

# PROJETO DATA LOGGER: AVALIAÇÃO DO PROCESSO E MODELOS DO FORNO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS Nº 2 DA ARCELORMITTAL TUBARÃO<sup>1</sup>

*Alexander de Oliveira Botelho<sup>2</sup>*

*Leandro de Jesus Candiano<sup>3</sup>*

*Eduardo Judice de Novais<sup>4</sup>*

*Leonardo Lira Alves<sup>4</sup>*

*Lara de Assis Moreira<sup>5</sup>*

## Resumo

A ArcelorMittal Tubarão, empresa localizada em Serra/ES, tem investido na ampliação de sua capacidade de produção de bobinas de aço no laminador de tiras a quente (LTQ), elevando de 2.4 Mt/a para 4 Mt/a em 2009. Dentre as modificações está incluída a implantação do segundo Forno de Reaquecimento de Placas e a reestruturação do sistema de otimização do Nível 2 para o gerenciamento simultâneo de dois (02) fornos. O propósito deste trabalho é apresentar o projeto Data Logger que tem como base a utilização de um equipamento que permite a monitoração das temperaturas reais em pontos definidos no interior de uma placa de aço, durante o processo de reaquecimento de placas, mostrando o sucesso da integração (fornecedor x entidade de ensino x empresa) no desenvolvimento deste projeto industrial para a obtenção dos seguintes resultados: conhecer o perfil real de reaquecimento das placas; comparar os valores medidos com os valores calculados pelos modelos do Nível 2 do forno; e conhecer o comportamento térmico real do forno de reaquecimento.

**Palavras-chave:** LTQ; ArcelorMittal; Fornos de reaquecimento; Automação; Data Logger.

## DATA LOGGER PROJECT: PROCESS AND MODEL EVALUATION OF ARCELORMITTAL TUBARÃO SLAB REHEATING FURNACE Nº 2

### Abstract

The ArcelorMittal Tubarão, located in Serra/ES, has been investing to improve the Hot Strip Mill (HSM) production capacity, from 2.4 Mt/a to 4 Mt/a since 2009. Among other modifications, it is included the implementation of second Slabs Reheating Furnace and adaptation of Level 2 optimization system to manage both furnaces. This paper describes the Data Logger project based on usage of a special equipment that allows to gather real measured temperatures at defined positions inside of a steel slab, during the reheating process. This paper also shows the successful integration (supplier x university x steel industrial company) on this industrial project development to evaluate the following results: to know the real slab reheating profile; to compare measured values with computed values by Level 2 models; to know the real thermal behavior of the second Slabs Reheating Furnace.

**Key words:** HSM; ArcelorMittal; Reheating Furnace; Automation; Data Logger.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 15º Seminário de Automação e TI Industrial, 20 a 22 de setembro de 2011, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> Especialista de Engenharia de Automação da ArcelorMittal Tubarão – Engenheiro Mecatrônico.

<sup>3</sup> Técnico de Controle de Processo – ArcelorMittal Tubarão – Engenheiro de Automação e Controle.

<sup>4</sup> Especialista de Laminação de Tiras a Quente da ArcelorMittal Tubarão – Engenheiro Metalúrgico.

<sup>5</sup> Coordenadora de Processo da Fives Brasil – Engenheira Eletricista.

# 1 INTRODUÇÃO

Dentro do projeto de expansão da ArcelorMittal Tubarão, com o objetivo de diversificar seus produtos e expandir seus negócios, foi implantado em 31/08/2002 o LTQ - Laminador de Tiras a Quente.

Com o investimento para elevação da capacidade anual de 2,4 milhões de toneladas para 4 milhões de toneladas foi adicionado, além de outros equipamentos, o segundo forno digital de reaquecimento de placas (11/06/2009), também fornecido pela Fives Stein e cujo sistema de otimização do Nível 2 foi modificado para realizar o gerenciamento completo de dois fornos.

A característica deste forno digital é operar com os queimadores sempre na condição de somente aberto (100%) ou somente fechado (0%), desta forma, a demanda de calor necessária é obtida através da variação do tempo de abertura dos queimadores, garantindo assim uma combustão otimizada.

Apresenta-se abaixo uma visão dos principais equipamentos que compõem o laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, destacando-se a localização do segundo forno de reaquecimento de placas.

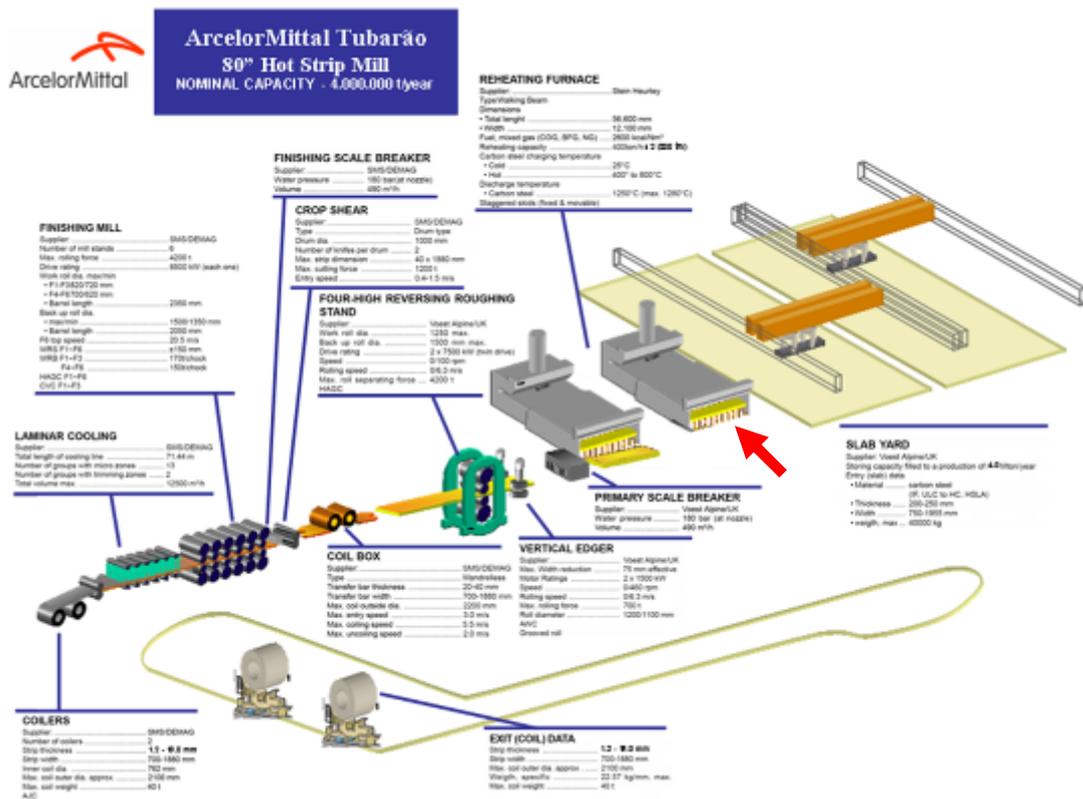


Figura 1. Layout do LTQ da ArcelorMittal Tubarão.

