta para se detectar a condição do homem morto. Observa-se que quando o coque do cadinho é renovado e a porosidade do homem morto é melhorada, o tempo de intervalo sem escória é reduzido e, conseqüentemente, o índice de escória, dado pela Equação 1, aumenta.^(1, 7)

$$\text{Índice de escória} = \frac{\text{tempo de escória}}{\text{tempo de corrida}} \quad (1)$$

Outros fatores indicam a condição do homem morto, tais como:⁽³⁾ queda nas temperaturas na soleira do cadinho, elevação dos teores de MnO e FeO da escória, aumento do teor de S do gusa, redução do comprimento do furo de gusa, redução do comprimento do *raceway*, elevação da temperatura do gusa e queda do teor de carbono do gusa. A utilização de materiais para se traçar o caminho do banho de gusa e escória no cadinho, como óxido de cobalto.⁽⁸⁾ Por fim, relatos correlacionam a formação de cargas inativas com a inatividade do homem morto.⁽⁹⁾ Tais fatos estão ligados ao impacto do homem morto na zona coesiva, conforme discutido no item 2.

2 MÉTODOLOGIA: DETECÇÃO DE FORMAÇÃO DE CARGA INATIVA NO ALTO-FORNO “A”

A formação de carga inativa pode ser observada por diversos parâmetros de processo, tais como, pressão de sopro, permeabilidade global, temperatura de topo, eficiência gasosa, e os reflexos podem ser percebidos na produtividade e no consumo de combustíveis. Uma detecção direta da formação é realizada pelo monitoramento de temperaturas na parede do reator.

O Alto-Forno “A” (AF-A) conta com *staves*, desde o cadinho até a cuba superior. Os *staves* da rampa, ventre e cuba inferior são de cobre (4 anéis: 5 a 8) e os demais, de ferro fundido. O alto-forno conta com cinco circuitos fechados de refrigeração. Um desses circuitos é exclusivo para efetuar a refrigeração dos *staves* superiores, isto é, dos *staves* da rampa até a cuba superior.

O monitoramento dos *staves* é realizado através de termopares instalados no corpo de um *stave* a cada dois instalados. A detecção da presença de alguma formação em algum *stave* é feita pela diferença de temperatura medida no *stave* e a temperatura de entrada da água. Para cada valor, baseados nos dados históricos de operação, foram definidas três faixas: i) faixa de temperatura baixa, indicando presença de algum material aderido - usualmente denominados de *staves* de inativos; ii) faixa média, que indica uma situação de transição; e iii) faixa de alta temperatura, que indica que o *stave* está limpo, ou seja, que não possui material aderido à sua parede. As temperaturas definidas para cada anel são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Faixas de controle para as temperaturas dos staves

Temperatura dos staves	Baixa	Média	Alta
Anel	<	>	<
A5	Te +1	Te +1	Te +3
A6	Te +1	Te +1	Te +2
A7	Te +3	Te +3	Te +6
A8	Te +7	Te +7	Te +16
A9	Te +40	Te +40	Te +70
A10	Te +40	Te +40	Te +70
A11	Te +40	Te +40	Te +70
A12	Te +40	Te +40	Te +70
A13	Te +40	Te +40	Te +60

*Te = Temperatura de Entrada da Água nos Staves Superiores

Com base nos cálculos de diferença de temperatura dos staves e da temperatura de entrada da água e das faixas de operação dos staves, foi construído um mapa de temperaturas que permite a visualização da condição da parede do forno, auxiliando a detecção da formação de carga inativa. Um exemplo desse mapa é mostrado na Figura 3.

