



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“TRANSIENTE TÉRMICO NUM DISTRIBUIDOR DURANTE TROCA
DE PANEAS E INFLUÊNCIA SOBRE O PADRÃO DE FLUXO”**

Camila de Castro Campos

Ouro Preto, Dezembro de 2019

Camila de Castro Campos

“Transiente térmico num distribuidor durante troca de painéis e influência sobre o padrão de fluxo”

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 Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva

Ouro Preto, Dezembro de 2019.



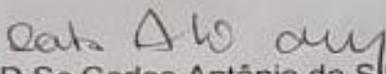
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

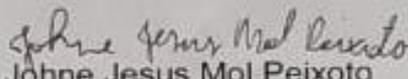


ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

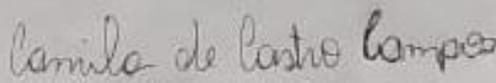
Ao décimo oitavo dia do mês de dezembro de 2019, às 10 horas, na sala 04 da Escola de Minas – Campus, foi realizada a defesa de monografia pela aluna **Camila de Castro Campos** sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Carlos Antônio da Silva (Orientador), Johne Jesus Mol Peixoto e Antonio Marlon Barros Silva (IFMG-Ouro Branco/MG). A aluna apresentou a monografia intitulada: *"Transiente térmico num distribuidor durante troca de painéis e influência sobre o padrão de fluxo"*. A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo à aluna um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pela aluna.

Ouro Preto, 18 de dezembro de 2019.


Prof. D.Sc Carlos Antônio da Silva
Orientador – Presidente


Prof. D.Sc Johne Jesus Mol Peixoto
Membro – DEMET


Prof. M.Sc. Antonio Marlon Barros Silva
Membro – Externo


Camila de Castro Campos
Aluna

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tornar possível a conclusão de mais uma etapa.

Aos meus pais José e Iolanda e minha irmã Renata, por estarem sempre presentes, me apoiando e aconselhando. Agradeço também ao Daniel por me incentivar continuamente.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva, pela oportunidade desse projeto, pela paciência e pela disposição.

Ao pessoal do laboratório de Pirometalurgia da Escola de Minas - UFOP, em especial Prof. Dr. Johnes Jesus Mól Peixoto e à Fernanda do Nascimento Oliveira, que me ajudaram a concretizar esse trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos por estarem sempre ao meu lado.

RESUMO

Sabe-se que dos processos de solidificação do aço, o lingotamento contínuo se destaca por ser o processo mais utilizado. Deste modo, torna-se bastante importante, a minimização de qualquer tipo de perda obtida durante o processo. Como o processo é sequencial ocorre a troca de panelas com aços de composições diferentes, obtendo-se então, aços de composições intermediárias que não são comerciáveis. Em função dos diferentes valores de *superheat*, a diferença entre a temperatura do aço remanescente no distribuidor e a temperatura de vazamento da panela com o aço novo é de grande importância para a qualidade do produto final, influenciando no fluxo, no perfil de velocidade e outros parâmetros de desempenho do distribuidor. O objetivo desse estudo é apresentar uma análise do transiente térmico de um distribuidor de lingotamento contínuo, a partir de medições realizadas em modelo físico em escala 1/3. Essas medições foram realizadas durante a simulação de trocas de panelas num distribuidor, variando algumas condições: *holding* ou não *holding*, diferentes nível de *holding* e ainda diferentes valores de *superheat*. A partir dos resultados obtidos observou-se que para estudar o descarte no lingotamento contínuo durante a troca de panelas, deve-se considerar a diferença de densidade dos aços presentes no distribuidor. Entre as diferenças de *superheat* estudadas, a admissão da nova panela com o fluido em temperatura maior gerou um maior descarte, porém um maior tempo de residência. Já o aumento do volume do nível de *holding* auxiliou na diminuição de descarte gerado. No veio central foram obtidos valores menores de tempo mínimo de residência e em relação aos testes com simulação da escória o nível mínimo maior favoreceu uma menor emulsão da escória.

Palavras-chave: Lingotamento Contínuo, Troca de Panelas, *Holding* e Distribuidor.

ABSTRACT

Continuous casting stands out as the most common steel solidification process. Thus, it's very important to minimize any kind of loss during the production process. As this process is continuous and as ladles with different steel grades are processed in a given sequential then intermixed steel with undesirable composition may be produced. In order to accommodate different superheat values and thermal losses, the difference between the remaining steel tundish temperature and ladle pouring temperature becomes a key casting parameter regarding the final product quality, affecting the flow, velocity pattern and others parameters of the tundish. This project goal is to present an analysis of tundish thermal transient from measurements performed in physical model (scale 1/3). These measurements were made during a simulation of ladle change in a tundish, varying some conditions such as: holding or no holding, level of holding and superheat values. From the results emerges that density difference due to thermal gradients must be considered for properly assessing the flow pattern. The amount of intermix is larger when a new ladle arrives with temperature higher than the temperature of steel remaining in the tundish. Increasing the holding level leads to increasing intermix. As expected the shorter values of breakthrough time are achieved for the central strand. Slag emulsion is lesser for higher metal level in the tundish.

Key words: Continuous Casting, Ladle Change, Holding e Tundish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do lingotamento contínuo.....	13
Figura 2 - Representação da divisão do distribuidor em três zonas de fluxo	16
Figura 3 - Curvas de transição para diferentes valores de nível mínimo de líquido no distribuidor	19
Figura 4 - Comprimentos das placas de mistura	19
Figura 5 - Efeito do volume mínimo na quantidade de mistura gerada baseado na composição na superfície e no centro	21
Figura 6 - Comparação da quantidade de mistura gerada para as condições isotérmica e não isotérmica	21
Figura 7 - Efeito das variáveis: vazão de entrada, volume residual no distribuidor e vazão de saída no tempo de mistura.....	22
Figura 8 - Visualização do fluxo isotérmico e não-isotérmico	25
Figura 9 - Cálculo do número de inclusões captadas na troca de panelas considerando um aumento de temperatura no distribuidor de 15K	26
Figura 10 - Cálculo do número de inclusões captadas na troca de panelas considerando uma redução de temperatura no distribuidor de 15K	27
Figura 11 - Esquema do modelo físico do distribuidor do lingotamento contínuo.....	28
Figura 12 - Mudanças de níveis no distribuidor durante os testes sem <i>holding</i>	30
Figura 13 - Mudanças de níveis no distribuidor durante os testes com <i>holding</i>	30
Figura 14 - Mudanças de níveis no distribuidor durante os testes com o nível de <i>holding</i> e nível mínimo maiores.....	30
Figura 15 - Esquema do experimento em relação a troca de panelas.	31
Figura 16 - Níveis citados para realização do <i>holding</i> dentro do distribuidor.	32
Figura 17 - Curva de transição ou curva F(t).	34
Figura 18 - Resultados comparativos dos valores de a)t _{2%} , b)t _{20%} , c)t _{70%} e d) descartes.	37
Figura 19 - Testes isotérmicos sem <i>holding</i>	38
Figura 20 - Testes isotérmicos com <i>holding</i>	38
Figura 21 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura menor sem <i>holding</i>	39
Figura 22 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura menor com <i>holding</i>	39
Figura 23 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura maior sem <i>holding</i>	40
Figura 24 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura maior com <i>holding</i>	40
Figura 25 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura maior, com nível mínimo e de <i>holding</i> maiores.	41
Figura 26 - Resultados da filmagem dos diferentes testes não isotérmicos.	42
Figura 27 - Resultados da filmagem dos testes não isotérmicos com nível mínimo de 15t e de 20t.....	42
Figura 28 - Resultados dos testes no modelo físico de simulação de escória: a) nível mínimo de 15t b) nível mínimo de 22t.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuição do nível mínimo na mistura no molde	20
Tabela 2 - Propriedades da água e do aço.	23
Tabela 3 – Condições experimentais dos testes realizados neste trabalho.....	29
Tabela 4 - Dados dos testes isotérmicos e sem <i>holding</i> (T1).....	35
Tabela 5 - Dados dos testes isotérmicos e com <i>holding</i> (T2).....	35
Tabela 6 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura menor sem <i>holding</i> (T3).....	35
Tabela 7 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura menor com <i>holding</i> (T4).....	35
Tabela 8 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura maior sem <i>holding</i> (T5).....	36
Tabela 9 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura maior com <i>holding</i> (T6).....	36
Tabela 10 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura maior e com níveis mínimo e de <i>holding</i> maiores (T7).	36

LISTA DE SÍMBOLOS

L – Comprimento

λ – Fator de Escala

g – Aceleração Gravitacional

ρ – Massa Específica

V – Velocidade

Q – Vazão volumétrica

t – Tempo

ν – Viscosidade Cinemática

η – Viscosidade Dinâmica

F_i – Força de inércia

F_g – Força gravitacional

F_η – Força viscosa

Re – Número Adimensional de Reynolds

Fr – Número Adimensional de Froude

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Lingotamento Contínuo.....	13
3.2 Descrição do Processo de Lingotamento Contínuo.....	14
3.2.1 Temperatura de Vazamento do Aço.....	14
3.3 Esquemas de Troca de Panela no Lingotamento Contínuo.....	15
3.4 Escoamento do Aço no Distribuidor	15
3.5 Estudo de Formação da Placa de Mistura	18
3.6 Critérios de Similaridade.....	22
3.7 Transição Térmica no Distribuidor	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
6 CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

No processo de lingotamento contínuo, o distribuidor possui grande importância por interligar a panela e o molde. O mesmo, além de ser utilizado para armazenar e distribuir, passou a ser utilizado também para a limpeza e ajuste de composição do aço (SAHAI *et al*, 1996).

Devido à procura de aços com melhor qualidade e menor custo, busca-se cada vez mais elevar a eficiência e a otimização do processo, a partir de um rígido controle das características do fluxo do metal líquido no distribuidor. Para que esse fluxo seja apropriado, são utilizados dispositivos (inibidores de turbulência, barragens, tampões, etc.) para seu controle, além da forma do distribuidor ser projetada para esta função específica. Em geral, o fluxo de metal líquido é simulado matematicamente e fisicamente em um modelo, antes de colocar em prática algum projeto na indústria (SAHAI *et al*, 1996).

A simulação física do lingotamento contínuo em escala reduzida é bastante aplicada, pois é um método relativamente rápido e de menor custo. A simulação permite o estudo do fluxo do aço e do projeto de um distribuidor. A aquisição de dados em uma planta industrial é bastante complexa, visto que se trabalha em temperaturas elevadas e pela falta de visibilidade dentro do distribuidor. Diante disso, utiliza-se água para simular o aço líquido, pois viscosidade cinemática à temperatura ambiente é semelhante à do aço na temperatura de vazamento (BOLLING *et al*, 2005).

Com base nos estudos utilizando as simulações, são investigadas diversas variáveis que influenciam de maneira direta no processo. A diferença entre a temperatura de vazamento aço e a temperatura *liquidus* é definida como grau de *superheat*; tanto valores baixos quanto valores elevados serão prejudiciais ao processo. O grau de *superheat* a ser adotado e a composição química do aço (que define a *liquidus*) determinam então a temperatura de vazamento a ser objetivada. Dependendo da composição química do aço sua temperatura em uma nova panela em um sequencial de corridas pode ser maior ou menor que a temperatura da anterior; diferentes padrões de fluxo podem resultar desta combinação. Objetiva-se então estudar a influência desta diferença de temperatura sobre o fluxo e parâmetros de operação do distribuidor.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Utilizar um modelo físico de um distribuidor de lingotamento contínuo, para avaliar a influência da diferença de temperatura entre o aço de uma nova panela admitida no sequencial de corridas e a temperatura da panela anterior sobre o padrão de fluxo.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar tempos mínimos de residência e volume de mistura;
- Avaliar o padrão macroscópico de fluxo;
- Avaliar a influência dos diferentes gradientes térmicos dentro do distribuidor durante a troca de panelas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo tem como principal função transformar o metal líquido em sólido de maneira contínua. O lingotamento contínuo trata-se do processo mais eficaz para a solidificação de uma grande quantidade de metal de forma mais simplificada, para um subsequente processo. Isso ocorre por esse ser um processo sequencial, o que viabiliza uma maior produtividade de tarugos, perfis e placas ou produtos semiacabados (THOMAS, 2001).

De acordo com Araújo (1997), o processo de lingotamento contínuo consiste nas seguintes etapas:

- Vazamento do aço da panela para o distribuidor;
- Fluxo do metal líquido através de um distribuidor para alimentar o molde;
- Formação de uma casca solidificada no molde em cobre resfriado a água;
- Extração contínua da peça por meio dos rolos extratores;
- Remoção de calor do veio por meio de *sprays* de água de resfriamento;
- Remoção de calor do veio apenas por convecção natural e radiação;
- Corte no comprimento desejado e remoção das peças.

Na Figura 1 é apresentado o processo de lingotamento contínuo. Os principais equipamentos desse processo são: panela, distribuidor e molde.

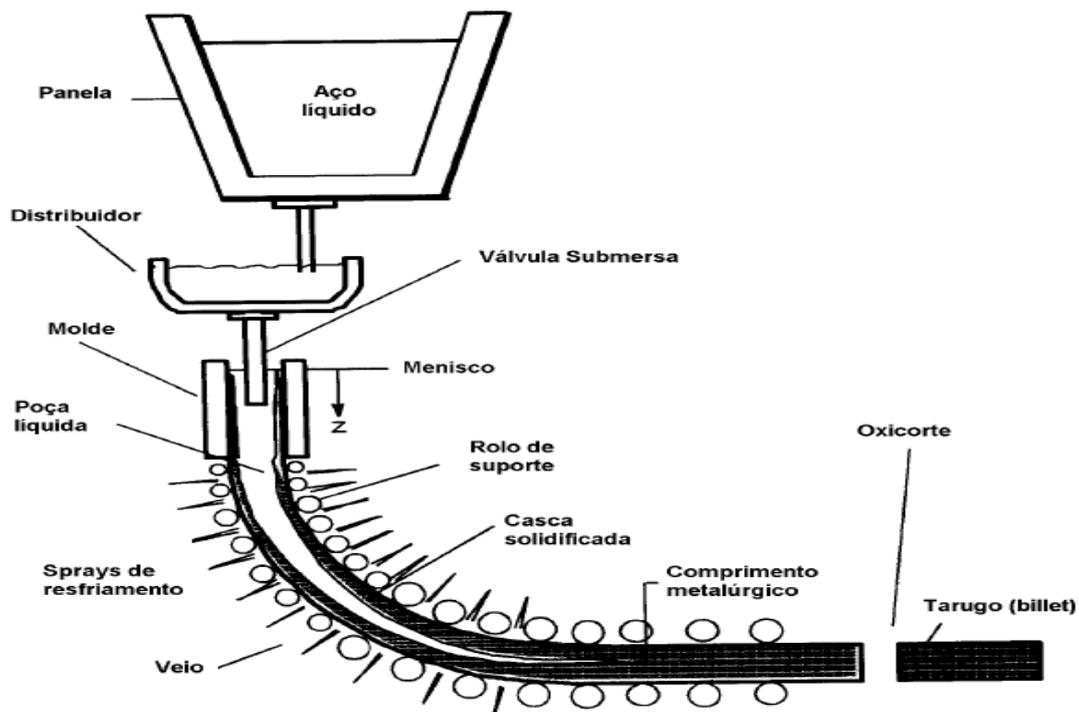


Figura 1 - Representação esquemática do lingotamento contínuo (THOMAS, 2001).

