

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

“SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESCÓRIA /
AÇO DURANTE O ESGOTAMENTO DA PANELA
ATRAVÉS DE MODELAGEM FÍSICA”

Autor: César Takaci Sato

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Março – 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

César Takaci Sato

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESCÓRIA/AÇO
DURANTE O ESGOTAMENTO DA PANELA ATRAVÉS
DE MODELAGEM FÍSICA

Dissertação de Mestrado apresentado ao Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa
Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

Dedico este trabalho a toda minha família e à Patrícia, pelo apoio e incentivo para esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de registrar os meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram de forma direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

À Belgo Arcelor Mittal, Usina de Monlevade, pela oportunidade de concluir o mestrado, representada pelos Engenheiros Gérson Alves Menezes e Augusto Espeschit de Almeida.

Aos Gerentes João Garcia Ramalho, Marco Antônio Bosco, Lucas Vieira Penna, Ricardo Corrêa Botelho e Antônio Martins pelo suporte técnico e financeiro para a construção do modelo físico.

Aos amigos da Gerência Técnica e da Gerência de Produção de Aço, dos Departamentos de Suprimentos e de Manutenção, pelas sugestões e esclarecimentos para o desenvolvimento do projeto.

Aos colegas que atuaram diretamente na elaboração elétrica, eletrônica e nos experimentos do modelo físico: Márcio Ramirez, José Ubiratan, Jéferson Homero Diniz e Francinêlio de Castro.

Ao consultor Joaquim Costa pelos conselhos ligados ao processo.

Ao Professor Parreiras pela orientação e apoio para a elaboração desta dissertação de mestrado.

SUMÁRIO

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE NOTAÇÃO.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – OBJETIVOS.....	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3.1 – Principais características da Belgo – Arcelor Mittal, Usina de Monlevade.....	4
3.2 – Lingotamento contínuo.....	7
3.3 – Simulação física de processos industriais.....	10
3.3.1 – Critérios de similaridade.....	10
3.3.2 – Fluidos simuladores.....	14
3.4 – Mecanismo de formação de vórtice.....	15
3.4.1 – Formação do escoamento do tipo vórtice.....	16
3.4.2 – Formação do escoamento do tipo dreno.....	19
3.5 – Regimes de escoamento no esvaziamento de um recipiente.....	20
3.6 – Fatores que afetam a formação dos vórtices.....	21
3.6.1 – Tempo de espera / Velocidade tangencial inicial.....	21
3.6.2 – Posição do orifício de saída	27
3.6.3 – Diâmetro do orifício de saída.....	29
3.6.4 – Viscosidade do fluido que simula a escória.....	34
3.6.5 – Dispositivos anti-vórtices.....	35
3.6.6 – Válvulas tampões.....	37
3.7 – Detectores da Formação dos Vórtices.....	38

4 – METODOLOGIA.....	40
4.1 – Montagem experimental.....	40
4.2 – Experimentos.....	51
4.2.1 – Procedimento experimental.....	54
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
6 – CONCLUSÕES.....	75
7 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	77
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 3.1 Fluxograma Usina Monlevade (CHAVES, 2006).....	4
Figura 3.2 Classe de material expedido pela Belgo Monlevade.....	6
Figura 3.3 Vista esquemática do processo lingotamento contínuo (Thomas, 2001).....	7
Figura 3.4 Tipos de escoamento em um orifício localizado no fundo de uma panela (Andrzejewski et alii, 1987).....	16
Figura 3.5 Estágios do escoamento do tipo vórtice (Sankaranarayanan, 1994).....	17
Figura 3.6 Características do escoamento do tipo vórtice (Sankaranarayanan, 1994).....	18
Figura 3.7 Características do escoamento do tipo dreno (Sankaranarayanan, 1994)	19
Figura 3.8 Características do escoamento do tipo orifício cheio e do tipo transbordamento (Sankaranarayanan, 1994)	20
Figura 3.9 Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 10 segundos de tempo de espera (Andrzejewski et alii, 1987)	22
Figura 3.10 Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 30 segundos de tempo de espera (Andrzejewski et alii, 1987)	22
Figura 3.11 Medição do decaimento da velocidade tangencial com o tempo - $D:1160\text{mm}$; $H_i: 995\text{mm}$ (Sankaranarayanan, 2002)	23
Figura 3.12 Altura crítica vs Número de Vórtice para a formação de redemoinho (Sankaranarayanan, 2002)	24
Figura 3.13 Altura crítica vs Número de Vórtice para a formação de vórtices (Sankaranarayanan, 2002)	25

Figura 3.14:	Variação da altura do banho com o tempo após a abertura da válvula. Tempo de espera é um parâmetro. (Koria, 1994).....	26
Figura 3.15	Posicionamento do orifício de saída ao longo do raio (Pimenta et alii, 1997)	27
Figura 3.16	Avaliação dos efeitos dos fatores e interações sobre a altura crítica de formação do vórtice na panela (Pimenta et alii, 1997).....	27
Figura 3.17	Influências da posição e diâmetro do orifício na altura crítica de formação do vórtice (Pimenta et alii, 1997).....	28
Figura 3.18	Ilustração da componente rotacional da velocidade do fluido em relação à posição do orifício: a-central; b- excêntrico (Pimenta et alii, 1997).....	29
Figura 3.19	Relação entre a altura crítica do escoamento do tipo dreno com o diâmetro de saída (Andrzejewski et alii, 1987)	30
Figura 3.20	Variação da altura do vórtice com o diâmetro para diferentes tempos de espera. Orifício de saída centralizado. (Koria, 1994)	31
Figura 3.21	Variação da altura do vórtice com o diâmetro para diferentes tempos de espera. Orifício de saída excêntrico. (Koria, 1994)	32
Figura 3.22	Influências do diâmetro do orifício e do procedimento operacional sobre o volume de óleo arrastado (Pimenta et alii, 1997)	33
Figura 3.23	Dispositivo anti-vórtice utilizado no modelo físico (Sankaranarayanan, 2002).....	36
Figura 3.24	Comparativo mostrando a eficiência do dispositivo anti-vórtice utilizado no modelo físico (Sankaranarayanan, 2002).....	36
Figura 3.25	Ilustração da extremidade da válvula tampão sugerida por Steffen (1987)	37
Figura 3.26	Ilustração do detector de vórtice (Dawson, 1988)	39

Figura 3.27	Curva resposta do sensor fotoelétrico (Santos, 2005).....	39
Figura 4.1	Desenho esquemático da panela vista lateral.....	40
Figura 4.2	Desenho esquemático da panela fundo.....	41
Figura 4.3	Esquema de montagem do modelo físico da panela.....	41
Figura 4.4	Vista principal do modelo físico da panela.....	42
Figura 4.5	Vista do modelo físico da panela.....	42
Figura 4.6	Detalhe do fundo do modelo físico da panela.....	43
Figura 4.7	Vista do modelo físico da panela.....	43
Figura 4.8	Vista do modelo físico da panela.....	44
Figura 4.9	Vista do fundo da panela vista superior.....	44
Figura 4.10	Ilustração do funcionamento do detector de vórtice.....	45
Figura 4.11	Imagem do transmissor de nível.....	46
Figura 4.12	Imagem do controlador de vazão.....	46
Figura 4.13	Imagem da servo- válvula.....	47
Figura 4.14	Imagem do medidor de vazão.....	48

Figura 4.15	Imagem do transmissor de vazão.....	48
Figura 4.16	Imagem do dispositivo de aquisição de dados.....	49
Figura 4.17	Imagem dos gráficos evolutivos do Datataker.....	50
Figura 4.18	Ilustração da região de entrada da água.....	56
Figura 4.19	Imagem do conjunto água com óleo de silicone no fundo da panela.....	57
Figura 4.20	Desenho ilustrativo do dispositivo anti-vórtice.....	58
Figura 4.21	Vista superior (a) e inferior (b) do dispositivo anti-vórtice.....	58
Figura 4.22	Imagem do dispositivo anti-vórtice utilizado nos experimentos.....	58
Figura 5.1	Detalhe do comportamento da voltagem emitida pelo sensor do detector de escória (linha contínua) com a altura de água (linha com pontos)	60
Figura 5.2	Procedimento para obtenção da altura de água no momento do vórtice.....	61
Figura 5.3	Curva característica para testes com a presença do óleo de silicone.....	63
Figura 5.4	Gráfico de Pareto com os fatores e interações significativas.....	65
Figura 5.5	Cube Plot com os valores de altura para os fatores e interações.....	66
Figura 5.6	Tela do Response Optimizer com o melhor resultado para altura crítica.....	67
Figura 5.7	Telas com os resultados comparativos avaliando a escória.....	68

Figura 5.8	Telas com os resultados comparativos avaliando a vazão (com escória)	69
Figura 5.9	Comparação avaliando o tempo de espera (com escória e vazão de 28l/min).....	70
Figura 5.10	Comparação entre os tempos de espera (com escória)	71
Figura 5.11	Avaliação da atuação da rinsagem (com escória)	71
Figura 5.12	Avaliação da atuação do dispositivo anti-vórtice (com escória).....	72

LISTA DE TABELAS

	PÁGINA	
Tabela III.1	Propriedades físicas de algumas substâncias simuladoras (Vilela, 2002).....	14
Tabela III.2	Influência do óleo de cobertura sobre a altura do vórtice quando água é drenada por um orifício de saída de 30mm de diâmetro e com tempo de espera de 120 segundos (Koria, 1994).....	34
Tabela IV.1	Níveis dos fatores testados no modelo físico.....	52
Tabela IV.2	Combinação de níveis e fatores testados.....	53
Tabela IV.3	Combinação de níveis e fatores testados (réplica)	54
Tabela IV.4	Relação entre velocidade de lingotamento industrial e vazões.....	55
Tabela V.1	Dados da vazão (A/Vazão) em l/min, nível de água (A/Nível) em percentual e detector de escória (A/Vortex) em mV, ao longo do tempo (Time), assim como as respectivas variações percentuais a cada segundo (%Vazão,%Nível,%Vortex).....	62
Tabela V.2	Resultados do DOE para a variável resposta altura de água (%)......	64
Tabela V.3	Alturas obtidas para os principais efeitos.....	73

LISTA DE NOTAÇÃO

d : diâmetro do orifício de saída, m

D : diâmetro da panela, m

Fr = número de Froude

g : aceleração da gravidade, m/s^2

g_c : constante

H_{cr_d} : altura crítica de formação do escoamento do tipo dreno, m

H_{cr_v} : altura crítica de formação do vórtice completamente desenvolvido, m

H_i : altura inicial do líquido, m

$Q_{industrial}$: Vazão de aço da panela industrial

Q_{modelo} : Vazão de água de saída da panela em acrílico

Re : número de Reynolds

t : tempo, s

t_{esp} : tempo de espera, s

V : velocidade do fluido, m/s

$V_{s,i}$: velocidade de saída no início do esvaziamento, m/s

$V_{\theta,i}$: velocidade tangencial inicial do líquido, m/s

$V_{\theta,l}$: velocidade tangencial do líquido, m/s

$V_{\theta,cr}$: velocidade tangencial crítica, m/s

We : número de Weber

μ : viscosidade do fluido, $kg/m.s$

ρ : massa específica do fluido, kg/m^3

σ : tensão superficial, N/m

λ : escala entre o modelo e o protótipo

RESUMO

A escória é fundamental ao processo produtivo do aço, pois o protege contra reoxidação e perda térmica. Além disso, ela pode afetar a produtividade do processo assim como a qualidade do aço quando não há um controle da passagem de escória saindo da panela e indo para o distribuidor no lingotamento contínuo. Uma passagem excessiva aumenta o volume de escória no distribuidor, potencializando o ataque químico dos refratários, limitando o número de corridas por seqüência. A interrupção prematura do vazamento é utilizada para evitar a passagem de escória, porém esta ação leva a uma quantidade residual significativa de aço dentro da panela, implicando em perda no rendimento metálico e, conseqüentemente, no aumento do custo de produção do aço. A passagem descontrolada de escória também pode acarretar em emulsificação da escória com o aço, levando a um arraste de escória, contaminando o produto final de inclusões não-metálicas. Isto pode afetar de forma negativa as propriedades mecânicas do produto final.

Dentro desta dissertação, um modelo físico da panela da Belgo - Usina de Monlevade foi construído em acrílico, na escala 1:3. Neste estudo, foi avaliado o comportamento da interface aço/escória (simulados, respectivamente, por água e óleo de silicone) no momento do escoamento para o distribuidor. Foi dada ênfase ao fim do esvaziamento da panela, onde a ocorrência de formação de vórtice acentua o arraste/emulsificação do óleo de silicone com a água. Para a realização dos testes, foi executado um Planejamento De Experimentos (PDE) ou Design Of Experiments (DOE), onde os seguintes fatores foram testados em dois níveis:

- Vazão de saída da água da panela, 19 l/min ou 28 l/min;
- Tempo de espera (tempo decorrido após o enchimento da panela até o início do esvaziamento), 1 minuto ou 30 minutos;
- Uso ou não de rinsagem durante o esvaziamento da panela;
- Presença ou não do dispositivo anti-vórtice na inibição do arraste de material sobrenadante;
- Presença ou não de óleo de silicone simulando a escória.

A variável resposta foi a altura crítica, isto é, a altura de água correspondente ao momento em que o detector de escória indicou a presença do ar e/ou óleo de silicone próximo ao orifício de saída da panela (a presença do ar e/ou óleo pode ser devido ao vórtice ou escoamento do tipo dreno). É importante ressaltar que quanto mais baixo for este valor, infere-se um maior aproveitamento do aço, isto é, um maior rendimento metálico da aciaria sem afetar a qualidade do aço.

O estudo mostrou que a simulação física do esvaziamento da panela foi eficaz para identificar os parâmetros mais importantes para avaliar o vórtice e minimizar o arraste e emulsificação do ar ou óleo de silicone com a água para a válvula de saída.

Foi concluído que houve uma diferença significativa entre as alturas críticas quando se simulou o esvaziamento da panela com e sem a presença do óleo de silicone (em valores médios, 12mm e 3mm, respectivamente). Este fato é importante, pois deste modo não se pode comparar os resultados dos testes realizados somente com água com os experimentos onde há a presença de água e de um óleo sobrenadante simulando a escória. Outros fatores que mostraram efeitos significativos sobre a altura crítica foram a vazão de saída da panela e a presença do dispositivo anti-vórtice, levando em consideração a presença de óleo de silicone. Quando se compara a vazão de 19 l/min com a de 28 l/min nas mesmas condições, a altura variou de 12mm para 18mm, ou seja, a influência da alteração da vazão levou a formação do vórtice a uma altura 51% maior. Analisando a atuação do dispositivo anti-vórtice, foi verificado que o efeito da presença do dispositivo reduziu a altura crítica de 17mm para 12mm, uma diferença de quase 41%. Portanto, o desenho concebido neste estudo, onde foi visada uma peça anti-vórtice simples e funcional, provou-se eficiente para reduzir a altura de formação do vórtice.

ABSTRACT

Slag is present in the majority of the operations involved in steelmaking processes and plays a significant role in protecting steel from reoxidation. During the transfer of liquid steel from the ladle to the tundish, an inadequate slag carryover from the ladle increases the amount of slag in the tundish. This phenomenon can lead to excessive wear of the refractories of the tundish. Slag emulsification in the steel can also cause serious problems with non-metallic inclusions. To prevent these problems, it is usual to stop the teeming prematurely, leaving a considerable amount of steel in the ladle. This technique is not very satisfactory from an economic point of view.

In the present investigation, vortex formation during the transfer of liquid steel from the ladle to the tundish was studied using physical modeling. A physical model of the ladle used at Belgo-Monlevade Steelworks was built in a 1:3 scale. In this model, water was used to simulate liquid steel and silicon oil for simulating slag. A DOE (Design Of Experiments) was implemented and the effects of the following factors and levels on vortex formation were analyzed:

- Water flow rate coming out of the ladle (19 l/min or 28 l/min);
- Waiting time – the time interval between the complete filling and the start of the teeming of the ladle. (1 minute or 30 minutes);
- Air bubbling through the bottom of ladle (with or without air injection);
- Silicon oil use for simulating the slag (with or without oil);
- Anti-vortex device (with or without this device).

The response for each experiment combination was the water height (critical height) at the onset of vortex formation.

Based on the results of the present investigation, some observations can be described. The ladle teeming physical simulation has shown that it was possible to identify the most important parameters for evaluating the vortex formation (critical height) and silicon oil and water emulsification. By comparing the simulation results of water with or without silicon oil, a significant difference was found for the critical height. Tests which were used silicon oil for simulating slag had obtained 12mm. Tests that were

used only water had found 3mm. It is an important observation to highlight due to fact that simulations using only water and simulations using water and oil supernatant are not comparable. Besides, the results had indicated huge effects for water flow rate and the presence of anti-vortex device, considering the silicon oil use. By comparing water flow rate on the same parameters, the critical height was 12mm for 19 l/min and 18mm for 28 l/min, which means the water flow rate modification led to a vortex formation higher than 51%. By analyzing the effectiveness of anti-vortex, the use of this device had reduced the critical height from 17mm for 12mm. Almost 41% according to level difference. That result had shown that a singular and simple device was effective enough to reduce the critical height.

1 – INTRODUÇÃO

Dentro do fluxo de produção de uma usina integrada, o aço é transferido de um recipiente para outro na sua forma líquida; como o vazamento do conversor LD para a panela, permanecendo algum período em tratamento no forno-panela, podendo ou não ser tratado posteriormente em um desgaseificador e, finalmente, transferido para o distribuidor e para o molde da máquina de lingotamento contínuo, onde ocorrerá a sua solidificação na forma de tarugos, blocos ou placas.

O conhecimento do comportamento do fluxo de aço em pontos críticos do processo produtivo, como a transferência do aço da panela para o distribuidor, dentro do distribuidor em si e do distribuidor para o molde, é muito importante para evitar a emulsificação da escória com o aço, podendo levar a um arraste de escória, contaminando o produto final de inclusões não-metálicas. Estas inclusões podem comprometer de forma significativa as propriedades mecânicas, como por exemplo, a resistência à tração e à fadiga e tendência a rupturas durante os processos de conformação mecânica. Assim, conhecer e eliminar as origens destas inclusões é fundamental para o sucesso nas aplicações do aço.

A escória é essencial para a produção do aço, protegendo-o contra reoxidações pelo ar e controlando as perdas térmicas, além disso, capta as inclusões aumentando a limpeza do aço. Porém, uma passagem inadequada da panela para o distribuidor aumenta o volume de escória, potencializando o ataque químico dos refratários, limitando o número de corridas por seqüência.

Uma técnica usual para evitar a presença de escória da panela no distribuidor é interromper prematuramente o vazamento, porém, esta ação leva a uma quantidade residual de aço significativa na panela, implicando em perda no rendimento metálico e, conseqüentemente, no aumento do custo de produção do aço.

Atualmente, é bastante difundida a simulação do comportamento de escoamento do aço, avaliado em modelos físicos. A modelagem física é uma ferramenta poderosa para um

entendimento melhor do processo de fabricação do aço. Os modelos físicos são, geralmente, construídos em acrílico e a água é um fluido adequado para modelar o aço líquido, pois a viscosidade cinemática e as linhas de fluxo são comparáveis. Estes fatores favorecem o estudo através de modelagem física, pois se pode trabalhar em temperatura ambiente e com um baixo custo quando comparado a processos industriais. Especificamente para o modelo físico da panela, o conhecimento do esvaziamento pode indicar se há a possibilidade de implementar alguma ação para otimizar o rendimento metálico sem comprometer a qualidade do aço. Além disso, o conhecimento do comportamento de vórtices e emulsificações na panela é muito útil para se avaliar o uso de dispositivos anti-vórtices e de medidas preventivas para reduzir a ocorrência de arraste de escória, minimizando a possibilidade de macro-inclusões serem arrastadas para o distribuidor, podendo chegar até os veios, contaminando o aço.

Nesta dissertação foi construído um modelo físico da panela e o comportamento da interface aço/escória, simulados respectivamente por água/óleo, foi avaliado no momento de escoamento para o distribuidor, principalmente, no fim do esvaziamento onde a ocorrência de formação de vórtice ou escoamento do tipo dreno acentua o arraste/emulsificação da escória para o aço.

Para avaliar os parâmetros a serem testados foi executado um Planejamento De Experimentos (PDE) ou “Design Of Experiments” (DOE) com os parâmetros mais influentes citados pela literatura. A variável resposta foi a altura de água correspondente ao momento em que o detector de escória percebe o arraste do fluido sobrenadante para o orifício de saída da panela de acrílico. É importante ressaltar que quanto mais baixo for este valor, infere-se um maior aproveitamento do aço, isto é, um maior rendimento metálico da aciaria.

2 – OBJETIVOS

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Simular a drenagem da panela e estudar o comportamento do conjunto óleo de silicone e água na formação do vórtice em um modelo físico;
- Estudar os efeitos das variáveis de processo significativas;
- Avaliar os dispositivos e procedimentos para reduzir/eliminar a formação do vórtice durante a simulação do esgotamento de aço da panela.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Principais características da Belgo-Arcelor Mittal, Usina de Monlevade

A planta da Belgo, unidade de João Monlevade – MG, é uma usina integrada com capacidade de produção de 1.200.000 t/ano de fio máquina. A figura 3.1 mostra de forma sintetizada o fluxograma de produção.

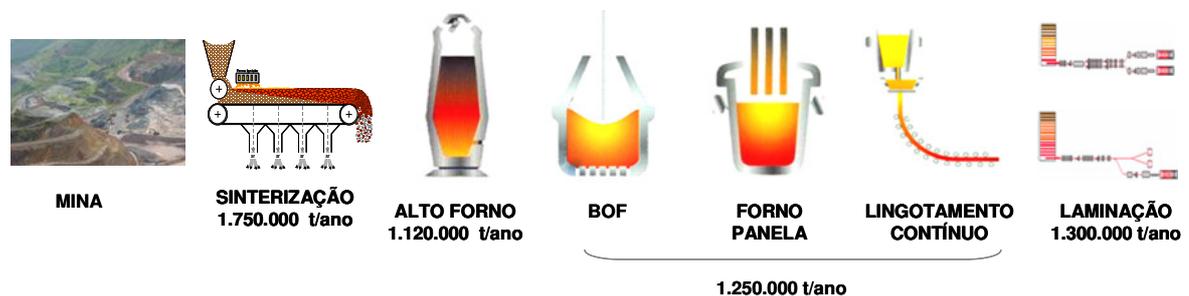


Figura 3.1: Fluxograma Usina Monlevade (CHAVES, 2006)

- **Sinterização**

O processo consiste na aglomeração de minérios de ferro finos que juntamente com adições permite a produção do sinter – componente da carga metálica destinado à alimentação do alto-forno para a produção do ferro-gusa líquido. A capacidade atual da planta é de 1.750.000 t/ano

- **Alto-forno**

Consiste num reator tubular vertical, em que a redução se verifica de maneira contínua. É o processo mais empregado para a produção de ferro gusa, através da redução da carga metálica (sinter e minério) utilizando-se o carbono como agente redutor por meio do princípio de contra-corrente (carga e gás quente).

O gusa líquido é fornecido por um único alto-forno com capacidade de 1.040.000t/ano e tem a seguinte composição química média: 4,2%C, 0,35%Si, 0,35%Mn, 0,100%P e 0,010%S.

- **Convertedores**

A aciaria conta com dois convertedores de 110t de capacidade que operam em regime “stand by”. Devido ao “mix” de aço para emprego nobre, o processo do LD tem como prática a obtenção de teores de fósforo < 100 ppm para a maioria dos aços. Essa condição implica em alguns cuidados e práticas especiais que por sua vez conferem ao processo algumas características bastante peculiares. Desde 2006, está em andamento o projeto de reestruturar toda a aciaria para o aumento da capacidade da panela para 130t por corrida.

- **Forno panela**

Estação de refino do aço líquido, equipada com eletrodos de grafite e uma abóbada refratária que acopla na panela de aço. Além da metalurgia secundária, faz o acerto da composição química e o ajuste da temperatura através dos eletrodos com utilização da energia elétrica. Todo o aço produzido segue o fluxo de produção LD, Forno panela, lingotamento contínuo. Todo o transporte entre os processos é feito através de uma panela refratária.

- **Máquina de lingotamento contínuo**

Equipamento que se encarrega da transformação do aço líquido em barras de aço denominadas tarugos. O processo de solidificação do aço é conseguido através do vazamento do aço líquido em moldes de cobre refrigerados a água.

A máquina de lingotamento contínuo é de tecnologia “Paul Wurth” e tem seis veios com seção de 155 mm quadrados equipados com agitadores eletromagnéticos. As velocidades de trabalho variam de 1,8m/min até 3,2m/min, dependendo de cada tipo de aço. Como toda a produção é absorvida apenas por uma máquina de lingotamento, também são necessários certos cuidados e práticas especiais para alcançar, além da qualidade, uma estabilidade operacional que permita o fluxo contínuo de produção (Penna, 2005).

- **Laminadores**

Equipamentos destinados à produção de fio-máquina através de conformação a quente. São dois laminadores, o nº 1 com capacidade de produção de 650.000 t/ano de fio-máquina nas faixas de bitola de 5,5 a 16,0mm e o nº 2 com capacidade de produção de 550.000 t/ano de fio-máquina nas faixas de bitola de 5,5 a 32,0mm.

- **Mix de produção**

A maior parte da produção da Usina de Monlevade é destinada a aplicações especiais, atendendo diversos segmentos: cordoalhas para pneus, molas e hastes de suspensão, parafusos e fixadores em geral, eletrodo, lã de aço, perfis laminados, cabos para concreto protendido e cabos de aço em geral. Desse “mix”, o principal é a cordoalha para pneu (“Steel Cord”), que atualmente representa em torno de 35% do total do fio máquina produzido, sendo boa parte destinada à exportação. Como o maior volume é utilizado em aplicações críticas (figura 3.2), torna-se necessária a garantia da qualidade do produto final através de um processo de produção eficaz e confiável.

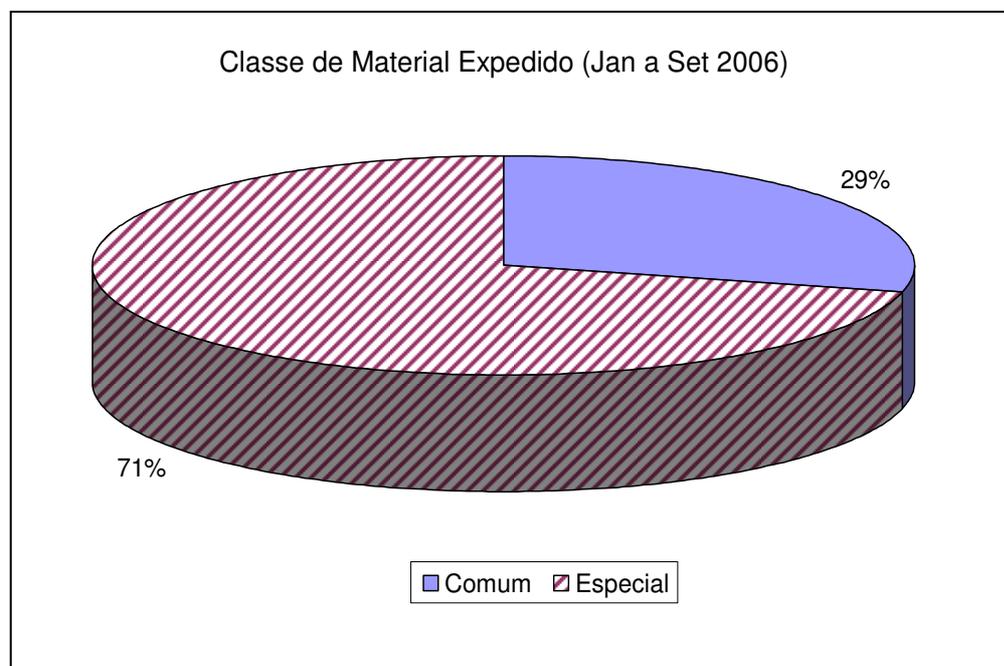


Figura 3.2: Classe de material expedido pela Belgo Monlevade.

3.2 – Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo é responsável pela transformação de um metal da sua forma líquida para a sólida de uma forma contínua. A figura a seguir mostra um desenho esquemático de uma máquina de lingotamento contínuo de aços (Thomas, 2001).

