



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



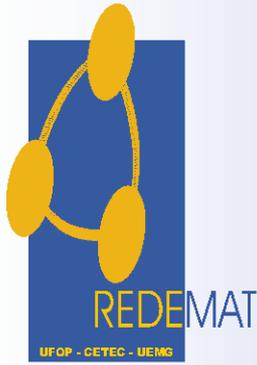
## Dissertação de Mestrado

**"Estudo do Mecanismo de Formação de Vórtice Durante a Etapa de Vazamento do Aço da Panela para o Distribuidor do Lingotamento Contínuo da CST Através da Modelagem Física"**



**Autor: Sandro de Souza Santos**  
**Orientador: Prof. PhD Carlos Antônio da Silva**  
**Co-Orientador: Engº MSc Henrique Silva Furtado**

**Outubro de 2006**



# REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Sandro de Souza Santos

**Estudo do Mecanismo de Formação de Vórtice Durante a Etapa de Vazamento do Aço da Panela para o Distribuidor do Lingotamento Contínuo da CST Através da Modelagem Física**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. PhD Carlos Antônio da Silva

Co-Orientador: Eng<sup>o</sup> MSc Henrique Silva Furtado

Ouro Preto, outubro de 2006

S237e

Santos, Sandro de Souza.

Estudo do mecanismo de formação de vórtice durante a etapa de vazamento do aço da panela para o distribuidor do lingotamento contínuo da CST através da modelagem física [manuscrito]. / Sandro de Souza Santos. – 2006.

xi, 101 f.: il. color., grafs. , tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio da Silva.

Co-orientador: Prof. Henrique Silva Furtado.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

1. Aço - Teses. 2. Fundição contínua - Teses. 3. Metais - Fundição - Teses.  
I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 669-41

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)



**“Estudo do Mecanismo de Formação de Vórtice Durante a  
Etapa de Vazamento do Aço da Panela para o Distribuidor do  
Lingotamento Contínuo da CST Através da Modelagem Física”**

**Autor(a): Sandro de Souza Santos**

Dissertação defendida e aprovada, em 30 de outubro de 2006, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Carlos Antônio da Silva (PhD) - Orientador  
REDEMAT / Univ. Federal de Ouro Preto / DEMET

Eng. Henrique Silva Furtado (MSc.)  
Cia. Siderúrgica de Tubarão / ARCELOR

Eng. Joaquim Gonçalves Costa Neto (DSc)  
BELGO / ARCELOR

Prof. Varadarajan Seshadri (Dr. Ing.)  
Universidade Federal de Minas Gerais / DEMET

Prof. Itavahn Alves da Silva (DSc)  
Universidade Federal de Ouro Preto / DEMET

**Dedico esse trabalho aos meus pais e minha esposa pelo carinho e incentivo.**

## **AGRADECIMENTOS**

- ✓ A CST pela oportunidade e suporte financeiro deste projeto;
- ✓ Ao Engenheiro Dimas Bahiense Moreira por acreditar desde o início nesta conquista;
- ✓ Ao professor Carlos Antonio Silva pelo conhecimento transmitido, apoio e orientação na elaboração deste trabalho;
- ✓ Ao Engenheiro Henrique Silva Furtado colaboração durante a elaboração deste trabalho;
- ✓ Aos bolsistas que colaboraram na realização das simulações;
- ✓ Aos Engenheiros Marcelo F. Matos e Kleber Beraldo de Andrade pelo apoio;
- ✓ À minha família pelo incentivo;
- ✓ À minha esposa pelo apoio e paciência;
- ✓ Aos colegas de trabalho pela motivação.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVOS GERAIS .....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1. A INFLUÊNCIA DA LIMPIDEZ DO AÇO NO PRODUTO FINAL.....	4
3.2. FORMAÇÃO DOS VÓRTICES .....	5
3.3. ESTUDOS RELACIONADOS À FORMAÇÃO DOS VÓRTICES.....	7
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>33</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
6.1. CONDIÇÕES DE PROCESSO NA CST .....	65
6.2. CAMPO ROTACIONAL FORÇADO.....	65
<b>7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>67</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>68</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3. 1</b> – Escoamento tipo Vórtice Completamente Desenvolvido.....	6
<b>Figura 3. 2</b> – Escoamento tipo Funil.....	6
<b>Figura 3. 3</b> – Sinais Típicos de uma Fotocélula e uma Célula de Carga em Experimentos Conduzidos com Água <sup>[4]</sup> .....	9
<b>Figura 3.4-</b> Curvas Típicas para Diferentes Tempos de Espera em Experimentos com Água. ....	10
<b>Figura 3.5</b> - Aparato Experimental com um Dispositivo Eletromagnético <sup>[1]</sup> . ....	12
<b>Figura 3. 6</b> - Curva de Drenagem em Relação ao Tempo - Não Sendo Aplicado o Campo Magnético (B=0.00T) e Aplicando o Campo Magnético (B=0.19T) <sup>[1]</sup> .....	13
<b>Figura 3. 7</b> – Correlação entre a Velocidade Tangencial e o Tempo de Espera (Panela com diâmetro de 374mm ; Nível Inicial 500mm ; Vazão Enchimento 27l/m) .....	14
<b>Figura 3.8</b> - Decaimento de Velocidade Tangencial ao Longo do Tempo (SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> ).....	15
<b>Figura 3.9</b> - Influência do Tempo de Espera, de Acordo com SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> .....	15
<b>Figura 3.10</b> – “Vortex Buster”, de Acordo com Concepção de SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> .....	16
<b>Figura 3. 11</b> – Velocidade Média Acima da Válvula Durante Drenagem. Vista Superior em um Nível de banho de 0,035m sem Quebradores de Vórtice.....	17
<b>Figura 3. 12</b> – Velocidade Média Acima da Válvula Durante Drenagem. Vista Superior em um Nível de Banho de 0,035m com Quebradores de Vórtice.....	18
<b>Figura 3. 13</b> – Típico Canal de Fluxo Panela-Distribuidor <sup>[11]</sup> .....	18
<b>Figura 3. 14</b> – Influência da Vazão de Saída na Altura do Banho para os Fenômenos do Final de Drenagem de Panela em um Modelo com Fundo Plano Horizontal <sup>[11]</sup> .....	20
<b>Figura 3. 15</b> – Predição de Sobra de Aço em Painéis com Fundo Plano Horizontal <sup>[11]</sup> . ....	20
<b>Figura 3. 16</b> – Exemplos de Fundos de Panela Otimizados - ELBY (“Enhanced Ladle Bottom Yield”) <sup>[11]</sup> .....	21
<b>Figura 3. 17</b> – Resultados da Campanha de uma Panela com ELBY (“Enhanced Ladle Bottom Yield”) Comparada com a Média dos Resultados Obtidos com Painéis com Fundo Plano.....	22
<b>Figura 4. 1</b> - Foto da Montagem Experimental.....	25
<b>Figura 4. 2</b> – Fundo do Modelo Apresentando o Sensor Fotoelétrico. ....	26

<b>Figura 4. 3</b> – Curva Característica de Resposta do Sensor Fotoelétrico.....	27
<b>Figura 4. 4</b> – Vista Geral do Modelo com Réplica do Reator RH.....	28
<b>Figura 4. 5</b> – Vista Geral do Modelo com Réplica do Reator IRUT. ....	28
<b>Figura 4. 6</b> – Dimensões dos Anteparos – (a) Base ; (b) Lateral.....	29
<b>Figura 4. 7</b> – Anteparo Anti-Vórtice Disposição A .....	30
<b>Figura 4. 8</b> – Anteparo Anti-Vórtice Disposição B .....	30
<b>Figura 4. 9</b> – Região do Vazamento com Pontos para Injeção de Ar .....	31
<b>Figura 4. 10</b> – Fundo Falso para Reduzir Volume Residual .....	31
<b>Figura 5. 1</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t Partindo do Repouso. ....	34
<b>Figura 5. 2</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Nível de Enchimento Inicial Igual a 315t: Circulação do RH no Sentido Horário e Anti-horário. ....	35
<b>Figura 5. 3</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t com Circulação do RH no Sentido Horário.....	36
<b>Figura 5. 4</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t com Circulação do RH no Sentido Anti-horário.....	37
<b>Figura 5. 5</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Vazão de Misturamento no IRUT. ....	41
<b>Figura 5.6</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Circulação do RH Sentido Horário e IRUT com Vazão de Misturamento de 40l/min.....	42
<b>Figura 5.7</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual em Diversas Condições para Vazão de Esgotamento de 9l/min. ....	44
<b>Figura 5.8</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Diversas Condições para Vazão de Esgotamento de 11l/min. ....	44
<b>Figura 5.9</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Diversas Condições para Vazão de Esgotamento de 13l/min. ....	45
<b>Figura 5.10</b> - Valores Previstos e Medidos, de Acordo com Tabela V.I e Fórmula de Harleman, para K Igual a 182530. ....	47
<b>Figura 5.11</b> - Valores Previstos de Acordo Fórmula de Harleman, para K Igual a 182530 Versus Valores Reais Obtidos em vazões Elevadas .....	48
<b>Figura 5.12</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Situações do RH com Circulação no Sentido Horário com 132 litros (315 t): sem Anteparos, com Anteparos tipo A e com Anteparos tipo B. ....	49

<b>Figura 5.13</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Fundo Normal e Fundo Falso com 132 litros (315t) Partindo do Repouso.....	51
<b>Figura 5.14</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial com Anteparos A e sem Anteparos.....	52
<b>Figura 5.15</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial com Anteparos B e sem Anteparos.....	53
<b>Figura 5.16</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min.....	54
<b>Figura 5.17</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min + Anteparos A. ....	56
<b>Figura 5.18</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min + Anteparos B. ....	57
<b>Figura 5.19</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial com Fundo Normal e Fundo Falso.....	58
<b>Figura 5.20</b> - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Fundo Falso com Injeção de Ar 2l/min e sem Injeção de Ar.....	59
<b>Figura 5.21</b> – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 1, 2 e 4l/min, Fundo Normal. ....	60
<b>Figura 5.22</b> – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Anteparos Tipo A e Injeção de Ar 1, 2 e 4l/min., Fundo Normal. ....	61
<b>Figura 5.23</b> – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Anteparos Tipo B e Injeção de Ar 1, 2 e 4l/min., Fundo Normal. ....	62
<b>Figura 5.24</b> – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, com Inclinação da Panela em 1º sem e com Injeção de Ar 1, 2 e 4l/min., Fundo Normal. ....	64

## RESUMO

Um modelo em acrílico na escala de 1:7 foi utilizado para simular as condições de processamento do aço na CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão na etapa de vazamento do aço da panela para o distribuidor do lingotamento contínuo de placas, avaliando as condições mais propícias ao surgimento do vórtice e contramedidas para mitigá-lo de forma a reduzir o volume residual de aço na panela. O modelo foi operado utilizando água como fluido de trabalho e seguindo o critério de similaridade de Froude. O momento da inserção da segunda fase – nestes experimentos o ar – no canal de vazamento foi determinado com auxílio de sensores foto-elétricos e, para permitir uma avaliação precisa do rendimento, o material residual foi pesado.

Variáveis como tipo de fluxo residual imposto por várias rotas de processamento comuns na CST, a vazão de drenagem, além de dispositivos antivórtice criados e transplantados da literatura foram avaliados através da modelagem física.

Os fluxos residuais gerados por reatores RH ou IRUT, a altura inicial de líquido e outras variáveis não mostraram influência na variável resposta Volume Residual de líquido na panela, indicando que o fluxo de aço era interrompido pela capacidade de abastecimento radial do canal de saída – Colapso da superfície. Como tal, a utilização de quebradores de vórtice se mostrou contra produtora. O Volume Residual, nestas condições experimentais, se mostrou função apenas de vazão de lingotamento.

Simulações adicionais foram realizadas induzindo um fluxo rotacional no fluido de forma a aumentar a propensão ao vórtice. Através desta simulação foi possível verificar que a injeção de gás pelo fundo da panela é eficiente para minimizar o volume residual na panela, assim como a utilização de barreiras próximas à região de vazamento. A inclinação da panela e a adoção de fundos falsos também apresentaram resultados promissores, uma vez que nestes casos, a altura crítica era mantida para um menor volume de fluido no modelo.

## ABSTRACT

A 1:7 scale plexiglas model of Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) steelmaking ladle was built on the basis of Froude similarity criteria in order to assess the conditions during the final stages of draining. The passage of the second phase (air in these experiments) was detected by a photo-electric sensor and the mass of residual liquid inside the ladle was evaluated after weighing. It is known that premature closing of the teeming nozzle leads to poor yield. And also slag or air should not be transferred to the tundish since steel cleanness would be affected. The objective of cold model experiments was to evaluate means of maximizing yield without compromising on quality.

Study of variables included the type of residual flow in respect of several routes of processing such as: RH degasser, IRUT reactor, the drainage flow rate, in addition to anti-vortex devices.

It was found that RH or IRUT processing as well as the initial level of liquid did not significantly affect the results. Under these circumstances the mass of liquid retained at onset of second phase drainage was influenced by the flow rate only. At the final stages of drainage, the liquid surface collapse was dictated by the bottom ladle capacity of supplying liquid in the radial direction to the outlet. Vortex formation was not important giving support to the findings reported here. As a consequence vortex breakers were found deleterious under these set of conditions.

Additional simulations were accomplished by inducing a rotational flow in order to increase the likelihood of vortex formation. Gas injection through the pouring nozzle, vortex breakers, sloped bottoms have been found effective adding support to the radial flow mechanism of drainage reported under regular conditions.

## 1. INTRODUÇÃO

A Indústria Siderúrgica atual vem focando o seu desenvolvimento na melhoria da qualidade dos materiais produzidos de forma a atender às cada vez mais rígidas aplicações. No entanto, mesmo com esta busca constante por qualidade, o custo de fabricação é outro fator que não pode ser desprezado, pois o objetivo de qualquer negócio é a satisfação dos acionistas e das partes interessadas.

Neste contexto, a Aciaria torna-se de grande valor potencial de estudo, uma vez que, além de agregar cerca de 30% ao custo do produto acabado, ainda pode ser responsável pela maioria dos defeitos observados no cliente final.

Em geral, o fluxo de processo de aciaria é constituído das seguintes etapas: LD – Panela – RH - Distribuidor – Molde do Lingotamento Contínuo <sup>[1]</sup>.

Na Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), o aço percorre um circuito compreendendo o Convertedor de sopro combinado 1 ou 2 – Panela – Estação de Desgaseificação à vácuo (RH) ou Estação de tratamento de panela (IRUT) – Lingotamento Contínuo 1 ou 2.

Durante o processo, quando o aço líquido é transferido desde um reator a outro, o eventual surgimento do vórtice proporciona a passagem de escória e/ou sucção de gases de um reator àquele imediatamente subsequente. A redução da passagem de escória durante o processamento do aço deve ser minimizada devido à <sup>[2]</sup>:

- Ocorrências de várias reações na panela oriundas da escória do convertedor – Reoxidação do aço;
- Acumulação de escória no distribuidor do lingotamento contínuo – Prejudica a limpidez do aço, devido à redução do volume útil do distribuidor;
- Poder ocasionar rompimentos de pele, caso seja carregada para o molde;

No lingotamento contínuo, faz-se o vazamento do aço recebido pelo refino secundário através de um sistema de válvulas localizadas na base da panela. Na CST a capacidade desta panela de aço é de 315t de aço por corrida. Deste total, aproximadamente 1,0% do volume de aço recebido no lingotamento contínuo é retornado na panela para reprocessamento.

A eliminação ou o retardo na formação do vórtice durante esta etapa pode levar a uma melhoria na limpidez do aço além de redução de custo, já que existiria um potencial para redução do volume de aço remanescente na panela.

Os estudos dos fenômenos hidrodinâmicos em reatores metalúrgicos apresentam várias dificuldades, relacionadas ao tamanho dos equipamentos, às altas temperaturas de trabalho, ao fato do banho metálico ser opaco e pelo custo dos experimentos<sup>[3]</sup>.

A técnica de modelamento físico vem sendo bastante empregada em vários estudos sobre a formação de vórtice em panelas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo geral desse trabalho é contribuir para um melhor entendimento do mecanismo da formação do vórtice no final da drenagem das placas de aço para o distribuidor, gerando melhor compreensão acerca do comportamento fluidodinâmico, com a aplicação da técnica de simulação física. O modelo, construído em escala 1:7, encontra-se no Laboratório de Modelagem Física do Departamento de Metalurgia e Materiais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Investigar as influências das variáveis de processo na formação do vórtice nas placas de aço da CST através da modelagem física.

Estudar dispositivos minimizadores para a formação do vórtice, de forma a retardar e até mesmo eliminar o surgimento do mesmo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. A INFLUÊNCIA DA LIMPIDEZ DO AÇO NO PRODUTO FINAL

De forma a atender a crescente demanda em qualidade pelos consumidores de laminados a quente e a frio, é inevitável o desenvolvimento de tecnologias que proporcionem maior limpidez dos aços <sup>[6,7]</sup>.

Segundo NAM et al. <sup>[7]</sup> os processos de Aciaria e Lingotamento Contínuo são os principais responsáveis por defeitos do tipo: esfoliação, segregação e inclusões nos laminados à quente e a frio.

A limpidez do aço é controlada por um vasto conjunto de práticas no processo de Aciaria. Estas práticas incluem: o tempo e a localização do desoxidante e das ligas, a seqüência do tratamento no refino secundário, a agitação e transferência do metal, a geometria e as práticas do distribuidor, a capacidade de absorção dos vários fluxantes utilizados e as práticas de lingotamento <sup>[8]</sup>.

Através da análise dos defeitos em chapas laminadas à quente e a frio, Nam et al. <sup>[7]</sup> agruparam as inclusões encontradas em quatro classes distintas, conforme Tabela I.1.

**Tabela I.1 .** Proporção Relativa das Fontes de Inclusão

Fonte	Componente	Proporção
Escória de Panela Escória de Distribuidor Produto de Desoxidação	Ca, Al	60%
Pó Fluxante	Ca, Si, Al	15%
Palha de Arroz	Si	15%
Refratário	Si, Al	10%

Para reduzir o impacto da escória de panela na limpidez do produto final, é importante evitar sua passagem para o distribuidor do lingotamento contínuo<sup>[9]</sup>.

Parte da dificuldade em reter a escória na panela é devido aos vórtices formados durante o vazamento. O cordão central destes, pode transportar escória da panela para o distribuidor, mesmo com uma considerável quantidade de aço na panela<sup>[4]</sup>.

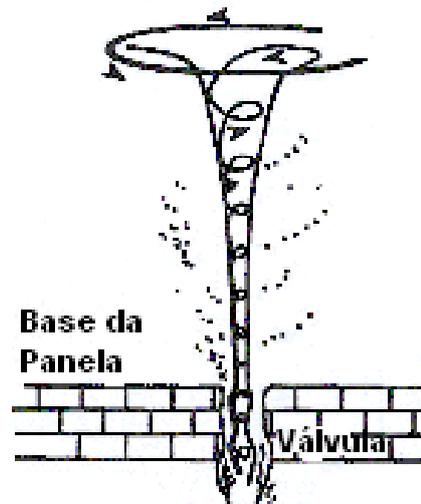
### 3.2. FORMAÇÃO DOS VÓRTICES

AJMANI et al.<sup>[2]</sup> e HAMMERSCHMID et al.<sup>[4]</sup> apresentam um cálculo simplificado para demonstrar o aumento da pequena rotação inicial presente no instante do início de vazamento do fluido através do orifício de saída.

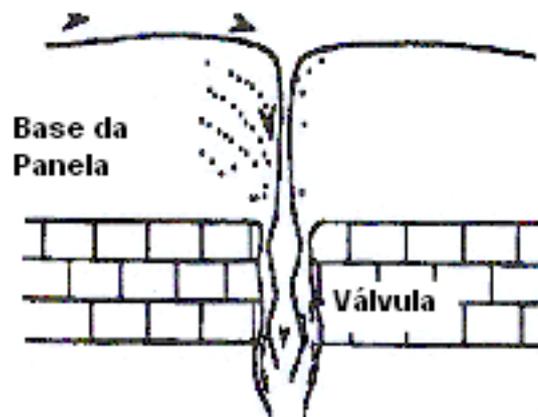
Este aumento no fluxo rotacional é explicado pelo princípio da conservação do momento angular<sup>[2,4]</sup>.

Segundo HAMMERSCHMID et al.<sup>[4]</sup> e SANKARANARAYANAN et al.<sup>[10]</sup>, o vórtice pode ser visto, principalmente, de três formas: “dimple” (corcova), vórtice de superfície e vórtice completamente desenvolvido. Estas três formas ocorrem em seqüência durante a drenagem da panela, entretanto não é necessária a presença das três formas.

AJMANI et al.<sup>[2]</sup>, PIMENTA et al.<sup>[6]</sup> e LIN et al.<sup>[12]</sup> citam dois tipos diferentes de escoamento: vórtice (Figura 3.1) e dreno (Figura 3.2).

**Vórtice Completamente Desenvolvido**

**Figura 3. 1** – Escoamento tipo Vórtice Completamente Desenvolvido.

**FUNIL**

**Figura 3. 2** – Escoamento tipo Funil.

No estágio inicial do vazamento, o movimento do fluido é quase vertical, sem nenhuma componente de velocidade em outra direção. Turbilhonamentos com pequenos diâmetros podem ser, ocasionalmente, observados na superfície. Em determinadas condições, estes se estabilizam, aumentando o diâmetro e formando um cordão até o orifício de saída. Este tipo de escoamento foi classificado como vórtice <sup>[2,6]</sup>.

Segundo LIN et al. <sup>[12]</sup> o vórtice ocorre quando o fluxo secundário do aço líquido incorpora com o fluxo primário do aço líquido para formar uma velocidade angular tangencial acima da válvula de drenagem.

No estágio final do vazamento, quando a vazão torna-se menor que a capacidade de saída, ocorre à mudança para escoamento tipo dreno. Este fenômeno pode ser ou não precedido pelo vórtice. Sob estas condições o canal não pode ser inteiramente preenchido e a passagem de escória torna-se inevitável <sup>[2,6]</sup>.

### **3.3. ESTUDOS RELACIONADOS À FORMAÇÃO DOS VÓRTICES**

Existem vários trabalhos desenvolvidos com o objetivo de aprofundar os conhecimentos dos mecanismos da formação dos vórtices <sup>[2,4,5,6,10,14]</sup>.

A influência do tempo de espera, ou seja, tempo entre o final de enchimento da panela e o início de vazamento na formação do vórtice, é citado na literatura por diversos autores <sup>[2,4,5,6,10]</sup> como parâmetro a ser controlado.

Coerentemente alguns autores estudaram o mecanismo da formação do vórtice mantendo o tempo de espera constante em todos os experimentos <sup>[2,4,5]</sup> e alterando o valor de outras variáveis.

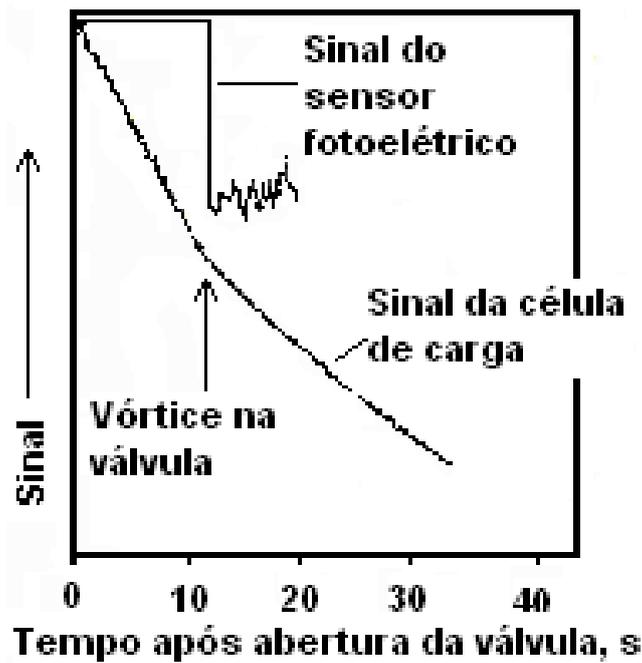
AJMANI et al. <sup>[2]</sup> estudou a ocorrência do vórtice na panela através de um modelo em escala 1:6 utilizando ou não óleo de parafina de forma a simular a escória no topo da panela. A determinação do nível de líquido no início da formação do vórtice foi realizada com o auxílio de filmagens dos testes. A filmagem era iniciada quando o nível de líquido atingia cerca de 80 mm do fundo da panela. As imagens eram analisadas posteriormente, quadro a quadro, para encontrar o exato momento da formação do vórtice.

