

# MODELO TERMOGRÁFICO DE DETECÇÃO DE COLAMENTO DE AÇO NO MOLDE NOS LINGOTAMENTOS CONTÍNUOS DA ARCELORMITTAL TUBARÃO\*

Altemar Dettogne do Nascimento<sup>1</sup>

Sandro de Souza Santos<sup>2</sup>

Alexandre Aparecida Moraes<sup>3</sup>

Rogério Luiz Fracalossi<sup>4</sup>

Antônio Luiz Gomes Reis<sup>5</sup>

## Resumo

O colamento de aço no molde (*sticker*) é uma anomalia de processo de lingotamento, que quando não detectado pelos modelos de prevenção de *sticker*, pode gerar *breakout*, o que significa perdas de produção significativas e aumentos de custos de manutenção para recuperação de componentes de segmentos e moldes, além dos riscos de segurança durante a limpeza do aço dentro da máquina e reprocessamento das placas para eliminação de defeitos superficiais. Outro aspecto a ser considerado é a ocorrência de falso alarme de *sticker* que também gera custos adicionais de produção, aumento de defeitos superficiais nas placas e *powder slivers* em laminado a quente devido a redução brusca da velocidade de lingotamento.

Visando reduzir as ocorrências citadas acima e otimizar o processo de lingotamento, um novo sistema de detecção de *sticker* foi implantando, em AM Tubarão, nas 03 máquinas de lingotamento contínuo de placas, com uma configuração diferente da que habitualmente é encontrada no mercado. O sistema é baseado em dois eixos: uma imagem termográfica do molde e um sistema de cálculo bastante avançado. Este trabalho apresenta os resultados deste processo e os ganhos obtidos quanto à redução de alarme falso de *sticker*.

**Palavras-chave:** *Sticker*; Termografia.

## THERMOGRAPHY MODEL TO MOULD STICKER DETECTION AT SLAB CASTERS OF THE ARCELORMITTAL TUBARÃO

### Abstract

Sticker is a casting anomaly, and when not detected by prediction models it generates a *breakout* and consequently significant production losses and maintenance costs increase to repair damaged equipment. Also there are safety issues during the cleaning of the burrs from breakouts and reconditioning of slabs due to superficial defects. Another aspect to be considered is the occurrence of false alarm which also generates additional production costs, slabs superficial defects and powder slivers in hot coils due to fast ramp of the casting speed.

Aiming to reduce the occurrences mentioned above and optimizes the casting process the new detection system was implemented on three casters and it is very different from what is found on the market. The system is based on 2 pillars: thermographic images of the mold and a very advanced calculation system. This paper presents the results of this process and gains due to reduction of false alarms.

**Keywords:** Sticker; Thermography.

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia de Materiais, Especialista Sênior de Lingotamento Contínuo Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão, ES, Brasil. [altemar.dettogne@arcelormittal.com.br](mailto:altemar.dettogne@arcelormittal.com.br)

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia de Materiais, Gerente de Divisão Técnica da ArcelorMittal Tubarão, ES, Brasil. Membro da ABM, [sandro.santos@arcelormittal.com.br](mailto:sandro.santos@arcelormittal.com.br)

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia de Materiais, Especialista Sênior de Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil. Membro da ABM, E-mail: [alexandre.aparecida@arcelormittal.com.br](mailto:alexandre.aparecida@arcelormittal.com.br).

<sup>4</sup> Engenheiro Elétrico da Área de Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão, ES, Brasil. E-mail: [rogerio.fracalossi@arcelormittal.com.br](mailto:rogerio.fracalossi@arcelormittal.com.br).

<sup>5</sup> Engenheiro Elétrico da Área de Engenharia da ArcelorMittal Tubarão, ES, Brasil. E-mail: [antonio.lreis@arcelormittal.com.br](mailto:antonio.lreis@arcelormittal.com.br)

## 1. INTRODUÇÃO

A ArcelorMittal Tubarão (AMT) iniciou sua operação em Novembro de 1983, e se caracteriza pela produção de placas de aço via lingotamento contínuo e laminado a quente. A primeira máquina de lingotamento contínuo, com capacidade nominal de 1,8 milhões de t / ano, entrou em operação, em Abril de 1995, tendo como objetivo aumentar a sua competitividade e atender melhor aos requisitos dos clientes, quanto à qualidade do produto.

