



**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**

***“FLUXO ASSIMÉTRICO EM UM DISTRIBUIDOR DE DOIS VEIOS E  
SEU EFEITO SOBRE A QUALIDADE DO AÇO”***

**João Vítor Gomes Guimarães Ananias**

**Ouro Preto, julho de 2019**

**João Vítor Gomes Guimarães Ananias**

**“Fluxo assimétrico em um distribuidor de dois veios e seu efeito sobre a qualidade do aço”**

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

**Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva**

**Ouro Preto, julho de 2019.**

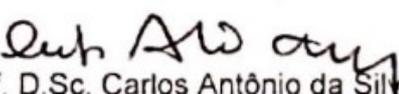


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

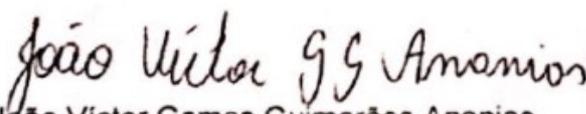
Aos 17 dias do mês de julho de 2019, às 10h00min, no Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica da Escola de Minas, Campus Universitário Morro do Cruzeiro - UFOP, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **João Víctor Gomes Guimarães Ananias** sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Carlos Antônio da Silva (Orientador), Johne Jesus Mol Peixoto e Weslei Viana Gabriel. O aluno apresentou a monografia intitulada "**Fluxo Assimétrico em um Distribuidor de Dois Veios e seu Efeito sobre a Qualidade do Aço**". A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno 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 pelo aluno.

Ouro Preto, 17 de julho de 2019.

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

  
Prof. D.Sc. Johne Jesus Mol Peixoto  
DEMET - EM - UFOP

  
M.Sc. Weslei Viana Gabriel  
DEMET - EM - UFOP

  
João Víctor Gomes Guimarães Ananias  
Aluno

## RESUMO

O fluxo de aço em um distribuidor de lingotamento contínuo é um dos fatores que ajuda a determinar a qualidade final do aço. O presente trabalho aborda o caso de fluxo assimétrico em um distribuidor de dois veios provocado pelo posicionamento descentralizado da válvula longa, avaliando o efeito de diferentes configurações de barreiras e diques na assimetria, além da influência nos campos de velocidades. Foram realizados testes em modelo físico de acrílico, utilizando água para simular o aço e KCl como traçador para obtenção das curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR). Simulação computacional e a técnica PIV também foram utilizadas para análise do fluxo. Foi possível verificar que a utilização de barragens e diques melhoraram as condições para a flotação de inclusão, devido ao aumento do tempo mínimo de residência do aço, além da diminuição de zonas mortas e da quantidade de descarte gerada durante a troca de painéis. A utilização de barragens e diques em conjunto foi eficiente para uma melhor distribuição do fluxo na superfície livre do distribuidor, o que também favorece a limpidez do aço.

**Palavras chave:** Distribuidor; fluxo assimétrico; simulação matemática; PIV.

## **ABSTRACT**

The liquid flow pattern inside a continuous casting tundish is a key factor as far as the final steel quality is concerned. This work deals with the asymmetric fluid flow in a two strand tundish due to the ladle shroud decentralized position. The effects of different weir and dam positions on the flow asymmetry and on the fluid velocity field are assessed. Trials were performed in an acrylic model, using water to simulate liquid steel and KCl as a tracer in order to yield the RTD curves. Furthermore, the fluid flow was analyzed by mathematical simulation as well as PIV technique. It was possible to verify that weirs and dams are able to significantly decrease the asymmetry and to improve the inclusion flotation, due to the increase of the minimum residence time as well as the decrease of dead zones and amount of ladle change intermixed steel. Also, weirs and dams combined seem to improve the fluid flow distribution on the free surface, favoring the steel cleanness.

**Keywords:** Tundish; asymmetric flow; mathematical simulation; PIV.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivos Gerais .....	3
2.2 Objetivos Específicos .....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Lingotamento Contínuo.....	4
3.2 Função do distribuidor no processo de lingotamento contínuo.....	6
3.3 Modificadores de Fluxo no Distribuidor .....	8
3.4 Fluxo assimétrico no distribuidor.....	17
4 METODOLOGIA.....	22
4.1 Modelo Físico.....	23
4.2 PIV (Velocimetria por Imagens de Partículas).....	25
4.3 Modelo Matemático.....	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
6 CONCLUSÃO.....	36
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Ilustração dos produtos semiacabados que podem ser produzidos no processo de lingotamento contínuo. ....	4
Figura 3.2: Equipamentos utilizados no processo de lingotamento contínuo. ....	6
Figura 3.3: Fluxos em um distribuidor com barreiras. ....	7
Figura 3.4: Representação esquemática das principais geometrias utilizadas nos distribuidores. ....	8
Figura 3.5: Esquema de mobiliários utilizadas no processo de lingotamento contínuo. ....	9
Figura 3.6: Teste em distribuidor com presença de barragens. ....	10
Figura 3.7: Teste em distribuidor sem presença de barragens. ....	10
Figura 3.8: Comparação entre o tempo de residência devido à presença de barreiras. ....	11
Figura 3.9: Modificações no distribuidor propostas por Barbosa et al.(2005). ....	12
Figura 3.10: Linhas de fluxo para um distribuidor sem modificadores de fluxo. ....	14
Figura 3.11: Linhas de fluxo em distribuidor com presença de barragem e dique. ....	14
Figura 3.12: Configurações utilizadas por Harnsihacacha et al. (2018): a) Distribuidor sem mobilia; b) Barragem tradicional; c) Barragem de oito furos e d) <i>Turbostop</i> . ....	15
Figura 3.13: Dispersão de traçador no distribuidor após 3 segundos de injeção. ....	15
Figura 3.14: Distribuidor de dois veios com anel e barreira porosos para passagem de gás. ....	16
Figura 3.15: Influência da passagem de gás em um distribuidor de dois veios para quatro configurações: a) inibidor sem passagem de gás, b) passagem de gás através de um anel poroso no veio, c) anel poroso mais barragem porosa e d) barragem porosa. ....	17

Figura 3.16: Posicionamento da válvula longa.....	18
Figura 3.17: Efeito do posicionamento da válvula longa no fluxo do material para (a) posicionamento vertical e (b) inclinada em 3° para a direita. ....	19
Figura 3.18: Posicionamento descentralizado da válvula longa em um distribuidor de cinco veios.....	20
Figura 3.19: Barragens fendadas com furos posicionados de maneira diferente. ....	21
Figura 4.1: Posicionamento das mobílias no distribuidor. ....	23
Figura 4.2: Representação esquemática da montagem para realização de medições utilizando PIV e as regiões analisadas.....	25
Figura 4.3: Malha utilizada na simulação matemática. ....	26
Figura 5.1: Valores médios de: (a) tempos médios de residência, $\tau$ ; (b) tempos mínimos de residência, $t_{mínimo}$ ; (c) fração de volume morto, FVM e (d) descarte em função da configuração de mobiliários do distribuidor.....	30
Figura 5.2: Comparação do perfil de velocidades no plano AA' da simulação matemática (superior) e do PIV (inferior) para configuração: (a) sem barreiras (SB), (b) com barreira e dique (BD2). ....	31
Figura 5.3: Comparação entre o modelo matemático e o PIV para as regiões BB' e CC' na configuração SB. ....	32
Figura 5.4: Comparação entre resultados do modelo matemático e de PIV para as regiões BB' e CC' na configuração BD2.....	32
Figura 5.5: Perfil de velocidades na superfície livre do distribuidor para configuração: (a) sem barreiras (SB); (b) com barreira e dique (BD2). ....	33

Figura 5.6: Fluxo ao longo do distribuidor para as configurações: (a) sem barreiras (SB); (b) com barreira e dique (BD2).. ..... 33

Figura 5.7: Comparação entre as curvas DTR dos modelos físico e matemático. .... 34

Figura 5.8: Comparação entre resultados do modelo físico e matemático para a configuração BD2..... 35

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1: Resultados experimentais para diferentes configurações do distribuidor. ....	13
Tabela 4.1: Posicionamento das barreiras. ....	23

# 1 INTRODUÇÃO

O fluxo de aço no interior do distribuidor é um dos fatores que ajuda a definir a qualidade final do aço, uma vez que o mesmo é o último equipamento utilizado antes da solidificação do produto (MACHADO, 2014). No distribuidor é possível caracterizar três tipos diferentes de regiões de fluxo: zona de mistura perfeita, onde gradientes de composição e térmicos tendem a serem dissipados devido à forte turbulência; zona de fluxo pistonado, em que o aço se move com velocidade constante sem haver mistura; e zona de volume morto, região na qual o aço permanece por um longo período, diminuindo o volume útil do distribuidor (RIZZO, 2006). Barragem, dique e inibidor de turbulência são os principais mobiliários utilizados para otimização do escoamento no distribuidor. Esses acessórios buscam aumentar o tempo mínimo de residência do aço líquido no distribuidor, o que implica em aumento da zona de fluxo pistonado (ALVES, 2014). Cloete et al. (2015), Barbosa et al. (2005) e Harnsihacacha et al. (2018) obtiveram resultados que mostram a eficiência dos mobiliários no aumento do tempo mínimo de residência do aço no distribuidor.

Um fator muito importante e que impacta diretamente na qualidade do aço produzido é a simetria do fluxo. Chattopadhyay et al. (2011) analisaram a influência do posicionamento da válvula longa e o seu efeito no fluxo de aço em um distribuidor de quatro veios realizando simulação física e matemática. O resultado obtido mostrou que ao se inclinar a válvula longa em 5° em relação à vertical obteve-se um fluxo assimétrico, o que resultou em redução do tempo de residência do aço em um dos lados do distribuidor, e aumento do número de inclusões que passam pelos veios. Outro fator que interfere na simetria do fluxo são os mobiliários. Zhong et al. (2007) realizaram simulação física e matemática em um distribuidor de quatro veios em formato “T”, adicionando-se duas barragens fendadas com furos inclinados posicionados diferentemente. Essa diferença no posicionamento dos furos resultou numa assimetria de fluxo nos veios, impactando na qualidade do produto lingotado. Cui et al. (2015) mostraram que a vazão nos veios pode ser um parâmetro importante para a simetria do fluxo. Foram realizadas simulações físicas e matemáticas em um distribuidor de dois veios operando com vazões diferentes. Quanto maior a diferença de vazão entre os veios, maior foi

a assimetria provocada no fluxo, havendo diferença significativa quanto à fração de zona morta e ao tempo de residência.

O presente trabalho consiste em um estudo do fluxo assimétrico em um distribuidor de dois veios provocado pelo posicionamento descentralizado do conjunto válvula longa/inibidor de turbulência, avaliando o efeito de diferentes configurações de barreiras e diques na assimetria de fluxo, assim como a influência sobre o campo de velocidades.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Analisar o fluxo em um distribuidor de dois veios, com posicionamento assimétrico da válvula longa e inibidor de turbulência, verificando como a inserção de diferentes configurações de barreiras irão impactar no processo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a assimetria de fluxo para cada configuração de barreira;
- Encontrar o tempo de residência, tempo mínimo de residência, fração de volume morto e descarte para cada configuração de barreira;
- Validar o modelo matemático em relação ao modelo físico através da técnica PIV.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo do aço surgiu como maneira de se aumentar a produtividade de aciarias, com o objetivo de tornar a fabricação de aço mais dinâmica e rápida, se comparada ao então denominado lingotamento convencional (em batelada).

Segundo Alves (2014), o processo de lingotamento contínuo é considerado, essencialmente, um processo de transferência de calor, em que o aço líquido é solidificado em produto sólido semiacabado, como tarugos, blocos, placas e *beam blanks* (pré-forma). A Figura 3.1 ilustra a geometria de cada um desses produtos.

