

FLUXO E TRANSIÇÃO EM DISTRIBUIDOR DE TARUGOS DE 4 VEIOS *

Marivaldo Junior Monteiro de Oliveira¹
Weslei Viana Gabriel²
Johne Jesus Mol Peixoto²
Carlos Antônio da Silva³
Itavahn Alves da Silva³
Laudinei Las Casas Amorim⁴
Varadarajan Seshadri⁵

Resumo

O processo de mistura de aços de diferentes composições durante um sequencial em uma máquina de lingotamento contínuo é influenciado pela geometria do distribuidor e do molde, bem como das condições operacionais durante a troca de panelas. O procedimento experimental adotado neste trabalho é baseado em estratégias de transição de troca de panelas determinada em um modelo físico de distribuidor de tarugos com quatro veios. Foram estudadas condições isotérmicas e não isotérmicas de transição, tendo sido verificadas alterações significativas no padrão de fluxo para regime não isotérmico. O regime não isotérmico resulta em fluidos mais homogêneos nos 4 veios, sendo que os veios internos são afetados de maneira mais significativa pela alteração de padrão de fluxo. A melhor estratégia para transição é o caso base, onde o distribuidor tem o volume de trabalho restaurado, retornando à capacidade máxima.

Palavras-chave: Distribuidor; Fluxo; Mistura; Intermix.

FLOW AND TRANSITION IN BILLET TUNDISH WITH FOUR STRANDS

Abstract

The process of mixing of steel grades during ladle change is influenced by the geometry of the tundish and mold, as well as the operational conditions. The experimental scheme adopted in this work is based in transition strategies as determined from water modelling of a billet tundish with four strands. Grade change under isothermal and non isothermal conditions has been assessed. The flow pattern inside the tundish is strongly affected by the thermal conditions. The non isothermal regime results in more homogenous fluids from the 4 strands. The best transition strategy is to return to the working level as fast as possible.

Keywords: Tundish; Flow; Mixture; Intermix.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Eng. Metalurgista, MSc., Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

³ Eng. Metalurgista, Doutor, Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

⁴ Eng. Metalurgista, UFMG - Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁵ Dr. Ing. Professor, DEMET -UFMG, BH, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção de altas produtividades em lingotamento contínuo requer o lingotamento sequencial de várias painelas, sem interrupção. A realização de mistura de aços no mesmo distribuidor pode ser uma consequência inevitável deste procedimento (CRAVO, [1]). Esse material de mistura, por apresentar composição química variável, não pode ser comercializado como produto homogêneo e acaba sendo aplicado em operações que não requerem um nível de qualidade tão elevado ou retorna ao processo siderúrgico como sucata (ELIAS, [2]). Neste sentido, Huang e Thomas [3] propõem vários métodos de se fazer a transição a fim de minimizar/evitar a mistura de aços durante a troca de painelas no lingotamento contínuo. O método mais simples, aquele no qual se troca somente a painela, garante maior produtividade no processo, contudo gera o maior grau de mistura.

Lowry e Sahai [4] realizaram experimentos em distribuidor considerando condições de regime permanente (isotérmico) e regime transiente (não isotérmico) com o objetivo de estudar a influência do gradiente térmico no fluxo de aço. Gryc et al. [5], a partir de modelagem física, conseguiram obter resultados satisfatórios na simulação de misturas de aços diferentes em um distribuidor de tarugos, assimétrico, de 5 veios. Os testes foram realizados em condições reais de operação de reenchimento e troca de painelas e em condições isotérmicas.

Siddiqui e Jha [6] avaliaram o comportamento do fluido no distribuidor, com e sem barreiras, de modo a estudar como o fluxo influencia na geração de *intermix*. Verificaram que reduzindo a vazão de alimentação do distribuidor tem-se a diminuição de mistura de aços. Pardeshi et al. [7] utilizaram um modelo físico de distribuidor de tarugos de um único veio para avaliar os efeitos dos parâmetros-chave no processo de lingotamento. Foram analisados os efeitos da temperatura de pré-aquecimento do distribuidor e o efeito da temperatura do aço na nova painela.

Yuan et al. [8], através de simulações computacionais, avaliaram o comportamento de fluxo transiente no lingotamento contínuo. Dentre os vários parâmetros estudados, destacam-se o efeito do empuxo térmico. Para tal, foi realizada uma simulação considerando o efeito natural da convecção e, posteriormente, uma análise envolvendo superaquecimento. Nesta, observou-se que o fluxo é ascendente e que existe uma estratificação térmica dentro do distribuidor.

