

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS

Dissertação de Mestrado

**“Melhoria no padrão de escoamento do aço líquido no distribuidor do
lingotamento contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul”.**

Autor: João Geraldo Alves

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Junho/2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS**

João Geraldo Alves

**“Melhoria no padrão de escoamento do aço líquido no distribuidor do
lingotamento contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul”.**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas
Gerais**

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2014**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu filho Samuel, que além de ser um grande sinal de Jesus na minha vida, tem sido fonte de inspiração e de renovação no amor à vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado o dom da vida e a sabedoria, pois “... o Senhor dá a sabedoria, da sua boca vem a inteligência e o entendimento.” (Pv 2,6).

Aos meus familiares por sempre me darem carinho e, sobretudo, por ensinarem a enfrentar os desafios da vida com coragem e determinação, principalmente ao meu pai e a minha mãe (*in memoriam*).

A minha esposa Jeanne Cristina pelo carinho, compreensão nos momentos de ausência e principalmente pelo incentivo na elaboração deste trabalho.

A Empresa APERAM Inox América do Sul, nas pessoas do Eng^o. Robson Machado e Eng^o. Hélio Loss, pela oportunidade de aperfeiçoamento técnico, profissional e pessoal, bem como pelos recursos financeiros que viabilizaram a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Roberto Parreiras Tavares pelo exemplo de dedicação e a disponibilidade em discutir os assuntos pertinentes à elaboração deste trabalho.

Ao amigo Leonardo Silvestre pelo incentivo e apoio no crescimento profissional e pessoal.

Ao Eng^o. André Afonso que durante várias vezes não mediu esforços para me ajudar nas simulações e nas discussões.

Ao aluno Lucas Costa pela boa vontade em me ajudar nas simulações e incentivo na execução deste trabalho.

Aos amigos da Aciaria pelo apoio na produção das corridas, da Laminação a Quente pela agilidade na retirada das amostras nas bobinas e do Centro de Pesquisa pela boa vontade em analisar e discutir os resultados encontrados.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE NOTAÇÕES	xi
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 – Descrição Geral do Processo de Lingotamento Contínuo.....	4
3.2 – Inclusões no Aço Líquido	8
3.2.1 – <i>Origens das inclusões não metálicas</i>	9
3.2.2 – <i>Influências das inclusões sobre as propriedades do aço</i>	10
3.3 – Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor.....	13
3.4 – Utilização de Modificadores de Fluxo no Distribuidor.....	15
3.4.1 – <i>Distribuidores do Lingotamento Contínuo 01 e 02 da APERAM</i> ...	21
3.5 – Modelamento Matemático do Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor	23
3.5.1 – <i>Introdução</i>	23
3.5.2 – <i>Teoria do modelamento matemático da fluido-dinâmica</i>	24
3.6 - <i>Curvas de Distribuição de Tempos de Residência (DTR)</i>	27
4 – METODOLOGIA	34
4.1 – Modelamento Matemático	34
4.1.1 – <i>Construção da geometria e da malha</i>	36
4.1.2 – <i>Configuração da simulação</i>	39
4.1.3 – <i>Solução das equações de conservação</i>	41
4.1.4 – <i>Pós-processamento dos resultados</i>	42
4.2 – Validação do Modelamento Matemático.....	42
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 – Estudo de Independência da Malha	46
5.2 – Efeitos dos Modificadores de Fluxo no Escoamento do Aço no Distribuidor.....	48
5.2.1 – <i>Perfis de velocidade</i>	50

5.2.2 – <i>Linhas de correntes</i>	52
5.2.3 – <i>Curvas DTR, tempos e volumes característicos</i>	53
5.2.4 – <i>Resultado de micro pureza</i>	55
6 – CONCLUSÕES.....	59
7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
9 – BIBLIOGRAFIA.....	64

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 – Desenho esquemático da seção transversal da máquina de lingotamento contínuo de placas. (Fonte: http://ccc.illinois.edu/images/cast_techniques_sized.jpg (Acesso em 02/04/2014)).....	4
Figura 3.2 – Distribuição da água da refrigeração secundária do aço SAE 1070, na largura de placa de 1.220mm e velocidade de lingotamento de 0,70m/min, na máquina 01 da APERAM. Fonte: base de dados Metalúrgica do lingotamento contínuo 01. Imagem: Ernandes Marcos da Silveira Rizzo, Introdução aos processos de lingotamento dos aços. ABM.....	7
Figura 3.3 – Defeito ocorrido em uma bobina laminada a frio do aço AISI 430, após a linha de recozimento e decapagem final, da APERAM: 3.3.a) seção transversal da região do defeito; 3.3.b) resultado de análise química realizada no MEV.....	13
Figura 3.4: Regiões de formação de zonas de volumes mortos presentes no distribuidor (Thomas, 1997).	17
Figura 3.5: Curvas experimentais do tempo de residência para um distribuidor sem arranjo de modificadores de fluxo, arranjos do tipo W&B e TI&B (Morales et al., 1999).	20
Figura 3.6: Perfis de velocidade do aço líquido no distribuidor sem dispositivo de controle de fluxo, com arranjo W&B, de modificadores de fluxo, arranjos do tipo W&B e com arranjo do tipo TI&B (Morales et al., 1999).	20
Figura 3.7: Desenhos ilustrativos dos distribuidores 01 e 02 da APERAM, destacando as diferenças dimensionais e de forma entre eles. Fonte: Práticas padrões internas de montagem refratárias dos distribuidores.....	21

Figura 3.8: Comparação do resultado de qualidade superficial das bobinas laminadas a frio, do aço AISI 430 oriundas de placas produzidas na máquina 01 e 02. Esse resultado foi medido durante a inspeção das bobinas laminadas a frio nas linhas de recozimento final. Período considerado: janeiro 2010 a abril 2014. Fonte SAI (Sistema de Acompanhamento de Inox – APERAM).....	23
Figura 3.9: Diferentes disciplinas contidas na CFD (Tu et al., 2008).	25
Figura 3.10: Curva típica de distribuição de tempos de residência (DTR) para um distribuidor de lingotamento contínuo	28
Figura 3.11: Modelo combinado representando os volumes pistonado e de mistura (Sahai e Emi, 1996). (Adaptado).	29
Figura 4.1: Desenho dos distribuidores mostrando a Configuração 01 (a), Configuração 02 (b) e Configuração 03 (c).....	35
Figura 4.2: Desenho do distribuidor mostrando o deslocamento de 240mm do eixo axial da entrada do fluido no distribuidor em relação ao eixo de saída.....	37
Figura 4.3: Desenho das regiões onde foi aplicada a condição do <i>inflation</i> : tubo submerso (a), paredes do distribuidor (b) e barragem e dique (c).....	38
Figura 4.4: Posicionamento do dique e da barragem dentro do distribuidor conforme a configuração 02.....	43
Figura 5.1: Comparação das curvas DTR's para as malhas 01 a 04 realizadas para o distribuidor sem modificadores de fluxo.....	48
Figura 5.2: Contornos da energia cinética de turbulência na interface aço/escória para a Configuração 01 (a), Configuração 02 (b) e Configuração 03 (c).....	49

Figura 5.3: Perfis de velocidade obtidos na simulação do distribuidor sem a utilização de modificadores de fluxo (configuração 01). Plano da válvula de saída.....	50
Figura 5.4: Perfis de velocidade obtidos nos distribuidores com a utilização de modificadores de fluxo (dique e barragem). Plano da válvula de saída.....	51
Figura 5.5: Linhas de correntes obtidas no distribuidor sem modificadores de fluxo (configuração 01). Plano da válvula de saída.....	52
Figura 5.6: Linhas de corrente obtidas nos distribuidores com a utilização de modificadores de fluxo (dique e barragem). Plano da válvula de saída.....	53
Figura 5.7: Comparação das curvas DTR das simulações das configurações 01, 02 e 03.....	54
Figura 5.8: Resultado de micro pureza da amostra E1: (a) região de menor incidência de inclusões; (b) região mediana de incidência de inclusões e (c) região de maior incidência de inclusões.....	56

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela III.1: Parâmetros de escoamento derivados do modelo físico a água. (Morales et al., 1999)	19
Tabela IV.1 - Composição química das corridas lingotadas com barragem e dique no lingotamento contínuo 01.....	43
Tabela V.1 - Especificações das malhas para os casos simulados do distribuidor sem modificadores de fluxo e moneclatura dos mesmos para referências futuras.....	47
Tabela V.2 - Volumes e tempos característicos das simulações com e sem o uso do dique e barragem.....	54
Tabela V.3 - Resultado de micro pureza das amostras.....	57
Tabela V.4 - Teores de cálcio total obtidos nas amostras.....	58

LISTA DE NOTAÇÕES

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C_i	valor normalizado da concentração
C_n	concentração adimensionalizada
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
C_r	concentração de referência do traçador (kg/m^3)
DIN	<i>Deutsche Industrie Normen</i>
DTR	Distribuição do Tempo de Residência
K	Energia Cinética de Turbulência (m^2/s^2)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
m_t	massa do traçador injetada (kg)
Q_a	vazão volumétrica da região ativa do distribuidor (m^3/s)
Q_D	vazão volumétrica total do distribuidor (m^3/s)
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTD	<i>Residence Time Distribution</i>
S_\emptyset	termo fonte
t	tempo teórico de residência (s)
t_i	instante de tempo (s)
t_{min}	tempo mínimo de residência (s)
t_{pico}	tempo de pico (s)
V_D	volume ocupado pelo fluido no interior do distribuidor (m^3)
V_d	volume morto (%)
V_m	Volume de mistura (%)
V_p	Volume pistonado (%)
V_{sc}	Volume de curto circuito (%)

Θ_{med}	tempo médio de residência (s)
Θ_{min}	instante em que aparece o primeiro sinal do traçador no molde
Θ_n	tempo adimensionalizado
Θ_{pico}	instante em que a curva DTR atinge o valor máximo de concentração
ϕ	variável dependente
ρ	densidade do fluido (kg/m^3)
Γ_ϕ	coeficiente de difusão da variável ϕ
ε	Taxa de dissipação da energia cinética de turbulência (m^2s^{-3})

RESUMO

O distribuidor no lingotamento contínuo, além de distribuir e garantir a alimentação de aço para um ou mais veios, exerce um papel significativo na flotação e separação das inclusões não metálicas. Os dispositivos modificadores de fluxo, tais como o dique, barragem e inibidor de turbulência, são alternativas utilizadas para otimização do projeto do distribuidor e, conseqüentemente, do escoamento do aço líquido. Diversos estudos têm sido realizados com intuito de apresentar os benefícios da utilização destes dispositivos no escoamento do aço líquido no distribuidor. Todos estes estudos procuram um acréscimo no tempo de residência efetivo do aço líquido no distribuidor, através do aumento do escoamento pistonado, objetivando favorecer a flotação das inclusões não metálicas e, conseqüentemente, aumentar a limpidez das placas produzidas. Para avaliar o desempenho do escoamento do aço líquido, normalmente é determinada a curva de distribuição do tempo de residência (DTR). Modelagens matemáticas vêm também sendo aplicadas para caracterizar o escoamento do aço líquido em um distribuidor de lingotamento contínuo na presença, ou não, de dispositivos modificadores de fluxo. Esses estudos auxiliam a avaliação e a otimização de parâmetros ligados ao escoamento do aço líquido, tais como o tempo de residência médio e mínimo e as frações de volume morto, pistonado e de mistura. O comportamento fluidodinâmico do aço líquido dentro do distribuidor do lingotamento contínuo está relacionado com o volume e a geometria do distribuidor, com a existência de dispositivos de controle de fluxo e com a taxa de alimentação do aço. Os distribuidores das máquinas de lingotamento contínuo 1 (distribuidor 1) e 2 (distribuidor 2) da APERAM Inox América do Sul (APERAM) possuem geometrias diferentes, sendo que as bobinas oriundas das placas que foram lingotadas no lingotamento contínuo 01, têm um resultado de qualidade cerca de 4 vezes pior do que as bobinas oriundas do lingotamento contínuo 02. Em função destas observações, o objetivo do presente trabalho foi estudar o perfil de escoamento do distribuidor do lingotamento contínuo 01, através de simulação matemática no software comercial ANSYS CFX 14.0, e propor o uso de modificadores de fluxo (dique e barragem) para melhorar a flotação de inclusões não metálicas. A validação do modelamento matemático foi efetuada através da comparação dos resultados de micro pureza de amostras de bobinas

laminada à quente de corridas lingotadas com e sem a utilização de modificadores de fluxo, do aço SAE 1070. Os resultados de micro pureza mostram que a utilização de dique e barragem, melhorou a flotação de inclusões não metálicas no distribuidor do lingotamento contínuo 01, o que viabiliza a produção de aços com maior exigência de qualidade neste distribuidor.

ABSTRACT

In addition to distributing and feeding liquid steel into the moulds, the continuous casting tundish has a significant effect on the floatation of non-metallic inclusions. Flow modifiers, such as dam, weir and turbulence inhibitors, are alternatives that can be used to optimize the liquid steel flow in the tundish. Previous investigations have demonstrated the benefits of using these devices in terms of improving the liquid steel flow and removing of non-metallic inclusions. All these studies aim at increasing the effective residence time of liquid steel in the tundish, increasing the plug flow. This can enable the floatation of non-metallic inclusions and, consequently, increase the cleanliness of the slabs and coils. To analyze the liquid steel flow inside the tundish, Residence Time Distribution (RTD) curves are normally determined. Mathematical modeling has been used to characterize the liquid steel flow in the continuous casting tundish and to determine RTD curves, with or without fluid flow modifiers. The tundishes of Continuous Casting Machines 01 and 02 at APERAM have different geometries, and the coils derived from the slabs cast in Machine 01, have quality results approximately 4 times worse than the slabs cast in Machine 02. Considering these observations, the objective of the present work was to study the fluid flow in the tundish of Continuous Casting 01, by means of mathematical modelling using the commercial software ANSYS CFX 14.0, and to identify configuration of flow modifiers (dam and weir) to improve the floatation of non-metallic inclusions. The validation of the mathematical modeling was carried out comparing the results of micro purity of samples of hot-rolled coils cast with and without the use of flow modifiers, of SAE 1070 steel. The micro purity results showed that the use of dam and weir as proposed in the present work improved the floatation of non-metallic inclusions in the tundish of Continuous Casting 01, which enabled the production of steels with higher quality requirements.

1 – INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo tornou-se a principal tecnologia de solidificação de aço, utilizada pelas empresas siderúrgicas atualmente, com cerca de 95,6% de participação (INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 2013). Essa grande importância é consequência das inúmeras vantagens sobre o lingotamento convencional (produção de lingote), principalmente o ganho de rendimento físico, maior produtividade, economia de energia e melhor qualidade do produto.

A procura constante de melhoria de desempenho dos produtos lingotados tem levado a grandes avanços na área de lingotamento contínuo de placas, com alternativas que auxiliem na obtenção de produtos com ótima qualidade e maior valor agregado.

Com a grande busca por produtos que possuam excelente qualidade interna e superficial, cada vez mais se torna necessário produzir placas com maiores níveis de limpeza e apurado controle da composição química. Essas características têm sido consideradas no desenvolvimento de projetos corretos e eficientes dos distribuidores de lingotamento contínuo.

Os dispositivos modificadores de fluxo, tais como a barragem, dique e o inibidor de turbulência, são alternativas para a otimização do projeto do distribuidor e, conseqüentemente, do escoamento do aço líquido.

Existem diversos estudos que apresentam os benefícios da utilização destes dispositivos no escoamento do aço líquido no distribuidor. Todos os estudos relativos a esta utilização procuram um acréscimo no tempo de residência efetivo do aço líquido no distribuidor, por meio do aumento do escoamento pistonado, objetivando favorecer a flotação das inclusões não-metálicas e, conseqüentemente, aumentar a limpeza das placas produzidas no lingotamento contínuo. Para verificar o desempenho do escoamento do aço líquido, é determinada a curva de distribuição do tempo de residência (DTR).

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo sobre o escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 da APERAM, visando melhorar as condições de flotações das inclusões não metálicas, possibilitando obter bobinas com melhor qualidade interna.

As bobinas laminadas a frio do aço AISI 430 oriundas das placas lingotadas na máquina 01 possuem desvio para a segunda qualidade (causado pela presença de inclusões) em torno de 4,0%, enquanto que as bobinas oriundas de placas lingotadas na máquina 02 o desvio é em torno de 1,0%.

