



## ESTUDO DA OCORRÊNCIA DE TRINCA TRANSVERSAL DE QUINA EM PLACAS PRODUZIDAS NA ARCELORMITTAL TUBARAO<sup>1</sup>

Deivison Morais Alvarenga<sup>2</sup>

Luiz Gustavo Andres<sup>2</sup>

Carlos Alberto Perim<sup>3</sup>

Altemar Dettogne do Nascimento<sup>3</sup>

Alexandre Aparecida Morais<sup>4</sup>

José Carlos Passos<sup>5</sup>

Leonardo Barbosa Godefroid<sup>6</sup>

### Resumo

Tradicionalmente a ArcelorMittal Tubarão é um grande fornecedor de placas destinadas à laminação de chapas grossas. Com o objetivo de atender à elevação da produção de placas destinadas a esse mercado além do rigor quanto à qualidade superficial, foi desenvolvido um estudo sobre o defeito superficial trinca de quina. Esse defeito tem sido responsável por grande parte da escarfagem realizada em Tubarão, operação realizada para garantir a qualidade superficial para os clientes finais quando identificada a ocorrência de trincas. O trabalho apresentará as etapas seguidas no estudo, destacando a metodologia utilizada: análise dos fenômenos envolvidos, variáveis de processo e estudo dos mecanismos de formação de trincas. Foram realizadas análises metalográficas que contribuíram para um melhor entendimento da formação do defeito. Uma vez identificadas as principais causas relacionadas ao defeito, foi possível a adoção de diversas medidas no processo, como controle de composição química, atuações no sistema de refrigeração da máquina, condições mecânicas dos segmentos entre outras variáveis. O estudo realizado permitiu implantar ações de controle de qualidade e de processo, bem como um maior entendimento sobre o fenômeno de formação de trincas, fazendo com que houvesse redução de custo de processamento, elevação de rendimento e redução de retrabalhos, bem como a elevação no nível de satisfação dos clientes através da melhora na qualidade superficial do produto.

**Palavras-chave:** Trinca transversal de quina; Lingotamento contínuo; Placa de aço.

## STUDY OF TRANSVERSE CORNER CRACK OCCURRENCE ON SLABS PRODUCED IN ARCELORMITTAL TUBARAO

### Abstract

Traditionally ArcelorMittal Tubarão is among the biggest suppliers of slabs for heavy plates. Aiming to meet the increasing production of slabs for this market as well as to improve the surface quality, a study was developed concerning transverse corner crack on slabs. The major part of slabs has been scarfed in order to remove this defect. The paper presents the steps followed in the study, emphasizing the methodology: phenomenon analysis, the process variables and study of formation mechanisms of corner crack. Metallographic analysis was made to contribute to a better understanding of the defect formation. The main causes related to defect were identified and it was possible to adopt counter measure in the process, as control of chemical composition, performances in the secondary cooling, mechanical conditions of segments and other variables as well. The study promoted a greater understanding of the phenomenon of corner crack formation and included the implementation of quality and process control actions. It was observed gains on processing cost, conditioning yield and rework. Furthermore, the customer satisfaction increased by the improvement of the surface quality.

**Key words:** Transverse corner crack; Continuous casting; Steel slab.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Controle de Qualidade de Produto, ArcelorMittal Tubarao.

<sup>3</sup> Msc. Engenheiro Metalurgista, Unidade Técnica do Lingotamento Contínuo, ArcelorMittal Tubarão.

<sup>4</sup> M.sc. Engenharia de Materiais, Operação do Lingotamento Contínuo, ArcelorMittal Tubarão.

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico, Manutenção do Lingotamento Contínuo, ArcelorMittal Tubarão.

<sup>6</sup> Prof. Dr., Redemat (UFOP, UEMG, CETEC).