Segundo AJMANI et al. <sup>[2]</sup> a inclinação da panela retarda o início da formação do vórtice, além de reduzir o volume de material remanescente na panela após o encerramento do vazamento. Os resultados com experimentos usando obstáculos de fluxo localizados próximos e afastados ao orifício de saída não foram satisfatórios com relação ao retardo na formação do vórtice <sup>[2]</sup>.

Os experimentos de HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> utilizavam tanques cilíndricos para a realização de testes com água. O enchimento do tanque foi realizado sempre com o fluxo tangencial de forma a gerar uma determinada velocidade tangencial. Para garantir que a velocidade seria reprodutiva, o enchimento era feito sempre nas mesmas condições.

Uma fotocélula instalada a 6cm abaixo da base do orifício de saída, registrava o exato momento de início da formação do vórtice. Segundo HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> o sinal de saída era constante até o momento que só havia água saindo pelo orifício, mas, ele decrescia e tornava-se irregular no momento que o cordão de ar passava através da válvula (Figura 3.3).

HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> utilizavam, ainda, as respostas de uma célula de carga instalada na base do modelo para avaliar o início de formação do vórtice. Era possível verificar a queda na taxa de vazamento quando do início do surgimento do vórtice (Figura 3.3).



**Figura 3.3** – Sinais Típicos de uma Fotocélula e uma Célula de Carga em Experimentos Conduzidos com Água <sup>[4]</sup>.

De forma a avaliar se os fenômenos ocorridos nos testes com água seriam similares em um sistema metálico e avaliar o uso de campos eletromagnéticos, HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> utilizaram um modelo de aço inoxidável, empregando mercúrio como fluido.

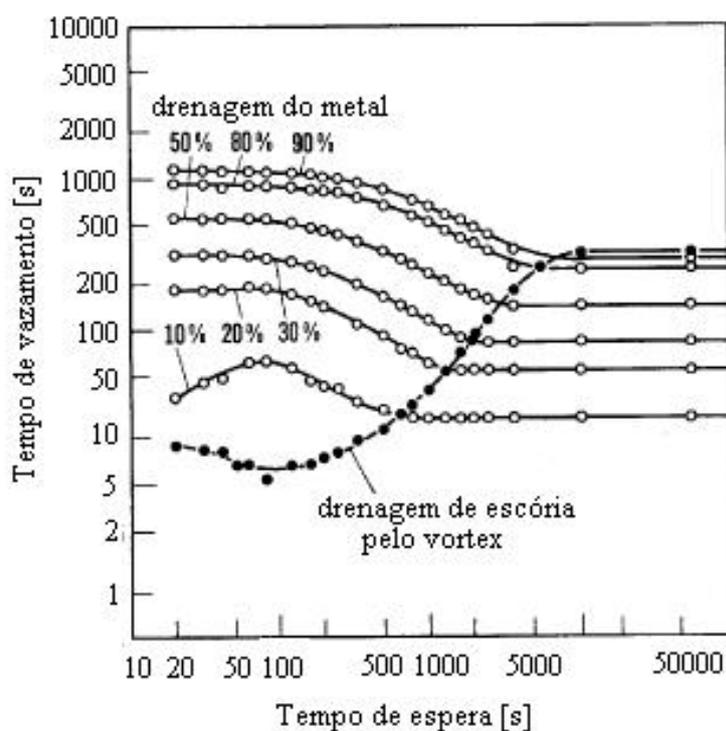
Segundo HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup>, para panelas com o orifício de saída central, o aumento no diâmetro reduz a altura crítica para formação do vórtice, concordando com o resultado de SANKARANARAYANAN et al. <sup>[10]</sup>.

Como mecanismo para eliminação do vórtice, HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> testou a interrupção temporária do vazamento, não obtendo resultados satisfatórios, pois, segundos após o reinício do vazamento o vórtice surgia novamente. Entretanto PIMENTA et al. <sup>[6]</sup> conseguiu uma maior eficácia na interrupção do fluxo, retardando o surgimento do vórtice, quando, após o reinício do vazamento, a válvula era reaberta com uma pequena vazão.

O uso de orifícios de saída (válvulas) de diferentes formatos não foi efetivo no retardamento da formação do vórtice <sup>[4]</sup>. A injeção de gás pelo fundo da panela durante o enchimento e o tempo de espera é citada por HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> como eficiente no adiamento do surgimento do vórtice.

HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> testaram vários obstáculos de fluxo instalados próximo ao orifício de saída, sendo que os resultados mostraram que o surgimento do vórtice é retardado, mesmo com curtos tempos de espera, ou seja, altas velocidades residuais.

Os resultados obtidos por HAMMERSCHMID et al. <sup>[4]</sup> estão sintetizados na Figura 3.4. As linhas com círculos em aberto indicam porcentagem de drenagem constante. Essencialmente após 10000s de espera o comportamento de drenagem seria o mesmo, isto é, o aparecimento do vórtice (linhas com círculos cheios) ocorreria ao mesmo nível de drenagem e logo na mesma altura crítica. O vórtice apareceria prematuramente (em baixos níveis de drenagem) para tempos de espera curtos e, como o filete de segunda fase efetivamente diminui a área de seção reta de fluxo, o intervalo de tempo necessário para esgotar a panela aumenta.



**Figura 3.4-** Curvas Típicas para Diferentes Tempos de Espera em Experimentos com Água.

Para realização de seus experimentos, PIMENTA et al. <sup>[6]</sup> utilizaram um modelo construído em escala geométrica de 1:5. Utilizando a técnica de planejamento fatorial de experimentos, eles procuraram conhecer as influências de variáveis de processo, tais como, posição e diâmetro do orifício de saída e diâmetro e profundidade de imersão da válvula longa sobre a formação do vórtice.

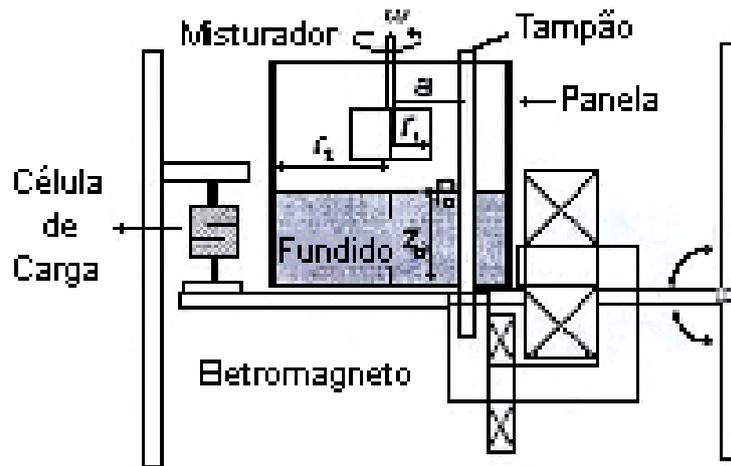
PIMENTA et al. <sup>[6]</sup> encontraram que, para orifício de vazamento no centro da panela, maiores tempos de espera implicam em formação tardia do vórtice. Esta afirmativa não foi verificada em painéis com orifícios de saída excêntricos, os quais possuem uma tendência de efeito inverso.

CHIAPPAROLI et al. <sup>[5]</sup> utilizaram um modelo construído na escala geométrica de 1:3 para estudar o fenômeno do vórtice em painéis de aço, respeitando também a similaridade de Froude. As dimensões de seu modelo levaram em consideração o desgaste do refratário da panela, desta forma suas dimensões foram definidas como sendo correspondentes a uma panela com uma vida média de uso.

Os testes de CHIAPPAROLI et al. <sup>[5]</sup> pretendiam avaliar o tempo crítico, altura crítica e tempo total de vazamento relativo à formação do vórtice. Estas variáveis foram avaliadas para um tempo de espera de 30 segundos (fornecido pela operação da planta) e 5t/min de taxa de extração (valor intermediário da planta).

A formação do vórtice foi verificada em todos os experimentos desenvolvidos por CHIAPPAROLI et al. <sup>[5]</sup>, a uma altura crítica de 270mm após 32 minutos de vazamento. Esta altura corresponde a um peso de aço de aproximadamente 12t.

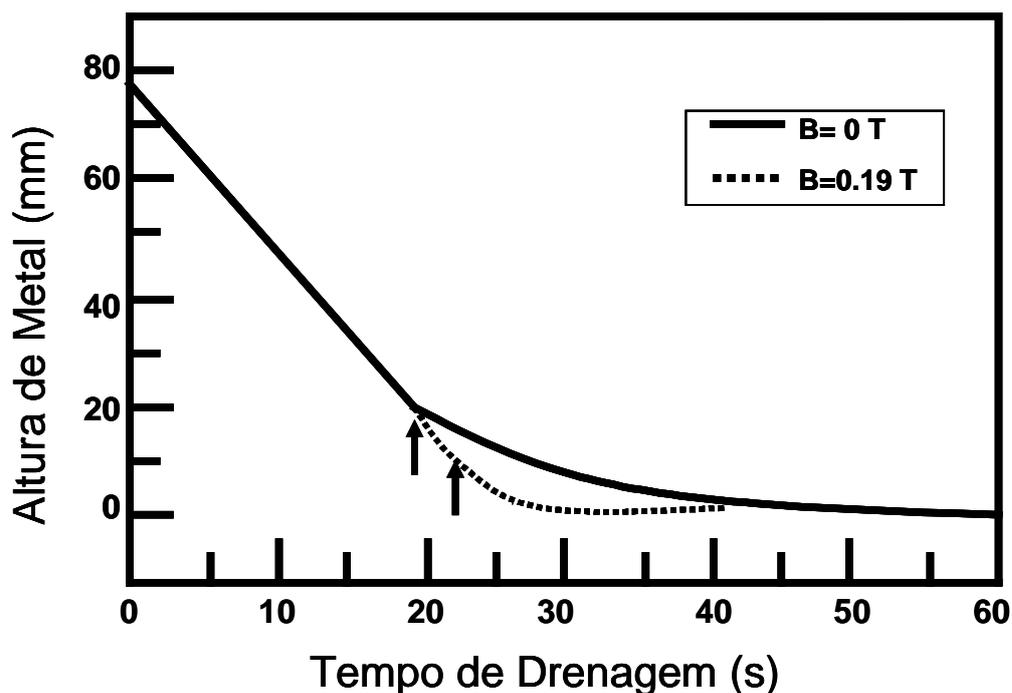
SUH et al. <sup>[1]</sup> utilizaram um aparato experimental conforme Figura 3.5. Este era consistido de uma panela de aço inoxidável, um agitador mecânico, uma célula de carga e um dispositivo com quatro magnetos permanentes (PM) ou um dispositivo eletromagnético (EM).



**Figura 3.5** - Aparato Experimental com um Dispositivo Eletromagnético <sup>[1]</sup>.

Após o enchimento da panela, SUH et al. <sup>[1]</sup> agitavam o fluido (Liga Bi-25Pb-12,5Sn-12,5Cd com temperatura de fusão de 72°C) com o agitador mecânico sempre com a mesma velocidade e pelo mesmo período de tempo, de forma a manter sempre as mesmas condições iniciais. O vazamento do banho era realizado após 90 segundos de tempo de espera e o instrumento de PM ou EM era acionado logo após o fim de agitação até o fim de vazamento.

A utilização de dispositivos para aplicação de um campo magnético estático foi proposta por SUH et al. <sup>[1]</sup>. O campo magnético seria aplicado na lateral e na base da panela e atuaria como um freio da velocidade tangencial do líquido, postergando a formação do vórtice. Como pode ser verificado na Figura 3.6, a aplicação do campo eletromagnético mantém a taxa de extração do banho durante um tempo maior, representando um retardo na formação do vórtice.



**Figura 3. 6** - Curva de Drenagem em Relação ao Tempo - Não Sendo Aplicado o Campo Magnético ( $B=0.00T$ ) e Aplicando o Campo Magnético ( $B=0.19T$ )<sup>[1]</sup>.

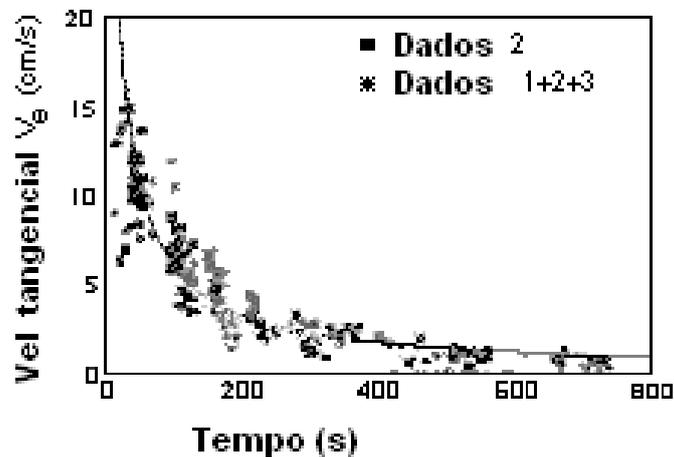
Segundo SUH et al.<sup>[1]</sup> o uso de obstáculos no fundo da panela seria uma nova fonte de inclusões para o aço líquido.

O aumento na relação de viscosidade entre o aço e a escória ( $\eta_{aço}/\eta_{esc}$ ), e da relação de densidade entre a escória e o aço ( $\rho_{esc}/\rho_{aço}$ ) antecipam a formação do vórtice, ou seja, a altura crítica é maior<sup>[1]</sup>. Entretanto, de acordo com SANKARANARAYANAN et al.<sup>[10]</sup>, o efeito seria inverso.

SANKARANARAYANAN et al.<sup>[10]</sup> desenvolveram testes em modelos cilíndricos de panela em vários diâmetros utilizando água como o fluido da panela e óleo de oliva sobre a água. A viscosidade do óleo de oliva nos experimentos era de 80mPa.s, equivalente, para motivos de comparação, a uma camada de escória líquida, que possui viscosidade de 560mPa.s (7x80).

Os experimentos de SANKARANARAYANAN et al.<sup>[10]</sup> foram conduzidos de forma avaliar o papel de uma segunda fase líquida que esteja sobre o fluido (Escória) na formação do vórtice, além da influência do diâmetro da válvula, velocidade tangencial inicial e localização da válvula.

A velocidade tangencial do fluido no interior da panela foi monitorada através de pedaços de isopor na superfície da água e, posteriormente, foi relacionada com o tempo de espera, encontrando uma forte correlação inversa entre as variáveis (Figura 3.7).

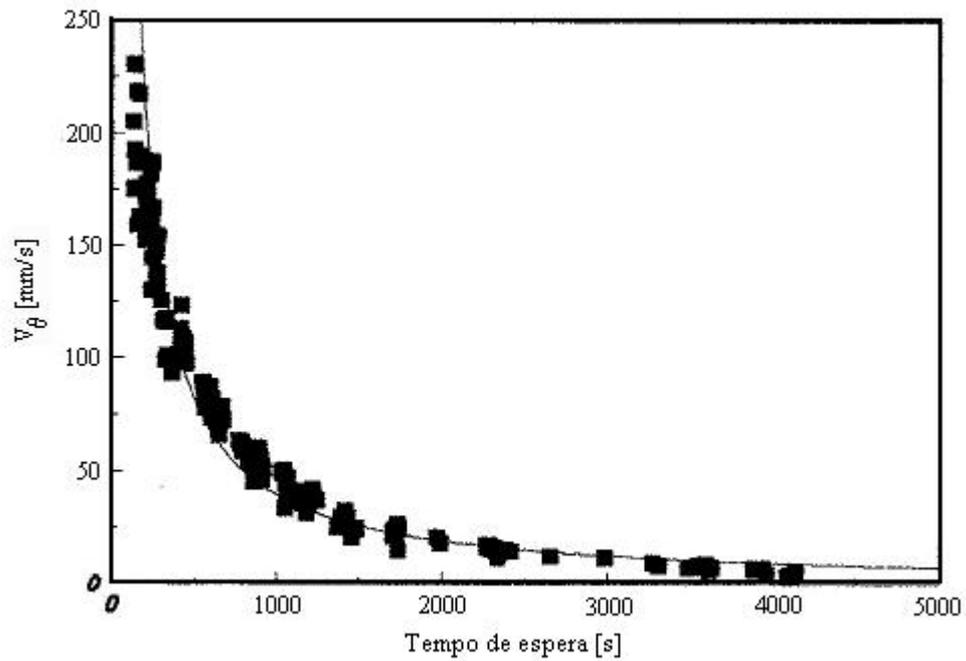


**Figura 3.7** – Correlação entre a Velocidade Tangencial e o Tempo de Espera (Panela com diâmetro de 374mm ; Nível Inicial 500mm ; Vazão Enchimento 27l/m)

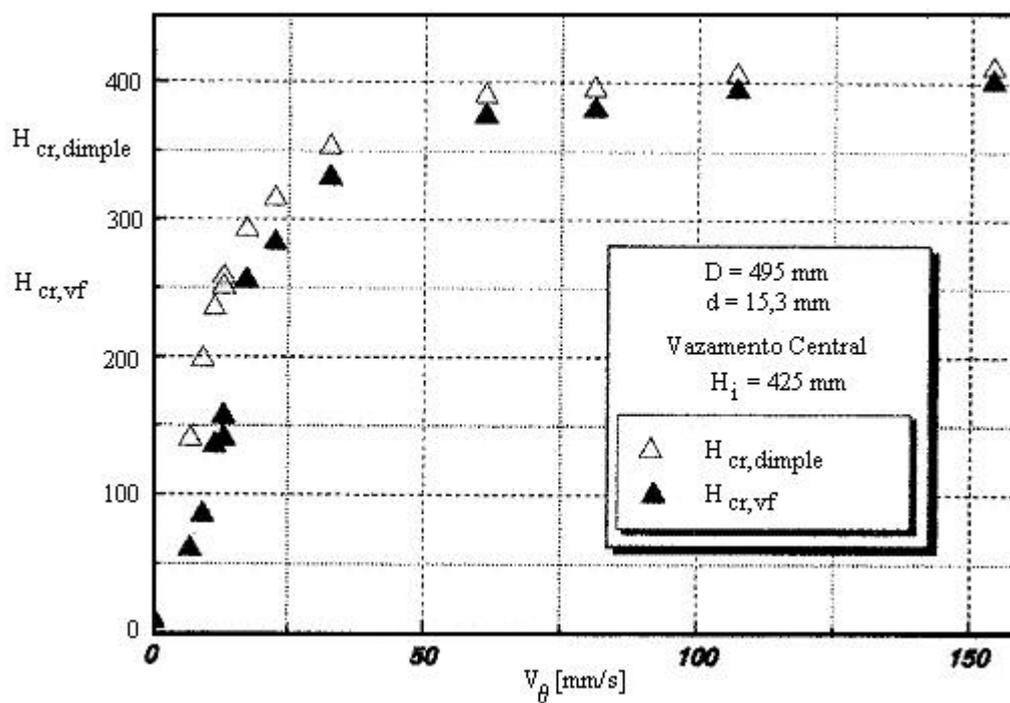
As conclusões de SANKARANARAYANAN et al. <sup>[10]</sup> foram:

- Durante o vazamento de panelas contendo água, é possível o surgimento de vórtices mesmo com velocidades tangenciais de 10mm/s;
- A iniciação do vórtice não é dependente do diâmetro da panela nem do nível inicial de líquido;
- A presença de uma camada mais leve e viscosa de óleo de oliva sobre a água aumenta a chance da formação do vórtice;
- Como o processo de vazamento é dominado pela gravidade, ele é totalmente independente da densidade do líquido, desta forma, concluí que existiria uma enorme similaridade entre o aço líquido e a água.

Em outro estudo, SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> foram capazes de medir o decaimento da componente tangencial (rotacional) residual após controlarem cuidadosamente a alimentação da panela (Figura 3.8). A influência do tempo de espera sobre a dissipação do campo residual de velocidade e, logo, sobre a altura crítica de formação do vórtice (dimple,  $H_{cr, \text{dimple}}$ ) e sobre a Altura Crítica de Formação do Vórtice ( $H_{cr, \text{vf}}$ ) fica clara na figura 3.9.

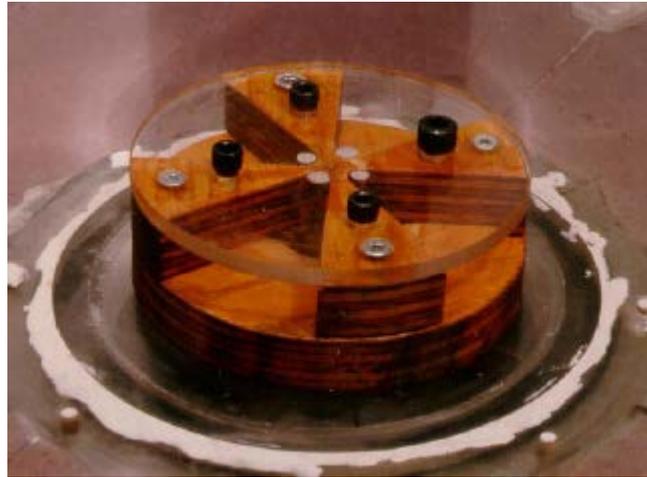


**Figura 3.8** - Decaimento de Velocidade Tangencial ao Longo do Tempo (SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup>).



**Figura 3.9** - Influência do Tempo de Espera, de Acordo com SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup>.

SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> propõem a utilização de um dispositivo representado na Figura 3.10, onde o mesmo dissiparia o movimento tangencial na entrada da válvula de drenagem, forçando um fluxo totalmente radial.



**Figura 3.10** – “Vortex Buster”, de acordo com concepção de SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup>

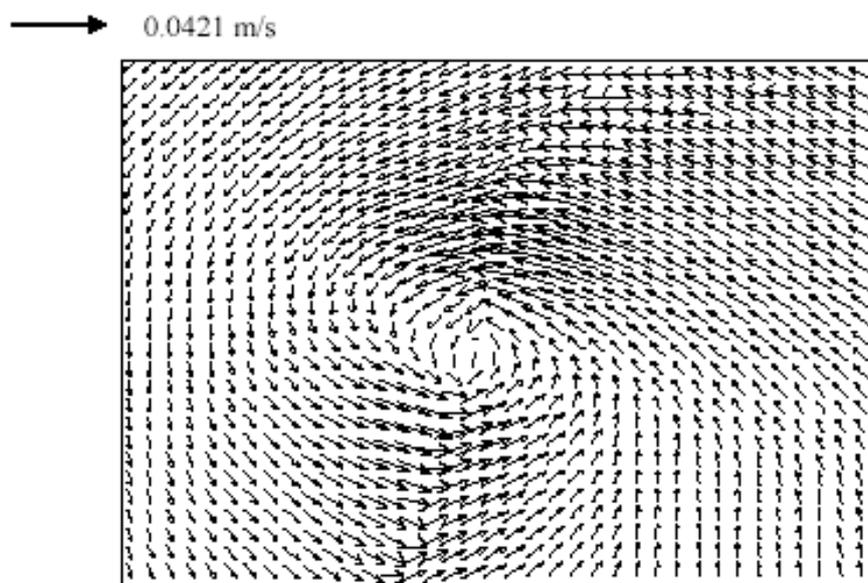
DAVILA et al. <sup>[14]</sup> utilizou um modelo construído em acrílico na escala de 1:3 usando o critério de Froude. A definição da escala foi feita de acordo com análise dimensional e experimental de Pan e Bjorkman citada por DAVILA et al. <sup>[14]</sup>. Eles demonstraram através de experimentos e simulações computacionais fluidodinâmicas que esta escala é uma das melhores para simular metal líquido vazando de uma panela sob condições isotérmicas e não isotérmicas <sup>[14]</sup>.