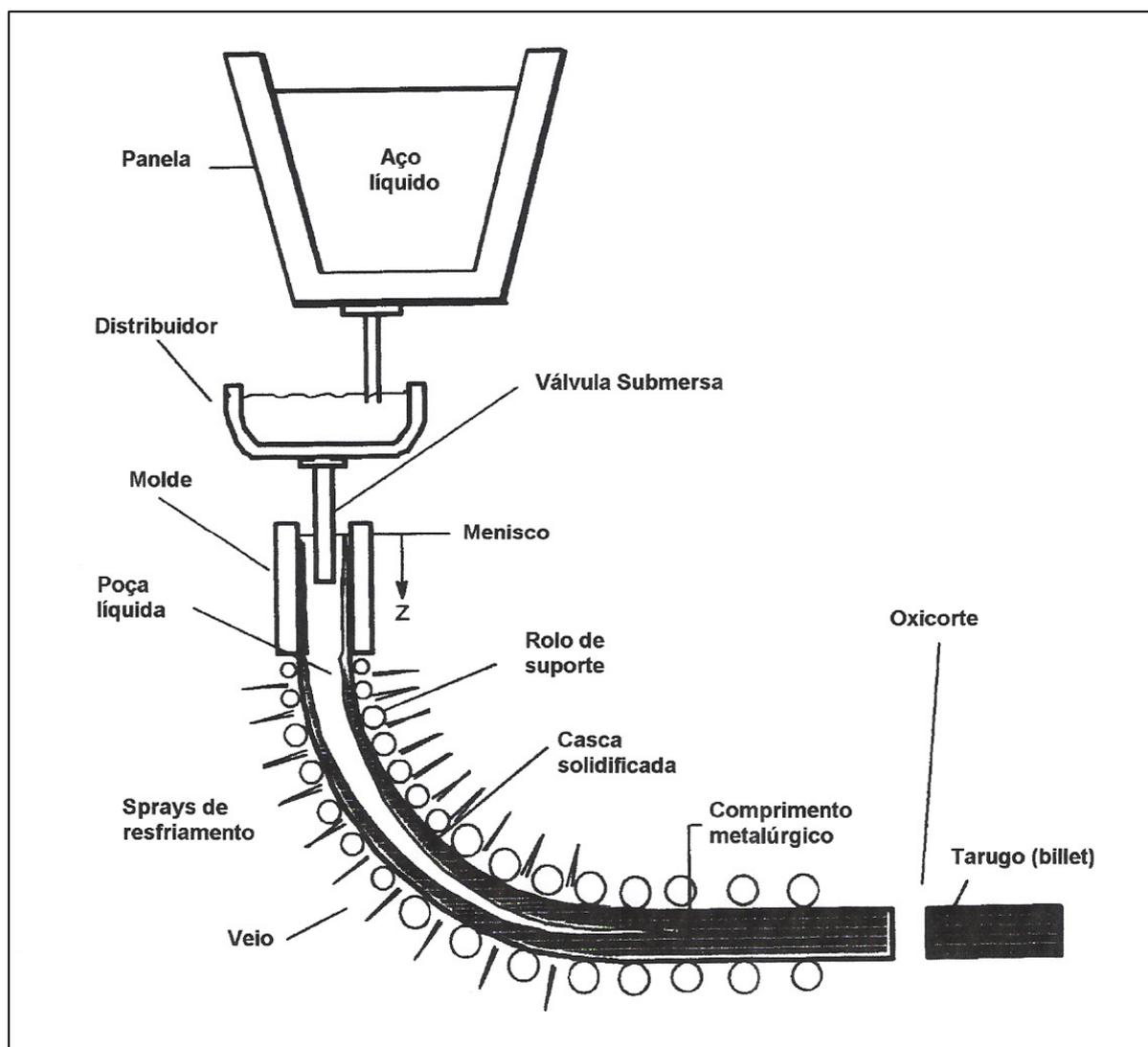


Figura 3.3 – Vista esquemática do processo lingotamento contínuo (Thomas, 2001).

A panela transporta o aço líquido até a máquina de lingotamento contínuo e serve também como reservatório durante o lingotamento. Dentro da panela, o aço é protegido por uma camada de escória com composição química, fluidez e temperatura adequadas

ao processo de fabricação. A escória da panela deve limitar a reoxidação do aço, atuando como uma barreira entre o ar e o aço líquido, além de capturar as inclusões geradas nas etapas de produção e minimizar as perdas de temperatura do aço.

O distribuidor é o recipiente intermediário entre a panela e o molde, atuando como um reservatório de aço, visando manter a continuidade do lingotamento, em especial nas trocas de panelas. O distribuidor também direciona o aço líquido para os veios e pode ser usado para promover a remoção de inclusões. Melhoria na limpeza do aço pode ser obtida através de otimização do seu fluxo no interior do distribuidor.

O molde é o local onde o aço líquido entra em contato com uma lingoteira de cobre refrigerada a água. Isto irá promover o resfriamento primário, ocorrendo a formação da pele solidificada. É importante ressaltar que a espessura desta pele na saída do molde tem que ser suficiente para suportar o líquido remanescente para posterior resfriamento via sprays.

O sistema de sprays de água, também denominado de resfriamento secundário, dá continuidade ao processo de resfriamento do metal e, conseqüentemente, ao aumento da pele solidificada. A vazão de água dos sprays deve ser dimensionada para uma extração de calor uniforme e suficiente para garantir a solidificação total do material no momento do corte, que pode ser realizado via oxicorte (Costa Neto, 1997).

Segundo Hammerschmid et alii (1984), durante a sua fabricação, o aço na forma líquida passa por recipientes como convertedor, panela, distribuidor e molde. O arraste de escória entre estes recipientes deve ser minimizado, pois:

- Várias reações químicas na panela podem ser influenciadas pela escória do convertedor;
- O acúmulo de escória no distribuidor pode levar a problemas no seqüencial de corridas no lingotamento contínuo;
- O arraste de escória para o molde pode comprometer a qualidade do aço e pode levar a perfurações de veios.

Devido à formação de vórtices no metal líquido, tem-se alguma dificuldade em reter as escórias nos recipientes citados anteriormente. A escória pode ser transportada para baixo por vórtices, mesmo a consideráveis profundidades de aço líquido.

Durante o período de troca de panelas, a limpidez do aço não permanece constante, em virtude da contaminação pelo arraste de escória provenientes da panela, do distribuidor, do molde e da geração de produtos de reoxidação. O arraste de escória constitui o principal fator para a contaminação do aço líquido no molde, uma vez que o volume de escória acumulado no distribuidor eleva-se com a seqüência de panelas. Este grau de contaminação varia de usina para usina (Gandra, 2002).

A necessidade de prevenir o arraste e emulsificação de escória é para garantir a produção de um aço com alta limpidez interna, pois a presença de inclusões maiores que 50 μm leva a uma redução drástica na resistência à fadiga e dificulta a conformação mecânica do aço. Frequentemente, as inclusões são classificadas como endógenas e exógenas. Inclusões que são formadas devido à desoxidação, reoxidação e dessulfuração do aço são denominadas endógenas, enquanto que as provenientes dos arrastes de escória são classificados como exógenas. Um possível arraste de escória das panelas tem grande chance de flotar até a superfície do aço no distribuidor e não teria contribuição significativa para a formação de inclusões exógenas, porém, já foi verificado que o arraste de escória da panela que vai para o distribuidor era fonte de defeitos em algumas usinas siderúrgicas (Sankaranarayanan, 1994).

Além da formação de vórtices no escoamento da panela, Lin et alii (2005) e Morales et alii (2005) também evidenciaram que há formação de vórtice quando se tem um nível baixo de aço líquido no distribuidor, podendo arrastar quantidades significativas de escória para o molde, principalmente no começo da primeira corrida, durante as trocas de panelas e o final da última corrida.

Uma das formas de estudar o arraste de escória envolve a utilização de modelos físicos, uma vez que este tipo de estudo diretamente no processo industrial é difícil e oneroso.

3.3 – Simulação Física de Processos Industriais

A utilização de modelos físicos no estudo de processos siderúrgicos vem sendo feita com sucesso já há vários anos. Estes estudos ganharam importância com o desenvolvimento dos processos de refino secundário e do lingotamento contínuo. Um grande número de estudos com modelos físicos, em escala reduzida ou não, vem sendo realizado nessa área para entender e quantificar os fenômenos e a influência de variáveis operacionais na otimização dos processos (Vilela, 2002).

O modelamento físico da panela possibilita, por exemplo, o entendimento das condições de escoamento e homogeneidade química e térmica, assim como dos processos de transferência de massa das reações metal-escória que ocorrem durante o tratamento de agitação do aço líquido. Já com relação aos modelos físicos de distribuidor e molde, o conhecimento da evolução do escoamento de aço líquido assim como a distribuição dos tempos de permanência do fluido no reator é de fundamental importância para melhorar a eficiência de flotação das inclusões e controle do arraste e/ou emulsificação de escória visando uma melhoria da qualidade do produto (Vilela, 2002).

Para que os modelos físicos forneçam resultados adequados, alguns critérios de similaridade devem ser atendidos.

3.3.1 – Critérios de similaridade

Para se construir um modelo físico, todas as possíveis variáveis existentes devem ser analisadas, bem como as leis que regem suas interações. No modelo físico de um processo, ou de partes inerentes a um processo mais amplo, deve-se sempre buscar o emprego de materiais mais fáceis de manipular, considerando que estes devem admitir modificações, ou seja, apresentar flexibilidade de trabalho durante a modelagem. Outra preocupação que se deve ter é em relação à facilidade de medições, bem como a confiabilidade de tais medidas, aliadas a um baixo custo, de forma a viabilizar o projeto como um todo. Exemplos de modelagem física incluem a modelagem de panelas com

água rinsadas com ar, sistemas panela/distribuidor e distribuidor/molde em lingotamento contínuo. Em muitos destes casos, o aço líquido é representado pela água à temperatura ambiente, pois a sua viscosidade cinemática é da mesma ordem de grandeza do aço na temperatura no qual ele é processado. (Gandra, 2002).

A construção e desenvolvimentos de experimentos em um modelo físico fundamentam-se em certas regras ou critérios de similaridade, que devem ser respeitados para que o modelo represente o protótipo industrial.

Um resumo dos critérios de similaridade é apresentado a seguir (Vilela, 2002):

- Similaridade Geométrica: é a similaridade das formas, ou seja, a razão de qualquer dimensão do protótipo é correspondente à do modelo. Esta razão é denominada fator de escala;
- Similaridade Dinâmica: representa a similaridade de forças (de inércia, pressão, viscosas, gravitacionais, tensão superficial, elásticas e eletromagnéticas) entre os sistemas. Normalmente elas são determinadas a partir da igualdade de números adimensionais como, por exemplo, o número de Froude (Fr), o número de Reynolds (Re) e o número de Weber (We);
- Similaridade Térmica: é a similaridade entre as taxas de transferência de calor do protótipo e do modelo;
- Similaridade Química: estabelece as condições necessárias para que a taxa das reações químicas em qualquer parte do modelo seja proporcional à taxa da mesma reação, no mesmo tempo e no mesmo local do protótipo.

Para o presente estudo, as similaridades geométricas e dinâmicas são as mais relevantes.

Os números adimensionais listados acima são definidos através das seguintes relações:

$$\text{Re} = \frac{L \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (3-1)$$

onde:

Re : número de Reynolds;

L : comprimento característico, definido em função do sistema em estudo, m ;

V : velocidade do fluido, m/s;

ρ : massa específica do fluido, kg/m³;

μ : viscosidade do fluido, kg/m.s.

$$Fr = \frac{V^2}{g \cdot L} \quad (3-2)$$

onde:

Fr : número de Froude;

V : velocidade do fluido, m/s;

g : aceleração da gravidade, m/s²;

L : comprimento característico, m.

$$We = \frac{L \cdot V^2 \cdot \rho}{\sigma} \quad (3-3)$$

onde:

We : número de Weber;

L : comprimento característico, m;

V : velocidade do fluido, m/s;

ρ : massa específica do fluido, kg/m³;

σ : tensão superficial, N/m.

Em modelos de escala plena (1:1), quando se emprega água para simular o aço líquido no estudo de escoamento, é possível fazer com que os números de Froude e Reynolds do modelo e do equipamento industrial sejam similares para que se possa realizar a transferência direta dos resultados. No caso do modelamento físico em escala reduzida, isso não é possível. Neste caso, tem-se optado por satisfazer a similaridade baseada no número de Froude entre o modelo e protótipo, sendo o número de Reynolds desconsiderado (Vilela, 2002).

Andrzejewski et alli (1987) avaliaram os últimos estágios de esvaziamento da panela em um modelo físico, escala 1:1, com altura da parede reduzida, para investigar o

comportamento do arraste de escória. O diâmetro interno da panela era de 3000mm, com altura máxima de enchimento de 300mm, altura suficiente para simular as últimas 15 toneladas de aço na panela. Assim como a panela, todo o sistema de válvula gaveta foi construído na escala 1:1. Utilizou a similaridade entre os números de Froude e Reynolds para o modelo.

Sankaranarayanan (2002), utilizou o fator de escala de 0,427 para montar duas panelas com diâmetros de 495 e 1160mm, assim como para as válvulas que eram geometricamente similares ao desenho industrial. Neste trabalho, foi feita uma análise dimensional, onde se tem um líquido passando por um orifício localizado no centro do fundo de uma panela. Tem-se que:

$$H_{cr,v} = f(H_i; V_{\theta i}; d; D; \rho; \mu; g)$$

Onde:

$H_{cr,v}$: altura crítica de formação do vórtice, m;

H_i : altura inicial do líquido, m;

$V_{\theta i}$: velocidade tangencial inicial do líquido, m/s;

d : diâmetro do orifício de saída, m;

D : diâmetro da panela, m;

ρ : massa específica do fluido, kg/m³;

μ : viscosidade do fluido, kg/m.s;

g : aceleração da gravidade, m/s².

Utilizando o teorema π de Buckingham e usando H_i , ρ e g como as variáveis comuns, têm-se cinco grupos adimensionais:

$$\pi_1 = \frac{H_{cr,v}}{H_i} \quad (3-4); \quad \pi_2 = \frac{d}{H_i} \quad (3-5); \quad \pi_3 = \frac{D}{H_i} \quad (3-6)$$

$$\pi_4 = \frac{V_{\theta,i}}{(g.H_i)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{V_{\theta,i}}{V_{s,i}} \quad (\text{Numero de Froude}) \quad (3-7)$$

$$\pi_5 = \frac{\rho.H_i(g.H_i)^{\frac{1}{2}}}{\mu} \approx \frac{\rho.V_{s,i}.H_i}{\mu} \quad (\text{Numero de Reynolds}) \quad (3-8)$$

Onde $V_{s,i}$ é a velocidade de saída no início do esvaziamento. Tem-se em π_1 a variável dependente primária; π_2 e π_3 representam a relação de similaridade geométrica que pode ser combinada em uma só, $\pi_2 / \pi_3 = d/D$; π_4 representa a relação da velocidade tangencial inicial e a velocidade de saída no início do esvaziamento, que tem a forma do número de Froude. O número adimensional de Reynolds “ π_5 ” foi negligenciado no estudo.

3.3.2 – Fluídos simuladores

São várias substâncias que têm sido utilizadas para simulação com modelos físicos, sendo que não existe nenhuma que permita obedecer simultaneamente a todas as relações de similaridade. A água tem sido o fluido de uso comum para simular o aço líquido, pois suas viscosidades cinemáticas são muito similares. A tabela III.1 mostra as relações de viscosidades e densidades entre alguns fluidos muito utilizados em modelos físicos que simulam o aço e a escória do processo industrial (Vilela, 2002).

Tabela III.1 – Propriedades físicas de algumas substâncias simuladoras (Vilela, 2002).

Propriedade	Modelo Físico	Equipamento Industrial
Viscosidade Cinemática (m ² /s)	Água (20°C) = 1.10^{-6}	Aço (1600°C) = 9.10^{-7}
Razão de Viscosidades	Água/óleo de silicone = 0,02	Aço/escória = 0,03 – 0,08
Razão de densidades	Querosene/água = 0,7	Escória/aço = 0,4

Para o estudo do arraste e, conseqüente, emulsificação de escória na panela, distribuidor e molde, as substâncias mais empregadas são óleo de silicone e querosene pigmentado. Para o estudo em modelos físicos de painéis agitadas por meio de gás são utilizados vários sistemas gás-líquido (água-ar) e gás-metais fundidos (ar-mercúrio, nitrogênio-liga de Wood) para o estudo do escoamento do líquido e comportamento das bolhas (Vilela, 2002).

Na avaliação do mecanismo de formação de vórtice e do arraste de escória durante a etapa de transferência de aço líquido panela/distribuidor utilizando modelo físico, Pimenta et alii (1997) utilizaram água e óleo diesel para simular o aço e a escória.

É usual a utilização da denominação de fluido primário para aquele que se encontra em maior volume e fluido secundário para o outro. Hammerchmid et alii (1984), estudaram a formação de vórtices em três panelas com dimensões distintas. Em uma panela utilizou o mercúrio como o líquido primário e água em outras duas panelas. Sankaranarayanan (1994) fez alguns experimentos utilizando água e óleo de canola. Koria (1994) avaliou a influência das viscosidades do óleo de parafina e um modelo de escória solidificada (termocola) na altura crítica de formação do vórtice.

A seguir serão discutidos aspectos relativos à formação de vórtices.

3.4 – Mecanismo de Formação de Vórtice

Para as etapas de esvaziamento de panelas, foram determinados dois tipos de escoamento, vórtice e dreno, mostrados a seguir (Andrzejewski et alii, 1987):

- No estágio inicial do vazamento, o movimento da superfície é predominantemente vertical e componentes de velocidade em outras direções são mínimas. Ocasionalmente, turbilhonamentos com pequenos diâmetros são observados na superfície, movimentando-se em volta do canal de saída. Em alguns casos estabilizam-se e há o aumento do seu diâmetro, formando um cordão central até o fundo. Neste instante, ocorre a formação do escoamento tipo vórtice. Um pré-requisito para a formação de um vórtice é de que, quando o líquido é drenado de um recipiente, sempre haja um movimento rotacional. O vórtice é sempre associado a uma rotação, mas nem todo movimento rotacional constitui um vórtice. Por definição, partículas individuais do líquido num vórtice verdadeiro irão girar em torno de um eixo com velocidade diferente de zero. A figura 3.4 (a) ilustra o escoamento vórtice;

- Próximo ao estágio final do vazamento, quando a vazão no orifício se torna menor que a capacidade de saída, determinada pela geometria do orifício e pela pressão ferrostática, ocorre a mudança para o escoamento tipo dreno. Este fenômeno pode ou não ser precedido pelo vórtice. Sob estas condições, o canal não pode ser inteiramente preenchido e a passagem de escória se torna inevitável. A figura 3.4 (b) ilustra o escoamento dreno.

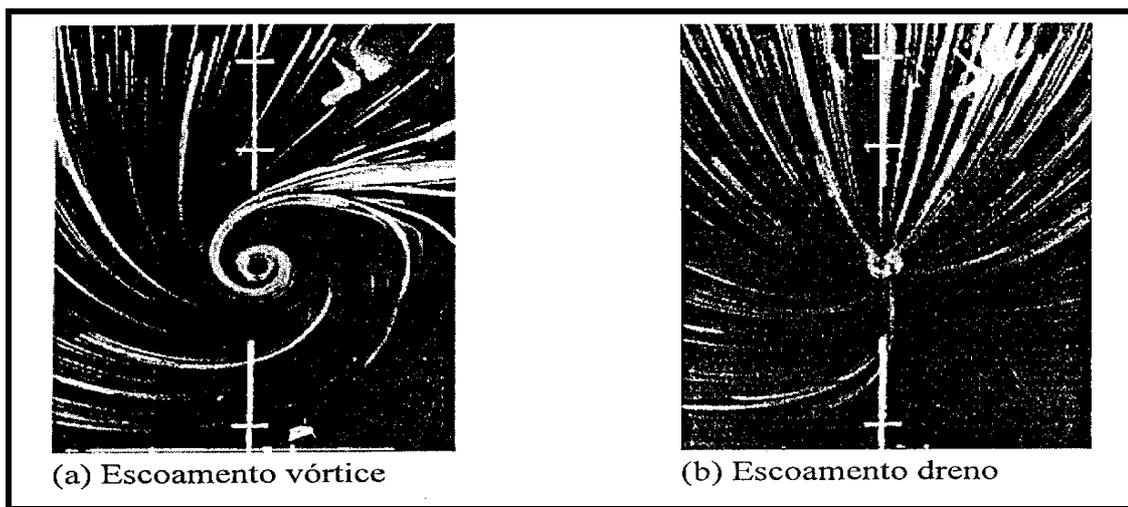


Figura 3.4 – Tipos de escoamento em um orifício localizado no fundo de uma panela (Andrzejewski et alii, 1987).

Sankaranarayanan (1994) utilizou a nomenclatura de escoamento do tipo funil com vórtice e do tipo funil sem vórtice para o escoamento tipo vórtice e tipo dreno, respectivamente.

3.4.1 – Formação do escoamento do tipo vórtice

O escoamento do tipo vórtice é ilustrado na figura 3.5, onde se tem quatro estágios (Sankaranarayanan 1994):

- Quando o líquido está em um nível relativamente alto e/ou a velocidade tangencial residual é baixa, um pequeno redemoinho pode ser formado na superfície (Figura 3.5.a);

- Quando o nível do líquido decresce ou a velocidade tangencial residual aumenta, o redemoinho tende a se estender para baixo na direção do orifício por onde o líquido está saindo do recipiente, formando um pequeno vórtice na superfície (Figura 3.5.b);
- O pequeno vórtice na superfície tende a se transformar num vórtice maior, apresentando velocidades tangenciais maiores próximo ao orifício de saída do líquido (Figura 3.5.c);
- Finalmente, o vórtice se desenvolve completamente podendo arrastar o fluido sobrenadante (Figura 3.5.d).

No caso de um bombeamento, o vórtice completamente desenvolvido será de baixo para cima como ilustra a Figura 3.5.e, sendo que os três primeiros estágios são iguais.

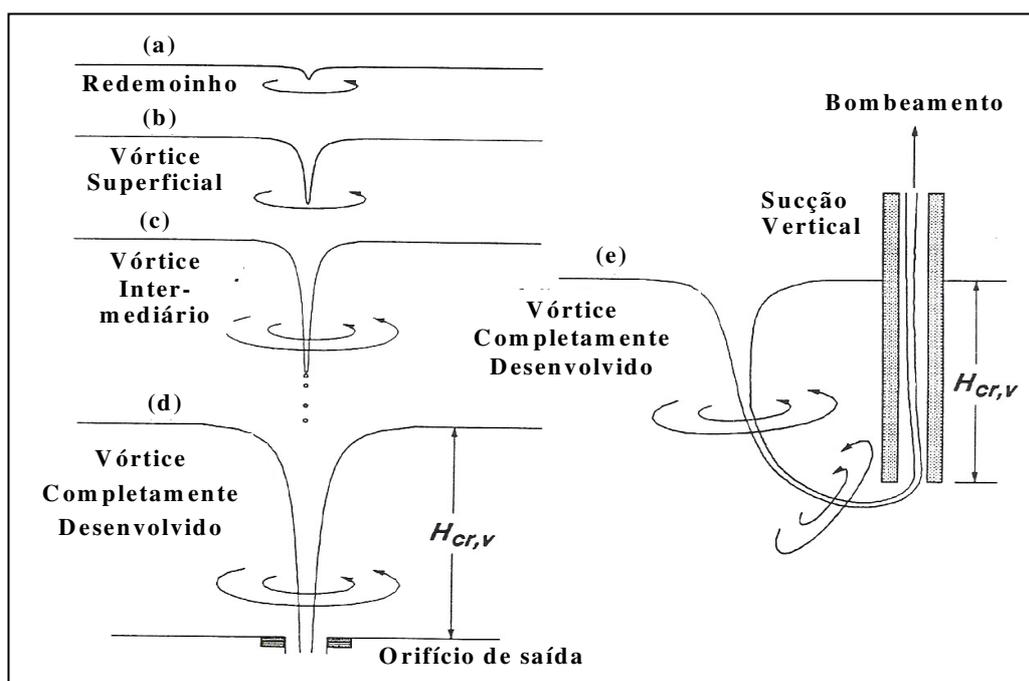


Figura 3.5 – Estágios do escoamento do tipo vórtice (Sankaranarayanan, 1994)

Vale ressaltar que o sentido da rotação do vórtice será sempre no mesmo sentido da velocidade residual tangencial no recipiente. Pode-se comprovar facilmente em experimentos onde se induz o líquido em um movimento rotacional no sentido horário ou anti-horário e observando a formação do vórtice. No processo industrial, a velocidade residual tangencial do fluido será função das condições de enchimento e

vazamento dos recipientes, gradientes de temperatura, agitação eletromagnética, dentre outros.

Algumas características do escoamento tipo vórtice são ilustradas na figura 3.6, onde se observa que altura crítica de formação do vórtice completamente desenvolvido ($H_{cr,v}$) pode ser várias vezes maiores que o diâmetro do orifício de saída (d). A mesma figura ilustra que é necessária uma velocidade tangencial do líquido ($V_{\theta,l}$) maior que uma velocidade tangencial crítica ($V_{\theta,cr}$) para iniciação de um redemoinho e posteriormente o vórtice completamente desenvolvido. O fluido sobrenadante (no caso da figura é o ar) tende a ser arrastado para a direção do orifício de saída num formato de espiral-hélice bem simétrico a um eixo axial.

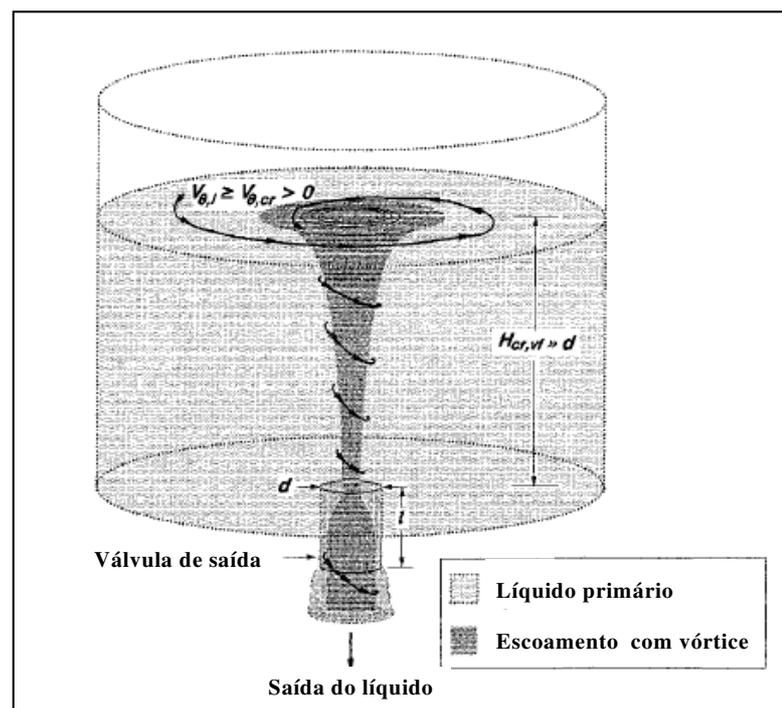


Figura 3.6 – Características do escoamento do tipo vórtice (Sankaranarayanan, 1994)

3.4.2 – Formação do escoamento do tipo dreno

Características de um escoamento do tipo dreno são ilustradas na figura 3.7. Nesta figura, $H_{cr,d}$ representa a altura crítica na qual o fluido sobrenadante é arrastado para o orifício de saída no esvaziamento de um recipiente no qual o líquido primário não apresentava movimento rotacional. Normalmente, $H_{cr,d}$ é da ordem do diâmetro “ d ” do orifício de saída. Neste caso, o fluido sobrenadante tende a ser arrastado para a saída sem movimento rotacional. Os testes para avaliar a formação do escoamento tipo dreno são relativamente mais simples que para avaliação do tipo vórtice pois, permitindo que o líquido permaneça em um período significativo em repouso, garante-se que não há velocidades tangenciais residuais significativas atuando no líquido. É importante registrar que no processo industrial é quase impossível evitar as velocidades tangenciais residuais devido às restrições de tempo de processamento do aço (Sankaranarayanan, 1994).