Sinha e Vassilicos [9] realizaram testes em modelo físico com o objetivo de determinar a influência do gradiente de temperatura no fluxo e comportamento da mistura de aço líquido no distribuidor. Esses pesquisadores concluíram que o gradiente térmico auxilia a limpeza do aço líquido, uma vez que aumenta o tempo mínimo de residência do material no interior do distribuidor e favorece a flotação das inclusões não metálicas.

Chatterjee [10], através de estudos computacionais, desenvolveu uma nova técnica de reenchimento de distribuidor e a comparou com diferentes técnicas utilizadas na indústria. De acordo com estes autores, algumas configurações de barreiras reduziram o tempo de transição em 50%. Cwudziński [11] analisou o fluxo não isotérmico e transiente no interior de um distribuidor de um veio utilizando modelamento físico e matemático (Ansys-CFX), de modo a determinar o

comprimento de mistura durante a troca de painéis. Para cada experimento de adição de traçador em degrau, determinou-se a curva de transição respeitando o critério de similaridade dado pelo adimensional de Richardson.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de mistura (ou produção de intermix) de aços em um distribuidor de lingotamento de tarugos de 4 (quatro) veios, operando em regimes isotérmico e não isotérmico.

2 DESENVOLVIMENTO

O sistema estudado é constituído de um distribuidor com quatro veios, Figura 1, com taxa de produção de 2,0 ton/min. Utiliza-se um modelo em escala 1:4 e como critérios de similaridade os adimensionais de Froude (equação 1) e de Richardson (equação 2) foram respeitados:

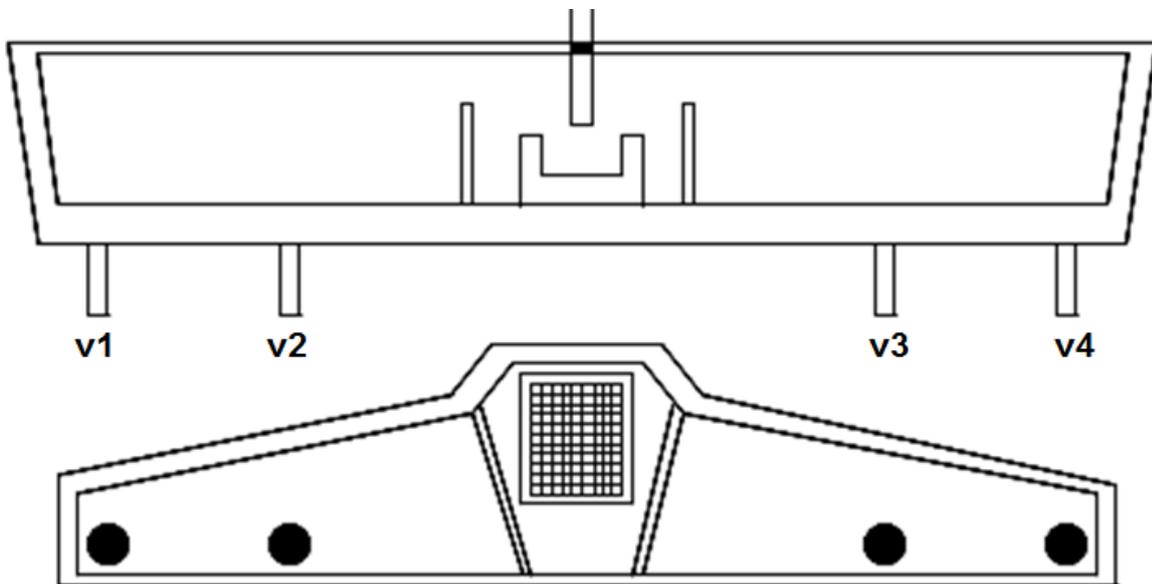


Figura 1. Representação esquemática do distribuidor.

$$Fr_M = Fr_P \quad (1)$$

$$Tu = [Gr/Re^2]_M = [Gr/Re^2]_P \quad (2)$$

Onde Fr representa o número de Froude, Tu o número de Richardson, Gr o número de Grashof e Re o número de Reynolds.