Neste projeto de expansão da capacidade produtiva para 4 Mt/ano, a especificação do segundo forno de reaquecimento de placas contemplou como um dos itens de desempenho, a realização de um teste denominado *data logger*. Este teste consiste na utilização de um equipamento que permite a monitoração de até 16 pontos de temperatura no interior de uma placa de aço, durante o processo de reaquecimento das placas permitindo assim conhecer as condições reais e também compará-las com os modelos do sistema de Nível 2.

## 2 PRINCIPAIS CONCEITOS

### 2.1 Marca de Skid

As placas dentro do forno de reaquecimento são apoiadas em uma estrutura refrigerada denominada *skid* fixos e móveis, que fazem parte do mecanismo de *walking beam* responsável pela movimentação física do material. O contato da placa com esta estrutura gera um resfriamento na superfície inferior do material se comparado com outra posição na qual não existe contato. Esta diferença de temperatura entre estes pontos é denominada marca de *skid*. A Figura 2 mostra o *layout* dos *skids* fixos e móveis, a defasagem destes *skids* e as posições de contato com uma placa (Corte AA').

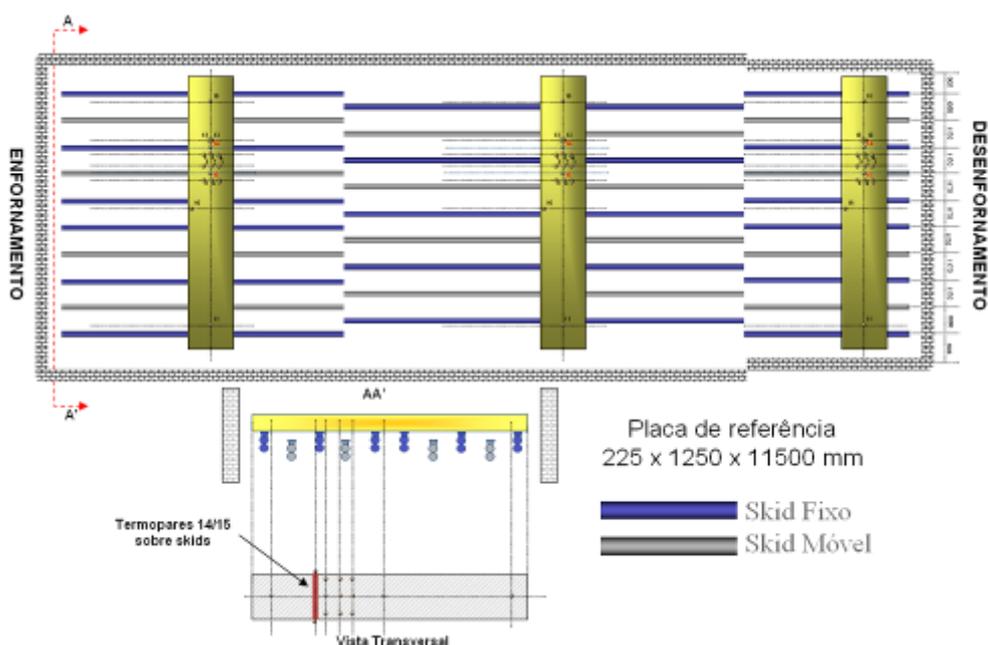


Figura 2. Layout da estrutura dos *skids* e posicionamento dos termopares na placa de teste.

### 2.2 Código Bisra

O código B.I.S.R.A significa *British Iron and Steel Research Association* e representa a definição das características metalúrgicas de aquecimento (Ex: condutividade térmica) baseada na composição química de cada placa.

### 2.3 Uniformidade Térmica

A uniformidade térmica é um requisito metalúrgico utilizado no cálculo da curva ótima de aquecimento e representa o valor máximo absoluto permitido da diferença entre a temperatura superficial e do centro da placa  $[(T1 - T3)$  ou  $(T5 - T3)]$  (Figura 3).

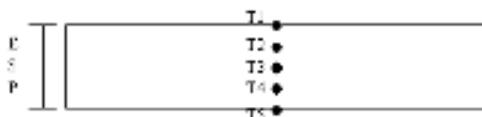


Figura 3. Malha do modelo matemático do Nível 2.

Quanto menor o valor da uniformidade, melhor é a homogeneidade térmica do aquecimento.

## 2.4 Índice de *Wobbe* (IW)

O índice de *wobbe* é a variável que reflete as características térmicas do gás misto,

sendo representado pela equação  $IW = \frac{PCI}{\sqrt{\rho}}$  no qual PCI é o poder calorífico inferior e  $\rho$  é a densidade do gás.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Equipamento de Medição

Neste projeto o fornecedor do forno de reaquecimento de placas nº 2 foi responsável por disponibilizar o equipamento que permitisse realizar as medições e registro das temperaturas na placa de teste.

A ArcelorMittal Tubarão e Fives Stein estabeleceram uma parceria com o GAMSET (Grupo de Análise e Modelagem de Sistemas e Equipamentos Térmicos) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais para a prestação de serviço contemplando:

- orientação sobre instalação do sistema de medição e registro de temperaturas;
- especificação de termopares e material isolante para o sistema de medição;
- arranjo final do sistema de medição, acompanhamento de campo dos procedimentos de medição e registro das temperaturas; e
- elaboração de relatório técnico sobre os resultados das medições.