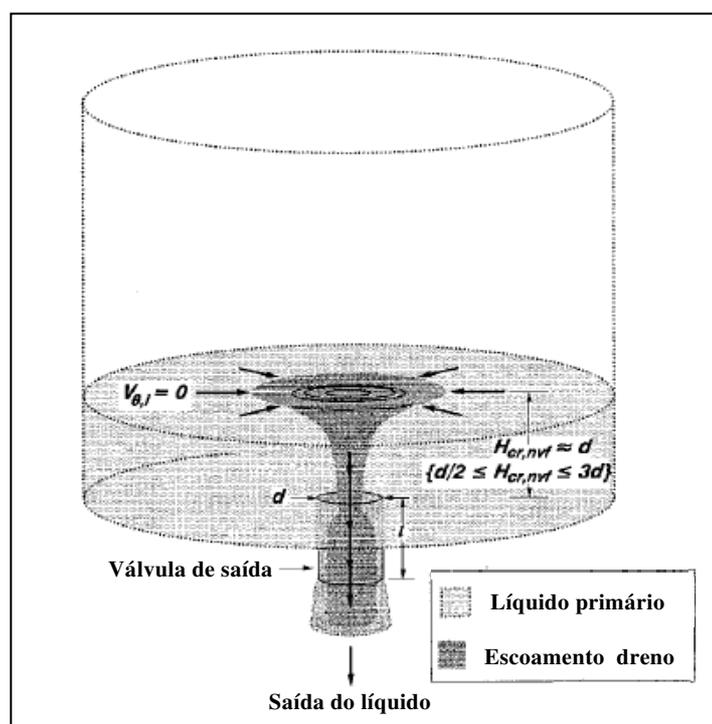


Figura 3.7 – Características do escoamento do tipo dreno (Sankaranarayanan, 1994)

3.5 – Regimes de Escoamento no Esvaziamento de um Recipiente

Como citado anteriormente, o arraste de um fluido sobrenadante como a escória pode ser decorrente de um escoamento tipo vórtice e/ou do tipo dreno. Em todos os esvaziamentos ocorrem os escoamentos do tipo dreno, pois em determinado momento, a vazão do fluido é menor que a vazão nominal do orifício de saída (Andrzejewski, 1987).

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

- 1- Escoamento do tipo orifício cheio;
- 2- Escoamento do tipo vórtice;
- 3- Escoamento do tipo dreno;
- 4- Escoamento do tipo transbordamento.

À esquerda da Figura 3.8 é ilustrado o escoamento do tipo orifício cheio, onde há um preenchimento de todo o volume do canal de saída, enquanto que no escoamento do tipo transbordamento, à direita da Figura 3.8, o orifício de saída está apenas parcialmente preenchido pelo líquido. O escoamento do tipo transbordamento ocorre para níveis bem baixos do líquido, isto é, para alturas inferiores à metade do diâmetro do orifício de saída “ d ”. Os escoamentos do tipo vórtice e do tipo dreno já foram ilustrados nas figuras 3.6 e 3.7. Vale ressaltar que no processo industrial, o escoamento do tipo transbordamento não ocorrerá, uma vez que, normalmente, no momento do fechamento da panela, há uma quantidade considerável de aço e escória.

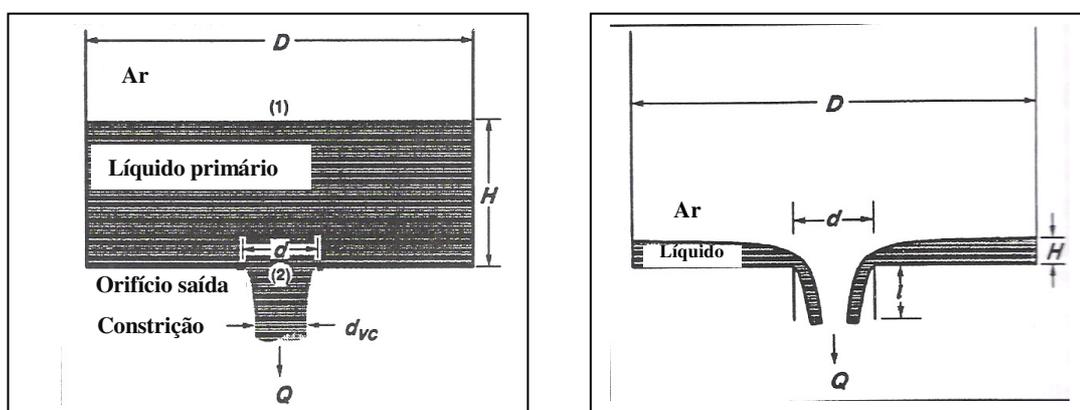


Figura 3.8 – Características do escoamento do tipo orifício cheio à esquerda e do tipo transbordamento à direita (Sankaranarayanan, 1994).

3.6 – Fatores que Afetam a Formação dos Vórtices

Neste tópico serão apresentados e discutidos os efeitos de alguns parâmetros na formação do escoamento do tipo dreno e no escoamento do tipo vórtice, avaliados nos principais experimentos citados na literatura técnica.

3.6.1 – Tempo de espera / Velocidade tangencial inicial

O tempo de espera é definido como o tempo decorrido entre o fim do enchimento e o início do esvaziamento da panela.

Andrzejewski et alii (1987) utilizaram um sistema de enchimento que permitia a entrada lateral da água, de forma a se ter um movimento rotacional do fluido dentro da panela. O conjunto de saída da água era ajustado no fundo da panela de forma centralizada ou próxima à parede. Este trabalho mostrou que se pode ter o escoamento do tipo dreno precedido ou não do escoamento do tipo vórtice, dependendo do tempo de espera.

Nas figuras 3.9 e 3.10 têm-se na abscissa os tempos de espera (s) e em uma ordenada a altura do fluido (mm) e na outra a taxa de esvaziamento (m^3/min). Para estimar a altura do fluido foi utilizado um sistema de medição de pressão de alta resolução no fundo da panela. O sistema foi conectado a um computador, onde se tinha uma medição instantânea da taxa de esvaziamento (vazão de esvaziamento).

Quando o tempo de espera é próximo a 30s (Figura 3.10), tem-se uma dissipação das velocidades residuais tangenciais que anula a ocorrência do escoamento do tipo vórtice, mas quando o tempo de espera é próximo a 10s (Figura 3.9), há uma tendência de se ter o escoamento do tipo vórtice precedendo o escoamento do tipo dreno. Pode-se observar que, quando ocorre um escoamento do tipo dreno ou um escoamento do tipo vórtice, há uma variação na vazão de escoamento da água conforme ilustram as figuras 3.9 e 3.10.

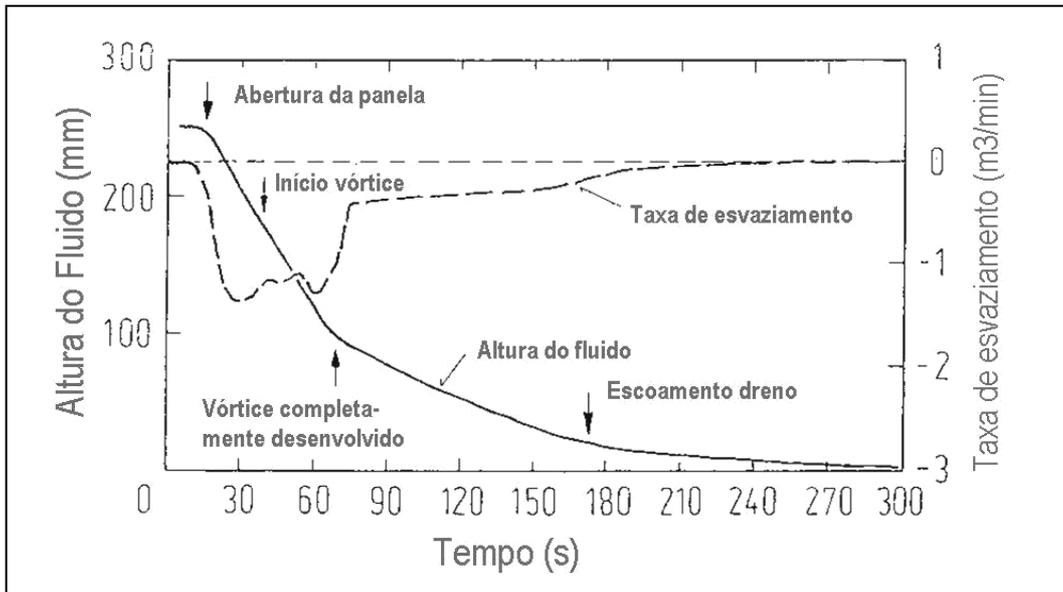


Figura 3.9 – Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 10 segundos de tempo de espera (Andrzejewski et alii, 1987).

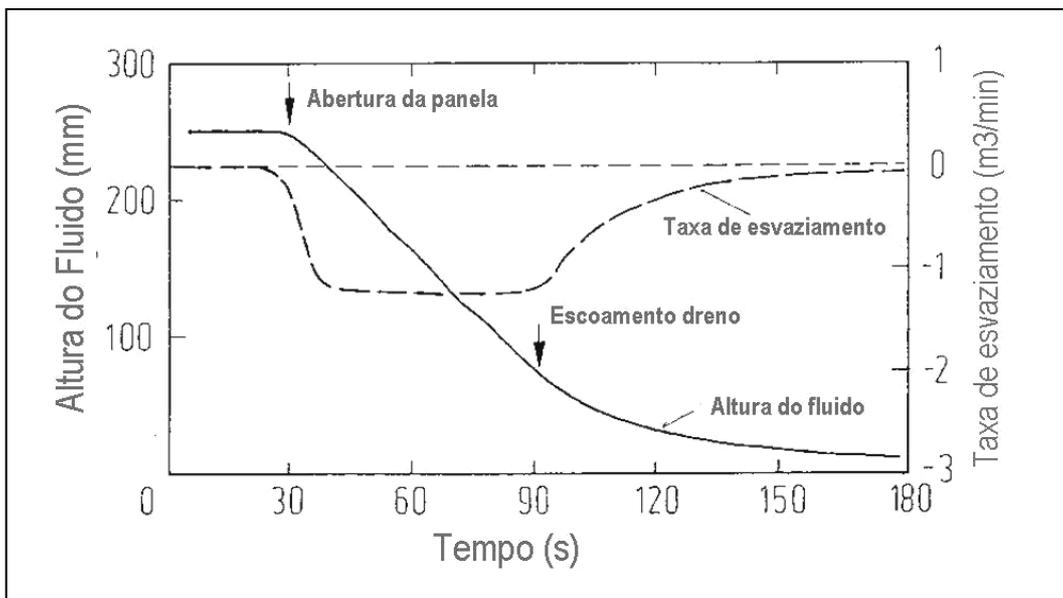


Figura 3.10 – Altura e vazão do líquido ao longo do tempo com abertura em torno de 30 segundos de tempo de espera (Andrzejewski et alii, 1987).

Os resultados de Pimenta et alii (1997) mostraram que para orifícios posicionados no centro da panela, com o aumento do tempo de espera, tem-se uma diminuição da altura de líquido na qual o vórtice é formado (quanto maior o tempo de espera, menor o movimento de rotação do banho).

Sankaranarayanan (2002) utilizou o tempo de espera para avaliar a influência do movimento de rotação residual do fluido na formação do vórtice. Um ensaio mostrou como a velocidade tangencial “ V_θ ” decai com o aumento do tempo de espera “ t_{esp} ” (Figura 3.11).

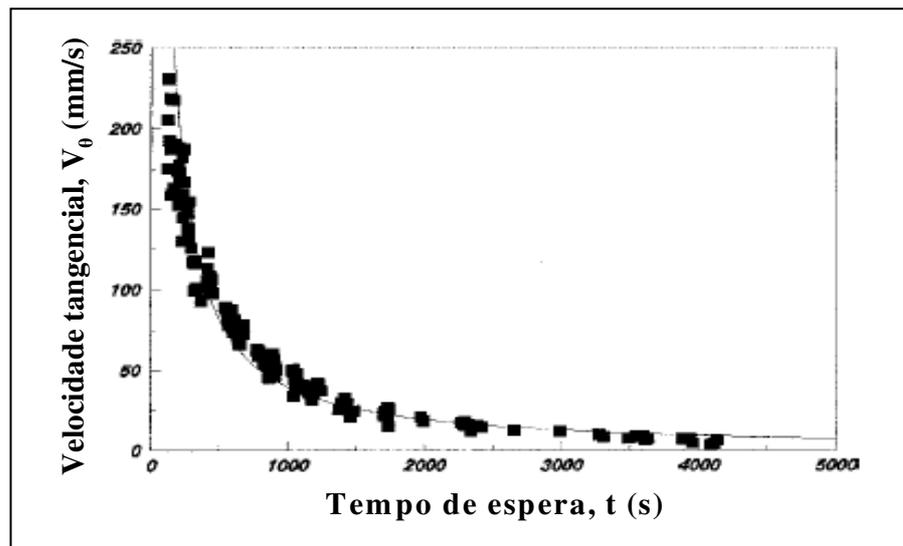


Figura 3.11: Medição do decaimento da velocidade tangencial com o tempo - D:1160mm; H_i : 995mm - (Sankaranarayanan, 2002).

É importante citar que o comportamento do decaimento da velocidade tangencial com o tempo de espera é característico para cada panela, pois determinadas características, como o desenho e configuração interna da panela, além da quantidade de fluido em movimento, pode alterar de forma significativa a correlação entre estes dois parâmetros.

Sankaranarayanan (2002), no teste para avaliar a altura de início de formação do vórtice, propôs a utilização de um parâmetro adimensional denominado de Número de Vórtice (“Vortex Number”) ou VN, dado pela relação:

$$VN = \frac{V_{\theta,i} \cdot D}{V_{s,i} \cdot d} \quad (3-9)$$

Onde:

$V_{\theta,i}$: velocidade tangencial inicial (mm/s);

D : diâmetro da panela (mm);

$V_{s,i}$: velocidade tangencial de saída no início de esgotamento (mm/s);

d : diâmetro do orifício de saída (mm).

A figura 3.12 mostra o comportamento da relação adimensional, altura crítica por altura inicial (H_{cr} / H_i) com o Número de Vórtice (VN), para uma situação de redemoinho (“dimple”).

Conforme ilustra a figura 3.12, para valores baixos de VN (até aproximadamente 0,05), não se verificou a presença de redemoinhos e, conseqüentemente, de vórtices. Com o aumento de VN, ocorreram as formações de redemoinhos. Por exemplo, para um valor de VN de 0,3, o redemoinho aconteceu próximo a 80% da altura inicial. Para a faixa de VN entre 0,05 e 3, foi verificado que houve um aumento significativo da altura em que o redemoinho ocorria. A validade da análise dimensional é confirmada uma vez que todos os dados ajustam bem à curva, independente do tamanho da panela testada, 495mm de diâmetro (círculos preenchidos) ou 1160mm de diâmetro (triângulos preenchidos).

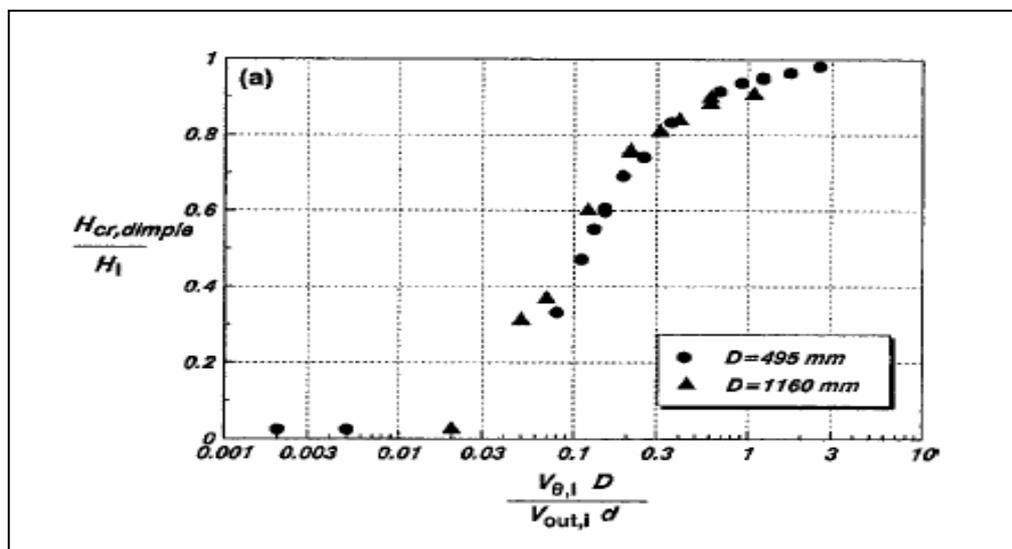


Figura 3.12: Altura crítica vs Número de Vórtice para a formação de redemoinho (Sankaranarayanan, 2002).

A partir da análise da figura 3.12, podem-se estabelecer duas faixas para VN:

$0 < VN < 0,05$: situação sem a formação de redemoinho;

$VN > 0,05$: situação de formação de redemoinho.

O Número de Vórtice ou Vortex Number (VN) pode ser interpretado como um parâmetro do momento angular do líquido na saída da panela. Quanto menor for o valor de VN, menor será a possibilidade para a formação do vórtice.

A figura 3.13 mostra o comportamento da relação adimensional, altura crítica por altura inicial ($H_{cr, vf} / H_I$) com o Número de Vórtice (VN), para uma situação de formação de vórtice.

Assim como para a situação de redemoinhos, mostrada na figura 3.12, a condição para vórtices, ilustrada na figura abaixo, mostra que para Vortex Number até 1, rapidamente, se atingem valores de 90% para a relação entre alturas. Isto reforça a forte correlação entre a velocidade tangencial inicial e a altura crítica de formação do vórtice. Por outro lado, para valores de VN acima de 1 quase não há alteração na altura crítica. A validade da análise dimensional é confirmada novamente, uma vez que todos os dados ajustam bem à curva, independente do tamanho da panela testada.

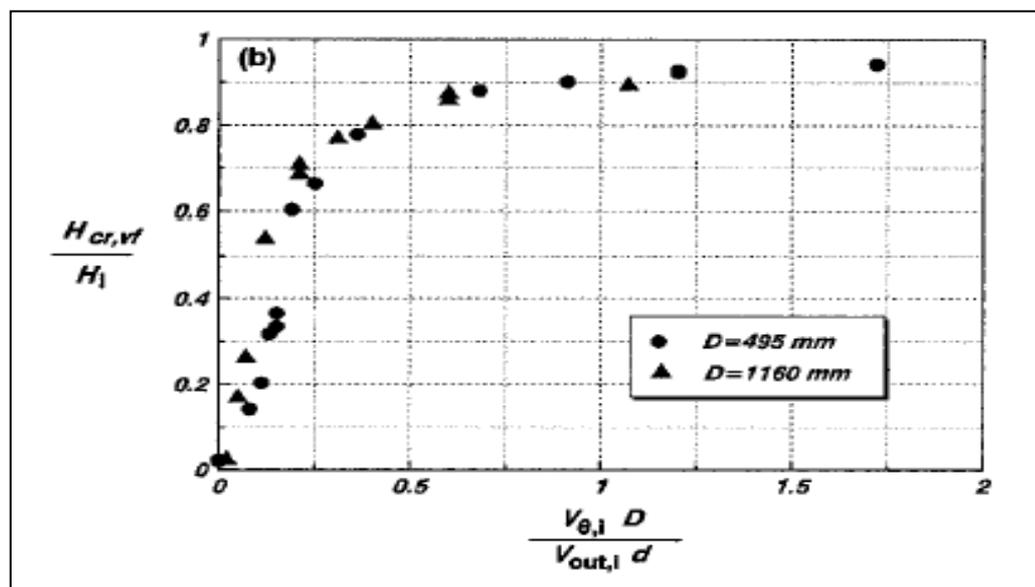


Figura 3.13: Altura crítica vs Número de vórtice para a formação de vórtices (Sankaranarayanan, 2002).

Analisando pelo lado de redução do arraste de escória, é interessante ter em mente que se deve explorar os métodos para suprimir a formação do redemoinho e

conseqüentemente do vórtice, independente da intensidade do movimento rotacional do líquido na panela.

Koria (1994), utilizando uma panela quadrada com lados de 570mm e altura de 440mm, avaliou a influência de alguns tempos de espera (30, 120, 300, 600 e 1500s) sobre a altura crítica de formação do vórtice e tempo após a abertura da válvula (região da curva indicadas pelas setas na figura 3.14). Foi verificado que, para um tempo de espera de apenas 30s (marcas no formato de círculos não preenchidos), o vórtice apareceu após um tempo próximo a 35 segundos após o início de esvaziamento, o que é equivalente a um nível de 250mm de altura. Quando se aumenta o tempo de espera, há uma redução da altura crítica de formação do vórtice. É importante notar que para o tempo de espera de 1500s não é observada a formação do vórtice e apenas o escoamento do tipo dreno aparece ao final do esvaziamento (linha descontínua), conforme pode ser avaliado na figura 3.14.

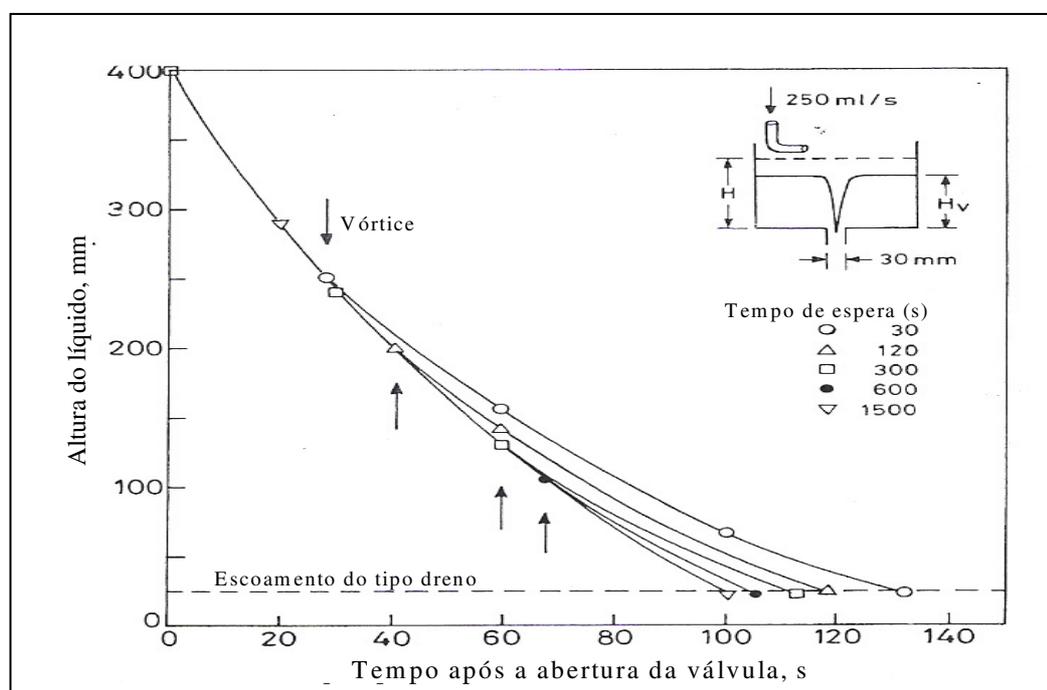


Figura 3.14: Variação da altura do banho com o tempo após a abertura da válvula. Tempo de espera é um parâmetro. Setas indicam o momento da formação do vórtice (Koria, 1994).

3.6.2 – Posição do orifício de saída

Pimenta et alii (1997) verificaram que a posição do orifício de saída, conforme ilustra a figura 3.15, é um dos fatores que mais influencia na formação do vórtice (ver Figura 3.16). Com o orifício posicionado excentricamente, o vórtice é formado mais tardiamente, quase ao final do vazamento. Este efeito é muito menos acentuado para grandes tempos de espera.

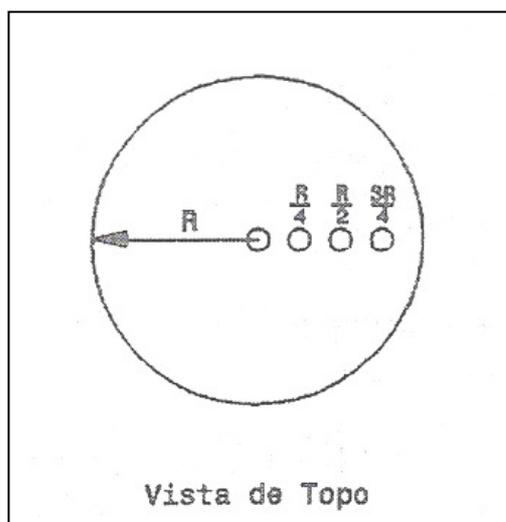


Figura 3.15 – Posicionamento do orifício de saída ao longo do raio (Pimenta et alii, 1997).

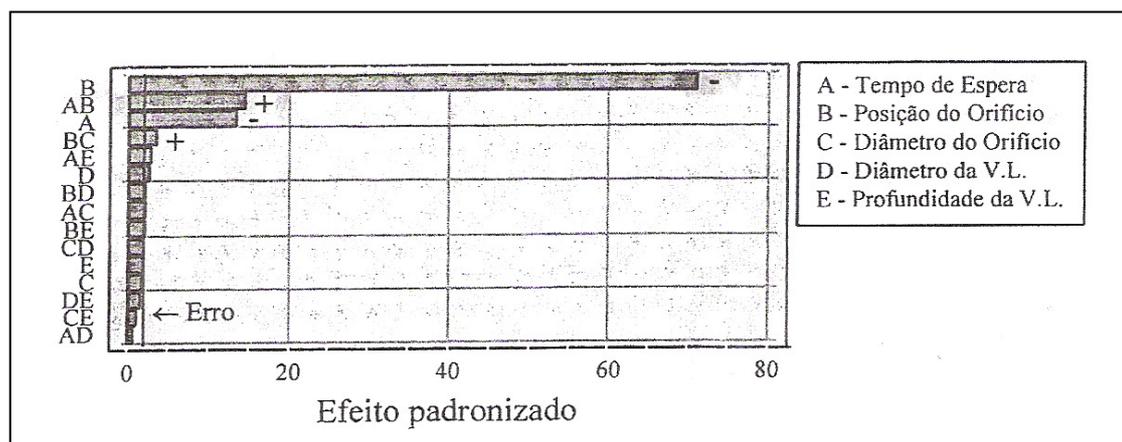


Figura 3.16 – Avaliação dos efeitos dos fatores e interações sobre a altura crítica de formação do vórtice na panela (Pimenta et alii, 1997).

Pode-se observar na figura 3.17 que ocorreu um retardamento significativo da formação do vórtice, representado pela altura crítica, com o deslocamento da posição do orifício. Um pequeno deslocamento ao longo do raio ($R/4$) provocou uma diminuição significativa na altura crítica, isto é, com o orifício posicionado excêntricamente, mais próximo da parede, o vórtice é formado mais tardiamente, quase ao final do vazamento.

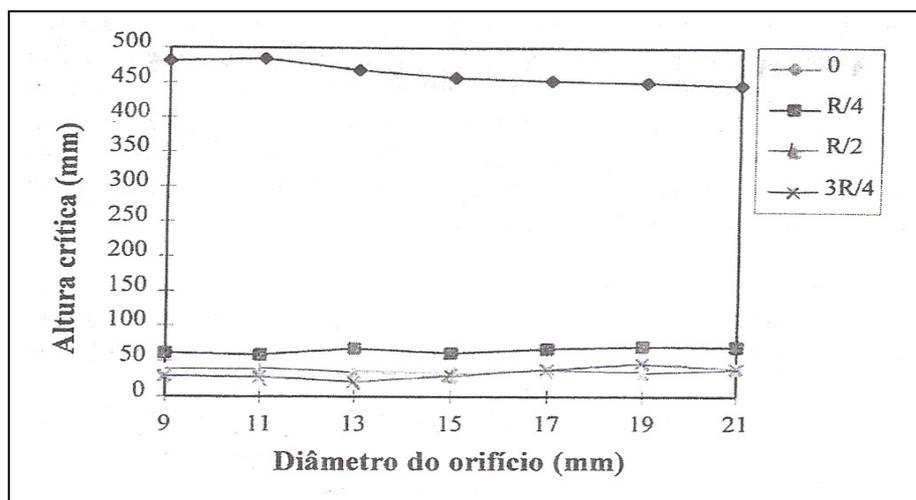


Figura 3.17 – Influências da posição e diâmetro do orifício na altura crítica de formação do vórtice (Pimenta et alii, 1997).

A figura 3.18 ilustra a componente rotacional da velocidade do fluido, induzida pelo enchimento tangencial da panela. Para a posição centralizada (a), a componente rotacional da velocidade está orientada em torno da panela e coincide com o eixo do orifício, o que potencializa o movimento rotacional do fluido e conseqüentemente, a formação do vórtice. Para o orifício descentralizado, não há uma coincidência entre os eixos de rotações, minimizando a formação de vórtices. A própria parede da panela tende a atuar como um freio para o movimento rotacional próximo ao orifício de saída.