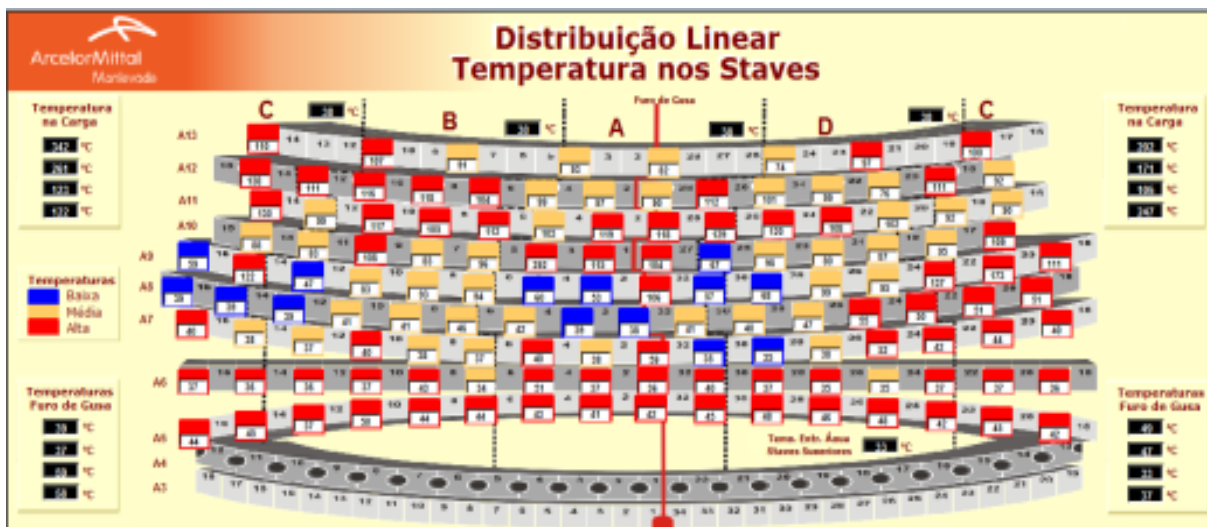


Figura 3. Distribuição Linear – Temperatura nos Staves.

A partir dessa classificação, são construídos gráficos de acompanhamento de número de staves inativos por região do forno, por anel ou por quadrante. Realiza-se também o acompanhamento da perda térmica do forno com o monitoramento das temperaturas de entrada, intermediária (após os staves de cobre e antes dos staves de ferro fundido) e de saída. Com base nesses dados e na vazão de água, calcula-se a entalpia de aquecimento da água e, conseqüentemente, a perda térmica do forno.

$$\text{Perda térmica} = \Delta H_{\text{aq. H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \int_{T_i}^{T_f} C_p dT \quad (2)$$

3 ESTUDO DA FORMAÇÃO DE CARGA INATIVA NO ALTO-FORNO “A”

3.1 Julho de 2012

Em julho de 2012, após 45 dias de operação com apenas 2 regeneradores, o processo do Alto-Forno “A” foi afetado pela formação de carga inativa, conforme podemos observar pelas Figuras 4 e 5.

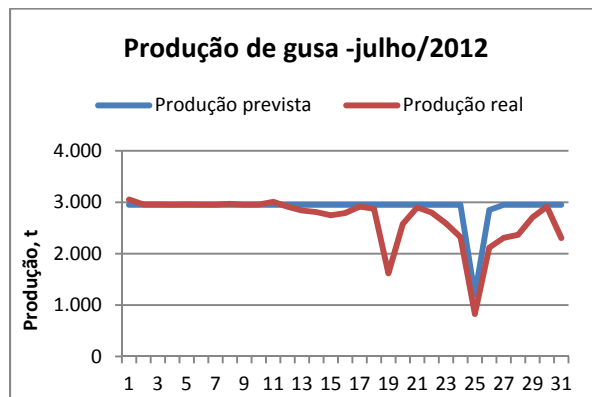


Figura 4. Produção de gusa – julho/2012.

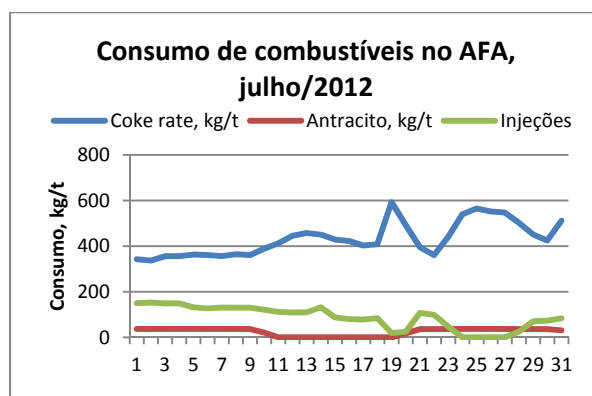


Figura 5. Consumo de combustíveis no AF-A – julho/2012.

