

MONITORAÇÃO E CONTROLE PARA PRESERVAÇÃO DO CADINHO DURANTE RETORNO A OPERAÇÃO DO ALTO-FORNO Nº 3 DA CSN¹

*Antônio Henriques Botelho de Mello²
Miguel Angelo da Gama Bentes³
André José de Souza Monsôres⁴
Marco Polo da Silva Peixoto⁴
José Maria Reinaldo da Silva⁵
Fabiam Franklin⁶*

Resumo

O presente trabalho relata as ações tomadas no sentido de possibilitar a instalação de sistemas de monitoramento das tensões e deformações da couraça do cadinho do alto-forno, durante o retorno a operação, com o objetivo de identificar e controlar áreas com possíveis deformações comprometedoras da integridade das chapas de aço, e em consequência, evitar danos permanentes ou até mesmo trincas do cadinho.

Palavras-chave: Alto-forno; Fundo e cadinho; Monitoração; Salamandra.

PRESERVATION OF CSN'S Nº 3 BLAST FURNACE HEARTH BY MONITORING AND CONTROLLING DURING THE BLOW IN

Abstract

The present paper relates the action that was doing in sense to be possible the installation of tension and deformation monitoring systems on shield of the the blast furnace hearth, during the blow-in, to identify and control areas with possible hazardous deformations that affect the sanity, and consequence avoid permanent damages or cracks in the shell of the blast furnace hearth .

Key words: Blast furnace; Bottom and hearth; Monitoring; Salamandre.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico MSc, Gerência Geral de Desenvolvimento de Produtos*

³ *Engenheiro Metalúrgico MSc, Gerente de Desenvolvimento Tecnológico*

⁴ *Engenheiro Metalúrgico Gerência Geral de Altos-Fornos*

⁵ *Engenheiro Metalúrgico, Gerente de Altos-Fornos*

⁶ *Engenheiro Metalúrgico, Gerente Geral dos Altos-Fornos*

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno 3 da CSN teve suas atividades operacionais interrompidas com a ocorrência da parada de emergência em janeiro de 2006. Normalmente, durante paradas de altos-fornos por longos períodos, é programado o vazamento da salamandra, material líquido (gusa + escória) contido no fundo do cadinho de um alto-forno. Mas para isto é necessário um tempo prévio de preparativos visando à máxima retirada deste material líquido antes que o mesmo se solidifique em seu interior.

No caso do alto-forno 3, sendo a parada em emergência e não existindo os preparativos para o vazamento da salamandra, foi necessário um tempo longo para montar toda a estrutura de retirada da salamandra e grande parte deste líquido foi solidificado. Devido ao longo tempo gasto para a preparação dos dispositivos de drenagem, só foi possível realizar a drenagem de uma pequena parte do material contido no cadinho (aproximadamente 100 t), pois o mesmo já havia solidificado. Com isto, no retorno do alto-forno 3, após aproximadamente cinco meses de paralização, a dilatação do volume residual de gusa e escória remanescentes nesta região provocariam tensões nos refratários e carcaça de aço do cadinho, podendo levá-lo a grandes deformações e até o seu trincamento.

Assim, no retorno em operação do alto-forno, sabendo das conseqüências que a dilatação excessiva poderia causar na estrutura de aço que compõe o cadinho, montou-se dispositivos ao redor desta região do forno para monitoração das possíveis deformações. Foram utilizadas fitas metálicas para acompanhamento do aumento de seu perímetro, strain gauges para medição da deformação pontual, barras de referência para avaliação das alterações do raio e deslocamentos e também medições empregando-se a técnica de emissão acústica para detecção da liberação de energia devido a tensões, transformações metalúrgicas, deformações plásticas e até fraturas que ocorrem no material avaliado. A monitoração foi realizada durante a partida do forno, identificando e servindo de ferramenta de análise para o controle da integridade do cadinho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A salamandra, composta de gusa, coque e escória ficou retida e solidificou no cadinho. Com o resfriamento, a salamandra contraiu-se ao longo do tempo, gerando espaços vazios entre o bloco refratário e a salamandra, pois só foi possível a drenagem parcial da salamandra. No retorno do alto-forno 3, o gusa produzido preenche os vazios entre o bloco refratário do cadinho e a salamandra solidificada, trocando calor e solidificando em seguida. Com o aumento da produção de gusa, tem-se a transferência de calor entre o gusa produzido e a massa solidificada no fundo do cadinho, gerando uma expansão volumétrica da massa solidificada, a qual cria tensões no refratário e na carcaça. Estas tensões podem provocar deformações, capazes de gerar e propagar trincas (Figura 1).