O que resulta em $\beta\Delta T_{aço} = \beta\Delta T_{água}$ (DAMLE e SAHAI [12]). Os valores das propriedades do aço e água são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores das propriedades do aço e água

PROPRIEDADE	UNIDADE	SÍMBOLO	ÁGUA	AÇO
Temperatura	°C	T	25	1600
Viscosidade dinâmica	Pa.s	η	$0,890 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-3}$
Massa específica	kg/m ³	ρ	$1,0 \times 10^3$	$7,0 \times 10^3$
Coefficiente de expansão térmica	K ⁻¹	β	$\beta = 7,3158 \times 10^{-6} T + 7,0899 \times 10^{-5}$	$9,833 \times 10^{-4}$

O período de troca de placas foi avaliado levando em consideração que o distribuidor trabalhe em um nível máximo, neste caso, 17 toneladas, e se esvazie até um nível mínimo de trabalho de 11 toneladas. Três casos distintos, em regimes isotérmicos e não isotérmicos foram abordados, com diferentes tempos de *holding*, vide Tabela 2 e Figura 2. Entenda-se como tempo de holding o período de espera para a completa transição entre diferentes líquidos (graus de aço diferentes na indústria).

Tabela 2. Resumo de condições experimentais para um distribuidor de tarugos de 4 veios

Exp	Nível De Trabalho ton	Nível Mínimo Ton	Nível Holding ton	Tempo Holding min	Vazão ton/min /Veio	Vazão Reenchi-Mento ton/min	ΔT °C
Base	17	11	17	0	0,50	5,1	0 ou 10
#1	17	11	11	6 ou 12	0,50	5,1	0 ou 10
#2	17	11	14	6 ou 12	0,50	5,1	0 ou 10

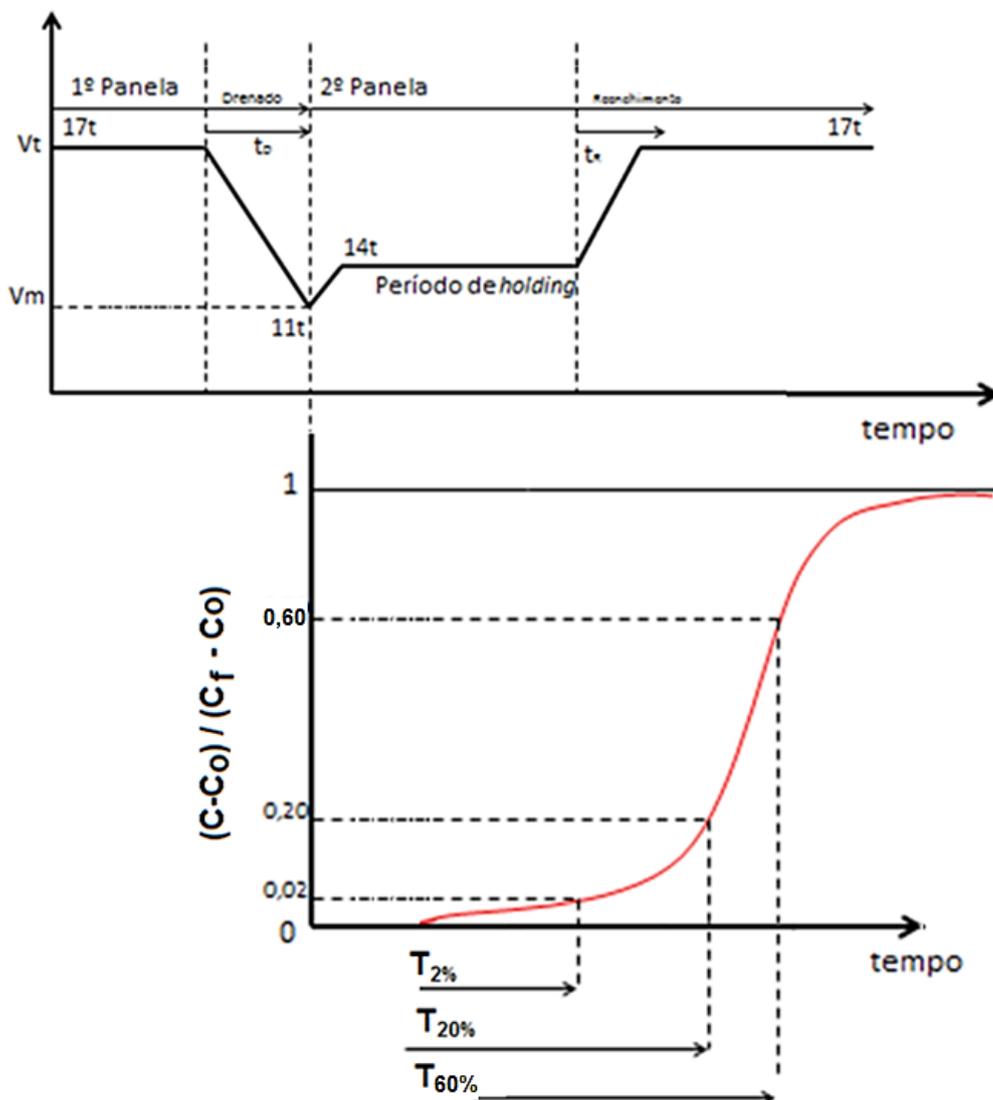


Figura 2. Esquema de alteração de nível e curva F, esquemáticos.