Os experimentos DAVILA et al. <sup>[14]</sup> incluíam a adição de traçadores vermelhos para melhor visualização dos vórtices que surgiam. Os experimentos eram realizados após trinta minutos de espera, tempo este suficiente para eliminar qualquer movimentação residual do fluido. Foram realizados, ainda, experimentos onde era promovida uma movimentação rotacional no fluido através de um dispositivo.

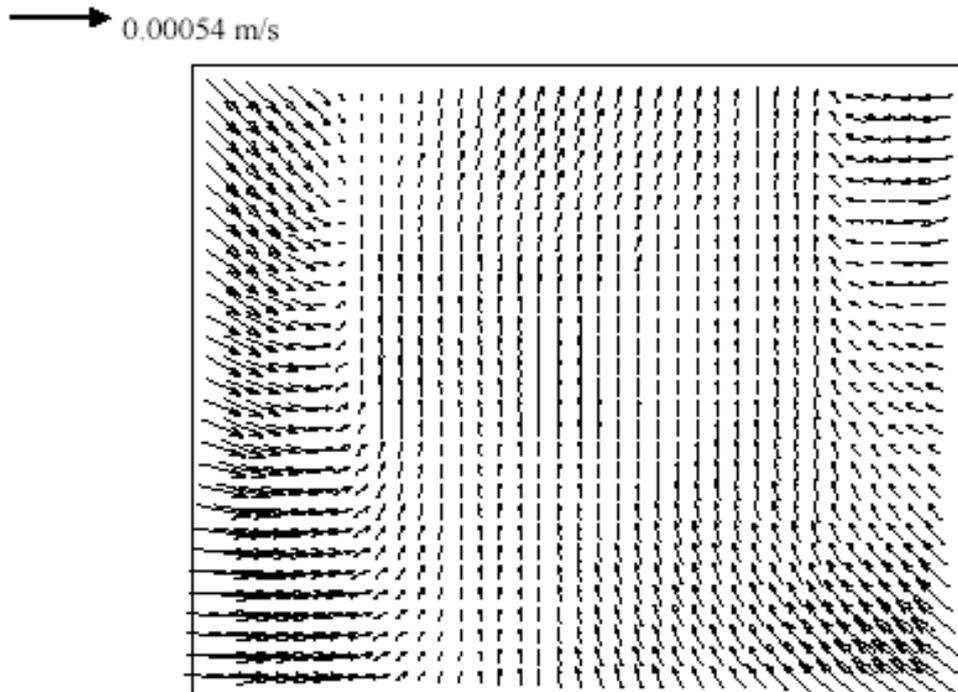
O equipamento de PIV (“Particle Image Velocimetry”) foi utilizado para avaliação do fluxo do fluido acima da linha da válvula de drenagem. A captura da escória era modelada por uma camada de óleo vermelho na superfície do fluido <sup>[14]</sup>.

DAVILA et al. <sup>[14]</sup> em seus experimentos concluíram que a altura crítica para a formação do vórtice independe da vazão de saída aplicada e do nível de fluido inicial, que, segundo eles, tais dependências podem surgir somente em condições experimentais extremas, situações estas que são muito difíceis de ocorrer em painéis reais durante o lingotamento. Eles concluíram, ainda, que a energia de movimentação do fluido e a movimentação residual do mesmo atuam de forma mínima na altura crítica.

Os experimentos de DAVILA et al. <sup>[14]</sup> apresentam tanto redução na formação de vórtice quanto na velocidade do fluido na região do vazamento quando da utilização de quebradores de vórtice, conforme pode ser visto nas Figuras 3.11 e 3.12, entretanto não são citados detalhes sobre tais dispositivos.

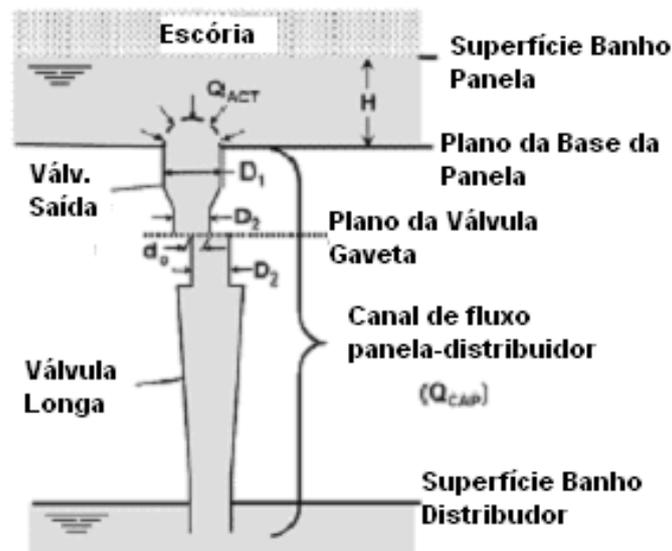


**Figura 3. 11** – Velocidade Média Acima da Válvula Durante Drenagem. Vista Superior em um Nível de banho de 0,035m sem Quebradores de Vórtice.



**Figura 3.12** – Velocidade Média Acima da Válvula Durante Drenagem. Vista Superior em um Nível de Banho de 0,035m com Quebradores de Vórtice.

HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> desenvolveram experimentos em água com um modelo cuja configuração replicava o fluxo do canal panela-distribuidor conforme pode ser visto na Figura 3.13.



**Figura 3.13** – Típico Canal de Fluxo Painela-Distribuidor <sup>[11]</sup>.

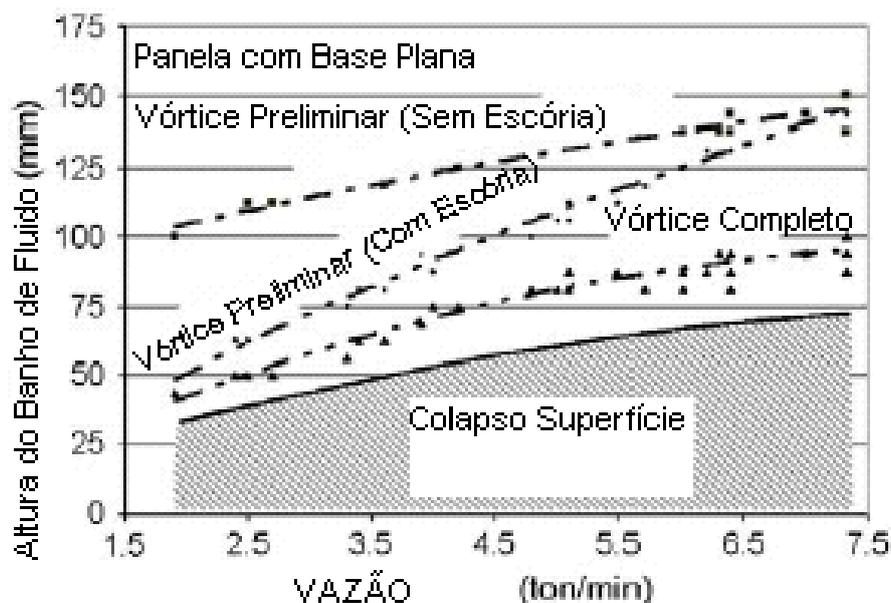
Os experimentos eram realizados com água em um modelo de panela que tinha uma escala geométrica de 0.6 comparando com o protótipo. O modelo de panela era um tanque de base plana com 1700mm de diâmetro, sendo que a válvula de saída era posicionada em uma posição radial de 760mm a partir do centro.

Considerando a similaridade de Froude, os experimentos de HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> puderam simular condições de drenagem variando entre 1,9 e 7,3ton/min através da utilização de vazões de água de 75 a 290l/min.

Os experimentos de HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> eram realizados simulando ou não a presença de escória na superfície do fluido. O modelo era cheio sempre da mesma maneira, ou seja, com uma baixa velocidade de entrada da água, de forma a minimizar a energia cinética aplicada ao banho. Após o enchimento do modelo, eram realizados diversos procedimentos para diversificar o fluxo inicial do banho no modelo. Um deles consistia em esperar por trinta minutos após o enchimento para início da extração da água, de forma a criar uma condição de repouso absoluto do banho.

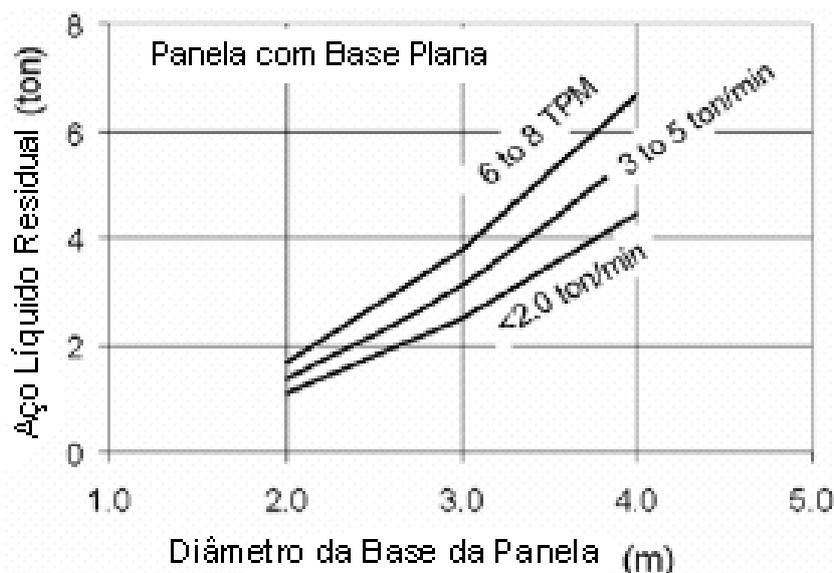
Durantes estes experimentos HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> observaram que 3 fenômenos ocorriam em seqüência durante os estágios finais de drenagem: corcovas superficiais, vórtice e colapso de superfície.

A Figura 3.14 apresenta uma simulação do volume de aço líquido residual na panela quando os três fenômenos acima ocorrem segundo os experimentos de HEASLIP et al. <sup>[11]</sup>. Como pode ser visto o aumento na vazão de drenagem da panela aumenta a altura crítica de líquido para o colapso de superfície. A presença de escória no topo do banho suprimiu somente o surgimento da corcova, principalmente em vazões de drenagem menores.



**Figura 3. 14** – Influência da Vazão de Saída na Altura do Banho para os Fenômenos do Final de Drenagem de Panela em um Modelo com Fundo Plano Horizontal <sup>[11]</sup>.

HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> assumindo que a relação direta entre a altura do colapso de superfície e a vazão de drenagem é independente do diâmetro da panela, apresenta na Figura 3.15 o volume residual em uma panela em função do diâmetro da mesma e da vazão de drenagem. Através desta figura podemos concluir que quanto maior for o tamanho da panela, maior o volume residual da mesma devido ao colapso de superfície.



**Figura 3. 15** – Predição de Sobra de Aço em Painéis com Fundo Plano Horizontal <sup>[11]</sup>.

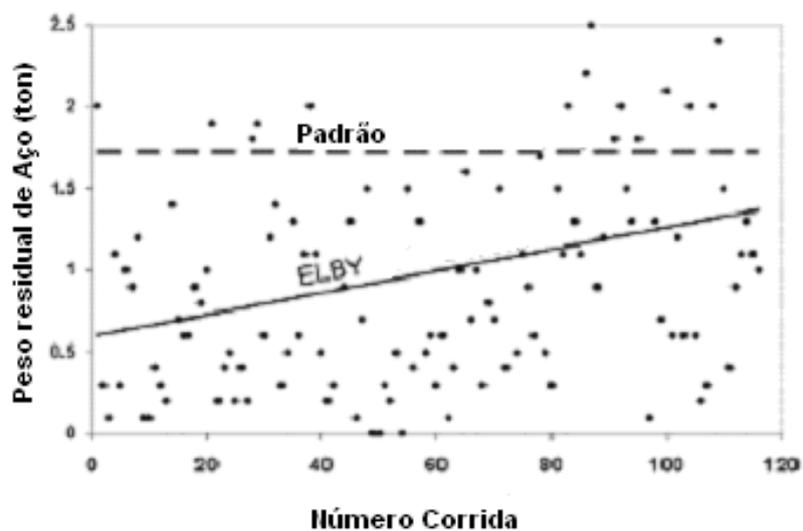
O modelo de HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> foi validado através de experimentos realizados em uma indústria siderúrgica na Europa.

HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> propuseram fundos de panela otimizados de forma a reduzir a passagem de escória da panela para o distribuidor durante a drenagem e, conseqüentemente, aumento significativo no ganho de rendimento em função da menor perda de aço residual. A Figura 3.16 apresenta representações do fundo otimizado chamado pelo autor de ELBY (“Enhanced Ladle Bottom Yield”).



**Figura 3. 16** – Exemplos de Fundos de Panela Otimizados - ELBY (“Enhanced Ladle Bottom Yield”) <sup>[11]</sup>.

A Figura 3.17 apresenta os resultados obtidos através de testes industriais com uma panela com a otimização ELBY (“Enhanced Ladle Bottom Yield”). Como pode ser visto os ganhos são destacáveis principalmente no início da campanha da panela, onde o fundo não apresenta desgaste.



**Figura 3. 17** – Resultados da Campanha de uma Panela com ELBY (*“Enhanced Ladle Bottom Yield”*) Comparada com a Média dos Resultados Obtidos com Panelas com Fundo Plano.

## 4. METODOLOGIA

De forma a simular as condições propostas, foi utilizado um modelo de panela em acrílico, construído na escala 1:7, representado na Figura 4.1, e operado de acordo com o critério de similaridade de Froude, o que implica segundo SZEKELY et al. <sup>[20]</sup>:

$$N_{Fr} = \frac{\text{Força Inercial}}{\text{Força Gravitacional}} \quad (4.1)$$

Então:

$$\left(\frac{u^2}{gL}\right)_M = \left(\frac{u^2}{gL}\right)_P \quad (4.2)$$

Onde,  $u$  = velocidade do fluido [m/s],  $g$  = aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ] e  $L$  é comprimento característico [m].

Simplificando a equação 2, sabendo que:

$$\lambda = \frac{L_P}{L_M} \quad (4.3)$$

Onde,  $\lambda$  é o fator de escala na similaridade geométrica<sup>[15,16]</sup>,  $L_P$  é o comprimento característico no modelo [m] e  $L_M$  é o comprimento característico no protótipo [m].

Chegamos a expressão que relaciona a velocidade do fluido no modelo com a velocidade do fluido no protótipo:

$$u_M = \lambda^{0,5} u_P \quad (4.4)$$

Onde,  $u_M$  = velocidade do fluido no modelo [m/s],  $u_P$  = velocidade do fluido no protótipo [m/s] e  $\lambda$  é o fator de escala na similaridade geométrica<sup>[15,16]</sup>.

Desenvolvendo a equação 2, chega-se a outras expressões que relacionam por exemplo: o tempo, a área, o volume, e a vazão entre o protótipo e o modelo.

Para encontrarmos a relação entre a vazão do modelo com a vazão do protótipo, fazemos as seguintes afirmações:

$$Q_{M,P} = u_{M,P} A_{M,P} \quad (4.5)$$

$$A_{M,P} = \frac{\pi D_{M,P}^2}{4} \quad (4.6)$$

$$D_M = \lambda D_P \quad (4.7)$$

Onde,  $Q_{M,P}$  = Vazão de fluido no modelo e protótipo [ $m^3/s$ ],  $u_{M,P}$  = velocidade do fluido no modelo e protótipo [ $m/s$ ],  $A_{M,P}$  = Área do modelo e protótipo [ $m^2$ ] e  $D_{M,P}$  = diâmetro do modelo e protótipo [ $m$ ].

Aplicando (5), (6) e (7) em (2), temos a relação entre a vazão de fluido no modelo e a vazão de fluido no protótipo:

$$Q_M = \lambda^{2,5} Q_P \quad (4.8)$$

Onde,  $Q_M$  é a vazão de drenagem no modelo [ $m^3/s$ ],  $Q_P$  é a vazão de drenagem no protótipo [ $m^3/s$ ] e  $\lambda$  é o fator de escala na similaridade geométrica <sup>[15,16]</sup>. Na prática industrial corrente na CST as taxas de lingotamento variam de 8ton/min a 12ton/min. Assim, as faixas de vazão no modelo variaram de 9 a 13litros/min.



**Figura 4.1** - Foto da Montagem Experimental

A Tabela IV.1 apresenta as principais características do modelo em comparação à panela utilizada no processo industrial da Companhia Siderúrgica de Tubarão.

**Tabela IV.1** - Características da Panela – Protótipo x Modelo

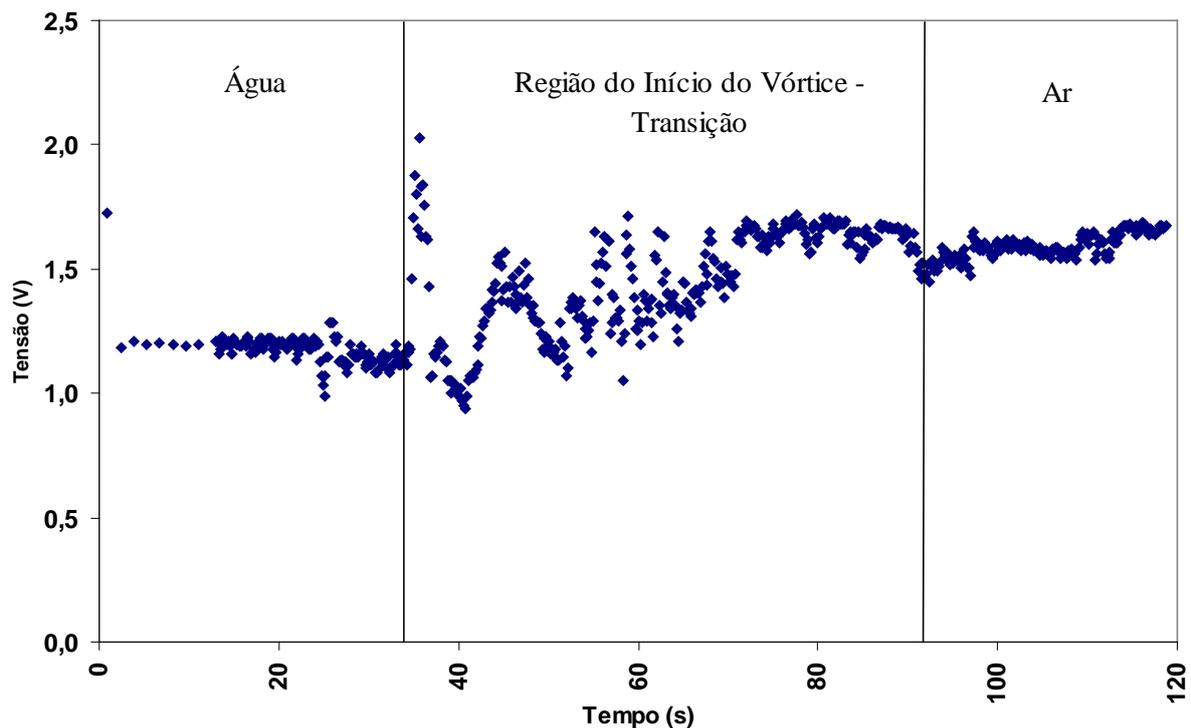
<b>Descrição</b>	<b>Protótipo</b>	<b>Modelo</b>
Volume de Líquido	45 m <sup>3</sup>	0,131 m <sup>3</sup>
Diâmetro interno do topo da panela	4,20 m	0,60 m
Diâmetro interno da base da panela	3,65 m	0,52 m
Altura da panela	4,40 m	0,63 m
Diâmetro do furo de vazamento	0,080 m	0,0114 m

A variável resposta utilizada para caracterizar a incidência do vórtice no processo foi o volume de líquido retido no modelo, após a detecção, pela célula fotoelétrica (Figura 4.2), da passagem de ar pelo canal de vazamento.



**Figura 4. 2** – Fundo do Modelo Apresentando o Sensor Fotoelétrico.

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 do início da passagem de ar (presença do Vórtice), o valor medido sofre uma alteração; desta forma, é possível registrar o início da formação do vórtice. A Figura 4.3 apresenta uma curva característica da leitura do sensor fotoelétrico.



**Figura 4.3** – Curva Característica de Resposta do Sensor Fotoelétrico.

O volume residual é medido através de uma balança, onde o peso é registrado. Uma válvula na base do modelo possibilita a retirada do líquido do interior do mesmo.

Como citado, a formação do vórtice é dependente tanto de condições geométricas particulares junto ao canal de vazamento, quanto do campo de velocidades, pré-existentes ao início do vazamento. A pré-existência de fluxos rotacionais aumenta a incidência do vórtice; desta forma os experimentos foram divididos em duas etapas:

- Avaliação nas condições do processo industrial;
- Avaliação através da indução de campo rotacional.

Em ambas as opções acima foram avaliadas, inclusive, as condições para minimização do vórtice.

**Campo inicial de velocidades:**

Na rota normal da CST o aço é distribuído ao Lingotamento Contínuo a partir de panela advinda do IRUT ou RH. Cada um destes reatores induz um padrão de fluxo e uma propensão específica a vórtice. Estes padrões foram simulados em modelos em escala dos reatores. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam a montagem para a simulação do reator RH e IRUT respectivamente. Os fluxos simulados podem ser vistos no anexo (Fluxo RH / Fluxo IRUT).



**Figura 4. 4** – Vista Geral do Modelo com Réplica do Reator RH.



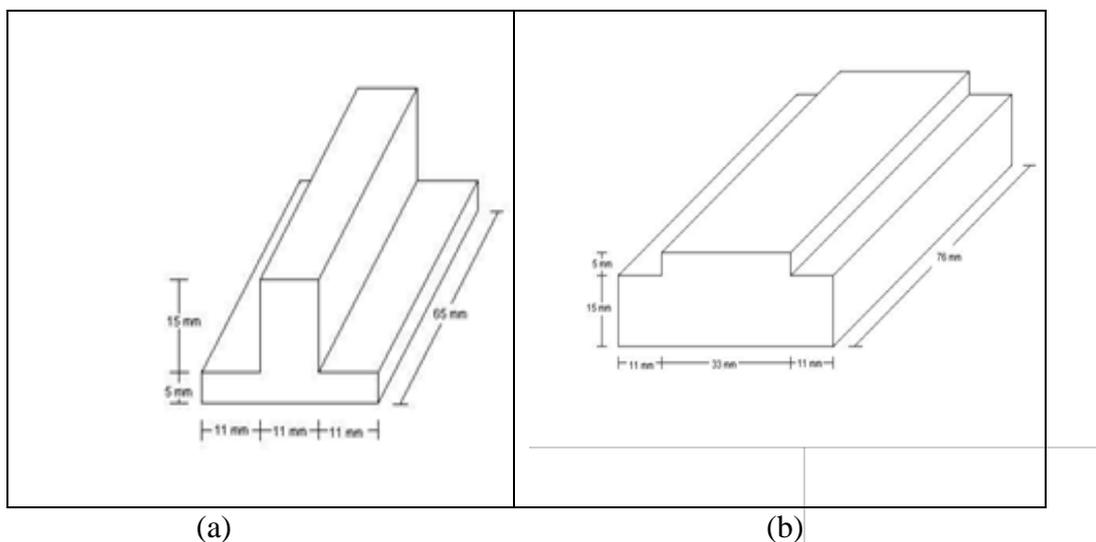
**Figura 4. 5** – Vista Geral do Modelo com Réplica do Reator IRUT.

Para comparar a influência dos fluxos mencionados acima foi realizado um experimento a partir do repouso absoluto, ou seja, após trinta minutos de espera entre o fim do enchimento da panela e o início do teste. Nesta situação não foi verificado movimento residual do líquido, decorrente do enchimento da panela. O fluxo citado pode ser visto no anexo (Fluxo Zero).

