

André Luís Souza

**Adaptação da válvula superior da
panela de aço para minimização de
vórtices**

São Paulo

2017

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

André Luís Souza

Adaptação da válvula superior da panela de aço para minimização de vórtices

Trabalho de Formatura
apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Guilherme F.
B. Lenz e Silva.

São Paulo

2017

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pelas oportunidades que me deu em toda minha vida, que me fizeram ser o homem que sou hoje.

Agradeço aos meus pais, que me deram base, valores e instruções para que eu percorresse meus próprios caminhos na direção certa.

Agradeço à minha irmã, por ser uma referência, profissional e pessoalmente, e por sempre acreditar nas minhas capacidades.

Agradeço aos meus avós, que estão sempre presentes, nos momentos bons e ruins, e que me guiam até hoje.

Agradeço aos colegas da Universidade de São Paulo, que deixaram em mim novas ideias.

Agradeço aos funcionários da Usiminas, que me passaram imenso conhecimento em pouquíssimo tempo, em especial aos “padrinhos” Ronaldo Adriano Alvarenga Borges, Geraldo Soares de Faria e Haysler Apolinário Amoroso Lima, e ao gerente Ricardo César Rodrigues Alves.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, pela construção acadêmica que realizaram em mim, em especial aos professores Dr. Marcelo Breda Mourão, Dra. Neusa Alonso-Falleiros e Dr. Cyro Takano, por me incentivarem e me conduzirem à siderurgia.

Agradeço a aluna Paloma Rodrigues Rocha, pelo auxílio com o projeto e impressão 3D das peças empregadas na simulação.

Por último, agradeço ao professor Dr. Guilherme Frederico Bernardo Lenz e Silva pela orientação neste trabalho, por ter me apresentado à Aciaria e pelas lições sobre a verdadeira essência de um engenheiro metalurgista.

Resumo

A siderurgia enfrenta hoje um cenário nada agradável economicamente, e toda e qualquer medida a fim de diminuir custos, aumentar rendimento ou elevar valor agregado são primordiais para a sustentação das grandes empresas deste setor, que é a base para as principais manufaturas humanas.

Este trabalho visa justamente reduzir o desperdício de aço que ocorre em uma das etapas que mais contribui para a queda de rendimento do aço líquido vazado pelos conversores e refinado na metalurgia secundária, o vazamento da panela para o distribuidor.

Em um modelo a base de água, foram comparadas quatro geometrias para o furo da válvula superior, furo único (padrão atual), elíptico, três furos próximos e três furos afastados. Os resultados de vazão e formação de vórtice demonstram superioridade da última, e indicam que a alteração pode trazer benefícios. No entanto, na prática industrial, outros fatores influenciam a passagem de escória, responsável pelo corte do vazamento.

Palavras chave: siderurgia, refratário, aciaria, panela, vazamento, distribuidor, vórtice.

Abstract

Nowadays, the steelmaking industry faces an economically unpleasant scenario, and any plot aiming reducing costs, increasing efficiency or raising aggregated value are essentials for the sustaining of the companies in this sector, which is basis for the main humans manufactures.

This study aims to reduce the steel wasting that occurs in one of the phases that mostly contributes to the efficiency loss of converter's teemed liquid steel and refined by secondary steelmaking, the ladle's teeming to the tundish.

Using water-based model, four upper valve geometries had been compared, single hole (usual pattern), elliptical, three holes close together and three holes spaces. The last one showed better results in flow rate and vortex formation, which indicates the modification could gather benefits. Although, in industrial practices, other factors induce the slag carry over, responsible for the end of teeming.

Key words: steelmaking, refractory, steel plant, ladle, teeming, tundish, vortex.

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Objetivos.....	4
3	Revisão Bibliográfica	5
3.1	Vórtice	5
3.2	Dispositivos e medidas para minimização de vórtice	6
4	Materiais e Métodos.....	15
4.1	Quantificação da vazão média.....	18
4.2	Estimativa da altura crítica de desenvolvimento completo de vórtice	18
5	Resultados e Discussões.....	19
6	Conclusões	23
7	Referências.....	24

Índice de Figuras

Figura 1 - Ilustração de (a) vórtice e (b) efeito dreno, em vista de topo ao furo de vazamento (MAZZAFERRO et al., 2004).	2
Figura 2 – Esboço da vista de topo da válvula superior, destacando o, chamado neste trabalho, furo de transmissão ((a) representa o formato atual, e (b) a alteração proposta).	3
Figura 3 - Classificação dos vórtices (PADMANABHAN; HECKER, 1984)	5
Figura 4 - Dispositivo antivórtice (TAVARES; SATO; RAMIRES, 2009).	8
Figura 5 - Configurações de anteparos: A - 1 radial e 2 tangenciais; e B - todos tangenciais. Ambos contando com um bloco vertical junto à parede (SANTOS et al., 2008)	8
Figura 6 - Fundo falso para reduzir volume residual (SANTOS et al., 2008).	9
Figura 7 - Resultados dos experimentos com e sem anteparos (SANTOS et al., 2008).	10
Figura 8 - Geometrias estudadas: a) furo circular comum; b) dois furos circulares; c) furo elíptico; d) furo quadrado; e) múltiplos furos; f) três furos (LIMA, 2013).	11
Figura 9 - Vazão média de cada válvula, em litros por minuto (LIMA, 2013).	12
Figura 10 - Altura crítica de formação de vórtice para cada válvula, em centímetros (LIMA, 2013).....	13
Figura 11 - Medida do percentual de água passante regularmente pelo furo da válvula (LIMA, 2013).	14
Figura 12 - Vista lateral do modelo utilizado.....	15
Figura 13 - Vista superior do recipiente, com destaque para o posicionamento da válvula no centro.	17

Figura 14 - Vista superior do recipiente, com destaque para o posicionamento da válvula excêntrico	17
Figura 15 - Vazão volumétrica para cada válvula testada na posição centralizada, em l/min	19
Figura 16 - Vazão volumétrica para cada válvula testada na posição excêntrica, em l/min	21

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Dimensões e propriedades adotadas.....	16
Tabela 2 – Valores encontrados para altura crítica de desenvolvimento completo do vórtice na condição de posicionamento centralizado, em cm.....	20
Tabela 3 - Valores encontrados para altura crítica de desenvolvimento completo do vórtice na condição de posicionamento excêntrico, em cm.....	22

1 Introdução

Com a crescente competitividade no mercado mundial de aço, a engenharia se faz cada vez mais necessária para a manutenção da atividade siderúrgica. Em meio a isso, a pesquisa tecnológica tem função fundamental, encaminhando possíveis soluções para problemas vividos na realidade industrial.

A siderurgia engloba processos complexos, rodeados por inúmeras variáveis. Dentre os processos, encontramos na aciaria uma grande gama de desafios, como é o caso do objeto deste estudo, os materiais refratários. A demanda por materiais mais resistentes e de menor custo não deve interferir no bom andamento do processo e manutenção dos equipamentos. Neste estudo, a panela de aço, meio de transporte e local onde diversas reações ocorrem para a produção de aço, é o grande foco. A usina reporta que na operação de vazamento do metal líquido para o distribuidor há a necessidade de evitar passagem de escória, e por conta disso há perda de rendimento devido à grande quantidade de aço retida na panela. Formulou-se então a hipótese (MAZZAFERRO et al., 2004) que, por questões fluidodinâmicas, há escoamento turbulento com formação de vórtices e dreno. O vórtice é formado devido à grande velocidade tangencial nas regiões próximas ao furo de vazamento (Figura 1a), e pode ser atenuado com diminuição da velocidade tangencial inicial do fluido ou com excentricidade do furo. Dreno é um evento independente do vórtice, acontecendo sempre quando o nível de fluido se aproxima de zero; é caracterizado por velocidade radial (Figura 1b) e costuma acontecer para um nível de fluido com valor semelhante ao diâmetro do furo.