## 1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a Arcelormittal Tubarão é um grande fornecedor de placas destinadas à laminação de chapas grossas. Esta aplicação exige um grande rigor na qualidade superficial, inclusive nas bordas da placa, o que exige uma demanda de escarfagem localizada na borda, visando à eliminação das eventuais trincas superficiais de quina. Com o aumento da produção destinada a esta aplicação no ano de 2010, foi necessário desenvolver um estudo sobre o defeito trinca de quina com objetivo de mitigar o surgimento do referido defeito, preservando o nível de qualidade das placas destinadas a este mercado.

O principal efeito dessas trincas sobre o produto chapa grossas ocorre quando a placa sofre laminação, onde o defeito se alonga na superfície da chapa de aço, tornando o defeito visível. Para evitar o retrabalho no cliente final, as trincas superficiais de quina são removidas das placas através do processo de escarfagem manual, o que gera custo com mão de obra, perda de rendimento, além de risco de desclassificação da placa, devido ao não atendimento dos requisitos de dimensão, superfície e forma da placa.

### 1.2 Objetivo

O objetivo principal do trabalho é identificar os principais mecanismos de formação da trinca superficial de quina no processo de produção de placas da Arcelormittal Tubarão, bem como os fatores que influenciam a sua geração e determinar ações de controle de qualidade e de processo. Através das ações propostas espera-se uma redução de custo de processamento, bem como a elevação no nível de satisfação dos clientes através da melhora na qualidade superficial do produto.

### 1.3 Revisão da Literatura

A formação da trinca superficial na placa é um dos problemas específicos do lingotamento contínuo de aços que está relacionada, principalmente, à capacidade do aço suportar as deformações geradas no processo. Existem três pontos no processo de lingotamento contínuo que podem ser considerados como críticos na formação de trincas superficiais, o molde o encurvamento e o desencurvamento da placa. No molde, a placa está sujeita à ação de forças de atrito com a parede, o que pode provocar a nucleação de trincas na pele solidificada. Também no molde temos a formação das marcas de oscilação, que é um concentrador de tensão. A partir da base destas marcas, qualquer esforço de tração (no sentido transversal à marca) que ocorra pode ou não causar a formação de uma trinca. Nas máquinas de lingotamento contínuo, as placas estão naturalmente sujeitas a este esforço quando são encurvadas ou desencurvadas. Assim, o surgimento das trincas transversais de quina estará condicionado à existência de uma condição de baixa ductilidade do aço, quando do encurvamento/ desencurvamento das placas.<sup>(1)</sup>

Esta condição de baixa ductilidade ocorre durante a solidificação do aço, em quatro regiões de temperaturas já bem discutidas em literatura, conforme ilustrado na Figura 1.

Região I - Fragilização á altas temperaturas (~ 40 oC abaixo de T solidus)

Região IIa - Fragilização devido a partículas de segunda fase (Mn,Fe)S

Região IIb - Fragilização devido a partículas de segunda fase Nb(CN), AlN, V(CN)



Região III - Fragilização devido a transformação de fase austenita-ferrita.

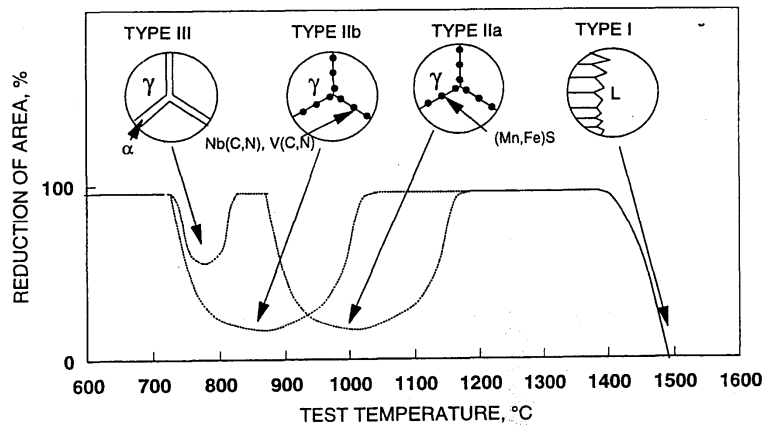


Figura 1 – Regiões de baixa ductilidade durante a solidificação dos aços.