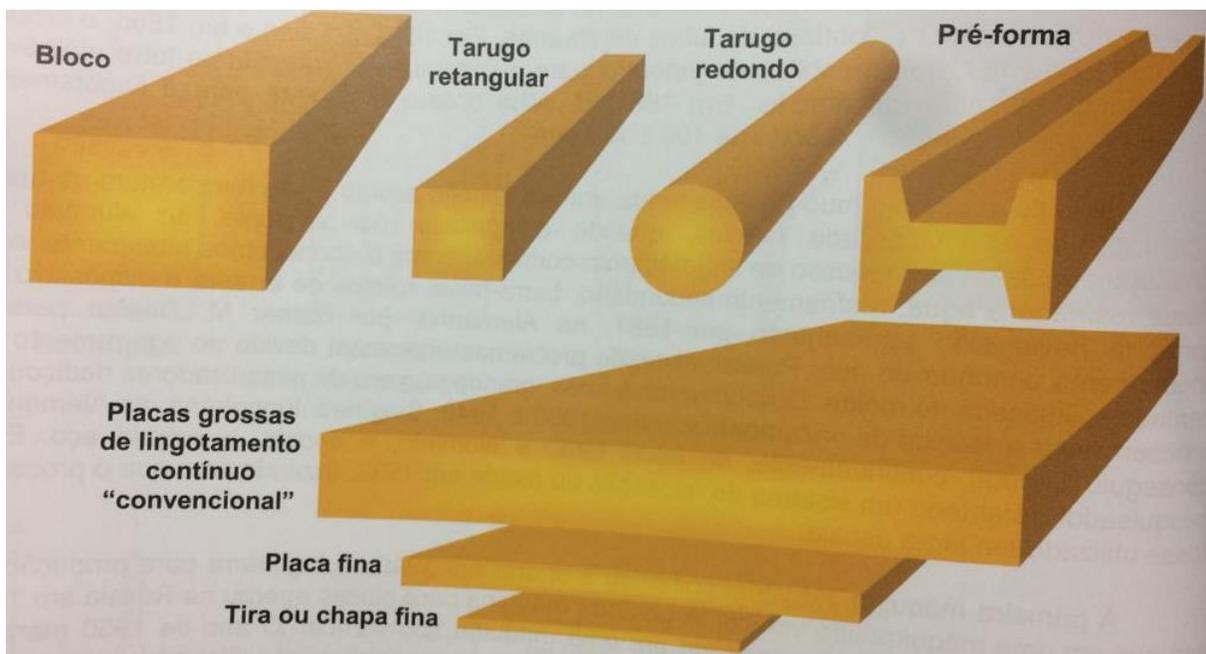


Figura 3.1: Ilustração dos produtos semiacabados que podem ser produzidos no processo de lingotamento contínuo (RIZZO, 2006).

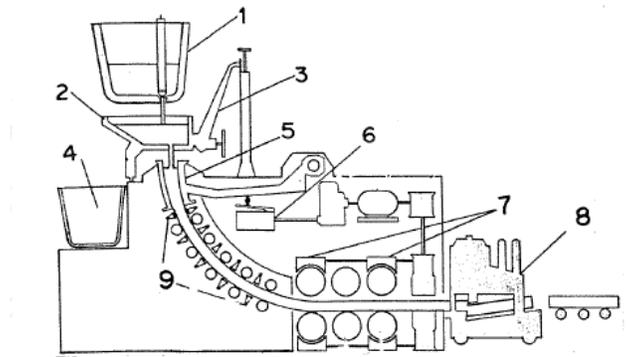
O lingotamento contínuo tem início após os processos de refino secundário do aço. Ao fim do refino, a panela de aço líquido será transportada e acoplada em uma torre giratória. Da panela, o aço será transferido ao distribuidor através de uma peça refratária denominada válvula longa. As principais funções do distribuidor nesse processo são: servir como um reservatório, possibilitando as trocas de panela, e distribuir o aço para um ou mais veios. Ao

atingir o nível de aço desejado no distribuidor, a válvula reguladora de vazão do equipamento será aberta, dando início ao enchimento do molde, através de um tubo refratário denominado válvula submersa (ALVES, 2014).

Conceição (2018) afirma que a última etapa do lingotamento contínuo é o resfriamento do aço e sua conseqüente solidificação no molde. O molde utilizado nos processos de lingotamento contínuo varia de acordo com a geometria do produto semiacabado. Ele é feito de cobre na maioria dos casos e é resfriado com água para maximizar a extração de calor entre o aço líquido e o molde. Devido a essa extração, forma-se uma “pele” nas paredes do molde, que contém no seu interior o aço líquido que ainda será solidificado. É necessário que a “pele” formada resista às oscilações do molde, evitando que ela grude nas paredes e ocorra seu rompimento. Para auxiliar no mecanismo de oscilação, adiciona-se ao molde pó fluxante, que tem como objetivo a lubrificação entre a “pele” formada e a parede do molde, evitando possíveis agarramentos e conseqüentes rompimentos.

O processo de solidificação do aço tem continuidade nas esteiras de rolagem. Nelas, ocorre o aumento da casca sólida formada devido ao banho de *spray* d’água sobre a casca pré-existente e por radiação de calor ao meio ambiente. Esse processo é denominado resfriamento secundário. O processo de refrigeração é continuado até um determinado comprimento onde o aço já se encontre completamente solidificado, podendo então ser cortado com maçaricos ou guilhotinas nos comprimentos desejados (RIZZO, 2006).

A Figura 3.2 ilustra o processo de lingotamento contínuo.



1- Panela de aço, 2- Distribuidor, 3- Carro do distribuidor, 4- Panela de emergência, 5- Molde curvo, 6- Oscilação do molde, 7- Rolos Extratores, 8- Corte de tarugos, 9- Resfriamento secundário.

Figura 3.2: Equipamentos utilizados no processo de lingotamento contínuo (COSTA NETO, 1997).

### 3.2 Função do distribuidor no processo de lingotamento contínuo

Segundo Rizzo (2006), o distribuidor pode ser classificado como sendo um recipiente composto de uma carcaça metálica, revestido internamente por refratários para suportar temperaturas elevadas, podendo apresentar várias formas dependendo do seu projeto de instalação, sendo utilizado como reservatório de material metálico. Além disso, Alves (2014) afirma que o distribuidor possui outras funções operacionais no processo de lingotamento contínuo, como: ajudar na flotação de inclusões não metálicas do aço líquido para a escória, melhorando a limpidez do aço, além de controlar a velocidade de lingotamento (extração da placa).

Para entender melhor o processo de remoção de inclusão, é necessário entender o fluxo de aço dentro do distribuidor. Szekely e Ilegbusi (1988) e Alves (2014) afirmam que existem três tipos de zonas de fluxo diferentes (Figura 3.3):

- Zona de fluxo pistonado: é a região do distribuidor em que o aço irá se mover praticamente com a mesma velocidade, sem se misturar durante a passagem. A zona de fluxo pistonado é que determina o tempo de residência mínimo do aço no distribuidor, buscando-se sempre aumentá-lo para que as inclusões tenham mais tempo para flotar.

- Zona de mistura perfeita: é a região onde a concentração do aço tende a ser homogênea em função da forte turbulência, podendo também acarretar em coalescência de inclusões, facilitando sua remoção devido ao aumento do seu diâmetro.
- Zona de volume morto: é a região do distribuidor onde o aço permanece por mais tempo. É uma região bastante indesejada, pois acarreta a segregação de elementos químicos no aço líquido, além de aumentar a sua perda de temperatura, indicando um mau uso do volume do distribuidor.

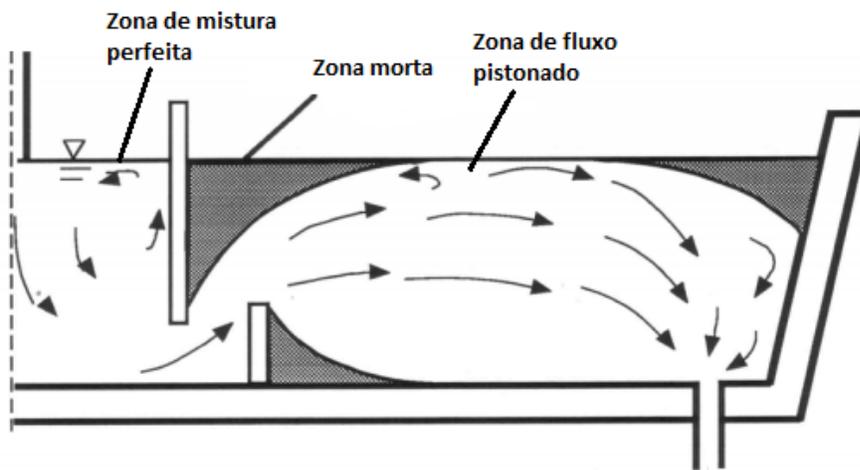


Figura 3.3: Fluxos em um distribuidor com barreiras (THOMAS, 1997).

Além das zonas de fluxo citadas acima, Wollmann (1999) afirma que existe uma outra zona de fluxo denominada por “curto circuito”. Nela, o aço entra e sai do distribuidor de forma muito rápida, fazendo com que mesmo as inclusões de grande diâmetro não sejam capazes de flotar nesse curto intervalo de tempo, sendo uma zona que deve ser evitada, já que interfere significativamente no controle do processo de lingotamento contínuo.

Assim, com o objetivo de aumentar o controle e a eficiência da flotação de inclusão nos distribuidores, diversos estudos já foram realizados para, de alguma forma, aumentar a zona de fluxo pistonado e diminuir as regiões de volume morto e curto circuito. Um dos principais fatores que influenciam significativamente no fluxo de aço é a geometria do distribuidor. Segundo Costa Neto (1997), um bom projeto de distribuidores consiste em confinar a região

de mistura perfeita devido ao jato de entrada, eliminar as zonas mortas, eliminar curtos circuitos e maximizar o tempo de residência do aço no distribuidor, além de eliminar a turbulência junto à superfície do metal e garantir a manutenção da homogeneidade térmica. Os tipos de geometria mais utilizadas em um distribuidor são ilustradas na Figura 3.4.

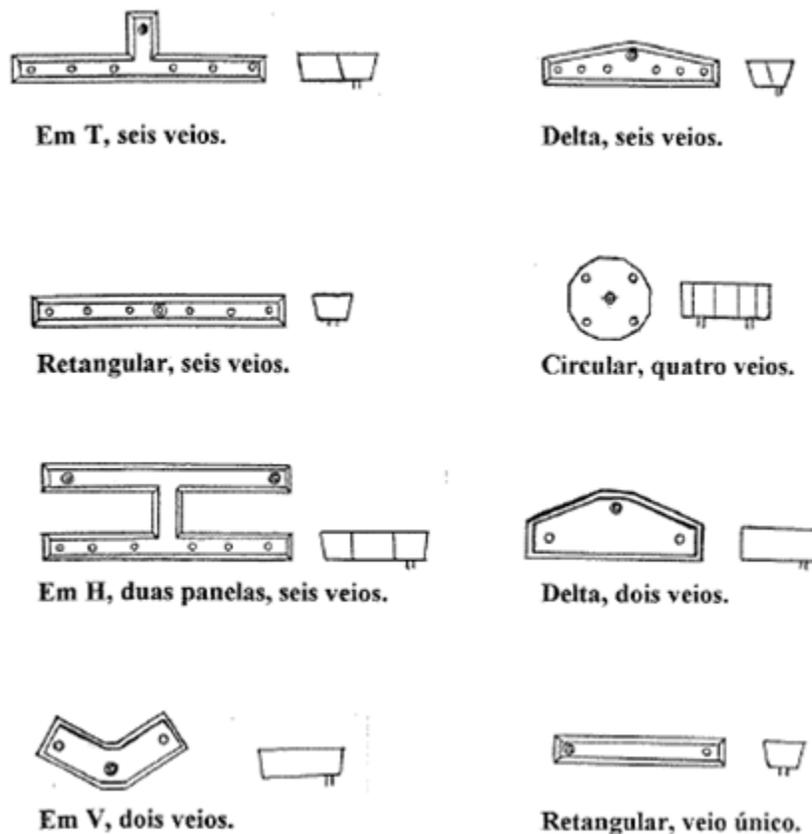


Figura 3.4: Representação esquemática das principais geometrias utilizadas nos distribuidores (SZEKELY e ILEGBUSI, 1988 apud COSTA NETO, 1997).

### 3.3 Modificadores de Fluxo no Distribuidor

Além da geometria, a utilização de mobiliários no distribuidor é de extrema importância para aumentar o tempo de residência do aço, assim como diminuir regiões de zona morta, curto circuito e controlar assimetrias no distribuidor devido à presença de mais de dois veios.