Além do exposto, para amplificar a possibilidade de formação de vórtice durante a drenagem foram realizados testes adicionais com alimentação tangencial da água junto à parede da panela, com entrada a 30 graus em relação à horizontal. A panela não se enchia totalmente, em média a 1/3 da capacidade durante cerca 3~4 minutos. Estes valores correspondem a uma vazão média de 14 litro/min e uma velocidade média de 0,2 m/s.

#### Dispositivos antivórtice:

Objetivando reduzir o volume residual na panela, diversas condições foram simuladas: Barreiras próximas ao furo de vazamento (Figuras 4.6, 4.7 e 4.8), injeção de ar através de agulhas posicionadas na região de vazamento (Figura 4.9), a utilização de um fundo falso (Figura 4.10) além da interação das condições acima como, por exemplo: Fundo falso com injeção de ar e Barreiras com injeção de ar.



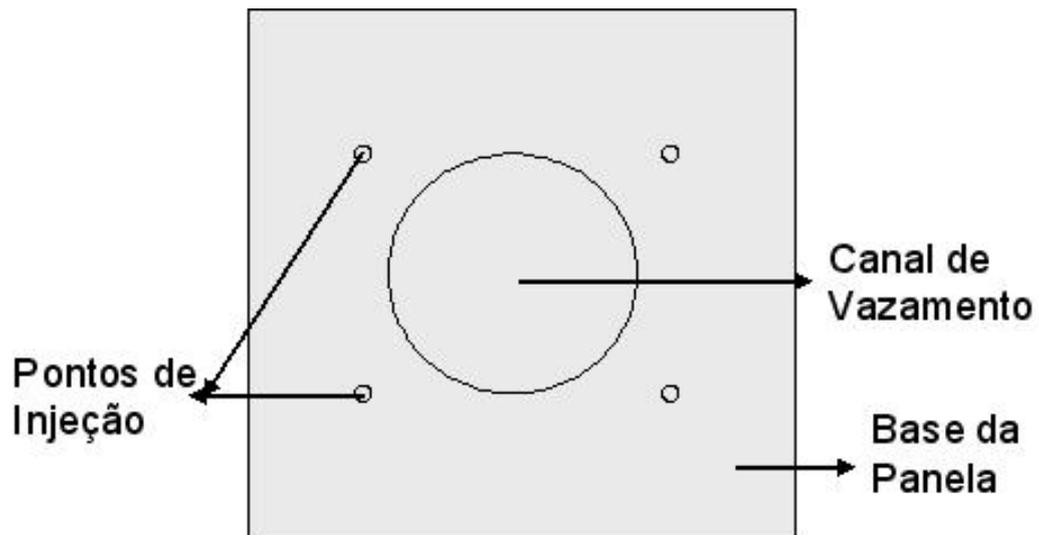
**Figura 4.6** – Dimensões dos Anteparos – (a) Base ; (b) Lateral



**Figura 4.7** – Anteparo Anti-Vórtice Disposição A



**Figura 4.8** – Anteparo Anti-Vórtice Disposição B



**Figura 4. 9** – Região do Vazamento com Pontos para Injeção de Ar



**Figura 4. 10** – Fundo Falso para Reduzir Volume Residual

As experiências levaram em conta, ainda, a vazão de esgotamento da placa e o volume de líquido inicial no interior da placa.

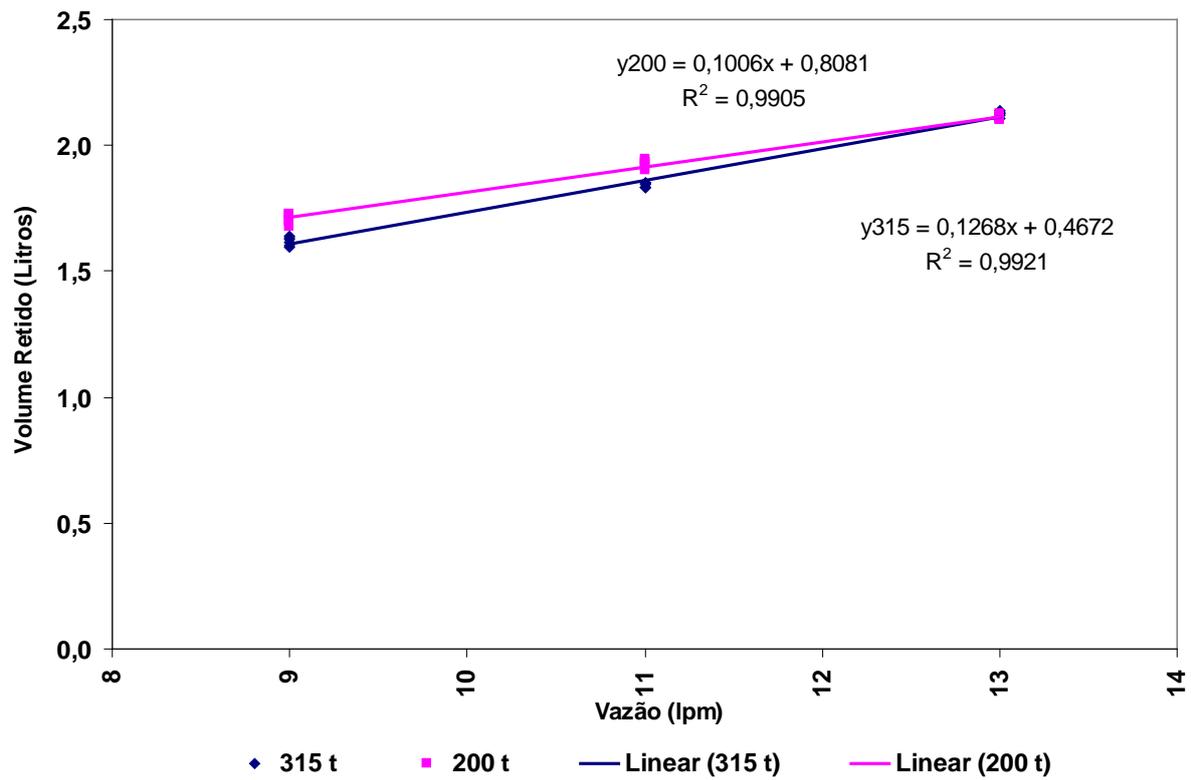
Resumidamente um teste consiste das etapas seguintes: 1- enchimento da panela ao nível desejado; 2- imposição do campo de velocidades característico do Desgaseificador à vácuo (RH) ou Estação de tratamento de panela (IRUT) , ou tempo de espera determinado, ou de alimentação tangencial; 3- abertura da panela e regulagem sistemática (manual) de vazão; 4- fechamento da válvula quando da detecção do vórtice; 5- escoamento do líquido residual e pesagem.

A placa de aquisição de dados A/D, acoplada ao computador, permite acompanhar em tempo real as vazões de saída, tempo de experiência e sinal do sensor fotoelétrico. Estes sinais são enviados à tela do monitor via um programa em BASIC, especialmente desenvolvido. Na eminência da formação de vórtice ou funil a velocidade de leitura é aumentada, o que permite capturar com precisão o instante de inserção de ar no canal de saída.

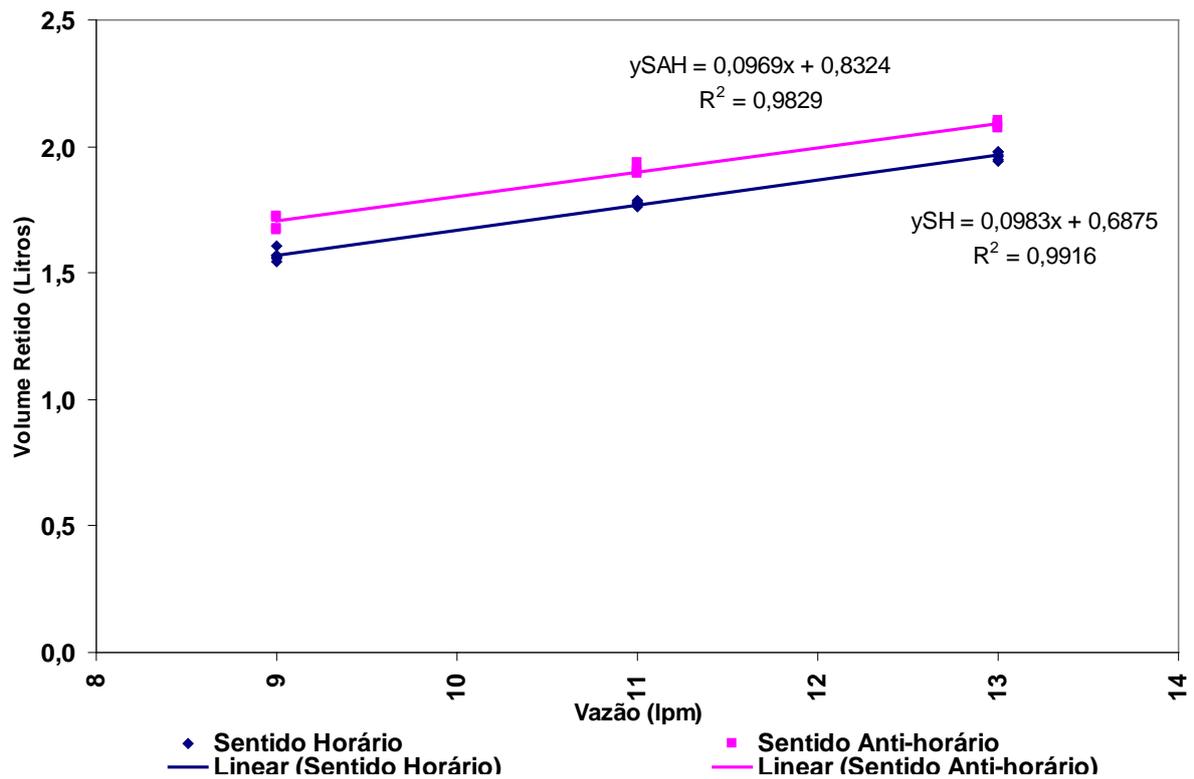
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram realizados experimentos com dois níveis de fluido, equivalentes a 315ton e 200ton de aço em uma panela industrial. Foram simuladas diversas condições de fluxo, sendo as vazões escolhidas de acordo com o já citado adimensional de Froude, de modo a retratar taxas de lingotamento de 8 a 12ton/minuto.

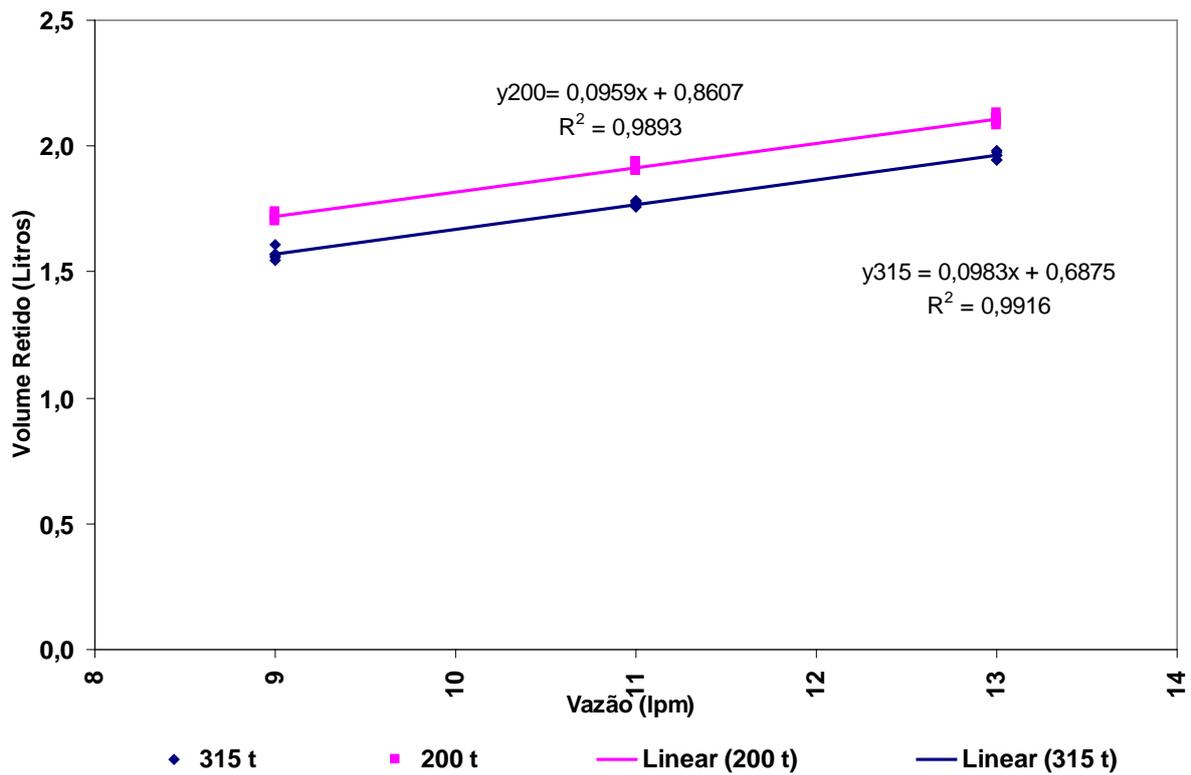
A Figura 5.1 apresenta os resultados com o fluido na condição inicial de repouso nos dois níveis propostos, equivalente a 200 e 315 toneladas de aço. Por repouso entende-se a ausência de movimentação do fluido ao início de vazamento: para tanto o vazamento somente foi iniciado após um tempo de espera de 30 minutos, julgado suficiente para a dissipação de qualquer movimento residual provocado pela operação de enchimento da panela. A Figura 5.2 mostra os resultados após circulação no sentido horário e no sentido anti-horário, provocada por um RH, a partir do nível inicial de 315ton. A Figura 5.3 apresenta os resultados quando a circulação pelo RH é realizada no sentido horário, a partir dos níveis iniciais de 200ton e 315ton; a Figura 5.4 apresenta dados semelhantes, para circulação no sentido anti-horário. Por questão de distribuição do desgaste do refratário da câmara de vácuo, isto é, para evitar o desgaste prematuro e a redução da vida útil, costuma-se alternar a posição da perna de subida. Assim sentido de circulação anti-horária implica que a perna de subida esteja localizada sobre o furo de vazamento; circulação horária implica em perna de subida na posição diametralmente oposta.



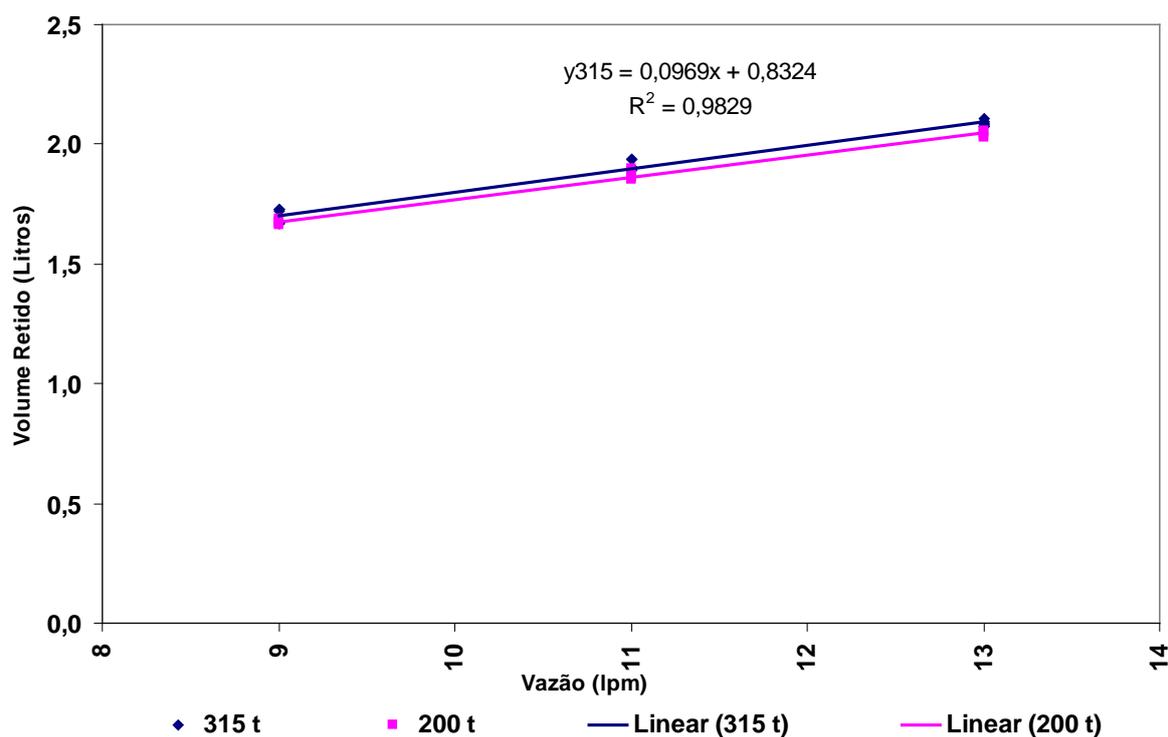
**Figura 5. 1** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t Partindo do Repouso.



**Figura 5. 2** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Nível de Enchimento Inicial Igual a 315t: Circulação do RH no Sentido Horário e Anti-horário.



**Figura 5. 3** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t com Circulação do RH no Sentido Horário.



**Figura 5.4** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Enchimento Inicial: 200 e 315t com Circulação do RH no Sentido Anti-horário.

Como pode ser visto nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, não existe diferença significativa no volume residual partindo de dois níveis diferentes de fluido. O sentido da circulação também não parece afetar de modo efetivo. Este resultado contrasta com o de vários pesquisadores. Por exemplo, PIMENTA et al. <sup>[6]</sup> comenta que o tempo de espera seria uma medida indireta da componente rotacional no início do vazamento, e sugere um valor maior de altura crítica (de formação do vórtice) com a diminuição do tempo de espera, para o caso de orifícios localizados no centro da panela. Para posicionamento excêntrico do furo o sentido seria inverso. Não fica claro, entretanto, como teria sido feita a alimentação da panela nos experimentos conduzidos por estes pesquisadores.

Por outro lado SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> controlaram cuidadosamente a alimentação da panela de modo a obter um campo rotacional reprodutível e foram capazes de medir o decaimento da componente tangencial (rotacional) residual, como indica a Figura 3.8 (Seção Revisão Bibliográfica). Deste modo ficou clara a influência do tempo de espera sobre a dissipação do campo residual de velocidades e, logo, sobre a Altura Crítica de Formação da Depressão Superficial (dimple,  $H_{cr, \text{dimple}}$ ) e sobre a Altura Crítica de Formação do Vórtice ( $H_{cr, \text{vf}}$ ), vide Figura 3.9 (Seção Revisão Bibliográfica). Embora estes resultados não estejam diretamente ligados à variação de altura inicial de líquido e sua influência sobre a formação de vórtice, eles reforçam o argumento de que a caracterização do campo inicial de velocidades é de suma importância neste tipo de experimento.

Neste caso sugere-se que, nos instantes finais de vazamento, os campos de velocidade não diferem muito (independente do sentido de circulação, da altura inicial e do tempo de repouso) no que tange à velocidade tangencial. Alguns autores citados por Costa et al. [17] também afirmam que a altura na coluna de líquido influencia no início da formação do vórtice.

Alguns comentários adicionais podem ser feitos a respeito destes resultados.

Talco foi polvilhado sobre a superfície do líquido, de modo que a movimentação das partículas do mesmo pudessem explicitar, qualitativamente, o regime de drenagem. Observou-se a formação inicial de uma depressão (“dimple”), seguida de um movimento rotacional característico de um vórtice, mas a drenagem era normalmente finalizada no regime de funil. Sugerindo, então, a sucção da segunda fase (ar) quando a capacidade de abastecimento ao furo de vazamento ficasse comprometida pelo baixo nível de líquido. O vídeo (vortex\_curto.mpeg) em anexo ilustra esta situação.

A equação 5.1, que aplica o princípio da conservação de energia de Bernoulli, permite inferir o nível de líquido a partir do qual a capacidade de abastecimento ao furo estaria comprometida:

$$Q = \pi R^2 \sqrt{2gh} \quad (5.1)$$

Onde,  $Q$  representa a vazão de lingotamento [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  $R$  o raio do furo de drenagem [ $\text{m}$ ];  $h$  o nível de líquido [ $\text{m}$ ]. É uma aproximação desde que nos instantes finais a velocidade na superfície do líquido não é nula, por desprezar o coeficiente de descarga (função da geometria do furo de vazamento) e por desprezar os efeitos viscosos. Entretanto, aliada à quase perfeita superposição dos resultados citados, permite sugerir que os longos tempos de vazamento, 7 a 15 minutos, são suficientes para obliterar qualquer diferença inicial quanto aos campos de velocidade. Pelo mesmo raciocínio a relação direta entre a quantidade material retido e a vazão, pois cada experimento teria sido encerrado quando a altura de líquido atingiu o valor crítico correspondente à capacidade de abastecimento. Isto é:

$$M = \frac{(Q/\pi R^2)^2}{2g} \pi R_p^2 \quad (5.2)$$

onde,  $R_p$  representa o raio do fundo da panela [ $\text{m}$ ],  $Q$  representa a vazão de lingotamento [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $R$  o raio do furo de drenagem [ $\text{m}$ ],  $g$  a aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

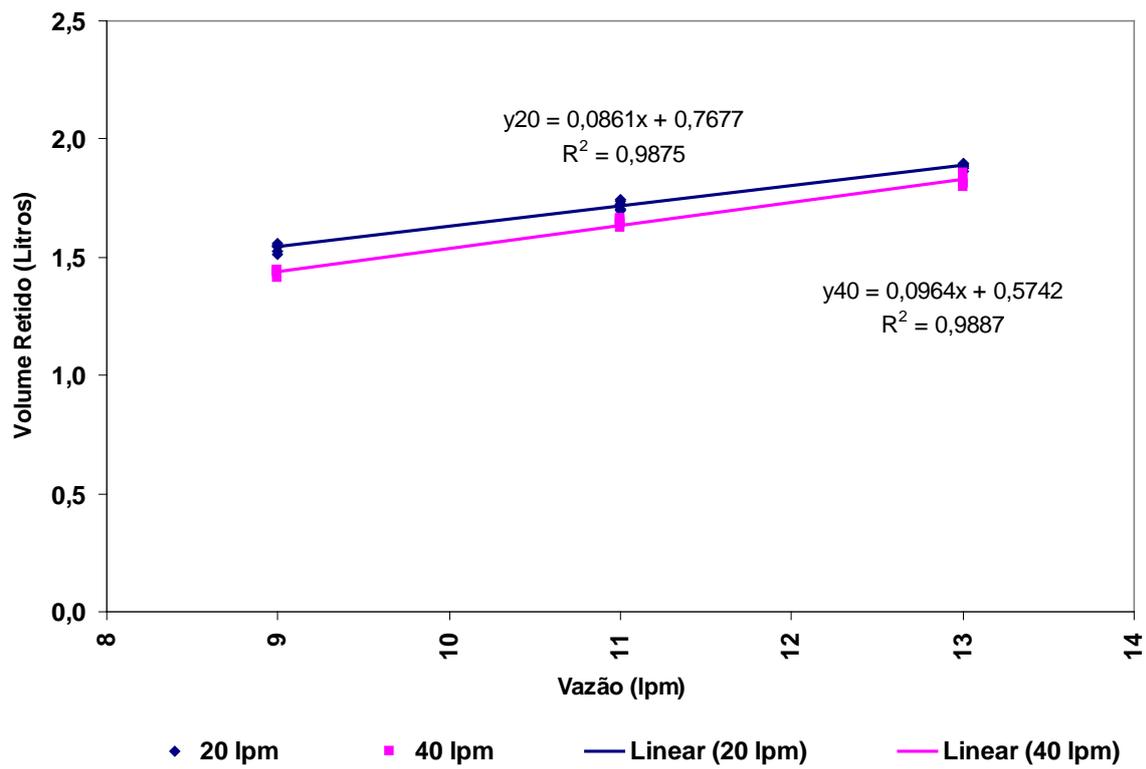
A Tabela V.1 apresenta a comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores teóricos de volume retido conforme a equação acima. Como pode ser visto os valores obtidos experimentalmente aproximam-se dos valores teóricos, mostrando-se uma tendência a superavaliação (em relação aos resultados experimentais) com o aumento de vazão. Uma das suposições básicas envolvidas na dedução da equação anterior é que a superfície do fluido esteja estática. É uma suposição razoável no início do experimento, mas se desvia paulatinamente da realidade quando a vazão aumenta e, sobretudo, nos instantes finais de vazamento. Este desvio poderia explicar a discrepância acentuada em vazões maiores.

