



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS
MATERIAIS
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

MISAEI PEIXOTO GOMES

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO PERFIL REFRAIÁRIO DO DISTRIBUIDOR PARA
REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA NO PROCESSO DO LINGOTAMENTO
CONTÍNUO DA CSP

FORTALEZA

2021

MISAEEL PEIXOTO GOMES

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO PERFIL REFRAATÁRIO DO DISTRIBUIDOR PARA
REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA NO PROCESSO DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO
DA CSP

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de Concentração: Metalúrgia Física

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G615e Gomes, Misael.
ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO PERFIL REFRAATÓRIO DO DISTRIBUIDOR PARA
REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA NO PROCESSO DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA
CSP / Misael Gomes. – 2021.
112 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.

1. Lingotamento Contínuo. 2. Inclusões. 3. Distribuidor. 4. Perda Metálica. I. Título.

CDD 620.11

MISAEEL PEIXOTO GOMES

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DO PERFIL REFRAATÁRIO DO DISTRIBUIDOR PARA
REDUÇÃO DA PERDA METÁLICA NO PROCESSO DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO
DA CSP

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de Concentração: Metalúrgia Física

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sérgio Souto Maior Tavares
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. MS. Carlos Alberto Perim

À Deus, porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas

À minha família, por todo amor, carinho e dedicação. De maneira especial à minha esposa Priscila Edimara, aos meus pais José Gomes e Lecy e a meus irmãos Samuel e Ana Priscila

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus pelo seu amor e cuidado em minha vida.

Agradeço a minha esposa, Priscila Edimara, pela paciência durante as horas de estudo e companheirismo e incentivo nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais José Gomes e Lecy, por seus ensinamentos, cuidado e todo amor. Vocês sempre serão os meus melhores professores.

Agradeço a Companhia Siderúrgica do Pecém por permitir e incentivar o estudo e desenvolvimento aqui apresentado e por fornecer os dados necessários para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço ao meu orientador professor Marcelo, pela amizade, orientação e ensinamentos nessa jornada.

"...Mesmo que eu conheça todos os mistérios e toda a ciência, e ainda tenha uma fé capaz de mover montanhas, se não tiver amor, nada serei."

(1 Coríntios 13:2)

RESUMO

Na Companhia Siderúrgica do Pecém, o aço líquido que chega à torre do lingotamento contínuo para ser transformado em placas, passa pelo processo de solidificação. No entanto, nem todo aço líquido da panela se transforma em placa. No intervalo entre a chegada do aço para ser lingotado até o momento em que efetivamente se transforma em placa de aço, parte do aço em solidificação é perdido nas etapas do processo.

A razão entre o volume de aço que efetivamente se transforma em placa e o volume de aço líquido que chegou a torre de lingotamento é chamado na indústria de rendimento metálico do lingotamento contínuo.

O distribuidor é um dos principais responsáveis pela perda de rendimento metálico no lingotamento contínuo e por tanto, o estudo das causas e soluções para a redução da perda metálica nesse reator Metalúrgico é de grande interesse da siderurgia.

Ao final de cada sequencial do lingotamento contínuo, uma massa de aço solidificada, chamada de Cascão é descartado dentro do distribuidor. Isso acontece para evitar a formação de vórtice que se forma em determinada altura crítica sobre os canais de drenagem do distribuidor.

O vórtice provoca o arraste de escória sobrenadante do banho metálico para dentro do molde que além de ser prejudicial à qualidade do aço, impõe riscos à segurança operacional, uma vez que pode ocasionar problemas sérios como o rompimento de veio no lingotamento contínuo.

Portanto, propor modificações em um reator Metalúrgico em uso industrial como o distribuidor requer um entendimento aprofundado das relações do distribuidor com o aço líquido; o comportamento fluidodinâmico do escoamento do aço e o papel das modificações de fluxo; a interação do aço e escória no distribuidor, e o fenômeno de formação de vórtice.

Palavras-chave: Lingotamento. Distribuidor. Vórtice. Inclusões. Simulação Computacional. Fluidodinâmica

ABSTRACT

At Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), the liquid steel that arrives to the continuous casting station to be turned into steel slabs, goes through the solidification process. However, not all the steel content of the teeming ladle becomes slab. In the interval between the steel arrival to the casting station to the moment it effectively becomes into slabs, some of the steel is lost in the process stages.

The ratio between the steel volume that becomes slab and the volume of the liquid steel that arrives to the continuous casting is called continuous casting metallic yield.

The yield loss in the Tundish is one of the main causes of metallic yield loss in the continuous casting. Therefore, understanding the causes and solutions for the metallic yield loss in this metallurgical reactor is of great interest to the steelmaking industry.

At the end sequence in the continuous casting, a solidified steel mass, called tundish skull is discarded inside the tundish. It happens so to avoid vortex formation that takes place at a critical height above the tundish drainage nozzles .

Vortex produces entrapment of the steel slag and leads it to the mold. This event is both detrimental to the steel quality and to the process safety because it can lead to serious problems like strand breakouts in the continuous casting.

Therefore, modify a metallurgical reactor like the tundish requires a great understanding of the correlations between the tundish and the liquid steel; the fluid flow behavior and the role of flow modifiers; the interaction between steel and slag inside the tundish; and the vortex formation phenomenon.

Keywords: Continuous Casting. Tundish. Vortex. Inclusions. Computational Simulation. Fluid dynamics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perda de Rendimento Metálico no Lingotamento Contínuo	20
Figura 2 – Acompanhamento da sobra de aço em duas plantas industriais distintas . . .	21
Figura 3 – Participação do lingotamento contínuo em relação ao total de aço bruto produzido no Mundo entre 1971 e 2017	24
Figura 4 – Participação do lingotamento contínuo em relação ao total de aço bruto produzido no Brasil entre 1971 e 2017	25
Figura 5 – Diagrama esquemático de uma máquina de lingotamento contínuo de placas mostrando os seus principais componentes	27
Figura 6 – Layout de uma máquina de lingotamento contínuo	28
Figura 7 – Configuração típica de um distribuidor de dois veios	29
Figura 8 – Princípio básico do lingotamento contínuo	30
Figura 9 – Sistema que compõe o lingotamento contínuo	31
Figura 10 – Vista superior de distribuidores de diferentes formatos	33
Figura 11 – Representação esquemática do revestimento refratário de um distribuidor . .	34
Figura 12 – Inclusão exógena típica de revestimento refratário	39
Figura 13 – Inclusões de alumina em clusters dendríticos (a) e inclusões de alumina em formato de corais	41
Figura 14 – Trajetórias de partículas em escoamentos unidimensionais, laminar e turbu- lento	44
Figura 15 – Fluxo laminar entre duas placas	45
Figura 16 – Momentum da camada limite de uma placa horizontal imersa em um líquido em movimento	46
Figura 17 – Tipos de escoamento em um orifício localizado no fundo de uma panela . .	51
Figura 18 – Representação esquemática das componentes do movimento de fluido . . .	52
Figura 19 – Rotação e deformação angular de segmentos de linha perpendiculares em um escoamento bidimensional	52
Figura 20 – Estágios do escoamento do tipo vórtice	55
Figura 21 – Formação de vórtice	56
Figura 22 – Características do escoamento do tipo dreno	58
Figura 23 – Características do escoamento do tipo orifício cheio (a) e do tipo transborda- mento (b)	59

Figura 24 – Decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera em uma panela de 495mm de diâmetro e Altura de 435mm	61
Figura 25 – Decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera em uma panela de 374 mm de diâmetro e Altura de 500mm	61
Figura 26 – Decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera em uma panela de 374 mm de diâmetro e Altura de 350 mm	62
Figura 27 – Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 10 segundos de tempo de espera	63
Figura 28 – Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 30 segundos de tempo de espera	63
Figura 29 – Fluxograma da Metodologia adotada no presente trabalho	64
Figura 30 – Domínio de simulação definido em função da simetria do distribuidor	68
Figura 31 – Distribuidor com Barragem	69
Figura 32 – Distribuidor com Inibidor de Turbulência e Diques	69
Figura 33 – Distribuidor com Inibidor de Turbulência, Diques e sola elevada	70
Figura 34 – Sobra de aço média por distribuidor no ano de 2018 na CSP	71
Figura 35 – Altura da coluna de aço dentro do distribuidor correspondente a 8 toneladas	71
Figura 36 – Simulação do rendimento metálico para três configurações de distribuidor	72
Figura 37 – - Representação esquemática do padrão de escoamento com e sem modificadores de fluxo	73
Figura 38 – - Simulação computacional das linhas de fluxo do distribuidor com barragem	74
Figura 39 – - Simulação computacional das linhas de fluxo do distribuidor com inibidor e dique	74
Figura 40 – - Simulação computacional das linhas de fluxo do distribuidor com sola elevada	75
Figura 41 – - Simulação computacional da distribuição de velocidade de escoamento no distribuidor com barragem	76
Figura 42 – - Simulação computacional da distribuição de velocidade de escoamento no distribuidor com inibidor de turbulência e dique	76

Figura 43 – - Simulação computacional da distribuição de velocidade de escoamento no distribuidor com sola elevada	77
Figura 44 – - Medição de velocidade instantânea por Laser Doppler	78
Figura 45 – - Energia Cinética turbulenta para o distribuidor com barragem	79
Figura 46 – - Energia Cinética turbulenta para o distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa	80
Figura 47 – - Energia Cinética turbulenta para o distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada	80
Figura 48 – - Pulso de entrada e o gráfico de resposta típico em formato de C	82
Figura 49 – -Representação esquemática do volume pistonado	82
Figura 50 – -Curva C para o Volume Pistonado	83
Figura 51 – -Representação esquemática do volume misturado	83
Figura 52 – -Representação esquemática da curva C para o volume misturado	84
Figura 53 – Modelo combinado representando Volume Pistonado e Volume Misturado .	85
Figura 54 – Curva C para o Modelo combinado de Volume Pistonado e Volume Misturado	85
Figura 55 – Tempo Mínimo de residência para as três configurações de distribuidor em estudo na simulação computacional	86
Figura 56 – Volume Pistonado para as três configurações de distribuidor em estudo na simulação computacional	86
Figura 57 – Escoamento em zonas ativas e estagnadas em um modelo combinado	87
Figura 58 – Curva característica de uma distribuição de tempo de residência para um Escoamento em zonas ativas e estagnadas em um modelo combinado	88
Figura 59 – Volume morto obtido por meio de simulação computacional para as três configurações em estudo	89
Figura 60 – Fluxograma do processo de montagem e disponibilização de um distribuidor	90
Figura 61 – Representação esquemática do distribuidor com sola baixa e barragem . . .	91
Figura 62 – Principais etapas da montagem do distribuidor com sola baixa e barragem .	92
Figura 63 – Projeção de massa de cobertura ou concreto de trabalho no distribuidor . . .	92
Figura 64 – Corte ilustrativo de um distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa	93
Figura 65 – Corte ilustrativo de distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada .	94
Figura 66 – Desenho ilustrativo destacando a região de elevação da sola montada com tijolos	94

Figura 67 – Construção da sola elevada do distribuidor	95
Figura 68 – Aspecto do distribuidor após a montagem da elevação da sola	96
Figura 69 – Curva de secagem utilizada no distribuidor com sola elevada	96
Figura 70 – Curva de secagem utilizada no distribuidor com sola elevada	97
Figura 71 – Tela operacional do lingotamento contínuo	98
Figura 72 – Fotografias da operação do primeiro distribuidor com sola elevada	99
Figura 73 – Fração calculada por simulação computacional das inclusões removidas pela escória	100
Figura 74 – Comparação entre a medição do Teor de Oxigênio Total em três configurações de distribuidores	101
Figura 75 – Classificação das amostras de Baumann quanto a continuidade da segregação central	102
Figura 76 – Classificação das amostras de Baumann quanto a Intensidade da segregação central	103
Figura 77 – Impressão de Baumann – Distribuidor com Barragem e sola baixa	103
Figura 78 – Impressão de Baumann – Distribuidor Sola baixa	103
Figura 79 – Classificação das amostras de Baumann quanto a Intensidade da segregação central	103
Figura 80 – Medição da altura do cascão do distribuidor com sola baixa	105
Figura 81 – Regressão Linear da correlação peso x altura do cascão solidificado do distribuidor	105
Figura 82 – Medição da altura do cascão do distribuidor encerrado com 8 toneladas . . .	106
Figura 83 – Comparação entre a Medição da altura do cascão do distribuidor com sola baixa e do distribuidor com sola elevada	106
Figura 84 – Sobra de aço média por distribuidor após alteração no perfil refratário	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Correlação Peso X Altura no distribuidor	104
---	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

D_p	Diâmetro da partícula
Re	Número de Reynolds
R_p	Raio da partícula
u	Velocidade do escoamento laminar
v	Velocidade média do fluido
ρ	Densidade do fluido
η	Viscosidade do fluido
$H_{cr,t}$	Altura crítica abaixo de onde ocorre transbordamento
$H_{cr,nv}$	Altura crítica para a formação de um escoamento de dreno
$H_{cr,v}$	Altura crítica para a formação de um escoamento de vórtice

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivos Específicos	23
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1	Lingotamento Contínuo	24
3.1.1	<i>O processo do Lingotamento Contínuo</i>	26
3.1.2	<i>Componentes e Operação</i>	26
3.2	Tecnologia do Distribuidor	31
3.2.1	<i>O papel do Distribuidor no Lingotamento Contínuo</i>	31
3.2.2	<i>Construção e Montagem de um Distribuidor</i>	34
3.2.2.1	<i>Revestimento de segurança</i>	35
3.2.2.2	<i>Revestimento de Trabalho</i>	36
3.3	Engenharia das Inclusões	37
3.3.1	<i>Origem das Inclusões</i>	37
3.3.1.1	<i>Inclusões exógenas</i>	38
3.3.1.1.1	<i>Definição de Macro inclusões</i>	38
3.3.1.1.2	<i>Origem das macro inclusões exógenas</i>	38
3.3.1.1.3	<i>Composição das inclusões exógenas</i>	39
3.3.1.2	<i>Inclusões endógenas</i>	40
3.3.1.2.1	<i>Termodinâmica das reações de desoxidação</i>	40
3.3.2	<i>Métodos de avaliação da limpidez do aço</i>	41
3.4	Modelamento de Fluxo no Distribuidor	43
3.4.1	<i>Revisão sobre escoamento de fluidos e turbulência</i>	43
3.4.1.1	<i>Regimes de escoamento de fluidos</i>	43
3.4.1.2	<i>Dimensionalidade do fluxo</i>	45
3.4.1.3	<i>Equações de continuidade e momentum</i>	45
3.4.1.3.1	<i>Dedução da equação de continuidade utilizando o teorema divergente</i>	46
3.4.1.4	<i>Equações do momentum</i>	47
3.4.1.5	<i>Lei de Stocks</i>	48
3.4.1.6	<i>Caracterização do escoamento de um fluxo</i>	48

3.5	Revisão sobre a formação de vórtice e seus efeitos no lingotamento contínuo	50
3.5.1	<i>Mecanismo de Formação de vórtice</i>	50
3.5.2	<i>Tipos de movimento dos elementos de fluido</i>	51
3.5.3	<i>Rotação de Fluido</i>	52
3.5.4	<i>Estágios da formação do escoamento do tipo vórtice</i>	54
3.5.5	<i>Formação do Escoamento tipo Dreno</i>	57
3.5.6	<i>Regimes de escoamento no esvaziamento de um recipiente</i>	58
3.5.7	<i>Fatores que afetam a formação dos vórtices</i>	59
3.5.7.1	<i>Tempo de espera e velocidade tangencial inicial</i>	60
4	METODOLOGIA	64
4.1	Simulação computacional de distribuidores com diferentes configurações	65
4.1.1	<i>Modelamento Matemático</i>	65
4.1.2	<i>Descrição do Modelo e definição das configurações em estudo</i>	67
4.1.2.1	<i>Descrição do Modelo</i>	67
4.1.3	<i>Definição das configurações de estudo</i>	68
4.1.3.1	<i>Distribuidor com Barragem</i>	68
4.1.3.2	<i>Distribuidor com Inibidor de Turbulência e Diques</i>	68
4.1.3.3	<i>Distribuidor com Inibidor de Turbulência, Diques e sola elevada</i>	68
4.1.4	<i>Resultados da simulação computacional</i>	70
4.1.4.1	<i>Rendimento Metálico</i>	70
4.1.4.2	<i>Quantificação e qualificação do escoamento em distribuidores</i>	73
4.1.4.2.1	<i>Linhas de Fluxo e campos de Velocidade</i>	73
4.1.4.2.2	<i>Energia Cinética Turbulenta</i>	77
4.1.4.2.3	<i>Distribuição do Tempo de Residência (DTR)</i>	79
4.1.4.2.4	<i>Pulso de entrada e a Curva C</i>	81
4.1.4.2.5	<i>Caracterização de um sistema de escoamento</i>	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1	Montagem de Distribuidores em planta industrial	90
5.1.1	<i>Configuração de Distribuidor com barragem e sola baixa</i>	91
5.1.2	<i>Configuração de Distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa</i>	93
5.1.3	<i>Configuração de Distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada</i>	93

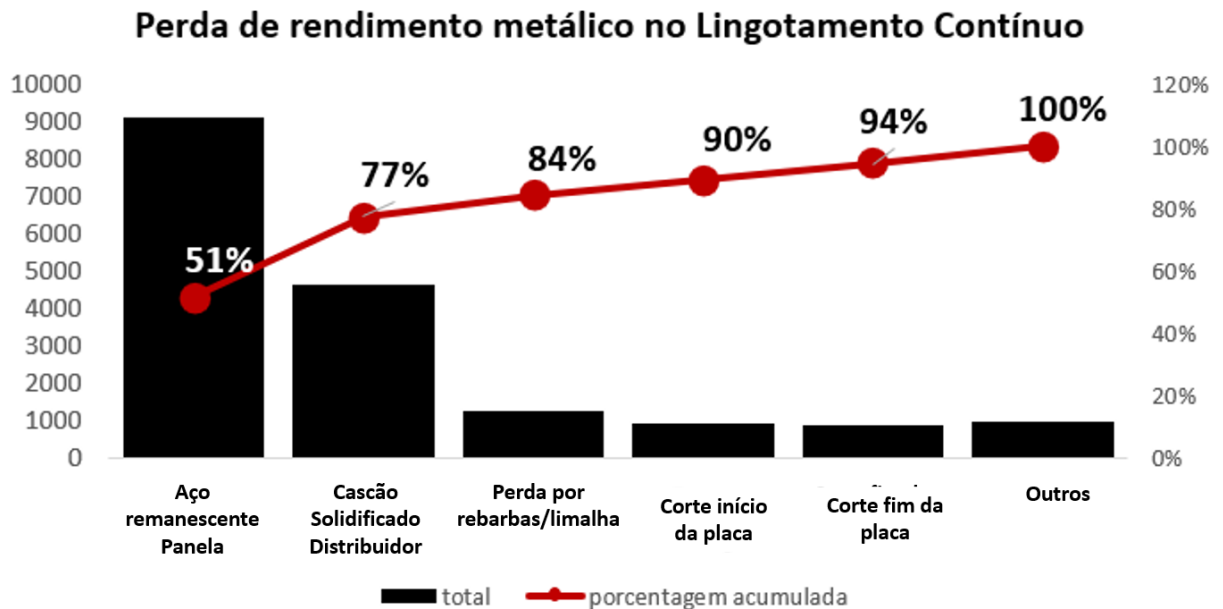
5.2	Operação do distribuidor com sola elevada em testes em escala industrial	97
5.2.1	<i>Teste operacional do primeiro distribuidor montado com sola elevada . . .</i>	97
5.3	Resultados comparativos dos distribuidores	99
5.3.1	<i>Análise comparativa da Limidez do aço</i>	99
5.3.1.1	<i>Simulação Computacional da Limidez do Aço</i>	99
5.3.1.2	<i>Percentual de Oxigênio Total</i>	100
5.3.1.3	<i>Caracterização pelo método de Baumann</i>	101
5.3.2	<i>Análise comparativa da altura da coluna de aço no distribuidor</i>	104
5.3.2.1	<i>Encerramento de sequenciais de distribuidores com sola elevada</i>	105
5.3.2.2	<i>Redução da sobra de aço do distribuidor</i>	107
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS	109
	ANEXOS	110

1 INTRODUÇÃO

Idealmente, todo aço proveniente do refino primário e secundário deveria ser solidificado no lingotamento contínuo e posteriormente processado em laminadores para se transformar em produtos acabados. Ou seja, o aço transportado pela panela deveria integralmente se transformar em placas, tarugos ou chapas. Assim, idealmente, o rendimento metálico da usina seria 100%. No entanto, ao longo do processamento do aço, é natural que ocorram perdas, fazendo com que haja uma redução do rendimento do produto produzido no lingotamento contínuo.

Uma das principais causas de perda de rendimento metálico no lingotamento contínuo é a quantidade de aço remanescente no distribuidor ao final de um sequencial. A cada sequencial, um volume considerável de aço é subtraído do rendimento metálico devido ao descarte de uma massa de aço solidificada no interior do distribuidor. A figura 1 é uma distribuição de Pareto que mostra os principais fatores que influenciaram na perda de rendimento metálico no lingotamento contínuo da Companhia Siderúrgica do Pécém (CSP) dentro de um determinado período. Na CSP, aproximadamente 26% da perda de rendimento metálico do lingotamento contínuo está associada ao cascão do distribuidor. Sendo portanto, o segundo maior influenciador na perda de rendimento metálico, ficando apenas atrás da sobra de aço de panela.

Figura 1 – Perda de Rendimento Metálico no Lingotamento Contínuo

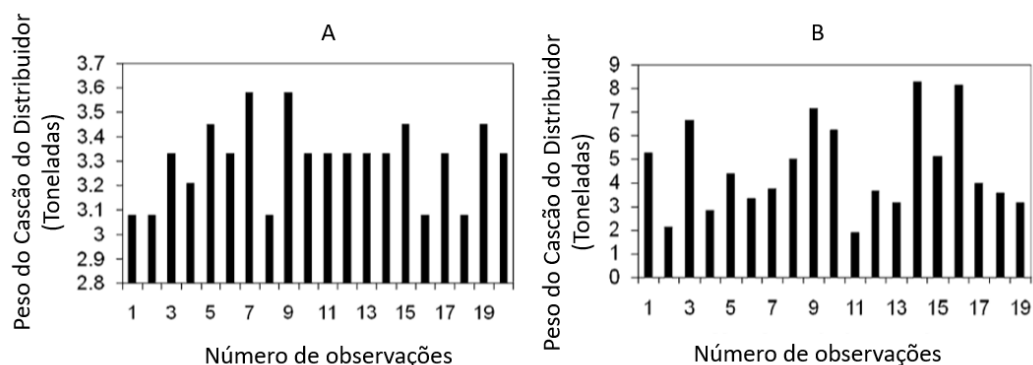


Fonte: Companhia Siderúrgica do Pécém (2021).

Isso acontece porque durante a operação do distribuidor, a presença de uma camada de escória sobrenadante no aço líquido impede que ocorra a completa drenagem do aço pre-

sente no distribuidor para o molde do lingotamento contínuo. Durante a última corrida de um sequencial, ao se aproximar do final da sequência de lingotamento, o aço contido dentro do distribuidor, que está sendo esvaziado, atinge um nível a partir do qual um vórtice é formado acima do canal de drenagem. A formação desse vórtice cria uma corrente de fluxo que captura a escória sobrenadante fazendo com que ela se misture ao aço e seja arrastada para o molde do lingotamento contínuo. A passagem de escória para o molde é extremamente danosa para a segurança operacional podendo ocasionar *breakout*, que é o rompimento de pele da camada de solidificação do aço; abaulamentos e estouros de topo. Além disso, a passagem de escória pode comprometer as propriedades químicas e mecânicas dos produtos que serão laminados. Como contramedida ao risco de passagem de escória para o distribuidor, um volume de aço residual é deixado no distribuidor ao final do sequencial. Assim, o processo de lingotamento contínuo é interrompido antes que haja a formação do vórtice. A massa de aço solidificada é popularmente chamada na indústria como “cascão do distribuidor”. Prevenir o arraste de escória para o molde do distribuidor assegura uma melhor qualidade do aço produzido. Além disso, um controle da passagem de escória para o molde é de extrema importância, uma vez que, quando ocorre passagem de escória, as medidas necessárias para se recuperar dos efeitos adversos do arraste de escória normalmente resultam em um aumento de custo de produção e perda de produtividade. Apesar de necessária, essa contramedida é insatisfatória do ponto de vista econômico, uma vez que um volume significativo de aço de qualidade é constantemente descartado afetando a produtividade da planta industrial.

Figura 2 – Acompanhamento da sobra de aço em duas plantas industriais distintas



Fonte: Mazumdar O. P. Singh (2011)

A figura 2 mostra dois exemplos de sobra de aço em distribuidor em duas plantas industriais distintas. A perda de rendimento metálico devido a sobra de aço no distribuidor depende das dimensões do distribuidor, do mobiliário utilizado no distribuidor, taxa de lingotamento,

dimensões do canal de drenagem entre outros.

A perda de rendimento metálico em cada sequencial é evidente e isso gera um interesse natural da siderurgia por desenvolver maneiras de reduzir as perdas decorrentes da sobra de aço no distribuidor.

2 OBJETIVOS

O Objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo técnico e científico da tecnologia do distribuidor do lingotamento contínuo e de seu impacto no processamento de aço, avaliando comparativamente por meio de simulação computacional e testes em planta industrial, as características de cada configuração em estudo de modo a definir uma configuração de distribuidor com sola elevada otimizada para permitir a redução de perda de aço no distribuidor e consequentemente aumentar o rendimento metálico e produtividade da planta industrial.

2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, serão empregadas simulações computacionais para avaliar os principais itens que afetam a lingotabilidade dos aços em distribuidores de diferentes configurações. Dentre os itens avaliados estão:

- Ensaios de linhas de fluxo;
- Análise do campo de velocidade do fluxo de aço e turbulência;
- Análise da tensão de cisalhamento;
- Quantificação dos tempos de residência e das frações de volumes característicos de escoamento do distribuidor;
- Avaliação das inclusões não-flotantes na simulação computacional.

A partir dessa análise, serão realizados testes em planta industrial.

Os testes em planta industrial envolvem:

- A montagem do distribuidor com a configuração escolhida;
- Acompanhamento dos sequencias de lingotamento contínuo;
- Acompanhamento e análise dos cascões de distribuidor;
- Acompanhamento da evolução de sobra de aço no distribuidor ao longo do período de estudo.

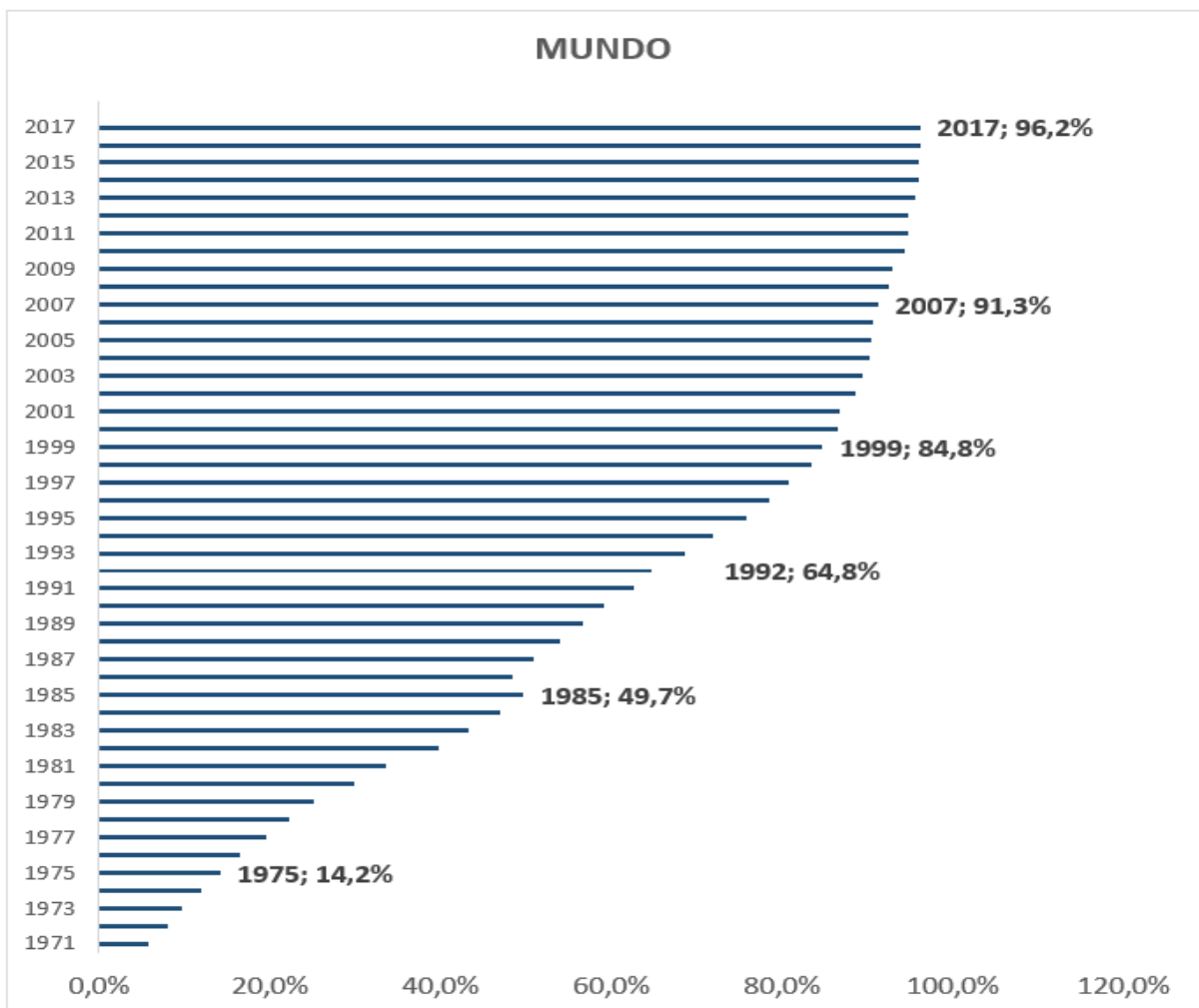
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lingotamento Contínuo

Mundialmente, o processo de lingotamento contínuo tem sido empregado em larga escala na indústria do aço. Quando comparado com o método de lingotamento convencional, o lingotamento contínuo apresenta vantagens consideráveis, dentre as quais pode-se citar: a sua maior flexibilidade de operação, menor custo operacional, maior rendimento e superior qualidade dos produtos finais. (WON Y.M., 2000).

Essas características popularizaram o processo de lingotamento contínuo, tornando-o o método de solidificação mais empregado na produção de aço no mundo. A figura 3 abaixo, mostra a evolução da utilização do lingotamento contínuo na produção de aço ao longo dos anos.

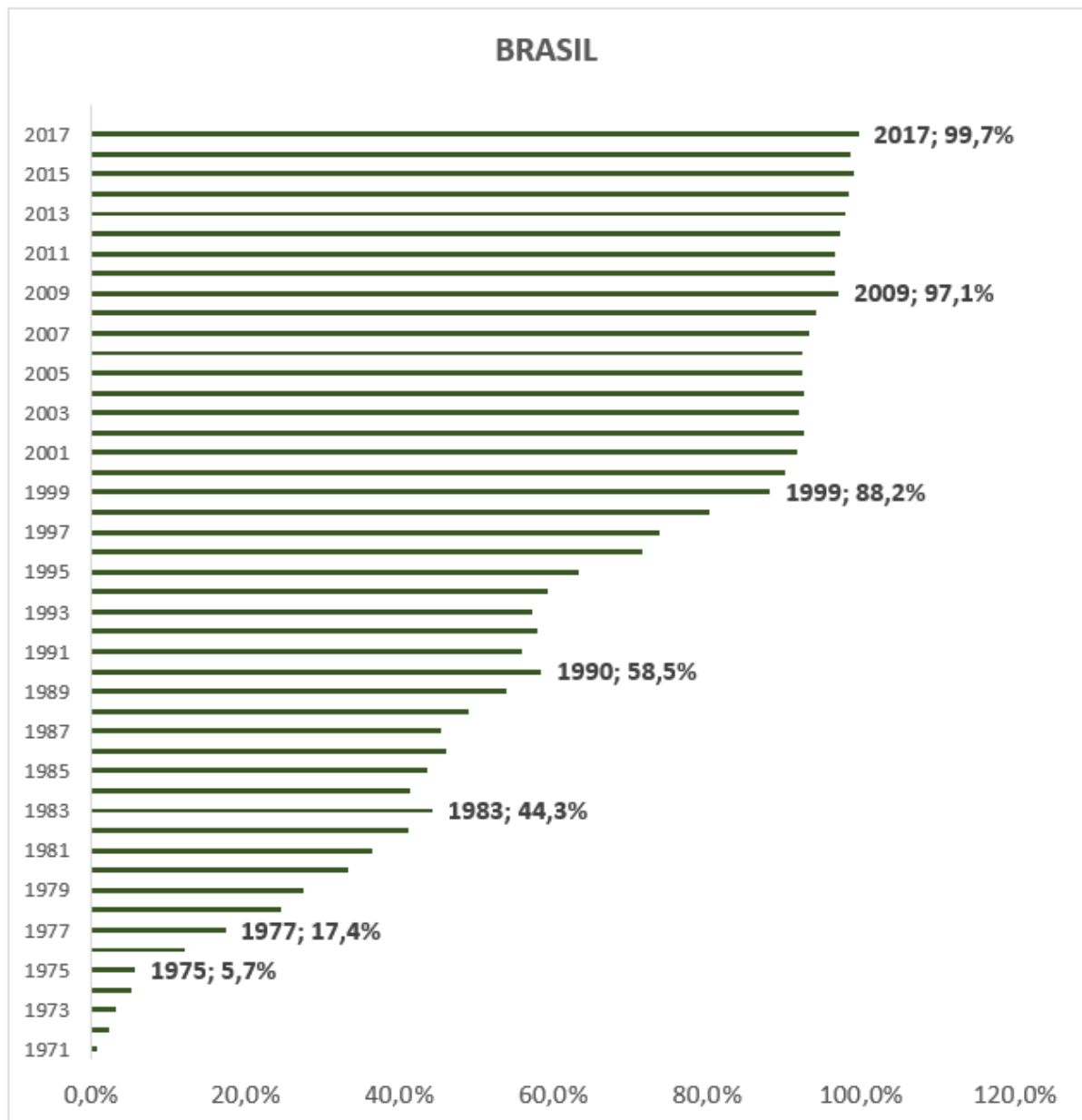
Figura 3 – Participação do lingotamento contínuo em relação ao total de aço bruto produzido no Mundo entre 1971 e 2017



Fonte: WorlSteel (2021b)

O Brasil seguiu o mesmo ritmo, com a implantação de importantes usinas siderúrgicas no país, o lingotamento contínuo vem gradativamente aumentando sua contribuição na produção de aço para a indústria nacional. A figura 4 mostra que o processo de lingotamento contínuo no Brasil vem crescendo em importância, inclusive, a partir de 1999, o percentual de aço produzido no Brasil por meio de lingotamento contínuo superou o percentual mundial. Isso demonstra a grande relevância desse processo em nossa indústria.

Figura 4 – Participação do lingotamento contínuo em relação ao total de aço bruto produzido no Brasil entre 1971 e 2017



Fonte: WorlSteel (2021a)

3.1.1 O processo do Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo é o processo através do qual o aço líquido é solidificado em um produto semiacabado que pode ser bloco, tarugo ou placa. Esse produto semiacabado é posteriormente processado em laminadores. Trata-se do modo mais eficiente de solidificar um grande volume de metal em formas mais simples para posterior laminação. (THOMAS, 2001)

A Companhia Siderúrgica do Pecém - CSP possui uma máquina de lingotamento contínuo de dois veios que produz placas de aço.

O princípio do lingotamento contínuo é simples. Há três etapas sequenciais de resfriamento: O resfriamento inicia em um molde de cobre refrigerado a água; em seguida, o resfriamento continua em conjuntos de chuveiros de água com capacidades variáveis de extração de calor, e por último ao ar através da transferência de calor por radiação e convecção natural (CHEUNG, 1999).

De maneira mais detalhada, a solidificação do aço em suas três etapas sequenciais segue o seguinte fluxo:

1. **Resfriamento primário:** Inicia-se a troca de calor entre o aço líquido e o molde refrigerado do lingotamento contínuo. Nessa etapa, inicia-se a formação de uma fina pele de solidificação;

2. **Resfriamento secundário:** Nessa etapa, água é pulverizada em forma de *spray* que incide diretamente sobre a placa de aço aumentando a extração de calor e fazendo com que a pele de solidificação avance tornando-se mais espessa. Durante o caminho da placa de aço no comprimento metalúrgico a solidificação é finalizada e placa cortada;

3. **Resfriamento terciário:** As placas são armazenadas em um pátio de placas e resfriadas até que sejam despachadas para embarque.

Na CSP, o aço líquido proveniente dos processos de refino primário e secundário é transferido da panela de aço para o distribuidor e em seguida para os moldes do lingotamento contínuo onde inicia-se o processo de solidificação.