Para a determinação dos parâmetros de controle utilizou-se a técnica de adição de traçador em degrau, a qual gera uma curva de composição adimensionalizada (equação 3):

$$F = \frac{C - C_o}{C_f - C_o} \quad (3)$$

Onde C_o representa a composição nominal da primeira panela, C_f a composição nominal da segunda panela e C a variação temporal de composição devida ao processo de mistura. Então, ao início de transição $C = 0$ e, no final, $C = 1$. Foram realizados 5 testes para cada combinação. Como mostra a figura citada o período de mistura se conta a partir do momento de abertura da segunda panela, no nível mínimo de distribuidor. Os parâmetros de controle são os tempos de transição identificados como $T_{2\%}$, $T_{20\%}$, $T_{60\%}$ e $T_{70\%}$. $T_{2\%}$ é o tempo mínimo de residência e representa uma medida indireta da fração de fluxo em pistão; transições mais rápidas, o que implica em menor volume de mistura, são alcançadas para maiores valores de $T_{2\%}$.

Neste trabalho, arbitrou-se calcular o material intermisturado como todo aquele entre 20% e 60%, de concentração efluente, já normalizada, respectivamente. O cálculo do volume de descarte (material intermisturado) é dado por:

$$descarte = \int_{F=0,2}^{F=0,6} Q dt \quad (4)$$

Onde Q representa a vazão efluente de um dado veio e t representa o tempo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Filmagens de dispersão de traçador (tinta em experimentos em degrau) comprovaram que há uma mudança de padrão de fluxo no interior do distribuidor devido ao empuxo térmico. O fluido de maior temperatura, menos denso, se dirige preferencialmente para a superfície do distribuidor. Nos regimes isotérmicos, quando ocorre a troca de panela, o novo material percorre o distribuidor pelo fundo, atingindo os veios internos mais rapidamente. Já nos casos não isotérmicos, o novo material (menos denso) percorre o distribuidor mais próximo à superfície livre até encontrar as paredes laterais do distribuidor redirecionando o fluxo em direção ao fundo do distribuidor. Neste caso, os veios externos detectam primeiramente a variação da concentração, Figura 3.

A Figura 4 compara os tempos de transição nos veios internos e externos para as diferentes situações analisadas.

Os tempos de transição, escolhidos para caracterizar a mudança de grau nestes experimentos, devem ser influenciados pela vazão de reenchimento, pela velocidade de lingotamento, nível mínimo de aço durante a troca de painéis, pela prática de *holding* e condições térmicas. Como se nota pelos dados da Figura 4 a transição se completa ($t_{70\%}$) cerca de 7 minutos após a troca de painéis. Então não se espera diferenças significativas entre os tempos de transição $t_{2\%}$, $t_{20\%}$ e $t_{60\%}$, para tempos de *holding* de 6 e 12 minutos, desde que sob a mesma condição térmica; esta condição fica clara na figura citada. Em condição isotérmica e não isotérmica o tempo de transição de 2% é maior nos veios externos, comparativamente aos internos, como esperado. Modo geral a transição começa mais cedo para os veios internos, o que

pode requerer um acompanhamento específico por veio. A mudança de fluxo devida ao gradiente térmico faz com a transição nos veios internos seja prolongada; este efeito fica evidente pelo aumento de tempos de transição $t_{60\%}$ (não isotérmicos comparados com isotérmicos).