O equipamento utilizado foi do fabricante Datapaq com dois registradores de oito canais cada um (Figura 4), no qual a manutenção e calibração são realizadas pela empresa TekBrasil.

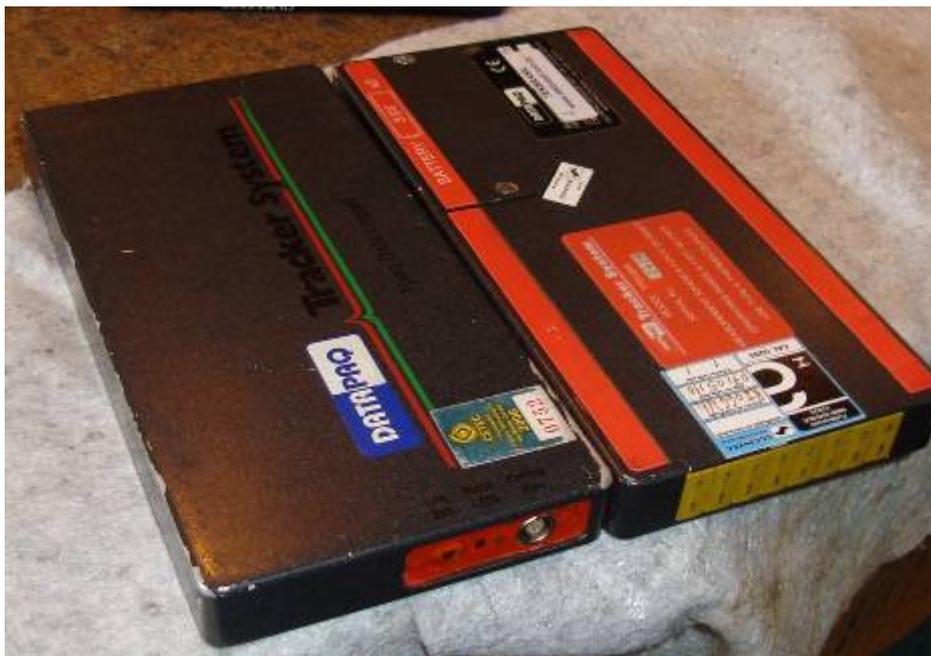


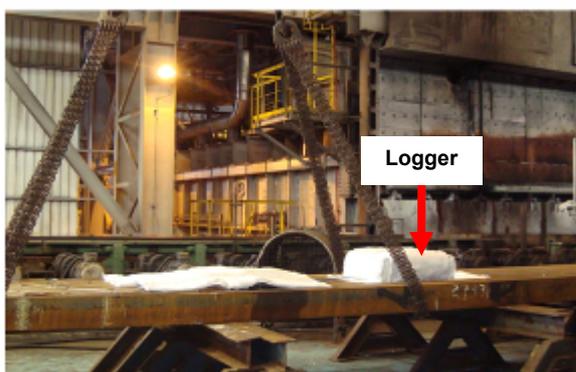
Figura 4. Registradores DATAPAQ.

### 3.2 Pontos de Medição

A ArcelorMittal Tubarão e Fives Stein definiram em conjunto o posicionamento dos termopares tipo K com o objetivo de conhecer os principais pontos térmicos do forno de reaquecimento de placas nº 2 e da placa de aço, dentre eles podemos destacar:

- eficiência da defasagem dos *skids* no perfil térmico da placa (termopares T14 e T15);
- temperatura do topo (termopar T11) e cauda (termopar T10) da placa e a respectiva diferença no desenformamento;
- temperatura da face superior da placa (25 mm de profundidade) representado pelos termopares T1, T4 e T7 da Figura 5;
- temperatura no centro da placa (112,5 mm de profundidade) representado pelos termopares T2, T5, T8 da Figura 5;
- temperatura da face inferior da placa (200 mm de profundidade) representado pelos termopares T3, T6 e T9 da Figura 5;
- temperatura do ambiente (superior e inferior) dentro do forno de reaquecimento (termopares T12 e T13 respectivamente);
- termopares T1 a T9 posicionados na metade da largura, mantendo assim compatibilidade para comparação com o modelo matemático do Nível 2; e
- termopar T16 posicionado na metade do comprimento na borda da placa.

A Figura 5 mostra o *layout* de distribuição dos termopares na placa de teste.



Profundidade dos Termopares:  
 1,4 e 7 – 25mm  
 2,5,8,10,11,14,15 e 16 – 112,5mm  
 3,6 e 9 – 200mm  
 12 – Ambiente superior  
 13 – Ambiente inferior

Dimensões da placa de teste  
 (Largura x Espessura x Comprimento)  
 1250 x 225 x 11450 mm

Figura 5. *Layout* das posições dos termopares e placa de teste montada para enformamento.

### 3.3 Definição do Método de Avaliação dos Modelos do Nível 2

A ArcelorMittal Tubarão e Fives Stein definiram em conjunto a forma de utilização dos dados para a avaliação dos modelos matemáticos do sistema de Nível 2.

Neste ponto consideram-se os seguintes itens com relação às tolerâncias das medições:

- termopar tipo K da placa de teste:  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ; e
- termopares do forno e malha de controle:  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.1 Modelo de rastreamento térmico

Para avaliação do modelo térmico da função THE (*Thermal Tracking*):

- o modelo matemático do Nível 2 considera que cada plano horizontal da placa é isotérmico;
- o modelo matemático do Nível 2 representa a temperatura da placa através de cinco pontos distribuídos ao longo da espessura da placa (Figura 6);

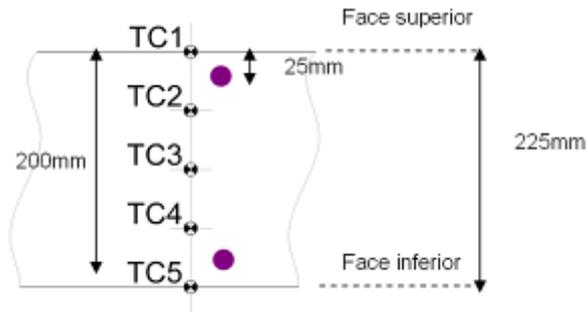


Figura 6. Temperaturas calculadas pelo modelo térmico do Nível 2.