2 – OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é estudar o perfil do escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 e propor configurações de modificadores do fluxo (dique e barragem) para melhoria da flotação de inclusões não metálicas.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Fazer o modelamento matemático do escoamento do aço no distribuidor do lingotamento contínuo 01;
- Conhecer o efeito da utilização de barragens e diques no escoamento do aço no distribuidor do lingotamento contínuo 01;
- Correlacionar o uso da barragem e dique no distribuidor do lingotamento contínuo 01, com o nível de inclusões não metálicas nas bobinas laminadas a quente oriundas de placas produzidas no distribuidor do lingotamento contínuo 01, com e sem a utilização de modificadores de fluxo.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Descrição Geral do Processo de Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo tornou-se a principal tecnologia de solidificação de aço, utilizada pelas empresas siderúrgicas atualmente. Isto se deve ao fato do lingotamento contínuo ser um processo que possibilita a produção de aço de forma seqüencial e contínua, o que proporciona ganhos de produtividade, rendimento físico e obtenção de produtos de melhor qualidade.

O processo de lingotamento contínuo é considerado essencialmente um processo de transferência de calor, em que o aço líquido é transformado via solidificação em produto sólido semi-acabado.

A figura 3.1 mostra uma visão esquemática do processo de lingotamento contínuo de placas.

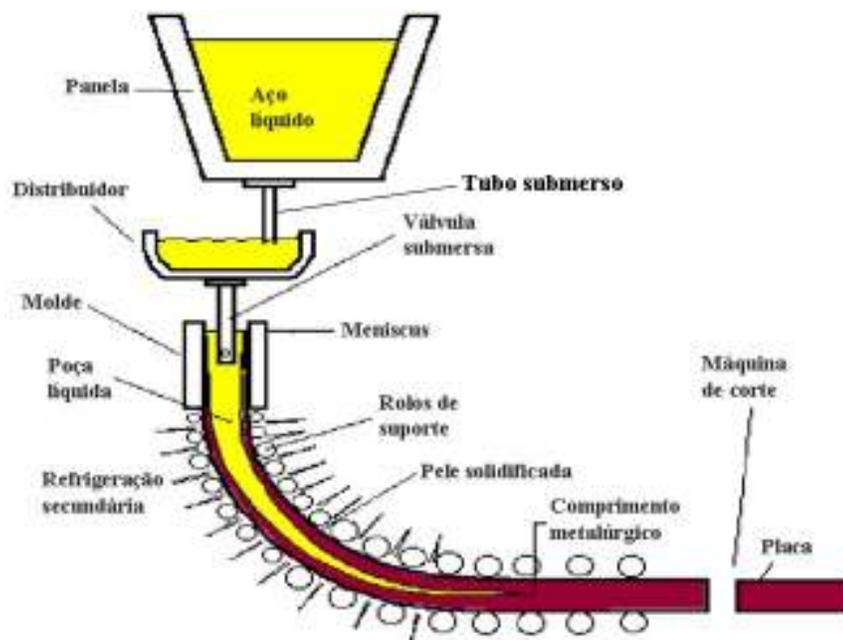


Figura 3.1 – Desenho esquemático da seção transversal da máquina de lingotamento contínuo de placas. (Fonte: http://ccc.illinois.edu/images/cast_techniques_sized.jpg. Acesso em 02/04/2014).

Antes do início do processo, uma “placa falsa” (denominada "barra-falsa") é inserida dentro do molde, para possibilitar o início de lingotamento.

Após a etapa do refino secundário, a panela contendo aço líquido deve ser transferida, no menor tempo possível, e colocada em um dispositivo de sustentação (normalmente utiliza-se o tipo “torre giratória”).

Da panela o aço é transferido para o distribuidor, através de uma peça refratária denominada “tubo submerso” (também chamado de válvula longa ou tubo longo). As principais funções do distribuidor são: servir de reservatório para possibilitar trocas de panelas e distribuir o aço para um ou mais veios (moldes). Quando o aço atinge uma altura pré-determinada, abre-se a válvula reguladora de vazão do distribuidor (válvula gaveta e/ou tampão), iniciando o enchimento do molde, através de um tubo refratário denominado “válvula submersa”. Também pode ser utilizada a transferência do aço pelo método denominado “jato aberto”, que é um método que não utiliza tubo refratário.

No molde é iniciada a solidificação do aço. Após o aço atingir um nível especificado no molde, a barra-falsa é extraída a uma taxa crescente de velocidade até atingir um estado estacionário de velocidade, definido em função da produtividade e qualidade requerida do produto.

O molde é composto de placas de cobre independentes refrigeradas à água, onde se processa o resfriamento primário do aço, com objetivo de formar uma camada solidificada com uma espessura tal que a torne resistente para suportar a pressão interna do metal líquido (pressão ferrostática) e as tensões mecânicas de extração e compressão da placa.

Para evitar a adesão da camada solidificada à superfície interna do molde, torna-se necessário a adição de um lubrificante (no caso de placas, é adicionado pó fluxante), bem como um movimento de oscilação vertical. O ciclo de oscilação do molde é geralmente senoidal, com a velocidade descendente do molde superando em determinado intervalo de tempo a velocidade de extração da placa. A principal função

do sistema de oscilação do molde é reduzir o atrito entre a placa solidificada e o molde, através da melhor distribuição do lubrificante em todo o perímetro do molde.

Imediatamente após a saída do molde, a placa é guiada e sustentada por rolos, sendo que alguns deles também são extratores. Nessa etapa é realizado o resfriamento secundário que tem como função continuar a extração de calor da placa, iniciada no molde, até que seja completada a solidificação. O resfriamento é realizado por uma bateria de sprays de água que é borrifada diretamente sobre a superfície da placa. Conforme Hibbins (1982), o principal ponto de extração de calor na placa está no impacto direto da água (61%), água drenada na placa (22%) e no contato do rolo na placa (17%). O resfriamento por sprays deve ser realizado de forma que a superfície da placa seja resfriada de forma contínua e homogênea, objetivando uma temperatura mais uniforme em toda a superfície da placa. Para facilitar o controle da vazão do resfriamento secundário, esta região é dividida em diversas zonas.

Logo abaixo do molde, caso a espessura da pele solidificada da placa seja insuficiente, existe uma tendência de abaulamento da mesma, devido à pressão ferrostática exercida pelo metal líquido que está no interior da placa. Para evitar a ocorrência deste defeito recomenda-se utilizar rolos de pequeno diâmetro e maior vazão de água. Essa região é extremamente importante para o bom desempenho operacional do lingotamento contínuo, e no caso do lingotamento contínuo de placas, o controle desta zona é realizado dividindo a mesma em subzonas independentes. Normalmente a refrigeração das faces estreitas das placas é realizada somente na primeira zona. Nas demais zonas, são posicionadas câmaras de sprays projetadas sempre com o objetivo de se obter um resfriamento uniforme da placa.

À medida que a placa se distancia do molde, com o gradual aumento da espessura solidificada, torna cada vez pronunciada a resistência térmica por condução no aço sólido, devendo-se reduzir proporcionalmente a vazão de água dos sprays. A Figura 3.2 mostra a distribuição de água da refrigeração secundária do aço SAE 1070, na máquina de lingotamento contínuo número 1 da APERAM.

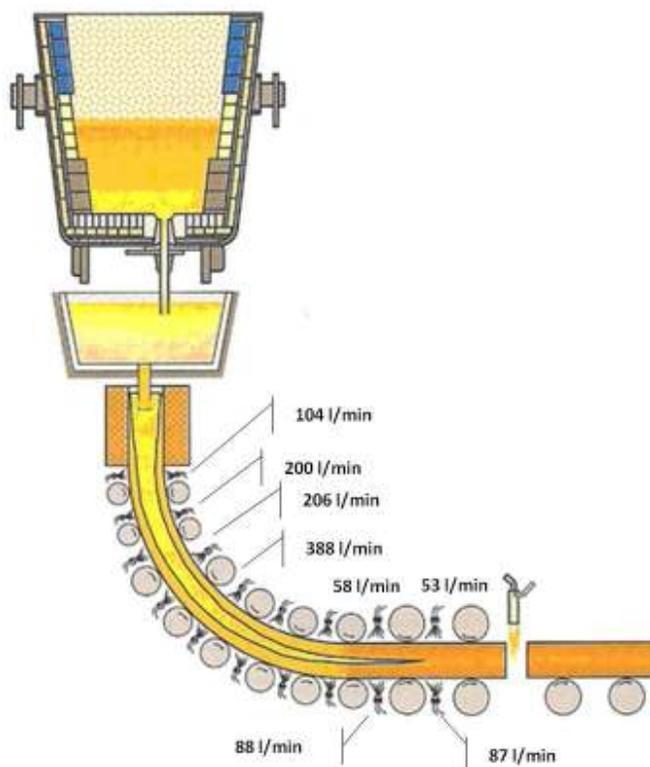


Figura 3.2 – Distribuição da água da refrigeração secundária do aço SAE 1070, na largura de placa de 1.220mm e velocidade de lingotamento de 0,70m/min, na máquina 01 da APERAM. Fonte: base de dados Metalúrgica do lingotamento contínuo 01. Imagem: Ernandes Marcos da Silveira Rizzo, Introdução aos processos de lingotamento dos aços. ABM.

No caso de máquinas de lingotamento contínuo curvas, a placa é retificada por pares de rolos, posicionados ao longo do veio da máquina de forma a realizar um dobramento e/ou desdobramento progressivo na placa, objetivando reduzir as tensões de flexão aplicadas na placa.

Logo após o último rolo da máquina, é localizada a máquina de corte, que secciona a placa em comprimentos pré-determinados pela equipe da programação e/ou controle da produção, para posteriores transformações. O corte das placas ocorre em função da fusão de uma fina camada de aço devido ao aquecimento provocado pelas seguintes reações químicas entre o ferro contido na placa de aço com o oxigênio (Ramalho, 2008):



Após o corte das placas lingotadas, as mesmas são colocadas em vagão ferroviário, que as transporta até o setor de resfriamento e condicionamento na laminação de tiras a quente. Esses vagões podem ser despachados com tampas térmicas especiais revestidas internamente com material refratário. Normalmente os aços transportados em vagões tampados são os aços sensíveis à trinca térmica quando resfriados ao ar.

3.2 – Inclusões no Aço Líquido

Inclusões são pequenas partículas dispersas na matriz metálica. As inclusões interrompem a continuidade da matriz metálica provocando alta concentração de tensões, por extinguir a distribuição uniforme de tensão.

Não é praticável, do ponto de vista de custo/benefício, produzir aços totalmente isentos de inclusões, apesar de serem sabidos os efeitos deletérios que as mesmas causam nos aços.

O termo *clean steel*, devido às considerações acima, passa a ser vago e relativo, pois o grau de limpidez de um aço vai depender das exigências das aplicações e, conseqüentemente, das propriedades requeridas.

A quantidade de inclusões presentes nos aços vai depender dos processos utilizados, das matérias-primas adicionadas e dos tratamentos a que os aços são submetidos. As inclusões geralmente são formadas durante o processo de fabricação do aço ainda no estado líquido.

Nesse sentido, as inclusões podem ser classificadas como endógenas e exógenas:

- ✓ Inclusões endógenas: são de origem interna e são resultantes do processo de desoxidação do aço (transformações de óxidos, inclusões de alumina, sílica, etc.) ou são partículas que se precipitam durante o resfriamento e a solidificação do aço (sulfetos, nitretos e carbonetos, precipitação do cobre e do chumbo, etc.).
- ✓ Inclusões exógenas: de origem externa, resultantes da entrada de escória no molde juntamente com o metal, da erosão mecânica do refratário do forno ou do refratário da panela de aço, das reações químicas entre o refratário do forno e/ou refratário da panela de aço com o metal e/ou a escória.

Quanto à composição química, as inclusões são classificadas em:

- ✓ Não metálicas: quando estão sob a forma combinada, como por exemplo: óxidos, sulfetos, nitretos, carbonitretos, etc.;
- ✓ Metálicas: quando estão sob a forma de elemento puro, como no caso do cobre, chumbo, estanho, etc.

No presente trabalho foram abordadas somente as inclusões não metálicas, por serem as que mais ocorrem nas bobinas laminadas a quente e/ou a frio na APERAM.

3.2.1 – Origens das inclusões não metálicas

O número, tipo, tamanho e a distribuição das inclusões não metálicas dependem, principalmente, das condições de como são realizados os processos de refino secundário, apesar do escoamento do aço no distribuidor exercer uma forte influência.

Conforme Zhang e Thomas (2003), as principais fontes de geração de inclusões são:

- ✓ reações químicas de desoxidação e dessulfuração: formam-se óxidos e sulfetos pela adição de elementos que possuem afinidade com o oxigênio e enxofre;
- ✓ reoxidação do aço líquido pelo ar atmosférico: formam-se óxidos com elementos remanescentes no banho;
- ✓ reações de tratamento para alteração da morfologia das inclusões realizadas de forma inadequada;

- ✓ arraste de escória, de pós de cobertura do distribuidor e de fluxantes no molde: geralmente, o arraste dessas inclusões ocorre durante as operações de transferência de aço líquido do distribuidor para o molde;
- ✓ erosão ou desgaste dos refratários utilizados na panela e no distribuidor.

As inclusões originadas na desoxidação do aço são inerentes ao referido processo, porém as inclusões originadas da reoxidação do aço, as que derivam do refratário, e as provenientes da escória, podem ser minimizadas ou eliminadas, através da otimização dos processos.

3.2.2 – Influências das inclusões sobre as propriedades do aço

É de suma importância conhecer os efeitos deletérios das inclusões remanescentes, tanto as de origem endógena como exógena, nas propriedades dos aços. De forma geral, tanto óxidos quanto sulfetos deterioram as propriedades mecânicas dos aços, principalmente a ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga e a usinabilidade do metal.

Entre os problemas causados pelas inclusões, destaca-se como um dos mais sérios a falha da peça durante a aplicação (quebra, desgaste prematuro, trincas, etc.).

Em geral, os efeitos das inclusões dependem (ASM Handbook, 1990):

- ✓ Do número de inclusões, das suas propriedades físicas (principalmente plasticidade);
- ✓ De seu tamanho e de sua geometria;
- ✓ De sua posição e orientação em relação à tensão e do limite de resistência à tração do aço;
- ✓ Da diferença do coeficiente de expansão térmica entre a inclusão e a matriz:
Caso o coeficiente de expansão térmica da inclusão seja maior do que o coeficiente do aço, durante o resfriamento a contração da inclusão será menor do que a contração da matriz, desenvolvendo uma tensão ao redor da inclusão iniciando uma trinca naquele local. Caso o coeficiente de expansão térmico da

inclusão seja menor do que o coeficiente do aço, não haverá problemas para a matriz.

As inclusões não metálicas podem induzir trincas por duas maneiras:

- ✓ Devido à incapacidade da inclusão em transferir as tensões existentes na matriz. Portanto, podem formar picos críticos de tensão ao redor destas inclusões, enquanto a matriz está em serviço (é solicitada), isto é, as inclusões têm um efeito direto na nucleação de trincas por fadiga em condição de carregamento de trabalhos cíclicos. Os aços de baixa dureza, portanto, são muito menos afetados do que os aços de elevada dureza;
- ✓ Inclusões que possuem um baixo índice de deformação, o que pode causar o surgimento de micro-trincas na interface metal/inclusão durante o trabalho a quente ou a frio.

Essas trincas presentes no metal já no serviço podem dar origem a posteriores fraturas por fadiga.

As inclusões que mais provocam defeitos no aço são as que deformam com a matriz, causando perda na ductilidade e tenacidade. Essas inclusões são as que mudam de forma com a matriz e, nesse caso, há uma deterioração das propriedades na direção transversal.

Algumas propriedades mecânicas dos aços, notadamente a ductilidade, são afetadas negativamente pela presença de inclusões não metálicas. A fratura dúctil nos aços se deve a inclusões, pois formam vazios ao redor das mesmas que, eventualmente, coalescem provocando fraturas no material. A tenacidade também é afetada negativamente, pois as inclusões comportam-se como pequenas trincas no interior do material.

As inclusões de alumina, espinélio e cálcio-aluminatos maiores do que 10 μ m nucleiam trincas devido à concentração de tensões localizadas, propiciando assim a diminuição da resistência à fadiga dos aços.

As inclusões de MnS, ao contrário, melhoram a usinabilidade dos aços, contribuindo para o aumento da vida útil das ferramentas de corte, em virtude de provocarem a fragilização dos cavacos. Entretanto, a presença de sulfetos alongados reduz drasticamente as propriedades mecânicas do aço tanto na direção da espessura quanto transversalmente, até mesmo para aços com baixo teor de enxofre. Deste modo, uma seqüência de sulfetos alongados pode servir como um caminho para a propagação de uma trinca. A soldabilidade e a resistência a corrosão dos aços também são prejudicadas.