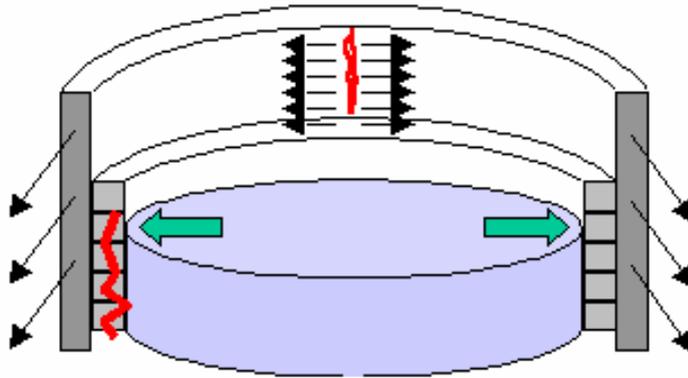


Figura 1 - A expansão volumétrica da salamandra exerce pressão nos refratários e na chapa da couraça do cadinho

Em face ao problema apresentado, foram tomadas ações de monitoramento e controle para preservação do cadinho durante o retorno a operação do alto forno 3.

2.1 Metodologia

A seguir são apresentadas as medidas operacionais juntamente com as metodologias empregadas para que fosse possível acompanhar a seqüência dos fatos que comprometessem o retorno do alto-forno 3, após paralisação por 5 meses.

2.1.1 Medidas adotadas

Pelas condições em que o alto-forno se encontrava, decidiu-se retornar sua operação realizando as corridas somente por um dos quatro furos de gusa existentes. Pela melhores condições optou-se pelo furo de gusa nº 3.

A partir da escolha do furo de gusa, foi iniciada a abertura das ventaneiras acima desta região de forma sequenciada e gradativa. O que levaria ao princípio de fundir e consumir a salamandra sempre por um mesmo lado (por quadrantes), com o objetivo de minimizar o efeito da dilatação radial sobre o cadinho.

A fim de auxiliar nas decisões, avaliar tendências, identificar regiões críticas e prever efeitos danosos no cadinho, decidiu-se por instalar e utilizar sistemas de monitoramento que abrangessem as seguintes condições:

- Evolução da temperatura e fluxo de calor dos refratários do cadinho (termopares existentes);
- Dilatação radial (barras de referência)
- Dilatação no perímetro externo da couraça (medido pela fita metálica)
- Avaliação da tensão da couraça (Strain Gauges ou extensômetros)
- Monitoração contínua das ondas elásticas por emissão acústica (sensores e guias de onda).

2.1.2 Monitoramento

- *Temperatura e fluxo de calor*

Utilizou-se os valores das temperaturas dos termopares dos níveis HB2 (Elevação: + 5.006 mm) e HB3 (Elevação: + 5.706 mm), aplicou-se a Equação de Fourier. A Figura 2 mostra a evolução do fluxo térmico do cadinho durante retorno operacional do alto-forno.

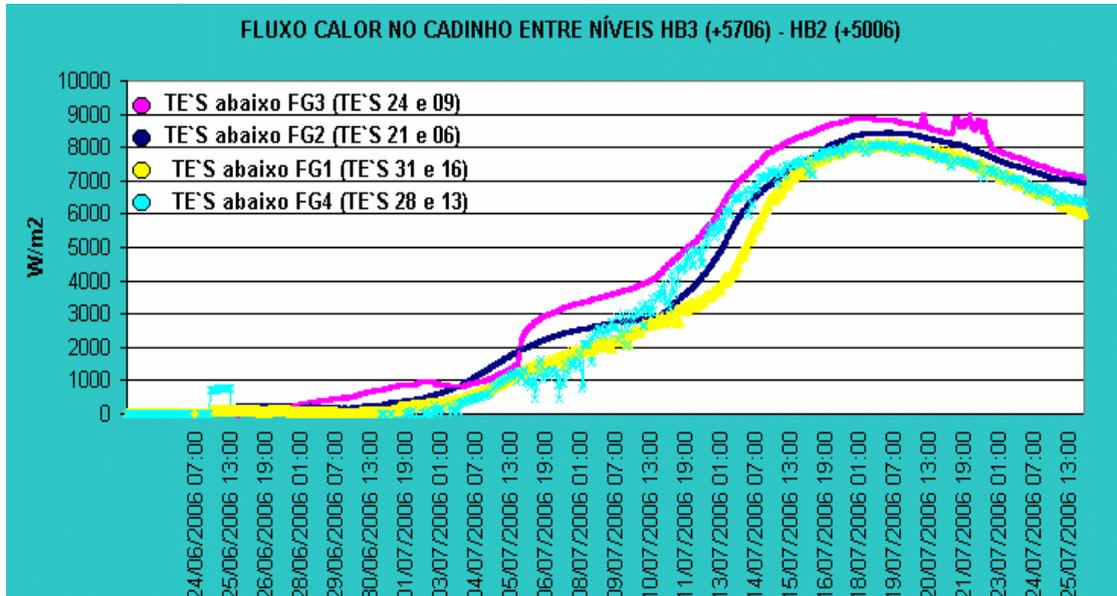


Figura 2 – Fluxo de Calor no cadinho durante o retorno do alto-forno 3

- *Dilatação Radial por barras de referência*

Foram instaladas na elevação 8.300mm, 6 barras soldadas na carcaça do cadinho que forma alinhadas a outras barras fixadas nas colunas de sustentação do forno, com intuito de se medir a dilatação radial e possíveis deformações oriundas de forças de momento. A Figura 3 mostra a evolução dos valores obtidos.