Segundo Alves (2014), diques e barragens foram os primeiros modificadores de fluxo utilizados nos distribuidores. O dique tem a característica de poder reter a camada de escória

proveniente da panela, além de ajudar a conter a turbulência próxima à região de entrada, porém não é capaz de eliminar o curto circuito. Já as barragens podem eliminar o curto circuito, direcionando o fluxo de aço para a superfície, contribuindo para que as inclusões sejam capturadas, além de reduzir drasticamente a energia cinética de turbulência do jato de aço dentro da região de entrada, tornando o escoamento do aço líquido mais uniforme.

Outra mobília bastante comum e utilizada no processo de lingotamento contínuo é o inibidor de turbulência. De acordo com Rizzo (2006), os inibidores de turbulência são instalados na região de impacto do aço líquido no interior dos distribuidores. Eles são projetados para reorientar o escoamento do fluido em direção à superfície livre do distribuidor visando a redução de turbulência nessa superfície, proporcionando o aumento do tempo de residência do aço, a redução da taxa de projeção, a redução da zona de volume morto e o decréscimo do desgaste do material refratário do distribuidor.

A Figura 3.5 ilustra os mobiliários citados acima e suas respectivas posições no distribuidor.

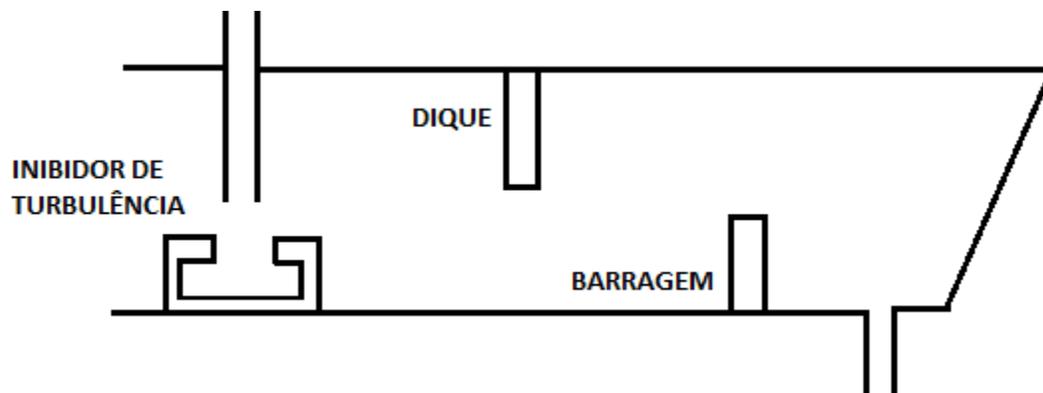


Figura 3.5: Esquema de mobiliários utilizadas no processo de lingotamento contínuo.

Além de diques e barragens, utiliza-se tampões para se ter controle da vazão de aço nos moldes. Mesmo não contribuindo para o controle das zonas de fluxo, os tampões possuem o papel de evitar a formação de vórtices próximos aos veios do distribuidor. Esse fenômeno pode ocorrer entre as trocas de panela, quando se tem baixos níveis de aço, ocasionando a passagem de escória para o molde, algo extremamente indesejável, já que irá aumentar o número de inclusões, assim como poderia prejudicar a composição química final do aço (KRUGER, 2010).

Darsie et al. (2014) realizaram filmagens em um modelo de acrílico 1:1 utilizando água para simular aço e permanganato de potássio como traçador para visualizar o fluxo. Resultados qualitativos foram obtidos realizando testes com e sem mobiliários. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram, respectivamente, os resultados.

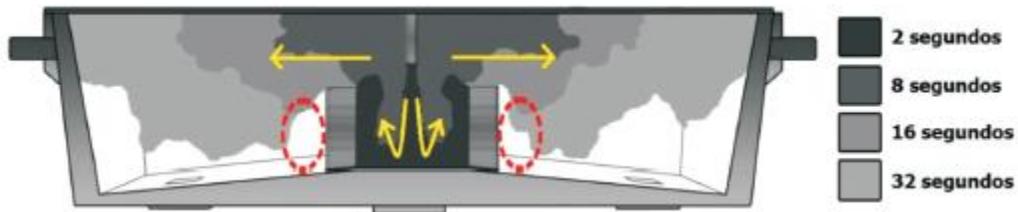


Figura 3.6: Teste em distribuidor com presença de barragens (DARSIE et al. 2014).

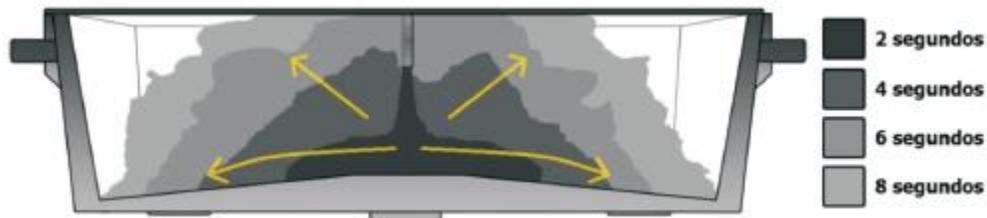


Figura 3.7: Teste em distribuidor sem presença de barragens (DARSIE et al. 2014).

Os resultados indicam que com a presença das barragens o tempo de residência foi muito maior se comparado com o teste sem barragens. Isso ocorre pois as barragens foram capazes de eliminar a zona de fluxo de curto circuito, evitando que a água chegasse rapidamente aos veios, proporcionando um tempo maior para a flotação de inclusões ocorrer.

Wollmann (1999) também utilizou a metodologia de se injetar permanganato de potássio como traçador para acompanhar as linhas de fluxo em um distribuidor na forma de T, composto por três veios. Os resultados obtidos por ele para uma das configurações adotadas são mostrados na Figura 3.8.

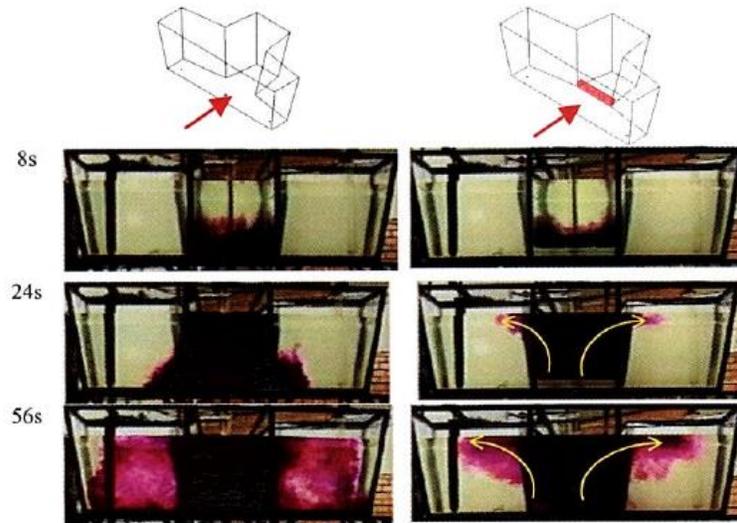


Figura 3.8: Comparação entre o tempo de residência devido à presença de barreiras (WOLLMANN, 1999).

É possível perceber que as barreiras foram muito eficazes em relação à modificação do tempo mínimo de residência, garantindo um fluxo que passa pela superfície, algo bastante interessante para a remoção de inclusões. Em contrapartida, percebe-se que a presença da barreira acarretou o aumento do volume morto no distribuidor, algo indesejável, já que diminui seu volume útil, prejudicando a eficiência do processo. Além disso, com a utilização de barreiras, Wollmann (1999) conseguiu diminuir a heterogeneidade do fluxo no distribuidor, fazendo com que a chegada do aço no veio central não seja tão diferente dos veios laterais, garantindo uma homogeneidade ao aço fabricado.

Com o objetivo de estudar a influência da alteração do fundo do distribuidor, assim como a utilização de inibidor de turbulência, diques e barragens no perfil de escoamento do aço, Barbosa et al. (2005) realizaram simulação física e matemática, utilizando as curvas de distribuição de tempo de residência (DTR) e simulação matemática com o *software* ANSYS CFD. Todas as configurações que foram utilizadas são mostradas na Figura 3.9.

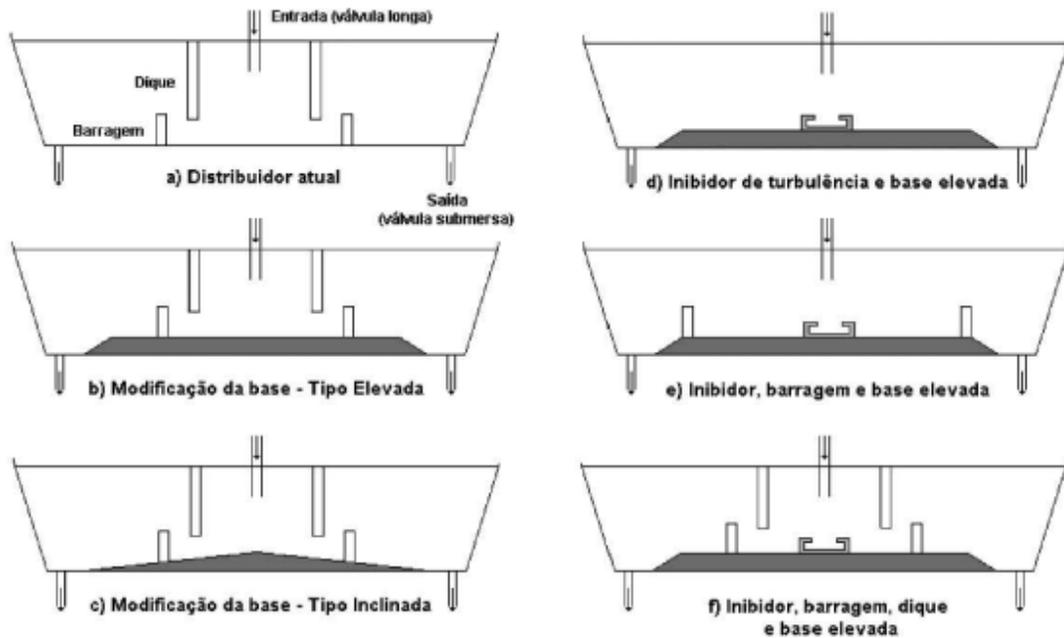


Figura 3.9: Modificações no distribuidor propostas por Barbosa et al.(2005).

Os resultados obtidos por Barbosa et al. (2005) mostraram que a modificação no fundo do distribuidor sem a utilização de inibidores de turbulência provocou uma redução do tempo mínimo de residência, além de provocar o aumento de zonas mortas, podendo comprometer a qualidade final do produto lingotado. Porém, a utilização conjunta de diques, barragens e inibidor de turbulência, além da modificação do fundo, proporcionou um aumento de 25% no tempo de residência médio, redução de 75% de zonas mortas e aumento de 50% e 12% das frações de fluxo pistonado e mistura perfeita, respectivamente.

Cloete et al. (2015), através de simulação física e matemática, estudaram um distribuidor de 4 veios, comparando os resultados sem a presença de mobiliários, com inibidor de turbulência (com e sem furos) e com inibidor de turbulência mais barragens.

Os resultados encontrados mostram que o distribuidor sem a presença de qualquer móvel não foi capaz de promover boas propriedades de fluxo, devido à presença de fluxo curto circuito e ao baixíssimo tempo de residência. Ambas as configurações, com inibidores de turbulência e barragens, foram capazes de diminuir o curto circuito, diminuir o volume morto, aumentar o fluxo pistão e o tempo de residência médio. A utilização de furos no inibidor de turbulência não mostrou melhorias em relação ao tempo de residência se

comparado ao inibidor sem a presença de furos devido a um fluxo de curto circuito, fazendo com que as inclusões chegassem mais rapidamente ao molde. Os resultados encontrados são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resultados experimentais para diferentes configurações do distribuidor (adaptado CLOETE et al. 2005).

Configuração	Tempo de Residência (min)	Volume Pistonado (%)	Volume Morto (%)	Mistura Perfeita (%)
Sem Mobiliários	0,0101	0,039	0,370	0,591
Inibidor de Turbulência com furos + barragens	0,043	0,163	0,299	0,538
Inibidor de Turbulência sem furos	0,089	0,162	0,306	0,532

Seguindo a mesma linha de raciocínio, Alves (2014) realizou simulação matemática em distribuidores sem presença de modificadores de fluxo e com a presença de diques e barragens. Os resultados obtidos por ele mostraram que, com os mobiliários, houve um aumento de 5,4% na zona de mistura perfeita, redução de 48% no volume morto, aumento de 20% no volume pistonado, aumento de 12% no tempo médio de residência e aumento de 20% no tempo mínimo de residência. A fim de analisar as razões para esses resultados, Alves (2014) realizou modelagem matemática com o intuito de analisar as linhas de fluxo nas diferentes configurações propostas. Os resultados são mostrados nas Figuras 3.10 e 3.11.