3.2 Descrição do Processo de Lingotamento Contínuo

O início do processo acontece através do transporte do metal líquido pela panela para o sistema do lingotamento, esta acoplada a uma torre giratória, que permite o seu movimento e que o processo seja contínuo. A temperatura de vazamento do aço líquido tem grande influência no processo, visto que em comparação com a temperatura de *liquidus* define o grau de superaquecimento. Valores elevados de superaquecimento (*superheat*), que é a diferença entre a temperatura de vazamento e a temperatura *liquidus*, podem causar perfuração do veio, formação de uma estrutura colunar que interfere negativamente na qualidade do aço. Valores baixos de superaquecimento podem causar entupimento da válvula, na qual é realizada a alimentação do distribuidor (ARAÚJO, 1997).

No distribuidor ocorre a passagem do metal líquido para o molde numa vazão constante; o distribuidor auxilia ainda na flotação de inclusões. O mesmo possui revestimento refratário interno, para manter a temperatura durante o processo. A máquina de lingotamento precisa ser dotada de um mecanismo que permita a troca de panelas sem que ocorra esgotamento de metal dentro distribuidor. O superaquecimento deve estar entre 5 e 20°C no lingotamento de placas, e entre 5 e 50°C para lingotamento de tarugos (ARAÚJO, 1997).

Durante a passagem do metal líquido do distribuidor para o molde, é necessário evitar a oxidação do metal e a adesão de inclusões ao sistema refratário. Por isso se utiliza a válvula submersa para que não haja contato do metal com o ar, minimizando a turbulência entre metal líquido e o pó fluxante, e ainda não permitindo que haja uma adesão do material escorificado no metal líquido (ARAÚJO, 1997).

3.2.1 Temperatura de Vazamento do Aço

Uma elevada temperatura de vazamento, em geral associada a elevados valores de *superheat*, provoca os seguintes efeitos:

- Estrutura preferencialmente colunar, que facilita o desenvolvimento de trincas internas no material, aumenta segregação e porosidade (LAIT, 1984);
- Diminui a espessura da casca solidificada, o que aumenta as chances de ocorrer perfuração do veio (SAMARASEKERA, 1984).

Já baixos valores de superaquecimento podem proporcionar um resfriamento inadequado do aço na válvula longa, fazendo com que haja um aumento na concentração de inclusões, pois a baixa temperatura bloqueia a flotação de inclusões (LAIT, 1984).

3.3 Esquemas de Troca de Panela no Lingotamento Contínuo

Existem algumas formas de realizar a minimização do volume de mistura, considerado descarte do processo. A primeira maneira é a que possui maior simplicidade em relação a sua operação, pois consiste em apenas lingotar os diferentes aços em sequência, ou seja, realizar a troca de panela de forma mais simplificada. Essa forma minimiza a perda na produtividade, porém produz um volume de descarte maior (HUANG *et al.*, 1996).

O método mais extremo é o esgotamento do distribuidor com o primeiro aço e em sequência produzir o novo aço. Assim, não produz o volume de mistura das composições que serão descartados, porém ocorre uma elevada perda de produtividade devido ao tempo gasto para encerrar e recomençar o lingotamento. Outro método consiste em trocar o distribuidor ao final do lingotamento de cada grau de aço, permitindo a diminuição da perda de produtividade e evitando a mistura de aços de composições diferentes. Isto, porém acarreta diminuição do rendimento, devido ao aço remanescente no distribuidor e minimiza a vida útil dos refratários (HUANG *et al.*, 1996).

A realização da mistura de aços com composições diferentes com otimização no distribuidor, é outra possibilidade de conseguir a troca de painelas. De acordo com Yeh *et al.* (1993), o descarte será mais afetado pela velocidade de lingotamento e pelo nível de aço no distribuidor.

3.4 Escoamento do Aço no Distribuidor

De acordo com Sahai e *et al.* (1996), no distribuidor acontece um fluxo que pode ser dividido em três zonas distintas: zona de fluxo pistonado, zona de mistura perfeita e zona de volume morto. A zona de fluxo pistonado é a região do distribuidor que possui a maior velocidade pontual, que representa o tempo mínimo de residência, sendo então a fração que representa a idealidade para flotação das inclusões no distribuidor.

A zona de mistura perfeita auxilia na remoção de diferenças na temperatura e na composição química dentro do distribuidor. Este possui também um gradiente de velocidade que causa a turbulência, que pode causar o arraste de partículas não-metálicas para dentro do aço e ainda aumentar a taxa de reoxidação no metal líquido.

A zona de volume morto possui velocidade muito baixa, pode até mesmo ser considerada como uma zona estática, ou seja, não possui muita interação com o fluxo principal. Esta zona é indesejável para o fluxo, pois produz redução no volume do distribuidor, indicando

também utilização deficiente do volume do reator. Acarreta também perdas térmicas e segregação na composição química. Na Figura 2 é mostrado a divisão do distribuidor de lingotamento contínuo nas três zonas de fluxo.

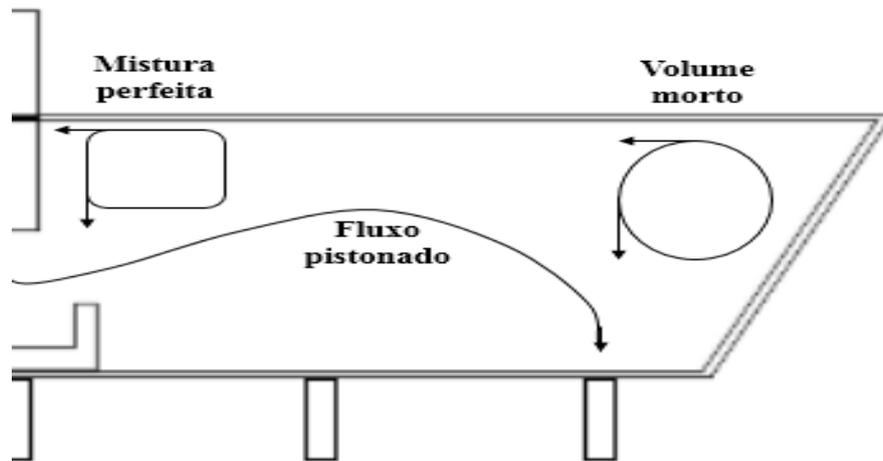


Figura 2 - Representação da divisão do distribuidor em três zonas de fluxo (modificado de SAHAI *et al.*, 1996).

A divisão em zonas tem sido empregada para estudar o escoamento dentro do distribuidor em estado estacionário, para diversas configurações de distribuidor. Os resultados dessas configurações de distribuidor podem ser estudadas a partir das variações nas frações de volumes das três zonas (THOMAS *et al.*, 1996).

No processo de lingotamento contínuo, de uma maneira geral, eram levados em consideração apenas a temperatura e a composição química para descrever a condição do aço no refino e em seguida no lingotamento. Hoje se admite que o padrão de escoamento deve ser levado em consideração. A qualidade e a produtividade na aciaria são determinadas pela combinação destes parâmetros (CRAVO, 2006).

Temperatura e composição química estão relacionados fortemente com a físico-química do processo de fabricação do aço. As perdas de calor, a flutuabilidade das partículas, inclusões e a reoxidação serão afetadas pela condição de escoamento (CRAVO, 2006).

A geometria dos equipamentos, a presença de dispositivos modificadores de fluxo e a presença de condições operacionais de lingotamento influenciam de maneira direta no escoamento. Esse, por sua vez, está relacionado fortemente a formação de mistura de variedades de aço no lingotamento contínuo. Compreendendo-se como o fluxo se comporta, pode-se antever os tipos de regiões, como: regiões de baixa troca de calor, regiões de volume morto e regiões de elevada turbulência (CRAVO, 2006).

Os estudos sobre o escoamento do metal líquido no distribuidor passaram a ter maior destaque, pois há necessidade de buscar um produto com maior limpidez e de melhor qualidade. A função de auxiliar na flotação das inclusões do metal líquido para a escória, evitando que essas sejam levadas ao veio, passou a ser uma nova função do distribuidor. A remoção dessas partículas está relacionada as condições cinéticas e termodinâmicas do distribuidor. Dessa forma, é importante analisar o fluxo do aço no distribuidor, essa análise tem sido realizada pelo modelamento matemático e físico. As modelagens têm sido realizadas para avaliar as condições do fluxo de escoamento no distribuidor, pois permitem analisar as linhas de fluxo de aço e avaliar também o efeito de mudanças na configuração do distribuidor sobre a classificação dos tempos de residência, diminuindo assim as zonas de volume morto. As zonas de volume morto são aquelas que possuem um maior tempo de residência médio, ou seja, permanecem por um tempo maior dentro do reator e essas regiões prejudicam a eficiência do distribuidor em termos de fluabilidade (CRAVO, 2006).

Andrade *et al.* (1993), efetuaram experimentos com diversos tipos de barragens, para obter condições mais favoráveis para a fluabilidade de inclusões, buscando aumentar o tempo médio de residência e diminuir a zona de fluxo morto. Os resultados mostraram que a elevada energia cinética do fluido tem como consequência, as forças de inércia predominarem sobre as forças viscosas, obtendo assim um grande volume de mistura e difusão turbulenta das partículas, sendo essa região caracterizada como a região de mistura. Aumentando as zonas de volume pistonado e as zonas de mistura, e diminuindo as zonas de volume morto, facilita na retirada de inclusões do metal líquido.

Cravo (2006) realizou testes a fim de conhecer o padrão de fluxo em um distribuidor, e consequentemente a relação de diversos parâmetros, para resultar em uma maior flotação de inclusões e menor geração de mistura no distribuidor. As simulações foram realizadas tanto no regime permanente quanto no regime transiente, o qual simula a troca de panelas, pois a combinação relacionada ao regime permanente não permanece a mesma quando se analisa as condições de transiência, devido à troca de panelas. No regime permanente, os testes foram combinados com variáveis de nível de aço no distribuidor, tais como: profundidade de imersão de válvula longa, taxa de lingotamento e presença de modificadores de fluxo. Foram simulados ainda no regime transiente o volume de aço no distribuidor no instante da abertura da nova panela e a taxa de reenchimento do distribuidor. Comparando os resultados dos dois regimes, obtém-se que no regime transiente os tempos mínimos de residência são consideravelmente menores que no regime permanente, o que destaca o quão importante é impedir o jato aberto durante as trocas de panelas. Os experimentos em regime permanente superestimam a projeção

de mistura a ser gerado, pois a mistura é muito dependente volume mínimo alcançado durante a troca de painéis (SILVA *et al.*, 2003 *apud* CRAVO, 2006).

3.5 Estudo de Formação da Placa de Mistura

Yu *et al.* (2005) desenvolveram um modelo para determinar a massa da placa de mistura que se forma durante a transição de tipos de aço. Os autores separaram o distribuidor em volume pistonado, volume morto e mistura perfeita, e a partir disso foi feito o balanço de massa para aquisição das composições químicas. Utilizou-se como aproximação que as concentrações nos volumes pistonado e volume morto seriam iguais as concentrações do aço novo e do aço antigo, respectivamente. Considerou-se que a mistura do aço se comporta de maneira uniforme no volume de mistura. As variações de concentração na saída do distribuidor em função do tempo foram relacionadas com equações diferenciais.

A partir das análises químicas das placas de misturas obtidas, validou-se o modelo. Com o intuito de facilitar o entendimento do efeito de diversas variáveis durante a troca de painéis, elaborou-se o modelo, sendo esse um programa eficiente e de simples utilização (YU *et al.*, 2005).

Abordou-se a influência do perfil de enchimento do distribuidor, o aumento da velocidade de lingotamento e a presença de inibidores de fluxo, durante a troca de painéis. Algumas características importantes durante a transição de qualidades foram ressaltadas por Yu *et al.* (2005):

- A taxa de enchimento do distribuidor é dependente do volume de aço contido no mesmo no momento da troca de painéis;
- Deve-se evitar o aumento da velocidade de lingotamento antes da troca dos painéis;
- Utiliza-se da menor quantidade de aço líquido possível no distribuidor durante a troca de qualidades, desde que não apresente risco de arraste de escória e inclusões;
- Para mudar o perfil de escoamento do aço, utilizar inibidores e modificadores de fluxo.

Essas medidas ajudam na redução da massa das placas de mistura, além de aprimorar a qualidade do produto.

Nos estudos de Cardoso Filho *et al.* (2008), foram avaliados os efeitos das condições de transição de qualidade sobre o tamanho da placa de mistura através também do modelamento físico. Alguns ensaios foram realizados levando em conta quatro níveis mínimos de fluido no

distribuidor, preservando assim a vazão da retomada em 80 L/min e o tempo de permanência no nível mínimo igual a 30 segundos.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as curvas de transição obtidas e os comprimentos das placas de mistura para esses experimentos, respectivamente. A redução do nível mínimo do aço no distribuidor causou a redução mais expressiva no comprimento da placa de mistura.