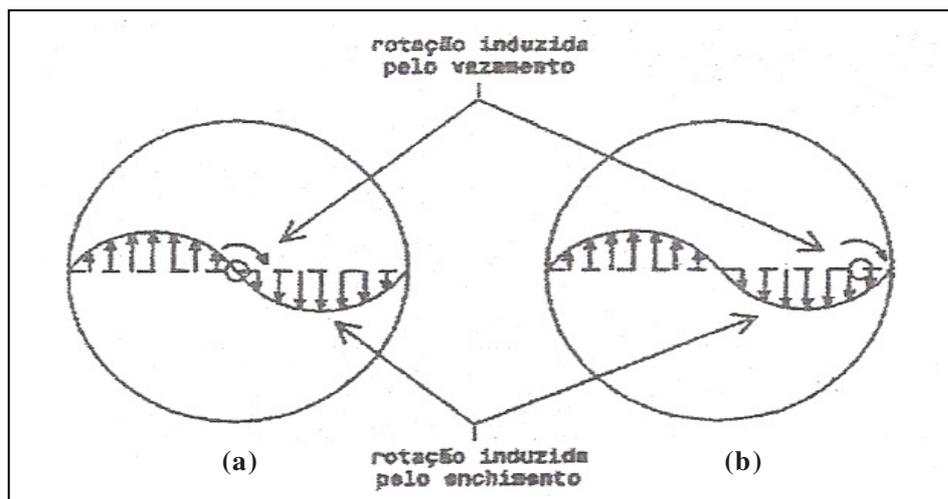


Figura 3.18 – Ilustração da componente rotacional da velocidade do fluido em relação à posição do orifício: a-central; b- excêntrico (Pimenta et alii, 1997).

Koria (1994) observou que, para todos os tempos de espera, a altura de formação do vórtice é bem maior para orifício centralizado no fundo, quando se compara com orifício localizado próximo à parede da panela.

3.6.3 – Diâmetro do orifício de saída

Andrzejewski et alii (1987) estudaram a drenagem com diâmetros dos orifícios de saída 20, 42, 50 e 80mm, sendo que os comprimentos das válvulas foram de 420, 720, 990 e 1050mm.

Foi verificado que a altura crítica para a ocorrência do escoamento do tipo dreno é dependente do diâmetro do orifício de saída, independente da sua posição, centralizada ou excêntrica, para um mesmo comprimento de saída (990mm). Isto leva à regra de que para um determinado comprimento de saída, a altura crítica para a ocorrência do escoamento do tipo dreno é aproximadamente igual ao diâmetro do orifício de saída, conforme ilustra a figura 3.19.

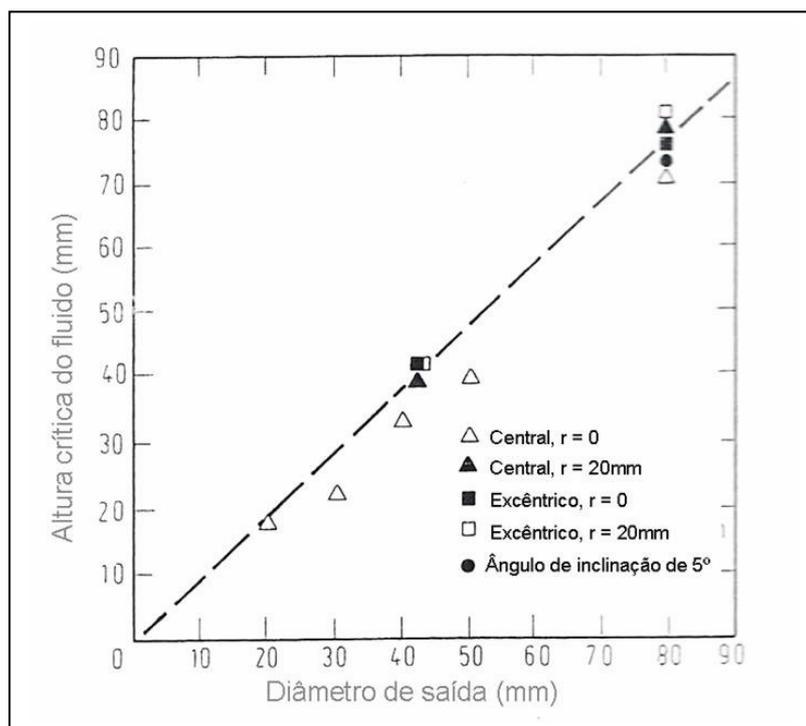


Figura 3.19 – Relação entre a altura crítica do escoamento do tipo dreno com o diâmetro de saída (Andrzejewski et alii, 1987).

Para o escoamento do tipo vórtice, os resultados de Pimenta et alii (1997) mostraram que a altura crítica de formação de vórtice quase não sofre influência do diâmetro do orifício (foram testados orifícios de 11 a 19mm de diâmetros). No caso do orifício posicionado no centro da panela, foi observada uma tendência de diminuição da altura crítica com o aumento do diâmetro. Todos os outros fatores foram mantidos constantes nesta fase de testes, sendo o tempo de espera de 30 segundos, e a válvula longa com 22mm de diâmetro e 90mm de comprimento submerso em água.

Koria (1994) avaliou a influência do aumento do diâmetro do orifício de saída com a altura de formação do vórtice para diversos tempos de espera. Os testes foram realizados levando-se em consideração a posição do orifício de saída, centralizada ou excêntrica.

Os experimentos evidenciaram que para orifício de saída centralizado e para tempos de espera menores que 120 segundos, a altura de formação do vórtice decresce continuamente com o aumento do diâmetro, conforme pode ser visualizado na figura

3.20. Para tempos de espera acima de 120 segundos, há a tendência da altura máxima de formação do vórtice ocorrer para o orifício de saída com 30 mm de diâmetro.

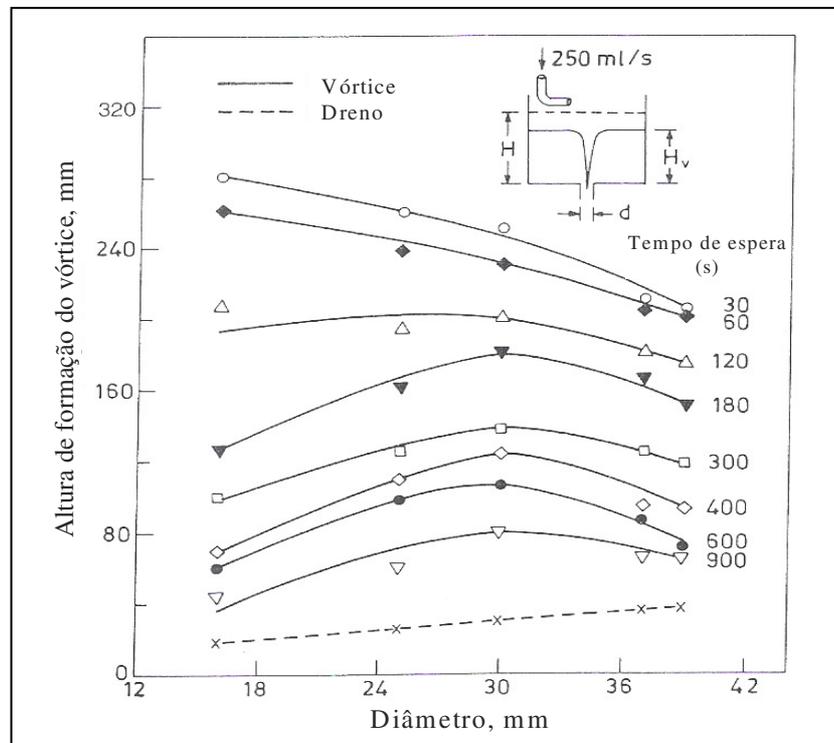


Figura 3.20: Variação da altura do vórtice com o diâmetro para diferentes tempos de espera. Orifício de saída centralizado (Koria, 1994)

Conforme ilustra a figura 3.21, para orifício excêntrico, ocorre um comportamento completamente diferente, principalmente para tempos de espera menores que 120 segundos. Ao contrário do orifício centralizado, a altura de formação do vórtice aumenta com o aumento do diâmetro do orifício de saída.

Para tempos de espera acima de 120 segundos, tanto para orifícios centralizado e excêntrico, a altura de formação do vórtice aumenta com diâmetro até o valor de 30mm e então, decresce conforme o aumento do diâmetro. A altura de formação do vórtice foi máxima para o diâmetro de 30mm, conforme ilustram as figuras 3.20 e 3.21.

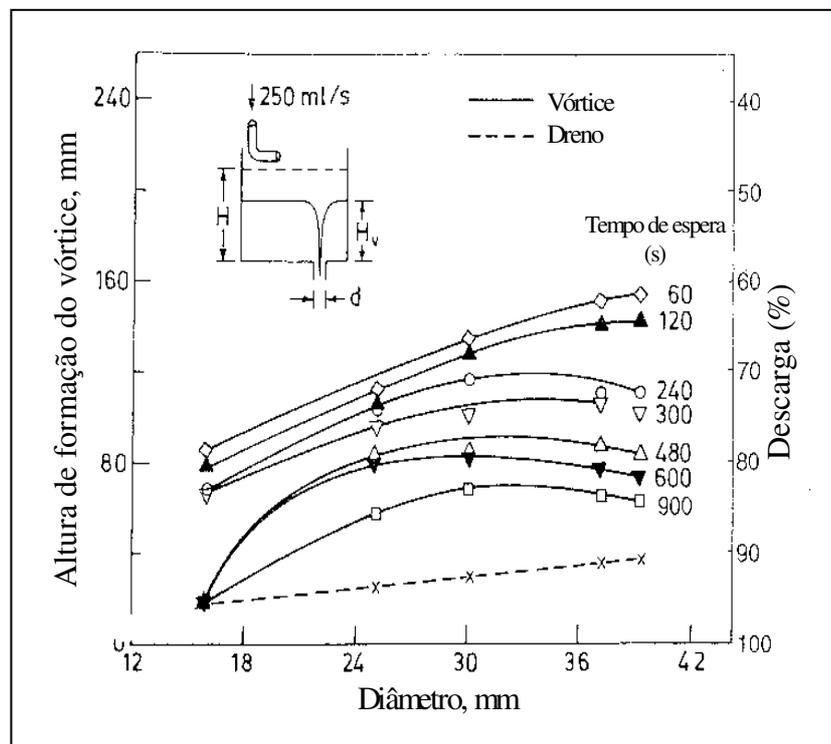


Figura 3.21 : Variação da altura do vórtice com o diâmetro para diferentes tempos de espera. Orifício de saída excêntrico (Koria, 1994)

É importante citar que para o escoamento do tipo dreno, a altura crítica deste escoamento aumenta conforme se tem o aumento do diâmetro do orifício de saída, independente da sua posição, centralizado ou excêntrico (linhas descontínuas das figuras 3.20 e 3.21, respectivamente).

Pimenta et alii (1997) simularam o arraste de escória utilizando óleo. Os testes mostraram haver uma elevação significativa no volume de óleo arrastado com o aumento da abertura do orifício de saída, chegando a atingir níveis de quase 50% do volume inicial contido na panela (Figura 3.22).

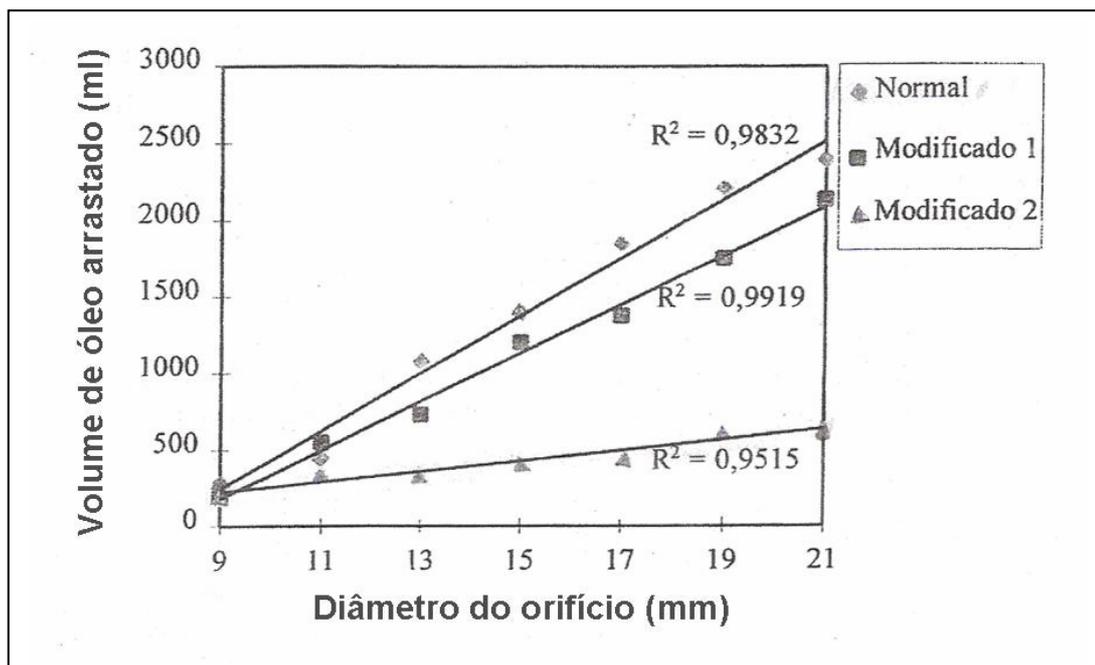


Figura 3.22 – Influências do diâmetro do orifício e do procedimento operacional sobre o volume de óleo arrastado (Pimenta et alii, 1997).

Dois procedimentos foram testados, sendo o primeiro com uma interrupção temporária do vazamento da panela pelo fechamento da válvula, quando o nível de líquido atinge 20% da altura inicial, voltando a abri-la na mesma abertura anterior após 10 segundos (Modificado 1). Pode-se observar na figura 3.22 que para “Modificado 1” houve uma diminuição no arraste de óleo para todos os diâmetros quando se compara com a condição “Normal”. Acredita-se que esta redução teria sido mais significativa com tempos de interrupção maiores.

O segundo procedimento, “Modificado 2”, foi parecido com o primeiro, porém o diâmetro da abertura do orifício de saída foi de apenas 9 milímetros após a interrupção do vazamento. A redução do volume de óleo arrastado foi significativamente maior quando se compara com as condições “Normal” e “Modificado 1” conforme mostra a figura 3.22. Os dois procedimentos operacionais avaliados para minimização do arraste de escória mostraram bons resultados. A interrupção temporária do vazamento diminuiu o movimento rotacional do fluido, retardando a formação do vórtice e, por consequência, diminuindo o volume de óleo arrastado. No entanto, maior eficácia foi

obtida quando, após a interrupção do vazamento, a válvula foi reaberta com pequena abertura (9mm). Neste caso, foram obtidas reduções de até 73% do volume de óleo arrastado.

3.6.4 – Viscosidade do fluido que simula a escória

Koria (1994) avaliou a influência do fluido de cobertura que simula a escória, para uma situação onde a água que simula o aço é drenada por um orifício de saída com 30mm de diâmetro e tempo de espera de 120 segundos (Tabela III.2).

Foi verificada uma ligeira redução na altura de formação do vórtice quando se aumenta a viscosidade do óleo que simula a escória. Para o caso em que se simulou uma escória sobrenadante sólida, foi mostrado que não ocorre a formação do vórtice, somente ocorrendo o dreno no final do esgotamento.

Tabela III.2: Influência do óleo de cobertura sobre a altura do vórtice quando água é drenada por um orifício de saída de 30mm de diâmetro e com tempo de espera de 120 segundos (Koria, 1994).

Fluido	Altura do vórtice (mm)	Observação
Água pura (sem óleo sobrenadante)	200	Arraste do ar para o orifício de saída
Óleo de parafina (5mm de espessura)	191	Pequena diminuição na altura do vórtice. Óleo é arrastado para o orifício de saída.
Óleo com baixa viscosidade	195	
Termocola simulando escória sólida	Sem vórtice	Ocorrência de apenas escoamento do tipo dreno

Sankaranarayanan (1994) verificou que a presença de uma camada de 20 mm de um óleo sobrenadante (óleo de canola) sobre a água leva a uma diferença significativa na altura crítica de formação do vórtice. É interessante citar que a quantidade de óleo necessária para gerar 20mm de espessura na panela foi medida previamente em um balde plástico e, logo após o enchimento, o óleo foi vazado dentro da panela tomando-se o cuidado para evitar a emulsificação. Mesmo assim, foi verificada a formação de bolhas de água com óleo que permaneceu em suspensão por aproximadamente 15 minutos. Neste teste, foi utilizada uma panela de 495mm de diâmetro com óleo de canola ($\mu=50\text{mPa}\cdot\text{s}$) realçado com corante vermelho (Sudan IV) para melhorar a visualização. Para uma velocidade tangencial inicial equivalente a 40mm/s, a formação de vórtice aconteceu em um nível mais elevado quando se tem o sistema água e óleo (460mm) do que quando se tem só água e ar (446mm), ou seja, uma diferença de 3,1%.

3.6.5 – Dispositivos anti-vórtices

Sankaranarayanan (2002) desenvolveu um dispositivo (figura 3.23) que efetivamente suprimiu a formação do vórtice, conforme mostra a figura 3.24, onde são comparados o comportamento das alturas de formações dos vórtices ($H_{cr,v}$), e das velocidades tangenciais iniciais ($V_{\theta,i}$).

Este teste foi realizado numa situação em que água é drenada de uma panela com 495mm de diâmetro (D) através de um orifício de saída de 14mm de diâmetro (d). Neste caso, não foi utilizado óleo simulando a escória e altura inicial do fluido (H) foi de aproximadamente 425mm.

Na figura 3.24, os símbolos quadrados representam a condição de drenagem normal e os triângulos representam a condição de escoamento com o dispositivo anti-vórtice. Foi evidenciado que o dispositivo reduziu drasticamente a altura de formação do vórtice ($H_{cr,v}$) para todas as condições de velocidades tangenciais iniciais ($V_{\theta,i}$).

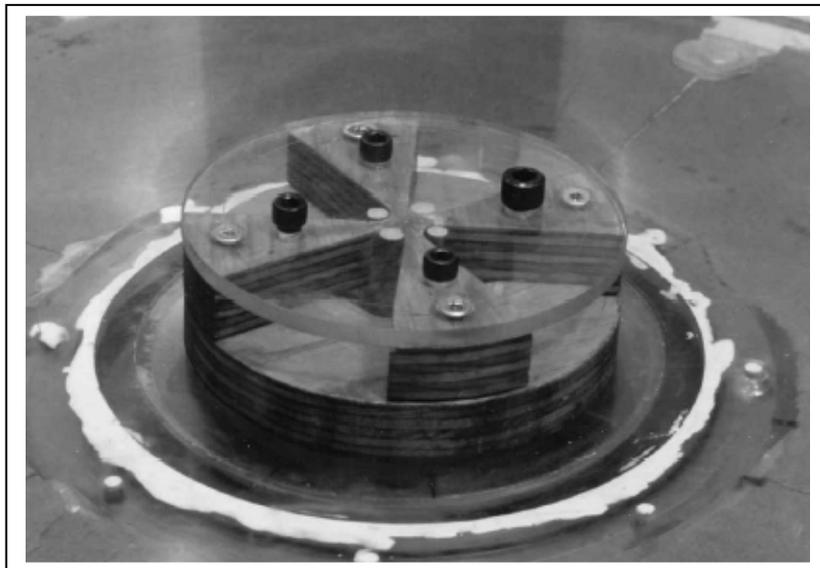


Figura 3.23: Dispositivo anti-vórtice utilizado no modelo físico (Sankaranarayanan,2002)

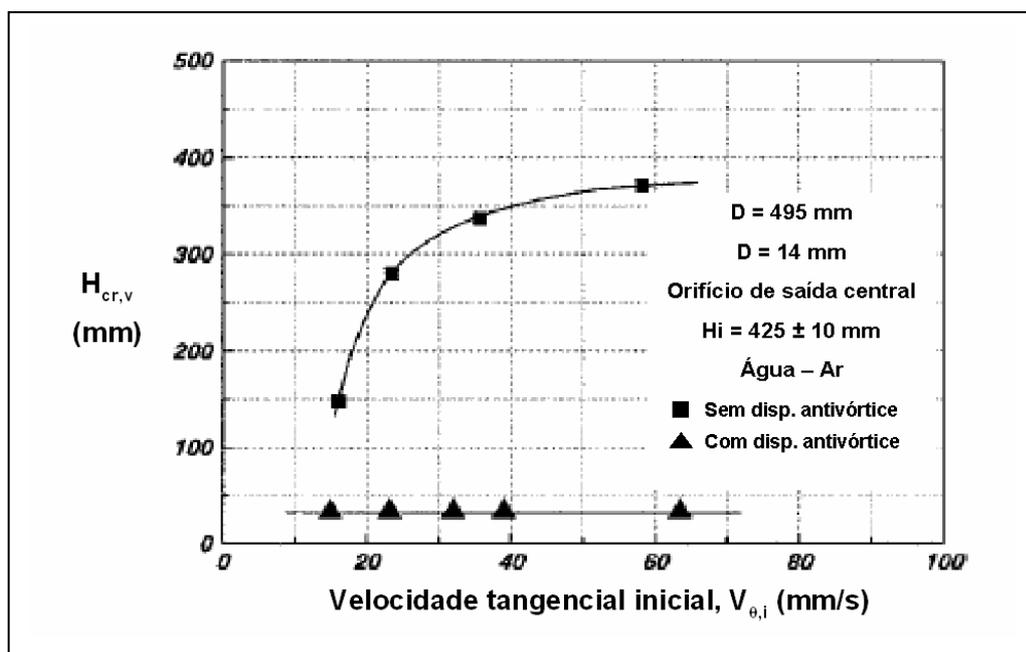


Figura 3.24: Comparativo mostrando a eficiência do dispositivo anti-vórtice utilizado no modelo físico (Sankaranarayanan,2002)

3.6.6 – Válvulas tampões

Sankaranarayanan (1994) testou a influência de uma válvula tampão de 37,5mm de diâmetro, localizado diretamente acima do orifício de saída, a uma altura de 50mm do fundo da panela e verificou que a presença desta válvula suprime a formação do vórtice até um determinado nível, isto é, quando o nível de água estava abaixo da ponta da válvula tampão, o vórtice se formou normalmente. Portanto, quando se compara o comportamento do vórtice com e sem válvula tampão sob as mesmas condições, a formação de vórtice é retardada com a presença do tampão, pois o mesmo reduz a velocidade tangencial do fluido próximo ao orifício de saída da panela.

Já Steffen (1987) comparou a passagem de escória em modelos físicos de panelas com válvulas tampões e com válvulas gavetas. A formação do vórtice e arraste de escória podem ser minimizadas utilizando uma válvula tampão com um desenho adaptado, onde o diâmetro na parte inferior ao tampão seja, pelo menos, 3 vezes maior que o diâmetro do orifício de saída e que esteja posicionado o mais próximo possível do fundo da panela.

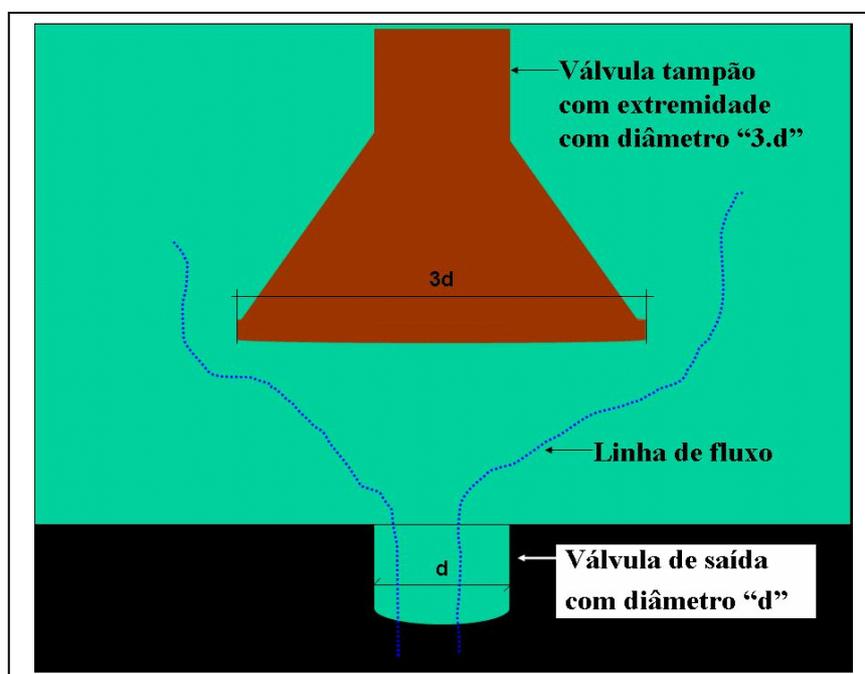


Figura 3.25: Ilustração da extremidade da válvula tampão sugerida por Steffen (1987)

3.7 – Detectores da Formação dos Vórtices

Como foi comentado anteriormente, o vórtice depende de vários fatores para se formar. Dependendo da situação, pode ser ocorrer em níveis elevados, mas por outro lado, em função dos parâmetros pode até mesmo não ocorrer. Assim, é muito importante um dispositivo eficaz para a detecção do fenômeno.

Sankaranarayanan (1994) testou em seus experimentos, um dispositivo composto de dois eletrodos localizados diametralmente opostos na válvula de saída da panela. Estes eletrodos funcionaram de forma eficaz para o sistema água e ar, mas para os casos de simulações com água e óleo, não foi possível de detectar o arraste do óleo sobrenadante. Outro dispositivo testado foi um sensor baseado em transmissores óticos. Devido à dificuldade em se identificar um diodo e um transdutor ideal, não foi possível utilizar este sistema. Devido a estas dificuldades, os experimentos foram realizados utilizando câmeras de vídeo para registrar e identificar a altura e o comportamento de formação do vórtice.

Andrzejewski (1987) utilizou um sistema de balança eletrônica que monitora e registra o peso da panela ao longo do esvaziamento. Como ocorre a passagem de ar no momento da formação do vórtice, a vazão de saída tende a se alterar, mudando a taxa de saída da água, podendo assim identificar a formação do vórtice. Esta configuração, no entanto, exige uma balança bem precisa para identificar o vórtice de forma confiável.

Um trabalho da Universidade de Toronto, publicado por Dawson et alii(1988), mostrou que um dispositivo baseado em ondas de ultra-som pode detectar a presença de vórtice na panela. Transmissores e receptores foram adaptados no fundo da panela e no momento que o vórtice atravessa as ondas de ultra-som, há uma mudança no comportamento do sinal recebido pelo osciloscópio. A figura 3.26 ilustra o funcionamento do equipamento.

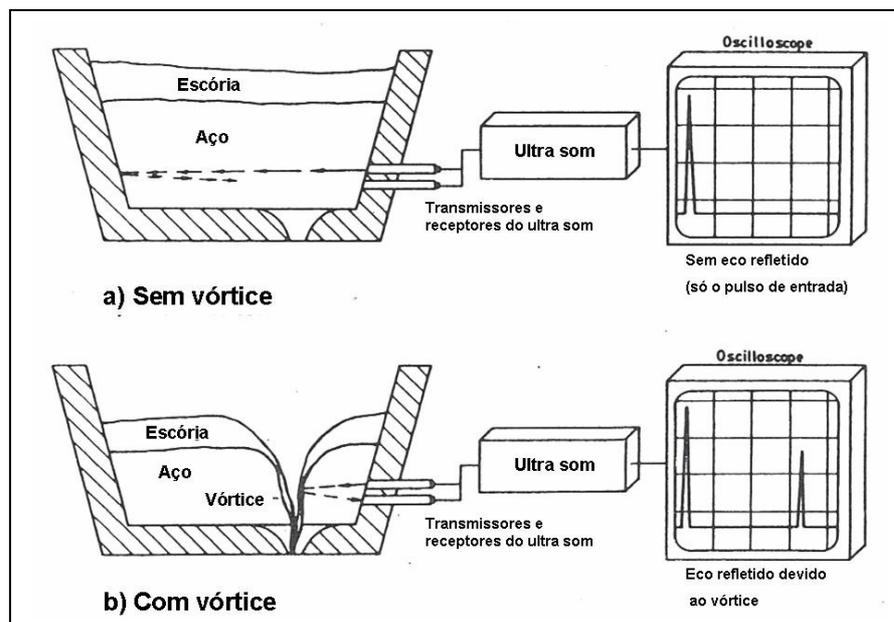


Figura 3.26: Ilustração do detector de vórtice (Dawson et alii, 1988)

Já Santos (2005) utilizou um dispositivo composto de uma célula fotoelétrica para detectar a passagem de ar pelo canal de vazamento. Neste equipamento, durante a operação do modelo, um sensor recebe a luz que atravessa o fluxo de água, emitida da fonte posicionada no lado oposto do tubo e registra um determinado valor de tensão. Quando há a passagem de ar, que indica a presença do vórtice, o valor medido sofre uma alteração, sendo possível indicar o início de formação do vórtice. A figura a seguir apresenta uma curva característica da leitura do sensor fotoelétrico utilizado neste estudo.