**Tabela V.1 – Comparação Material Retido Teórico x Experimental**

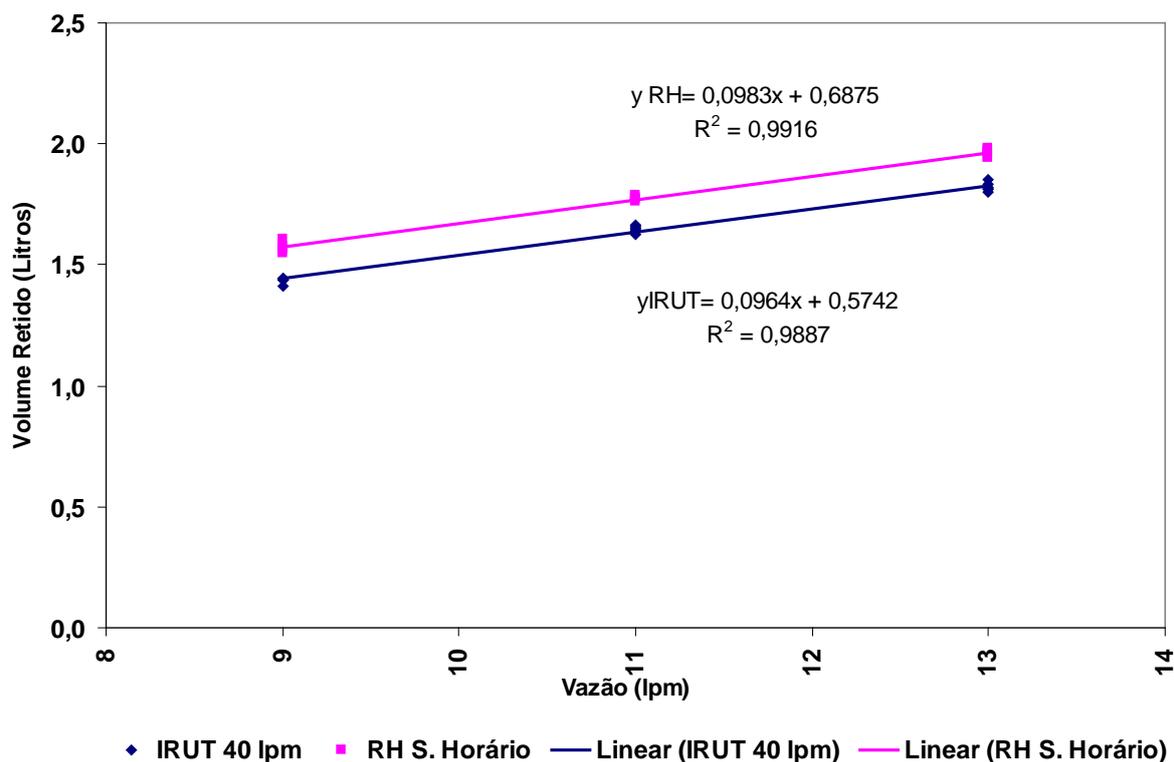
Material Retido Teórico (l)			Material Retido Exp. (l)		
9 l/min	11 l/min	13 l/min	9 l/min	11 l/min	13 l/min
1,4	2,2	3,0	1,6	1,9	2,1

Cada experimento foi repetido por seis vezes. As tabelas do anexo indicam que um valor típico de desvio padrão, para cada vazão, foi em torno de 0,025 litros. Um teste de hipótese, relativo à diferença entre médias de duas experiências diferentes (sob mesma vazão) indicaria significância ( $t(\alpha = 0,025)$ ; two tailed test) = 2,228) somente quando a diferença entre média alcançasse 0,032 litros. Em alguns dos casos progressos a diferença claramente supera este valor limite. Entretanto vale ressaltar que um erro de nivelamento da panela da ordem de 1mm pode induzir a uma quantidade adicional de material retido da ordem de 0,115 litros. Portanto pode ser argumentado que não existe razão para afirmar que exista diferença significativa entre os resultados até aqui apresentados. De fato esta consideração permanece válida em algumas das situações descritas a seguir.

As simulações seguintes foram realizadas considerando os diferentes tipos de fluxo possíveis para um mesmo nível inicial de 132 litros (315t). A Figura 5.5 apresenta uma comparação entre resultados correspondentes às vazões de misturamento de 20l/min em um modelo de reator IRUT. A Figura 5.6 compara os resultados relativos ao modelo do IRUT em uma vazão de 40l/min e a circulação no sentido horário de um RH.



**Figura 5.5** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para dois Níveis de Vazão de Misturamento no IRUT.



**Figura 5.6** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Circulação do RH Sentido Horário e IRUT com Vazão de Misturamento de 40l/min.

Os resultados sugerem que não há diferença entre os tipos de fluxo testados no que tange ao volume residual na panela. Então, se existia alguma diferença significativa quanto às componentes tangenciais (rotacionais) geradas por estes aparelhos, esta deixou de ser importante ao final do vazamento.

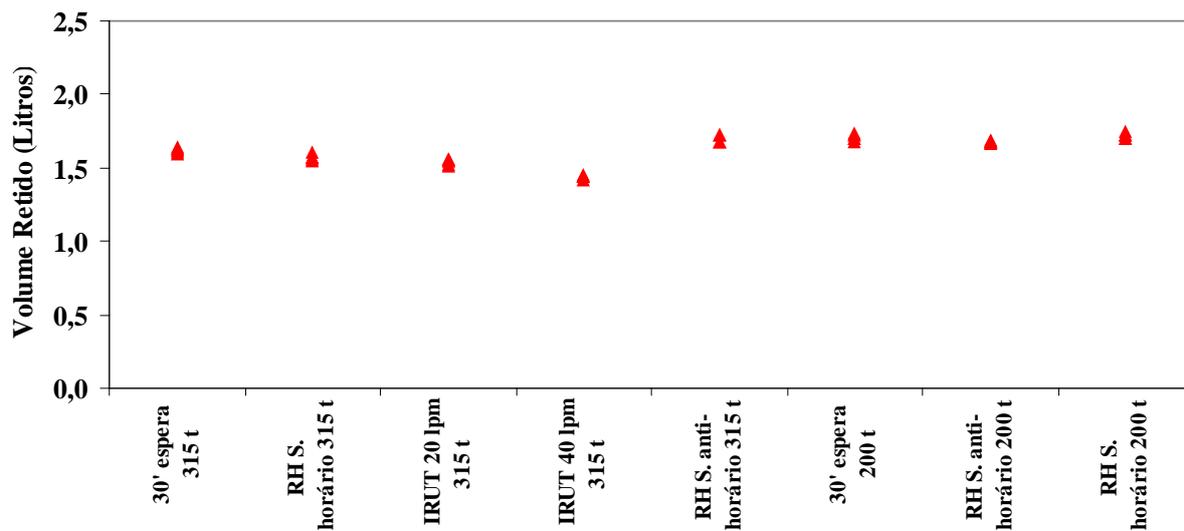
Os resultados deste trabalho são complementares aos estudos de HAMMERSCHIMID et al.<sup>[4]</sup>. Dão suporte apenas parcial às afirmativas de DAVILA et al.<sup>[14]</sup>, uma vez que o evidencia a pouca a influência do movimento residual gerado pelo RH e pelo IRUT sobre o material retido após formação do vórtice.

Os resultados apresentados até este ponto sugerem que o volume residual possui uma relação direta com a vazão de esgotamento, tendência confirmada, por exemplo, pelos estudos de HEASLIP et al. <sup>[11]</sup>. Os experimentos de DAVILA et al. <sup>[14]</sup> mostram resultados divergentes. Os autores chegam a sugerir inicialmente que resultados numéricos e experimentais indicavam que a altura crítica de formação de vórtice, durante drenagem da panela através de um furo excêntrico, é independente da vazão, do nível inicial de líquido e, essencialmente independente de movimentos residuais no líquido, dependendo somente da razão entre altura e diâmetro do banho. Portanto não haveria relação entre início da formação do vórtice e a vazão de drenagem.

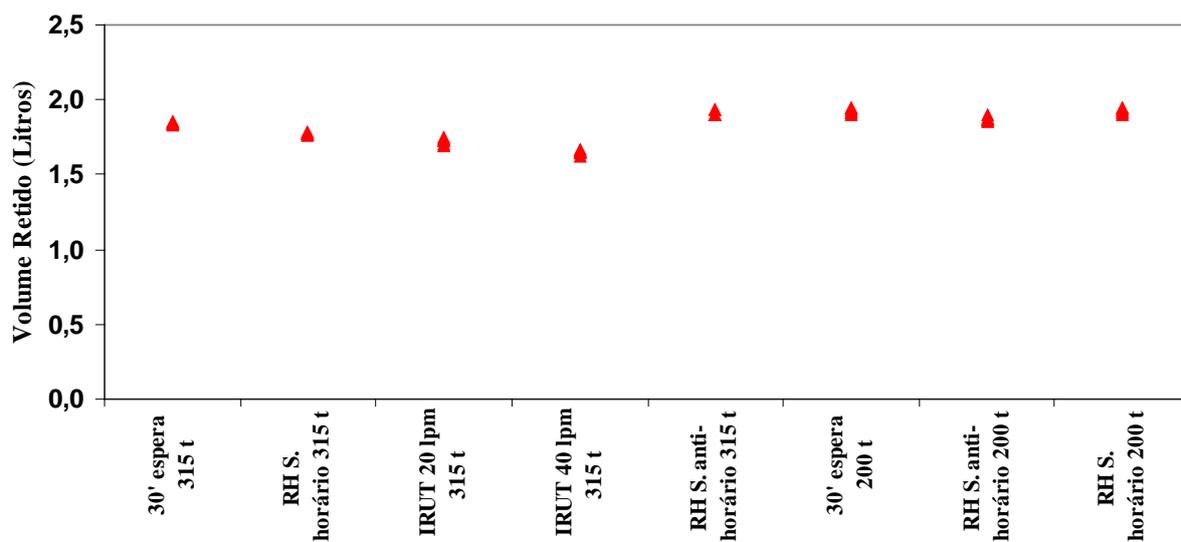
Vale ressaltar que nos estudos de DAVILA et al. <sup>[14]</sup> a altura crítica era medida através de uma régua na lateral da panela (e ainda com auxílio de filmagens), o que pode levar a erros de determinação da altura crítica, devido à dificuldade na leitura destes valores. A título de exemplo, no caso dos experimentos conduzidos para esta dissertação, um erro de leitura na altura da ordem de 1mm (perfeitamente normal em se tratando de diferentes operadores, por exemplo, devido ao molhamento do acrílico pela água) levaria a uma diferença em volume residual (panela com 52cm de diâmetro) próxima de 210ml. Este valor é cerca de 10% do valor médio recolhido ao final da drenagem. Portanto não parece que medições realizadas do modo descrito por DAVILA et al. <sup>[14]</sup> permitam precisão significativa.

Ultimamente DAVILA et al. <sup>[14]</sup> reconhecem que existe a dependência entre altura crítica de formação de vórtice, velocidade de drenagem e nível inicial de líquido, mas que esta seria somente encontrada em condições extremas, tais como valores elevados da razão entre diâmetros do furo e da panela e no caso de alimentação tangencial. O que, salientam, não seria a condição normal em uma aciaria.

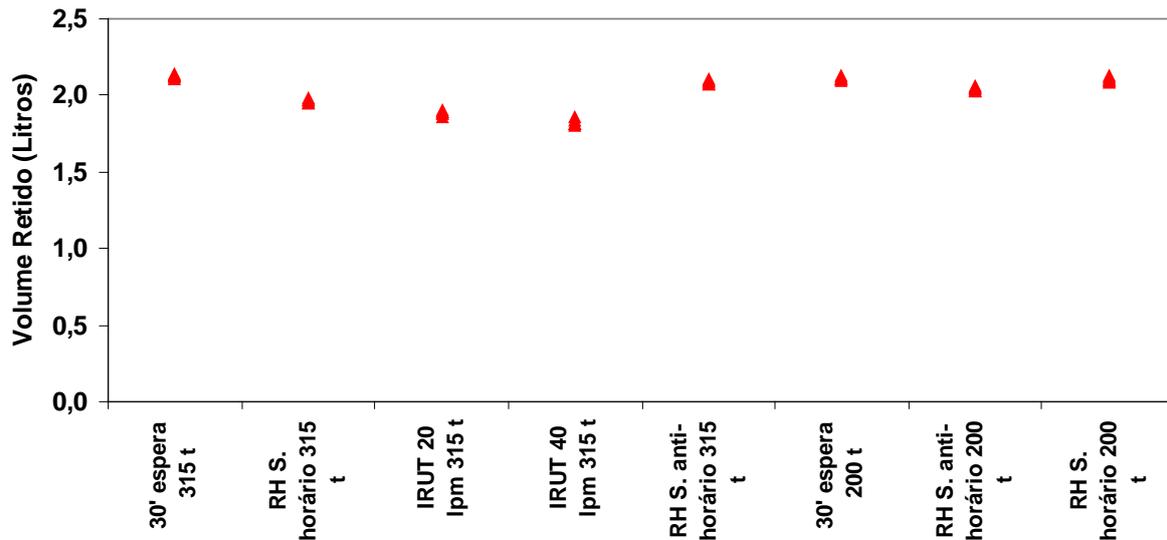
As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam todos os resultados acima agrupados para as vazões de esgotamento de 9, 11 e 13l/min respectivamente.



**Figura 5.7** - Comportamento do Volume de Líquido Residual em Diversas Condições para Vazão de Esgotamento de 9l/min.



**Figura 5.8** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Diversas Condições para Vazão de Esgotamento de 11l/min.



**Figura 5.9** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Diversas Condições para Vazão de Esgotamento de 13l/min.

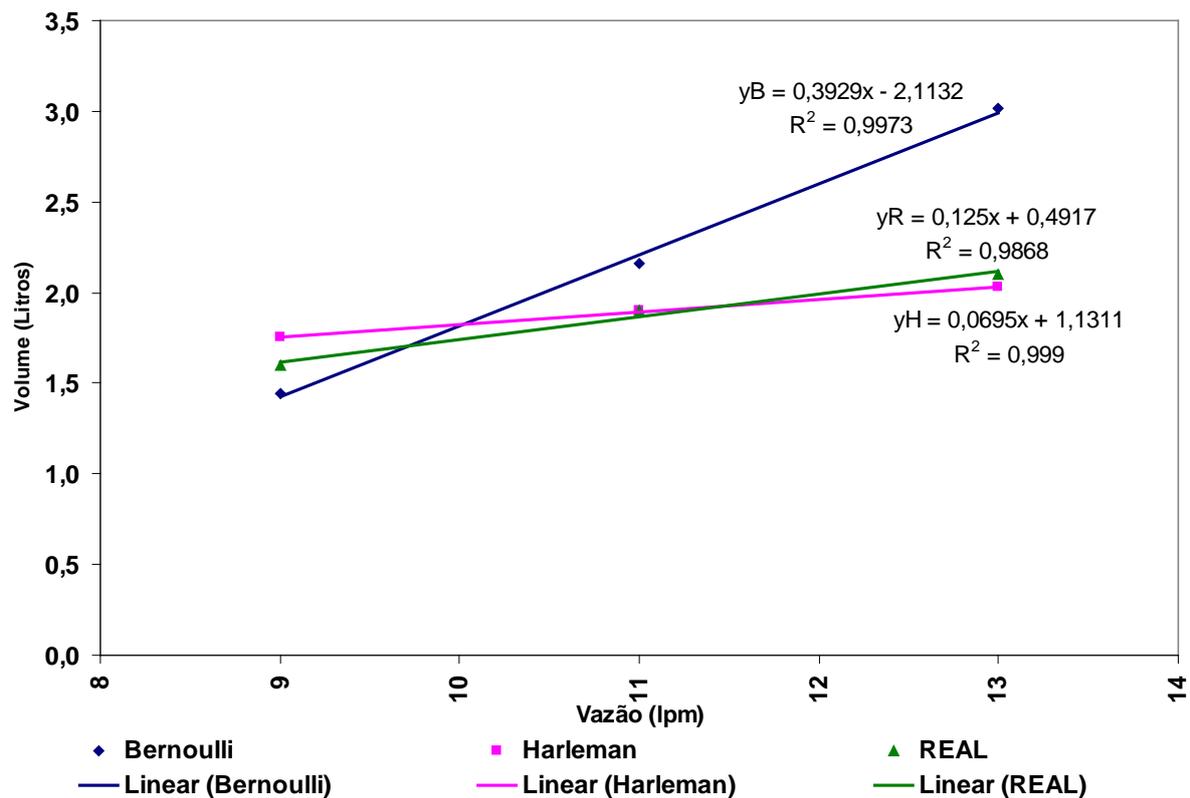
Os resultados acima reforçam que não há diferença significativa no volume residual, independente dos fluxos testados e do nível inicial da panela. Então os resultados sugerem que os fluxos estudados não são capazes de garantir a formação de um vórtice completamente desenvolvido, confirmando a independência entre o volume retido, o tipo de fluxo aplicado e o nível inicial na panela, para esta geometria e condições experimentais. Estes resultados estão alinhados com HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> que verificaram uma influência mínima ou nula do estado inicial de agitação do fluido na incidência do vórtice. Em seus experimentos HEASLIP et al. <sup>[11]</sup> simulavam diversos tipos de fluxos, após o enchimento do modelo de forma vertical com velocidade baixa (baixa vazão em um orifício grande).

Outros pesquisadores, citados por SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup>, encontraram que a altura crítica de drenagem, a partir do qual se observa o arraste da fase sobrenadante (ar, escória) para o interior do canal de vazamento sem o estabelecimento de fluxo rotacional (vórtice), isto é, escoamento radial a partir da periferia do fundo da panela, escoamento em funil, varia linearmente com o diâmetro do canal, e, também, em proporção direta com a vazão. Seria independente do diâmetro da panela, da excentricidade do furo de vazamento, da forma do fundo, da inclinação do fundo e da altura inicial de líquido. Como se nota os resultados obtidos nos experimentos aqui relatados são coerentes com estas observações. Sugerem ainda, baseados em que o líquido principal e o sobrenadante seriam invíscidos, e que o escoamento é controlado pela drenagem radial de líquido do fundo da panela na direção do furo de vazamento, calcular o Material Retido Residual [m<sup>3</sup>] como <sup>[19]</sup>:

$$M = \frac{\pi D_p^2 d}{4} \left( \frac{1}{2,54 K} \frac{Q}{\sqrt{g \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho}\right) d^5}} \right)^{0,4} \quad (5.3)$$

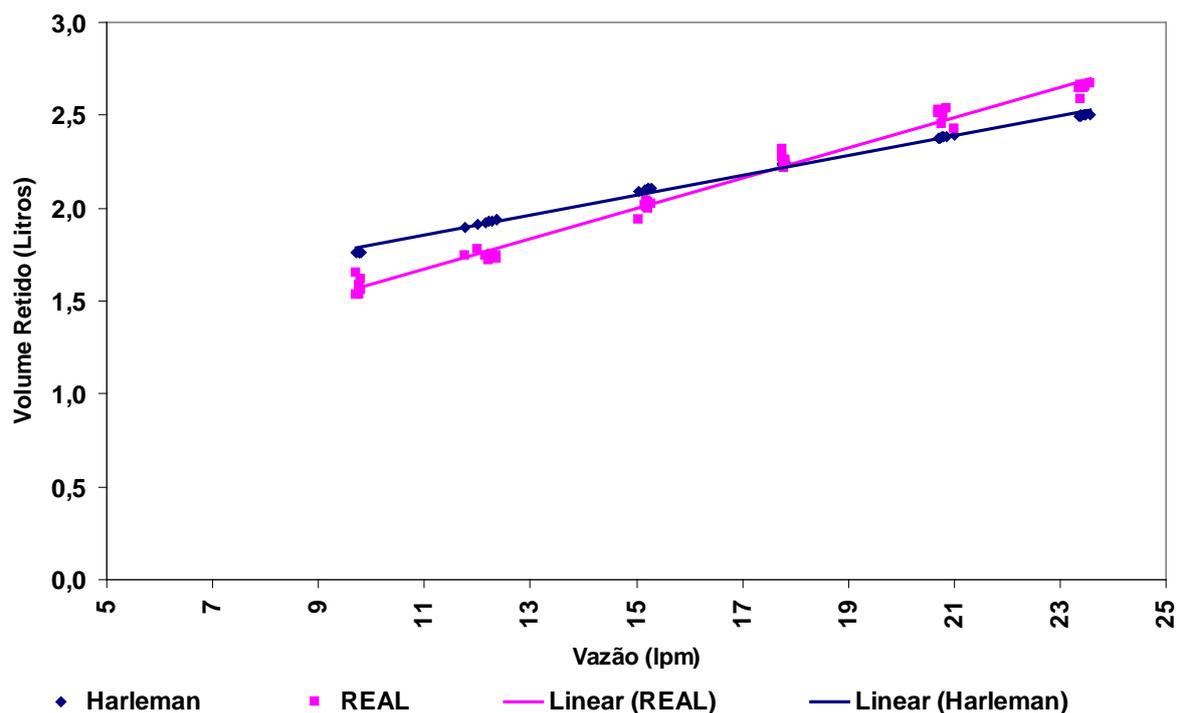
onde, **D<sub>p</sub>** representa o diâmetro da panela [m]; **d** o diâmetro do furo de vazamento [m]; **Q** a vazão [m<sup>3</sup>/s]; **g** a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]; **ρ<sub>s</sub>** a densidade do sobrenadante [Kg/m<sup>3</sup>] e **ρ** a densidade do líquido principal [Kg/m<sup>3</sup>].

Valores da Tabela V.1, experimentais e calculados a partir da equação de Bernoulli (Equação 5.2), foram lançados na Figura 5. 10, em conjunto com aqueles previstos pelo desenvolvimento da fórmula de Harleman (Equação 5.3). No caso desta última o valor da constante foi ajustado para 182530, de modo a fazer coincidir o valor calculado e o valor medido a 11l/min. Após este ajuste a concordância parece muito boa.