O aparecimento da trinca superficial transversal é influenciada pela resistência e ductilidade da pele solidificada e pelas tensões e deformações impostas a ela. A primeira depende da composição química do aço enquanto a última pode ser de origem térmica e/ou mecânica.

Um exemplo de trinca na placa é mostrado na Figura 2. Na maioria das vezes, as trincas não são detectadas visualmente na superfície da placa. O processo de escarfigem é necessário para evidenciar a trinca, sendo que usualmente o defeito encontra-se abaixo da superfície. As trincas de quina são geralmente situadas na face larga próxima a quina da placa. O comprimento normalmente varia de 0 ~ 20mm e possuem poucos milímetros de profundidade. As trincas transversais de quina são geralmente associadas com as marcas de oscilação. Foi observado que quanto mais profunda é a marca de oscilação maior é o número de trincas.<sup>(2)</sup> A Figura 3 explica a influência da marca de oscilação na formação de trincas transversais.

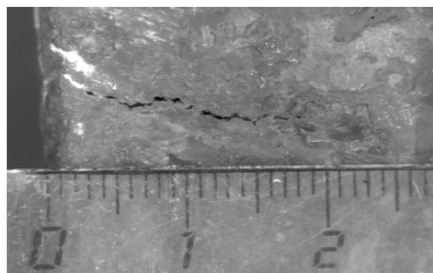
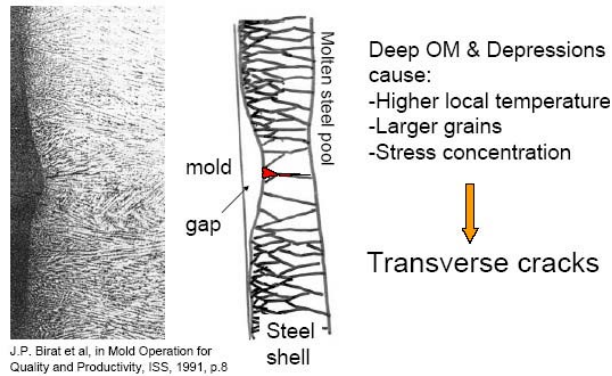


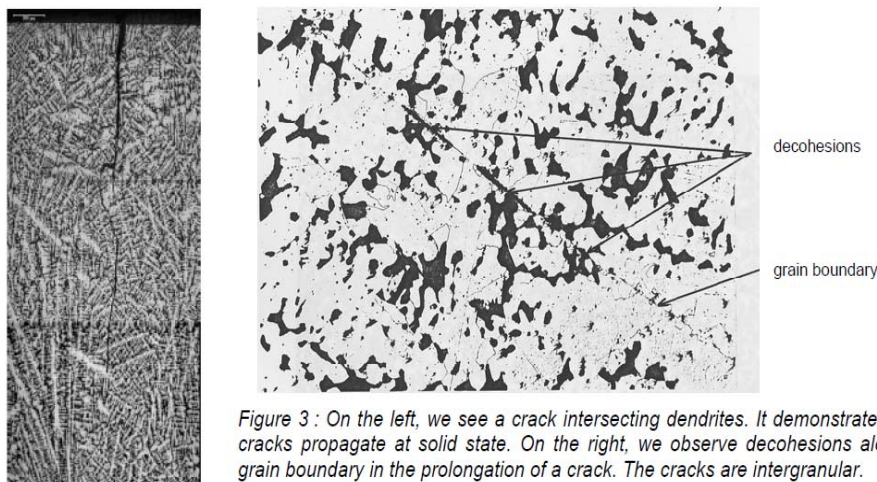
Figura 2: Trinca observada após leve passe de escarfigem na placa de aço microligado com baixo carbono e elevado manganês.<sup>(2)</sup>



