

BRUNO TABARELLI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO DISTRIBUIDOR DO
LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

Trabalho de Formatura apresentado ao
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo de Aquino Martorano

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Tabarelli, Bruno

Modelagem matemática do distribuidor do lingotamento contínuo / B. Tabarelli. – São Paulo, 2008.

71 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Modelos matemáticos 2.Fundição 3.Siderurgia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e compreensão durante todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Dr. Marcelo de Aquino Martorano, pela orientação, paciência, amizade e a oportunidade de participar do projeto que originou este trabalho.

Ao Prof. Dr. Efraim Cekinski pela co-orientação nesse trabalho, amizade e permissão em utilizar os computadores do IPT para realizar boa parte das simulações deste trabalho.

À Engenheira Química Ana Letícia Monteiro Olini pelo apoio e principalmente paciência ao ter me ensinado a usar o software utilizado nas simulações numéricas.

Ao pessoal do Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo por ter me recebido e tratado muito bem durante o período que realizei o estágio.

RESUMO

Foi construído um modelo matemático para determinar o escoamento do metal líquido no distribuidor (“tundish”) do lingotamento contínuo de tarugos de aço visando maximizar a remoção de inclusões de óxido. Primeiramente foram estudados os principais modificadores de fluxo utilizados industrialmente (diques, barreiras, blocos de impacto, inibidores de turbulência) e como afetam o escoamento ao longo do distribuidor. As equações diferenciais para modelagem foram definidas com base nos princípios de conservação e, devido à complexidade do problema, foi utilizado um software comercial para a resolução numérica destas equações. Devido à maior eficiência dos inibidores de turbulência, este recurso foi estudado em detalhes. Especificamente, verificou-se a influência do tamanho do inibidor de turbulência na remoção das inclusões. A efetividade na remoção foi analisada principalmente através das curvas de distribuição de tempo de residência e da fração removida de inclusões de diversos tamanhos. Em geral, as simulações mostraram que inibidores de turbulência maiores são menos eficientes na remoção de inclusões, embora diminuam o volume morto em relação ao distribuidor sem nenhum modificador. Por fim a configuração $L_{\text{INIBIDOR}}/W = 0.4$, onde L_{INIBIDOR} é a largura do inibidor e W a largura do distribuidor, apresentou a maior eficiência na remoção de inclusões, principalmente aquelas com diâmetro abaixo de $20 \mu\text{m}$.

Palavras-chave: Distribuidor, Lingotamento contínuo, Fluidodinâmica computacional (CFD), Simulação.

ABSTRACT

A mathematical model was implemented to determine the fluid flow of molten steel in a tundish for the continuous casting of steel billets and maximize the removal of oxide inclusions. Initially, the efficiency of the main flow modifiers commonly used in industrial steel casters (dams, weirs, impact pads, turbulence inhibitors) was reviewed. The differential equations governing the fluid flow and heat transfer in the tundish were defined and, due to complexity of the problem, were solved numerically by a commercial software package. After a mesh refining study of the model, the role played by the turbulence inhibitor was studied in detail, because previous research has shown that it is one of the most efficient flow modifiers. In the present work, the effect of the turbulence inhibitor size on the inclusion removal was examined. The efficiency of inclusion removal was analyzed mainly by residence time distribution curves and by the fraction of removed inclusions of various sizes. Larger turbulence inhibitors are less efficient for inclusion removal, although they decrease the dead volume when compared to the tundish without any modifier. Finally, the ratio $L_{\text{INHIBITOR}} / W = 0.4$, where $L_{\text{INHIBITOR}}$ is the inhibitor size and W the tundish width, showed the largest inclusion removal efficiency, especially for inclusion diameters smaller than $20 \mu\text{m}$.

Keywords: Tundish, Continuous Casting, Computational Fluid Dynamics (CFD), Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do processo de lingotamento contínuo mostrando o distribuidor.....	9
Figura 2: Representação dos mecanismos de incorporação de inclusões à escória e adesão às paredes do distribuidor, bem como do efeito de turbulência na região de entrada, promovendo a colisão e coalescimento de inclusões (SINHA e SAHAI, 1993).....	10
Figura 3: Posicionamento dos modificadores de fluxo na configuração 2 com barreira e dique. As dimensões estão em metros (SINHA e SAHAI, 1993).	14
Figura 4: Geometria do distribuidor utilizado na simulação de Miki e Thomas (1999).	15
Figura 5: Fração removida de clusters (considerados de alumina) em função do tamanho de partícula (MIKI e THOMAS, 1999).....	16
Figura 6: Representação do perfil de temperaturas para condições isotérmicas mostrando a disposição da configuração dique/barreira (JOO e GUTHRIE, 1991). .	17
Figura 7: Residual de inclusões em função da velocidade de Stokes. Nota-se que a melhor configuração é aquela em que a configuração barreira/dique está posicionada a 1/3 do comprimento do distribuidor em relação à parede próxima ao jato de entrada (JOO e GUTHRIE, 1991).....	18
Figura 8: Residual de inclusões em função da velocidade de Stokes da inclusão para três vazões de metal líquido e dois tipos de configuração: (a) sem e (b) com a utilização de modificadores (JOO e GUTHRIE, 1991).	20
Figura 9: Perfil de velocidades para uma redução de 50% na altura de metal líquido (DEBROY e SYCHTERZ, 1985).....	20
Figura 10: Campos de velocidades calculados para dois tipos de distribuidor: um com paredes verticais e outro com paredes laterais inclinadas de um ângulo de 30° em relação a um plano vertical (HE e SAHAI, 1987).....	21
Figura 11: Residual de inclusões em função da velocidade de Stokes para quatro ângulos de inclinação da parede lateral do distribuidor em relação a um plano vertical (HE e SAHAI, 1987).....	22
Figura 12: Geometria do distribuidor utilizado. (a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral. Medidas em mm (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES <i>et al.</i> , 2007).	23

Figura 13: Geometria dos inibidores utilizados. Medidas em mm (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES <i>et al.</i> , 2007).	23
Figura 14: Curvas de tempo de residência para os cinco casos analisados. Concentração adimensional em função do tempo adimensional (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES <i>et al.</i> , 2007).	24
Figura 15: Gradientes da taxa de dissipação da energia cinética da base do distribuidor até a superfície livre. (a) Inibidor A. (b) Inibidor B. (c) Inibidor C. (d) Inibidor D (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES <i>et al.</i> , 2007).	26
Figura 16: Efeito da convecção térmica na remoção de inclusões (MIKI e THOMAS, 1999).	27
Figura 17: Dimensões do distribuidor (m) experimental desenvolvido. (a) dois blocos de impacto. (b) inibidor de turbulência e diques (AGUILAR-CORONA, MORALES <i>et al.</i> , 2003)	27
Figura 18: a) Dimensões (m) do bloco de impacto e dique utilizados. b) Dimensões do inibidor de turbulência (visões superior, frontal e lateral) (AGUILAR-CORONA, MORALES <i>et al.</i> , 2003).	28
Figura 19: Curvas de tempo de residência para uma vazão de 3,8 ton/min para os arranjos (a) e (b) (AGUILAR-CORONA, MORALES <i>et al.</i> , 2003).	28
Figura 20: Força de convecção térmica em função do tempo adimensional. (a) Arranjo com dois blocos de impacto. (b) Arranjo com inibidor de turbulência e dois diques. As diversas curvas existentes em cada gráfico são medições em alguns pontos do distribuidor (AGUILAR-CORONA, MORALES <i>et al.</i> , 2003).	30
Figura 21: Variação da componente da velocidade no escoamento turbulento (WHITE, 2003).	32
Figura 22: Curva E(t) da distribuição do tempo de residência (LEVENSPIEL, 2000)	38
Figura 23: Respostas ao pulso de entrada (LEVENSPIEL, 2000). (a) escoamento pistonado ideal; (b) escoamento de mistura completa ideal; (c) escoamento combinado.	40
Figura 24: Curva de tempo de residência típica em um distribuidor (SAHAL e EMI, 1996).	42
Figura 25: Curva de escoamento em curto-circuito (LEVENSPIEL, 2000).	43
Figura 26: Dimensões do distribuidor utilizado no modelo.	46
Figura 27: Geometria dos inibidores de turbulência e suas respectivas dimensões. Vista Lateral.	47

Figura 28: Perspectiva isométrica dos cinco inibidores simulados e seu posicionamento no interior do distribuidor.....	48
Figura 29: Pulso de traçador em função do tempo no jato de entrada.....	50
Figura 30: Comparação dos perfis de velocidades obtidos no presente modelo e no artigo de Miki e Thomas (1999): (a) e (b) plano central de simetria; (c) e (d) plano intermediário; (e) e (f) plano próximo à parede.	52
Figura 31: Comparação da remoção de clusters de alumina para o modelo matemático empregado e o resultado obtido por Miki e Thomas (1999).....	52
Figura 32: Malhas utilizadas no distribuidor.	53
Figura 33: Comparação dos resultados obtidos na simulação do distribuidor sem o inibidor. As figuras à esquerda mostram os contornos de velocidade e as figuras à direita mostram os contornos de temperatura. Vista Frontal do plano $z=0.5$ m.	54
Figura 34: Comparação dos resultados obtidos na simulação do distribuidor sem o inibidor. As figuras à esquerda mostram os contornos de velocidade e as figuras à direita mostram os contornos de temperatura. Vista lateral do plano $x=0.5$ (m).	55
Figura 35: Comparação dos resultados obtidos na simulação do distribuidor sem o inibidor. As figuras mostram os vetores de velocidade na vista frontal do plano $z=0.5$ (m) e na vista lateral do plano $x=0.5$ (m).	56
Figura 36: Perfis de velocidades e de temperaturas para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista frontal do plano $z=0.5$ (m).	58
Figura 37: Perfis de velocidades e de temperaturas para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista lateral do plano $x=0.5$ (m).....	59
Figura 38: Vetores de velocidades para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista frontal do plano $z=0.5$ (m).	60
Figura 39: Vetores de velocidades para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista lateral do plano $x=0.5$ (m).....	61
Figura 40: Curvas de tempo de residência para os tamanhos de inibidores simulados.	63
Figura 41: Percentual de volume morto em função de $L_{INIBIDOR}/W$ para as cinco configurações analisadas.....	64
Figura 42: Fração removida para a camada de escória para inclusões de $5\ \mu\text{m}$	65
Figura 43: Fração removida para a camada de escória para inclusões de $10\ \mu\text{m}$	65
Figura 44: Fração removida para a camada de escória para inclusões de $20\ \mu\text{m}$	66
Figura 45: Fração removida para a camada de escória para inclusões de $50\ \mu\text{m}$	66

Figura 46: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 80 μm67

Figura 47: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 100 μm . .67

LISTA DE SÍMBOLOS

$[A]$: matriz de coeficientes do sistema linear

$[b]$: vetor de coeficientes advindos da discretização

Bu : relação entre forças de convecção e inerciais $\left(Bu = \frac{Gr}{Re^2} \right)$

$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_m, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$: constantes do modelo $k-\varepsilon$

c_p : capacidade térmica do metal líquido ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)

C_D : coeficiente de arrasto

C : fração mássica de traçador

D : difusividade efetiva ($m^2 s^{-1}$)

D : difusividade molecular ($m^2 s^{-1}$)

D_T : difusividade turbulenta ($m^2 s^{-1}$)

$E(t)$: concentração adimensional do traçador

F_D : força de arrasto sobre a inclusão (N).

Gr : número de Grashof

g_i : aceleração gravitacional na direção

k : energia cinética turbulenta ($m^2 s^{-2}$)

$N_{ou/in}$: número de inclusões na entrada (in) ou na saída (out) do distribuidor

$\bar{P}$: pressão média em um dado intervalo de tempo ($kg\ m^{-1}\ s^{-2}$)

Pr : número de Prandtl molecular

Pr_T : número de Prandtl turbulento

Q_a : vazão volumétrica do fluido na região ativa (m^3/s)

Q : vazão volumétrica do fluido em todo o volume do distribuidor (m^3/s)

R : taxa residual de inclusões

Re_p : número de Reynolds da inclusão

t_m : tempo de residência médio (s)

t_c : tempo calculado até duas vezes o tempo de residência t_m (s)

T_0 : temperatura inicial (ou de referência) (K)

$\bar{T}$: temperatura média em um dado intervalo de tempo (K)

$\bar{u}_i$: velocidade média ($m\ s^{-1}$)

u_i' : : velocidade flutuante ($m s^{-1}$)

$\overline{u_{p,i}}$: velocidade média da partícula ($m s^{-1}$).

V_a : : volume da região ativa (m^3)

V_d : volume morto (m^3)

V_m : volume em mistura (m^3)

V_p : volume pistonado (m^3)

V : volume total do distribuidor (m^3)

α : coeficiente de expansão volumétrica térmica (K^{-1})

ε : taxa de dissipação da energia cinética turbulenta em função do tempo ($m^2 s^{-3}$)

μ : viscosidade molecular ($kg m^{-1} s^{-1}$)

μ_t : viscosidade turbulenta da aproximação de Boussinesq ($kg m^{-1} s^{-1}$)

μ_{eff} : viscosidade efetiva ($kg m^{-1} s^{-1}$)

k : condutividade térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)

k_t : condutividade térmica devido à turbulência ($W m^{-1} K^{-1}$)

k_{eff} : condutividade térmica efetiva ($W m^{-1} K^{-1}$)

ρ_0 : massa específica (ou de referência) do metal líquido ($kg m^{-3}$)

ρ_p : massa específica da inclusão ($kg m^{-3}$)

Θ : tempo adimensional

Θ_c : tempo adimensional (t_c/t_m)

$[\phi]$: vetor solução do problema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Influência dos Modificadores de Escoamento.....	13
3.2	Influência dos Parâmetros de Processo.....	18
3.3	Influência da Inclinação da Parede	21
3.4	Influência dos Inibidores de Turbulência.....	22
4	METODOLOGIA	31
4.1	Equações de Conservação	31
4.2	Hipóteses Utilizadas no Modelo Matemático.....	32
4.3	Modelagem da Fluidodinâmica do Distribuidor	33
4.4	Modelagem para a Dinâmica das Inclusões	36
4.5	Modelagem para a Dispersão de Traçadores	36
4.6	Cálculo do Tempo de Residência no Distribuidor	37
4.6.1	Estudo do Escoamento Não-Ideal	38
4.7	Resolução das Equações Diferenciais.....	43
4.8	Geometria do Distribuidor e do Inibidor de Turbulência	44
4.9	Condições de Contorno do Modelo Matemático	48
4.9.1	Condições de Contorno para a Fluidodinâmica.....	49
4.9.2	Condições de Contorno para a Dinâmica das Inclusões	49
4.9.3	Condições de Contorno para a Dispersão de Traçadores.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Validação do Modelo Matemático	51
5.2	Teste de Independência de Malha	53
5.3	Influência do Tamanho do Inibidor de Turbulência	57
5.3.1	Perfis de Velocidades e Temperaturas.....	57

5.3.2	Análise do Tempo de Residência	63
5.3.3	Análise da Remoção de Inclusões	64
6	CONCLUSÕES	69
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

No processo de lingotamento contínuo, o distribuidor ("tundish") é um reservatório intermediário que recebe o aço líquido do conversor a partir de uma panela e efetua a distribuição para um ou mais moldes metálicos. O distribuidor também é utilizado para a remoção de inclusões não-metálicas, geralmente compostas de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e MnO , além de outros produtos provenientes da desoxidação do aço (DEBROY e SYCHTERZ, 1985). Na Figura 1 está uma representação esquemática do processo de lingotamento contínuo e do distribuidor.

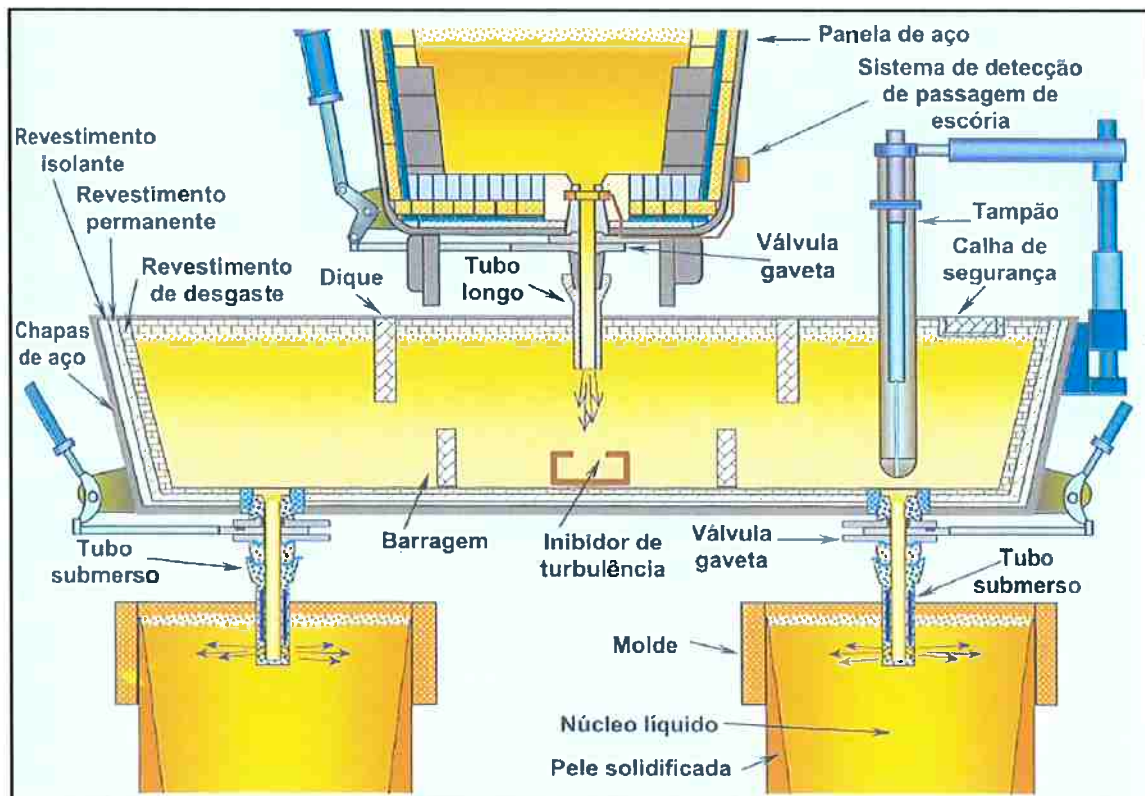


Figura 1: Representação esquemática do processo de lingotamento contínuo mostrando o distribuidor.

A remoção de inclusões do aço líquido contido no distribuidor ocorre através de dois tipos de mecanismos: (a) a incorporação das inclusões à escória presente na superfície do banho metálico e (b) a adesão das inclusões às paredes refratárias que revestem o distribuidor. Estes dois mecanismos, apresentados esquematicamente na Figura 2, ocorrem à medida que as inclusões são

transportadas do interior do metal líquido para as interfaces aço líquido-escória e aço líquido-refratário do distribuidor (JOO, HAN *et al.*, 1993b; SINHA e SAHAI, 1993; MIKI e THOMAS, 1999). O transporte pode ocorrer através da ação de dois tipos de forças: (a) a força de arraste exercida pelo metal líquido em movimento (correntes de convecção) sobre as inclusões e (b) a força de empuxo causada pela diferença entre as densidades das inclusões e do aço líquido (JOO, HAN *et al.*, 1993a; KAUFMANN, NIEDERMAYR *et al.*, 1993; SINHA e SAHAI, 1993; MIKI e THOMAS, 1999). Estas forças aceleram as inclusões e impõe uma velocidade que, quando direcionada às interfaces mencionadas anteriormente, podem auxiliar no processo de remoção e limpeza do aço.

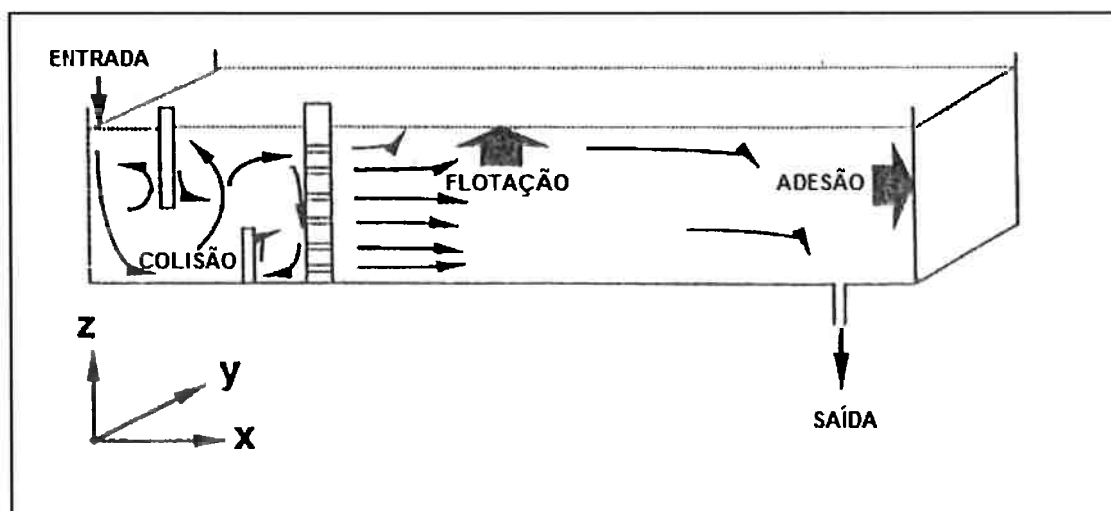


Figura 2: Representação dos mecanismos de incorporação de inclusões à escória e adesão às paredes do distribuidor, bem como do efeito de turbulência na região de entrada, promovendo a colisão e coalescimento de inclusões (SINHA e SAHAI, 1993).

Conseqüentemente, diversos pesquisadores concentraram esforços para entender o escoamento no distribuidor para posteriormente introduzir diversos modificadores objetivando (SINHA e SAHAI, 1993):

- promover escoamento ascendente em direção à escória para aumentar a probabilidade das inclusões serem retidas pela camada de escória;
- absorver a turbulência do jato metálico originário da panela na região próxima à entrada (Figura 2) de modo que ocorra colisão e coalescimento das inclusões (fora dessa região, se houver um fluxo pistonado, sem mistura excessiva, a flotação das partículas torna-se mais fácil);

- prevenir que parte da camada de escória se incorpore ao banho metálico e entre no molde metálico do processo de lingotamento contínuo;
- aumentar o tempo de residência e o caminho do metal líquido no distribuidor, aumentando a probabilidade das inclusões encontrarem as interfaces de remoção mencionadas;
- evitar zonas mortas e curto-circuito no padrão de escoamento do metal líquido.

Portanto para um projeto eficiente do distribuidor é muito importante conhecer como os modificadores de fluxo e suas combinações afetam a remoção de inclusões. Neste trabalho diversas configurações de inibidores de turbulência serão abordadas, mostrando os seus efeitos no padrão de escoamento no interior do distribuidor e na remoção das inclusões não metálicas.

2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é utilizar um modelo matemático para estudar o efeito do tamanho do inibidor de turbulência no padrão de escoamento do aço líquido em um distribuidor (“tundish”) para máquinas de lingotamento contínuo de tarugos. A partir dos resultados do modelo, pretende-se determinar a configuração de inibidor mais eficiente para a eliminação de inclusões de óxido.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Influência dos Modificadores de Escoamento

A utilização de modificadores de escoamento no distribuidor foi alvo de muitos trabalhos de pesquisa, que comprovaram sua eficiência na remoção das inclusões. Diques, barreiras e blocos de impacto, ilustrados na Figura 1 e na Figura 3, são os principais modificadores utilizados industrialmente e, geralmente, não são utilizados isoladamente, mas sim associados. Dependendo do posicionamento dos mesmos ao longo do distribuidor, ocorre uma redução significativa na quantidade de inclusões do aço líquido da entrada.