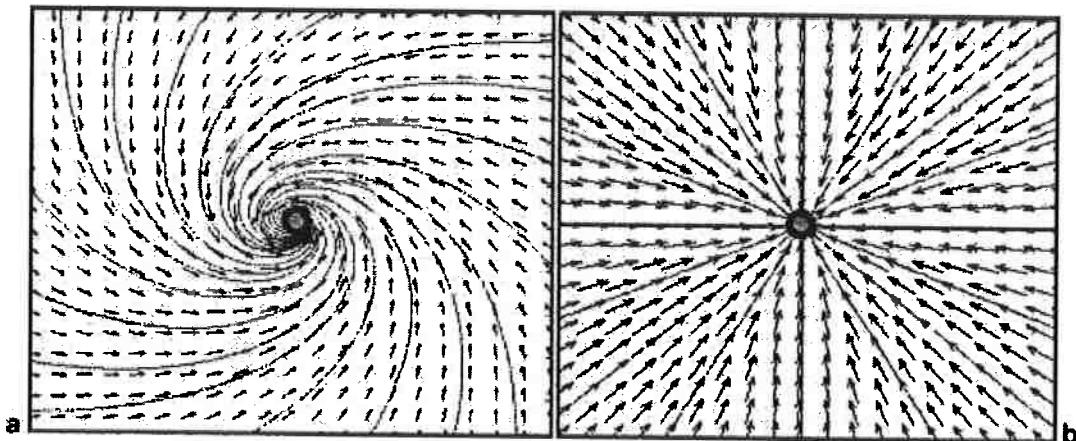


Figura 1 - Ilustração de (a) vórtice e (b) efeito dreno, em vista de topo ao furo de vazamento (MAZZAFERRO et al., 2004).

A combinação destes efeitos durante o vazamento de aço pelo fundo da panela é tida, conforme a literatura (MAZZAFERRO et al., 2004; SANKARANARAYANAN; GUTHRIE, 2002), como a principal causa da antecipação do fechamento do fluxo. Acredita-se que a escória, inicialmente sobrenadante ao aço, seja succionada para as regiões mais próximas da saída do banho, quando o nível de aço da panela atinge valores críticos. Desta forma, o operador ao visualizar grande quantidade de escória misturada ao fluxo de aço tem a indicação de ser o momento de fechamento da válvula gaveta que controla a passagem para o distribuidor.

O presente estudo aponta que o consagrado furo único de transmissão (Figura 2a) do banho metálico para o sistema refratário de controle de fluxo pode ser modificado, de forma que a formação de vórtices aconteça para um nível de aço bem abaixo do atual. A Figura 2b mostra o formato proposto neste trabalho para a geometria do topo da válvula superior, inspirado em trabalhos anteriores, voltados para hidrelétricas (LIMA, 2013).

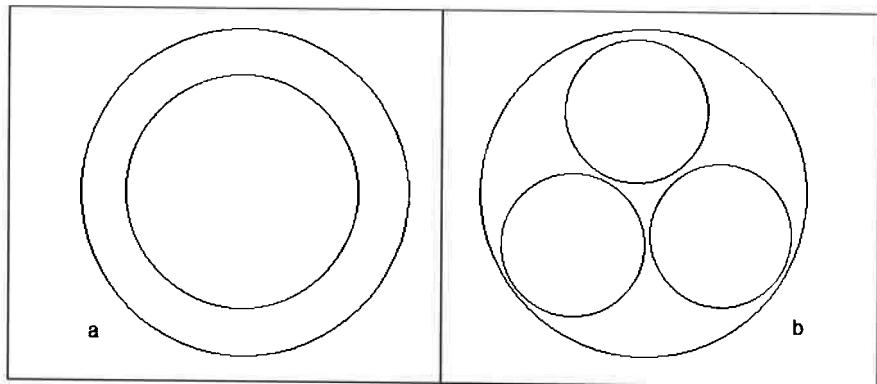


Figura 2 – Esboço da vista de topo da válvula superior, destacando o, chamado neste trabalho, furo de transmissão ((a) representa o formato atual, e (b) a alteração proposta).

Se atingido o objetivo – minimizar efeito do escoamento turbulento – esta modificação também trará melhorias para a vida útil da peça, visto que diminuirá a erosão causada pelo fluxo rotacional (velocidade tangencial) do metal líquido.

2 Objetivos

Este trabalho objetiva clarificar a existência de benefícios na alteração geométrica da válvula superior da panela de aço, para aplicações metalúrgicas.

Estudos comparativos entre a condição inicial e a proposta foram conduzidos para demonstrar se houve melhora de desempenho e eventuais efeitos colaterais.

As comparações serão feitas com base na vazão média de escoamento e nível de fluido para o qual aparece o vórtice. Os ensaios serão detalhados em seções a seguir.

Ao final dos experimentos, a alteração deve ser caracterizada como relevante, pouca melhoria ou piora dos parâmetros ensaiados e, portanto, possível ou não de ser estendida para a siderurgia.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Vórtice

É necessário, inicialmente, definir o que é o vórtice. O vórtice é denotado pelo aparecimento ou aumento do movimento circular de um fluido em trajetórias concêntricas, e tem como base para o fenômeno a conservação do momento angular em um conduto (FERREIRA; BORIN; GENOVEZ, 2000)

Além disso, convencionou-se uma classificação em seis níveis para o vórtice, de acordo com seu estágio, intensidade e efeito no fluido (PADMANABHAN; HECKER, 1984). A classificação é representada na Figura 3.

Tipo de Vórtice	Descrição
1	Rotação superficial sem depressão
2	Depressão Superficial
3	Núcleo sem presença de ar
4	Sucção de partículas flutuantes, mas não ar
5	Bolhas de ar engolidas pela tomada
6	Núcleo de ar completamente desenvolvido até a tomada

Figura 3 - Classificação dos vórtices (PADMANABHAN; HECKER, 1984)

Para o critério de desenvolvimento completo de vórtice, o autor estabeleceu o tipo 6 como referência, por ser o mais distinto dos demais.

É importante identificar relações fluidodinâmicas que influenciam a formação de vórtice. É o caso do número de Froude, uma relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais (SANTOS, 2006). O número de Froude objetiva qualificar o escoamento com relação a interações das superfícies livres. No caso deste trabalho, foi utilizado como critério de similaridade, visto que o vórtice completamente desenvolvido.

Da literatura, temos:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times L_{ref}}} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo: v = velocidade do fluido; g = aceleração da gravidade; L_{ref} = comprimento de referência. No caso da panela e de seu modelo físico, o comprimento de referência é o diâmetro do furo de vazamento.

Para a previsão de velocidade do fluido, a equação de Bernoulli, simplificada abaixo, foi utilizada (LIMA, 2013):

$$v = Cd \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo: Cd = coeficiente de descarga; h = nível de fluido.

Para definir o valor do coeficiente de descarga, multiplicou-se de ambos os lados pela área do orifício (A_o), tendo à esquerda a vazão volumétrica, variável mensurável. Enfim, teremos:

$$Q = Cd \times A_o \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad (\text{Equação 3})$$

3.2 Dispositivos e medidas para minimização de vórtice

Observa-se na literatura um reduzido número de artigos relacionados ao tema deste trabalho, no entanto, com notória participação de pesquisadores em comunhão ou até mesmo filiados a indústrias. Observa-se grande interesse dos

aciaristas do Brasil e Argentina em desenvolver melhorias para a operação de vazamento da panela de aço para o distribuidor.

Podem-se destacar alguns artigos que realizaram ambas as abordagens de pesquisa, como é o caso de (MAZZAFERRO et al., 2004). Sua pesquisa buscou minimizar o montante residual de líquido. Pela sua solução numérica, a geometria do furo de transmissão, entre formato quadrado e circular, não influencia na minimização dos efeitos de vórtice e dreno, porém, em concordância com sua simulação física, uma pequena inclinação do fundo da panela poderia diminuir o efeito dreno (recomendou-se 5° de inclinação). Outras indicações são feitas, em relação à utilização de furo excêntrico à panela, de forma a reduzir os efeitos supracitados; vale lembrar que o experimento que sustentou este argumento foi realizado em um modelo físico com água. Em sua parte numérica, o autor destaca que se costuma assumir que a passagem de escória durante o vazamento é devido ao efeito dreno, pois as condições não são propícias para formação do efeito vórtice.