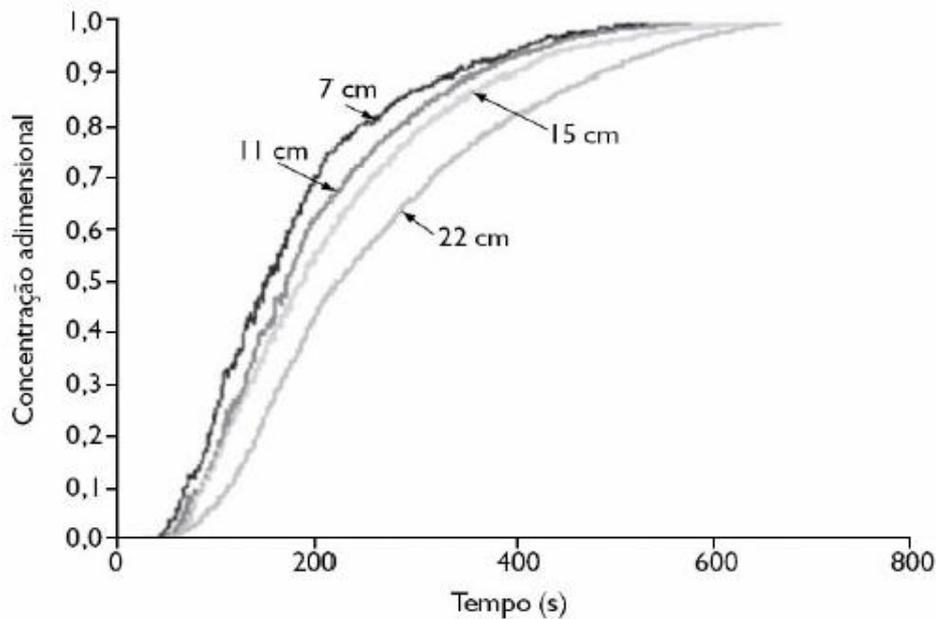


Figura 3 - Curvas de transição para diferentes valores de nível mínimo de líquido no distribuidor (CARDOSO FILHO *et al.*, 2008).

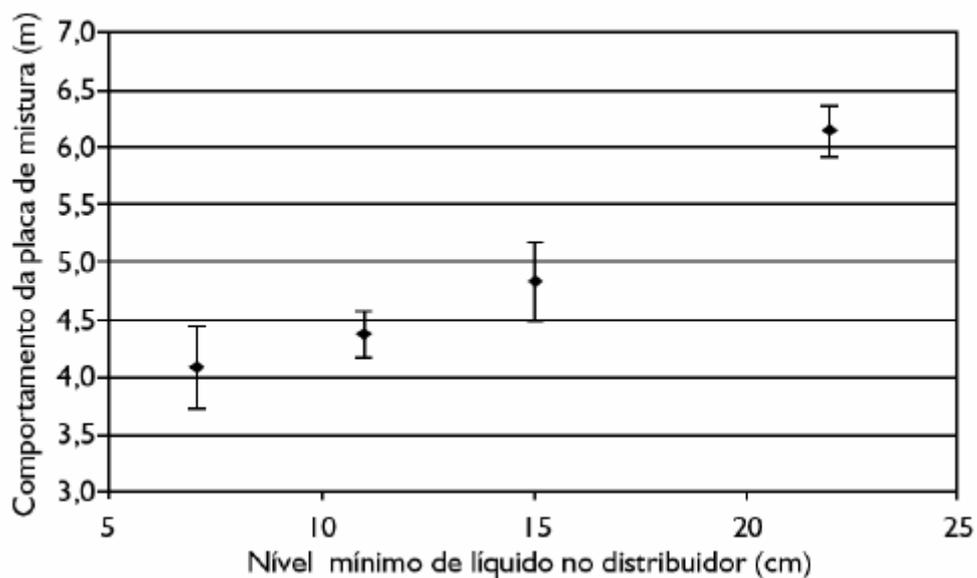


Figura 4 - Comprimentos das placas de mistura (CARDOSO FILHO *et al.*, 2008).

O tempo de permanência no nível mínimo e a vazão de alimentação de aço no distribuidor tiveram pouco efeito sobre o comprimento da placa de mistura. Foi verificado

também que, de acordo com os dados da Tabela 1, a mistura observada no molde é a contribuição mais significativa, em todos os níveis mínimos de líquido no distribuidor. Conclui-se que as variáveis que afetam o escoamento no molde devem ser avaliadas quando precisa-se realizar previsões mais eficientes do comprimento das placas de mistura e desenvolver maneiras para a diminuição do comprimento da mesma (CARDOSO FILHO *et al.*, 2008).

Tabela 1 - Contribuição do nível mínimo na mistura no molde (CARDOSO FILHO *et al.*, 2008).

Nível mínimo de líquido no distribuidor (cm)	Contribuição relativa da mistura no molde ao comprimento da placa de mistura (%)
7	86,0
11	73,0
15	72,5
22	63,6

GRIC *et al.* (2010) realizaram estudos de modelagem física, simulando a mistura de aços diferentes no distribuidor assimétrico de tarugos e de cinco veios. Utilizou-se um modelo em escala 1:4. As condições utilizadas nos testes foram isotérmicas, utilizando cloreto de potássio (KCl) como traçador, a fim de verificar as diferenças de composição química durante a troca de panelas. A partir dos resultados dos testes, observou-se que ao diminuir o volume mínimo de aço existente no distribuidor antes da troca de panelas, a tendência de distribuição uniforme de aço nos veios aumenta. O período de enchimento dificilmente modifica a natureza do fluxo do aço durante o estágio inicial de recarga, já os volumes menores de aço restante no distribuidor, influenciam de maneira significativa na dinâmica do fluxo.

A partir de simulações de transição em regime não isotérmico com aços de composições distintas, Alizadeh *et al.* (2008), utilizaram um modelo matemático em uma máquina de lingotamento contínuo de placas. Eles utilizaram água para simular a condição de mistura para um sistema não isotérmico no modelo físico. Retiraram-se várias amostras em partes distintas das placas lingotadas para analisar as composições químicas na máquina industrial. A aplicação do modelo mostrou que o descarte do processo pode ser diminuído das seguintes maneiras: temperatura maior para a nova panela com o aço de composição nova que do aço que já está no distribuidor; diminuição do peso de aço no distribuidor no momento de aquisição da nova

panela, ou seja, diminuição do nível mínimo, e redução da velocidade de lingotamento durante a troca de placas. As Figuras 5 e 6 mostram alguns dos resultados obtidos.

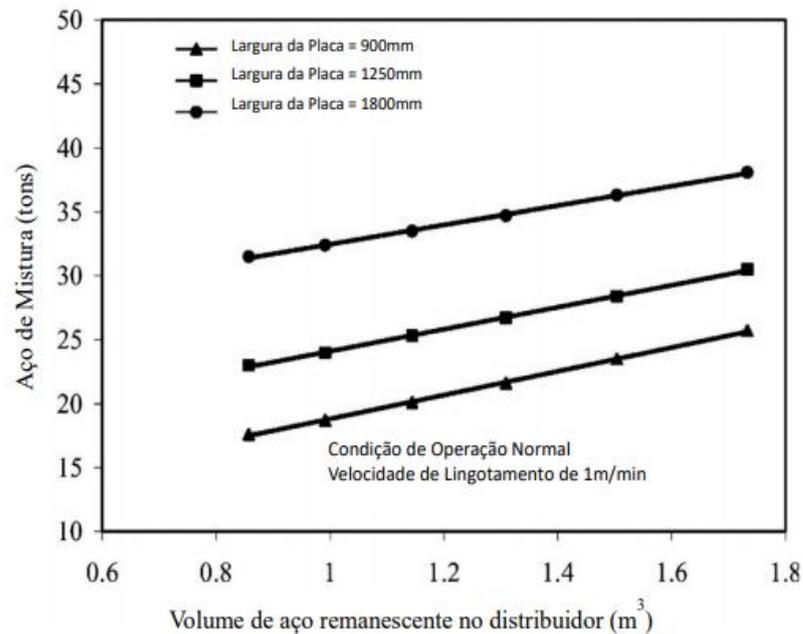


Figura 5 - Efeito do volume mínimo na quantidade de mistura gerada baseado na composição na superfície e no centro (adaptado de ALIZADEH *et al*, 2008).

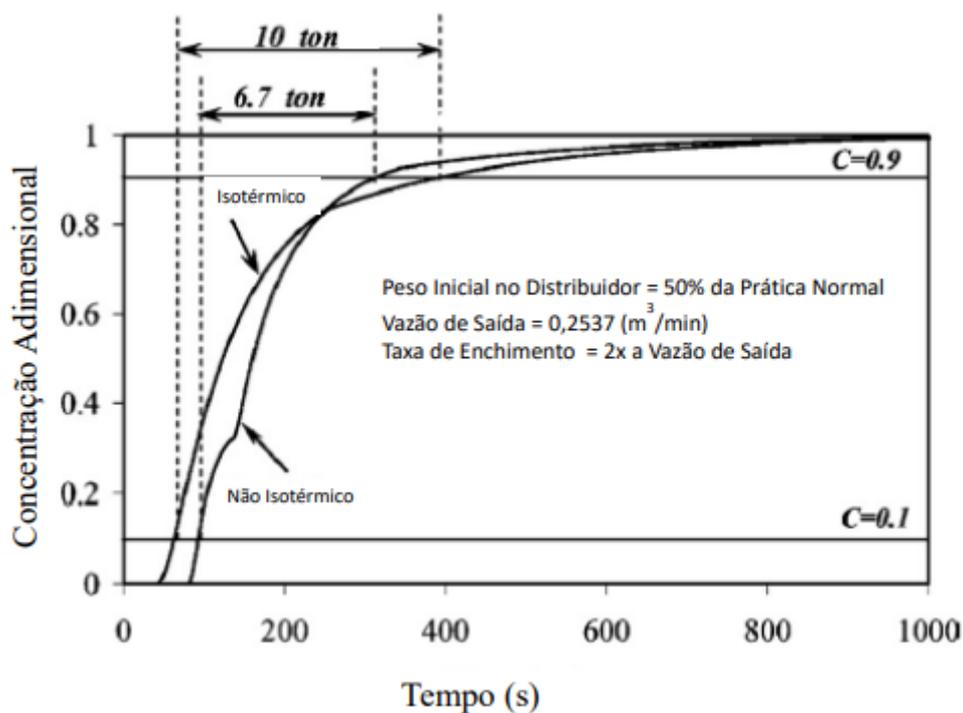


Figura 6 - Comparação da quantidade de mistura gerada para as condições isotérmica e não isotérmica (adaptado de ALIZADEH *et al*, 2008).

Muralikrishna *et al* (2013) realizaram experimentos a fim de simular a mistura de aços utilizando um modelo físico de distribuidor em escala 0,3 com quatro veios em regime

isotérmico. A partir da análise de algumas variáveis como vazão de enchimento do distribuidor, vazão do veio e volume de aço no distribuidor (nível de *holding*) foram feitas algumas conclusões. Para realizar a redução do tempo de mistura conclui-se que deve haver uma redução da vazão de enchimento do distribuidor; uma redução também na vazão dos veios e ainda um aumento na vazão dos veios. Na Figura 7, mostra-se a consequência das mudanças nas variáveis no tempo de mistura.

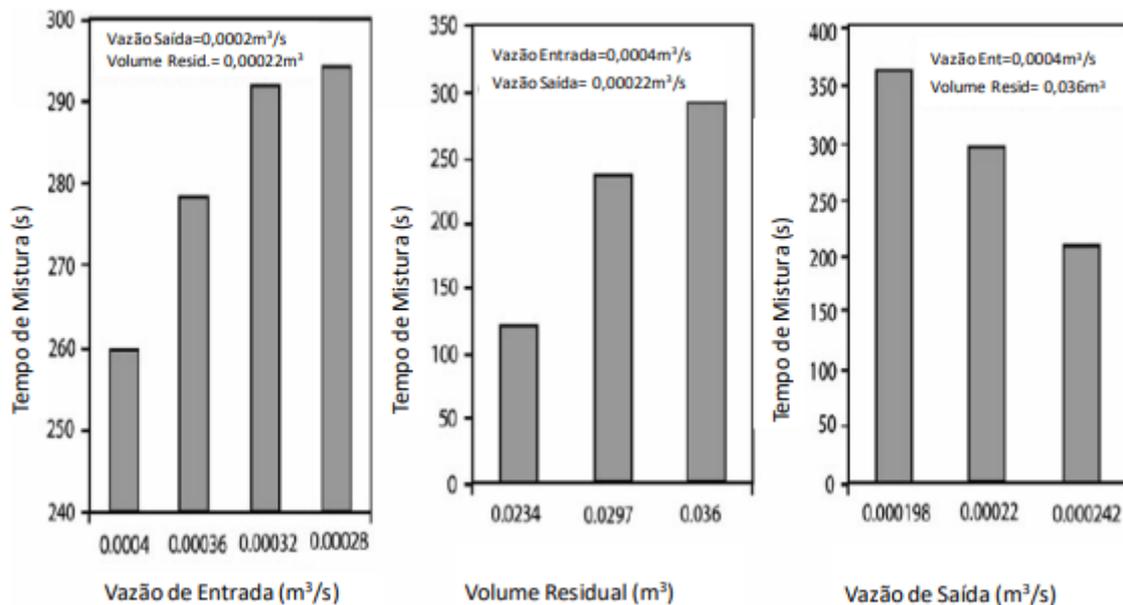


Figura 7 - Efeito das variáveis: vazão de entrada, volume residual no distribuidor e vazão de saída no tempo de mistura (adaptado de MURALIKRISHNA et al, 2013).

3.6 Critérios de Similaridade

A partir de critérios de similaridade que relacionam o modelo e a máquina industrial, o modelamento físico resume-se em réplicas construídas de processos industriais em escala laboratorial e a prática de experimentos nas mesmas. Para garantir que os resultados sejam confiáveis e extensíveis à indústria, procura-se ter uma obediência aos critérios de similaridade, garantindo assim que as informações utilizadas no sistema industrial sejam mantidas quando produzidas em escala laboratorial (ELIAS, 2010).

Segundo Seshadri *et al.* (2005), a utilização de modelos físicos é importante, pois permite que as operações sejam estudadas para futuras mudanças, sem que haja uma interrupção na produção industrial. O modelamento físico permite ainda o aperfeiçoamento e avaliação dos processos industriais a baixo custo.

As similaridades geométrica, mecânica, térmica e química, são os critérios que devem ser obedecidos para se construir um modelo físico que represente as principais características operacionais de um processo metalúrgico. Uma observação relevante é que o modelo físico não precisa reportar totalmente o sistema industrial, apenas os parâmetros importantes para o estudo em consideração (ELIAS, 2010).

Szekely *et al.* (1971) avaliaram que em estudos de escoamento do aço em operações de lingotamento contínuo, os critérios de similaridade para construir e operar os modelos a frio são:

- Similaridade geométrica: acontece quando nas duas operações a razão entre os tamanhos é constante.
- Similaridade cinemática: acontece quando as partículas possuem movimentos geometricamente parecidos e a razão de proporcionalidade do tempo entre as duas operações correspondentes nos dois sistemas é constante.
- Similaridade dinâmica: acontece quando as forças atuantes em locais e tempos correspondentes nas duas operações possuem razões fixas.