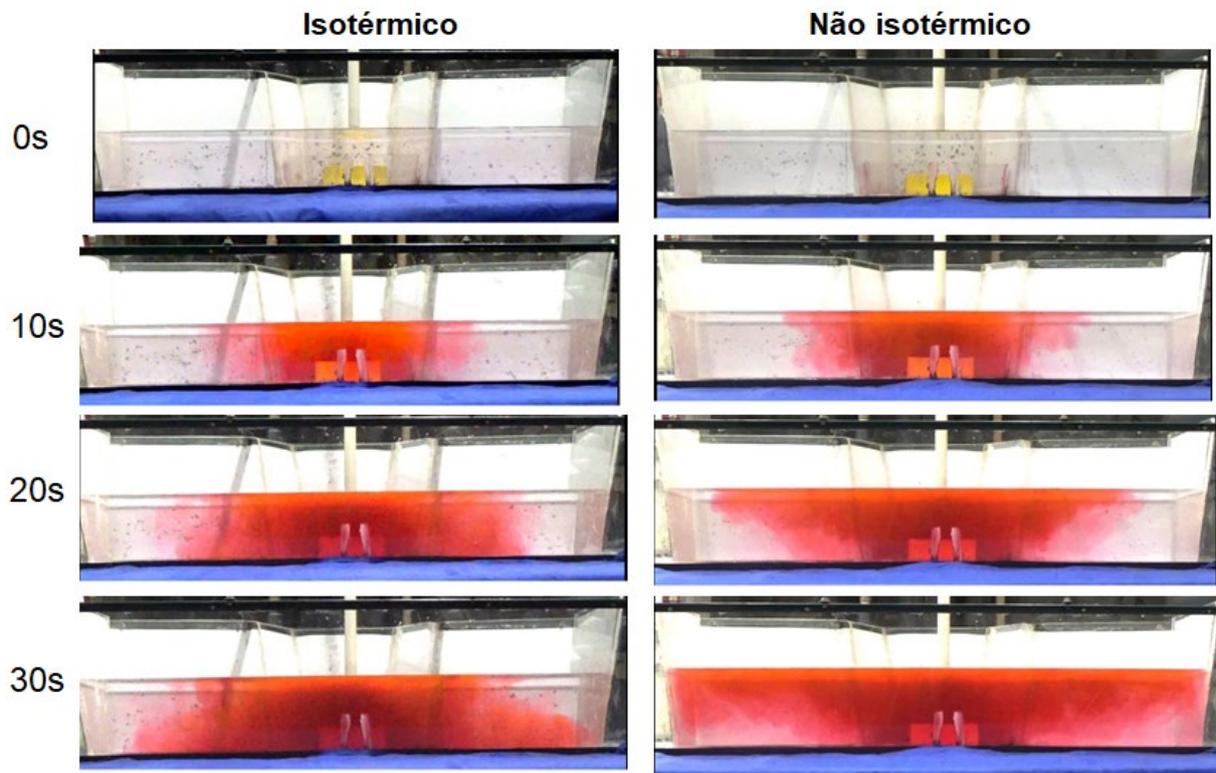


Figura 3. Filmagem de dispersão de traçador, adição em degrau, testes isotérmicos e não isotérmicos.

Analisando os descartes gerados nos testes (Tabelas 3 a 6), pode-se observar que, de um modo geral, considerando o descarte total (soma de descarte de todos os veios), a maior quantidade de mistura se encontra nos casos de regimes não isotérmicos, independentemente do tempo de holding. O tempo de holding não exerceu influência significativa no volume descartado (Figura 5).

O fenômeno de reversão de fluxo, exemplificado na Figura 3, afeta adversamente, principalmente os veios internos; a quantidade de descarte gerada nestes é maior em regime não isotérmico, comparativamente ao caso isotérmico, conforme mostrado na Figura 6. As quantidades de descarte geradas pelos veios externos praticamente não se alteram, quando se compara regime isotérmico e não-isotérmico.

As maiores quantidades de descarte, Figuras 5 e 6, são observados para o menor nível de *holding*, 11 toneladas. Em geral o *holding* é indicado como maneira de apressar a transição e assim diminuir a quantidade de descarte. O efeito contrário pode se dever à turbulência excessiva em níveis baixos, o que pode levar à intensificação da mistura. Nestes experimentos o nível de descarte diminuiu progressivamente com o aumento do volume de trabalho do distribuidor. Então, comparando caso a caso, nota-se que o caso base, para o qual o nível de trabalho é recuperado rapidamente, implicou em menor volume de descarte.