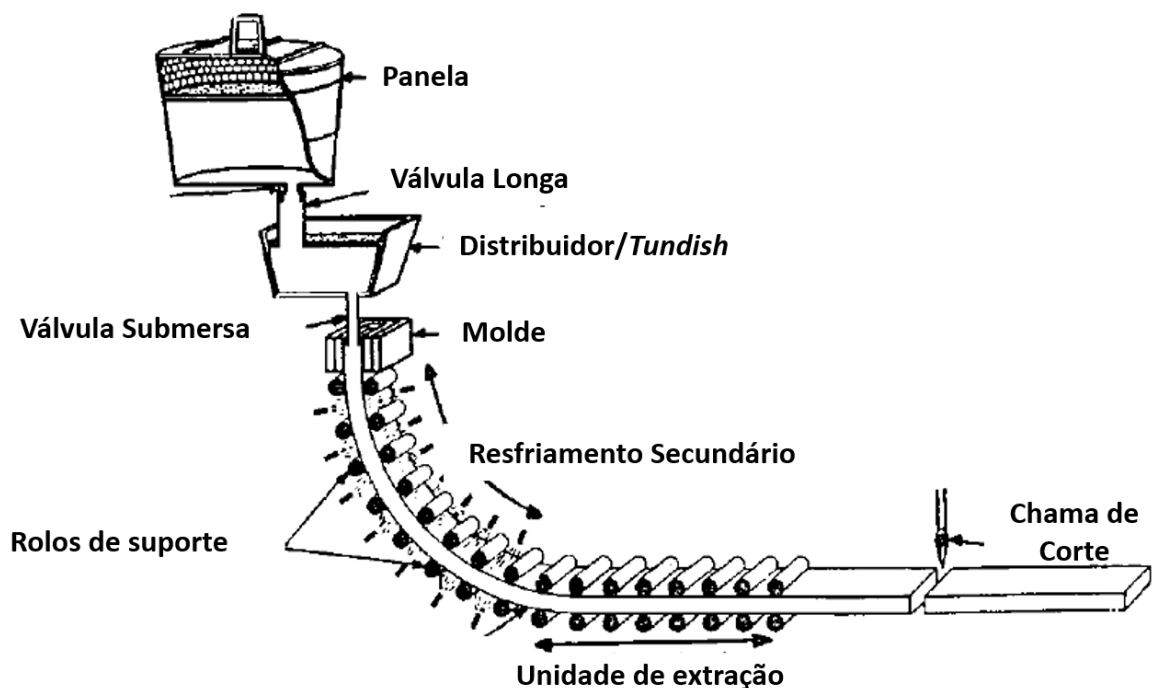
3.1.2 Componentes e Operação

O processo de lingotamento contínuo é baseado no esvaziamento de uma panela verticalmente em um molde vazado de cobre que é constantemente resfriado com água. (IRVING, 1993)

A figura 5 mostra esquematicamente, os principais componentes do lingotamento contínuo que são: a panela de aço, o distribuidor, o molde de resfriamento primário e a região do resfriamento secundário com sprays.

No processo do Lingotamento contínuo, o aço líquido é inicialmente vazado do convertedor para a panela de aço e após processamentos no refino secundário, sejam eles; estação de borbulhamento, forno panela, RH ou uma combinação desses processos, a panela é suspensa por meio de uma ponte rolante e posicionada na torre de panelas do lingotamento contínuo.

Figura 5 – Diagrama esquemático de uma máquina de lingotamento contínuo de placas mostrando os seus principais componentes



Fonte: Irving (1993)

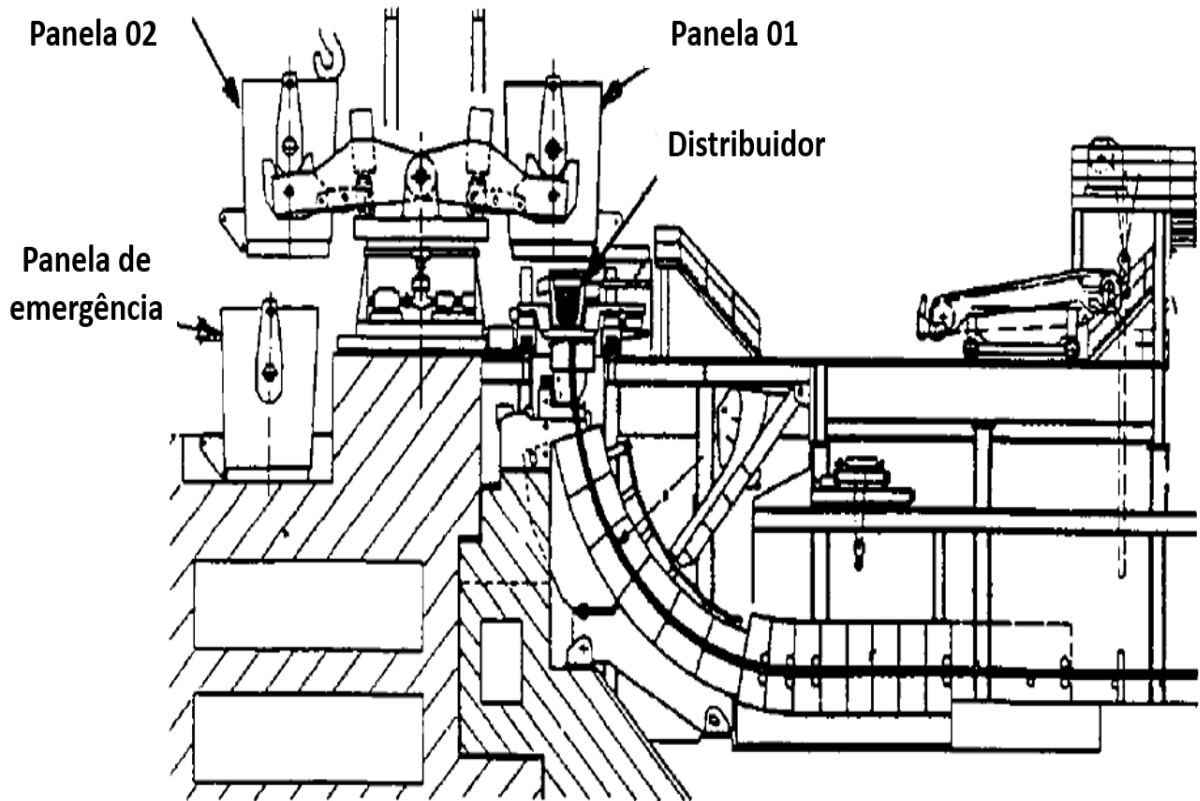
Para se alcançar alta produtividade, as panelas são lingotadas em sequência, de modo que o processo é contínuo enquanto uma panela vazia é substituída por uma panela cheia que já está esperando na torre giratória.(IRVING, 1993)

A figura 6 descreve brevemente a disposição dos elementos que compõe o lingotamento contínuo de placas de aço. A torre giratória do lingotamento contínuo suporta duas panelas. Assim, ao fim do lingotamento da panela número 1, a panela número 2 pode ser imediatamente trasladada para a posição de lingotamento, mantendo o ritmo de lingotamento o mais estável possível.

Sob a panela que está em posição de lingotamento, encontra-se o distribuidor. O aço líquido é transferido da panela para o distribuidor por meio de um sistema de válvula gaveta e o

fluxo de aço é protegido por um tubo refratário para evitar oxidação do aço pela atmosfera.

Figura 6 – Layout de uma máquina de lingotamento contínuo

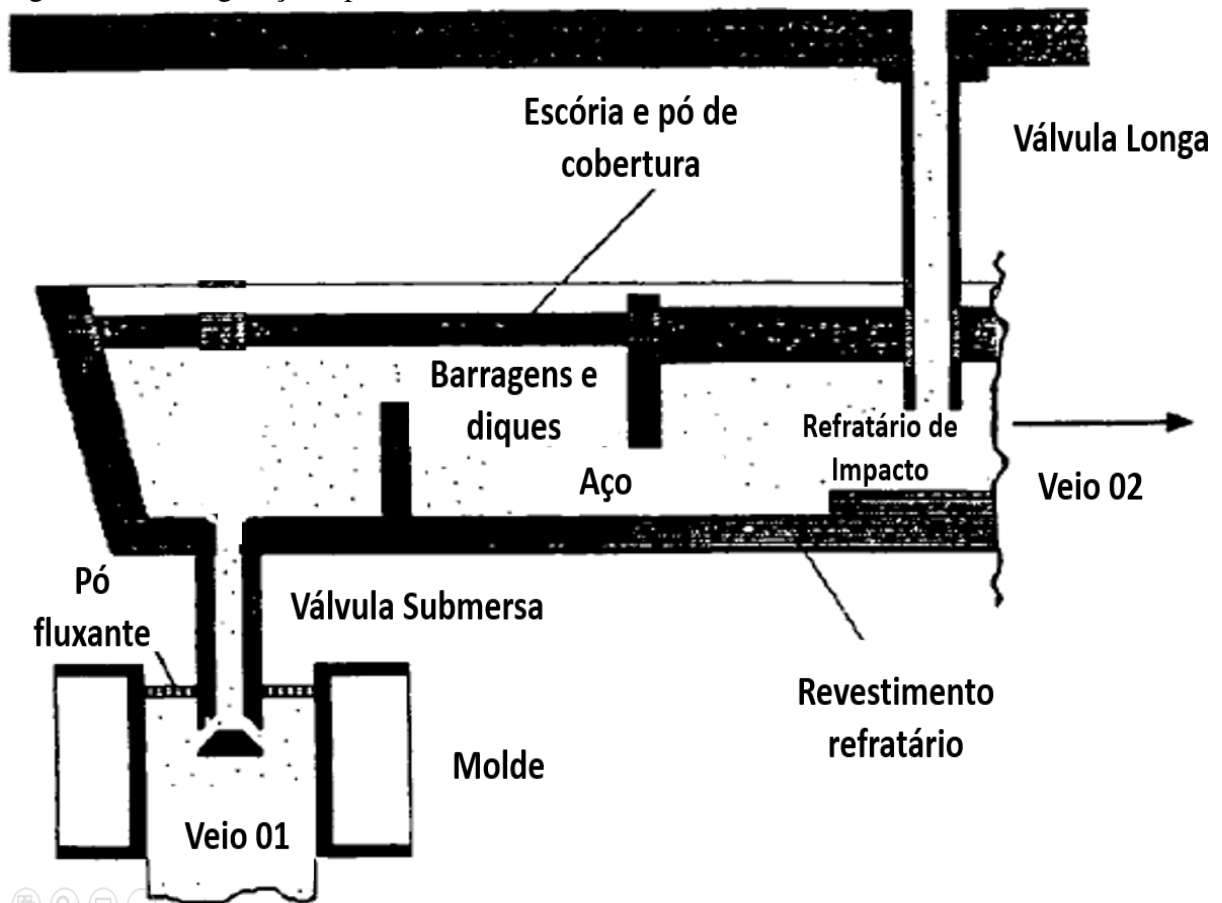


Fonte: Irving (1993)

O distribuidor que recebe o aço da panela, é responsável por conter o aço e distribuir o fluxo para os veios do distribuidor de modo a preservar a estabilidade e constância do processo de lingotamento. O design e configuração do distribuidor depende, dentre outros fatores, do número de veios do lingotamento e tem como objetivo a otimização do processo. Além disso, quando necessário, os distribuidores também são substituídos rapidamente, garantindo longos sequenciais e maior produtividade. A figura 7 abaixo mostra a configuração típica de um distribuidor. A tecnologia do distribuidor será discutida de maneira mais aprofundada em uma seção a parte.

O aço do distribuidor é transferido para o molde de cobre refrigerado. Nesta etapa do processo, inicia-se o resfriamento primário, sendo suas principais funções permitir a retirada de calor do metal pela água que circula no molde e suportar a coluna de metal líquido até que se forme uma camada de solidificação suficientemente espessa junto à superfície do molde durante os instantes iniciais do processo de solidificação (SANTOS, 2001)(GARCIA A., 2006).

Figura 7 – Configuração típica de um distribuidor de dois veios



Fonte: Irving (1993)

Entre os parâmetros que merecem atenção e controle nessa região, pode-se destacar as condições de refrigeração, características como composição, o nível e flutuação do metal líquido no molde, espessura, conicidade, tipo de suportes, oscilação e lubrificação, além de espessura mínima requerida da casca solidificada na saída do molde (SANTOS, 2001)(GARCIA A., 2006).

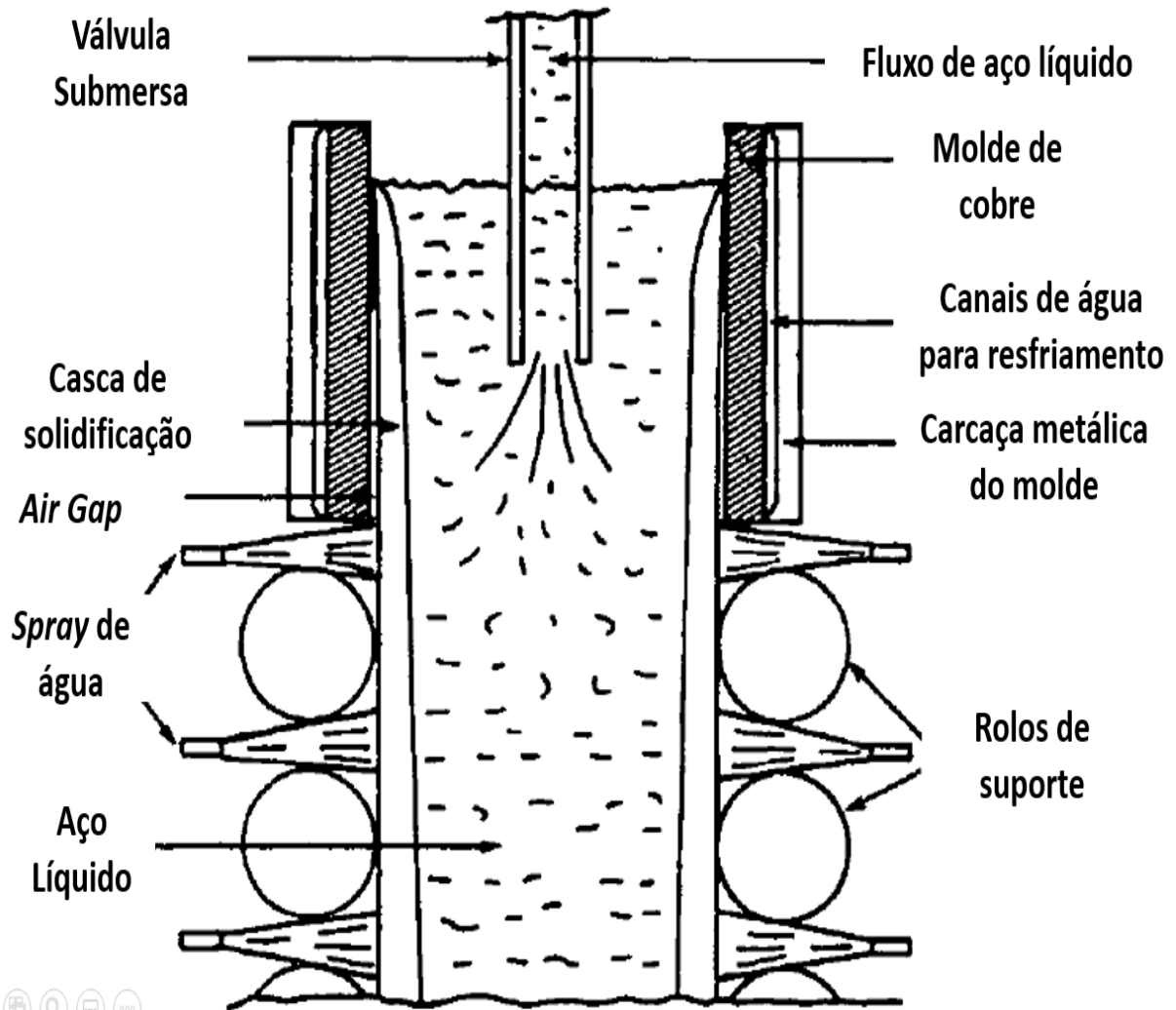
(IRVING, 1993) destaca dois princípios fundamentais necessários para garantir que não ocorra agarramento de aço no molde:

1. O molde faz um movimento senoidal em uma determinada frequência de modo a promover o estripamento negativo. Ou seja, o molde se move em uma velocidade maior do que a pele solidificada em ciclos predefinidos.

2. O molde precisa ser lubrificado na interface entre a pele de solidificação e as paredes de cobre refrigeradas. A CSP utiliza um pó fluxante apropriado para cada tipo de aço produzido. O pó fluxante em contato com o aço fundido formando uma escória sintética que escorre preenchendo as aberturas entre o molde e a pele de aço solidificada promovendo a lubrificação.

A figura 8 ilustra o princípio básico de solidificação de aço no lingotamento contínuo.

Figura 8 – Princípio básico do lingotamento contínuo



Fonte: Irving (1993)

Assim que a pele de solidificação é suficientemente espessa para suportar a pressão ferrostática, o veio deixa o molde e continua seu processo de solidificação por meio de *sprays* de água que são pulverizados por meio de válvulas de alta pressão sobre a pele de aço em solidificação. Um sistema de rolos mecânicos dá suporte ao aço evitando abaulamentos causados pela pressão ferrostática. O aço é extraído da máquina a uma taxa constante por meio de rolos de extração.

3.2 Tecnologia do Distribuidor

3.2.1 O papel do Distribuidor no Lingotamento Contínuo

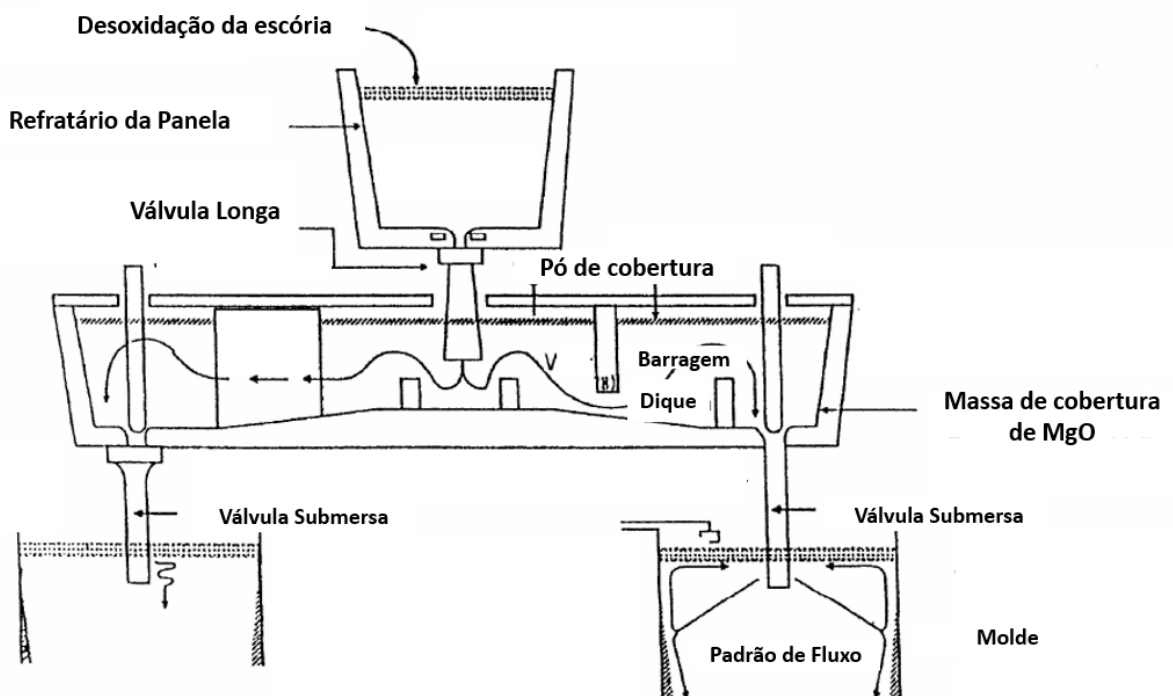
Para transferir o aço processado da panela para o molde em uma máquina de lingotamento contínuo, utiliza-se um vaso metalúrgico intermediário chamado de distribuidor.

(OKIMORI, 1996) descreve o distribuidor como um recipiente retangular comprido, revestido de material refratário e que pode ser coberto com uma tampa refratária. O distribuidor pode ter uma ou mais válvulas de saída que podem ser válvula gaveta ou um sistema de tampão para controle de fluxo de metal.

O distribuidor geralmente é dividido em duas regiões: Uma região de entrada, que normalmente possui uma zona de impacto ou inibidor de turbulência e onde o metal líquido é transferido da panela; e uma região de saída, que é onde o metal é transferido do distribuidor para dentro do molde. (SAHAI, 2008)

A figura 9 mostra o distribuidor dentro do sistema que compõe o lingotamento contínuo.

Figura 9 – Sistema que compõe o lingotamento contínuo



Fonte: Okimori (1996)

É comum a utilização de vários modificadores de fluxo ao longo do distribuidor. Os modificadores de fluxo tem sido alvo de estudo de vários autores, que por meio de modelamentos

matemáticos, simulações físicas e computacionais procuram identificar a melhor composição e distribuição dos mobiliários ao longo do distribuidor de modo a otimizar o processo, melhorar a produtividade e qualidade do aço produzido.(SAHAI, 2008)

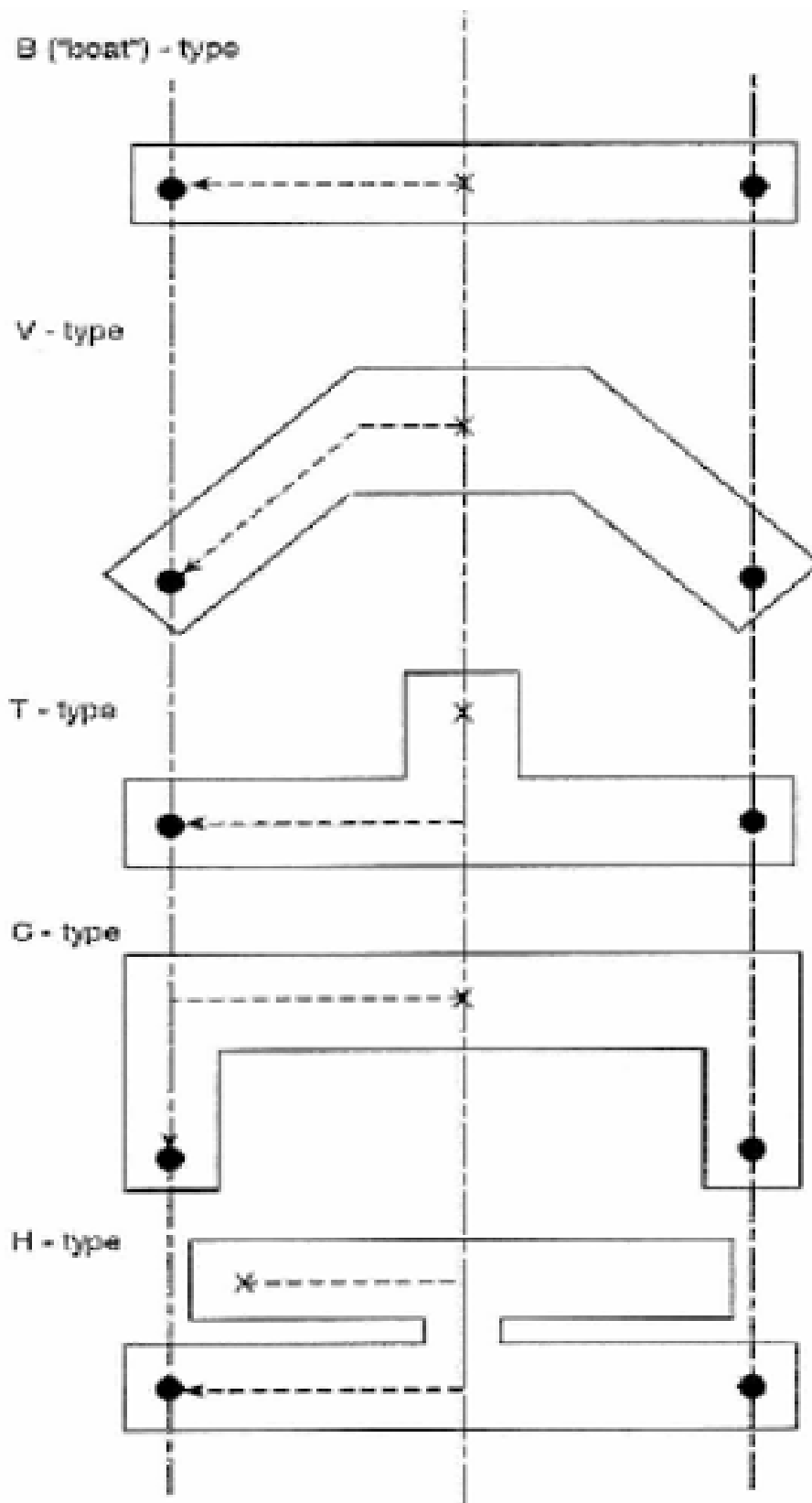
O distribuidor é projetado com o objetivo de distribuir o fluxo de aço de maneira homogênea para o molde, a uma taxa de extração e temperatura planejadas sem que haja contaminação por inclusões.(SAHAI, 2008)

O distribuidor funciona ainda como um reservatório durante as trocas de panela e continua a suprir o aço para o molde mesmo quando a panela já foi completamente esvaziada. Essa característica possibilita o lingotamento de muitas panelas, tornando o processo contínuo. (IRVING, 1993)

As principais causas de formação de inclusões e contaminação do metal líquido inclui a oxidação do metal pelo ar, mistura do aço com a escória da panela, arraste de escória da panela e do distribuidor e a emulsificação dessas escórias no banho. A geometria e fluxo do aço dentro do distribuidor deve ser projetado de maneira a favorecer a flotação dessas inclusões para fora do aço.(SAHAI, 2008)

A figura 10 mostra a geometria de diferentes distribuidores utilizados na indústria siderúrgica.

Figura 10 – Vista superior de distribuidores de diferentes formatos



Fonte: Sahai (2008)

3.2.2 Construção e Montagem de um Distribuidor

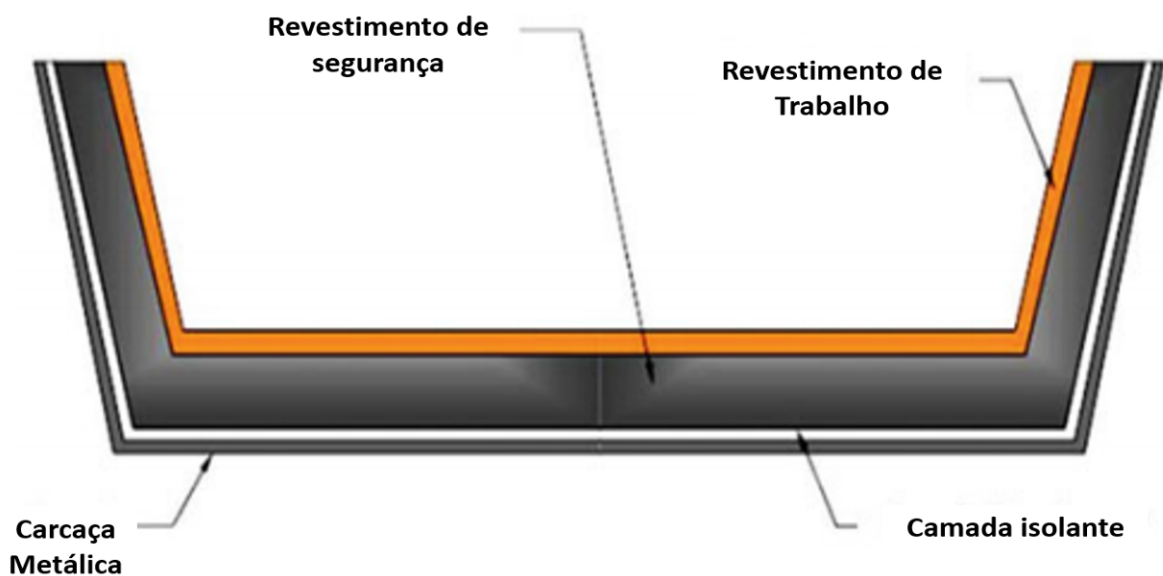
(BISWAS, 2020) no livro *Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking* descreve didaticamente as camadas que compõe um distribuidor. De modo geral, o distribuidor é composto por três camadas de acordo com a figura 11:

1. O revestimento de trabalho do distribuidor consiste em um material a base de MgO e é a camada de revestimento que fica diretamente exposta ao aço líquido. Diferentes tipos de materiais podem ser utilizados no revestimento de trabalho como: tijolos, massas de projeção, placas, concretos vertidos, massas plásticas etc.

2. O revestimento permanente é, geralmente, feito de um refratário com alto teor de alumina e baixo cimento. E possui uma espessura média entre 80 a 110 mm. Em algumas plantas, utiliza-se tijolos de alto teor de alumina como revestimento permanente.

3. O terceiro componente do revestimento do distribuidor é a camada isolante. Ela é instalada entre a carcaça metálica e o revestimento permanente. Sua função é a de garantir isolamento térmico de modo a manter a temperatura da carcaça do distribuidor abaixo de sua temperatura crítica ao longo de um sequencial de lingotamento. Alguns dos materiais comumente utilizados como isolantes são: tijolos de isolamento ASTM23, fibras cerâmicas etc.

Figura 11 – Representação esquemática do revestimento refratário de um distribuidor



Fonte: Biswas (2020)

3.2.2.1 *Revestimento de segurança*

O revestimento de segurança, também conhecido como revestimento permanente, protege a carcaça do distribuidor de superaquecimentos, além de prover suporte termomecânico para o revestimento de trabalho. O revestimento permanente, precisa permanecer intacto durante as atividades cambagem, que é a atividade de remoção do cascão remanescente e revestimento de trabalho já utilizado. (BISWAS, 2020)

De acordo com (BISWAS, 2020), as principais características do revestimento de segurança são:

- Reduzir o desgaste mecânico e danos causados durante a remoção do cascão e revestimento de trabalho;
- Suportar choques mecânicos;
- Ser resistente contra fusões ou quaisquer outras reações químicas entre o revestimento permanente e o revestimento de trabalho de modo a facilitar as atividades de remoção de cascão e resíduos de refratários de trabalho durante a cambagem;
- Funcionar como uma barreira a eventuais infiltrações de aço líquido que poderiam ocasionar furo do distribuidor.

O revestimento permanente pode ser feito de tijolos de alta alumina. No entanto, esse tipo de material possui a desvantagem de se soltar com facilidade durante as atividades de remoção de cascão e revestimento de trabalho. Assim, essa modalidade de revestimento necessita de frequentes reparos.

Com o desenvolvimento de concretos de alta resistência e alto teor de alumina, a maioria das plantas siderúrgicas tem utilizado o revestimento monolítico como revestimento permanente. Isso faz com que a vida das campanhas de revestimento aumente significativamente. Na CSP, por exemplo, a vida do permanente monolítico gira em torno de 1200 corridas.

(BISWAS, 2020) cita as vantagens da utilização de revestimento permanente monolítico no lugar de tijolos convencionais:

- Revestimento sem a presença de juntas, o que torna praticamente impossível a queda de materiais refratários permanentes durante cambagem;
- Menor tempo de instalação. Utiliza-se um molde metálico no formato do distribuidor para a realização do revestimento de segurança;
- Não há aderência do revestimento de trabalho ao revestimento permanente devido a formação de componentes de baixo ponto de fusão na interface;

- Facilidade de remoção de cascão;
- Baixa frequência de reparos;
- Aumento de resistência ao choque térmico;
- Aumento da vida da campanha refratária;
- Aumento de disponibilidade de distribuidor.

3.2.2.2 *Revestimento de Trabalho*

O revestimento de trabalho do distribuidor é um refratário descartável, facilmente removível durante a retirada de cascão e facilmente aplicável para os sequenciais subsequentes (SAHAI, 2008):

(BISWAS, 2020) destaca alguns dos tipos de refratários utilizados como revestimento de trabalho:

- Placas expansivas;
- Massa spray;
- Massa seca vibrada.

A CSP utiliza massa spray ou massa de projeção. Esse tipo de massa refratária monolítica possui as seguintes vantagens (BISWAS, 2020):

- Baixa densidade após aplicação e cura promovendo baixo volume térmico e baixa condutividade térmica;
- Contração adequado ao fim da campanha de utilização, facilitando a remoção de cascão;
- Redução de pick-up de hidrogênio pelo aço;
- Boa resistência a lascamento de refratário;
- Composição química adequada para suportar a corrosão pela escória presente no distribuidor;
- Interação e adesão adequada ao revestimento permanente.

3.3 Engenharia das Inclusões

A demanda por materiais para aplicações *state of the art* desafia constantemente a indústria siderúrgica para desenvolver aços cada vez mais limpos. Ao longo dos anos, tornou-se evidente que uma parte importante das propriedades dos aços está intimamente relacionada ao tipo, tamanho e distribuição das inclusões não metálicas. Isso impulsionou um desenvolvimento profundo sobre o entendimento da origem, propriedades e comportamento das inclusões não metálicas durante o processamento do aço.(SILVA, 2018)

Desenvolvimentos significativos foram alcançados no controle, quantificação e correlação das características das inclusões nas propriedades dos aços de modo que, a manipulação de inclusões para melhora de performance e propriedades dos aços tornou-se uma demanda essencial para a indústria siderúrgica e o conceito de engenharia das inclusões foi cunhado para descrever esse processo.(SILVA, 2018)

Engenharia de inclusões, portanto, é o campo do processamento metalúrgico do ferro que lida com o controle da quantidade, tamanho, distribuição e composição das inclusões não-metálicas formadas no metal líquido durante o refino e solidificação. O conceito de inclusões não-metálicas inclui óxidos, sulfetos, nitretos, carbonetos, e seus compostos.(HOLAPPAA, 2014)

3.3.1 Origem das Inclusões

Os óxidos de inclusões surgem a partir de causas endógenas e causas exógenas. As inclusões exógenas são formadas durante a transferência do metal líquido devido a reoxidação dos aços desoxidados e refinados que entram em contato com o ar e com a escória oxidada. e devido ao arraste de produtos de reoxidação, escória e refratários. (EMI, 1999)

As inclusões endógenas se formam na panela devido a reação entre oxigênio dissolvido no banho metálico e elementos desoxidantes como Alumínio e Silício. Em um aço desoxidado e refinado, as inclusões endógenas são, normalmente, muito pequenas e, portanto, desde que essas inclusões não se aglomerem em inclusões maiores, são menos danosas. Por outro lado, as inclusões exógenas apresentam-se frequentemente em tamanhos maiores, pouco antes do aço ser transferido para o molde do lingotamento contínuo. Essas inclusões têm pouco tempo de ser removidas e portanto são mais prejudiciais.(SILVA, 2018)

Dentre as funções do distribuidor/*tundish* está a prevenção da ocorrência de grandes

Produtos de Aço	Tamanho Crítico de inclusões em placas de aço
Chapas Laminadas à Frio	240
UOE pipe	200
ERW pipe	140
Materiais para forja a frio	100
Cabos de aço	30
Rolamentos de esfera	15

inclusões de origem exógenas, a prevenção da formação de grandes aglomerados de inclusões endógenas e a remoção dessas inclusões durante o escoamento do aço pelo distribuidor. (SAHAI, 2008)

3.3.1.1 *Inclusões exógenas*

3.3.1.1.1 Definição de Macro inclusões

Após a desoxidação do banho metálico, normalmente, ocorre o refino de aço na panela. Esse processo visa realizar ajustes na composição química, remoção de produtos de desoxidação e ajuste térmico. O refinamento na panela geralmente remove a maioria das grandes inclusões, de modo que apenas uma pequena quantidade de inclusões de tamanhos entre 20 μm -50 μm continua no banho. As inclusões maiores que 50 μm , geralmente inclusões exógenas, são chamadas de macro inclusões e as inclusões menores que 50 μm , geralmente inclusões endógenas, são chamadas de micro-inclusões. (SAHAI, 2008)

A definição acima de macro inclusões apesar de ser convencional, é limitada. Uma vez que as demandas por aço cada vez mais limpos tem sido constante, uma outra forma de definir macro inclusões seria defini-las como inclusões de tamanho crítico que comprometam as propriedades de produtos de aplicações específicas.(EMI, 1999)

A Tabela abaixo mostra o tamanho crítico das inclusões que causam anomalias no processo e defeitos nos produtos. Nota-se que para algum dos produtos, as inclusões de até 15 μm já seriam consideradas macro inclusões.