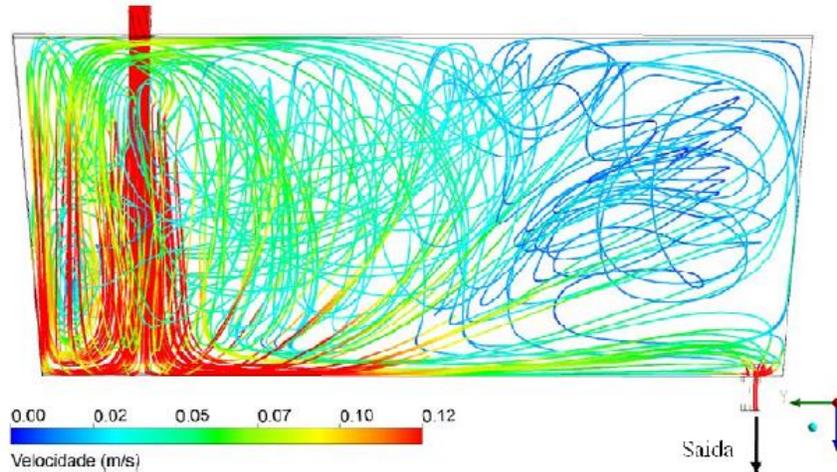


Figura 3.10: Linhas de fluxo para um distribuidor sem modificadores de fluxo (ALVES, 2014).

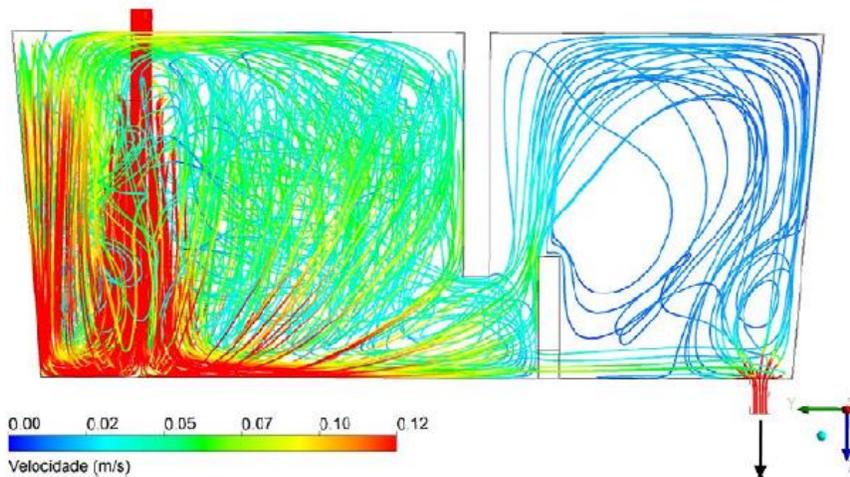


Figura 3.11: Linhas de fluxo em distribuidor com presença de barragem e dique (ALVES, 2014).

É possível verificar que a presença de barragens e diques foi capaz de anular o curto circuito do sistema, aumentando a qualidade do processo. Além disso, percebe-se que a utilização desses modificadores de fluxo força, em grande parte, o fluido a ir para o topo do banho, ajudando no processo de remoção de inclusão.

Harnsihacacha et al. (2018) analisaram o fluxo no distribuidor sem a presença de mobiliários, com a presença de barragem tradicional, uma barragem com oito furos e um inibidor de

turbulência com as dimensões internas de 13x13x3 cm. As configurações são mostradas na Figura 3.12.

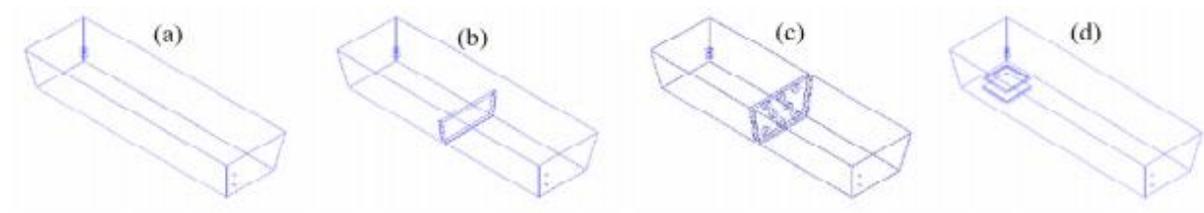


Figura 3.12: Configurações utilizadas por Harnsihacacha et al. (2018): a) Distribuidor sem mobilia; b) Barragem tradicional; c) Barragem de oito furos e d) *Turbostop*.

Para realizar os experimentos, Harnsihacacha et al. (2018) utilizaram tinta como traçador para verificar o fluxo que ocorre dentro do distribuidor. Os resultados são mostrados na Figura 3.13.



Figura 3.13: Dispersão de traçador no distribuidor após 3 segundos de injeção (HARNSIHACACHA et al. 2018).

Percebe-se que, com a utilização dos modificadores de fluxo, especialmente o *turbostop*, houve uma modificação muito grande no fluxo, aumentando o tempo de residência do fluido no distribuidor, assim como a possibilidade de flotação de inclusão.

Harnsihacacha et al. (2018) afirmam que a utilização dos mobiliários promoveu um aumento maior do que 20% no tempo de residência mínimo, sendo a utilização do *turbostop* a melhor configuração dentre as quatro utilizadas.

Outro método muito utilizado para modificar o fluxo dentro do distribuidor é através da injeção de gases inertes. Utilizando-se um plug poroso, gases inertes funcionam como uma espécie de filtro, impedindo a passagem de inclusões para os veios, melhorando significativamente a limpidez do aço.

Utilizando-se dessa metodologia, Seshadri et al. (2018) realizaram testes físicos em um distribuidor de escala 1:3 de dois veios, injetando-se gás em um deles. Para simular as inclusões, foram utilizadas partículas de plástico entre 50-100  $\mu\text{m}$  e 100-200  $\mu\text{m}$ , utilizando peneiras para coletar as partículas que passaram pelos veios e as partículas retidas no distribuidor. Os resultados obtidos mostram que a cortina de gás agiu como um filtro, provocando um fluxo direcionado para a superfície do banho, favorecendo a flotação de inclusão. Além do mais, notou-se que plugs porosos com poros maiores e partículas de maiores tamanhos resultam em melhor flotação de inclusão.

Silva et al. (2018) também realizaram estudos com injeção de gás em um distribuidor de dois veios. Foram realizadas simulações físicas e matemáticas a respeito da influência da cortina de gás, utilizando-se anel poroso e barragem porosa, como mostra a Figura 3.14.

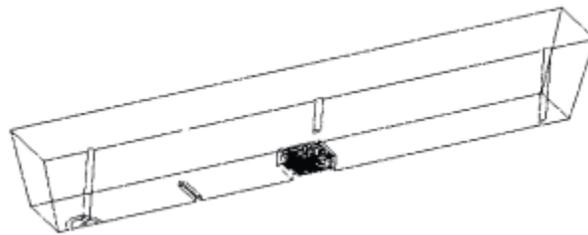


Figura 3.14: Distribuidor de dois veios com anel e barreira porosos para passagem de gás (SILVA et al. 2018).

Para realização dos experimentos, três tipos de configurações foram testados: anel poroso, barragem porosa e anel poroso mais barragem porosa. Nos resultados obtidos, a pior configuração se deu com a utilização da barragem porosa, coletando-se 20,79% das partículas que foram injetadas no distribuidor. A melhor configuração foi obtida utilizando a barragem

porosa e o anel poroso, recolhendo-se apenas 2,52% das partículas injetadas. A configuração com apenas o anel poroso resultou em 9,39% de partículas recolhidas.

Silva (2018) realizou simulação matemática para quatro configurações diferentes: a) inibidor sem passagem de gás, b) passagem de gás através de um anel poroso no veio, c) anel poroso mais barragem porosa e d) barragem porosa, vide Figura 3.15.

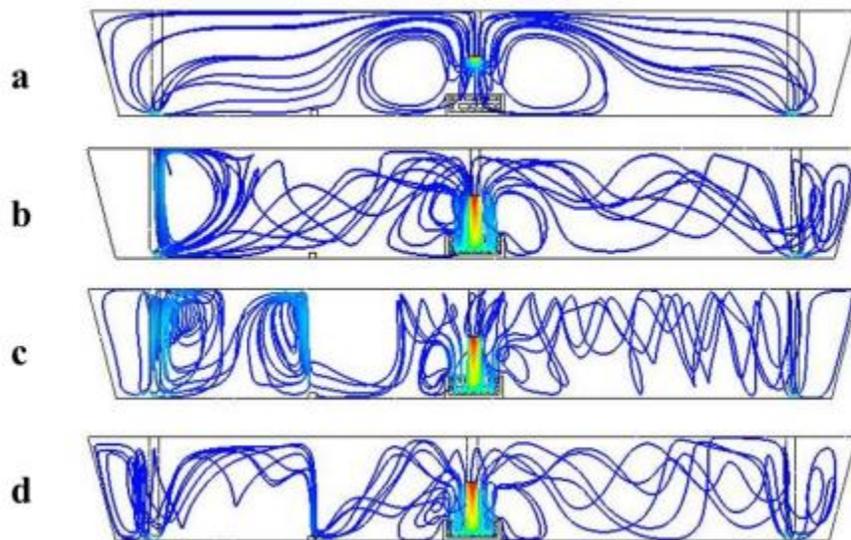


Figura 3.15: Influência da passagem de gás em um distribuidor de dois veios para quatro configurações: a) inibidor sem passagem de gás, b) passagem de gás através de um anel poroso no veio, c) anel poroso mais barragem porosa e d) barragem porosa (SILVA, 2018).

É possível verificar que para a configuração a), o fluido tende a ir diretamente para os veios, desfavorecendo a flotação de inclusão. Porém, para a configuração c), percebe-se que a injeção de gás pelo anel, assim como pela barragem, funciona como uma barreira, direcionando o fluxo para cima, favorecendo as condições para que a flotação de inclusão ocorra.

### 3.4 Fluxo assimétrico no distribuidor

A assimetria do fluxo no distribuidor pode ser prejudicial para a qualidade final do aço, já que o comportamento em cada veio será diferente, podendo haver um número maior de inclusões que passam em um veio em relação ao outro. Fatores como posicionamento da

válvula longa, vazão diferente entre os veios e posicionamento das barreiras podem causar essa assimetria no fluxo.

Chattopadhyay et al. (2011) realizaram simulação física em um distribuidor de 12 toneladas, usando água para simular aço e partículas de polietileno para simular inclusões, analisando a influência do posicionamento da válvula longa na assimetria do fluxo dentro do distribuidor. Foram realizados testes com a válvula longa perfeitamente alinhada e testes com ela inclinada em 5°, como mostra a Figura 3.16.

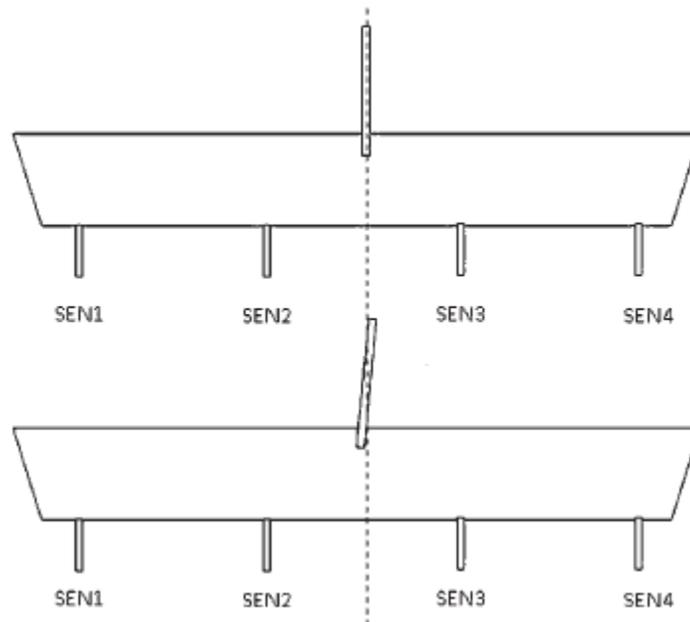


Figura 3.16: Posicionamento da válvula longa (CHATTOPADADHYAY et al. 2011).