Há destaque também para medidas mais bem conhecidas e simples (TAVARES; SATO; RAMIRES, 2009). Com o auxílio de tecnologia de um emissor/receptor de raio laser, que funcionou como um identificador de vórtice, os autores buscaram relacionar cinco parâmetros:

- Vazão de saída da água da panela (19 l/min ou 28 l/min);
- Tempo de espera (1 minuto ou 30 minutos);
- Rinsagem no modelo (sem ou com presença de borbulhamento de ar);
- Dispositivos antivórtice (sem ou com presença do dispositivo antivórtice); e
- Fluido sobrenadante (sem ou com presença de óleo de silicone de 50 cSt).

O fluido sobrenadante simulava a escória presente na panela de aço, para simular uma condição mais próxima da real.

A figura 4 mostra o formato do dispositivo antivórtice, que é um simples disco com dimensões $d = 230$ mm e $h = 40$ mm, de material não especificado (na prática industrial necessitaria ser de material refratário).

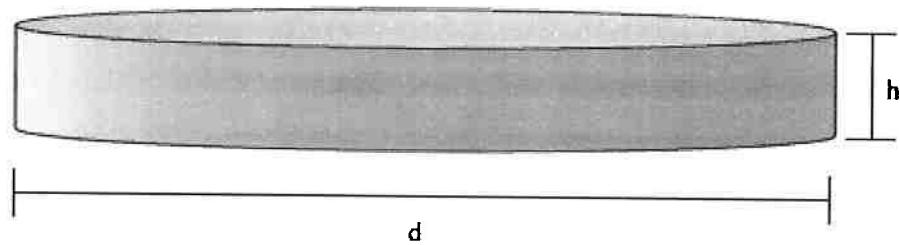


Figura 4 - Dispositivo antivórtice (TAVARES; SATO; RAMIRES, 2009).

Os resultados que receberam maior enfoque foram os com presença de fluido simulando escória, pois se assemelhavam mais às condições encontradas na indústria. Nestes, a vazão de 28 l/min obteve uma altura crítica de formação de vórtice 50% maior que a altura crítica da vazão de 19 l/min. Algo muito parecido foi alcançado com a utilização do dispositivo antivórtice, sendo a redução de quase 30%.

Outros trabalhos relataram a eficiência de dispositivos antivórtice (SANTOS et al., 2008). Foram testadas configurações de anteparos que serviriam para bloquear o movimento rotacional do fluxo de metal líquido na panela. A figura 5 mostra estas configurações:

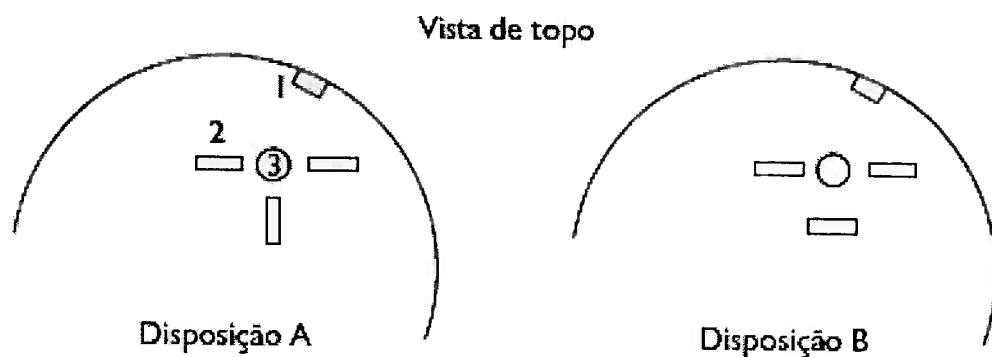


Figura 5 - Configurações de anteparos: A - 1 radial e 2 tangenciais; e B - todos tangenciais. Ambos contando com um bloco vertical junto à parede (SANTOS et al., 2008).

Outra medida analisada foi a utilização de um fundo falso, ou seja, um degrau próximo ao furo de vazamento do modelo em acrílico, que adotou a relação 1:7; o resultado esperado é a diminuição do volume retido de líquido. A figura 6 representa este fundo falso.

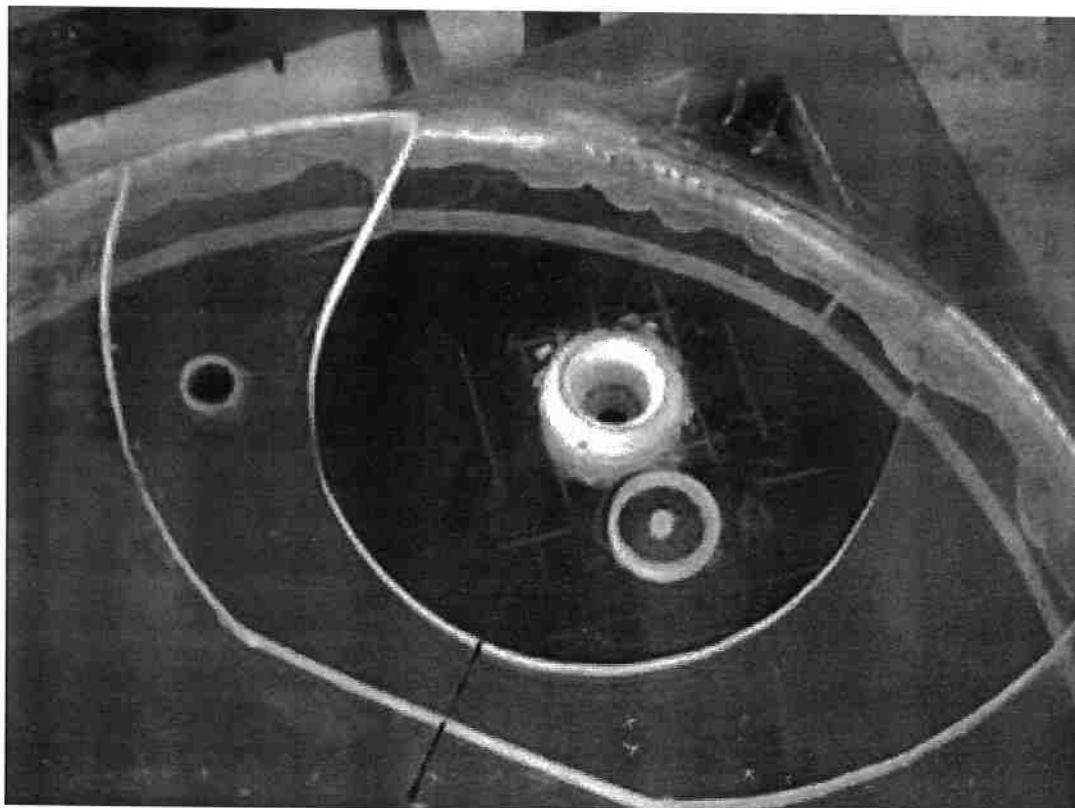


Figura 6 - Fundo falso para reduzir volume residual (SANTOS et al., 2008).

O método de identificação do vórtice foi o uso de um sensor fotoelétrico, tido como mais preciso que o método visual. O funcionamento se dá por um feixe de luz que atravessa o fluxo de água, sendo recebido do outro lado pelo sensor; em caso de presença de ar, a tensão medida passa a um valor levemente superior, o que caracteriza o início da formação de vórtice.

O autor destaca que as relações de vazão foram tomadas em conformidade com o critério de similaridade de Froude.

Os resultados gráficos mostraram que os anteparos tiveram efeito deletério em relação à minimização do volume retido após vazamento do modelo, como mostra a figura 7.