3.3.1.1.2 Origem das macro inclusões exógenas

(SAHAI, 2008) lista as principais causas da formação de macro inclusões exógenas:

(1) Reoxidação de aço refinado pela entrada de ar na junção entre a panela/válvula longa, distribuidor/mecanismo e mecanismo/válvula submersa;

- (2) Reoxidação do banho no distribuidor pela entrada de ar;
- (3) Reoxidação da superfície do banho por óxido de ferro, óxido de manganês e ou sílica na escória que passa da panela para o distribuidor;
- (4) Arraste e mistura de escória no distribuidor ocasionada pela formação de vórtice no escoamento próximo ao final do esvaziamento da panela;
- (5) Emulsificação e arraste da escória do distribuidor devido ao fluxo turbulento causado pelo jato de aço proveniente da panela;
- (6) Arraste de escória do distribuidor devido a formação de vórtice na saída do veio, particularmente quando a profundidade do banho no distribuidor é reduzida a um nível crítico durante o período de troca da panela e encerramento de sequencial;

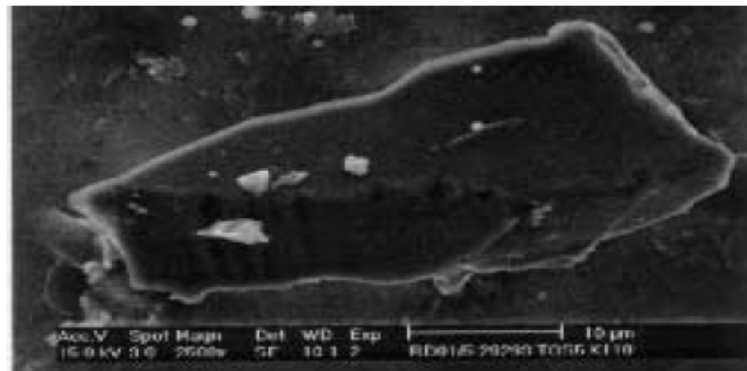
3.3.1.1.3 Composição das inclusões exógenas

A química e microestrutura das inclusões exógenas é reflexo da composição dos produtos de reoxidação, dos vários componentes presentes na escória da panela, dos pós de cobertura, pós fluxantes e refratários do distribuidor. (HOLAPPAA, 2014)

Assim, as macro inclusões são constituídas dos produtos de desoxidação e reoxidação como Al_2O_3 e aluminossilicato de manganês; escória de BOF como $CaO-MgO-SiO_2-FeO$; Escória de panela do refino secundário, normalmente composta de $CaO-Al_2O_3-SiO_2$; pó de cobertura $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ e pó fluxante que consiste de $CaO-SiO_2-Al_2O_3-(NaF)$. (SILVA, 2018)

A figura 12 mostra exemplos de inclusões exógenas.

Figura 12 – Inclusão exógena típica de revestimento refratário

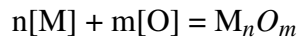


Fonte: Zhang (2003)

3.3.1.2 Inclusões endógenas

3.3.1.2.1 Termodinâmica das reações de desoxidação

As inclusões endógenas ocorrem como consequência das reações de desoxidação:



Onde [M] representa o elemento desoxidante, como Mn, Si, ou Al dissolvido no banho metálico. (SAHAI, 2008)

A solubilidade do oxigênio em ferro puro a 1600°C é aproximadamente 2300 ppm. Essa solubilidade não é normalmente atingida nos processos da aciaria, pois o percentual de oxigênio é limitado por outros elementos dissolvidos no aço líquido. O aço proveniente do refino primário é rico em oxigênio dissolvido. Quanto menor for o teor de carbono no aço após a descarburagem, maior será o oxigênio. Os valores típicos de oxigênio após a descarburagem variam entre 200-800 ppm (0,02-0,08 wt% [O]). Para desoxidar o aço proveniente do refino primário, elementos com alta afinidade ao oxigênio são adicionados formando óxidos e reduzindo significativamente o percentual de oxigênio no aço. (HOLAPPAA, 2014)

Na desoxidação por Si-Mn o percentual de oxigênio dissolvido no aço líquido varia entre 100 a 50 ppm. A adição de alumínio reduz significativamente o equilíbrio de oxigênio. Na dissolução de 0,03% de alumínio, por exemplo, o percentual de alumínio no equilíbrio varia entre 5 – 3 ppm dependendo da temperatura. Comparando o percentual de oxigênio dissolvido durante o vazamento do convertedor, esse número é 100 vezes menor. (HOLAPPAA, 2014)

Quando desoxidantes são adicionados no aço líquido, uma intensa nucleação acontece. Após essa nucleação inicial, a inclusão cresce em tamanho devido ao crescimento difusivo, coalescência e colisão.

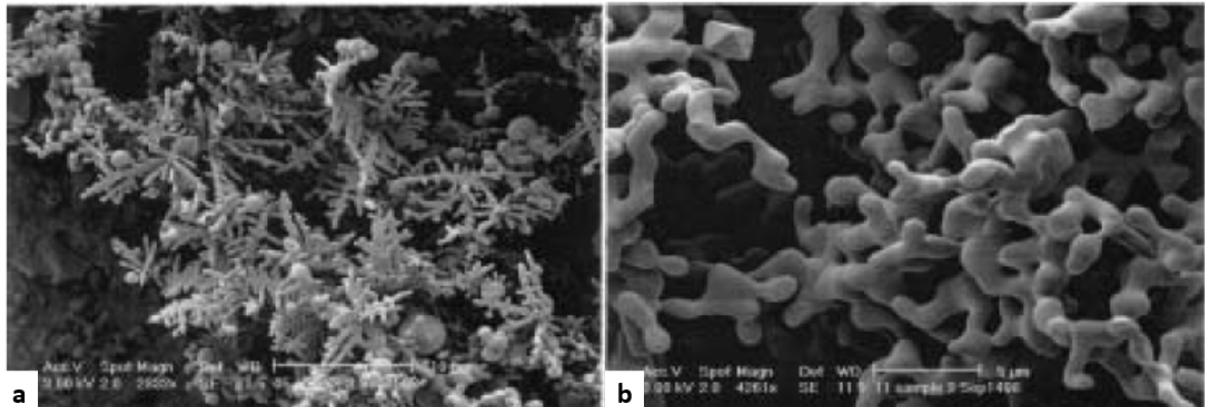
Devido a rápida desoxidação inicial, logo após a adição de desoxidante, o percentual de oxigênio dissolvido é reduzido até um valor próximo ao equilíbrio que se mantém constante até o aço ser lingotado. No entanto, o *Total Oxygen Content* ou percentual de oxigênio total, que leva em consideração o oxigênio dissolvido e o oxigênio ligado as inclusões, diminui lentamente durante os processos metalúrgicos subsequentes. Além dessas inclusões primárias, uma nova nucleação de inclusões e crescimento de inclusões já existentes pode ocorrer durante o lingotamento. (BARTOSIAKI JULIO ANÍBAL MORALES PEREIRA, 2015)

Todas essas inclusões formadas como produto dos processos de desoxidação são endógenas, elas se formam no banho como resultado da adição de desoxidantes que reagem

com o oxigênio dissolvido. Na prática, vários outros fatores podem influenciar na quantidade de inclusões no aço, pois na metalurgia da panela e no lingotamento contínuo há inúmeras possibilidades de reoxidação do aço. Na panela, por exemplo, a reoxidação pode ocorrer devido a escória muito oxidada, reações com o ar atmosférico devido aberturas na escória que causam a exposição do banho ao ar, etc. No lingotamento, podem ocorrer reações com pó de cobertura do distribuidor, podem ocorrer problemas na abertura da válvula gaveta que favoreça a entrada de ar, além de formação de inclusões devido a interferência dos mobiliários do distribuidor no escoamento do aço.

A figura 13 mostra exemplos de inclusões endógenas.

Figura 13 – Inclusões de alumina em clusters dendríticos (a) e inclusões de alumina em formato de corais



Fonte: Zhang (2003)

3.3.2 Métodos de avaliação da limpeza do aço

Para se estudar e controlar a limpeza do aço é importante que se disponha de métodos preciso de avaliação. O tamanho, quantidade, distribuição e composição das inclusões não metálicas deveria ser medido em todos os estágios da produção do aço. Os métodos de medição de limpeza de aço são classificados em métodos diretos e métodos indiretos. (BARTOSIAKI JULIO ANÍBAL MORALES PEREIRA, 2015)

a. Métodos Diretos

Alguns dos métodos diretos de medição da limpeza do aço são descritos abaixo:

- *Observação Metalográfica por Microscópio (MMO)* – Nesse método tradicional, duas regiões ao longo de uma amostra de aço são examinadas com o microscópio e quantificadas a olho nu. Inclusões com formatos complexos podem gerar dificuldades na interpretação dos

resultados, além disso, inclusões muito pequenas podem ser difíceis de serem contabilizadas e as inclusões maiores são mais raras. A figura 1 a abaixo mostra uma análise por MMO. (ZHANG, 2003)

- *Análise de Imagens (IA)* – Esse método é uma evolução do MMO pois no lugar de realizar a análise a olho nu, utiliza-se softwares de computadores para distinguir regiões claras e escuras em uma escala de cinza. Esse método permite avaliar um maior campo de observação e identificar um número maior de inclusões. A análise por imagens está suscetível a erros devido a ranhaduras, manchas e pontos que podem ser confundidos por inclusões.(ZHANG, 2003)

- *Impressão por Enxofre (Método de Baumann)* – É um método de testes popular e barato que avalia a presença de macroinclusões e trincas por meio de gravuras ricas de enxofre formadas. Esse método está sujeito aos mesmo problemas dos métodos expostos acima.(QUEIROZ, 2015)

- *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)* – Esse método revela claramente em três dimensões a morfologia e composição de cada inclusão examinada. A composição é medida por meio de uma sonda de elétrons (Electron Probe Micro Analyzer - EPMA).(BARTOSIAKI JULIO ANÍBAL MORALES PEREIRA, 2015)

b. Métodos Indiretos

Devido aos custos, tempo e dificuldades de preparação de amostras, a limpidez do aço é geralmente medida na indústria por meio de métodos indiretos como Percentual de Oxigênio Total – TOS, *Pick-up* de Nitrogênio dentre outros.

- *Percentual de Oxigênio Total – TOS*: O percentual de oxigênio total no aço é a soma do oxigênio dissolvido no aço e do dissolvido combinado às inclusões não metálicas. A medição do oxigênio livre pode ser medida por meio de sensores de oxigênio. O percentual de oxigênio total representa o nível de pequenas inclusões presentes no aço. Um baixo percentual de oxigênio total indica menor probabilidade de aparecimento de grandes inclusões. (BARTOSIAKI JULIO ANÍBAL MORALES PEREIRA, 2015)

- *Pick-up de Nitrogênio*: A diferença do teor de nitrogênio entre os reatores metalúrgicos (especialmente a panela e o distribuidor) são um indicativo da entrada de ar durante as operações de transferência de metal líquido. Após a desoxidação, o baixo teor de oxigênio dissolvido no aço favorece uma rápida absorção de ar. O pick-up de Nitrogênio, portanto, serve como uma medida indireta do oxigênio total, limpidez do aço e problemas de qualidade das inclusões por reoxidação. (SILVA, 2010)

- *Medida da Perda de alumínio dissolvido:* Para aços baixo carbono acalmados ao alumínio, a perda de alumínio também é um indicativo de reoxidação. No entanto, essa medição é menos precisa do que a medição de TOS e Pick-up de Nitrogênio porque o alumínio pode ser reoxidado pela escória. (ZHANG, 2003)

- *Medição da composição da escória:* Análise da composição da escória antes e depois das operações pode ser interpretada para estimar a absorção de inclusões pela escória. Além disso, o arraste de escória pelo aço pode ser determinado ao correlacionar características de elementos presentes na escória e a composição de inclusões. (ZHANG, 2003)

3.4 Modelamento de Fluxo no Distribuidor

3.4.1 Revisão sobre escoamento de fluidos e turbulência

O escoamento dos fluídos tem um papel muito importante na operação do distribuidor do lingotamento contínuo. Pois as leis da mecânica dos fluidos governam o fluxo de metal líquido, arraste de gás e escória e o movimento e flutuações de inclusões não-metálicas. (SAHAI, 2008)

3.4.1.1 Regimes de escoamento de fluidos

O escoamento de um fluido pode ser caracterizado de várias maneiras. No entanto, uma das classificações mais importantes é a distinção entre regime de escoamento laminar e regime de escoamento turbulento. (SAHAI, 2008)

De acordo com (FOX ROBERT W., 2014) um escoamento laminar é aquele em que partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou suaves.

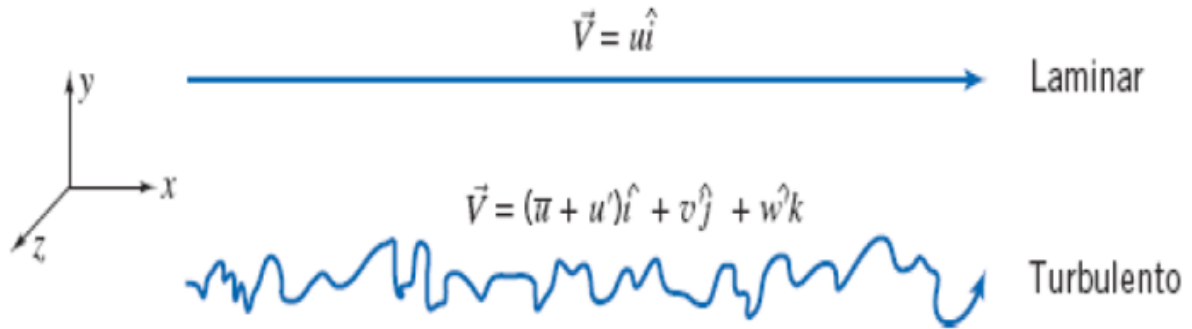
(ÇENGEL, 2012) fala que o escoamento laminar é altamente ordenado e que o próprio nome escoamento laminar faz referência ao movimento de partículas adjacentes agrupadas em “lâminas”. Dentre os exemplos de fluidos com escoamento tipicamente laminar citam-se os óleos de alta viscosidade.

Um escoamento em regime turbulento por outro lado, é aquele em que há movimento altamente desordenado no campo tridimensional e em altas velocidades. O escoamento de fluídos de baixa viscosidade como o ar em altas velocidades é tipicamente turbulento. (ÇENGEL, 2012)

A figura 14 mostra exemplos típicos de um escoamento laminar e turbulento.

A velocidade do escoamento laminar é simplesmente u a velocidade do escoamento turbulento é composta pela velocidade média \bar{u} mais as três componentes das flutuações aleatórias

Figura 14 – Trajetórias de partículas em escoamentos unidimensionais, laminar e turbulento



Fonte: Fox Robert W. (2014)

de velocidade u , e w . A presença de flutuações aleatórias de velocidade e de alta frequência torna a análise do escoamento turbulento extremamente difícil. Em um escoamento laminar, unidimensional, a tensão de cisalhamento está relacionada com o gradiente de velocidade pela relação simples (FOX ROBERT W., 2014):

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.1)$$

Para um escoamento turbulento, no qual o campo de velocidade média é unidimensional, nenhuma relação simples como essa é válida. Uma das investigações mais antigas sobre regimes turbulentos de escoamento foi conduzida por Osborne Reynolds. Ele estabeleceu um critério para a transição de um fluxo laminar para um fluxo turbulento por meio de uma quantidade adimensional conhecida como número de Reynolds (Re) (REYNOLDS, 1883):

$$Re = Lv\rho/\eta \quad (3.2)$$

Onde L é o comprimento característico do sistema, v é a velocidade média do fluido, ρ e η são a densidade e viscosidade do fluido respectivamente.

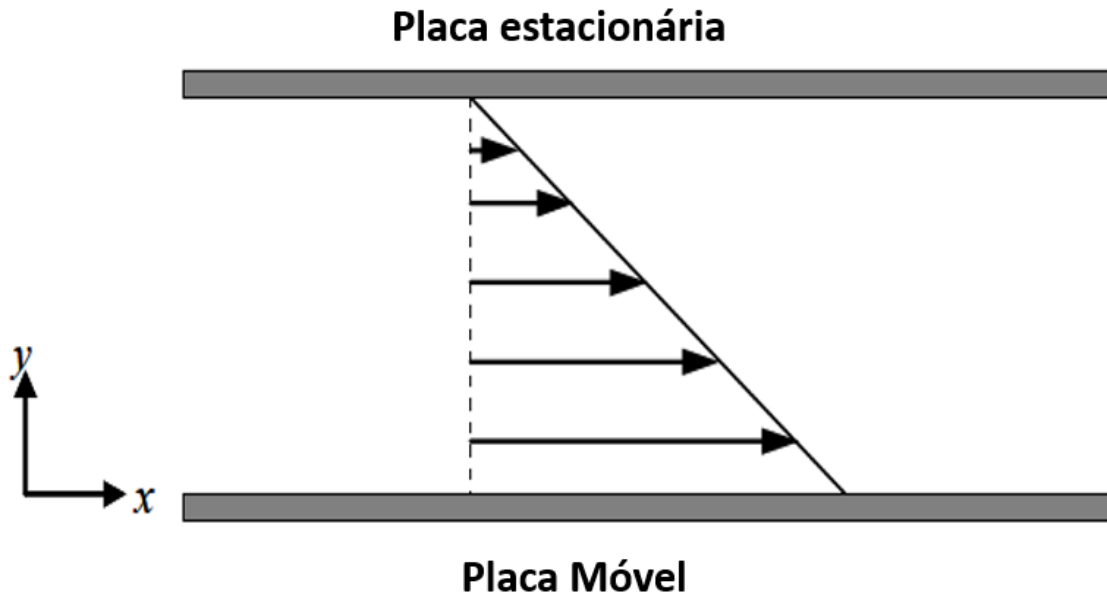
O valor do número de Reynolds onde ocorre a transição de um regime laminar para um turbulento é extremamente dependente da geometria do sistema.

Para um fluxo em superfície livre como a que acontece em um distribuidor, o número de Reynolds aproximado é de 500, onde o comprimento L característico é a profundidade do fluido. (SAHAI, 2008)

3.4.1.2 Dimensionalidade do fluxo

É comum referir-se a um escoamento de acordo com a sua dimensão. O escoamento é dito uni, bi ou tri dimensional. A figura 15 mostra o fluxo na direção x. Em qualquer sistema, se a velocidade varia em apenas uma coordenada, esse fluxo é considerado uni-dimensional.

Figura 15 – Fluxo laminar entre duas placas



Fonte: Fox Robert W. (2014)

Pela figura 16, pode-se notar que próximo a placa, para valores de y e z, a velocidade varia na direção x. Assim, no fluxo da camada limite, a velocidade é função das coordenadas x e y e assim o fluxo é bi-dimensional.

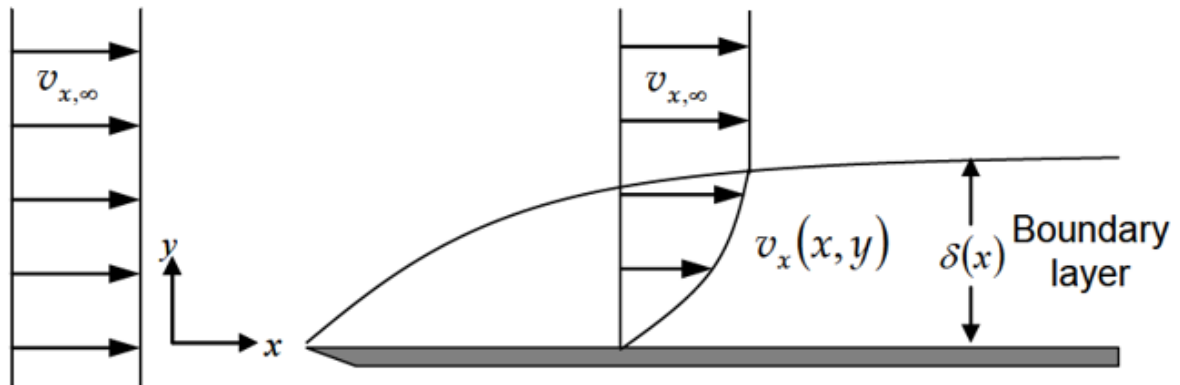
De modo geral, o fluxo em um distribuidor depende das três coordenadas, sendo assim um fluxo tri-dimensional.(SAHAI, 2008)

3.4.1.3 Equações de continuidade e momentum

A equação da continuidade é desenvolvida escrevendo-se um balanço de massa sobre um elemento de volume estacionário em um escoamento de um fluido. A expressão geral para a conservação de massa para um volume de controle é dada por:

$$0 = \int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (3.3)$$

Figura 16 – Momentum da camada limite de uma placa horizontal imersa em um líquido em movimento



Fonte: Fox Robert W. (2014)

Havendo entradas e saídas bem definidas, a equação 3.3 pode ser reescrita como:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \Sigma_c \dot{m} - \Sigma_s \dot{m} \quad (3.4)$$

Em resumo, a taxa de variação total da massa dentro do volume de controle é igual à taxa na qual a massa flui para dentro do volume de controle, menos a taxa na qual a massa flui para fora do volume de controle.

3.4.1.3.1 Dedução da equação de continuidade utilizando o teorema divergente

A maneira mais rápida e direta de deduzir a forma diferencial da equação de conservação da massa é aplicar o teorema do divergente à equação 3.3:

O teorema do divergente também é chamado de teorema de Gauss. Ele nos permite transformar uma integral de volume do divergente de um vetor em uma integral da área sobre a superfície que define o volume. Para qualquer vetor \vec{G} , o divergente de \vec{G} é definido como $\vec{\nabla} \cdot \vec{G}$, e o teorema do divergente pode ser escrito como:

Teorema do Divergente:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{G} dV = \oint_A \vec{G} \cdot \vec{n} dA \quad (3.5)$$

O círculo na integral da área é usado para enfatizar o fato de que a integral deve ser calculada sobre toda a área fechada A que envolve o volume V . Como a equação se refere a qualquer volume, podemos substituir \vec{G} pelo volume de controle da equação 1, assim $\vec{G} = \rho \cdot \vec{V}$

A substituição da equação 3.5 pela equação 3.3 converte a integral da área em uma integral de volume:

$$0 = \int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{VC} \vec{\nabla} (\rho \vec{V}) dV \quad (3.6)$$

Combinamos agora as duas integrais de volume em uma:

$$0 = \int_{VC} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} (\rho \vec{V}) \right] dV \quad (3.7)$$

A equação 3.7 deve valer para qualquer volume de controle independente do seu tamanho ou forma. Isso é possível somente se o integrando da equação 3.7 for igual a zero. Daí temos uma equação diferencial geral para a conservação de massa, mais conhecida como equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.8)$$

3.4.1.4 Equações do momentum

De forma similar, a equação de momentum pode ser obtida escrevendo-se o balanceamento do momentum sobre um elemento volumétrico. Assim a equação de movimento em um vetor singular é:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - [\nabla \cdot p] - [\nabla \cdot \tau] + F_b \quad (3.9)$$

O termo a esquerda da equação é taxa de variação do momentum por unidade de volume. Os quatro termos a direita são a taxa de ganho de momentum por convecção por unidade volumétrica, pressão por unidade volumétrica, e ganho de momentum por transferência viscosa

por unidade volumétrica e força do elemento na unidade volumétrica. Para fluidos de densidade e viscosidade constantes, a equação 3.9 pode ser simplificada dando:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -[\nabla \cdot p] + \eta [\nabla^2 v] + F_b \quad (3.10)$$

Onde $\frac{D()}{Dt} \equiv \frac{\partial ()}{\partial t} + v \cdot \nabla ()$

A equação 3.10 é a famosa equação de Navier-Stokes.

3.4.1.5 Lei de Stocks

As inclusões são mais leves do que o aço líquido e tendem a flotar para a superfície onde são absorvidas pela escória do distribuidor. Em um líquido em repouso, a velocidade de flotação terminal V_t de uma partícula de inclusão é dada pela seguinte relação, conhecida como Lei de Stocks:

$$V_t = \frac{2R_p^2(\rho_s - \rho_p)g}{9\eta_s} \quad (3.11)$$

Onde R_p é o raio da partícula, ρ_s e η_s são a densidade e viscosidade do aço líquido, respectivamente. ρ_p é a densidade da partícula e g é a aceleração da gravidade. A lei de Stock se aplica as partículas que possuem número de Reynolds, Re_p menor que uma unidade.

$$Re_p = \frac{D_p V_t \rho_s}{\eta_s} \quad (3.12)$$

Onde D_p é o diâmetro da partícula. No escoamento de um banho metálico, a velocidade do metal precisa ser adicionada vetorialmente a velocidade de flotação calculada pela Lei de Stock.

3.4.1.6 Caracterização do escoamento de um fluxo

Como já descrito, o distribuidor tem um papel fundamental na operação do lingotamento contínuo. Sendo ele um importante link entre a panela e o molde de lingotamento. Uma vez que o último vaso metalúrgico antes da solidificação do aço no molde, é o distribuidor, cada

vez mais requisita-se que a sua operação garanta a limpidez, homogeneidade térmica e composicional. Assim, a flotação e separação de inclusões, assim como ajustes de composição química se tornaram importantes funções do distribuidor. A eficiência e otimização desses processos requerem um controle preciso das características de fluxo do aço líquido. Pois se o fluxo de aço dentro do distribuidor não foi propriamente controlado, a qualidade do aço produzida pode ser comprometida.

3.5 Revisão sobre a formação de vórtice e seus efeitos no lingotamento contínuo

A formação de vórtices durante as operações que ocorrem em uma aciaria é de grande importância uma vez que a mistura de escória no aço é prejudicial a qualidade do aço produzido. A mistura de aço com escória pode resultar em uma contaminação severa do aço uma vez que a escória é formada por vários óxidos. A interação entre a mistura aço e escória pode gerar uma reversão de impurezas como o fósforo presente na escória, fazendo com que elas retornem ao aço. (LEE SANG-JOON KIM, 2016)

O fenômeno de formação de vórtices tem sido exaustivamente estudado e investigado ao longo dos anos. Por meio de modelamentos físicos e modelamentos computacionais, é possível compreender os fundamentos da formação de vórtice.

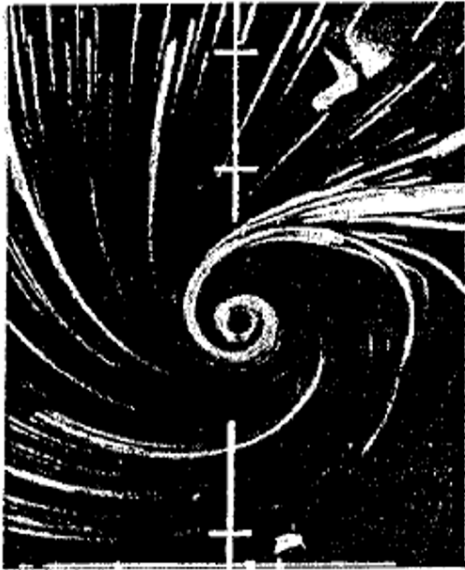
3.5.1 Mecanismo de Formação de vórtice

No estudos de (ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) foram identificados dois tipos de escoamento para as etapas de esvaziamento de um vaso metalúrgico. Escoamento vórtice e escoamento dreno.

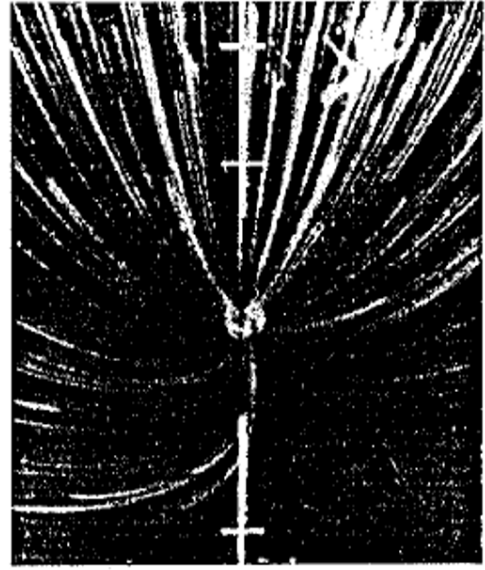
Segundo (ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) no início de um vazamento, o movimento verificado na superfície do líquido é predominantemente vertical, sendo mínimas as componentes de velocidade em outras direções. A partir de determinado momento, turbilhonações de pequenas dimensões começam a se formar na superfície do líquido sobre o canal de drenagem. Em alguns casos, ocorre a estabilização e aumento do seu diâmetro, formando um cordão central até o fundo. Caracterizando-se nesse instante a formação de um escoamento tipo vórtice. O vórtice está associado a um movimento de rotação, onde, por definição, as partículas individuais do líquido giram em torno de um eixo com velocidade diferente de zero.

(ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) indica que próximo ao estágio final de vazamento, quando a vazão do orifício é menor do que a capacidade de saída, determinada pela pressão ferrostática e pela geometria do canal de drenagem, ocorre a mudança para o escoamento tipo dreno. Este fenômeno acontece independente da formação ou não do vórtice. Sob estas condições, uma vez que o canal de drenagem não é completamente preenchido, ocorre a passagem de escória.

Figura 17 – Tipos de escoamento em um orifício localizado no fundo de uma panela



(a) Escoamento vórtice



(b) Escoamento dreno

Fonte: ANDRZEJEWSKI P.; DIENER (1987)

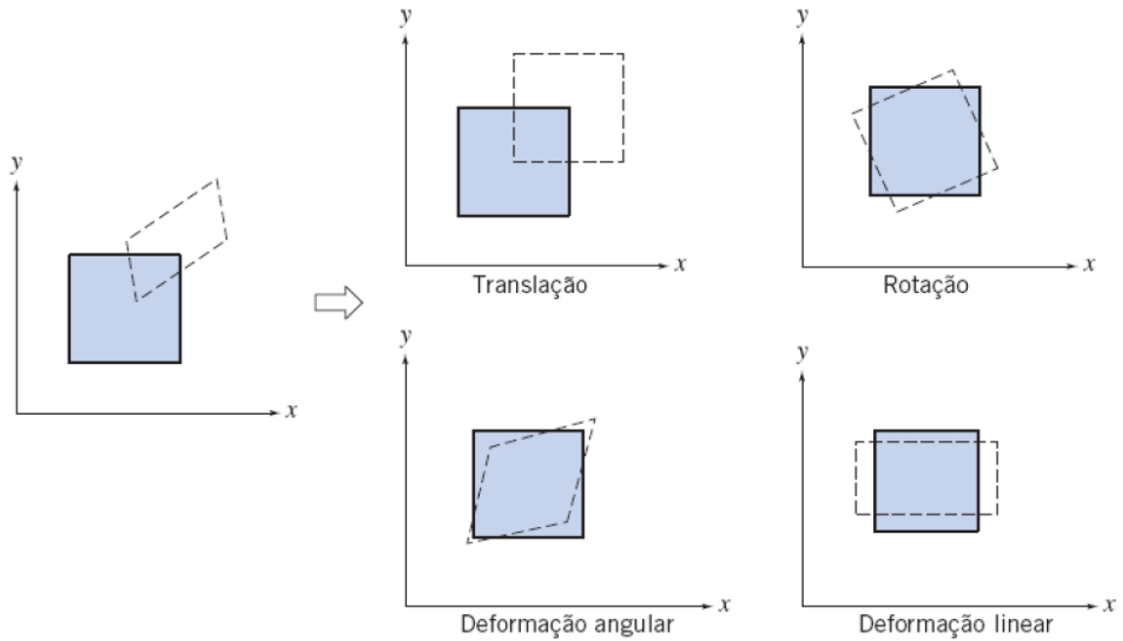
3.5.2 Tipos de movimento dos elementos de fluido

(ÇENGEL, 2012) afirma que um elemento pode passar por quatro tipos fundamentais de movimentos ou deformação:

- a) Translação, na qual a partícula se desloca de um ponto para o outro;
- b) Rotação, que pode ocorrer em torno de um eixo x, y ou z ou de todos eles;
- c) Deformação linear, no qual os lados da partícula esticam ou contraem;
- d) Deformação por cisalhamento, onde os ângulos inicialmente perpendiculares da partícula variam.

A figura 18 ilustra as quatro componentes do movimento de um fluido.

Figura 18 – Representação esquemática das componentes do movimento de fluido



Fonte: Çengel (2012)

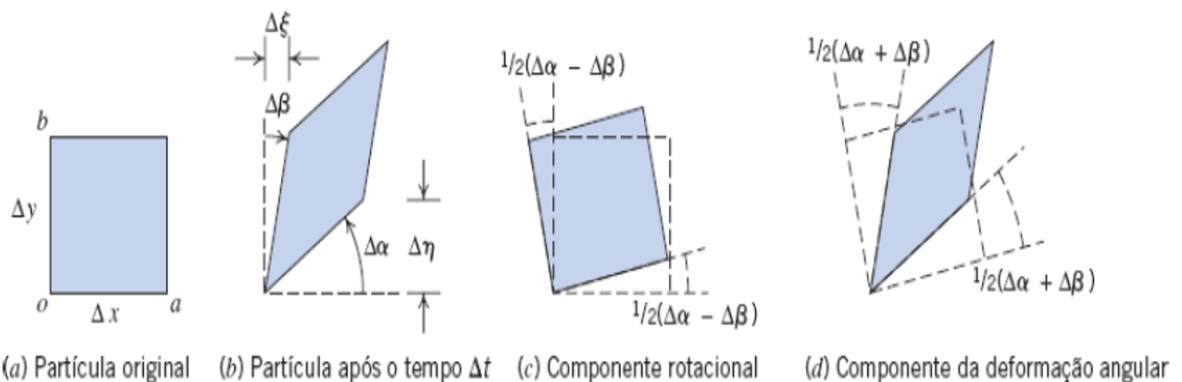
3.5.3 Rotação de Fluido

Uma partícula de fluido que se move em determinado campo de escoamento tridimensional qualquer pode girar em relação a todos os três eixos de coordenadas. Portanto, a rotação de uma partícula é uma quantidade vetorial, onde (FOX ROBERT W., 2014):

$$\vec{\omega} = \hat{i}\omega_x + \hat{j}\omega_y + \hat{k}\omega_z \tag{3.13}$$

Em que ω_x é a rotação sobre o eixo x, ω_y é a rotação sobre o eixo y e ω_z é a rotação sobre o eixo z.

Figura 19 – Rotação e deformação angular de segmentos de linha perpendiculares em um escoamento bidimensional



Fonte: Çengel (2012)

Da figura 19 temos:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\frac{1}{2}) \cdot (\Delta\alpha - \Delta\beta)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\frac{1}{2}) \cdot (\frac{\Delta\eta}{\Delta x} - \frac{\Delta\xi}{\Delta y})}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(\frac{1}{2}) \cdot (\frac{\partial v \Delta x}{\partial x \Delta x} \Delta t - \frac{\partial u \Delta x}{\partial y \Delta y} \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.14)$$

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.15)$$

Pode-se ainda calcular a velocidade angular da partícula sobre o eixo z, pela combinação dos resultados:

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3.16)$$

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (3.17)$$

Considerando a rotação dos pares de segmentos similares de linhas perpendiculares nos planos yz e xz, pode-se mostrar de forma similar que a equação 3.13: $\vec{\omega} = \hat{i}\omega_x + \hat{j}\omega_y + \hat{k}\omega_z$ pode ser escrita como:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \left[\hat{i} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \hat{j} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \hat{k} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (3.18)$$

O termo entre cochetes é chamado de rotacional $\vec{V} = \nabla \times \vec{V}$

Portanto, podemos escrever que:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{V} \quad (3.19)$$

A vorticidade $\vec{\xi}$ é definida como sendo o dobro da rotação, portanto:

$$\vec{\xi} = 2\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V} \quad (3.20)$$

A vorticidade é portanto, de acordo com (FOX ROBERT W., 2014), uma medida da rotação de um elemento de fluido conforme se move no campo de escoamento.