Portanto, para assegurar as propriedades mecânicas e aplicação dos aços é de essencial importância conhecer o tipo de inclusão, quantidade, morfologia, a distribuição de tamanho, a área que ela ocupa em relação a todos os outros tipos de inclusões. Entretanto, como a presença de inclusões é inevitável, o controle de sua distribuição na matriz bem como o seu tamanho torna-se importante para determinar a probabilidade de presença de inclusões (principalmente de grande diâmetro) em locais críticos na matriz.

Em relação ao tamanho, as inclusões são geralmente divididas em duas classes: macroinclusões (50 a 100 μ m) e microinclusões (menor que 1 μ m).

Macroinclusões podem ser formadas por vários óxidos e sulfetos, podendo ser modificadas para reduzir danos às propriedades dos aços.

Microinclusões podem ser toleradas desde que não afetem as propriedades do aço, sendo que em alguns casos podem ser benéficas, como por exemplo, restringir o tamanho de grão e aumentar o limite de resistência e a dureza.

Assim, as inclusões são um importante fator na seleção de um aço em função de aplicações e projetos específicos (ASM Handbook, 1990).

Durante a caracterização dos defeitos ocasionados pela presença de inclusões nas bobinas dos aços AISI 430 laminadas a frio, foram feitas as seguintes observações:

- ✓ O defeito ocorre em ambas as faces das bobinas (superior e inferior). Em alguns casos de maior intensidade, é observada também na bobina laminada a quente;
- ✓ No resultado de análise dos defeitos no microscópio eletrônico de varredura (MEV), foram encontradas, predominantemente, inclusões de óxidos com forte presença de alumínio, sob a forma de Al/Si/Ca ou Al/Mg, conforme pode ser visto na figura 3.3.

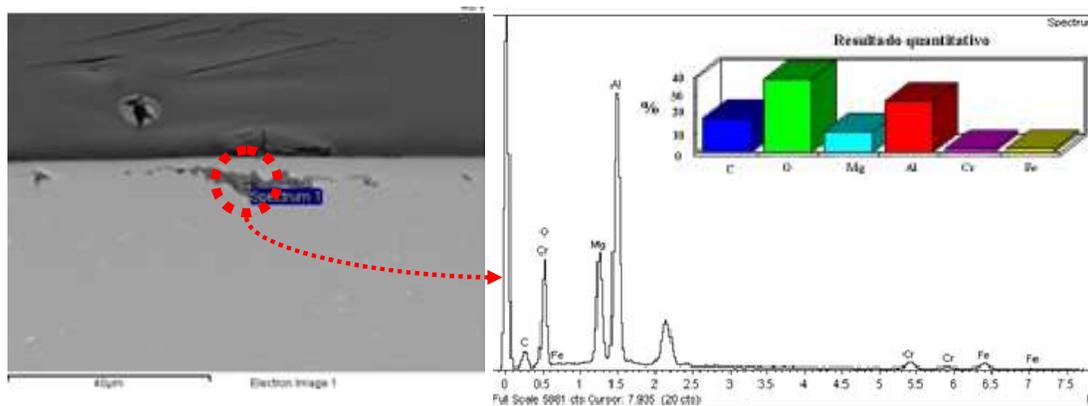


Figura 3.3.a

Figura 3.3.b

Figura 3.3 – Defeito ocorrido em uma bobina laminada a frio do aço AISI 430, após a linha de recozimento e decapagem final, da APERAM: 3.3.a) seção transversal da região do defeito; 3.3.b) resultado de análise química realizada no MEV.

3.3 – Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor

Conforme apresentado na seção 3.1, o distribuidor é um reator intermediário entre a panela e o molde, que tem como funções básicas servir de reservatório para possibilitar trocas de panas e distribuir o aço para um ou mais veios (moldes). Além dessas funções, o distribuidor no processo do lingotamento contínuo, possui outras funções operacionais, tais como:

- ✓ Ajudar na flotação e separação das inclusões não metálicas do aço líquido para a escória, visando uma melhor limpidez do produto final;
- ✓ Controlar a velocidade de lingotamento (extração da placa).

Conforme Szekely e Ilegbusi (1988), o distribuidor caracteriza-se pela existência de três zonas de fluxo distintas, definidas como:

- ✓ Zona de fluxo pistonado: é a fração do volume total do distribuidor que apresenta velocidade pontual máxima, que determina o tempo mínimo de residência do metal líquido no distribuidor, sendo ideal um valor mais alto com relação à flotação das inclusões não metálicas;
- ✓ Zona de mistura perfeita: é a fração que contribui para a eliminação dos gradientes de temperatura e de composição química no metal líquido. Essa região é caracterizada por um gradiente de velocidade causador de turbulência, que pode promover o arraste de inclusões não metálicas para dentro do aço líquido, distúrbios na flotação das inclusões não metálicas e o aumento da taxa de reoxidação do metal líquido;
- ✓ Zona de volume morto: é a fração de volume total do distribuidor que possui velocidade baixa o suficiente para ser considerada estagnada. Esta zona é indesejada, pois reduz efetivamente o volume útil do distribuidor, além de provocar a perda de temperatura do aço líquido e a segregação de elementos químicos. A presença dessa zona indica o uso ineficiente do volume do distribuidor.

Conforme Shinde et al. (2006), existe outra zona de fluxo de aço no distribuidor, denominada de “curto circuito”. Essa zona é representada pela porção do fluido que entra no distribuidor, movimenta-se pelo fundo e sai em um intervalo de tempo curto o suficiente para não permitir que as inclusões existentes nesta porção do líquido sejam direcionadas para a superfície do aço líquido. Portanto, esta zona é indesejável e deve ser eliminada, uma vez que reduz o tempo mínimo de residência do aço líquido no distribuidor e propicia a transferência das inclusões do distribuidor para o molde. Wollman et al. (1998) observou que o comportamento do “curto circuito” pode ser evitado, principalmente com o uso de barragens próximas à região de impacto do jato da panela.

A maioria dos modelamentos físicos e matemáticos do distribuidor, que objetivam avaliar o escoamento do fluido e os fenômenos relacionados à flotação e separação das

inclusões, não levam em consideração o comportamento não isotérmico do escoamento nem a coalescência das inclusões. Esses modelamentos visam principalmente (Hughes et al., 1995):

- ✓ Otimizar a configuração dos dispositivos de modificadores de fluxo presentes no distribuidor;
- ✓ Avaliar a possibilidade de aumento do tempo de residência do aço no distribuidor de modo que otimize a flotação das inclusões;
- ✓ Minimizar o grau de mistura do metal líquido no distribuidor;
- ✓ Minimizar a taxa de reoxidação do metal líquido no distribuidor ou durante a transferência do metal da panela para o distribuidor;
- ✓ Otimizar os sistemas de controle do nível de metal líquido no distribuidor.

A crescente demanda de aço e o aumento da exigência de produtos com melhor qualidade interna e superficial (maiores níveis de limpidez e melhor controle da composição química) têm sido preponderantes para o desenvolvimento de projetos corretos e eficientes dos distribuidores.

De acordo com Costa Neto (1997), a otimização do projeto de distribuidores consiste em:

- ✓ Eliminação das zonas mortas;
- ✓ Eliminação dos curtos circuitos;
- ✓ Maximização do tempo de residência do aço no distribuidor;
- ✓ Eliminação da ocorrência de vórtices;
- ✓ Redução da turbulência junto à superfície do metal;
- ✓ Manutenção da homogeneização térmica.

3.4 – Utilização de Modificadores de Fluxo no Distribuidor

Conforme citado no item 3.1, uma das funções do distribuidor é fornecer um fluxo contínuo de aço entre a panela e o molde.

O objetivo da otimização do escoamento do aço no distribuidor é promover condições para maximizar a remoção de inclusões, evitando, ao mesmo tempo, problemas de escoamento como turbulências superficiais excessivas, curtos circuitos, zonas mortas e formação de vórtices.

O escoamento do aço no distribuidor deve proporcionar um fluxo de modo a direcionar as inclusões para a superfície, com um nível ótimo de turbulência, evitando ao mesmo tempo, emulsificação e arraste de novas inclusões.

O escoamento no distribuidor é influenciado principalmente por suas dimensões e geometria, e pela utilização de dispositivos modificadores de fluxo, tais como dique, barragem e inibidores de turbulência.

Existem diversos estudos que apresentam os benefícios da utilização destes dispositivos no escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo.

Todos os estudos relativos à utilização dos modificadores de fluxo procuram um acréscimo no tempo de residência médio do aço no distribuidor por meio do aumento do escoamento pistonado, objetivando favorecer a flotação das inclusões não metálicas e, conseqüentemente, aumentar a limpidez das placas produzidas no lingotamento contínuo.

Para aumentar a limpidez da placa de aço, é bem conhecido o procedimento, em que, mediante a inserção apropriada de modificadores de fluxo, o escoamento do aço líquido pode ser controlado e a maioria das inclusões podem ser removidas.

Os diques e as barragens foram os primeiros modificadores de fluxo utilizados no distribuidor. Embora alguns benefícios no controle do escoamento sejam alcançados, observa-se a formação de zonas de volumes mortos através dos dispositivos, conforme mostrado na Figura 3.4.

O dique pode garantir a retenção da camada de escória proveniente da panela e ajudar a conter a turbulência próxima à região de entrada, contudo, esse dispositivo não pode eliminar completamente o “curto circuito”. Por outro lado a barragem pode eliminar completamente o “curto circuito”, direcionar o fluxo de aço para a superfície do aço. Essa condição contribui para que as inclusões sejam capturadas, e tem o potencial de reduzir drasticamente a energia cinética de turbulência do jato de aço dentro da região de entrada. Como consequência disso, o escoamento do aço líquido no distribuidor tende a ser mais uniforme.

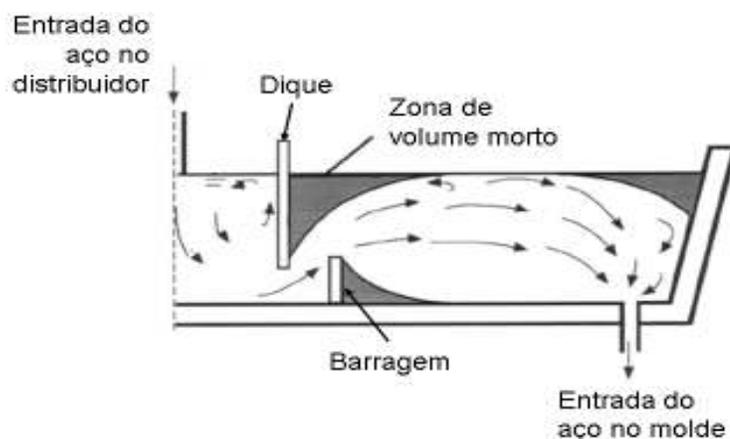


Figura 3.4: Regiões de formação de zonas de volumes mortos presentes no distribuidor (Thomas, 1997).

A barragem e o dique têm sido aplicados em conjunto para produzir os resultados desejados no processo de lingotamento contínuo. Muitos estudos mostram claramente que as condições para flotação e separação das inclusões não metálicas no distribuidor, tais como a ausência de “curto circuito”, uma região de turbulência confinada próxima à entrada do fluxo de aço proveniente da panela, alto tempo de residência médio, etc., podem ser efetivamente criadas utilizando uma combinação apropriada desses modificadores de fluxo de aço no distribuidor.

Barbosa et al. (2005) obtiveram um aumento de aproximadamente 25% no tempo de residência médio do aço no distribuidor, redução de 75% nas frações de volume morto, um aumento de 50% na fração de volume pistonado e 12% na fração de volume de

mistura, quando foram utilizados inibidores de turbulência, barragens e diques no escoamento do aço no interior do distribuidor.

Wolmann et al. (1998) testaram modificadores de fluxo, barragens e diques, em um distribuidor do formato “delta T” com três veios, e conseguiram aumentar, tanto para o veio central quanto para os veios laterais, o tempo mínimo e médio de residência.

Morales et al. (1999) consideraram em seus estudos (modelamento físico e matemático) três arranjos diferentes e dois tipos de distribuidores, sendo:

- Três arranjos diferentes:
 - ✓ Distribuidor sem modificadores de fluxo;
 - ✓ Distribuidor com arranjo W&B: distribuidor equipado com um par de diques (*weirs*) e um par de placas de desvios (*baffles*);
 - ✓ Distribuidor com arranjo TI&B: distribuidor equipado com um inibidor de turbulência e um par de placas de desvios (*baffles*).

- Dois tipos de distribuidores:
 - ✓ Distribuidor de dois veios de uma máquina de lingotamento contínuo de placas: sem modificadores de fluxo e com arranjo W&B;
 - ✓ Distribuidor de quatro veios de uma máquina de lingotamento contínuo de blocos: com arranjo TI&B.

Onde:

- W = *weirs* – diques;
- B = *baffles* - placas de desvios ;
- TI – *turbulence inhibitor* - inibidor de turbulência.

Conforme a Tabela III.1 e Figuras 3.5 e 3.6, Morales et al. (1999) chegaram às seguintes conclusões nos seus estudos:

- ✓ O arranjo TI&B foi mais efetivo para eliminar a turbulência e distúrbios permitindo um fluxo mais suave do aço no distribuidor;
- ✓ O arranjo TI&B produziu uma maior relação entre volume pistonado/volume morto entre os três casos estudados;
- ✓ As forças de flotação afetam os padrões de escoamento do aço líquido em condições não isotérmicas;
- ✓ O arranjo TI&B ajudou a mitigar os efeitos das mudanças de temperaturas do aço na entrada do distribuidor, dando resposta mais lenta para os distúrbios térmicos;
- ✓ Como consequência da conclusão precedente da mistura térmica em um distribuidor sem modificadores e em um distribuidor equipado com arranjo do tipo W&B, os resultados dessas duas condições são muito similares entre si (Tabela III.1) e ambos resultados são diferentes dos resultados do distribuidor com arranjo do tipo TI&B.

Tabela III.1: Parâmetros de escoamento derivados do modelo físico a água. (Morales et al., 1999).

Parâmetro	Distribuidor sem dispositivo de controle de fluxo	Arranjo W&B	Arranjo TI&B
Tempo mínimo de residência (s)	24,9	24,9	67,6
Tempo de concentração máxima (s)	57,5	75,0	110,0
Tempo de residência médio (s)	150,0	152,4	175,0
Fração de escoamento pistonado (%)	0,070	0,065	0,200

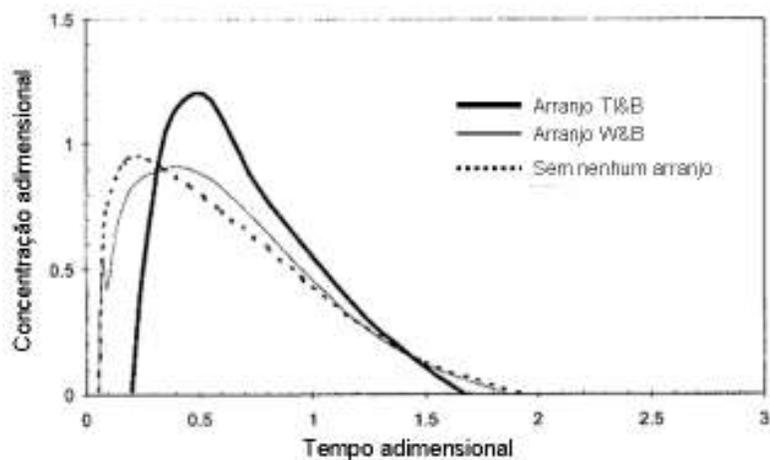


Figura 3.5: Curvas experimentais do tempo de residência para um distribuidor sem arranjo de modificadores de fluxo, arranjos do tipo W&B e TI&B (Morales et al., 1999).