A Tabela 1, contendo resultados experimentais e de simulações obtidos por Sinha e Sahai (1993), compara o percentual de inclusões removido sem nenhum modificador e com a presença de barreira ou dique isoladamente ou de forma combinada. No modelo apresentado, dois tamanhos típicos de inclusões foram adotados, a saber, 40 e 80 μm , mostrando uma boa concordância entre resultados calculados e obtidos experimentalmente.

Tabela 1: Percentual de remoção de inclusões obtido experimentalmente e através de simulações para dois tamanhos de inclusões em três configurações distintas do distribuidor (SINHA e SAHAI, 1993).

Configuração do distribuidor	Percentual removido através do modelamento matemático	Percentual removido experimentalmente	Tamanho de partícula (μm)
<i>Sem modificadores</i>	<i>20,00</i>	<i>18,70</i>	<i>40</i>
<i>Somente barreira</i>	<i>18,60</i>	<i>20,00</i>	<i>40</i>
<i>Dique e Barreira</i>	<i>17,00</i>	<i>18,50</i>	<i>40</i>
Sem modificadores	67,60	64,00	80
Dique e barreira	75,20	78,00	80

Nesta tabela, os percentuais de remoção de inclusões através do mecanismo de flotação, considerando ou não as colisões, e do mecanismo de aderência aos diversos tipos de paredes do distribuidor estão mostrados. Foram simulados três tipos de configurações. Na configuração 1, não se utilizou modificadores, na

configuração 2 foram utilizados uma barreira e um dique e na configuração 3, adicionou-se ainda um bloco de impacto para controlar a turbulência da entrada.

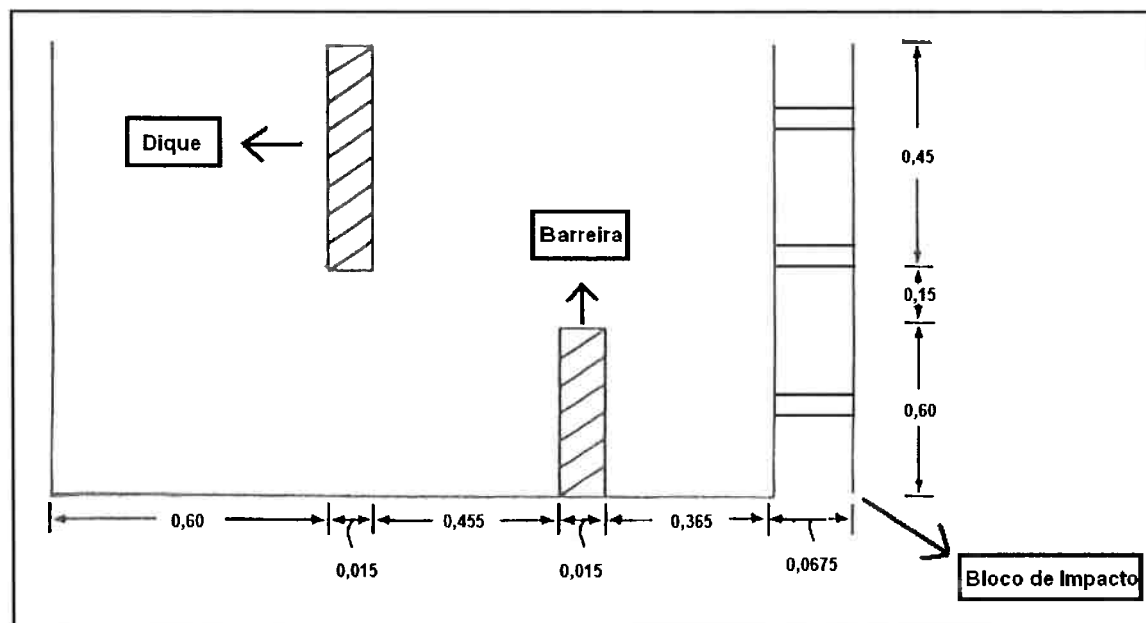


Figura 3: Posicionamento dos modificadores de fluxo na configuração 2 com barreira e dique. As dimensões estão em metros (SINHA e SAHAI, 1993).

Tabela 2: Percentual de remoção de inclusões através dos mecanismos de flotação (com ou sem colisão) e de adesão aos diversos tipos de paredes internas do distribuidor. (SINHA e SAHAI, 1993).

Tamanho da Partícula	Remoção por adesão (%)						Mecanismo de Remoção		Total Removido (%)
	PE	PV	BS	BA	DI	BI	Colisão	Flotação	
Configuração 1: Sem Modificadores									
25-40	2.92	28.20	26.80	-	-	-	9.50	4.70	72.2
45-72	2.90	27.60	25.90	-	-	-	0.04	16.00	72.4
75-150	2.15	23.30	22.20	-	-	-	0.00	31.00	78.7
Configuração dois: Barreira e Dique									
25-40	2.28	17.70	27.30	5.80	0.30	-	10.57	4.93	68.9
45-72	2.21	17.40	27.20	6.20	0.30	-	0.08	16.15	69.5
75-150	1.71	14.00	20.40	5.90	0.40	-	0.03	35.50	77.9
Configuração três: Barreira, Dique e Bloco de Impacto									
25-40	0.56	23.80	26.20	7.50	3.50	1.40	16.60	3.55	83.1
45-72	0.49	24.40	25.40	8.00	3.30	1.50	0.52	20.39	84.0
75-150	0.04	24.70	20.90	8.20	3.20	1.40	0.04	33.20	91.7
Legenda: PE, Parede Externa; PV, Parede Vertical; BS, Base; BA, Barreira; DI: Dique; BI: Bloco de Impacto.									

Nota-se que a utilização conjunta da barreira, dique e bloco de impacto (configuração 3) resultou no maior percentual de remoção de inclusões,

possibilitando a eliminação de aproximadamente 80 a 90 % das inclusões presentes na entrada do distribuidor. Curiosamente, ao contrário do esperado, a utilização da barreira e dique sem o bloco de impacto (configuração 2) mostrou uma menor remoção de inclusões em comparação à configuração onde nenhum modificador foi utilizado (configuração 1). Além disso, na configuração 3, que causou a maior eliminação de inclusões, observa-se que o mecanismo de adesão das inclusões às paredes verticais laterais e ao fundo do distribuidor foram os que mais contribuíram para a remoção. O efeito de colisão, que promove um aumento do tamanho médio das inclusões, facilitando a sua flotação, foi mais importante no caso das menores inclusões, com tamanhos na faixa de 25 a 40 μm . No caso das partículas maiores, o efeito de colisão praticamente não afetou a remoção.

Miki e Thomas (1999), utilizando um modelo onde além do efeito de colisões, considerava-se o efeito de reoxidação no distribuidor, examinaram a influência de uma barragem na fração de inclusões removidas para diversos tamanhos de aglomerados de inclusões ("clusters"). A Figura 4 mostra o desenho esquemático do distribuidor e a Tabela 3 as condições de simulação.

A Figura 5 mostra uma comparação da fração removida de aglomerados de inclusões para diversos tamanhos com dados experimentais, apresentando uma aderência excelente. Nota-se novamente que os aglomerados maiores são eliminados em maior quantidade. O efeito simulado da reoxidação reduz significativamente a eficiência da remoção.

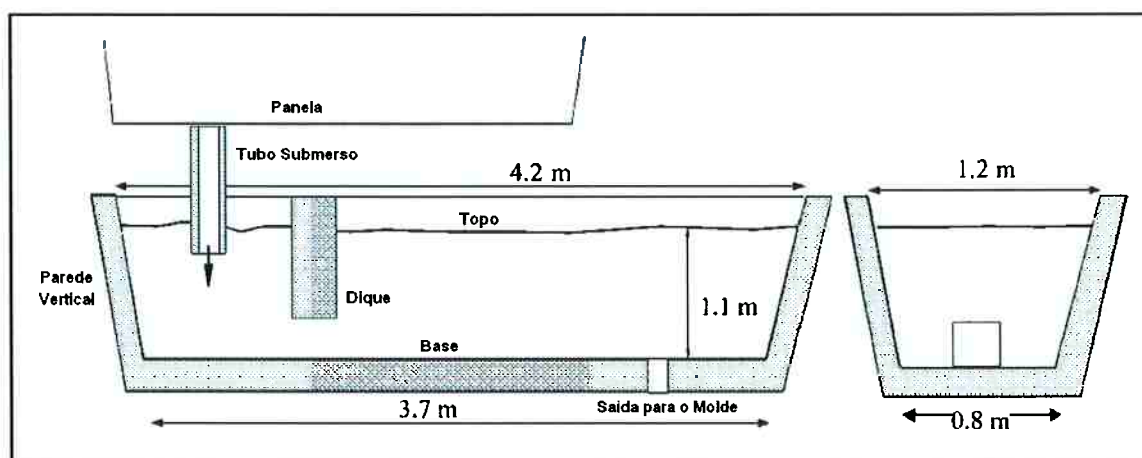


Figura 4: Geometria do distribuidor utilizado na simulação de Miki e Thomas (1999).

Tabela 3: Parâmetros utilizados na simulação (MIKI e THOMAS, 1999).

Massa Armazenada no Distribuidor	30 toneladas
Velocidade de Entrada	0.43 m/s
Vazão Volumétrica	1.7 tonelada/minuto
Tempo Médio de Residência	1060 s
Temperatura do Jato de Entrada	1580°C (1853 K)
Viscosidade	0.0057 kg/ms
Densidade	7000 kg/m ³
Expansividade Térmica	0.00013 K ⁻¹

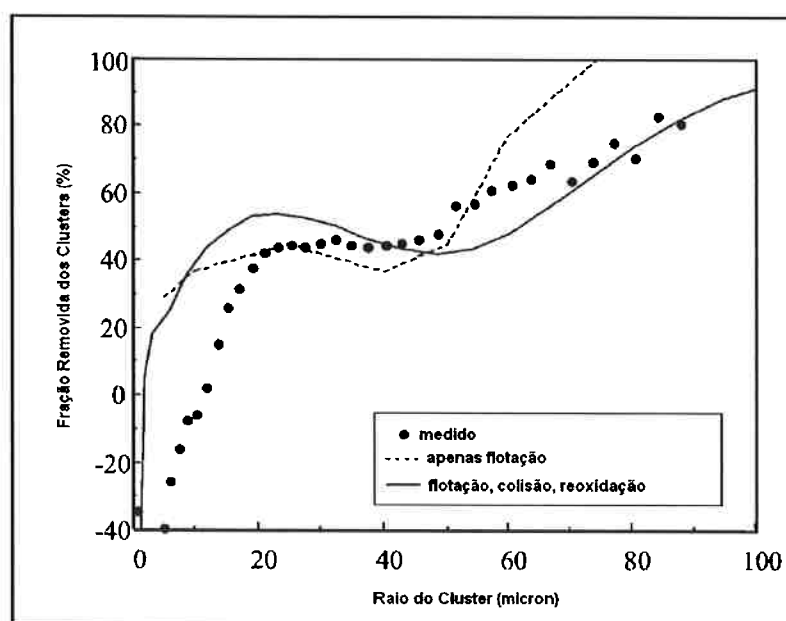


Figura 5: Fração removida de clusters (considerados de alumina) em função do tamanho de partícula (MIKI e THOMAS, 1999).

Também foi analisada a relação entre o posicionamento dos modificadores de fluxo e o residual de inclusões presente para cada tamanho de partícula. A maior proximidade do arranjo barreira/dique em relação ao jato de entrada permite que haja um volume maior de fluxo pistonado ao longo do distribuidor, facilitando o processo de flotação das inclusões. Para partículas com velocidade de Stokes (eq. (2)) entre 1,5 e 4 mm/s a diferença na remoção entre o arranjo sem modificador de fluxo e a configuração mais próxima ao jato de entrada é significativa. Inclusões com 3mm/s de velocidade de subida apresentam uma taxa de residual de aproximadamente 20% com o posicionamento da configuração barreira/dique a 1/3 do comprimento total do distribuidor em relação ao jato de entrada, sendo que para

a mesma velocidade e sem modificadores de fluxo a taxa residual é de 60%. Velocidades abaixo de 1 mm/s, ou seja, partículas de diâmetro pequeno e partículas acima de 5 mm/s para as disposições estudadas não apresentam diferenças consideráveis na taxa de remoção de inclusões.

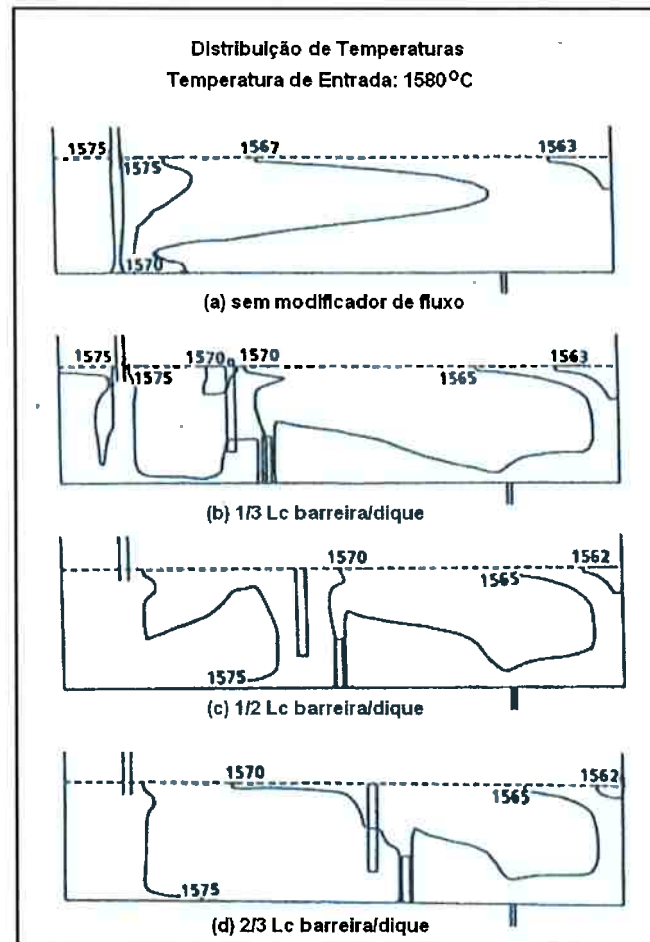


Figura 6: Representação do perfil de temperaturas para condições isotérmicas mostrando a disposição da configuração dique/barreira (JOO e GUTHRIE, 1991).

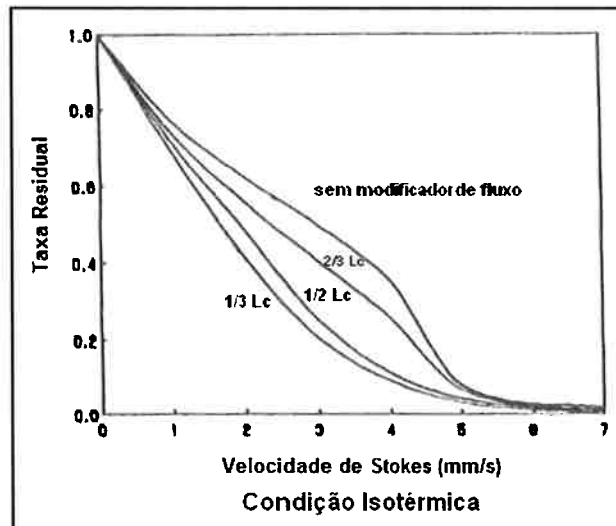


Figura 7: Residual de inclusões em função da velocidade de Stokes. Nota-se que a melhor configuração é aquela em que a configuração barreira/dique está posicionada a 1/3 do comprimento do distribuidor em relação à parede próxima ao jato de entrada (JOO e GUTHRIE, 1991).

3.2 Influência dos Parâmetros de Processo

No item anterior, foi mostrado como os modificadores de escoamento podem auxiliar a remoção de inclusões no distribuidor do lingotamento contínuo. Neste item, os efeitos de duas variáveis de processamento, a saber, a vazão de metal líquido da panela para o distribuidor e a altura de metal líquido no distribuidor.

Na Figura 8 (a) e (b), a taxa residual de inclusões foi definida pela equação dada abaixo:

$$R = \frac{N_{OUT}}{N_{IN}} \quad (1)$$

onde: N_{OUT} é o número de inclusões que saem do distribuidor;

N_{IN} é o número de inclusões que entram no distribuidor.

Esta taxa foi calculada através de um modelo matemático em função da velocidade de flotação das inclusões para diversas vazões de metal e para dois tipos de configuração, sem e com a utilização de modificadores. A velocidade de flotação foi escolhida como uma variável, pois ela indica qual a intensidade da ação do mecanismo de flotação e captura pela camada de escória. Esta velocidade está

diretamente relacionada com o tamanho da inclusão através da lei de Stokes, escrita abaixo:

$$V_s = \frac{g(\rho_f - \rho_p)d_p^2}{18\mu} \quad (2)$$

onde: V_s : velocidade de ascensão ($m s^{-1}$).

g : aceleração gravitacional ($m s^{-2}$).

ρ_f : densidade do fluido ($kg m^{-3}$).

ρ_p : densidade da inclusão ($kg m^{-3}$).

d_p : diâmetro da partícula (m)

μ : viscosidade do fluido ($kg m^{-1} s^{-1}$).

Esta lei é válida quando a região de fluxo laminar, com número de Reynolds menor do que 0,1 (BIRD, STEWART *et al.*, 1960). O número de Reynolds é caracterizado como uma relação entre forças de inércia e forças viscosas:

$$Re = \frac{\rho V_p d_p}{\mu} \quad (3)$$

Quando os modificadores não são utilizados, as menores vazões de metal líquido resultam em um maior tempo de residência médio, definido como Logo, tem-se maior tempo para que as inclusões flitem e sejam incorporadas pela escória. Este efeito é tão mais acentuado quanto maior for a velocidade de flotação, ou seja, o tamanho das inclusões. A eliminação das inclusões menores, que flitam a velocidades abaixo de 1 mm/s praticamente não sofre efeito da vazão. Quando os modificadores são utilizados, a vazão passa a não afetar a eliminação também das inclusões menores, pois agora apesar do tempo de residência médio permanecer constante, o tempo de residência de cada inclusão é praticamente igual, ou seja, aproxima-se da situação do chamado fluxo pistonado. Desta forma, podem-se utilizar vazões maiores, visando uma maior produtividade, sem alterar a eficiência de eliminação de inclusões.

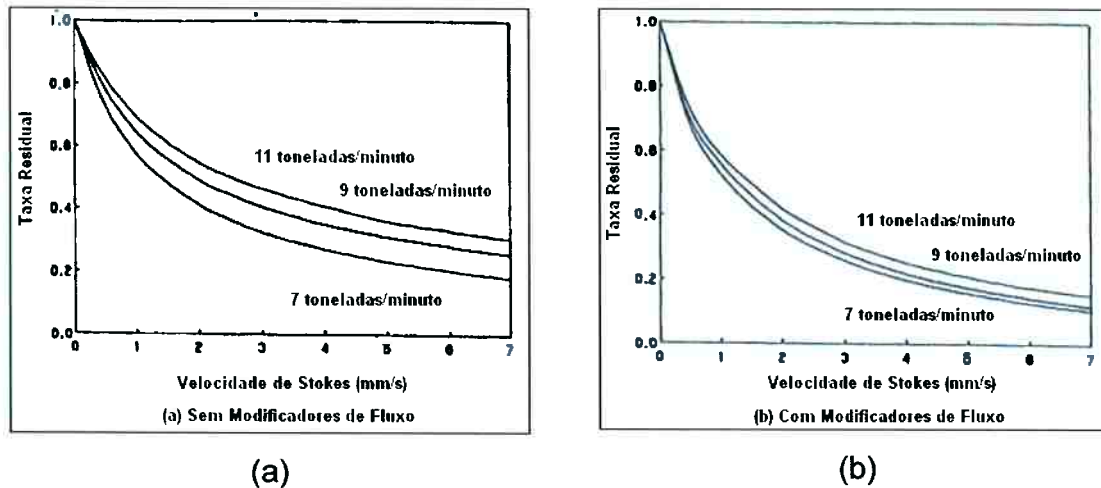


Figura 8: Residual de inclusões em função da velocidade de Stokes da inclusão para três vazões de metal líquido e dois tipos de configuração: (a) sem e (b) com a utilização de modificadores (JOO e GUTHRIE, 1991).

A redução na altura de metal líquido para uma dada vazão promove uma aceleração das partículas na região próxima ao dique, diminuindo o tempo de residência das partículas e não promove melhoras no percentual de remoção de inclusões. A Figura 9 apresenta essa aceleração citada anteriormente, além de uma região de recirculação na parte anterior do dique (DEBROY e SYCHTERZ, 1985).

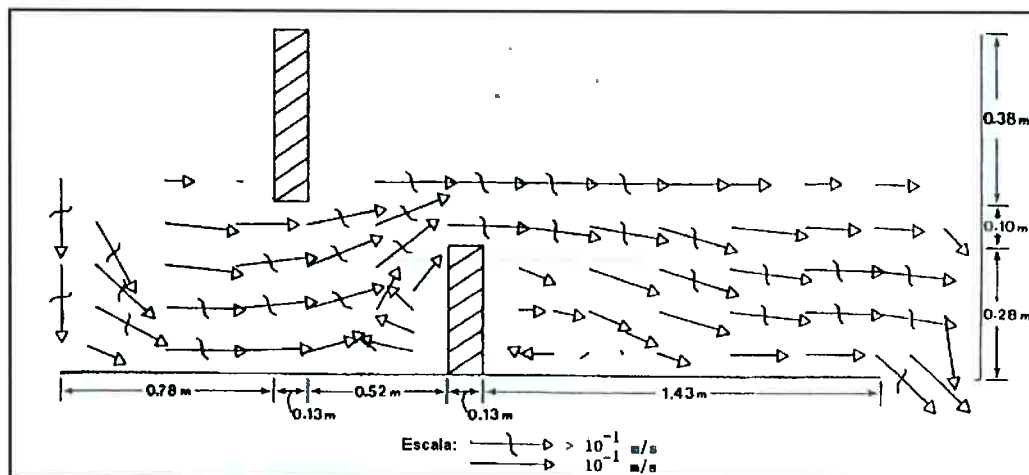


Figura 9: Perfil de velocidades para uma redução de 50% na altura de metal líquido (DEBROY e SYCHTERZ, 1985).

3.3 Influência da Inclinação da Parede

No projeto do distribuidor é importante considerar a inclinação das paredes, pois a sua presença altera significativamente o perfil de velocidades do metal líquido (Figura 10) e conseqüentemente influencia a eficácia na remoção de inclusões. Na Figura 11 observa-se que o aumento do ângulo de inclinação das paredes laterais do distribuidor aumenta a remoção das inclusões. O maior ângulo de inclinação estudado, que foi de 30° , resultou no menor residual de inclusões na saída.