**Figura 5.10** - Valores Previstos e Medidos, de Acordo com Tabela V.I e Fórmula de Harleman, para K Igual a 182530.

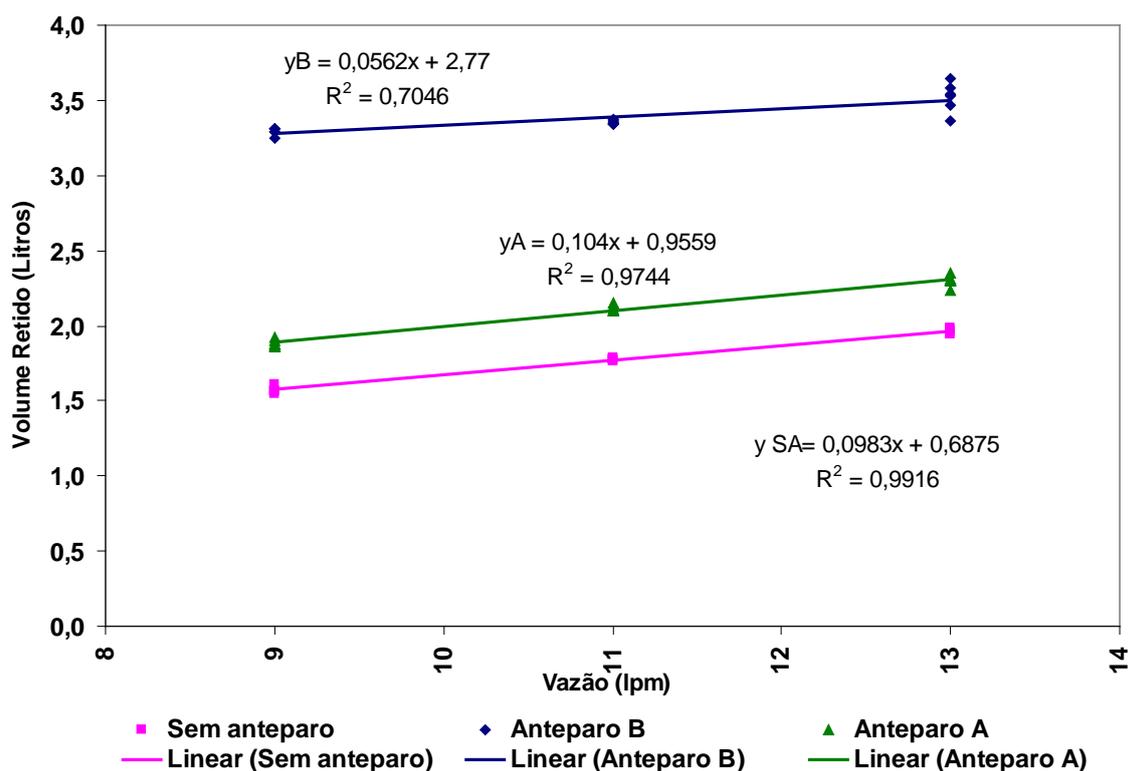
Foram realizados testes com valores mais altos de vazão (Ou seja, nº de Reynolds mais altos), desta forma, o efeito da viscosidade foi minimizado. A Figura 5.11 apresenta os resultados, comparados com os valores correspondentes a fórmula de Harleman (Equação 5.3). Como pode ser visto, mesmo em vazões mais elevadas os resultados apresentam concordância com o esperado pela fórmula de Harleman.



**Figura 5.11** - Valores Previstos de Acordo Fórmula de Harleman, para K Igual a 182530 Versus Valores Reais Obtidos em vazões Elevadas

É prática corrente considerar que virtualmente todo e qualquer obstáculo colocado junto ao canal de vazamento, e que seja capaz de impedir ou minorar o movimento rotacional do líquido, seria capaz de controlar a formação de vórtice. Por exemplo, SANKARANARAYANAN et al. <sup>[19]</sup> relatam sucesso com a aplicação de um “vortex buster”, tal como o esquematizado na Figura 3.10 (Seção Revisão Bibliográfica). Aparatos deste tipo poderiam de fato ter sucesso no caso de haver um residual de movimento tangencial elevado, suficiente para induzir ao aparecimento de vórtice. Como se mostra a seguir este não seria o caso do sistema em estudo, para estas condições específicas.

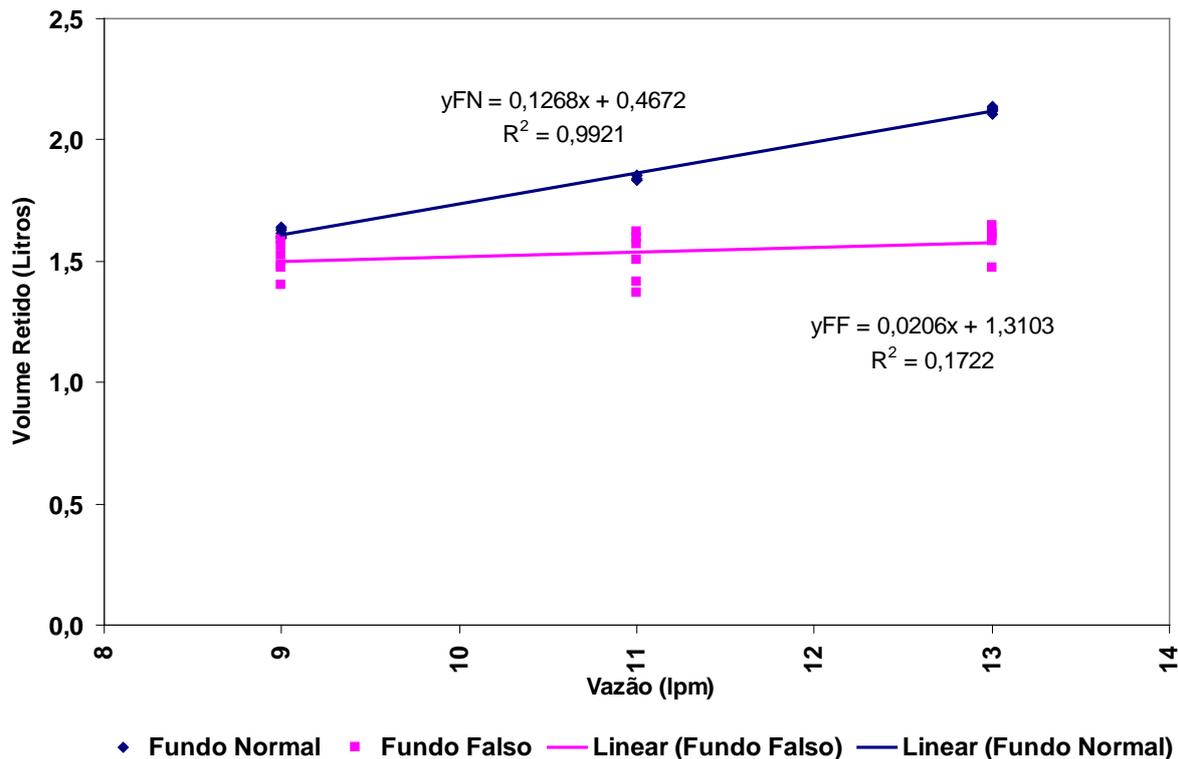
Foram posicionados anteparos (ver descrição na seção Metodologia) - na região do canal de saída com o objetivo de reduzir o volume residual na panela. A Figura 5.12 apresenta uma comparação entre três situações do RH: com circulação no sentido horário e 315 t: sem anteparos, com anteparos tipo A (todos os três na direção radial) e com anteparos tipo B. De acordo com os resultados, nas condições experimentais estudadas, anteparos não são efetivos na redução do volume residual na panela e, inclusive, a presença dos mesmos pode aumentar o residual de líquido. Esta tendência reforça o argumento que, nas experiências relatadas até aqui, nos estágios finais de drenagem o mecanismo seria controlado pela capacidade de abastecimento ao furo de vazamento; os anteparos seriam obstáculos ao abastecimento. De fato, o posicionamento dos obstáculos de acordo com o esquema A (todos na direção radial) se mostra substancialmente menos deletério que o posicionamento de acordo com o esquema B.



**Figura 5.12-** Comportamento do Volume de Líquido Residual para Situações do RH com Circulação no Sentido Horário com 132 litros (315 t): sem Anteparos, com Anteparos tipo A e com Anteparos tipo B.

Os valores residuais obtidos na planta industrial confirmam os resultados obtidos nos experimentos apresentados até agora. O valor médio de sobra de aço em uma panela está na ordem de 1,6 a 3,0 toneladas, conforme relatórios diários de acompanhamento da produção da CST. Nos experimentos realizados para esta Dissertação, o residual de água a uma vazão de 11l/min foi de 1,9 litros. Transportando este valor para a escala industrial, obtém-se um valor residual esperado de 4,5ton. Entretanto, os testes foram realizados com o modelo na horizontal e na planta industrial a panela fica inclinada em 1,2° para reduzir o volume residual. Levando em conta a correção devida à inclinação, resulta um valor residual na ordem de 2,3ton, o que está perfeitamente alinhado com os valores industriais.

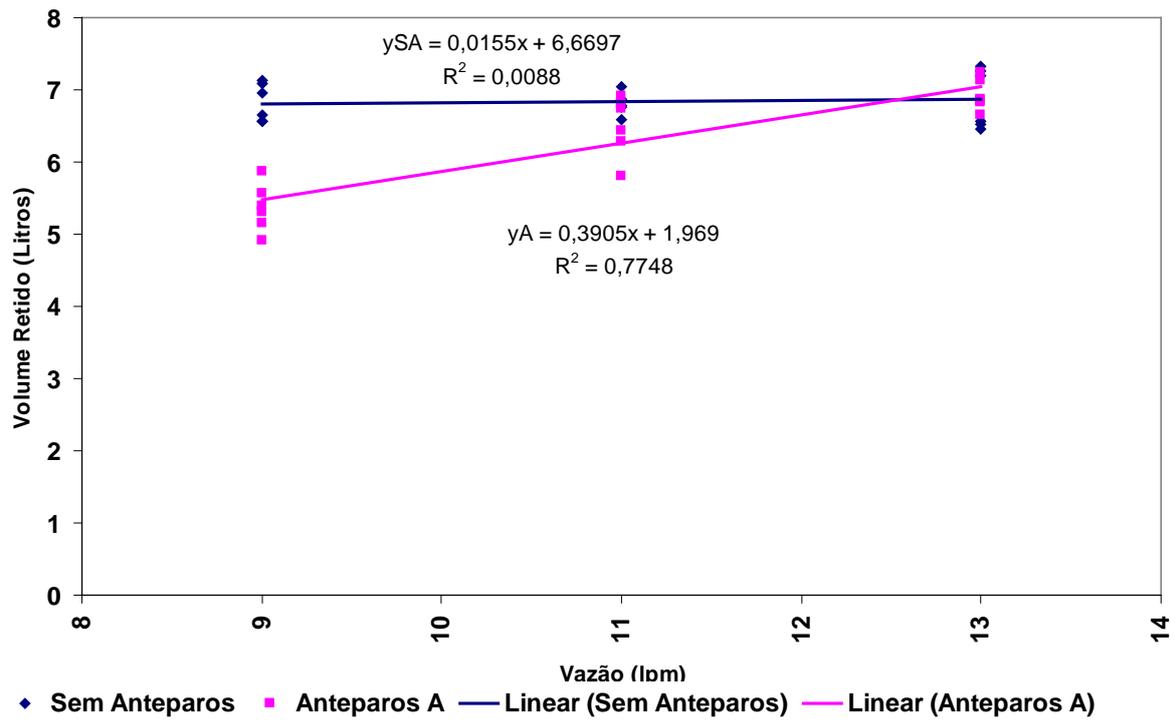
Diante dos resultados anteriores, foram realizados novos experimentos considerando a utilização de um fundo falso – vide esquema e dimensões na seção Metodologia - ou seja, um poço na região de vazamento de forma a aumentar a altura de líquido nesta posição. A Figura 5.13 compara os resultados relativos ao fundo normal com os do fundo falso, em condição de repouso. Como pode ser visto o fundo falso reduziu o volume residual nas vazões de 11 e 13l/min. A redução do volume residual é explicada pelo fato de que quando é utilizado um fundo falso tem-se, para a mesma altura crítica, um volume menor de líquido no interior da panela comparado com o fundo normal. Estes resultados são coerentes com os obtidos por HEASLIP et al. <sup>[11]</sup>, embora os dados industriais apresentados por este autor evidenciem uma forte dispersão. Entretanto, a utilização de um fundo falso implica em redução do volume útil da panela.



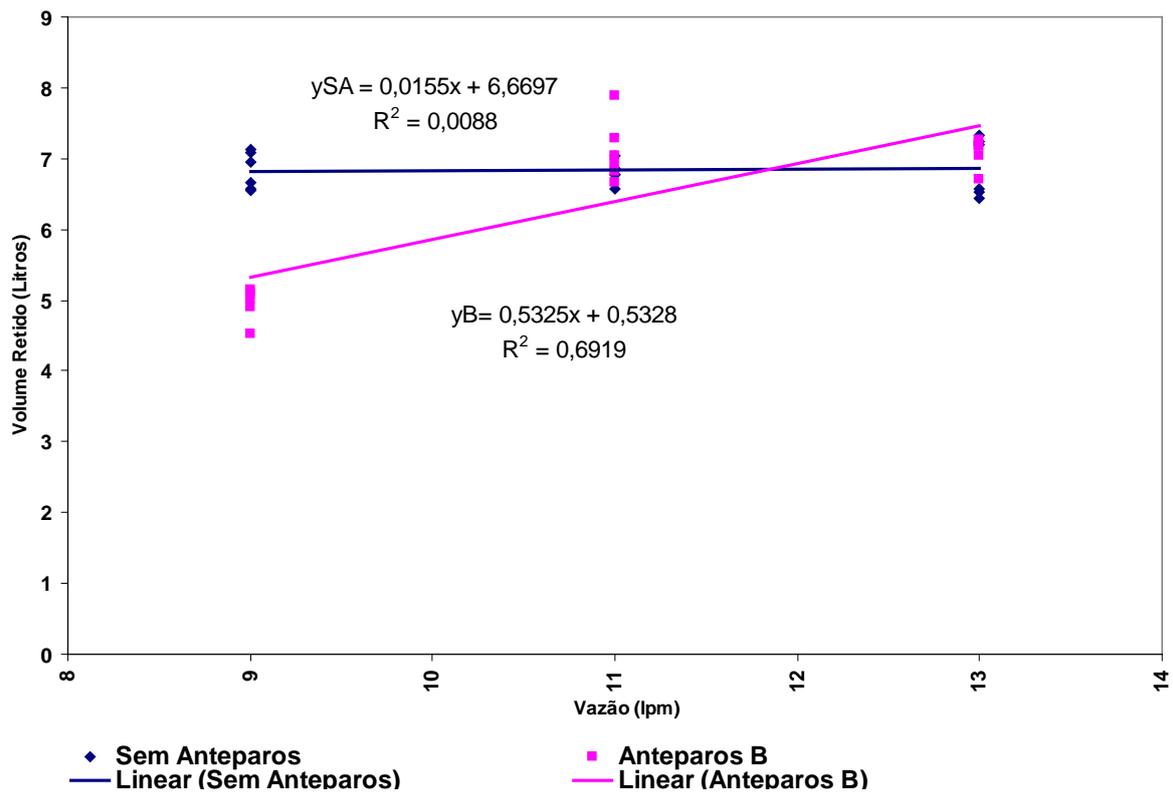
**Figura 5.13** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Fundo Normal e Fundo Falso com 132 litros (315t) Partindo do Repouso.

Realizadas as simulações referentes a condições típicas de processo, claramente desfavoráveis à formação de vórtices, foram realizadas avaliações com campo rotacional forçado, ou seja, alimentação da água realizada tangencialmente conforme detalhado no capítulo anterior.

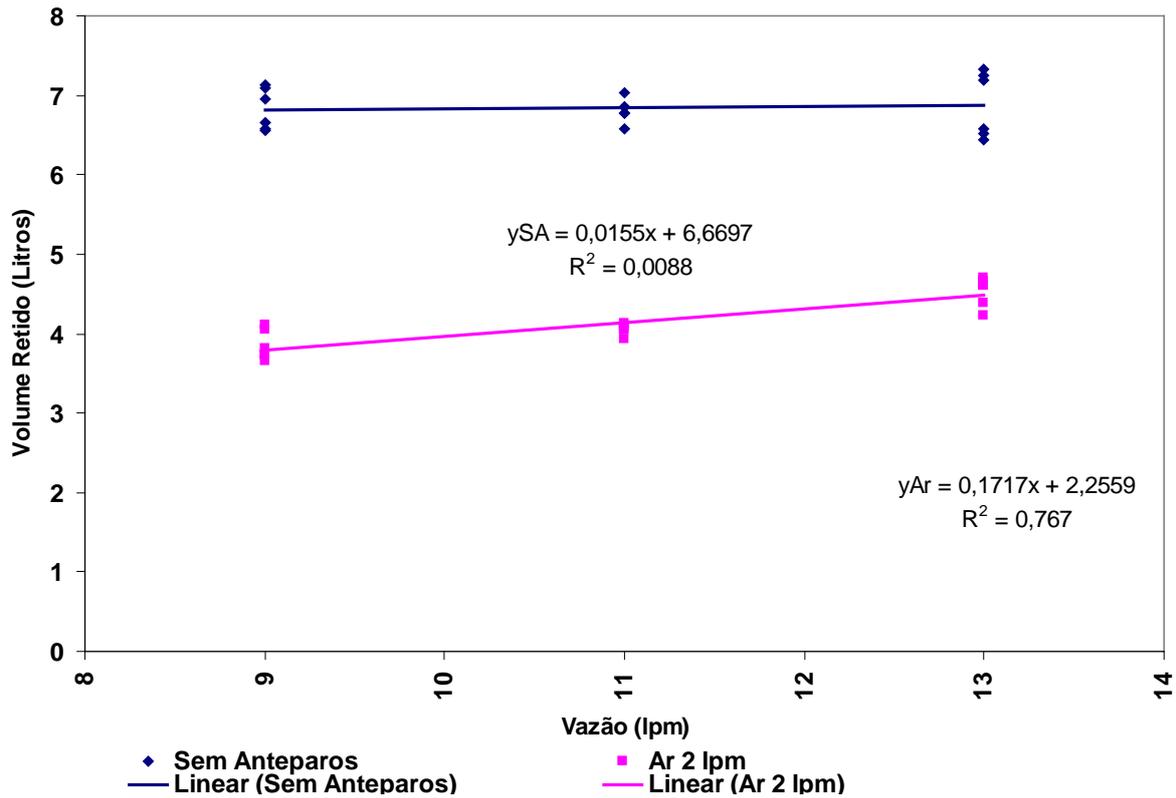
Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, são comparados resultados advindos da utilização de três dispositivos anti-vórtice: anteparo tipo A, anteparo tipo B e injeção de ar a 2l/min.



**Figura 5.14** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial com Anteparos A e sem Anteparos



**Figura 5.15** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial com Anteparos B e sem Anteparos



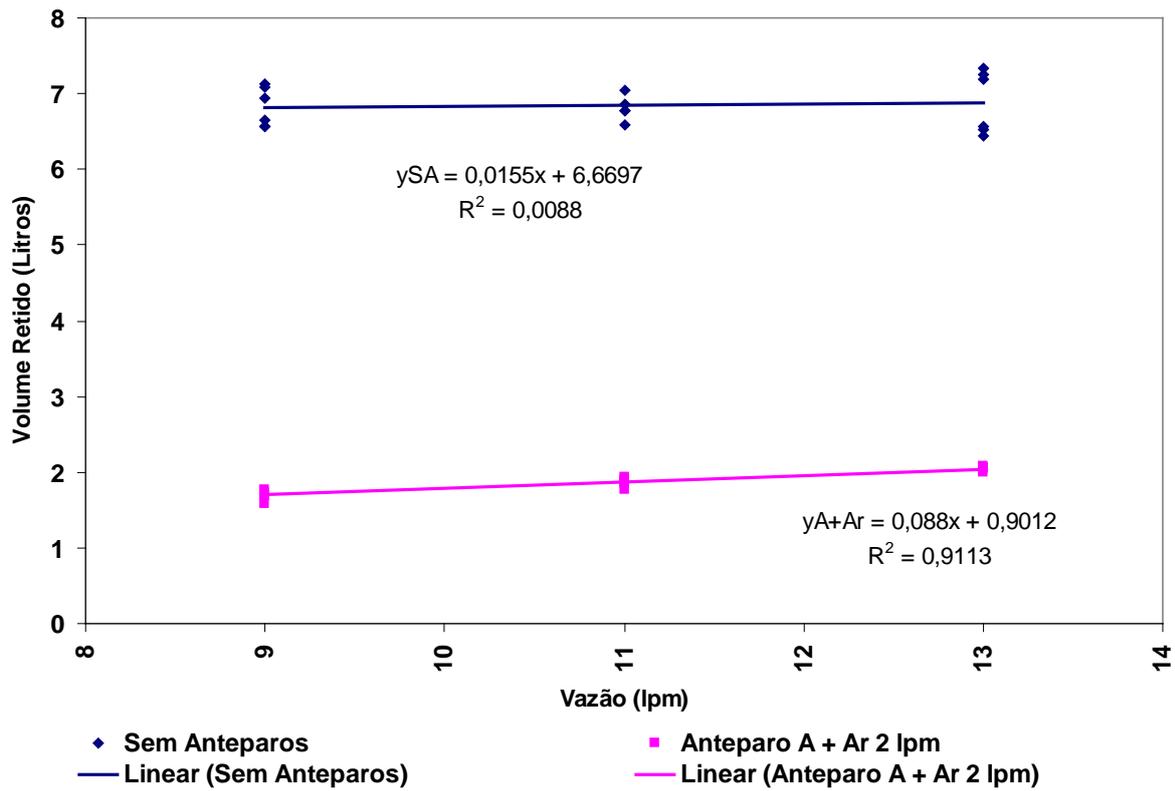
**Figura 5.16** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min.

Como se nota nos gráficos acima, o volume retido depende fortemente da presença ou não de um campo rotacional inicial, ao contrário do sugerido por DAVILA et al. <sup>[14]</sup>. De modo geral o volume residual triplicou quando da presença do campo rotacional.

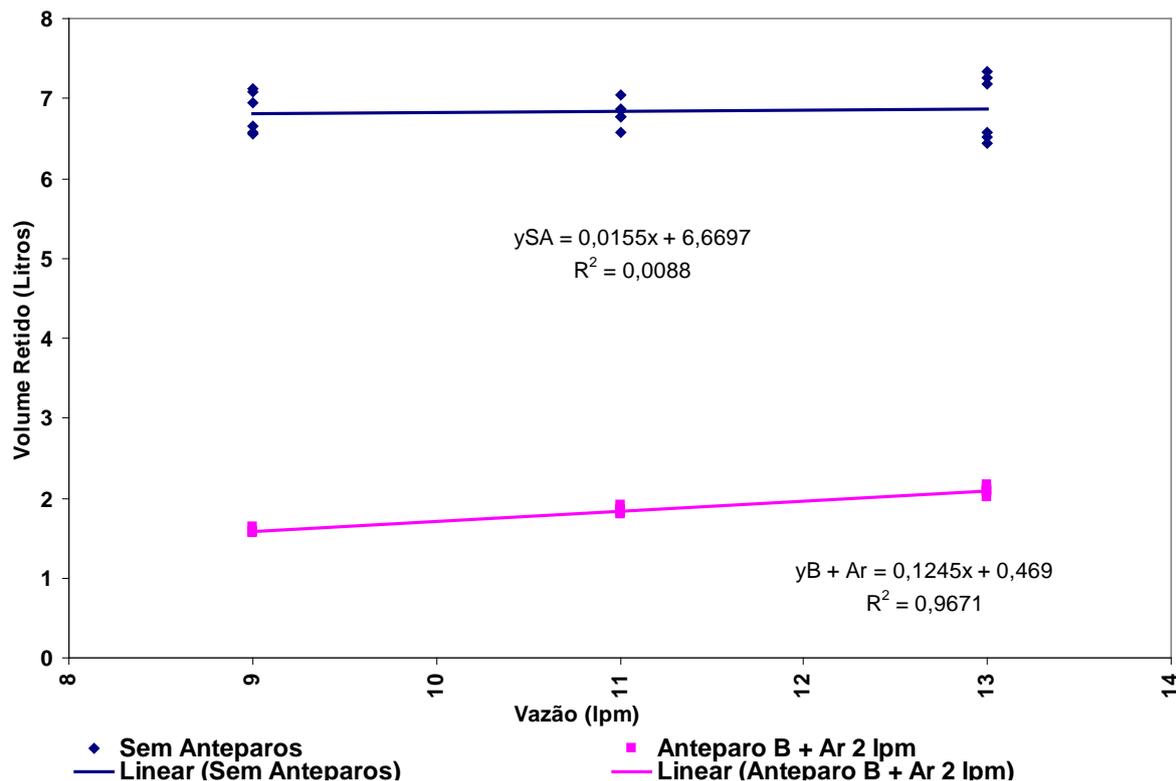
Como pode ser visto, os anteparos mostraram-se eficientes na redução do volume residual apenas nas vazões mais baixas, divergindo dos estudos de HAMMERSCHIMID et al.<sup>[4]</sup> onde os obstáculos testados suprimiram quase que totalmente o cordão de ar. Por outro lado, em seus experimentos, AJAMANI et al.<sup>[2]</sup> encontraram que a presença de obstáculos anti-vórtice não conseguiu reduzir a altura crítica de formação de vórtices; pelo contrário, a depender da proximidade com o furo de vazamento observava-se formação prematura de vórtices. Vale ressaltar que os resultados obtidos com a utilização de obstáculos são susceptíveis a capacidade dos mesmos em reduzir o fluxo rotacional o que é exclusivamente dependente do projeto dos mesmos. Note-se ainda que não existiria razão para emprego dos obstáculos propostos no caso dos fluxos produtivos analisados, envolvendo IRUT e RH; apenas nos casos em que houvesse certeza da presença de forte rotacional residual este entrariam em consideração.

