

# MELHORIAS NA OPERAÇÃO DE UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO COM O AUXÍLIO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS\*

Rodrigo Garcia Ribeiro<sup>1</sup>  
Alexandre Dolabella Resende<sup>2</sup>  
Carlos Alberto Rodrigues Lares<sup>3</sup>  
Marcelo Martins Ferreira<sup>4</sup>  
Marcos Pereira Manso<sup>5</sup>  
Sandro Luiz Zahner<sup>6</sup>  
Marcelo Marques Felipe<sup>7</sup>

## Resumo

O Distribuidor é um equipamento fundamental no processo de Lingotamento Contínuo por ter como função, dentre outras, assegurar a continuidade do processo durante a troca de panela, bem como manter o aço líquido na temperatura adequada para o processo. O presente trabalho apresenta um estudo de melhoria no Distribuidor da Gerdau Divinópolis, no qual foi realizada a redução da temperatura de entrada do aço no distribuidor após modificações no projeto refratário e estudos de simulação numérica. As simulações indicaram que seria possível uma redução significativa da temperatura de entrada do aço no distribuidor e a implementação na prática dessa alteração levou a ganhos significativos, tais como, redução de Power On, redução de Temperatura Média para liberação e consequente redução de consumo de energia.

**Palavras-chave:** Distribuidor; Lingotamento Contínuo; Simulação Numérica; Refratários.

## IMPROVEMENT OF A CONTINUOUS CASTING TUNDISH'S OPERATION WITH SUPPORT OF NUMERICAL SIMULATIONS

### Abstract

The Tundish is an essential equipment in the continuous casting process by having the role of assuring the continuity of the process during ladle exchange and by keeping the molten steel in an adequate range for the process. The present work consists in a study of improvement of the Tundish at Gerdau Divinópolis, in which a reduction in the steel temperature at the tundish inlet was achieved after modifications in the tundish refractory design and numerical simulation studies. The simulations showed that it would be possible to reduce significantly the steel temperature in the tundish and the field implementation of this modification led to significant gains, such as: reduction of power on, reduction of average temperature for release and consequent reduction in energy consumption.

**Keywords:** Tundish; Continuous Casting; Numerical Simulation; Refractory.

<sup>1</sup> Analista de Engenharia - Engineering and Simulations, RHI Magnesita, Contagem, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. de Desenvolvimento - Engineering and Simulations, RHI Magnesita, Contagem, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Assistente Técnico - Linings, RHI Magnesita, Contagem, MG, Brasil.

<sup>4</sup> Especialista Sr. de Processo - Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Analista de Contrato Sr. - RHI Magnesita, Contagem, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Sócio da ABM, Gerente da Aciaria - Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil.

<sup>7</sup> Coordenador de Processos de Lingotamento Contínuo - Gerdau Divinópolis, Divinópolis, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A Usina da Gerdau Divinópolis é uma siderúrgica integrada com capacidade de 600.000 toneladas anuais para a produção de tarugos e vergalhões. A área de redução é composta por 3 Altos Fornos a carvão vegetal que atendem a carga líquida de gusa para a Aciaria.

A produção de aço é realizada em uma Aciaria a oxigênio com um misturador de 300 toneladas, um forno EOF (Energy Optimizing Furnace) de 45 toneladas, um forno panela e uma máquina de lingotamento contínuo de tarugos com 4 veios.

O refino secundário do aço é realizado através do Forno Panela, e tem como princípio de funcionamento a utilização de energia elétrica para o aquecimento do aço. O Forno Panela, apesar de ter sido desenvolvido com o objetivo principal de liberar o forno primário das funções de refino e aquecimento do aço, possui vantagens em termos de produtividade, qualidade de produção e redução de custo que tem tornando-o cada vez mais indispensável nas aciarias. Após o refino secundário no Forno Panela, o aço líquido segue para o Lingotamento Contínuo, processo no qual será solidificado em um produto semi-acabado no formato de tarugo, bloco, *beam blank* ou placa.

Durante o processo no Lingotamento Contínuo, o aço líquido passa pelo Distribuidor, também conhecido como *Tundish*, que consiste em um reservatório cuja função primária é a manutenção do processo de lingotamento durante a troca de panela. O Distribuidor também tem por objetivo proporcionar melhorias na qualidade do aço, por meio de:

- Remoção de partículas não-metálicas, tanto por mecanismos de flotação como por características de escoamento do aço líquido;
- Dissipação da energia do fluxo vindo da panela, distribuindo um fluxo de aço menos turbulento para os moldes;
- Manutenção da temperatura do aço, de modo a evitar a ocorrência de congelamento;
- Distribuição mais homogênea da temperatura de entrada do aço entre os moldes.

O revestimento refratário de um Distribuidor de Lingotamento Contínuo, por sua vez, influencia diretamente seus processos, não só nas características de escoamento do aço líquido dentro do Distribuidor, mas também na perda térmica que o aço líquido terá durante a sua residência no equipamento. Desta forma, o projeto e seleção adequados de materiais refratários para Distribuidores são críticos para evitar fenômenos indesejados, como o congelamento do aço no fundo do distribuidor ou escoamentos altamente turbulentos.

Dada a severidade e altas temperaturas dos processos ocorridos no Distribuidor, o estudo em campo de fenômenos que ocorrem no seu interior torna-se de difícil realização. Desta forma, a utilização de modelos numéricos computacionais permite o estudo tanto de fenômenos térmicos como fenômenos fluidodinâmicos ocorridos no Distribuidor, permitindo assim entender a influência de diferentes configurações refratárias (tanto aspectos geométricos como de isolamento térmico) no desempenho do aço líquido no Distribuidor.