J.P. Birat et al, in Mold Operation for Quality and Productivity, ISS, 1991, p.8

**Figura 3:** Influência da marca de oscilação nas ocorrências de trincas transversais.<sup>(3,4)</sup>

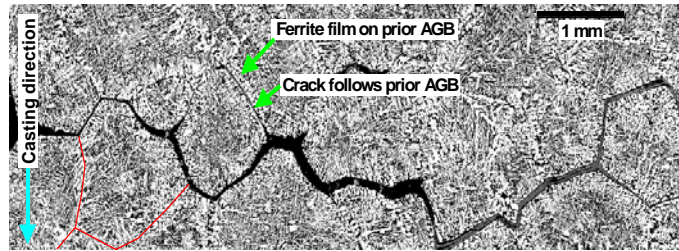
Investigações metalográficas realizadas por Triolet,<sup>(2)</sup> mostraram que as trincas se propagam através das dendritas, o que sugere que as trincas não se formaram através de filmes líquidos interdendriticos (Figura 4). Além disso, não foi observada oxidação interna ao longo das trincas, ao contrário do que geralmente é visto em trincas formadas em temperaturas acima de 1.200°C. Foi observado também que as trincas se propagam ao longo do contorno de grão austenítico. Nas análises de metalografia das seções, microcavidades são observadas no prolongamento das trincas (Figura 4).<sup>(2)</sup>



*Figure 3 : On the left, we see a crack intersecting dendrites. It demonstrates that cracks propagate at solid state. On the right, we observe decohesions along a grain boundary in the prolongation of a crack. The cracks are intergranular.*

**Figura 4:** Na esquerda, a trinca intercepta a dendrita. Na direita, mostra que a trinca é intergranular.

As análises realizadas por Tsai,<sup>(5)</sup> conforme Figura 5, mostraram que as trincas ocorrem de forma intergranular. Desgaste do molde, não foi determinado como causa das trincas, devido não encontrar elementos de molde no interior do defeito. Com base nos fatos de que as trincas acompanham o contorno de grão da austenita prévia, pode-se concluir que as trincas podem iniciar abaixo do menisco no molde, mas principalmente abrir em temperatura mais baixa por tração na região de descurvamento e desalinhamento da máquina, em alguns casos.



**Figura 5:** Propagação da trinca ao longo do filme de ferrite formado no contorno de grão da austenita prévia (superfície superior próxima à quina).<sup>(5)</sup>

Em análises realizadas por Harada,<sup>(6)</sup> a origem das trincas transversais foi devido à presença de segregação. A segregação é localizada no vale da marca de oscilação fazendo com que as trincas se propaguem nesta parte frágil abaixo da pele solidificada sob qualquer tensão externa. Assim as trincas são formadas abaixo da marca de oscilação e se propagam ao longo do contorno do grão austenítico.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi formado um grupo multidisciplinar com objetivo de avaliar os fatores influentes na formação da trinca transversal de quina. Para que as análises das ocorrências de trinca de quina fossem representativas, as placas de aço destinadas à aplicação de chapas grossas passaram a sofrer uma leve escurfagem nas bordas, conforme Figura 6, para verificação da existência da trinca.



**Figura 6:** Placa com escurfagem leve na borda.

De posse dos resultados de ocorrência de trinca de quina foi realizado um estudo investigativo na área de lingotamento contínuo a fim de identificar possíveis desvios relacionados às variáveis de processo, bem como a condição mecânica da máquina. Os itens avaliados podem ser distribuídos da seguinte forma, conforme Figura 7:

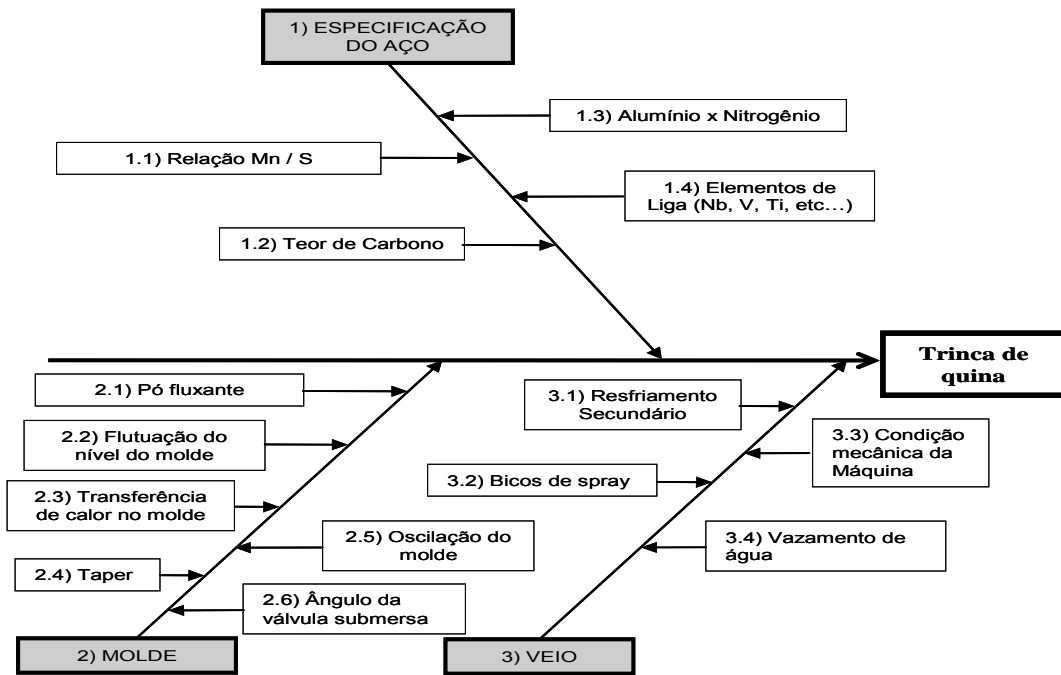


Figura 7: Diagrama de causa e efeito do defeito trinca de quina.

Além das análises das variáveis descritas acima, foram realizados testes buscando um melhor entendimento do defeito trinca de quina.

- Realizado medição do sistema de oscilação com aplicação de acelerômetros, com objetivo de realizar medições das variáveis de trajetória, vibração e parâmetros metalúrgicos dos osciladores dos veios da máquina de lingotamento.
- Realizado teste com nova curva de resfriamento. Durante a produção foi utilizada a curva de teste somente em um veio para que pudesse comparar as ocorrências de trinca com outro veio que estava utilizando a curva padrão. Foram realizadas medições de temperatura na região de desencurvamento da máquina através de termografia.
- Realizado controle de largura de spray no segmento zero.
- Realizado testes com diferentes curvas de oscilação no molde.
- Retiradas amostras do defeito trinca de quina na placa e caracterizadas através do microscópio eletrônico de varredura e microscopia ótica visando buscar um melhor entendimento do mecanismo de formação da trinca.
- Realizado ensaio de utilidade a quente. Os testes foram realizados no centro de pesquisa da ArcelorMittal em Chicago, Estados Unidos, com a utilização da máquina Gleeble 3500. Este ensaio é o mais utilizado para simular as condições operacionais impostas ao aço durante o processo de lingotamento contínuo.

As amostras foram retiradas da placa na direção de lingotamento, visando uma simulação mais próxima da situação atual de encurvamento/desencurvamento da máquina. Conforme desenho esquemático abaixo (Figura 8).