A partir de 12 de julho, houve perda de produção devido à redução do ritmo de produção e realização de duas paradas com abaixamento de carga. Além disso, foi necessário elevar o *coke rate* desde o início do mês de julho e operação *all coke* não programada, durante 3 dias. Observou-se também a elevação do *fuel rate* e redução dos combustíveis alternativos.

Através da análise das temperaturas dos *staves* (Figuras 6a e 6b), é possível identificar o mecanismo de formação da carga inativa. Observando o número de *staves* inativos, mostrado na Figura 7, é possível apontar exatamente quando ocorreu a formação da carga inativa.

Verifica-se também que a formação da carga inativa se iniciou na região do ferro fundido e cresceu nessa direção. Outrossim, analisando a entrada de zinco no AF-A (Figura 8), nota-se que esta formação pode estar relacionada ao aumento desse elemento na carga durante o ano de 2012.

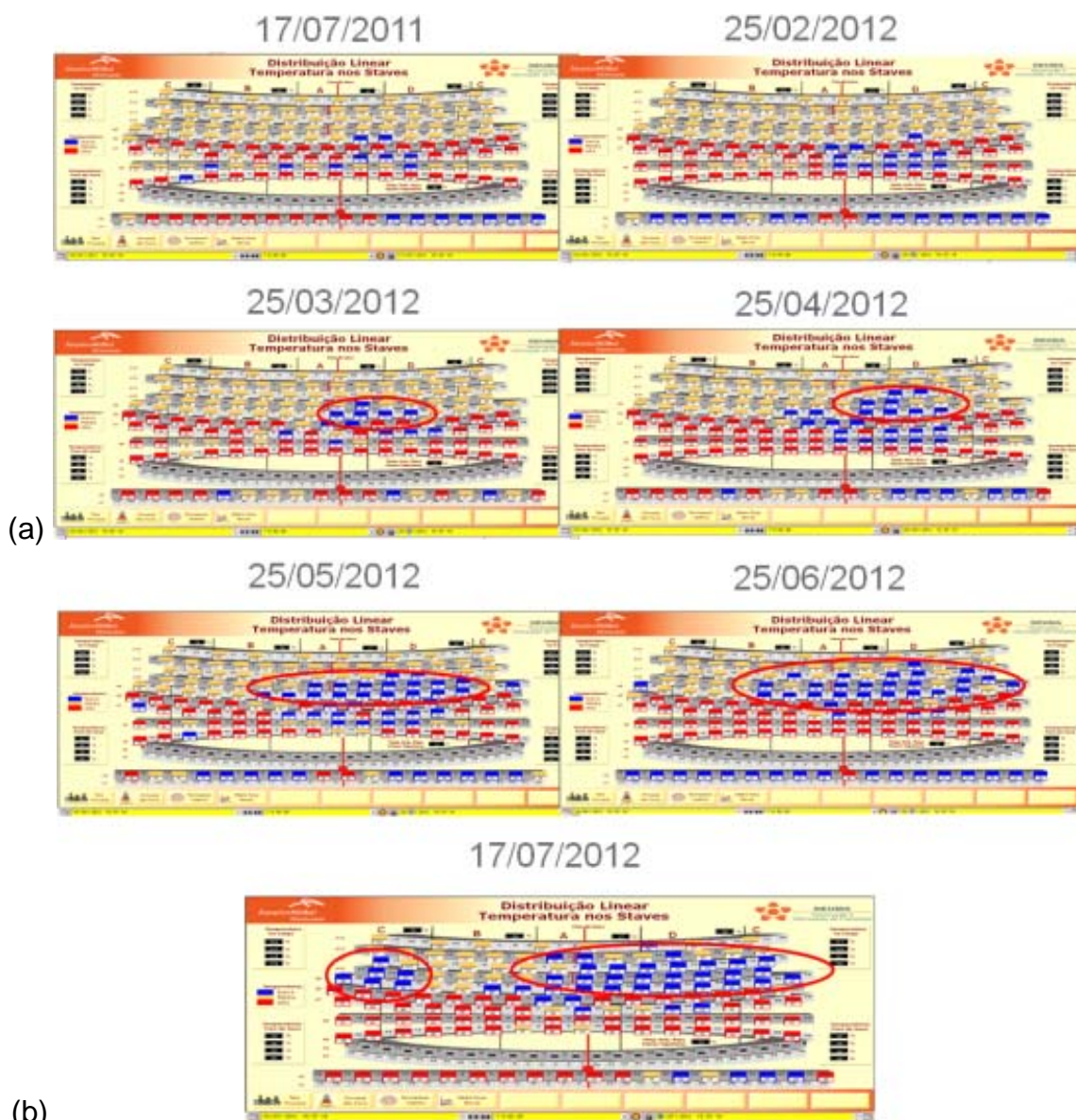


Figura 6. (a) Sequência de mapas de monitoramento de temperaturas dos staves quando da formação da carga inativa de julho de 2012; e (b) sequência de mapas de monitoramento de temperaturas dos staves quando da formação da carga inativa de julho de 2012.

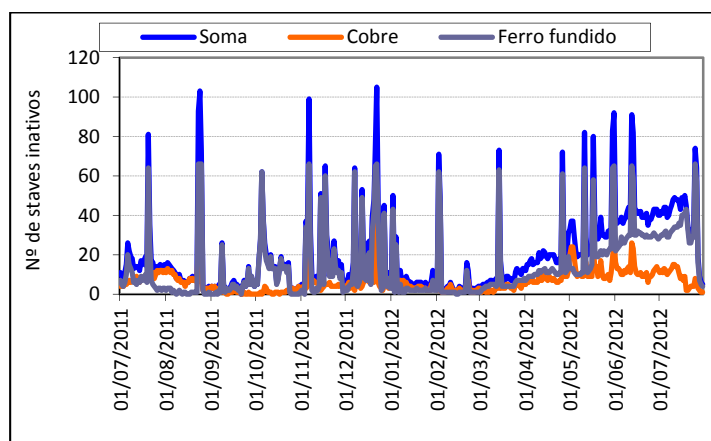


Figura 7. Número de staves inativos, por região (os picos representam os dias de parada).

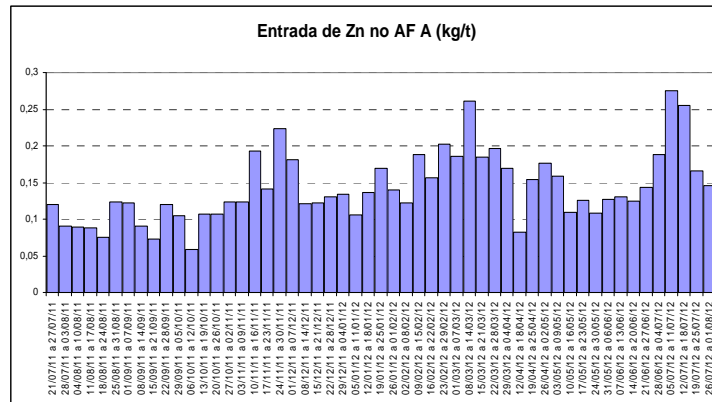


Figura 8. Entrada de zinco no AF-A (kg/t).

Porém, durante o período em questão, outro fator se destaca: o número de *staves* inativos mostra correlação com o índice de escória do período (Figura 9).

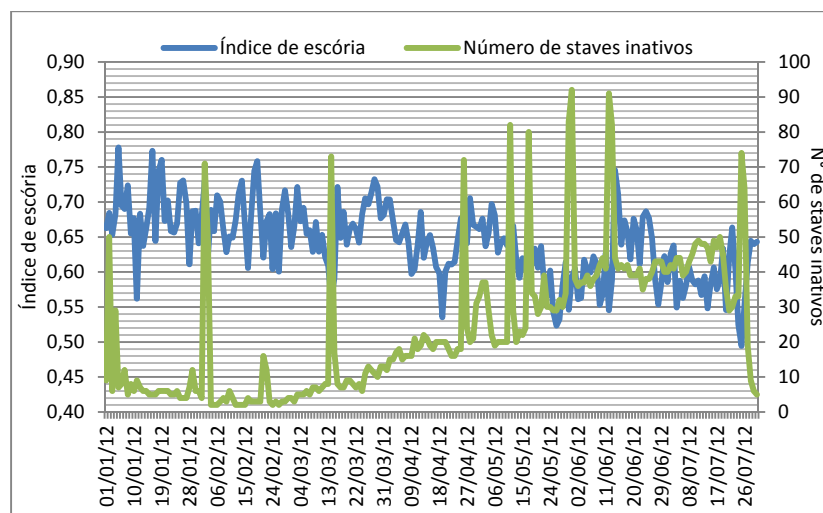


Figura 9. Correlação entre o índice de escória e número de *staves* inativos.

