



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



JOÃO MARCOS RABELO MESQUITA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA OBSTRUÇÃO DE BICOS DE SPRAY DO
RESFRIAMENTO SECUNDÁRIO NA FORMAÇÃO DE TRINCAS TRANSVERSAIS
DE QUINA EM PLACAS PRODUZIDAS NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Ouro Preto
Agosto 2025

João Marcos Rabelo Mesquita

**Avaliação do impacto da obstrução de bicos de spray do resfriamento secundário na
formação de trincas transversais de quina em placas produzidas no lingotamento
contínuo**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Engenheiro
Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Johne Jesus Mol Peixoto

Ouro Preto
Agosto 2025.



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Marcos Rabelo Mesquita

Avaliação do impacto da obstrução de bicos de spray do resfriamento secundário na formação de trincas transversais de quina em placas produzidas no lingotamento contínuo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 01 de agosto de 2025

Membros da banca

[Titulação] Dr. Johne Jesus Mol Peixoto - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
PhD. Carlos Antônio da Silva - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. André Afonso Nascimento - Membro (Gerdau Açominas/Ouro Branco)

Johne Jesus Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/08/2025, às 14:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0954778** e o código CRC **BB33FDB7**.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da obstrução dos bicos de spray do sistema de resfriamento secundário na formação de trincas transversais de quina em placas de aço produzidas por lingotamento contínuo. Foram utilizados dados operacionais obtidos por meio do equipamento Roll Gap Checker (RGC), que identifica a obstrução dos bicos de spray, e registros de inspeção de qualidade das placas em um período de 20 meses. Foi desenvolvido um indicador com base na distribuição da obstrução entre as regiões do centro e margem dos segmentos críticos do veio, possibilitando avaliar a uniformidade do resfriamento em cada área. Essa análise permite identificar a necessidade de manutenção ou substituição dos bicos de spray obstruídos. A análise estatística indicou ausência de correlação significativa entre o índice global de obstrução e a ocorrência de placas com trincas de quina. Esses resultados sugerem que a ocorrência de trincas é influenciada por múltiplos fatores operacionais e metalúrgicos, sendo necessário adotar uma abordagem multivariada para o controle eficaz da qualidade superficial das placas. Conclui-se que o monitoramento localizado da temperatura, a inspeção individual dos bicos de spray e o controle da curva térmica por segmento são estratégias mais eficazes para a prevenção desses defeitos.

Palavras-chave: lingotamento contínuo; trinca de quina; obstrução de bico; resfriamento secundário; qualidade superficial;

ABSTRACT

This study aims to evaluate the impact of spray nozzle blockage in the secondary cooling system on the formation of transverse corner cracks in steel slabs produced by continuous casting. Operational data collected through the Roll Gap Checker (RGC), which detects spray nozzle obstructions, were analyzed along with slab quality inspection records over a 20-month period. An index was developed based on the difference in obstruction between the central and marginal regions of the critical segments of the strand, allowing the assessment of cooling uniformity in each strand zone. This analysis makes it possible to determine whether maintenance or replacement of obstructed spray nozzles is required. Statistical analysis showed no significant correlation between the global obstruction index and the occurrence of slabs with corner cracks. These results suggest that crack formation is influenced by multiple operational and metallurgical factors, requiring a multivariate approach to effectively control surface quality. It is concluded that localized thermal monitoring, individual spray nozzle inspection, and segment-specific thermal curve control are more effective strategies to prevent such defects.

Keywords: continuous casting; corner crack; nozzle blockage; secondary cooling; surface quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo de lingotamento contínuo	11
Figura 2 - Representação esquemática do molde de lingotamento contínuo	12
Figura 3 - Exemplo da distribuição das zonas de resfriamento em máquina de lingotamento contínuo	13
Figura 4 - Mecanismos de transferência de calor no resfriamento secundário	14
Figura 5 - Arranjo de sprays de Air-mist em um segmento de rolos.....	15
Figura 6 - Representação esquemática da redução da ductilidade a quente em função da temperatura	16
Figura 7 - Esquema de defeitos de trincas em placas	17
Figura 8 - Exemplo de trinca transversal de quina em uma placa.....	18
Figura 9- Mecanismo para a formação e propagação das trincas transversais no fundo das marcas de oscilação com o transbordamento da pele do menisco.....	19
Figura 10 - Representação esquemática das tensões trativas e compressivas durante dobramento e desdobramento da placa de aço no processo de lingotamento contínuo.	19
Figura 11 - Dispositivo de Monitoramento de Condição de veio, Roll Gap Checker (RGC)..	21
Figura 12 - Bico de spray entupido	22
Figura 13 - Esquema da distribuição de bicos de spray em um segmento de uma máquina de lingotamento de placas.	24
Figura 14 - Posição dos sprays na parte inferior de um segmento de uma máquina de lingotamento de placas.	25
Figura 15 - Notas de qualidade do veio 01 durante o período analisado.....	27
Figura 16 - Notas de qualidade do veio 02 durante o período analisado.....	27
Figura 17 - Uniformidade do veio 01 durante o período analisado.....	28
Figura 18 - Uniformidade do veio 02 durante o período analisado.....	29
Figura 19 - Uniformidade do veio 01 durante o período analisado.....	32
Figura 20 - Uniformidade do veio 02 durante o período analisado.....	32
Figura 21 - Correlação entre o índice de obstrução dos bicos de spray do veio 01 e a ocorrência de trincas de quina.	33
Figura 22 - Correlação entre o índice de obstrução dos bicos de spray do veio 02 e a ocorrência de trincas de quina.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões das placas analisadas	25
Tabela 2 - Relação entre qualidade do veio 01 e o percentual de ocorrência de trincas	30
Tabela 3 - Relação entre qualidade do veio 01 e razão de ocorrência de trincas	31

1 INTRODUÇÃO

A demanda do mercado por placas de alta qualidade, obtidas por lingotamento contínuo, tem aumentado significativamente. Para garantir a qualidade superficial desejada do aço, um resfriamento eficiente e controlado é essencial durante o processo de lingotamento contínuo. O resfriamento secundário é uma etapa crucial desse processo, na qual bicos de spray são utilizados para pulverizar um fluxo de água e *Air Mist* sobre a superfície da placa em formação (Nascimento, 2019).

De acordo com Thomas, Brimacombe e Samarasekera (1986), Meng e Thomas (2003) e Sengupta, Thomas e Wells (2004), a formação e a propagação de trincas em placas estão relacionadas com o resfriamento não uniforme, com o resfriamento excessivo, com o reaquecimento da placa e com tensões mecânicas. No entanto, a operação contínua dos bicos de spray está sujeita a diversos desafios, e um dos problemas mais frequentes é a obstrução dos orifícios dos bicos de spray. A obstrução pode ocorrer devido a incrustações minerais, acúmulo de sedimentos ou problemas relacionados à qualidade da água utilizada no resfriamento.

Esse trabalho tem como objetivo investigar e analisar o impacto da obstrução de bicos de spray no resfriamento secundário do processo de lingotamento contínuo de placas. Avaliar a relação entre a obstrução de zonas específicas de sprays no resfriamento secundário da máquina de lingotamento contínuo e a ocorrência de trincas transversais de quina em placas de aço destinadas à laminação de chapas grossas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da obstrução de sprays do resfriamento secundário na ocorrência de trincas transversais de quina em placas de aço destinadas a laminação de chapas grossas.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o índice de ocorrência de placas com trincas de quina;
- Avaliar influência de determinada proporção de bicos obstruídos nas ocorrências de trincas de transversais de quina em placas enviadas para laminação de chapas grossas;
- Comparar resultados obtidos com a literatura;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lingotamento Contínuo