Fenômenos térmicos e fluidodinâmicos em Distribuidores de Lingotamento Contínuo já foram alvo de estudo de vários autores [1-4] que, utilizando de ferramentas de Simulação Numérica, analisaram a influência de diversos parâmetros nos campos

de escoamento e de temperatura do aço líquido. Tais estudos também permitiram a observação de regiões de baixa temperatura de aço líquido, bem como o cálculo a queda de temperatura entre a entrada no Distribuidor e a saída nos veios. O modelo de distribuidor estudado apresenta um ciclo térmico com variações de até 20 °C entre o início e o fim de lingotamento. A Figura 1 mostra o comportamento da temperatura do distribuidor ao longo da corrida no intervalo de 3 em 3 minutos

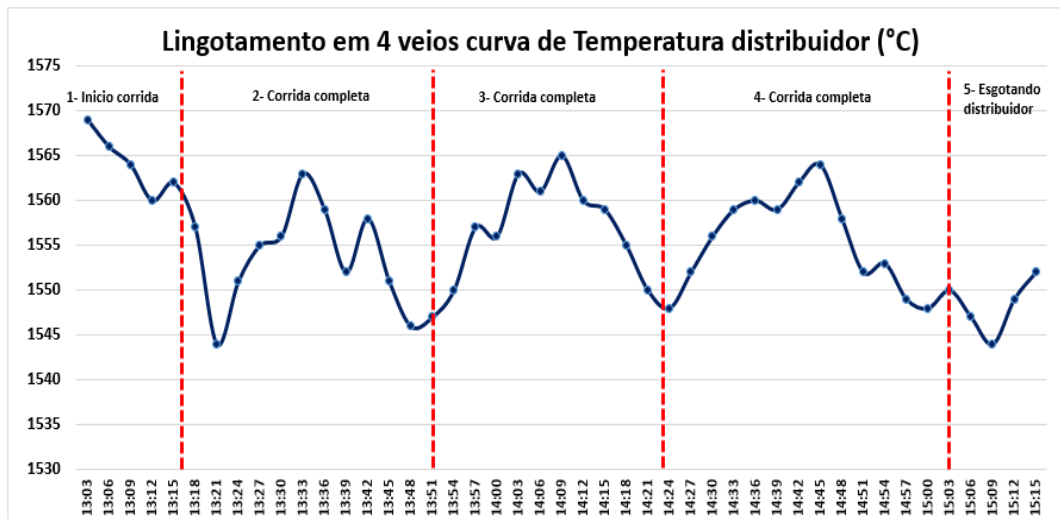


Figura 1: Curva de temperatura do aço no interior de um distribuidor

Para a grade de aços estudada, a Figura 2 mostra que o Distribuidor em questão opera na maior parte do tempo fora da zona ótima de trabalho (zona com Temperatura Máxima de 25°C acima da Temperatura *Liquidus*).

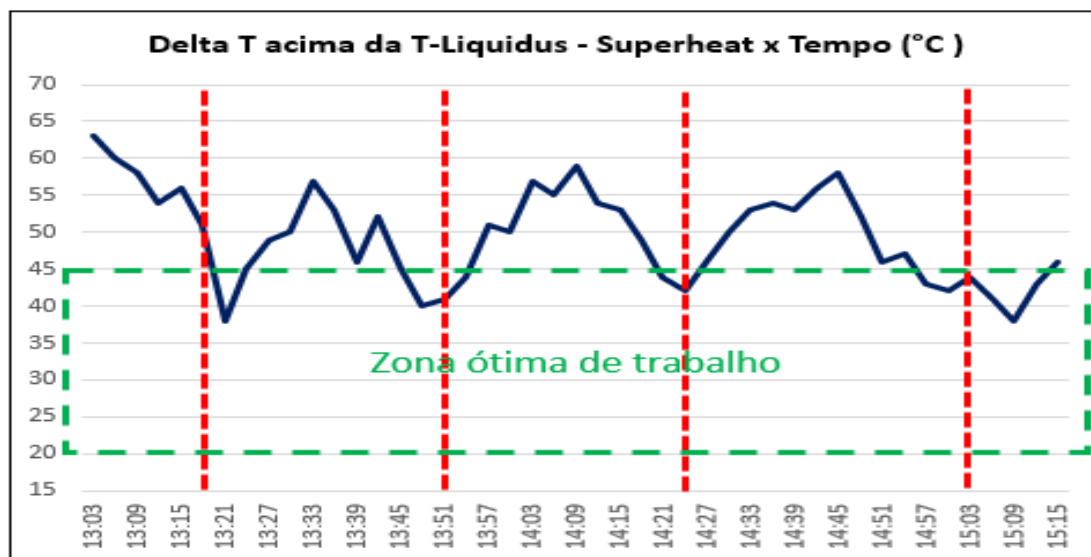


Figura 2: Curva de temperatura em função da zona desejada de trabalho

Dessa forma, observou-se uma oportunidade de melhoria no processo ao se reduzir a temperatura de aquecimento do aço no Forno Painela, de tal forma que o Distribuidor passaria a operar mais frequentemente na zona ótima de trabalho. Além disso, seria possível obter ganhos significativos em termos de economias obtidas ao se reduzir a elevação de temperatura no Forno Painela. Para fornecer um embasamento teórico para a implementação da redução de temperatura na prática, evitando consequências indesejáveis para o processo, foram realizadas simulações

numéricas com o objetivo de prever qual seria o impacto de se promover essa alteração.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Modelos de Simulação Numérica

#### 2.1.1 Configurações de Revestimento Refratário

Todas as análises realizadas foram feitas para duas configurações de Distribuidor, (Configuração #1 e Configuração #2), mostradas na Figura 3. A Configuração #2 é a configuração anterior na qual o distribuidor operava, enquanto a Configuração #1 foi proposta como forma de reduzir as perdas térmicas pelo revestimento, através da retirada da massa refratária em torno do inibidor. Foram analisadas ambas configurações para verificar o efeito da mudança do projeto refratário nas perdas térmicas do distribuidor.