A água pode ser utilizada como fluido em análises do escoamento turbulento do aço em modelos físicos a frio. Isso é possível devido a viscosidade cinemática da água na temperatura ambiente ser semelhante à do aço na temperatura do lingotamento. A razão entre a viscosidade dinâmica (η) e a densidade do fluido (ρ) é a definição de viscosidade cinemática (ν). Na Tabela 2 são apresentadas algumas propriedades da água e do aço (ELIAS, 2010).

Tabela 2 - Propriedades da água e do aço (adaptado de WOLLMANN, 1999).

Propriedade	Unidade	Água (20°C)	Aço (1600°C)
Viscosidade dinâmica	kg/m.s	$0,855 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-3}$
Densidade	kg/m ³	$0,998 \times 10^3$	$7,08 \times 10^3$
Viscosidade cinemática	m ² /s	$0,86 \times 10^{-6}$	$0,9 \times 10^{-6}$

As igualdades dos números de Reynolds e de Froude expressam as similaridades dinâmica e cinemática, respectivamente. A partir da razão entre a força de inércia (F_i) e a força viscosa (F_η) tem-se o número de Reynolds (Re) e a partir da razão da força de inércia e da força gravitacional (F_g) tem-se o número de Froude (Fr), correspondente às equações 3.1 e 3.2. Quando os modelos utilizados são de escala reduzida, o alcance da igualdade simultânea destes dois números adimensionais não é possível, então é necessária a escolha do que melhor retrata a característica de interesse (ELIAS, 2010).

$$\text{Re} = \frac{\rho V^2 L^2}{\mu V L} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3.1)$$

$$\text{Fr} = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{L g} \quad (3.2)$$

Em que, Re é número de Reynolds (adimensional), Fr é número de Froude (adimensional), V é velocidade característica do fluido (m/s), g é aceleração da gravidade (m/s^2), L é dimensão característica, μ é viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s), ρ é densidade do fluido (kg/m^3).

3.7 Transição Térmica no Distribuidor

A partir de um modelo físico que possui escala de 1:3, mostrou-se as diferenças existentes entre o fluxo isotérmico e o fluxo não-isotérmico. Com a utilização de um corante foi possível analisar o fluxo no modelo. Com a observação das imagens registradas, conclui-se que no fluxo isotérmico o fluido entra no distribuidor e seu movimento é realizado no fundo desde a válvula, mais perto do jato de entrada, até a parede lateral do distribuidor. Com isso, tem-se o retorno do fluxo na direção ao jato de entrada (LOWRY, 1993 apud WOLLMANN, 1999).

Na Figura 8, no escoamento não isotérmico, o fluxo que possui maior temperatura movimenta-se inicialmente em direção a válvula 4, mas rapidamente começa a fluir na parte superior do distribuidor enquanto o fluido frio permanece na parte inferior. A propriedade responsável por tal distribuição é a densidade, que varia em função da temperatura. Tanto a água como o aço são menos densos com o aumento da temperatura e a força de empuxo age na velocidade do fluxo (LOWRY, 1993 apud WOLLMANN, 1999).

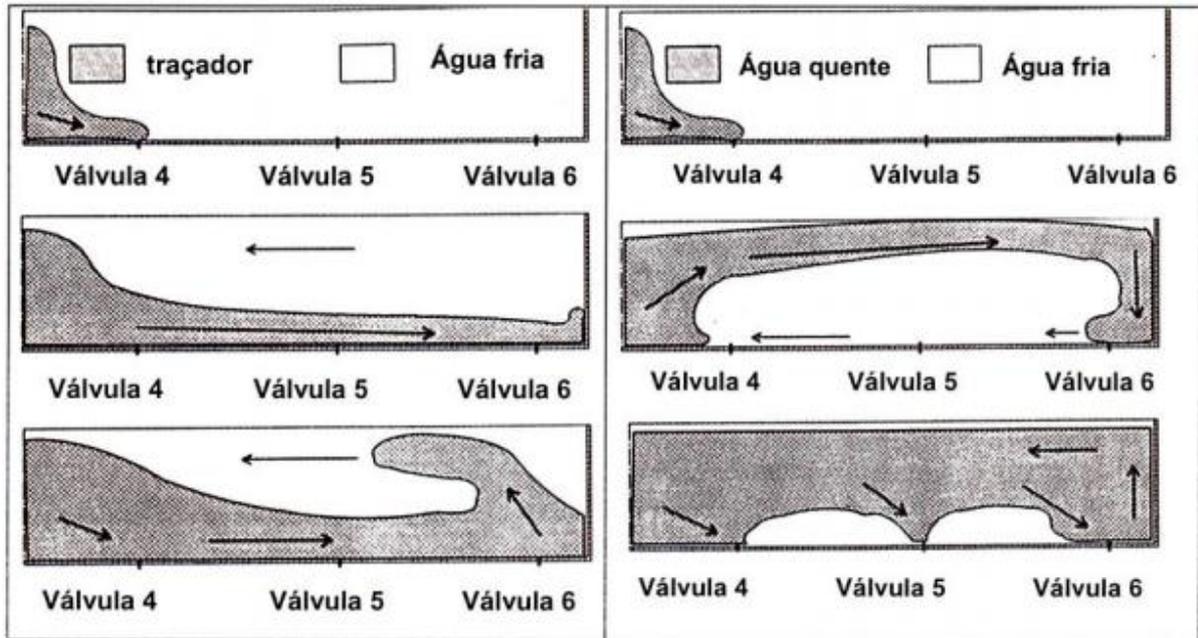


Figura 8 - Visualização do fluxo isotérmico e não-isotérmico (LOWRY, 1993 apud WOLLMANN, 1999).

Amorim (2018) estudou a mistura de aços em um distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos, de seis veios, a fim de reduzir perdas que são geradas no processo de mistura. A análise foi realizada em um distribuidor de 23t de capacidade de seção quadrada de 130mm, atuando com jato aberto, em condições isotérmicas e não isotérmicas. Visando a diminuição das perdas por mistura através da influência do nível de aço no distribuidor no momento da troca de panelas (*holding*) e a disposição de barreiras no interior do distribuidor, foram utilizadas simulações numéricas e modelagem física em um distribuidor na escala $\frac{1}{4}$.

Para a avaliação da relevância do fluxo térmico na quantidade de perda metálica gerada foi avaliado a diferença de temperatura entre o aço da corrida anterior e do aço na próxima corrida. O nível de aço no distribuidor durante a troca de panelas (*holding*) também é uma variável de grande importância para definir a quantidade de mistura, sendo que quanto menor o nível, menor será o descarte gerado (AMORIM, 2018).

Esse trabalho demonstrou que a diferença de densidade do aço líquido durante a troca de panelas, devido as diferentes temperaturas, é a variável de maior importância para avaliar a quantidade de aço na mistura e ainda para prever o arraste de inclusões não metálicas para os veios. Conclui-se também que a admissão de um aço com maior temperatura sobre o de menor temperatura contribui para flotar inclusões vindas da diminuição do volume morto, porém favorece uma maior quantidade de mistura (AMORIM, 2018).

A partir de modelagem numérica e física em um distribuidor de tarugos com quatro veios de escala $\frac{1}{3}$, Chattopadhyay *et al* (2012) simularam duas condições não isotérmicas,

uma com aumento de temperatura (5K a 15K) e outra com redução de temperatura (10K a 15K) entre o aço da nova panela e o aço da corrida anterior. Na primeira condição, eles concluíram que ocorre o favorecimento da limpeza do aço a partir da flotação das inclusões não metálicas, devido a fluabilidade do aço que é consequência da diferença de densidade existente no distribuidor, apresentada na Figura 9. Já a segunda condição pode ser muito prejudicial para a qualidade do aço, visto que aprisiona as inclusões nos veios, como mostra a Figura 10.

Assim, utilizou-se um inibidor de turbulência para diminuir o efeito do gradiente térmico e de densidade. Foram observados também os diferentes comportamentos entre as inclusões de tamanhos distintos e concluiu-se que isso ocorre devido ao efeito do empuxo, uma vez que as inclusões de maior tamanho também flutam com maior velocidade, e assim são mais facilmente captadas.

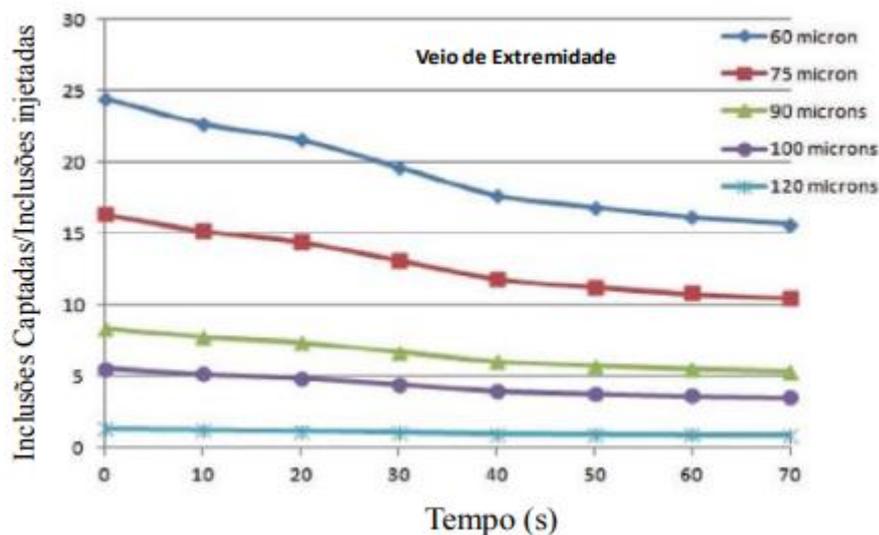


Figura 9 - Cálculo do número de inclusões captadas na troca de panelas considerando um aumento de temperatura no distribuidor de 15K (adaptado de CHATTOPADHYAY *et al*, 2012).

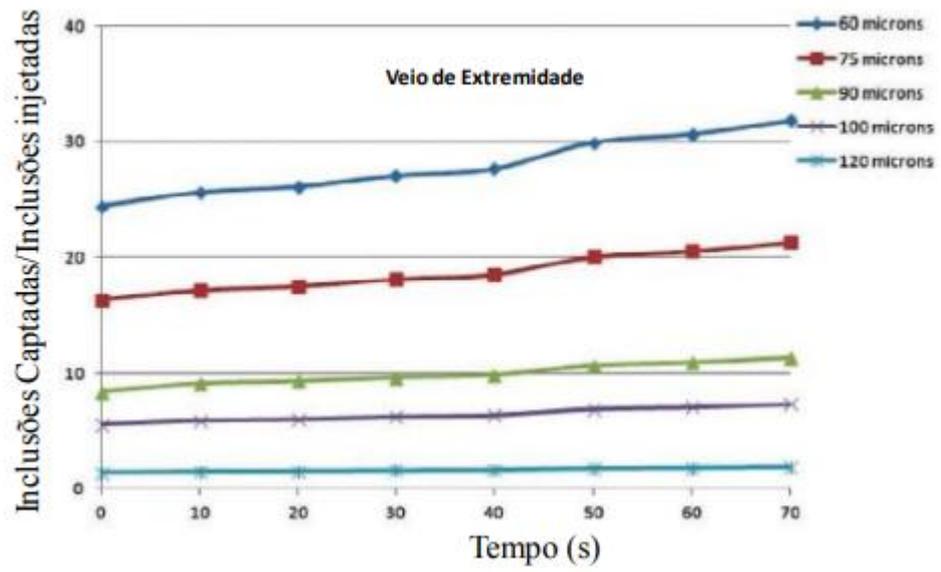


Figura 10 - Cálculo do número de inclusões captadas na troca de painelas considerando uma redução de temperatura no distribuidor de 15K (adaptado de CHATTOPADHYAY *et al*, 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados experimentos em um modelo físico de um distribuidor construído em acrílico em uma escala de 1:3, em relação a máquina industrial. O distribuidor utilizado possui uma válvula longa, cinco veios (V1, V2, V3, V4 e V5), os quais são dispostos simetricamente em relação à válvula longa, um inibidor de turbulência quadrado no centro e cinco tampões que são colocados sobre os veios para evitar formação de vórtices. Na Figura 11 é apresentado um esquema do distribuidor utilizado.

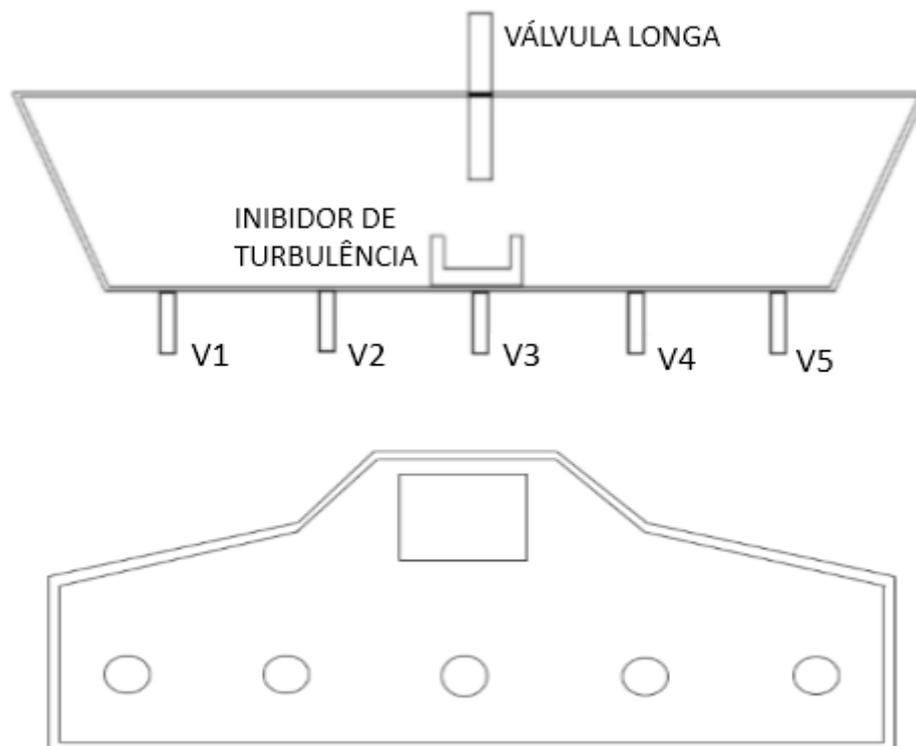


Figura 11 - Esquema do modelo físico do distribuidor do lingotamento contínuo.