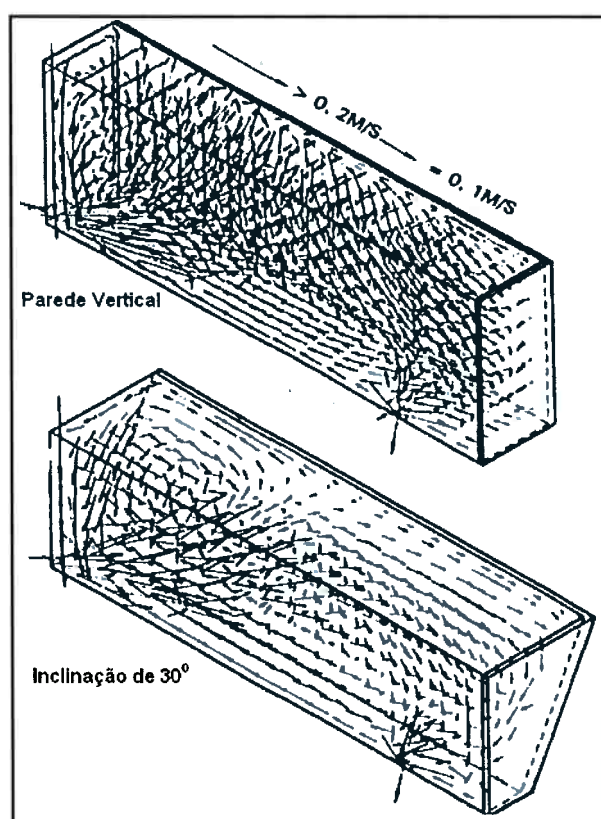


Figura 10: Campos de velocidades calculados para dois tipos de distribuidor: um com paredes verticais e outro com paredes laterais inclinadas de um ângulo de 30° em relação a um plano vertical (HE e SAHAI, 1987).

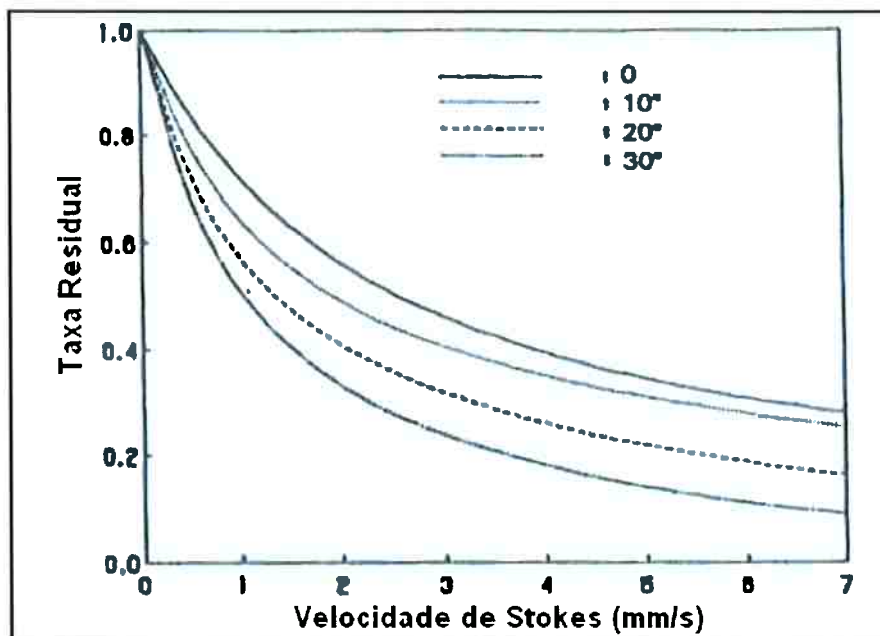


Figura 11: Residual de inclusões em função da velocidade de Stokes para quatro ângulos de inclinação da parede lateral do distribuidor em relação a um plano vertical (HE e SAHAI, 1987).

3.4 Influência dos Inibidores de Turbulência

Atualmente um dos principais equipamentos a serem considerados no projeto de um distribuidor é o inibidor de turbulência. É um equipamento semelhante a uma caixa com diversas possibilidades de configurações internas e sua principal função é diminuir a energia cinética do jato de entrada proveniente da panela, promovendo a sua desaceleração e reorganizando o fluxo de aço líquido. Como consequência de sua geometria, as inclusões podem ser eliminadas das seguintes maneiras:

- **partículas pequenas:** ocorre o aprisionamento das mesmas nas paredes do distribuidor;
- **partículas maiores:** são carregadas com o fluxo ascendente do jato de entrada para a camada de escória superficial.

A geometria de um inibidor altera significativamente como a turbulência distribui-se ao longo do distribuidor e pode alterar a eficiência na flotação de inclusões.

Nájera-Bastida et al. (2007) analisaram a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta no distribuidor em função da geometria dos inibidores, além de comparar com o distribuidor sem nenhum modificador de fluxo.

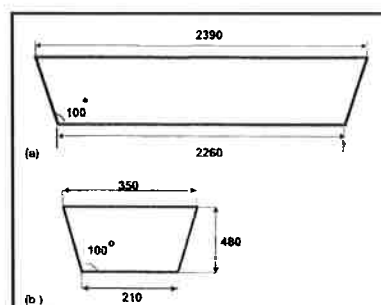


Figura 12: Geometria do distribuidor utilizado. (a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral. Medidas em mm (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007).

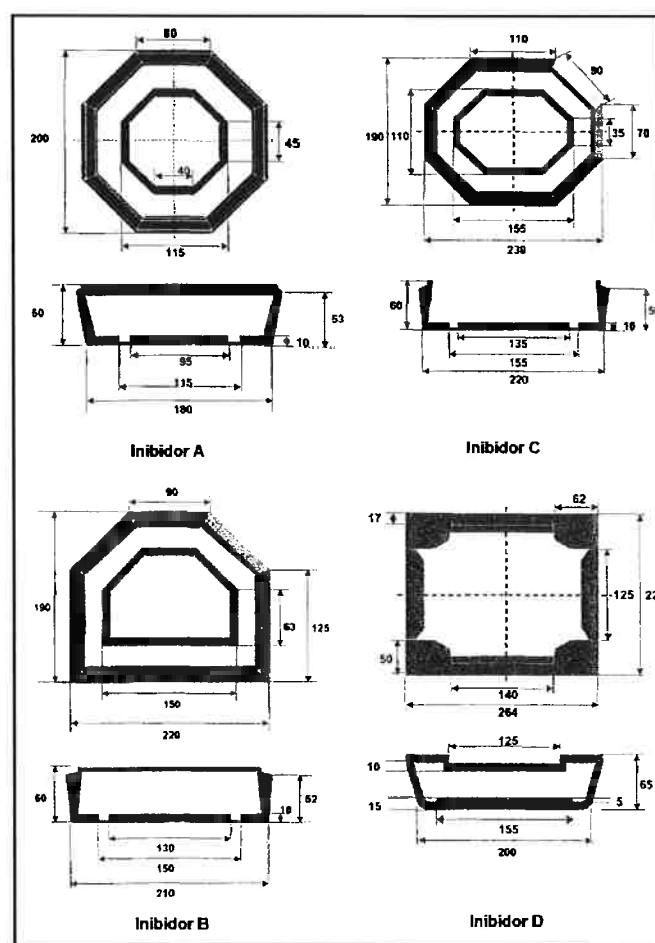


Figura 13: Geometria dos inibidores utilizados. Medidas em mm (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007).

A Figura 13 mostra a geometria dos inibidores testados, podendo-se observar os detalhes internos de cada um. A eficiência dos inibidores será discutida posteriormente.

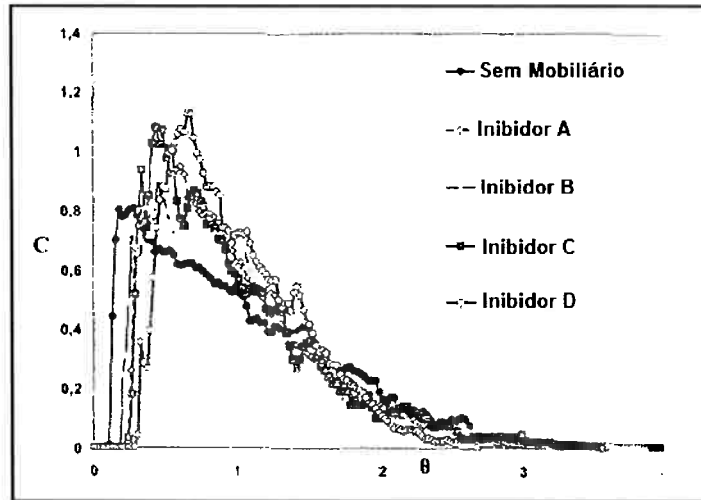


Figura 14: Curvas de tempo de residência para os cinco casos analisados. Concentração adimensional em função do tempo adimensional (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007).

A concentração adimensional é definida por:

$$C = \frac{C_i V}{M} \quad (4)$$

onde C_i é a concentração do traçador (kg/m^3), M é a massa de traçador injetada e V é o volume do distribuidor. O tempo de residência é definido como o tempo médio que uma substância permanece em uma região do espaço, como por exemplo, no distribuidor.

Analisando a Figura 14 é possível notar que o distribuidor sem o inibidor de turbulência apresenta o menor tempo de residência e o menor pico de concentração, revelando grande tendência à mistura do fluido e a grande cauda da curva (menor taxa de decrescimento da concentração em função do tempo) permite deduzir a presença de uma relevante porcentagem de volume morto no distribuidor. Todos os inibidores utilizados melhoraram o fluxo ao longo do distribuidor, aumentando o fluxo pistonado e diminuindo a fração de volume morto. A melhor curva de tempo de residência é observada para o inibidor D (Figura 13), em que é possível notar o maior tempo mínimo de residência, o maior pico de concentração de traçador e menor cauda.

Tabela 4: Características do fluxo a partir das curvas de tempo de residência. $\theta_{\min}$ é o tempo mínimo adimensional em que nota-se a presença do traçador na saída do distribuidor (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007).

Arranjo utilizado	Volume Morto %	Volume Pistonado %	Volume Misturado %	$\theta_{\min}$
Sem inibidor	8.63	12.7	78.67	0.1016
Inibidor A	6.47	27.5	66.03	0.2368
Inibidor B	6.36	24.5	69.14	0.2043
Inibidor C	7.75	23.3	68.95	0.2413
Inibidor D	2.71	41.7	55.59	0.3074

A Tabela 4 resume os resultados apresentados nas curvas de tempo de residência para as configurações utilizadas. O inibidor D promove a maior porcentagem de fluxo pistonado e menores valores de volume morto e misturado, fatores esses que permitem que a flotação ocorra com maior eficiência.

Nájera-Bastida et al (2007) realizaram um experimento interessante, que consistiu em simular experimentalmente a presença de escória no distribuidor através de uma camada de óleo (silicone), uma vez que o líquido circulante era água. Observou-se que apenas o inibidor D manteve a camada de óleo sempre cobrindo o fluxo de água. A abertura da camada de óleo é explicada, segundo os autores, devido ao surgimento de tensões de deformação na interface água-óleo associada com a taxa de dissipação da energia cinética. Assim o uso dos outros inibidores (A, B e C) é limitado para altas vazões de fluido.

Portanto o inibidor D, comparativamente às outras configurações, apresenta os seguintes aprimoramentos ao fluxo no distribuidor, recomendando a sua utilização (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007):

- Maior tempo de residência mínimo do traçador, que propicia que as inclusões possuam maior probabilidade de flotação;
- Maior porcentagem em volume no distribuidor de fluxo pistonado (vide Tabela 4);
- Maior gradiente da taxa de dissipação da energia cinética da base do distribuidor até a superfície livre do banho, dissipando energia mais rapidamente nos locais que são mais próximos da base do que os outros inibidores (Figura 15);

- Mantêm o banho coberto pela camada de escória para vazões volumétricas maiores do que os outros inibidores testados, evitando assim a reoxidação da superfície do aço líquido em uma situação industrial.

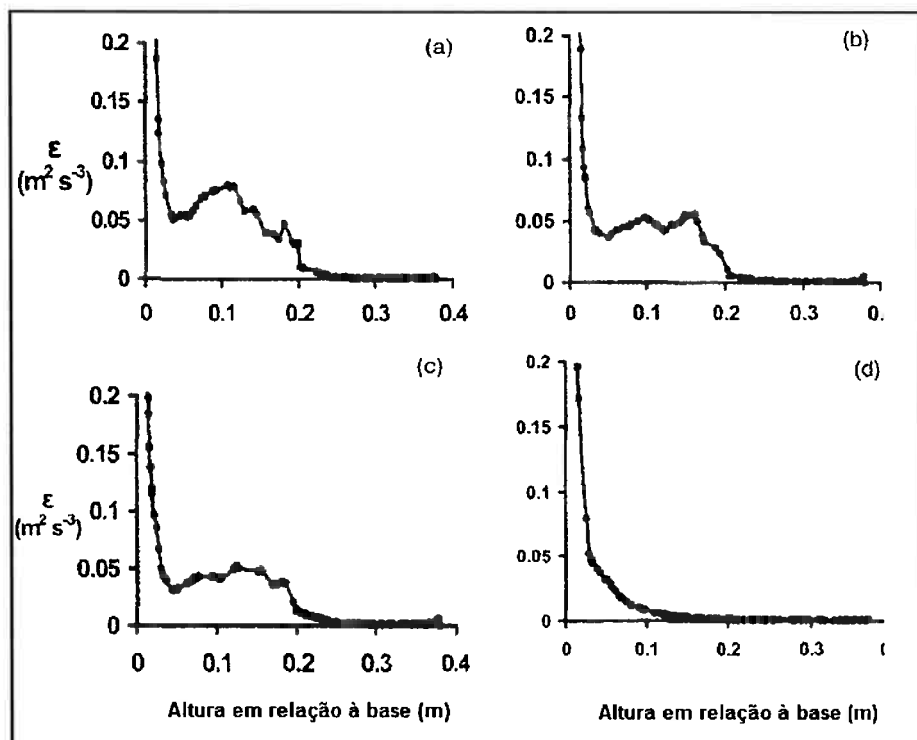


Figura 15: Gradientes da taxa de dissipação da energia cinética da base do distribuidor até a superfície livre. (a) Inibidor A. (b) Inibidor B. (c) Inibidor C. (d) Inibidor D (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007).

A associação de inibidores de turbulência com outros modificadores de fluxo (blocos de impacto e diques) no perfil de temperaturas e de velocidades em um distribuidor foi analisada em um artigo por Aguilar-Corona *et al.* (2003). A estratificação térmica, ou seja, o gradiente de temperaturas para pontos diferentes no distribuidor provoca o surgimento de forças de convecção natural no fluido. A variação de densidade do fluido adiciona um termo à força peso e muda o escoamento do material comparativamente ao estado estacionário, podendo influenciar na remoção das inclusões. A Figura 16 compara o efeito da convecção térmica na remoção de inclusões, revelando que para tamanho de partículas menores que 20 μm é relevante considerar a convecção no modelamento matemático (MIKI e THOMAS, 1999):

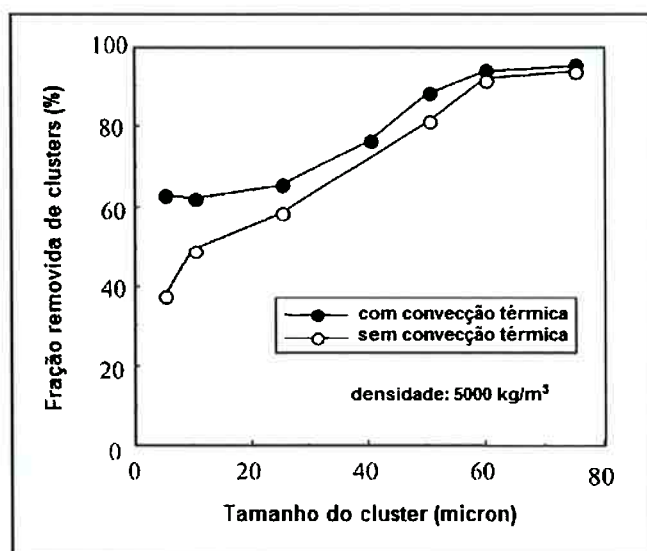


Figura 16: Efeito da convecção térmica na remoção de inclusões (MIKI e THOMAS, 1999).

No artigo de Aguilar-Corona et al. (2003) foram analisadas duas combinações de modificadores de fluxo: o arranjo (a) consiste na utilização de dois blocos de impacto; o arranjo (b) é formado por um inibidor de turbulência e dois diques.

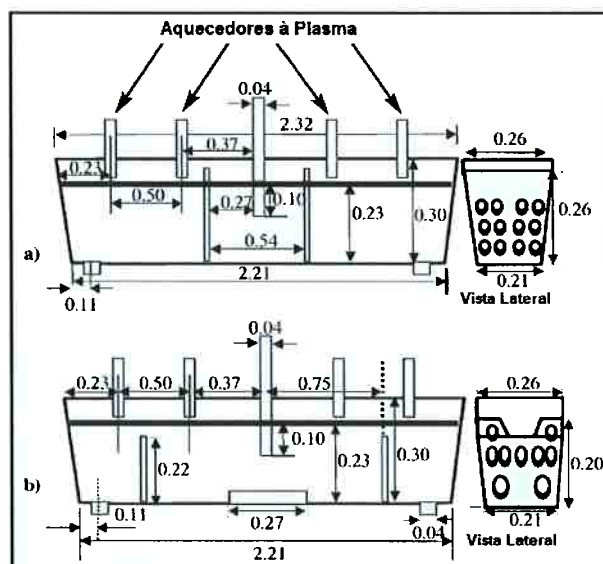


Figura 17: Dimensões do distribuidor (m) experimental desenvolvido. (a) dois blocos de impacto. (b) inibidor de turbulência e diques (AGUILAR-CORONA, MORALES *et al.*, 2003)

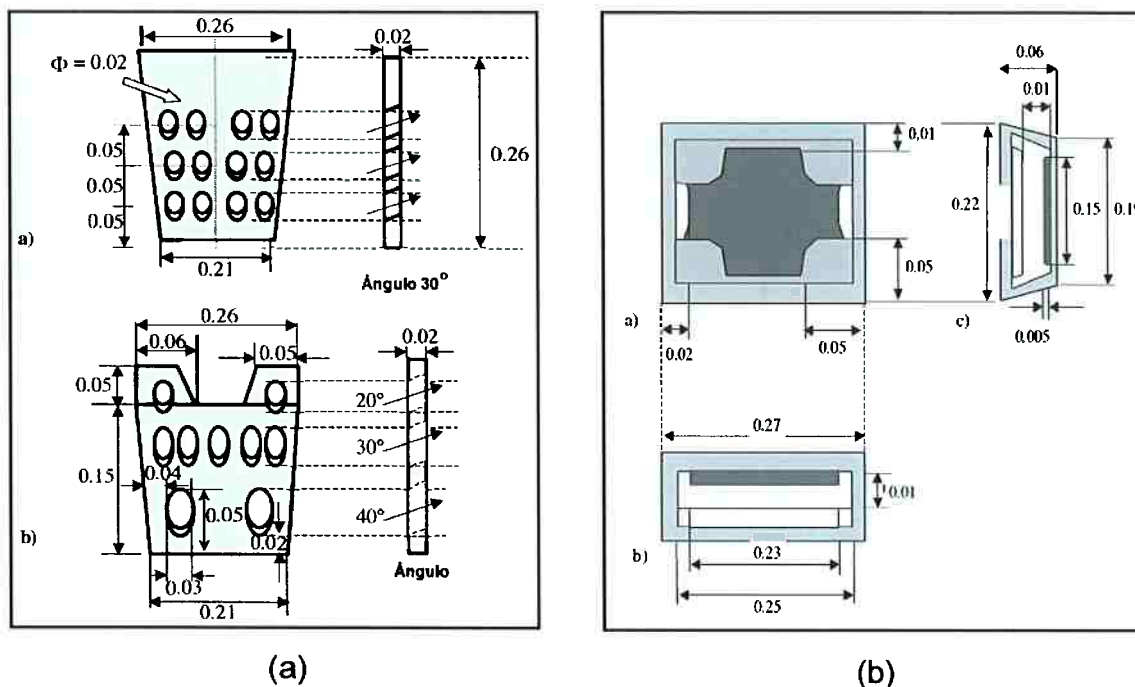


Figura 18: a) Dimensões (m) do bloco de impacto e dique utilizados. b) Dimensões do inibidor de turbulência (visões superior, frontal e lateral) (AGUILAR-CORONA, MORALES *et al.*, 2003).

As curvas de tempo de residência foram obtidas para os dois arranjos descritos anteriormente:

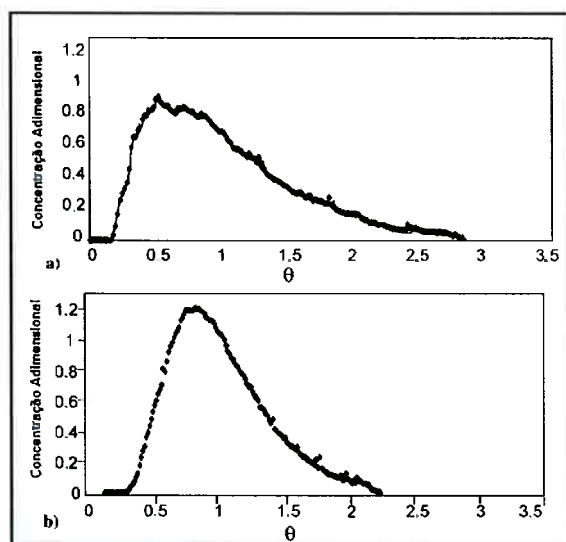


Figura 19: Curvas de tempo de residência para uma vazão de 3,8 ton/min para os arranjos (a) e (b) (AGUILAR-CORONA, MORALES *et al.*, 2003).

A análise da Figura 19 revela que a curva para o arranjo (b) apresenta maior porcentagem de fluxo pistonado, em que a remoção de inclusões é mais favorável

do que em outros tipos de fluxo. É importante ressaltar que esses resultados foram obtidos para condições próximas da isotérmica, em que para altas vazões as forças de inércia possuem a mesma ordem de grandeza do que as forças de convecção térmica quando a diferença de temperaturas ao longo do distribuidor está próxima de 9,5 °C. Nessa situação ambos os sistemas apresentam comportamento térmico semelhante.

Aguilar-Corona et al. (2003) estimaram a força de convecção em função do tempo adimensional definido pela eq. (5), sendo definida por:

$$F_b = \rho_{ref} \beta \Delta T g_i \quad (5)$$

onde β é o coeficiente de expansão térmica do fluido e ΔT é a diferença de temperaturas entre a entrada e qualquer ponto no distribuidor. Derivando em função de θ obtemos a seguinte equação:

$$\frac{dF_b}{d\theta} = \frac{\rho_{ref} \nu^2}{L} \frac{d(Bu)}{d\theta} \quad (6)$$

onde ν é a velocidade média do fluido em uma seção do distribuidor, L é o comprimento característico do sistema (p.ex. altura) e $Bu = \frac{Gr}{Re^2}$, sendo Gr o número de Grashof e Re o número de Reynolds.

A partir da eq.(6) é possível deduzir uma curva de tempo de residência “térmica”, em que a força de convecção é determinada em função do tempo adimensional.