- para comparar as temperaturas medidas na placa de teste (face superior e face inferior) com as calculadas pelo modelo matemático do Nível 2, é necessário ajustar os valores do modelo para a mesma referencia de posição das medições ao longo da espessura da placa, utilizando-se as equações abaixo:

$$\begin{cases} T_{C,Upper} = 2 \cdot (T_{C1} + T_{C5} - 2 \cdot T_{C3}) \cdot \left(\frac{25}{225}\right)^2 - (3 \cdot T_{C1} - 4 \cdot T_{C3} + T_{C5}) \cdot \left(\frac{25}{225}\right) + T_{C1} \\ T_{C,Lower} = 2 \cdot (T_{C1} + T_{C5} - 2 \cdot T_{C3}) \cdot \left(\frac{225-25}{225}\right)^2 - (3 \cdot T_{C1} - 4 \cdot T_{C3} + T_{C5}) \cdot \left(\frac{225-25}{225}\right) + T_{C1} \\ T_{C,Core} = T_{C3} \end{cases}$$

- comparação da temperatura média: a temperatura média calculada pelo modelo térmico (função THE) do Nível 2 ( $\tilde{T}_C$ ) é representada pela equação  $\tilde{T}_C = \frac{1/2 T_{C1} + T_{C2} + T_{C3} + T_{C4} + 1/2 T_{C5}}{4}$

A temperatura média da placa de teste ( $\tilde{T}_M$ ) é representada pela equação

$$\tilde{T}_M = \frac{T_{M,Sup} + 2 \cdot T_{M,Core} + T_{M,Inf}}{4}$$

onde:

- $T_{M,Sup}$  é a mediana das temperatura medidas da face superior da placa (termopares T1, T4 e T7);
- $T_{M,Core}$  é a mediana das temperatura medidas no centro (metade da espessura) da placa (termopares T2, T5 e T8);
- $T_{M,Inf}$  é a mediana das temperatura medidas da face inferior da placa (termopares T3, T6 e T9).

- comparação da uniformidade térmica: a uniformidade térmica calculada pelo modelo do Nível 2 ( $\Delta T_C$ ) é representada pela equação 
$$\Delta T_C = \left| \text{MAX}(T_{C,Upper}, T_{C,Lower}) - T_{C,Core} \right|$$

A uniformidade térmica da placa de teste ( $\Delta T_M$ ) é representada pela equação 
$$\Delta T_M = \left| \text{MAX}(T_{M,Sup}, T_{M,Inf}) - T_{M,Core} \right|$$

### 3.3.2 Modelo de desbaste

O modelo de desbaste consiste em utilizar dados de laminação de cada placa para calcular a temperatura de desenformamento realizando assim uma correção de temperatura no controle do aquecimento do respectivo forno de reaquecimento de placas. Para avaliação deste modelo da função MFB (*Mill Feedback*):

- a placa de teste não pode ser laminada, portanto não é possível diretamente avaliar qual seria o cálculo da temperatura para esta placa;
- a temperatura média da função MFB para a placa de teste [ $T_{FB_{Test}}(N)$ ] é

representada pela equação 
$$T_{FB_{Test}}(N) = \frac{T_{FB}(N+1) + T_{FB}(N-1)}{2}$$
 onde :

- a) FB é a função MFB (Mill Feedback)
  - b) N é a placa de teste
  - c)  $T_{FB}(N-1)$  é a temperatura de desenformamento calculada pela função MFB para a placa laminada imediatamente antes da placa de teste.
  - d)  $T_{FB}(N+1)$  é a temperatura de desenformamento calculada pela função MFB para a placa laminada imediatamente após o desenformamento da placa de teste. Esta placa deve ser desenformada no máximo dez (10) minutos após a placa de teste.
- comparação da temperatura média entre os modelos THE e MFB:  
comparar  $\tilde{T}_C(N)$  com  $T_{FB_{Test}}(N)$
  - comparação da temperatura média do modelo MFB com a placa de teste:  
comparar:  $\tilde{T}_M$  com  $T_{FB}(N-1)$ ,  $\tilde{T}_M$  com  $T_{FB_{Test}}(N)$  e  $\tilde{T}_M$  com  $T_{FB}(N+1)$

## 3.4 Preparação da Placa e Definições do Processo

### 3.4.1 Preparação da placa de teste

Podemos citar as seguintes etapas de preparação da placa de teste:

- usinar a placa conforme desenho técnico com as definições das posições nos quais os termopares serão montados;
- medir todas as furações e comparar com desenho técnico;
- tamponar os furos com gazes para evitar penetração de sujeiras durante lavagem;
- lavar com água e escovar toda a placa;
- secar a placa com pano limpo para o início da marcação;
- identificar os furos conforme desenho técnico da placa de teste;
- fazer a limpeza de todos os furos com álcool e gazes e medi-los novamente;

- traçar o percurso dos termopares;
- aferir todos os termopares e anotar os valores obtidos;
- identificar cada termopar conforme desenho técnico;
- instalar os termopares conforme desenho técnico realizando a selagem dos furos com material refratário com elevada condutividade térmica (alta concentração de alumina);
- fixar os termopares com cantoneiras e realizar a organização final dos cabos dos termopares, removendo as sobras de refratário;
- instalar o equipamento *data logger* devidamente isolado com manta refratária;
- preencher a caixa de refrigeração do equipamento com água a temperatura ambiente;
- instalar os registradores *data logger* e conectá-los aos termopares, verificando a coleta e registro dos dados; e
- finalizar a preparação utilizando manta refratária (suporta temperaturas até 1.400°C);

Desconsiderando o tempo de usinagem, é necessário aproximadamente 8 horas para realizar a preparação da placa de teste. A equipe técnica de execução contou com o apoio de quatro funcionários do controle de processo, um soldador, um mecânico, um supervisor além do suporte das áreas envolvidas (quando necessário).



Figura 7. Placa de Teste em processo de usinagem.

A Figura 8 mostra o equipamento *Logger* em fase final de preparação.