Para simular os diferentes aços durante a troca de painéis foram utilizados água e solução salina (KCl). Visto que estes dois possuem diferentes condutividades elétricas, cada veio foi equipado com um sensor de condutividade elétrica a fim de detectar quando o diferente aço alcança o veio. A partir dessa detecção, calculou-se o descarte produzido em cada veio. Além disso, medidores de vazão foram colocados em cada veio e na entrada do distribuidor para controle da mesma. A solução salina foi preparada com o auxílio de uma balança com uma concentração de 0,1g/L de KCl.

Foram realizados três conjuntos de testes em diferentes condições para estudar a influência do gradiente de temperatura entre o fluido remanescente no modelo físico e o novo fluido que simula a abertura de uma nova panela. Cada teste teve duração de aproximadamente

22 minutos. A primeira condição de testes foi realizada isotermicamente para a comparação com os demais, testes sem *holding* e testes com *holding*; a segunda condição de testes foi não-isotérmica, iniciado com água na temperatura ambiente, com a posterior admissão de solução salina sobreaquecida em 15°C, testes sem *holding* e com *holding*; já a terceira condição de testes esta ordem de admissão dos fluidos foi invertida, possuindo testes sem *holding*, testes com *holding* e ainda testes com um *holding* em um nível maior. Foram realizados 8 testes com cada condição. A Tabela 3 sumariza as condições experimentais.

Tabela 3 – Condições experimentais dos testes realizados neste trabalho.

Condição dos testes		
Isotérmico	T1 - Temperatura ambiente	Sem <i>holding</i>
	T2 - Temperatura ambiente	Com <i>holding</i>
Não-isotérmico	T3 - Admissão do novo fluido com temperatura menor	Sem <i>holding</i>
	T4 - Admissão do novo fluido com temperatura menor	Com <i>holding</i>
	T5 - Admissão do novo fluido com temperatura maior	Sem <i>holding</i>
	T6 - Admissão do novo fluido com temperatura maior	Com <i>holding</i>
	T7 - Admissão do novo fluido com temperatura maior	Com nível de <i>holding</i> e nível mínimo maiores

Os esquemas das Figura 12, 13 e 14 representam a alteração do nível durante a troca de panela em testes sem *holding*, com *holding* e com valores maiores de *holding* e nível mínimo.

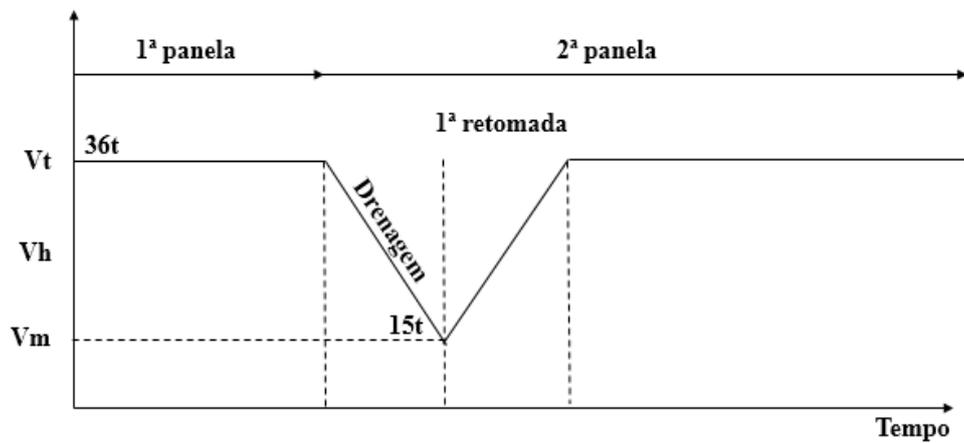


Figura 12 - Mudanças de níveis no distribuidor durante os testes sem holding.

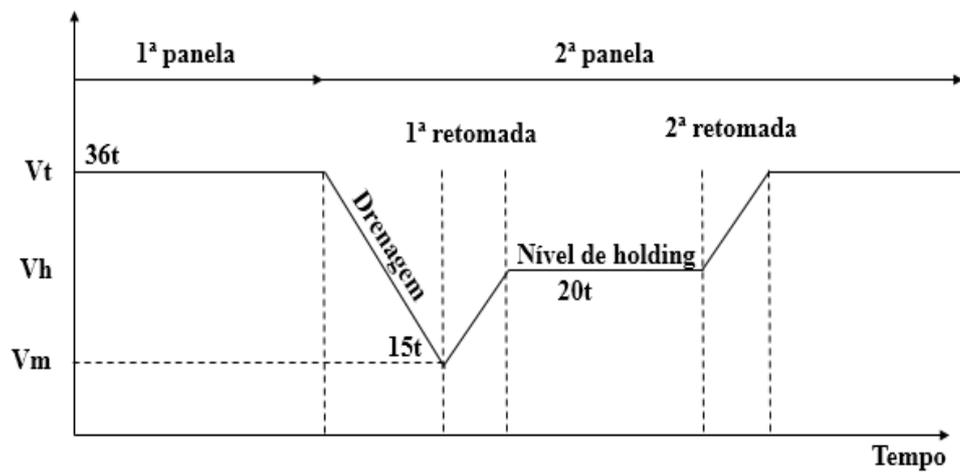


Figura 13 - Mudanças de níveis no distribuidor durante os testes com holding.

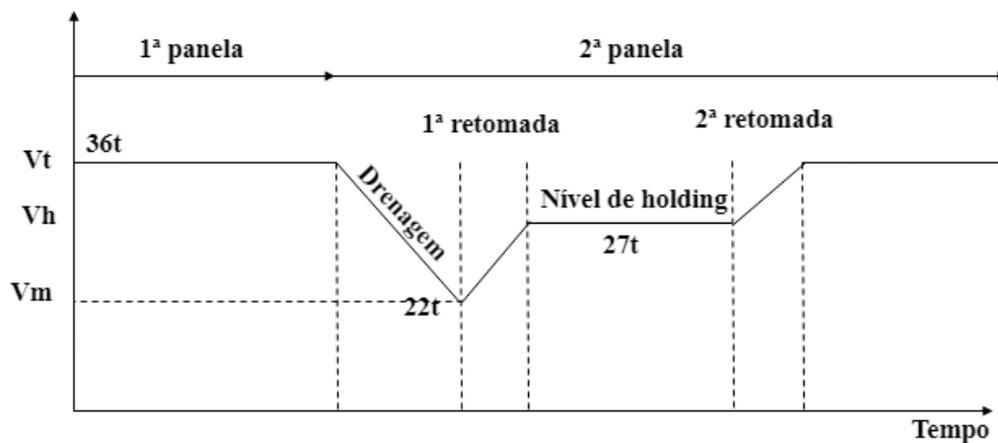


Figura 14 - Mudanças de níveis no distribuidor durante os testes com o nível de holding e nível mínimo maiores.

A Figura 15 apresenta o esquema do experimento, em relação a diferença de temperatura e aos diferentes recipientes para a simulação da troca de placas. O recipiente A representa o recipiente com água limpa em temperatura ambiente e o recipiente B representa o recipiente com salmoura aquecida. O aquecimento foi realizado com o auxílio de dois aquecedores e para o controle da temperatura foi utilizado um termômetro. A presença de duas bombas se fez necessário para permitir o fluxo dos líquidos e conseqüente simulação de troca de placas, B1 e B2.

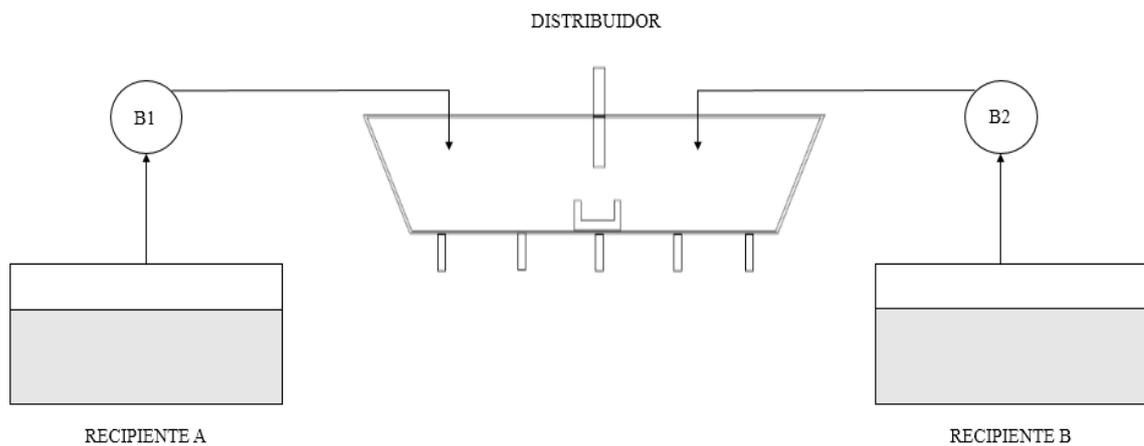


Figura 15 - Esquema do experimento em relação a troca de placas.

A partir da última condição de testes foram realizadas também análises sobre o padrão macroscópico do fluxo, a fim de observar a influência do gradiente térmico existente no distribuidor e de um nível mínimo maior. Com base nestas análises, estudou-se qual condição de teste produz um menor descarte.

Estudos também foram realizados para analisar a emulsão da escória tanto com jato aberto e fechado. Para simular a escória no modelo foi utilizada uma mistura entre querosene, com densidade entre 0,760 e 0,822 kg L⁻¹, e indicador azul de metileno, e a água simulando aço no distribuidor. Como o óleo possui uma densidade menor que a água, essa mistura fica sobrenadante e a observação do padrão macroscópico é facilitada.

Os sensores de condutividade elétrica colocados em cada veio foram empregados para captar, indiretamente, a concentração de sal na solução. Essa técnica é chamada de adição de traçador (solução de KCl) em degrau, e esta permite a formação de uma curva de concentração normalizada, representada na equação 4.1.

$$F(t) = \frac{C-C1}{C2-C1} \quad (4.1)$$

Em que, o C é a concentração de traçador de KCl, C_1 é a concentração de traçador da panela 1 e C_2 é a concentração da panela 2. Os valores desta função de transição se situam entre 0 e 1.

Para o início de cada teste, encheu-se o distribuidor ao seu nível de trabalho a 249mm centímetros no modelo, correspondente a 36t na máquina industrial. Ao alcançar este nível, estabilizou-se a vazão de entrada em aproximadamente 25 L/min e a vazão de saída em cada veio em 5 L/min. Em seguida, interrompeu-se a alimentação do fluido até que distribuidor alcançasse o nível mínimo corresponde a 15 toneladas ou 22 toneladas na máquina industrial; essa etapa é chamada de drenagem. Ao alcançar esse nível, caso o teste previsse esta etapa, o distribuidor foi reenchido até o nível de *holding* com uma vazão de enchimento de aproximadamente 55 L/min; esta é a etapa chamada primeira retomada. Caso o teste não previsse essa etapa, encheu-se o distribuidor com a mesma vazão até o nível de trabalho e estabilizou-se o mesmo até completar o tempo do teste. Posteriormente, estabiliza-se o nível no distribuidor no nível de *holding*, este é um período estacionário, visto que as vazões de entrada e saída são iguais, permanecendo no mesmo nível.

A medida do nível de *holding* foi dada como 1cm de imersão da válvula longa, e o tempo para permanecer no mesmo é de 5 minutos. E finalmente a segunda etapa de retomada é realizada com vazão de 55 L/min até ser atingido o nível de trabalho. A Figura 16 esquematiza estas variações.

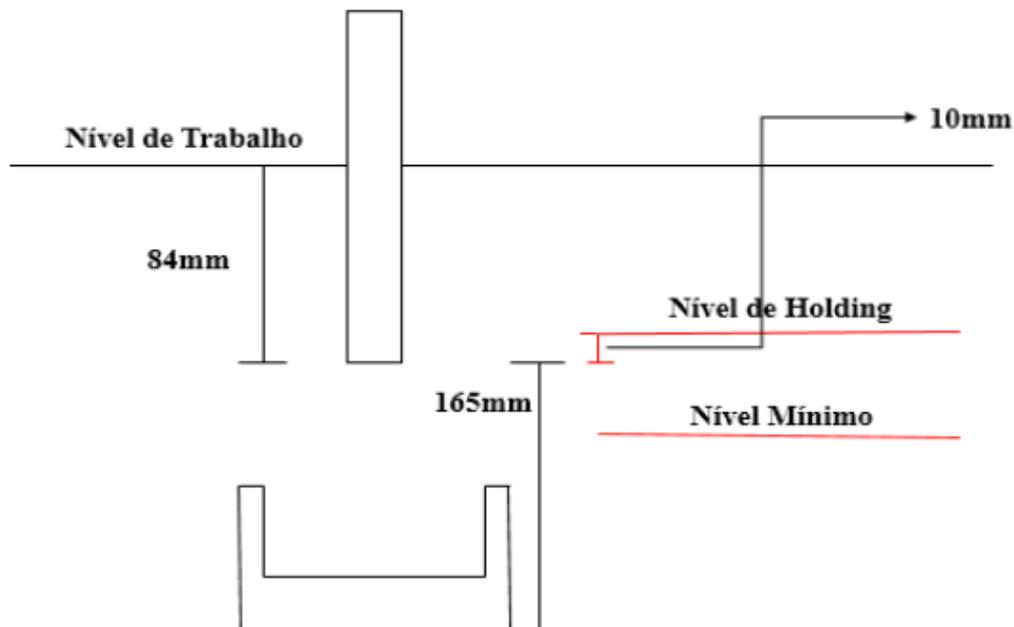


Figura 16 - Níveis citados para realização do *holding* dentro do distribuidor.

O terceiro tipo de teste consiste apenas em mudar a ordem da troca de painéis, ou seja, primeiramente a salmoura com temperatura superior e posteriormente a água limpa na temperatura ambiente.

Com base nos dados capturados pelo sistema de aquisição de dados foi mensurada a vazão de entrada, representada pela equação 4.2.

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (4.2)$$

Em que, Q_e é a vazão de entrada, e Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 são as vazões de saída de cada veio.

Outro importante parâmetro mensurado, representado pela equação 4.3, foi o tempo nominal de residência do líquido no interior do reator, ou seja, o tempo necessário para preencher um volume de trabalho.

$$t_{\text{nominal}} = \frac{V_R}{\sum Q_i} \quad (4.3)$$

Em que, V_R é o volume do distribuidor e Q_i é a vazão do veio i .

A fração de volume do distribuidor, que se comporta como fluxo pistão, é retratada na equação 4.4.

$$\text{FFP} = \frac{t_{2\%}}{t_{\text{nominal}}} \quad (4.4)$$

Em que, o $t_{2\%}$ corresponde ao tempo necessário para que as primeiras quantidades de traçador (KCl) atinjam o veio, escolhido como o tempo necessário para se obter 2% de transição, de acordo com a curva $F(t)$, correspondente a equação 4.1.