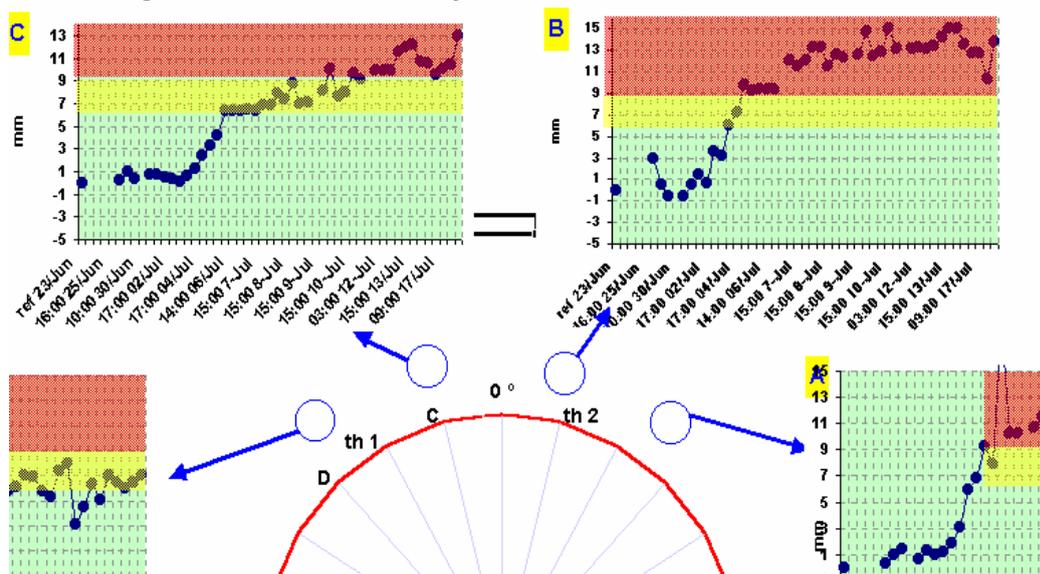


Figura 3 – Evolução da variação das medições das barras fixadas

- *Dilatação no perímetro externo da couraça (expansão da fita metálica)*

Foram instaladas fitas metálicas em dois níveis (elevação 7.191 e 8.370 mm), esticadas através de molas. A Figura 4 mostra a evolução do aumento do perímetro do cadinho.

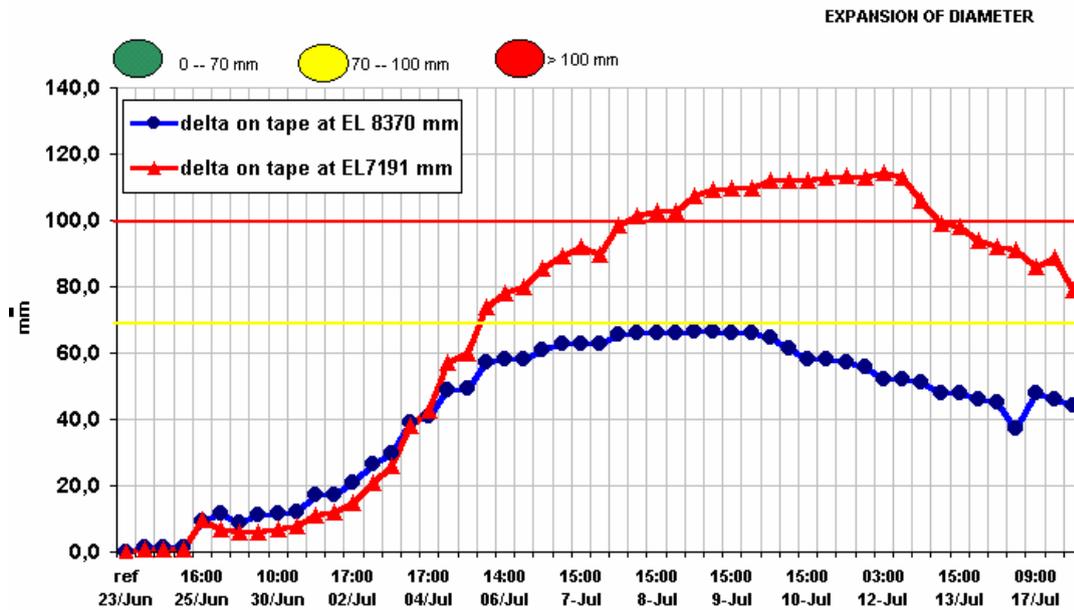


Figura 4 – Evolução da variação de perímetro do cadinho medida nas fitas.