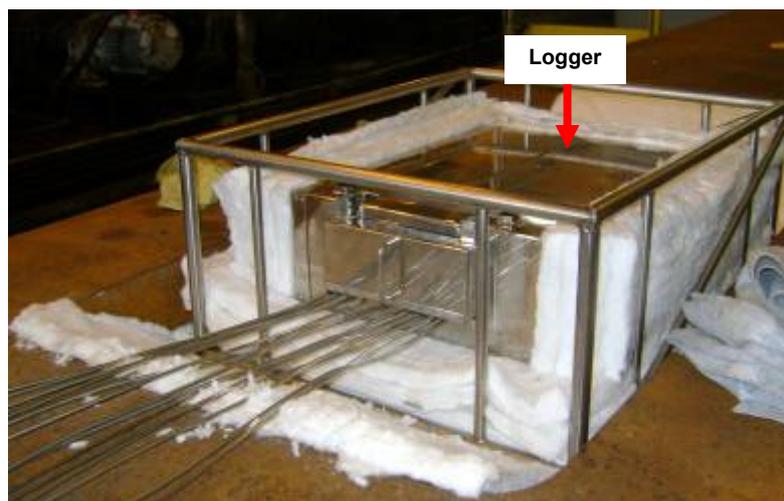


Figura 8. Equipamento em fase final da preparação.

### 3.4.2 Definições do Processo

As definições com relação ao processo de reaquecimento foram estabelecidas de forma a não colocar o equipamento (forno de reaquecimento de placas nº 2) em

risco e manter um ambiente de reaquecimento o mais estável e homogêneo possível, visando minimizar as influências do processo na realização do teste.

Os seguintes pontos devem ser destacados:

- preparação de instruções favoráveis com material não crítico para a laminação;
- pelo menos as três placas anteriores e as três placas posteriores devem ter dimensões similares o mais próximo possível da placa de teste. Estas placas também devem possuir o mesmo código BISRA para permitir comparação dos modelos matemáticos do Nível 2;
- a placa anterior e a placa posterior ao *logger* devem ser laminadas nas mesmas condições de processo (Exemplo: número de passes, descarepações utilizadas);
- utilizar o controle das zonas de aquecimento do forno em modo Nível 1, com set-points fixos de temperatura, mantendo os controles em modo automático (gás, ar, pressão interna, índice de *wobbe*, etc...);
- manter o controle do ritmo dos fornos (controle do *walking beam*) em modo modo nível 1, sem utilizar tempo imposto pelo operador;
- não utilizar os ganhos da lógica *fuzzy* nos controladores das zonas no nível 1;
- manter somente o controle dos comprimentos de chama otimizados pelo sistema de Nível 2; e
- sempre que possível, manter ritmo constante de produção na máxima capacidade do forno de reaquecimento de placas nº 2.

### 3.5 Realização do Teste

O teste foi realizado em 08/12/2010 de forma que no momento do enformamento da placa de teste, somente forno de reaquecimento de placas nº 2 estivesse com placas em seu interior. A placa de teste utilizada foi classificada como código BISRA 1 (Aço VG IF Fosforo) com os seguintes dados:

- placa: 2733199521;
- dimensões: 11.450 mm x 1.250 mm x 225 mm;
- hora do enformamento: 13 h e 15 min;
- hora do desenformamento: 15 h e 57 min;
- tempo de permanência real: 162 minutos;
- tempo de permanência previsto: 155 minutos;
- temperatura de enformamento: 30°C;
- temperatura de desenformamento média da placa de teste: 1.281°C;
- medições de temperatura realizadas na placa de teste: a cada 30 segundos;
- abscissa lateral de enformamento: 318 mm.

A Figura 9 mostra o momento do desenformamento da placa de teste.



Figura 9. Desenformamento da Placa de Teste.

Durante o reaquecimento da placa de teste no interior do forno, a velocidade de atravessamento foi constante (Figura 10), obtendo ritmo médio de produção de 387 toneladas/hora.

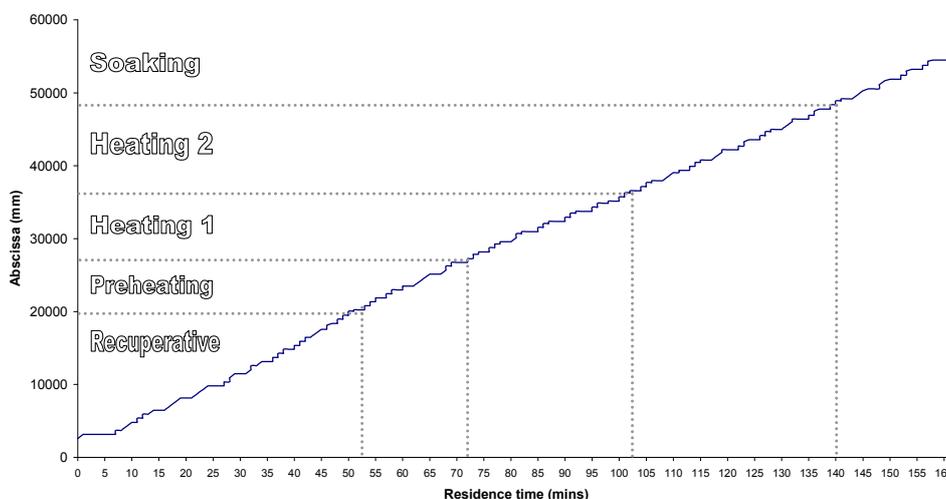


Figura 10. Velocidade de atravessamento.

A distribuição do gás combustível utilizado durante o teste é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição de combustível durante o teste

Tempo	13:15 - 15:26	15:26 - 16:00
BFG (gás de alto forno)	46%	18%
COG (gás de coqueria)	54%	42%
LDG (gás de aciaria)	0%	40%
PCI	2395 kcal/Nm <sup>3</sup>	2411 kcal/Nm <sup>3</sup>

A distribuição percentual dos gases na mistura do combustível mostrada na Tabela 1 encontra-se dentro dos requisitos de controle do projeto (PCI de 2.600 kcal/Nm<sup>3</sup> ± 15% e índice de wobble de 3,079 kcal/Nm<sup>3</sup> ± 20%) visto que o valor do índice de wobble durante o teste (13h15 a 16 h) manteve-se com valor médio de 3.1 e com variação menor que 5% (Figura 11).