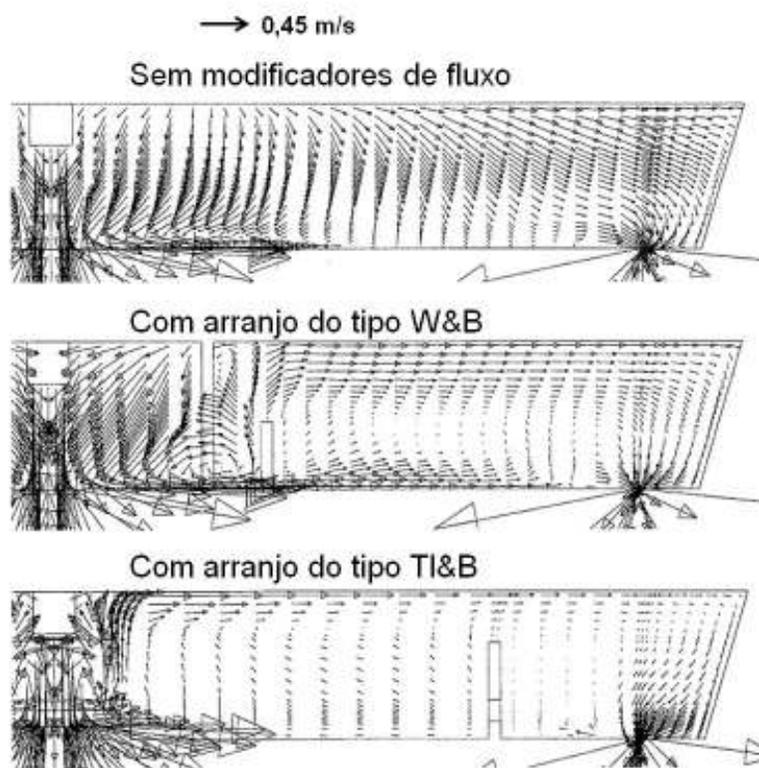


Figura 3.6: Perfis de velocidade do aço líquido no distribuidor sem dispositivo de controle de fluxo, com arranjo W&B, de modificadores de fluxo, arranjos do tipo W&B e com arranjo do tipo TI&B (Morales et al., 1999).

3.4.1 – Distribuidores do Lingotamento Contínuo 01 e 02 da APERAM

A APERAM possui duas máquinas de lingotamento contínuo com um único veio cada, sendo que a máquina 1 normalmente produz os aços carbono e siliciosos e a máquina 2 os aços inoxidáveis. Em função da carteira de produção, eventualmente produz-se os aços inoxidáveis em ambas as máquinas de lingotamento.

Devido às características inerentes do projeto de fabricação de cada máquina de lingotamento, os distribuidores possuem diferenças dimensionais e geométricas entre si, apesar de possuírem a mesma capacidade de 15t.

Conforme mostrado na Figura 3.7, o distribuidor 1 é mais alto e possui menor distância entre a entrada e a saída do aço no distribuidor

Essa diferença é uma das variáveis de processo que impacta negativamente nos resultados de qualidade interna e superficial dos aços inoxidáveis, observados durante a inspeção das bobinas laminadas a frio (denominadas linhas de recozimento das bobinas, “RB”), após o recozimento e decapagem. Em casos mais graves, as inclusões não metálicas são também observadas nas bobinas laminadas a quente.

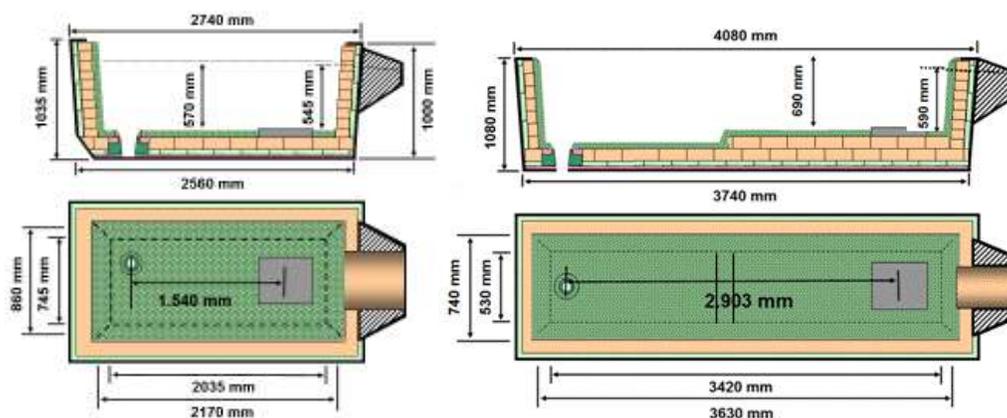


Figura 3.7: Desenhos ilustrativos dos distribuidores 01 e 02 da APERAM, destacando as diferenças dimensionais e de forma entre eles. Fonte: Práticas padrões internas de montagem refratárias dos distribuidores.

Na APERAM, têm-se dois critérios para mensurar a influência de determinada variável na qualidade final (interna e superficial) do produto laminado a quente e/ou a frio:

- ✓ Bobina “desviada” por determinado defeito: quando a intensidade do referido defeito na bobina possui um nível de intensidade que impossibilita o direcionamento da mesma para a aplicação originalmente programada. Nesse caso a bobina é direcionada para uma aplicação menos nobre, denominada “segunda qualidade”. Em casos de intensidade de inclusões mais graves, a bobina pode até ser sucutada, comprometendo o atendimento ao cliente final e os custos de produção;
- ✓ Bobina com “ocorrência” de determinado defeito: quando a intensidade do referido defeito na bobina possui um nível mais leve do que o citado acima e não impossibilita o direcionamento da mesma para a aplicação originalmente programada. Esse indicador é muito importante para o acompanhamento do processo, pois é um indicativo da presença de determinado defeito nas bobinas laminadas a quente e/ou a frio, servindo como balizadores para tomadas de ações preventivas nos processos de fabricação do aço.

Como pode ser observado na Figura 3.8, as bobinas oriundas de placas lingotadas na máquina 01 são muito mais susceptíveis à presença de inclusões no produto laminado a frio do que as bobinas oriundas de placas lingotadas na máquina 02.

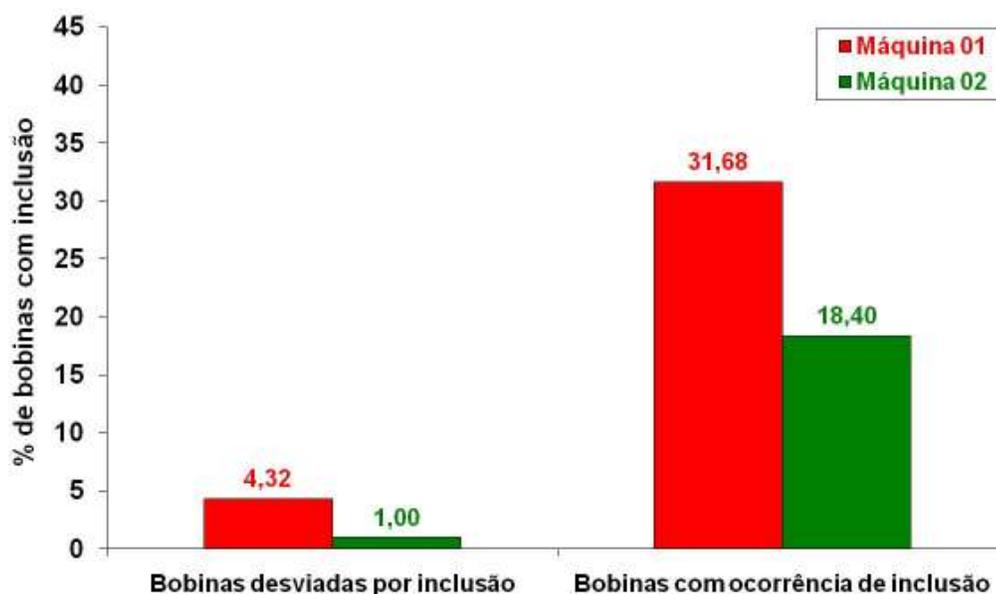


Figura 3.8: Comparação do resultado de qualidade superficial das bobinas laminadas a frio, do aço AISI 430 oriundas de placas produzidas na máquina 01 e 02. Esse resultado foi medido durante a inspeção das bobinas laminadas a frio nas linhas de recozimento final. Período considerado: janeiro 2010 a abril 2014. Fonte SAI (Sistema de Acompanhamento de Inox – APERAM).

Para análise da influência da geometria do distribuidor na qualidade do produto final, foram consideradas somente as bobinas laminadas a frio, pois 80% das bobinas dos aços inoxidáveis da APERAM são destinadas para este fluxo de produção.

3.5 – Modelamento Matemático do Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor

3.5.1 – Introdução

A análise dos processos metalúrgicos visando os diagnósticos de problemas operacionais, o seu aprimoramento e otimização, e o desenvolvimento de novos processos, exigem a utilização de modelos matemáticos e/ou físicos dos processos em questão.

Problemas relativos à influência da convecção natural e quantificações, como por exemplo, da velocidade, energia cinética de turbulência, perfis de temperaturas e distribuição de tempos de residência e volumes característicos nos distribuidores, são mais facilmente tratados através de simulação numérica.

Um modelo matemático é usualmente constituído de um sistema de equações algébricas e diferenciais que representam quantitativamente o processo ou alguns de seus aspectos. O estabelecimento de um modelo depende do conhecimento das leis que governam o sistema, da capacidade de expressá-las matematicamente e da habilidade matemática para a solução das equações.

Os modelos matemáticos têm como objetivo ajudar a determinar as melhores condições de operação, nas diversas situações encontradas na prática.

3.5.2 – Teoria do modelamento matemático da fluido-dinâmica

A utilização da fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) remonta à década de 1970, onde inicialmente era utilizado apenas como ferramenta para análise de problemas físicos, matemáticos e, em alguns casos, empregado na ciência da computação para simular escoamento dos fluídos (Blazek, 2001).

A CFD é uma importante ferramenta utilizada para a simulação do comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluídos, transferência de calor e outros processos físicos correlatos. É originada de diferentes disciplinas da mecânica dos fluídos e transferência de calor.

Segundo Tu et al. (2008), atualmente a CFD não é somente a disciplina de mecânica dos fluídos com matemática, mas também com a ciência da computação, conforme ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9: Diferentes disciplinas contidas na CFD (Tu et al., 2008).

O modelamento matemático possui algumas vantagens, conforme descrito por Patankar (1980):

- ✓ Baixo custo: é um das principais vantagens, pois, na maioria das aplicações o custo de aquisição de um computador é muito menor que o custo correspondente à investigação experimental (modelos físicos). Além disso, enquanto os custos da maioria dos itens utilizados nas investigações experimentais tendem a aumentar, os custos de computação tendem a diminuir;
- ✓ Velocidade: uma investigação computacional pode ter um bom desempenho com uma considerável velocidade. Diversas configurações diferentes podem ser estudadas e escolhida a melhor configuração, em poucos dias. Ao contrário, uma investigação experimental correspondente pode gastar muitos dias;
- ✓ Informações completas (detalhadas): o modelo matemático pode fornecer os valores de todas as variáveis mais relevantes de todo o domínio estudado;
- ✓ Habilidade para simular condições reais: em um cálculo teórico, as condições reais podem ser facilmente simuladas, e não existe a necessidade de se utilizar modelos em pequenas escalas ou modelos a frio. No modelamento matemático existe pouca dificuldade em ter dimensões muito pequenas ou muito grandes, no tratamento de temperaturas muito baixas ou muito altas, na manipulação de

substâncias tóxicas ou inflamáveis, ou em acompanhar processos muito lentos ou muito rápidos;

- ✓ Habilidade para simular condições ideais: o método de predição é utilizado algumas vezes no estudo de fenômenos simples, ao invés de uma aplicação de engenharia complexa. Em um estudo de um fenômeno básico, tem-se atenção especial para alguns parâmetros essenciais e procura-se eliminar todas as características de pouca importância. Assim, muitas condições ideais são analisadas, tais como: duas dimensões, densidade constante, superfície adiabática, etc.

Os modelos matemáticos, utilizados para a solução de problemas envolvendo escoamento de fluidos, devem descrever os aspectos mais importantes do problema a ser estudado. No caso do processo de lingotamento contínuo, para o modelamento matemático devem ser utilizadas as equações para escoamentos turbulentos.

O modelamento matemático consiste em um conjunto de equações de conservação global de massa (equação da continuidade), da quantidade de movimento e das grandezas de turbulência (no caso de escoamento turbulento). Estas equações devem ser resolvidas simultaneamente.

A equação mais utilizada é a equação geral de conservação (equação 3.4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (3.4)$$

Onde:

ϕ = variável dependente;

ρ = densidade do fluido;

t = tempo;

Γ_{ϕ} = coeficiente de difusão da variável ϕ ;

S_{ϕ} = termo fonte.

A definição adequada da variável dependente, do coeficiente de difusão e do termo fonte, permite expressar todas as equações de conservação (de massa, quantidade de movimento e grandezas de turbulência).

Existem muitos estudos que apresentam os benefícios da utilização dos modelos matemáticos para análise do processo de lingotamento contínuo, visando o diagnóstico de problemas operacionais, para seu aprimoramento e otimização, e mesmo para desenvolvimento de novos processos.

Conforme Kruger (2010), as análises numéricas das curvas DTR permitem que as características internas do escoamento dos distribuidores sejam obtidas de maneira rápida e confiável, auxiliando no processo de melhoria de qualidade do aço produzido. Os resultados obtidos em seus estudos, com objetivo de desenvolver um procedimento computacional de escoamento de aço no interior do distribuidor, evidenciaram a importância e robustez dos métodos numéricos, auxiliando na avaliação de diferentes geometrias e localizações de modificadores de fluxo (barragens, diques, inibidores de turbulência e tampões).

Segundo Elias (2010), em função de uma boa concordância entre os resultados obtidos no modelamento matemático com os de modelagem física, pode-se tomar decisões a partir das previsões do modelo matemático, sem a necessidade de realização de experimentos.

Os resultados obtidos pelo modelo matemático possibilitam a análise de pontos críticos no escoamento, facilitando a sugestão de mudanças objetivando alcançar a melhor configuração de modificadores de fluxo para aperfeiçoar o escoamento do aço.

3.6 - Curvas de Distribuição de Tempos de Residência (DTR)

Os distribuidores possuem diversas configurações geométricas e podem possuir vários componentes internos como diques, barragens e inibidores de turbulência. Assim, diante de tantas variáveis, determinar um padrão de escoamento no seu interior torna-se

bastante complexo. Uma das técnicas mais difundidas e utilizadas para caracterizar o fluxo de aço no interior do distribuidor está relacionada à empregada em reatores químicos e consiste basicamente na análise das curvas de distribuição dos tempos de residência.

O tempo de residência de um fluido em um distribuidor é definido como o tempo de cada elemento do fluido gasta para passar através do seu interior, desde a sua entrada até a saída. Assim, o escoamento do fluido no interior do distribuidor geralmente é representado por uma distribuição de tempos de residência para diferentes elementos do fluido. Para o escoamento no interior de distribuidor do lingotamento contínuo é desejado que diferentes porções do fluido possuam basicamente o mesmo tempo de residência. Conforme Sahai e Emi (1996) os distribuidores são concebidos para possuírem o mínimo de regiões de estagnação (zona morta).

Em modelos físicos e matemáticos, a curva de distribuição de tempos de residência de um reator é calculada através da injeção de um traçador na região de entrada e o monitoramento de sua concentração na saída. A Figura 3.10 mostra uma curva típica de distribuição de tempos de residência para um distribuidor no lingotamento contínuo, onde C representa a concentração adimensionalizada do traçador na saída do distribuidor e θ o tempo adimensionalizado.

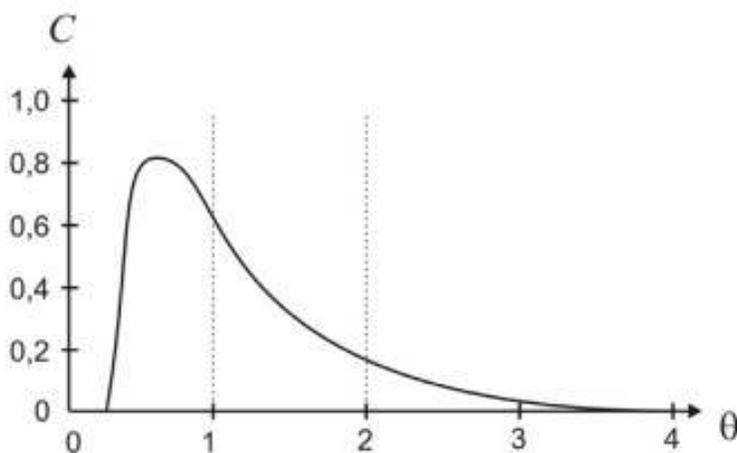


Figura 3.10: Curva típica de distribuição de tempos de residência (DTR) para um distribuidor de lingotamento contínuo.

Destaca-se na Figura 3.10 que a injeção do traçador corresponde ao tempo zero da curva DTR.

Conforme Singh e Koria (1993), as curvas DTR representam características particulares de cada distribuidor, e são dependentes da configuração geométrica e operacional do equipamento. Dessas curvas extraem-se valores de tempos e volumes característicos.