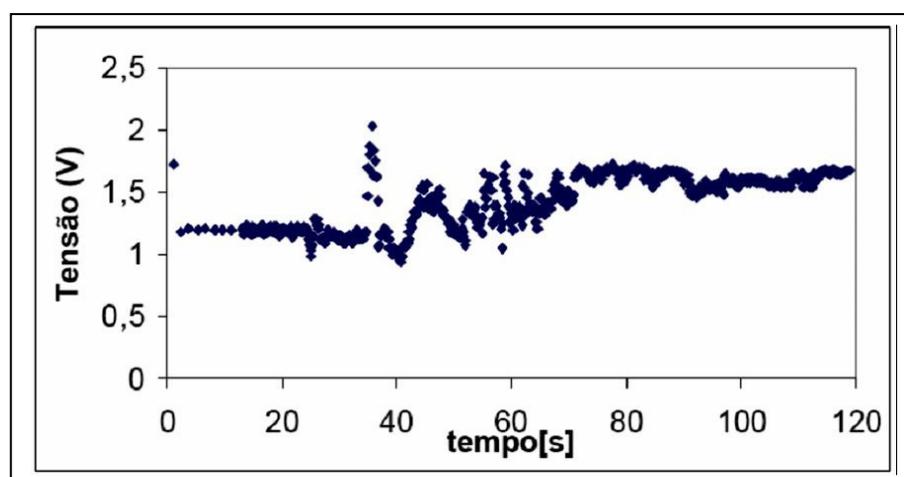


Figura 3.27: Curva resposta do sensor fotoelétrico (Santos, 2005)

4 – METODOLOGIA

4.1 – Montagem Experimental

Para simular o escoamento de aço, foram construídos modelos físicos da panela em acrílico e das válvulas de saída em teflon, cuja escala utilizada foi de 1:3 em relação à panela da Belgo Monlevade. O desenho das peças foi baseado no projeto industrial visando similaridade geométrica entre as configurações.

As figuras 4.1 e 4.2 mostram os desenhos esquemáticos da panela de acrílico com as dimensões em milímetros.

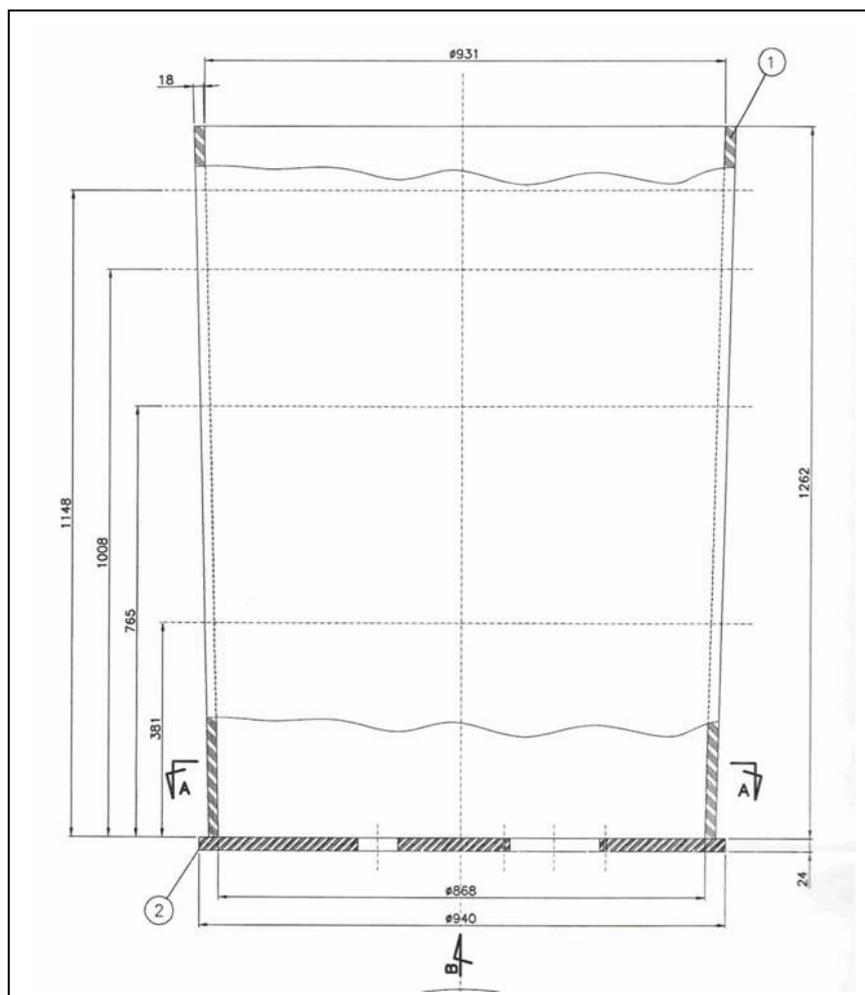


Figura 4.1: Desenho esquemático da panela – vista lateral.

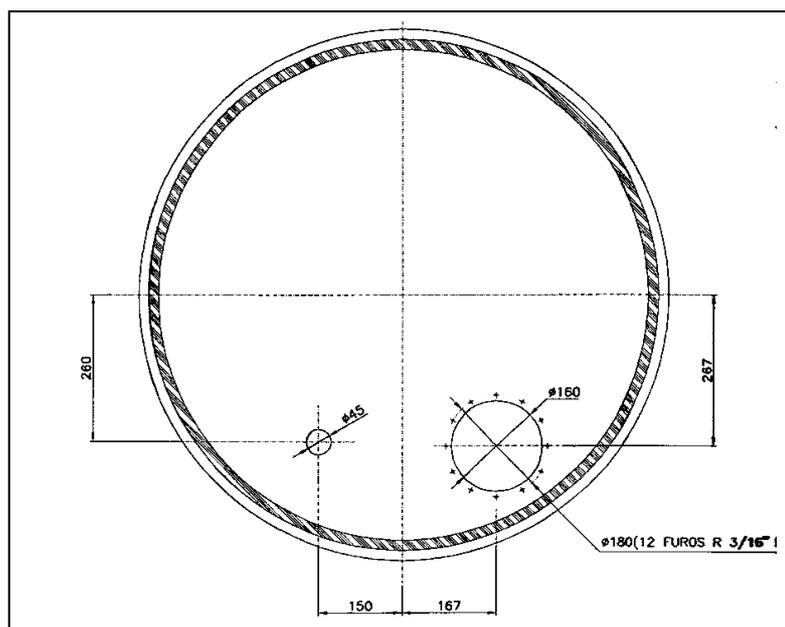


Figura 4.2: Desenho esquemático da panela – fundo.

A figura 4.3 apresenta uma ilustração do esquema de montagem do modelo físico da panela.

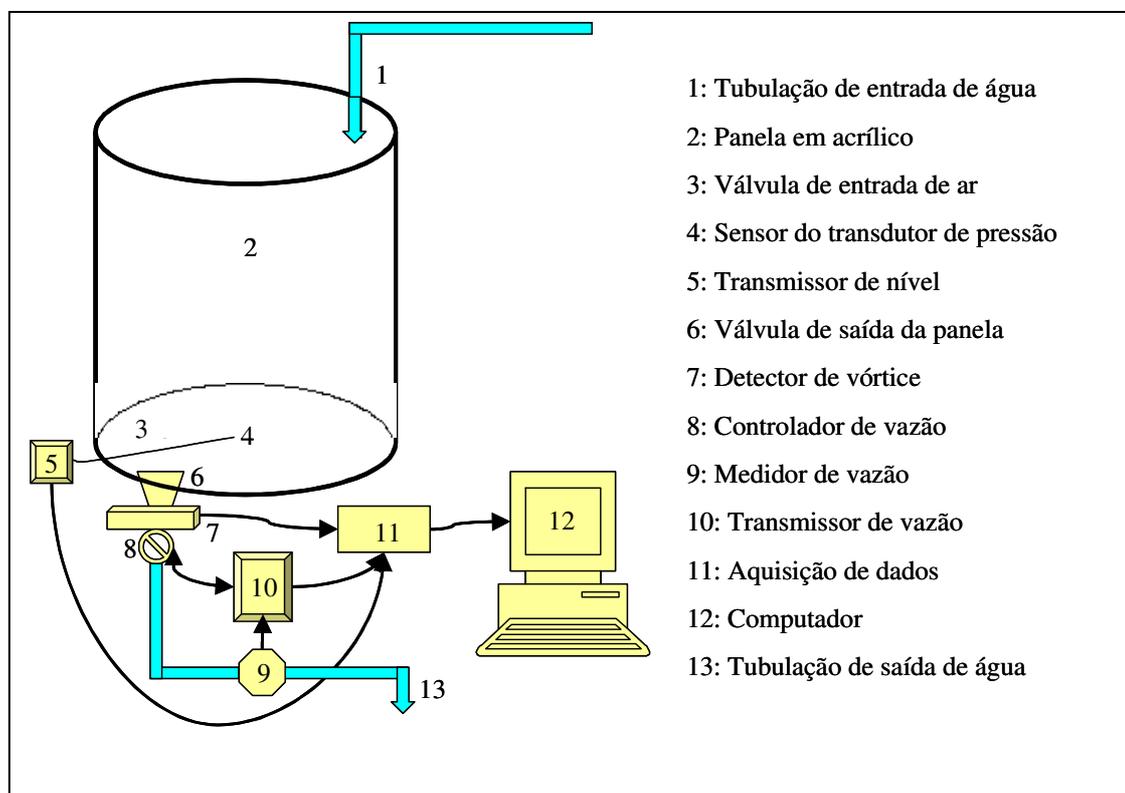


Figura 4.3: Esquema de montagem do modelo físico da panela.

As figuras 4.4 a 4.9 mostram as imagens e detalhes da panela e dos instrumentos montados no laboratório de modelagem física da Usina de Monlevade.

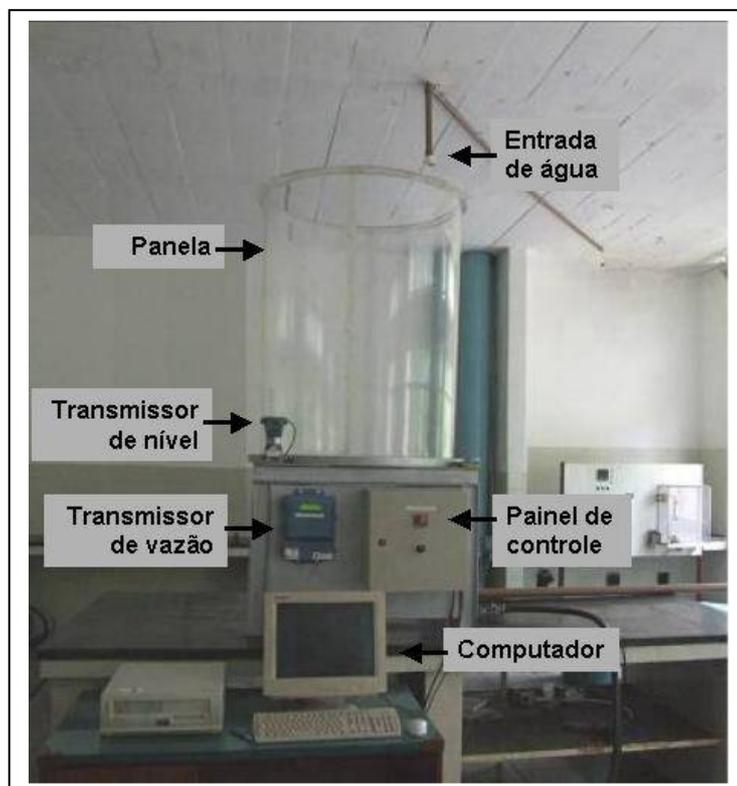


Figura 4.4: Vista principal do modelo físico da panela.

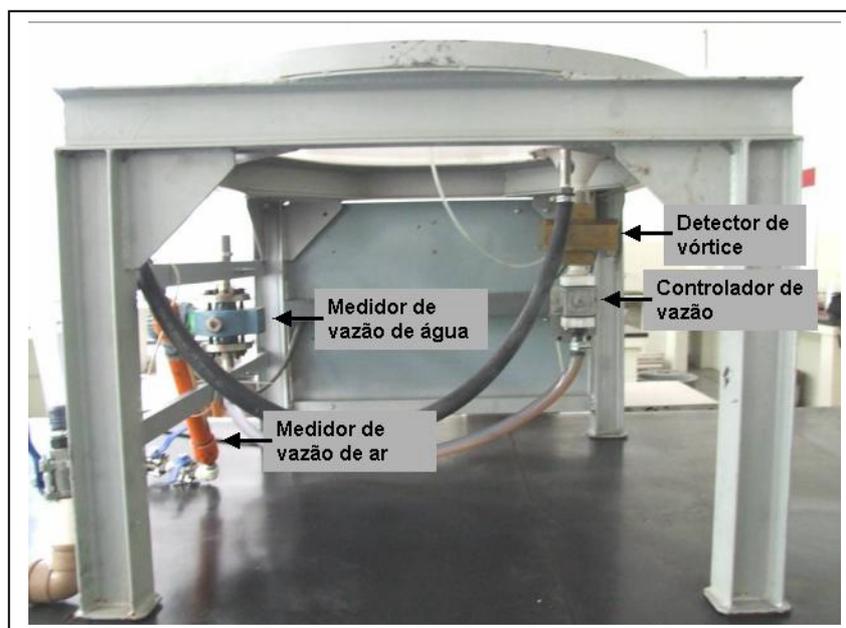


Figura 4.5: Vista do modelo físico da panela.

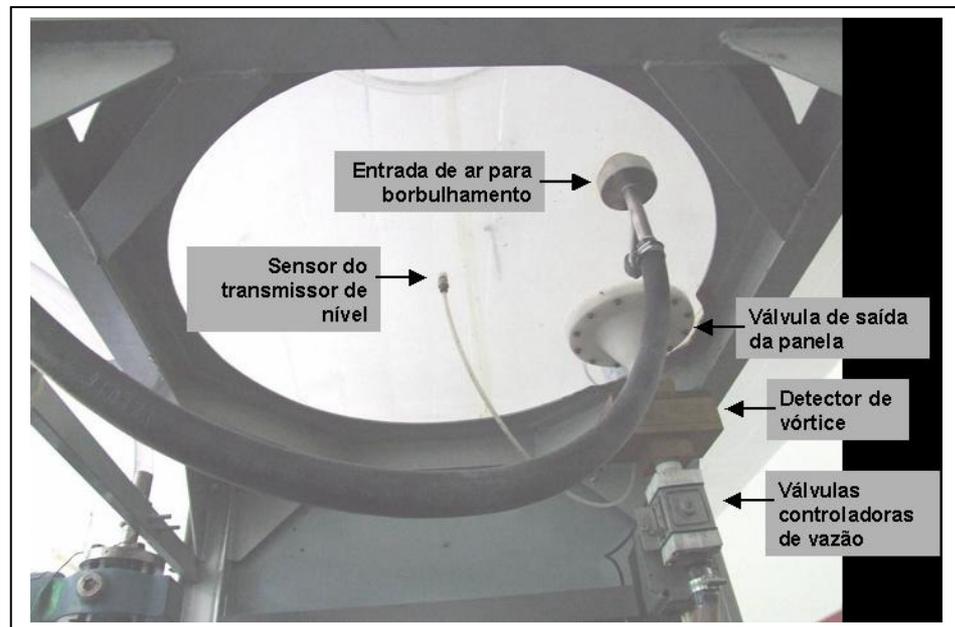


Figura 4.6: Detalhe do fundo do modelo físico da panela.

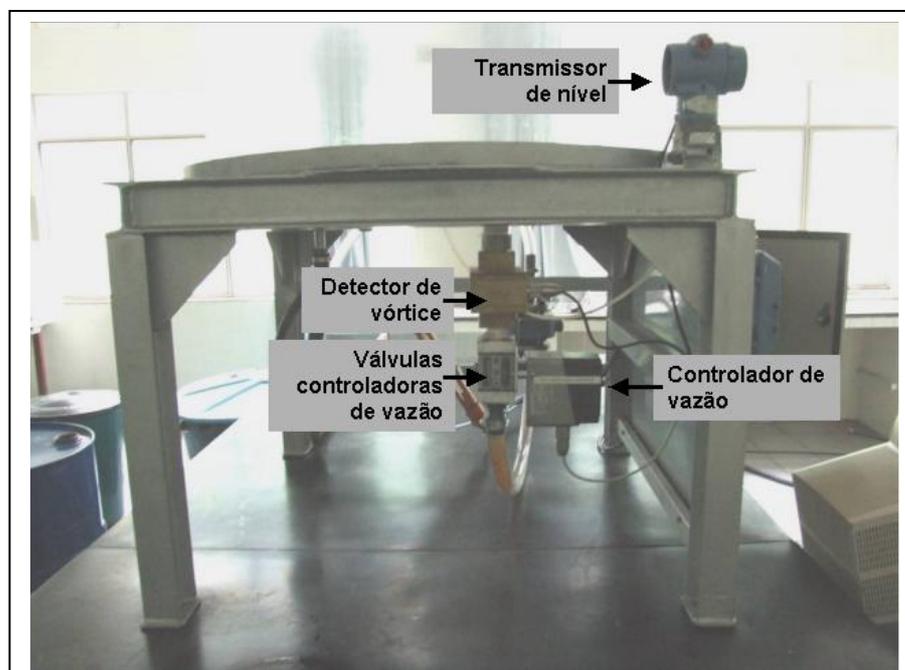


Figura 4.7: Vista do modelo físico da panela.

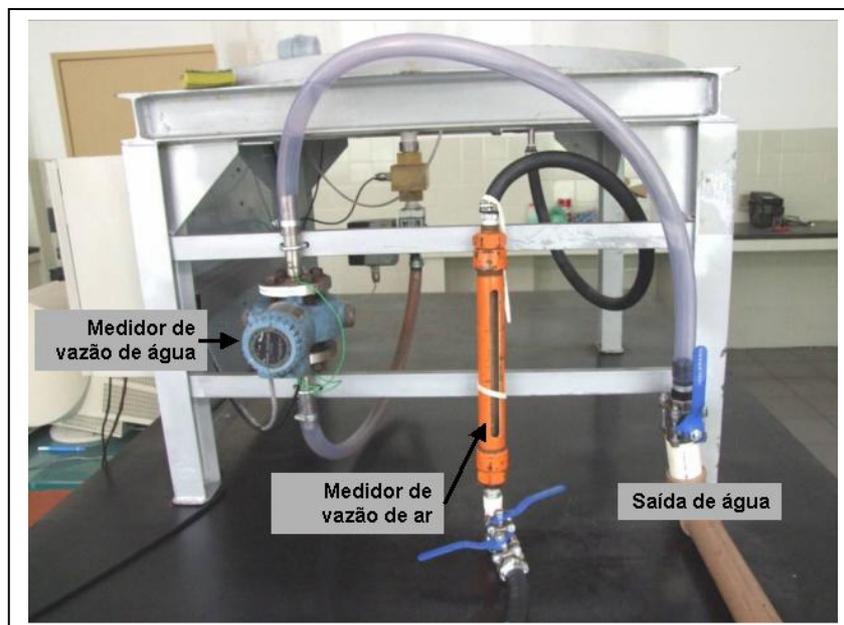


Figura 4.8: Vista do modelo físico da panela.

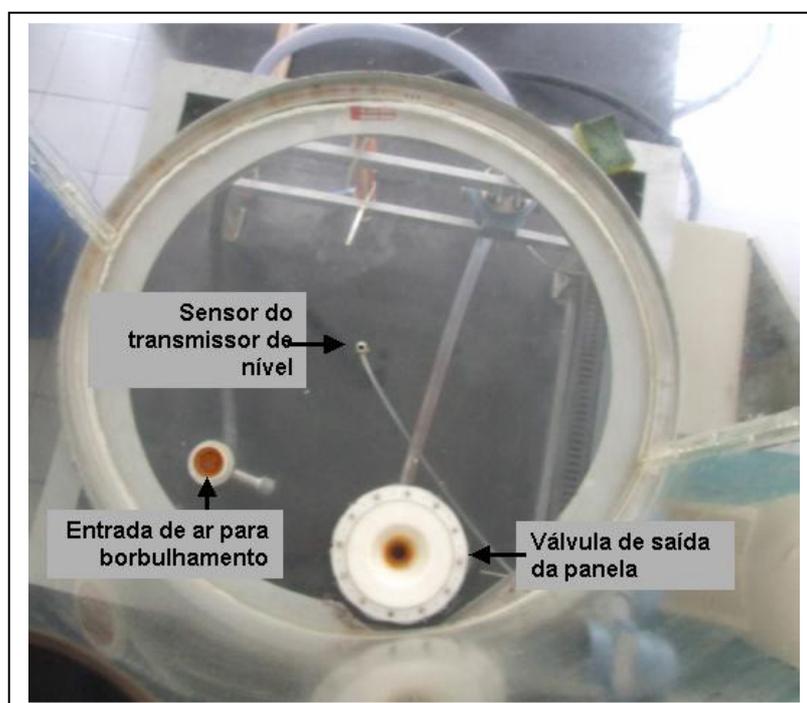


Figura 4.9: Vista do fundo da panela – vista superior.

Para a identificação do vórtice, foi desenvolvido um dispositivo eletrônico que fica localizado logo abaixo da válvula de saída da panela (pode-se ver a localização nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7). Este aparelho tem uma fonte emissora de laser em uma extremidade e na outra um receptor. Quando se tem apenas água passando pelo tubo do dispositivo, Figura 4.10 (a), o equipamento apresenta um valor de voltagem, neste exemplo 2000mV. Mas a presença de um outro fluido diferente da água induz à difração do raio laser, levando o aparelho a apresentar valores diferentes, neste caso 1500mV, ilustrado na figura 4.10 (b), acusando a passagem do fluido sobrenadante, que neste estudo foi o ar ou o óleo de silicone ou uma mistura dos dois.

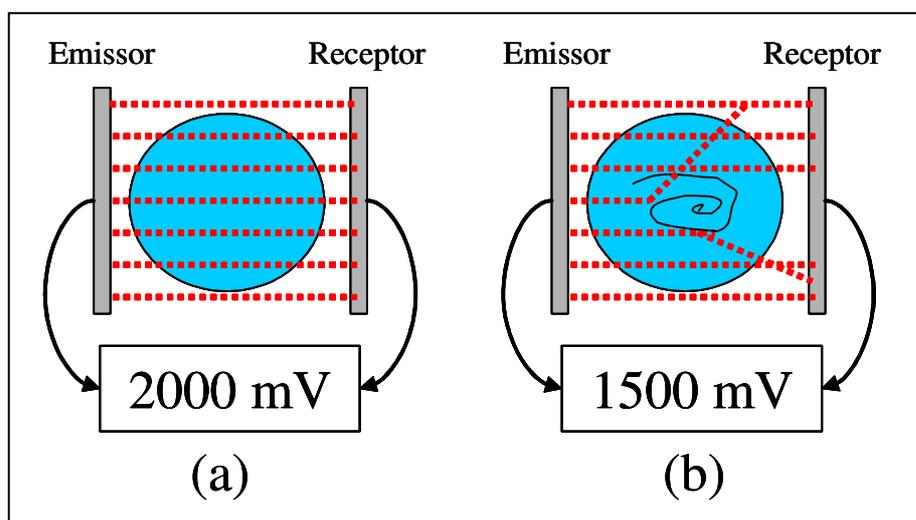


Figura 4.10: Ilustração do funcionamento do detector de vórtice.

Para o registro da altura da água, foi instalado um transdutor de pressão (transmissor de nível) no fundo da panela que possibilita a obtenção direta do nível da coluna de água em mm ou em % da altura de referência (neste caso, a referência é 1200mm, portanto, 1% é equivalente a 12 mm de água). O transmissor de nível é do tipo 3051 Smart-family da Fisher-Rosemount (Figura 4.11), que tem como princípio básico de funcionamento, a diferença de capacitância entre a pressão de referência e a medida a cada coluna de água (precisão de 0,15%). Esta diferença de capacitância gera um sinal de corrente de 4 a 20mA que é processada numa unidade eletrônica interna do medidor. Esse sinal processado é convertido em indicação digital do nível num visor na parte frontal do instrumento. Este sinal também pode ser enviado para um registrador de dados que neste estudo foi o Datalogger DT600.

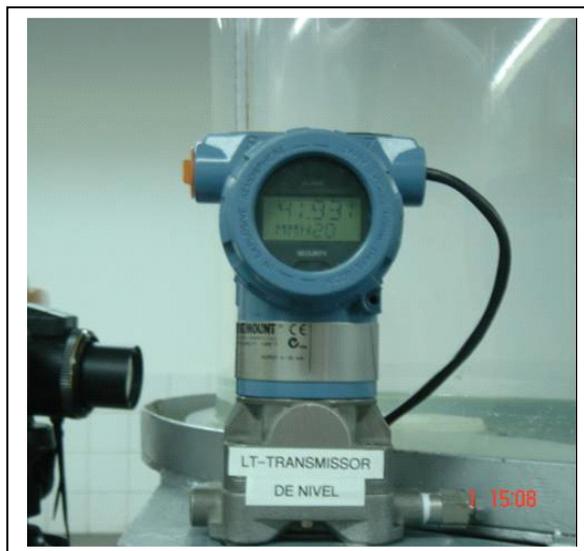


Figura 4.11: Imagem do transmissor de nível.

Para o controle da vazão, foi utilizado um controlador microprocessado do tipo 4400 da WEST (Figura 4.12), que permite a programação de seus parâmetros via teclado na parte frontal e possibilita o ajuste e controle automático do vazamento da panela. Este dispositivo, em conjunto com a servo-válvula motorizada do fabricante GASTEC-HINIC (Figura 4.13), permite o controle do fluxo de fluido que passa através de um conjunto de aberturas com dimensões controláveis. Este sistema permitiu que todo o vazamento fosse controlado automaticamente, não sendo necessário o ajuste manual da vazão de saída de água.



Figura 4.12: Imagem do controlador de vazão.



Figura 4.13: Imagem da servo-válvula.

Para a obtenção da vazão de água da panela, foi utilizado o medidor de vazão eletromagnético do tipo 570 TM da Fisher-Rosemount (Figura 4.14) que tem como princípio de funcionamento baseado na lei de FARADAY onde “um objeto condutor que se move em um campo magnético, gera neste uma força eletromotriz”. A água circulando e sendo submetida a um campo magnético gerado por duas bobinas dispostas em lados opostos do medidor é captada por dois eletrodos montados nas laterais do instrumento. Assim, o medidor envia um sinal ao transmissor de vazão do tipo 8712C da Fisher-Rosemount (Figura 4.15) onde é processado numa unidade eletrônica interna (precisão de 0,25%). Desta forma, o conjunto estabelece o controle da geração do campo magnético, a medição da tensão gerada, o cálculo da vazão, a geração do sinal analógico, a geração da frequência e a indicação da vazão real num display frontal do instrumento e também no dispositivo de aquisição de dados (Datataker DT600).



Figura 4.14: Imagem do medidor de vazão.



Figura 4.15: Imagem do transmissor de vazão.

Nesta estrutura, as informações provenientes dos transmissores de nível e de vazão, além do detector de escória, são armazenadas no dispositivo de aquisição de dados denominado de Datataker (DT600). O DT600 (Figura 4.16) possui 18 canais para registro de dados e o intervalo de armazenamento foi de um segundo para todos os três parâmetros.



Figura 4.16: Imagem do dispositivo de aquisição de dados.