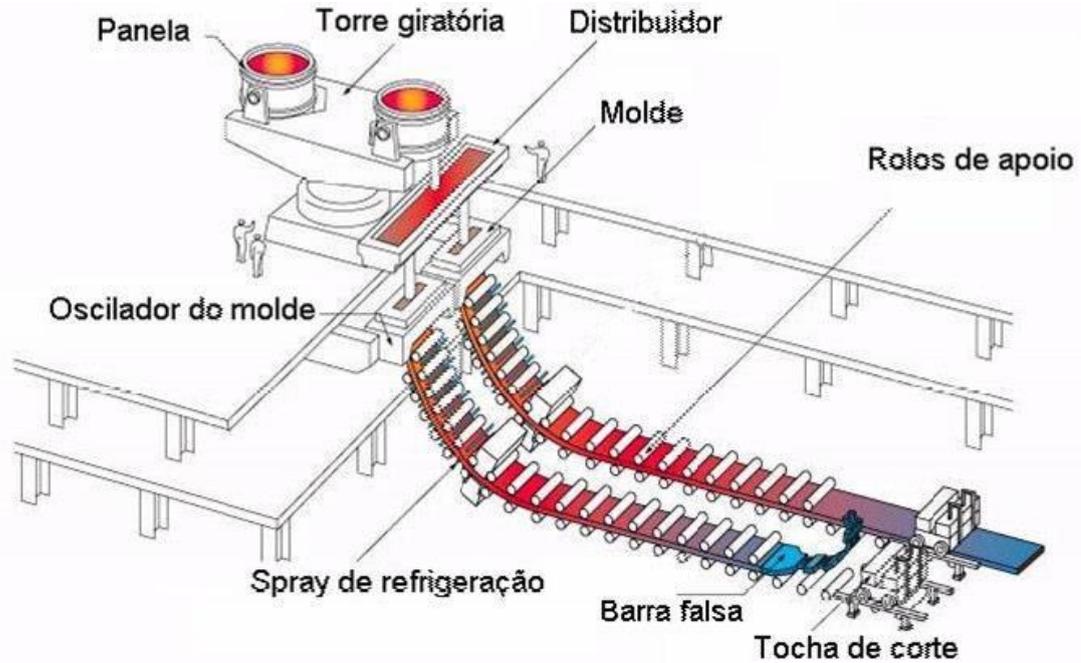
O lingotamento contínuo é um processo de moldagem direta do aço líquido em placas, barras ou tarugos, eliminando a necessidade de etapas intermediárias de solidificação em moldes convencionais. A produção de aço via processo de lingotamento contínuo no mundo representa aproximadamente 96% da produção mundial (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2016).

O processo de lingotamento contínuo se inicia com a chegada da panela de aço líquido, proveniente do último processo de refino, na torre giratória. O aço da panela é transferido para o distribuidor, sendo que a principal função do distribuidor é atuar como um reservatório de aço entre a panela e o molde, e no caso de lingotamento com mais de um veio, para distribuir o líquido nos moldes. Além de ser um reservatório de aço líquido, o distribuidor é cada vez mais usado como vaso de reator metalúrgico que visa melhorar o controle da pureza, temperatura e composição do aço (Mazumdar, 2013).

Em seguida o aço é transferido do distribuidor para o molde, que normalmente são produzidos em liga de cobre, refrigerado a água e tem a função de promover a solidificação inicial do aço, formando a “pele”, que retém o aço líquido na parte interna da peça após a saída do molde. A placa segue então para o resfriamento secundário, formado por bicos de spray de água e ar posicionados ao longo da superfície da placa, rolos de sustentação e extração que rotacionam a uma velocidade que corresponde a taxa de entrada de aço no molde mantendo o processo contínuo (velocidade de lingotamento) (Mourão, 2007).

Após a placa sair do último segmento, ela é medida e seccionada, conforme programação de comprimentos requeridos pelo cliente, através da máquina de corte, em seguida a placa é marcada, visando sua identificação no processo. Por fim, a placa segue para a área de acabamento onde é inspecionada e escarificada, caso seja necessário. A FIG. 1 apresenta, de forma esquemática, um sistema de lingotamento contínuo.

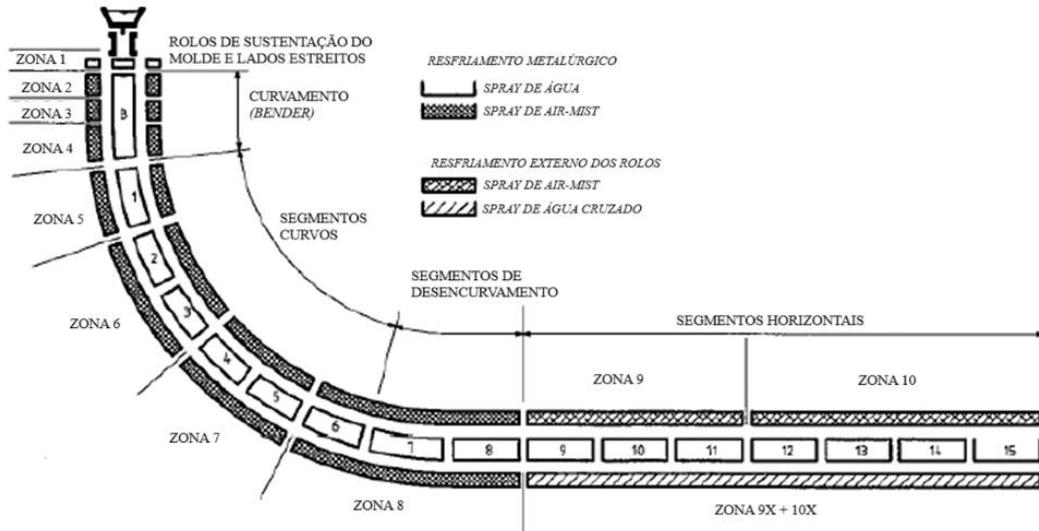
Figura 1 - Esquema do processo de lingotamento contínuo



Fonte: Adaptado de JFE (2023)

Na transferência do aço da panela para o distribuidor, e distribuidor para o molde é utilizado, respectivamente, o tubo longo e a válvula submersa para evitar a reoxidação do aço. Ainda é utilizado uma escória sintética no distribuidor e pó fluxante no molde para evitar a reoxidação e perda de calor em excesso para atmosfera. O pó fluxante utilizado no molde também é responsável por lubrificar, capturar inclusões e controlar a transferência de calor entre a pele e placa de cobre (Nascimento, 2019). A FIG. 2 apresenta, de forma esquemática, um detalhamento do molde de lingotamento contínuo.

Figura 3 - Exemplo da distribuição das zonas de resfriamento em máquina de lingotamento contínuo



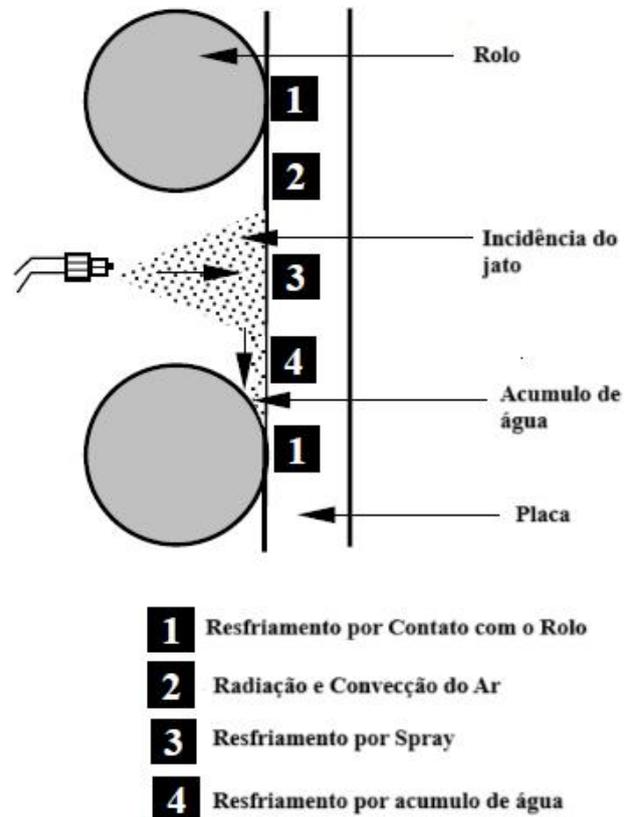
Fonte: Adaptado de Reynolds et al. (2003).

O resfriamento no veio ocorre da seguinte maneira:

- (i) Transferência de calor por condução devido ao contato da placa com o rolo;
- (ii) Transferência de calor por radiação devido troca de calor da placa com o ambiente;
- (iii) Resfriamento devido ao acúmulo de água nos rolos;

Na FIG. 4 é apresentado o mecanismo de transferência de calor na zona de sprays.

Figura 4 - Mecanismos de transferência de calor no resfriamento secundário



Fonte: Adaptado de Sengupta, Thomas e Wells (2004).

Há dois tipos básicos de resfriamento secundário. O primeiro é o chamado de resfriamento hidráulico, ou seja, pelos bicos do spray passa somente água para refrigerar o veio. No segundo tipo, e largamente utilizado pelas máquinas de lingotamento, ar e água são misturados, provocando a atomização da água, diminuindo o tamanho da gota, tornando mais eficiente a troca de calor com o veio, é o chamado de *Air-Mist* (Mourão, 2007).

A FIG. 5 mostra o posicionamento dos sprays de *Air-Mist* em um segmento de rolos de uma máquina de lingotamento contínuo de placas.

Figura 5 - Arranjo de sprays de *Air-mist* em um segmento de rolos.