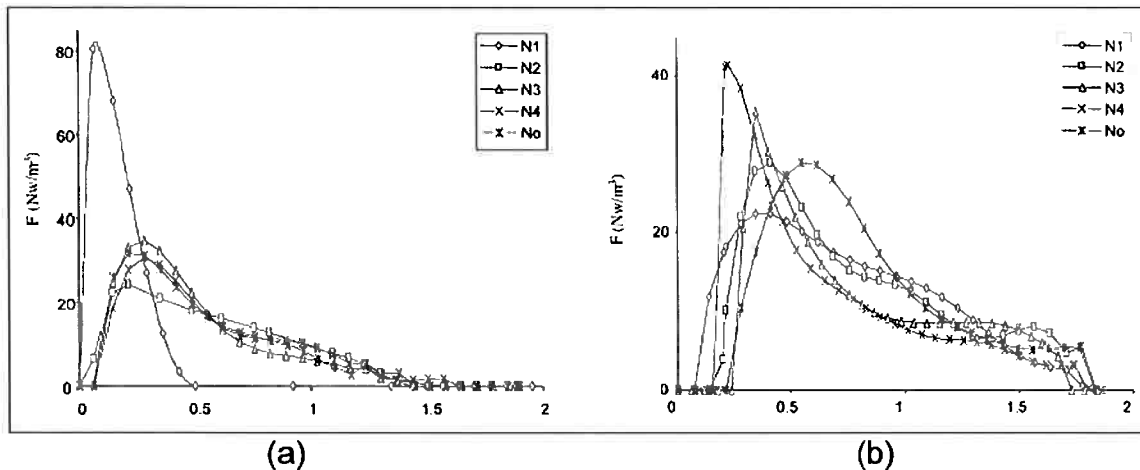


Figura 20: Força de convecção térmica em função do tempo adimensional. (a) Arranjo com dois blocos de impacto. (b) Arranjo com inibidor de turbulência e dois diques. As diversas curvas existentes em cada gráfico são medições em alguns pontos do distribuidor (AGUILAR-CORONA, MORALES *et al.*, 2003).

A Figura 20 revela que no arranjo (b) as forças de convecção permanecem para tempos maiores do que para o arranjo (a), devido essencialmente ao fato que o inibidor de turbulência promove a ascensão do líquido para a superfície, aumentando as forças de convecção. Como também é possível observar na Figura 20 as forças de convecção apresentam maiores valores para tempos baixos no arranjo (a), embora a duração das mesmas seja menor do que em (b).

As conclusões que podem ser retiradas sobre a influência dos modificadores de fluxo e a estratificação térmica no distribuidor são as seguintes:

- O arranjo (b), constituído de um inibidor de turbulência e dois diques, permite um maior volume de fluido em fluxo pistonado, além de diminuir a turbulência do jato de entrada próxima ao inibidor, fatores esse que são benéficos na remoção das inclusões;
- Os efeitos advindos da convecção térmica são mantidos por maiores tempos no arranjo (b) do que no arranjo (a). Conforme observado na Figura 16 a convecção térmica é significativa para a remoção de partículas pequenas, abaixo de 20 μm . Logo no desenvolvimento do projeto é possível considerar no modelamento a geometria dos modificadores apresentados na Figura 18.

4 METODOLOGIA

A modelagem matemática do escoamento do metal líquido no distribuidor foi realizada através da solução numérica das equações diferenciais de balanço de massa, quantidade de movimento e energia. Em conjunto às equações citadas, utilizou-se um modelo para a turbulência existente no distribuidor. Este equacionamento, a metodologia de resolução e as formas de análise dos resultados estão mostrados a seguir.

4.1 Equações de Conservação

As equações que governam o escoamento de um fluido são representações matemáticas das leis de conservação advindas da física:

- A massa de um dado sistema é conservada (não há criação nem perda espontânea de matéria);
- A taxa de variação da quantidade de movimento com o tempo é igual à soma das forças agindo em uma partícula de fluido (Segunda Lei de Newton);
- A taxa de variação da energia com o tempo é igual à soma da energia recebida na forma de calor, por unidade de tempo, e da potência das forças externas (Primeira Lei da Termodinâmica).

A presença de um regime turbulento no distribuidor gera uma série de dificuldades na solução analítica das equações diferenciais. No regime laminar, se as condições de contorno não se alterarem em função do tempo, a velocidade de escoamento em um ponto é constante. Já no regime turbulento existe a flutuação da velocidade em torno de um ponto médio, tornando o problema transiente e dificultando a solução numérica das equações diferenciais de conservação.

Uma maneira de descrever esse fenômeno é decompor o valor da propriedade do fluido como a soma de uma componente média e uma componente variável. Assim as equações diferenciais de conservação ficam em função dos valores médios das propriedades e a turbulência pode ser incorporada em função da complexidade do modelo de turbulência adotado.

A Figura 21 mostra o perfil de velocidades em um ponto para um regime turbulento. Pode-se observar a variação da componente da velocidade no eixo x em torno de um valor médio em função do tempo.

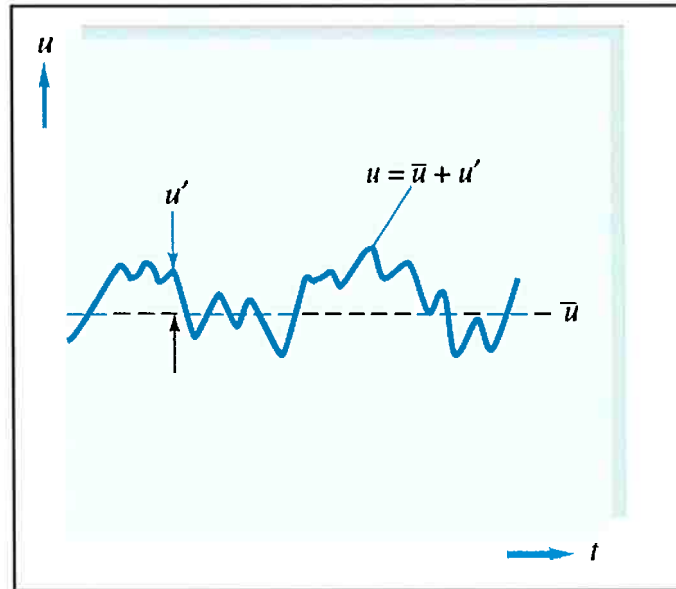


Figura 21: Variação da componente da velocidade no escoamento turbulento (WHITE, 2003).

4.2 Hipóteses Utilizadas no Modelo Matemático

As seguintes hipóteses são adotadas para o modelo matemático:

a) Fluidodinâmica do Distribuidor

- i. Escoamento incompressível, tridimensional e turbulento;
- ii. Regime estacionário para o escoamento. A diferença entre o estado transiente e o estacionário para a remoção de inclusões é pequena, como mostrado por Miki e Thomas (MIKI e THOMAS, 1999);
- iii. Presença de uma camada fina de escória sobre o metal líquido, entretanto não afeta o escoamento do metal líquido no distribuidor.

b) Transferência de calor no distribuidor

- i. O transporte de calor no metal líquido por condução, convecção forçada (jatos de entrada e saída) e natural induzida por gradientes de temperatura são considerados;
- ii. O transporte de calor por condução através das paredes internas e externas do distribuidor é considerado;
- iii. Regime estacionário de transferência de calor no metal e nas paredes do distribuidor.

c) Dinâmica das Inclusões

- i. A aceleração e velocidade das inclusões no metal líquido são calculadas considerando as forças peso, de arraste viscoso e de forma e de empuxo;
- ii. Inclusões são assumidas esféricas e de alumina para o cálculo da velocidade de flotação;
- iii. O efeito do movimento das inclusões no escoamento do metal líquido é desprezível;
- iv. Quando as inclusões entram em contato com a camada de escória, são retiradas do metal líquido (incorporação à escória), não voltando novamente ao metal líquido;
- v. A colisão, o coalescimento e a formação de aglomerados de inclusões são desprezados;
- vi. A aderência de inclusões às paredes sólidas do distribuidor é desprezada;
- vii. A geração de inclusões no distribuidor devido à erosão e/ou reação com o distribuidor ou reoxidação é desprezada.

4.3 Modelagem da Fluidodinâmica do Distribuidor

As equações de conservação considerando o caráter flutuante das propriedades do escoamento do fluido estão mostradas a seguir. Note que o regime estacionário foi assumido para o escoamento e a transferência de calor, porém o regime transiente foi considerado para modelar a movimentação das partículas de inclusão e o transporte de traçador.

a) Equação da Continuidade¹:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

onde: $\bar{u}_i$: velocidade média ($m s^{-1}$).

x_i : coordenada espacial (m).

b) Equação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + \alpha (T_0 - \bar{T}) \rho_0 g_i \quad (8)$$

onde: $\bar{P}$: pressão média em um dado intervalo de tempo ($kg m^{-1} s^{-2}$).

μ_{eff} : viscosidade efetiva ($\mu_{eff} = \mu + \mu_t$).

μ : viscosidade molecular ($kg m^{-1} s^{-1}$)

μ_t : viscosidade turbulenta da aproximação de Boussinesq ($kg m^{-1} s^{-1}$)

α : coeficiente de expansão volumétrica térmica (K^{-1}).

T_0 : Temperatura de referência (K).

$\bar{T}$: Temperatura média (K).

ρ_0 : densidade do material na temperatura de referência T_0 ($kg m^{-3}$).

g_i : aceleração gravitacional ($m s^{-2}$).

A eq.(8) é deduzida a partir da equação de Navier-Stokes, considerando os valores médios das velocidades nas três direções ortogonais. Foram incorporadas a essa equação o modelo de viscosidade turbulenta e a aproximação de Boussinesq para considerar o efeito da convecção natural induzida por gradientes de temperatura. A aproximação de Boussinesq é utilizada quando a variação da densidade do fluido é pequena ao longo do domínio de controle e aproxima linearmente a força de campo gravitacional em função de sua expansividade térmica e da diferença de temperatura em relação a uma temperatura de referência.

¹ A notação da somatória está sendo utilizada, ou seja, a presença de índices repetidos implica na somatória ao longo dos valores do índice.

c) Equação da Conservação de Energia:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\kappa_{eff}}{c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$\kappa_{eff} = \kappa + \kappa_T \quad \frac{\kappa_{eff}}{c_p} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T}$$

onde: κ_{eff} : condutividade térmica efetiva ($W m^{-1} K^{-1}$).

κ : condutividade térmica molecular ($W m^{-1} K^{-1}$).

κ_T : condutividade térmica turbulenta ($W m^{-1} K^{-1}$).

c_p : capacidade térmica do metal líquido ($J kg^{-1} K^{-1}$).

Pr : número de Prandtl molecular.

Pr_T : número de Prandtl turbulento.

d) Modelo k-ε de Turbulência

O modelo k-ε de turbulência é utilizado para o cálculo da viscosidade turbulenta (μ_t) e consiste de duas equações principais, uma para a energia cinética turbulenta e outra para a taxa de dissipação da energia turbulenta. Estas equações estão indicadas a seguir.

• **Equação da Energia Cinética Turbulenta:**

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_0 \bar{u}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{2} \sum u_i'^2 \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

onde: u_i' : velocidade flutuante ($m s^{-1}$).

k : energia cinética turbulenta ($m^2 s^{-2}$).

σ_k : constante do modelo $k - \varepsilon$ $\sigma_k = 1,0$.

ε : taxa de dissipação da energia cinética turbulenta em função do tempo ($m^2 s^{-3}$).

- **Equação da Dissipação da Energia Cinética Turbulenta:**

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

onde: $\sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$: constantes do modelo $k - \varepsilon$. $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

4.4 Modelagem para a Dinâmica das Inclusões

A trajetória das inclusões foi calculada usando um método lagrangeano, que resolve uma equação de transporte para cada inclusão que escoar através do campo de velocidades previamente calculado para o líquido. Os componentes de velocidade local e instantânea da inclusão necessários para obter o caminho da partícula são obtidos através de um balanço de forças. Este balanço iguala a força de inércia com as forças de arrasto e empuxo:

$$\frac{d\bar{u}_{p,i}}{dt} = F_D(\bar{u}_i - \bar{u}_{p,i}) + g_i \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (12)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{24\rho_p d_p^2} \quad \text{com } C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + 0,15 \text{Re}^{0,687} \right) \text{ e } \text{Re}_p = \frac{(\bar{u}_i - \bar{u}_{p,i})d_p\rho}{\mu}$$

onde: $\bar{u}_{p,i}$: velocidade média da inclusão (m s^{-1}).

d_p : diâmetro da inclusão (m).

ρ_p : densidade da inclusão (kg m^{-3}).

F_D : força de arrasto sobre a inclusão (N).

C_D : coeficiente de arrasto.

Re_p : número de Reynolds da inclusão.

4.5 Modelagem para a Dispersão de Traçadores

A equação para o balanço de massa de traçador, considerado como um elemento químico, é dada a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{eff} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

onde: C : fração em massa do traçador.

D_{eff} : difusividade efetiva $D_{eff} = D + D_T$, ou seja, soma da difusividade molecular e a difusividade turbulenta ($m^2 s^{-1}$).

D : difusividade molecular ($m^2 s^{-1}$).

D_T : difusividade turbulenta $\left(D_T = \frac{\mu_T}{Pr_T} \right)$ ($m^2 s^{-1}$).

4.6 Cálculo do Tempo de Residência no Distribuidor

A idéia básica de estudar a distribuição de tempo de residência é de caracterizar e modelar sistemas não ideais e diagnosticar problemas como zonas mortas e curto-circuito.

A quantidade $E(t)$ é denominada função do tempo de residência e descreve de forma quantitativa o tempo despendido por diferentes elementos de fluido para atravessar o tanque. A quantidade $E(t)dt$ é a fração de fluido que permanece dentro do sistema, ou seja, demora para atravessar o reator, em um tempo entre t e $t+dt$.

É possível obter esta função a partir de testes experimentais ou simulação numérica. Em ambos os casos um traçador é injetado na forma de um pulso na entrada do tanque e sua concentração é detectada na saída do tanque. A partir dos dados de concentração do traçador na saída do reator em função do tempo, calcula-se:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt} \quad (14)$$

A integral no denominador é a área sob a curva do tempo de residência. Definido desta forma, $\int_0^\infty E(t)dt = 1$ e, a fração de material que permaneceu entre os tempos t_1 e t_2 no interior do reator é $\int_{t_1}^{t_2} E(t)dt$.

A Figura 22 mostra esquematicamente a curva de tempo de residência:

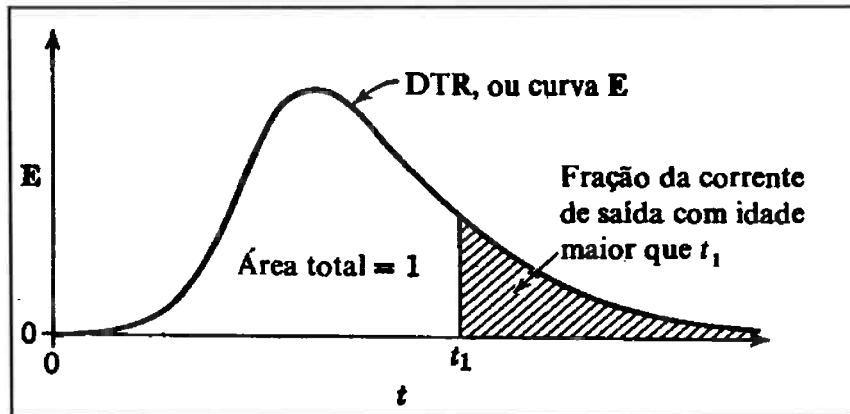


Figura 22: Curva E(t) da distribuição do tempo de residência (LEVENSPIEL, 2000)

O tempo médio de residência é dado pela integração da curva acima e é dada pela seguinte equação:

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (15)$$

Definindo o tempo adimensional, que nada mais é que a relação entre o tempo e o tempo médio de residência, podemos normalizar a curva de tempo de residência e comparar distribuidores com dimensões diferentes. O tempo adimensional é definido então:

$$\Theta = \frac{t}{t_m} \quad (16)$$

4.6.1 Estudo do Escoamento Não-Ideal

O distribuidor é um exemplo de tanque não-ideal e através da análise da curva de distribuição de tempo de residência é possível identificar os problemas de escoamento presentes. O volume total do tanque pode ser dividido em três regiões:

- i. **Volume Pistonado:** Neste volume não ocorre mistura longitudinal e cada elemento de fluido possui o mesmo tempo de residência. Para o distribuidor a maximização deste escoamento é importante, pois aumenta o tempo médio de residência e o tempo de contato das inclusões na camada de escória.

- ii. **Volume de Mistura:** A mistura no tanque é a máxima possível e a concentração dos componentes é a mesma.
- iii. **Volume Morto:** Nesta região do tanque o fluido possui baixa velocidade e pode ser identificado pela curva de distribuição de tempo de residência como a fração de fluido que permanece no tanque por um tempo superior a $2 t_m$, ou seja, $\Theta > 2$.

Considera-se que o escoamento pistonado e o de mistura constituem o volume ativo do tanque e para aumentar a eficiência do distribuidor é necessário diminuir o seu volume morto, onde a probabilidade das inclusões serem removidas para a camada de escória é baixa. Como o tempo de residência médio, definido pela relação entre o volume e a vazão volumétrica, é constante, o fluido que se encontra nesta região, permanece no distribuidor um tempo maior e, portanto, a outra parte do fluido irá permanecer um tempo menor, e, como consequência, nesta porção de fluido há menos tempo para separar as inclusões.

A Figura 23 mostra a resposta para um pulso de traçador para o escoamento pistonado e de mistura, além da combinação dos dois. No escoamento pistonado ideal, a curva de tempo de residência é o próprio pulso deslocado no tempo V_p/V , em que V_p é o volume em fluxo pistonado e V é o volume total do tanque. Já para o escoamento de mistura completa ideal, a curva é um decaimento exponencial cuja função é dada por $E(\Theta) = \exp(-\Theta)$.

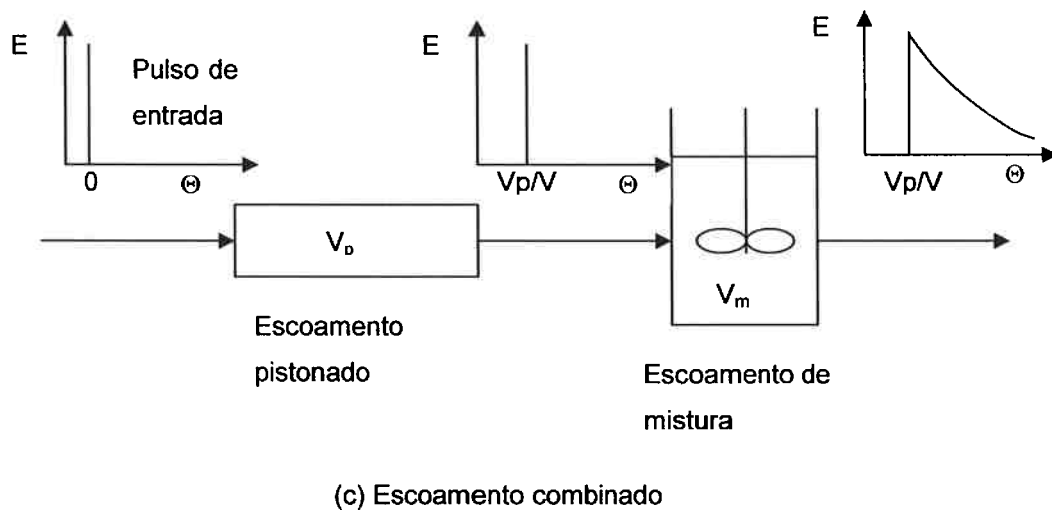
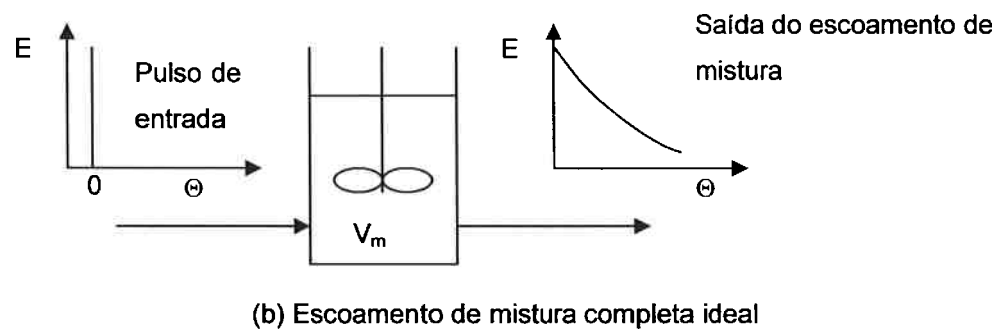
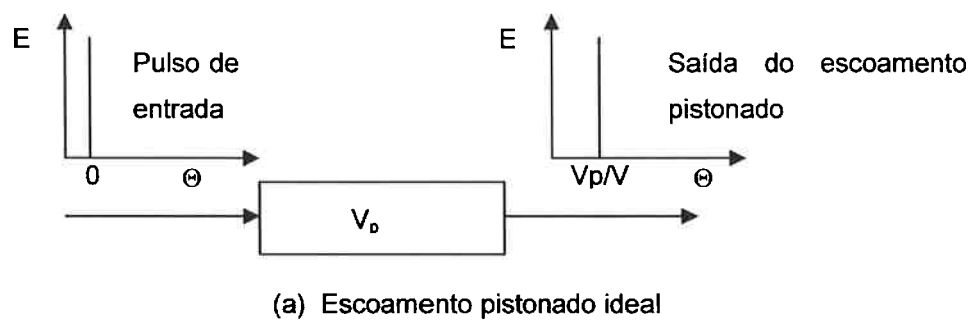


Figura 23: Respostas ao pulso de entrada (LEVENSPIEL, 2000). (a) escoamento pistonado ideal; (b) escoamento de mistura completa ideal; (c) escoamento combinado.

A Figura 24 apresenta uma curva real de resposta para o distribuidor. O tempo de residência médio, Θ_c , que leva em conta o volume ativo é dado pelas equações abaixo (SAHAL e EMI, 1996):

$$\Theta_c = \frac{t_c}{t_m} = \frac{V_a / Q_a}{V / Q} = \frac{V_a}{V} \cdot \frac{Q}{Q_a} \quad (17)$$

$$\frac{V_a}{V} = \frac{Q_a}{Q} * \Theta_c \quad (18)$$

$$\frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} * \Theta_c \quad (19)$$

onde: V_a = volume da região ativa (m^3).

V_d = volume morto (m^3).

V = volume total (m^3).

Q_a = vazão volumétrica do fluido na região ativa (m^3/s).

Q = vazão volumétrica do fluido em todo o volume do distribuidor (m^3/s).

t_m = tempo de residência médio (s).

t_c = tempo calculado até duas vezes o tempo de residência t_m (s).

Θ_c = tempo adimensional, t_c/t_m .

O termo Q_a/Q representa a vazão volumétrica média na região ativa. Na presença de volume morto, o tempo de residência Θ_c , é menor que 1.