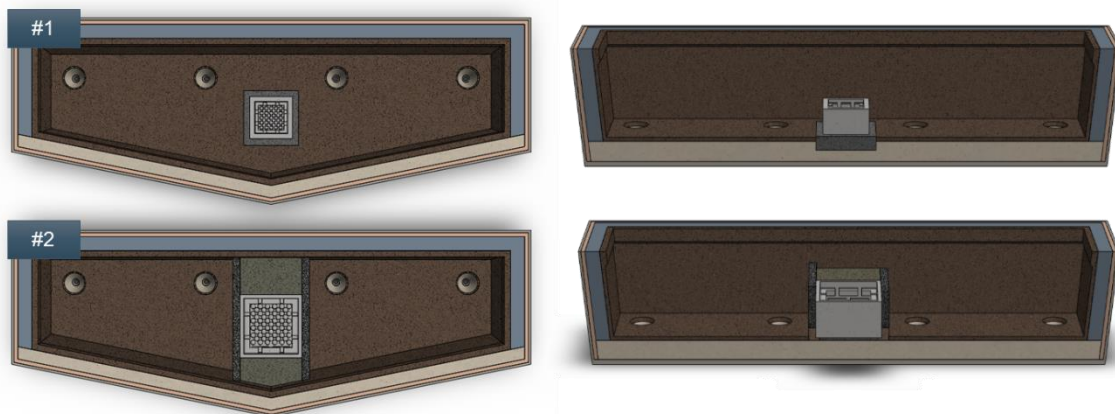


Figura 3: Configurações refratárias simuladas.

A Configuração #1 apresenta:

- Inibidor de Turbulência modelo RisalImpact™ (354mm x 347mm – Altura: 188mm);
- Tijolo de Impacto instalado abaixo do Inibidor de Turbulência.

A Configuração #2 apresenta:

- Inibidor de Turbulência modelo RisalImpact™ (520mm x 510mm – Altura: 277mm)
- Barragens nas laterais do Inibidor;
- Massa refratária cobrindo as laterais do Inibidor até as paredes do Distribuidor;
- Tijolo de Impacto instalado abaixo do conjunto Inibidor-Barragens.

O revestimento refratário das paredes é o mesmo para ambas as configurações.

### 2.1.2 Descrição do Modelo Transiente-Térmico

De maneira a obter o perfil térmico dos refratários e os fluxos de calor nas paredes internas do refratário ao longo do tempo, foram realizadas simulações de caráter transiente térmico para ambas as configurações de Distribuidor. Tais simulações incluem 3 etapas:

- Etapa 1: Pré-aquecimento do revestimento de cobertura do Distribuidor – 180 min (curva de temperaturas mostrada na Figura 4)

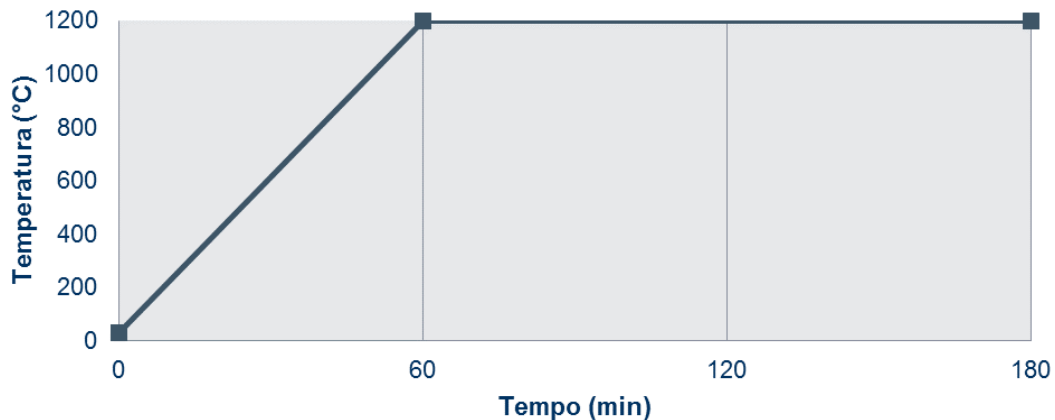


Figura 4: Curva de aquecimento do revestimento refratário

- Etapa 2: Espera entre o fim do pré-aquecimento e o início da operação – 15 min;
- Etapa 3: Lingotamento Contínuo – 1645 min (35 corridas x 47min/corrida).

As condições de contorno utilizadas para cada etapa das simulações transiente térmicas foram: convecção natural e radiação para o ambiente nas faces frias, durante todas as três etapas do processo. As faces quentes estarão submetidas ao pré-aquecimento segundo a curva de temperatura na Etapa 1, à Convecção e Radiação do ambiente na Etapa 2 e à temperatura do aço (temperatura média de operação) na Etapa 3.