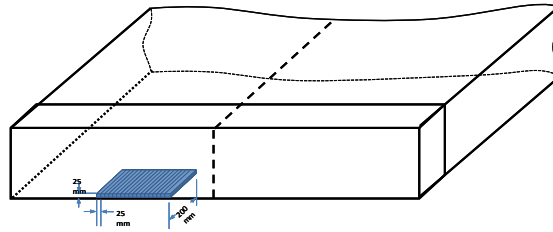


Figura 8: Desenho esquemático da posição de retirada de amostra;

Os testes foram realizados com aquecimento do corpo de prova até 1.300°C, resfriados com um ciclo térmico similar ao utilizado nas condições reais de lingotamento e ensaiados nas temperaturas de 600°C à 1.200°C, variando 50°C.

### 3 RESULTADOS

Durante a etapa de análise no laboratório de Metalurgia Física da ArcelorMittal Tubarao, realizou-se a preparação e análises das amostras na seção transversal e superficial do defeito. Os resultados foram obtidos após análises via MEV-EDS e microscopia ótica.

Conforme observado na Figura 9, a trinca é vista na seção transversal, a faixa superior branca trata-se de região termicamente afetada pela escarfagem. Pode ser observado que as trincas interceptam as dendritas. Em análises realizadas via MEV-EDS não foi detectada nenhuma inclusão não metálica. A profundidade da trinca é de aproximadamente 5 mm e sua extensão na superfície e de 28 mm.

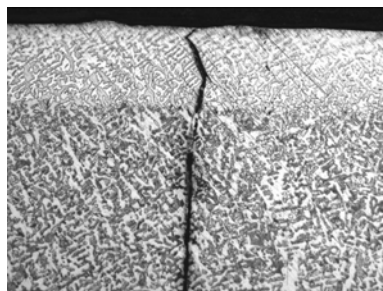


Figura 9: Fotomicrografia ótica da trinca de quina.

Com base na metodologia 6 Sigma,<sup>(8)</sup> as ocorrências de trinca foram inicialmente estratificadas e constatadas que este defeito concentrava-se em materiais médio carbono e médio carbono microligado destinados a aplicações chapas grossas, sem concentração por espessura / largura de placa. O defeito trinca de quina apresentava-se em ambas as faces e ambos os lados da placa.

Na análise do processo, observou-se uma tendência de maiores ocorrências de trinca com elevação do teor do produto Alumínio x Nitrogênio no aço, conforme Tabela 1, bem como influências das variações do nível de aço no molde.

Tabela 1: Influência do produto Al\*N na ocorrência de trinca

Tipo de aço	Al * N (ppm)	% Trinca
Aço médio carbono	0-9000	X
	>9000	2X
Aço médio carbono microligado	0-9000	X
	>9000	2X



Realizou-se um trabalho intensivo em relação à condição mecânica da máquina de lingotamento com objetivo de deixar a máquina em perfeita ordem para produção dos aços destinados a chapas grossas. Desta forma constantemente eram realizadas checagem na máquina com objetivo de eliminar qualquer tensão mecânica que possa ser introduzida em função de alinhamento incorreto ou por outras fontes. Outro item que foi bastante investigado foram os vazamentos de água nos segmentos.

Através da aplicação de acelerômetros instalados no molde, foi possível identificar pequenos desvios relacionados à oscilação do molde. Assim foram tomadas ações fazendo com que a oscilação passasse a oscilar nas condições de projeto.

Nas máquinas de lingotamento contínuo, torna-se importante evitar que as regiões de baixa ductilidade coincidam com as regiões onde são impostas as maiores tensões sobre a placa em lingotamento (curvamento e descurvamento). Portanto é fundamental o conhecimento da curva de ductilidade do aço para que se possa aplicar uma estratégia de resfriamento fora da faixa de baixa ductilidade. Desta forma curva de ductilidade (Figura 10), foi obtida através dos ensaios realizados no centro de pesquisa da ArcelorMittal.