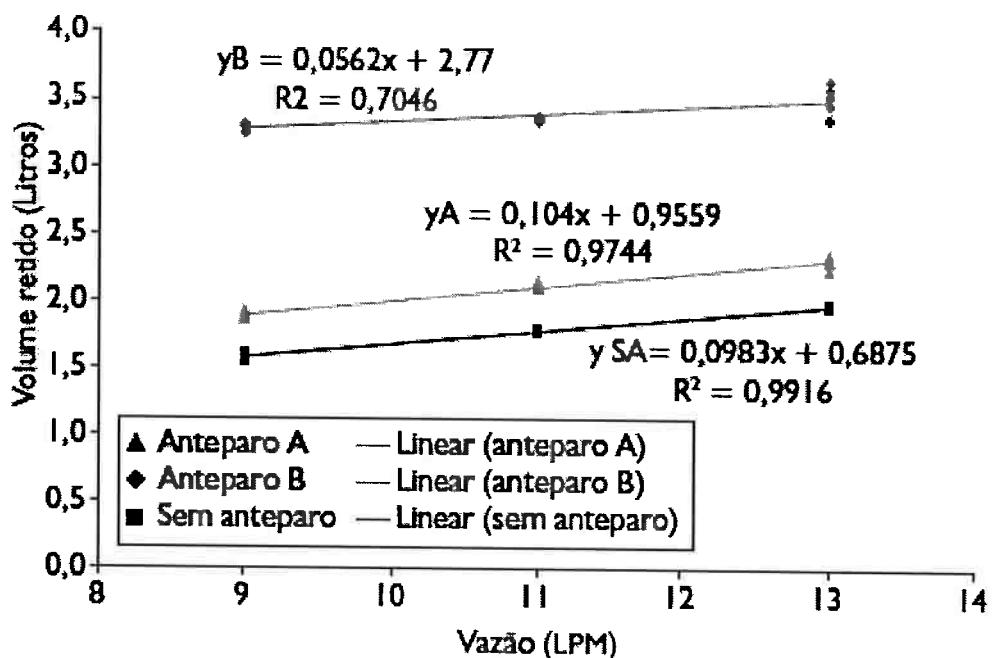


Figura 7 - Resultados dos experimentos com e sem anteparos (SANTOS et al., 2008).

Entretanto, a utilização do fundo falso se mostrou favorável à eliminação de volume retido, e, apesar de o autor lembrar que sua implantação acarretaria uma redução no volume útil da panela, aconselha-se sua utilização. Ainda houve um experimento em que se simulou a alimentação tangencial (fluxo a 30° com a horizontal), condição evitada na indústria, e registrou-se aumento de mais de 4 vezes o volume retido da condição normal, ambos sem anteparos.

Encontram-se, ainda na literatura, estudos que examinaram as consequências nas práticas da acaria do efeito vórtice durante o vazamento de aço pela panela para o distribuidor (CHIAPPAROLI; SYLVESTRE, 2003).

Há a indicação de que as melhores dimensões para a panela são as que obedecem a uma relação de $d/h = 1$ (d = diâmetro médio da panela e h = altura útil da panela), e que a altura crítica para formação de vórtice, nas condições das panelas da Siderar, é de 270 mm, representando 12 t de aço, das 190 t de

capacidade das mesmas panelas. Isto indica que, com mais de 3% de aço ainda residente na panela começa a passagem de escória, e aparece o denominado “olho” na camada de escória protetora sobrenadante ao aço. Essa abertura de olho é responsável por reoxidação do aço, aumentando a perda de metal.

Um trabalho interessante, que tratava de uma tomada d’água para usinas hidrelétricas (LIMA, 2013), pode ser muito bem aproveitado, pois também simulou condições de formação de vórtice e o desgaste da peça, além de outros fatores mais ligados ao uso em reservatórios de água. Esta pesquisa foi muito importante para este trabalho, visto que produziu os melhores resultados e também foi realizado pelo supervisor de estágio do autor deste.

A proposta inicial era a de 5 novas geometrias para o furo das válvulas, e a avaliação do desempenho das mesmas com relação à vazão, altura de formação de vórtice, espalhamento do fluxo de água e desgaste da peça. A figura 8 esquematiza essas geometrias.

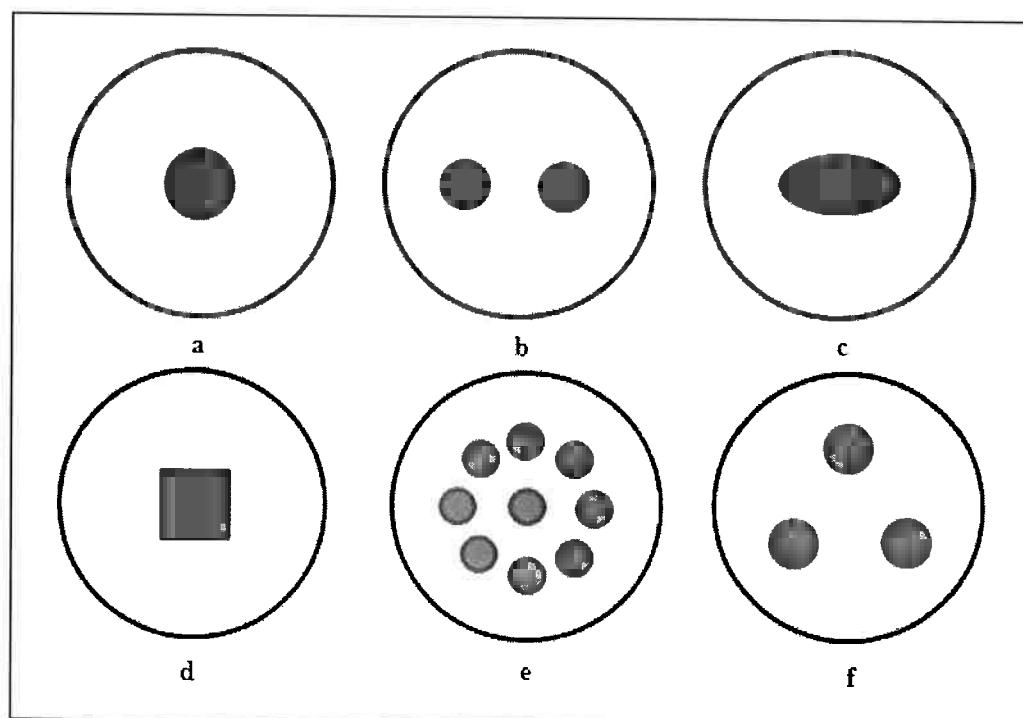


Figura 8 - Geometrias estudadas: a) furo circular comum; b) dois furos circulares; c) furo elíptico; d) furo quadrado; e) múltiplos furos; f) três furos (LIMA, 2013).

A configuração f obteve os melhores resultados, o que foi justificado pela interação de um vórtice com o outro. À medida que um vórtice se forma ele assume uma orientação de rotação; um vórtice vizinho pode assumir a mesma orientação, e aniquilá-lo no ponto de encontro, ou a orientação inversa; no entanto, o último furo inevitavelmente terá orientação igual a um dos outros, o que inicia um processo de destruição do vórtice.

As figuras 9 e 10 mostram a superioridade do desempenho da válvula f em relação às demais. A vazão média foi calculada dividindo o volume de água pelo tempo de escoamento. A altura crítica de formação de vórtice foi mensurada por inspeção visual, com auxílio de uma régua.