Além do posicionamento da válvula longa, foi verificada a influência do inibidor de turbulência e de barragens na flotação de inclusão. Os resultados obtidos mostram que, ao inclinar a válvula longa, os veios centrais não apresentam o mesmo comportamento, assim como os veios externos. Os mobiliários ajudaram a aumentar a flotação de inclusão, mas não foram eficientes para reduzir a assimetria.

Bul'ko et al. (2011) também analisaram os efeitos do posicionamento da válvula longa sobre o fluxo e as consequências metalúrgicas. Foram realizados testes com a válvula longa na vertical e testes com a mesma inclinada em 3° em relação à vertical. Utilizando permanganato

de potássio como traçador, foram realizadas filmagens no distribuidor, avaliando qualitativamente a influência dessa inclinação, vide Figura 3.17.

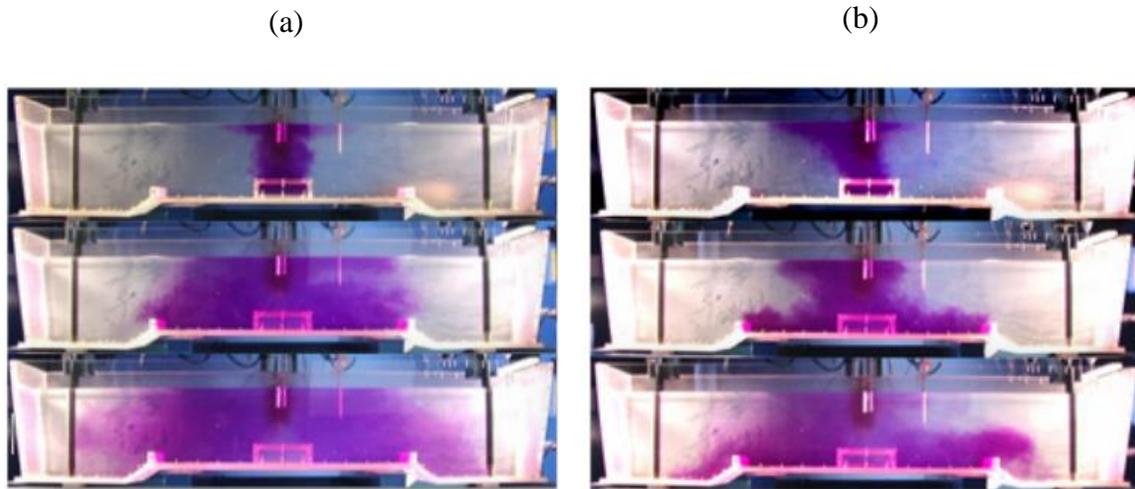


Figura 3.17: Efeito do posicionamento da válvula longa no fluxo do material para (a) posicionamento vertical e (b) inclinada em  $3^\circ$  para a direita (BUL'KO et al. 2011).

Foi possível verificar que, com a inclinação da válvula longa, o fluxo fica nitidamente assimétrico, implicando em consequências metalúrgicas ao processo. Bul'ko et al. (2011) também analisaram a influência da velocidade de lingotamento na assimetria do fluxo. Aumentando a velocidade de lingotamento de 0,8 m/min para 1,8 m/min, a assimetria aumentou consideravelmente. Concluem ainda que qualquer desvio da válvula longa em relação à vertical, mesmo utilizando-se inibidor de turbulência como mobiliário, resulta em assimetria no fluxo e redução do tempo de residência do aço em ambos os veios, sendo muito importante monitorar a posição correta da válvula longa.

Gryc et al. (2010) estudaram o fluxo assimétrico em um distribuidor, causado pelo posicionamento da válvula longa, como mostra a Figura 3.18.

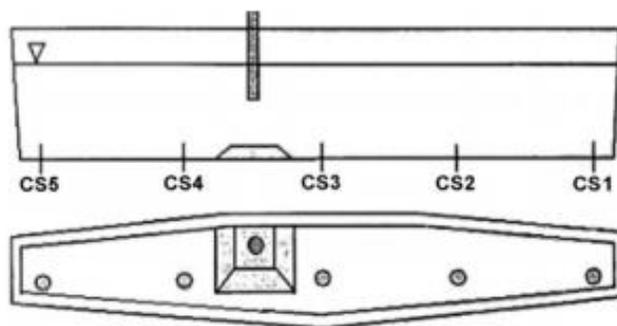


Figura 3.18: Posicionamento descentralizado da válvula longa em um distribuidor de cinco veios (GRYC et al. 2010).

Estudos foram realizados analisando o tempo mínimo de residência para cada veio, variando o reenchimento do distribuidor entre os níveis de água de: 168, 187, 206, 224 e 243 mm até o nível de trabalho de 262 mm, utilizando barragens fendadas como controladores de fluxo. Os resultados obtidos mostram que as barragens são eficientes para eliminar o fluxo de curto circuito no interior do distribuidor. O tempo mínimo de residência do aço aumenta à medida que a diferença entre o nível de trabalho e o nível de início do reenchimento diminui para os veios CS2-CS5. Como o veio CS1 se encontra muito afastado da válvula longa, seu tempo mínimo de residência é significativamente maior se comparado aos outros veios. Porém, com a utilização da barragem fendada a assimetria do fluxo foi reduzida.

Xiaohui et al. (2014) também analisaram o fluxo assimétrico de aço em um distribuidor de 35 toneladas, lingotando com 12 veios. As simulações foram realizadas em um modelo em escala 1:3 e, entre os resultados citados, destaca-se a redução da fração de volume morto de 27,96% para 8,94%.

Já Zhong et al. (2007) realizaram simulação física e matemática em um distribuidor em formato de “T”. Foram utilizadas barragens fendadas com furos posicionados de forma diferente, como mostra a Figura 3.19, analisando tempo mínimo de residência do aço no interior do distribuidor.

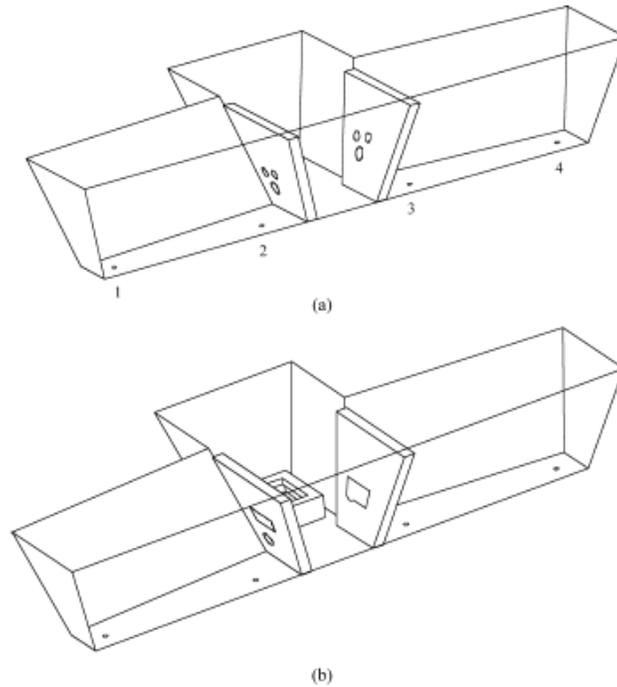


Figura 3.19: Barragens fendadas com furos posicionados de maneira diferente (ZHONG et al. 2007).

Os resultados mostram que em um distribuidor de vários veios, se os controladores de fluxo não são bem projetados, haverá grande diferença nas características de fluxo entre os veios, acarretando a não uniformidade dos tempos de residência e a falta de homogeneidade térmica nos distribuidores.

Cui et al. (2015) analisaram como a diferença de vazão entre dois veios podem afetar a fração de volume morto do distribuidor, assim como o tempo de residência. Os resultados obtidos mostram que a fração de volume morto aumenta com o aumento da diferença de vazão entre os veios. A diferença de vazão entre os veios tem influência significativa na fração de zona morta do distribuidor, mas se comparado com a concentração em cada veio, tem uma influência menor.

## 4 METODOLOGIA

Os testes foram realizados em um modelo físico em escala ( $\lambda$ ) 1:4 de um distribuidor de dois veios, de lingotamento de placas. Água a 25°C foi utilizada para simular o comportamento do aço líquido a 1600°C. Barragens e diques foram instalados para modificação adicional de fluxo. Medidores de vazão e de condutividade foram acoplados em cada veio, realizando medições instantâneas de vazão e permitindo determinar a concentração de traçador, KCl, para obtenção de curvas de distribuição de tempo de residência (DTR).

O modelo é operado em similaridade dinâmica com um distribuidor industrial, sendo o critério de similaridade definido conforme Equação 4.1 (adimensional de Froude).

$$Fr = \frac{V^2}{Lg} \quad (4.1)$$

Em que L é o comprimento característico; V, a velocidade característica e g, a aceleração da gravidade. Desta forma, no modelo físico foi utilizada uma vazão de entrada de 40 l/min, sendo a vazão de saída igual a 20 l/min para cada veio e o volume de trabalho 160 L.

Quatro configurações de mobiliários foram estudadas: a primeira apresentando somente inibidor de turbulência (configuração SB), a segunda com inibidor de turbulência e barragens, apresentando dois furos com inclinação de 23° em relação a horizontal (configuração AB) e a terceira e a quarta com barragens e diques (configurações BD1 e BD2), variando as distâncias do dique ao centro da válvula longa (Dd), do dique ao fundo do distribuidor (Ddf), da barragem ao centro da válvula longa (Db) e a altura da barragem (Hb). A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 ilustram essas configurações.

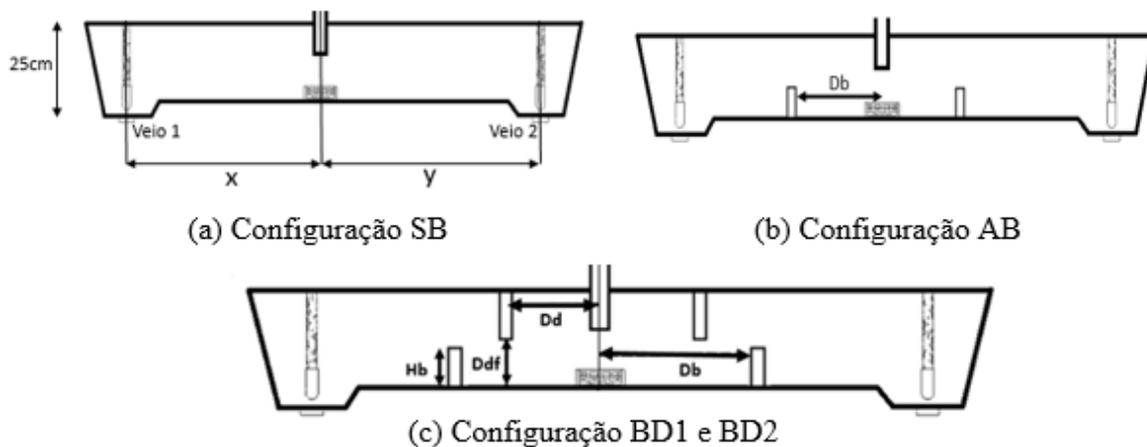


Figura 4.1: Posicionamento das mobílias no distribuidor.

Tabela 4.1: Posicionamento das barreiras.

Configuração	Dd (cm)	Ddf (cm)	Hb (cm)	Db (cm)
SB (sem barreira)	-	-	-	-
AB (apenas barragem)	-	-	7	20
BD1 (barreiras e diques 1)	28	10,4	10,2	36,7
BD2 (barreiras e diques 2)	18,2	8,9	10,2	29,5

#### 4.1 Modelo Físico

Szekely e Ilegbusi (1988) mostram de maneira detalhada como as curvas DTR são empregadas para caracterizar o fluxo em distribuidores. Merder e Pieprzyca (2012), Silva (2017), entre outros, seguiram a mesma metodologia em seus trabalhos. Em distribuidores de dois veios com fluxo simétrico é prática apresentar valores médios (dos dois veios) de parâmetros operacionais. Tal consideração não é conveniente se é esperado que o fluxo seja fortemente assimétrico, com intensidade que se reflete na qualidade individual do aço provindo de cada veio. Neste caso, o tratamento precisa ser individualizado.