O Datataker DT600 tem um software que mostra a evolução dos parâmetros em análise (Figura 4.17). A linha verde mostra o nível de água dentro da panela. Neste exemplo, a panela estava vazia (nível de água em 0%) e foi cheia até o nível de aproximadamente 86% da altura total da panela (1032mm). Depois de algum tempo de espera (linha reta no topo), abriu-se a panela e iniciou-se o esvaziamento, onde há o início de registro de vazão (linha azul) e é caracterizado pelo pico desta curva chegando a valores próximos a 50 l/min. Após a atuação do controlador de vazão, os valores oscilaram em torno de 28 l/min até o fim do esvaziamento. A linha vermelha é a informação do detector de escória, onde se percebe que enquanto há a passagem de água apenas, o patamar de valores é em torno de 1900 mV. Porém, ao final do esvaziamento da panela, há uma

mudança nos valores, indicando o momento da passagem de um fluido diferente da água (neste caso foi o ar).

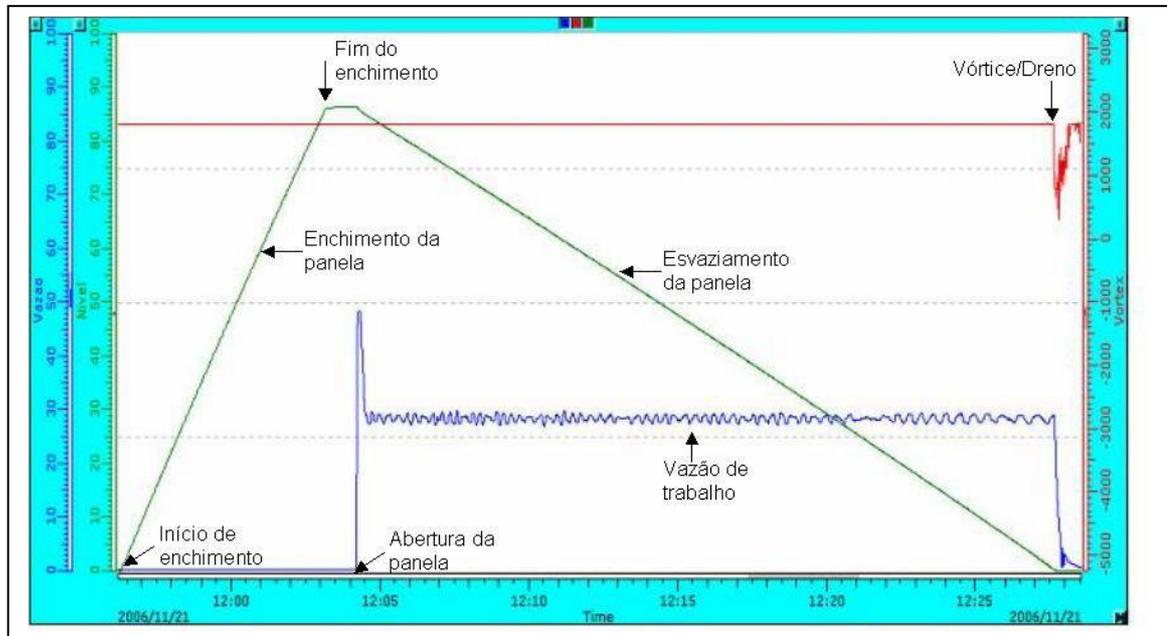


Figura 4.17: Imagem dos gráficos evolutivos do Datataker.

Deve-se ressaltar que o detector de escória vai indicar a passagem de ar, óleo de silicone ou a mistura de ambos, que podem ser decorrentes de uma formação de vórtice ou devido ao escoamento do tipo dreno. Sabe-se que ambos são prejudiciais ao processo industrial, levando partículas sobrenadante para o fundo e para a saída da panela e, conseqüentemente, para o distribuidor.

Portanto, neste estudo, deve-se visar uma combinação de parâmetros que visa minimizar a altura de água (altura crítica) no momento que o detector de escória identifica a passagem do óleo, do ar ou de ambos.

4.2 – Experimentos

Segundo Werkema (1995), o planejamento de experimentos ou DOE (“Design Of Experiments”) é uma técnica estatística de grande importância, pois o seu emprego permite a identificação das principais causas do processo sobre as quais devemos atuar no sentido de fazer com que a melhoria seja alcançada.

As causas mais prováveis (hipóteses) podem ser identificadas e testadas, com o mínimo de tempo e custos e, ao mesmo tempo, com a manutenção de um nível de confiança pré-estabelecido para as conclusões, por meio da realização de experimentos estatisticamente planejados.

Estes experimentos são especialmente importantes quando é necessário projetar um novo processo ou fazer modificações substanciais no processo existente para que a meta de melhoria possa ser alcançada, mas também podem ser empregados no melhoramento contínuo de um processo já existente.

Para esclarecimento, alguns conceitos devem ser enfatizados (Werkema, 2000):

- 1- Variáveis respostas: variáveis por meio das quais serão avaliados os resultados dos experimentos;
- 2- Fatores: variáveis que são deliberadamente alteradas em um experimento, com o objetivo de avaliar o efeito que elas exercem sobre as variáveis respostas;
- 3- Níveis de um fator: representam as possíveis condições que um fator pode assumir em um experimento;
- 4- Variáveis de ruído: são variáveis conhecidas que afetam as variáveis respostas de um experimento, mas que na prática não há como controlá-las ou não há interesse em tratá-las como fatores.

Neste estudo foram testados os seguintes fatores e níveis para compor o DOE:

- Vazão de saída da água da panela (19 l/min ou 28 l/min);
- Tempo de espera (1 minuto ou 30 minutos);
- Rinsagem na panela (Sem ou Com presença de borbulhamento de ar);
- Dispositivos anti-vórtice (Sem ou Com presença do dispositivo anti-vórtice);
- Fluido sobrenadante (Sem ou Com presença de óleo de silicone de 50cst).

A variável resposta considerada foi a altura de água no momento em que o detector de escória indicou o arraste do fluido sobrenadante para o orifício de saída (altura crítica). Em termos práticos, isto representa o momento em que o detector apresentou uma variação nos valores de milivolts maior que 4% (este valor foi baseado no valor de trabalho do detector de escória para fechar a panela na planta industrial). É importante citar que quanto mais baixa for a altura crítica, maior será a quantidade de água “pura” que saiu da panela sem a presença de outro fluido. Assim, pode-se inferir um maior aproveitamento de aço no processo industrial, ou seja, uma maior passagem de aço sem a presença de escória, levando a um maior rendimento metálico da aciaria sem afetar a qualidade do aço.

Assim, foram realizados testes atendendo a combinação de fatores e níveis para avaliação do comportamento do vórtice e/ou emulsificação do conjunto aço/escória em um modelo físico da panela da Belgo - Usina de Monlevade.

Tabela IV.1: Níveis dos fatores testados no modelo físico

Fatores	Níveis	
Vazão de saída	19 l/min	28 l/min
Tempo de espera	1 min	30 min
Injeção de ar pelo fundo	Sem	Com
Dispositivo anti-vórtice	Sem	Com
Óleo de silicone	Sem	Com

Para o caso de cinco fatores (vazão de saída, tempo de espera, injeção de ar pelo fundo da panela, dispositivo anti-vórtice, óleo de silicone) em dois níveis para cada fator, são necessários 32 testes ou combinações para compor uma matriz de experimento fatorial 2^5 completa. Para o caso de uma réplica, são necessários mais 32 testes ou combinações, totalizando 64 experimentos.

As tabelas IV.2 e IV.3 mostram a matriz de experimento fatorial 2^5 completa com uma réplica. Portanto, cada linha representa uma combinação de níveis para os fatores a serem testados no modelo físico da panela. Para evitar vícios nos experimentos, foi feita uma aleatorização da seqüência dos testes (coluna Ordem Teste).

Tabela IV.2: Combinação de níveis e fatores testados.

Combinação	Ordem Teste	Vazão	Tempo Espera	Rinsagem	AntiVortice	Escória
1	18	19	1	Sem	Sem	Sem
2	33	28	1	Sem	Sem	Sem
3	32	19	30	Sem	Sem	Sem
4	42	28	30	Sem	Sem	Sem
5	34	19	1	Com	Sem	Sem
6	17	28	1	Com	Sem	Sem
7	37	19	30	Com	Sem	Sem
8	61	28	30	Com	Sem	Sem
9	63	19	1	Sem	Com	Sem
10	25	28	1	Sem	Com	Sem
11	4	19	30	Sem	Com	Sem
12	59	28	30	Sem	Com	Sem
13	8	19	1	Com	Com	Sem
14	41	28	1	Com	Com	Sem
15	44	19	30	Com	Com	Sem
16	47	28	30	Com	Com	Sem
17	30	19	1	Sem	Sem	Com
18	38	28	1	Sem	Sem	Com
19	3	19	30	Sem	Sem	Com
20	60	28	30	Sem	Sem	Com
21	13	19	1	Com	Sem	Com
22	14	28	1	Com	Sem	Com
23	19	19	30	Com	Sem	Com
24	5	28	30	Com	Sem	Com
25	56	19	1	Sem	Com	Com
26	36	28	1	Sem	Com	Com
27	53	19	30	Sem	Com	Com
28	50	28	30	Sem	Com	Com
29	54	19	1	Com	Com	Com
30	55	28	1	Com	Com	Com
31	62	19	30	Com	Com	Com
32	10	28	30	Com	Com	Com

Tabela IV.3: Combinação de níveis e fatores testados (réplica).

Combinação	Ordem Teste	Vazão	Tempo Espera	Rinsagem	AntiVortice	Escória
33	52	19	1	Sem	Sem	Sem
34	45	28	1	Sem	Sem	Sem
35	28	19	30	Sem	Sem	Sem
36	51	28	30	Sem	Sem	Sem
37	6	19	1	Com	Sem	Sem
38	29	28	1	Com	Sem	Sem
39	11	19	30	Com	Sem	Sem
40	43	28	30	Com	Sem	Sem
41	31	19	1	Sem	Com	Sem
42	7	28	1	Sem	Com	Sem
43	1	19	30	Sem	Com	Sem
44	9	28	30	Sem	Com	Sem
45	46	19	1	Com	Com	Sem
46	64	28	1	Com	Com	Sem
47	21	19	30	Com	Com	Sem
48	24	28	30	Com	Com	Sem
49	2	19	1	Sem	Sem	Com
50	39	28	1	Sem	Sem	Com
51	16	19	30	Sem	Sem	Com
52	22	28	30	Sem	Sem	Com
53	26	19	1	Com	Sem	Com
54	35	28	1	Com	Sem	Com
55	40	19	30	Com	Sem	Com
56	27	28	30	Com	Sem	Com
57	15	19	1	Sem	Com	Com
58	12	28	1	Sem	Com	Com
59	49	19	30	Sem	Com	Com
60	48	28	30	Sem	Com	Com
61	57	19	1	Com	Com	Com
62	58	28	1	Com	Com	Com
63	23	19	30	Com	Com	Com
64	20	28	30	Com	Com	Com

4.2.1 – Procedimento experimental

Em todos os testes, água à temperatura ambiente foi utilizada para simular o aço. A vazão de saída da água da panela foi estimada utilizando a condição de lingotamento no processo industrial. Para comparação, foram utilizadas as vazões de aço da panela correspondentes às condições de velocidades máxima e mínima de trabalho. Para calcular as vazões testadas no protótipo, foi utilizado o critério de similaridade baseado no número de Froude.

Utilizando o critério de froude para similaridade, tem-se que:

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{5/2} \cdot Q_{\text{industrial}}$$

Onde:

Q_{modelo} : Vazão de água de saída da panela em acrílico;

λ : escala entre o modelo e o protótipo;

$Q_{\text{industrial}}$: Vazão de aço da panela industrial.

Para um tarugo com seção quadrada de 155mm de lado, tem-se que a área (A) é igual 0,155m x 0,155m, isto é, 0,024025m². Assim, considerado a velocidade de lingotamento (V) em m/min e o número de veios em operação (N), estima-se que a vazão de aço saindo da panela ($Q_{\text{industrial}}$) seja igual:

$$Q_{\text{industrial}} = V \cdot A \cdot N \quad (\text{m}^3/\text{min})$$

Utilizando o fator de escala (λ) e a expressão para a similaridade de Froude, tem-se que:

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{5/2} \cdot Q_{\text{industrial}}$$

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{5/2} \cdot V \cdot A \cdot N \quad (\text{m}^3/\text{min})$$

A tabela a seguir, mostra alguns valores de vazões para o modelo correlacionando com algumas velocidades de lingotamento industrial.

Tabela IV.4: Relação entre velocidade de lingotamento industrial e vazões.

V (m/min)	A (m ²)	N (veios)	$Q_{\text{industrial}}$ (m ³ /min)	λ	Q_{modelo} (m ³ /min)	Q_{modelo} (l/min)
2,0	0,024	6	0,288	1/3	0,018	18,5
2,5	0,024	6	0,360	1/3	0,023	23,1
3,0	0,024	6	0,432	1/3	0,028	27,7

Como se tem o interesse em avaliar o efeito da variável vazão de saída da panela, ou indiretamente, a velocidade de lingotamento, foram escolhidos os níveis de 19 l/min e 28 l/min para serem avaliados no DOE.

Para escolha do óleo de silicone para simular a escória, foi visada a similaridade entre as viscosidades cinemáticas. Neste caso, para uma escória de panela com viscosidade (μ) de aproximadamente 1,5P e massa específica (ρ) de 2650kg/m³, tem-se uma viscosidade cinemática (ν) de:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,5P}{2650\text{kg/m}^3} = \frac{0,15\text{Pa.s}}{2650\text{kg/m}^3} = 5,66 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 57\text{cst}$$

Como não foi encontrado o óleo de silicone de 60cst, comprou-se o óleo de silicone com 50cst.

Como a literatura em geral cita que a condição inicial de rotação do fluído é um item crítico, neste estudo foram selecionados dois valores extremos, 1 minuto e 30 minutos de tempo de espera, justamente para avaliar o impacto destes níveis. Neste sentido, infere-se que o movimento rotacional do fluído para 1 minuto será maior do que 30 minutos, uma vez que o tempo da água em repouso é menor. É importante registrar que para o enchimento da panela (vazão de 94 l/min), foi escolhida a entrada axial da água sendo o jato direcionado próximo à parede oposta ao orifício de saída e do plug poroso. Esta situação é similar ao enchimento da panela via vazamento do convertedor. A região marcada na figura 4.18 ilustra a região de entrada ou área de impacto da água no fundo da panela.

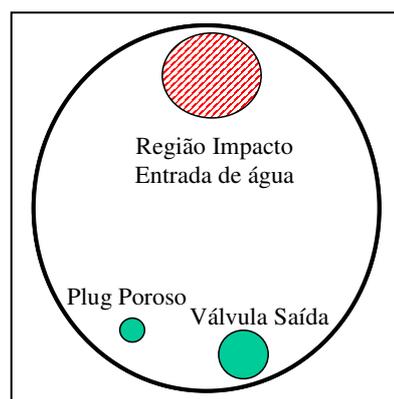


Figura 4.18: Ilustração da região de entrada da água.

Para os testes com um fluído sobrenadante para simular a escória, foi utilizado o óleo de silicone com viscosidade de 50 centistroke com adição de corante azul para facilitar a visualização. O volume de óleo utilizado no modelo físico foi estimado a partir de dados

obtidos em medições das espessuras de escórias no processo industrial. O valor médio medido na panela foi de 6cm, o que equivale a 2cm ou 20mm de espessura de óleo de silicone no modelo físico, uma vez que o fator de escala utilizado foi de 1:3. Para os casos em que não havia a presença do óleo de silicone, pode-se considerar que o fluido sobrenadante era o ar atmosférico.

A figura 4.19 mostra uma imagem do óleo de silicone simulando a escória e abaixo, a água simulando o aço na região inferior da panela. Como a panela utilizada é cônica, a espessura da camada do óleo de silicone é maior que 20mm.

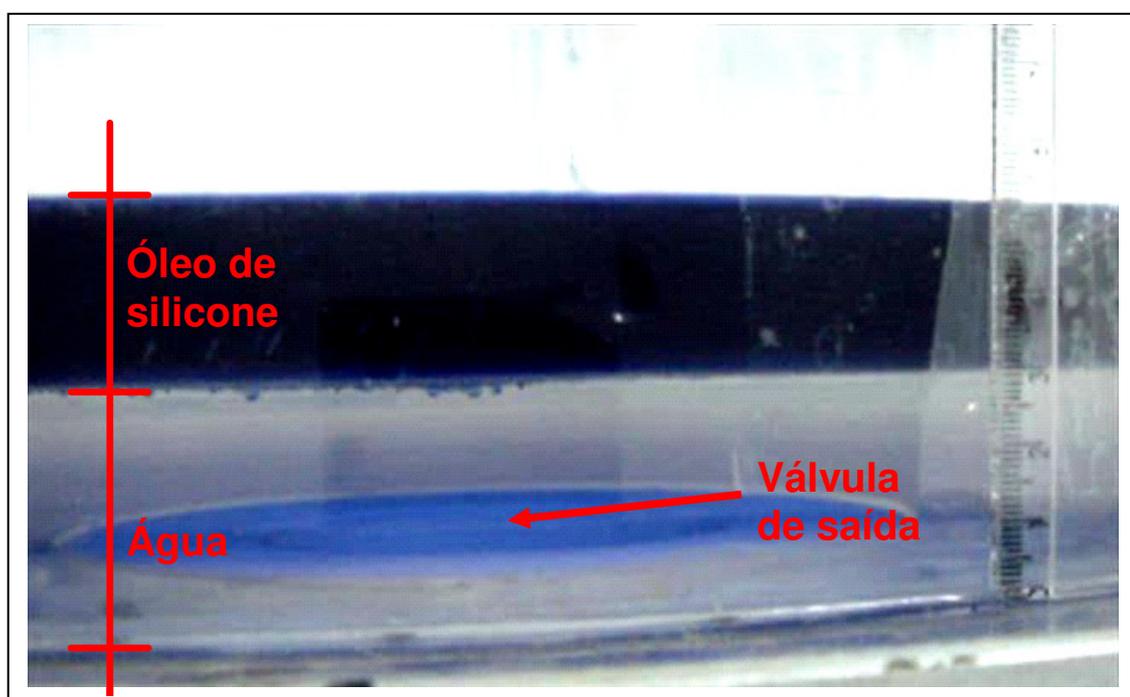


Figura 4.19: Imagem do conjunto água com óleo de silicone no fundo da panela.

A configuração do dispositivo anti-vórtice testado foi baseada numa sugestão do corpo técnico da aciaria, onde foi proposta uma configuração simples e de fácil manuseio. O dispositivo sugerido tinha um desenho próximo a de um disco sobrenadante, pois dispositivos fixos próximos à saída da panela têm a desvantagem de dificultar a colocação de areia para a abertura da panela, assim como o desgaste natural ao longo das corridas no processo industrial. Além disso, a citação de Steffen (1987), onde válvulas tampões tendem a minimizar a formação de vórtice, também favoreceu o design do dispositivo. A figura 4.20 mostra uma figura esquemática da lateral e as

figuras 4.21 (a) e (b) mostram as imagens superior e inferior do dispositivo anti-vórtice. As dimensões mostradas estão em milímetros. Já a figura 4.22 mostra uma imagem do dispositivo utilizado nos experimentos.

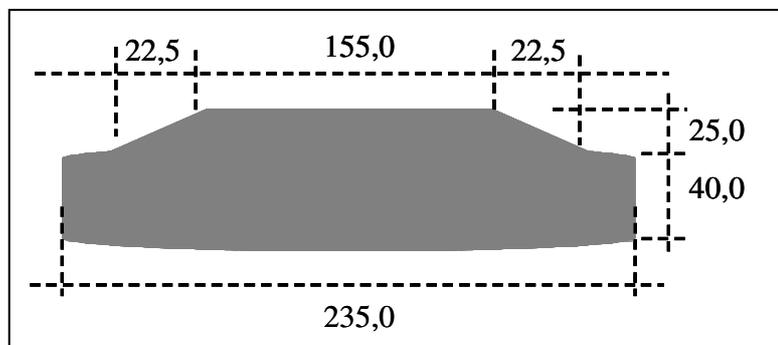


Figura 4.20: Desenho ilustrativo do dispositivo anti-vórtice.

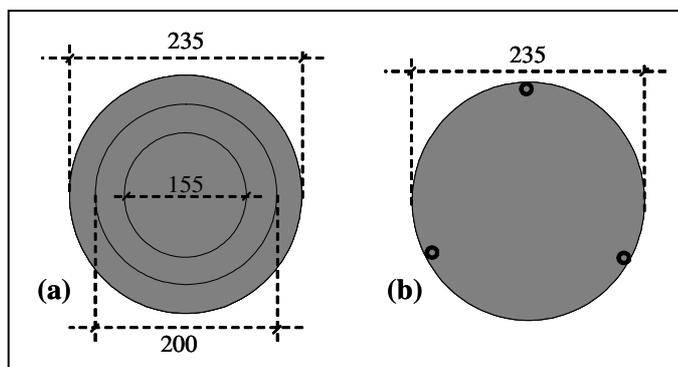


Figura 4.21: Vista superior (a) e inferior (b) do dispositivo anti-vórtice.



Figura 4.22: Imagem do dispositivo anti-vórtice utilizado nos experimentos.

Cada experimento consistiu no enchimento da panela de acrílico com água de forma axial até o nível de 86,3% da altura total da panela. Este valor é igual 1036mm de coluna de água dentro da panela de acrílico, valor equivalente a 130 toneladas de aço na panela industrial.

Logo após atingir o nível de 86,3%, desligou-se a bomba de água e iniciou-se a contagem do tempo de espera. De acordo com o planejamento de experimentos, eram inseridos ou não, o dispositivo anti-vórtice e/ou o óleo de silicone (equivalente à espessura de 2cm). Após o tempo de espera de 1 minuto ou 30 minutos, abriu-se a panela e, dependendo dos casos, injetava-se ou não ar pelo plug poroso durante o esvaziamento (vazão de injeção de ar foi de 0,5 l/min). Maiores informações sobre a relação entre vazão de injeção de gases na panela do modelo e do protótipo podem ser pesquisadas no artigo publicado por Pereira (2002).

Ao longo dos experimentos, o Datataker DT600 armazenava todas as informações provenientes dos medidores de nível de água, de vazão e do detector de vórtice. Com essas informações, foi possível avaliar a altura crítica no escoamento da panela, com boa detecção da formação do vórtice e da emulsificação do óleo de silicone ou ar. Além disso, todos os testes foram filmados para avaliação visual do fenômeno.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada teste, onde os parâmetros de interesse foram selecionados de acordo com o “DOE”, foi registrado o nível de água no momento em que o detector de escória identificava a passagem do fluido sobrenadante pela válvula de saída.

Para distinguir os valores normais (quando só há a passagem de água pura) e os valores emitidos pelo detector quando há a presença da passagem de óleo ou ar, foi adotado o valor de 4% de variação (valor igual ao processo industrial), isto é, caso a diferença de milivtagem a cada segundo seja maior que 4%, foi considerado que houve uma passagem significativa de ar ou óleo de silicone junto com a água. A figura 5.1 ilustra o comportamento do detector de escória e a altura de água dentro da panela ao longo do tempo.

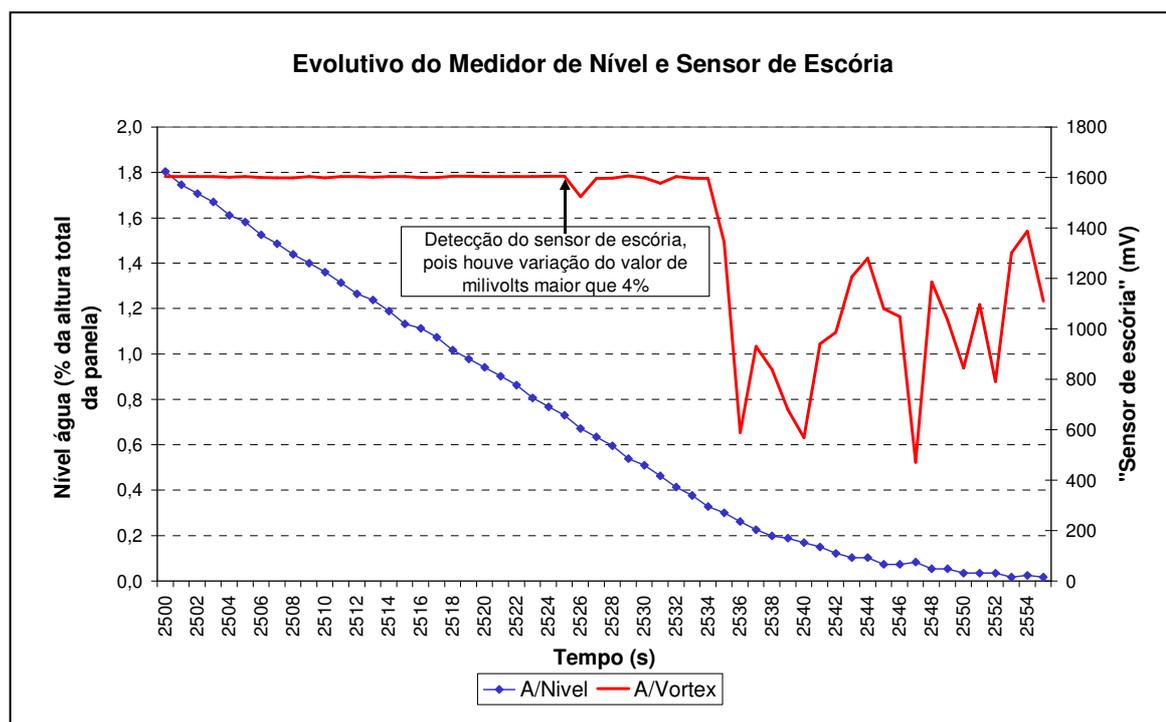


Figura 5.1: Detalhe do comportamento da voltagem emitida pelo sensor do detector de escória (linha contínua) com a altura de água (linha com pontos).

Para estimar o nível equivalente ao momento em que o sensor detectou o vórtice, pode-se avaliar o gráfico, conforme ilustra a figura seguinte.

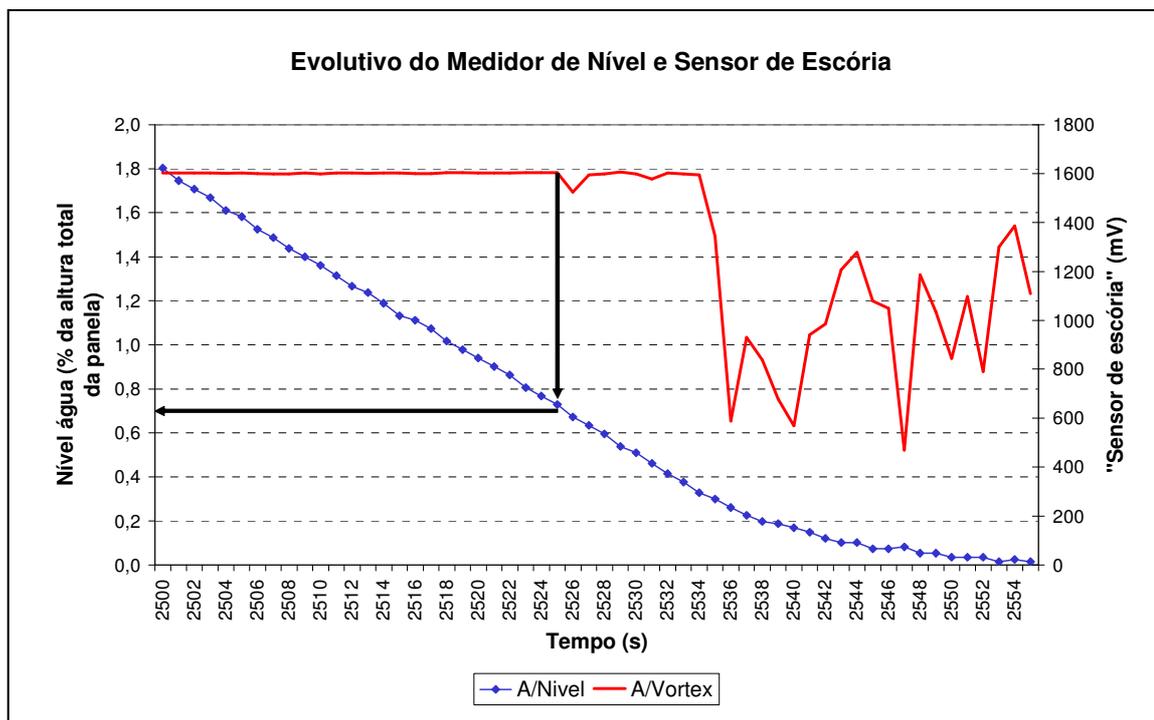


Figura 5.2: Procedimento para obtenção da altura de água no momento do vórtice.