### 2.1.3 Descrição do Modelo Fluidodinâmico

Para a análise do aço líquido durante a operação em Lingotamento Contínuo, utilizou-se da ferramenta de Fluidodinâmica Computacional (CFD). O modelo numérico computacional possui as seguintes características:

- escoamento em regime permanente, não-isotérmico;
- Malha de 2.400.000 elementos;
- Modelo de Turbulência: k- $\epsilon$

Para o cálculo do campo de temperaturas do aço líquido, o modelo numérico computacional utilizado leva em conta:

- A temperatura de entrada do aço líquido no distribuidor. Medições em campo fornecem valores de temperatura de entrada de  $1552,6 \pm 6,9$  °C. Para a

simulação, apenas o valor principal (1552,6 °C) é usado como condição de contorno, embora os resultados possam ser analisados tanto para a faixa inferior como para a faixa superior;

- Fluxos de calor perdidos para as paredes do refratário como condições de contorno térmicas. Os valores utilizados para estes fluxos foram obtidos das Simulações Transiente - Térmicas realizadas;
- O cálculo do fluxo de calor do aço líquido para a escória foi feito a partir de uma planilha de cálculo térmico unidimensional em regime permanente, a partir de dados de espessura e condutividade térmica das camadas de escória e casca de arroz.

As simulações CFD do Distribuidor foram realizadas para ambas as Configurações #1 e #2, bem como para duas situações distintas de fluxo de calor nas paredes:

- Distribuidor em regime transiente térmico (fluxo de calor crítico, que ocorre na 1ª corrida);
- Distribuidor em regime permanente térmico (fluxo de calor de regime permanente).

Os resultados da simulação numérica do escoamento de aço permitirão estimar, para cada situação simulada, se haverá formação de cascão no fundo do Distribuidor (por meio de uma Temperatura *Liquidus* de referência). No caso de não formação de cascão, é possível estimar também quanto se pode reduzir a temperatura de entrada do aço no Distribuidor, por meio da diferença entre a temperatura mínima no aço líquido e a Temperatura *Liquidus* calculada para o tipo de aço em questão.

#### 2.1.4 – Cálculo da Temperatura *Liquidus* do aço

O cálculo da Temperatura *Liquidus* de um aço é efetuado em função de sua composição. Para o aço em questão, foram calculadas quatro Temperaturas *Liquidus* baseadas em modelos de literatura [5-7]:

- Schürmann e Stišovic –  $T_{Liquidus} = 1517\text{ °C}$ ;
- Kagawa e Ogamoto –  $T_{Liquidus} = 1513,5\text{ °C}$ ;
- Howe –  $T_{Liquidus} = 1514\text{ °C}$ ;
- Wolf –  $T_{Liquidus} = 1511\text{ °C}$

A Temperatura *Liquidus* de 1517°C, calculada pelo modelo de Schürmann e Stišovic, foi utilizada como referência (a maior temperatura dentre os 4 modelos utilizados) para estimar a formação de cascão pelos resultados das simulações fluidodinâmicas, adotando-se assim uma perspectiva mais conservadora na obtenção dos resultados.

## 2.2 – Resultados das Simulações

### 2.2.1 – Simulações Transiente-Térmicas

A Figura 7 apresenta o campo de temperaturas no Distribuidor para ambas as configurações, no início do Lingotamento Contínuo:

A presença de maior massa refratária na Configuração #2 aumenta o tempo necessário para o encharque térmico do revestimento em relação à Configuração #1. Além disso, será necessária uma maior quantidade de energia para aquecer o refratário na Configuração #2 em relação à Configuração #1, o que acarretará em maiores perdas térmicas do aço líquido nas primeiras corridas

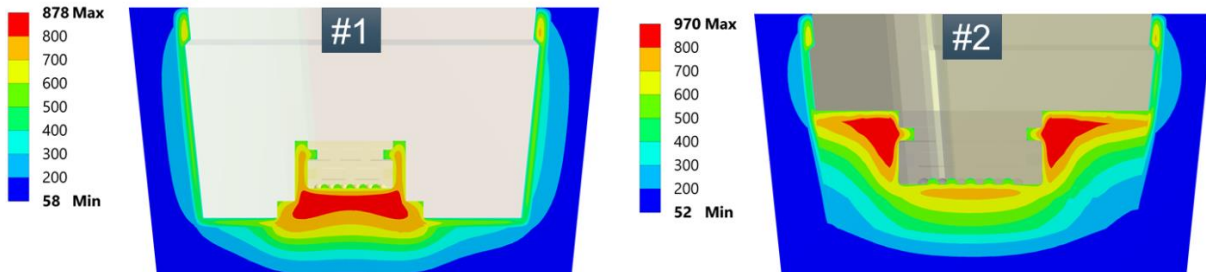


Figura 7: Campo de temperaturas no plano central do Distribuidor, no início do Lingotamento

O gráfico mostrado pela Figura 8 mostra a perda de calor total do Distribuidor ao longo do tempo. Observa-se um pico de perda de calor logo no início do Lingotamento Contínuo, causado pelo choque térmico do contato do aço líquido a altas temperaturas com as paredes do Distribuidor que ainda não atingiram a condição de encharque térmico. A medida que o processo se desenvolve, a perda de calor total reduz ao longo do tempo, até se tornar constante, atingindo o regime permanente. O início do regime permanente, de acordo com as previsões do modelo numérico, ocorreria aproximadamente após a 8ª corrida (cerca de 6,5 horas após o início da operação).