Como primeiro passo, a escala de tempo pode ser normalizada a partir da expressão (Equação 4.2):

$$\theta = \frac{t}{t_{nominal}} \quad (4.2)$$

Em que  $t$  é o tempo (s) e  $t_{\text{nominal}}$  é o tempo nominal de residência do líquido no interior do reator (s), isto é, a razão entre o volume do reator e a somatória da vazão dos dois veios.

A função de distribuição de probabilidade dos tempos de residência (curva DTR) é então estimada pela transformação aplicada aos dados de cada veio, pela seguinte expressão (Equação 4.3):

$$E(t) = \frac{C}{\int_0^{\infty} C \cdot dt} \quad (4.3)$$

Aqui,  $C$  é a concentração de traçador medida na saída para cada veio. O tempo médio de residência de cada veio é, portanto, dado por (Equação 4.4):

$$\tau = \int_0^{\infty} t E(t) dt \quad (4.4)$$

A partir da curva  $E(t)$  desenvolve-se, por integração direta, a curva cumulativa de distribuição dos tempos de residência,  $F(t)$ :

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (4.5)$$

que fornece a fração de elementos de fluido com tempo de residência inferior a  $t$ .

Desta forma, cada veio pode ser analisado de forma individual, como requer a condição de fluxo fortemente assimétrico.

Neste trabalho, optou-se, para fins comparativos, por estimar a quantidade de material de mistura como aquele material lingotado no intervalo de tempo entre os valores correspondentes a  $F=0,2$  e  $F=0,7$ . O tempo mínimo de residência de cada veio é o tempo necessário para que se observe  $F=0,02$ .

Assim, a fração de fluxo em pistão (FFP) e de volume morto (FVM) são dadas, respectivamente, pelas equações (4.6) e (4.7):

$$FFP = \frac{t_{\text{mínimo}}}{t_{\text{nominal}}} \quad (4.6)$$

$$FVM = \int_{-\tau}^{\tau} (t/t_{nominal}) E(t) dt \quad (4.7)$$

Conseqüentemente, o valor da fração de mistura perfeita será dado pela Equação 4.8:

$$FFP + FMP + FVM = 1 \quad (4.8)$$

#### 4.2 PIV (Velocimetria por Imagens de Partículas)

Para verificar a influência das barreiras nos perfis de velocidade do distribuidor, além de validar o modelo matemático, utilizou-se a metodologia PIV. Na realização do ensaio, injetou-se microesferas banhadas a prata de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro pela válvula longa; tais partículas possuem a mesma densidade da água e, conseqüentemente, acompanham o fluxo. O laser e a câmera de alta resolução foram posicionados conforme apresentado na Figura 4.2. Foram realizados testes com as configurações SB e BD2. Conforme mostra a Figura 4.2, o distribuidor foi dividido em três regiões: o plano AA', próximo à válvula longa; o plano BB', mais centralizado, e o plano CC', na região de saída. Para a realização do PIV, não foi utilizado o tampão.

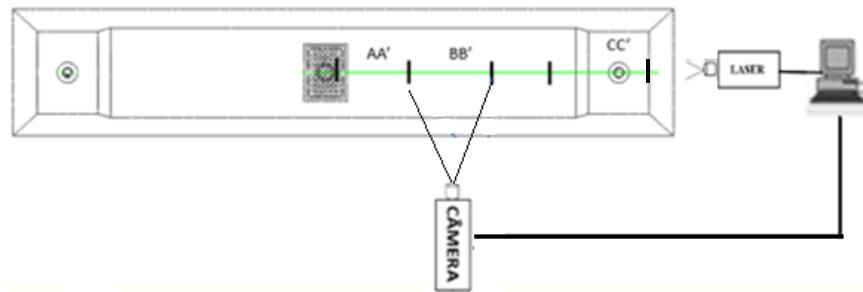


Figura 4.2: Representação esquemática da montagem para realização de medições utilizando PIV e as regiões analisadas.

#### 4.3 Modelo Matemático

O *software* CFX 19.1 (Ansys®) versão acadêmica foi utilizado para realizar a simulação matemática do fluxo no distribuidor, resolvendo as equações da continuidade, de conservação de quantidade de movimento (forma turbulenta das equações de Navier-Stokes)

e de espécie química (para o transporte de traçador). O modelo de turbulência adotado foi o modelo  $k-\epsilon$  padrão e utilizou-se os valores padrões do *software* para as propriedades físicas da água e do ar (a 25°C). Mais detalhes podem ser obtidos no guia do *software*.

A geometria utilizada nas simulações foi construída através do *software* Design Modeler e suas dimensões seguem as dimensões do modelo físico. A malha foi construída utilizando o *software* Meshing Modeler. O estudo de independência de malha foi realizado pelo monitoramento de velocidade em alguns pontos do distribuidor, obtido em simulações com malhas de tamanhos variados. Obteve-se uma malha de 2 mm nas paredes do inibidor, 5 mm na região acima do inibidor e no tubo longo, 6 mm próxima aos veios e 8 mm no restante do distribuidor utilizando a ferramenta *element sizing*, com 5 camadas de refinamento nas paredes através da ferramenta *inflation*, totalizando cerca de 1 milhão de elementos e 413 mil nós. A malha pode ser vista pela Figura 4.3.

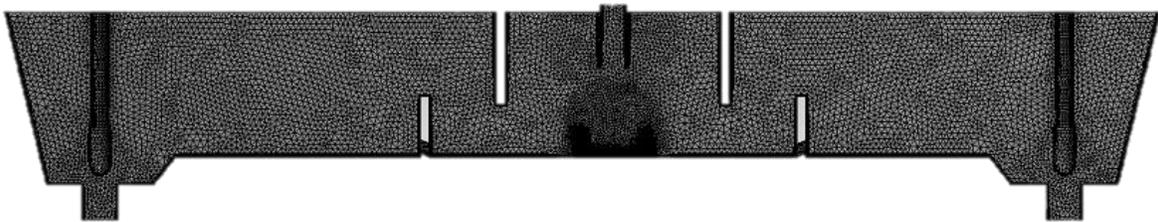


Figura 4.3: Malha utilizada na simulação matemática.

As condições de contorno aplicáveis ao problema foram:

- Condição de não deslizamento aplicada em todas as paredes (distribuidor, tubo longo e mobiliários), regiões onde o fluido possui velocidade zero;
- Um plano de simetria, o que reduz consideravelmente o custo computacional das simulações;
- Entrada: vazão mássica de água, correspondente a metade de 40 l/min (dada a condição de simetria). O regime de escoamento selecionado é o subsônico, com uma intensidade de turbulência de 5% (média);
- Veios 1 e 2: condição de saída, com vazão mássica de água correspondente a metade de 20 l/min (dada a condição de simetria);
- Condição de escorregamento livre na superfície do distribuidor.

Na simulação de injeção de traçador (solução salina), foram realizadas simulações em regime transiente (*timestep* de 0,01 s) para avaliar a dispersão de um traçador, representado pela função *Additional Variables*, utilizando a opção escalar volumétrica (kg/m<sup>3</sup>). Um pulso de traçador é adicionado na entrada do tubo longo com 1 s de duração, como no modelo físico. Os resultados de fluxo obtidos nas simulações em regime permanente são utilizados como condição inicial para garantir que o traçador seja inserido no modelo em uma etapa com fluxo completamente desenvolvido. Além disso, para reduzir o tempo de simulação, utilizando a ferramenta *Expert Parameters* do CFX, foram desabilitadas as resoluções de todas as equações, exceto aquela correspondente ao transporte de massa do escalar, permitindo alcançar o tempo total de simulação de 1200 segundos em até três dias de cálculo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir foram submetidos para o 50º Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos do Congresso ABM WEEK 2019.

Alguns aspectos da influência de diques e barragens no fluxo no interior do distribuidor podem ser observados na Figura 5.1. Os tempos médios,  $\tau$ , Figura 5.1(a), são sempre maiores para o veio 2. Esse comportamento é explicado pela assimetria geométrica do distribuidor, e consequente assimetria de fluxo. Para caracterizar a assimetria do distribuidor, isto é, a diferença entre os veios, foi calculada, através da Equação 5.1, uma relação percentual de quanto a assimetria foi reduzida para cada configuração:

$$A\% = \left( \frac{t_{\text{mínimo}; \text{veio 2}} - t_{\text{mínimo}; \text{veio 1}}}{t_{\text{mínimo}; \text{veio 1}}} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

Os valores foram 22,3%, 31,8%, 15% e 15,2% para a configuração SB, AB, BD1 e BD2, respectivamente. Nota-se que existe uma assimetria consideravelmente alta para a configuração AB, o que compromete o controle da qualidade do aço produzido. Tanto os intervalos de tempo para a flotação de inclusão são muito diferentes veio a veio como os intervalos de produção de *intermix*. Por outro lado, nas configurações BD1 e BD2, nota-se que a assimetria caiu para menos da metade, mostrando que essas configurações foram eficientes no que diz respeito à redução da assimetria no distribuidor.

As configurações BD1 e BD2 apresentaram maior valor de tempo médio de residência, o que favorece as condições de flotação de inclusão e limpidez do aço. A melhor condição de flotação de inclusão, ou seja, o maior tempo mínimo de residência,  $t_{\text{mínimo}}$ , tanto para o veio 1 quanto para o veio 2, se dá para a configuração BD2, enquanto a pior condição é aquela utilizando-se apenas inibidor de turbulência, SB, vide Figura 5.1(b). Liu et al. (2007), Bensouici et al. (2009) e Boudjabi et al. (2008) também observaram em seus trabalhos uma melhora nas condições para a flotação de inclusão com a utilização de barreiras/diques e inibidor.

Para aplicações mais nobres, as placas devem atender a requisitos de limpidez mais estritos, que incluem mesmo as inclusões de menor tamanho, por exemplo  $10 \mu m$ . Uma análise macroscópica do desempenho do distribuidor quanto à flotação de inclusões é normalmente dada pela fração de inclusões removidas nas duas primeiras seções do distribuidor, de mistura perfeita e de fluxo em pistão. Para inclusões pequenas, cuja flotação pode ser explicada pela Lei de Stokes, a quantidade residual de inclusões na saída de cada seção é dada pela Equação 5.2:

$$r = 1 - \frac{V_{terminal} t_{residência}}{H} \quad (5.2)$$

Onde  $V_{terminal}$  é a velocidade terminal de ascensão da inclusão dada pela Lei de Stokes;  $t_{residência}$  é o tempo de residência naquela seção específica do distribuidor;  $H$  é o nível de aço no distribuidor.

Então, ambas as seções contribuem de maneira similar à flotação de inclusões. Desta forma, é conveniente associar o tempo de residência (efetivo para remoção de inclusões) ao tempo médio de residência, descontada a fração de volume morto (calculada com base no limite  $2\tau$ ), isto é (Equação 5.3):

$$t_{residência} = \tau (1 - FVM) = \int_0^{2\tau} t E(t) dt \quad (5.3)$$

A título de exemplo, considerando configuração BD2, inclusões de alumina ( $3000 \text{ kg/m}^3$ ) e propriedades do aço típicas ( $7000 \text{ kg/m}^3$ ;  $6,5 \text{ mPa.s}$ ),  $V_{terminal}$  igual a  $3,35 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ,  $H$  da ordem de 1m, se estima que cerca de 98% das inclusões de  $10 \mu m$  provindas da panela adentram o molde. Portanto, para esta faixa de tamanho de inclusões o distribuidor não pode ser pensado como um reator efetivo para remoção de inclusões, a menos que medidas adicionais sejam tomadas (por exemplo, a implantação de cortinas gasosas). De modo geral, se espera que as piores performances sejam para aquelas configurações que combinam alta fração de volume morto com baixo tempo médio de residência, vide Figuras 5.1(a) e 5.1(c).

Outro aspecto importante a se observar é como a fração de volume morto (FVM) impacta a produção de *intermix*. De acordo com a Figura 5.1(c), é possível verificar que a configuração BD1 foi a mais eficiente na redução do volume morto.