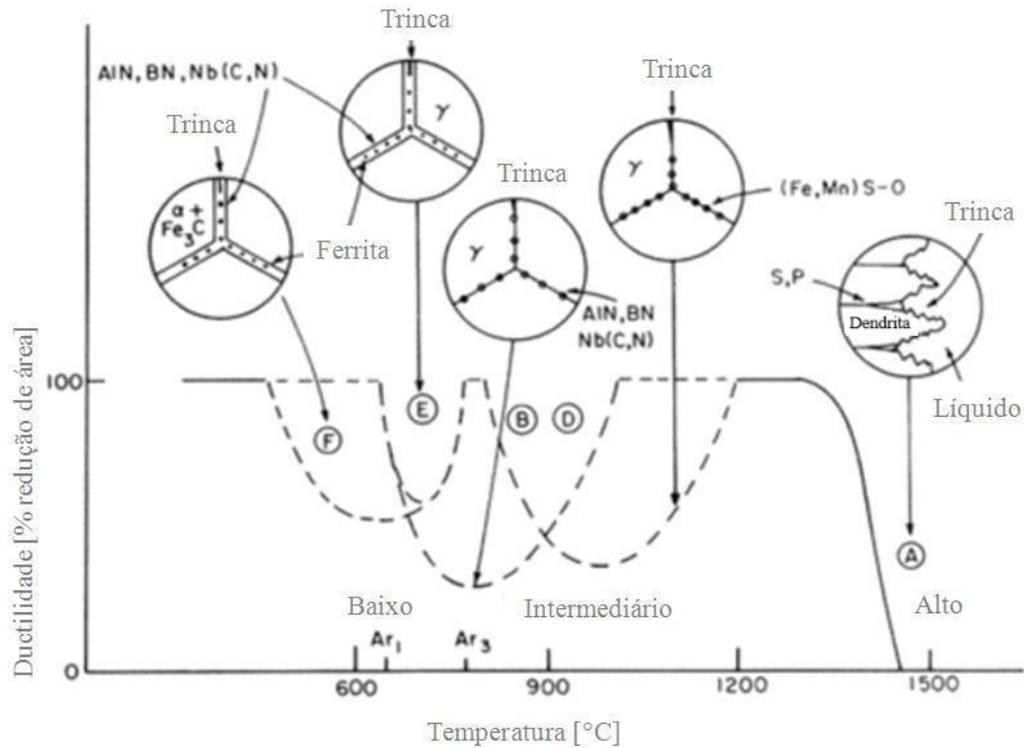
Fonte: Adaptado de Bauer-Öppinger (2008)

O resfriamento secundário é uma parte essencial do lingotamento contínuo. A nova geração de bicos permite controle da intensidade de resfriamento definindo uma combinação das pressões da água e do ar. O resfriamento deve ser controlado no que diz respeito à velocidade de lingotamento, tipo de aço e outras demandas tecnológicas. O conhecimento dos parâmetros de transferência de calor é necessário para controle de sistemas de resfriamento secundário. O conhecimento dos parâmetros de refrigeração também é necessário para a preparação de modelos de resfriamento para grupos de aços (Raudensky e Horsky, 2005).

3.3 Defeitos Em Placas De Lingotamento Contínuo

Um dos principais parâmetros que influenciam o índice de trinca é a ductilidade a quente do material, que depende da temperatura, da taxa de deformação e da composição química do aço (Thomas, Brimacombe e Samarasekera, 1986). Na FIG. 6 é apresentada a variação da ductilidade a quente em função da temperatura.

Figura 6 - Representação esquemática da redução da ductilidade a quente em função da temperatura



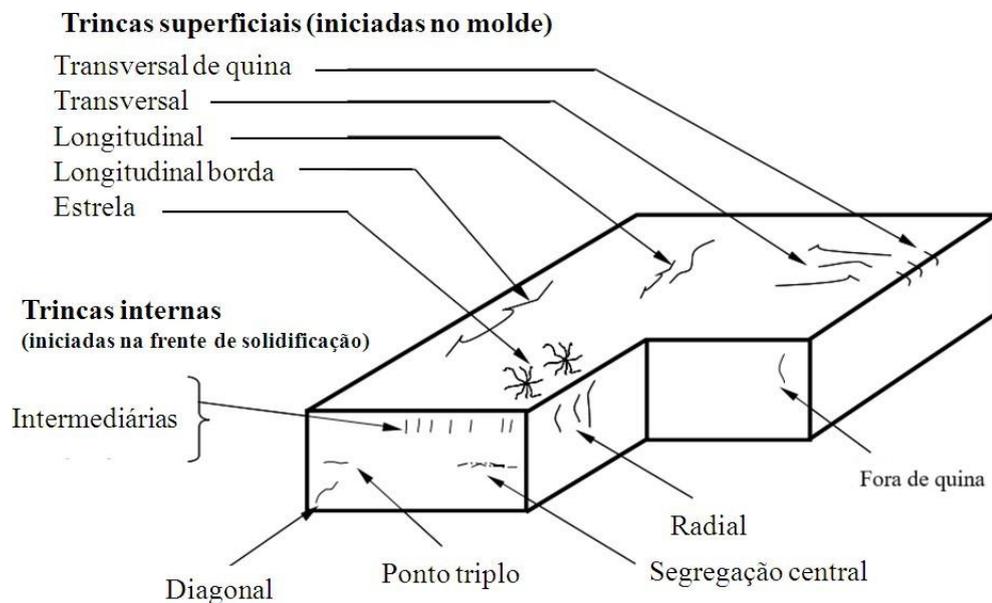
Fonte: Adaptado de Thomas, Brimacombe e Samarasekera (1986).

Na FIG. 6 a primeira faixa de temperatura de baixa ductilidade do aço varia entre a temperatura *solidus* até 1340°C, onde ocorre a presença de líquido interdendrítico. Nessa região, há uma tendência para a formação da maioria das trincas internas. Entre 1200°C e 900°C, observa-se a precipitação de sulfetos nos contornos de grãos, resultando em uma concentração de tensões na matriz austenítica enfraquecida. Esse fenômeno pode estar associado à formação das trincas estrela ("star cracks") e das trincas longitudinais do meio da face ("longitudinal midface cracks"). Já na faixa de temperatura entre 900°C e 600°C, ocorre a precipitação de nitretos, carbeto e carbonitretos nos contornos de grãos, o que leva a uma concentração adicional de tensões em torno dos precipitados, com formação de micro cavidades, que se desenvolvem em trincas. As operações de encurvamento e desencurvamento do veio devem ocorrer fora das regiões de baixa ductilidade para que os problemas devidos às tensões mecânicas sejam minimizados (Thomas, Brimacombe e Samarasekera, 1986).

De acordo com Nascimento (2019), práticas impróprias de resfriamento podem contribuir para muitos dos defeitos indicados na FIG. 7. Resfriamento excessivo e/ou abrangência insuficiente do spray podem causar reaquecimento na placa, o que induz tensões abaixo da

superfície e na frente de solidificação, provocando a formação de trincas internas. Resfriamento assimétrico nas quinas induz distorção e trincas diagonais. Vazões altas de água nos sprays irão produzir taxas altas de resfriamento e tensões altas na superfície da placa, o que pode abrir pequenas trincas formadas no molde. Por outro lado, resfriamento mais suave abaixo do molde pode acarretar um abaulamento da placa devido a altas temperaturas da pele. Neste caso serão observadas trincas no ponto tríplice, subsuperficiais, longitudinais, centrais e segregação central. Trincas transversais e de quina são iniciadas no molde, mas podem abrir devido a tensões induzidas pelo resfriamento secundário, quando a temperatura da superfície estiver na faixa de baixa ductilidade do aço 600-900°C. Sengupta, Thomas e Wells (2004) apresentam em seu estudo que práticas de resfriamento com flutuações excessivas de temperatura podem também agravar estas trincas, especialmente na faixa de temperatura de baixa ductilidade.

Figura 7 - Esquema de defeitos de trincas em placas



Fonte: Adaptado de Sengupta, Thomas e Wells (2004).

As trincas superficiais transversais ocorrem no centro da face larga ou nas quinas da placa, conforme exemplo na FIG. 8, geralmente ao longo da base das marcas de oscilação. As trincas de quina podem apresentar-se de 3mm a 30mm de comprimento e de 1mm a 10mm de profundidade. Em geral elas surgem na face relativa ao raio interno nas máquinas curvas, as quais apresentam somente regiões de desdobramento da placa. Por outro lado, essas trincas podem ocorrer em ambas as faces nas máquinas verticais curvas, as quais

possuem regiões de dobramento e desdobramento da placa (Alvarenga, 2012).