3.5.4 Estágios da formação do escoamento do tipo vórtice

(SANKARANARAYANAN, 1994) descreve a formação do escoamento tipo vórtice em quatro estágios:

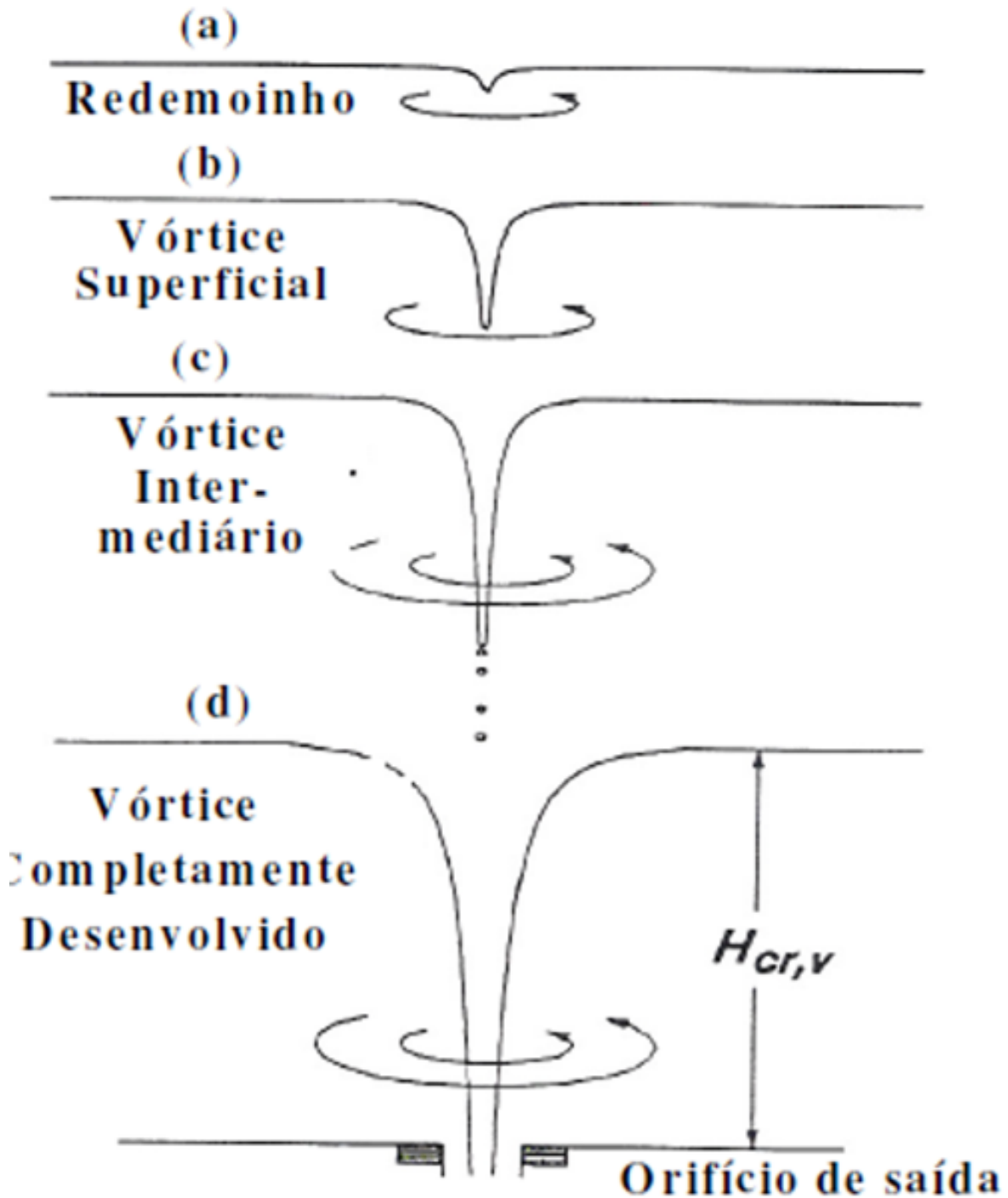
- Quando um líquido se encontra em um nível relativamente alto e sua velocidade tangencial é baixa, pode-se observar a formação de um pequeno movimento rotacional ou redemoinho; (Figura 20a)
- Com a redução do nível do líquido ou com um aumento da velocidade tangencial, o redemoinho tende a se estender na direção do orifício de vazamento. Inicia-se aí a formação de um pequeno vórtice; (Figura 20b)
- A progressão da redução do nível do líquido ou aumento da velocidade tangencial próximo ao orifício de saída do líquido amplificam a dimensão do vórtice; (Figura 20c)
- Finalmente, o vórtice completamente desenvolvido tem potencial para arrastar o fluido sobrenadante. (Figura 20d)

A progressão entre os quatro estágios mencionados na formação do vórtice dependem da velocidade tangencial e da distribuição dessa velocidade no vaso metalúrgico. Quando há uma forte velocidade tangencial, a progressão do redemoinho para um vórtice completamente desenvolvido acontece quase que instantaneamente. Quando a velocidade tangencial residual é baixa, a progressão de redemoinho para vórtice totalmente desenvolvido pode demorar muito mais tempo. (SANKARANARAYANAN, 1994)

Na figura 21 (MAZUMDAR, 2010) ilustra a formação de vórtice em um vaso metalúrgico. A formação do funil do vórtice se forma quando a velocidade tangencial do líquido é maior do que uma velocidade tangencial crítica. Além disso, a formação do vórtice ocorre em uma altura crítica (H_{cr_v}) *muíto maior do que o diâmetro (d) do canal de drenagem.*

Do ponto de vista da prevenção de arraste de escórias, (SANKARANARAYANAN, 1994), fala que a altura crítica (H_{cr_v}) *apricipal propriedaderesponsvel pela forma do vrtice.*

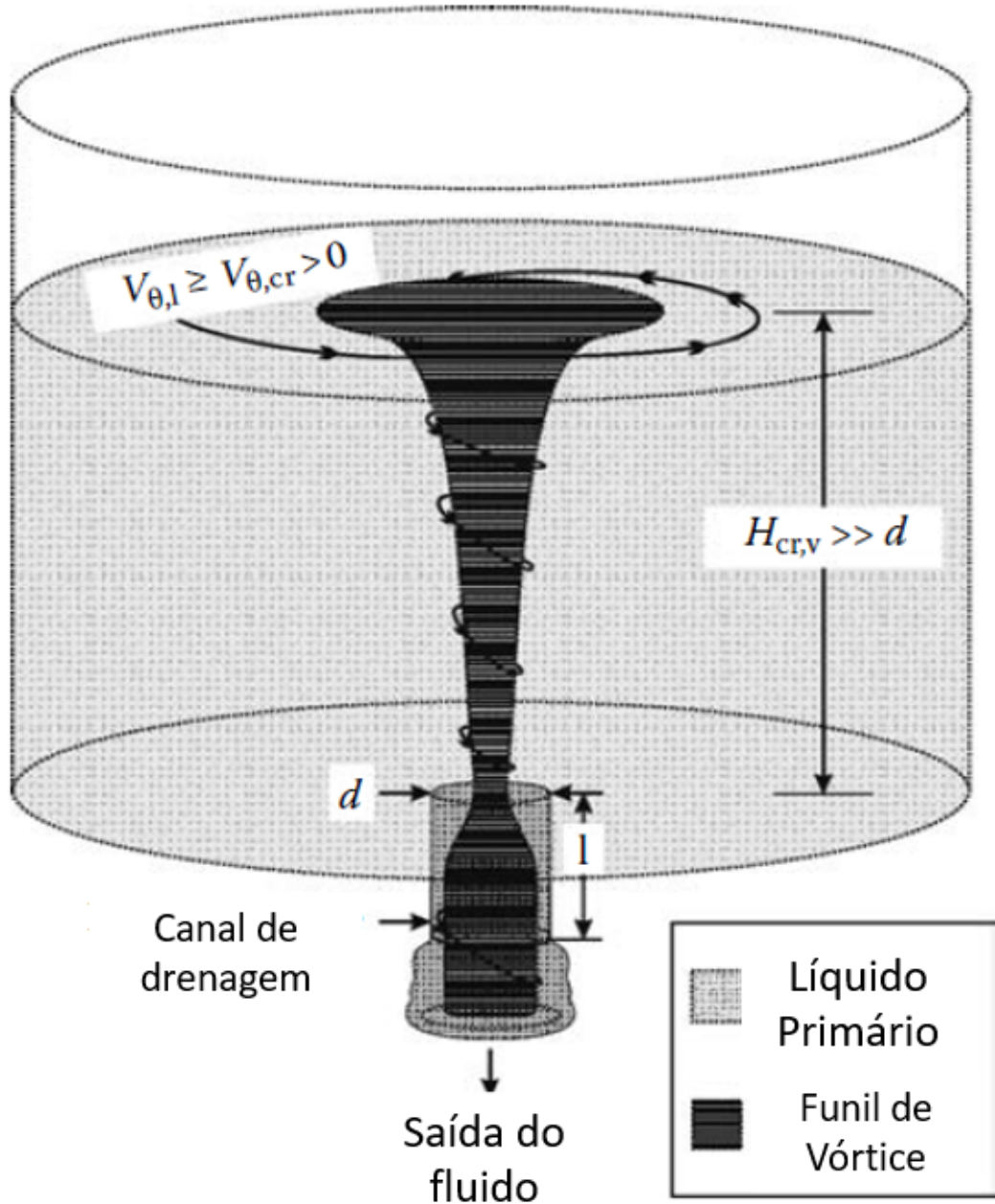
Figura 20 – Estágios do escoamento do tipo vórtice



Fonte: SANKARANARAYANAN (1994)

Quando o vórtice se forma, uma parte do líquido, o líquido primário, ou o líquido que está afastado do centro do vórtice, mantém o seu regime de fluxo sendo pouco afetado pelo vórtice. Por outro lado, o líquido atraído para o centro, é fortemente afetado pelo vórtice. No caso do esvaziamento de um vaso metalúrgico contendo aço e escória, na região fora de ação do vórtice, não ocorre arrastamento de escória e mistura com o aço, enquanto, na região de domínio

Figura 21 – Formação de vórtice



Fonte: Mazumdar (2010)

do vórtice, ocorre a mistura do aço e escória e os seus consequentes efeitos deletérios a qualidade do produto e segurança do processo.

(SANKARANARAYANAN, 1994) menciona que a presença de rotação é condição necessária para a formação de um vórtice durante a drenagem de um vaso metálico. Um vaso metálico pode ser definido como um recipiente que possui um canal de entrada e um canal de saída e que tem a capacidade de conter o líquido.

De acordo com (SANKARANARAYANAN, 1994) são conhecidos dois tipos de drenagem para um vaso metálico, que são:

- Drenagem em regime permanente;
- Drenagem em regime não permanente.

Durante a drenagem em regime permanente, a superfície do banho se mantém a uma altura constante. Nesse caso, a taxa de entrada é igual a taxa de saída no vaso metalúrgico. Por outro lado, a drenagem em regime não permanente, ou drenagem em batelada, acontece quando há uma redução ou supressão da entrada de líquido no vaso metalúrgico. Nesse caso, o nível da superfície do metal líquido reduz gradativamente com a passagem do tempo.

O distribuidor do lingotamento contínuo experimenta os dois tipos de drenagem. Durante o lingotamento de uma panela, o regime de drenagem é permanente, uma vez que a taxa de entrada de aço na panela é aproximadamente igual a taxa de saída de aço do distribuidor para o molde. No entanto, durante as trocas de panela ou durante a última corrida do sequencial, a drenagem é em regime não permanente.

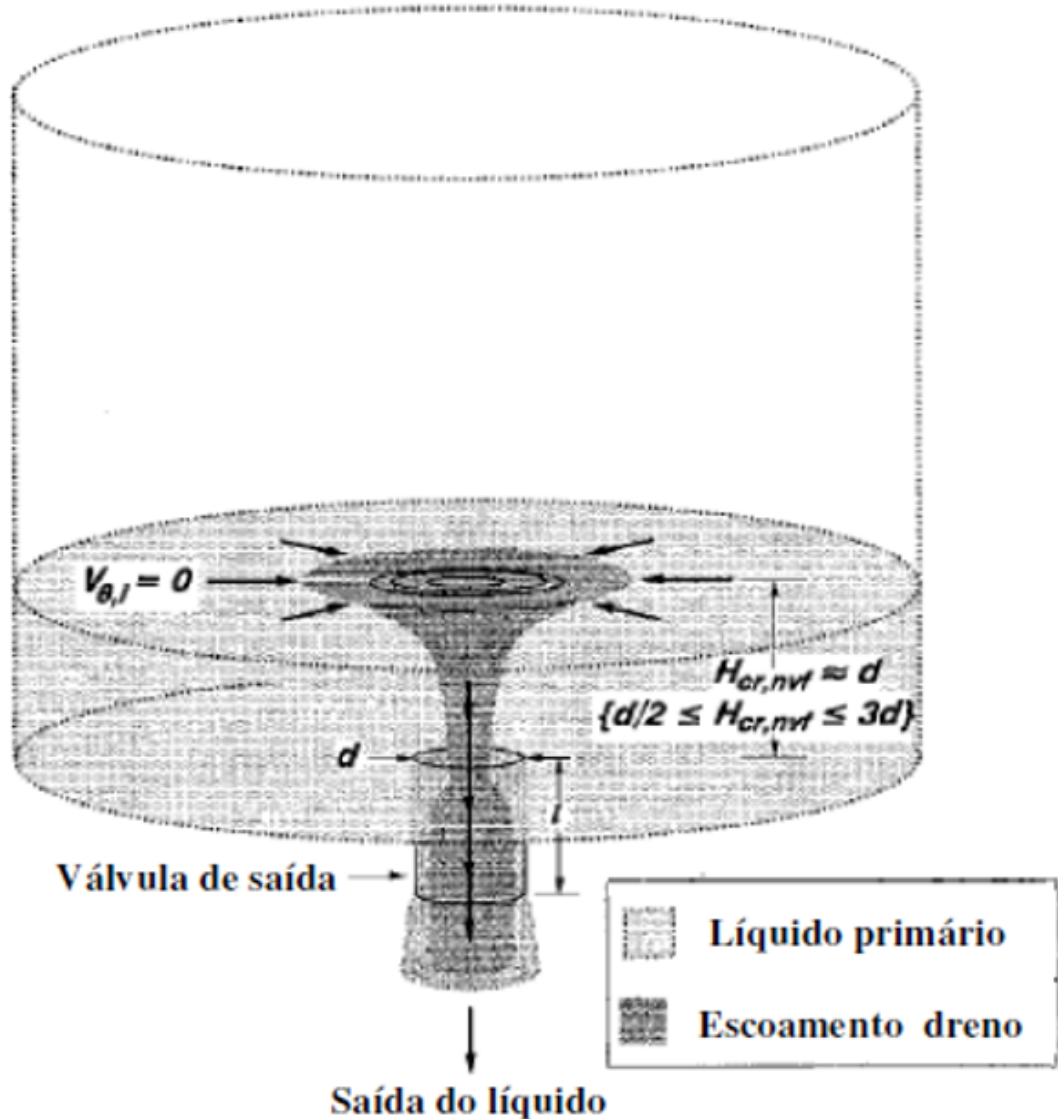
De acordo com (LEE SANG-JOON KIM, 2016) há alguns fatores cruciais que afetam a formação do vórtice durante o esvaziamento de um recipiente metalúrgico que são: a velocidade tangencial inicial, a espessura da escória sobrenadante no metal líquido, a excentricidade e a altura crítica; que é a profundidade a partir da qual o vórtice inicia a sua formação.

(LEE SANG-JOON KIM, 2016) observaram que quanto maior a velocidade tangencial, maior é a altura crítica de formação do vórtice. Além disso, quanto maior for a distância do canal de drenagem para o centro do recipiente, menor será a altura crítica de formação de vórtice.

3.5.5 Formação do Escoamento tipo Dreno

A figura 7 abaixo ilustra as características presentes em um escoamento do tipo dreno em um recipiente. $H_{cr.nv}$ é a altura a partir de onde ocorre o arrastamento do líquido sobrenadante durante a drenagem de um recipiente que inicialmente continha um líquido irrotacional. A altura $H_{cr.nv}$ é aproximadamente da mesma ordem de grandeza do diâmetro d . Em um escoamento tipo dreno, as partículas fluem para o canal de drenagem sem que haja qualquer movimento rotacional. Os testes para avaliar a formação de um escoamento do tipo dreno são mais simples do que os necessários para avaliar um escoamento do tipo vórtice. Pois, uma vez que o líquido é mantido em repouso por um período significativo, não há velocidades tangenciais significativas atuando no líquido. (SANKARANARAYANAN, 1994)

Figura 22 – Características do escoamento do tipo dreno



Fonte: SANKARANARAYANAN (1994)

3.5.6 Regimes de escoamento no esvaziamento de um recipiente

O arraste de um fluido sobrenadante, como a escória presente no processo de produção de aço, pode ser decorrente de um escoamento do tipo vórtice ou dreno. O processamento de aço dentro de um distribuidor conta com períodos de regime estável e períodos de regime não estável. Portanto, a movimentação constante do banho no distribuidor favorece a formação de um escoamento do tipo vórtice.

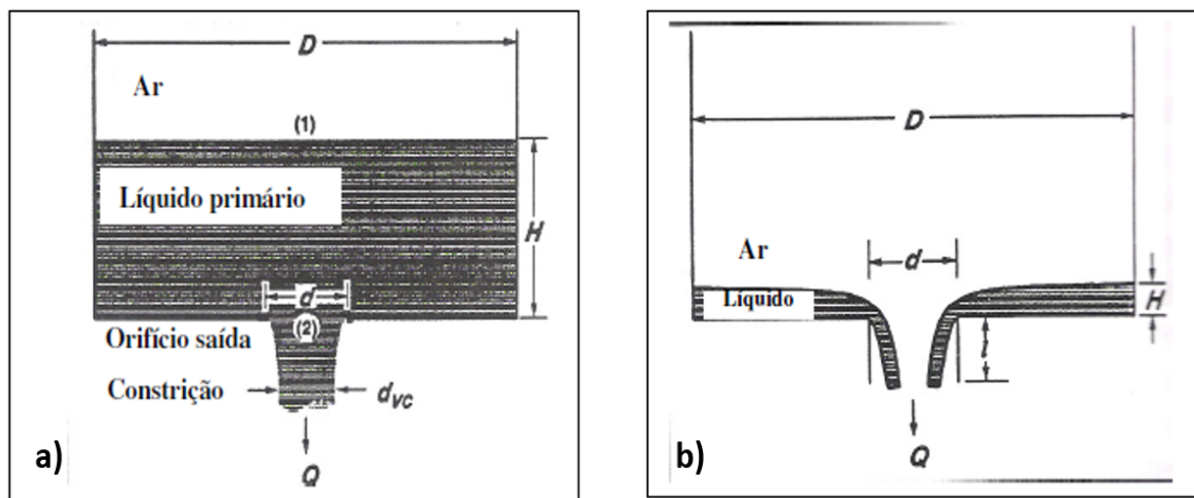
(ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) destaca que, permitido o total esvaziamento de um recipiente, em todos os esvaziamentos ocorrerão os escoamentos tipo dreno, pois em determinado momento, a vazão do fluido se torna menor que a vazão nominal do orifício de

saída.

O esvaziamento de um recipiente pode ser dividido em quatro fases (SANKARANARAYANAN, 1994):

- Escoamento do tipo orifício cheio;
- Escoamento do tipo vórtice;
- Escoamento do tipo dreno;
- Escoamento do tipo transbordamento.

Figura 23 – Características do escoamento do tipo orifício cheio (a) e do tipo transbordamento (b)



Fonte: SANKARANARAYANAN (1994)

No escoamento em regime orifício cheio: $H > H_{cr,v} > H_{cr,nv} > H_{cr,t}$

No escoamento tipo vórtice : $H < H_{cr,v}$

No escoamento tipo dreno: $H < H_{cr,nv}$

No escoamento do tipo transbordamento: $H < H_{cr,t}$

Onde: - $H_{cr,t}$: Altura crítica abaixo de onde ocorre transbordamento; - $H_{cr,nv}$: Altura crítica para a formação de um escoamento de dreno; - $H_{cr,v}$: Altura crítica para a formação de um escoamento de vórtice.

3.5.7 Fatores que afetam a formação dos vórtices

Por meio de experimentos, é possível avaliar a influência de diversos parâmetros envolvidos na formação de um escoamento tipo dreno e escoamento tipo vórtice. Vários autores se debruçaram sobre os tópicos aqui detalhados, procurando mensurar a influência de cada um desses parâmetros na formação do escoamento observado.

3.5.7.1 *Tempo de espera e velocidade tangencial inicial*

O tempo de espera é definido como sendo o tempo entre o final do enchimento do recipiente e o início de seu vazamento. O tempo de espera é citado por vários autores como sendo um importante parâmetro a ser controlado.

(HAMMERSCHMID P., 1984) estudaram a altura crítica de formação de vórtice ($H_{cr,v}$) durante a drenagem por influência da gravidade em três panelas diferentes. Em duas panelas eles utilizaram água como o líquido de estudo e em uma terceira panela utilizaram mercúrio. Foi utilizado um equipamento formado por um duto tangencial para entrada de fluido. Esse duto possuía uma seção vertical conectada a uma fonte de água e uma saída horizontal. A seção vertical do duto foi afixada na parede interna de um recipiente cilíndrico de modo que a seção horizontal do duto ficasse disposta acima do nível máximo do recipiente. No experimento, mantendo-se a taxa de entrada de água e a altura do líquido constante, foi possível induzir uma distribuição de velocidade tangencial no líquido primário. A intensidade do movimento de rotação no líquido no início da drenagem em batelada variou de acordo com o tempo de espera.

(HAMMERSCHMID P., 1984) observaram que a velocidade tangencial diminui com o aumento do tempo de espera. Assim, descobriu-se que a altura crítica ($H_{cr,v}$) diminui com o aumento do tempo de espera e que portanto, a altura crítica ($H_{cr,v}$) é diretamente proporcional a intensidade do movimento rotacional presente no líquido no início da drenagem.

(SANKARANARAYANAN, 1994) traçou a curva do decaimento da velocidade tangencial em função do tempo de espera para recipiente de diferentes diâmetros e alturas. Abaixo segue o gráfico plotado para três dos experimentos realizados:

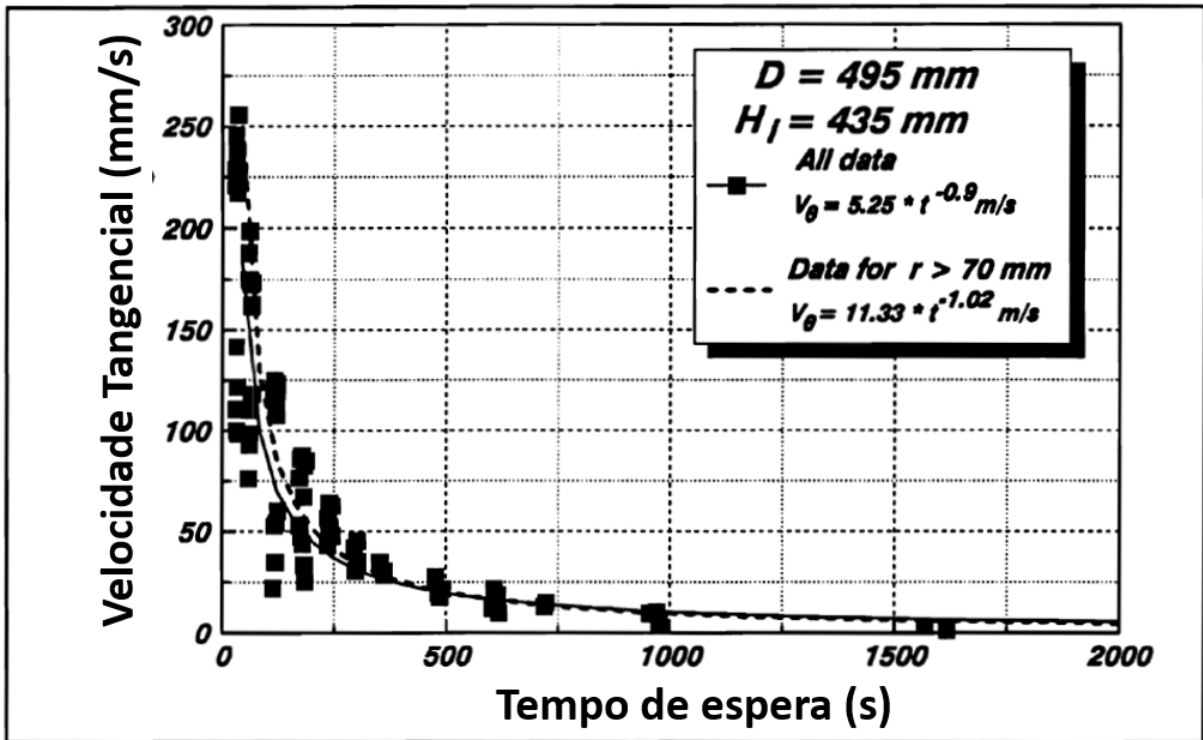
- Recipiente com 495 mm de diâmetro e 435 mm de altura;
- Recipiente com 374 mm de diâmetro e 500 mm de altura;
- Recipiente com 374 mm de diâmetro e 350 mm de altura.

(SANKARANARAYANAN, 1994) concluiu que para diferentes alturas iniciais do líquido, o aumento do tempo de espera provocou redução da velocidade tangencial.

(ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) construíram um sistema de enchimento de líquido em um recipiente de modo a permitir a entrada de água lateralmente. Esse sistema induzia um movimento rotacional do fluido da panela como nos estudos de (HAMMERSCHMID P., 1984).

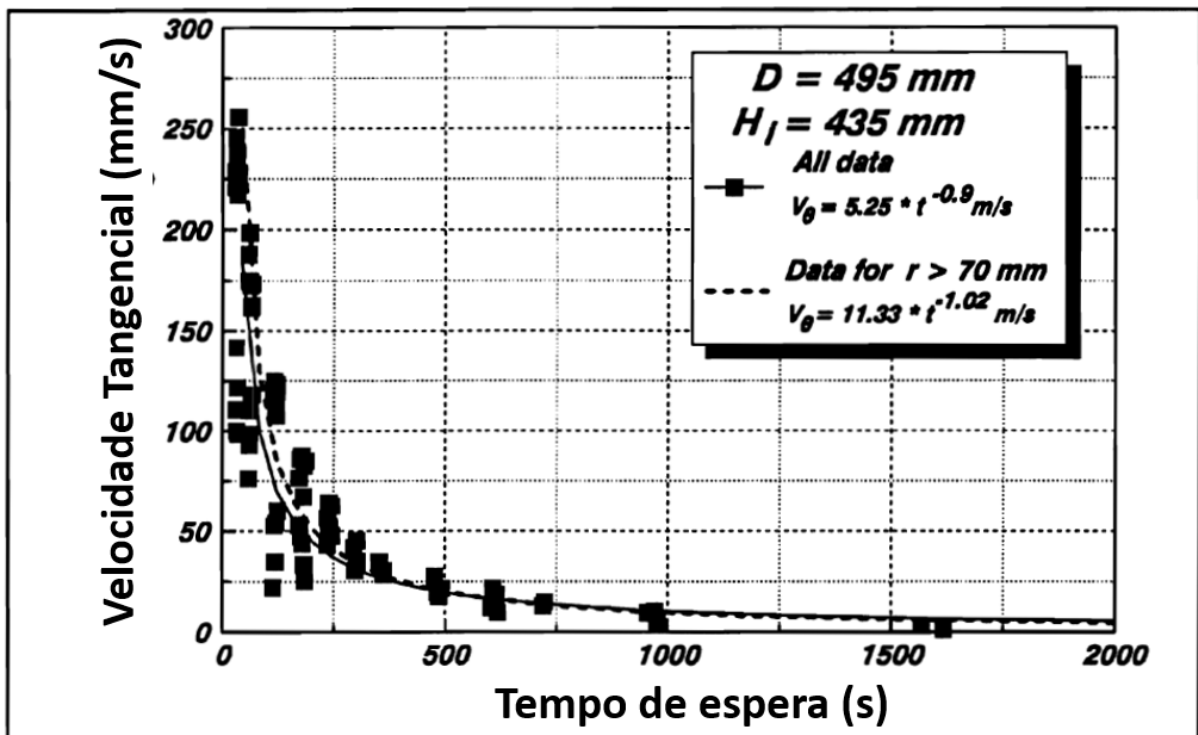
A saída de água era no fundo do recipiente, variando para uma posição centralizada ou próxima da parede. O trabalho de (ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) mostrou que

Figura 24 – Decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera em uma panela de 495mm de diâmetro e Altura de 435mm



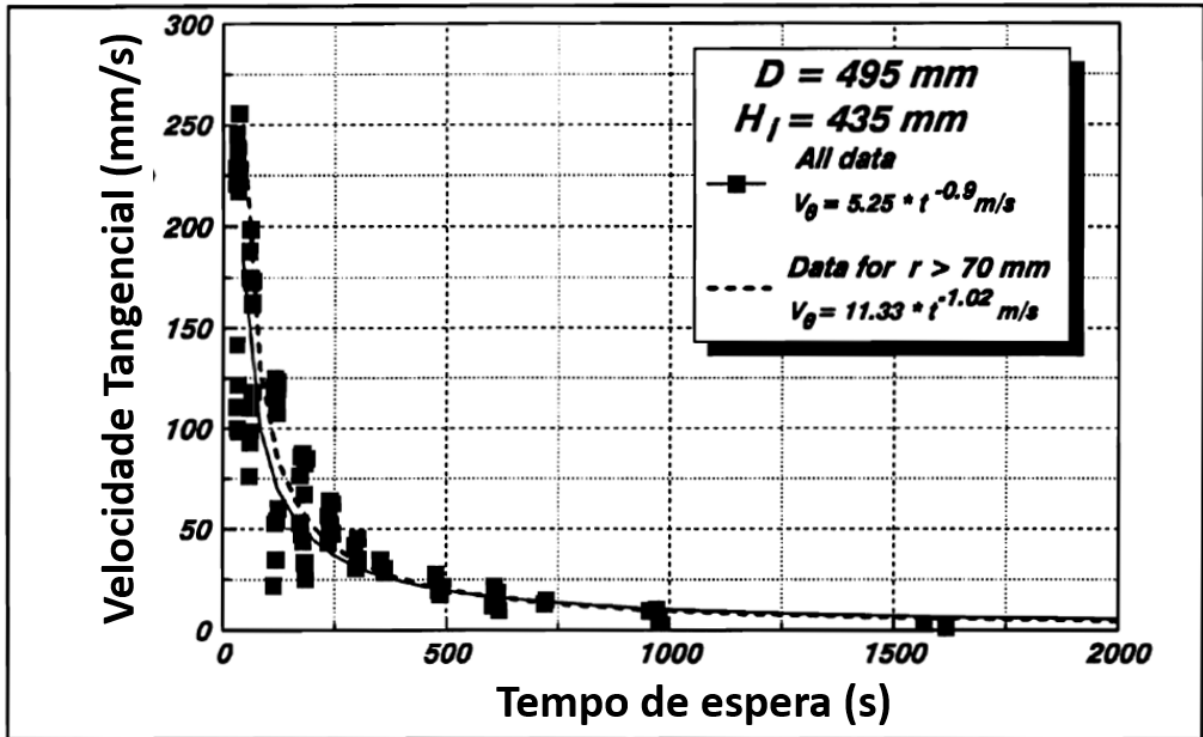
Fonte: SANKARANARAYANAN (1994)

Figura 25 – Decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera em uma panela de 374 mm de diâmetro e Altura de 500mm



Fonte: SANKARANARAYANAN (1994)

Figura 26 – Decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera em uma panela de 374 mm de diâmetro e Altura de 350 mm



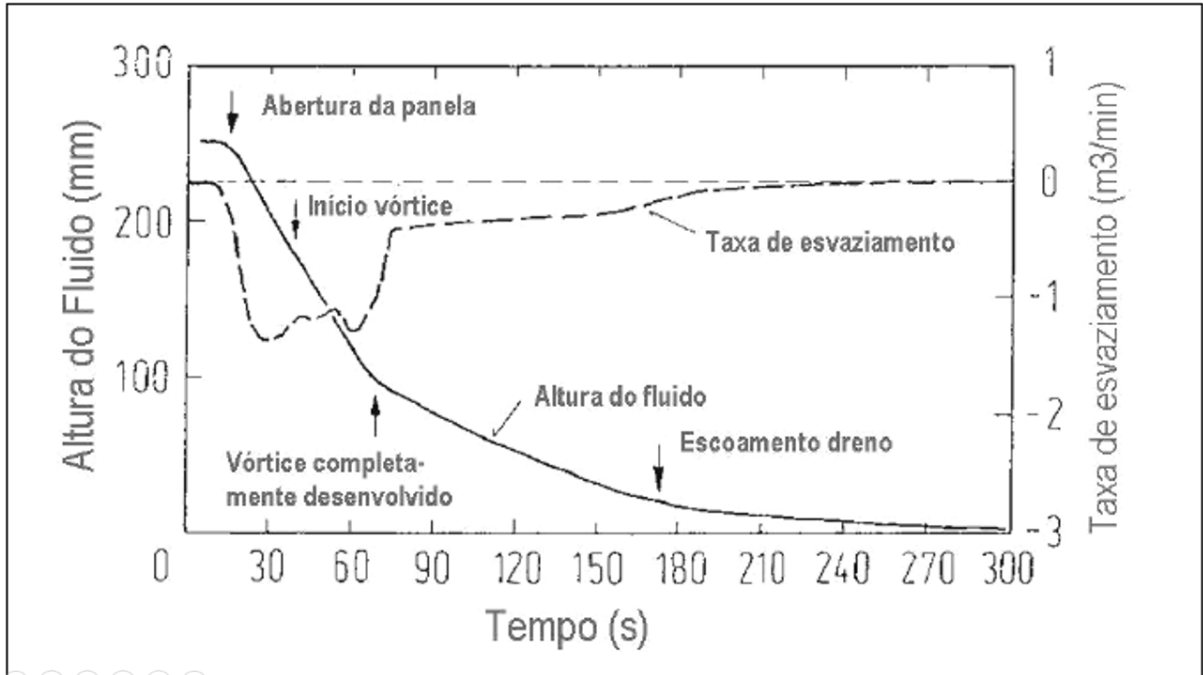
Fonte: SANKARANARAYANAN (1994)

variando-se o tempo de espera, é possível obter um escoamento do tipo dreno precedido ou não por um escoamento do tipo vórtice.

Para estimar a altura do fluido (ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, 1987) utilizaram um sistema de medição de pressão de alta resolução no fundo da panela conectado a um computador, onde se tinha uma medição instantânea da taxa de esvaziamento do líquido.

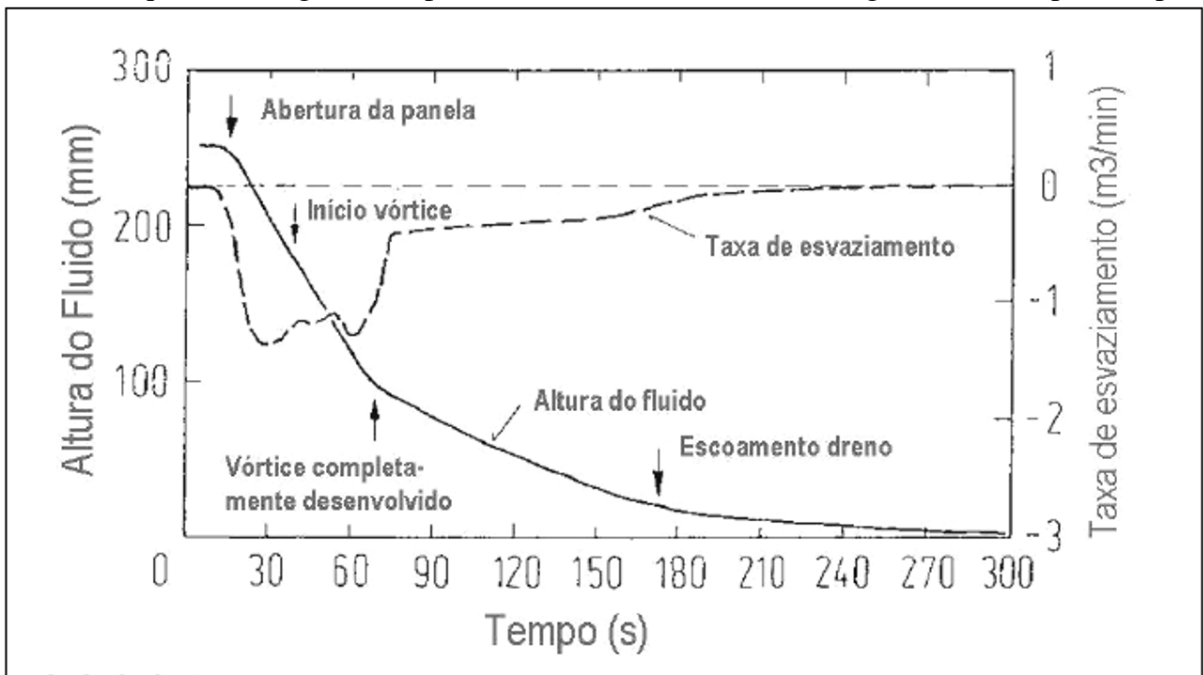
Nas figuras 27 e 29, a abscissa representa os tempos de espera (s) e a ordenada a altura do fluido (mm) e a taxa de esvaziamento. Quando o tempo de espera é próximo a 10s há uma tendência de se ter o escoamento do tipo vórtice precedendo o escoamento do tipo dreno. Quando o tempo de espera aumenta, próximo de 30 s, ocorre uma dissipação das velocidades tangenciais, anulando a formação do escoamento do tipo vórtice.

Figura 27 – Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 10 segundos de tempo de espera



Fonte: ANDRZEJEWSKI P.; DIENER (1987)

Figura 28 – Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 30 segundos de tempo de espera



Fonte: ANDRZEJEWSKI P.; DIENER (1987)

4 METODOLOGIA

A visão geral da metodologia utilizada no presente trabalho pode ser observada na Figura abaixo. Nela são apresentadas as diversas etapas, bem como a otimização da sola do distribuidor para aumento de rendimento metálico:

Figura 29 – Fluxograma da Metodologia adotada no presente trabalho



Fonte: Autoria própria

4.1 Simulação computacional de distribuidores com diferentes configurações

Nos dias de hoje, o distribuidor é projetado de modo a executar o máximo de operações metalúrgicas possíveis como a separação de inclusões, flotação de inclusões, homogeneização térmica e química, otimização de rendimento metálico etc. Assim, esforços significativos têm sido feitos ao longo das últimas décadas para explorar ao máximo o potencial do distribuidor do lingotamento contínuo.