- *Avaliação da tensão da couraça utilizando-se Strain Gauges (extensômetros)*

Foram selecionados extensômetros unidirecionais, específicos para aço, com alta capacidade de alongamento. Na sua instalação (Figura 5), tomou-se precauções para evitar umidade, utilizando proteções de silicone e anteparos específicos para desvio da água de refrigeração. Uma ponte extensiométrica foi utilizada para realizar as medições nos 10 extensômetros posicionados eqüidistantes de 36° ao longo do perímetro do cadinho, na elevação 8.100 mm.



Figura 5 – Detalhamento da instalação dos extensômetros (Strain Gauges)

O aço utilizado na região do cadinho é o ASTM A-516 Gr 70, com espessura igual a 70 mm. Segundo a norma, este aço apresenta limite de resistência entre 485 a 660 MPa, e limite de escoamento mínimo de 260 MPa. Foram adotados os resultados determinados pelos ensaios mecânico realizados na chapa retirada para abertura de furo para a corrida da salamandra. Os resultados de tensões geradas, medidos durante o processo de retomada do alto-forno 3 são mostrados na figura 6, onde são comparados com o comportamento, em médias diárias, de outro alto-forno brasileiro durante retorno à operação com salamandra também solidificada.

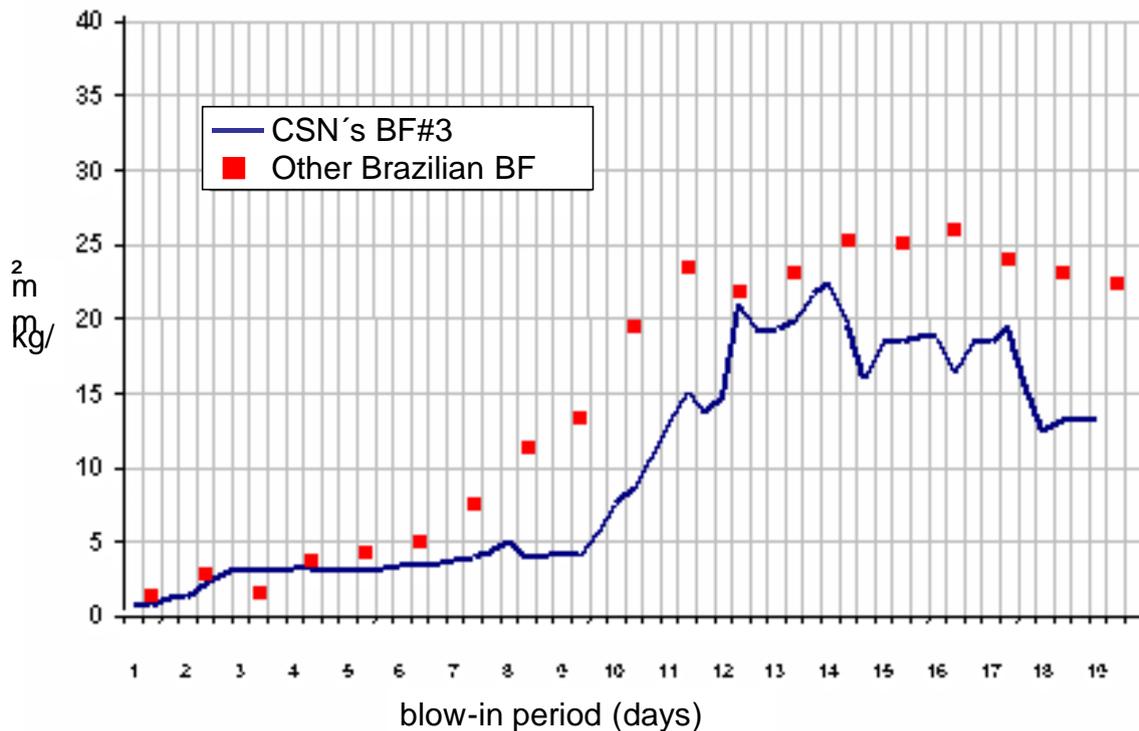


Figura 6 - Comparação da evolução das tensões geradas durante o retorno do alto-forno 3 da CSN e outra operação de retorno de alto-forno no Brasil com salamandra solidificada.

- *Monitoração contínua por emissão acústica (Sensores e guias de onda).*

A técnica de Emissão Acústica é definida como o transiente de ondas elásticas gerada pela rápida liberação de energia de fontes localizadas no interior do material. Estas fontes incluem: Crescimento sub-crítico de trincas, descolamento e fratura na região de maior concentração de tensões dos contornos de inclusões e precipitados no material, transformações metalúrgicas e deformações plásticas no material e vazamentos;

A propagação destas ondas são atenuadas ao longo do percurso no material, à partir da fonte de emissão, portanto a distribuição de sensores na superfície do equipamento torna-se importante para que seja possível identificar todas as fontes geradores de onda na estrutura.

O deslocamento das ondas, quando chegam à superfície do equipamento (cadinho) são transformadas pelos sensores (Figura 7) em sinais elétricos, conforme descrição apresentada a seguir.