Figura 8 - Exemplo de trinca transversal de quina em uma placa

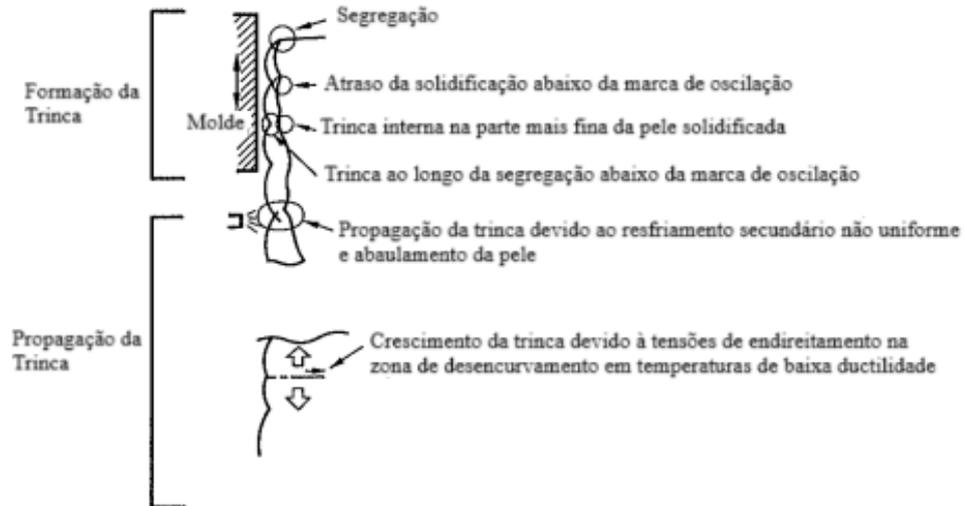


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

De acordo com Harada *et al.* (1990), a trinca transversal pode ser formada da seguinte forma (ver FIG. 9): primeiramente há uma segregação na linha do menisco; este provoca um atraso na solidificação na marca de oscilação; na região do atraso da solidificação aparece uma trinca interna na pele em solidificação mais fina; ao longo da marca de oscilação surge uma pequena trinca simétrica à trinca anterior que pode se propagar por causa de um resfriamento secundário não uniforme e/ou do abaulamento da pele em solidificação devido à pressão ferrostática que a casca tem de suportar sem o auxílio das paredes do molde; posteriormente há o crescimento da trinca devido às tensões do endireitamento nos intervalos de temperatura de baixa ductilidade.

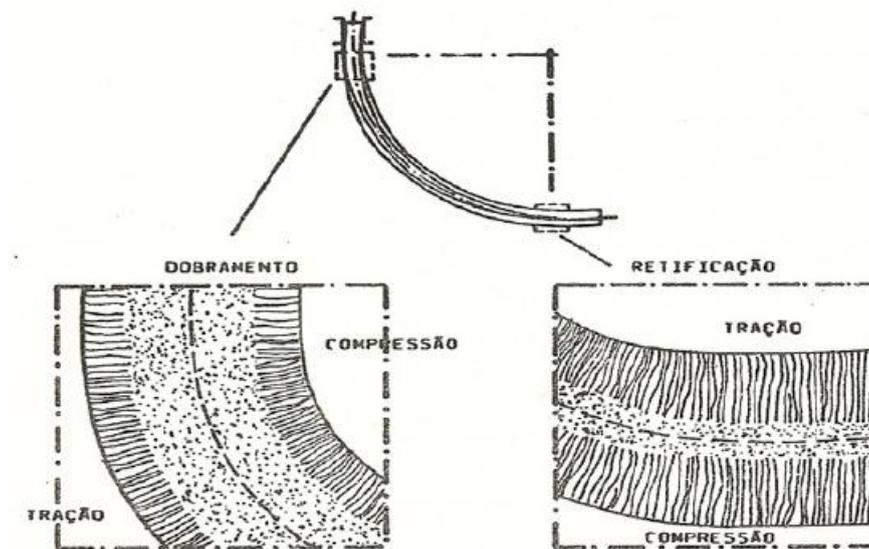
De acordo com Maehara e Olmori (1984), durante o dobramento e desdobramento da placa, tensões axiais são introduzidas à pele. Na etapa de dobramento, tensões trativas são induzidas na superfície inferior da placa e tensões compressivas, na superfície superior. Já no desdobramento, os estados de tensões são invertidos. A FIG.10 representa esquematicamente as tensões trativas e compressivas durante o dobramento e desdobramento da placa de aço no processo de lingotamento contínuo.

Figura 9- Mecanismo para a formação e propagação das trincas transversais no fundo das marcas de oscilação com o transbordamento da pele do menisco



Fonte: Adaptado de Harada *et al.* (1990).

Figura 10 - Representação esquemática das tensões trativas e compressivas durante dobramento e desdobraimento da placa de aço no processo de lingotamento contínuo.



Fonte: Adaptado de Maehara e Olmori (1984)

3.4 Roll Gap Checker

A FIG. 11 mostra a aparência externa do Dispositivo de Monitoramento de Condição de

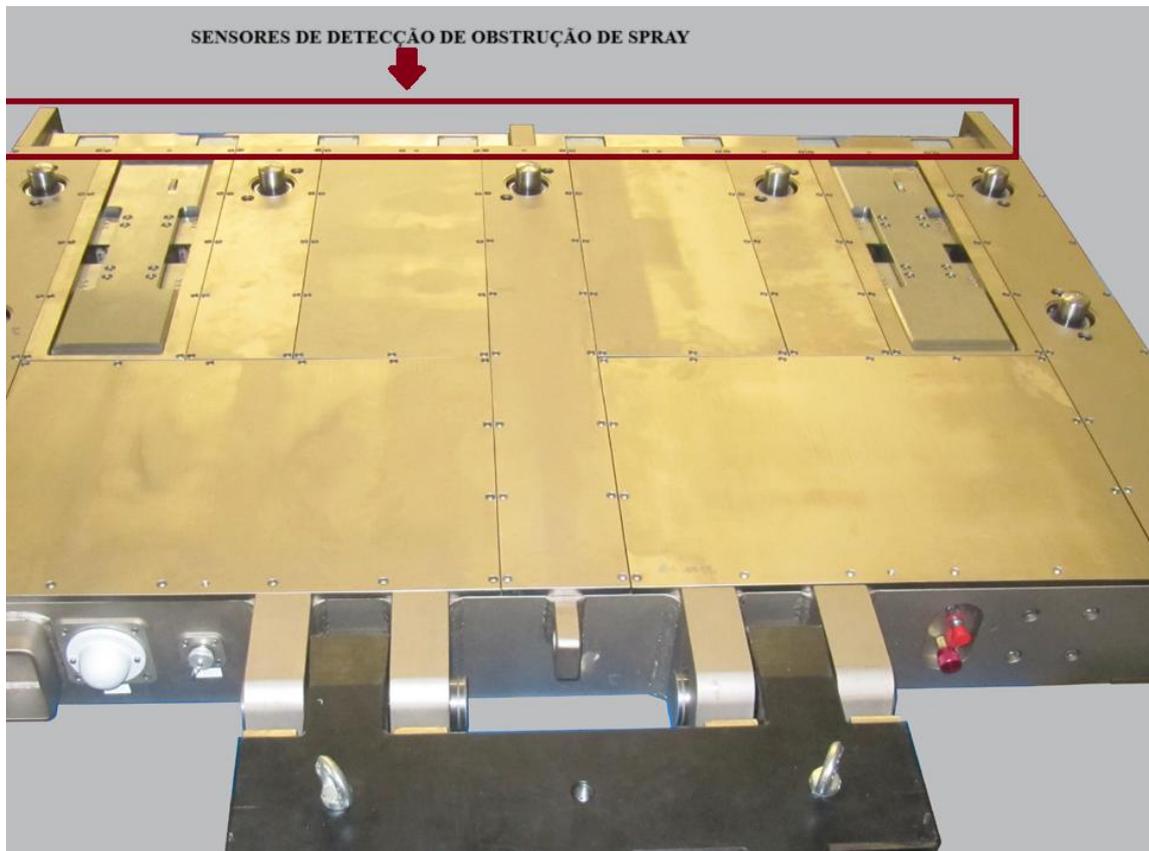
veio ou *Roll Gap Checker (RGC)*. Ele tem uma aparência semelhante a uma barra falsa, que é usada para extrair placas no início do lingotamento contínuo. Quando se deseja medir a condição do lingotamento, o RGC é acoplado a barra falsa. O monitoramento é realizado enquanto a barra falsa é extraída através do veio (Lee; Cho; Kang, 1999).

Durante o lingotamento de placas, a força ferrostática é aplicada aos rolos dos segmentos, para simular essa força ferrostática, atuadores fixados nas laterais largas do RGC aplicam força aos rolos. Os atuadores operam por meio de um sistema de molas e hidráulico. O RGC é controlado remotamente por ondas de rádio, e as sequências de operação, como o acionamento do dispositivo, reconhecimento do número do rolo e controle dos atuadores, são realizadas automaticamente por um microprocessador embutido. São utilizados 5 tipos de sensores: sensores de folga entre rolos, sensores de flexão dos rolos, sensores de alinhamento dos rolos, sensores de detecção de entupimento dos sprays e sensores de rotação dos rolos (Lee; Cho; Kang, 1999).