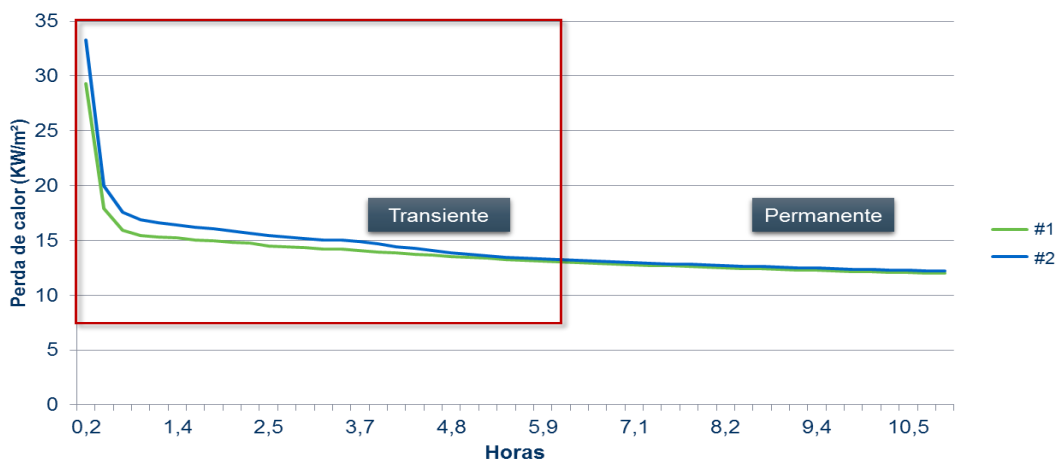


Figura 8: Perda de calor total do Distribuidor ao longo do tempo de operação

Enquanto em regime transiente, a Configuração #2 apresenta uma diminuição mais lenta das perdas de calor menores em relação à Configuração #1, por apresentar, pela presença maior de refratários, um encharque térmico mais lento. Por outro lado, após atingir o regime permanente as perdas de calor se estabilizam em um valor semelhante para ambas as configurações.

## 2.2.2 – Simulações Fluidodinâmicas

As simulações fluidodinâmicas realizadas para o Distribuidor mostram um padrão de escoamento muito semelhante entre as diferentes configurações, para ambos os regimes. É possível afirmar que as diferenças do revestimento refratário e Inibidor de Impacto entre as duas configurações, bem como suas conseqüentes alterações no fluxo de calor e no campo de temperaturas, são insuficientes para promover alterações significativas no padrão de escoamento no aço líquido. A Figura 9 ilustra tal semelhança entre as configurações, para o escoamento em Regime Térmico Permanente.

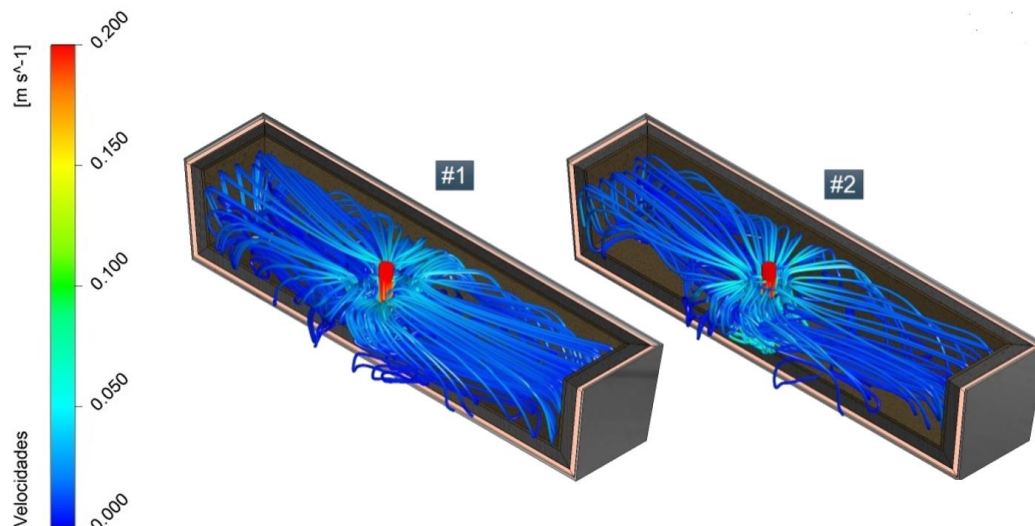


Figura 9: Linhas de fluxo para o escoamento do aço líquido no Distribuidor

### 2.2.2.1 – Regime Térmico Transiente

Para a simulação fluidodinâmica do Distribuidor em Regime Térmico Transiente, é levado em conta as características térmicas do Distribuidor em suas primeiras corridas, antes de seu campo de temperaturas se estabilizar. De modo a retratar a situação mais crítica, levou-se em conta na simulação as perdas de calor observadas no início do Lingotamento Contínuo (1ª corrida), quando ocorre o valor máximo de perda de calor em Regime Transiente.

A Figura 10 mostra o campo de temperaturas do aço líquido no plano do jato de entrada, para o Regime Térmico Transiente:

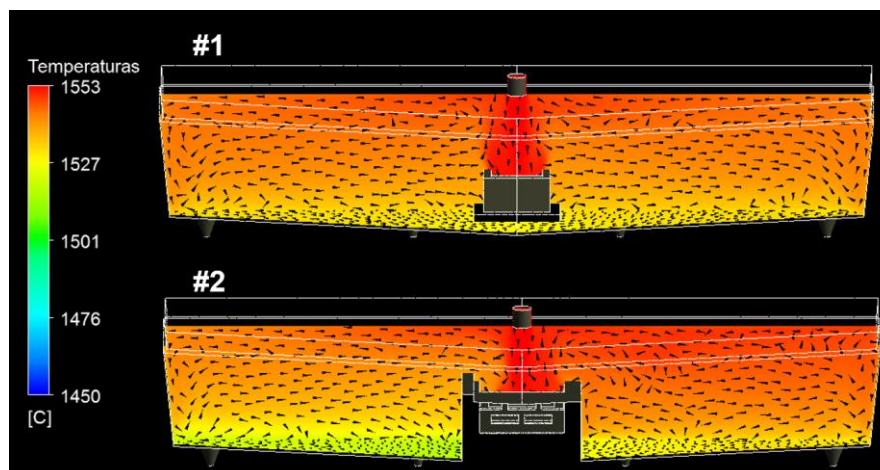


Figura 10: Campo de Temperaturas do aço líquido para o Regime Transiente Térmica



Os fluxos de calor do aço líquido para o fundo são maiores do que do aço líquido para as paredes laterais, por isso observam-se temperaturas menores do aço líquido próximo ao fundo do Distribuidor.