Diversas metodologias podem ser aplicadas sobre as curvas de distribuição para obtenção das características do escoamento. No presente estudo, foi adotada a metodologia proposta por Sahai e Emi (1996) conhecida por Modelo Combinado (*Combined Model*). O modelo assume que o escoamento no interior do distribuidor é composto basicamente por três tipos de regiões ou volumes, sendo elas: região de volume pistonado, região de volume de mistura e região de volume morto. O escoamento pode ser então representado pela combinação entre regiões de volume pistonado e de mistura, como mostrado na Figura 3.11.

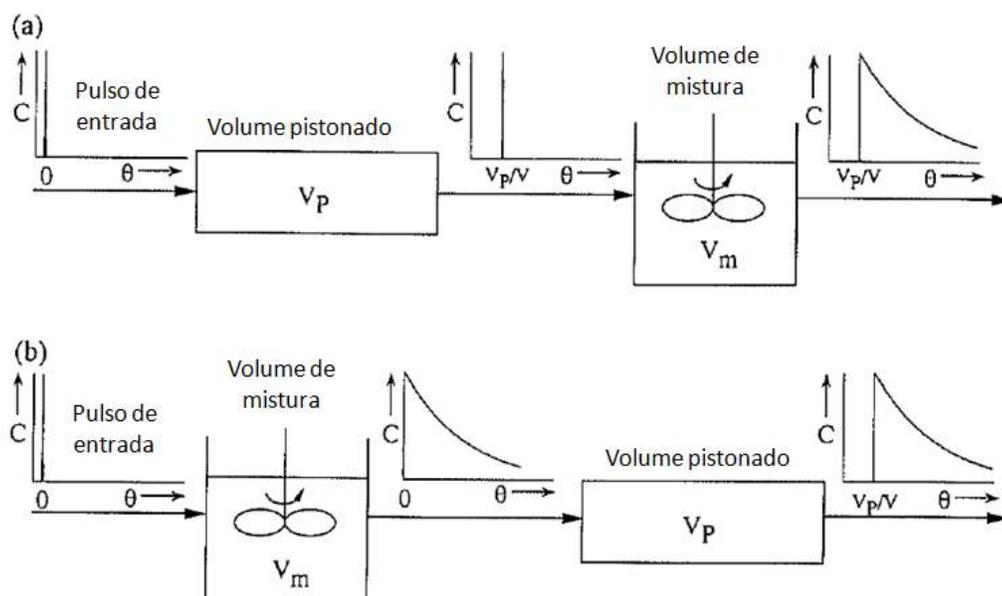


Figura 3.11: Modelo combinado representando os volumes pistonado e de mistura (Sahai e Emi, 1996). (Adaptado).

O modelo considera então que o escoamento no interior do distribuidor é representado por uma parcela de volume ativo, composto pelo volume pistonado e de mistura, e uma parcela de volume morto.

Os volumes característicos, já anteriormente mencionados no item 3.3, representam porções do fluido no interior do distribuidor e são assim caracterizados:

- Volume pistonado (V_p): fração do fluido que se caracteriza por não haver mistura no sentido longitudinal, ou seja, não há mistura entre materiais injetados em instantes de tempos distintos. Conforme Levenspiel (1974) o tempo de residência é constante para qualquer elemento do fluido;
- Volume de mistura (V_m): ao contrário do volume pistonado, caracteriza-se pela grande mistura do escoamento. Essas regiões são importantes para ajudar o coalescimento das inclusões;
- Volume morto (V_d): o volume morto possui várias definições (Sahai e Emi, 1996), sendo que no presente trabalho é caracterizado como a porção do fluido que permanece no interior do distribuidor por um período de tempo superior a duas vezes ao tempo médio de residência. Geralmente o volume morto ocasiona na formação de materiais heterogêneos nos veios de saída, problemas de solidificação prematura e formação de formação de curto circuito;
- Volume de curto circuito (V_{sc}): fração de volume com comportamento semelhante ao volume pistonado, porém com um tempo de permanência muito curto. Esse tipo de volume pode ser evitado com a utilização de barragens e inibidores de turbulência que impendem que o fluido seja direcionado imediatamente para o molde.

Além dos volumes característicos, outra variável importante e utilizada na metodologia são os tempos característicos, que são definidos como:

- Tempo teórico de residência ($t_{teórico}$): definido pela razão entre o volume ocupado pelo fluido no interior do distribuidor, V_D , e a vazão volumétrica do distribuidor, Q_D . Importante notar que este tempo independe da curva de concentração e está simplesmente relacionado às características do sistema, e serve como referência para os demais tempos característicos:

$$t_{teórico} = \frac{V_D}{Q_D} \quad (3.5)$$

- Tempo médio de residência (θ_m): representa a média dos tempos de residência de todo o fluido no interior do distribuidor. O tempo médio de residência fornece a principal informação de escoamento com relação ao grau de limpeza do aço. Conforme Sahai e Ahuja (1986), em um distribuidor é desejável que a distribuição de tempos seja uniforme e o tempo médio de residência seja maximizado, a fim de favorecer a remoção de inclusões não-metálicas;
- Tempo mínimo de residência (t_{min}): representa o tempo em que as primeiras concentrações do traçador começam a aparecer nos veios de saída;
- Tempo de pico (t_{pico}): tempo característico que representa a maior quantidade de elementos do fluido que deixam o distribuidor ao mesmo instante. Em uma curva DTR, conforme mostrada na Figura 3.10, o tempo de pico é o tempo correspondente à máxima concentração detectada.

Com os parâmetros definidos, a primeira etapa para caracterização dos distribuidores consiste na adimensionalização da curva DTR. A adimensionalização é importante para tirar qualquer influência de quantidade de traçador injetada em cada caso e estabelecer um critério de comparação, uma vez que os distribuidores podem apresentar tempos teóricos de residência distintos.

A adimensionalização do tempo, θ_n , é realizada dividindo-se cada instante de tempo, t_i , desde o instante da injeção, pelo tempo teórico de residência, t , como

$$\theta_n = \frac{t_i}{t_{teórico}} \quad (3.6)$$

Os tempos mínimo e de pico definidos anteriormente seguem a mesma metodologia e, portanto, ficam respectivamente:

$$\theta^{min} = \frac{t_{min}}{t_{teórico}} \quad (3.7)$$

$$\theta^{pico} = \frac{t_{pico}}{t_{teórico}} \quad (3.8)$$

Para a adimensionalização da variável concentração de traçador é utilizado um valor de referência, C_r , definido pela relação entre a massa do traçador injetada, m_t , e o volume do distribuidor, V_d . Assim:

$$C^r = \frac{m_t}{V_d} \quad (3.9)$$

e o valor normalizado da concentração, C_n :

$$C^n = \frac{C^i}{C^r} \quad (3.10)$$

O tempo médio de residência, $\bar{\theta}_{med}$, pode ser calculado pela equação:

$$\bar{\theta}_{med} = \frac{\sum_{\theta=0}^2 \theta^i C^i}{\sum_{\theta=0}^2 C^i} \quad (3.11)$$

Para se construir a curva DTR é feito um gráfico C_n versus θ_n . Conforme Levenspiel (1974) é conveniente representar a DTR de tal maneira que a área sob a curva seja unitária, ou seja:

$$\int_{\theta=0}^{\theta=\infty} C_n d\theta = 1 \quad (3.12)$$

A fração de volume ativo que compõe o escoamento é representada pela relação entre a vazão volumétrica da região ativa do distribuidor, Q_a , e a vazão volumétrica total do distribuidor, Q_D , e pode ser definida pela área sob a curva $C(\theta)$ até $\theta = 2$:

$$\frac{Q_a}{Q_D} = \sum_{\theta=0}^2 C^i \Delta\theta \quad (3.13)$$

Assim a fração de volume morto é calculada pela seguinte equação:

$$V^d = 1 - \frac{Q_a}{Q_D} \bar{\theta}_{med} \quad (3.14)$$

A fração de volume pistonado é calculada pela seguinte equação:

$$\frac{V_P}{V_D} = \theta^{min} \quad (3.15)$$

Por fim, a fração de volume de mistura fica:

$$V_M = I - V_d - V_p \quad (3.16)$$

Essa metodologia permite quantificar e qualificar o escoamento no interior de um distribuidor de lingotamento e comparar entre várias configurações de maneira a atingir as características desejadas.

Na otimização do escoamento em um distribuidor se buscam as seguintes características:

- ✓ maior volume pistonado;
- ✓ menor volume morto;
- ✓ maior tempo médio;
- ✓ maior tempo mínimo;
- ✓ maior remoção das inclusões.

Dentre todas as características somente a remoção de inclusões não pode ser obtida de forma direta com a metodologia indicada acima. Os volumes e tempos característicos podem fornecer de forma indireta uma idéia em termos de melhorias no processo de remoção de inclusão.

4 – METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

- ✓ 1ª etapa: desenvolvimento do modelo matemático do sistema para análise do escoamento do aço no distribuidor, incorporando modificadores de fluxo, obtenção das curvas DTR e dos tempos e volumes característicos e identificação de configuração mais adequada dentre as testadas;
- ✓ 2ª etapa: produção de corridas com modificadores de fluxo na configuração selecionada através do modelo matemático, para validação do modelamento matemático.

A seguir, as etapas do trabalho serão descritas.

4.1 – Modelamento Matemático

Para o desenvolvimento do modelamento matemático foi utilizado o software comercial ANSYS CFX 14.0, que é um software baseado no método dos volumes finitos para a solução de problemas da dinâmica dos fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*). O domínio escolhido é dividido em volumes de controle. As equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e das grandezas de turbulência são discretizadas e resolvidas utilizando-se métodos iterativos para cada volume de controle. Além destes pontos, o software permite escolher modelos de turbulência e simular o escoamento nos estados estacionário e transiente.

O modelamento matemático do escoamento do aço no distribuidor foi realizado considerando três configurações que estão mostradas na Figura 4.1 e são assim denominadas:

- Configuração 01 - distribuidor atual sem modificadores de fluxo;
- Configuração 02 - distribuidor com dique e barragem, sendo que o dique foi posicionado a 1.000mm da entrada do aço líquido no distribuidor (tubo submerso), e a barragem a 200mm do dique.

- Configuração 03 - distribuidor com dique e barragem, sendo que o dique foi posicionado a 792,5mm da entrada do aço líquido no distribuidor (tubo submerso), e a barragem a 500mm do dique.

As posições do dique e da barragem foram adaptadas de um projeto de melhoria da qualidade das placas lingotadas na máquina 1, proposto pelo fornecedor de insumos refratários do lingotamento contínuo APERAM.

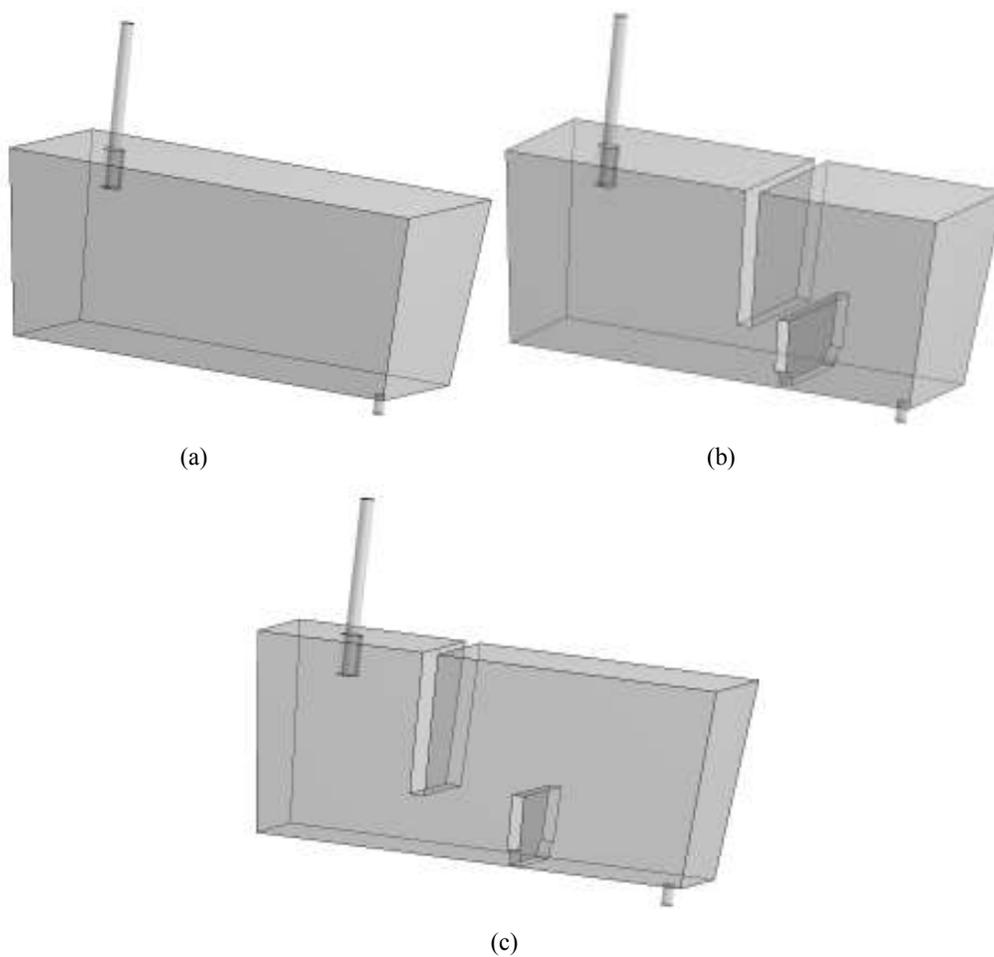


Figura 4.1: Desenho dos distribuidores mostrando a Configuração 01 (a), Configuração 02 (b) e Configuração 03 (c).

Para desenvolvimento do modelo matemático, foram feitas as seguintes considerações:

- Sistema isotérmico;
- Superfície do aço no distribuidor é plana e mantida em nível constante;
- O efeito da camada de escória pode ser desprezado. As simulações consideram apenas o aço líquido;
- Propriedades físicas do aço uniformes e constantes, sendo densidade de 7.020kg/m^3 e viscosidade de $6,5.10^{-3}\text{Pa.s}$.

Para a simulação do escoamento turbulento tridimensional do fluido no distribuidor, foram seguidos os seguintes passos:

- 1º passo: construção da geometria e da malha do sistema;
- 2º passo: configuração da simulação: estados estacionário e transiente;
- 3º passo: solução das equações de conservação;
- 4º passo: pós-processamento dos resultados.

Cada passo será explicado detalhadamente a seguir.

4.1.1 – Construção da geometria e da malha

Para a realização da simulação foi considerado todo o distribuidor, pois não há plano de simetria, como pode ser observado na vista superior do distribuidor, mostrada na Figura 4.2.

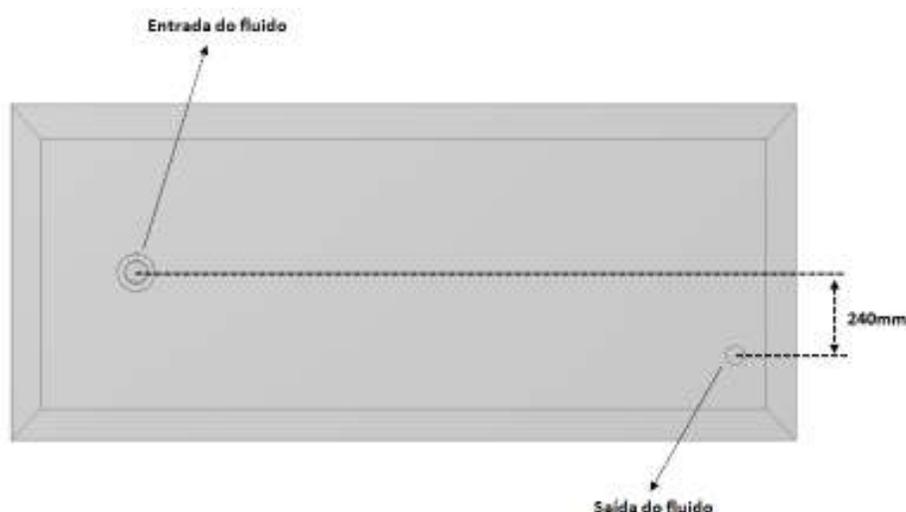


Figura 4.2: Desenho do distribuidor mostrando o deslocamento de 240mm do eixo axial da entrada do fluido no distribuidor em relação ao eixo de saída.