A FIG. 11 mostra os sensores de detecção de entupimento de sprays posicionados na parte superior do dispositivo. A pressão do spray é detectada por meio de microfones fixados em uma placa. A distribuição da água de spray pode ser calculada a partir do sinal de pressão e do grau de obstrução dos bicos.

Como não é possível usar energia elétrica externa, uma bateria é incorporada ao dispositivo, sendo utilizada na bomba hidráulica, recepção de sinais, comunicação por ondas de rádio e nos controladores. A estrutura da carcaça é construída com aço inoxidável para que o dispositivo possa ser usado em ambientes severos por longos períodos (Lee; Cho; Kang, 1999).

Figura 11 - Dispositivo de Monitoramento de Condição de veio, Roll Gap Checker (RGC)



Fonte: Adaptado de Primetals Technologies (2020)

De acordo com Lechler (2019), os principais problemas que podem ocorrer com os bicos de spray são:

- Erosão / desgaste: A degradação do metal do bico de spray e dos canais internos de fluxo provoca aumento e/ou deformação das aberturas. O fluxo normalmente aumenta, a pressão pode diminuir, o padrão de pulverização torna-se irregular e as gotas ficam maiores.
- Corrosão: Degradação do material do bico devido à ação química do líquido pulverizado ou do ambiente. Os efeitos são semelhantes aos causados por erosão e desgaste, podendo haver ainda danos adicionais nas superfícies externas do bico.
- Incrustação: Acúmulo de material nas bordas internas ou externas do orifício, causado pela evaporação do líquido, que deixa uma camada de sólidos secos e obstrui o bico de spray ou os canais internos de fluxo.

- Entupimento: Partículas sólidas indesejadas bloqueiam o interior do orifício, restringindo o fluxo e prejudicando a uniformidade do padrão de pulverização, conforme exemplificado na FIG. 12.

Figura 12 - Bico de spray entupido



Fonte: Lechler (2019)

- Montagem incorreta: Alguns bicos exigem remontagem cuidadosa após a limpeza para garantir que componentes internos, como juntas, anéis de vedação e válvulas, estejam corretamente alinhados. O posicionamento inadequado pode causar vazamentos e comprometer a eficiência da pulverização. Além disso, apertos excessivos das tampas dos bicos nos corpos podem danificar as roscas.

- Dano acidental: Danos ao bico causados por riscos ou manuseio inadequado durante a instalação ou operação. Orifícios menores podem ser severamente danificados pelo uso de ferramentas impróprias durante a limpeza.

- Aumento da vazão: Em todos os bicos, a vazão aumenta à medida que as superfícies do orifício e/ou dos elementos internos começam a se deteriorar, o que pode prejudicar a qualidade do produto ou do processo.

- Qualidade do padrão de pulverização: O padrão do tipo leque tende a se deteriorar, apresentando listras, maior concentração de fluxo no centro do leque e redução na cobertura angular efetiva da pulverização.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a influência da obstrução dos bicos de spray na zona de resfriamento secundário do lingotamento contínuo sobre a formação de trincas transversais de quina nas placas. Para isso, foram utilizados dados operacionais de uma máquina de lingotamento de placas de dois veios e registros de inspeção de qualidade das placas produzidas.

4.1 Avaliação da Qualidade do Veio

A condição do veio foi avaliada com base nas medições do equipamento *Roll Gap Checker* (RGC), que detecta o percentual de obstrução de cada bico de spray do resfriamento secundário. Foram consideradas as medições realizadas em um período de 20 meses, com intervalo médio de aproximadamente 10 dias entre cada medição. Os dados gerados foram inseridos em uma planilha desenvolvida para o cálculo da qualidade do veio.

A avaliação concentrou-se exclusivamente nos segmentos 6, 7 e 8 da Zona 8, conforme representado na FIG. 3, por se tratar de uma região crítica do processo de resfriamento. Essa criticidade se deve ao crescimento da trinca transversal de quina nessa zona devido às tensões mecânicas geradas durante o descurvamento do veio, conforme descrito por Harada *et al.* (1990).

Cada segmento é composto por 56 bicos de spray, sendo 28 posicionados na parte superior e 28 na parte inferior, conforme representado na FIG. 13.

Figura 13 - Esquema da distribuição de bicos de spray em um segmento de uma máquina de lingotamento de placas.

SEGMENTO (PARTE SUPERIOR)				SEGMENTO (PARTE INFERIOR)			
MARGEM	CENTRO		MARGEM	MARGEM	CENTRO		MARGEM
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
ROLO				ROLO			
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆

◆ = BICO DE SPRAY

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para fins de análise, os bicos foram agrupados em quatro regiões distintas por segmento, com 14 bicos por região, conforme descrito abaixo:

- Margem superior
- Margem inferior
- Centro superior
- Centro inferior

Para cada região cuja média de obstrução dos 14 bicos ultrapassou 30%, foi atribuída uma penalização de 0,3 ponto na nota do segmento. A nota de cada segmento foi calculada da seguinte forma:

$$\text{Nota do segmento} = 10 - (0,3 \times (\text{número de regiões com média de obstrução maior que 30\%}))$$

A nota final do veio foi então determinada subtraindo-se do valor máximo (10) a soma das penalizações dos três segmentos avaliados:

$$\text{Nota final} = 10 - (\text{soma das notas dos segmentos 6, 7 e 8})$$

A FIG. 14 mostra o posicionamento dos sprays na parte inferior de um segmento de uma máquina de lingotamento de placas.

Figura 14 - Posição dos sprays na parte inferior de um segmento de uma máquina de lingotamento de placas.



Fonte: Lechler (2019)

4.2 Identificação de Placas com Trinca Transversais de Quina

Com base no banco de dados industrial, foram selecionadas todas as placas lingotadas destinadas à laminação de chapas grossas que, no momento do envio para o processo de laminação, apresentaram trincas transversais de quina. A TAB. 1 apresenta as dimensões dessas placas no período analisado. O estudo considerou aços com teor de carbono variando entre 0,05% e 0,45%.

Tabela 1 - Dimensões das placas analisadas

<u>DIMENSÕES DAS PLACAS [mm]</u>
220 x 1600
250 x 1100
250 x 1320
250 x 1400
250 x 1502
250 x 1600
250 x 1800
250 x 1870
250 x 1900
250 x 2010
250 x 2100

4.3 Cruzamento dos Dados e Análise

Foi realizado o cruzamento dos dados de qualidade do veio (QS) com a quantidade de placas com trincas de quina associadas a cada veio. Esse levantamento permitiu observar a relação direta entre a condição de resfriamento (avaliada via índice de obstrução dos bicos) e a ocorrência de falhas superficiais.

Os dados foram organizados em tabelas e representados graficamente para permitir uma visualização da relação entre notas baixas de qualidade do veio e o maior número de trincas de borda, possibilitando uma discussão técnica sobre o impacto do resfriamento irregular na integridade superficial das placas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos representados nas FIG. 15 e FIG. 16 mostram as notas de qualidade do Veio 01 e Veio 02 de uma máquina de lingotamento de placas de dois veios durante o período de 20 meses.

Figura 15 - Notas de qualidade do sistema de resfriamento secundário do veio 01 durante o período analisado.