Figura 7 – Detalhamento da instalação dos sensores com guias de onda na superfície da couraça do cadinho do alto forno

Dos sinais captados pelos sensores são extraídas as informações necessárias para caracterização da fonte emissora. Alguns parâmetros, tais como amplitude, tempo de subida do sinal, contagens, duração e energia do sinal são exemplos de resultados necessários para análise do ensaio. Durante o tempo de realização do ensaio, as ondas geradas, que podem ter característica contínua ou discreta, são acumuladas em arquivos de grande extensão, fato que explica a maior aceitação e melhores resultados da técnica com o desenvolvimento mais recente de recursos computacionais compatíveis.

Além do tratamento das ondas para identificação e caracterização das fontes de emissão, um passo importante da técnica diz respeito a localização das fontes, que são obtidas através de algoritmos que separam os primeiros sinais detectados por um sensor, localizando-as geometricamente. Para o cadinho do alto-forno 3 foram utilizados um total de 24 sensores, distribuídos nos níveis 6.850 e 9.350 mm

No início das atividades de monitoramento, o sistema de medição acústica identificou diversas fontes geradoras de onda na estrutura, entre elas, impactos mecânicos na carcaça do cadinho, abertura e vazamentos realizadas pelos canais de corrida, e também efeitos da água de refrigeração sobre estrutura de aço.

Durante o retorno do alto-forno, foram observados atividades relacionadas ao vazamento do furo de gusa 3, que podem ser observados no monitoramento relativo ao período de 11/07/2006 a 12/07/2006, conforme plotado nos mapas 3-D e 2-D das figuras 8 e 9, respectivamente. As regiões que apresentaram maior ocorrência de eventos (acima de 3 eventos) em uma mesma região geram um *cluster*, caracterizados de forma crescente nas cores verde, azul e vermelho, dependendo da intensidade e freqüência das energias captadas. A tendência destes eventos, medida pela energia associada, foi monitorada, conforme exemplo da figura 10, permitindo o controle do processo de preservação da parede do cadinho.

PERÍODO DE 11.07.06 (16:20h) ATÉ 12.07.06 (05:20h)

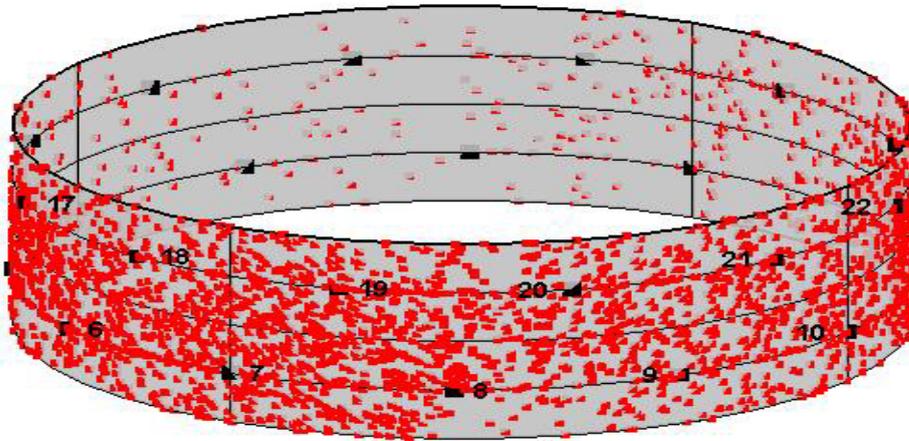


Figura 8 - Mapa 3-D de Plotagem dos eventos captados pelos sensores de emissão acústica instalados na região Cadinho