É importante ressaltar que durante o período de fevereiro a junho de 2012, o volume de escória praticado no Alto-Forno “A” foi muito elevado, com média de 362 kg/t. Outro fator importante no período foi a operação com 2 regeneradores, ocorrida em 26 de abril e 13 de junho. Os dois fatos, aliados a um consumo de um coque com CSR médio de 61%, contribuíram para uma piora da permeabilidade do cadinho, que refletiu no índice de escória e na temperatura da soleira.

Para remoção dessa carga inativa, uma vez que ela se localizava principalmente na região da cuba, realizou-se abaixamento da carga até 12 m do *stock line*. Com o forno parado, foi feita uma sondagem na região onde, possivelmente, a carga inativa se encontrava. Os resultados da filmagem são mostrados na figura 10.

Observa-se que na região superior, a carga inativa mostra-se do tipo laminar, com presença de uma crosta sólida separada da parede do forno por uma camada de finos provenientes da carga. Já na região inferior o material sofre uma alteração brusca, tornando-se mais escuro e irregular.

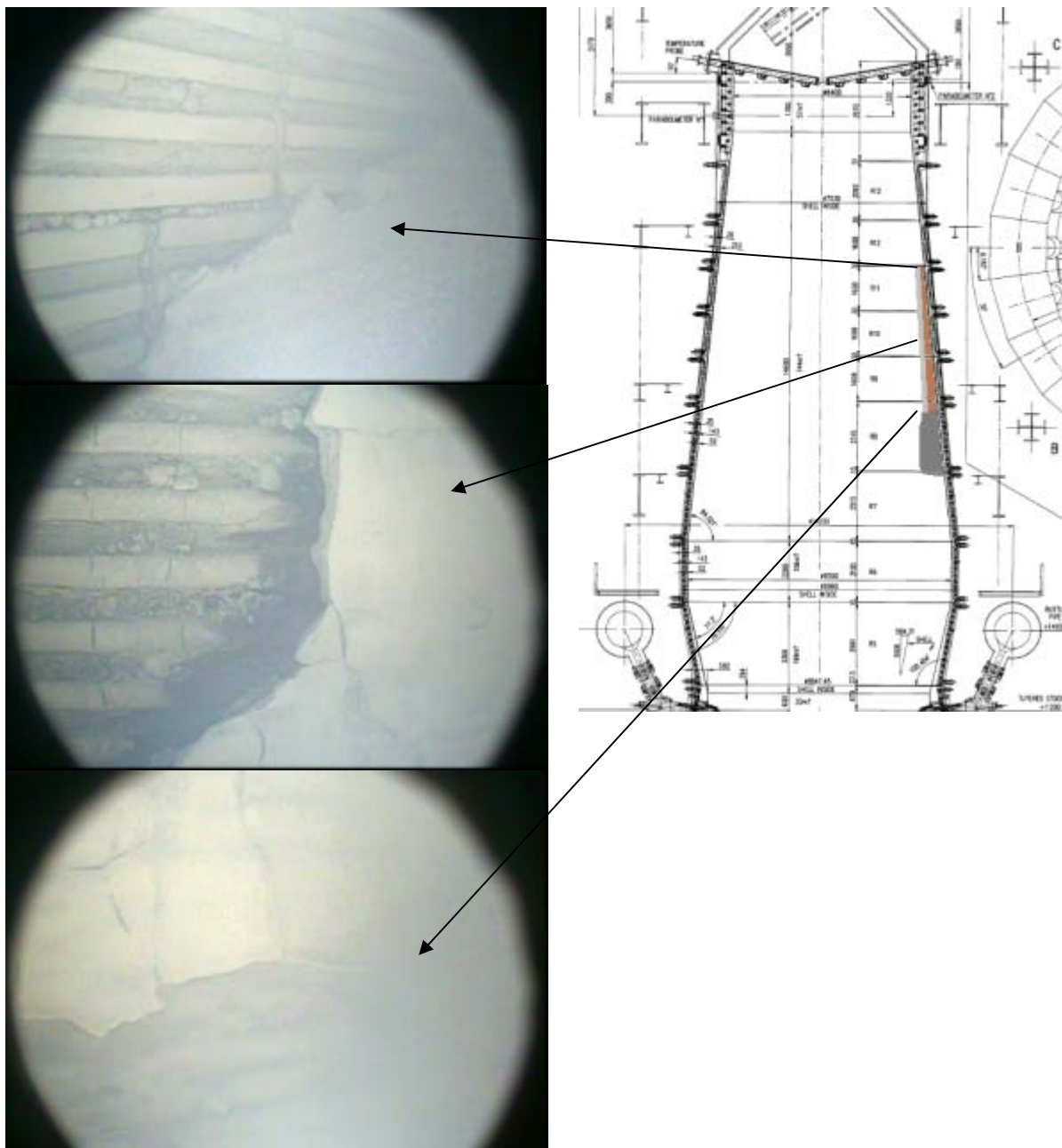


Figura 10. Imagens da carga inativa obtidas através da sonda.

3.2 Janeiro de 2013