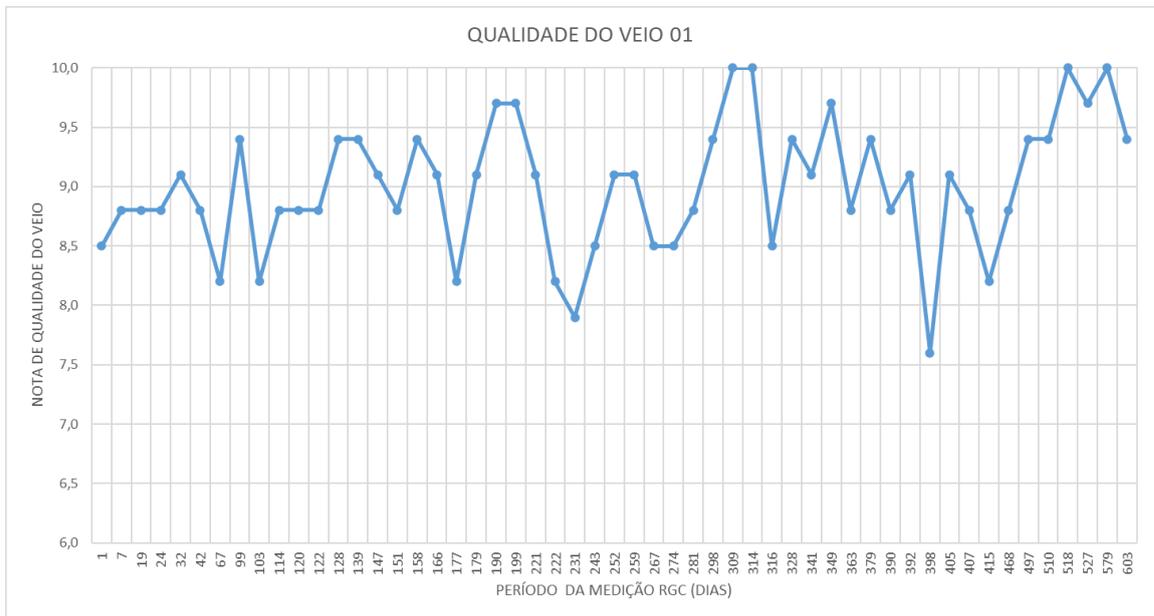
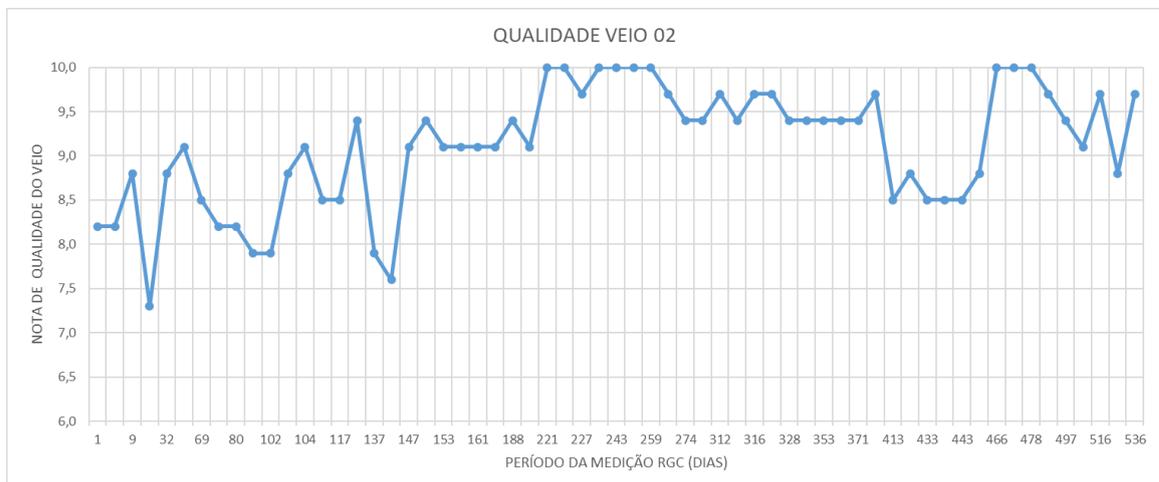


Figura 16 - Notas de qualidade do sistema de resfriamento secundário do veio 02 durante o período analisado.



A análise dos gráficos mostra notas predominantemente entre 8,0 e 10,0. Ambos os veios apresentaram oscilações recorrentes no índice de qualidade do sistema de resfriamento secundário, seguidas de recuperações rápidas, devido as ações de manutenção,

especialmente a substituição ou limpeza dos bicos de spray obstruídos identificados durante as medições.

Também foi avaliado a uniformidade do resfriamento secundário, sendo a comparação da qualidade dos bicos de spray localizados na margem e no centro do segmento, com base no grau de obstrução desses bicos. Esse parâmetro indica a quão homogênea é a aplicação de água sobre a superfície da placa durante a solidificação. Obstruções parciais causam desbalanceamento no resfriamento, resultando em gradientes térmicos transversais que favorecem o surgimento de trincas, especialmente nas quinas. As FIG. 17 e FIG. 18 representam os gráficos de uniformidade dos veios 1 e 2 respectivamente. Quanto maior a distância entre as linhas dos gráficos, menor a uniformidade do resfriamento do veio. Se a uniformidade do veio for igual a zero significa que o resfriamento secundário está homogêneo, quanto maior o valor de uniformidade, maior é a diferença na obstrução de bicos de spray entre a margem e o centro dos segmentos.

Figura 17 - Uniformidade do resfriamento secundário do veio 01 durante o período analisado.

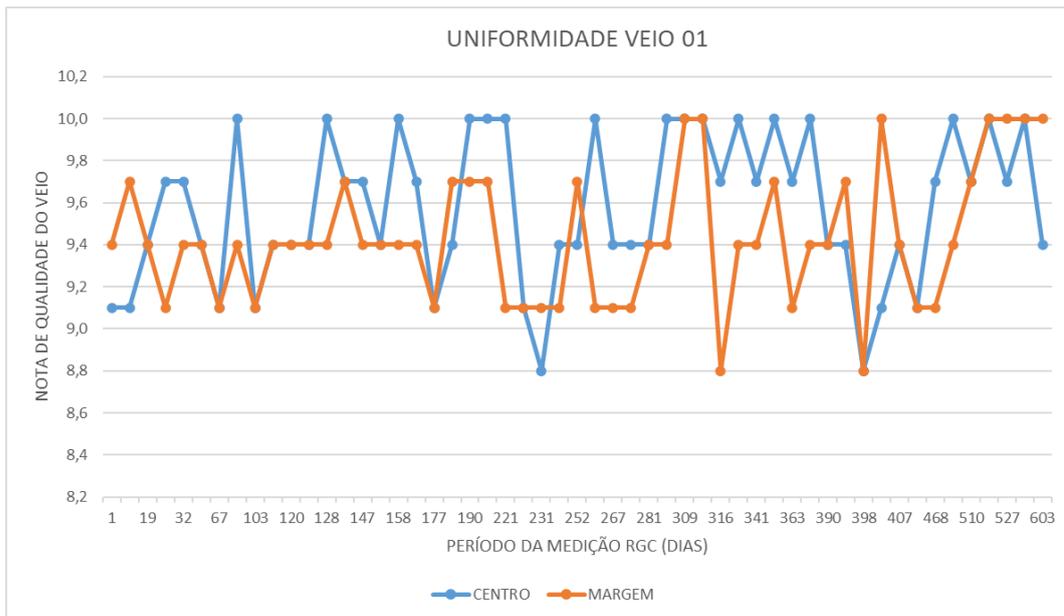
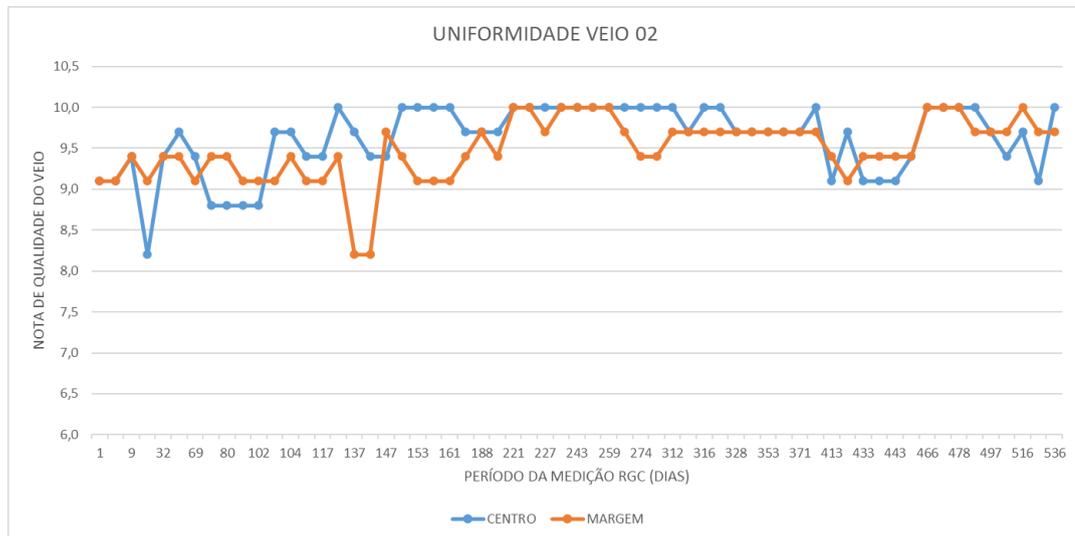


Figura 18 - Uniformidade do resfriamento secundário do veio 02 durante o período analisado



As TAB. 2 e TAB. 3 mostram a relação entre o valor de qualidade dos veios e a razão da massa de placas com trinca de quina e o total de massa placas produzidas no período analisado, os dados da razão foram normalizados para pelo maior valor para gerar um indicador de ocorrência de trincas.

A análise da TAB. 2 e TAB. 3 demonstra que os maiores índices de trincas foram registrados justamente em períodos em que a nota de qualidade do veio estavam em torno de 9 e 10. Esses dados indicam que, durante o intervalo analisado, a alta nota de qualidade do veio não foi um indicativo de menor incidência de trincas, ao mesmo tempo que com notas semelhantes em outros períodos não foram identificadas ocorrências de trinca de quina. Isso evidencia que, neste caso, a nota de qualidade do veio não se correlaciona diretamente com a ocorrência de trincas de quina.