Para os três valores de temperaturas de entrada, a Figura 11 mostra valores de massa de cascão e temperatura mínima no Distribuidor previstos pelo modelo, para a 1ª corrida:

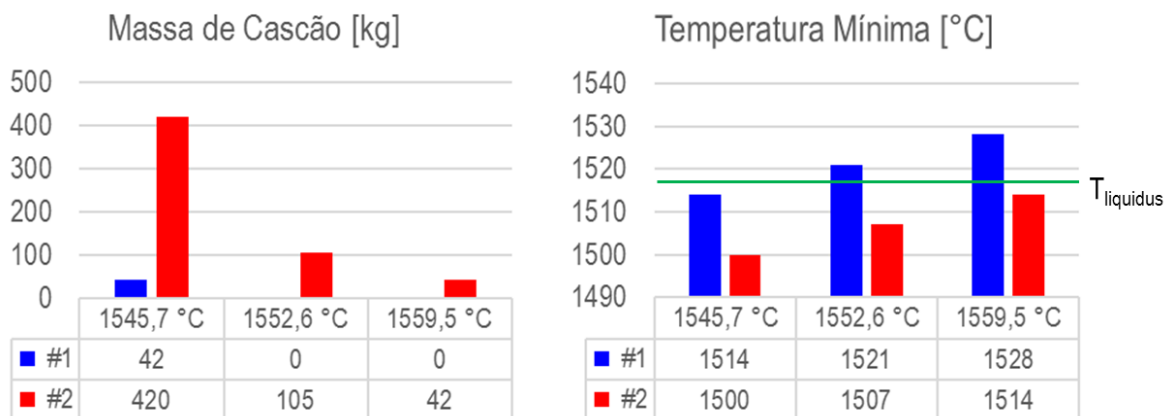


Figura 11: Temperatura mínima e massa de cascão para a 1ª corrida.

Analisando comparativamente, a Configuração #1 apresenta, para todas as três temperaturas, tanto menores valores de massa de cascão, como menores valores de temperatura mínima em relação à Configuração #2, apresentando formação de cascão apenas para  $T_{ENTRADA} = 1545,7 \text{ °C}$ . Tais resultados corroboram com o campo de temperaturas apresentado pela Figura 10, em que se observam temperaturas menores para a Configuração #2 na região do fundo, em comparação com a Configuração #1. A Figura 12 apresenta, para a 1ª corrida, as regiões de formação de cascão estimadas pela simulação (volume de aço líquido com temperaturas abaixo de  $1517\text{°C}$ ).

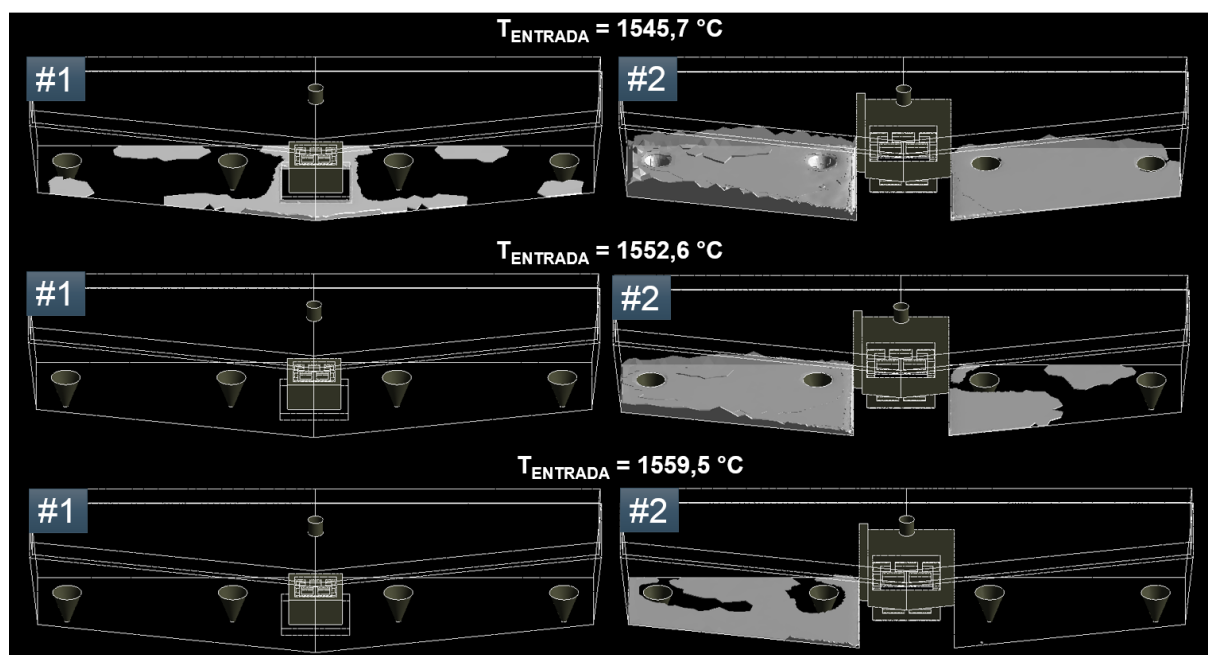


Figura 12: Volume de cascão para as diferentes configurações e temperaturas de entrada