Em novembro de 2012, após uma parada de 120 horas, o homem morto do AF-A tornou-se extremamente inativo. Após dois meses de operação para recuperação da sua condição operacional, durante uma instabilidade do processo, causada pelo uso intensivo de sínter do pátio, ocorreu uma formação de carga inativa na região inferior do forno.

A inatividade do cadinho no período é evidenciada pelo índice de escória, pelo comprimento do furo de gusa e pela temperatura da soleira (Figuras 11 e 12).

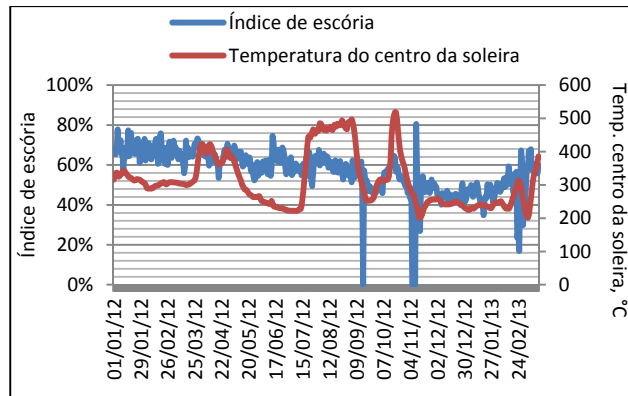


Figura 11. Índice de escória.

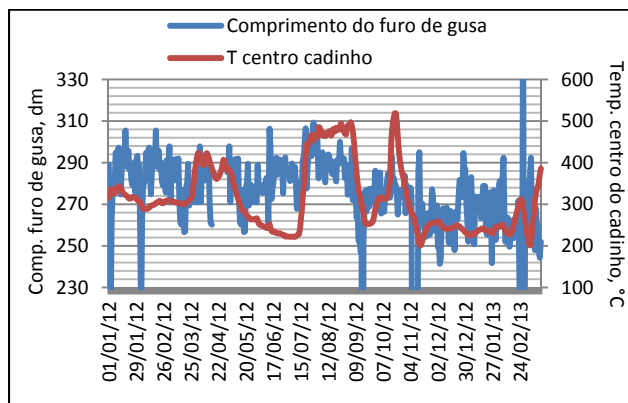


Figura 12. Comprimento do furo de gusa.

A Figura 13 mostra o número de *staves* inativos no período entre julho de 2012 e fevereiro de 2013. Observa-se que o número de *staves* inativos tende a crescer em períodos de baixa temperatura da soleira do cadinho. O crescimento de carga inativa nesse período pode ser evitado com adoção de medidas que garantam a permeabilidade da carga, a estabilidade do processo e a remoção de álcalis do reator.

Comportamento semelhante da formação de carga inativa havia sido observado no Alto-Forno "A" em 2002, após um período de 25 dias de reparo dos regeneradores quando, para evitar o crescimento de carga inativa, operou-se *all coke* por 37 dias.