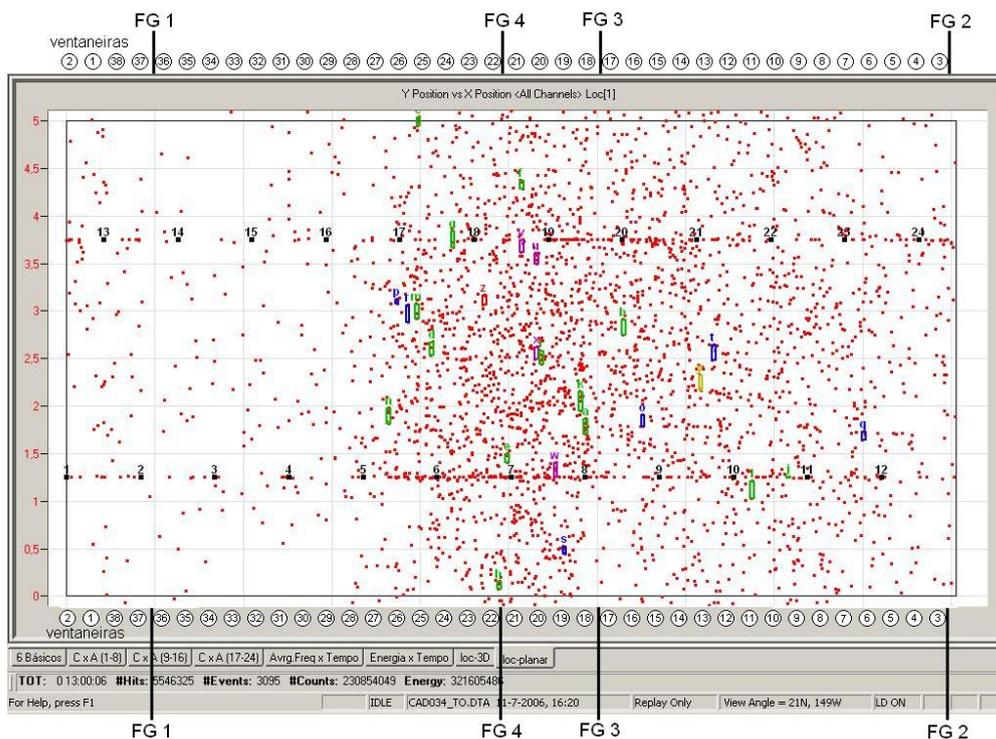


Figura 9 - Mapa 2-D de Plotagem dos eventos e "clusters" captados pelos sensores de emissão acústica.

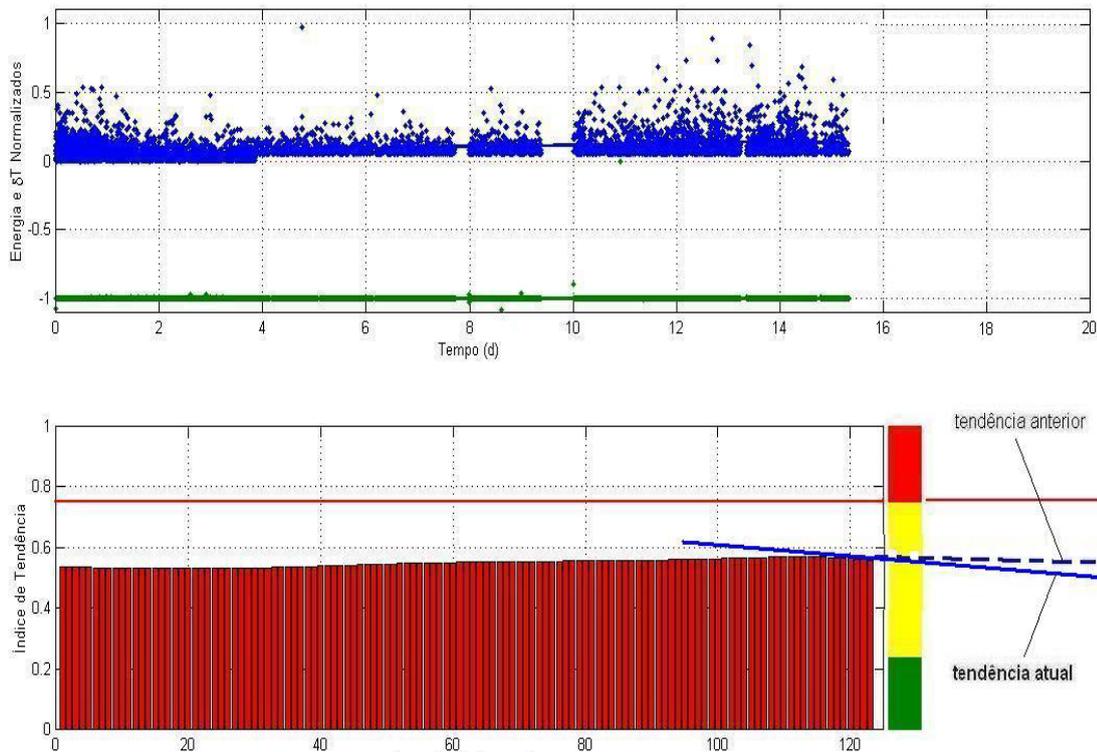


Figura 10 - Gráfico de tendência de eventos captados pelos sensores de medição acústica

2.2 Controle e Avaliação

Durante o período de retorno do forno, foram realizadas reuniões diárias para avaliação e tomada de decisão seguindo a metodologia de análise de tendências.

Os resultados de cada sistema de monitoramento eram previamente analisados e apresentados em gráficos tipo “farol” com os índices de criticidade seguindo a ordem de cores verde (normal), amarelo (alerta) e vermelho (crítico). A partir desta apresentação foi criado um índice global de criticidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Faixa de criticidade de controle

ÍNDICE DE CRITICIDADE	FAROL GLOBAL	AÇÃO
0 a 30% dos sistemas com faróis vermelhos	VERDE	Manutenção do programa
31 a 69% dos sistemas com faróis vermelhos	AMARELO	Tomar ações de alerta e interromper evolução do programa
> =70% dos sistemas com faróis vermelhos	VERMELHO	Recuar ações e tomar ações de emergência

A Figura 11 mostra um exemplo de avaliação de gráfico farol para os indicadores de controle da expansão da carcaça.