Pelo gráfico, o vórtice se formou a um nível de água equivalente a algo próximo a 0,70% da altura total da panela. Percebe-se que neste procedimento, o valor de referência é susceptível a erros de leitura e interpolação do avaliador.

Para minimizar erros de leitura e interpolação, foi padronizada a seguinte ação:

- Para cada teste, foi estruturada uma planilha a partir dos resultados de vazão, percentual de nível de água dentro da panela e a milivoltagem registrada pelo sensor do detector de escória. Foi feito um cálculo da diferença de cada parâmetro a cada segundo.
- Quando o valor da diferença percentual da milivoltagem indicada pelo detector de escória era acima de 4%, tinha-se então a referência para a obtenção do percentual de nível de água no momento da passagem de ar e/ou óleo de silicone devido ao vórtice ou dreno.

Conforme pode ser observado na tabela seguinte, até o marcador 2524, a variação da leitura do sensor de escória (%Vortex) variou muito pouco, de 0,1% até 0,3%. Porém, nos marcadores 2525 e 2526, a milivoltagem (A/Vortex) mudou de 1604mV para

1524mV, ou seja, uma variação de 5% em um segundo, indicando que houve uma mudança no comportamento da passagem de água. Esta variação indica que houve a presença de algum fluido diferente da água, que neste caso era o ar. Assim, calculando a variação da voltagem do sensor de escória para todas as planilhas, foi possível estimar o nível em que houve a formação do vórtice de forma confiável, minimizando possíveis erros de leituras dos gráficos. Comparando o resultado da tabela através de cálculos, percebe-se que o nível foi de 0,67% contra 0,70% citado anteriormente.

Tabela V.1: Dados da vazão (A/Vazão) em l/min, nível de água (A/Nível) em percentual e detector de escória (A/Vortex) em mV, ao longo do tempo (Time), assim como as respectivas variações percentuais a cada segundo (%Vazão, %Nível, %Vortex).

Marcador	A/Vazao	A/Nivel	A/Vortex	Time	%Vazão	%Nível	%Vortex
2500	18,9	1,80	1603	2006/11/16 12:53:38	2,2	3,2	0,1
2501	19,3	1,75	1602	2006/11/16 12:53:39	2,7	2,2	0,0
2502	19,8	1,71	1602	2006/11/16 12:53:40	0,4	2,2	0,0
2503	19,9	1,67	1603	2006/11/16 12:53:41	0,1	3,5	0,1
2504	19,9	1,61	1601	2006/11/16 12:53:42	0,8	1,8	0,1
2505	20,1	1,58	1603	2006/11/16 12:53:43	0,0	3,6	0,2
2506	20,1	1,52	1600	2006/11/16 12:53:44	0,0	2,5	0,1
2507	20,1	1,49	1599	2006/11/16 12:53:45	0,4	3,2	0,0
2508	20,2	1,44	1599	2006/11/16 12:53:46	0,0	2,7	0,2
2509	20,2	1,40	1602	2006/11/16 12:53:47	0,4	2,7	0,2
2510	20,1	1,36	1599	2006/11/16 12:53:48	2,0	3,5	0,2
2511	19,7	1,31	1603	2006/11/16 12:53:49	1,4	3,6	0,0
2512	19,4	1,27	1603	2006/11/16 12:53:50	1,3	2,3	0,2
2513	19,1	1,24	1601	2006/11/16 12:53:51	0,5	3,9	0,1
2514	19,0	1,19	1603	2006/11/16 12:53:52	1,2	4,8	0,0
2515	18,8	1,13	1603	2006/11/16 12:53:53	0,0	1,7	0,3
2516	18,8	1,11	1599	2006/11/16 12:53:54	0,2	3,4	0,0
2517	18,8	1,07	1599	2006/11/16 12:53:55	0,1	5,3	0,3
2518	18,8	1,02	1605	2006/11/16 12:53:56	0,1	3,8	0,1
2519	18,8	0,98	1604	2006/11/16 12:53:57	0,2	3,9	0,1
2520	18,8	0,94	1603	2006/11/16 12:53:58	0,0	4,1	0,0
2521	18,8	0,90	1603	2006/11/16 12:53:59	0,3	4,2	0,0
2522	18,9	0,86	1604	2006/11/16 12:54:00	1,4	6,7	0,0
2523	19,1	0,81	1604	2006/11/16 12:54:01	1,5	4,7	0,1
2524	19,4	0,77	1605	2006/11/16 12:54:02	0,0	5,0	0,0
2525	19,4	0,73	1604	2006/11/16 12:54:03	1,2	7,9	5,0
2526	19,7	0,67	1524	2006/11/16 12:54:04	0,9	5,7	4,7
2527	19,8	0,63	1595	2006/11/16 12:54:05	0,4	6,0	0,2
2528	19,9	0,60	1598	2006/11/16 12:54:06	1,1	9,6	0,5
2529	20,1	0,54	1606	2006/11/16 12:54:07	0,0	5,3	0,4

Outro item interessante sobre o detector de escória é a diferença de leitura quando o experimento era realizado com a presença do óleo de silicone. Todas as vezes que o

sensor detectava a passagem de óleo, a milivoltagem mudava para um patamar acima de 1600mV. Assim, visualmente, é possível identificar quando o teste era só com água (diminuição da voltagem) ou com água e óleo de silicone (aumento da voltagem). A figura 5.3 ilustra o comportamento característico de testes envolvendo a presença de óleo de silicone, onde a voltagem do detector de escória sempre aumenta quando é percebida a presença do óleo de silicone (linha vermelha contínua).

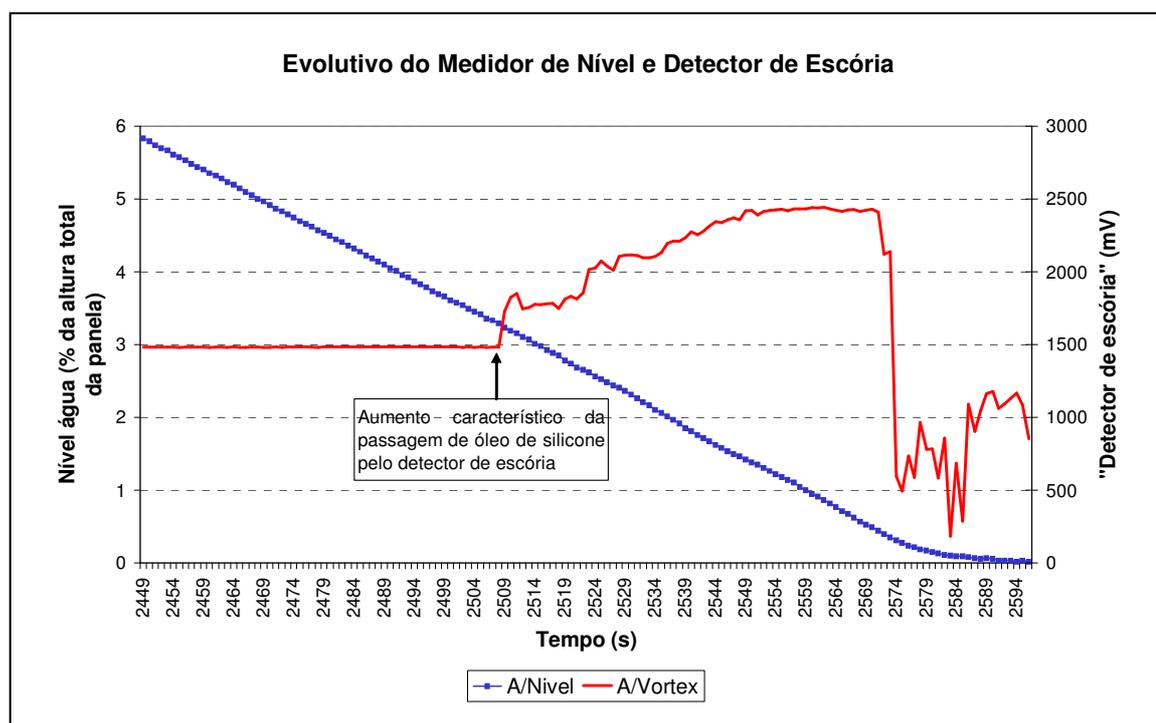


Figura 5.3: Curva característica para testes com a presença do óleo de silicone.

Assim, o detector de escória demonstrou ser capaz de detectar a presença de uma outra fase além da água e distinguir se a segunda fase era ar ou óleo de silicone. Outra observação importante é que para todos os testes com óleo de silicone, a passagem de escória pelo sensor se dava a um nível consideravelmente mais alto do que para os testes só com água.

A tabela seguinte mostra a estrutura dos experimentos e os resultados obtidos para cada teste proposto no DOE. É importante lembrar que a variável resposta ‘altura de água’ está em percentual em relação à altura total da panela.

Tabela V.2: Resultados do DOE para a variável resposta altura de água (%).

Combinação	Ordem Teste	Vazão	Tempo Espera	Rinsagem	AntiVortice	Escória	Altura (%)
1	18	19	1	Sem	Sem	Sem	0,284
2	33	28	1	Sem	Sem	Sem	0,494
3	32	19	30	Sem	Sem	Sem	0,328
4	42	28	30	Sem	Sem	Sem	0,558
5	34	19	1	Com	Sem	Sem	0,328
6	17	28	1	Com	Sem	Sem	0,565
7	37	19	30	Com	Sem	Sem	0,332
8	61	28	30	Com	Sem	Sem	0,788
9	63	19	1	Sem	Com	Sem	0,372
10	25	28	1	Sem	Com	Sem	0,368
11	4	19	30	Sem	Com	Sem	0,302
12	59	28	30	Sem	Com	Sem	0,388
13	8	19	1	Com	Com	Sem	0,282
14	41	28	1	Com	Com	Sem	0,433
15	44	19	30	Com	Com	Sem	0,293
16	47	28	30	Com	Com	Sem	0,326
17	30	19	1	Sem	Sem	Com	1,466
18	38	28	1	Sem	Sem	Com	1,565
19	3	19	30	Sem	Sem	Com	1,393
20	60	28	30	Sem	Sem	Com	1,775
21	13	19	1	Com	Sem	Com	1,646
22	14	28	1	Com	Sem	Com	1,932
23	19	19	30	Com	Sem	Com	1,505
24	5	28	30	Com	Sem	Com	1,941
25	56	19	1	Sem	Com	Com	1,098
26	36	28	1	Sem	Com	Com	1,596
27	53	19	30	Sem	Com	Com	1,058
28	50	28	30	Sem	Com	Com	1,373
29	54	19	1	Com	Com	Com	1,022
30	55	28	1	Com	Com	Com	1,735
31	62	19	30	Com	Com	Com	1,065
32	10	28	30	Com	Com	Com	1,287
33	52	19	1	Sem	Sem	Sem	0,314
34	45	28	1	Sem	Sem	Sem	1,131
35	28	19	30	Sem	Sem	Sem	0,330
36	51	28	30	Sem	Sem	Sem	0,487
37	6	19	1	Com	Sem	Sem	0,337
38	29	28	1	Com	Sem	Sem	0,464
39	11	19	30	Com	Sem	Sem	0,314
40	43	28	30	Com	Sem	Sem	0,760
41	31	19	1	Sem	Com	Sem	0,301
42	7	28	1	Sem	Com	Sem	0,655
43	1	19	30	Sem	Com	Sem	0,301
44	9	28	30	Sem	Com	Sem	0,352
45	46	19	1	Com	Com	Sem	0,257
46	64	28	1	Com	Com	Sem	0,377
47	21	19	30	Com	Com	Sem	0,263
48	24	28	30	Com	Com	Sem	0,321
49	2	19	1	Sem	Sem	Com	1,467
50	39	28	1	Sem	Sem	Com	1,595
51	16	19	30	Sem	Sem	Com	1,344
52	22	28	30	Sem	Sem	Com	1,741
53	26	19	1	Com	Sem	Com	1,183
54	35	28	1	Com	Sem	Com	1,737
55	40	19	30	Com	Sem	Com	1,267
56	27	28	30	Com	Sem	Com	1,819
57	15	19	1	Sem	Com	Com	1,125
58	12	28	1	Sem	Com	Com	1,353
59	49	19	30	Sem	Com	Com	1,003
60	48	28	30	Sem	Com	Com	1,478
61	57	19	1	Com	Com	Com	0,983
62	58	28	1	Com	Com	Com	1,293
63	23	19	30	Com	Com	Com	1,079
64	20	28	30	Com	Com	Com	1,383

O software Minitab foi utilizado para fazer a análise dos testes que compõem o DOE. A figura 5.4 mostra o gráfico de Pareto com os efeitos dos fatores e suas combinações na variável resposta. O nível de significância utilizado foi de 5% ($\alpha = 0,05$), que está associado à probabilidade de uma tomada de decisão errada sobre a hipótese de que não há diferença estatística significativa entre os tratamentos. A linha pontilhada representa o valor da estatística de teste que permite diferenciar os fatores mais significativos (à direita da linha) daqueles que são irrelevantes, ou têm pouca influência na altura de formação do vórtice e arraste de óleo/ar com a água.

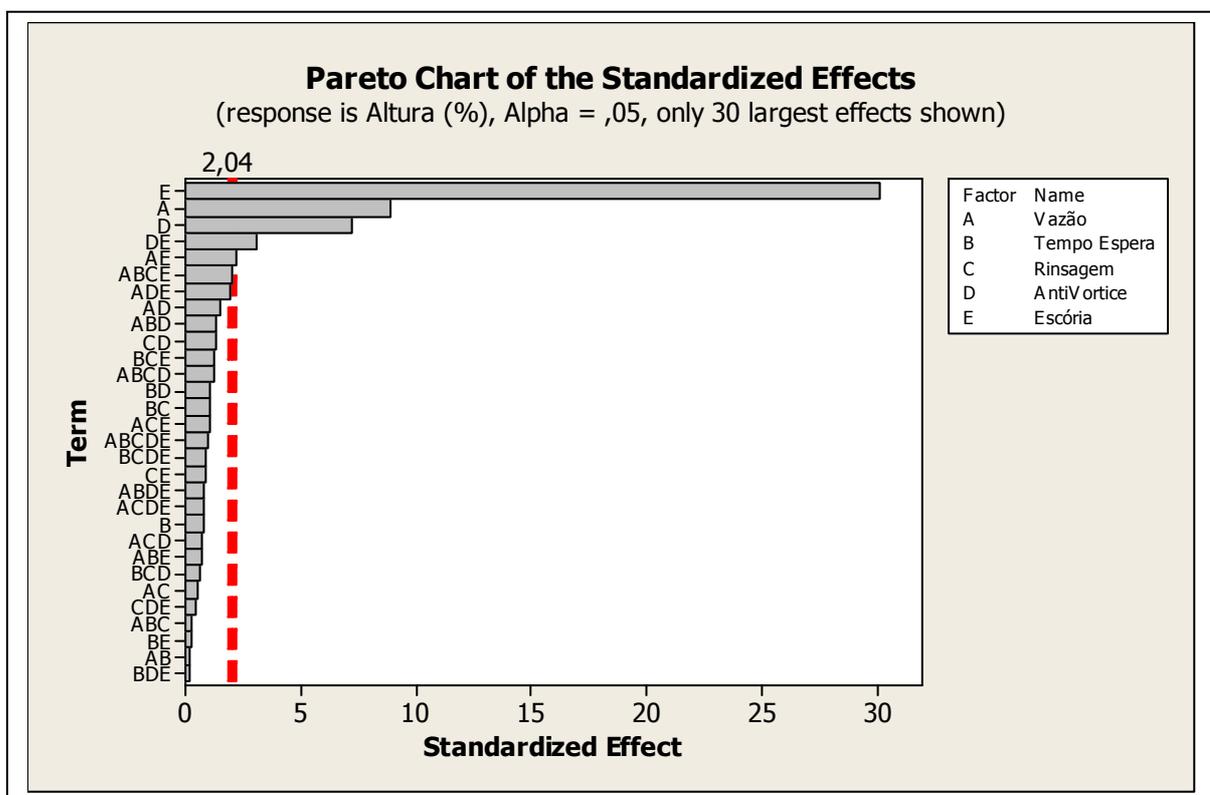


Figura 5.4: Gráfico de pareto com os fatores e interações significativas.

A figura 5.4 mostra que há uma forte influência da presença da escória (barra E), da vazão de saída (barra A) e dispositivo antivórtice (barra D) na variável resposta altura de água. Além disso, algumas interações de fatores foram significativas (barras DE, AE e ABCE). Neste resultado, chama atenção a interação de quinta ordem ABCE, onde mostra que há uma interação de quarta ordem, situação pouco comum na prática. No entanto, deve-se considerar esta interação devido ao rigor empregado nos experimentos.

Uma forma de análise dos testes é através da ferramenta Cube Plot (Figura 5.5), onde em cada quina dos cubos são apresentados os valores médios da altura crítica para cada combinação de níveis e fatores.

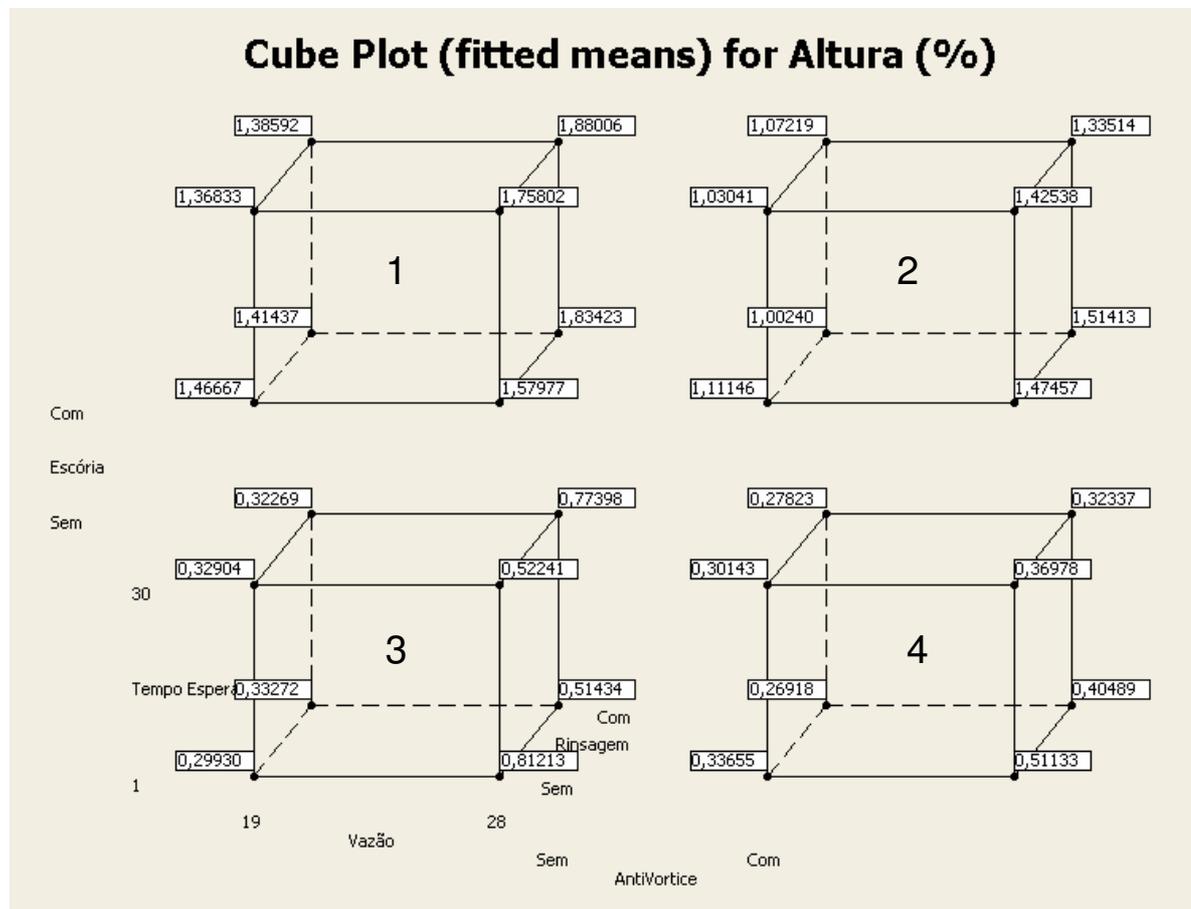


Figura 5.5: Cube Plot com os valores de altura para os fatores e interações.

A análise por Cube Plot é um pouco complexa, onde, por exemplo, para comparar os resultados avaliando a influência da escória, deve-se fazer uma comparação entre os cubos 1 e 2 (com escória) com os cubos 3 e 4 (sem escória). De forma análoga, pode-se comparar a influência do dispositivo anti-vórtice analisando os cubos 1 e 3 (sem dispositivo) com 2 e 4 (com dispositivo). Já a influência da vazão pode ser verificada comparando as faces esquerdas (19 l/min) com as faces direitas (28 l/min) de todos os cubos. Da mesma forma, a influência do tempo de espera pode ser verificada comparando as faces superiores (30min) com as faces inferiores (1min). Já a influência da rinsagem pode ser verificada comparando as faces da frente dos cubos (sem rinsagem) com as faces posteriores (com rinsagem).

Como a variável resposta é a altura crítica, quanto menor for o valor médio, melhor será o resultado. Portanto, o menor valor encontrado foi de 0,27%, localizado no cubo 4. Assim, a melhor condição do experimento foi o teste sem escória, com a presença do dispositivo anti-vórtice, com a vazão de 19 l/min, com o tempo de espera de 1 minuto e com a presença da rinsagem. Desta forma se pode verificar a influência dos fatores e interações, mas como citado anteriormente, é uma avaliação bem complexa. Uma forma de contornar esta análise é através da ferramenta denominada de Response Optimizer, muito útil e adequada para situações como estas.

Para facilitar a avaliação dos resultados, o Response Optimizer apresenta telas amigáveis onde é possível identificar quais são as condições de operação mais adequadas e a situação que satisfaça da melhor maneira possível todas as variáveis simultaneamente (Damasceno, 2003). A figura 5.6 mostra a melhor condição obtida para todos os fatores e níveis testados.

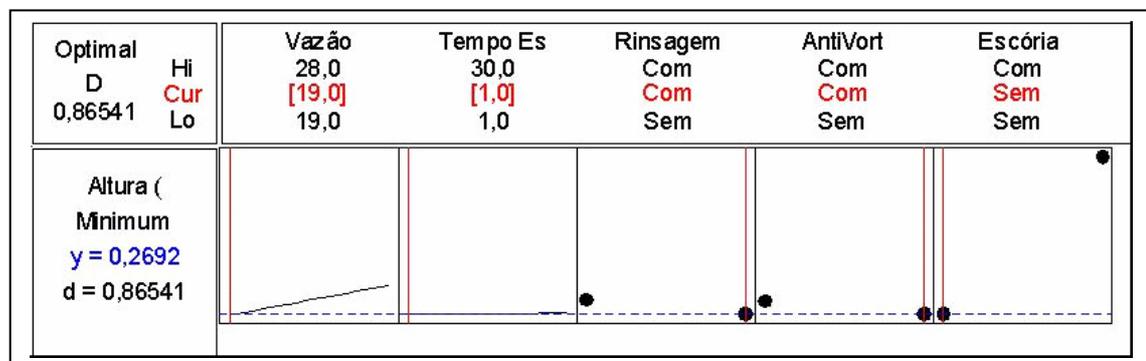


Figura 5.6: Tela do Response Optimizer com o melhor resultado para altura crítica.

Idêntico ao apresentado anteriormente na análise do Cube Plot, a melhor condição obtida pelo Response Optimizer foi:

- Vazão de 19 l/min;
- Tempo de espera de 1 minuto;
- Uso da rinsagem;
- Uso do dispositivo anti-vórtice;
- Sem a presença de escória.

Nesta condição, também foi obtida uma altura mínima de 0,27% ou 3mm.

A grande vantagem da análise através do Response Optimizer é facilidade em se fazer comparações. A figura 5.7 mostra as telas quando se altera o nível do fator escória na panela.

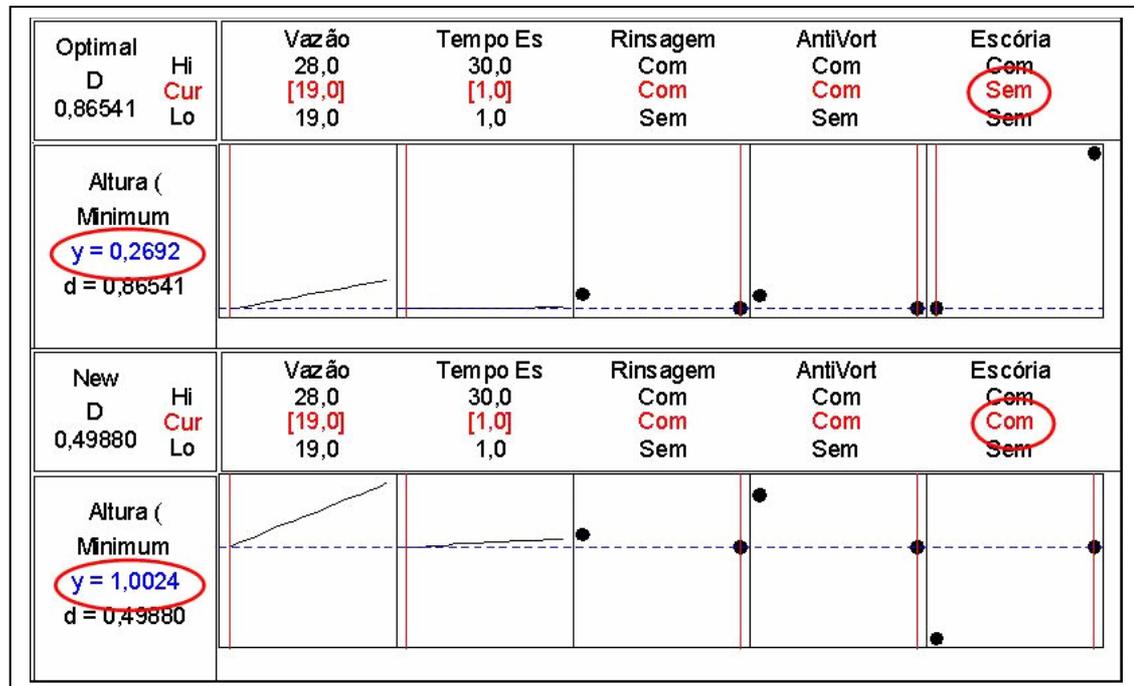


Figura 5.7: Telas com os resultados comparativos avaliando a escória.

Percebe-se que a presença da escória levou a uma grande diferença na altura crítica (1,00% contra 0,27%), isto é, para testes com o óleo de silicone simulando a escória, a altura de detecção do vórtice foi 372% mais alto do que a condição de testes só com água. Este resultado é muito importante, pois deste modo não se pode comparar testes realizados somente com água com os testes que simularam a presença de escória. O resultado obtido neste DOE está de acordo com o apresentado por Sankaranayan (2004), porém não na mesma ordem de grandeza para as diferenças de altura.

Como no processo industrial há a presença de escória, será feita uma análise dos fatores sempre levando em consideração a presença de óleo de silicone. Os valores de referência são: vazão de água de 19 l/min, tempo de espera de 1 minuto, com rinsagem, com anti-vórtice e com a presença de escória, onde a altura foi de 1,00%.

A figura 5.8 mostra a influência da vazão de saída de água da panela. Como citado pela revisão bibliográfica, quanto maior a vazão, mais alta será a formação do vórtice. Neste DOE, para os valores de referência, a altura crítica média foi de 1,00% (12mm), como citado anteriormente. Quando a vazão foi alterada de 19 l/min para 28 l/min sem variar os demais parâmetros, a nova altura foi de 1,51% (18mm), ou seja, a influência da alteração da vazão de 19 l/min para 28 l/min levou a formação do vórtice a uma altura 51% maior.