Em Fevereiro de 1998 a AMT iniciou a operação de sua máquina de contínuo nº 2, tipo vertical curva, dotada de várias tecnologias, simultaneamente com a desgaseificação a vácuo RH (1º semestre de 1998), visando o enobrecimento da linha de produtos.

Em 2002 iniciou-se a produção de laminados a quente com a implantação do *hot strip mill* (HSM) com tecnologia *state-of-the-art* visando atender as demandas dos principais mercados.

Novos equipamentos foram implantados na usina a partir de 2004 desde a área de redução até Aciaria demandando investimentos na ordem de US\$ 1.8 bilhões, sendo 12% alocados para controle ambiental. Entre os equipamentos instalados vale à pena destacar o terceiro alto forno, o terceiro convertedor, o segundo RH e a terceira máquina de lingotamento contínuo. A figura 1 mostra o fluxo atual de produção <sup>(1)</sup>.

Em 2007 ocorreu o *start up* destes novos equipamentos aumentando a capacidade nominal da usina para 7,5 milhões de tonelada de placa.

Utilizando a metodologia de melhoria contínua no processo produtivo e manutenções em conjunto com tecnologias avançadas, foi atingido a marca histórica de produção de placas de 7.034 Mt em 2016.

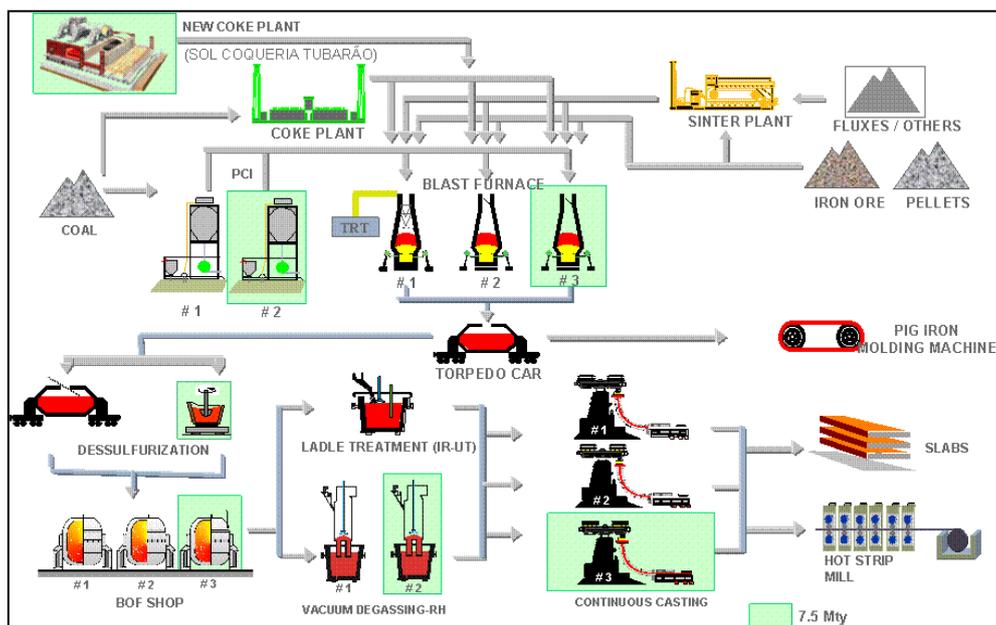


Figura 1. Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão

No processo de lingotamento contínuo, durante a solidificação do aço dentro do molde, ocorre em alguns casos, aderência da camada de aço solidificada à placa de cobre do molde. Isto gera um “rasgo” implicando em deformação indesejável do sólido produzido (placa, tarugo, bilhet, etc), este fenômeno é conhecido como