Pode-se observar que o poço de ductilidade ocorre em temperaturas próximas a 750°C. Portanto foi utilizada a estratégia de redução da água de resfriamento secundário, visando uma temperatura superficial superior a 750°C nas regiões de encurvamento e descurvamento da máquina. Através da termografia é possível comprovar a eficiência da adoção da estratégia descrita acima. As temperaturas foram medidas do segmento 8 da máquina (região de descurvamento).

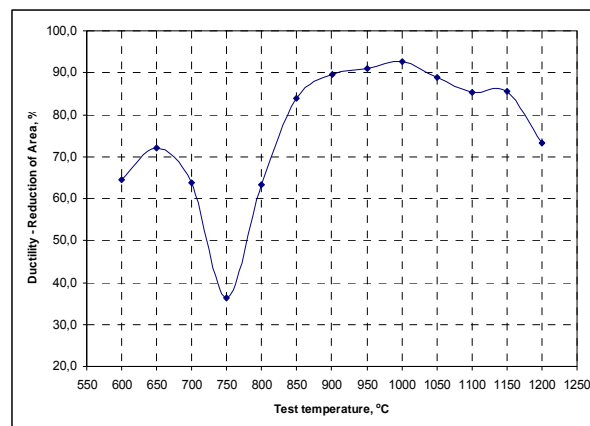


Figura 10. Curva de ductilidade do aço médio carbono produzido na ArcelorMittal tubarão.

Os resultados mostraram que a curva de resfriamento testada apresenta uma maior ductilidade na região de descurvamento quando comparada a curva padrão. Devido à grande quantidade de vapor na região de encurvamento da máquina torna-se praticamente impossível a medição neste ponto.

Os testes relacionados à curva de oscilação permitiram a produção dos aços com um menor tempo de estripamento negativo (curva não senoidal com  $\alpha = 40\%$ ) (Figura 11). Quanto maior o tempo de estripamento negativo, maior será a profundidade da marca de oscilação e maior serão os grãos de austenita próximo ao vale da marca de oscilação, devido retardo da solidificação.<sup>(8)</sup>



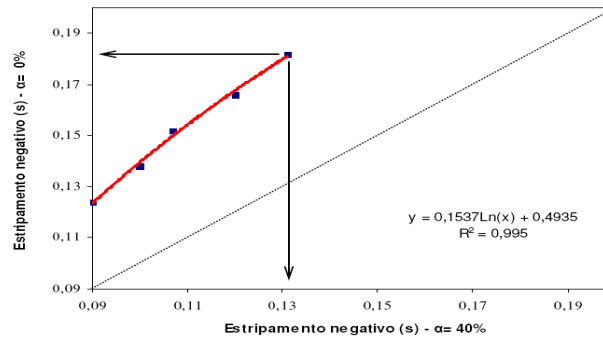


Figura 11: Estripamento negativo versus valor de  $\alpha$ .

Após as análises e experimentos realizados permitiram-se implantar ações de controle de qualidade, alterações de parâmetros de processo, controle e correção das interferências mecânicas da máquina. Essas ações, conforme pode ser visto na Tabela 2, possibilitaram uma redução significativa das ocorrências de trinca de quina nas placas de aço médio carbono e médio carbono microligado após ações implantadas.

Tabela 2: Redução da ocorrência de Trinca de quina após ações implantadas

Tipo de Aço	% Redução das ocorrências de Trinca de quina
Médio Carbono	77%
Médio Carbono Microligado	53%

## 4 DISCUSSÃO

A caracterização do defeito permitiu identificar que a trinca de quina se propaga no estado sólido, sendo que nas análises realizadas não foram encontradas partículas estranhas, como pó fluxante, e nenhum elemento de molde, como Cu, Ni e Cr no interior da trinca. Estas características indicam que esta trinca não foi formada no estágio inicial de solidificação próximo ao menisco.<sup>(7)</sup>