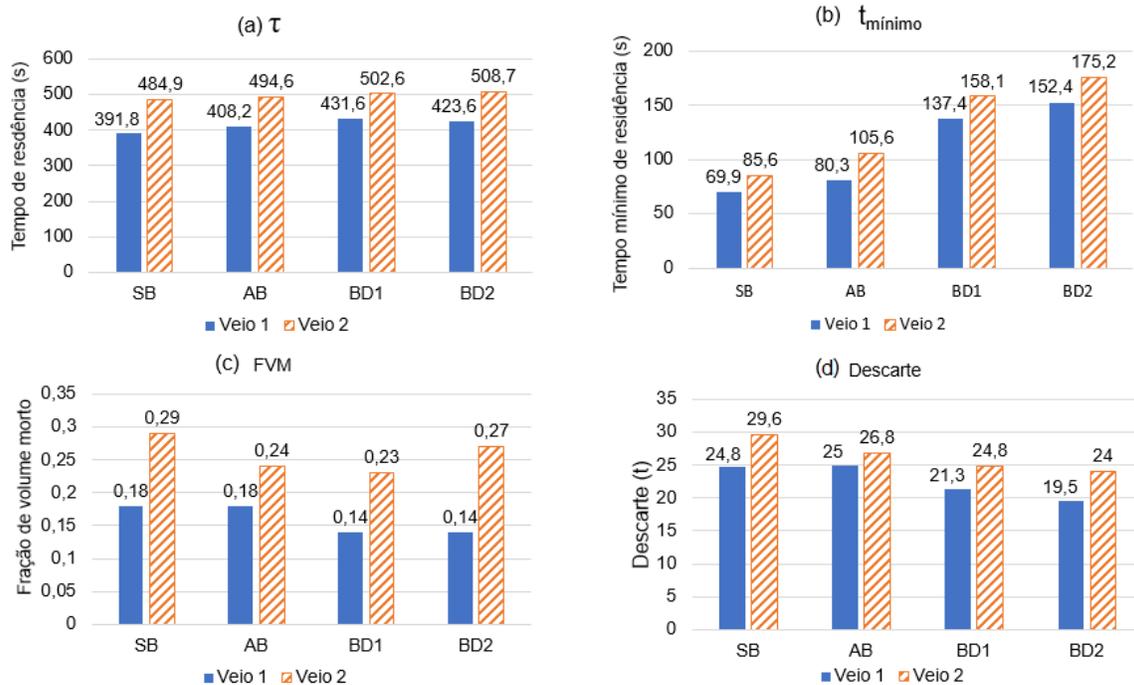


Figura 5.1: Valores médios de: (a) tempos médios de residência,  $\tau$  ; (b) tempos mínimos de residência,  $t_{\text{mínimo}}$ ; (c) fração de volume morto, FVM e (d) descarte em função da configuração de mobiliários do distribuidor.

A configuração BD2 foi a mais eficiente para a redução do descarte para ambos os veios. Essa redução implica em uma menor quantidade de aço descartada, aumentando o rendimento metálico e a eficiência do processo.

Para elucidar as alterações do fluxo no interior do distribuidor com a introdução das barreiras, foram realizados testes via técnica PIV e simulações numéricas para as condições sem barreira (SB) e com barreira e dique 2 (BD2). Observa-se na Figura 5.2 os perfis de velocidade obtidos no plano AA'. É possível verificar que, ao sair da válvula longa, o fluido se choca com o inibidor de turbulência e retorna à superfície com alta velocidade, deslocando-se horizontalmente. Na Figura 5.2(b), a presença do dique altera a direção de

deslocamento do fluido, aumentando o número de vórtices e reduzindo a velocidade superficial após a barreira. Estas alterações na direção do fluxo implicam em alterações de tempo mínimo de residência. Destaca-se ainda uma boa concordância entre os perfis calculados pelo PIV e pelo modelo numérico.

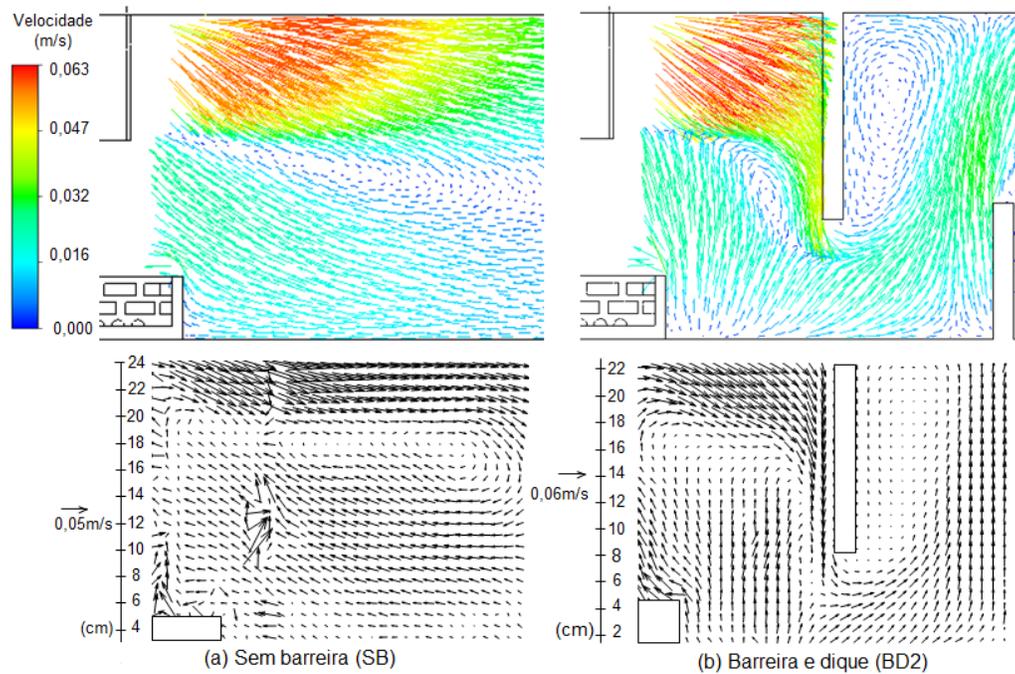


Figura 5.2: Comparação do perfil de velocidades no plano AA' da simulação matemática (superior) e do PIV (inferior) para configuração: (a) sem barreiras (SB), (b) com barreira e dique (BD2).

Na região intermediária de fluxo (entre inibidor e veio, plano BB', Figura 5.3), verifica-se que na parte inferior o fluido retorna em direção ao inibidor, enquanto o fluxo principal segue pela parte superior do distribuidor até a região de saída, plano CC', sendo direcionado para o veio. Na Figura 5.4, o fluxo retornando pela parte inferior do plano BB' é guiado novamente pela barragem ao encontro do fluxo principal na região superior, seguindo em direção ao veio.

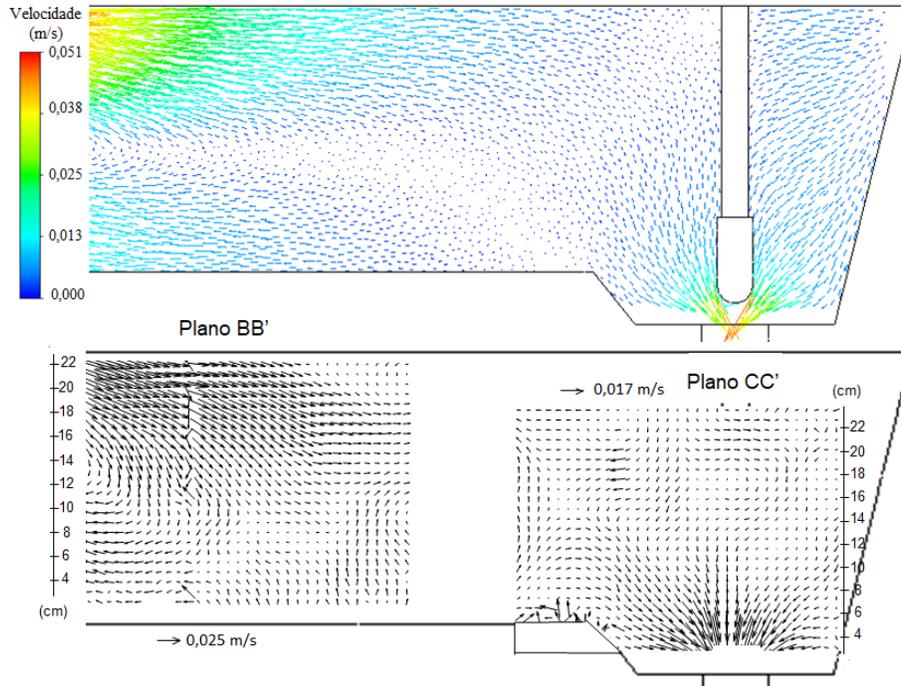


Figura 5.3: Comparação entre o modelo matemático e o PIV para as regiões BB' e CC' na configuração SB.

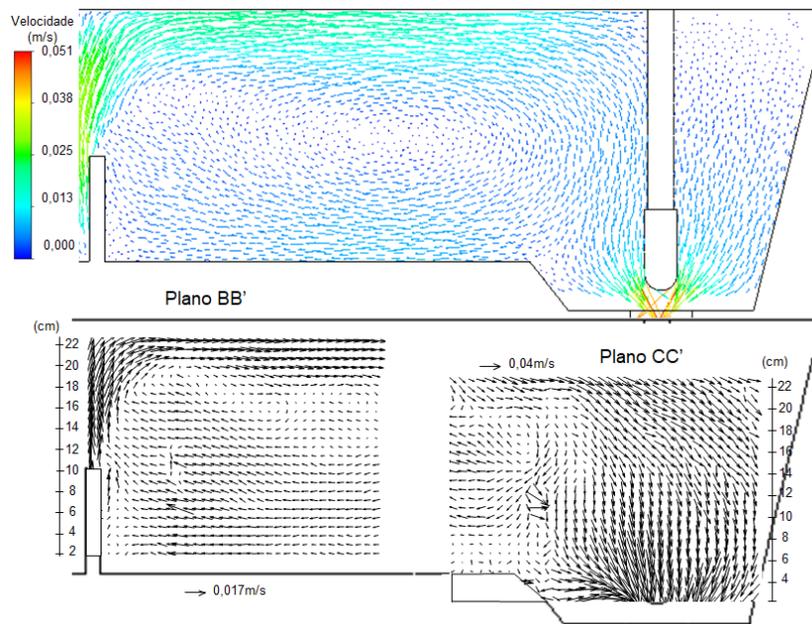


Figura 5.4: Comparação entre resultados do modelo matemático e de PIV para as regiões BB' e CC' na configuração BD2.

O fluxo no distribuidor também foi analisado por meio do modelo numérico (Figuras 5.5 e 5.6). É possível verificar que, sem as barreiras, na parte superior do distribuidor, o líquido se desloca majoritariamente próximo às paredes do distribuidor indo diretamente para o veio 2, resultando no tempo mínimo de residência baixo para essa condição. Com a presença das barreiras, o fluxo oriundo do tubo longo precisa inicialmente contornar os obstáculos (dique e barragem), como observado nas Figuras 5.3 e 5.4, e depois percorrer a parte superior uniformemente distribuído até a região do veio. Essas alterações no comportamento do fluido fazem com que o tempo mínimo de residência aumente significativamente, como foi encontrado nos resultados com injeção de traçador.

É possível notar também, na Figura 5.5, uma tendência à recirculação do líquido na região sobre o veio. Esta estrutura pode resultar no desenvolvimento de um vórtice durante a redução de nível, no final da operação de lingotamento ou durante a troca de painéis.

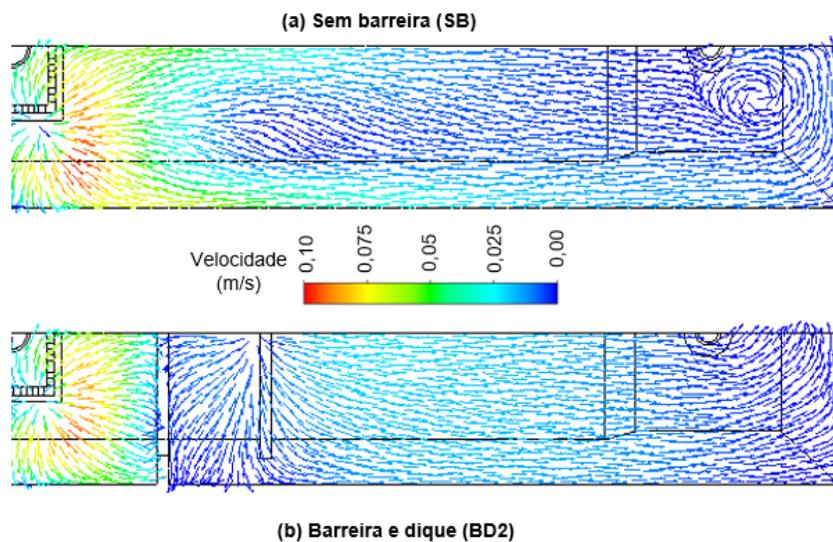


Figura 5.5: Perfil de velocidades na superfície livre do distribuidor para configuração: (a) sem barreiras (SB); (b) com barreira e dique (BD2).