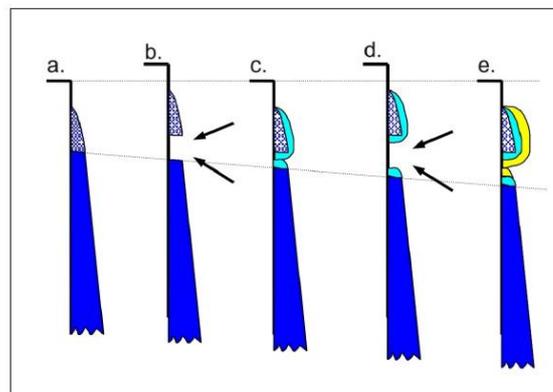
colamento (*sticker*), que quando não detectado pode gerar o rompimento da pele na saída do molde. O *sticker* na superfície da placa, figura 2, pode ser detectado através de um sistema termográfico a partir de termopares instalados internamente ao molde e com monitoramento constante das temperaturas que são analisadas através de *software* específico. Quando este fenômeno é detectado, a velocidade de lingotamento é reduzida, aumentando o tempo de residência do aço no molde, visando o aumento da espessura de pele solidificada e garantir a solidificação do “rasgo da shell” ainda dentro do molde, evitando o rompimento da pele <sup>(2)</sup>. O novo sistema termográfico, para detecção de *sticker*, implantando nas 03 máquinas da AMT Tubarão, possui dois eixos: uma imagem termográfica do molde e um sistema de cálculo bastante avançado. Este trabalho apresenta os resultados deste processo e os ganhos obtidos quanto à redução de alarme falso de *sticker*.



**Figura 2.** Foto ilustrativa mostrando o defeito na placa ocasionado por *sticker*.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 3 demonstra a sequência de propagação de agarramento de aço no molde, através dos *steps* de “a” a “e”.



**Figura 3.** Sequência de agarramento de aço no molde – *steps* de “a” a “e”

**Step a.**

Simboliza o início de formação do *sticker* no molde. O fenômeno do *sticker* sempre inicia a partir do topo do molde na região do *meniscus*. A zona solidificada irá agarrar na placa de cobre sendo que parte da *shell* irá extrair normalmente.

As causas de *sticker* são várias que podem ser de processo, materiais e composição química do aço. O *sticker* é mais frequente em aços peritéticos devido as reações durante a solidificação, o que pode ser explicado pela redução volumétrica que ocorre na transformação da fase L (líquida) +  $\delta$  (ferrita, ccc) para o ferro  $\gamma$  (austenita, cfc), o que gera o deslocamento da “pele” formada em relação a parede do molde. Esta perda de contato dificulta a transferência de calor, o que ocasiona um reaquecimento local desta área, gerado um decréscimo dada resistência e um retardo no crescimento da pele sólida. Quando se aplica uma tensão sobre esta área a pele fina e frágil, pode cisalhar e trincar gerando o *sticker*. A figura 4 mostra três etapas tendo como exemplo a reação peritética. Na 1ª etapa, figura 4(a) em altas taxas de resfriamento, “ilhas” de cristais  $\delta$  aparecem; 1/30 segundos após, figura 4(b), cristais de  $\delta$  transformam-se em  $\gamma$ . Na 3ª etapa, figura 4(c) após a completa solidificação (2 segundos) é possível verificar que este cristal  $\gamma$ , formado, possui irregularidades superficiais, atribuídas às contrações volumétricas decorrentes da reação <sup>(2)</sup>.

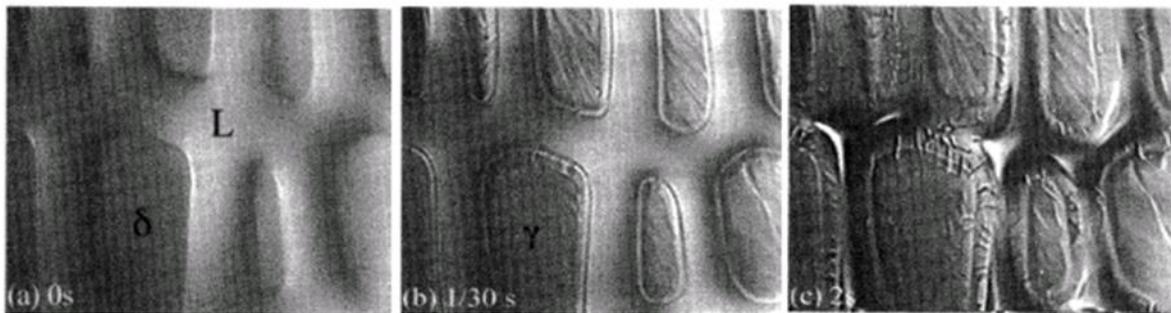


Figura 4 - (a) Base formação, (b) Coexistência de L+ $\delta$ → $\gamma$  ; (c) Reação peritética a transformação do Fe-0,14% de carbono durante solidificação a 1495 °C

**Step b.**

O step (b) mostra a parte da *shell* aderida ao molde que se moveu para cima com o deslocamento do oscilador do molde. O rasgo da *shell* aparece logo abaixo e o aço líquido irá preenchê-lo (representado pelas 2 setas).