A injeção de ar a 2l/min proporcionou um volume residual significativamente menor em todas as condições de vazão, porém os níveis residuais de material retido não retornam aos valores típicos referente à condição de repouso (e utilização de RH, IRUT). Este resultado está alinhado com HAMMERSCHIMID et al.<sup>[4]</sup> que obteve sucesso na redução do vórtice através da injeção de ar pelo fundo, entretanto a injeção do gás era feita antes do início de vazamento da panela (neste caso sua função seria impedir a continuidade do movimento rotacional induzido pela alimentação tangencial).

Resultados referentes à combinação dos anteparos com a injeção de ar estão apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18.



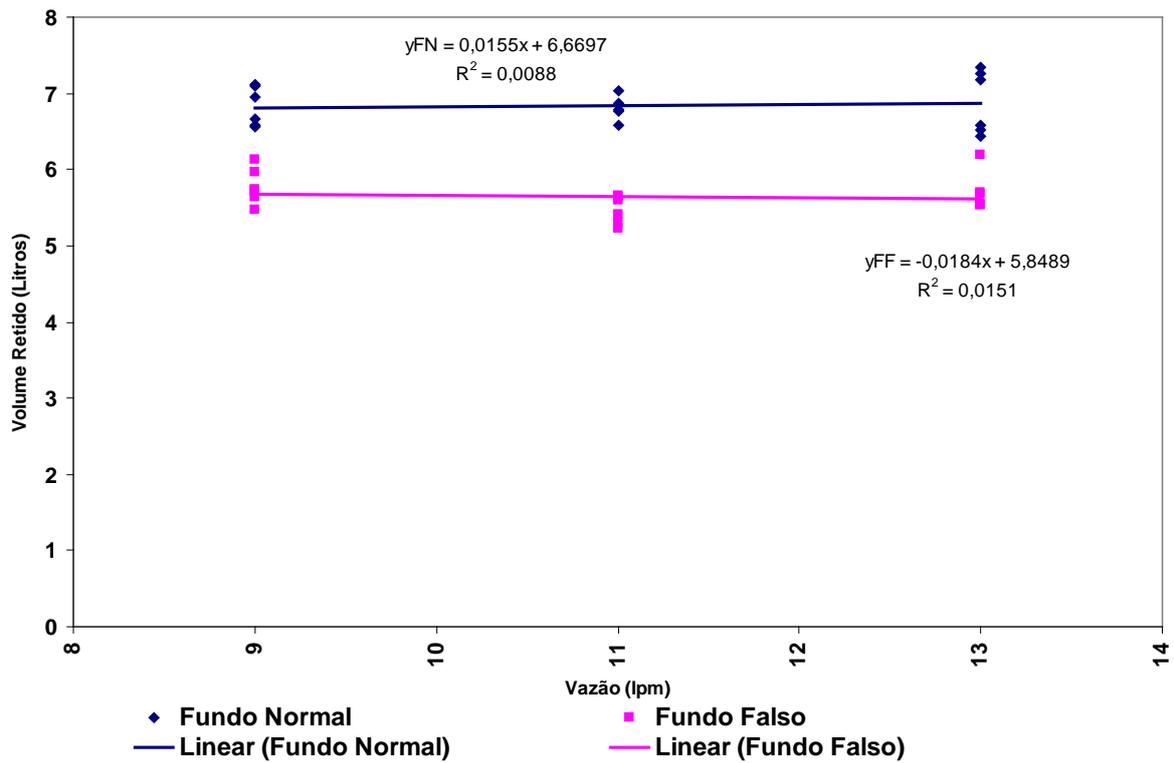
**Figura 5.17** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min + Anteparos A.



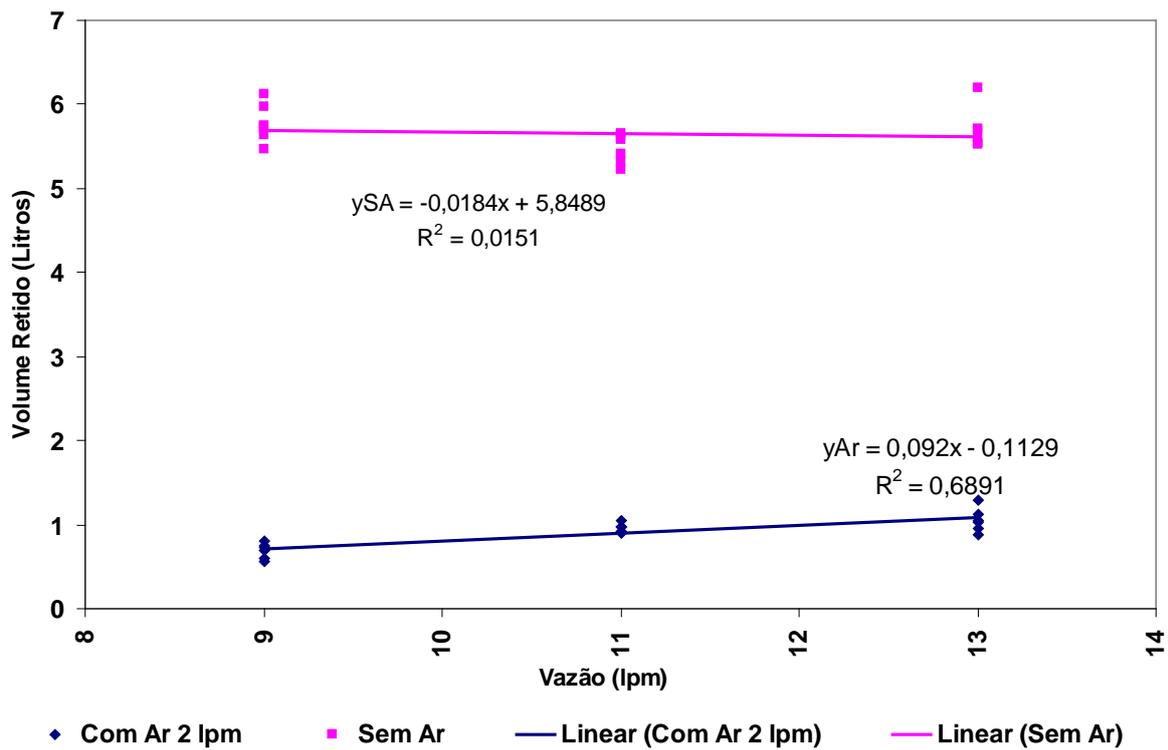
**Figura 5.18** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 2l/min + Anteparos B.

Estes se mostraram bastante promissores, uma vez que estão na mesma ordem dos obtidos em repouso, com RH e IRUT (1,4 ~ 2,1l).

Avaliou-se também a possibilidade de utilização conjunta de fundo falso e injeção de ar, vide Figuras 5.19 e 5.20. A combinação parece efetiva, notando-se que o emprego do fundo falso acoplado à injeção de ar reduz o material retido ao nível de 1 litro. Ressalta-se, entretanto, que a utilização do fundo falso poderia implicar em redução do volume útil da panela em cerca de 7 toneladas.

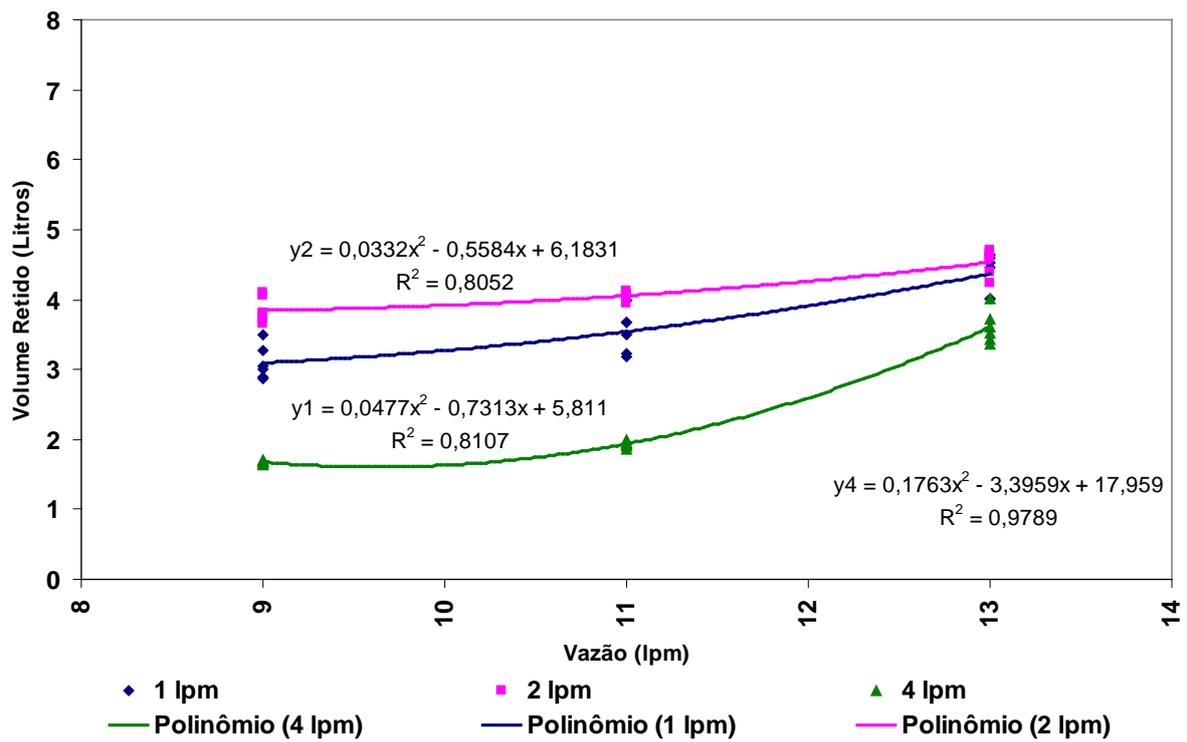


**Figura 5.19** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial com Fundo Normal e Fundo Falso.

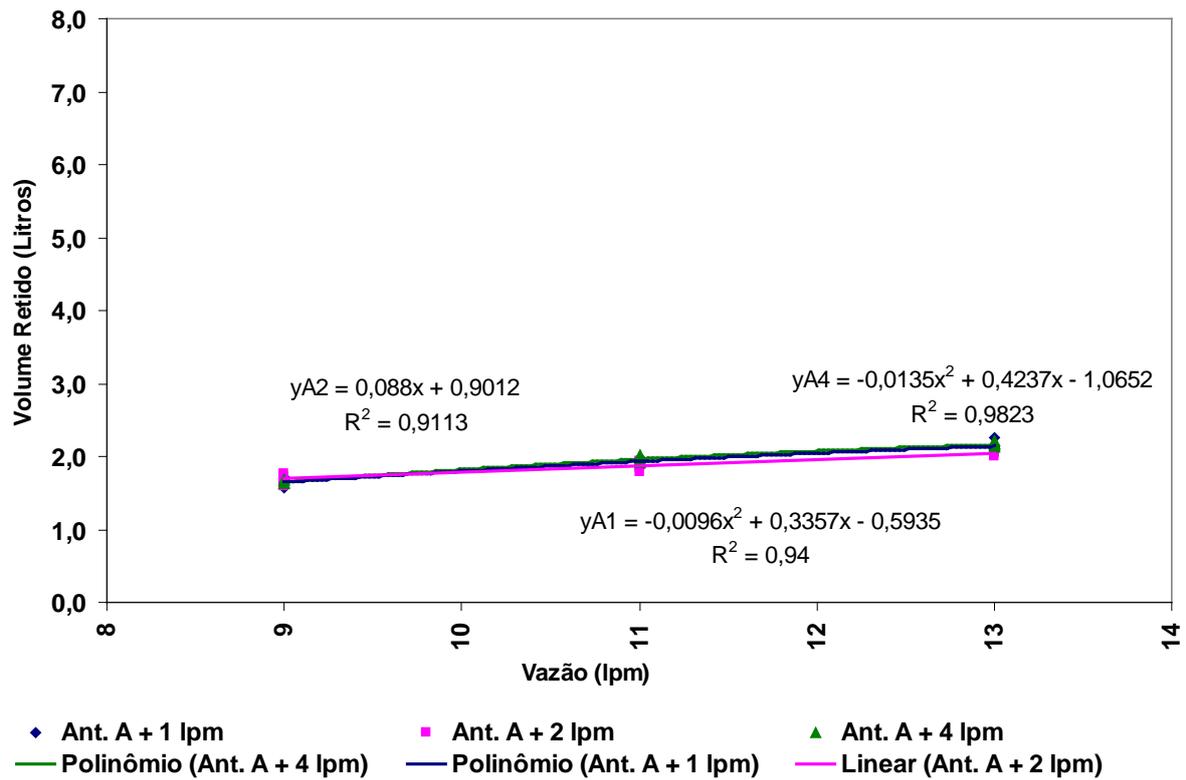


**Figura 5.20** - Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Fundo Falso com Injeção de Ar 2l/min e sem Injeção de Ar.

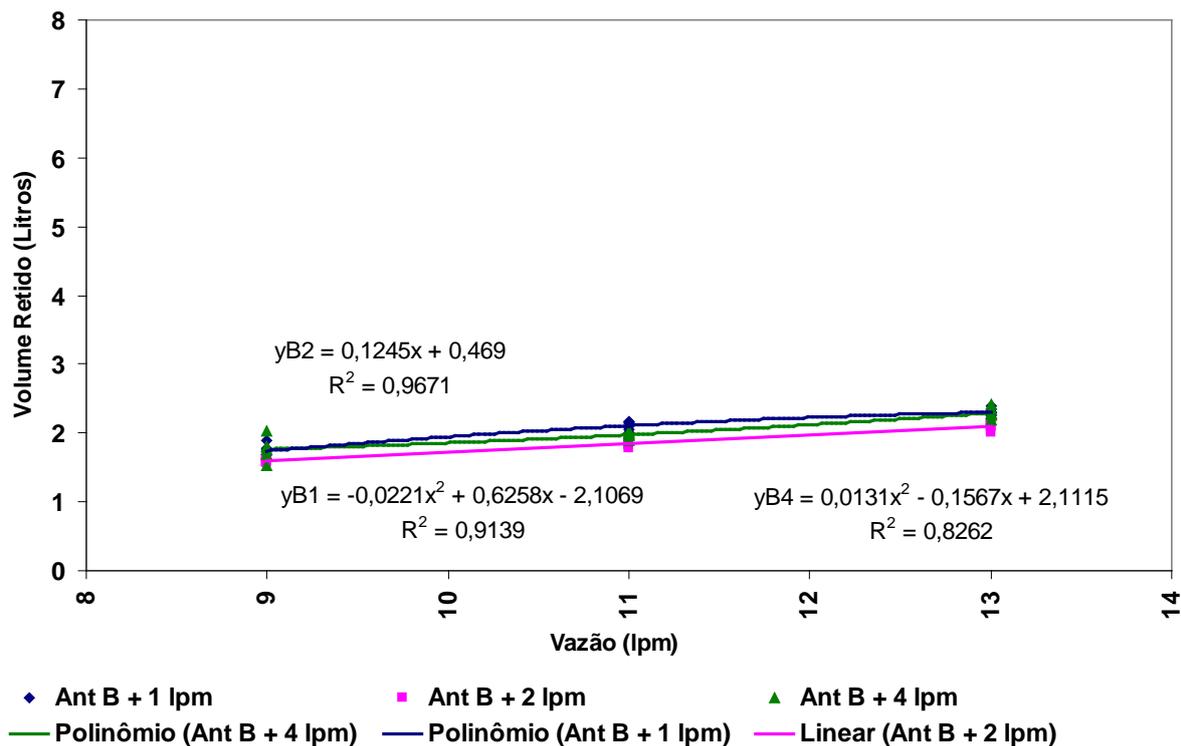
Avaliou-se, também, o efeito da vazão de gás injetada acoplada ou não a anteparos para o fundo normal. Pode-se verificar nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 que a vazão da injeção de ar só foi determinante quando não era conjugada com a utilização de anteparos.



**Figura 5.21** – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial sem Anteparos e com Injeção de Ar a 1, 2 e 4l/min, Fundo Normal.



**Figura 5.22** – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Anteparos Tipo A e Injeção de Ar 1, 2 e 4l/min., Fundo Normal.



**Figura 5.23** – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, Anteparos Tipo B e Injeção de Ar 1, 2 e 4l/min., Fundo Normal.

A injeção de argônio através de bicos injetores situados na sede de válvula forma a base da proposição conhecida por “Clean Steel Block” (CSB), ou bloco para produção de aços limpos. De acordo com os responsáveis a combinação das funções de sede de válvula e bloco de purga leva à supressão sistemática de vórtice e à produção de aço limpo<sup>[18]</sup>. Os resultados relatados neste trabalho indicam que, de fato, este pode ser o caso e que a combinação com barreiras físicas quebra-vórtice pode ser mais efetiva. Ressalta-se, entretanto, que estas tecnologias não se justificam em caso de escoamento radial.

Os valores de vazão de gás a serem eventualmente utilizados podem ser calculados assumindo que os efeitos serão semelhantes se for empregada a mesma Taxa de Dissipação de Energia por Unidade de Massa:

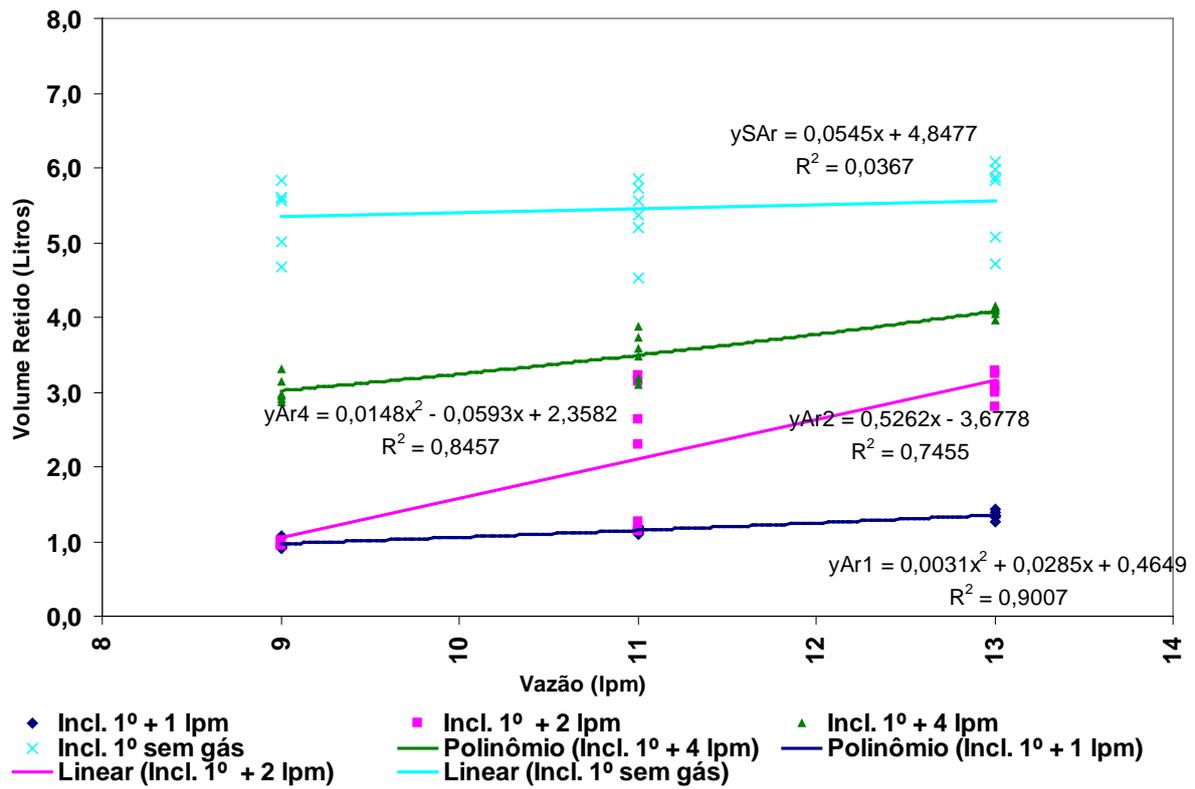
$$\varepsilon = \frac{\dot{n} R T}{M} \ln \left( 1 + \frac{\rho g H}{P_a} \right) \quad (5.4)$$

onde,  $\dot{n}$  representa o fluxo de gás [mol/s],  $R$  a constante dos gases [J/K.mol],  $T$  a temperatura absoluta [K],  $\rho$  a massa específica do líquido [Kg/m<sup>3</sup>];  $g$  a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];  $H$  a profundidade de injeção [m] e  $P_a$  a pressão ambiente [Pa]. Valores típicos de propriedades do aço e água permitem então encontrar a correlação entre vazões volumétricas de gás:

$$Q_{\text{industrial}} = Q_{\text{Modelo}} \frac{1,116}{\lambda^3} \frac{\ln(1 + 0,0968 \lambda H)}{\ln(1 + 0,6778 H)} \quad (5.5)$$

onde,  $H$  representa o nível de aço na panela [m] e  $\lambda$  o fator de escala. Esta fórmula prescreve, para níveis inferiores a 0,5 m de aço, vazões industriais cerca de 8,5 vezes superior à vazão no modelo, o que parece estar de acordo com a proposta do CSB.

Por fim foi avaliada a inclinação do fundo da panela como redutor do volume residual. Por meio de um calço aplicou-se uma inclinação de 1 grau na direção do furo de vazamento. A Figura 5.24 apresenta os resultados, através dos quais se pode verificar a relação entre o volume residual e a injeção ou não de ar pela sede. Os resultados sugerem que a inclinação é mais efetiva quando conjugada à injeção de 1l/min de vazão; este efeito é contrário ao observado com a panela nivelada. Verifica-se ainda que os volumes retidos apresentam tendência ao crescimento quando aumenta a vazão de ar, para os níveis mais altos. A redução na capacidade de esgotamento da panela em função do volume de ar injetado ser capturado pelo fluxo de fluido saindo do modelo explica o fenômeno acima.



**Figura 5.24** – Comportamento do Volume de Líquido Residual para Alimentação Tangencial, com Inclinação da Panela em 1º sem e com Injeção de Ar 1, 2 e 4l/min., Fundo Normal.

## **6. CONCLUSÕES**

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho.

### **6.1. CONDIÇÕES DE PROCESSO NA CST**

A altura inicial de fluido na panela, representado por dois volumes equivalentes de aço na panela (315 e 200t) não são fatores que influenciam no volume residual.

O sentido de circulação do aço no reator RH não é determinante no volume residual, uma vez que o padrão de fluxo é o mesmo.

Os fluxos aplicados ao fluido no interior da panela nas estações de refino secundário IRUT e RH não são fatores que influenciam no volume residual.

Os valores de volume retido que foram obtidos nos experimentos são compatíveis com os valores que podem ser calculados pela teoria (Fórmula de Harleman).

Os dispositivos anti-vórtice tipo A e B não foram eficazes na redução do volume residual, quando empregados sem o concurso de uma técnica adicional tal como a injeção de gás na sede de válvula.