Em relação à constatação de maiores ocorrências de trincas influenciadas pelo aumento do produto Al\*N, vários estudos já mostraram que a precipitação de AlN no contorno de grão da austenita causa fragilização vindo a gerar possíveis trincas superficiais em placas devido uma queda na ductilidade do material. Em relação à variação do nível de aço, Soejima et AL, mostrou que elevadas variações de nível resultam numa marca de oscilação mais profunda, fazendo com que a placa se torne mais susceptível a trinca de quina transversal.<sup>(7)</sup>

Durante o período de estudo ficou mais evidente a influência das condições mecânicas da máquina na ocorrência da trinca de quina. Desta forma conseguiu-se uma atuação mais rápida e eficaz fazendo com que a máquina estivesse sempre em condições ideais de lingotamento.

Através dos ensaios de ductilidade a quente foi observado que o poço de ductilidade ocorre em temperaturas próximas a 750°C. Nesta região a fragilidade pode ser explicada por fatores como precipitação intergranular ou formação de filmes de ferrita proeutetóide ao longo do contorno de grão. A estratégia de distribuição de água com a nova curva de resfriamento permitiu que a região de desencurvamento da máquina estivesse fora deste poço de ductilidade, ou seja, neste ponto onde sofre força de tração a ductilidade do aço foi aumentada.



Os índices alcançados de ocorrência de trinca de quina foram reduzidos além da expectativa, o que permitiu que a empresa pudesse elevar sua produção de placas destinadas ao mercado de chapas grossas sem perdas decorrentes do trabalho causado pela geração de trincas de quina.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo realizado permitiu implantar ações de controle de qualidade e de processo, bem como um maior entendimento sobre o fenômeno de formação de trincas, fazendo com que houvesse redução de custo de processamento, bem como a elevação no nível de satisfação dos clientes através da melhora na qualidade superficial do produto. A principal conclusão de todo este estudo é que existem vários parâmetros que podem influenciar na geração da trinca de quina. Foram estabelecidas várias regras de monitoramento das variáveis no lingotamento contínuo a fim de serem capaz de prever a trinca em função dos desvios gerados no processo. No entanto muito ainda tem-se que avançar no controle e prevenção da trinca de quina em placas de aço. Nesta linha, o monitoramento on line da temperatura superficial das placas nas regiões de encurvamento e desencurvamento da máquina está sendo estudado, bem como criação de uma rotina para avaliação do desempenho do sistema de oscilação do molde através do uso de acelerômetros.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a toda equipe da unidade técnica, operação e manutenções do lingotamento contínuo e toda a equipe da área de controle de qualidade e inspeções de produtos pelas valorosas contribuições na execução deste trabalho.

## REVISÃO

- 1 D. N; Crowther. A comparison of the effects of microalloying on cracking during continuous casting. Corus Research, Development and Technology.
- 2 Triolet, Nicolas. Prevention of corner cracks in slabs continuous casting. Internal Report at ArcelorMittal Research, Maizières Lès Metz, France, 2009.P
- 3 BIRAT J.P. et al. In Mold Operation for Quality and Productivity, ISS, 1991, p.8.
- 4 NASCIMENTO, A. D. Influência das variáveis físicas do oscilador do molde nas características das marcas de oscilação das placas de lingotamento contínuo. Ouro Preto: Rede temática em engenharia de materiais – UFOP – CETEC - UEMG , 2008.
- 5 Tsai H.T et al. Analysis of transverse Corner Cracks on Slabs and Countermeasures. Internal Report at Mittal Steel Lazaro Cardenas, Michoacan, Mexico, 2007.
- 6 HARADA, S., TANAKA, S. A Formation Mechanism of Transverse Cracks on CC Slab Surface. ISIJ International, Vol. 30 (1990), Nº 4, p. 310-316.
- 7 T.Soejima et al., "Improvement os transverse Corner Cracking of CC Slabs, CAMP-ISIJ, Vol.1, 1998, p. 308.
- 8 WERKEMA, CRISTINA. Criando a Cultura Seis Sigma. Nova Lima, Minas Gerais: 2004