**Step c.**

A parte da *shell* aderida moveu-se para baixo com o molde, porém a placa também foi para baixo. Portanto, o rasgo não pode ser completamente fechado.

**Step d.**

Parte da *shell* aderida ao molde está subindo novamente com o deslocamento do oscilador e novo rasgo será criado na parte mais fraca da *shell* e novamente o aço líquido irá preencher este rasgo.

**Step e.**

O step (e) é um deslocamento ou intensificação do step (c), enquanto o rasgo se move para baixo. Teoricamente, é possível mostrar que o rasgo move no mínimo com 50% da velocidade de lingotamento. Uma vez que o rasgo deixa o molde não ocorre à solidificação do aço e conseqüentemente o *breakout*. A combinação da

propagação da solidificação com o efeito do *sticker* irá gerar um efeito tipo "V" na placa.

## 2.1 – Efeito do *sticker* nos termopares instalados no molde

A figura 5 apresenta os três steps (a, b, c) onde o *sticker* passa em frente aos termopares instalados no molde. Observa que existe um padrão de subida e descida da temperatura *detectada* pelor termopar superior e inferior quando do deslocamento do rasgo da pele no sentido de lingotamento. Este comportamento de temperatura é a base para desenvolvimento do software de detecção de *sticker*.

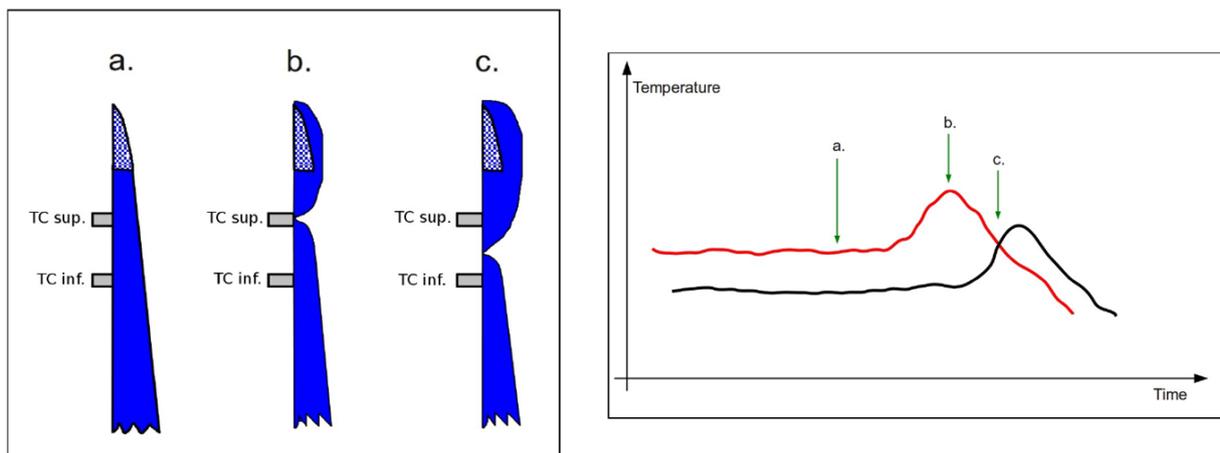


Figura 5. Efeito do *sticker* nos termopares instalados no molde. Fonte EBDS Engineering

## 2.2 – Estratificação da origem dos *breakouts*

A figura 6 demonstra que 25% da origem dos *breakouts*, em 2015, foram devidos a *stickers* não detectados. Também se destaca neste período, mas sem demonstração gráfica, a elevada frequência de alarme falso de *sticker* impactando nos índices de qualidade da placa.