A utilização de um fundo falso mostrou-se eficaz para a redução do volume residual da panela, principalmente quando as vazões de drenagem são maiores.

Todos estes resultados são compatíveis com drenagem de líquido no sentido radial, com abastecimento provindo do fundo da panela. Portanto com a ausência de vórtice.

### **6.2. CAMPO ROTACIONAL FORÇADO**

Pôde-se verificar que quando a panela é alimentada tangencialmente, o que provoca um movimento rotacional, o volume residual da mesma tende a aumentar em cerca de 400%. Sugere-se que este aumento do movimento rotacional aumenta o potencial para o surgimento do vórtice.

O uso dos dispositivos anti-vórtice tipo A e B foram eficazes na redução do volume residual, principalmente em vazões menores, ou seja, os obstáculos conseguem quebrar o fluxo rotacional do fluido no interior da panela.

A utilização de um fundo falso reduziu em cerca de 10% o volume residual, uma vez que para uma mesma altura crítica o volume de fluido na panela é menor.

O uso de borbulhamento de argônio na sede de válvula a uma vazão de 2l/min reduziu em cerca de 40% o volume residual, sugerindo que a cortina de ar formada é capaz de dissipar em parte o movimento rotacional do fluido até os instantes finais de vazamento.

O uso dos dispositivos anti-vórtice tipo A e B em conjunto com o borbulhamento de argônio a uma vazão de 2l/min reduziu em 70% o volume residual, retornando os mesmos a valores compatíveis com os obtidos com o enchimento da panela normal.

A utilização de borbulhamento de argônio em conjunto com o fundo falso reduz em cerca de 80% o volume residual na panela, uma vez que além de reduzir o volume de fluido na mesma altura crítica, a cortina formada pelo borbulhamento de ar foi suficiente para dissipar o movimento rotacional do fluido.

O borbulhamento com vazão de argônio de 4l/min mostrou mais eficiente na redução do volume residual na panela. Coerentemente uma maior vazão de ar proporciona uma cortina mais densa e esta é mais eficiente na redução da movimentação residual do fluido.

A vazão do borbulhamento de argônio não é fator que influencia no volume residual quando são utilizados os dispositivos antivórtice tipo A ou B em conjunto com a mesma.

A inclinação da panela mostrou-se eficiente para redução do volume residual. Quando a mesma é acoplada ao borbulhamento de argônio, o ganho mostra-se mais considerável.

## **7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Realizar simulações avaliando a influência de fluidos na superfície na formação do vórtice;

A avaliação de um fundo de panela otimizado (Fundo falso) na planta industrial.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SUO, J. W. et al., Suppression of the Vortex in Ladle by Static Magnetic Field, ISIJ International, Vol. 41, Nº 7, p. 689-695, 2001.
2. AJMANI, S. K.; CHOUDHARY, S. K., Cold Model study of Vortexing in Ladle and Tundish, TATA Search, p. 103-109, 2002.
3. SILVA, C. M. O. G., Análise do Comportamento Metalúrgico do Reator IR-UT por Meio da Modelagem Física. 2003. 95 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT.
4. HAMMERSCHMID, P. et al., Vortex Formation during Drainage of Metallurgical Vessels, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 11, Nº 6, p. 332-339, 1984.
5. CHIAPPAROLI, W.; SYLVESTRE, S.; MADÍAS, J., First Experiences with a Steel Ladle Water Model, 13<sup>TH</sup> IAS Steelmaking Seminar, p. 689-696, 2001.
6. PIMENTA, H. P.; VALADARES, C. A.; BELLIGOLI, G. C. D., Estudo da Passagem de Escória na Etapa de Vazamento de Aço Panela/Distribuidor, 11<sup>TH</sup> IAS Steelmaking Seminar, p. 199-207, 1997.
7. NAM, S. H.; KWON, O. D.; YANG, D. W.; KIM, M. R.; LEE, H. B.; KIM, J. I.; YOU, B. D., Improvement of Steel Cleanliness in Ladle Exchange Period, Steelmaking Conference Proceedings, p. 551-556, 1995.
8. ZHANG, L.; THOMAS, B. G.; WANG, X.; CAI, K., Evaluation and Control of Steel Cleanliness - Review, Steelmaking Conference Proceedings, p. 431-452, 2002.
9. Nupro Corporation - Metallurgical Process Technology Specialists. Disponível em: [http://www.nuprocorp.com/pdf\\_file/slag\\_trkII.pdf](http://www.nuprocorp.com/pdf_file/slag_trkII.pdf). Acesso em 08/nov/2004.
10. SANKARANARAYANAN, R.; GUTHRIE, R. I. L., Slag Entrainment Through a "Funnel" Vortex During Ladle Teeming Operations, Proceedings of the International Symposium on Developments in Ladle Steelmaking and Continuous Casting, CIM-Met-Soc, p. 66-87, 1990.
11. HEASLIP, L. J.; DORRICOTT, J. D.; RICHAUD, J.; ROGLER, J. P.; ALVES, W. A., Yield Improvement Through Enhanced Ladle Bottom Design (ELBY), XXXVII Seminário de Aciaria – Internacional, p. 515-524, 2006.
12. LIN, H. T., KAO, C. L., LIN, T. C., CHEN, J. H., The Decrease of Vortexing Funnel and Draining Funnel in Tundish During Casting, AISTech Proceedings – Volume II, p. 125-134, 2005.

13. MORALES, R. D., ALONSO, E. T., DEMEDICES, L. G., RAMOS, J. P., Vortex Growth and Vortex Elimination in a Slab Tundish, AISTech Proceedings – Volume II, p. 117-123, 2005.
14. DAVILA, O., FERRO, L., MORALES, R. D., DEMEDICES, G. L., PEREZ, P. R., Physical Model and Mathematical Simulations of Ladle Draining Operations, AISTech Proceedings – Volume I, p. 873-899, 2005.
15. BRAHMA, D., BOOM, R., Fundamentals of Steelmaking Metallurgy, Editora Prentice Hall International, Grã Bretanha, 300 p., 1993.
16. GANDRA, C. A., Modelamento Físico do Fluxo de Aço Líquido no Interior do Distribuidor de Lingotamento Contínuo em Regime Transiente. 2002. 183 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT.
17. COSTA, S. L. S., PIMENTA, H. P., ALMEIDA, C. X., Análise da Passagem de Escória do Convertedor para a Panela durante o vazamento do Aço, 50º Congresso Anual da ABM, p. 287-297.
18. LANGE, M., CLAES, J., JOLY, A., Clean Steel Block – New Developments Towards Clean Steel, Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques, v 100, nº 6, June, p. 577-582e, 2003.
19. SANKARANARAYANAN, R.; GUTHRIE, R. I. L., Slag Entraining Vortexing Funnel Formations During ladle Teeming: Similarity Criteria and Scale-up Relationships, Ironmaking and Steelmaking, v 29, nº 2, p. 147-153, 2002.
20. SZEKELY, JULIAN, THEMELIS, NICKOAS J.. Rate Phenomena in Process Metallurgy., John Wiley & S. Sons, 1971, p. 784.

## 9. ANEXOS

- Nível 315t com 30' de espera

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,615	8,900
9	1,640	9,030
9	1,595	8,930
9	1,632	8,960
9	1,628	8,990
9	1,603	8,990
11	1,855	10,930
11	1,836	11,070
11	1,833	11,080
11	1,836	11,000
11	1,855	11,040
11	1,844	11,060
13	2,122	12,860
13	2,106	12,920
13	2,126	12,980
13	2,134	13,050
13	2,141	12,970
13	2,127	13,000

- Nível 315t com fluxo RH no sentido horário

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,607	9,020
9	1,559	8,970
9	1,569	9,040
9	1,545	9,000
9	1,565	9,060
9	1,571	9,010
11	1,774	10,990
11	1,761	10,960
11	1,785	10,950
11	1,767	11,040
11	1,775	10,970
11	1,780	10,980
13	1,945	13,060
13	1,981	12,950
13	1,944	13,020
13	1,976	13,010
13	1,967	13,020
13	1,962	13,050

- Nível 315t com fluxo IRUT na Vazão 20l/min

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,544	9,050
9	1,554	8,940
9	1,557	8,980
9	1,515	9,010
9	1,525	8,990
9	1,542	9,020
11	1,722	11,150
11	1,705	10,810
11	1,725	10,750
11	1,695	10,830
11	1,745	10,700
11	1,738	10,880
13	1,876	12,850
13	1,861	12,770
13	1,890	12,860
13	1,898	12,960
13	1,884	12,820
13	1,895	12,900

- Nível 315t com fluxo IRUT na Vazão 40l/min

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,440	8,790
9	1,413	9,090
9	1,437	8,780
9	1,447	9,020
9	1,443	8,950
9	1,435	9,090
11	1,644	11,070
11	1,623	11,110
11	1,660	11,030
11	1,639	10,760
11	1,666	11,410
11	1,650	10,920
13	1,813	13,000
13	1,812	13,100
13	1,854	12,990
13	1,817	13,090
13	1,800	12,960
13	1,833	12,950

- Nível 315t com fluxo RH no sentido anti-horário

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,718	9,040
9	1,727	9,040
9	1,676	9,030
9	1,670	9,050
9	1,725	8,990
9	1,672	9,000
11	1,902	11,020
11	1,934	11,020
11	1,900	10,950
11	1,894	10,960
11	1,935	11,000
11	1,898	10,960
13	2,075	13,010
13	2,090	12,950
13	2,073	13,000
13	2,078	12,930
13	2,092	12,990
13	2,105	12,980

- Nível 200t com 30' de espera

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,730	9,030
9	1,718	9,030
9	1,725	9,050
9	1,696	9,020
9	1,700	9,040
9	1,680	9,050
11	1,932	11,010
11	1,924	11,030
11	1,915	11,060
11	1,945	11,020
11	1,900	10,970
11	1,940	11,100
13	2,100	12,980
13	2,108	12,980
13	2,110	12,970
13	2,124	12,990
13	2,108	13,020
13	2,114	12,970

- Nível 200t com fluxo RH no sentido anti-horário

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,686	9,000
9	1,670	9,000
9	1,675	8,970
9	1,678	9,020
9	1,664	9,050
9	1,678	9,060
11	1,898	11,020
11	1,875	11,010
11	1,864	11,010
11	1,860	11,000
11	1,868	10,990
11	1,850	10,970
13	2,032	12,970
13	2,054	12,990
13	2,028	12,950
13	2,050	12,970
13	2,041	13,010
13	2,056	12,960

- Nível 200t com fluxo RH no sentido horário

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,742	9,010
9	1,726	9,060
9	1,700	9,040
9	1,720	9,000
9	1,704	9,030
9	1,725	9,030
11	1,922	10,950
11	1,902	10,930
11	1,904	10,980
11	1,940	11,020
11	1,930	10,960
11	1,942	10,990
13	2,112	12,970
13	2,130	12,950
13	2,105	12,970
13	2,093	12,960
13	2,098	13,030
13	2,080	12,970

- Nível 315t com fluxo RH no sentido horário e anteparos tipo A

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,870	9,020
9	1,925	9,050
9	1,860	9,070
9	1,865	9,010
9	1,906	9,040
9	1,885	9,030
11	2,100	11,040
11	2,150	11,050
11	2,096	11,010
11	2,095	10,970
11	2,130	11,050
11	2,110	10,950
13	2,240	12,960
13	2,310	13,030
13	2,300	12,970
13	2,305	13,060
13	2,302	13,050
13	2,350	13,010

- Nível 315t com fluxo RH no sentido horário e anteparos tipo B

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	3,310	8,970
9	3,250	8,990
9	3,312	9,010
9	3,288	9,040
9	3,315	8,980
9	3,295	9,000
11	3,362	10,980
11	3,347	10,950
11	3,371	11,020
11	3,340	11,010
11	3,338	10,950
11	3,350	10,970
13	3,640	12,900
13	3,580	12,970
13	3,360	12,930
13	3,535	12,950
13	3,540	12,980
13	3,465	13,020

- Nível 315t com fluxo RH no sentido anti-horário e anteparos tipo B

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	3,400	9,010
9	3,480	8,990
9	3,495	9,000
9	3,440	9,080
9	3,425	8,970
9	3,225	9,060
11	3,350	10,950
11	3,250	11,000
11	3,370	10,980
11	3,305	10,940
11	3,224	10,950
11	3,430	10,970
13	3,398	13,010
13	3,420	12,920
13	3,460	12,960
13	3,335	13,010
13	3,478	13,000
13	3,420	12,930

- Nível 315t com fluxo IRUT na Vazão 40l/min e fundo falso

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,279	9,070
9	1,201	9,080
9	1,322	8,940
9	1,245	9,110
9	1,297	9,060
9	1,306	9,120
11	1,556	11,000
11	1,490	11,110
11	1,543	10,990
11	1,507	11,090
11	1,390	10,970
11	1,405	11,310
13	1,367	12,960
13	1,700	12,970
13	2,537	12,950
13	1,289	12,950
13	1,753	12,960
13	1,555	12,880

- Nível 200t com fluxo IRUT na Vazão 40l/min e fundo falso

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,039	8,970
9	1,123	9,130
9	1,044	9,100
9	1,144	9,110
9	1,168	9,080
9	1,162	9,010
11	1,251	11,240
11	0,884	11,190
11	0,930	10,970
11	0,900	11,220
11	1,188	11,180
11	1,062	11,190
13	1,025	13,030
13	1,040	12,740
13	0,937	12,850
13	0,952	13,030
13	1,121	12,950
13	0,965	13,150

Nível 200t com fluxo IRUT na Vazão 40l/min, fundo falso e injeção 2l/min pelo fundo

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
13	0,771	12,780
13	1,121	12,790
13	1,090	12,800
13	0,984	12,920
13	1,065	12,730
13	1,077	12,810
13	0,716	12,900
13	1,027	12,910
15	0,975	14,760
15	1,013	15,040
15	1,103	14,810
15	1,016	15,020
15	1,044	14,920
15	0,937	14,860

- Alimentação Tangencial

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	6,948	9,01
9	7,121	9,01
9	6,556	9,03
9	7,090	9,08
9	6,571	9,00
9	6,657	9,00
11	6,769	11,14
11	6,850	11,19
11	6,777	11,20
11	6,862	11,02
11	6,580	11,17
11	7,035	11,15
13	7,336	12,87
13	6,520	12,82
13	7,186	12,92
13	6,576	12,90
13	7,251	12,92
13	6,447	12,93
15	6,555	14,95
15	7,032	14,70
15	7,390	14,74
15	6,232	15,10
15	7,161	14,88
15	6,573	14,94

- Alimentação Tangencial com anteparos tipo A

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	5,874	8,960
9	5,561	9,070
9	4,909	9,080
9	5,401	9,010
9	5,314	8,910
9	5,145	8,990
11	5,805	11,200
11	6,801	11,160
11	6,734	11,190
11	6,433	11,040
11	6,286	11,220
11	6,915	11,030
13	6,652	12,970
13	6,831	13,040
13	6,845	12,770
13	7,236	12,530
13	6,871	12,920
13	7,140	12,870
15	7,248	14,900
15	7,016	14,980
15	6,988	15,070
15	6,815	14,950
15	6,697	15,150
15	7,075	15,000

- Alimentação Tangencial com anteparos tipo B

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	5,075	9,220
9	5,155	9,130
9	4,528	9,050
9	5,015	8,880
9	5,133	9,220
9	4,902	9,010
11	7,046	11,330
11	7,896	11,220
11	6,932	11,210
11	7,290	10,930
11	6,807	11,160
11	6,651	11,290
13	7,256	12,790
13	7,039	13,140
13	6,707	12,870
13	7,183	13,070
13	7,222	13,060
13	7,180	13,010
15	6,856	14,950
15	7,754	15,040
15	6,965	14,980
15	6,922	15,010
15	7,622	15,080
15	6,819	15,160

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 1l/min

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	3,048	8,97
9	3,274	9,05
9	3,014	9,09
9	2,862	9,02
9	2,888	9,02
9	3,489	9,09
11	3,502	11,07
11	3,184	11,14
11	3,995	11,13
11	3,235	10,92
11	3,665	11,09
11	3,674	11,16
13	4,006	13,08
13	4,003	12,97
13	4,534	12,82
13	4,587	12,88
13	4,465	12,81
13	4,631	12,89

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 2l/min

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	3,810	8,92
9	3,726	9,01
9	3,737	9,13
9	4,050	9,15
9	4,100	9,02
9	3,650	9,05
11	3,940	11,02
11	4,050	11,03
11	4,126	11,02
11	4,070	11,15
11	4,040	10,91
11	4,111	11,00
13	4,385	12,89
13	4,654	13,00
13	4,605	12,89
13	4,706	12,99
13	4,236	12,91
13	4,608	12,80
15	5,096	14,76
15	4,770	14,88
15	4,608	14,80
15	4,321	15,07
15	4,865	14,76
15	4,708	14,70

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 4l/min

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,645	9,07
9	1,649	9,02
9	1,684	8,99
9	1,674	9,04
9	1,710	9,02
9	1,698	9,05
11	1,958	10,89
11	1,915	10,93
11	1,935	11,05
11	2,001	11,08
11	1,957	11,05
11	1,858	11,09
13	3,425	13,00
13	3,717	12,95
13	3,613	12,86
13	3,371	12,87
13	4,007	12,82
13	3,518	12,92

- Alimentação Tangencial com inclinação de 1° na panela

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	5,564	8,99
9	5,836	9,02
9	5,010	8,99
9	5,590	9,03
9	4,666	9,00
9	5,592	8,98
11	5,861	10,95
11	5,365	10,90
11	4,525	11,02
11	5,554	11,03
11	5,724	11,01
11	5,204	10,95
13	4,707	13,01
13	5,972	12,83
13	5,884	12,84
13	6,086	12,92
13	5,837	13,05
13	5,081	12,91

- Alimentação Tangencial com inclinação de 1° na panela e injeção de 1l/min de ar pelo fundo

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,064	9,02
9	0,950	9,00
9	1,051	8,97
9	0,921	9,04
9	0,930	8,96
9	0,901	9,00
11	1,114	11,05
11	1,135	10,93
11	1,175	11,04
11	1,199	10,99
11	1,086	10,96
11	1,185	11,03
13	1,425	12,93
13	1,331	12,97
13	1,351	12,89
13	1,394	12,90
13	1,270	12,87
13	1,347	12,95

- Alimentação Tangencial com inclinação de 1° na panela e injeção de 2l/min de ar pelo fundo

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	0,967	9,04
9	0,964	9,01
9	1,021	9,14
9	0,987	9,03
9	0,941	9,08
9	0,953	9,01
11	2,304	11,12
11	1,260	10,90
11	2,635	10,99
11	3,220	11,08
11	1,131	11,10
11	3,144	11,08
13	2,800	12,92
13	3,281	12,97
13	3,232	12,92
13	3,066	12,93
13	2,987	12,86
13	3,096	13,04

- Alimentação Tangencial com inclinação de 1° na panela e injeção de 4l/min de ar pelo fundo

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	3,140	9,00
9	2,938	9,05
9	2,975	8,96
9	3,300	9,01
9	2,895	9,03
9	2,870	8,98
11	3,098	10,92
11	3,480	11,20
11	3,189	11,03
11	3,874	11,01
11	3,577	11,07
11	3,729	11,02
13	4,091	12,99
13	4,100	12,77
13	3,963	12,97
13	4,152	13,08
13	4,128	12,75
13	4,050	12,86

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 11/min e anteparo tipo A

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,636	9,06
9	1,669	9,05
9	1,728	9,11
9	1,629	9,09
9	1,562	9,03
9	1,653	9,04
11	1,918	11,07
11	1,972	11,05
11	1,969	11,02
11	1,933	11,21
11	1,848	11,05
11	1,950	10,92
13	2,265	13,01
13	2,154	13,05
13	2,126	12,87
13	2,107	12,96
13	2,109	12,83
13	2,079	12,90

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 2l/min e anteparo tipo A

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,589	9,11
9	1,756	9,02
9	1,683	8,99
9	1,726	9,07
9	1,731	9,05
9	1,678	9,06
11	1,886	10,97
11	1,896	11,13
11	1,850	10,94
11	1,942	10,82
11	1,775	10,98
11	1,866	10,94
13	2,070	12,80
13	2,041	12,90
13	2,050	12,83
13	2,000	12,98
13	2,059	12,93
13	2,056	12,94
15	2,231	14,91
15	2,168	14,82
15	2,240	14,90
15	2,204	14,97
15	2,232	14,87
15	2,217	14,92

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 4l/min e anteparo tipo A

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,685	8,94
9	1,673	9,15
9	1,624	8,95
9	1,641	8,96
9	1,668	8,94
9	1,635	8,94
11	2,023	11,16
11	1,919	10,80
11	1,940	11,18
11	1,957	11,27
11	1,960	11,26
11	1,971	11,16
13	2,178	13,00
13	2,205	13,09
13	2,132	12,97
13	2,121	12,68
13	2,176	12,73
13	2,154	12,96

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 1l/min e anteparo tipo B

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,623	9,03
9	1,696	9,04
9	1,885	9,00
9	1,683	9,05
9	1,762	9,03
9	1,782	9,02
11	2,170	11,05
11	2,176	11,17
11	2,046	11,08
11	2,001	10,92
11	2,146	11,07
11	2,107	11,09
13	2,200	12,90
13	2,398	12,85
13	2,351	12,80
13	2,250	13,12
13	2,309	12,91
13	2,294	13,19

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 2l/min e anteparo tipo B

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,638	8,99
9	1,576	9,01
9	1,571	9,07
9	1,581	9,06
9	1,568	9,08
9	1,589	9,05
11	1,911	11,08
11	1,846	11,12
11	1,831	11,15
11	1,863	10,95
11	1,788	10,93
11	1,812	11,08
13	2,088	12,93
13	2,075	13,03
13	2,086	12,99
13	2,098	13,05
13	2,003	13,15
13	2,160	13,00
15	2,274	14,81
15	2,205	15,03
15	2,232	15,18
15	2,115	14,92
15	2,135	14,98
15	2,187	15,10

- Alimentação Tangencial com injeção de ar pelo fundo a 4l/min e anteparo tipo B

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	1,520	9,03
9	1,688	9,03
9	1,797	9,06
9	1,798	9,05
9	1,757	9,08
9	2,023	9,00
11	1,951	11,09
11	1,898	10,98
11	2,034	11,08
11	1,972	11,07
11	2,013	11,12
11	1,984	11,15
13	2,284	12,90
13	2,280	13,00
13	2,350	12,93
13	2,410	13,19
13	2,180	12,95
13	2,247	13,01

- Alimentação Tangencial com fundo falso

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	5,463	8,930
9	5,722	8,990
9	5,627	9,000
9	5,966	8,970
9	5,738	8,910
9	6,121	8,920
11	5,307	11,280
11	5,655	11,230
11	5,228	11,110
11	5,584	11,140
11	5,401	11,270
11	5,634	11,150
13	5,530	12,960
13	5,700	12,980
13	5,675	13,050
13	5,551	12,970
13	5,540	13,380
13	6,200	13,010
15	5,373	14,730
15	5,445	14,970
15	5,461	15,010
15	5,406	14,950
15	5,473	15,020
15	5,602	15,080

- Alimentação Tangencial com fundo falso e injeção de ar a 2 l/min pelo fundo

<b>Vazão Visada Drenagem (l/min)</b>	<b>Volume Residual (l)</b>	<b>Vazão Média Drenagem (l/min)</b>
9	0,598	8,98
9	0,746	8,97
9	0,558	9,00
9	0,722	9,02
9	0,688	8,96
9	0,800	9,07
11	0,978	11,23
11	0,972	10,87
11	0,900	10,92
11	0,925	11,10
11	1,050	11,06
11	0,926	11,06
13	1,284	12,78
13	1,030	12,65
13	0,959	12,90
13	1,120	12,80
13	1,040	13,06
13	0,887	12,87
15	1,857	15,39
15	2,649	14,85
15	1,383	14,88
15	2,799	15,00
15	1,949	15,08
15	1,616	14,97