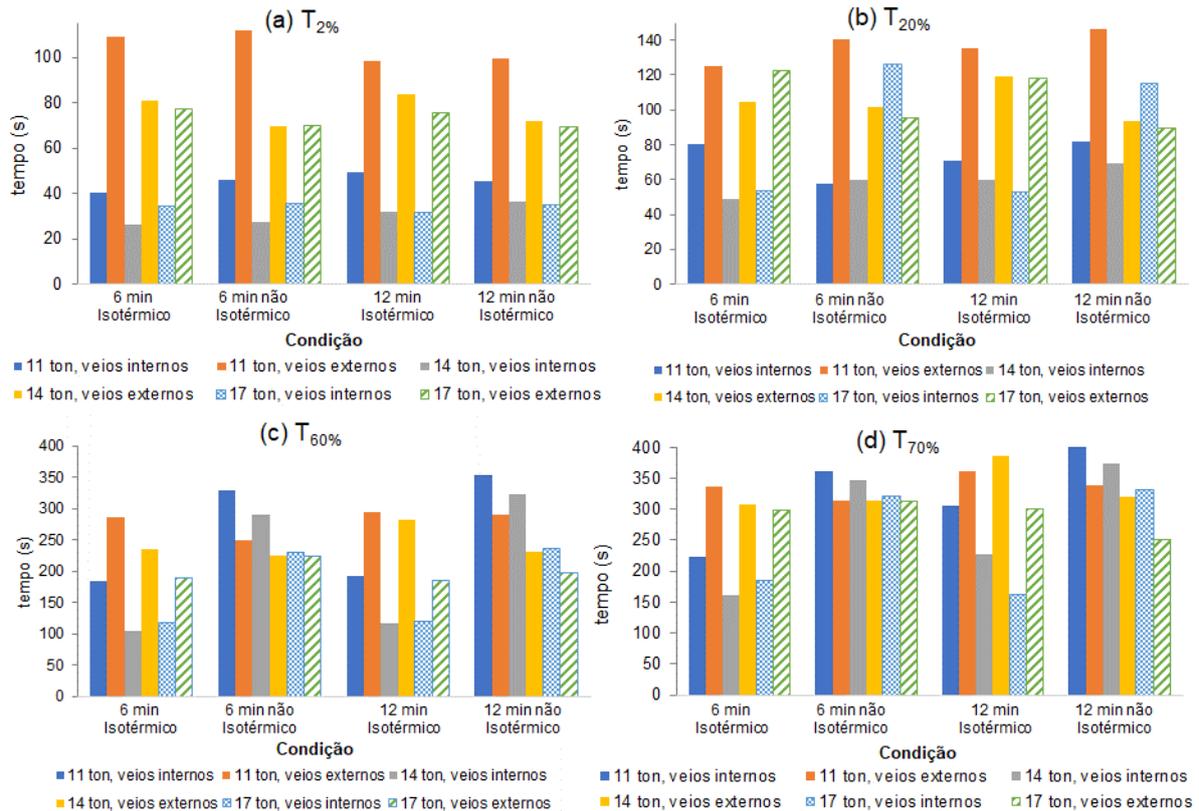


Figura 4. Valores médios de tempos de transição em função do tempo de holding e do regime de fluxo térmico

Tabela 3. Vazão média, intervalo de descarte e descarte por veio para regime isotérmico e 6 minutos de holding

Vol	Vazão ton/min				$(T_{60\%} - T_{20\%})$ min		Descarte ton	
	v1	v2	v3	v4	v1&v4	v2&v3	v1&v4	v2&v3
11 ton	0,524	0,520	0,524	0,540	2,708	1,738	1,440	0,906
14 ton	0,529	0,524	0,529	0,547	2,168	0,926	1,165	0,487
17 ton	0,598	0,542	0,558	0,578	1,112	1,072	0,653	0,589

Tabela 4. Vazão média, intervalo de descarte e descarte por veio para regime não isotérmico e 6 minutos de holding

ΔT °C	Vol	Vazão ton/min				$(T_{60\%} - T_{20\%})$ min		Descarte ton	
		v1	v2	v3	v4	v1&v4	v2&v3	v1&v4	v2&v3
9,8	11 ton	0,542	0,547	0,547	0,542	1,816	4,538	0,985	2,480
10,8	14 ton	0,484	0,529	0,522	0,484	2,080	3,836	1,006	2,022
11,4	17 ton	0,540	0,549	0,549	0,551	2,140	1,740	1,167	0,954

Tabela 5. Vazão média, intervalo de descarte e descarte por veio para regime isotérmico e 12 minutos de holding

Vol	Vazão ton/min				$(T_{60\%} - T_{20\%})$ min		Descarte ton	
	v1	v2	v3	v4	v1&v4	v2&v3	v1&v4	v2&v3
11 ton	0,506	0,495	0,506	0,508	2,648	2,046	1,342	1,023
14 ton	0,533	0,553	0,553	0,556	2,724	0,958	1,483	0,529
17 ton	0,578	0,569	0,569	0,580	1,116	1,122	0,645	0,638

Tabela 6. Vazão média, intervalo de descarte e descarte por veio para regime não isotérmico e 12 minutos de *holding*