A quantidade de descarte foi estimada assumindo uma curva de transição utilizando a equação 4.1, curva $F(t)$. Nesse trabalho, foram escolhidos arbitrariamente os valores de $t_{20\%}$ e $t_{70\%}$, para que todo o material compreendido entre esses valores seja considerado descarte. Assim, esse parâmetro foi aplicado para distinguir a melhor condição para realização da troca de painéis. O descarte foi calculado de acordo com a equação 4.5.

$$\text{Descarte} = Q \times (\Delta t_{70\%} - \Delta t_{20\%}) \quad (4.5)$$

Em que, Q é a vazão em L/min, t é o tempo, em minutos, e conseqüentemente o descarte em litros.

Na Figura 17 é apresentado um exemplo esquemático de curva de transição ($F(t)$) gerada durante o experimento, mostrando as definições dos parâmetros citados anteriormente.

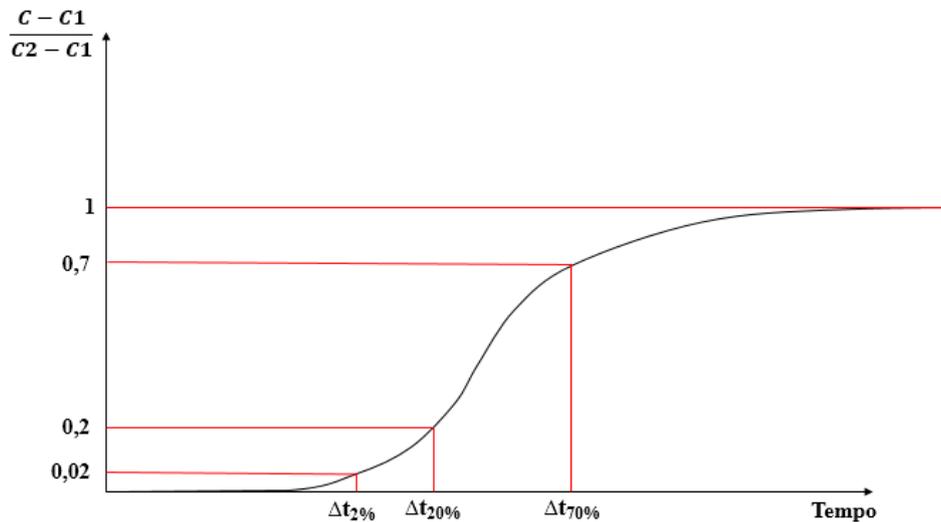


Figura 17 - Curva de transição ou curva $F(t)$.

Todos os dados de cada experimento foram coletados por placa de aquisição A/D e armazenados em um computador. Os sistemas de controle e supervisão monitoram as seguintes variáveis:

- Vazão de alimentação do distribuidor para estabilizar no nível de trabalho;
- Vazão de saída do distribuidor em cada veio;
- Vazão de alimentação durante as retomadas;
- Condutividade elétrica do fluido que passa pelos veios;
- Níveis de líquido no distribuidor.

Assim, objetivou-se encontrar as condições experimentais que implicam em menor descarte, possibilitando menores perdas (que produzam a transição mais abrupta), e os maiores valores de tempo mínimo de residência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas seguintes foram obtidas a partir das médias dos testes realizados para cada condição. Considerando a simetria do distribuidor, foram realizadas também médias entre os veios 1 e 5 (veios externos) e veios 2 e 4 (veios intermediários). A partir da análise das Tabelas 4 e 5, dos testes isotérmicos, percebe-se que os maiores valores de descarte são nos veios externos e intermediários, e que a condição sem *holding* leva ao menor descarte. Nota-se também que o fluido chega primeiro no veio central e que a transição neste é mais curta, acarretando menor produção de descarte; entretanto o baixo tempo de residência característico deste veio não deve ser favorável para a remoção de inclusões.

Tabela 4 - Dados dos testes isotérmicos e sem *holding* (T1).

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	102,13	124,90	217,19	92,29	7,69
veios 2 e 4	32,05	39,61	107,45	67,84	5,65
veio 3	13,38	18,96	42,56	23,60	1,97

Tabela 5 - Dados dos testes isotérmicos e com *holding* (T2).

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	108,32	148,05	288,71	140,66	11,72
veios 2 e 4	31,44	38,27	123,29	85,02	7,09
veio 3	14,04	20,06	44,19	24,13	2,01

Os dados referentes aos testes com admissão do novo fluido com temperatura menor sem *holding* e com *holding*, encontram-se nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. Observa-se que, de maneira geral, os valores de descartes são menores que o dos testes isotérmicos; os valores de t_{2%}, t_{20%} e t_{70%} são menores, requerendo-se menos tempo para o fluido novo alcançar os veios. Novamente, o teste com *holding* leva ao maior descarte comparando-se com o teste sem *holding*, para a mesma condição.

Tabela 6 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura menor sem *holding* (T3).

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	71,46	73,77	140,60	66,83	5,57
veios 2 e 4	36,08	41,29	119,91	78,62	6,55
veio 3	19,71	24,41	50,08	25,68	2,14

Tabela 7 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura menor com *holding* (T4).

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	72,03	73,77	153,03	79,26	6,60

veios 2 e 4	37,63	42,17	122,76	80,59	6,72
veio 3	20,03	25,17	46,63	21,45	1,79

Já nos resultados dos testes apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10, nota-se que os descartes são significativamente maiores no veio central. Em comparação aos veios externos, os descartes e o tempo de detecção do novo fluido são menores que nos testes isotérmicos.

Tabela 8 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura maior sem *holding* (T5)..

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	78,32	83,75	167,66	83,92	6,99
veios 2 e 4	43,25	105,91	204,57	98,66	8,22
veio 3	13,82	22,29	193,26	170,97	14,25

Tabela 9 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura maior com *holding* (T6).

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	85,21	92,60	174,49	81,89	6,82
veios 2 e 4	40,73	87,18	253,28	166,10	13,84
veio 3	13,66	22,34	295,30	272,96	22,75

Tabela 10 - Dados dos testes com admissão do novo fluido com temperatura maior e com níveis mínimo e de *holding* maiores (T7).

	Dados(s)				Descarte (L)
	t _{2%}	t _{20%}	t _{70%}	t _{70%-t20%}	
veios 1 e 5	84,63	91,01	171,73	80,72	6,73
veios 2 e 4	38,20	98,57	212,30	113,73	9,48
veio 3	15,75	23,31	232,75	209,43	17,45

Os testes não isotérmicos com novo fluido admitido a temperatura maior levaram a um menor valor de t_{2%} no veios 1 e 5 em relação aos testes isotérmicos, detectando-se mais rápido a presença do novo fluido nos mesmos. Dos testes não isotérmicos, o que leva ao menor valor total de descarte é o de admissão do novo fluido com temperatura menor e sem *holding*. Percebe-se também que os descartes do veio central são menores nos testes isotérmicos, ou seja, a transição no veio 3 acontece primeiro, e nos veios externos a transição ocorre em um tempo maior. Isso ocorre devido as diferenças de temperatura e densidade dentro do distribuidor.

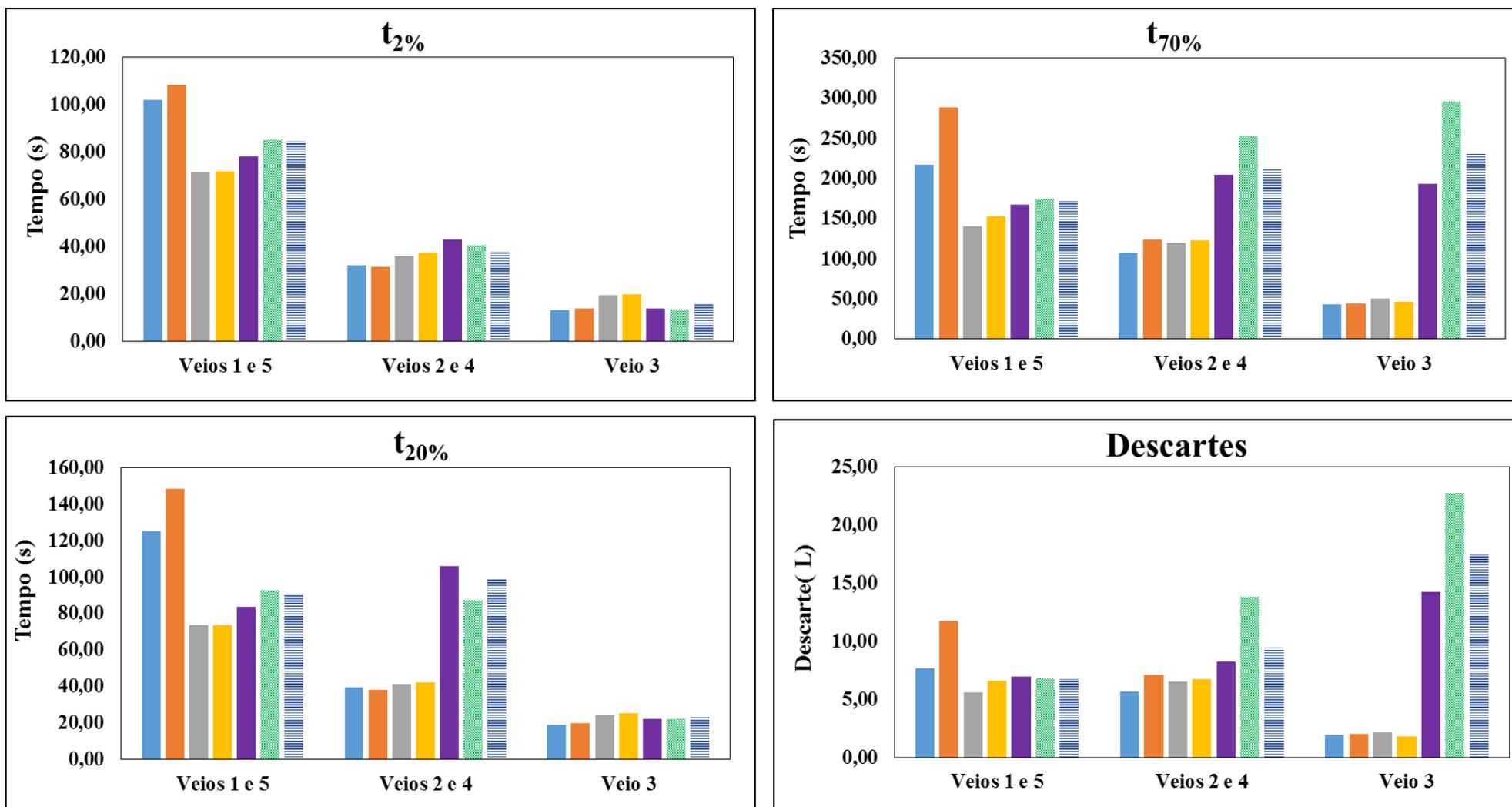


Figura 18 - Resultados comparativos dos valores de $t_{2\%}$, $t_{70\%}$ e descartes.

T1 - Temperatura ambiente/Sem holding; T2 - Temperatura ambiente/Com holding; T3 - Novo fluido com temperatura menor/Sem holding; T4 - Novo fluido com temperatura menor/Com holding; T5 - Novo fluido com temperatura maior/Sem holding; T6 - Novo fluido com temperatura maior/Com holding; T7 - Novo fluido com temperatura maior/Com nível de holding e nível mínimo maiores

Valores médios de $t_{2\%}$, de $t_{20\%}$ e de $t_{70\%}$ para as condições experimentais citadas são sumarizados na Figura 18, juntamente com os valores de descarte ou intermix. A influência do gradiente térmico é claramente notada.

A partir das médias dos testes realizados em cada condição, foram calculadas as curvas de transição. Nas Figuras 19 e 20 apresentam as curvas de transição dos testes isotérmicos e observa-se que a curva do veio central, em azul, possui maior inclinação, ou seja, a transição ocorre consideravelmente mais rápida que nos outros veios. Assim, para os veios externos, em vermelho, a transição é mais lenta. Já a inclinação da curva dos veios intermediários está mais próxima da curva do veio central, com a transição mais rápida que dos veios externos.

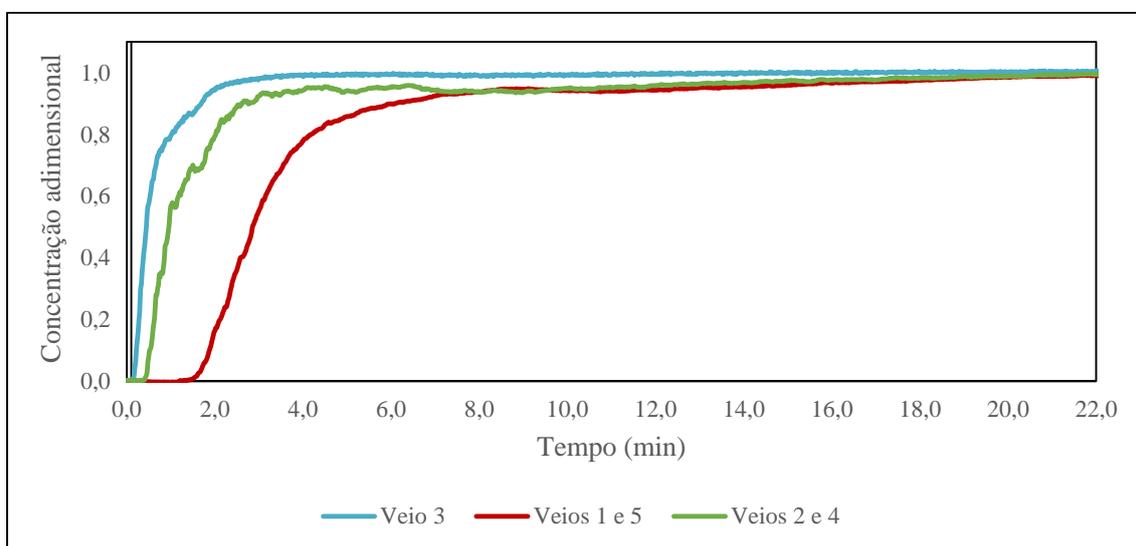


Figura 19 - Testes isotérmicos sem *holding*.