### 2.2.2.2 – Regime Térmico Permanente

A Figura 13 mostra o campo de temperaturas do aço líquido no plano do jato de entrada, para as corridas nas quais o distribuidor já atingiu a condição de encharque térmico do revestimento (Regime Térmico Permanente):

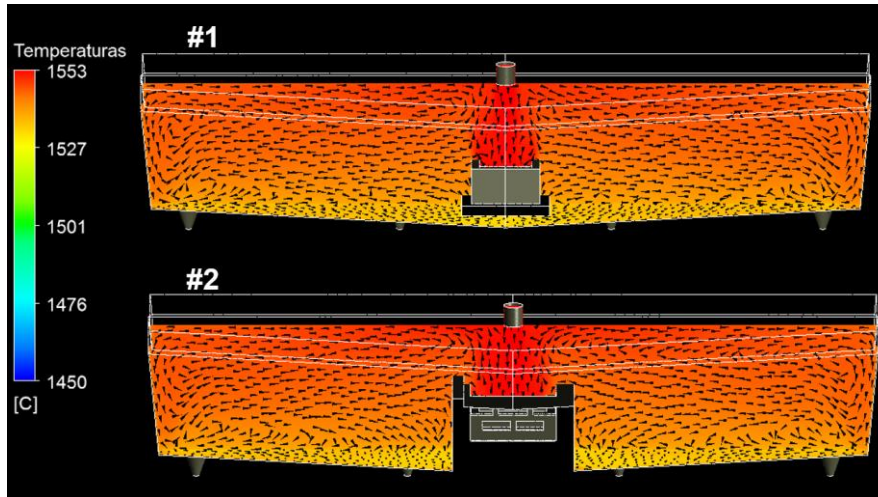


Figura 13: Campo de Temperaturas do aço líquido para o Regime Térmico Permanente

Os campos de temperatura do aço líquido escoando em Regime Térmico Permanente são similares para ambas as configurações. A semelhança do padrão de escoamento mostrado na Figura 9, juntamente com a proximidade de valores de perda de calor em Regime Térmico Permanente, mostrado no gráfico da Figura 8, corrobora para que os campos de temperaturas de ambas as Configurações apresentem tal semelhança.

A Figura 13 traz informações sobre a massa de cascão e a temperatura mínima do aço líquido no Distribuidor previstos pelo modelo, para as três temperaturas de entrada consideradas, sob Regime Térmico Permanente:

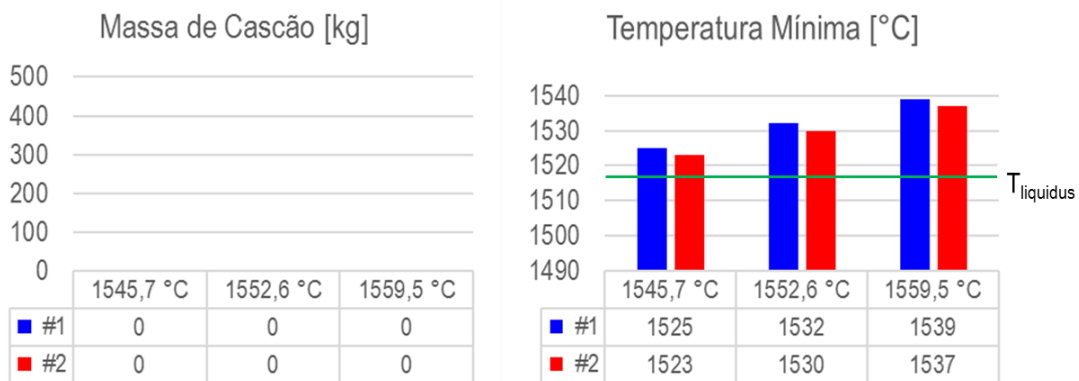


Figura 13: Temperatura mínima e massa de cascão para o Regime Térmico Permanente

Observa-se que, para a operação do Distribuidor em Regime Térmico Permanente, em todas as situações os valores de temperatura mínima estão acima da Temperatura *Liquidus* de 1517°C, o que permite reduzir a temperatura de entrada do aço líquido no distribuidor. Conclui-se através dos resultados das simulações que, a partir do momento em que o revestimento atingir a condição de encharque térmico, será possível reduzir com segurança a temperatura de entrada do aço no distribuidor, sem prejuízos para o processo. Ainda de acordo com as simulações,

esse momento seria aproximadamente a partir da 8ª corrida. Por fim, observou-se que a Configuração #1 apresenta menores perdas térmicas, especialmente nas primeiras corridas.