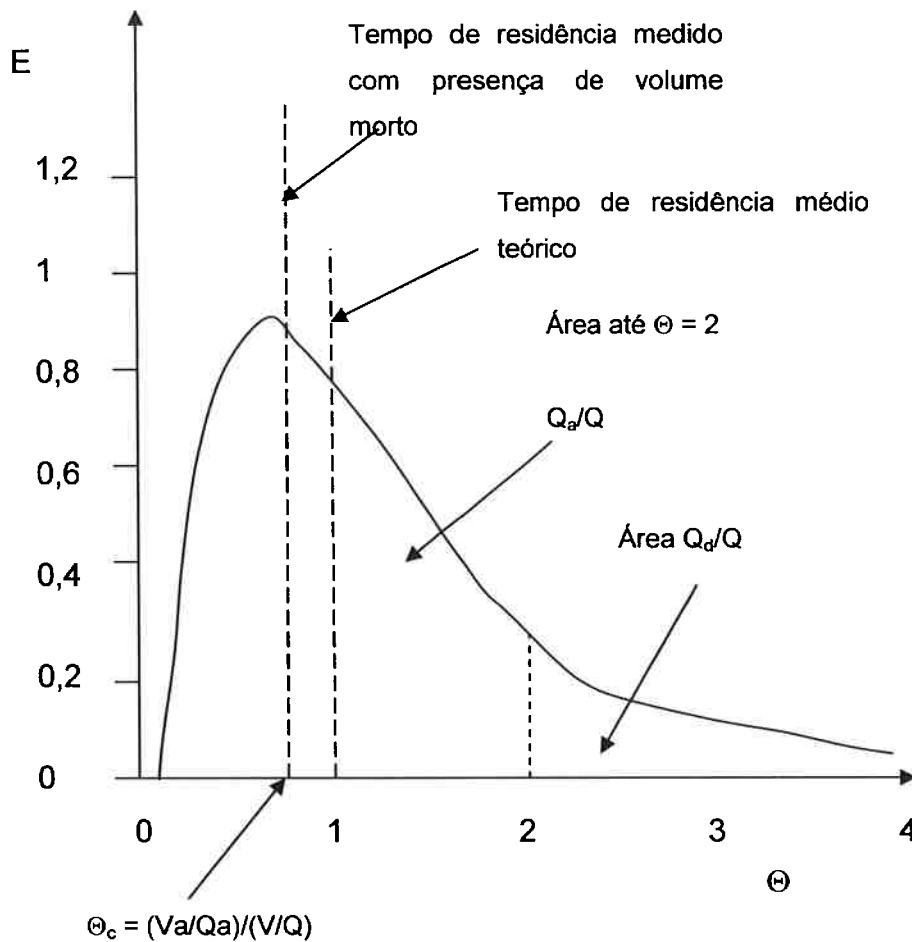


Figura 24: Curva de tempo de residência típica em um distribuidor (SAHAL e EMI, 1996).

Outro problema que pode surgir no distribuidor é o curto-circuito. Neste caso, uma parte do fluido que entra no distribuidor sai num tempo bem menor que o tempo de residência médio e conseqüentemente as inclusões não tem tempo de serem removidas para a camada de escória. A Figura 25 mostra uma curva típica de escoamento na presença de curto-circuito.

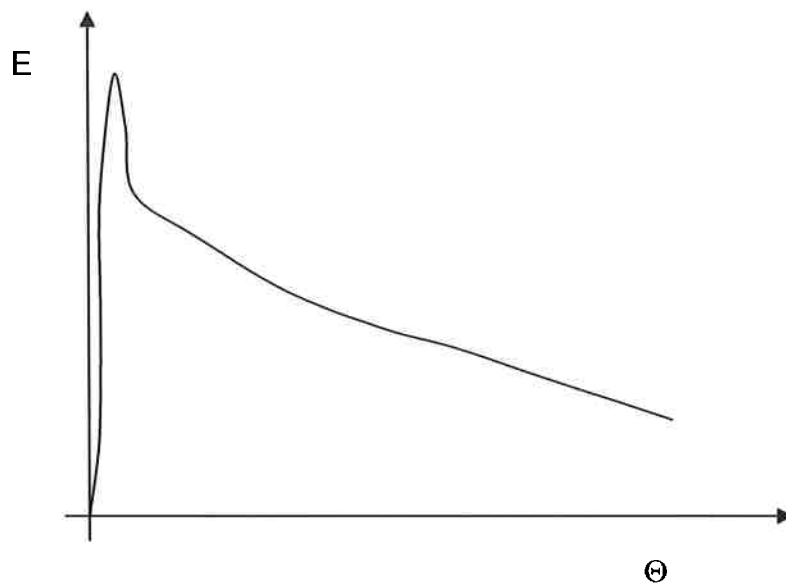


Figura 25: Curva de escoamento em curto-circuito (LEVENSPIEL, 2000).

Portanto na construção de um distribuidor eficiente devemos ter as seguintes características (PALAFOX-RAMOS, BARRETO *et al.*, 2001).

- i. Maior porcentagem de volume em escoamento pistonado;
- i. Menor porcentagem de volume morto;
- ii. Ausência de curto-circuito.

4.7 Resolução das Equações Diferenciais

As equações diferenciais definidas anteriormente para descrever a fluidodinâmica do metal líquido no distribuidor foram solucionadas através do software comercial ANSYS CFX 11.0, de propriedade da ANSYS Inc. O método dos volumes finitos (MVF) é empregado neste software para discretização das equações de conservação no domínio computacional e consiste nas seguintes etapas:

- O domínio computacional é subdividido em uma malha de volumes de controle ou volumes finitos;
- As equações diferenciais são integradas ao longo de todos os volumes de controle do domínio computacional, sendo equivalente a aplicar as equações de conservação para cada volume de controle;

- A integração das equações gera um sistema de equações algébricas através das aproximações realizadas nos termos constituintes das equações integradas;
- As equações algébricas são resolvidas iterativamente.

Métodos iterativos são utilizados devido à não-linearidade das equações envolvidas. A medida da convergência da solução do problema é definida através do resíduo. O sistema de equações pode ser escrito na forma matricial da seguinte forma.

$$[A][\phi] = [b] \quad (20)$$

onde: $[A]$: matriz de coeficientes do sistema linear.

$[\phi]$: vetor solução do problema.

$[b]$: vetor de coeficientes advindos da discretização.

O sistema é resolvido iterativamente a partir de uma solução inicial e o resíduo na n-ésima iteração é definido a seguir.

$$r^n = [b] - [A][\phi]^n \quad (21)$$

4.8 Geometria do Distribuidor e do Inibidor de Turbulência

Para analisar a influência dos inibidores de turbulência foi escolhido um distribuidor retangular com apenas um veio de saída. As dimensões do distribuidor estão definidas na Figura 26. A Tabela 5 foi utilizada como referência para a construção do distribuidor e as dimensões e parâmetros finais estão descritos na Tabela 6. As propriedades do aço da Tabela 7 foram baseadas no artigo de (LOPEZ-RAMIREZ, BARRETO *et al.*, 2001).

Tabela 5: Parâmetros utilizados na construção do distribuidor utilizado no modelamento matemático (DE KOCK, CRAIG *et al.*, 2003).

Parâmetros	Distribuidores utilizados Industrialmente	Distribuidor utilizado no Modelamento
L, m	3.0 – 8.0	4.0
W/L	0.10 -0.30	0.25
H/L	0.10 – 0.30	0.20
$L_{saída}/L$	0.68 – 0.92	0.90
$H_{submerso}/H$	0.08 – 0.62	0.40
Vazão Volumétrica ($m^3 s^{-1}$)	$1.18 \times 10^{-4} - 2.8 \times 10^{-2}$	6.87×10^{-3}

Tabela 6: Dimensões finais e parâmetros do distribuidor.

Dimensões	Distribuidor utilizado no Modelamento
L (m)	4.0
W (m)	1.0
H (m)	0.8
$L_{saída}$ (m)	3.6
$H_{submerso}$ (m)	0.32
D_{tubo_panela} (m)	0.08
$D_{tubo_distribuidor}$ (m)	0.08
$H_{tubo_distribuidor}$ (m)	0.5
Volume Distribuidor (m^3)	3.2
Massa de Metal Armazenado (ton)	22.4
Tempo de Residência (s)	465.53

Tabela 7: Propriedades do aço líquido (LOPEZ-RAMIREZ, BARRETO *et al.*, 2001).

Densidade ($kg m^{-3}$)	7000
Viscosidade (Pa s)	0.005
Expansividade Térmica (K^{-1})	0.000127

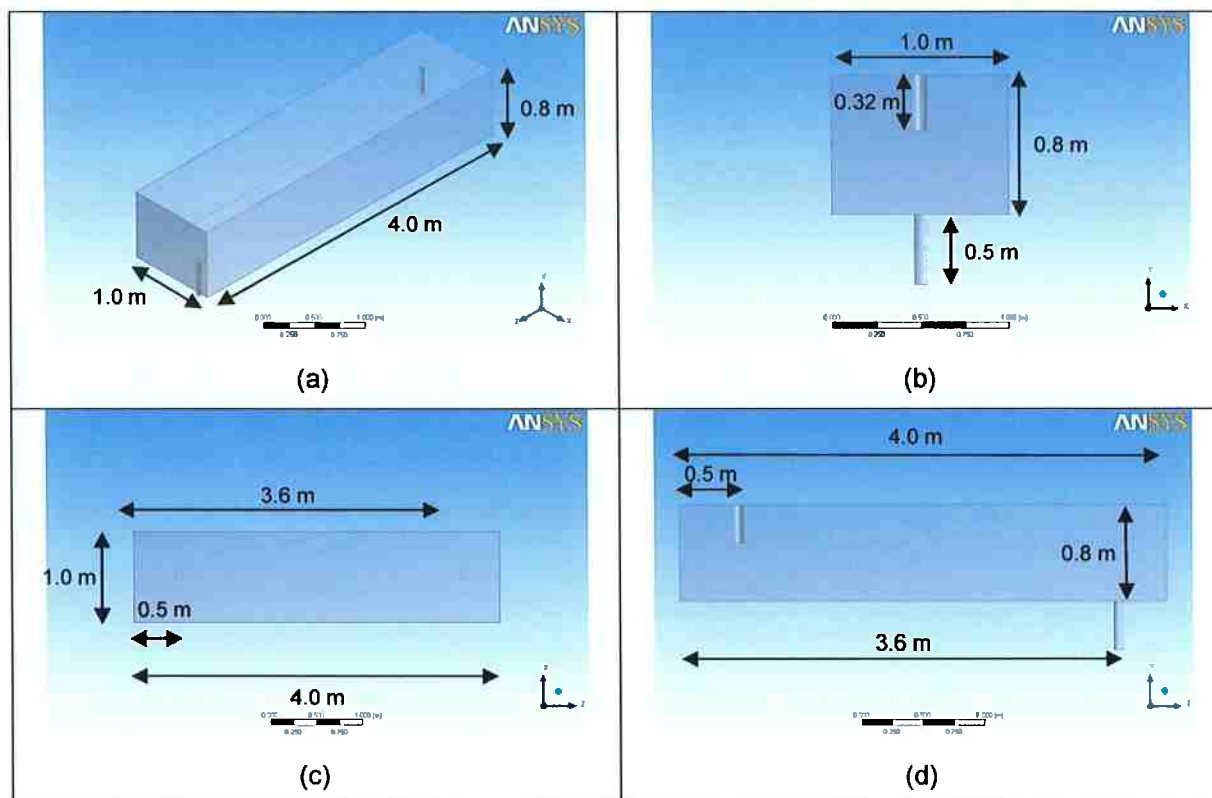


Figura 26: Dimensões do distribuidor utilizado no modelo.

O inibidor de turbulência foi considerado ter o formato de uma caixa quadrada com altura constante e diferentes larguras. A Figura 26 apresenta as dimensões do distribuidor, a Figura 27 mostra as dimensões do inibidor e a Figura 28 mostra o posicionamento dos inibidores no distribuidor. Diversos formatos têm sido propostos na literatura (NAJERA-BASTIDA, GARCIA-DEMEDICES *et al.*, 2007), mas decidiu-se adotar o formato mais simples possível. A largura do inibidor foi adimensionalizada em relação à largura do distribuidor ($W = 1.0 \text{ m}$) e as outras dimensões foram mantidas constantes.

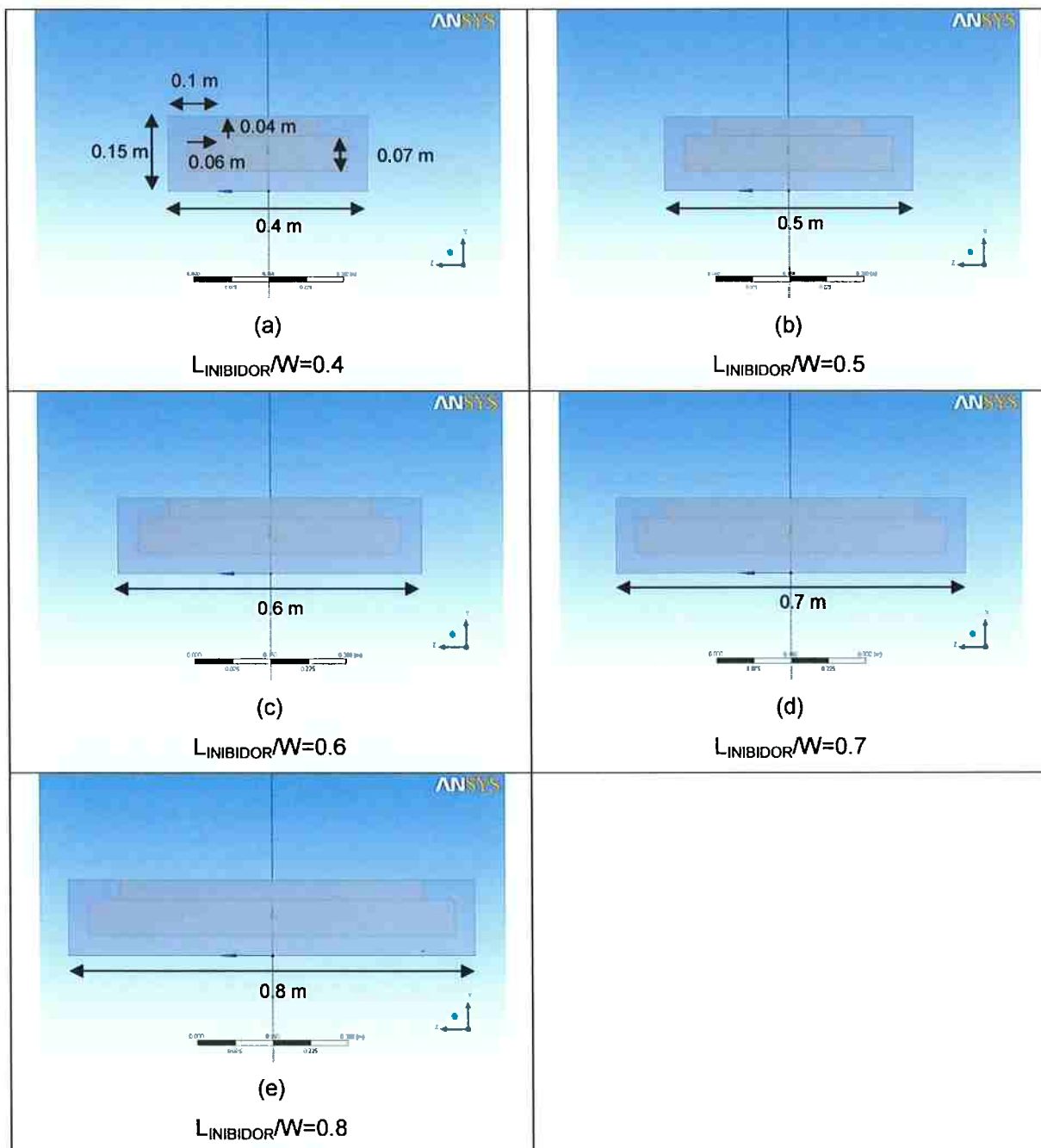


Figura 27: Geometria dos inibidores de turbulência e suas respectivas dimensões. Vista Lateral.

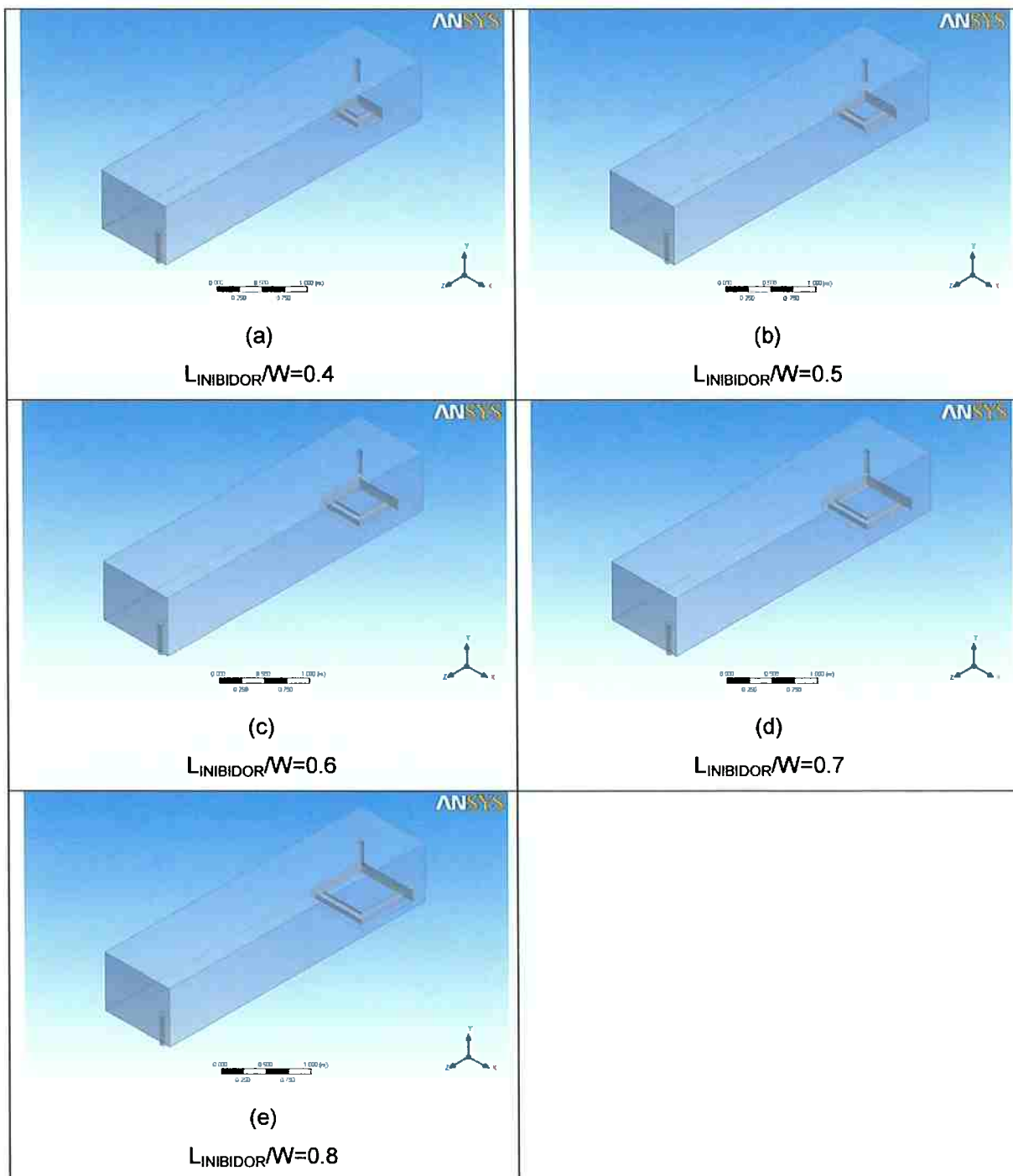


Figura 28: Perspectiva isométrica dos cinco inibidores simulados e seu posicionamento no interior do distribuidor.

4.9 Condições de Contorno do Modelo Matemático

Para resolver o escoamento foi necessário impor as condições de contorno do domínio do distribuidor. Primeiramente será determinado o escoamento do metal

líquido (estado estacionário) para que, em seguida, sejam resolvidas as equações da dinâmica de inclusões e dispersão de traçador (estado transiente).

4.9.1 Condições de Contorno para a Fluidodinâmica

A Tabela 8 e a Tabela 9 sumarizam as condições de contorno utilizadas para a resolução da equação da continuidade, da quantidade de movimento e da energia (transferência de calor). Em especial os fluxos de calor nas paredes do distribuidor foram baseados nos resultados obtidos por Chakraborty e Sahai (1992).

Tabela 8: Valores e condições utilizadas no distribuidor utilizado no modelamento matemático para resolução do balanço de massa e quantidade de movimento.

Parâmetros	Valores/ Condições
Entrada	
Vazão Volumétrica (toneladas/minuto)	2.89
Velocidade de Entrada (m/s)	1.421
Energia Cinética Turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$)	0.0069
Taxa de Dissipação da Energia Cinética Turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$)	0.5673
Paredes	
Camada de Escória	Gradiente de velocidade nulo ("Free Slip")
Restante das Paredes	Condição de aderência ("No Slip")

Tabela 9: Valores e condições utilizadas no distribuidor utilizado no modelamento matemático para resolução da equação de transferência de calor.

Parâmetros	Valores/ Condições
Temperatura do Jato de Entrada (K)	1873
Fluxo de Calor na Base (W m^{-2})	-1.400
Fluxo de Calor nas Paredes Laterais (W m^{-2})	-3.800
Fluxo de Calor nas Paredes Externas (W m^{-2})	-3.200
Fluxo de Calor na Camada de Escória (W m^{-2})	-15.000
Fluxo de Calor nas Paredes Restantes (W m^{-2})	Adiabáticas

4.9.2 Condições de Contorno para a Dinâmica das Inclusões

São injetadas 2000 partículas, possuindo a mesma velocidade do fluido e distribuídas uniformemente sobre o plano do jato de entrada. Nas paredes considera-se que o coeficiente de restituição é unitário (relação entre a velocidade posterior e anterior à colisão), ou seja, a partícula não sofre desaceleração ao entrar

em contato com a parede. Na camada de escória considera-se que toda a partícula que colide é retida. A eficiência de remoção das inclusões pode ser medida diretamente pelo percentual de partículas que são retidas na escória.

4.9.3 Condições de Contorno para a Dispersão de Traçadores

A injeção do traçador no jato de entrada é realizada através de uma função do tipo degrau, como mostrado na Figura 29, em que a concentração é mantida constante durante um intervalo de tempo e bruscamente decresce à zero.

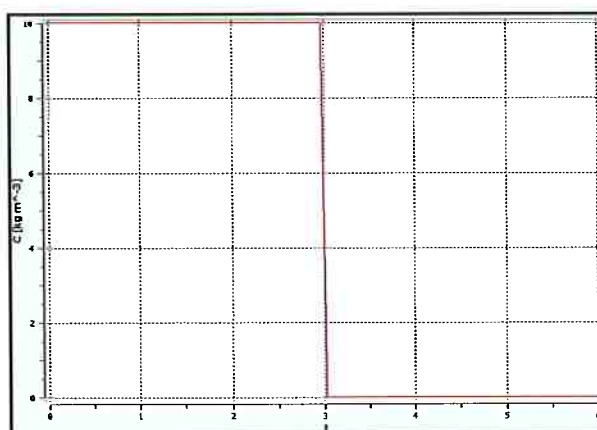


Figura 29: Pulso de traçador em função do tempo no jato de entrada.

Nas paredes, considera-se que não há fluxo de massa e no jato de saída há um fluxo convectivo que carrega o traçador para dentro do distribuidor. No cálculo do coeficiente de difusão efetivo (D_{eff}) Não foi definido um coeficiente de difusão cinemático molecular (D), pois é geralmente considerado desprezível frente ao coeficiente turbulento (D_T).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo matemático apresentado no item anterior foi inicialmente validado simulando-se o problema solucionado por Miki e Thomas (1999) e comparando os seus resultados com aqueles obtidos através do presente modelo. Posteriormente, verificou-se o efeito do tamanho da malha, ou seja, número de volumes finitos, na simulação do distribuidor estudado no presente trabalho, permitindo a escolha de uma malha para o restante das simulações. Finalmente o efeito do tamanho do inibidor de turbulência foi analisado.