ΔT °C	Vol	Vazão ton/min				$(T_{60\%} - T_{20\%})$ min		Descarte ton	
		v1	v2	v3	v4	v1&v4	v2&v3	v1&v4	v2&v3
12,8	11 ton	0,495	0,502	0,511	0,466	2,414	4,544	1,160	2,300
11,6	14 ton	0,508	0,531	0,535	0,502	2,296	4,228	1,160	2,253
11,1	17 ton	0,551	0,549	0,531	0,553	1,806	2,004	0,997	1,082

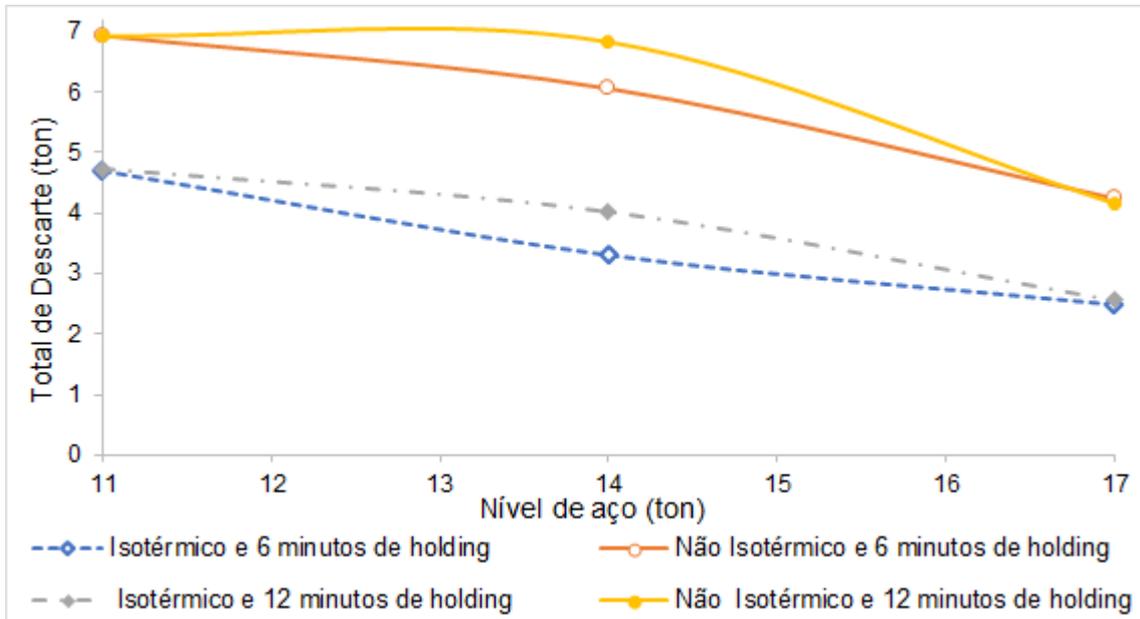


Figura 5. Total de metal descartado em função do nível de aço no distribuidor para diferentes condições térmicas e tempos de *holding*.