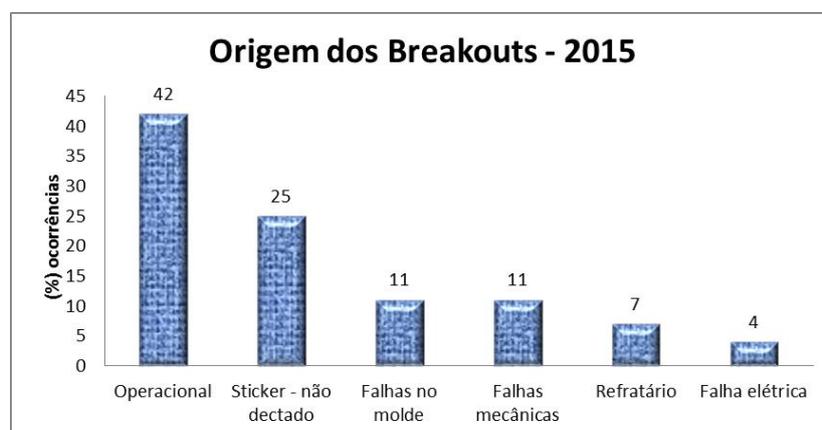


Figura 6. Estratificação da origem dos *breakouts* – 2015. ArcelorMittal Tubarão

No segundo semestre de 2015 foi realizado um benchmarking de tecnologias, para detecção de *sticker*, levando em consideração a interface visual do fenômeno de agarramento da *shell* no molde, como também, a eficiência de detecção. A figura 7 demonstra os dois tipos de tecnologias existentes no mercado quanto à apresentação visual: gráfica (a) e termográfica (b).

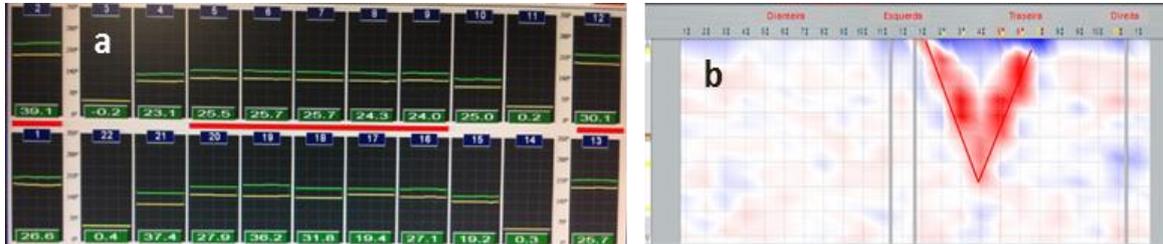


Figura 7. Apresentação visual de detecção de *sticker*. (a) - gráfica; (b) - termográfica.

### 2.3 – Modelo termográfico de detecção de *sticker*

O sistema de detecção de *sticker* é baseado em dois eixos: uma imagem termográfica do molde, e um avançado sistema de cálculo. A imagem representa as quatro faces de cobre do molde. Ela exibe em tempo real todos os eventos térmicos da placa recém-formada “no interior do molde”, de maneira a revelar eficientemente qualquer evento irregular ao operador. Por exemplo, no caso de perfuração por colamento a conhecida forma em “V” irá aparecer (figura 8).

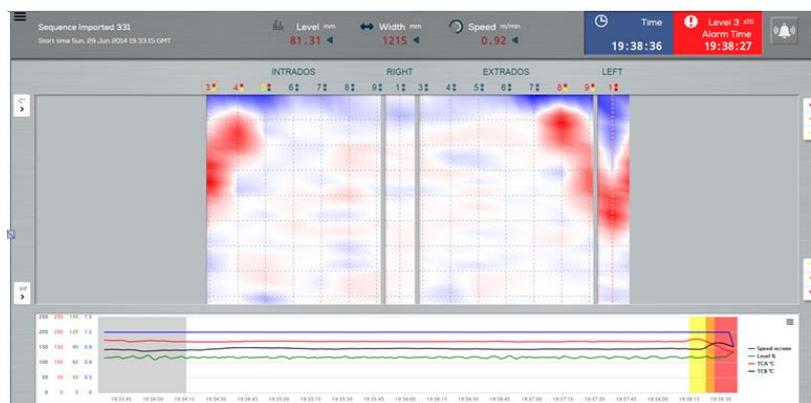


Figura 8. Termografia do *sticker*.

Os cálculos são baseados nos possíveis comportamentos metalúrgicos das curvas. Isto permite detectar não só os colamentos, como também, outros fenômenos. O sistema é “auto ajustável” às condições de lingotamento, de maneira que não se faz necessária a pré-seleção do tipo de aço <sup>(3)</sup>. A junção da análise visual por termografia, e com vários níveis de alarmes, possibilita o operador a tomar decisões preventivas no processo para evitar a ocorrência do *sticker* ou até mesmo o *Breakout*.