Para a construção da geometria do sistema foi utilizado o *DesignModeler*, que é um módulo do ANSYS CFX 14.0 que possibilita elaborar desenhos tridimensionais. O desenho segue as dimensões reais do distribuidor do lingotamento contínuo número 01 da APERAM.

Uma particularidade de grande utilidade no ANSYS CFX 14.0 é a possibilidade de parametrizar as dimensões do distribuidor, através de um conjunto de programação simples. Isso permite que futuras alterações nas dimensões sejam realizadas, sem que seja necessário repetir todo o desenho.

Depois de construída a geometria foi realizada a construção da malha do sistema. Para isso foi utilizado o módulo *CFX Meshing* do ANSYS *Workbench*, onde se pode realizar o controle do tamanho dos elementos de volume, além do refinamento em regiões específicas em que ocorra maior turbulência ou maiores gradientes dos parâmetros de escoamento, fazendo com que os resultados nestas regiões sejam mais precisos.

A forma básica dos elementos de volume gerados durante a construção da malha foi tetraédrica. As regiões próximas às paredes necessitam de boa precisão na divisão do

domínio, pois nestes locais os gradientes de velocidade são muito elevados. Com intuito de evitar ocorrências de distorções no domínio, os tetraedros devem ser bem pequenos, o que nem sempre é uma boa alternativa, pois pode gerar um aumento significativo no tempo de simulação. Uma alternativa para contornar esse problema é criar elementos de volumes prismáticos, ao invés dos tetraédricos. No ANSYS CFX 14.0, esta operação é realizada pelo comando *Inflation*, que permite a geração de elementos de volumes prismáticos que refinam a região normal às paredes e ao mesmo tempo, mostram-se grosseiros nas regiões paralelas a elas, conciliando a precisão necessária na discretização da região, sem que aumente de maneira significativa o tempo de simulação. A Figura 4.3 mostra as regiões de aplicação do *Inflation*, no tubo submerso, nas paredes do distribuidor, do dique e da barragem.

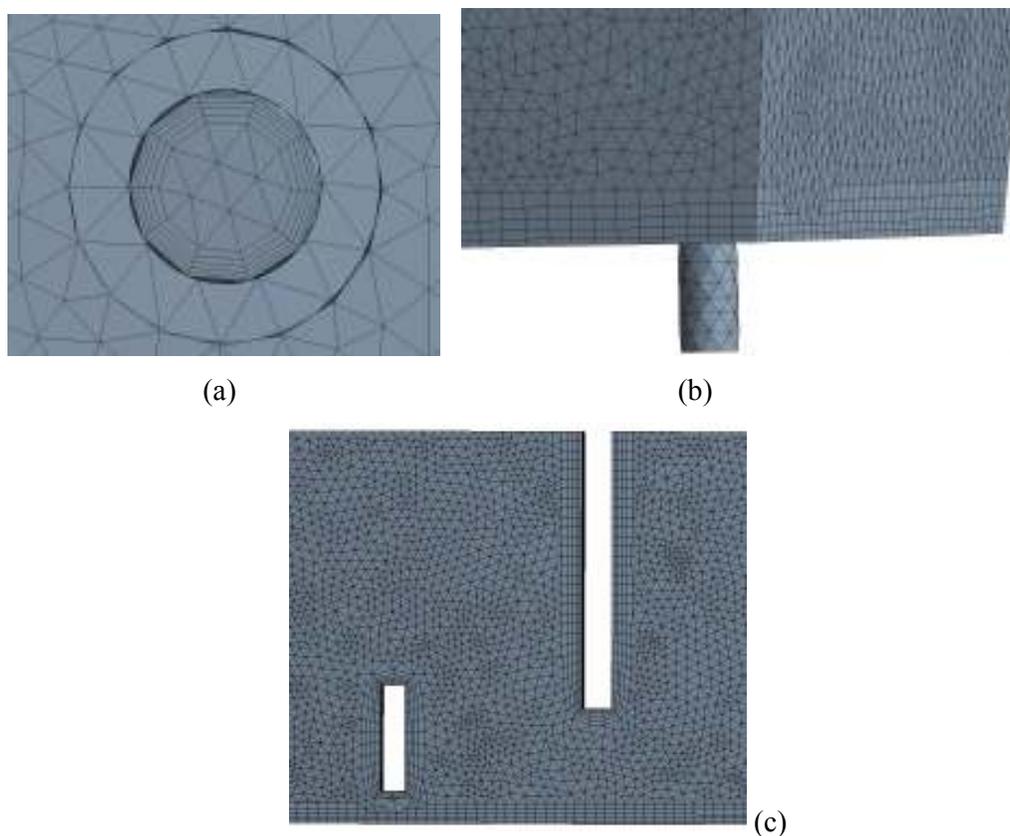


Figura 4.3: Desenho das regiões onde foi aplicada a condição do *inflation*: tubo submerso (a), paredes do distribuidor (b) e barragem e dique (c).

A geração de uma malha adequada é uma das etapas mais importantes da construção da geometria, pois os resultados encontrados com um modelamento matemático devem ser independentes da malha utilizada. Portanto, os resultados obtidos serão totalmente confiáveis quando a independência da malha for alcançada. O estudo da independência da malha consiste da determinação da malha que, ao sofrer refinamentos consecutivos, não provoque alterações significativas nos perfis das grandezas estudadas, tais como os perfis de velocidade e de grandezas de turbulências. A malha escolhida para realização das simulações deve garantir que, ao se utilizar malhas mais refinadas, os resultados não sofram alterações significativas. A utilização de uma malha muito refinada melhora a precisão dos resultados, porém, aumenta o tempo de simulação, o que não é interessante.

4.1.2 – Configuração da simulação

Para o desenvolvimento do modelo, foi considerado um sistema tridimensional e isotérmico, sendo as simulações realizadas em duas etapas:

- 1ª etapa: regime estacionário: determinação dos perfis de velocidades, pressão, grandezas de turbulência K e ε para todo o domínio;
- 2ª etapa: regime transiente: utilizando os perfis determinados acima, foram obtidas as curvas de DTR do fluido no interior do distribuidor, através da simulação da injeção de um traçador na entrada do distribuidor (tubo submerso) e do monitoramento da concentração desse traçador na saída do distribuidor (válvula submersa ou veio). Através desta técnica, obteve-se também as frações de volume das diversas regiões de escoamento: volume pistonado, volume de mistura e volume morto.

As condições de contorno foram estabelecidas conforme indicado abaixo:

✓ Entrada

Na entrada foi aplicado um valor de vazão de 23,6kg/s, calculado em função da velocidade média de lingotamento e da largura média das placas lingotadas na máquina 1 da APERAM. Foi considerado um nível de turbulência intermediário (5%) nesta região.

✓ Saída

Foi utilizada a condição de contorno de pressão prescrita na região de saída do distribuidor (veio). Como o fluido é incompressível, especificou-se um valor de 0 (zero)Pa, sendo que para as demais variáveis definiu-se gradiente nulo na direção normal à saída.

✓ Parede, fundo, barragem e dique.

A condição de parede é aplicada em todas as paredes do distribuidor e dos modificadores de fluxo, barragem e dique. Nestas regiões aplica-se a condição de não-escorregamento do fluido junto às paredes, isto é, $V_x, V_y, V_z = 0$.

✓ Região do topo.

A condição no topo (superfície) do distribuidor foi considerada como escorregamento livre.

Para a discretização da equação de conservação foi utilizado o esquema de interpolação *upwind*. Para a simulação da turbulência foi utilizado o modelo de turbulência do tipo K- ϵ .

Durante a simulação em regime transiente foi realizado monitoramento da concentração média de traçador na saída do distribuidor (entrada da válvula submersa), visando determinar a concentração do traçador a cada intervalo de tempo pré-determinado. Assim, à medida que a simulação avança, a curva DTR é gerada (Concentração do traçador x tempo). Para o monitoramento na saída do distribuidor foi utilizada a expressão: "areaAve(Tracador)@Saida Valvula Submersa", que calcula a concentração média do traçador na área da válvula submersa. Nesta etapa da simulação somente a equação de conservação de massa para o traçador é resolvida.

O critério de convergência para término das simulações foi estabelecido como sendo a raiz quadrada média RMS (*Root Mean Square*) de 1×10^{-4} para regime estacionário e de 1×10^{-5} para regime transiente.

Essa etapa gera um arquivo de extensão (.cfx) que contém as configurações estabelecidas no CFX-PRE 14.0, além do arquivo de definição com extensão (.def), que contém as informações necessárias para que o CFX-SOLVER resolva as equações de conservação pertinentes.

4.1.3 – Solução das equações de conservação

A execução da simulação é realizada pelo CFX-SOLVER *Manager*, que gera todas as soluções para os campos de velocidades, pressão, grandezas de turbulências (energia cinética de turbulência e taxa de dissipação da energia cinética de turbulência) e concentração de traçador, no caso do regime transiente. Esta fase do modelamento é a que demanda mais tempo e que necessita menor intervenção do modelador.

Durante a solução do problema, gráficos de resíduos são continuamente registrados, mostrando se a solução está convergindo conforme o critério de convergência estabelecido no CFX-PRE.

Ao final da simulação, quando o critério de convergência é atingido, são gerados dois arquivos:

- ✓ o de extensão (.out): arquivo onde se encontra o resumo da simulação, contendo as configurações utilizadas e os resultados de cada iteração realizada. Mesmo quando já finalizadas, as simulações podem ser retomadas, basta que o usuário utilize o arquivo de resultados obtidos como arquivos de valores iniciais;
- ✓ o de extensão (.res): arquivo que contém todos os resultados obtidos e é utilizado pelo CFX-POST para o pós-processamento e visualização dos mesmos.

Para a simulação no estado transiente é realizada uma configuração prévia que permite que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento e as do modelo de turbulência não sejam resolvidas novamente, prevalecendo os resultados obtidos no estado estacionário. Para isso, são desabilitados no CFX-PRE os itens *solve fluid* e *solve turbulence*, situados em *insert>solver>expert parameter>model over-rides*, que

resolvem, respectivamente, as equações de conservação global de massa e de quantidade de movimento e as equações diferenciais parciais adicionais de turbulência.

A simulação termina quando os resíduos da equação de conservação de massa, das três componentes da equação de conservação de quantidade de movimento, das equações do modelo de turbulência, alcançam o critério de convergência, estabelecido como sendo $\text{RMS } 1 \times 10^{-4}$. No caso da variável que descreve a dispersão do traçador (no caso do regime transiente) alcançam o critério de convergência, estabelecido como RMS de 1×10^{-5} .

4.1.4 – Pós-processamento dos resultados

O CFX-POST 14.0 permite a visualização e análise dos resultados obtidos na simulação através de várias variáveis, tais como: velocidade, pressão, energia cinética de turbulência, entre outras.

A visualização dos resultados pode ser feita através da criação de campos de vetores, geração de planos de contorno, linhas de corrente, além da utilização de uma escala de cores para descrever os valores das variáveis de interesse nos resultados obtidos.

Outra possibilidade é de gerar filmes com extensão .mpeg, para representar a injeção e a dispersão de traçador no domínio, num ensaio virtual, semelhante aquele que é feito no modelamento físico.

4.2 – Validação do Modelamento Matemático

No presente trabalho, a validação do modelamento matemático foi efetuada através da produção de duas corridas no lingotamento contínuo número 01, do aço SAE 1070 com a utilização de dique e barragem, conforme posicionamento da configuração 02 (descrito no item 4.1), que foi a que forneceu os melhores resultados. As composições químicas das corridas estão descritas na Tabela IV.1, que foram obtidas das amostras

retiradas no aço líquido do distribuidor aos 20 minutos de lingotamento através de amostradores de imersão, seguindo os padrões internos da APERAM.

Tabela IV.1: Composição química das corridas lingotadas com a utilização de dique e barragem no lingotamento contínuo 01.

<i>Corrida</i>		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>
<i>1ª corrida com bar/diq</i>		0,75	0,76	0,25	0,0218	0,0012	0,20	0,0108	0,0162
<i>2ª corrida com bar/diq</i>		0,76	0,80	0,20	0,0153	0,0021	0,20	0,0188	0,010
<i>Composição química típica</i>	Média	0,73	0,70	0,25	0,0151	0,0013	0,19	0,0189	0,0216
	Desvio padrão	0,02	0,05	0,02	0,0040	0,0012	0,03	0,0132	0,0070

O dique e a barragem foram posicionados dentro do distribuidor, conforme o posicionamento da configuração 02, descrito no item 4.1. A Figura 4.4 mostra a posição dos modificadores de fluxo dentro do distribuidor, depois de montados.



Figura 4.4: Posicionamento do dique e da barragem dentro do distribuidor conforme a configuração 02.

Após o processo de laminação a quente, foi retirada uma amostra em duas bobinas de cada corrida para verificação do nível de inclusões. O critério para a retirada das amostras foi o mesmo da amostragem de rotina, ou seja, para o referido aço é retirada uma amostra da bobina laminada a quente (BQ) por corrida, não havendo posição preferencial em função da seqüência de produção na aciaria e/ou na laminação a quente. A posição de retirada da amostra na bobina foi a região da espira de fora.

Quanto aos resultados de micro pureza, foram utilizados os recursos do Centro de Pesquisa da APERAM.

O equipamento utilizado para a verificação foi o Microscópio Ótico, LEICA modelo DMRM. Para a contagem das inclusões foi utilizada a norma ASTM E45-13, que descreve os procedimentos para fazer a classificação das inclusões não metálicas em aço.

Nestes testes microscópicos, as inclusões são classificadas em 04 categorias, denominadas "Tipos", que são baseados em suas morfologias e em duas categorias baseadas em suas larguras ou diâmetros.

As categorias são:

- ✓ Tipo A: sulfetos;
- ✓ Tipo B: alumina;
- ✓ Tipo C: silicatos;
- ✓ Tipo D: óxidos globulares.

Essas 04 categorias (ou Tipos) são divididas em níveis de severidade, baseados no número ou no comprimento das partículas, podendo variar de 0,5 a 5,0 (número adimensional). Quanto maior o nível de severidade, maior é o número e o tamanho das inclusões não metálicas presentes no aço.

A análise foi realizada sobre a seção longitudinal (sentido de laminação a quente) das amostras retiradas nas bobinas.

As amostras foram preparadas conforme procedimento padrão interno da APERAM, na seguinte seqüência:

- ✓ corte na seção longitudinal, objetivando obter uma dimensão mínima estipulada pela norma ASTM E45-13, que é de $0,50\text{mm}^2$;
- ✓ lixamento com a seqüência de lixas de 120, 220, 320, 500 e 600 grana;
- ✓ polimento seguindo a seqüência de panos de 9, 3 e 1 micra;
- ✓ embutimento em baquelite para posterior análise.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação e discussão dos resultados será feita em duas etapas, conforme a seqüência em que o trabalho foi desenvolvido.

Inicialmente serão apresentados e discutidos os resultados relativos ao estudo da independência da malha. Em seguida, após a definição da malha, serão analisados os resultados das simulações para a configuração atual e para as novas que foram propostas, comparando os perfis de escoamento, as curvas DTR's e os níveis de turbulências.

Posteriormente, serão apresentados e analisados os resultados de micro pureza das bobinas laminadas a quente, oriundas de placas lingotadas no lingotamento contínuo 01, sem e com o uso de modificadores de fluxo conforme configuração 02.

5.1 – Estudo de Independência da Malha

Conforme mencionado anteriormente, as previsões dos modelos matemáticos são dependentes do tipo e da qualidade de malha computacional utilizada. Inicialmente foi feito um estudo de independência da malha, visando determinar a configuração de discretização que otimize os aspectos de precisão e tempo de simulação.

No presente estudo, a independência da malha foi avaliada a partir do acompanhamento das curvas DTR obtidas durante a simulação do estado transiente para cada configuração.

Foi realizado o estudo de independência da malha utilizando o distribuidor sem modificadores de fluxo. As malhas utilizadas foram identificadas com número, sendo que os mesmos obedecem à ordem das simulações. O refinamento utilizado em cada simulação está especificado na Tabela V.1, onde na medida em que o número aumenta,

diminui o tamanho dos elementos de volume, mantendo constantes as demais características.

Tabela V.1 - Especificações das malhas para os casos simulados do distribuidor sem modificadores de fluxo e moneclatura dos mesmos para referências futuras.