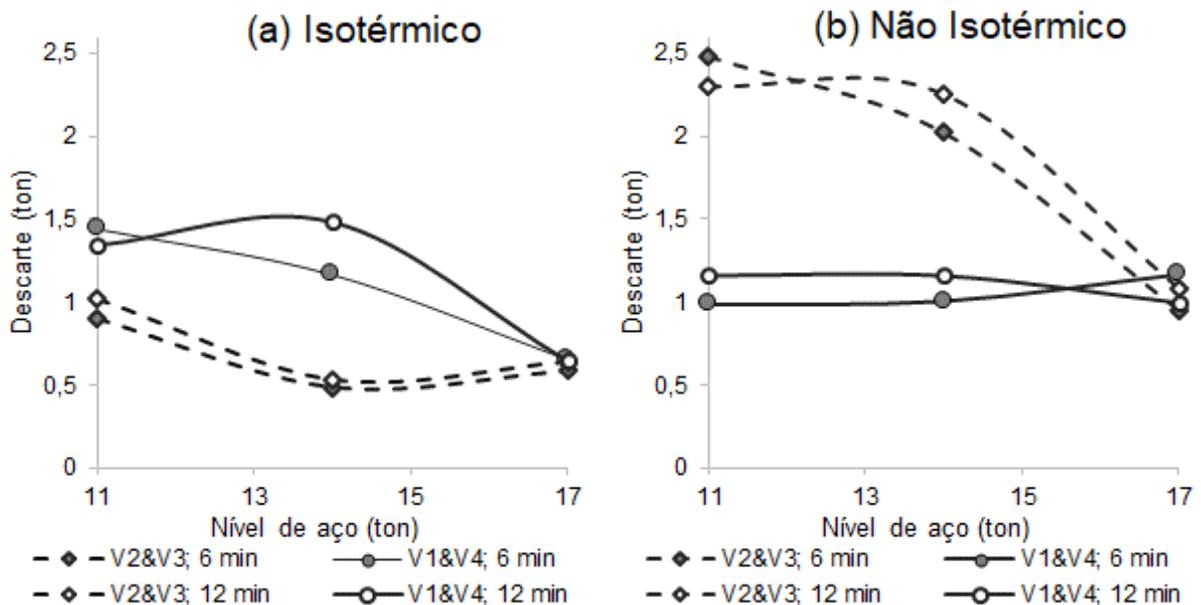


Figura 6. Quantidade média de metal descartado por veio em função do nível de aço no distribuidor para os veios internos (V2&V3) e externos (V1&V4) em diferentes tempos de *holding* e condição: (a) isotérmica; (b) não isotérmica.

4 CONCLUSÃO

- A diferença de temperatura do aço no distribuidor durante a troca de painéis tem forte influência na mistura de aços no processo de lingotamento contínuo, uma vez que o gradiente térmico muda o fluxo de aço no interior do distribuidor.
- Os veios internos são afetados de maneira mais significativa pela alteração de padrão de fluxo causada pelo gradiente de temperatura.
- A quantidade de descarte gerada pelos veios internos é significativamente maior em regime não isotérmico.
- Além disso, a melhor estratégia para transição, quando se considera o peso de mistura gerado, é o caso base, onde o distribuidor tem o volume de trabalho restaurado imediatamente após a abertura da nova panela, retornando à capacidade máxima de 17 toneladas.

Agradecimentos

Ao CNPq, à CAPES, à Fundação Gorceix e à FAPEMIG pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Cravo, VO. Modelamento Matemático da Zona de Mistura de Aços em Lingotamento Contínuo. 2006. 139 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, 2006.
- 2 Elias, RCA. Modelamento Físico e Matemático da Formação de Placa de Mistura no Lingotamento Contínuo – Efeitos de Modificadores de Fluxo no Molde. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Programa Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 2010;105 folhas.
- 3 Huang X, Thomas BG. Modeling of Transient Flow Phenomena in Continuous Casting of Steel. Canadian Metallurgical Quarterly, 1998; 37(3-4):197-212.
- 4 Lowry ML, Sahai Y. Modelling of Thermal Effects in Liquid Steel Flow in Tundishes. Steelmaking Conference Proceedings, 1991;505-551. (apud Gandra CA. Modelamento Físico do Fluxo de Aço Líquido no Interior do Distribuidor de Lingotamento Contínuo em Regime Transiente. 2002. 183 folhas).
- 5 Gryc K, Michalek K, Hudzieczek Z, Tkadlečková M. Physical Modelling of Flow Pattern in 5-Strand Asymmetrical Tundish with Baffles. Metal 2010 – Roznov pod Radhostem, p. 42-46.
- 6 Siddiqui MIH, Jha PK. Experimental Investigation of Inter Mixing in a Tundish-Mold Arrangement. Int. J. Mechanical Engineering and Robotics Research, 2014;1(1):36-43.
- 7 Pardeshi R, Basak S, Singh AK, Basu B, Mahashabde V, et al. Mathematical Modeling of the Tundish of a Single-Strand Slab Caster. ISIJ Int. 2004;44(9):1534-1540.
- 8 Yuan Q, Zhao B, Vanka P, Thomas BG. Study of Computational Issues in Simulation of Transient Flow in Continuous Casting. Process Metallurgy – Continuous Casting. 2005;76(1):33-43.
- 9 Sinha AK, Vassilicos A. Physical Modeling Study of Thermal Effects on Steel Flow and Mixing in the Tundish, Steelmaking Conference Proceedings 82, Chicago. 1999:163-174. (apud Gandra CA. Modelamento Físico do Fluxo de Aço Líquido no Interior do Distribuidor de Lingotamento Contínuo em Regime Transiente. 2002. 183 folhas).
- 10 Chatterjee D. Computational Study of a Trailblazer Multi Reactor Tundish (MRT) for Improving Yield and Quality of Steel During Continuous Casting. Int. Journal of Research in Engineering and Technology. 2013; 2(9):359-364.
- 11 Cwudziński A. International Journal of Cast Metals Research. 2017;30(1):50-60.
- 12 Damle CS, Sahai Y. A Criterion for Water Modeling of Non-isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International. 1996;36(6):681-689.