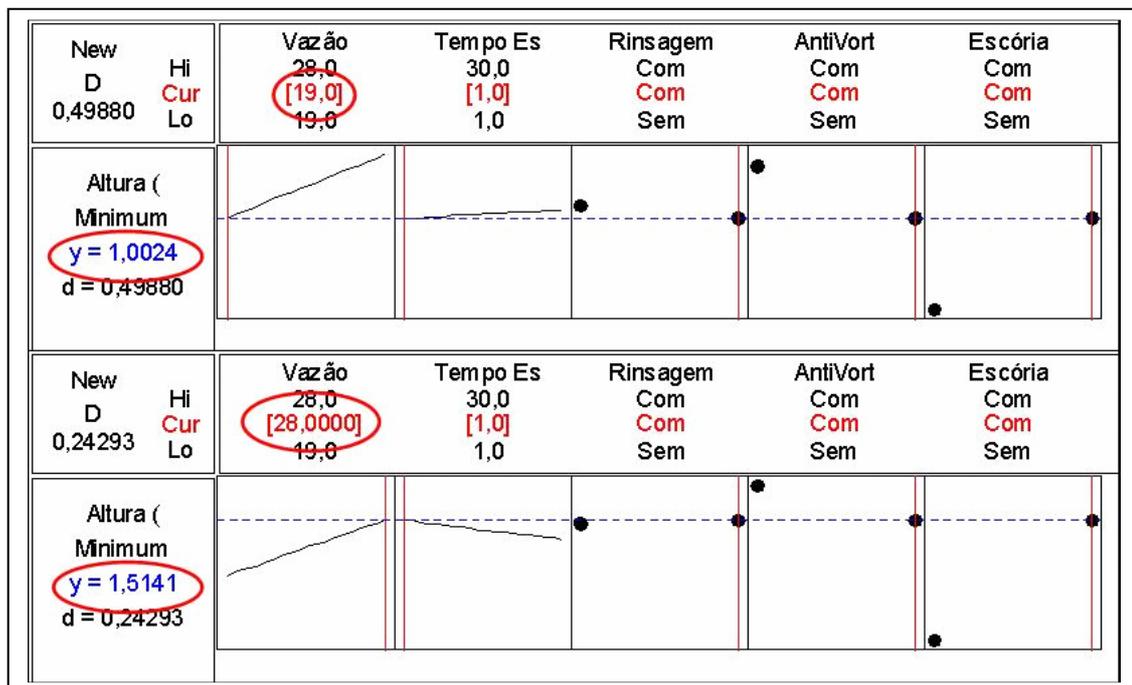


Figura 5.8: Telas com os resultados comparativos avaliando a vazão (com escória).

Um item que também deve ser observado na figura 5.8 é a mudança do efeito do tempo de espera quando se tem a alteração de vazão. Para 19 l/min, a melhor condição para minimizar o vórtice é o tempo de espera de 1 minuto. Porém, quando se tem a vazão de 28 l/min, a melhor condição para minimizar o vórtice é para tempo de espera mais longo, neste caso, 30 minutos. Da mesma forma, de maneira bem sutil, tem-se uma inversão dos valores otimizados para reduzir a altura crítica quando se avalia o item rinsagem.

A figura 5.9 ilustra o efeito do aumento do tempo de espera para a vazão de 28 l/min. É significativa a redução da altura crítica quando se aumenta o tempo de espera de 1 minuto para 30 minutos, de 1,51% (18,2mm) para 1,34% (16,0mm), respectivamente. Portanto, para vazões mais elevadas, o tempo de espera de 30 minutos mostrou-se mais efetivo para reduzir a altura crítica.

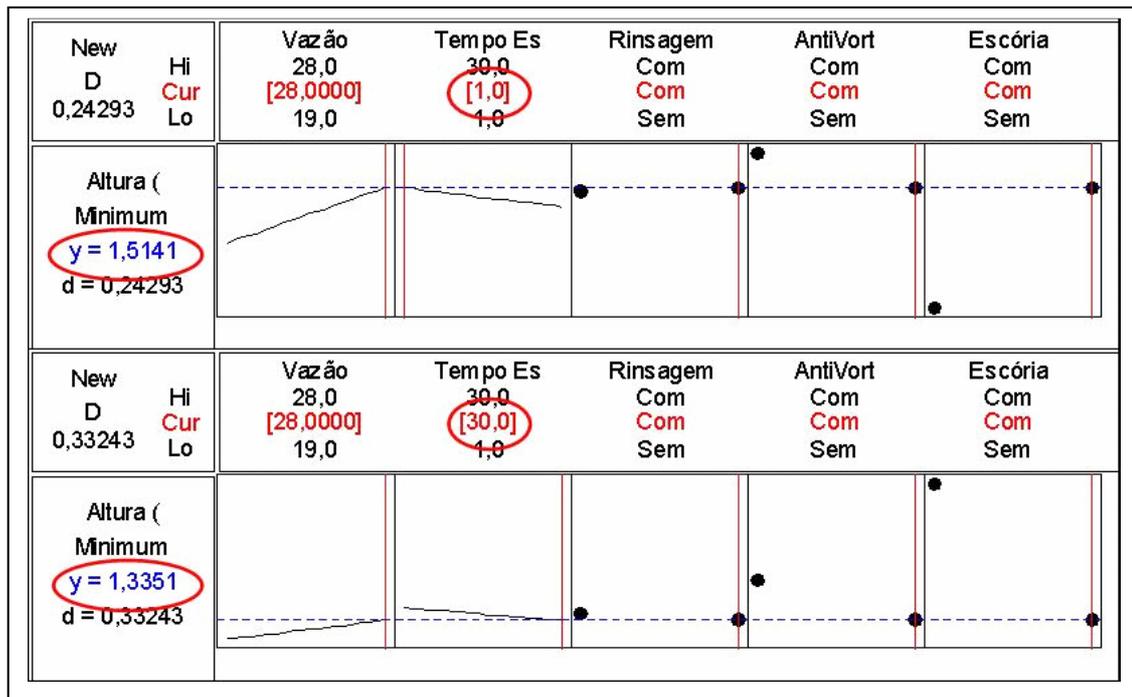


Figura 5.9: Comparação avaliando o tempo de espera (com escória e vazão de 28l/min).

Voltando aos valores de referência; vazão de 19 l/min, tempo de espera de 1 minuto, com a rinsagem, com dispositivo anti-vórtice e com a presença de escória, altura crítica média de 1,00% (12mm); quando se altera o tempo de espera para 30 minutos, a altura crítica encontrada foi de 1,07% (12,9mm), uma diferença de quase 7%. O tempo de espera foi o que apresentou a menor influência na formação do vórtice dentro dos parâmetros avaliados no DOE. Como citado anteriormente, rigorosamente, este resultado não está em consenso com os resultados obtidos na literatura, pois para o nível de tempo de espera maior (fluido mais calmo), a altura crítica foi maior. O fenômeno que pode explicar este resultado é o longo tempo de esvaziamento da panela em conjunto com uma vazão de saída baixa levando a baixa velocidade tangencial da água. A figura 5.10 mostra um comparativo quando se altera o tempo de espera à partir dos valores de referência.

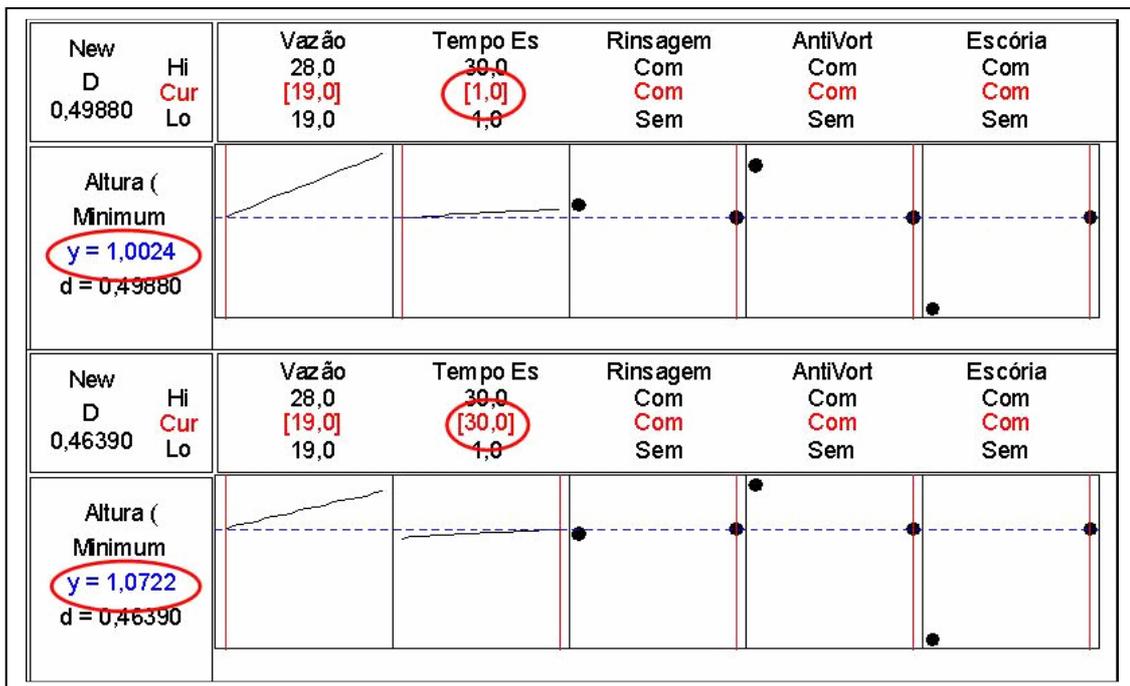


Figura 5.10: Comparação entre os tempos de espera (com escória).

A rinsagem apresentou um efeito um pouco maior do que o tempo de espera, com uma altura crítica de 1,11% (13,3mm), uma diferença de quase 11%. A figura 5.11 mostra o efeito da rinsagem.

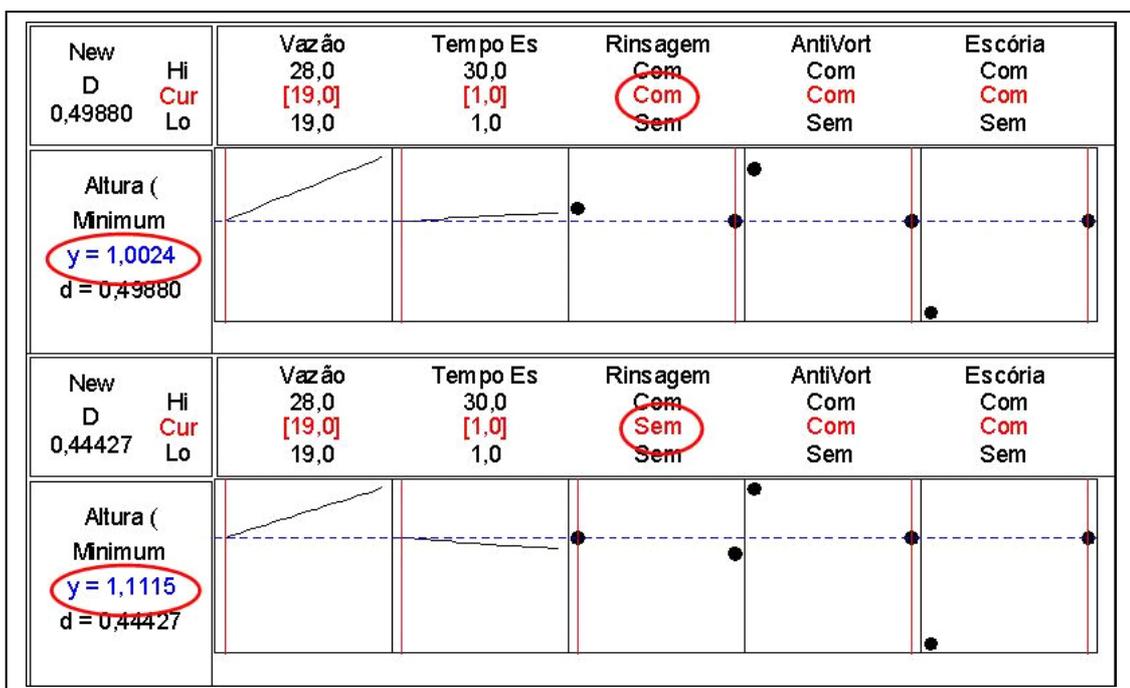


Figura 5.11: Avaliação da atuação da rinsagem (com escória).

Analisando a atuação do dispositivo anti-vórtice, foi verificado que o efeito da presença do dispositivo reduziu a altura crítica de 1,41% (17mm) para 1,00% (12mm), uma diferença de quase 41%. A figura 5.12 mostra o efeito da presença do dispositivo anti-vórtice na altura crítica.

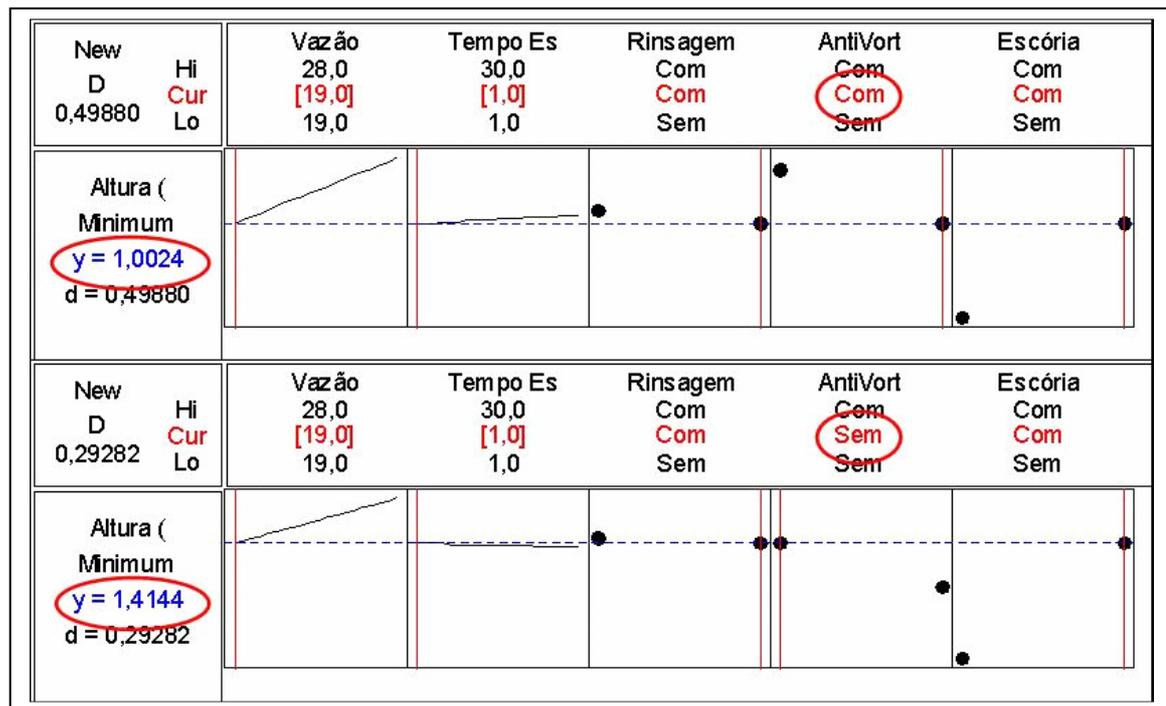


Figura 5.12: Avaliação da atuação do dispositivo anti-vórtice (com escória).

A idéia de um dispositivo para reduzir a altura crítica de formação do vórtice é objeto de vários estudos e testes em modelos físicos. O desenho concebido para este estudo, onde foi visada uma peça simples, mas funcional, provou-se eficiente para reduzir a altura de formação do vórtice.

A tabela V.3 mostra uma síntese dos resultados mais importantes evidenciados pelo DOE.

Tabela V.3: Alturas obtidas para os principais efeitos.

Vazão (l/min)	Tempo (s)	Rinsag	AntiVort	Escória	Altura (%)	Altura (mm)	Observação
19	1	Com	Com	Sem	0,27	3,2	Melhor resultado dos testes
19	1	Com	Com	Com	1,00	12,0	Comparativo com e sem escória
19	30	Com	Com	Com	1,07	12,9	Efeito do tempo de espera com a presença de escória
19	1	Sem	Com	Com	1,11	13,3	Efeito da rinsagem com a presença de escória
19	1	Com	Sem	Com	1,41	17,0	Efeito do antivortice com a presença de escória
28	1	Com	Com	Com	1,51	18,2	Efeito da vazão com a presença de escória
28	30	Com	Com	Com	1,34	16,0	Efeito do tempo de espera com 28 l/min e com a presença de escória

De forma resumida, pode-se citar:

- Há uma diferença significativa na altura crítica quando se simula sem e com o óleo de silicone (de 3,2mm para 12mm, respectivamente);
- A alteração controlada do tempo de espera indicou resultados menos pronunciados, principalmente para a vazão de 19 l/min, onde a altura crítica foi de 12,0mm para o tempo de espera de 1 minuto e 12,9mm para o tempo de espera de 30 minutos. Porém, para a vazão de 28 l/min, o tempo de espera mostrou-se eficiente para reduzir a altura crítica, pois de 18,2mm (tempo de espera de 1 minuto) foi para 16,0mm (tempo de espera de 30 minutos);
- A rinsagem apresentou resultados moderados para altura crítica. De 13,3mm sem a rinsagem caiu para 12,0mm com a atuação da rinsagem, ou seja, uma diferença de 11%;
- O dispositivo anti-vórtice atuou de forma significativa para reduzir a altura crítica: de 17mm sem o dispositivo, foi para 12mm com o anti-vórtice, isto significou uma diferença de 41%;
- A vazão de saída de água da panela também impactou a altura crítica de forma significativa, pois de 12,0mm para uma vazão de 19 l/min, elevou a altura para 18,2mm para a condição cuja vazão era de 28 l/min.

Mediante aos resultados obtidos da modelagem física, pode-se inferir que para velocidade de lingotamento contínuo de 3m/min (equivalente à vazão de água de 28

l/min no modelo físico), o arraste da escória sobrenadante para o fundo da panela irá acontecer a uma altura equivalente a $3 \times 18,2 \text{ mm}$, isto é, a $54,6 \text{ mm}$ ou $0,0546 \text{ m}$. Como a panela industrial tem aproximadamente $2,604 \text{ m}$ de diâmetro no fundo, isto significa uma área equivalente a $5,326 \text{ m}^2$. Portanto, para a altura de $0,055 \text{ m}$ de aço, tem-se algo em torno de $0,293 \text{ m}^3$ de aço ($0,055 \text{ m} \times 5,326 \text{ m}^2$). Considerando a massa específica do aço líquido de 7000 kg/m^3 , tem-se um peso equivalente a 2050 kg de aço no momento de fechamento da válvula gaveta. De maneira análoga, tem-se uma altura de 36 mm de aço para a velocidade de lingotamento de 2 m/min (equivalente a 19 l/min de água), isto implica em aproximadamente 1342 kg de aço. Assim, em termos de aço remanescente na panela, tem-se uma perda de 708 kg de aço por corrida quando se trabalha com velocidade de $3,0 \text{ m/min}$ em comparação com a situação de $2,0 \text{ m/min}$.

Avaliando a eficácia do dispositivo anti-vórtice, para uma situação sem o uso do dispositivo, a altura de aço estimada é de $3 \times 17 \text{ mm}$, ou seja, 51 mm . Isto é equivalente a 1901 kg de aço. Com o dispositivo, a altura equivalente foi de $3 \times 12 \text{ mm}$, ou seja, 36 mm , ou 1342 kg , como calculado no item anterior. Portanto, o dispositivo anti-vórtice permitiria um aproveitamento de 559 kg de aço a cada panela. Para o caso específico da Belgo Monlevade, que fabrica em torno de 900 corridas por mês, significa um aproveitamento de mais 503 toneladas de aço líquido.

6 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram que se tirassem as seguintes conclusões:

-O melhor resultado obtido foi na condição onde a vazão de saída de água era de 19 l/min, com 1 minuto de tempo de espera, com a rinsagem durante o esvaziamento, com a atuação do dispositivo anti-vórtice e sem a presença do óleo de silicone (escória). Neste caso, a passagem de ar pelo orifício de saída foi detectada com uma coluna de água de apenas 3mm;

-Foi verificada uma significativa diferença da altura de formação do vórtice quando se simula o esvaziamento da panela com e sem a presença do óleo de silicone (12mm e 3mm, respectivamente). Este fato é importante, pois deste modo não se pode comparar os resultados dos testes realizados somente com água com os experimentos com a presença de um óleo sobrenadante simulando a escória;

-Analisando os resultados dos testes, mas sempre levando em consideração a presença de escória, os efeitos da vazão e do dispositivo anti-vórtice foram os mais expressivos;

-Quando se compara a vazão de 19 l/min com 28 l/min nas mesmas condições, a altura variou de 1,00% (12,0mm) para 1,51% (18,1mm), ou seja, a influência da alteração da vazão levou a formação do vórtice a uma altura 51% maior;

-Para 19 l/min, não se verificou influência significativa do tempo de espera. A alteração do tempo de espera de 1 minuto para 30 minutos levou a uma altura crítica de 1,00% (12,0mm) para 1,07% (12,9mm), uma diferença de 7%;

-O fenômeno que explica a pequena diferença quando se avaliou o tempo de espera de 1 minuto com o tempo de 30 minutos para a vazão de 19 l/min é a baixa vazão de saída em conjunto com o longo tempo de esvaziamento. Esta interação leva a um fluxo menos turbulento no escoamento da água na válvula de saída da panela.

-Para a vazão de 28 l/min, a melhor condição para minimizar o vórtice é através de um tempo de espera mais longo. Para 1 minuto, a altura crítica foi de 1,51% (18,2mm). Para 30 minutos, a altura crítica foi de 1,34% (16,0mm). Isto significa uma redução de 14% na altura crítica. Este resultado era esperado, pois um tempo de espera maior reduz a velocidade inicial tangencial da água, reduzindo a altura de formação do vórtice.

-Na situação onde a vazão era de 19 l/min, tempo de espera de 1 minuto, com rinsagem, com dispositivo anti-vórtice e com a presença de escória, a altura crítica média foi de 1,00% (12,0mm). Quando se compara a situação sem a rinsagem, a altura crítica encontrada foi de 1,11% (13,3mm), ou seja, um aumento de quase 11%.

-Analisando a atuação do dispositivo anti-vórtice, foi verificado que o efeito da presença do dispositivo reduziu a altura crítica de 1,41% (17mm) para 1,00% (12mm), uma diferença de quase 41%. O desenho concebido para o teste, onde foi visada uma peça simples e funcional, provou-se eficiente para reduzir a altura de formação do vórtice.

-O estudo do esvaziamento da panela no modelo físico mostrou-se eficaz para identificar os parâmetros mais importantes para minimizar o arraste de ar e/ou óleo de silicone para o orifício de saída da panela.

-Finalmente, pode-se inferir que o dispositivo anti-vórtice desenvolvido para este estudo permite um aproveitamento de 559kg de aço a cada panela. Como a Belgo Monlevade produz em torno de 900 corridas por mês, isto significaria um aproveitamento de mais 503 toneladas de aço líquido mensal.

7 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência da viscosidade cinemática do óleo sobrenadante na formação do vórtice.
- Alterar a configuração da panela para checar a influência da inclinação do fundo no vórtice.
- Testar outras opções de dispositivos anti-vórtice como barreiras, injeção conjugada de gases para quebrar o vórtice.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRZEJEWSKI, P.; DIENER, A.; PLUSCHKELL, W.. Model investigations of slag flow during last stages of ladle teeming. Steel Research 58, N° 12, p. 547-552, 1987.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. John Wiley & Sons, Madison, Wisconsin, 1960, cap 13, P108.

CARVALHO, J. L. R. et al. Diagramas de isoviscosidades para vários sistemas de interesse metalúrgico. In: Dados termodinâmicos para metalurgistas. UFMG, Belo Horizonte, 1977, P.319-379.

CHIAPPAROLI, W.; SYLVESTRE S.; MADÍAS J. Primeras experiencias con un modelo hidraulico de una cuchara de acero; In: 13° IAS Steelmaking Seminar, 2001, Buenos Aires Argentina. 689-696.

CHAVES, A. J. M. Avaliação do desempenho operacional de um convertedor LD através do desenvolvimento do processo de sopro com lança de quatro furos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 106pags, 2006.

CHAVES, J. G.; Otimização do fluxo de aço no distribuidor do lingotamento contínuo. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, 147pags, 1997.

COSTA NETO, J. G.; Otimização do fluxo de aço no distribuidor do lingotamento contínuo. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, São Paulo, Brasil, 147pags, 1997.

DAMASCENO, E. C.. Síntese dos principais tópicos abordados no curso 6 σ . Fundação de Desenvolvimento Gerencial - FDG, João Monlevade, Maio 2003.

DAVILA, O.; FERRO L.; MPRALES, R. D.; DEMEDICES G. L.; RAMIREZ-PEREZ P.. Physical Model and Mathematical simulations of ladle draining operations, AISTech Proceedings, Vol 1, p. 873-899, 2005.

DAWSON, S. M.; MOUNTFORD N. D. G.; SOMMERVILLE I. D.. Evaluation of liquid steel quality during metallurgical processing, University of Toronto, Canada, p.109-116, 1988.

GANDRA, C. A. Modelamento físico do fluxo de aço líquido no interior do distribuidor de lingotamento contínuo em regime transiente. UFOP, Ouro Preto, 2002.

HAMMERSCHMID, P.; TACKE, K. H.; POPPER, H.; WEBER, L.; BUBKE, M.; SCHWERDTFEGER, K. Vortex formation during drainage of metallurgical vessels. Ironmaking and Steelmaking, Vol 11, N° 6, p. 332-339, 1984.

KORIA, S. C., KANTH, U.. Model studies of slag carry-over during drainage of metallurgical vessels. Steel Research 65, N° 1, p.8-14, 1994

KEENE, B. J., MILLS, K. C.. Densities of molten slags. In: Slag Atlas, Verlag Stahleisen GmbH, 2nd Edition, Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), p.313-344, 1995

LIN, H. T.; KAO, C. L.; LIN, T. C.; CHEN, J. H.; The decrease of vortexing funnel and draining funnel in tundish casting. AISTech 2005 Proceedings, Volume II, p.125, 2005

MORALES, R. D.; ALONSO, E. T.; DEMEDICES, L. G.; RAMOS, J. P.; Vortex growth and vortex elimination in a slab tundish. AISTech 2005 Proceedings, Volume II, p.118-119, 2005

OLIVEIRA, S. P.. Diagrama de fase aplicados à siderurgia. Curso da Magnesita S.A., João Monlevade, MG, P66-78, Setembro/2004.

PIMENTA, H. M.; VALADARES C. A. G; BELLIGOLI G. C. D. Estudo da passagem de escória na etapa de vazamento de aço panela/distribuidor; In: 11º Seminário de aciaria do IAS, 1997, Buenos Aires Argentina. 199-207.

PENNA, L. V. Trinca de solidificação off-corner no lingotamento contínuo de tarugos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, p.18-24, 2005..

PEREIRA, J. A. M.; FRANÇOIS, M. G.; VILELA A. C. F.. Determinação do tempo de mistura numa panela siderúrgica. In: REM: Revista Escola de Minas, Vol.55, Nº 55, Ouro Preto, Jan/Mar. 2002.

SANKARANARAYANAN, R. Modeling of slag entraining funnel formation ('vortex') during liquid metal transfer operations. Thesis of Doctor of Philosophy. McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 441pages, 1994.

SANKARANARAYANAN, R.; GUTHRIE, R. I. L. Slag entraining vortexing funnel formation during ladle teeming: similarity criteria and scale-up relationships. Ironmaking and Steelmaking, Vol 29, Nº 2, p. 147-153, 2002.

SANKARANARAYANAN, R.; Slag entraining funnel formation during liquid metal transfer operations. PhD Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 442pags, 1994.

STEFFEN, R. Fluid flow phenomena of metal and slag during drainage of metallurgical vessels. Proceedings of the international conference secondary metallurgy. Aachen, West Germany , Preprints, P97-118.

TAVARES, R. P. Viscosidade. In: Apostila de fenômenos de transporte. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Abril/2002, P29-66.

THOMAS, B. G. Continuous Casting, the encyclopedia of material: science and technology. Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, V2, P 1595-1599, 2001.

VILELA, A. C. F., PEREIRA J. A. M. Modelamento físico no lingotamento contínuo. In: VILELA, A. C. F., SOARES, R. B. Lingotamento contínuo de blocos e tarugos. São Paulo, ABM, 2002, Capítulo 13, P146-147.

VILELA, A. C. F., TRINDADE L. B. Modelamento matemático no lingotamento contínuo. In: VILELA, A. C. F., SOARES, R. B. Lingotamento contínuo de blocos e tarugos. São Paulo, ABM, 2002, Capítulo 14, P163-164.

WERKEMA, M. C. C. As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos, Editora de Desenvolvimento Gerencial, Belo Horizonte, MG, p73, 1995.

WERKEMA, M. C. C. Apostila para treinamento do programa seis sigma, Belo Horizonte, MG, p.2.5 -2.6, 2000.