Tabela 2 - Relação entre qualidade do veio 01 e a razão de ocorrência de trincas

PERÍODO (DIAS)	QUALIDADE DO VEIO	OCORRÊNCIA DE TRINCAS
1	8,5	0,00
7	8,8	0,01
19	8,8	0,00
24	8,8	0,00
32	9,1	0,00
42	8,8	0,00
67	8,2	0,00
99	9,4	0,00
103	8,2	0,00
114	8,8	0,00
120	8,8	0,00
122	8,8	0,01
128	9,4	0,01
139	9,4	0,00
147	9,1	0,00
151	8,8	0,01
158	9,4	0,00
166	9,1	0,01
177	8,2	0,00
179	9,1	0,01
190	9,7	0,07
199	9,7	0,03
221	9,1	0,03
222	8,2	0,26
231	7,9	0,35
243	8,5	0,26
252	9,1	0,27
259	9,1	0,15
267	8,5	0,09
274	8,5	0,06
281	8,8	0,16
298	9,4	0,15
309	10	0,14
314	10	0,03
316	8,5	0,25
328	9,4	0,39
341	9,1	0,10
349	9,7	0,11
363	8,8	0,11
379	9,4	0,00
390	8,8	0,00
392	9,1	0,00
398	7,6	0,01
405	9,1	0,01
407	8,8	0,54
415	8,2	1,00
468	8,8	0,64
497	9,4	0,31
510	9,4	0,24
518	10	0,85
527	9,7	0,70
579	10	0,36
603	9,4	0,00

Tabela 3 - Relação entre qualidade do veio 02 e a razão de ocorrência de trincas

PERÍODO (DIAS)	QUALIDADE DO VEIO	OCORRÊNCIA DE TRINCAS
1	8,2	0,00
2	8,2	0,00
9	8,8	0,00
16	7,3	0,02
32	8,8	0,01
42	9,1	0,01
69	8,5	0,00
70	8,2	0,00
80	8,2	0,00
96	7,9	0,01
102	7,9	0,00
103	8,8	0,00
104	9,1	0,00
115	8,5	0,00
117	8,5	0,02
126	9,4	0,03
137	7,9	0,00
139	7,6	0,00
147	9,1	0,03
151	9,4	0,00
153	9,1	0,01
160	9,1	0,00
161	9,1	0,03
177	9,1	0,03
188	9,4	0,00
191	9,1	0,22
221	10	0,00
222	10	0,47
227	9,7	0,09
231	10	0,46
243	10	0,56
252	10	0,43
259	10	0,25
266	9,7	0,22
274	9,4	0,14
281	9,4	0,99
312	9,7	0,00
314	9,4	0,02
316	9,7	0,22
321	9,7	0,06
328	9,4	0,26
341	9,4	0,32
353	9,4	0,04
361	9,4	0,08
371	9,4	0,12
379	9,7	0,69
413	8,5	0,28
422	8,8	0,46
433	8,5	0,24
439	8,5	0,00
443	8,5	0,00
444	8,8	0,44
466	10	0,08
468	10	0,23
478	10	0,43
490	9,7	0,20
497	9,4	0,56
507	9,1	0,16
516	9,7	0,20
528	8,8	0,02
536	9,7	1,00

Figura 21 - Correlação entre o índice de obstrução dos bicos de spray do veio 01 e a ocorrência de trincas de quina.

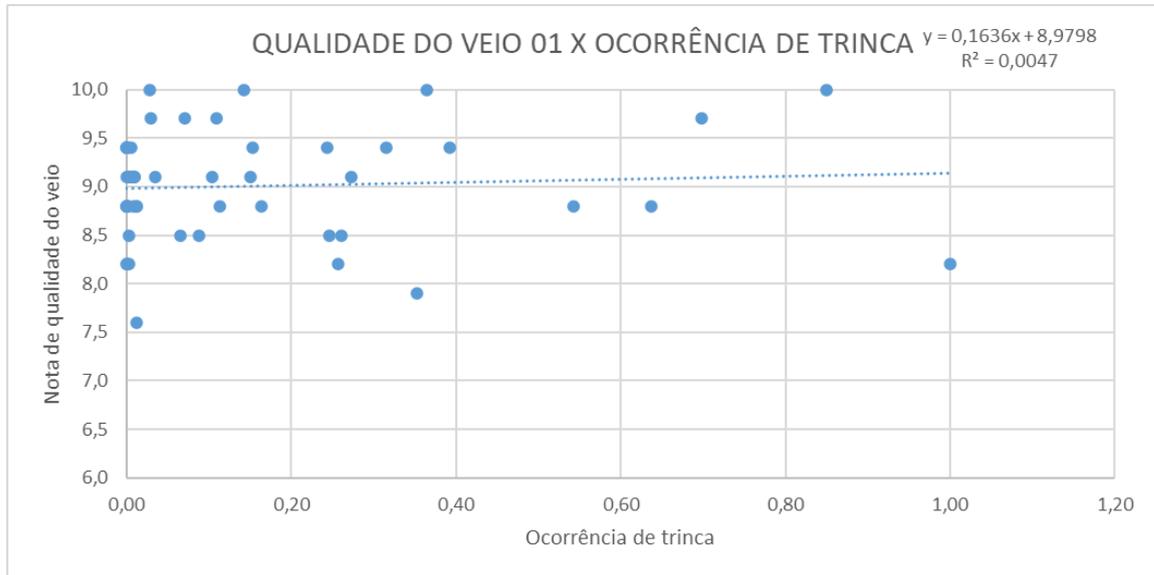
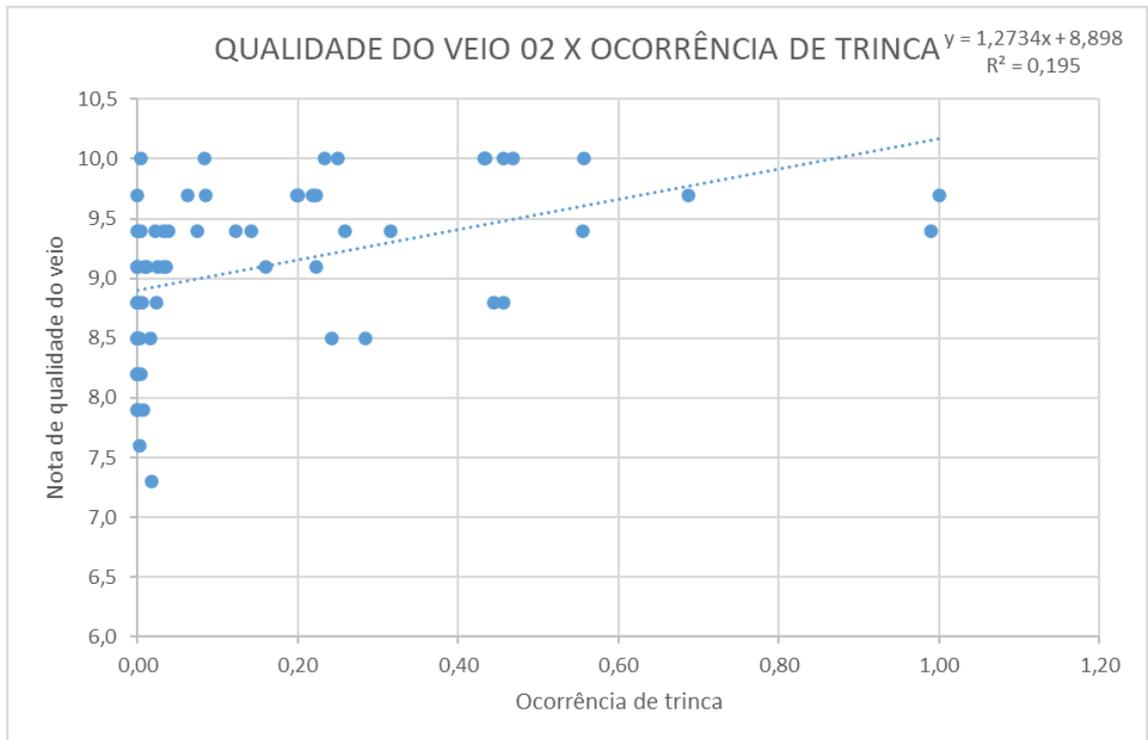


Figura 22 - Correlação entre o índice de obstrução dos bicos de spray do veio 02 e a ocorrência de trincas de quina.



A análise dos dados obtidos ao longo do período de 20 meses permitiu avaliar a relação entre a condição operacional dos veios da máquina de lingotamento contínuo de placas, a uniformidade do resfriamento secundário e a ocorrência de trincas transversais de quina nas placas produzidas.