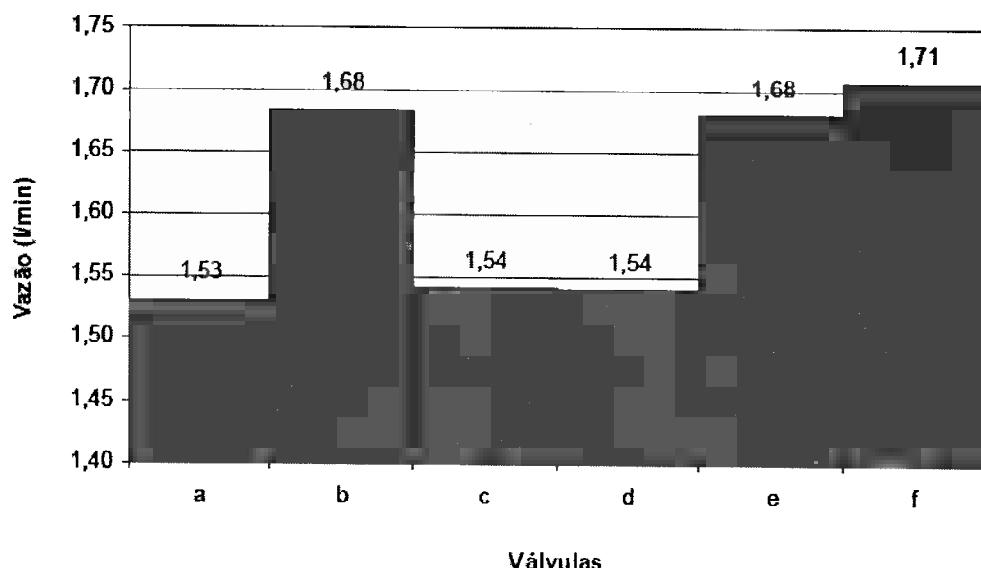


Figura 9 - Vazão média de cada válvula, em litros por minuto (LIMA, 2013).

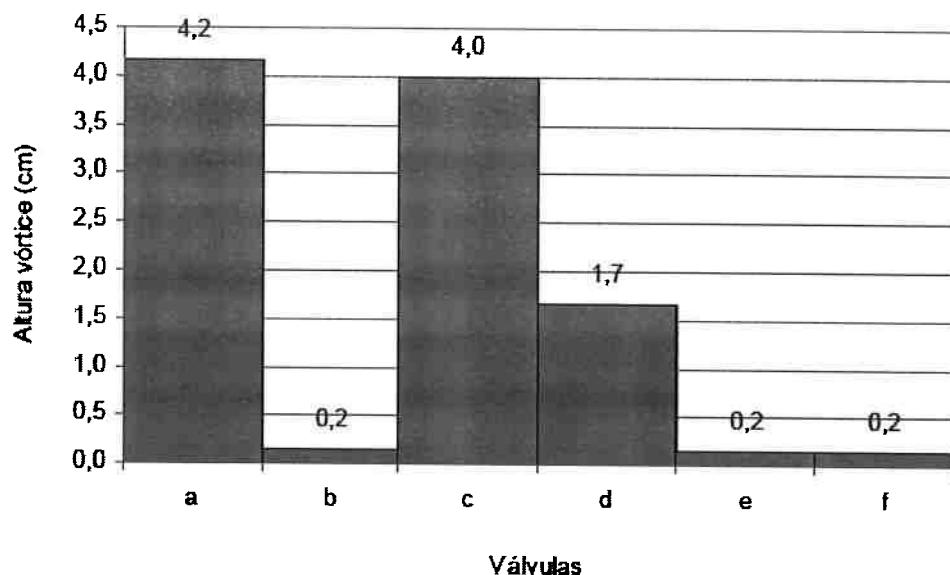


Figura 10 - Altura crítica de formação de vórtice para cada válvula, em centímetros
(LIMA, 2013).

O espalhamento foi medido por um tubo captador com diâmetro de 10 mm, posicionado na saída da válvula, e o volume captado foi comparado com o volume abastecido. A diferença se dá pelo fato de o ar passante devido ao vórtice tornar o fluxo de água irregular, fazendo com que o escoamento ocorra com desvios em relação à vertical. O resultado das válvulas a e f são mostrados na figura 11. Para a siderurgia, esse espalhamento é importante para o fluxo regular e constante da panela para o distribuidor, o que reduziria a ocorrência de reoxidação.

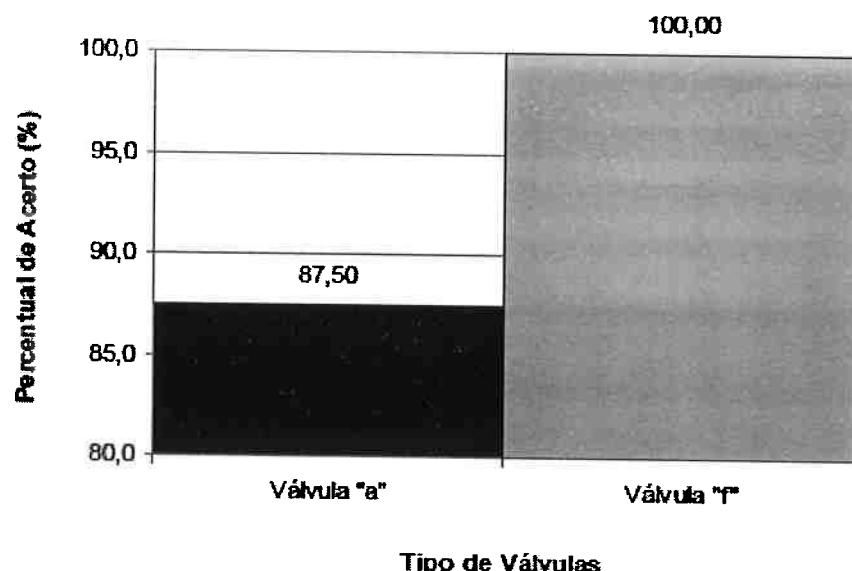


Figura 11 - Medida do percentual de água passante regularmente pelo furo da válvula (LIMA, 2013).

O desgaste foi avaliado utilizando açúcar caramelizado na saída da válvula. Uma quantidade fixa de água foi escoada para as duas principais válvulas, e a perda de massa foi anotada. Segundo o autor, a válvula a teve desgaste de 1,8 g/l, enquanto a f obteve 1,44 g/l. Este dado é importante pois determina a vida útil da peça refratária, visto que o movimento rotacional é extremamente danoso por ocasionar erosão maior à cerâmica.

4 Materiais e Métodos

Para a realização dos ensaios que geraram os dados para este trabalho, foi utilizado um modelo físico, utilizando água como fluido para simular o aço, devido à similaridade de viscosidade cinemática existente entre os dois. O modelo permite manter a água em repouso, para diminuir a existência de velocidades tangenciais, criadas durante o preenchimento do recipiente, e então iniciar o vazamento de água pelo furo no fundo do reservatório, passando pela válvula modificadora de fluxo – ou seu formato padrão – e sendo recolhida para evitar desperdício. Na figura 12 observa-se o modelo, e na Tabela 1, suas dimensões.