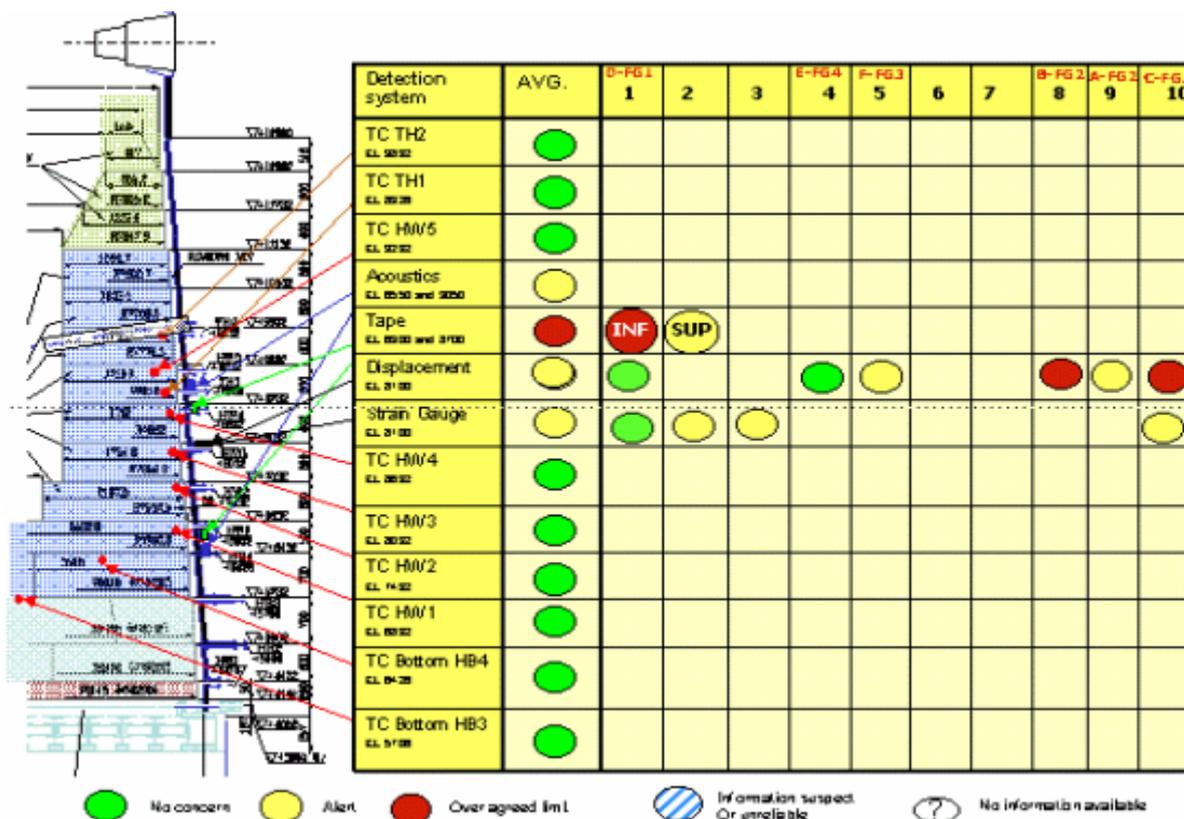


Figura 11 - Modelo de avaliação de criticidade global dos sistemas de monitoramento.

3 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Observou-se que, o fluxo de calor no furo de gusa 3 foi maior que os demais por ter sido a região escolhida para iniciar a partida do forno, e em consequência iniciou-se naquela região a fusão da massa sólida. Devido a este procedimento adotado, somente após 24 dias de operação foi obtido o seu nível mais alto de expansão, sendo que este efeito já era esperado;

- Devido a possíveis interferências da umidade, nesta aplicação, é recomendado a utilização de extensômetros a prova de água, colados com silicones especiais mais resistentes a ação de água de refrigeração do cadinho;

- Com 18 dias do forno em operação a fita indicou a maior dilatação no perímetro e comparando os valores das fitas com os valores micrométricos por metro dos extensômetros, convertidos para o perímetro total, foi observado o mesmo comportamento, conforme mostra a Figura 12. Cabe o comentário sobre a fita da elevação 7.191 mm, a qual apresentou um aumento permanente na medida de dilatação devido a efeito da pressão incidente da água de refrigeração sobre a mesma;