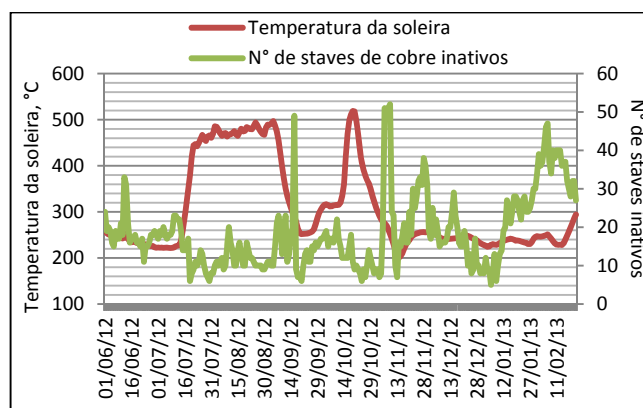


Figura 13. Temperatura da soleira do cadinho e número de staves inativos.

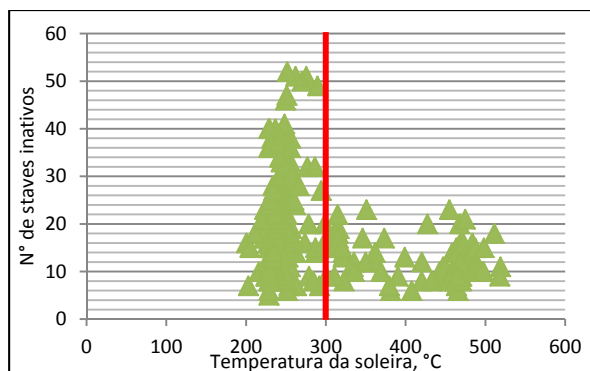


Figura 14. Correlação entre número de *staves* inativos e a temperatura da soleira.

Para o período em questão, observa-se que o número de *staves* inativos atingiu valores elevados (acima de 25 *staves*), apenas quando a temperatura da soleira do cadinho se manteve abaixo de 300°C, como observamos na Figura 14.

4 CONCLUSÃO

Verifica-se com os dados apresentados que a metodologia de detecção de formação de carga inativa no Alto-Forno “A” é eficiente. Com os dados gerados é possível correlacionar os períodos de formação com os parâmetros de processo, tais como, *input* de zinco, carregamento de finos ou retirada de álcalis pela escória. O acompanhamento desses dados pode evitar a formação de carga inativa ou, no mínimo, detectar tal formação de forma a permitir ações de controle em tempo hábil para reduzir os impactos negativos que este fenômeno pode causar.

A análise das últimas duas ocorrências de carga inativa no AF-A mostra que um homem morto impermeável pode ser uma das causas desse tipo de formação. Isto ratifica a necessidade de um controle rigoroso de processo e de matérias-primas visando à manutenção da permeabilidade do homem morto.

REFERÊNCIAS

- 1 HILDING, T.S. Investigation of accretion formation in a blast furnace shaft. Master Thesis. Lulea Tekniska Universitet, 2001.
- 2 KLIMA, R. et al. Investigation of accretion formation in a blast furnace shaft. Technical Steel Research. European Commission. Final report, 2005.
- 3 RAIPALA, R. On hearth phenomena and hot metal carbon content in blast furnace. Doctoral Thesis. Helsinki University of Technology Publications in Materials Science Metallurgy, 2003.
- 4 ICHIDA, M. Inner profile and burden descent behavior in the blast furnace. Nippon Steel Technical Report, jul. 2006. n. 94.
- 5 ICHIDA, M. Activation of deadman state in the blast furnace using serpentine injection through tuyere. ISIJ International, v. 44, n. 12, pp. 2134-2143, 2004.
- 6 GANDRA, B.F. Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno. Dissertação de mestrado. Minas Gerais: PPGEM/UFMG, 2006.
- 7 TORRKULLA, J. et al. Indicators of the internal state of the blast furnace hearth. ISIJ International, v. 42, n. 5, pp. 504-511, 2002.
- 8 INADA, T. Dissection investigation of blast furnace hearth – Kokura No. 2 Blast Furnace (2nd Campaign). ISIJ International, v. 49, n. 4, pp. 470-478, 2009.
- 9 RAIPALA, K. Monitoring blast furnace hearth. In. BLAST FURNACE SEMINAR, 2004, Oulu, Finland. Oulu: University of Oulu, 2004.