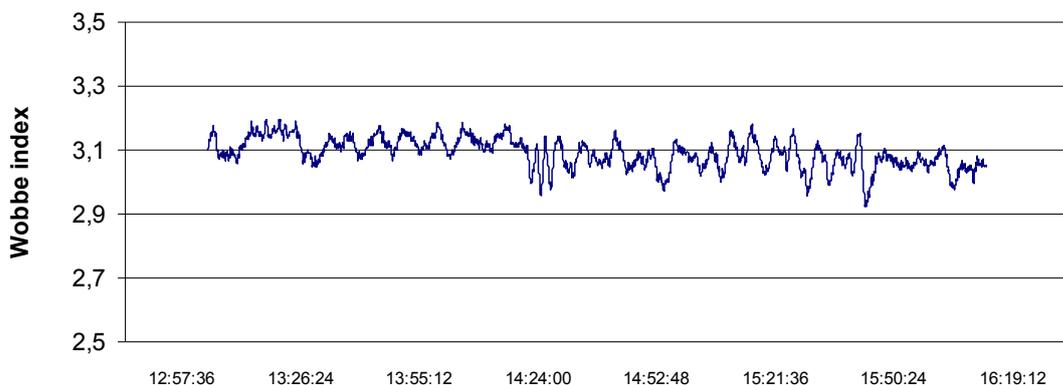


Figura 11. Variação do índice de Wobble.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Marca de *Skid*

A eficiência do projeto de defasagem dos *skids* fixos do forno de reaquecimento de placas é comprovada comparando-se o termopar sobre o *skid* fixo (T14) com os termopares em seqüência (T2 e T5) (Figura 12).

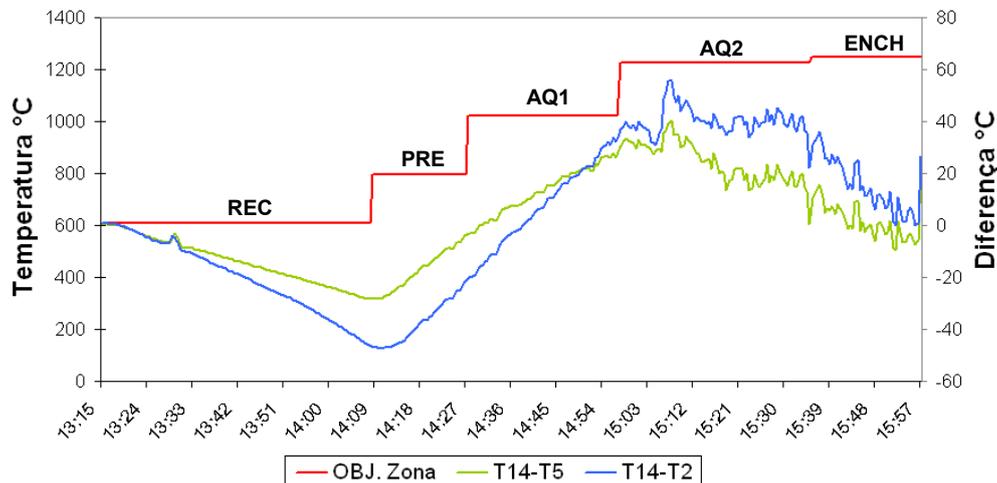


Figura 12. Avaliação da marca de *skid* fixo.

O termopar T14 em relação ao *skid* fixo localiza-se em três posições diferentes ao longo do comprimento do forno:

- primeiro terço: o Termopar T14 está sobre o *skid* fixo o qual é refrigerado, sofrendo assim um déficit (perda) de calor em relação aos termopares em seqüência T2 e T5 que não estão sobre o *skid* fixo.
- segundo terço: o Termopar T14 não está sobre o *skid* fixo, recebendo assim um aporte maior de calor. A curva da Figura 12 se inverte, e o déficit de calor se torna superávit.
- último terço: novamente o Termopar T14 volta para a posição sobre o *skid* fixo, perdendo o excesso térmico (mesmo processo do primeiro terço), voltando ao equilíbrio térmico no momento do desenformamento da placa.

O cálculo da estrutura do *skid* e suas respectivas distâncias (defasagem) foi otimizado pelo fornecedor do equipamento com o objetivo de minimizar a marca de *skid*. O resultado no desenformamento da placa foi de  $-6^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$  (equivalente a  $7^{\circ}\text{C}$ ).

### 4.2 Temperaturas do Topo e Cauda

Observa-se na Figura 13 uma igualdade de valores até o início do aquecimento 1, seguida de uma elevação positiva até final desta zona no qual não existe controle de comprimento de chama. Com o controle de comprimento de chama pelo Nível 2 no aquecimento 2 e encharque, a tendência da curva muda, minimizando as diferenças até o desenformamento que apresentou um valor de  $-5^{\circ}\text{C}$ .

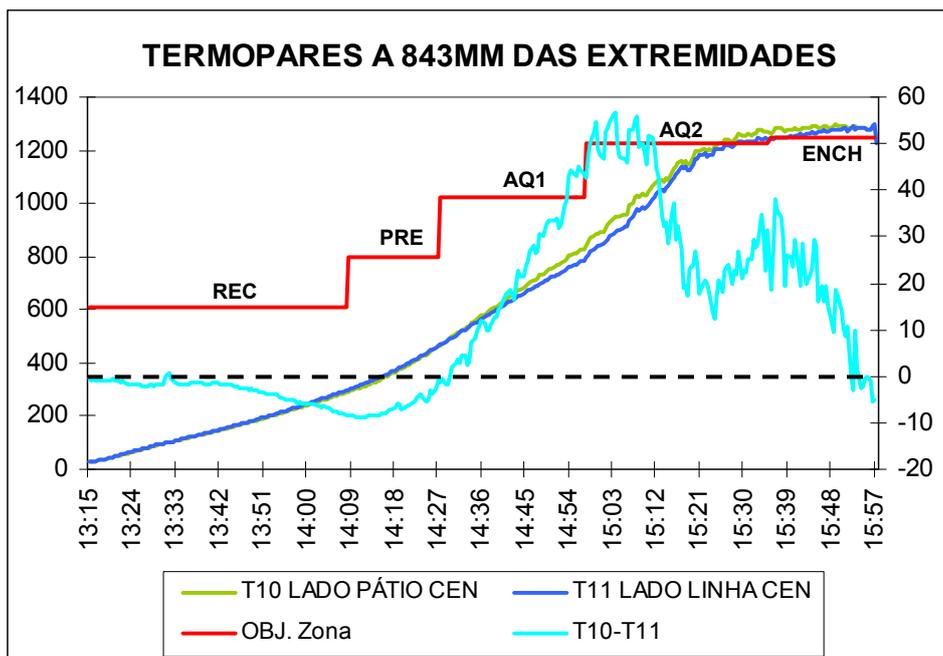


Figura 13. Avaliação da temperatura do topo e cauda.