Parâmetro	Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04
Número de elementos de volumes	179.095	418.373	907.122	1.223.020
Número de nós	37.019	81.159	170.531	227.020
<i>Inflation 1</i> (m) "Paredes do distribuidor"	0,05	0,05	0,05	0,05
<i>Inflation 2</i> (m) "Entrada do tubo submerso"	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>Inflation 3</i> (m) "Barragem e dique"	0,01	0,01	0,01	0,01
Modelo de turbulência	K- ϵ	K- ϵ	K- ϵ	K- ϵ
Nível de turbulência na entrada	5%	5%	5%	5%
Esquema de interpolação	<i>Upwind</i>	<i>Upwind</i>	<i>Upwind</i>	<i>Upwind</i>

Foram obtidas, então, as curvas DTR para cada uma das configurações de malha testadas.

Na Figura 5.1 são apresentados os resultados obtidos após a realização do estudo de independência da malha para os casos citados na Tabela V.1.

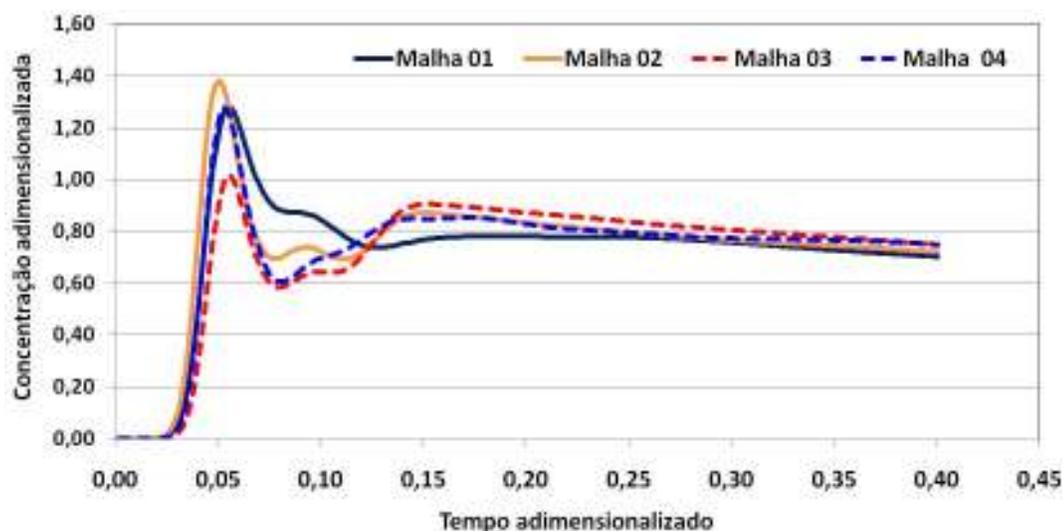


Figura 5.1: Comparação das curvas DTR's para as malhas 01 a 04 realizadas para o distribuidor sem modificadores de fluxo.

A Figura 5.1 mostra que as DTR das malhas 03 e 04 são bastante próximas, não havendo variações significativas dentro da região de interesse. Assim, o tamanho da malha 03 foi escolhido por apresentar um menor número de elementos de volume e servirá como base para o restante dos testes.

5.2 – Efeitos dos Modificadores de Fluxo no escoamento do Aço no Distribuidor

Após a escolha da malha 03, foram realizadas as simulações matemáticas do escoamento com a inserção de barragem e dique no distribuidor, para verificar a influência destes no escoamento. A posição das mesmas dentro do distribuidor está descrita no item 4.1.

A escolha da configuração 02 para ser testada na indústria foi devido à mesma apresentar menor energia de cinética de turbulência na interface aço/escória, durante as simulações matemáticas, conforme mostrado na Figura 5.2. Essa análise é importante, pois permite verificar qual configuração terá maior turbulência nessa interface, o que pode provocar emulsificação e arraste de novas inclusões.

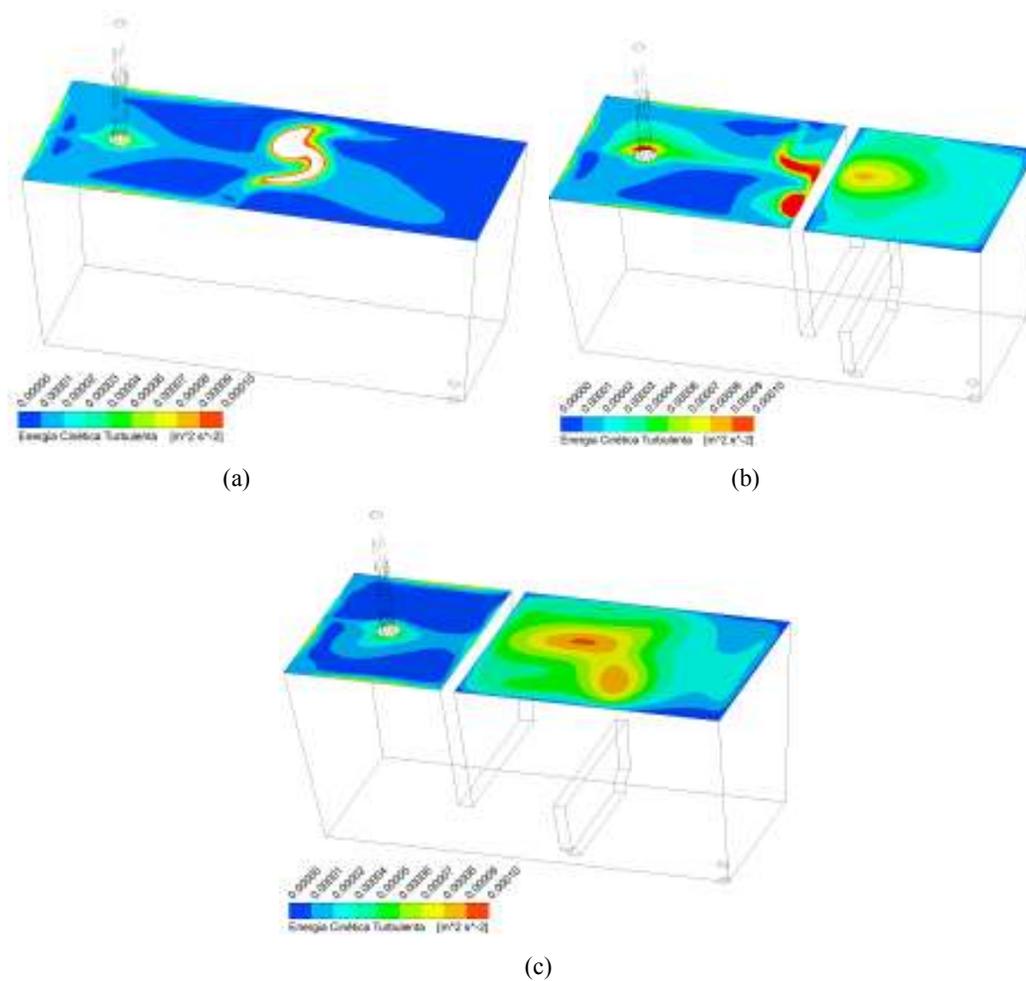


Figura 5.2: Contornos da energia cinética de turbulência na interface aço/escória para a Configuração 01 (a), Configuração 02 (b) e Configuração 03 (c).

Outro fator que influenciou na escolha da configuração 02, foi obter um posicionamento do dique e da barragem dentro do distribuidor, de forma a não comprometer o aquecimento da massa de projeção do distribuidor na região oposta à entrada da chama, do tampão e da válvula submersa.

5.2.1 – Perfis de velocidade

A Figura 5.3 mostra os perfis de velocidade dentro do distribuidor sem a inserção de modificadores de fluxo (configuração 01). Pode-se notar que o fluido tende a escoar preferencialmente pelo fundo do distribuidor reduzindo drasticamente a possibilidade de flotação de inclusões não metálicas.

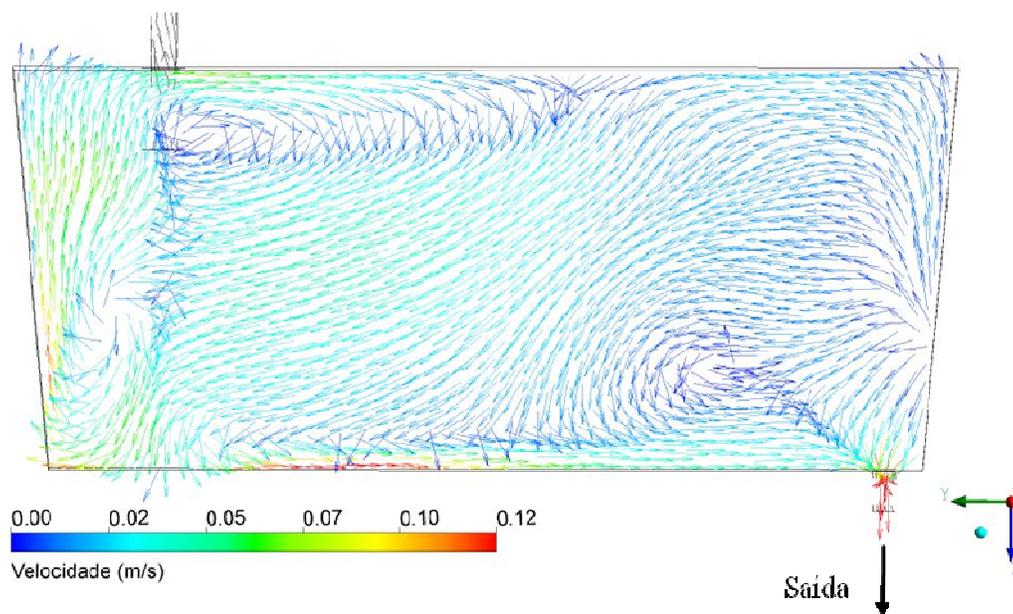


Figura 5.3: Perfis de velocidade obtidos na simulação do distribuidor sem a utilização de modificadores de fluxo (configuração 01). Plano da válvula de saída.

A Figura 5.4 mostra os perfis de velocidade dentro do distribuidor com a inserção de modificadores de fluxo, conforme as configurações 02 e 03.

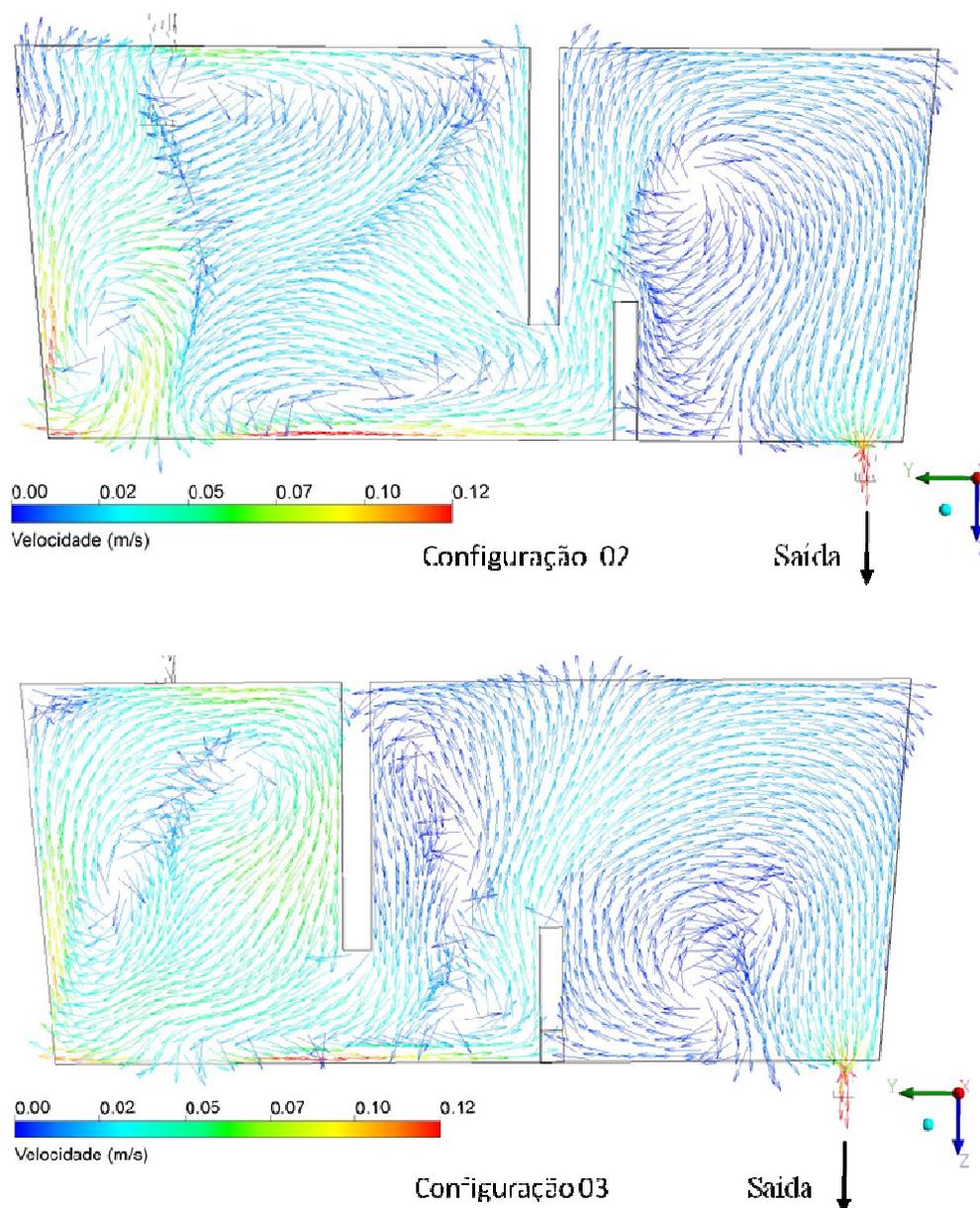


Figura 5.4: Perfis de velocidade obtidos nos distribuidores com a utilização de modificadores de fluxo (dique e barragem). Plano da válvula de saída.

Conforme pode ser observado na Figura 5.4, o risco de curto circuito foi totalmente eliminado. Há um direcionamento do aço para a parte superior do distribuidor, o que aumenta a possibilidade de flotação de inclusões não metálicas. Esse direcionamento é mais intenso na configuração 02.

5.2.2 – Linhas de correntes

A Figura 5.5 mostra a trajetória das partículas dentro do distribuidor sem modificadores de fluxo (configuração 01), onde observa-se a existência de regiões de altas velocidades no jato da panela na entrada do distribuidor e uma boa parte das partículas movimentam-se em regime de curto-circuito na direção do veio com alta velocidade.

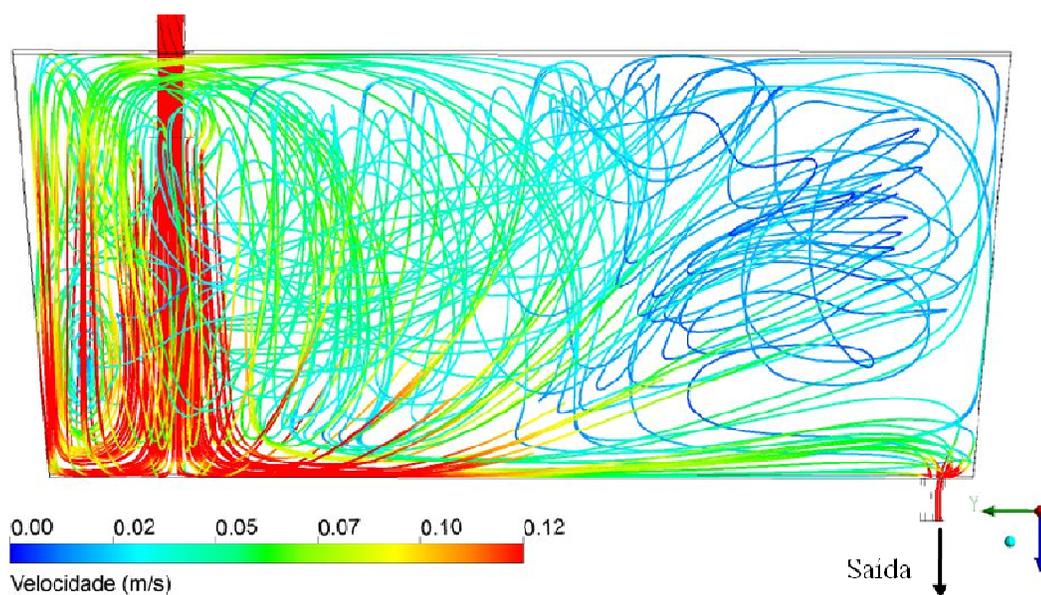


Figura 5.5: Linhas de correntes obtidas no distribuidor sem modificadores de fluxo (configuração 01). Plano da válvula de saída.