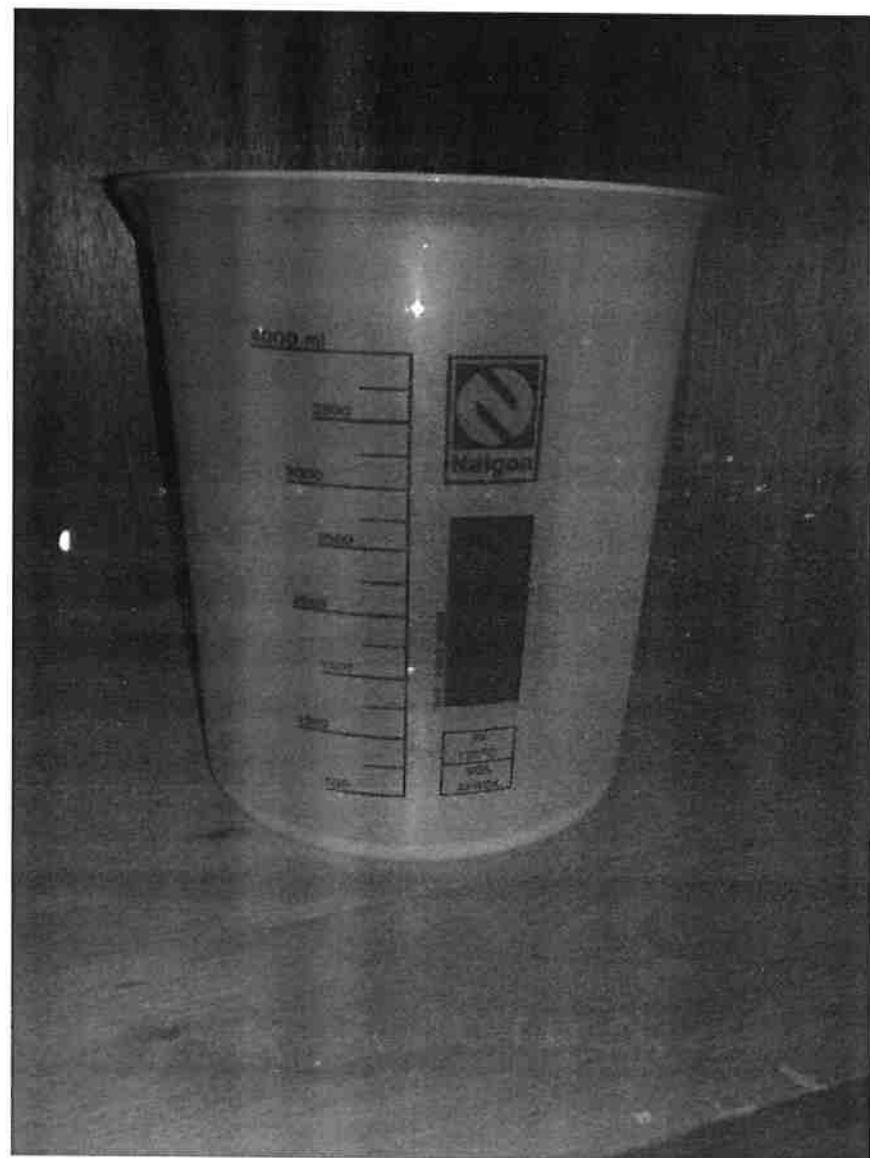


Figura 12 - Vista lateral do modelo utilizado.

Tabela 1 - Dimensões e propriedades adotadas

	Unidade	Valor
Diâmetro do recipiente	m	0,16
Diâmetro do orifício de saída	m	0,008
Nível da água inicial	m	0,15
Densidade da água	kg/m ³	1000
Viscosidade da água	P	0,01002
Aceleração da gravidade	m/s ²	9,81

As válvulas foram construídas empregando impressão 3D de acordo com os projetos indicados na figura 13. Foi empregado ABS como polímero para a impressão.

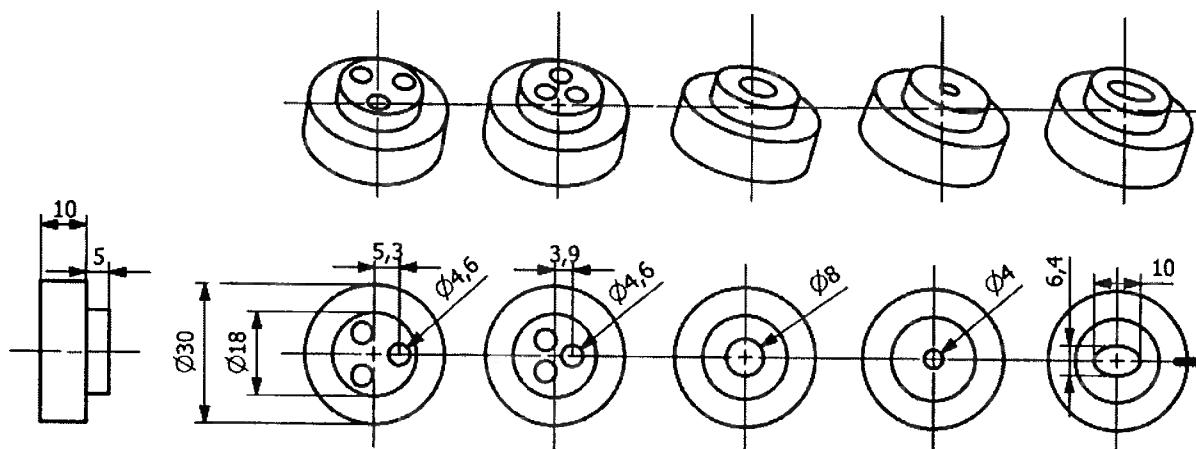


Figura 13 – Projetos dos sistemas de válvula simulados e construídos

Os projetos foram então transferidos empregando o software NX-Siemens e impressos por manufatura aditiva. A figura 14 apresenta a tela de um dos projetos construídos. No anexo são apresentadas todas as figuras dos projetos de sistemas de válvulas.

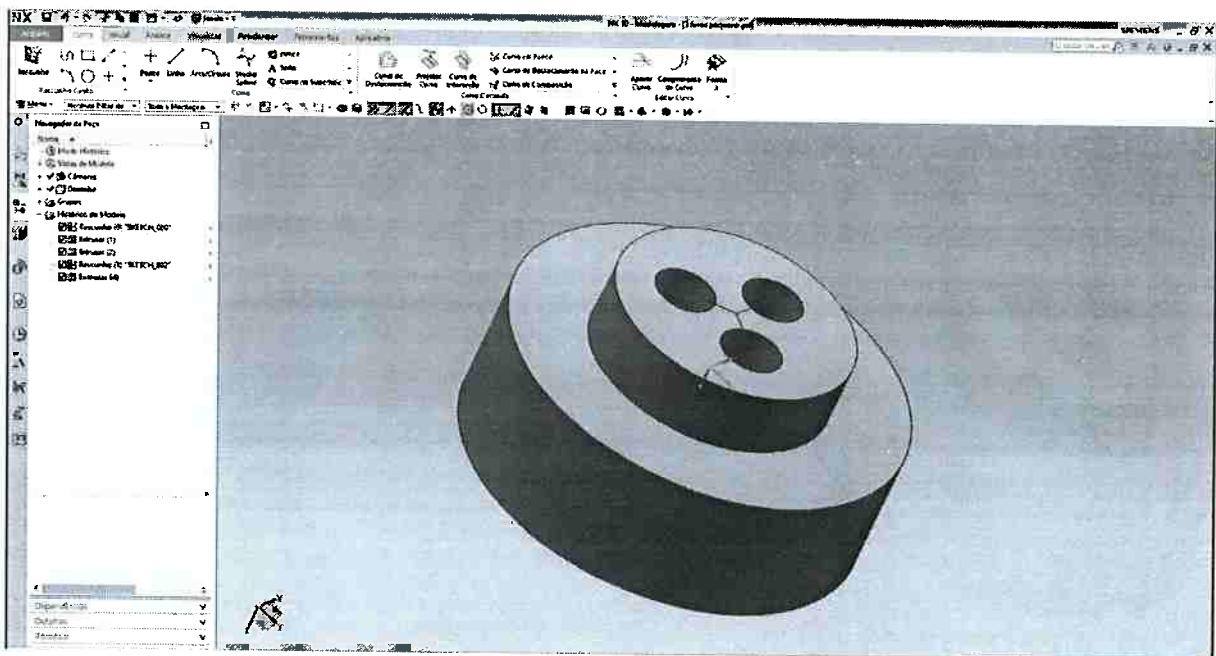


Figura 14 – Vista tridimensional da válvula de três furos simulada.

É importante notar que foram estudados dois posicionamentos: para isolar os resultados providos pela válvula de outros métodos de otimização de vazamento, como, por exemplo, os que foram citados na revisão bibliográfica (anteparos, inclinação, fundo falso, furo excêntrico, etc.), posicionou-se o furo para vazamento no centro do recipiente, de forma a evitar influência das paredes, e nenhuma modificação foi implementada (a figura 15 mostra como ficou a disposição espacial); no segundo modelo, simulou-se o posicionamento aproximado da válvula em seu uso na aciaria, como mostrado nas figuras 16 e 17.