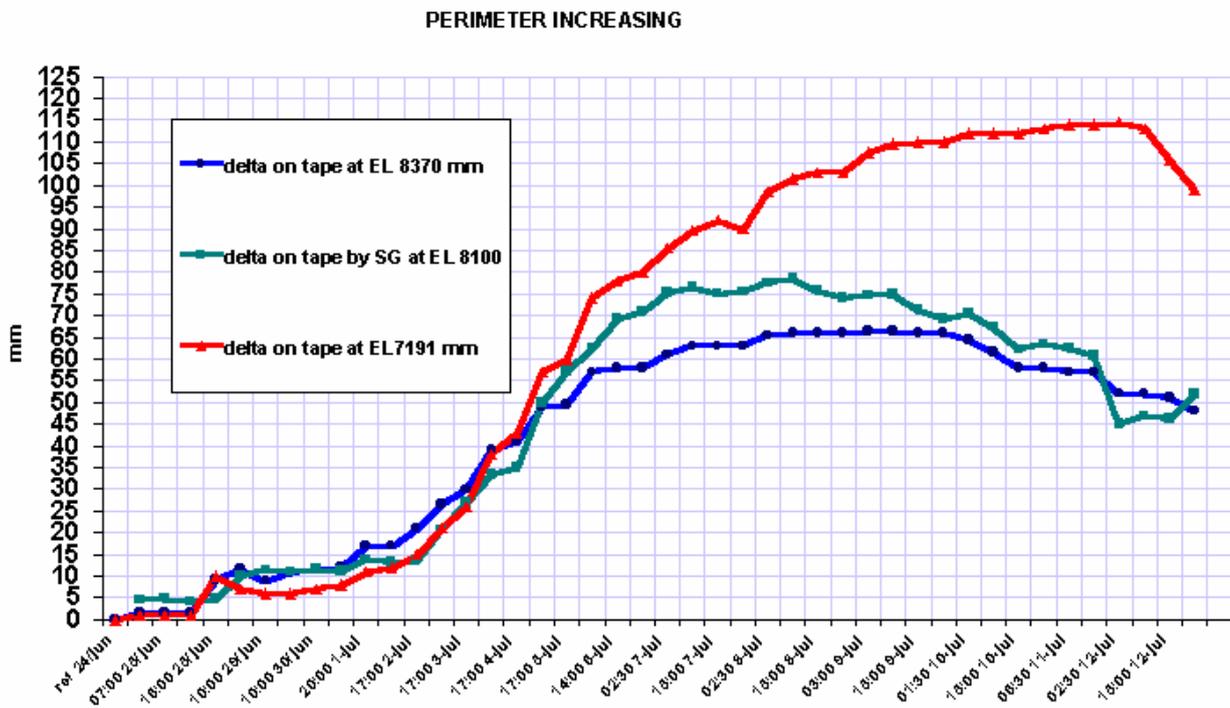


Figura 12 - Comparação entre a evolução do aumento do perímetro do forno pelas medições das fitas e conversão pelos extensômetros.

- A análise comparativa dos diferentes sistemas de monitoramento utilizados no retorno a operação do alto-forno indica que o comportamento da carcaça do cadinho apresentou deformações irregulares, influenciadas diretamente pelos parâmetros operacionais do forno, tais como: aberturas de ventaneiras, variação da pressão de sopro, corridas em canais diferentes, bem como variação da vazão de água de refrigeração da carcaça e fundo do cadinho;

- O sistema de monitoramento realizado demonstrou ser de vital importância para o retorno seguro da operação do alto-forno 3 da CSN, o que levou em momentos de picos de deformação a tomadas de ações em emergência para conter esta elevação;

- Após análise comparativa dos resultados de tensão obtidos em outro forno, observa-se que a CSN conseguiu retornar a operação com níveis de valores menores;

- A não aplicação destas técnicas já acarretaram paralisações por tempo indeterminado de altos fornos, devido a ocorrência de grandes deformações seguido abertura de trincas no cadinho.

Agradecimentos

Agradecemos a participação da Gerências GGAF, GAF, GMG, GEF, GGDP, GLD e GGPS da CSN, em especial ao Brandão, Pedro Coutinho, Francisco Nóbrega, Pedro Emídio, Carlos Guinâncio, Heitor Nogueira, Cláudio Veríssimo, Gilson Henrique, Reginaldo Toledo, Wilson Murilo, Eliane Guedes, Robson D. Caetano, Hilton Zanetti, José Arimathéa e Tchê. Da PASA, os colaboradores Amaury F.dos Santos e Alberto C. Braga Jr.

REFERÊNCIAS

- 1 SAITO, N., NKK (atual JFE) – correspondência trocada em 24/11/99 sobre comportamento de expansão de salamandra
- 2 SANTOS, Amaury F.dos; Braga Jr, Alberto C. - Monitoração Contínua por Emissão Acústica do Alto-Forno 3 da CSN - 24 de junho a 18 de julho de 2006 –. PASA – Physical Acoustics South America
- 3 MILLING O.; Everson G. - Blast Furnace Heart Jacket Monitoring & Design – (Corus R, D & T, Teesside Technology Centre – Middlesbrough – United Kingdom.
- 4 JAMES, Thomas E. - Cooling Hazards in High Tonnage Carbon Hearths — Bethlehem Steel Corporation, Pennsylvania
- 5 BENTES, Miguel A.G. ; Mello, A.H.B. ; Peixoto Marco. P. S. - (CSN - Brazil), LAAR, R. J.; van Oudenallen R.G.; va Straaten V.W.B. (Danieli Corus BV;) Andreev; K. (Corus, Ceramics Research Centre) – the Netherlands. Expansion Phenomena in Blast Furnace Hearths after Blow-in – Paris - France