A otimização de um *design* e o melhor posicionamento de modificadores de fluxo dentro de um distribuidor é extremamente dependente da geometria do distribuidor, das condições operacionais e do tamanho das inclusões presentes no aço. Assim, ao longo dos últimos anos, vários pesquisadores investigaram e testaram a influência de diversas geometrias de distribuidor, modificadores de fluxo, bem como o posicionamento desses modificadores de fluxo dentro do distribuidor e suas influências na qualidade do aço lingotado. (CHATTOPADHYAY; GUTHRIE, 2010)

O grande desafio em se propor um *design* otimizado de distribuidor é que um teste em escala industrial envolve muitas variáveis de qualidade, de produtividade e sobretudo de segurança. Portanto, antes da realização de testes em escala industrial, pode-se executar experimentos utilizando modelos físicos em menor escala, onde simula-se as modificações propostas e analisa-se o comportamento do fluido. Os modelamentos físicos possuem certas limitações, como por exemplo a ausência das condições térmicas de um processo industrial.

Além da simulação física, as simulações computacionais apresentam-se como um método extremamente confiável para os estudos dos fenômenos que ocorrem no distribuidor. Extensivo modelamento matemático dos fenômenos de fluido e fenômenos de transporte, assim como a confirmação desses modelos por meio de testes laboratoriais e dados de testes industriais, indicam que há um substancial e preciso arcabouço matemático para desenvolver um *design* efetivo de distribuidor capaz de otimizar a performance de um processo industrial.

4.1.1 Modelamento Matemático

O modelamento matemático é uma forma de se visualizar os campos de fluxo em um distribuidor. Em um modelamento matemático, a equação de Navier-Stokes é resolvida em condições de contorno dentro de um sistema de coordenadas, prevendo-se assim as distribuições de velocidade. Soluções analíticas da equação de Navier-Stokes em 3D não são possíveis,

tendo-se que recorrer aos métodos numéricos. Vários softwares foram desenvolvidos para dar soluções numéricas para essas equações como FLUENT, CFX, FLOW-3D, PHOENICS, FIDAP, COMSOL etc. Essas soluções comerciais popularizaram o uso dos CFD (Computer Fluid Dynamics).(CHATTOPADHYAY; GUTHRIE, 2010)

(CHATTOPADHYAY; GUTHRIE, 2010) realizou uma revisão extensiva da literatura e concluiu que os conceitos básicos do modelamento matemático utilizado no distribuidor podem ser divididos em três categorias:

a) Definição do problema, que é feito expressando-se o processo em termos de variáveis físicas utilizando-se equações diferenciais parciais, com operações e condições de contorno apropriadas;

b) Geração de malhas do domínio e discretização das equações diferenciais parciais em forma algébrica;

c) Solução para equações discretizadas utilizando técnicas numéricas.

A principal variável física relacionada a qualquer campo de fluxo é a velocidade. Uma vez que outras propriedades derivam diretamente do campo de velocidade, a determinação da velocidade é o passo primordial na resolução de um problema de escoamento de fluido. Por essa razão, a velocidade foi escolhida como a variável primária em todos os modelamentos matemáticos.(CHATTOPADHYAY; GUTHRIE, 2010)

A natureza do escoamento de aço líquido dentro do distribuidor é turbulenta e tridimensional. Uma vez que as equações de continuidade e equações de conservação de momentum descrevem o escoamento de um fluido matematicamente, elas, juntamente com o tratamento da turbulência e condições de contorno, são utilizadas como o ponto de partida para todos os estudos de modelamento matemático de distribuidores.

Além das equações mencionadas acima, diferentes pesquisadores utilizaram diferentes equações para modelar diferentes parâmetros. Alguns incluíram equações de energia para prever a distribuição de temperatura sob condições não isotérmicas. Outros pesquisadores incluíram outras equações diferenciais para descrever a trajetória de inclusões e distribuição da densidade de inclusões. O modelamento também foi utilizado para prever a Distribuição do tempo de residência (DTR).(LÓPEZ-RAMÍREZ J. DE BARRETO, 2004)

Devido à natureza complexa das equações e geometrias dos distribuidores, as soluções analíticas não são viáveis no sentido prático. Assim, diferentes técnicas numéricas são utilizadas para resolver as equações de transporte. A conversão das equações diferen-

ciais em um conjunto de equações algébricas discretas requer a discretização do domínio. Isso é chamado geração de malhas. Diferentes técnicas de geração de malhas são utilizadas como:(CHATTOPADHYAY; GUTHRIE, 2010)

1. Finite Difference Method (FDM) - Método das diferenças finitas;
2. Finite Element Method (FEM) – Método dos elementos finitos
3. Spectral Methods – Métodos Espectrais
4. Métodos híbridos (como Método de Controle de Volume de Elemento Finito,

Método de Controle de volume de diferenças finitas)

Todas essas técnicas utilizam três passos básicos que são:

- i. Aproximação das variáveis desconhecidas por meio de funções simples;
- ii. Discretização pela substituição das aproximações dentro das equações que governam o escoamento;
- iii. Soluções matemáticas subsequentes

4.1.2 Descrição do Modelo e definição das configurações em estudo

4.1.2.1 Descrição do Modelo

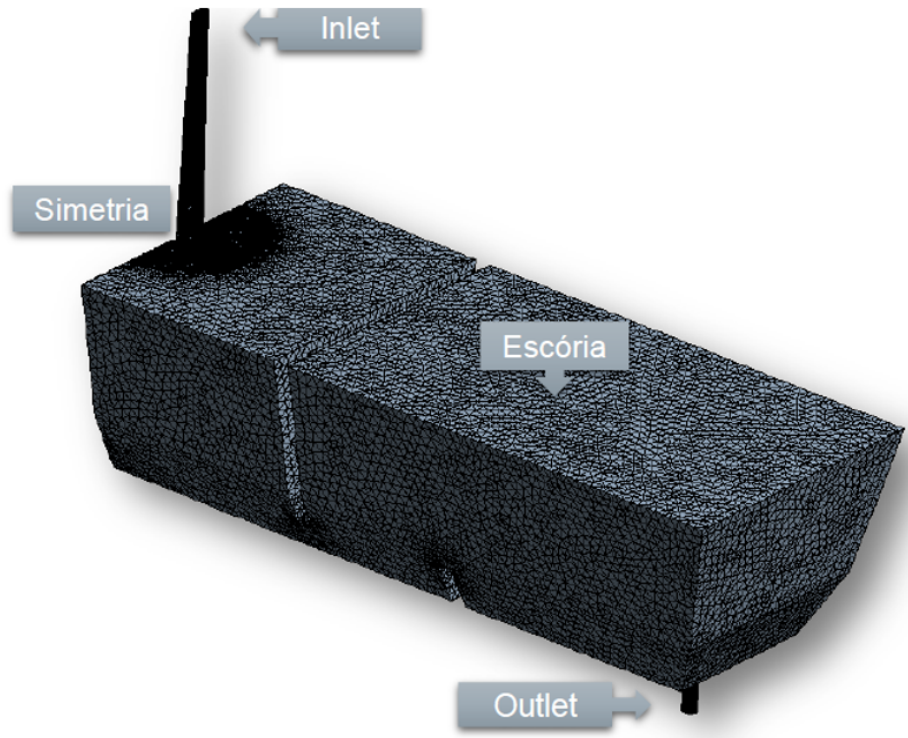
Para a simulação fluidodinâmica utilizou-se um software comercial para resolução das equações.

A tabela abaixo descreve os parâmetros adotados para a simulação fluidodinâmica:

Domínio	Vazão de entrada	Temperatura
½ distribuidor	10 ton/ min	1570 °C

Uma vez que o distribuidor da CSP é simétrico em todos os sentidos, o domínio estudado contemplou somente meio distribuidor. A vazão de entrada escolhida, bem como a temperatura também foram definidas de acordo com os parâmetros de processo do lingotamento contínuo da CSP. A figura 30 mostra a malha de uma das configurações utilizadas na simulação computacional, a região de entrada de fluxo (Inlet), a região de saída de fluxo (Outlet) e o ponto de simetria.

Figura 30 – Domínio de simulação definido em função da simetria do distribuidor



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Definição das configurações de estudo

4.1.3.1 Distribuidor com Barragem

A figura 31 abaixo mostra uma das configurações de montagem de distribuidor utilizadas na CSP. Esse distribuidor é montado utilizando-se duas barragens, dois diques e uma região central de impacto.

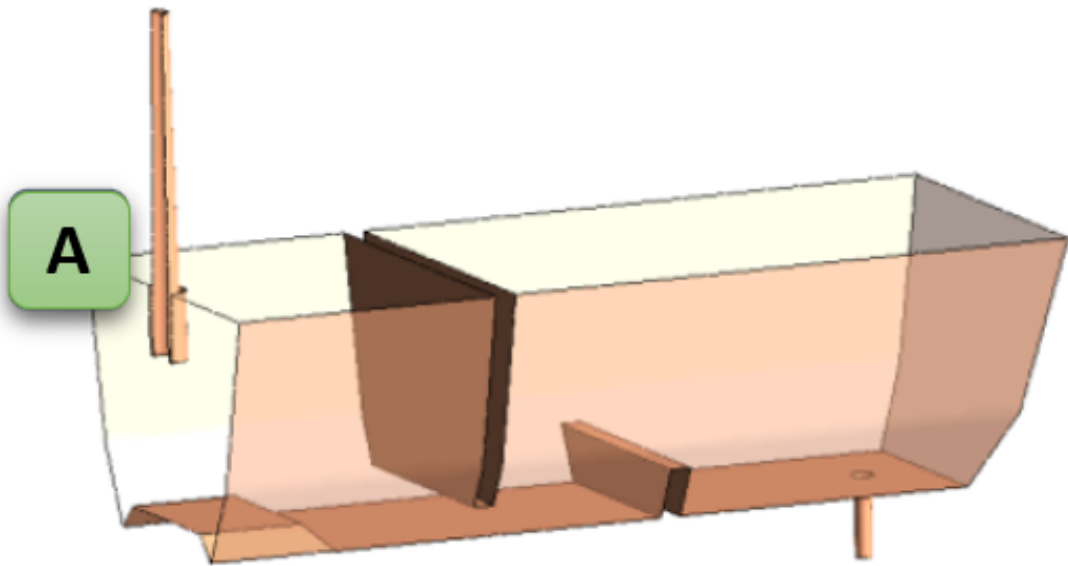
4.1.3.2 Distribuidor com Inibidor de Turbulência e Diques

A figura 32 é a segunda configuração estudada na simulação CFD, essa configuração também é atualmente utilizada na CSP. Nessa montagem, não utiliza-se barragens nem região de tijolos de impacto. Utiliza-se um mobiliário especialmente projetado chamado inibidor de turbulência.

4.1.3.3 Distribuidor com Inibidor de Turbulência, Diques e sola elevada

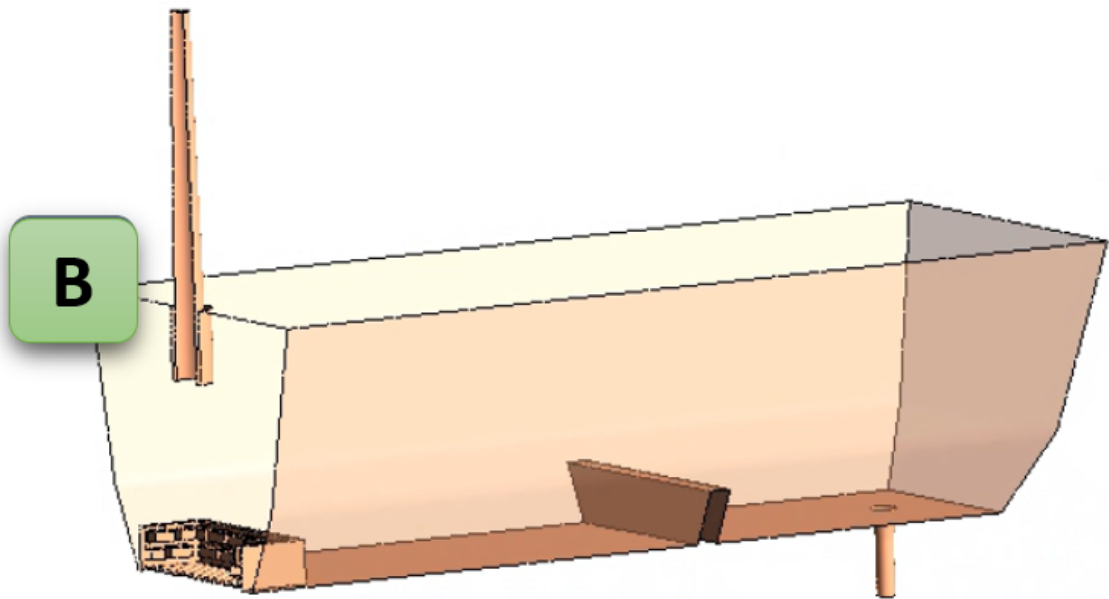
As duas primeiras configurações mencionadas acima já são utilizadas em escala industrial na CSP. A figura 33 mostra uma configuração proposta para teste no distribuidor da

Figura 31 – Distribuidor com Barragem



Fonte: Autoria própria

Figura 32 – Distribuidor com Inibidor de Turbulência e Diques



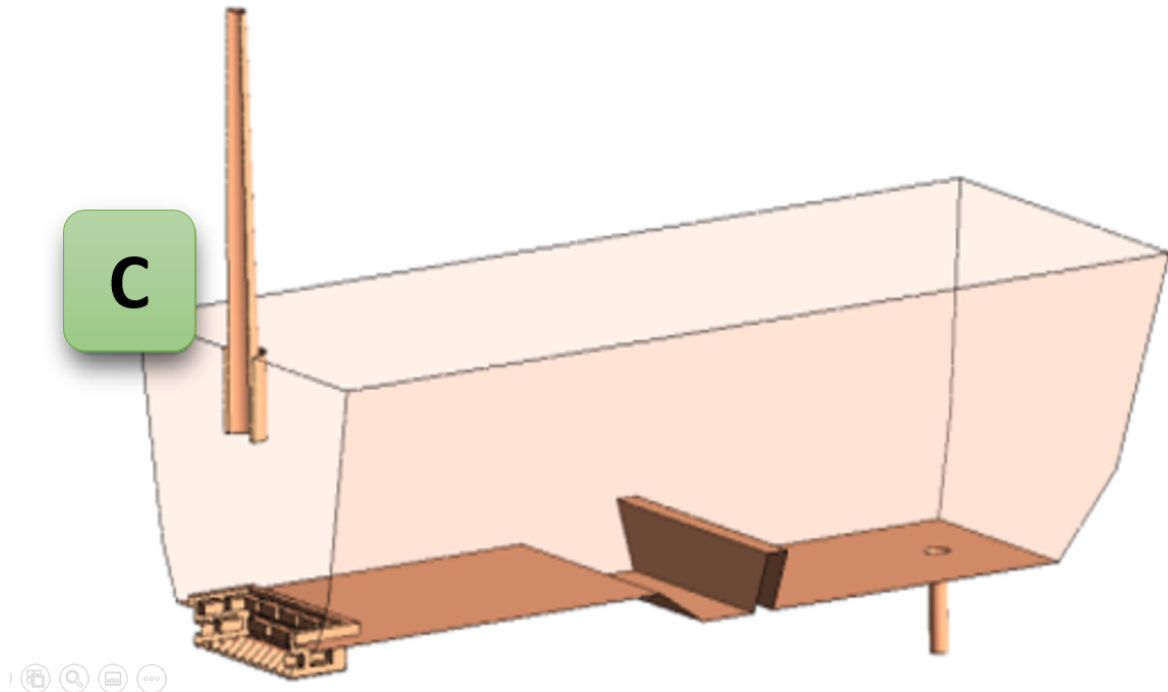
Fonte: Autoria própria

CSP. Nessa montagem, além do inibidor de turbulência há uma elevação no piso central do distribuidor.

A proposta dessa elevação é permitir que durante a drenagem do aço líquido, um menor volume remanescente seja descartada. Onde apesar de haver uma redução na coluna de aço da região central do distribuidor, a coluna de aço sobre a região dos veios permanece

inalterada, garantido que a altura crítica de formação de vórtice seja preservada.

Figura 33 – Distribuidor com Inibidor de Turbulência, Diques e sola elevada



Fonte: Autoria própria

4.1.4 Resultados da simulação computacional

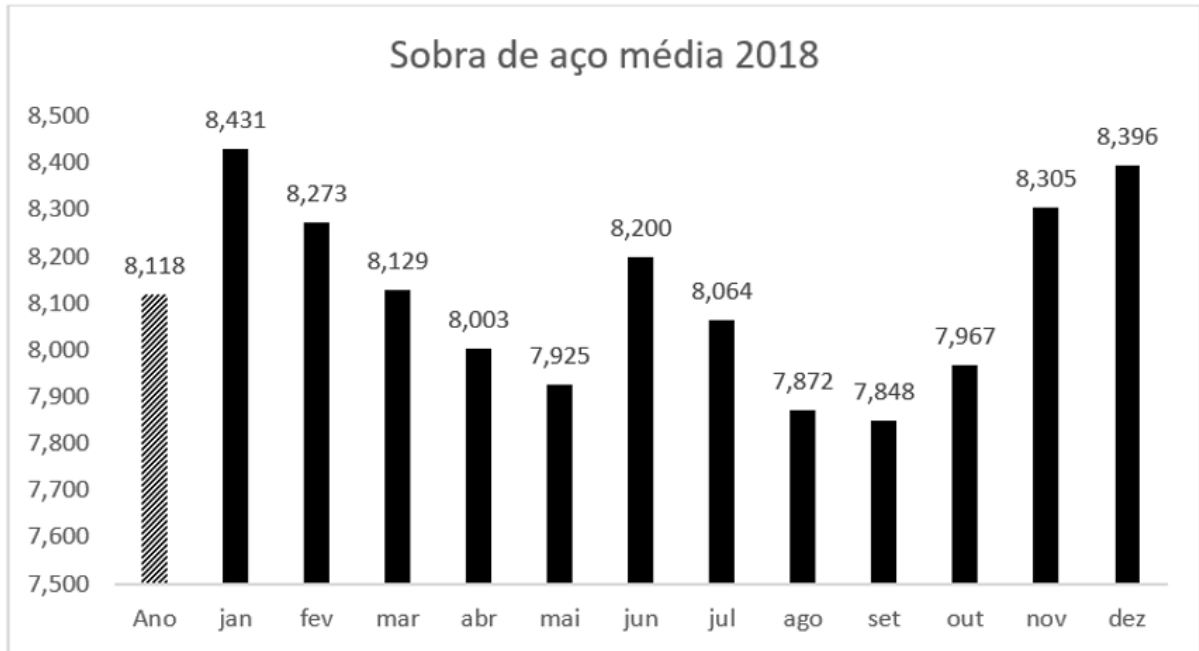
Os resultados da simulação computacional são a base de validação necessária para prosseguir com os testes de distribuidores em escala industrial.

4.1.4.1 Rendimento Metálico

A sobra de aço média por distribuidor na CSP é de 8,11 toneladas de aço. Isso significa que a cada distribuidor utilizado, em média, aproximadamente 8 toneladas de aço são descartadas. A figura 34 é um gráfico que mostra a sobra de aço média no distribuidor da CSP em cada um dos meses do ano de 2018.

Essa sobra de aço corresponde a uma altura de aproximadamente 180 mm altura de coluna de aço dentro do distribuidor. Empiricamente, sabe-se que a altura crítica de formação de vórtice no distribuidor da CSP é menor do que 180 mm, portanto, por padrão, adota-se o volume de 8 toneladas de aço no distribuidor como o limite para encerramento de sequencial do lingotamento contínuo. Essa altura garante que não haverá arraste de escória do distribuidor para

Figura 34 – Sobra de aço média por distribuidor no ano de 2018 na CSP



d

Fonte – Autoria própria

dentro do molde do lingotamento contínuo.

A figura 35 abaixo ilustra o nível da coluna de aço dentro do distribuidor da CSP no final do encerramento de um sequencial com 8 toneladas de sobra de aço remanescente.

Figura 35 – Altura da coluna de aço dentro do distribuidor correspondente a 8 toneladas



Fonte: Autoria própria

Mantendo-se constante a altura de 180 mm e variando-se a geometria e mobiliários, a figura 6 abaixo mostra o resultado esperado da sobra de aço para as três configurações de montagem de distribuidor estudadas.

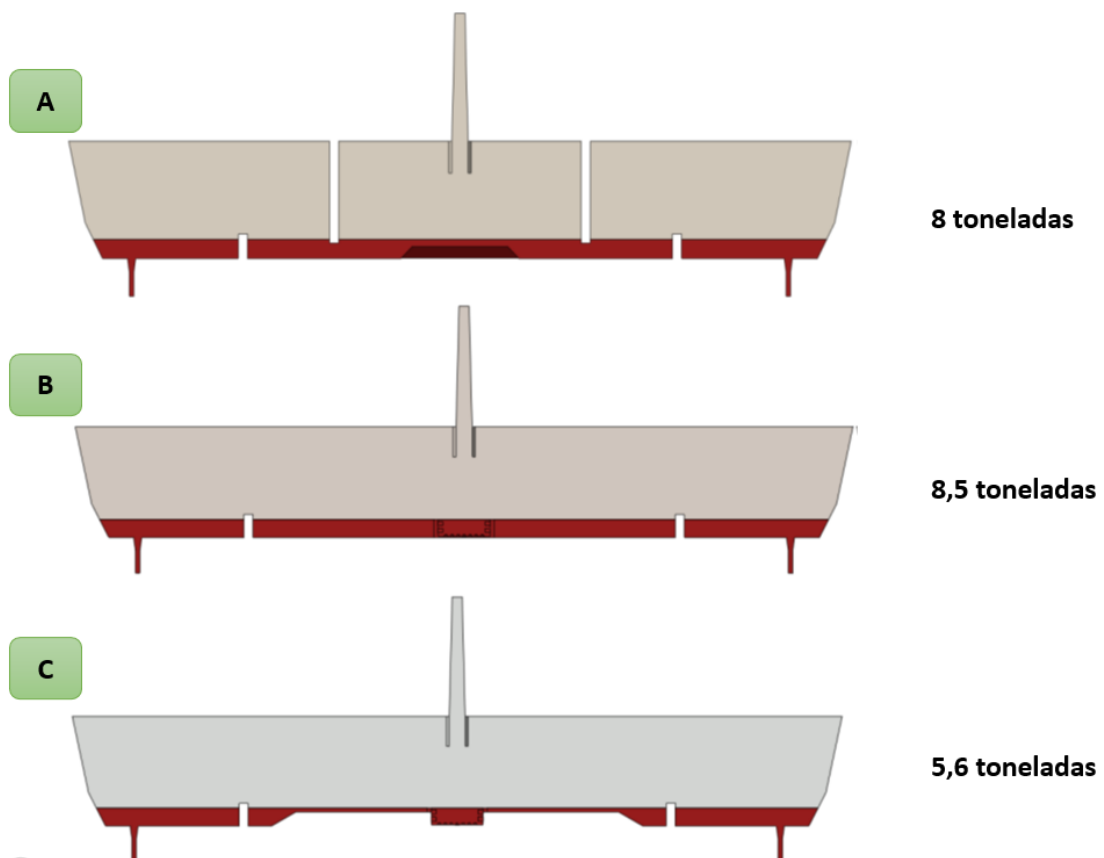
A simulação computacional ilustrada na figura 6 indica que a uma altura de aproximadamente 180 mm de altura haverá uma sobra de aproximadamente 8 toneladas de aço nas configurações A e B. Ou seja, os dados encontrados na figura 6 para as configurações A e B corroboram com os resultados reais apresentados no gráfico 1 acima.

Pode-se, portanto, inferir que a sobra de aço de 5,6 toneladas previstas para a configuração C da figura 6 será constatada na prática nos testes em escala industrial.

A implementação da configuração C da figura 6 significa um aumento de rendimento metálico de aproximadamente 2,4 toneladas por distribuidor quando comparado a configuração 1 e de aproximadamente 2,9 toneladas quando comparado a configuração 2.

Em números anualizados essa modificação significa um aumento de produção de quase 3 mil toneladas de aço produzidos.

Figura 36 – Simulação do rendimento metálico para três configurações de distribuidor



Fonte: Autoria própria

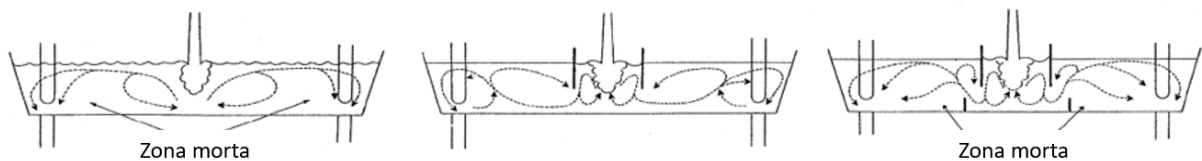
4.1.4.2 Quantificação e qualificação do escoamento em distribuidores

4.1.4.2.1 Linhas de Fluxo e campos de Velocidade

O entendimento do percurso realizado pelas partículas dentro do distribuidor, bem como sua velocidade ajudam a definir critérios de avaliação da lingotabilidade em cada configuração proposta. A interação entre o jato de aço, o mobiliário e a geometria interna do distribuidor criam padrões de escoamento.

A figura 37 ilustra as linhas de fluxo dentro de um distribuidor. A primeira imagem mostra um distribuidor sem modificadores de fluxo. Essa condição favorece a formação de zonas mortas ou estagnadas. A segunda e terceira imagens da figura 37 introduzem modificadores de fluxo no distribuidor. É possível observar da segunda imagem que à introdução de modificadores de fluxo extinguiu a formação de zonas estagnadas havendo maiores zonas de recirculação.

Figura 37 – - Representação esquemática do padrão de escoamento com e sem modificadores de fluxo

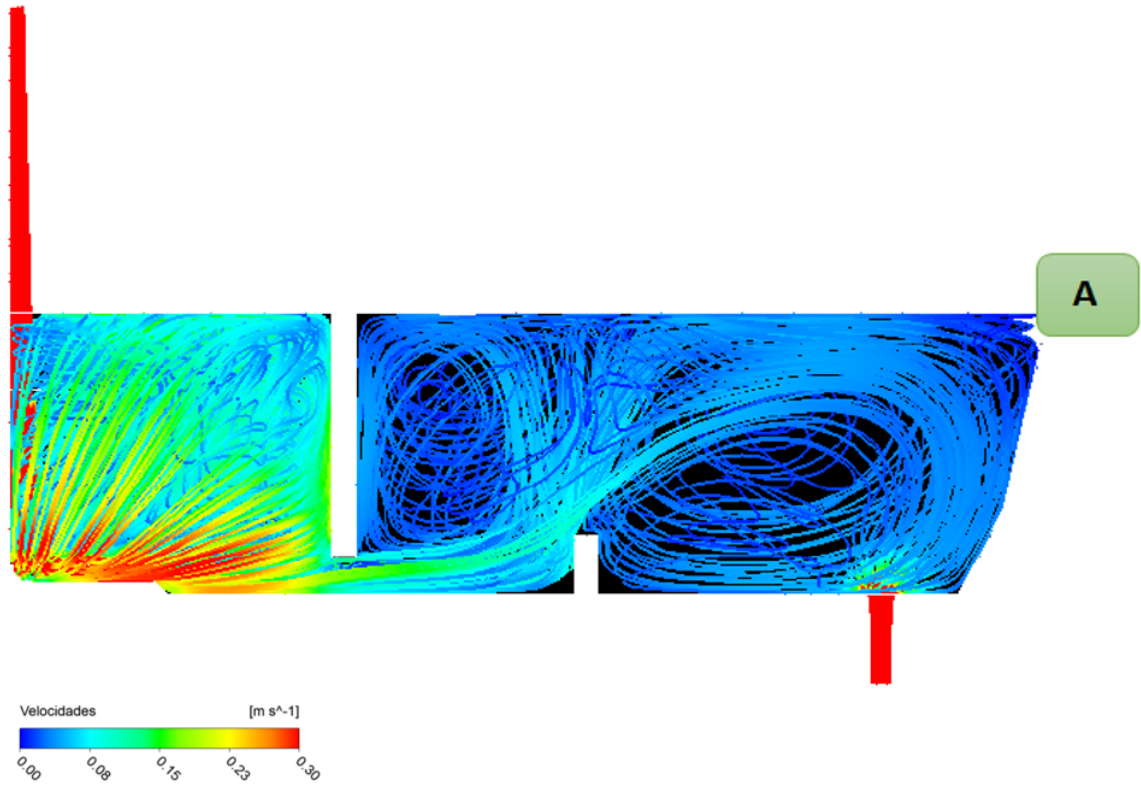


Fonte: Mazumdar (2010)

As figuras 38, 39 e 40 abaixo mostram o resultado da simulação computacional. Elas mostram a trajetória das partículas dentro dos distribuidores das configurações em estudo.

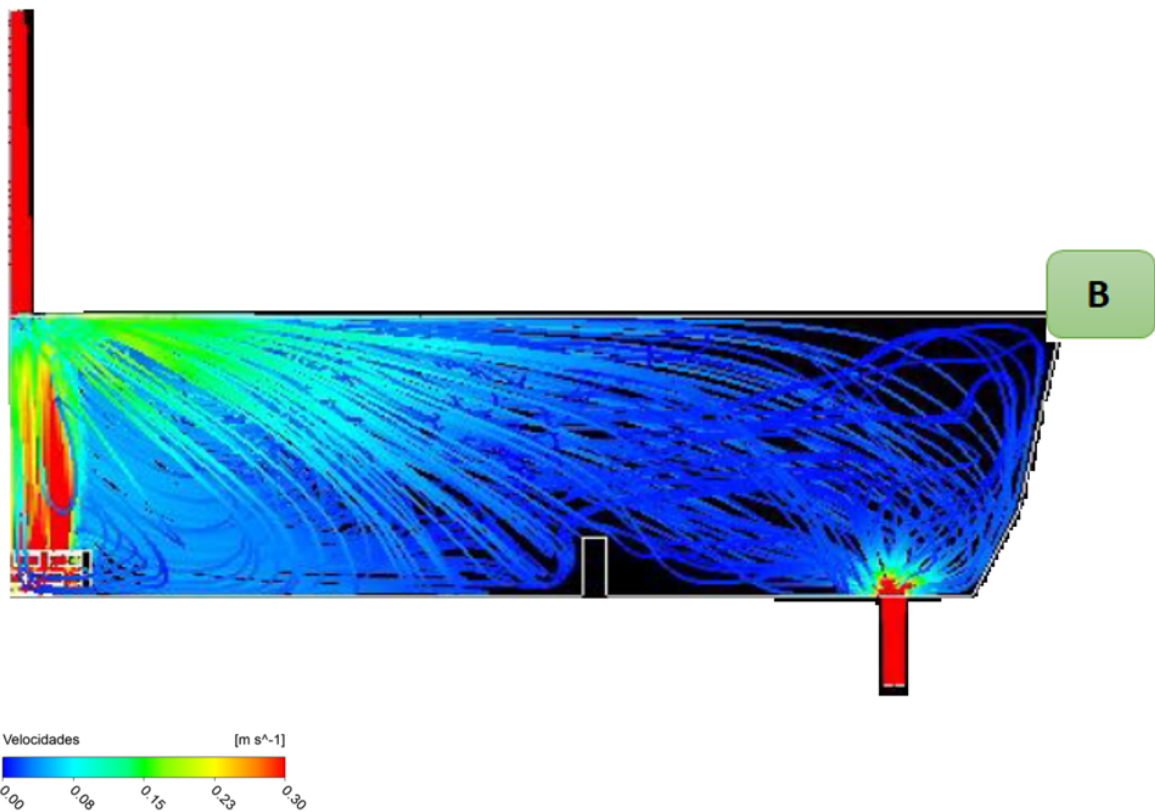
Observa-se a existência de uma região de alta velocidade no jato de aço que sai da panela de aço para o distribuidor. Esse jato é amortecido pela região de impacto central em seguida flui em direção aos veios, tendo seu caminho modificado de acordo com os mobiliários presentes na montagem.

Figura 38 – - Simulação computacional das linhas de fluxo do distribuidor com barragem



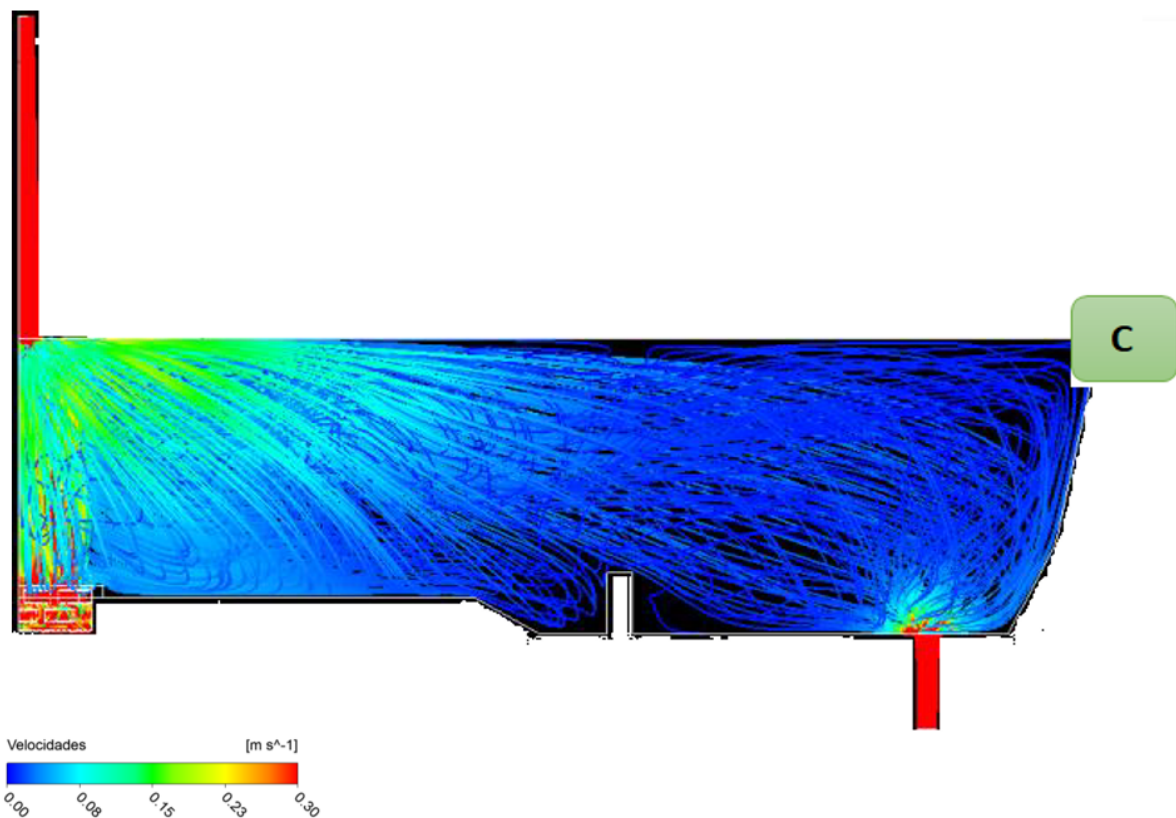
Fonte: Autoria Própria

Figura 39 – - Simulação computacional das linhas de fluxo do distribuidor com inibidor e dique



Fonte: Autoria Própria

Figura 40 – - Simulação computacional das linhas de fluxo do distribuidor com sola elevada



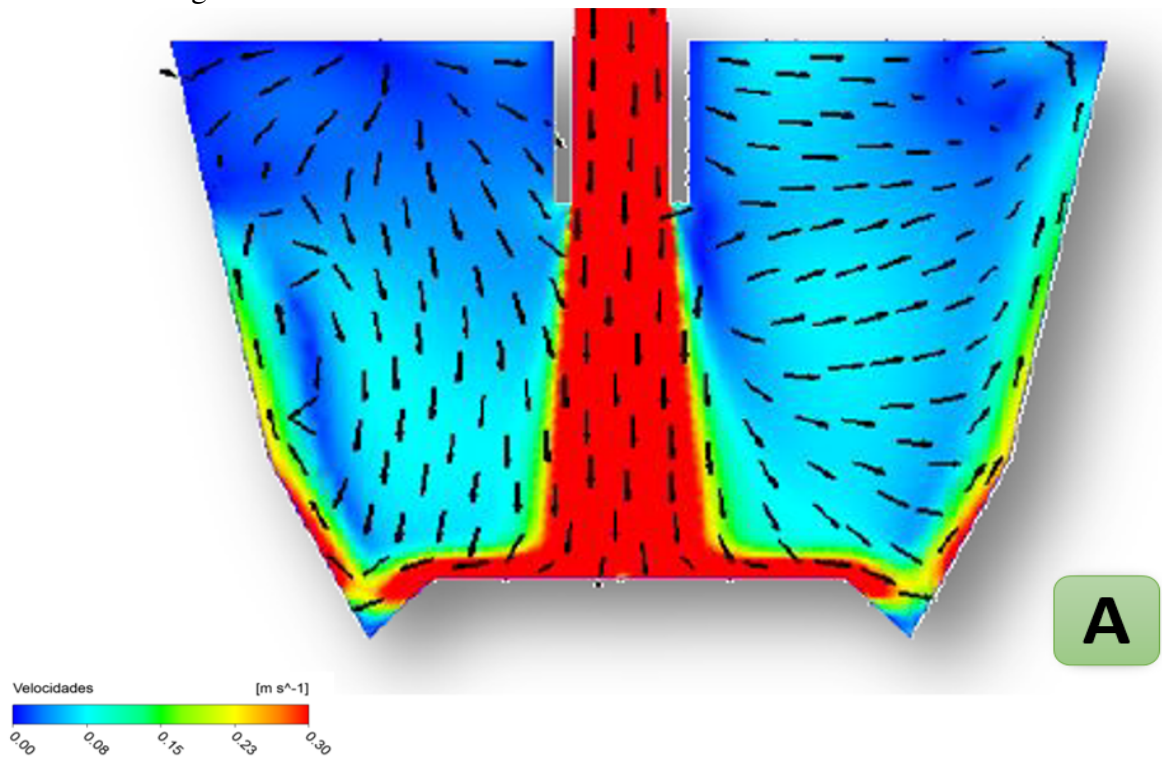
Fonte: Autoria Própria

Além da trajetória, a velocidade do fluxo dentro do distribuidor é extremamente importante. A figura 41 mostra o resultado da simulação de velocidade para o distribuidor com barragens. Uma vez que esse distribuidor não possui inibidor de turbulência, o jato de aço direcionado para a região de impacto é espalhado para as paredes do distribuidor impulsionando o fluxo mais velozmente na direção dos veios.