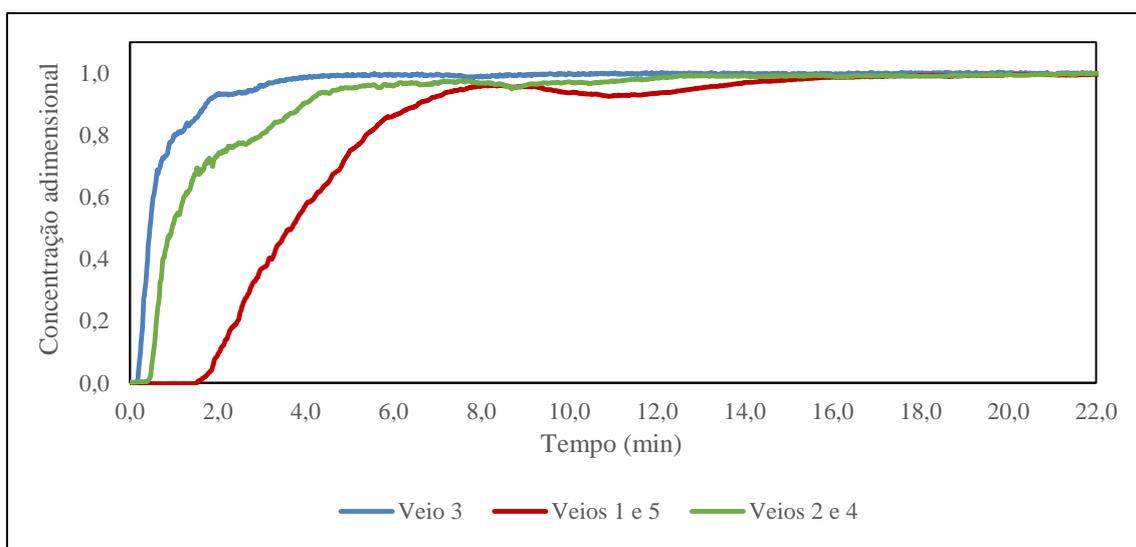


Figura 20 - Testes isotérmicos com *holding*.

Como sugerem as Figuras 21 e 22, que se referem aos testes não isotérmicos, com fluido recém-admitido a temperatura menor, a ordem de transição permanece a mesma que a anterior: veio central, veios intermediários e veios da extremidade.

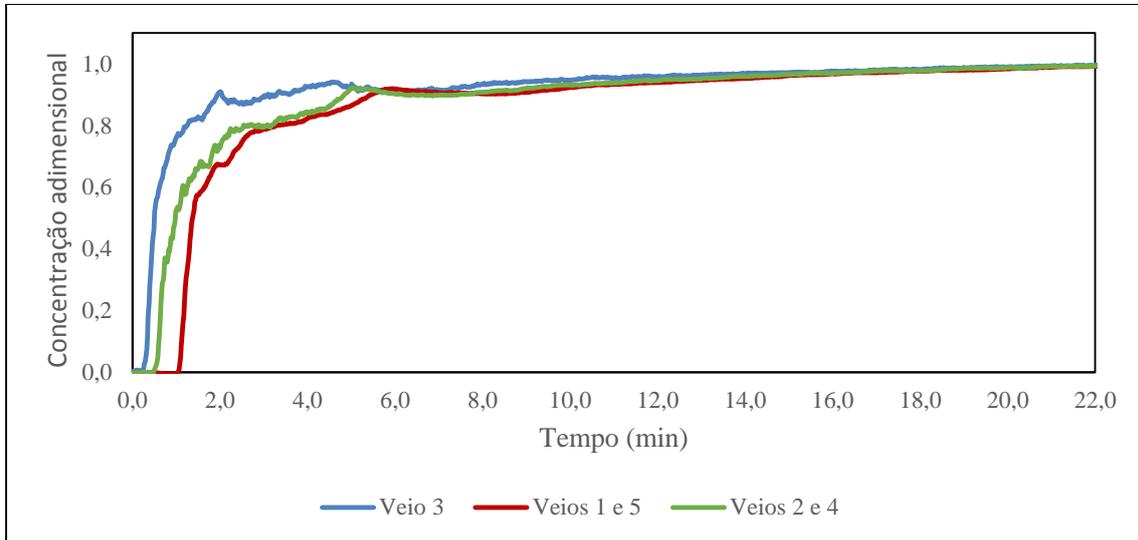


Figura 21 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura menor sem *holding*.

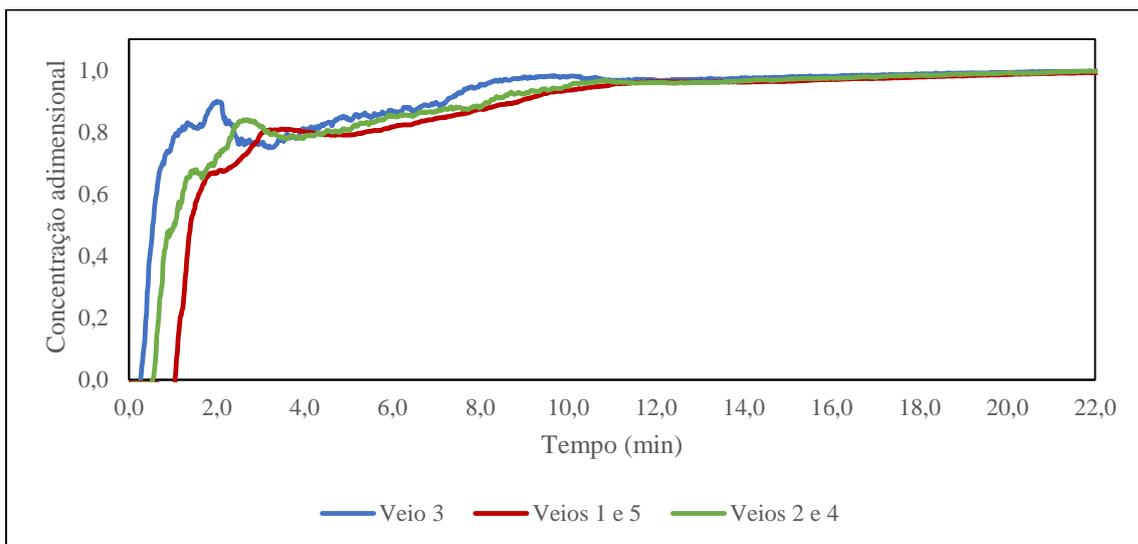


Figura 22 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura menor com *holding*.

As curvas de transição para testes com admissão do novo fluido com temperatura maior, são apresentados nas Figuras 23 24 e 25. Percebe-se que a transição é mais curta para os veios 1 e 5. Já para os veios 2 e 4, aparece um pequeno pico inicial que pode ser explicado por um início de curto circuito no fluxo, resultando em um maior descarte. No veio 3 este pico ocorre de maneira mais pronunciada, proporcionando um descarte ainda maior.

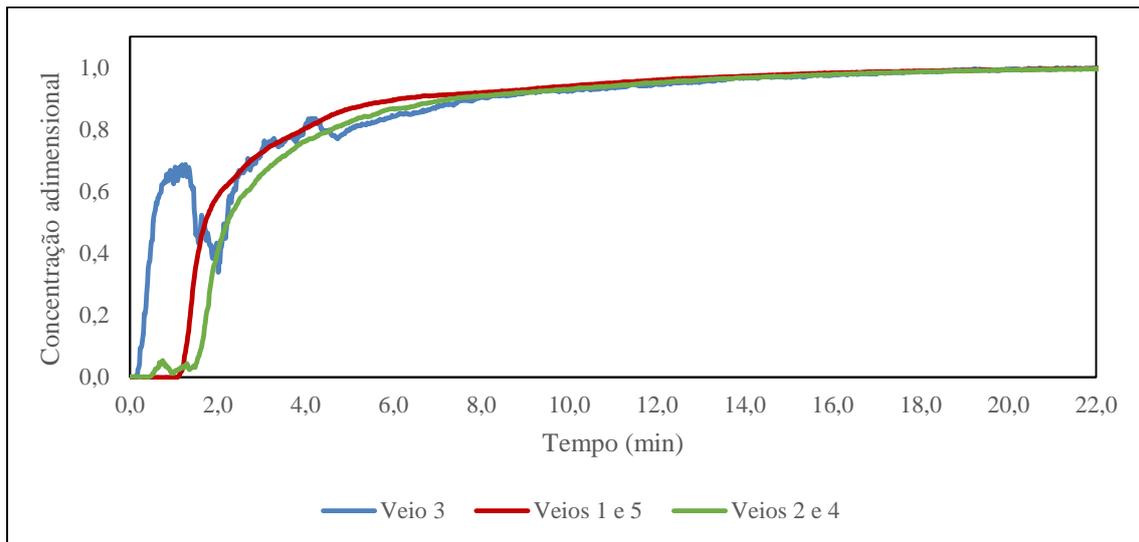


Figura 23 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura maior sem *holding*.

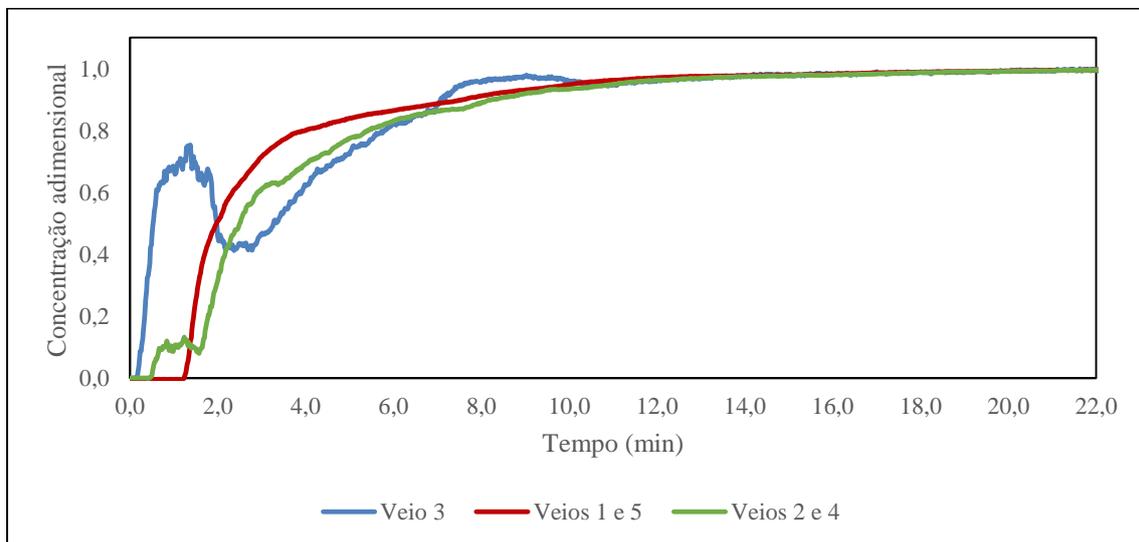


Figura 24 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura maior com *holding*.

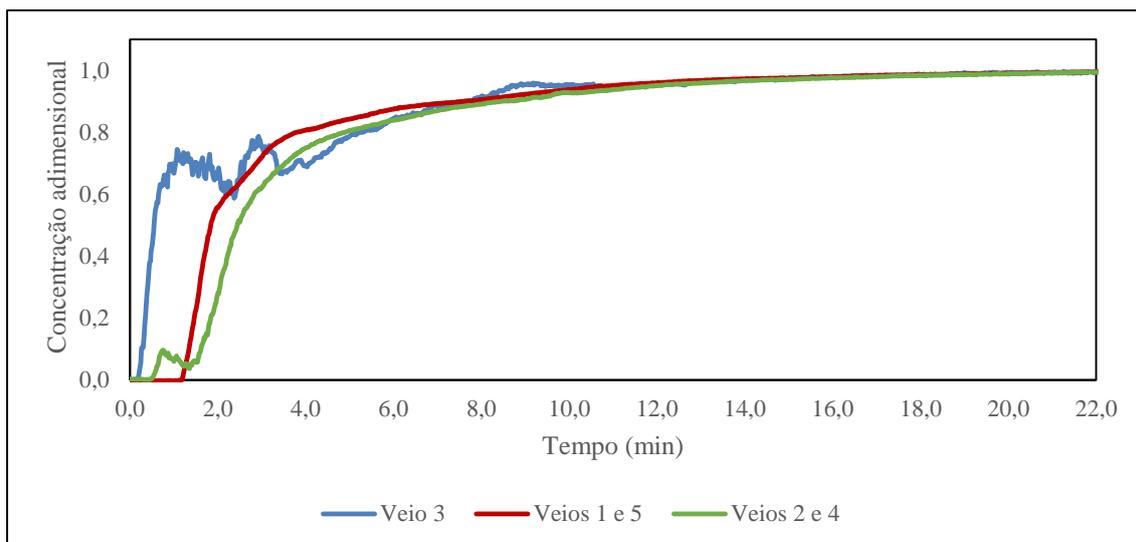


Figura 25 - Testes com admissão do novo fluido com temperatura maior, com nível mínimo e de *holding* maiores.

As filmagens dos testes confirmam os diferentes comportamentos do fluxo dentro do distribuidor devido ao gradiente térmico existente entre as painéis e as distintas densidades dos fluidos. Na Figura 26, no primeiro caso, o fluido novo chega ao distribuidor com uma temperatura menor, logo possuindo uma densidade maior, percorre o distribuidor pela parte inferior até encontrar-se com as paredes laterais. Na parte superior, forma uma espécie de volume morto. Já no segundo caso, o fluido que entra com temperatura maior é menos denso. Então, este percorre o distribuidor pela parte superior até se encontrar com as paredes laterais e em seguida para o fundo do distribuidor. Isso explica o porquê dos testes levarem a maior descarte no veio central ou nos veios externos. Assim como as Tabelas 9 e 10, a Figura 27 mostra que, o aumento do nível mínimo favorece para que a transição ocorra em um menor tempo.