5.1 Validação do Modelo Matemático

A validação do modelo matemático empregado nesse trabalho consistiu da simulação do problema solucionado por Miki e Thomas (1999) e comparação com os resultados de perfil de velocidades e do percentual de inclusões removidas. O número de volumes finitos utilizados na simulação foi de 18.000 para o artigo de Miki e Thomas (1999) e de 19.753 para o modelo matemático desse trabalho. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 30 e na Figura 31.

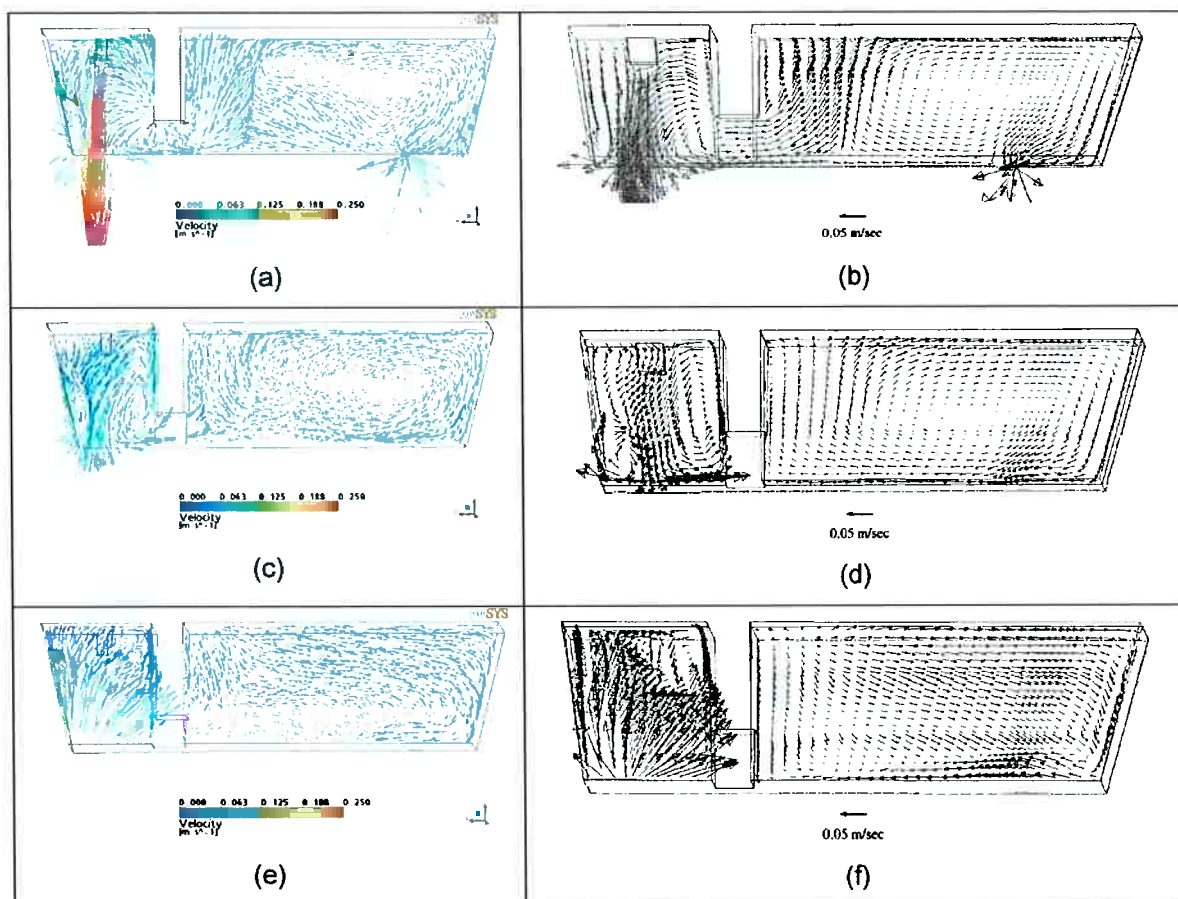


Figura 30: Comparação dos perfis de velocidades obtidos no presente modelo e no artigo de Miki e Thomas (1999): (a) e (b) plano central de simetria; (c) e (d) plano intermediário; (e) e (f) plano próximo à parede.

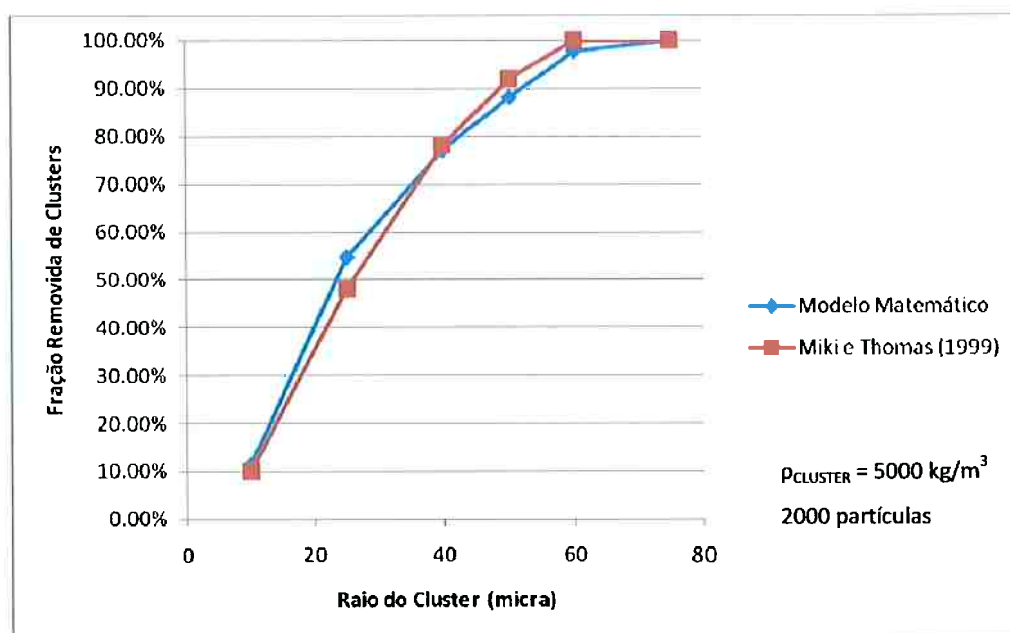


Figura 31: Comparação da remoção de clusters de alumina para o modelo matemático empregado e o resultado obtido por Miki e Thomas (1999).

Observando a Figura 30, nota-se que os campos de velocidades são semelhantes. Segundo a Figura 30a e a Figura 30b, nota-se o fluxo direcionado para a camada de escória logo após o dique e a presença de recirculação. Na Figura 30c e a Figura 30d observa-se a formação de vórtices na região anterior ao dique. Por fim a Figura 30e e a Figura 30f mostram fluxo ascendente na parede e após o dique na região próxima a camada de escória o fluxo é praticamente paralelo à mesma.

A Figura 31 mostra a fração removida de clusters em função do seu raio. Os resultados apresentados mostram boa concordância e a tendência de quanto maior o raio do cluster maior é sua velocidade de flotação e, portanto, sua remoção do banho metálico, é evidente.

5.2 Teste de Independência de Malha

A influência do tamanho da malha nos resultados obtidos foi verificada a partir do estudo de três tamanhos de malha para o distribuidor sem nenhum inibidor de turbulência. O número de elementos está apresentado na Tabela 10. As malhas estão apresentadas na Figura 32.

Tabela 10: Número de elementos para as malhas estudadas para o distribuidor sem o inibidor.

	Malha A	Malha B	Malha C
Número de Elementos	270.310	519.921	835.940

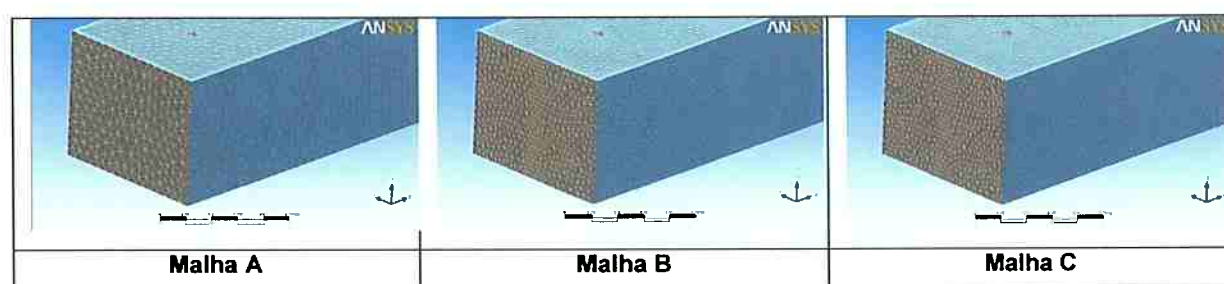


Figura 32: Malhas utilizadas no distribuidor.

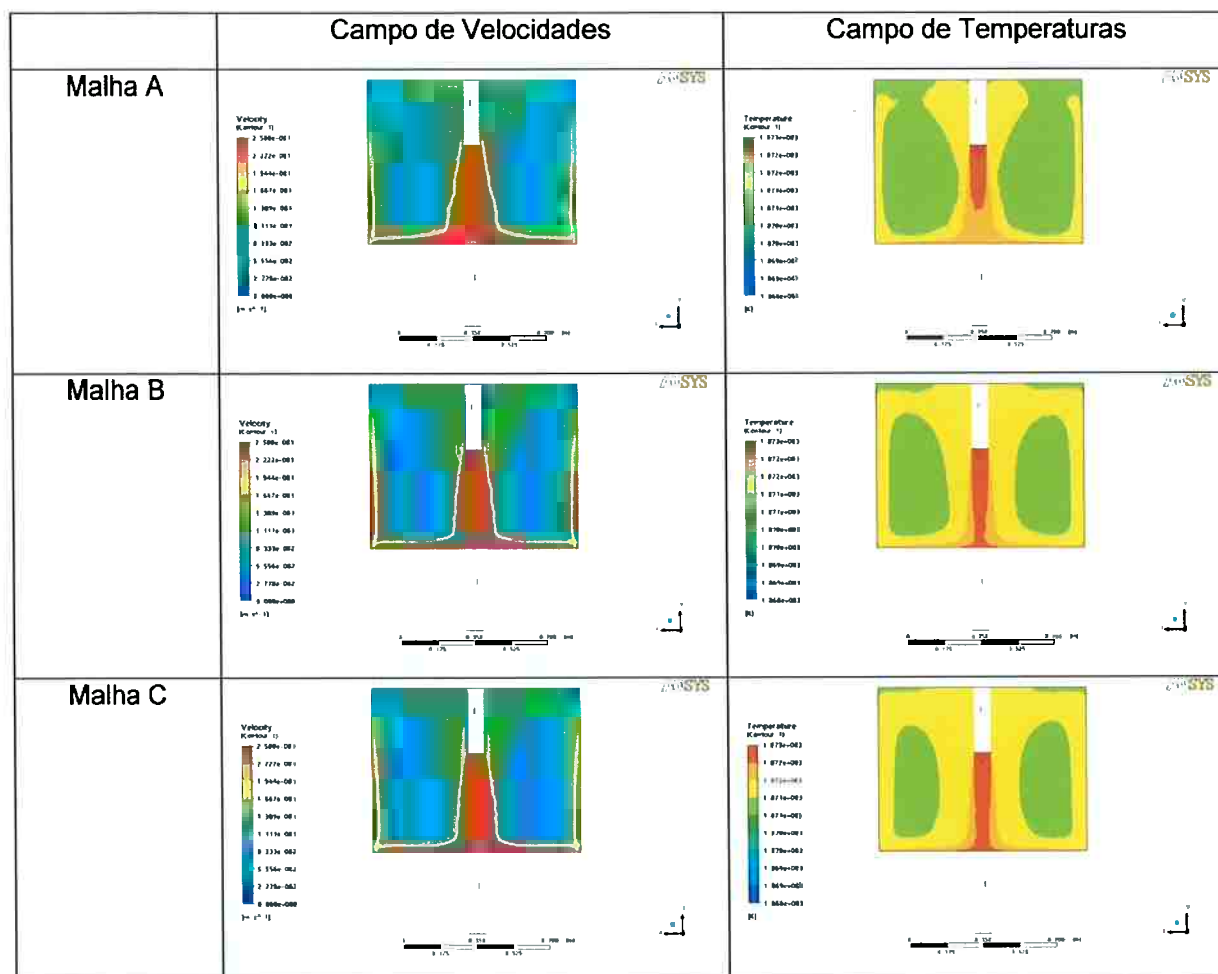


Figura 33: Comparação dos resultados obtidos na simulação do distribuidor sem o inibidor. As figuras à esquerda mostram os contornos de velocidade e as figuras à direita mostram os contornos de temperatura. Vista Frontal do plano $z=0.5$ m.

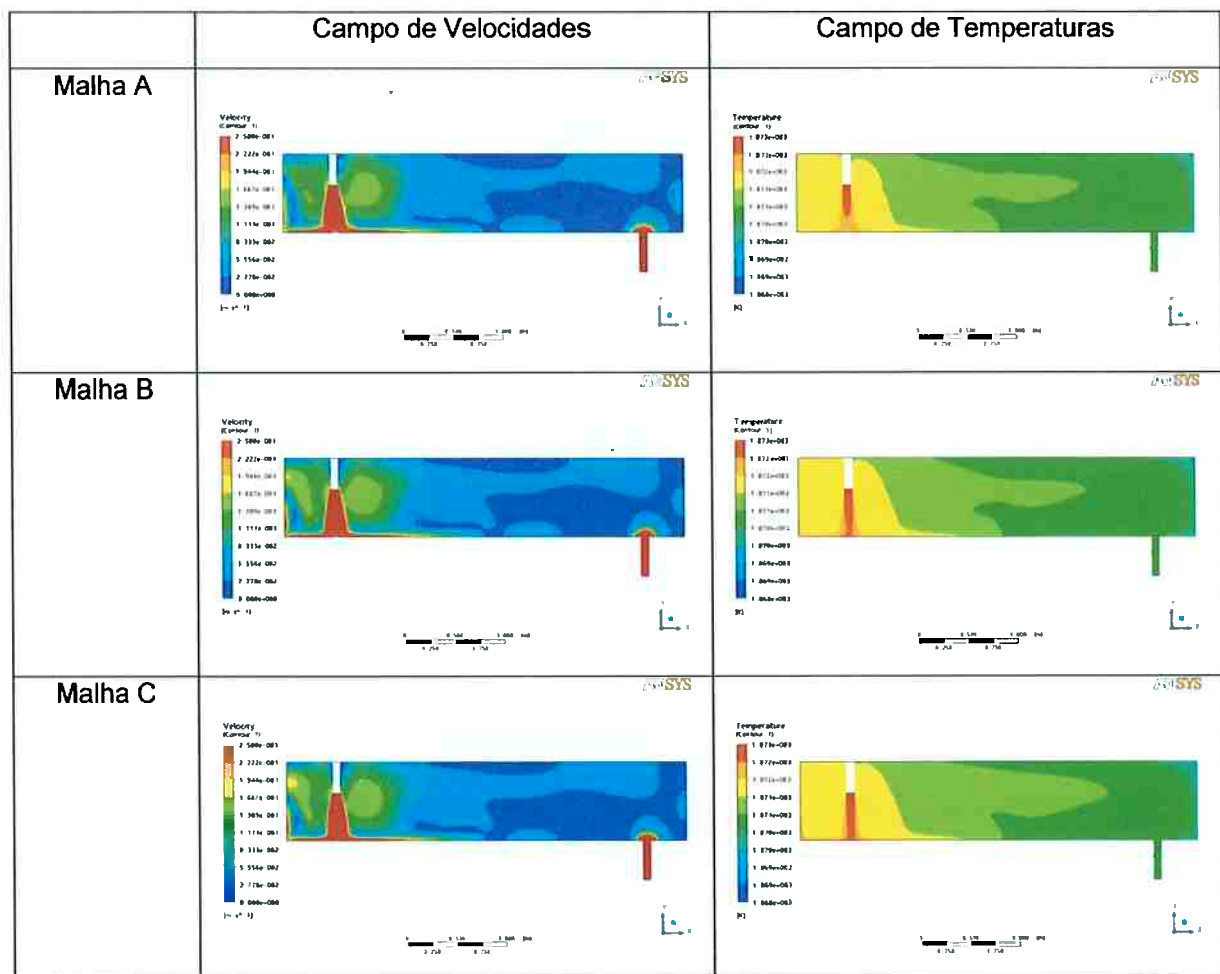


Figura 34: Comparação dos resultados obtidos na simulação do distribuidor sem o inibidor. As figuras à esquerda mostram os contornos de velocidade e as figuras à direita mostram os contornos de temperatura. Vista lateral do plano $x=0.5$ (m).

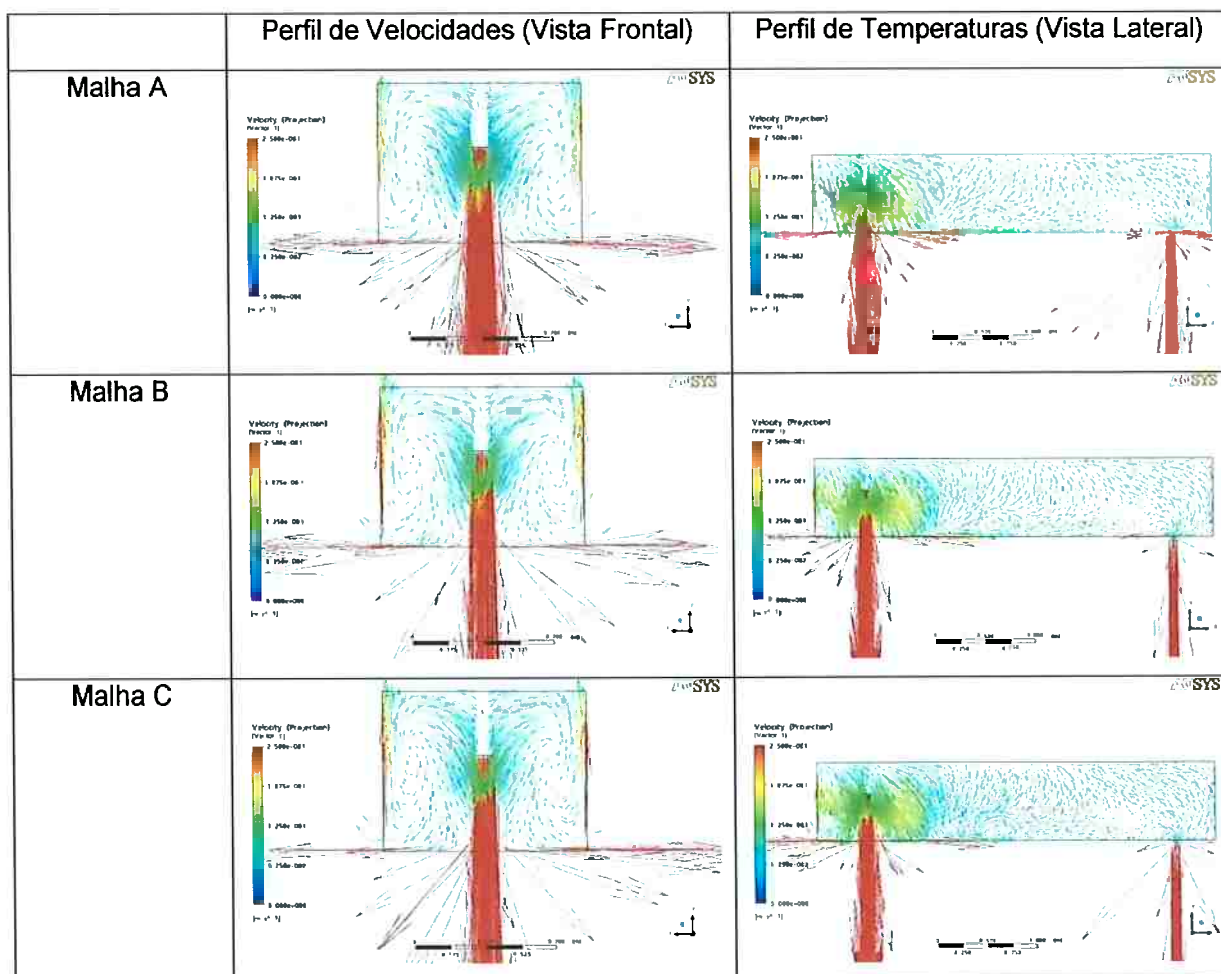


Figura 35: Comparação dos resultados obtidos na simulação do distribuidor sem o inibidor. As figuras mostram os vetores de velocidade na vista frontal do plano $z=0.5$ (m) e na vista lateral do plano $x=0.5$ (m).

Observando a Figura 33, Figura 34 e Figura 35 é possível notar que os resultados obtidos estão similares para os três tamanhos de malhas testados, com maior concordância entre a Malha B e a Malha C. Na Figura 35, observando a vista frontal, o jato de entrada atinge a base do distribuidor e é direcionado para a camada de escória, criando dois vórtices simétricos ao plano de simetria longitudinal do distribuidor. A vista lateral permite observar a complexidade do escoamento, além de não haver o fluxo direcionado para a camada de escória.

Para quantificar a influência do tamanho da malha foi realizada uma simulação com 2000 inclusões de alumina de $50 \mu\text{m}$ de diâmetro e densidade de 3000 kg m^{-3} . A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 11: Comparação da remoção de inclusões para os três tamanhos de malha estudados.

	Malha A		Malha B		Malha C	
	Número	%	Número	%	Número	%
Entrada	2000		2000		2000	
Saída	993	49.65	1391	69.55	1354	67.70
Escória	995	49.75	605	30.25	625	31.25
Erro (*)	12	0.50	4	0.20	21	1.05

(*) O erro é computado caso a inclusão entre em uma região de recirculação, ou se atinge o limite do tempo de monitoramento ou o limite de passos de integração de sua trajetória.

A Tabela 11 revela que há uma grande diferença no percentual de inclusões removidas para a camada de escória quando passamos da Malha A para a Malha B. Já a diferença entre a Malha B e a Malha C é de apenas 1%. Portanto para as próximas simulações, visando minimizar o tempo de simulação, o tamanho de malha estará próximo de 600.000 elementos, que é aproximadamente o tamanho da malha B.

5.3 Influência do Tamanho do Inibidor de Turbulência

Neste item serão estudados os tamanhos de inibidores de turbulência escolhidos e como os mesmos alteram o escoamento e, logo, a eficiência do distribuidor na remoção das inclusões. A Tabela 12 mostra os tamanhos de malha utilizados nas simulações. Tentou-se manter o número de elementos ao redor de 600.000.

Tabela 12: Número elementos para as simulações realizadas.

	Distribuidor	$L_{INIBIDOR}/W$ = 0.4	$L_{INIBIDOR}/W$ = 0.5	$L_{INIBIDOR}/W$ = 0.6	$L_{INIBIDOR}/W$ = 0.7	$L_{INIBIDOR}/W$ = 0.8
Número de Elementos	519.921	629.310	786.259	750.722	758.176	649.620

5.3.1 Perfis de Velocidades e Temperaturas

A Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39 apresentam os resultados obtidos para os inibidores utilizados.