A Figura 5.6 mostra como as partículas se movimentam dentro do distribuidor com a utilização de modificadores de fluxo (dique e barragem).

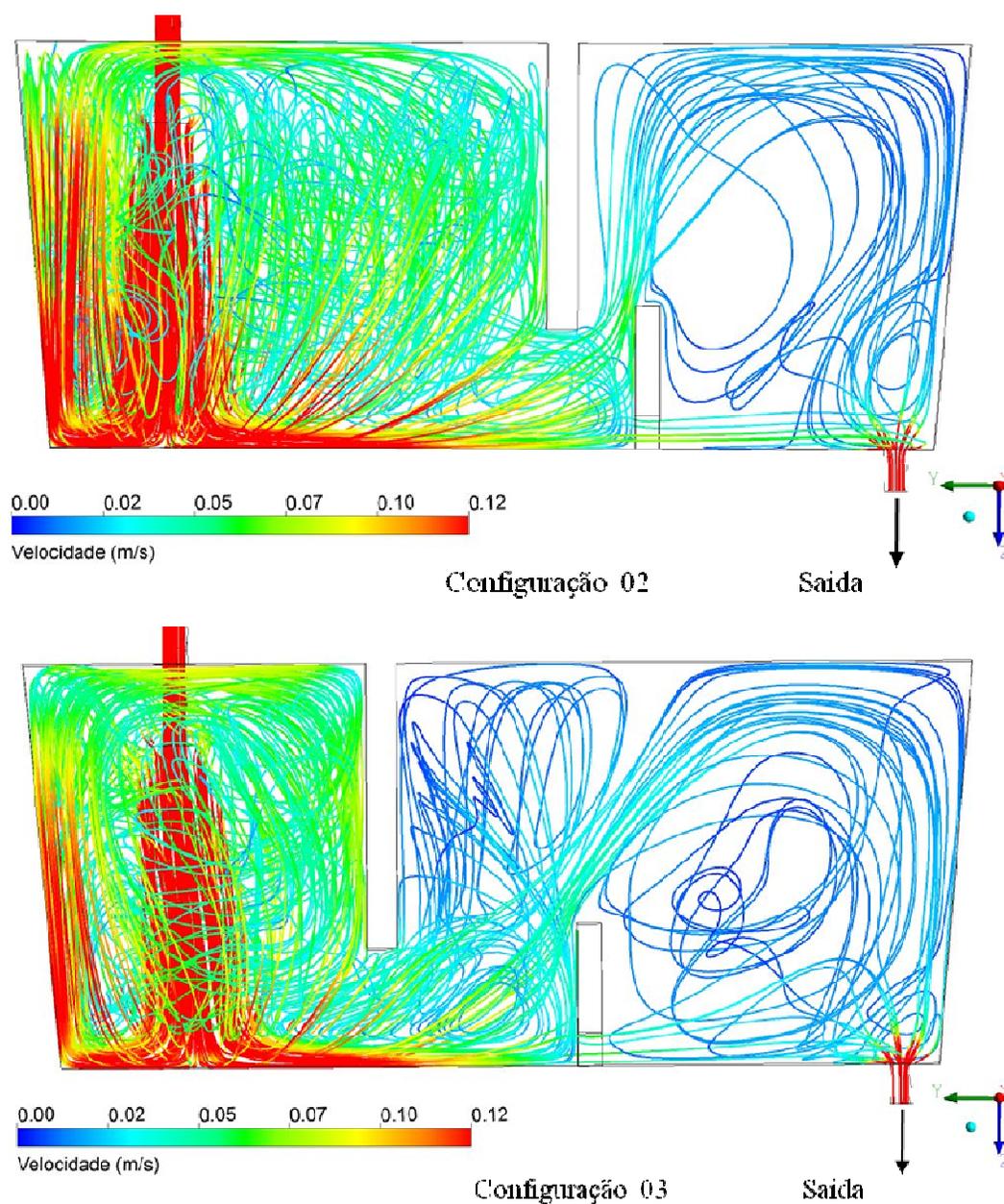


Figura 5.6: Linhas de corrente obtidas nos distribuidores com a utilização de modificadores de fluxo (dique e barragem). Plano da válvula de saída.

Como pode ser observado na Figura 5.6, as trajetórias das partículas foram alteradas, direcionando o fluxo de aço para a superfície do distribuidor, possibilitando melhores condições de flotação das inclusões não metálicas, eliminando a condição de "curto circuito".

5.2.3 – Curvas DTR, tempos e volumes característicos

A Figura 5.7 mostra a comparação das curvas DTR das simulações das configurações 01, 02 e 03.

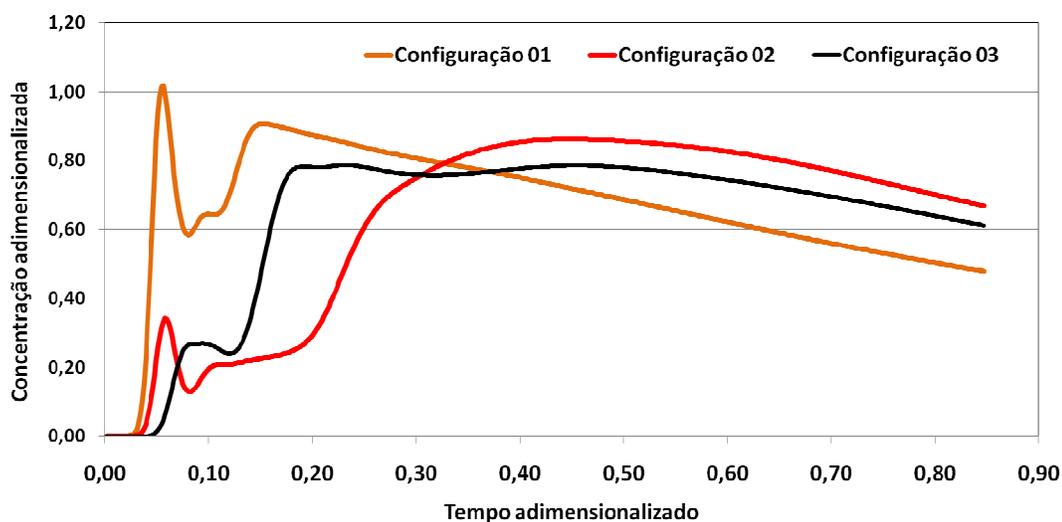


Figura 5.7: Comparação das curvas DTR das simulações das configurações 01, 02 e 03.

A Tabela V.2 mostra os tempos e volumes característicos dos distribuidores com e sem a utilização de dique e barragem, conforme as configurações 01, 02 e 03.

Tabela V.2 - Volumes e tempos característicos das simulações com e sem o uso do dique e barragem.

Configuração	Volume de mistura (%)	Volume morto (%)	Volume pistonado (%)	Tempo médio de residência (s)	Tempo mínimo de residência (adimensional)
01	86,73	11,23	2,04	431	0,02036
02	91,65	5,80	2,55	490	0,02545
03	90,18	6,26	3,56	476	0,03564

Comparando as curvas DTR mostradas na Figura 5.7 e os valores obtidos na Tabela V.2, nota-se que a inserção do dique e da barragem conforme a configuração 02, proporcionou :

- ✓ aumento de 5,4% no volume de mistura;
- ✓ reduziu em 48% o volume morto;
- ✓ aumento de 20% no tempo de volume pistonado;
- ✓ aumento de 12% no tempo médio de residência;
- ✓ aumento de 20% no tempo mínimo de residência;

em relação à configuração atual.

5.2.4 – Resultado de micro pureza

A Figura 5.8 e a Tabela V.3 mostram o resultado de micro pureza das bobinas laminadas a quente oriundas de placas lingotadas com barragem e dique inseridos no distribuidor conforme configuração 02.

As amostras das bobinas foram identificadas da seguinte forma:

- ✓ E1 - amostra 01 da primeira corrida;
- ✓ E2 - amostra 02 da primeira corrida;
- ✓ E3 - amostra 01 da segunda corrida;
- ✓ E4 - amostra 02 da segunda corrida;

Durante a análise da amostra E1 no microscópio ótico, foram escolhidas três regiões para verificação visual do nível de inclusões, conforme mostrado na Figura 5.7.



Figura 5.8: Resultado de micro pureza da amostra E1: (a) região de menor incidência de inclusões; (b) região mediana de incidência de inclusões e (c) região de maior incidência de inclusões.

Conforme pode ser observado na Figura 5.8, as inclusões presentes no aço foram globulizadas e houve pequena presença de inclusões do Tipo C (silicatos), mostrando que, possivelmente, essas inclusões não irão provocar danos à aplicação final do produto.

A Tabela V.3 mostra o resultado de micro pureza das amostras E1, E2, E3, E4 e do resultado médio das últimas 50 amostras retiradas de rotina de bobinas oriundas de placas que foram lingotadas sem a utilização de barragem e dique (denominadas "R"). Essas amostras foram analisadas no microscópio óptico através da metodologia automatizada.

Tabela V.3 - Resultado de micro pureza das amostras.

Amostra	Condição do distribuidor	Inclusão Tipo A	Inclusão Tipo B	Inclusão Tipo C	Inclusão Tipo D	Área analisada (mm²)
E1	Com barragem e dique	0,0	0,0	0,5	1,5	9,00
E2	Com barragem e dique	0,0	0,0	0,5	2,0	9,00
E3	Com barragem e dique	0,0	0,0	0,0	1,5	9,56
E4	Com barragem e dique	0,0	0,0	0,5	1,5	10,12
R (média)	Sem barragem e dique	1,6	0,6	0,3	1,0	Diversas
R (desvio padrão)	Sem barragem e dique	0,5	1,0	0,6	0,1	Diversas

Conforme pode ser observado na Tabela V.3, as quatro bobinas oriundas das placas lingotadas com o dique e a barragem, apresentaram um nível de inclusões bem menor quando comparadas com as bobinas lingotadas sem esses modificadores de fluxo. Esse fato mostra que o direcionamento do aço para a parte superior do distribuidor possibilitou melhores condições para a flotação das inclusões, possibilitando obter bobinas com maior grau de limpidez.

Os resultados de micro pureza das amostras E1, E2, E3 e E4 (Tabela V.3), mostrou:

- ✓ ausência de inclusões Tipo B (Alumina), o que diminui a possibilidade de ocorrência do defeito esfoliação por inclusões não metálicas;
- ✓ um aumento no nível de óxidos globulares (Tipo D), principalmente nas amostras E1 e E2. Uma das variáveis que pode explicar este fato foi o maior teor de cálcio total obtido na corrida, conforme pode ser observado na Tabela V.4.

Os resultados de cálcio descritos na Tabela V.4, referem-se ao teor de cálcio total e foram obtidos nas amostras retiradas no aço líquido do distribuidor aos 20 minutos de lingotamento através de amostradores de imersão, seguindo os padrões internos da APERAM.

Tabela V.4 - Teores de cálcio total obtido nas corridas.

Amostra	% Ca
E1	0,0017
E2	0,0017
E3	0,0008
E4	0,0008
R (média)	0,0010
R (desvio padrão)	0,0004

6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido o modelamento matemático do escoamento do aço no distribuidor da máquina 01 da APERAM visando melhorar as condições de flotações das inclusões não metálicas, possibilitando obter bobinas com melhor qualidade interna.

Através dos resultados alcançados no presente estudo, foi possível chegar às seguintes conclusões em relação ao distribuidor do lingotamento contínuo 01:

- ✓ na configuração atual, há forte regime de curto circuito, o que dificulta bastante a eliminação das inclusões não metálicas;
- ✓ a inserção da barragem e dique, possibilitou a eliminação do curto circuito e promoveu melhoria significativa nas características do escoamento, através do aumento de 5,4% no volume de mistura, da redução de 48% no volume morto, do aumento de 20% no tempo de volume pistonado e do aumento de 12% no tempo médio de residência;
- ✓ a utilização do dique e a barragem mostrou ser uma boa alternativa para viabilizar o lingotamento de aços que exigem maior qualidade interna requerida, reduzindo a probabilidade da ocorrência de desvios para a segunda qualidade e reclamação de clientes pela presença de inclusões não metálicas.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de otimizar a flotação das inclusões não metálicas nos distribuidores do lingotamento contínuo, utilizando-se modelamento matemático, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- ✓ estudar o perfil de escoamento do aço líquido no distribuidor da máquina 02, tendo em vista que esta máquina produz predominantemente os aços inoxidáveis, que fornecem maior retorno financeiro em relação aos demais aços produzidos;
- ✓ avaliar o efeito da utilização do inibidor de turbulência junto com a barragem e dique no distribuidor da máquina 01 e da máquina 02;
- ✓ avaliar a influência do uso do dique e da barragem na qualidade interna dos aços inoxidáveis produzidos no lingotamento contínuo 01.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.I, n.4, p. 34-39, abr.-jun. 2005.

BLAZEK, J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, 2001, 435p.

COSTA NETO, J. G. *Otimização do fluxo de aço no distribuidor do Lingotamento Contínuo*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. 1997. 13p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica).

ELIAS, R. C. A.. *Modelamento físico e matemático da formação de placa de mistura no Lingotamento Contínuo – Efeitos de modificadores de fluxo no molde*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010, 124p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Extrativa).

HIBBINS, S. G. *Characterization of heat transfer in the secondary cooling system of a continuous casting slab caster*. Vancouver. Canadá. The University of British Columbia. 1982. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

HUGHES, K. P. SCHADE, C.T. SHEPHERD, M. A. WEYANTJ, W. *Improvement in the internal quality of continuously cast slabs at Lukens Steel*. 78th Steelmaking Conference: proceedings. Nashville Meeting. 1995, vol. 22, pp. 35-41.

KRUGER, M. *Desenvolvimento de um procedimento computacional para o estudo do escoamento no interior de distribuidores de Lingotamento Contínuo*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010, 105p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica)

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. Steel statistical year book. Disponível em: (<http://http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/statistics-archive/yearbook-archive/Steel-Statistical-Yearbook-2013/document/Steel-Statistical-Yearbook-2013.pdf>). Acesso em 14/05/2014.

LEVENSPIEL, O. *Engenharia das reações químicas. Vol. 2 - Cálculo de reatores*. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1974, 274p. CDD-660.283.

MORALES, R. D. LOPEZ-RAMIREZ, S. PALAFOX-RAMOS, J. ZACHARIAS D. *Numerical and Modeling Analysis of Fluid and Heat Transfer of Liquid Steel in a Tundish with different Flow Control Devices*. ISIJ International, Vol. 33 (1999), N° 5, pp. 455-462.

RAMALHO, J. P. *Oxicorte: Estudo da transferência de calor e modelamento por redes neurais artificiais de variáveis de processo*. Campinas: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. 2008. 150p. (Tese, Doutorado em Engenharia).

SAHAI, Y.; AHUJA, R. *Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes*. Ironmaking and Steelmaking. Vol. 13 (1986), N°5, pp. 241-247.

SAHAI, Y.; EMI, T. *Melt Flow characterization in continuous casting tundishes*. ISIJ international, Vol. 36 (1996), N°6, pp. 667-672.

SINGH, S.; KORJA, S.C. *Model study of the dynamics of flow steel melt in the tundish*. ISIJ International, Vol. 33 (1993), N°12, pp. 1228-1237.

SHINDE, S. JHA, P. MUJUNDAR, A. HORIO, M. *Fluid flow characteristics and RTD analysis of a single strand tundish*. Fifth International Conference on CFD in the Process Industries. Melbourne. Austrália. 2006.

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

THOMAS, B. G. *Modeling study of intermixing in tundish and strand during a continuous-casting grade transition*. Iron and Steelmaker (ISS Transactions), Vol. 24, Nº 12, Iron and Steel Society, Warrendale, PA, 1997, pp. 83-96.

TU, J.; YEOH, G.H.; LIU, C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical approach*. Elsevier, 2008, 459p.

WOLLMANN, A. M., FRANÇOIS, M. G., VILELA, A. C. F., BAS, JOAQUIN, SOARES, R. B., LEAL, P. *Estudos de fluxo no distribuidor de Lingotamento Contínuo da Aços Finos Piratini*. 29º Seminário sobre fusão, refino e solidificação dos metais. Seminário da ABM, São Paulo, SP, 11 a 13 de maio de 1998.

ZHANG, L. THOMAS, B. G. *State of the art in evaluation and control of steel cleanliness*. ISIJ International, Vol. 43 (2003), Nº3, pp. 271-291.

9 – BIBLIOGRAFIA

ASM Handbook: *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*.
Vol. 1, ASM International, 1990.

PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. 1.ed. Minnesota: Taylor
& Francis Publishers, 1980. 197p.