## 2.3 – Resultados de campo

### 2.3.1 – Ganhos na operação do Forno Panela

A partir dos resultados obtidos da simulação numérica, foi adotada na prática a redução da temperatura de entrada do aço no distribuidor e ganhos significativos de processo foram observados, principalmente no refino secundário por Forno Panela, tais como a redução de Power On, redução de temperatura e redução de consumo de energia mostrados na Figura 14:

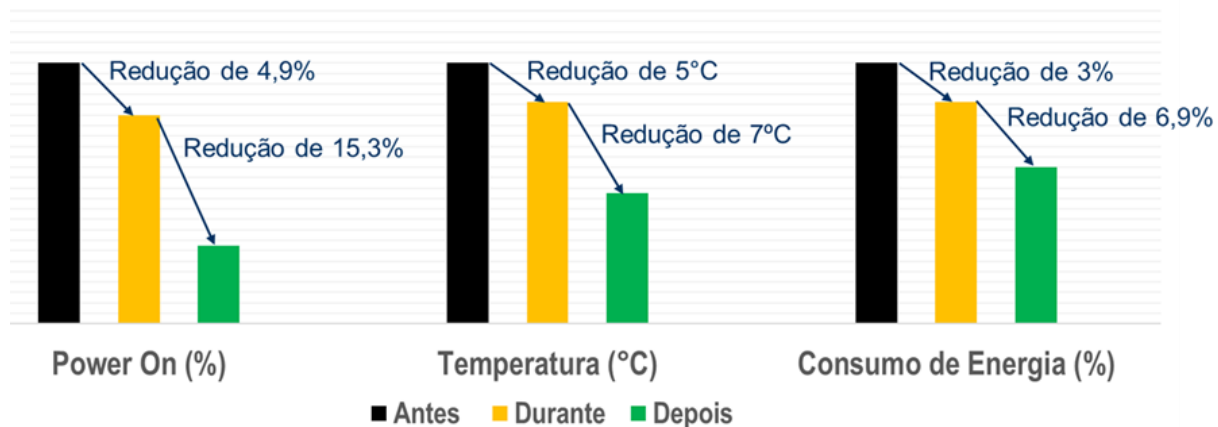


Figura 14: ganhos no Forno Panela

A Figura mostra uma redução de 4,9% no Power On do forno panela durante a implantação e 15,3% após implantação da modificação no perfil do Distribuidor. O ganho final de redução no Power On, portanto, foi de 20,2%.

Também é observada uma significativa redução na temperatura média de liberação do aço no Forno Panela, com uma redução inicial de 5°C durante a implantação e, após a implantação, uma redução de 7°C, totalizando 12 °C de redução total.

As reduções de Power On e de temperatura média de liberação no Forno Panela impactam diretamente no consumo de energia, que apresenta redução de 3% durante a implantação e de 6,9% de redução após implantação, totalizando 9,9% de redução total do consumo de energia no Forno Panela. Tais reduções também trouxeram impacto de aumento da vida média de refratário, com consequente redução de consumo de refratário na Panela de aço.

### 2.3.2 - Impactos Ambientais percebidos

A sustentabilidade ambiental é considerada um dos desafios para a área de Melhorias e Inovação. Os projetos devem ser concebidos de forma a garantir a melhoria contínua, mitigando os impactos Ambientais oriundos dos processos produtivos. A implantação deste projeto trouxe contribuições ao Meio Ambiente nos seguintes aspectos:

- Menor consumo específico de refratário, aumentando a vida do revestimento das placas de aço e distribuidores, reforçando o conceito da economia circular, otimizando os recursos;
- Redução do consumo de energia elétrica do Forno Panela em 9,7% reforçando o conceito da sustentabilidade energética.

### 2.3.3 - Aspectos de segurança percebidos

A valorização do ser humano no ambiente de trabalho é um dos itens que dão suporte ao sucesso de uma organização e que norteia e prioriza investimentos para busca de um ambiente cada vez mais seguro ao convívio humano e geração de valor.

O significativo sucesso deste projeto assegurou, além da melhoria contínua do processo através da estabilidade alcançada, também redução de falhas de processo, redução das intervenções humanas e redução de exposições de pessoas em atividades fora de rotina, assegurando assim práticas mais seguras para a operação.

## 3 CONCLUSÃO

- Os resultados das simulações numéricas do Distribuidor foram fundamentais para orientar modificações em campo;
- Redução total de 20,2% no Power On do Forno panela;
- Redução de 12 °C na temperatura final de liberação do Forno panela;
- Redução de 9,9% no consumo final de energia do Forno Panela.

## Agradecimentos

A Gerdau Divinópolis e RHI Magnesita pela parceria e apoio na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 Pardeshi, R., Basak, S., Singh, A.K., Basu, B., Mahashabde, V., Roy, S.K. *et al* (2004). Mathematical modeling of the tundish of a single-strand slab caster. *ISIJ International*, 44(9), 1534-1540.
- 2 Liu, S. X., Yang, X. M., Du, L., Li, L., & Liu, C. Z. (2008). Hydrodynamic and mathematical simulations of flow field and temperature profile in an asymmetrical T-type single-strand continuous casting tundish. *ISIJ International*, 48(12), 1712-1721.
- 3 Merder, T. (2012). Numerical simulation of liquid flow and mixing steel in multi-strands tundish. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55(2), 561-566
- 4 Sowa, L. (2014). Numerical modelling of fluid flow and thermal phenomena in the tundish of CSC machine. *Archives of foundry engineering*, 14(1), 103-106.
- 5 Schurmann, E., & Stisovic, T. (1998). Calculation of the *Liquidus* temperature from the chemical analysis of alloyed steel heats. *Stahl und Eisen(Germany)*, 118(11), 97-102.
- 6 Kagawa, A., & Okamoto, T. (1986). Influence of alloying elements on temperature and composition for peritectic reaction in plain carbon steels. *Materials science and technology*, 2(10), 997-1008.
- 7 J. Miettinen & A.A. Howe (2000) Estimation of *Liquidus* temperatures for steels using thermodynamic approach, *Ironmaking & Steelmaking*, 27:3, 212-227