### Principais características do Software:

- ✓ Auto-adaptação às condições de lingotamento sem qualquer intervenção necessária de um operador graças aos seus parâmetros Individuais de ajuste de auto-Adaptação independente da composição química do aço;
- ✓ Quantificação da importância dos fenômenos para aumentar a confiabilidade e a velocidade de detecção, em combinação com o uso de uma matriz de eventos críticos;
- ✓ Algoritmos de correção de temperatura absoluta, para compensação da sensibilidade térmica.

### 2.4 – Metodologia aplicada para validação do novo modelo de detecção de *sticker*.

- ✓ O modelo termográfico foi instalado primeiramente *off line*, paralelo com o modelo de detecção residente na máquina três, a partir de Maio de 2016;
- ✓ As placas com geração de alarme de *sticker* foram inspecionadas para identificar a veracidade do alarme e avaliar a necessidade de ajustes dos parâmetros do modelo;
- ✓ Instalação do modelo termográfico *on line* após validação.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os seguintes resultados de processo foram obtidos a partir de Maio de 2016, com a instalação do modelo termográfico no lingotamento contínuo nº 3 (primeira fase):

- ✓ Redução significativa da geração de alarme *sticker* quando comparado o modelo residente na máquina. A figura 9 mostra a estatística destes alarmes. Como no período analisado, não houve nenhum rompimento de pele por *sticker*, conclui-se que este sistema é mais eficiente para redução de alarmes falsos contribuindo para redução dos custos de produção e aumento da qualidade do produto final.

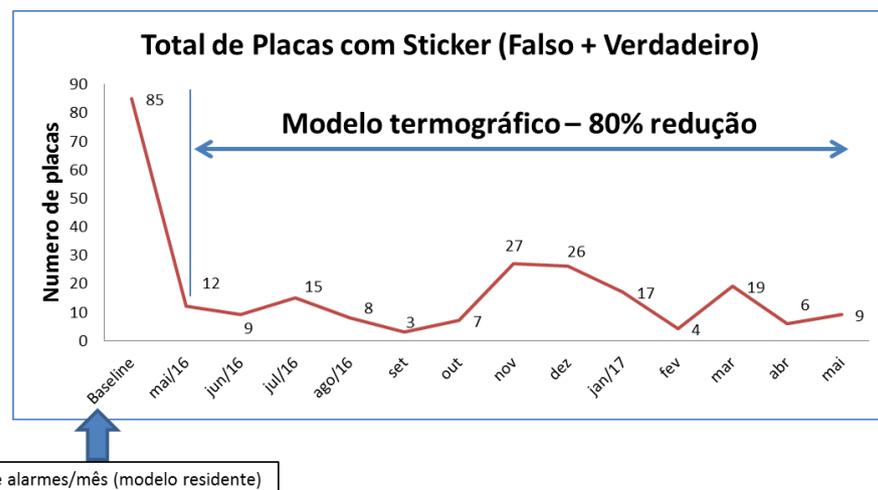
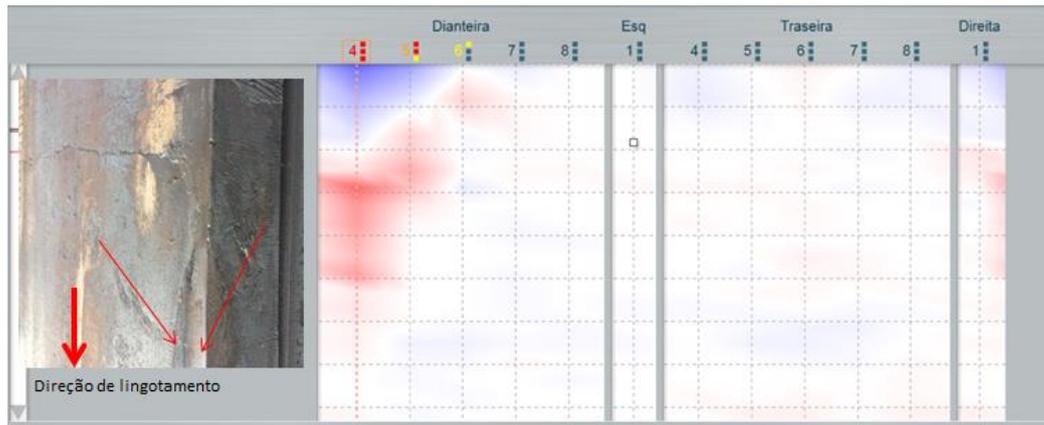