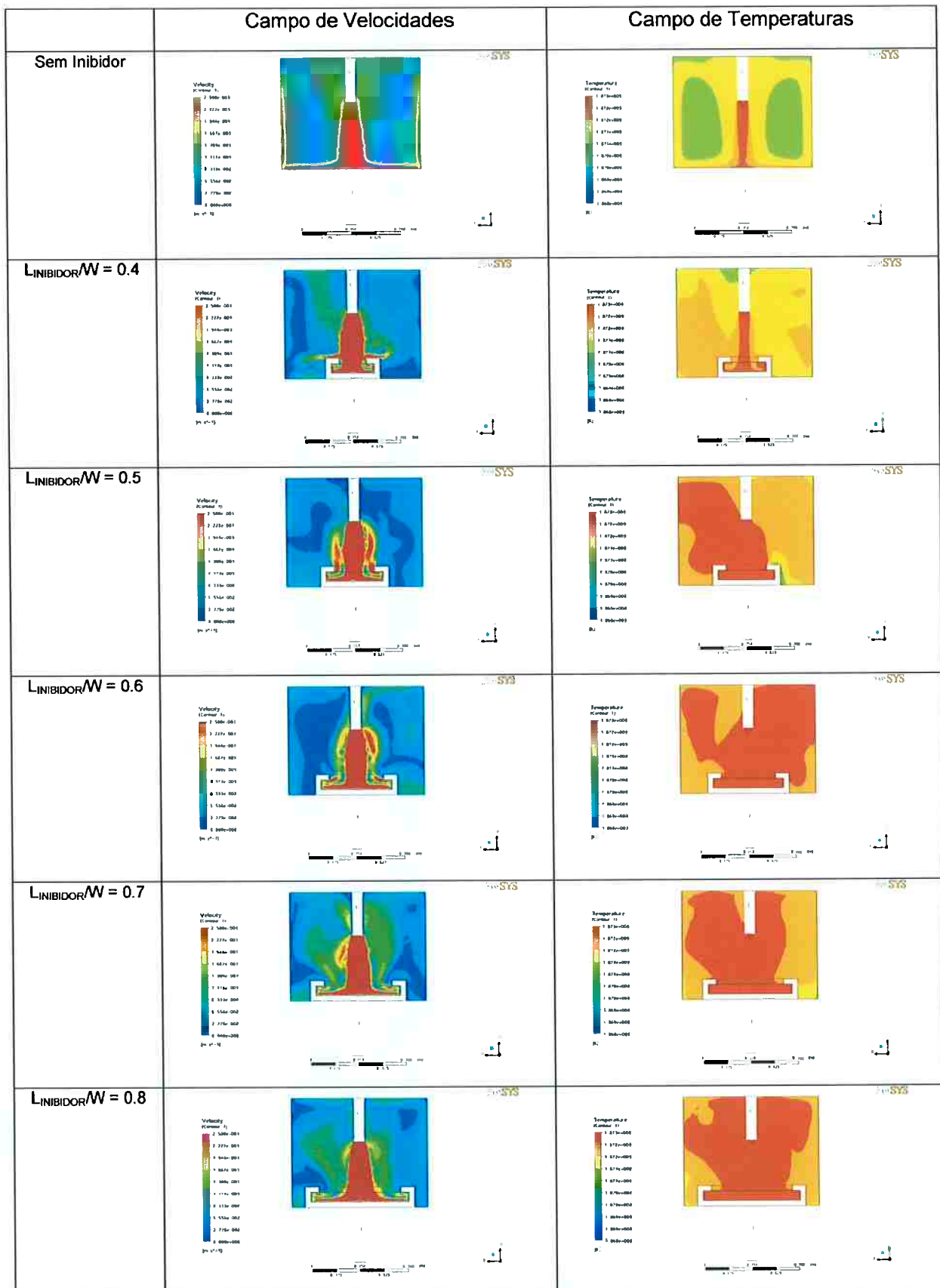


Figura 36: Perfis de velocidades e de temperaturas para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista frontal do plano $z=0.5$ (m).

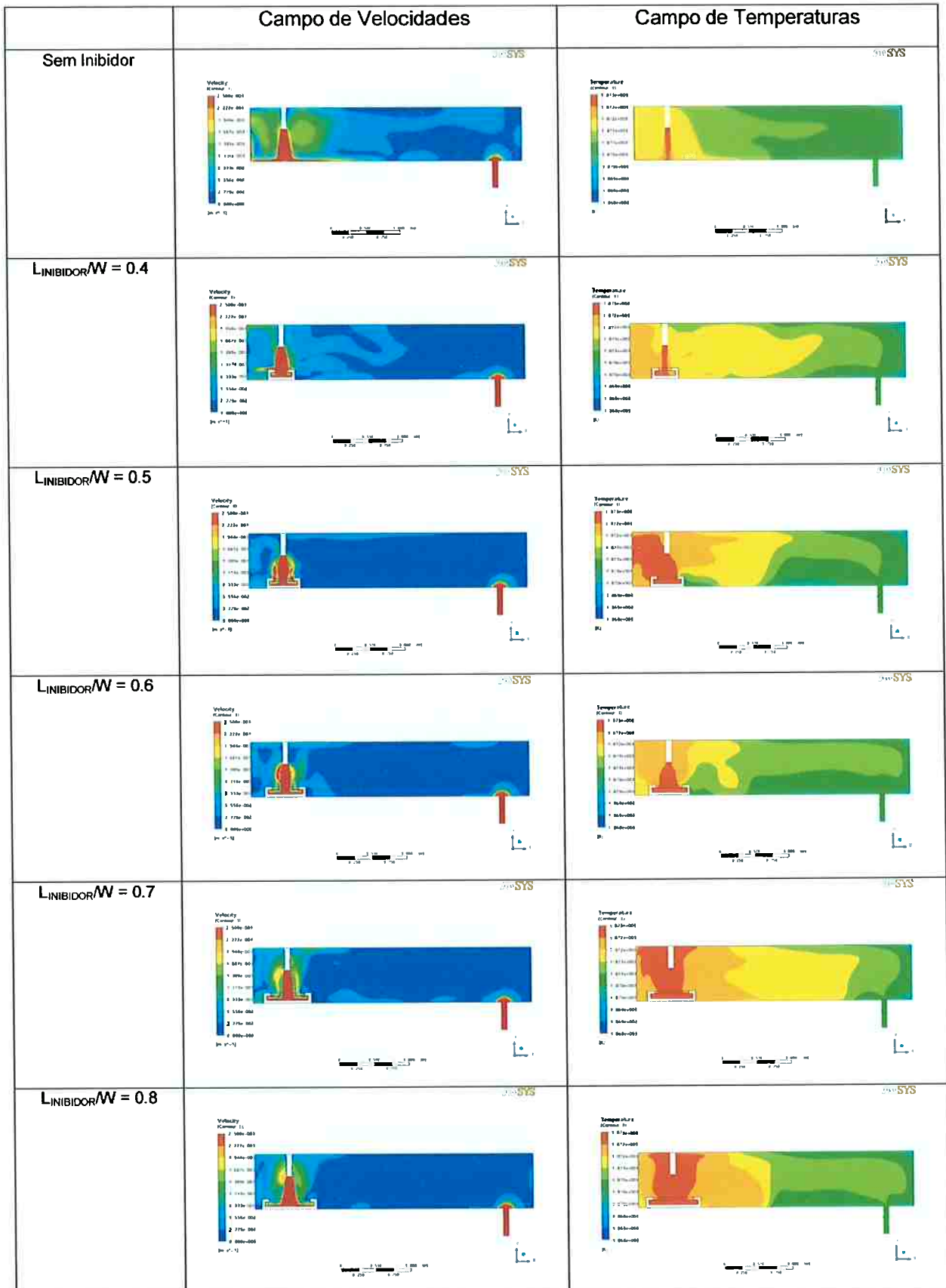


Figura 37: Perfis de velocidades e de temperaturas para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista lateral do plano $x=0.5$ (m).

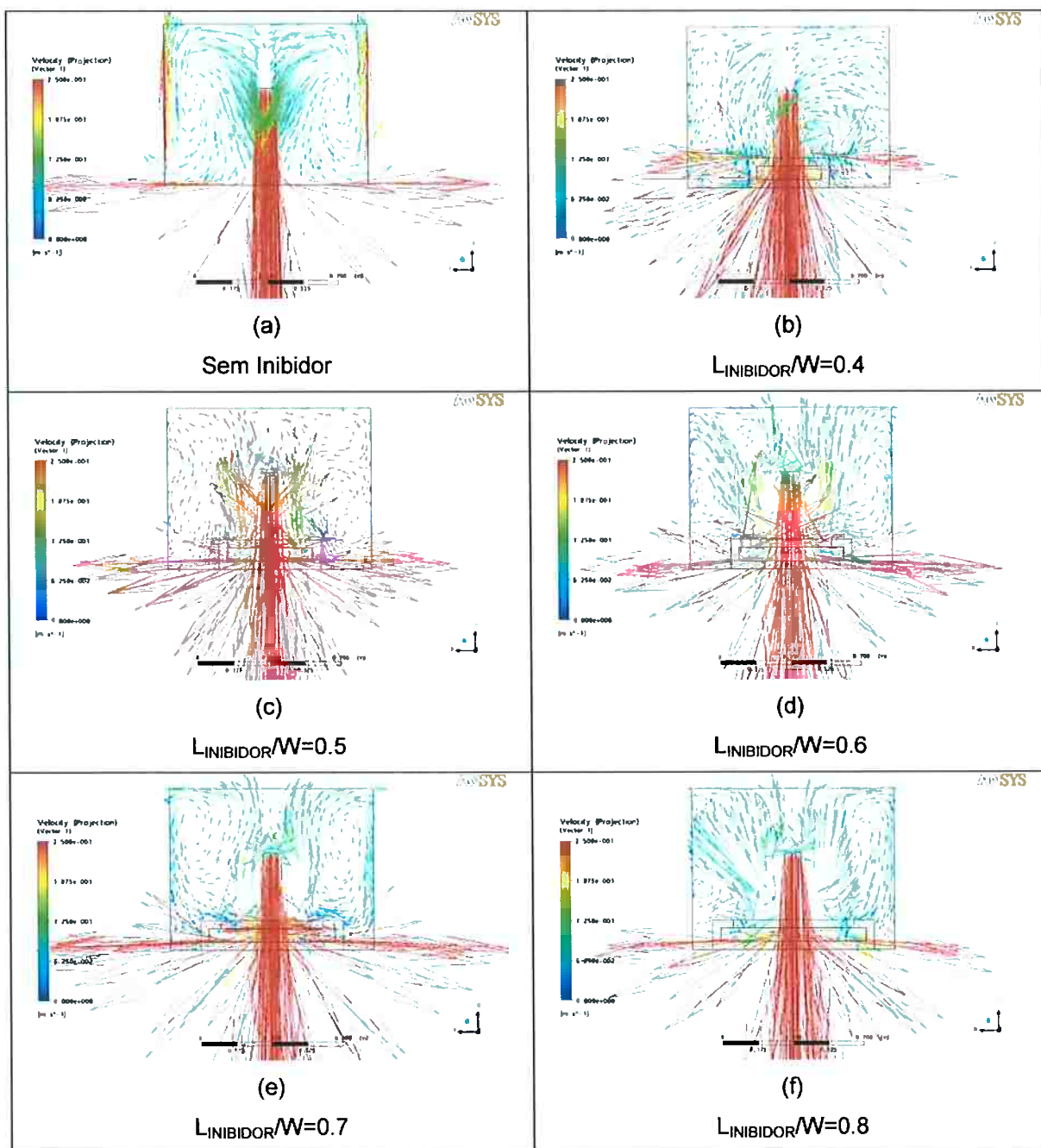


Figura 38: Vetores de velocidades para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista frontal do plano $z=0.5$ (m).

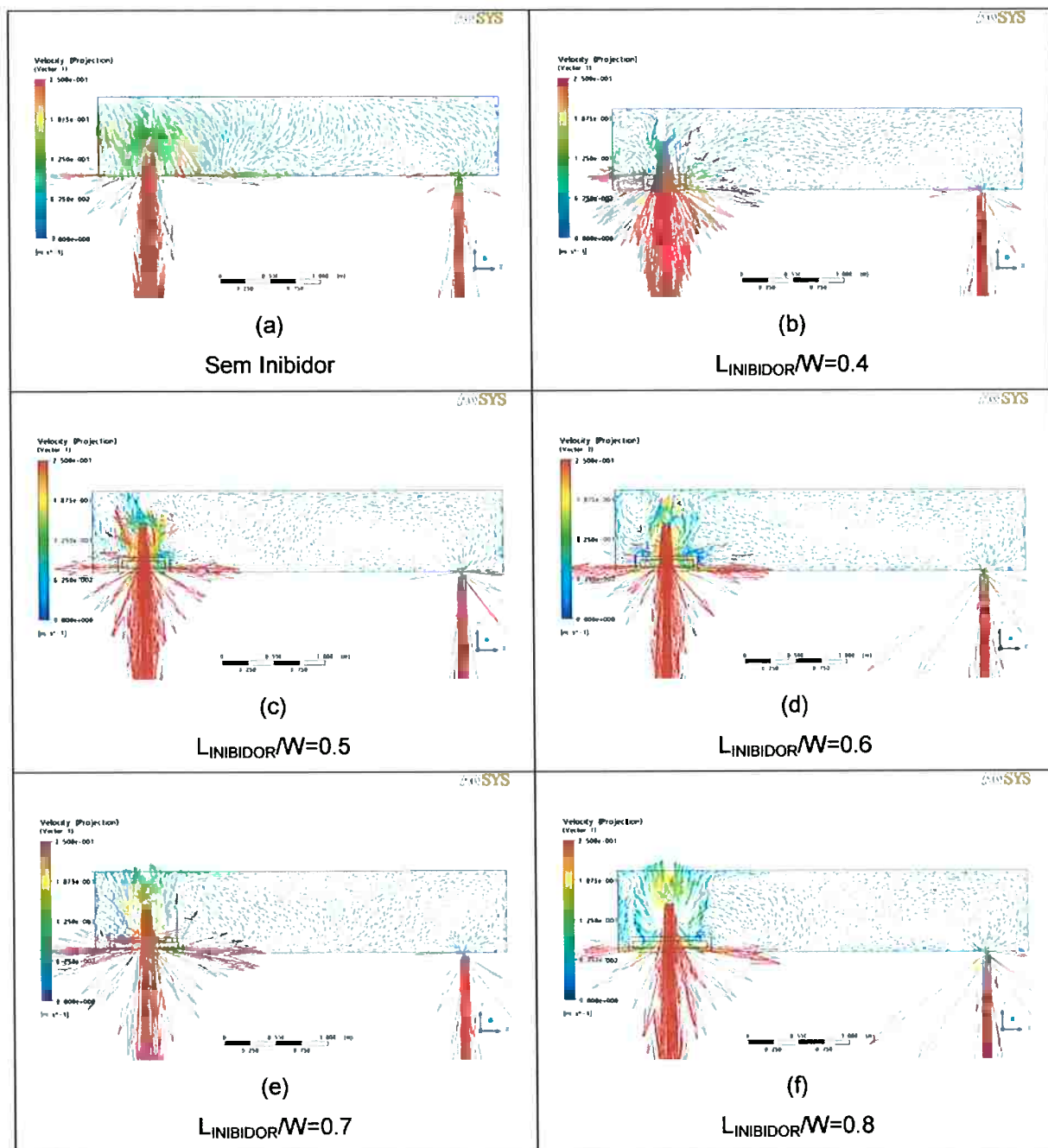


Figura 39: Vetores de velocidades para as configurações de inibidor utilizadas na simulação. Vista lateral do plano $x=0.5$ (m).

A Figura 36 compara os perfis de velocidade e de temperatura para o distribuidor sem inibidor e com as configurações de inibidor estudadas para a vista frontal. A inserção dos modificadores desacelera o jato de metal líquido, gerando regiões de velocidades mais baixas se compararmos ao distribuidor sem o inibidor. Com relação ao perfil de temperatura, os inibidores geram regiões de temperaturas mais elevadas próximas aos mesmos, indicando que o mecanismo de convecção térmica é mais acentuado nesta região. Também não é possível observar simetria nos resultados obtidos quando foram utilizadas as configurações de inibidores. López-Ramirez, Barreto et al (2001) obtiveram resultados que, mesmo existindo simetria geométrica, os resultados podem ser assimétricos, embora não expliquem o motivo deste resultado (LOPEZ-RAMIREZ, BARRETO *et al.*, 2001).

A Figura 37 compara os campos de velocidade e de temperatura para o distribuidor sem inibidor e com as configurações estudadas para a vista lateral. O contorno do perfil de velocidades comprova o aumento da região com velocidades abaixo de 0.0277 m/s e indica que o inibidor de turbulência realmente confina a energia cinética do jato de entrada, reduzindo a velocidade no restante do distribuidor. Os perfis de temperatura revelam o gradiente de temperaturas ao longo do plano longitudinal do distribuidor e que a diferença de temperaturas entre o jato de entrada e de saída é de aproximadamente 4°C. Essa diferença de temperaturas é suficiente para modificar o escoamento em relação à situação isotérmica e para uma descrição correta da fluidodinâmica do distribuidor é necessário considerar as perdas térmicas, conforme ressaltado por Miki e Thomas (1999).

A Figura 38 e a Figura 39 apresentam os vetores de velocidade para o distribuidor sem inibidor e para as configurações estudadas nas vistas frontal e lateral do distribuidor. Os resultados mostram que o escoamento é direcionado para a camada de escória, além de haver a diminuição da velocidade no restante do distribuidor. Esse padrão de escoamento permite então que as inclusões possam permanecer por mais tempo próximas à camada de escória, maximizando a eficiência do distribuidor

5.3.2 Análise do Tempo de Residência

As curvas de tempo de residência e o percentual de volume morto para os tamanhos de inibidores utilizados na simulação matemática estão apresentados na Figura 40 e Tabela 13.

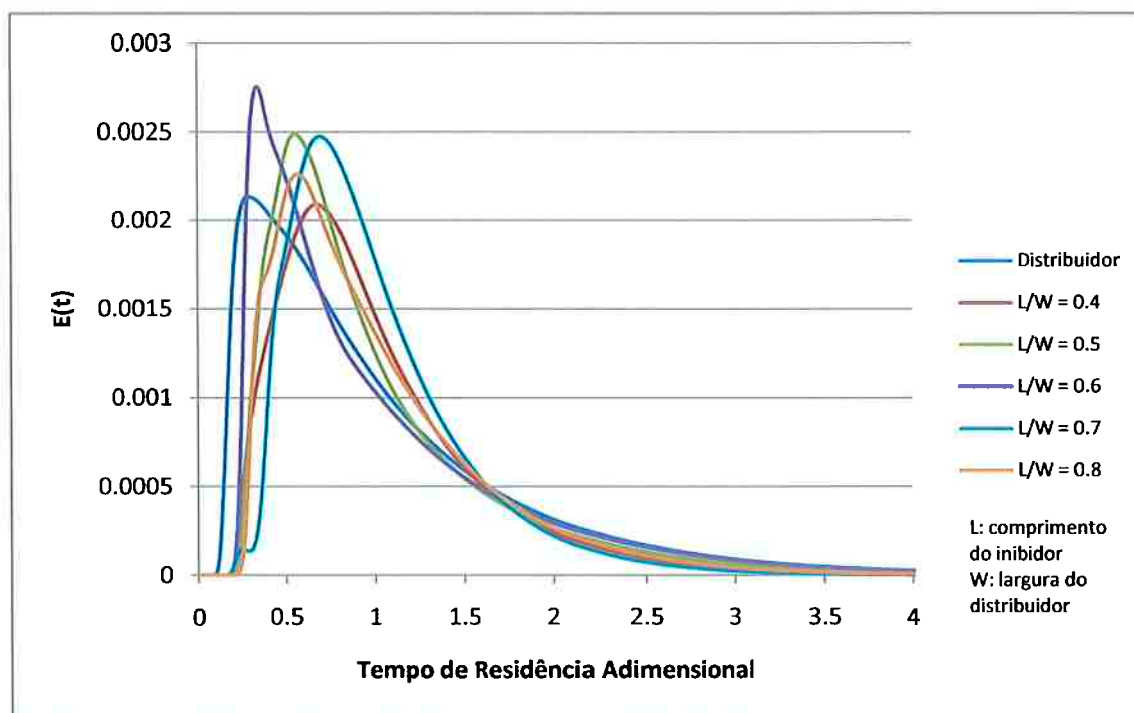


Figura 40: Curvas de tempo de residência para os tamanhos de inibidores simulados.

Tabela 13: Percentual de volume morto para os tamanhos de inibidores utilizados.

	Distribuidor	L_{INIBIDOR}/W =0.4	L_{INIBIDOR}/W =0.5	L_{INIBIDOR}/W =0.6	L_{INIBIDOR}/L =0.7	L_{INIBIDOR}/W =0.8
Volume Morto (%)	28.18	15.45	21.57	27.27	11.06	17.02

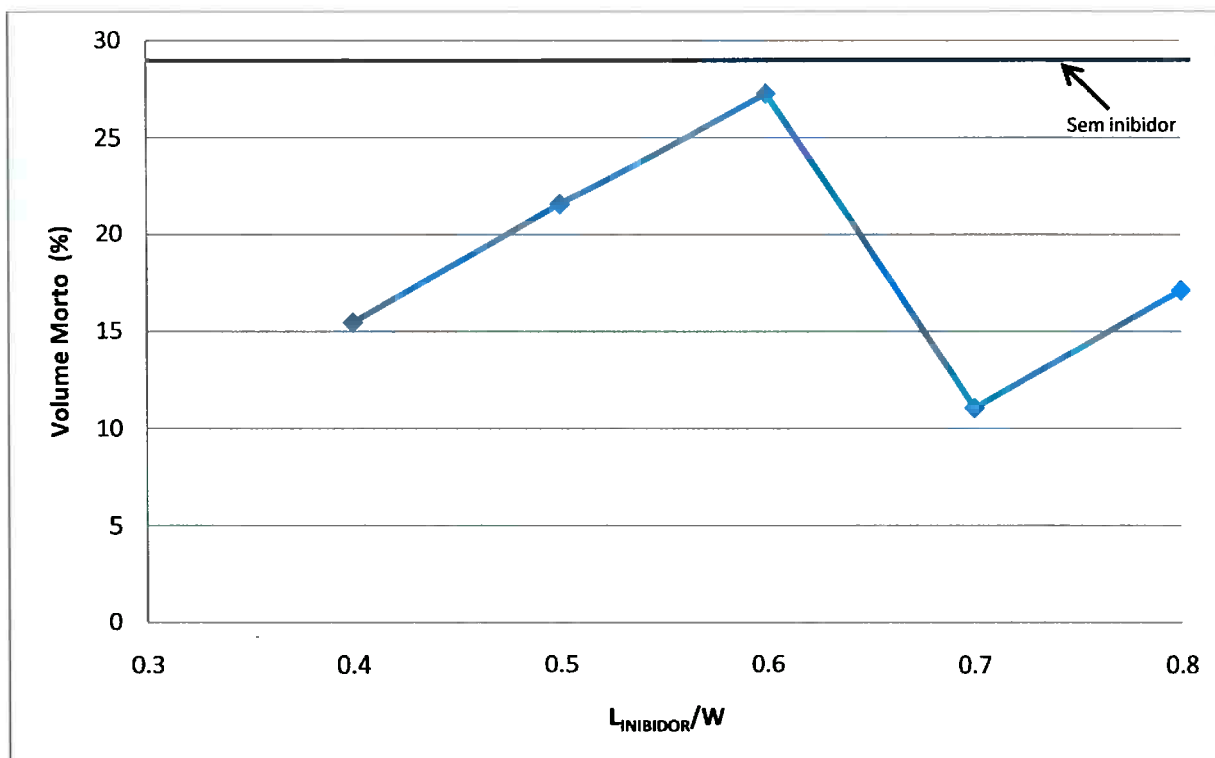


Figura 41: Percentual de volume morto em função de $L_{INIBIDOR}/W$ para as cinco configurações analisadas.