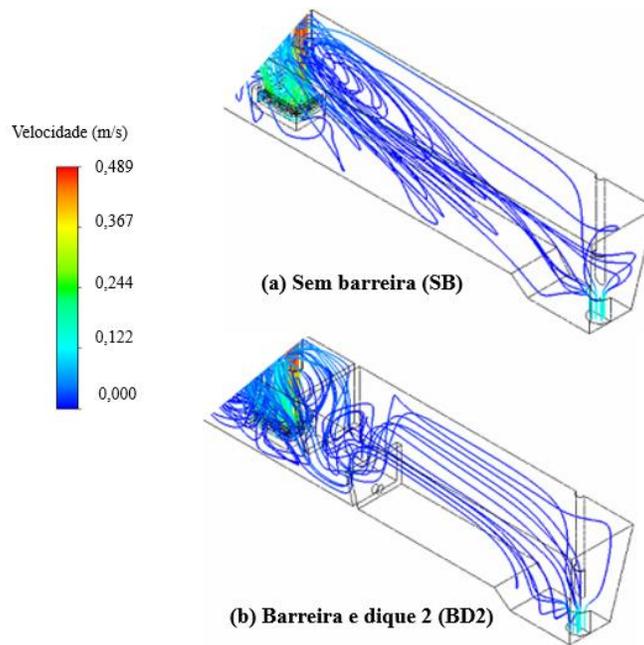


Figura 5.6: Fluxo ao longo do distribuidor para as configurações: (a) sem barreiras (SB);  
(b) com barreira e dique (BD2).

Os resultados obtidos na simulação matemática com injeção de traçador são apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8. Nota-se que as curvas DTR do modelo físico e matemático na configuração BD2 para ambos os veios apresentam resultados similares. Os tempos de residência, a fração de volume morto e o descarte calculados a partir destas curvas também apresentam boa concordância (Figura 5.7).

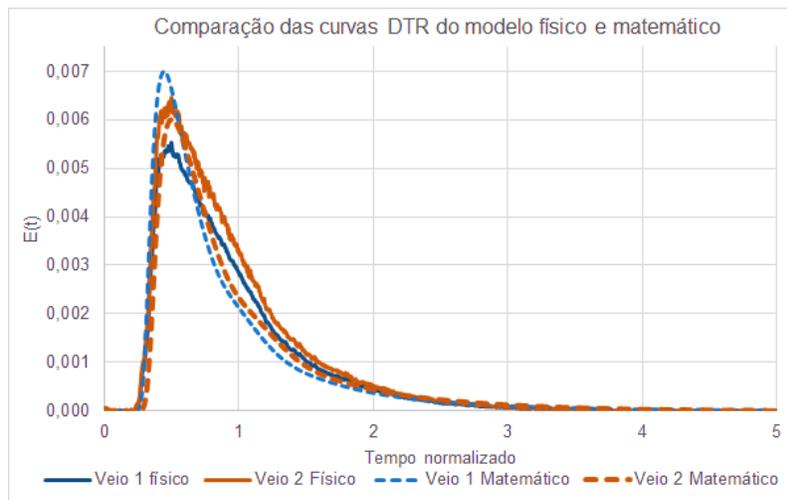


Figura 5.7: Comparação entre as curvas DTR dos modelos físico e matemático.

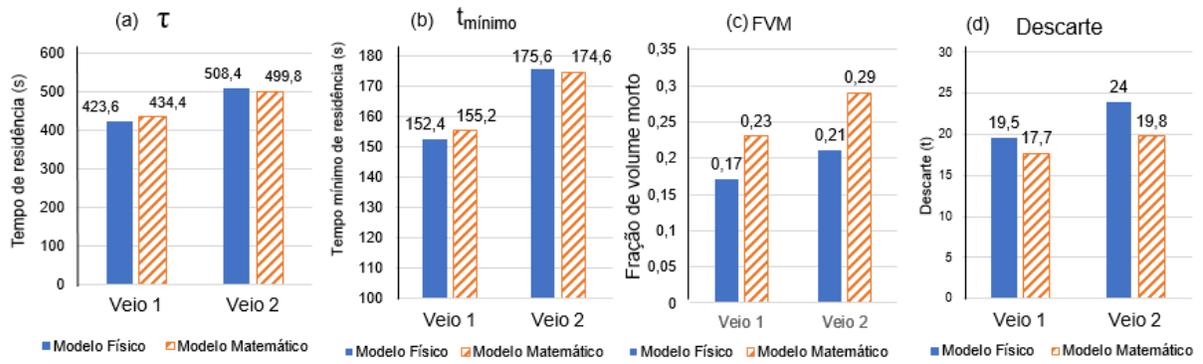


Figura 5.8: Comparação entre resultados do modelo físico e matemático para a configuração BD2.

## 6 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A assimetria geométrica descrita neste trabalho introduz assimetria de fluxo significativa, como se pode aferir pela comparação de valores de  $\tau$ ,  $t_{\text{mínimo}}$  e *intermix*;
- A combinação de inibidor de turbulência, dique e barragem foi capaz de reduzir a assimetria do fluxo, sendo a configuração BD2 a mais eficiente. A combinação de inibidor de turbulência e barragem (AB) levou ao aumento da assimetria de fluxo, em comparação à configuração utilizando somente inibidor (SB);
- Os perfis de velocidade no plano de simetria foram obtidos através da técnica PIV e possibilitaram uma caracterização das alterações ocorridas pela introdução das barreiras;
- Observou-se uma boa concordância entre os perfis calculados via PIV e pelo modelo numérico, assim como entre as curvas DTR e os tempos de residência calculados para a configuração BD2;
- Diques e barragens produziram um fluxo superficial mais uniformemente distribuído comparativamente ao que ocorre somente com inibidor de turbulência, onde se observa um fluxo majoritariamente nas paredes.

## **7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Com base nos estudos realizados neste trabalho, podem ser feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar testes de remoção de inclusões;
- Realizar testes de remoção de inclusões com injeção de gás (barreira gasosa);
- Executar simulações matemáticas para avaliar a trajetória das inclusões no distribuidor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. G. **Melhoria no Padrão de Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor do Lingotamento Contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul**. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

BARBOSA, F. A.; ARAÚJO FILHO, G. M.; TAVARES, R. P. Modelagens Matemática e Física do Escoamento do Aço Líquido em Diferentes Projetos de Distribuidor do Lingotamento Contínuo da Usiminas. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 1, n. 4, p. 34-39, 2005.

BENSOUICI, M.; BELLAOUAR, A.; TALBI, K. Numerical investigation of the fluid flow in continuous casting tundish using analysis of RTD curves. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 16, n. 2, p. 22-29, 2009.

BOUDJABI, A.F.; BELLAOUAR, A.; LACHI, M.; ELWAKIL, N. Physical Modelling of a Continuous Casting Tundish: a Parametric Study of Residence Time Distribution Curves. **WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS**, v. 10, p. 849-858, 2008.

BUL'KO, B.; KIJAK, J.; DEMETER, P.; DEMETER, J. Influence of Misalignment Ladle Shroud on Tundish Residence Time. **Acta Metallurgica Slovaca**, v. 17, p. 51-57, 2011.

CHATTOPADHYAY, K.; LIU, F. G.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Effect of Vertical Alignment of Ladle Shroud on Transient Steel Quality Output From Multistrand Tundish. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 38, p. 112-118, 2011.

CLOETE, J. H.; AKDOGAN, G.; BRADSHAW, S. M.; CHIBWE, D.K. Physical and Numerical Modelling of a Four-Strand Steelmaking Tundish Using Flow Analysis of Different Configurations. **The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 115, p. 355-362, 2015.

CONCEIÇÃO, P.V.S. **Rendimento Metálico Durante o Vazamento de Painéis de Aço**. 2018. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

COSTA NETO, J. G. **Otimização do Fluxo de Aço no Distribuidor do Lingotamento Contínuo**. 1997. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

CUI, H.; LIU, Y.; LI, D. Fluid Flow Characterization in Asymmetric Tundish. **ISIJ International**, v. 55, n. 12, p. 2604-2608, 2015.

DARSIE, E. A. S.; MACHADO, F. D.; FRANÇOIS, M. B. G.; VILELA, A. C. F. Simulação Física do Escoamento do Aço no Interior do Distribuidor de Lingotamento Contínuo Com ou Sem Modificador de Fluxo. **Revista de Iniciação Científica da ULBRA**, Canoas, n. 12, p. 243-250, 2014.

GRYC, K.; MICHALEK, K.; HUDZIECZEK, Z.; TKDLEČKOVÁ, M. Physical Modelling of Flow Pattern in 5-Strand Asymmetrical Tundish with Baffles. **METAL 2010**, Roznov pod Radhostem, v. 18, 2010.

HARNSIHACACHA, A.; PIYAPANEEKOON, A.; KOWITWARANGKUL, P. Physical Water Model and CFD Studies of Fluid Flow in a Single Strand Tundish. In: THAILAND INTERNATIONAL METALLURGY CONFERENCE, 10., 2017, Bangkok. **Proceedings...** Amsterdã: Elsevier, 2018. p. 9220-9228.

KRUGER, M. **Desenvolvimento de um Procedimento Computacional para o Estudo do Escoamento no Interior de Distribuidores de Lingotamento Contínuo**. 2010. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

LIU, J.G.; YAN, H.C.; LIU, L.; WANG, X.H. Water Modeling of Optimizing Tundish Flow Field. **Journal of Iron and Steel, Research, International**, v. 14, n. 3, p. 13-19, 2007.

MACHADO, F.D. **Modelagem Física de Remoção de Inclusões em Distribuidor de Lingotamento Contínuo de Tarugos**. 2014. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MERDER, T.; PIEPRZYCA, J. Optimization of Two-Strand Industrial Tundish Work with use of Turbulence Inhibitors: Physical and Numerical Modeling. **Steel Research International**, v. 83, n. 9999, p. 1-10, 2012.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos Processos de Lingotamento dos Aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006. 158 p.

SESHADRI, V.; SILVA, C.A.; SILVA, I.A.; ARAÚJO JÚNIOR, E.S. A Physical Modelling Study of Inclusion Removal in Tundish using Inert Gas Curtain. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 22-29, 2012.

SILVA, H. H. S. **Remoção de Inclusões em um Distribuidor Assistida por Injeção de Gás Inerte**. 2017. 55f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SILVA, H.H.S; SILVA, C.A.; SILVA, I.A.; BARROS JÚNIOR, A.G. Study of Flow Modification and Inclusion Removal in Slab Tundish due to Bottom Gas Injection. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 167-174, 2018.

SZEKELY, J.; ILEGBUSI, O. J. **The Physical and Mathematical Modeling of Tundish Operations**. New York: Springer-Verlag, 1988. 111 p.

THOMAS, B. G. Modeling Study of Intermixing in Tundish and Strand During a Continuous-Casting Grade Transition. **Iron and Steelmaker (ISS Transactions)**, Warrendale, v. 24, n. 12, p. 83-96, 1997.

WOLLMANN, A. M. **Estudos de Fluxo em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo**. 1999. 93f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

XIAOHUI, M.; JINGSHE, L.; JUANGSHAN, Z.; XINGLIN, LI.; YUANSHENG, H. Water Modelling Test of a Special Asymmetrical 12 Strand 35t Tundish and Optimization of Flow Control Device. Disponível em: [https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-TSGA201402001/](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-TSGA201402001/) Acesso em: 11 de julho de 2019.

ZHONG, L.; LI, B.; ZHU, Y.; WANG, R.; WANG, W.; ZHANG, X. Fluid Flow in a Four-strand Bloom Continuous Casting Tundish with Different Flow Modifiers. **ISIJ International**, v. 47, n. 1, p. 88-94, 2007.