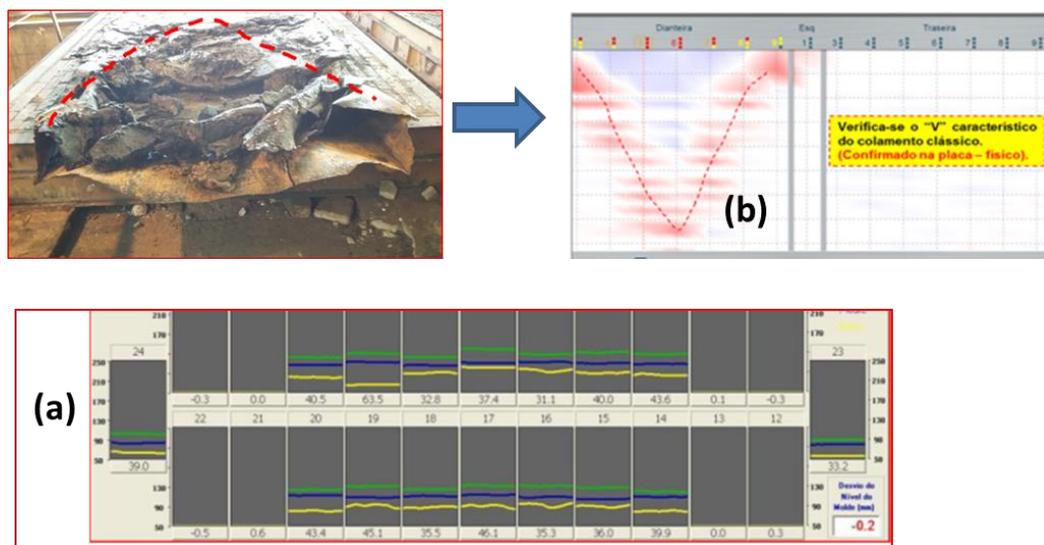
Figura 9. Frequência de alarme de *sticker*: modelo residente x termográfico

- ✓ Detecção efetiva de colamento do aço no molde (figura 10), com antecipação do alarme de 10 a 15 segundos antes do programa residente.



**Figura 10.** Validação do modelo termográfico em relação ao alarme de *sticker*

- ✓ Durante o período de testes, que o modelo termográfico estava *off line*, houve uma ocorrência de rompimento de pele não detectado pelo modelo residente. O modelo termográfico detectou o colamento clássico no molde (figura 11).



**Figura 11.** Ocorrência de *breakout* não detectado pelo modelo residente (a) e detectado pelo modelo termográfico *off line* (b). Aço médio carbono (C=0,23% e Mn= 1,30%)

- ✓ Através da imagem termográfica é possível identificar distúrbios no molde tais como: obstrução do furo da válvula submersa com fluxo turbulento para um lado da face estreita, furo da válvula submersa e anomalias de fluxo de calor durante troca de largura.

## 4 CONCLUSÃO

O sistema termográfico, conjugado com o modelo de cálculo avançado, mostrou eficiência na detecção de verdadeiros *stickers*, reduzindo 80% os alarmes falsos no lingotamento contínuo III. Estes resultados contribuíram para reduzir os custos de processo, aumento da qualidade das placas e laminado a quente.

Através da imagem termográfica permite visualizar de maneira efetiva todas as trocas térmicas anormais, incluindo o conhecido padrão de colamento no formato "V".

O modelo termográfico, conjugado com o modelo de cálculo avançado, foi implantado primeiramente no lingotamento contínuo III em Maio/2016 e na sequência nos lingotamentos contínuos I e II – *on line* (Junho/ 2017).

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem a todos que contribuíram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, em especial às equipes de manutenção eletromecânica e operação.

## **REFERÊNCIAS**

- 1 NASCIMENTO, A. D. et al. New Slab Technologies at ArcelorMittal Tubarão. In 6th European Continuous Casting Conference, Riccione, Italy, 3-6/june, 2008.
- 2 ANDRADE, K.B. et al. Estudos sobre fatores causadores de colamento de aço no molde (*sticker*) e soluções adotadas para redução deste fenômeno. Contribuição Técnica ao XXXII Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Salvador, BA, 07 a 09 de maio de 2001.
- 3 CASTIAUX,E; GRUENZNER,G. Breakout detection/prevention for slab and bloom caster. In 40th Steelmaking International Seminar, 24th - 28th of May 2009, São Paulo, Brazil.