### 4.3 Avaliação dos Modelos Matemáticos do Nível 2

A ArcelorMittal Tubarão possui para o sistema dos fornos de reaquecimento de placas uma contingência “on line” que permite a alteração de controle dos fornos do servidor de produção para o servidor de contingência sem perda de dados/rastreamento/control, ou seja, o servidor de contingência opera totalmente em paralelo, acessando a mesma base de dados do Nível 1, realizando os mesmos cálculos. A Figura 14 ilustra esta arquitetura simplificada.

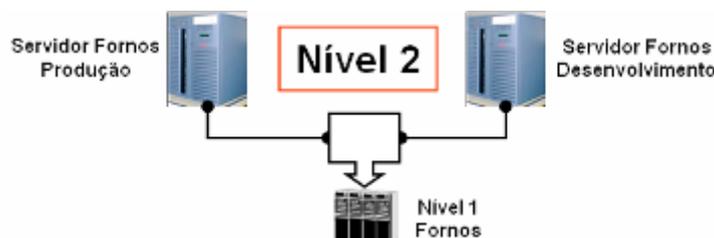


Figura 14. Arquitetura simplificada Nível 2 fornos LTQ.

Esta estrutura foi utilizada visando utilizar três termopares adicionais na zona recuperativa superior com o objetivo de avaliar durante o teste a diferença dos cálculos no modelo térmico.

Outro fator a ser considerado na análise é o posicionamento dos termopares na placa de teste e o posicionamento dos termopares no teto e soleira do forno. Os termopares do forno são utilizados para os cálculos dos modelos matemáticos.

A Figura 15 mostra em azul os termopares do teto do forno e suas respectivas distâncias da parede do forno, os quais são considerados nos cálculos da temperatura do modelo para o perfil do lado pátio. Estes são os valores utilizados para a comparação com as medições da placa de teste, visto que os termopares T1 a T9 da placa de teste estão posicionados somente no lado pátio de placas.

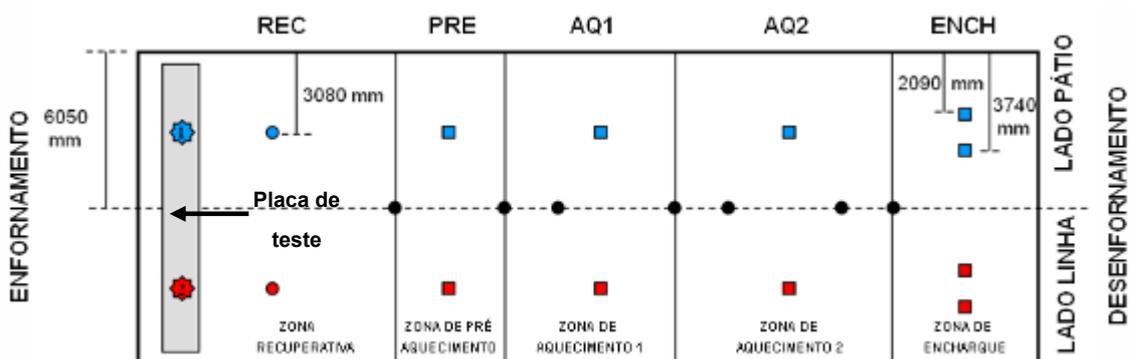


Figura 15. Visão superior dos termopares do teto do forno de reaquisição.

Logo, os cálculos do modelo matemático para a face superior da placa utilizam termopares do teto em diferentes posições se comparadas com as posições dos termopares T1 a T9 da placa de teste (Tabela 2).

Tabela 2. Posicionamento dos termopares

	Posição Termopares - mm
Placa de Teste	3.406, 3.991 e 4.606
Modelo Face Superior	2.090, 3.080, 3.740 e 6.050
Modelo Face Inferior	6.050 mm

A Tabela 3 mostra o resumo dos resultados comparando-se a placa de teste com o modelo térmico.

Tabela 3. Comparação com modelo térmico

Comparação Placa de Teste x Modelo Térmico (Função THE)			
Termopar Tipo K	Temp. Placa de Teste	Temp. Modelo	Diferença
Temperatura Média	1.281°C ± 10°C	1.266°C	15°C
Uniformidade	14°C ± 10°C	34°C	20°C
Face superior - 25 mm	1.290°C ± 10°C	1.287°C	3°C
Centro - 112,5 mm	1.276°C ± 10°C	1.253°C	23°C
Face inferior - 200 mm	1.283°C ± 10°C	1.262°C	20°C

A Tabela 4 mostra o resumo dos resultados comparando-se a placa de teste e o modelo térmico com o modelo de desbaste (Função MFB).

Tabela 4. Comparação com modelo de desbaste

Comparação Placa de Teste x Modelo Desbaste (Função MFB)								
Placa	BQ	Posição	MFB	THE	Logger	ΔMFB_Logger	ΔTHE_Logger	ΔMFB_THE
1793914541	0C02416	Anterior	1254 °C	1269 °C	-----	-27 °C	-12 °C	-15 °C
2733199521	-----	Logger	1250 °C	1266 °C	1281 °C	-31 °C	-15 °C	-16 °C
2776309531	0C02421	Posterior	1246 °C	1267 °C	-----	-35 °C	-14 °C	-21 °C

#### 4.3.1 Cálculos do modelo térmico – servidor produção x desenvolvimento

A Tabela 3 mostra que a diferença no desenforamento para a face superior (25 mm) foi de apenas 3°C, porém a Figura 16 mostra que no início do aquecimento até a zona de aquecimento 1 (AQ1) esta diferença é maior.