Por outro lado, as configurações com inibidor de turbulência e sola baixa da figura 42 e inibidor de turbulência e sola elevada da figura 43 mostram uma maior concentração dos vetores de velocidade e uma direcionalidade do fluxo para a escória.

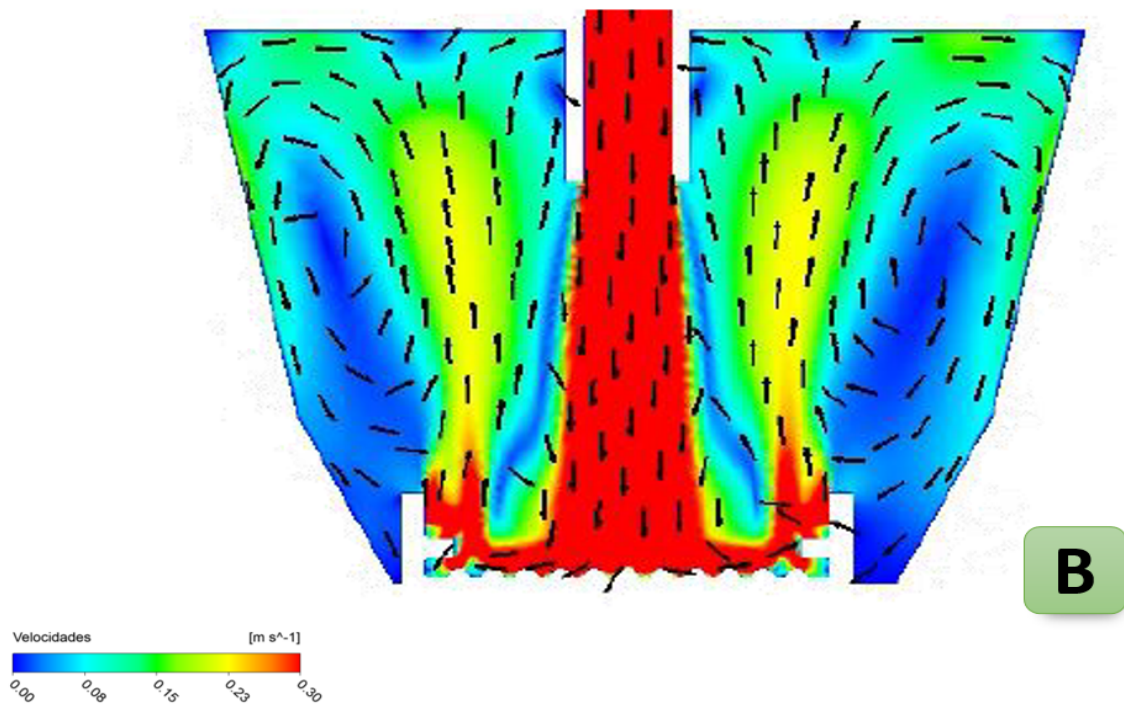
Nas configurações da figura 42 e 43, a difusão da velocidade no volume de aço acontece com menor intensidade do que no distribuidor com barragem da figura 41, fazendo com que as velocidades próximas as paredes sejam menores. Assim, quanto maior a tensão de cisalhamento nas paredes, menor a energia cinética turbulenta na escória.

Figura 41 – - Simulação computacional da distribuição de velocidade de escoamento no distribuidor com barragem



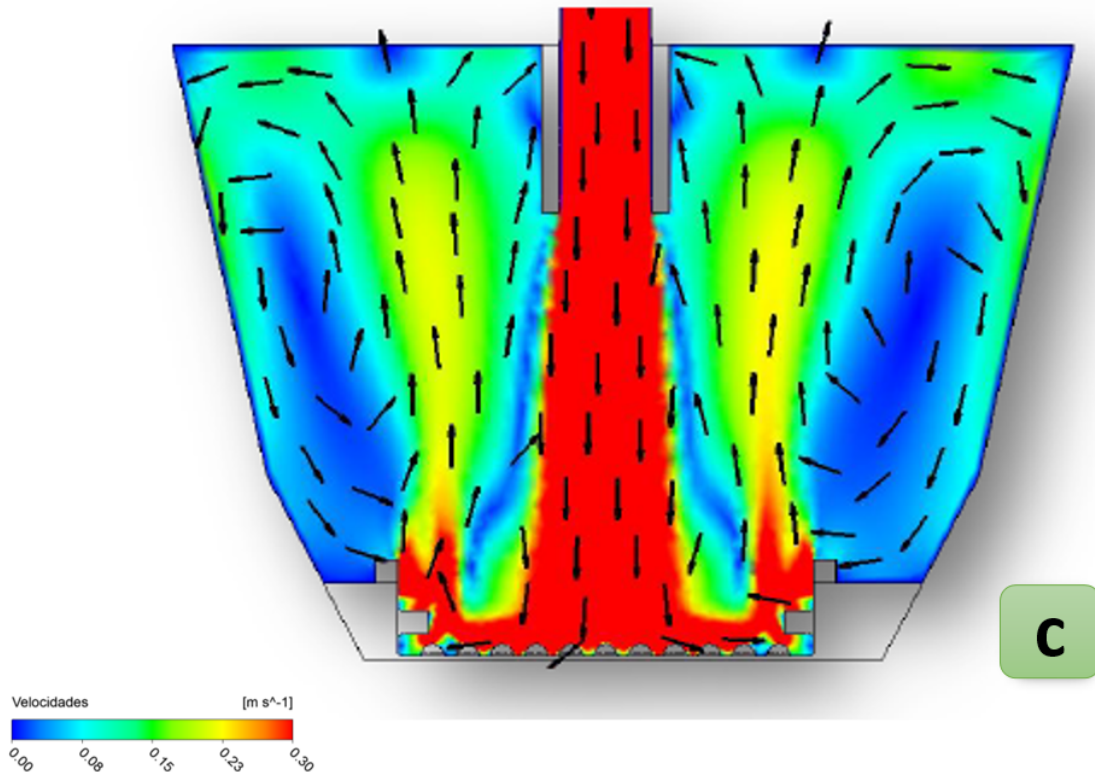
Fonte: Autoria Própria

Figura 42 – - Simulação computacional da distribuição de velocidade de escoamento no distribuidor com inibidor de turbulência e dique



Fonte: Autoria Própria

Figura 43 – - Simulação computacional da distribuição de velocidade de escoamento no distribuidor com sola elevada



Fonte: Autoria Própria

4.1.4.2.2 Energia Cinética Turbulenta

A característica de um fluido depende de forças inerciais e forças viscosas do fluido. As forças inerciais têm a tendência de romper com a ordem e direcionalidade de um escoamento, por outro lado as forças viscosas trazem estabilidade para o escoamento e mantêm uniformes as linhas de fluxo. (SAHAI, 2008)

Sob relativamente baixas velocidades e, por tanto, baixo número de Reynolds, as forças viscosas dominam e seu efeito estabilizante fazem com que o escoamento seja laminar. No entanto, com o aumento da velocidade, as forças inerciais passam a dominar e acima de um número de Re crítico o fluxo se torna turbulento. (FOX ROBERT W., 2014)

A força inercial agindo em um fluido é dada por $\rho L^2 v^2$ e a força viscosa é dada por $\eta v L$. Assim:

$$Re = \frac{\rho L^2 v^2}{\eta v L} = \frac{L v \rho}{\eta}$$

que é a definição de número de Reynolds dada na equação 3.2

Em um estado de escoamento turbulento, a velocidade varia aproximadamente próximo a um valor médio. Assim, a velocidade instantânea de um fluido, v_x , é a soma da

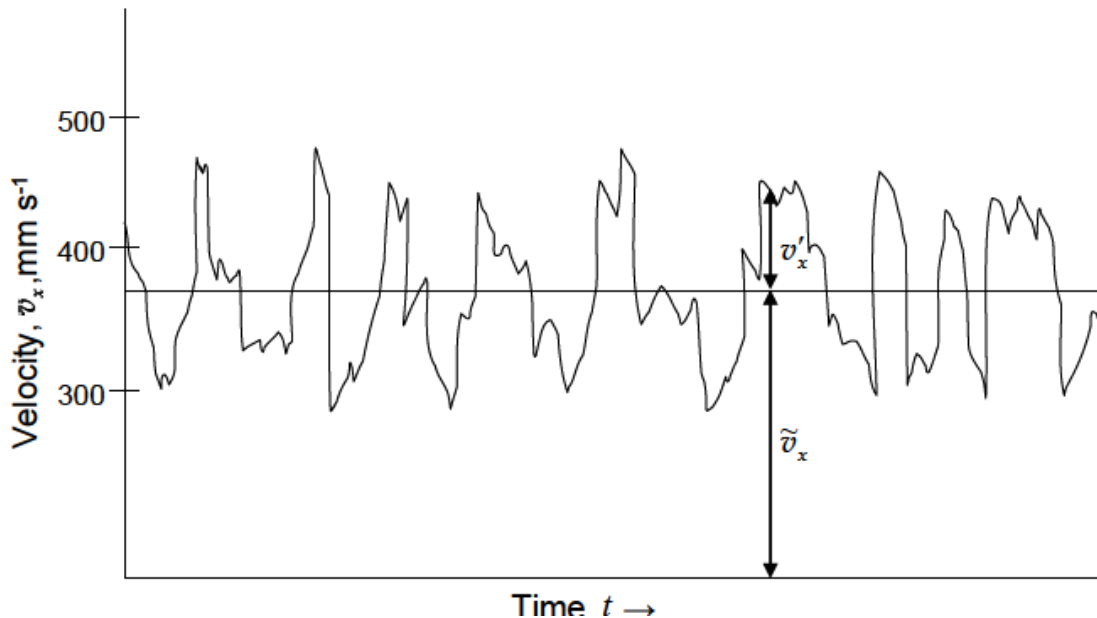
velocidade média \tilde{v}_x e uma componente flutuante.

A velocidade instantânea é por tanto:

$$v_x = \tilde{v}_x + v'_x \quad (4.1)$$

A figura 44 mostra a velocidade instantânea medida em água. A velocidade média é 370 mm/s; no entanto, o valor da velocidade instantânea flutua entre 290 a 475 mm/s. Assim, a média da velocidade do componente flutuante ($\overline{v'_x}$) será zero. Mas a média dos quadrados da componente flutuante ($\overline{v'^2_x}$) é diferente de zero. Assim, $(\overline{v'^2_x})/\tilde{v}_x$ é a medida do nível de turbulência, chamado de intensidade de turbulência.

Figura 44 – - Medição de velocidade instantânea por Laser Doppler



Fonte: Sahai (2008)

As figuras abaixo mostram os resultados da simulação computacional do comportamento da energia cinética turbulenta em cada uma das configurações dos distribuidores estudados.

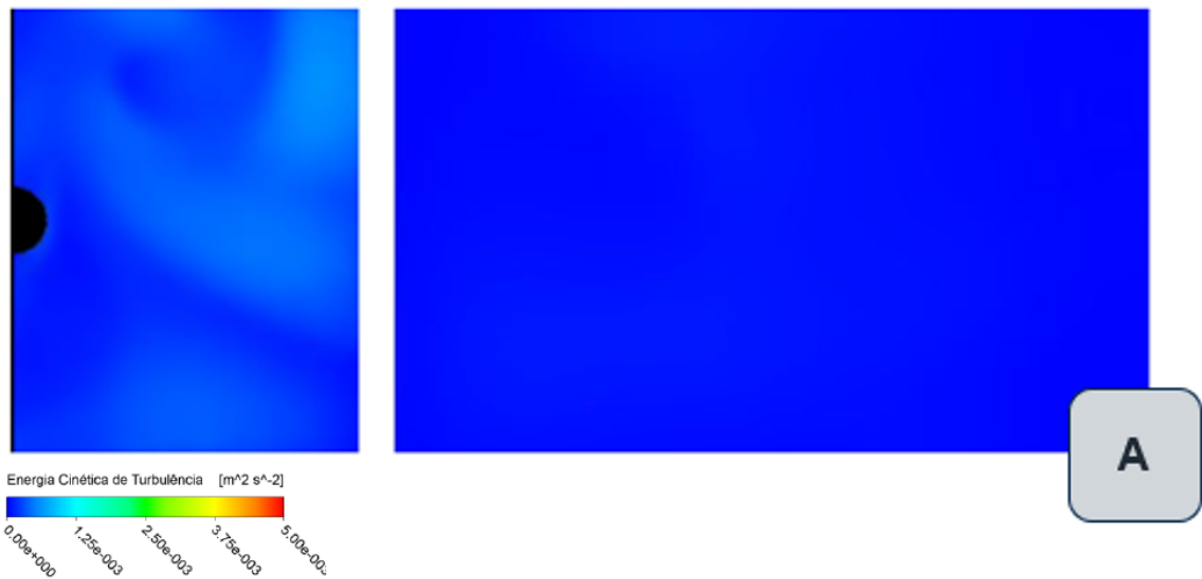
A figura 45 mostra o comportamento da energia cinética turbulenta no distribuidor com barragens. Devido ao fluxo de aço direcionado para as paredes, a região superior do distribuidor tem pouca circulação de fluido. Portanto, a superfície do banho metálico possui um comportamento mais laminar.

A figura 46 e figura ww reflete o comportamento da energia cinética turbulenta no distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa e no distribuidor com inibidor de turbulência

e sola elevada, respectivamente. O comportamento ascendente semelhante das simulações da figura 46 e figura 47 é provocado pelo inibidor de turbulência que como evidenciado pelos vetores de velocidade da figura aa e bb impulsionam o fluido para a superfície, favorecendo a captura de inclusões pela escória.

A elevação da sola do distribuidor da configuração C, faz com que a distância entre a superfície do banho metálico e do inibidor de turbulência seja menor fazendo com que o fluxo ascendente atinja a região da superfície com mais velocidade.

Figura 45 – - Energia Cinética turbulenta para o distribuidor com barragem



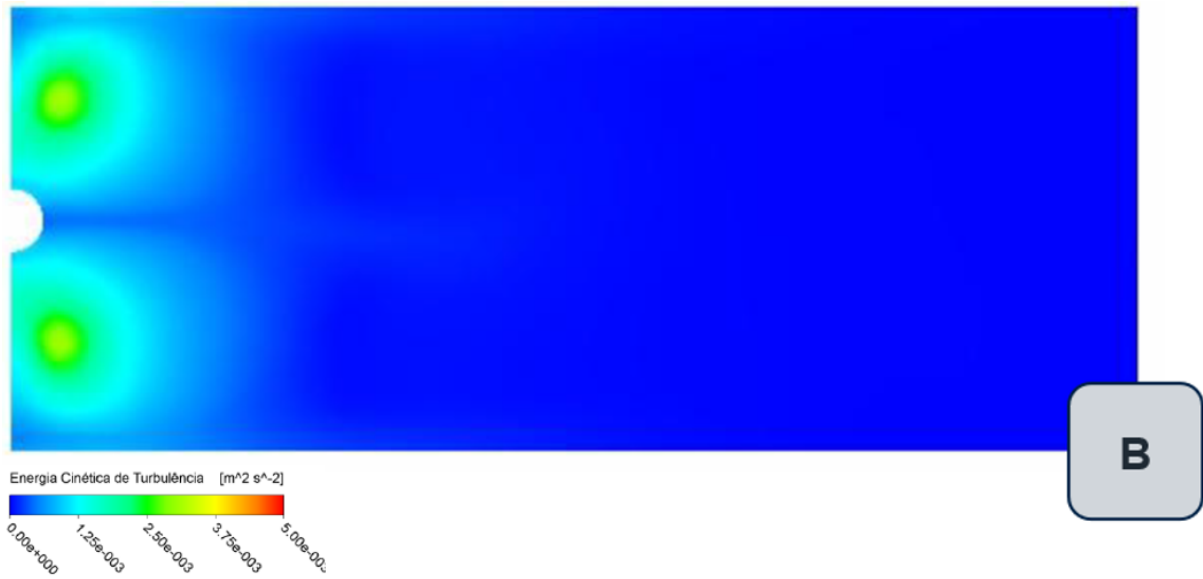
Fonte: Autoria Própria

4.1.4.2.3 Distribuição do Tempo de Residência (DTR)

É esperado que os elementos de um fluido que entram em um reator e viajam em rotas distintas dentro deste recipiente demorem tempos diferentes para atingir o canal de saída. A distribuição desses tempos em que o fluido deixa o recipiente é chamado de Distribuição do Tempo de Residência (DTR). DTR consiste, portanto, no rastreamento de uma partícula desde o momento de sua entrada no sistema até a sua saída.(LEVENSPIEL, 1999)

Modelamentos físicos em escala real ou reduzida utilizando água é um modo bastante popular de simular fisicamente o escoamento em um distribuidor. Nesses estudos, um elemento de rastreio que pode ser um ácido, um corante ou um outro elemento é injetado na corrente de água que entra no sistema e a sua concentração é detectada no canal de saída em função do tempo. O gráfico plotado da concentração do elemento de rastreio em função do tempo é a

Figura 46 – - Energia Cinética turbulenta para o distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa



Fonte: Autoria Própria

Figura 47 – - Energia Cinética turbulenta para o distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada



Fonte: Autoria Própria

Distribuição do Tempo de Residência (DTR).

Considerando V o volume de um fluido dentro do distribuidor sendo escoado a uma taxa Q , assim para um fluido incompressível, como o aço líquido, o tempo médio que o fluido passa dentro do distribuidor pode ser dado por:

$$\bar{t} = \frac{V}{Q} \quad (4.2)$$

Onde \bar{t} é o tempo médio de residência teórico do fluido dentro do recipiente.

A DTR de um fluido em um recipiente, como o distribuidor, é traçada como um tempo adimensional e uma concentração adimensional. O tempo adimensional, θ , que indica uma fração de residência, é obtido pela razão entre um tempo qualquer pelo tempo médio de residência teórico. Assim,

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (4.3)$$

4.1.4.2.4 Pulso de entrada e a Curva C

Quando a adição de um elemento de rastreio é um pequeno pulso, o gráfico resultante da concentração e tempo adimensionais é chamada de Curva C. A figura 48 abaixo mostra o exemplo de uma curva C. A concentração de saída se eleva até determinado valor máximo e logo em seguida reduz a zero quando todo o elemento de rastreio deixa o recipiente. Plotada em escala adimensional, a área sob a curva é considerada unitária:

$$\int_0^{\infty} C d\theta = 1 \quad (4.4)$$

4.1.4.2.5 Caracterização de um sistema de escoamento

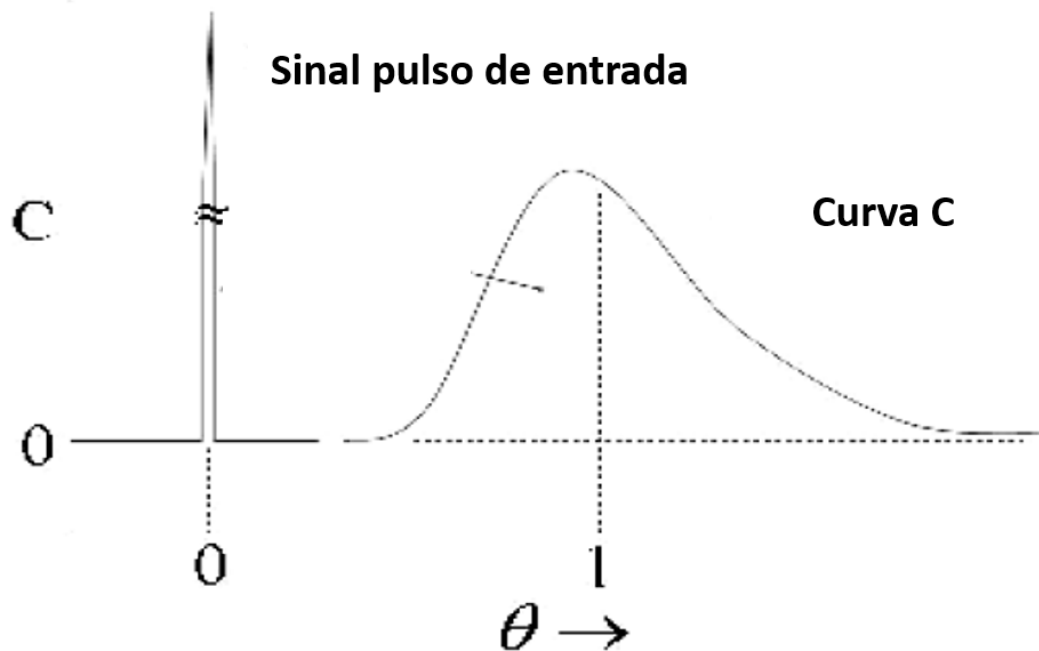
A DTR de um fluido no distribuidor é analisada para caracterizar o escoamento, que inclui a determinação da extensão do volume pistonado, volume misturado e volume morto no distribuidor.(LEVENSPIEL, 1999).

Na região de **volume pistonado**, não há mistura longitudinal de fluido. No volume pistonado todos os elementos do fluido possuem tempo de residência idênticos. A figura 49 abaixo mostra esquematicamente a representação do volume pistonado.(SAHAI, 2008)

O escoamento na região de volume misturado é o extremo oposto ao volume pistonado, pois nele a mistura do fluido em todas as direções é a máxima possível. Como resultado a concentração na saída e a concentração no interior do recipiente permanecem inalteradas. A figura 51 abaixo ilustra o volume misturado.

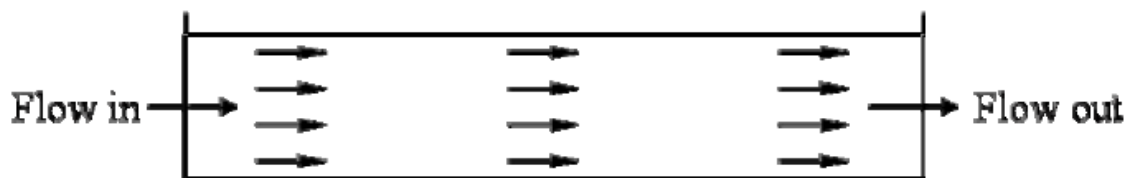
A figura 52 mostra a curva C para o volume misturado após uma quantidade q de elemento de rastreio ser dissolvida por todo o volume de fluido. A distribuição do tempo de

Figura 48 – - Pulso de entrada e o gráfico de resposta típico em formato de C



Fonte: Sahai (2008)

Figura 49 – -Representação esquemática do volume pistonado



Fonte: Sahai (2008)

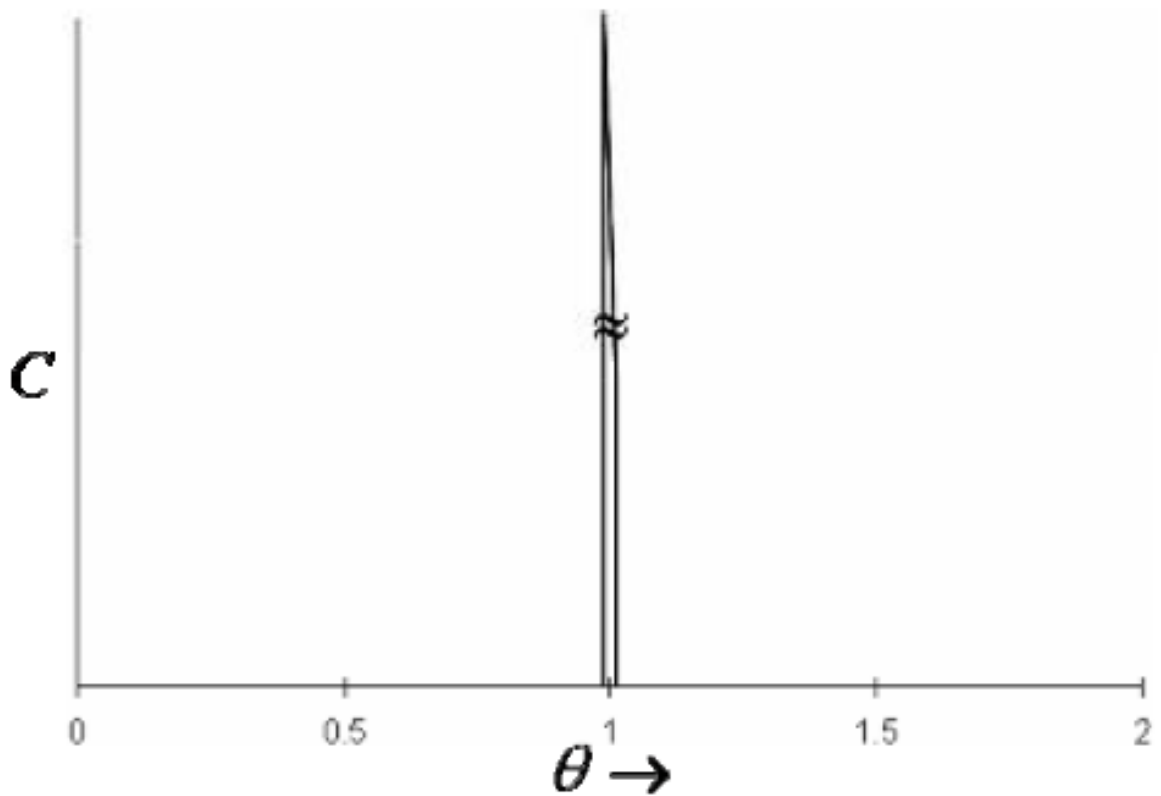
residência segue um decaimento exponencial. Com a composição do fluxo de saída sendo idêntica a composição dentro do recipiente. O primeiro fluido a deixar o recipiente terá uma composição q/V . Assim a curva C inicia a uma concentração adimensional unitária. A concentração na saída é reduzida gradativamente a medida que a quantidade de elemento de rastreo no recipiente diminui.

O volume morto é a região de fluido que se move muito lentamente e permanece no distribuidor por mais de duas vezes o tempo médio de residência. Levenspiel (1999)

A forma mais simples e mais utilizada para se caracterizar o escoamento de um distribuidor assume que as três regiões estão presentes no volume total do volume de um distribuidor:

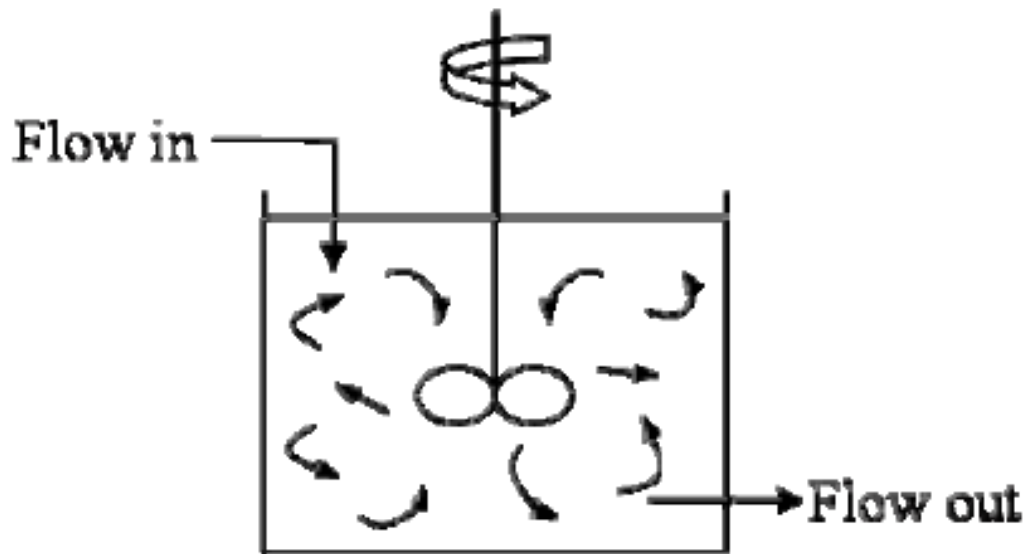
- Região de volume pistonado;

Figura 50 – -Curva C para o Volume Pistonado



Fonte: Sahai (2008)

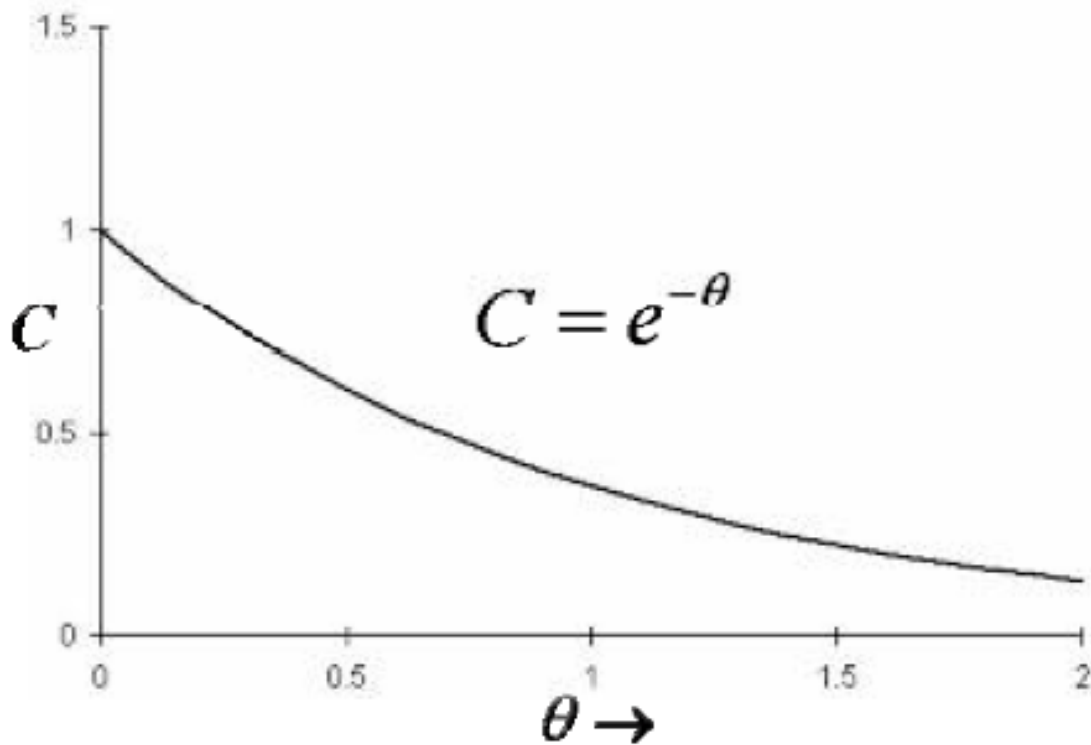
Figura 51 – -Representação esquemática do volume misturado



Fonte: Sahai (2008)

- Região de volume misturado e
- Região de volume morto.

Figura 52 – -Representação esquemática da curva C para o volume misturado



Fonte: Sahai (2008)

a) Região de Volume ativo Qualquer combinação de volume pistonado e volume misturado pode ser classificado com volume ativo. Considere que o escoamento de um fluido dentro de um vaso pode ser representado pela combinação de volume pistonado e volume misturado como mostra a figura 53 abaixo:

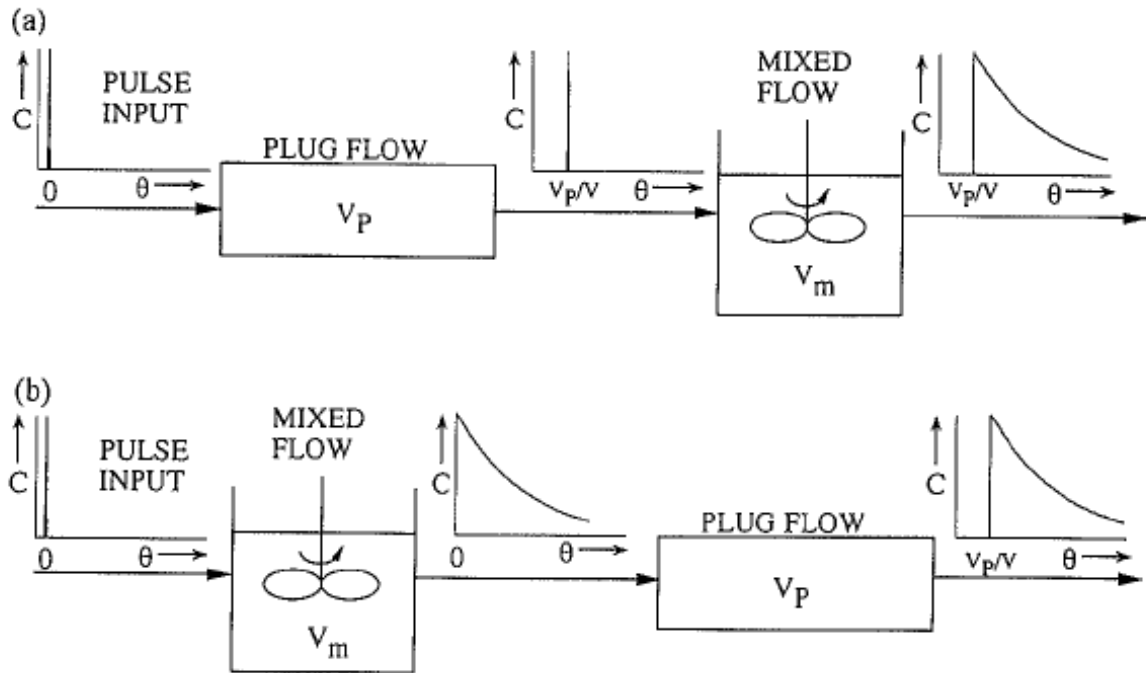
Os dois modelos dão uma resposta idêntica que pode ser verificada na curva C. Conforme mostrado na figura, o tempo mínimo de residência corresponde a fração de volume pistonado, e a concentração máxima é igual ao inverso da fração do volume misturado (V/V_m). Onde V_p , V_m e V são volume pistonado, misturado e volume total. A equação do decaimento exponencial é dada na figura 54.

Para as três configurações em estudo, o gráfico da figura 56 abaixo mostra o tempo mínimo de residência encontrado na simulação computacional:

A configuração 1 – Distribuidor com barragem, possui o menor tempo mínimo de residência com 79 segundos, enquanto a configuração 2 – Distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa apresentou melhor tempo de residência com 124 segundos seguido da configuração 3 – distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada com 119 segundos.