Analisando a Figura 40, a Figura 41 e a Tabela 13 podemos concluir que as melhores configurações são para $L_{INIBIDOR}/W$ igual a 0.4 e 0.7. Ambas as curvas apresentam pico de concentração próximos ao tempo de residência adimensional igual a 1 (ou seja, o tempo de residência médio do metal líquido no distribuidor), maior percentual de volume em fluxo pistonado comparativamente ao distribuidor sem inibidor e menor percentual de volume morto. A configuração $L_{INIBIDOR}/W$ igual a 0.6 apresentou volume morto muito próximo ao do distribuidor sem o inibidor. Portanto o estudo da geometria do inibidor e de seu tamanho é muito importante, pois uma escolha inadequada pode não promover uma limpeza eficiente do aço líquido.

5.3.3 Análise da Remoção de Inclusões

Para verificar a eficácia dos inibidores de turbulência foram analisados seis tamanhos (diâmetros) de inclusões, a saber: 5, 10, 20, 50, 80 e 100 μm .

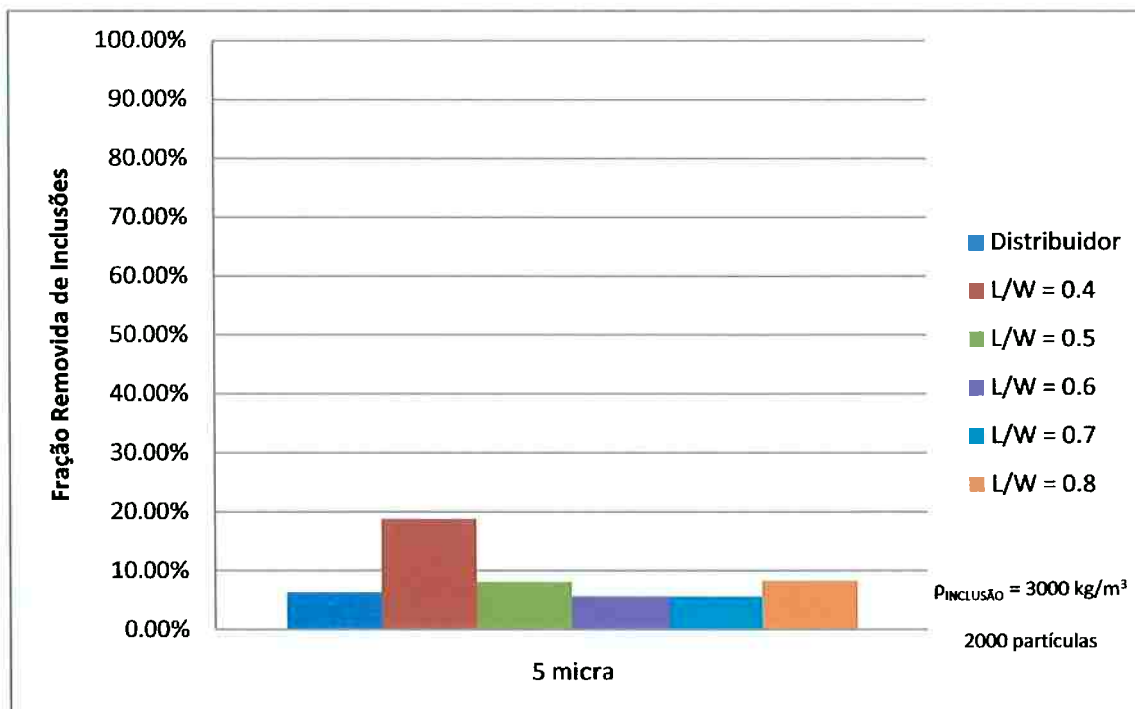


Figura 42: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 5 μm

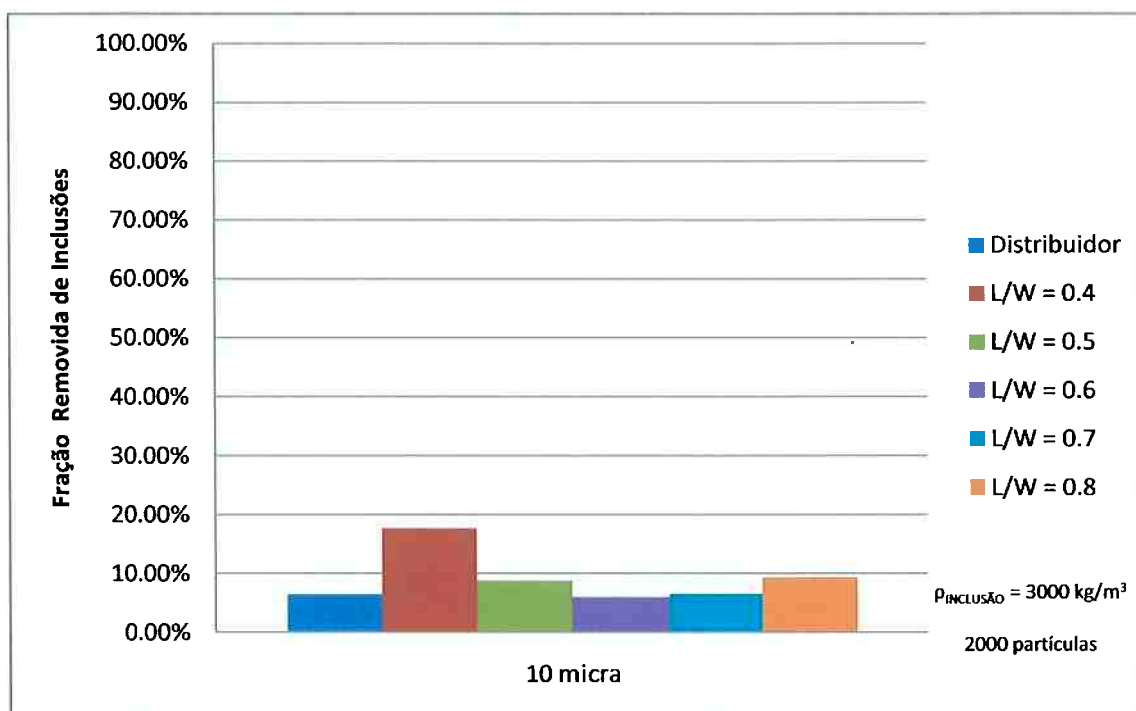


Figura 43: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 10 μm .

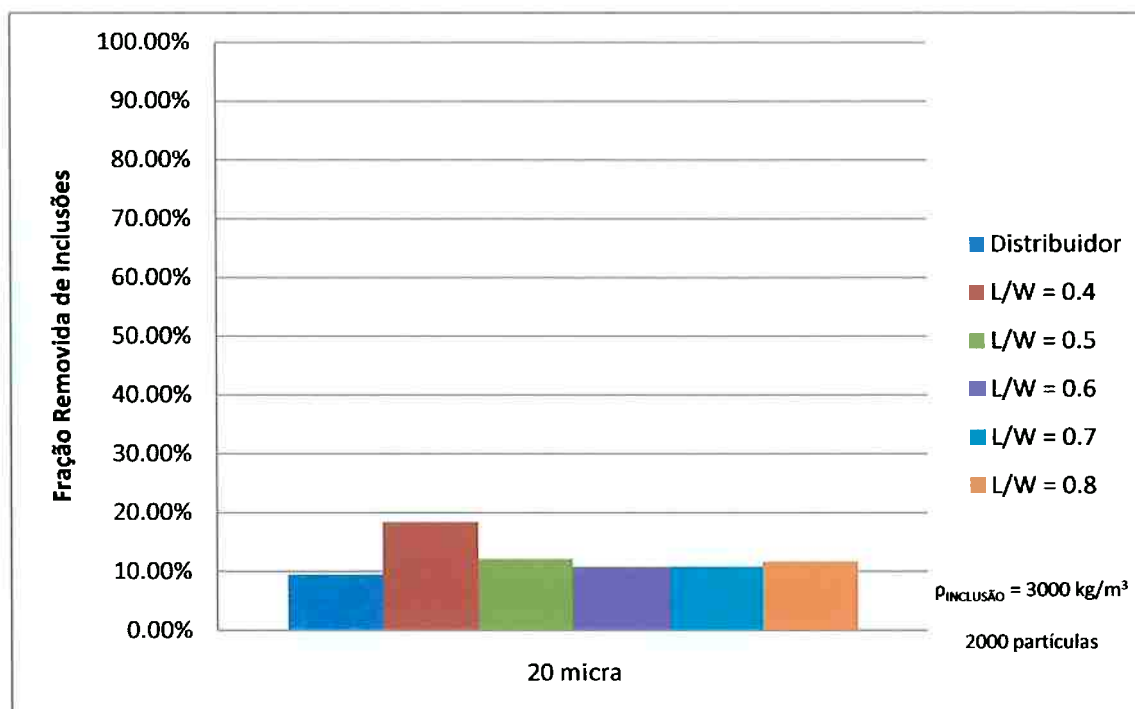


Figura 44: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 20 μm .

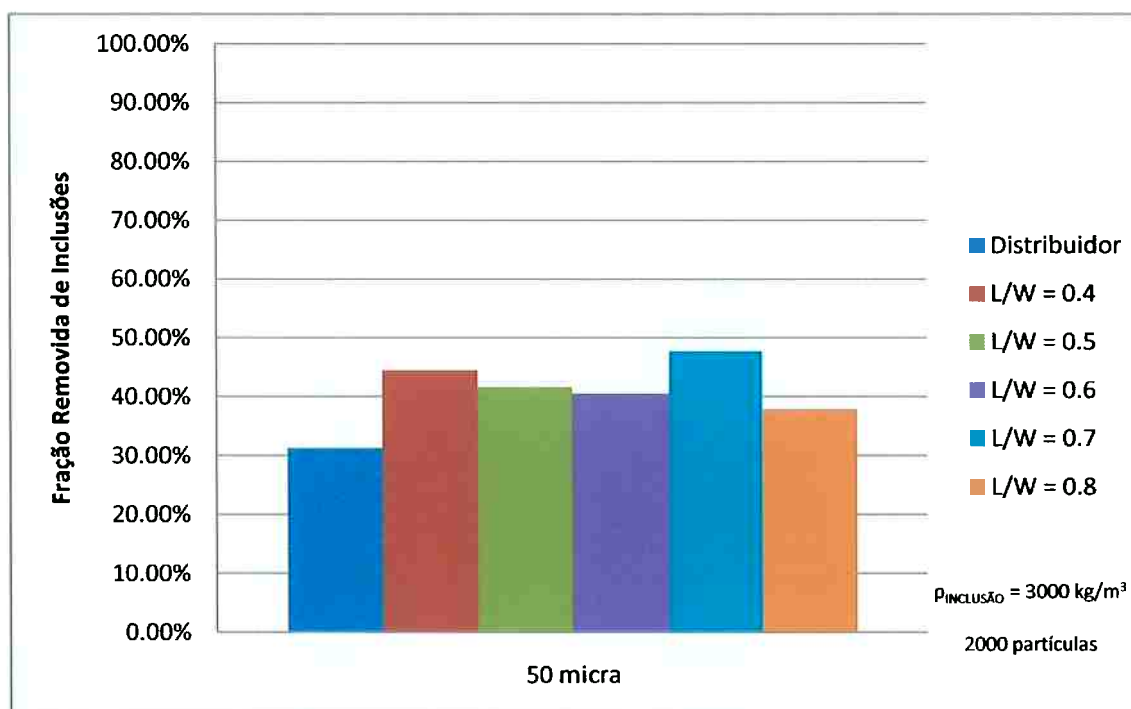


Figura 45: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 50 μm .

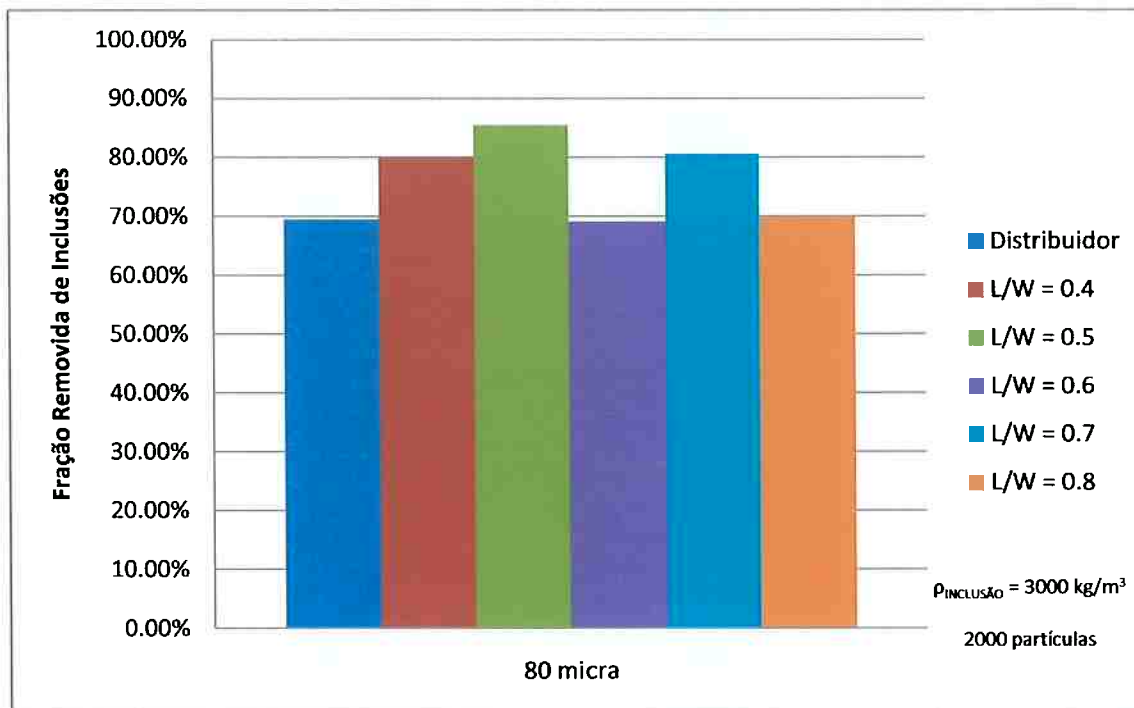


Figura 46: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 80 μm .

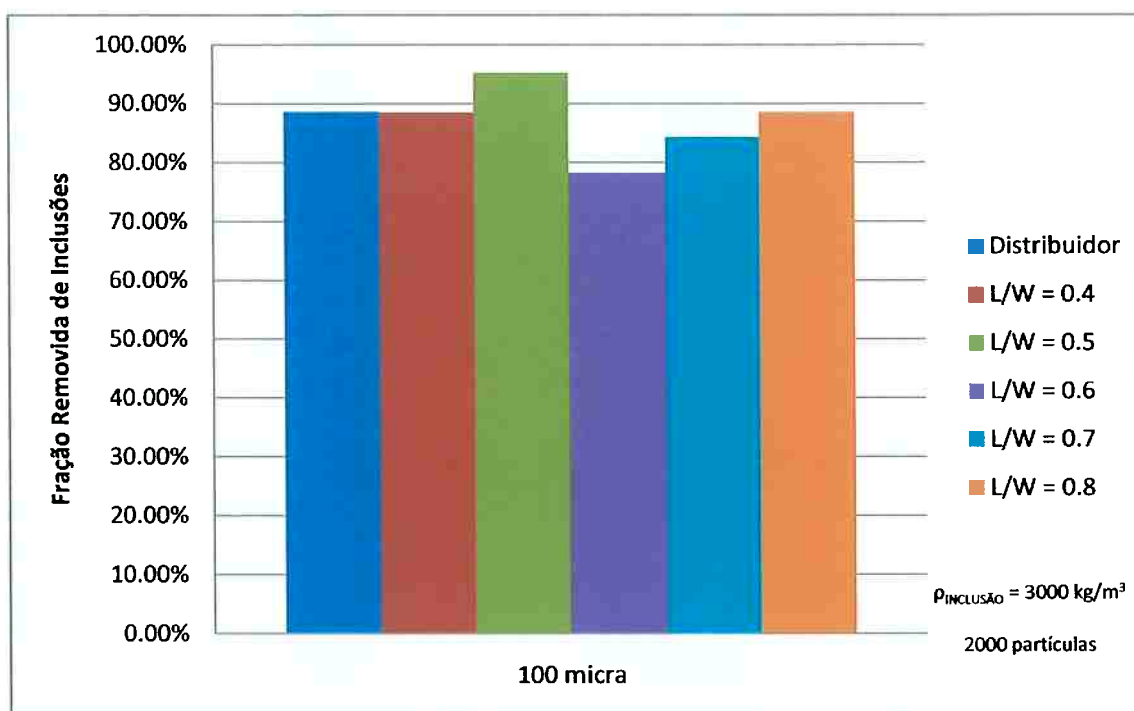


Figura 47: Fração removida para a camada de escória para inclusões de 100 μm .

Para inclusões de 5 a 10 μm a melhor configuração é $L_{INIBIDOR}/W$ igual a 0.4. Para esses tamanhos de inclusões é importante direcionar o fluxo para a camada de escória uma vez que a velocidade de flotação é muito baixa. Além disso, o emprego

do inibidor promove um fluxo de mistura próximo ao jato de entrada que permite a colisão das inclusões, aumentando de tamanho e adquirindo maior velocidade de flotação, embora esse efeito de coalescimento não tenha sido simulado neste trabalho.

As inclusões com tamanho de 20 e 50 μm possuem maior fração removida para a camada de escória para as configurações L_{INIBIDOR}/W igual a 0.4 e 0.7, embora para as inclusões de 20 μm a melhor configuração é para L_{INIBIDOR}/W igual a 0.4. O fluxo pistonado é muito importante para a remoção dessas inclusões, pois aumenta o tempo de residência médio e o tempo em que essas partículas ficam em contato com a camada de escória.

Já as inclusões de 80 e 100 μm apresentam maior velocidade de flotação e os melhores resultados são para L_{INIBIDOR}/W igual a 0.4, 0.5 e 0.7 para 80 μm e L_{INIBIDOR}/W igual a 0.4, 0.5 e 0.8 para 100 μm . Para ambos os tamanhos o melhor resultado foi para L_{INIBIDOR}/W igual a 0.5 e observa-se que a eficiência na remoção das inclusões em comparação com o distribuidor sem o inibidor diminui. Um resultado interessante é que, para inclusões de 100 μm , as três configurações (L_{INIBIDOR}/W igual a 0.6, 0.7 e 0.8) apresentaram a fração removida inferior ao distribuidor sem inibidor. Em especial, a configuração L_{INIBIDOR}/W igual a 0.6 apresenta fração removida de inclusões muito mais baixa do que para o distribuidor sem inibidor. A curva de tempo de residência comprova a ineficácia desta configuração, apresentando volume morto próximo ao distribuidor sem inibidor de turbulência. Na verdade, as inclusões maiores sofrem um efeito de arraste pelo fluido muito menor quando comparado à força de empuxo, que causa a flotação. Portanto, uma alteração do padrão de escoamento deve ter um menor efeito na velocidade de flotação destas inclusões. Desta forma, os modificadores de fluxo ou a alteração destes modificadores apresentam um menor efeito na remoção das inclusões maiores.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem obter as seguintes conclusões:

1. O inibidor de turbulência altera o padrão de escoamento do metal líquido no distribuidor, modificando o tempo de residência.
2. A fração removida de inclusões para inclusões abaixo de 50 μm foi otimizada para configurações L_{INIBIDOR}/W igual a 0.4 e para inclusões acima de 50 μm esta configuração apresentou resultados próximos às configurações L_{INIBIDOR}/W igual a 0.5 e 0.7.
3. A utilização de inibidores onde L_{INIBIDOR}/W igual a 0.6 e 0.8 não promoveram melhora significativa na remoção de inclusões quando comparados ao distribuidor sem inibidor, embora ambas as configurações diminuam o volume morto do distribuidor.
4. O estudo da geometria do inibidor e de seu tamanho é muito importante no projeto de um distribuidor, pois uma escolha inadequada pode não promover a remoção adequada das inclusões presentes no aço líquido.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILAR-CORONA, A., R. D. MORALES, *et al.* Thermal stratification of steel flow in tundishes with off-centred ladle shrouds using different flow control designs. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v.42, n.4, OCT, p.455-464. 2003.
2. BIRD, R. B., W. E. STEWART, *et al.* **Transport Phenomena**. New York: John Wiley & Sons. 1960. 780 p.
3. DE KOCK, D. J., K. J. CRAIG, *et al.* Mathematical maximisation of minimum residence time for two strand continuous caster. **Ironmaking & Steelmaking**, v.30, n.3, Jun, p.229-234. 2003.
4. DEBROY, T. e J. A. SYCHTERZ. Numerical-Calculation of Fluid-Flow in a Continuous-Casting Tundish. **Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy**, v.16, n.3, SEP, p.497-504. 1985.
5. HE, Y. e Y. SAHAI. The Effect of Tundish Wall Inclination on the Fluid-Flow and Mixing - a Modeling Study. **Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy**, v.18, n.1, MAR, p.81-92. 1987.
6. JOO, S. e R. I. L. GUTHRIE. Heat-Flow and Inclusion Behavior in a Tundish for Slab Casting. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v.30, n.4, OCT-DEC, p.261-269. 1991.
7. JOO, S., J. W. HAN, *et al.* Inclusion Behavior and Heat-Transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations .2. Mathematical-Model for Liquid Steel in Tundishes. **Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy**, v.24, n.5, OCT, p.767-777. 1993a.
8. _____. Inclusion Behavior and Heat-Transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations .3. Applications Computational Approach to Tundish Design. **Metallurgical Transactions B-Process Metallurgy**, v.24, n.5, OCT, p.779-788. 1993b.
9. KAUFMANN, B., A. NIEDERMAYR, *et al.* Separation of Nonmetallic Particles in Tundishes. **Steel Research**, v.64, n.4, APR, p.203-209. 1993.
10. LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. São Paulo: Edgar Blucher. 2000. 563 p.
11. LOPEZ-RAMIREZ, S., J. D. BARRETO, *et al.* Modeling study of the influence of turbulence inhibitors on the molten steel flow, tracer dispersion, and inclusion trajectories in tundishes. **Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v.32, n.4, Aug, p.615-627. 2001.

12. MIKI, Y. e B. G. THOMAS. Modeling of inclusion removal in a tundish. **Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science**, v.30, n.4, AUG, p.639-654. 1999.
13. NAJERA-BASTIDA, A., L. GARCIA-DEMEDICES, *et al.* Dissipation of turbulent kinetic energy in a tundish by inhibitors with different designs. **Steel Research International**, v.78, n.4, APR, p.318-326. 2007.
14. PALAFOX-RAMOS, J., J. D. J. BARRETO, *et al.* Melt flow optimisation using turbulence inhibitors in large volume tundishes. **Ironmaking & Steelmaking**, v.28, n.2, p.101-109. 2001.
15. SAHAI, Y. e T. EMI. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. **Isij International**, v.36, n.6, p.667-672. 1996.
16. SINHA, A. K. e Y. SAHAI. Mathematical-Modeling of Inclusion Transport and Removal in Continuous-Casting Tundishes. **Isij International**, v.33, n.5, p.556-566. 1993.
17. WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**: McGraw Hill. 2003. 866 p.