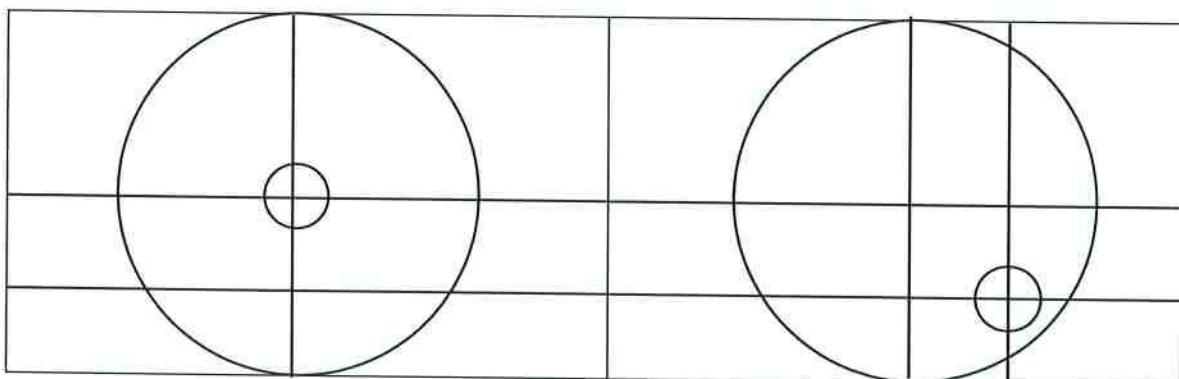


Figura 15 – Posicionamento as válvulas no fundo dos recipientes: Centralizado no fundo e centralizado no quadrante.

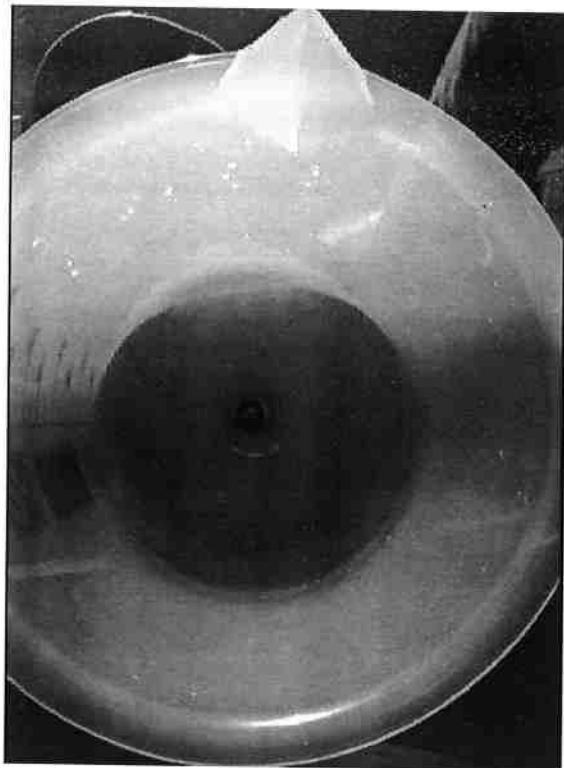


Figura 16 - Vista superior do recipiente, com destaque para o posicionamento da válvula no centro.

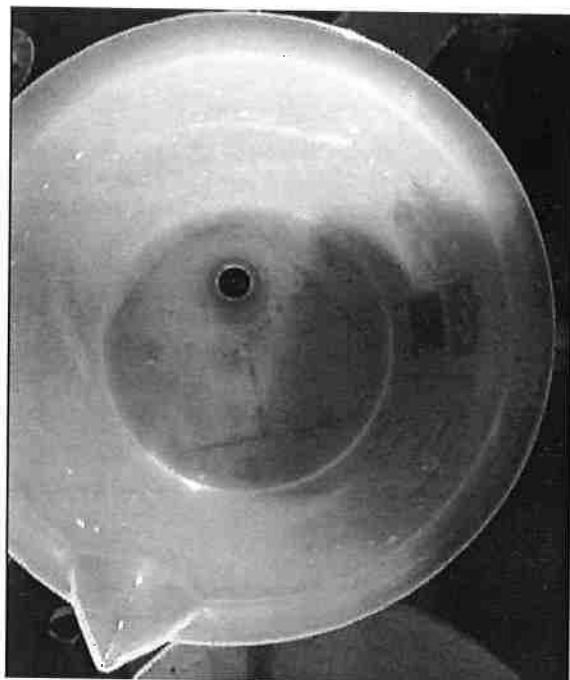


Figura 17 - Vista superior do recipiente, com destaque para o posicionamento da válvula excêntrico.

Foram realizados ensaios para avaliar o desempenho de ambas as válvulas, sempre buscando um significado metalúrgico para eles. Foram eles:

- Quantificação da vazão média
- Estimativa da altura crítica de desenvolvimento completo de vórtice

Cada condição foi ensaiada três vezes, e os valores médios foram calculados.

A seguir, cada ensaio é detalhado, citando seus procedimentos e objetivos.

4.1 Quantificação da vazão média

O cálculo da vazão média foi realizado de maneira indireta, ou seja, fixando o volume de água no reservatório (3l) antes do vazamento e cronometrando o tempo necessário para seu esgotamento. Desta forma, dividindo-se o volume pelo tempo, resulta-se na vazão média global do ensaio, em litros por minuto (l/min).

4.2 Estimativa da altura crítica de desenvolvimento completo de vórtice

Paralelamente à quantificação da vazão média, registrou-se o nível de fluido para o qual o vórtice alcançou desenvolvimento completo (convencionado como o instante em que o vórtice assume o tipo 6, segundo a classificação de Padmanabhan e Hecker, apresentada na seção 3.1).

Foi fixada uma régua ao recipiente, de forma que o valor zero alinhou-se à base do mesmo.

5 Resultados e Discussões

O ensaio de quantificação da vazão média teve importância para garantir que não haja perda de eficiência com a alteração da válvula, e ainda pode revelar ou indicar suposições sobre o mecanismo de melhoria. Os dados da condição de furo centralizado podem ser vistos na Figura 15.

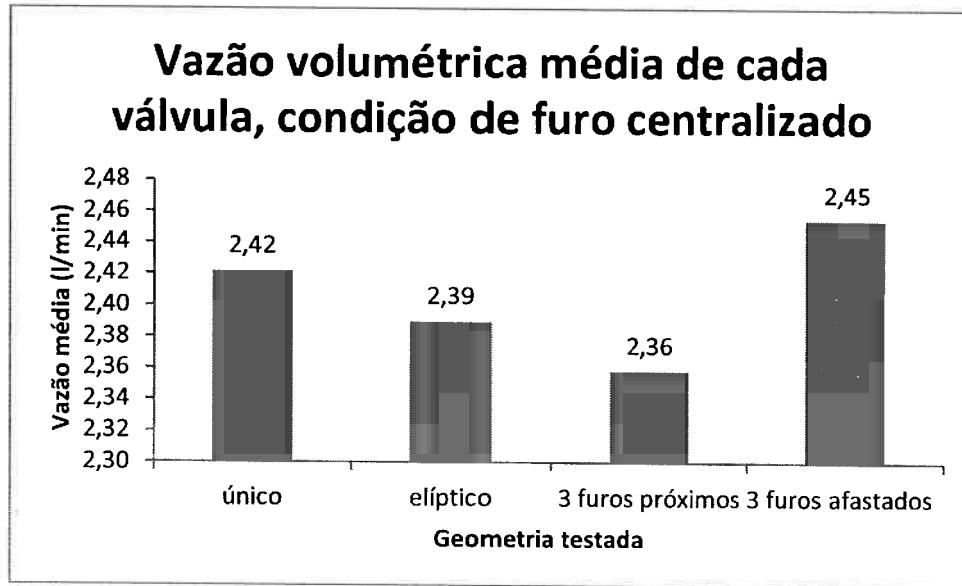


Figura 15 - Vazão volumétrica para cada válvula testada na posição centralizada, em l/min

Os resultados foram satisfatórios, visto que a válvula de 3 furos alcançou desempenho quase 1,3% superior ao desenho padrão.