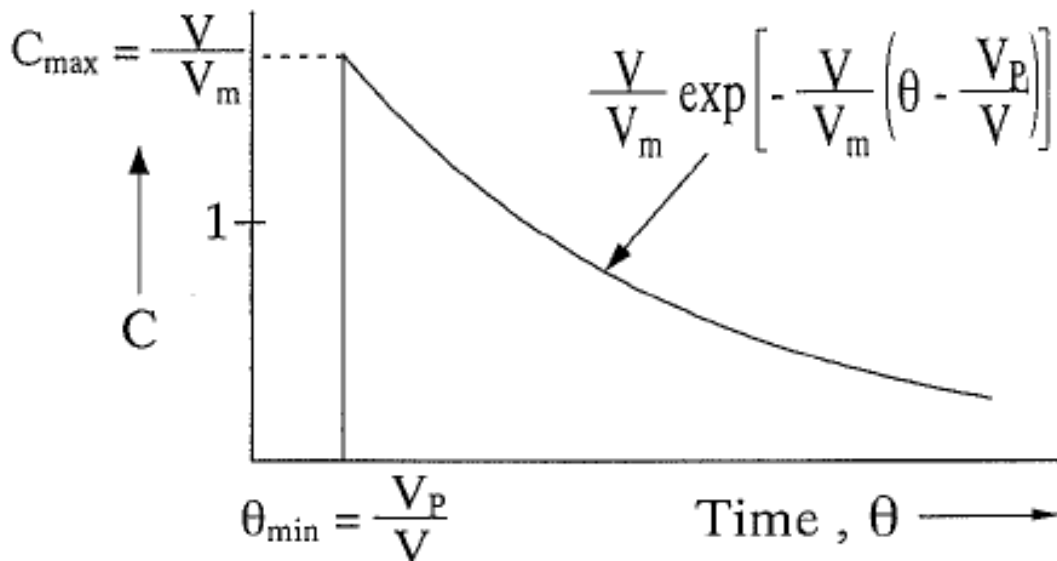
As configurações 2 e 3 possuem tempo mínimo de residência próximo um do outro e

Figura 53 – Modelo combinado representando Volume Pistonado e Volume Misturado



Fonte: Sahai (2008)

Figura 54 – Curva C para o Modelo combinado de Volume Pistonado e Volume Misturado



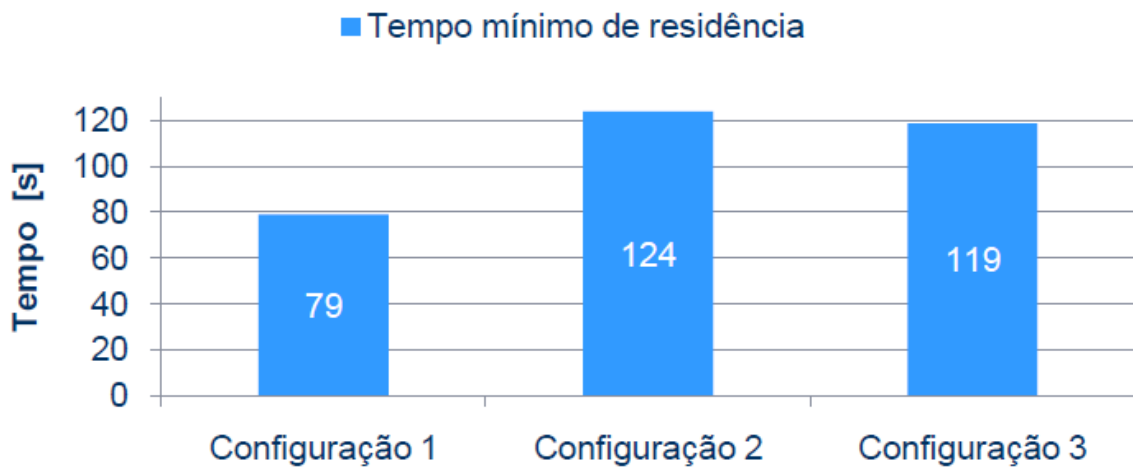
Fonte: Sahai (2008)

bem superior quando comparados a configuração 1 com barragem. O maior tempo mínimo de residência está associado a um maior volume pistonado, conforme indicado pela relação dada acima na figura da curva C.

Os valores de volume pistonado encontrados na simulação computacional para as configurações em estudo corroboram os dados do gráfico de tempo mínimo de residência.

No gráfico abaixo é possível identificar que a configuração 1 possui menor volume

Figura 55 – Tempo Mínimo de residência para as três configurações de distribuidor em estudo na simulação computacional

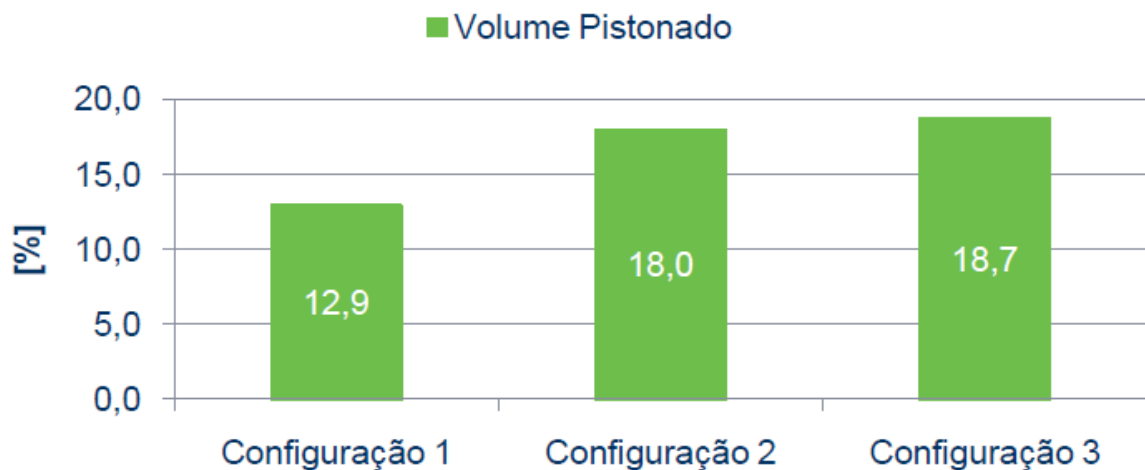


Fonte: Autoria Própria

pistonado, sendo 12,9% do volume total, ou seja, isso indica uma maior possibilidade de formação de zonas estagnadas e de fluxo misturado.

A configuração 2 possui 18% de volume pistonado e a configuração 3 possui 18,3% de volume pistonado.

Figura 56 – Volume Pistonado para as três configurações de distribuidor em estudo na simulação computacional



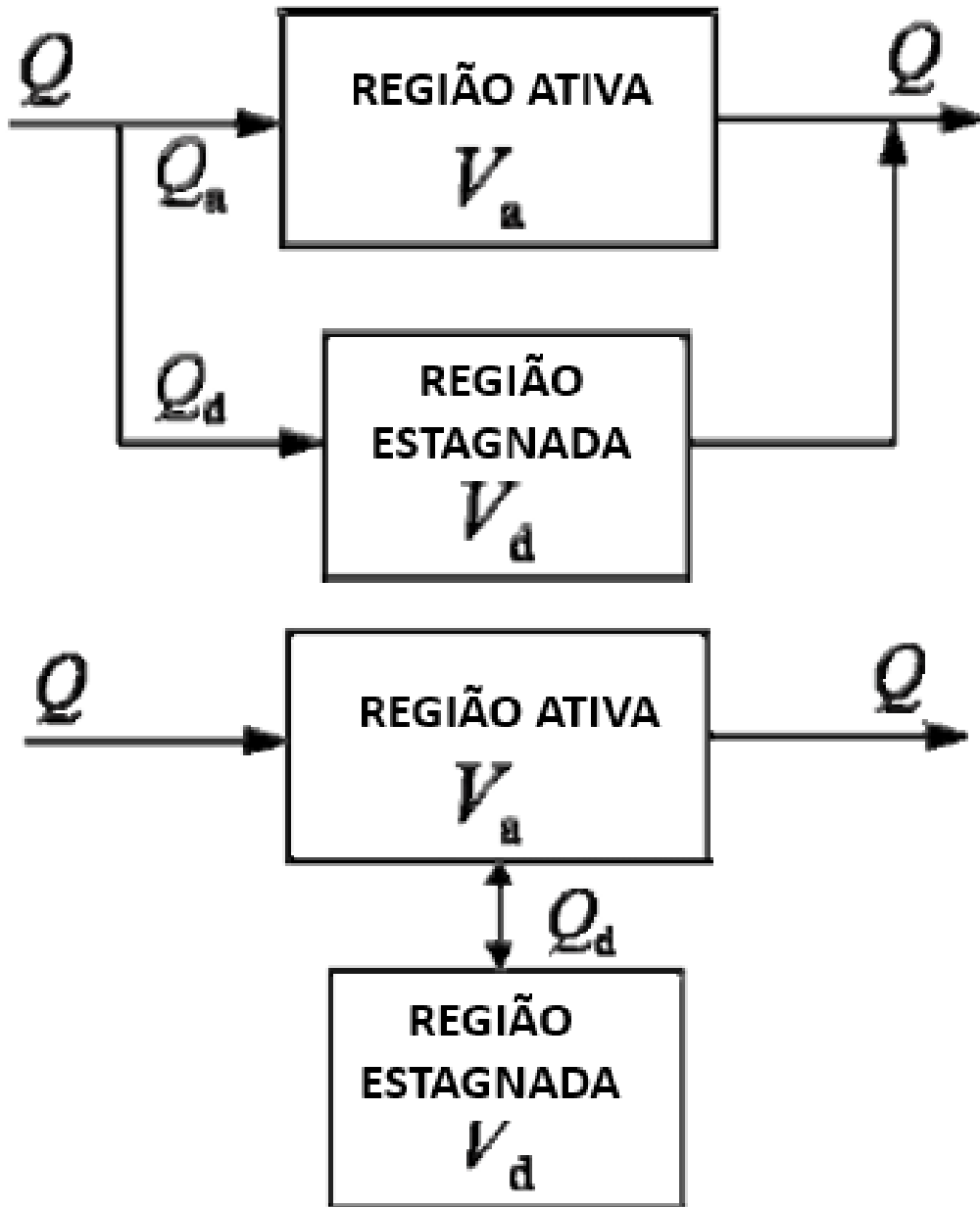
Fonte: Autoria Própria

b) Região de volume estagnado

Considerando um distribuidor que possui uma região de volume ativo e uma região de volume estagnado, conforme descrito na figura 59. O volume total do sistema é dividido em volume ativo e volume morto. A taxa de escoamento volumétrico Q pelo sistema também

dividido em Q_a para a zona ativa e Q_d para a zona morta.

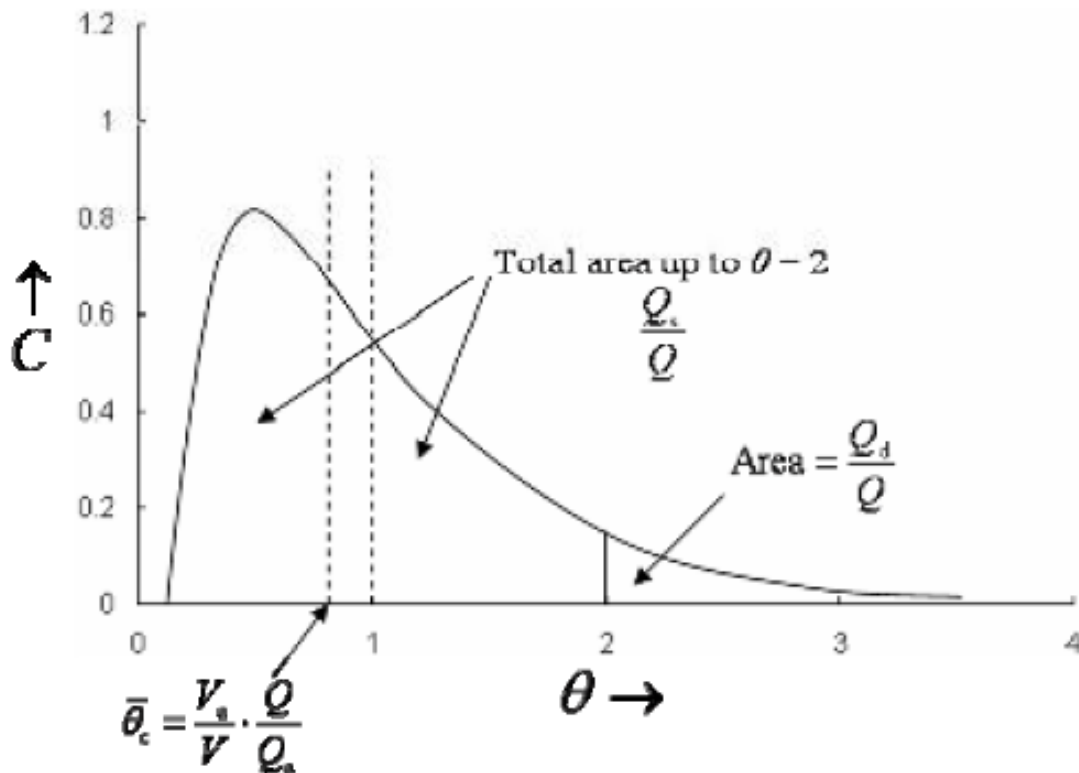
Figura 57 – Escoamento em zonas ativas e estagnadas em um modelo combinado



Fonte: Sahai (2008)

De acordo com a definição de Levenspiel (1999) o fluido que permanece dentro de um recipiente por mais de duas vezes o tempo médio de residência é considerado volume morto. Para uma região com zona morta, a curva C característica é mostrada na figura abaixo:

Figura 58 – Curva característica de uma distribuição de tempo de residência para um escoamento em zonas ativas e estagnadas em um modelo combinado



Fonte: Sahai (2008)

A área sob a curva da figura abaixo é dada por:

$$\sum_{\theta=0}^{\infty} c_i \Delta \theta = 1 \quad (4.5)$$

O tempo médio de residência para toda a curva é:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_i \Delta \theta}{\sum_{\theta=0}^{\infty} C_i} = 1 \quad (4.6)$$

Tempo médio de residência até $\theta=2$,

$$\bar{\theta}_c = \frac{\sum_{\theta=0}^2 C_i \Delta \theta}{\sum_{\theta=0}^2 C_i} \quad (4.7)$$

A área sob a curva até $\theta=2$,

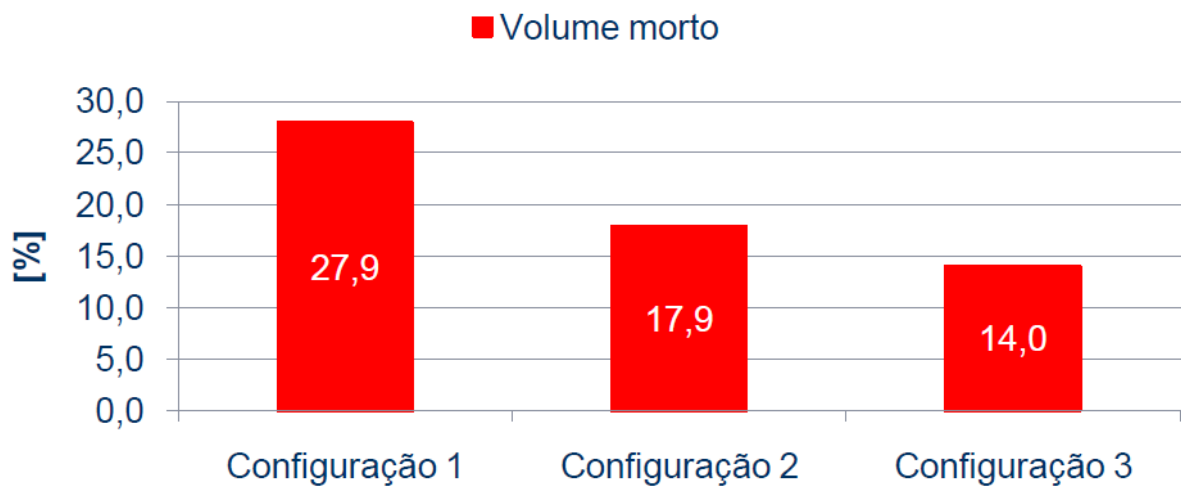
$$\frac{Q_a}{Q} = \sum_{\theta=0}^2 C_i \Delta \theta \quad (4.8)$$

E a fração de volume morto,

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \bar{\theta}_c \quad (4.9)$$

O gráfico abaixo mostra o resultado da simulação computacional para as três configurações em estudo. O maior volume morto foi identificado no distribuidor de configuração 1 – Distribuidor com barragem, onde 27,9% do volume encontrado foi de volume morto. O distribuidor de configuração 2 – Distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa possui volume morto de 17,9% e o distribuidor de configuração 3 – Inibidor de turbulência e sola elevada possui o menor percentual de volume morto com 14%.

Figura 59 – Volume morto obtido por meio de simulação computacional para as três configurações em estudo



Fonte: Autoria Própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Montagem de Distribuidores em planta industrial

O fluxograma abaixo descreve sucintamente o processo de preparação, montagem e disponibilização de um distribuidor para operação:

Figura 60 – Fluxograma do processo de montagem e disponibilização de um distribuidor

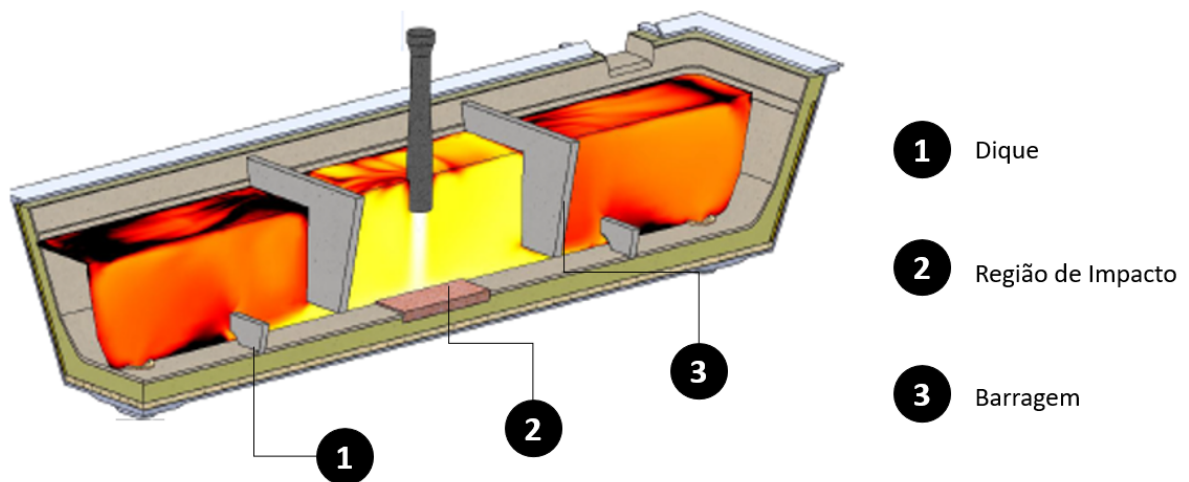


A montagem de dos distribuidores de configuração com barragem, inibidor de turbulência e sola elevada seguem o mesmo fluxograma apresentado acima.

5.1.1 Configuração de Distribuidor com barragem e sola baixa

A barragem é um dos mobiliários utilizados para modificar o fluxo de aço no distribuidor. A figura 61 abaixo ilustra os principais mobiliários presentes nessa montagem.

Figura 61 – Representação esquemática do distribuidor com sola baixa e barragem



Fonte: Autoria Própria

A montagem do distribuidor com barragem envolve em primeiro lugar a limpeza e reparo do concreto permanente caso necessário. Posteriormente, antes de iniciar a montagem dos mobiliários constrói-se uma região de impacto central no fundo do distribuidor conforme ilustrado na 62(a). Essa região é construída com tijolos refratários com alta resistência mecânica pois essa região receberá o impacto do jato de aço proveniente da panela. Em seguida, os primeiros mobiliários instalados são os diques conforme ilustrado na 62(b). Eles são posicionados em locais pré-determinados e suas medições e distancias são verificadas para assegurar que a montagem seguirá fielmente ao projeto. Por último monta-se as barragens conforme figura 62(c). A montagem das barragens também deve seguir o projeto pré-determinado, seguindo todas as dimensões e distâncias estabelecidas para garantir que o escoamento de fluxo esperado seja atingido.

Posteriormente, o distribuidor é projetado com a massa de cobertura de acordo com a figura abaixo e enviado para o secador para cumprir uma curva de secagem otimizada para a configuração da montagem.

Figura 62 – Principais etapas da montagem do distribuidor com sola baixa e barragem



Fonte: Autoria Própria

Figura 63 – Projeção de massa de cobertura ou concreto de trabalho no distribuidor



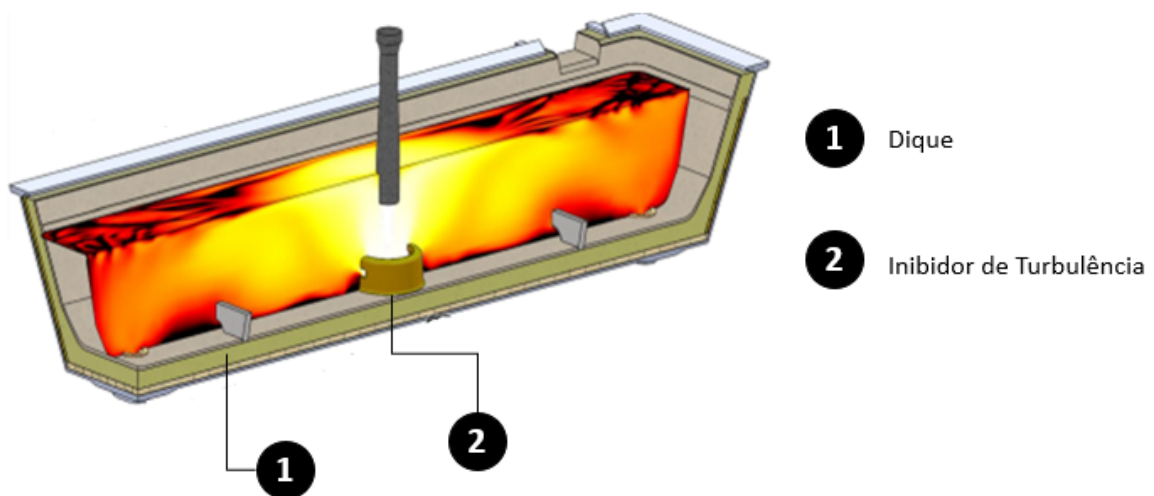
Fonte: Autoria Própria

5.1.2 Configuração de Distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa

A montagem do distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa segue o mesmo fluxo da montagem do distribuidor com barragens. No entanto, nessa montagem não é preciso construir uma região de impacto com tijolos refratários no centro do distribuidor nem utilizar barragens. As barragens dão lugar ao inibidor de turbulência. Assim, após a montagem dos diques, realiza-se a montagem do inibidor de turbulência na região central do distribuidor.

A figura 64 ilustra essa montagem.

Figura 64 – Corte ilustrativo de um distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa



Fonte: Autoria Própria

5.1.3 Configuração de Distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada

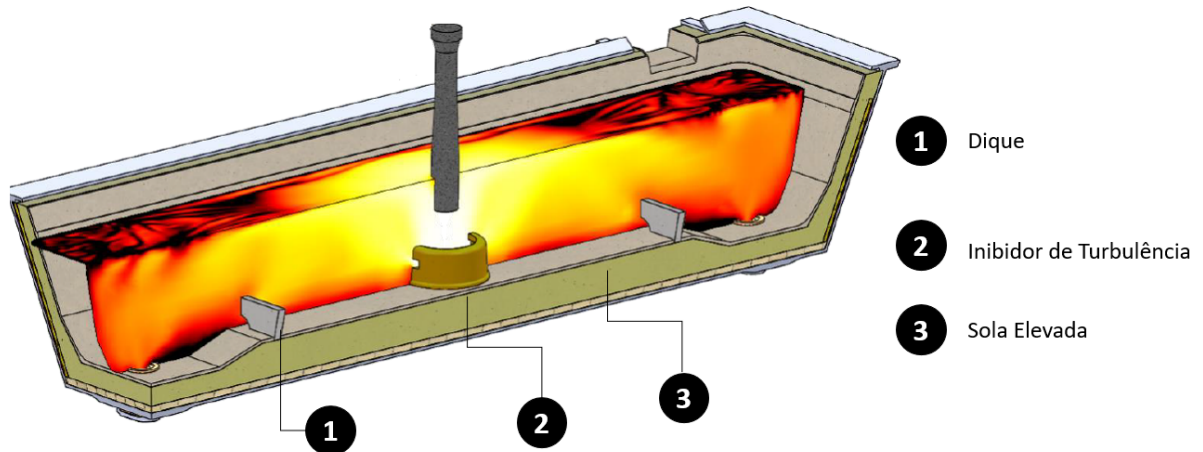
A montagem de distribuidores com sola elevada é ilustrada na figura 65.

a. Construção da Sola Elevada

A concretagem do concreto de segurança do distribuidor ou concreto permanente é uma atividade realizada esporadicamente devido a elevada vida do concreto permanente. Na CSP, por exemplo, a vida média do revestimento permanente do distribuidor é de mil corridas. Para realizar a atividade de concretagem de permanente, um molde metálico é introduzido no distribuidor e o concreto é derramado entre o molde e a carcaça metálica do distribuidor. Dessa maneira, o concreto escoar tomando a forma do perfil do molde metálico.

Idealmente, a modificação do perfil refratário da sola do distribuidor deve ser feita no concreto permanente. Assim, ao realizar a concretagem do permanente, o distribuidor obterá

Figura 65 – Corte ilustrativo de distribuidor com inibidor de turbulência e sola elevada



Fonte: Autoria Própria

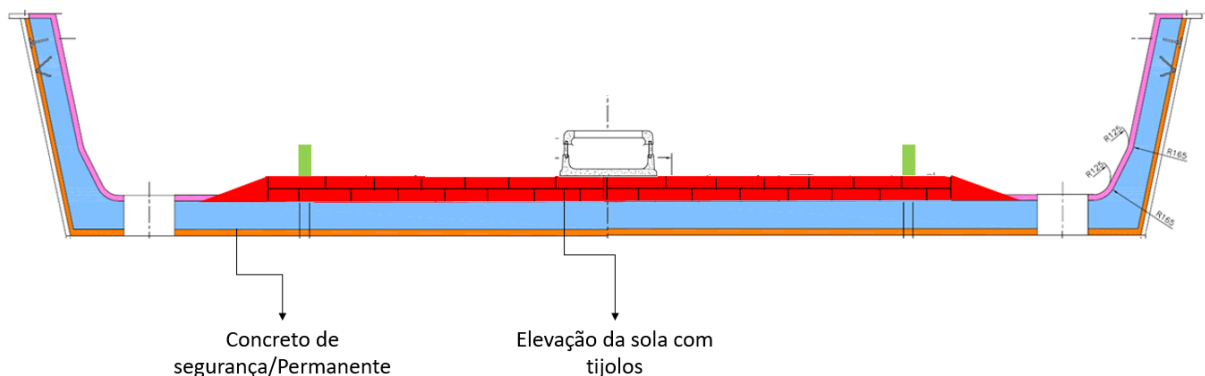
a forma com sola elevada conforme ilustrado na figura acima e não precisará ser refeita a cada utilização do distribuidor.

No entanto, para a realização dos primeiros testes, decidiu-se alterar o perfil refratário por meio de uma montagem com tijolos. Essa decisão foi tomada para dar flexibilidade na avaliação dos impactos da modificação na operação do distribuidor. Caso os resultados não fossem satisfatórios, a montagem com tijolos poderia ser facilmente desfeita sem comprometer a usabilidade do distribuidor.

Foram utilizados tijolos refratários sílico aluminosos para construir a região elevada da sola do distribuidor. Esses tijolos foram escolhidos devido a similaridade de propriedades em relação ao concreto utilizado como permanente do distribuidor.

A figura 66 abaixo ilustra a montagem da elevação da sola com tijolos.

Figura 66 – Desenho ilustrativo destacando a região de elevação da sola montada com tijolos



Fonte: Autoria Própria

As dimensões utilizadas para a montagem seguiram as especificações do projeto no

apêndice A. A figura 67 abaixo mostra as etapas de construção da elevação da sola.

Figura 67 – Construção da sola elevada do distribuidor



Fonte: Autoria Própria

A figura 67(a) mostra o revestimento de segurança/permanente do distribuidor a figura 67(b) mostra a montagem da primeira fiada de tijolos sobre o permanente que compõe a elevação da sola e a figura 67(c) mostra a montagem da segunda fiada para a construção da elevação da sola do distribuidor.

Os diques foram montados sobre a elevação conforme a figura 68(a) e a figura 68(b) mostra o distribuidor com sola elevada já projetado com massa de cobertura.

b. Acompanhamento da secagem do distribuidor com sola elevada

Após a montagem e projeção com massa de cobertura, os distribuidores precisam ser secados de modo a remover toda a umidade presente.

O distribuidor com sola elevada utilizou a mesma curva de secagem já utilizada para as montagens com barragem e com sola baixa. Como não houve alteração no volume de massa de projeção aplicada, o aporte térmico necessário para realizar a secagem do distribuidor não sofreu alteração.

A figura 69 abaixo é a curva de secagem teórica necessária para realizar a secagem do distribuidor.

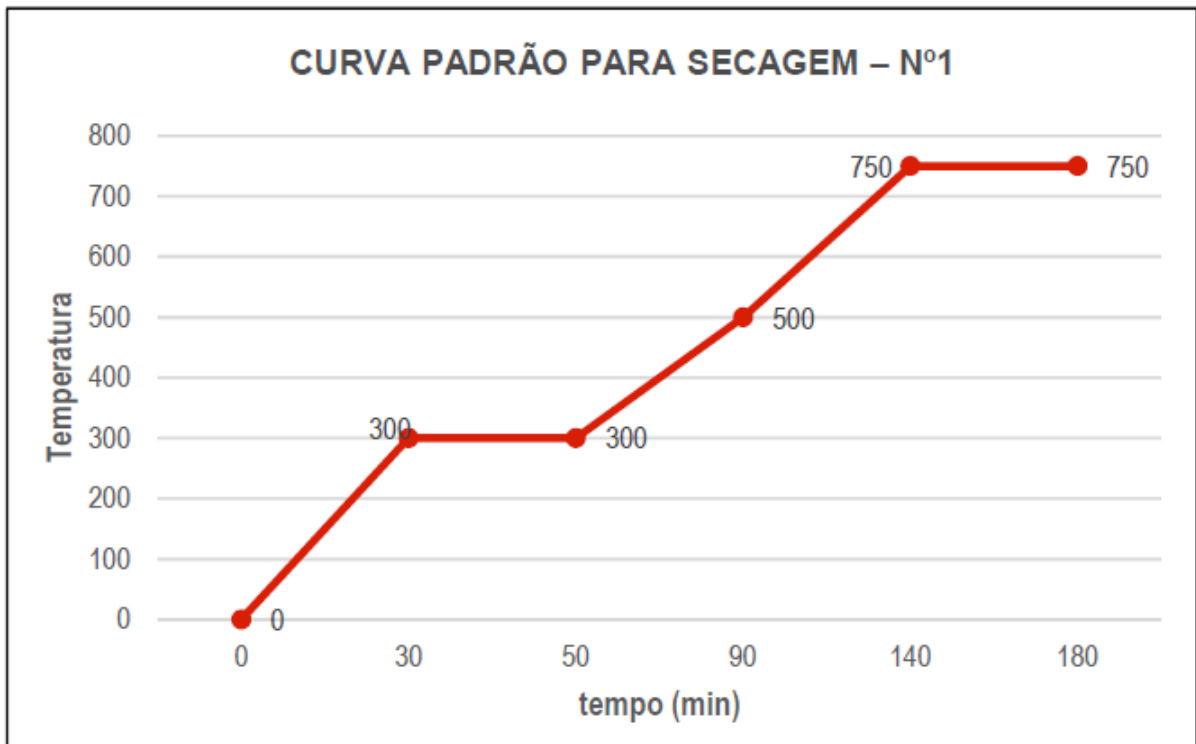
A figura 70 abaixo é a curva de secagem real medida no momento da secagem

Figura 68 – Aspecto do distribuidor após a montagem da elevação da sola



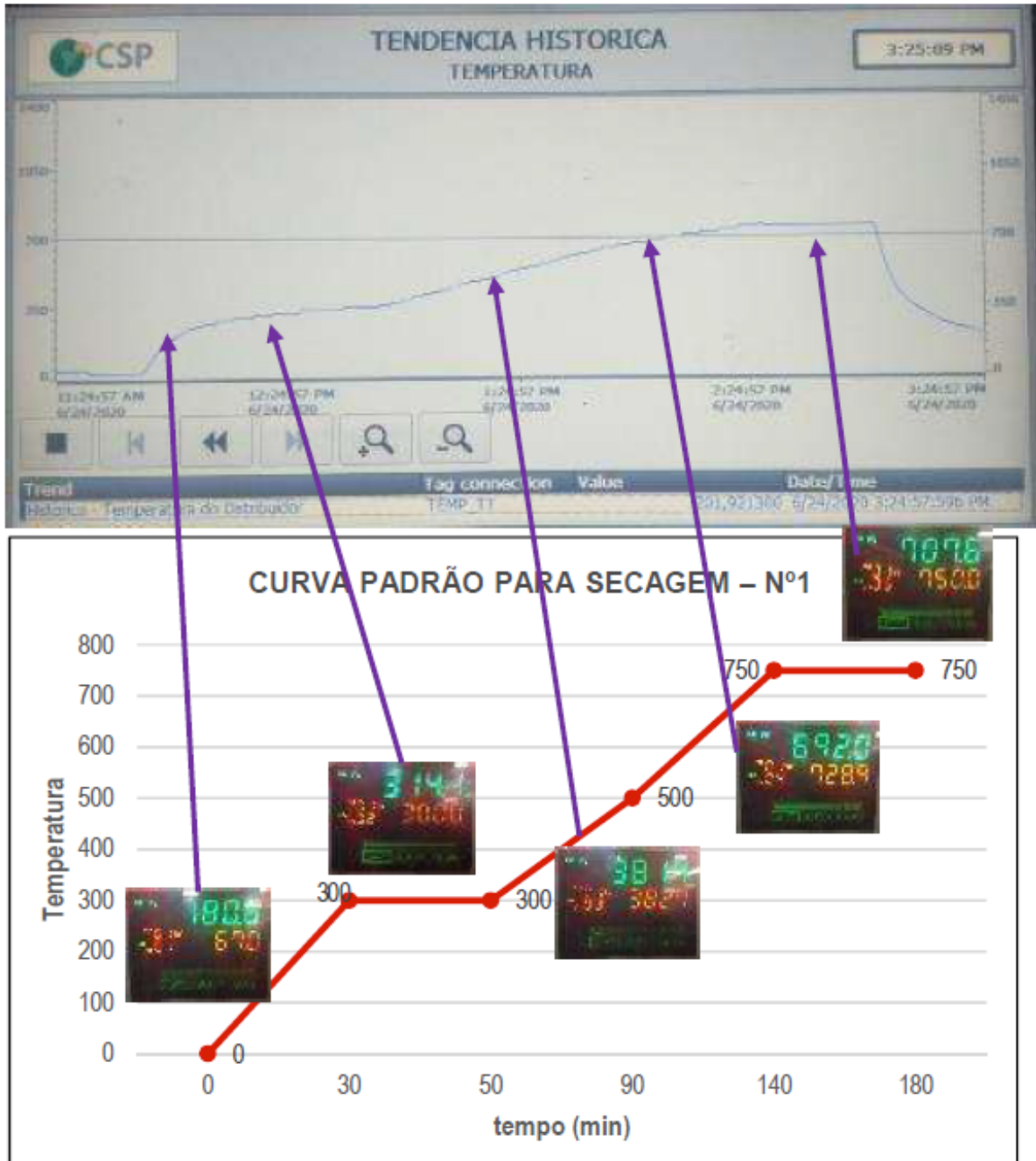
Fonte: Autoria Própria

Figura 69 – Curva de secagem utilizada no distribuidor com sola elevada



Fonte: Autoria Própria

Figura 70 – Curva de secagem utilizada no distribuidor com sola elevada



Fonte: Autoria Própria

5.2 Operação do distribuidor com sola elevada em testes em escala industrial

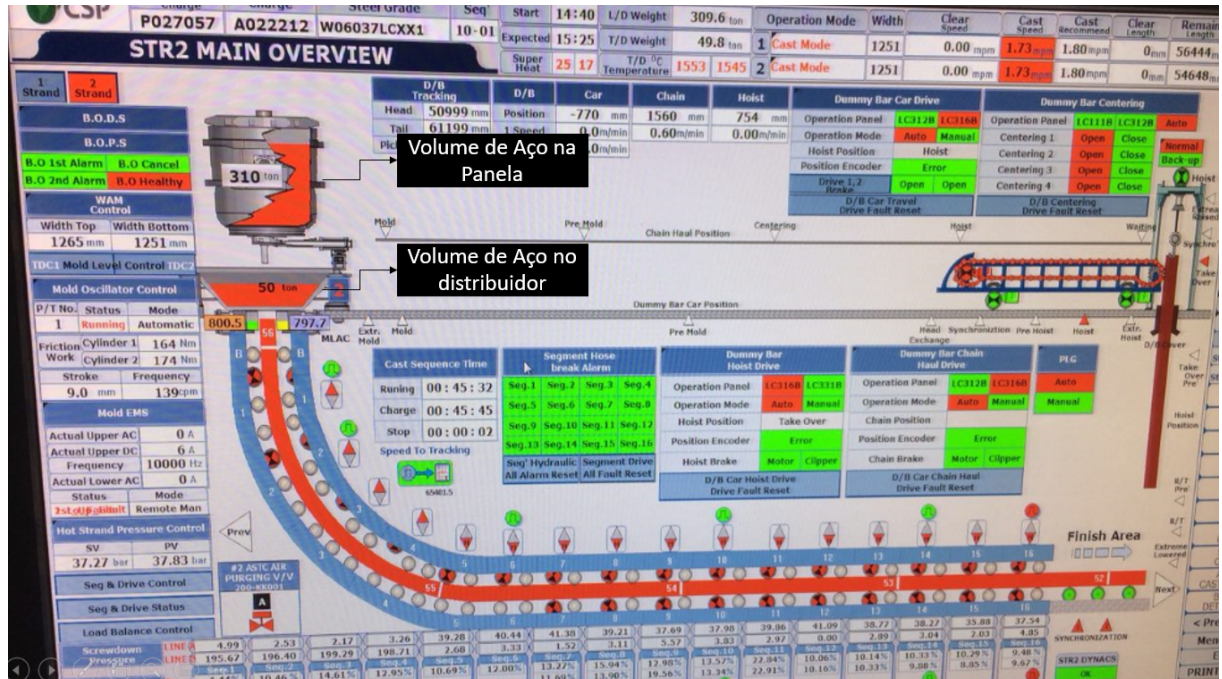
5.2.1 Teste operacional do primeiro distribuidor montado com sola elevada

O aço escolhido para o primeiro teste foi um aço baixo carbono.