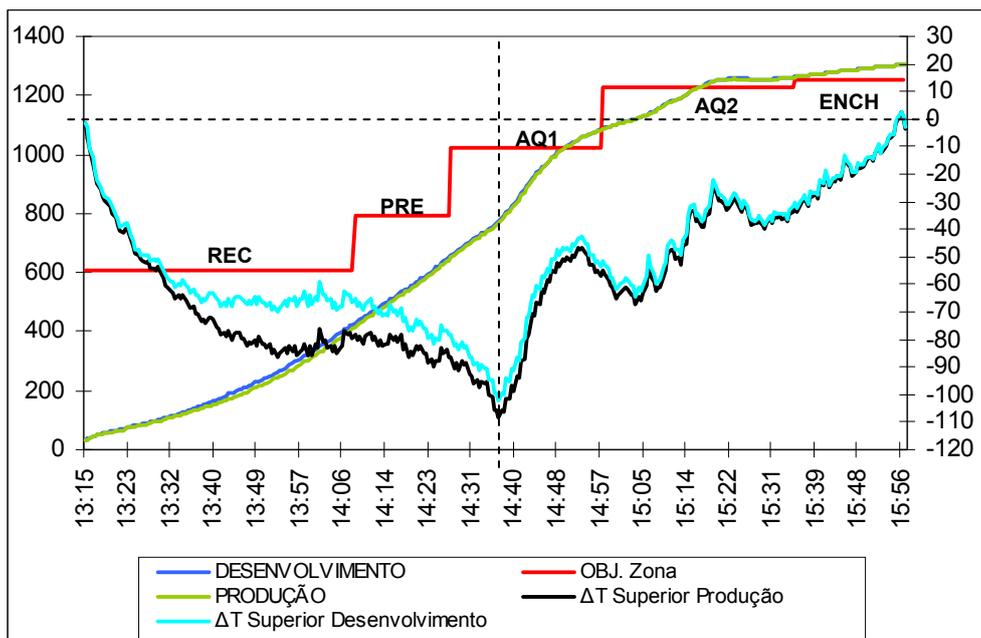


Figura 16. Temperaturas da face superior e diferenças em relação à placa de teste.

A curva azul claro ( $\Delta T$  Superior Desenvolvimento) apresenta uma diferença em relação à placa de teste menor do que a curva preta ( $\Delta T$  Superior Produção) na zona recuperativa até o início da zona de aquecimento 1 (AQ1). Este fato deve-se pela utilização de três termopares adicionais na zona superior de recuperação comprovando sua influência nos cálculos do modelo térmico.

#### 4.3.2 Cálculos do modelo térmico – face inferior

A Tabela 3 mostra que a diferença no desenformamento para a face inferior (200 mm) foi de 20°C. Neste ponto é importante verificar a influência do posicionamento dos termopares citadas na Tabela 2.

O Termopar T9 apresenta a melhor precisão com relação ao cálculo do modelo na face inferior, influenciado por estar localizado a 4606 mm da lateral do forno, sendo o mais próximo da localização física dos termopares da soleira (6.050 mm). A diferença no desenformamento deste termopar foi de 2°C.

## 5 CONCLUSÃO

Considera-se a temperatura do topo e cauda da placa iguais utilizando-se o controle de chama otimizado pelo Nível 2 utilizando *taper* térmico objetivado igual a zero, ou seja, sem diferença entre o topo e cauda.

Considera-se que o modelo térmico está adequado às necessidades de controle, visto que a temperatura média é a variável utilizada na otimização do reaquecimento, estando esta no momento do desenformamento dentro das tolerâncias esperadas (diferença de 15°C).

A diferença entre a medição na placa de teste e os valores calculados pelo modelo térmico podem estar relacionados a alguns fatores, dentre eles podemos destacar:

- emissividades do teto do forno e superfície da placa (valores utilizados podem não estar plenamente ajustados com os valores reais do processo);
- diferentes posições dos termopares citadas na Tabela 2;

- diferença das propriedades termofísicas (Ex: condutividade térmica) da placa de teste em relação ao código BISRA 1.

**Tabela 5.** Comparação com modelo de desbaste

%	Placa de Teste	BISRA 1
<b>C</b>	0,0034	0,06
<b>Si</b>	0,006	0,01
<b>Mn</b>	0,58	0,38
<b>P</b>	0,035	0,017
<b>S</b>	0,0068	0,035
<b>Al</b>	0,03	0,01
<b>Cu</b>	0,004	0,08
<b>Ni</b>	0,004	0,055
<b>Cr</b>	0,019	0,022
<b>Mo</b>	0,001	0,03

O modelo térmico é uma boa referência para ajuste do modelo de desbaste (função MFB).

O modelo de desbaste apresenta diferenças maiores (Tabela 5), sendo um modelo de complexo ajuste afetado principalmente pela medição da temperatura superficial do esboço.

Após a realização deste teste, o modelo de desbaste da função MFB foi modificado para calcular a temperatura de desenformamento utilizando ambas as temperaturas [CBET (Temperatura de entrada da *coilbox*) e a temperatura da RDT (Temperatura na saída do desbaste)] com o objetivo de avaliar o melhor ajuste para este modelo, comparando-o com os cálculos térmicos de cada placa.

Outro aspecto importante foi a absorção do conhecimento necessário para a realização e avaliação deste tipo de projeto e registro do mesmo em padrões internos da empresa.

Uma definição importante para a realização deste tipo de teste em ambiente industrial, permitindo sua comparação com modelos matemáticos é a utilização dos dados até o momento em que a placa atingiu a posição de desenformamento (posição da célula laser, placa ainda dentro do forno), visando evitar a influência nas medições e cálculos referente à abertura da porta de desenformamento, movimentação da placa e o exato momento em que a placa é desenformada no sistema do Nível 2 (manualmente pelo operador).

## Agradecimentos

Aos professores Geraldo Augusto Campolina França e Márcio Ziviani do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG pela excelente qualidade do serviço executado em ambiente industrial permitindo adquirir dados para avaliação térmica.

Ao supervisor de manutenção em instrumentação Roberval Rogerio Costa da Aperam South América (Ex ArcelorMittal Inox Brasil) por todo suporte e orientação na preparação da placa de teste.

À empresa Five Stein pela participação nas definições, acompanhamento da execução do projeto e suporte na avaliação de resultados.

A todas as áreas envolvidas da ArcelorMittal Tubarão no comprometimento e participação permitindo o sucesso na execução deste projeto.