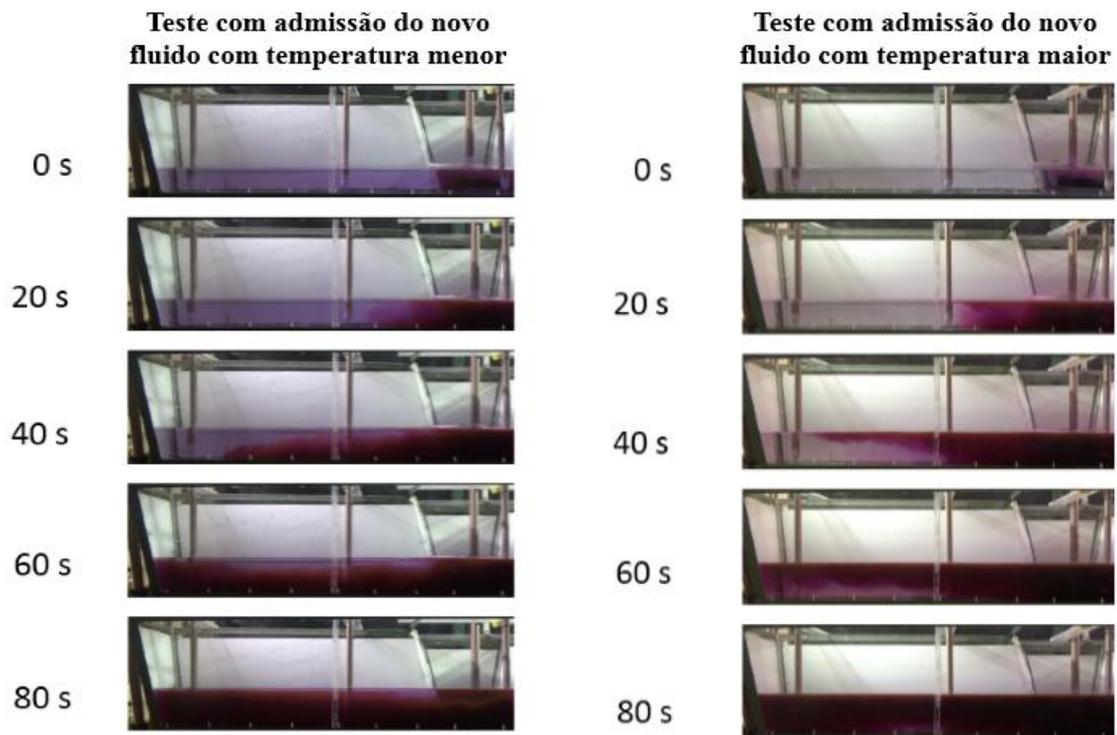


Figura 26 - Resultados da filmagem dos diferentes testes não isotérmicos.

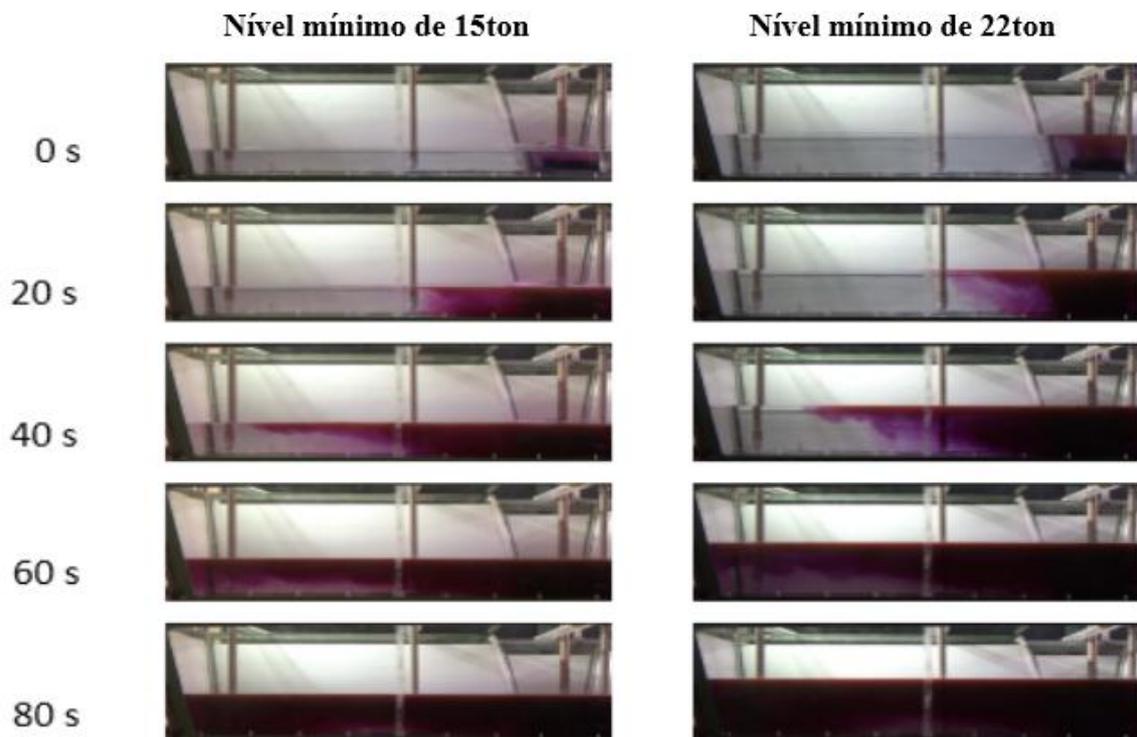


Figura 27 - Resultados da filmagem dos testes não isotérmicos com nível mínimo de 15t e de 20t.

Com a observação das imagens dos testes com simulação de escória, apresentada na Figura 28, percebe-se que na situação a, na qual o nível mínimo alcançado é de 15t e com jato aberto, ocorre significativa emulsificação da escória. Observa-se também que em 46 segundos ainda ocorre emulsão; esta situação é bastante prejudicial para a qualidade e limpidez do aço. Já em b, no teste com nível mínimo de 22t e jato submerso, a emulsificação é menor, observando-se que em 20 segundos já não ocorre mais esta situação.

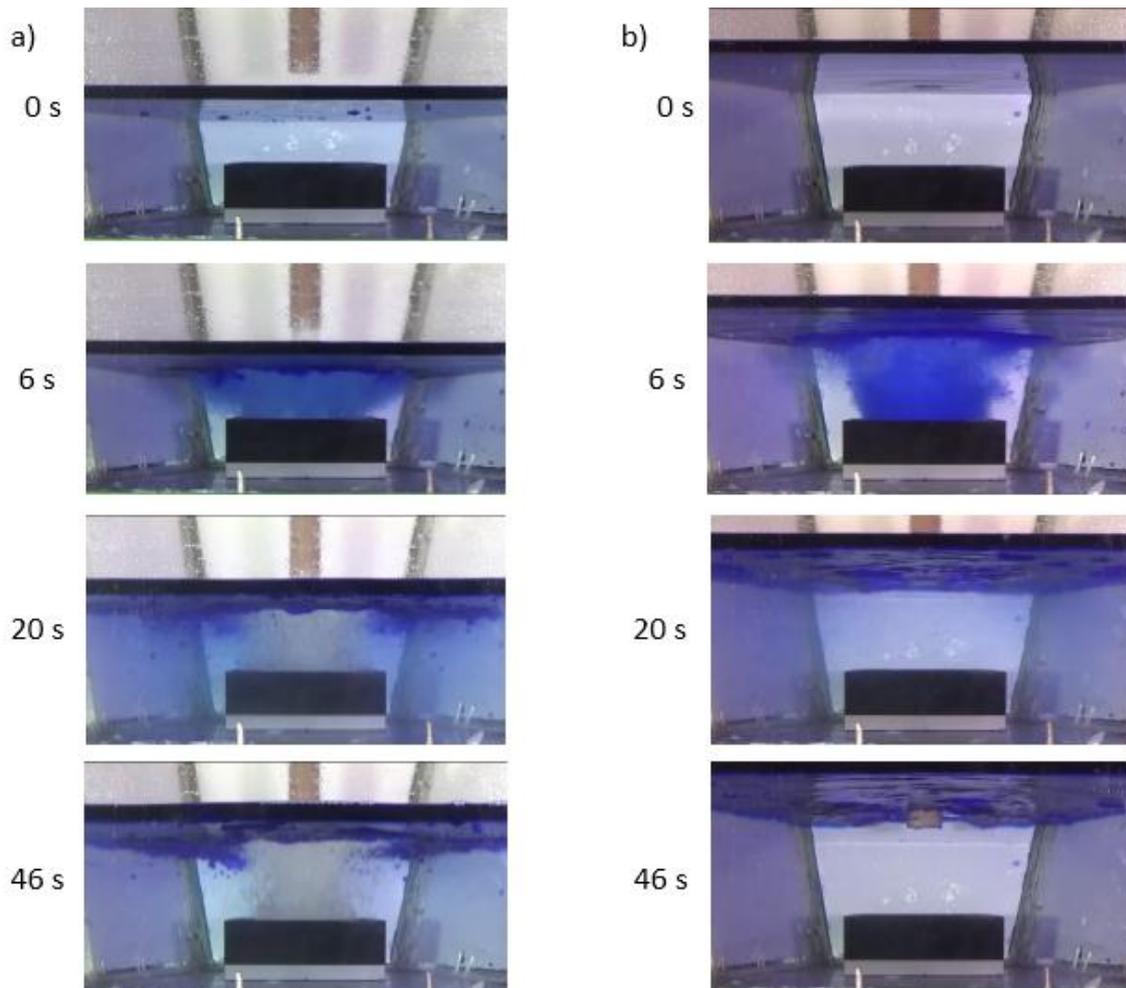


Figura 28 - Resultados dos testes no modelo físico de simulação de escória: a) nível mínimo de 15t
b) nível mínimo de 22t.

6 CONCLUSÕES

Na troca de panelas no processo de lingotamento contínuo, para estudos na quantidade de descarte gerado, deve-se levar em consideração a diferença de densidade entre o aço presente no distribuidor e o aço da nova panela a ser lingotada, que é consequência do gradiente térmico existente dentro do distribuidor,

Conclui-se também que para um maior nível de *holding*, a transição entre os dois fluidos ocorre mais rápido, gerando menos descarte.

A partir da observação dos testes, percebe-se uma condição de curto circuito gerando t2%, tempo mínimo de residência, com valores baixos no veio 3.

Os testes com aquisição do fluido novo em maior temperatura geram maior descarte.

Em relação a simulação da escória, a troca de panelas com o nível mínimo maior favorece uma menor emulsão da escória, resultando em uma menor arraste da escória para o aço.

REFERÊNCIAS

ALIZADEH, M.; EDRIS, H Hossein e PISHEVAR, A. R.: ISIJ International, 2008, Vol.48 (1), 28-37.

AMORIM, L. L. C. Estudo de mistura de aços em distribuidor e nos veios aplicando simulação numérica, modelagem física e validação em planta industrial. 2018. 104 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018

ANDRADE, S.O.C.; RIBEIRO, H.L.O.; SANTOS, A.A. “Efeito da flutuação de barragens no distribuidor sobre a flutuação de inclusões” Seminário sobre Aciaria, Refratário, Fornos Elétricos, Ferro-ligas e Fundição da ABM, p 11-20, Porto Alegre – RS, Setembro de 1993.

ARAÚJO, L.A. **Manual de Siderurgia**. 2ª edição, São Paulo: Arte & Ciência, 1997. 470p.

BÖLLING, R.; ODENTHAL, H.-J.; PFEIFER, H. Transient Fluid Flow in a Continuous Casting Tundish during Ladle Change and Steady-state Casting. **Steel Research International**, v. 76, n. 1, p. 71-80, 2005.

CARDOSO FILHO, A. C. P.; POLICARPO, F. F.; SANTOS, H. S. O.; TAVARES, R. P. Avaliação do comprimento da placa de mistura no lingotamento contínuo através de modelagens física e matemática. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.5 , n.1 , p.17-21, jul.-set. 2008.

CHATTOPADHYAY, I. MIHAIELA AND R. I. L GUTHRIE: ISIJ International, Vol. 52 - 2012, No. 11, 2026–2035

CRAVO, V. O. 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, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

ELIAS, R. C. A. Modelamento Físico e Matemático da Formação de Placa de Mistura no Lingotamento Contínuo-Efeitos de Modificadores de Fluxo no Molde. 2010. 105 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Programa Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GRYC, K.; MICHALEK, K.; HUDZIECZEK, Z.; TKADLECKOVÁ, M. Physical Modelling of Flow Pattern in 5-Strand Asymmetrical Tundish with Baffles. *Metal* 2010 – Rožnov pod Radhostem, p. 42-46, 2010.

HUANG, X; THOMAS, B. G. Intermixing Model of Continuous Casting during a Grade Transition. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v.27, p.617-618, 1996.

LAIT, J.E.; BRIMACOMBE, J.K. Solidification during continuous casting of steel. In: BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; LAIT, J.E. Continuous Casting. Heat Flow, Solidification and Crack Formation. **Iron and Steel Society**, 1984. v.2, p. 171-183.

LOWRY, M L.; SAHAI, Y. Thermal effect on the flow of liquid steel in continuous casting tundishes. **ISS Transactions**, v.14, p.17-22, 1993.

MURALIKRISHNA, A; BAGUI, S. e MAZUMDAR, D.: *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2013, Vol.66 (3), 281-295

SAHAI, Y.; EMI, T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. **ISIJ International** - , v. 36, n. 6, p. 667-672, 1996.

SAMARASEKERA, I.V.; BRIMACOMBE, J.K. The continuous-casting mould. In: BRIMACOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V.; LAIT, J.E. Continuous Casting. Heat Flow, Solidification and Crack Formation. **Iron and Steel Society**, 1984. v.2, p. 33-44.

SESHADRI, V.; SILVA, C. A.; SILVA, I. A. Physical modeling simulations of refining processes in Brazilian Steel Industry. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v.34, n.6, p.340-352, 2005.

SILVA, C. A.; SILVA, I. A.; SESHADRI, V.; MAGALHÃES, H. L. G.; GOMES, E. S.; SANTOS, P. C.; BOTELHO, H. S.; CARVALHO, J. L. R. Estudos de Otimização do Distribuidor de Lingotamento Contínuo da Acesita, via Modelagem Física. XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, 2003, Belo Horizonte, 19-21 de Maio. SP:ABM, 2003.

SZEKELY, J.; THEMELIS, N. J. Rate phenomena in process metallurgy. New York: John Wiley and Sons Inc, 1971. 784p.

THOMAS, B. G. Continuous Casting, The Encyclopedia of Materials: Science and Technology, K.H. J. Buschow, R. Cahn, M. Flemings, B. Ilchner, E. J. Kramer, S. Mahajan, Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, v. 2, 2001, p. 1595-1599;

THOMAS, B. G.; HUANG, X. Intermix model of continuous casting during a grade transition. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 27, n.4, p. 617-632, 1996.

WOLLMANN, A. M. Estudos de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo. 1999. 94 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, 1999.

YEH, J. L.; HWANG, W. S.; CHOU, C.L.. "The development of a mathematical Model to Predict Composition Distribution in Casting Slab and Intermix Slab Length During Ladle-Changeover Period and Its Verification By Physical Model". **ISIJ International**, V.33, p.588-594, February 25, 1993.

YU, Q.; DICKINSON, D; SKAGEN, R. Determination of transition slab weight for grade change during continuous casting. **Aistech-Conference Proceedings** - Association for Iron & Steel Technology, v.2, p.169-180, 2005.