As notas de qualidade dos Veios 01 e 02, conforme evidenciado nas FIG. 15 e FIG. 16, apresentaram valores consistentemente elevados (entre 8,0 e 10,0), com quedas pontuais seguidas de recuperações, atribuídas às ações de manutenção preventiva e corretiva, como a substituição ou desobstrução dos bicos de spray. No entanto, a análise das TAB. 2 e TAB. 3 mostrou que não há correlação direta entre a nota de qualidade do veio e o percentual de placas com trinca, uma vez que altos índices de defeitos foram observados mesmo em períodos com notas máximas de qualidade. Os gráficos das FIG. 21 e FIG. 22 demonstram que não existe relação significativa entre a ocorrência de trinca de quina e a nota de qualidade dos veios analisados. Ambos os gráficos apresentam coeficientes de determinação (R^2) extremamente baixos, 0,0047 para o Veio 01 e 0,195 para o Veio 02, evidenciando que a variação das notas de qualidade do não explica a ocorrência de trincas.

Além disso, os gráficos de uniformidade do resfriamento secundário FIG. 17 e FIG. 18 indicam variações entre a condição dos bicos localizados nas margens e no centro do segmento. O índice de uniformidade foi construído a partir da diferença entre o grau de obstrução dos bicos nas regiões centrais e marginais. Em teoria, maiores diferenças indicariam menor uniformidade térmica e maior potencial de geração de trincas. Contudo, os gráficos de correlação entre esse índice e a ocorrência de trincas FIG. 19 e FIG. 20 apresentaram coeficientes de determinação muito baixos ($R^2 = 0,0072$ para o Veio 01 e $R^2 = 0,0458$ para o Veio 02), o que demonstra a inexistência de correlação estatisticamente significativa entre essas variáveis.

Esses resultados indicam que o índice global de qualidade do veio a partir da obstrução dos bicos de spray não é suficiente para representar, de forma isolada, o risco de formação de trincas. A ocorrência desses defeitos está associada a diversos fatores, como gradientes térmicos intensos em regiões periféricas da placa, especialmente durante o desdobramento do veio, a composição química do aço, o alinhamento da máquina, a velocidade de lingotamento, e a distribuição de calor ao longo da largura da placa.

Alvarenga (2012) demonstrou que regimes de resfriamento secundário com menor intensidade favorecem a ductilidade a quente e reduzem o risco de trincamento superficial. Isso explica por que altos índices de obstrução (que reduzem a vazão de resfriamento) podem, em alguns casos, coincidir com baixos percentuais de trinca. Tal comportamento

reforça que a simples medição do grau de obstrução não traduz necessariamente o efeito térmico real no material.

Com base nesses achados, conclui-se que o controle de qualidade no lingotamento contínuo exige uma abordagem multivariada, com ênfase em variáveis térmicas localizadas e inspeção contínua dos componentes do sistema de resfriamento. Tecnologias como termografia infravermelha em tempo real, modelos computacionais de transferência de calor e monitoramento individualizado dos bicos de spray são fundamentais para a identificação precoce de condições críticas de operação. A integração dessas ferramentas com dados operacionais e históricos de manutenção pode permitir o desenvolvimento de modelos preditivos de risco de trinca, otimizando a confiabilidade do processo e a qualidade do produto final.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o impacto da obstrução parcial dos bicos de spray do sistema de resfriamento secundário na formação de trincas transversais de quina em placas de aço produzidas por lingotamento contínuo. Foram analisadas variáveis como o percentual mensal de placas com trinca em relação ao total produzido, e sua correlação com a nota de qualidade do veio atribuída durante a medição do RGC.

Para os dados disponíveis não foi observado uma correlação direta entre a nota de qualidade do veio e a ocorrência de trincas de quina, com coeficiente de correlação estatisticamente baixo. Este resultado indica que a avaliação global do veio não é suficientemente sensível para detectar falhas localizadas no sistema de resfriamento que resulte em ocorrência de trincas transversais de quina.

Esses achados confirmam que a formação de trincas de quina é um fenômeno multifatorial, fortemente influenciado por condições térmicas específicas nas extremidades da placa, como distribuição assimétrica de resfriamento, variações operacionais e composição química do aço.

Esse comportamento está de acordo com a literatura, que aponta a fragilidade do aço na faixa de 700–900 °C como determinante para o surgimento das trincas, quando associada a tensões térmicas e deformações na etapa de desencurvamento.

Dessa forma, conclui-se que o monitoramento efetivo da integridade superficial do produto requer uma abordagem integrada, com foco em parâmetros térmicos localizados, inspeções sistemáticas dos sistemas de resfriamento, controle da curva térmica por segmento e utilização de ferramentas avançadas de análise preditiva. A adoção dessas práticas pode elevar a confiabilidade do processo e minimizar a ocorrência de trincas, promovendo ganhos de produtividade e qualidade no lingotamento contínuo de placas.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a qualidade de resfriamento e comparar com a ocorrência de trincas para cada classe de aço.
- Monitoramento térmico em tempo real da placa: Implementar termografia infravermelha ou sensores embarcados para medir a temperatura superficial ao longo do resfriamento secundário.
- Análise de falha dos bicos de spray: Realizar um estudo detalhado de obstruções, vazamentos e variações de vazão por bico, correlacionando com ocorrências de trinca por segmento da máquina.
- Simulação computacional do perfil térmico da placa com falhas localizadas no spray: Utilizar software de dinâmica dos fluidos e transferência de calor para simular o efeito da obstrução parcial de bicos e o impacto térmico localizado nas placas.
- Desenvolvimento de um modelo preditivo de risco de trinca: Integrar dados de operação (temperatura, velocidade, histórico de manutenção dos bicos) com algoritmos de machine learning para prever, em tempo real, a probabilidade de ocorrência de trincas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, Deivison Morais. Efeito da composição química e do volume de água do resfriamento secundário na formação de trincas superficiais transversais de quina em placas produzidas no lingotamento contínuo [manuscrito]. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, 2012.

BAUER-ÖPPINGER, Philipp. Cooling system. [S.l.]: Siemens VAI MT CC FE, set. 2008. 1 apresentação em PowerPoint.

HARADA, S.; TANAKA, S.; MISUMI, H.; MIZOGUCHI, S.; HORIGUCHI, H. A formation mechanism of transverse cracks on CC slab surface. *ISIJ International*, Tokyo, v. 30, n. 4, p. 310–316, 1990.

JFE 21st CENTURY FOUNDATION. 21世紀の鉄鋼 Chapter 2 – 製鉄の基礎 [online]. 2025. Disponível em: <https://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html>. Acesso em: 23 ago. 2023.

LECHLER GmbH. Continuous casting – secondary cooling: precision spray nozzles and solutions. Stuttgart: Lechler GmbH, 2019. 56 p.

LEE, Sung-Jin; CHO, Kang-Hyeong; KANG, Shin-Eon. Development of strand condition diagnostic system of continuous slab caster by using wireless telemetry. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SIGNAL PROCESSING AND ITS APPLICATIONS – ISSPA, 5.*, 1999, Brisbane. Anais [...]. Brisbane: Signal Processing Research Centre, QUT, 1999.

MAEHARA, Y.; OLMORI, Y. The precipitation of AlN and NbC and hot ductility of low carbon steel. In: *Materials Science and Engineering*, v. 62, 1984. p. 109-119.

MAZUMDAR, D. Tundish metallurgy: Towards increased productivity and clean steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 66, p. 597–610, 2013.

- MENG, Y.; THOMAS, B. G. Heat-transfer and solidification model of continuous slab casting: CONID. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 34B, out. 2003.
- MOURÃO, Marcelo Breda (coord.). Introdução à siderurgia. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428 p.
- NASCIMENTO, A. A. Desenvolvimento de um modelo de transferência de calor e solidificação de placas no processo de lingotamento contínuo. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2019. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- PRIMETALS TECHNOLOGIES. Strand Checker: accurate and easy adjustment of continuous casting segments. Linz: Primetals Technologies, 2020.
- RAUDENSKY, M.; HORSKY, J. Secondary cooling in continuous casting and Leidenfrost temperature effects. Ironmaking and Steelmaking, v. 32, p. 8, 2005.
- REYNOLDS, T.; FITZEL, H.; HARVEY, A.; JUZA, P.; MORWALD, K.; WINDR, E. The design of flat and long products casters. In: FRUEHAM, R.J. Making and shaping casting. Pittsburg: AISE Steel Foundation, 2003, p. 1-139.
- SENGUPTA, J.; THOMAS, B. G.; WELLS, M. A. Understanding the role water-cooling plays during continuous casting of steel and aluminum alloys. In: MS&T 2004 CONFERENCE PROCEEDINGS, 2004, New Orleans. Warrendale: AIST, 2004. p. 179-193.
- THOMAS, B. G.; BRIMACOMBE, J. K.; SAMARASEKERA, I. V. The formation of panel cracks in steel ingots: a state-of-the-art review. ISS Transactions, v. 7, p. 7-20, 1986.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. Steel statistical yearbook 2016. Bruxelas, 2016. 128 p.