A figura 71 abaixo é uma foto da tela operacional da plataforma do lingotamento contínuo. Essa tela possui as informações operacionais como velocidade de lingotamento, largura

de molde, volume de aço na panela e volume de aço no distribuidor.

Figura 71 – Tela operacional do lingotamento contínuo



Fonte: Autoria Própria

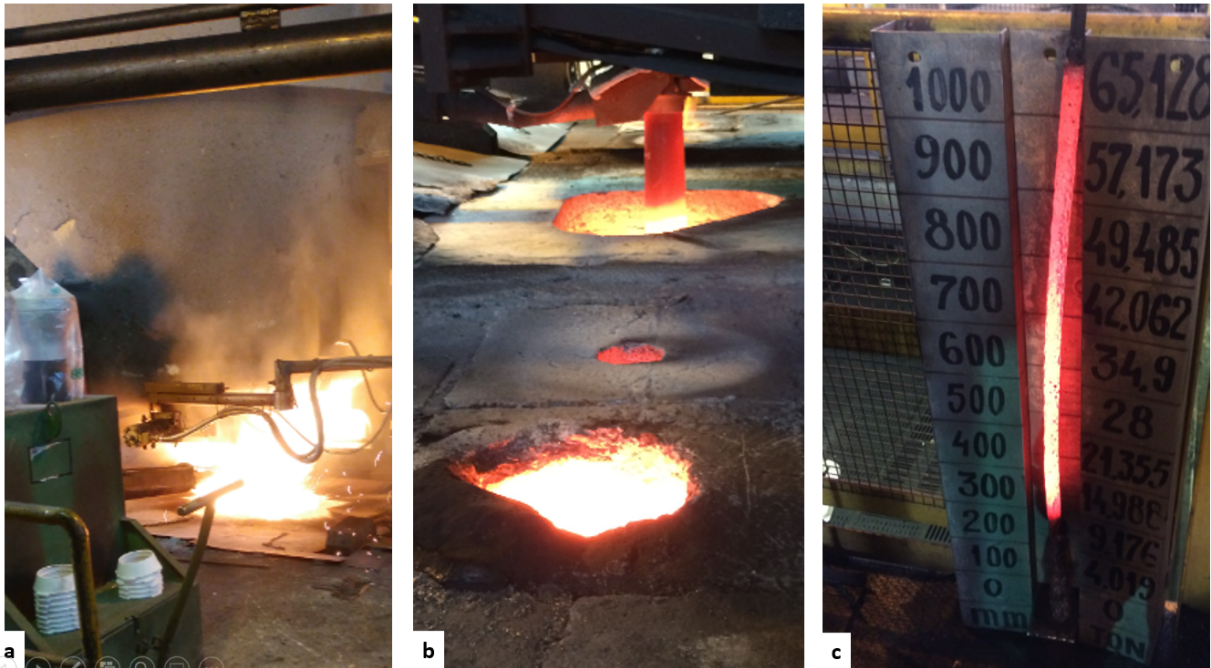
A foto abaixo mostra a operação do lingotamento contínuo do primeiro distribuidor com sola elevada. A figura 72(a) mostra o momento da abertura de panela, esse é um momento crítico, pois devido a elevação da sola do distribuidor, e de acordo com a simulação computacional, o jato de aço ao atingir o inibidor de turbulência seria redirecionado para a superfície do banho com alta velocidade. No entanto, visualmente, a turbulência na superfície do banho não trouxe perigos operacionais. A figura 72(b) foi tirada durante a corrida, logo após a estabilização do nível do banho no distribuidor. A operação não apresentou nenhum desvio ou anormalidade. A figura 72(c) representa a medição da altura do banho metálico no distribuidor. Após a estabilização do nível de aço no distribuidor, um vergalhão foi inserido no banho e em seguida posicionado ao lado de uma régua métrica de correlação peso e altura do distribuidor.

Um dos itens de atenção durante a operação do distribuidor com sola elevada foi o volume de aço dentro do distribuidor durante o lingotamento. Nos distribuidores com sola baixa, a capacidade máxima é de 73 toneladas de aço enquanto no distribuidor com sola elevada a capacidade de aço máxima dentro do distribuidor foi de 67 toneladas.

A tabela abaixo traz detalhes sobre o primeiro teste realizado:

O encerramento de sequencial do distribuidor não foi alterado. Ou seja, o distribuidor encerrou sequencial deixando aproximadamente 8 toneladas de aço remanescente conforme

Figura 72 – Fotografias da operação do primeiro distribuidor com sola elevada



Fonte: Autoria Própria

Nº de Corridas no Distribuidor	Tipo de Aço	Volume de aço remanescente no distribuidor (t)
9	Baixo Carbono	8 toneladas

padrão estabelecido.

5.3 Resultados comparativos dos distribuidores

5.3.1 Análise comparativa da Limpeza do aço

5.3.1.1 Simulação Computacional da Limpeza do Aço

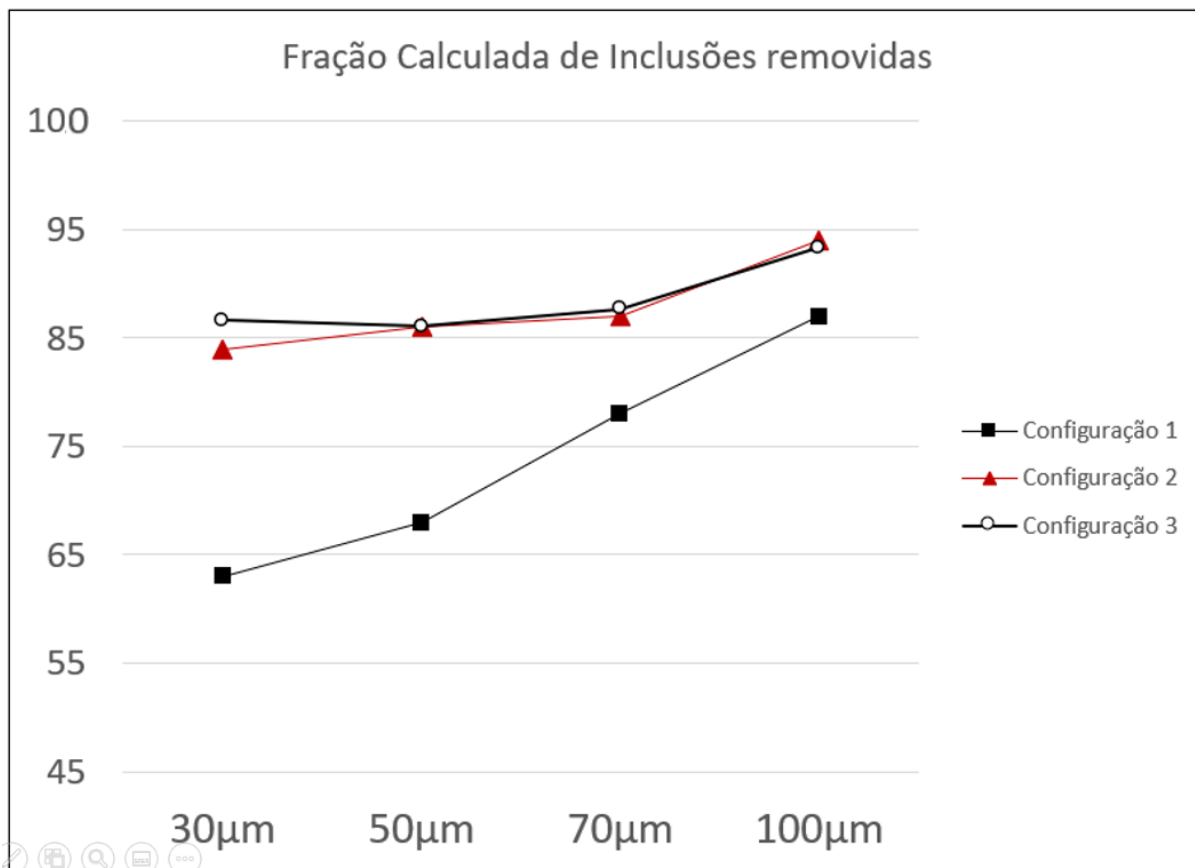
A figura 73 é um gráfico que mostra a fração calculada das inclusões removidas para a escória.

A simulação computacional da fração de inclusões removidas no distribuidor com barragem foi a pior em todas as dimensões analisadas. De acordo com o gráfico abaixo, para o distribuidor de configuração 1 – Distribuidor com barragem, 63% das inclusões de $30\mu\text{m}$ são removidas sendo flotadas para a escória, 68% das inclusões de $50\mu\text{m}$ são flotadas para a escória, 78% das inclusões de $70\mu\text{m}$ são flotadas sendo removidas pela escória e 87% das inclusões de $100\mu\text{m}$ são flotadas para a escória.

Por outro lado, os resultados da simulação computacional dos distribuidores de configuração 2 – Distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa e configuração 3 – Distri-

buidor com inibidor de turbulência e sola elevada são muito similares. Ambas as configurações apresentam melhores resultados de flotação de inclusões em todas as dimensões.

Figura 73 – Fração calculada por simulação computacional das inclusões removidas pela escória



Fonte: Autoria Própria

5.3.1.2 Percentual de Oxigênio Total

Acompanhou-se o lingotamento de três sequenciais diferentes de um aço ultra baixo carbono.

No primeiro sequencial foi utilizado um distribuidor montado com barragens, no segundo sequencial foi utilizado um distribuidor com inibidor de turbulência e sola baixa e no terceiro sequencial utilizou-se um distribuidor montado com sola elevada e inibidor de turbulência.

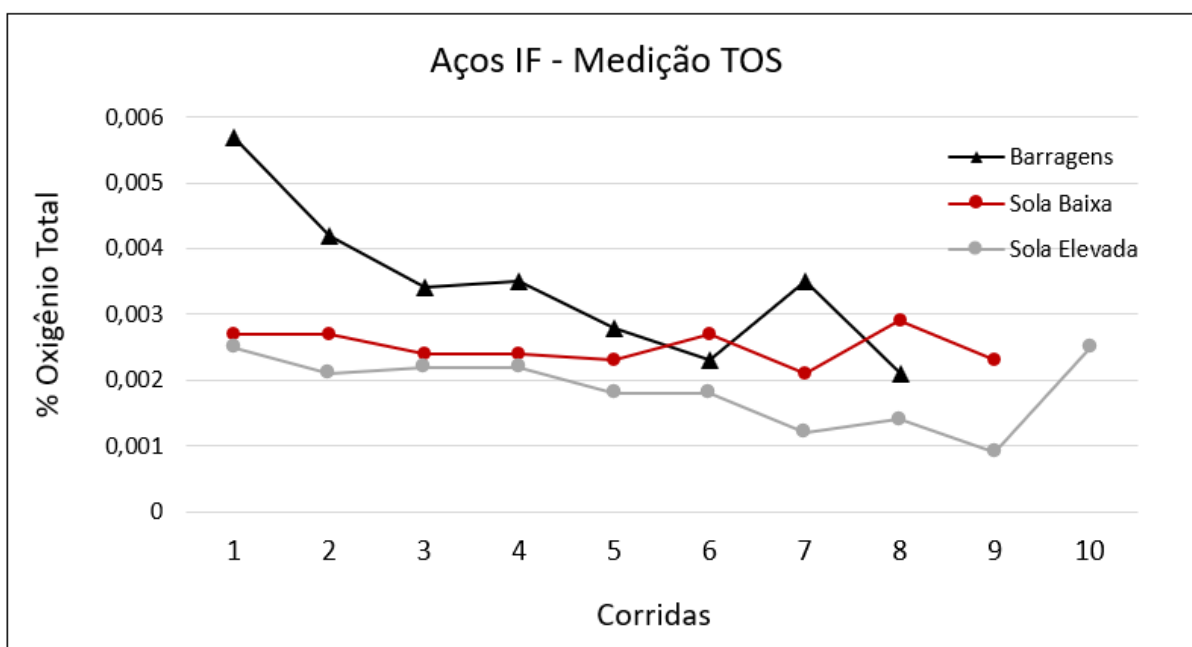
Em cada corrida dos sequenciais de cada distribuidor, foi realizada a retirada de amostras para análise do percentual de oxigênio total. O TOS é uma medição indireta da limpeza do aço.

Os dados encontrados foram plotados no gráfico da figura 74 abaixo. É possível

observar que o distribuidor com barragem possui maior percentual de oxigênio total em praticamente todas as corridas do sequencial. Os distribuidores com sola baixa e com sola elevada possuem valores de TOS mais baixos e mais estáveis ao longo do sequencial.

Os valores de TOS para os distribuidores com barragem são mais elevados caindo progressivamente ao longo do sequencial. Esses dados corroboram com a simulação computacional que indica que os distribuidores com barragem possuem menor índice de flotação de inclusões. Já os distribuidores com sola elevada, possuem TOS similar os distribuidores com inibidor de turbulência e sola baixa. Esses valores também confirmam os dados da simulação computacional quanto a melhora na flotação de inclusões

Figura 74 – Comparação entre a medição do Teor de Oxigênio Total em três configurações de distribuidores



Fonte: Autoria Própria

5.3.1.3 Caracterização pelo método de Baumann

Conforme descrito na revisão bibliográfica, a análise por método Baumann é uma análise da limpidez de aço que utiliza impressão de enxofre para qualificar as macro-inclusões.

O processo de preparação da amostra consiste basicamente das etapas de corte, desbaste, lixamento, polimento e ataque químico.(QUEIROZ, 2015)

O ataque químico é realizado através da imersão de um papel fotográfico comum, de brometo de prata, por aproximadamente cinco minutos em uma solução aquosa de ácido

sulfúrico e H_2O em temperatura ambiente. Em seguida, o papel fotográfico é colocado em contato com a superfície da amostra.(QUEIROZ, 2015)

Os sulfetos existentes na superfície metálica reagem com o brometo de prata do papel fotográfico, formando o sulfeto de prata, que imprime manchas pardas ou negras no papel. (QUEIROZ, 2015)

(RIZZO, 2006) destaca que a principal finalidade da impressão de Baumann é atuar como uma ferramenta de apoio permitindo o controle do processo de lingotamento contínuo e da limpidez do aço, onde para tal são analisados os seguintes parâmetros:

- Índice de macro segregação central;
- Presença, tipo e intensidade de trincas internas;
- Presença e intensidade de inclusões não-metálicas e porosidade.

A avaliação desses parâmetros, ou seja, a classificação dos resultados conforme a intensidade e criticidade é realizada visualmente por um especialista através de comparação da impressão de Baumann da amostra com critérios de classificação pré-estabelecidos.

O Padrão NSC classifica as amostras de Baumann de acordo com a continuidade da segregação central.(QUEIROZ, 2015)

Figura 75 – Classificação das amostras de Baumann quanto a continuidade da segregação central

Continuidade	Definição
A	Linha pronunciada uniforme e contínua.
B	Linha pronunciada, porém não uniforme disposta na forma de traços mais alongados.
C	Pontos não uniformes irregularmente formados.

Fonte: Queiroz (2015)

A intensidade, por sua vez, é classificada de acordo com a dimensão da segregação central, medida em relação à espessura da linha segregada da placa com valores que variam de 0 a 3 em intervalos de 0,5. O grau de severidade em relação a intensidade varia de 0 a 3 sendo 0 o menos crítico e 3 o mais crítico. (QUEIROZ, 2015)

- a. Impressão de Baumann – Distribuidor com Barragem e sola baixa
- b. Impressão de Baumann – Distribuidor com Inibidor de Turbulência e Sola baixa
- c. Impressão de Baumann – Distribuidor com Sola elevada

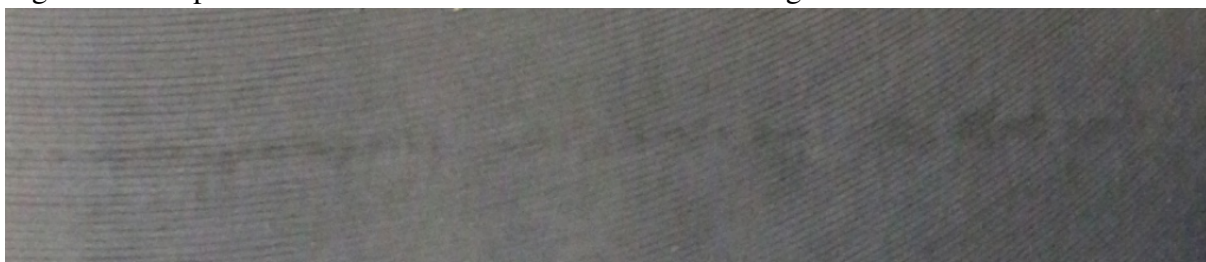
As imagens foram classificadas por um especialista de acordo com o padrão de classificação e as três imagens foram classificadas como sendo C - 01. Que indica leve segregação

Figura 76 – Classificação das amostras de Baumann quanto a Intensidade da segregação central

Continuidade	Intensidade da faixa segregada
A	1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0
B	1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0
C	0,0 – 0,5 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0

Fonte: ??)

Figura 77 – Impressão de Baumann – Distribuidor com Barragem e sola baixa



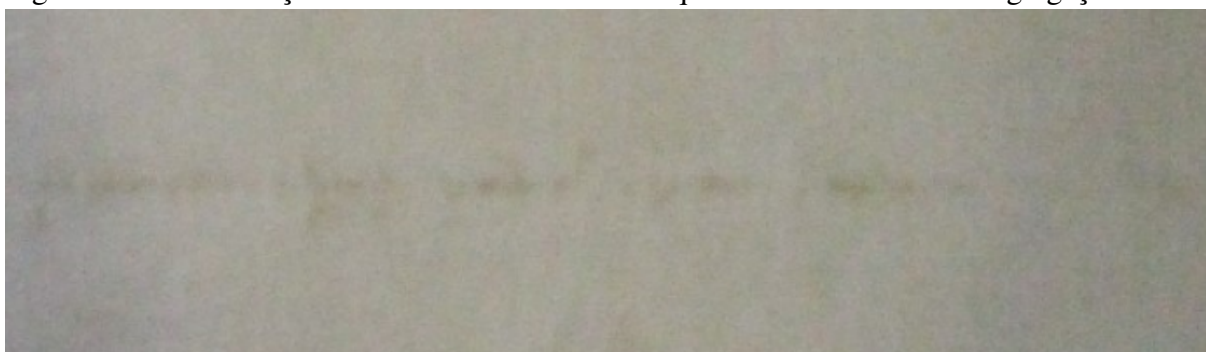
Fonte: Autoria Própria

Figura 78 – Impressão de Baumann – Distribuidor Sola baixa



Fonte: Autoria Própria

Figura 79 – Classificação das amostras de Baumann quanto a Intensidade da segregação central



Fonte: Autoria Própria

central.

5.3.2 *Análise comparativa da altura da coluna de aço no distribuidor*

De acordo com a simulação computacional apresentada, o volume de aço correspondente a um nível acima da altura crítica de formação de vórtice nos distribuidores com sola baixa foi de aproximadamente 8 toneladas. No distribuidor com sola elevada, por outro lado, essa mesma altura corresponde a um volume de 5,6 toneladas.

A partir da simulação computacional, foi possível criar uma correspondência teórica entre o volume de aço contido no distribuidor e a altura do nível do banho. A tabela abaixo mostra essa correlação para os distribuidores com sola baixa.

Para uma altura de 200 mm tem-se aproximadamente 9,17 toneladas de aço, enquanto para uma altura de 1100 mm tem-se um peso de aproximadamente 73,5 toneladas.

Tabela 1 – Tabela de Correlação Peso X Altura no distribuidor

Altura	Peso	t/mm
1100	73,5	0,08372
1000	65,128	0,07955
900	57,173	0,07688
800	49,485	0,07423
750	45,60975	0,072925
700	42,062	0,07162
650	38,31725	0,07031
600	34,9	0,069
550	31,28625	0,067725
500	28	0,06645
450	24,51375	0,06506
400	21,355	0,06367
350	18,00775	0,060895
300	14,988	0,05812
250	11,91825	0,054845
200	9,176	0,05157
100	4,019	0,04019

Fonte: elaborado pelo autor (2021).

Para confirmar a correlação teórica apresentada na Tabela 1, foram realizadas medições da altura da massa solidificada (cascão do distribuidor) de vários distribuidores após o encerramento dos sequenciais. Por um período de dois meses, foram mensuradas as alturas dos cascões solidificados de distribuidores com sola baixa que encerraram sequencial. A figura abaixo é uma foto do cascão do distribuidor e dos pontos de medição.

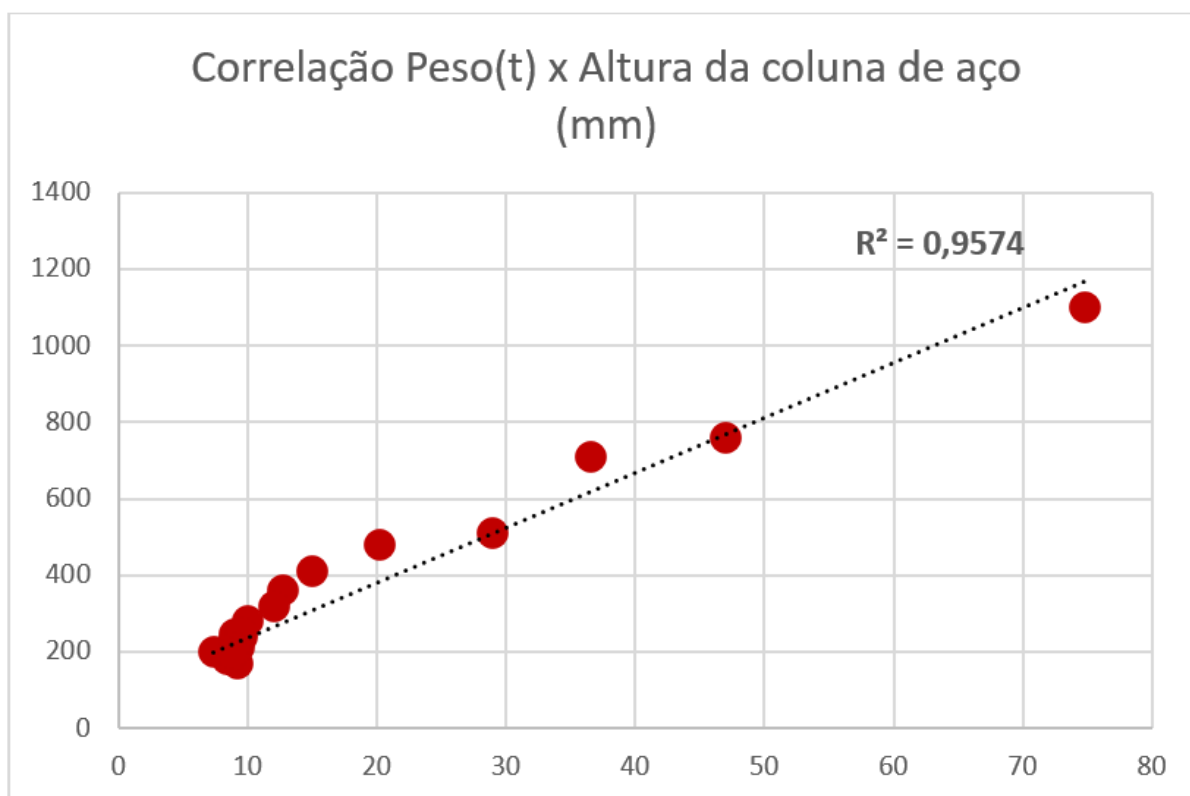
A partir dos dados coletados na medição dos cascões solidificados foi possível plotar a regreção linear da figura abaixo.

Figura 80 – Medição da altura do cascão do distribuidor com sola baixa



Fonte: Autoria Própria

Figura 81 – Regressão Linear da correlação peso x altura do cascão solidificado do distribuidor



Fonte: Autoria Própria

O resultado foi uma correlação de 95%.

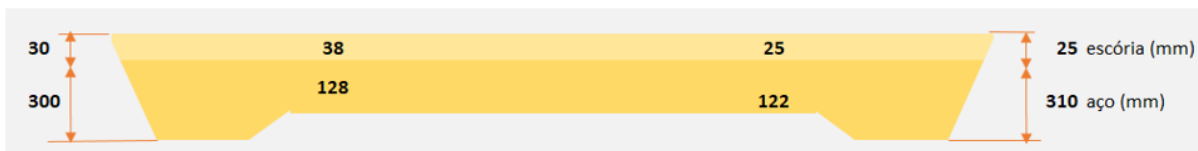
5.3.2.1 Encerramento de sequenciais de distribuidores com sola elevada

Nos primeiros testes com distribuidores com sola elevada. A fim de confirmar o potencial de redução de aço remanescente para essa configuração, os sequenciais desses distribuidores foram encerrados com aproximadamente 8 toneladas de aço. A figura abaixo ilustra as medidas encontradas no cascão do distribuidor com sola elevada encerrado com 8

toneladas.

Para um volume de aproximadamente 8 toneladas, a altura do cascão do distribuidor foi de 300 mm de aço. 300 mm é bem superior a altura crítica de formação de vórtice. Comparativamente, em um distribuidor com sola baixa, 300 mm de altura correspondem a 12 toneladas de aço conforme tabela acima.

Figura 82 – Medição da altura do cascão do distribuidor encerrado com 8 toneladas

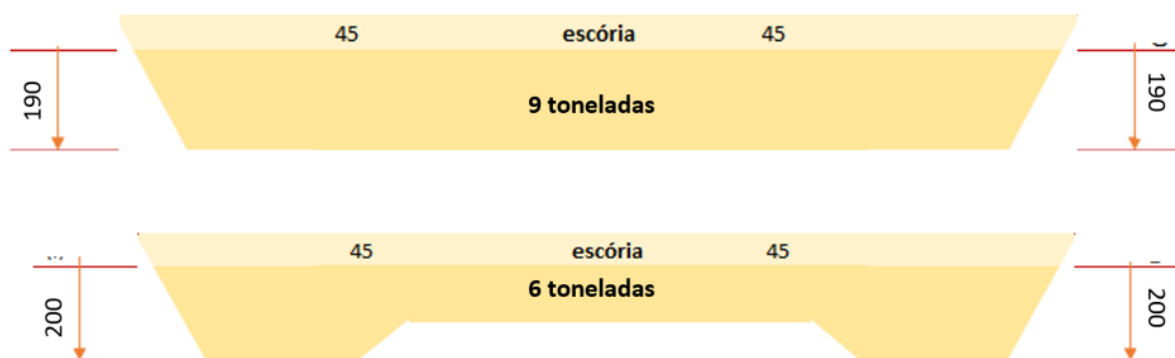


Fonte: Autoria Própria

Essa constatação deu espaço para uma redução gradativa no volume de encerramento de sequencial nos distribuidores com sola elevada sem, contudo, comprometer a segurança operacional e a qualidade do aço.

A figura abaixo ilustra a medição de altura do cascão do distribuidor em um distribuidor com sola baixa e em um distribuidor com sola elevada:

Figura 83 – Comparação entre a Medição da altura do cascão do distribuidor com sola baixa e do distribuidor com sola elevada



Fonte: Autoria Própria

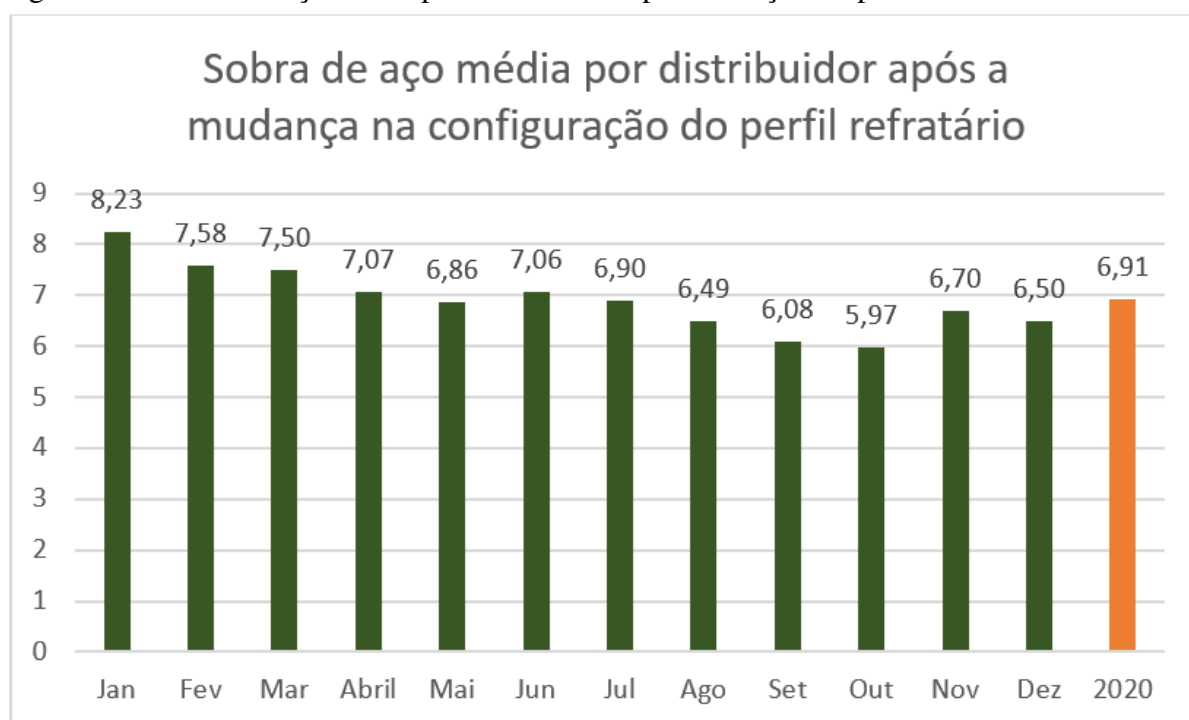
No distribuidor com sola baixa, a altura do cascão de 9 toneladas foi de 190 mm. No distribuidor com sola elevada a altura do cascão de 6 toneladas foi de 200 mm. Ou seja, a alteração dos distribuidores de sola baixa para sola elevada trará uma redução de perda de aço de aproximadamente 3 toneladas por distribuidor.

5.3.2.2 Redução da sobra de aço do distribuidor

A conversão de todos os distribuidores de sola baixa para sola elevada significa um ganho significativo em rendimento metálico.

O gráfico abaixo mostra a evolução da redução da sobra média de aço no distribuidor ao longo do ano com a modificação dos distribuidores para sola elevada.

Figura 84 – Sobra de aço média por distribuidor após alteração no perfil refratário



Fonte: Autoria Própria

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A Alteração do perfil refratário do distribuidor, por meio da elevação da sola, permitiu reduzir o volume mínimo de aço no encerramento do sequencial do lingotamento contínuo, sem, contudo, comprometer a altura de segurança de formação de vórtice sobre os veios do distribuidor.

As simulações computacionais e testes em escala industrial confirmaram não haver perdas de qualidade ou segurança.

Do ponto de vista estratégico, esse projeto representa um aumento significativo na produção de placa aço e da receita financeira da CSP. O ganho de 2,5 toneladas de aço por distribuidor representa um ganho anual de aproximadamente 3600 toneladas de aço e um ganho financeiro da ordem de milhões de reais anuais.

Para futuros trabalhos, sugiro realizar uma análise comparativa utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura em amostras coletadas de sequências de aços com alta exigência de limpidez. Pode-se coletar amostras no refino secundário, no distribuidor e molde do lingotamento contínuo e avaliar comparativamente para o distribuidor com sola elevada e distribuidor com sola baixa a quantidade, tamanho e morfologia das inclusões presentes no aço.

REFERÊNCIAS

- ANDRZEJEWSKI P.; DIENER, A. P. W. Model investigations of slag flow during last stages of ladle teeming. **Steel Research**, v. 58, n. 12, p. 547–552, 1987.
- BARTOSIAKI JULIO ANÍBAL MORALES PEREIRA, W. V. B. A. C. F. V. B. G. Assessment of inclusion analysis via manual and automated sem and total oxygen content of steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 4, n. 3, p. 235–240, 2015.
- BISWAS, D. S. S. **Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking**. Suíça: Springer Nature Switzerland, 2020.
- CHATTOPADHYAY, M. I. K.; GUTHRIE, R. I. L. Physical and mathematical modelling of steelmaking tundish operations: A review of the last decade (1999–2009). **ISIJ International**, v. 50, n. 3, p. 331–348, 2010.
- CHEUNG, N. **Interação entre uma Base de Conhecimento e um Modelo Matemático de Solidificação na Análise da Qualidade no Lingotamento Contínuo de Aços**. 1999. 144 f. Dissertação (Mestrado) – UNICAMP, 1999.
- COMPANHIA SIDERÚRGICA DO PÉCEM. **Gráfico de Pareto da distribuição das causas de perda de rendimento metálico**. 2021. Acesso em: 04 março. 2021.
- EMI, T. Process integration for making extra clean steels for stringent applications, in “metal separation technologies beyond 2000. In: _____. Warrendale: TMS, 1999. p. 207–218.
- FOX ROBERT W., M. A. T. P. P. J. L. J. C. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. [S. l.]: GEN - Grupo Editorial Nacional, 2014.
- GARCIA A., e. a. **Lingotamento Contínuo de Aços**. São Paulo: ABM, 2006.
- HAMMERSCHMID P., P. H. W. L. T. K. D. M. S. K. Vortex formation during drainage of metallurgical vessels. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 11, n. 6, p. 332–339, 1984.
- HOLAPPAA, O. W. L. Inclusion engineering. In: SEETHARAMAN ALEXANDER MCLEAN, R. G. S. S. S. (Ed.). **TREATISE ON PROCESS METALLURGY: Industrial Processes, Part A**. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2014. v. 3, p. 1751.
- IRVING, W. **Continuous Casting of Steel**. [S. l.]: The Institute of Materials, 1993.
- LEE SANG-JOON KIM, H.-G. L. S.-J. New idea of suppressing free surface vortex during tapping liquid steel from converter. **Metals and Materials International**, v. 22, n. 1, p. 136–142, 2016.
- LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering, 3rd**. United States of America: John Wiley Sons, Inc, 1999.
- LÓPEZ-RAMÍREZ J. DE BARRETO, P. V.-M. J. A. R. S. . C. D.-V. S. Physical and mathematical determination of the influence of input temperature changes on the molten steel flow characteristics in slab tundishes. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 35B, n. 5, p. 957–966, 2004.
- MAZUMDAR, J. W. E. D. **MODELING OF STEELMAKING PROCESSES**. Boca Raton, Flórida: CRC Press, 2010.

MAZUMDAR O. P. SINGH, J. D. S. G. D. S. S. C. D. Reduction of tundish skull and yield improvement in steel plants through physical modeling of steelmaking tundish systems. Indian Institute of Metals 2011, 2011.

OKIMORI, M. Development of continuous casting technology at yawata works. **Nippon Steel Technical Report**, v. 71, n. 1, p. 83–94, 1996.

QUEIROZ, L. C. L. **Classificação das amostras do Ensaio de Baumann através do processamento digital de imagens**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. An optional note.

REYNOLDS, P. O. **Trans. Roy. Soc. London**. 1883.

RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos de lingotamento dos aços**. São Paulo: ABM, 2006.

SAHAI, T. E. Y. **TUNDISH TECHNOLOGY FOR CLEAN STEEL PRODUCTION**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2008.

SANKARANARAYANAN, R. **Modeling of slag entraining funnel formation ('vortex') during liquid metal transfer operations**. 1994. Tese (Doutorado) – McGill University, 1994.

SANTOS, C. A. **A Inserção de Técnicas de Inteligência Artificial na Modelagem Matemática do Lingotamento Contínuo dos Aços**. 2001. Tese (Doutorado) – UNICAMP, 2001.

SILVA, A. L. V. d. Costa e. Non-metallic inclusions in steels – origin and control. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 3, p. 283–299, 2018.

SILVA, H. G. da. **Estudo sobre o Pick-up de Nitrogênio após a etapa de refino primário de aços**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2010.

THOMAS, B. **Continuous Casting, The Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [S. l.]: Elsevier Science Ltd, 2001. v. 2.

WON Y.M., e. a. Analysis of solidification cracking using the specific crack susceptibility. **ISIJ International**, ISIJ International, v. 40, n. 2, p. 129–136, 2000.

WORLDSTEEL. **Participação do lingotamento contínuo em relação ao total de aço bruto produzido no Brasil entre 1971 e 2017**. 2021. Acesso em: 04 março. 2021.

WORLDSTEEL. **Participação do lingotamento contínuo em relação ao total de aço bruto produzido no Mundo entre 1971 e 2017**. 2021. Acesso em: 04 março. 2021.

ZHANG, B. G. T. L. Inclusions in continuous casting of steel. In: EDITOR, T. (Ed.). **XXIV National Steelmaking Symposium**. [S. l.: s. n.], 2003. p. 138.

ÇENGEL, J. M. C. Y. A. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2012.