Em comparação com a literatura, (LIMA, 2013) obteve também ganho de desempenho, porém com valores diferentes. Na mesma referência, pode-se explicar o mecanismo que dá origem a esta superioridade da válvula modificada. Trata-se da constância do fluxo de água, sem a entrada de ar na válvula, o que não ocorre na válvula padrão devido ao aparecimento do vórtice completamente desenvolvido; a Tabela 2 compara os valores de altura crítica de desenvolvimento completo de vórtice para as válvulas.

Tabela 2 – Valores encontrados para altura crítica de desenvolvimento completo do vórtice na condição de posicionamento centralizado, em cm.

Medida	Válvula			
	Padrão	Elíptico	3 furos próximos	3 furos afastados
1	1,5	1,5	0,5	0,0
2	0,5	1,0	0,0	0,0
3	1,0	1,5	0,5	0,0
Média	1,0	1,33	0,16	0,0

Como mostram os dados, o objetivo de reduzir a formação de vórtice e seu completo desenvolvimento foi atingido. O vórtice praticamente não foi observado, com apenas um leve aumento da velocidade tangencial no final do vazamento. Os resultados foram sustentados pela literatura, mais uma vez usando como referência (LIMA, 2013).

Os dados do experimento, aliados a outros experimentos de (LIMA, 2013), puderam concluir que a passagem de ar é a responsável pela queda de vazão no fim de vazamento, o que torna o tempo para esvaziar o recipiente maior. Em termos metalúrgicos, este efeito é muito mais amplo. Ao evitar a passagem de ar pela válvula, a entrada com 3 furos diminui a quantidade de aço reoxidado durante o esgotamento da panela. Isto implica em menor quantidade de óxidos de ferro na escória do distribuidor, e também diminuição do volume desta, além de evitar o desperdício de aço com alto valor agregado pelas operações de refino.

Em relação às duas possíveis configurações de 3 furos, afastados ou próximos, obteve-se superioridade da configuração afastada. O motivo pode ser a menor interferência entre os fluxos de cada furo.

É importante notar a importância da posição do orifício. Conforme foi citado pelo autor da referência acima, na prática industrial o efeito vórtice é combatido com a excentricidade do furo na panela. A excentricidade, no entanto, cria uma direção preferencial para o fluxo radial do fluido (coincidente

com o raio da panela) devido à região do furo estar com déficit de massa, pois o escoamento está acontecendo próximo à parede da panela de aço. Desta forma, realizaram-se ensaios simulando a condição real das panelas de aciaria, e seus resultados de vazão podem ser observados na Figura 16.

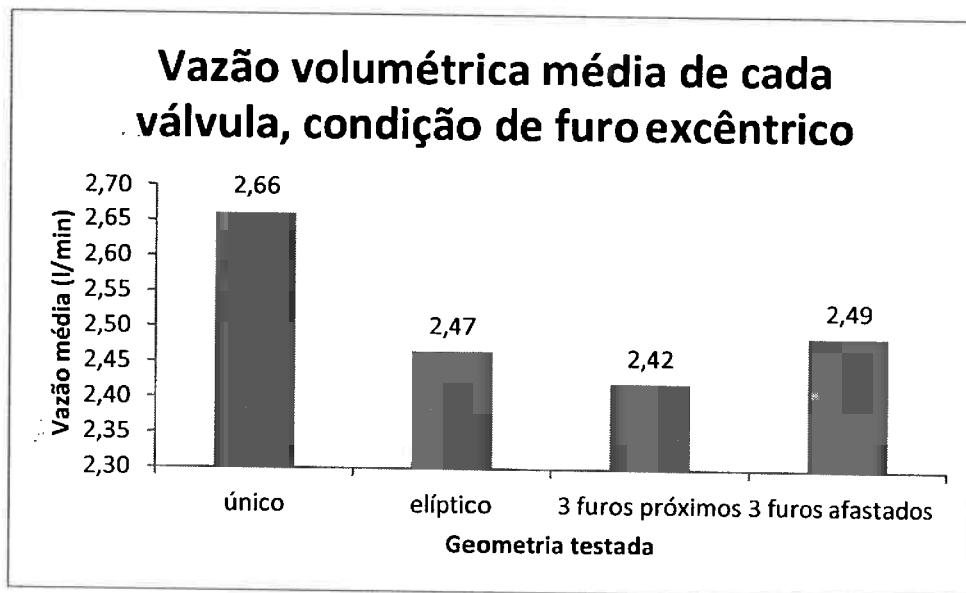


Figura 16 - Vazão volumétrica para cada válvula testada na posição excêntrica, em l/min

Conforme exposto, a alteração para 3 furos teve desempenho pior que a geometria padrão quando simulado o furo em posição próxima da real. Como dito anteriormente, a excentricidade do furo reduz a influência do vórtice. De fato, o vórtice teve dificuldade de se desenvolver no escoamento, o que fica evidente na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores encontrados para altura crítica de desenvolvimento completo do vórtice na condição de posicionamento excêntrico, em cm.

Medida	Válvula			
	Padrão	Elíptico	3 furos próximos	3 furos afastados
1	1,0	0,5	0,0	0,0
2	0,5	1,0	0,0	0,0
3	0,5	1,0	0,0	0,0
Média	0,83	0,83	0,0	0,0

Os resultados de formação de vórtice foram levemente melhores, corroborando com o esperado. Isto significa que o efeito vórtice não é tão relevante para o corte do fluxo antecipado, causador do volume retido de aço.

Portanto, a alteração não é benéfica à aciaria, visto que a panela de aço tem seu furo excêntrico por motivo de impossibilidade do uso central (cinta de reforço).

6 Conclusões

Os dados permitem afirmar que a alteração geométrica proposta na válvula superior da panela de aço é benéfica na supressão dos problemas acarretados por efeito vórtice, em configuração centralizada.

No entanto, na configuração excêntrica, seu desempenho foi inferior ao da geometria padrão. Visto que a excentricidade já combate a formação de vórtices, e a alteração para 3 furos traria outras dificuldades (maior área de contato para desgaste, dificuldade de abertura de fluxo, etc.) não é recomendada sua implementação na aciaria.

A contribuição tecnológica deste trabalho fica sendo a demonstração do bom desempenho da válvula de 3 furos centralizada, porém sua inviabilidade em posição excêntrica.

7 Referências

- CHIAPPAROLI, W.; SYLVESTRE, S. A steel ladle study by water modelling. **14 th Steelmaking Conference**, n. 1, 2003.
- FERREIRA, L.; BORIN, D.; GENOVEZ, A. Submergência Crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. **XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica**, 2000.
- LIMA, H. A. A. Desenvolvimento de um dispositivo anti-vórtice para tomada d'água para aumento da eficiência de usinas hidrelétricas. **Prêmio Jovem Cientista**, n. XXVII, p. 39, 2013.
- MAZZAFERRO, G. M. et al. Experimental and numerical analysis of ladle teeming process. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 31, n. 6, p. 503–508, dez. 2004.
- PADMANABHAN, M.; HECKER, G. Scale effects in pump sump models. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1984.
- SANKARANARAYANAN, R.; GUTHRIE, R. I. L. Slag entraining vortexing funnel formation during ladle teeming : similarity criteria and scale-up relationships. **Ironmaking & Steelmaking**, v. 29, n. 2, p. 147–153, 2002.
- SANTOS, S. D. S. **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**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2006.
- SANTOS, S. D. S. et al. Modelagem Física Da Formação De Vórtice Durante O Vazamento Do Aço De Uma Panela. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 5, n. 1, p. 12–16, 2008.
- TAVARES, R. P.; SATO, C. T.; RAMIREZ, M. Avaliação Do Comportamento Escória / Aço Durante O Esgotamento Da Panela Por Meio De Modelagem Física. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 5, n. 4, p. 210–214, 2009.

8 Anexos

Projetos tridimensionais e suas vistas dos dispositivos simulando os furos das válvulas, impressos em impressão 3D.

