

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ANTI-VÓRTICE PARA A VÁLVULA SUPERIOR DA PANELA DE AÇO*

Renato Okabayashi Miyaji¹
Guilherme F. B. Lenz e Silva²

Resumo

As novas tecnologias de manufatura aditiva podem acelerar tanto o desenvolvimento, quanto a prototipagem na indústria siderúrgica. Dessa forma, várias etapas do processo produtivo podem ter sua eficiência melhorada, com o objetivo de se obter um produto final de melhor qualidade, gastando menos recursos humanos, operacionais, custos e tempo. Nesse contexto, este projeto tem como objetivo o aumento da eficácia do procedimento do vazamento do aço líquido da panela para o distribuidor, por meio do desenvolvimento de um dispositivo anti-vórtice para a válvula superior da panela de aço. Neste projeto foram avaliados diferentes formatos e geometrias por meio da metodologia de Planejamento de Experimentos (DOE), empregando a impressão 3D e um modelo de escala reduzida. Posteriormente, foram realizadas simulações de fluidodinâmica computacional (CFD), para melhor compreensão do fenômeno e dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Simulação 3D; Panela de aço; Vórtice.

DEVELOPMENT OF AN ANTI-VORTEX DEVICE FOR THE SUPERIOR VALVE OF THE STEEL LADDLE

Abstract

The new technologies of additive manufacturing can expedite not only the development, but also the prototyping in the steelmaking industry. Therefore, many stages of the productive process can have their efficiency increased, aiming to obtain a final product with higher quality, saving human, economic and operational resources. In this scenario, this undergraduate research project aims to increase the efficiency of the ladle's teeming to the tundish, through the development of an anti-vortex device for the superior valve of the steel ladle. New geometries and formats were tested in this project through the Design of Experiments (DOE) methodology, using the additive manufacturing in a reduced scale model. Subsequently, computational fluid dynamics (CFD) simulations were executed, in order to comprehend the phenomena and the results.

Keywords: 3D Simulation; Steel ladle; Vortex.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)
² Orientador, Professor Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1 INTRODUÇÃO

Durante o processo de vazamento do aço líquido da panela para o distribuidor, podem ocorrer contaminações por escória e aumento do número de inclusões, em decorrência da formação de vórtices e consequente escoamento da escória, material refratários, fluxos de cobertura isolantes, etc. da superfície para o metal líquido. Em 2017, foram realizados estudos preliminares em um Projeto de Formatura no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais [1], no qual o número de furos e a geometria (circular e elíptica) foram satisfatoriamente simuladas empregando um modelo físico, cujos dispositivos anti-vórtice foram manufaturados por impressão 3D, como pode ser observado na Figura 1.

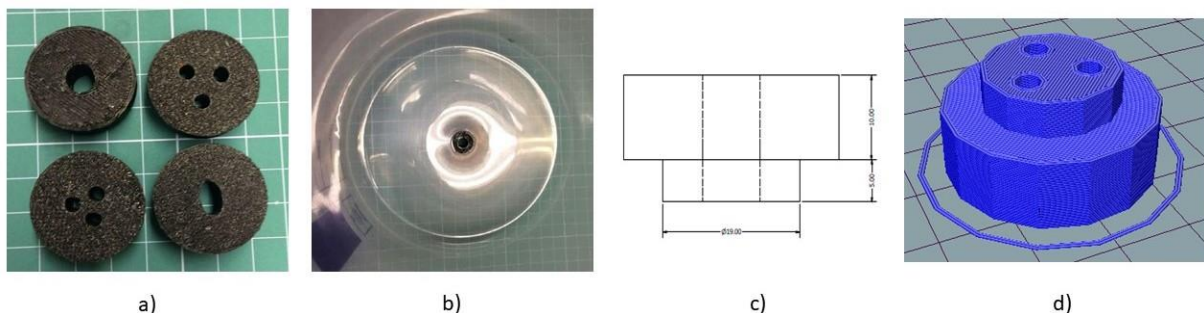


Figura 1. Componentes do modelo físico: a) geometrias impressa em 3D das válvulas; b) béquero com válvula acoplada em seu fundo; c) desenho técnico da válvula; d) software de impressão 3D.

Neste trabalho, o comportamento do fluido foi avaliado por meio do uso de um planejamento fatorial de experimentos, no qual as principais variáveis estudadas foram: número de furos, posição da válvula em relação ao centro da panela (central e excêntrica), ângulo de variação da seção do furo, simetria longitudinal e sua posição em relação ao plano de assentamento do fundo da panela e a inclinação do fundo da panela em relação à horizontal.

1.1. Objetivos

Este projeto tem como objetivo avaliar novos formatos, novas seções, geometrias e o posicionamento das válvulas sobre o comportamento do fluido durante o processo de vazamento de uma panela de aço líquido para o distribuidor, empregando água como fluido de referência e uma redução de escala de 1:20.

1.2. Revisão Bibliográfica

1.2.1. Transferência de Inclusões

Durante o processo de fabricação do aço, podem ocorrer diversos defeitos no produto final. Para este projeto, o defeito mais comum é o aparecimento de inclusões, uma vez que essas podem ser consequências diretas da prática de metalurgia e vazamento e do projeto da panela e de seus dispositivos de controle de fluxo do aço líquido da panela para o distribuidor. Inclusões são impurezas, que podem ser não-metálicas ou fases intermetálicas, que são embebidas em uma matriz metálica. Elas são defeitos de processamento de materiais metálicos, que ocorrem quando esses ainda estão no estado líquido [2].

No caso do fenômeno estudado, o tipo de inclusão que pode se formar é exógena, por conta da contaminação pela fase sobrenadante (escória). A grande maioria das operações envolvem fenômenos de mistura com turbulência entre escória e o metal líquido. Estas podem gerar contaminações quando as inclusões são transferidas da panela, para o distribuidor chegando finalmente ao molde.

1.2.2. Vórtices

Segundo [3], um vórtice pode ser definido como o movimento de um fluido com trajetórias circulares concêntricas, devido à conservação do momento angular em um conduto.

É importante a apresentação de alguns conceitos e definições empregadas neste trabalho, entre eles podemos citar: a grandeza vetorial da vorticidade, que pode ser compreendida como a tendência de um fluido girar em torno de seu eixo.

Outro conceito relevante é o da circulação (Γ) que pode ser descrito matematicamente pela integral de linha da componente tangencial da velocidade em uma curva fechada C no campo de escoamento [4].

$$\Gamma = \oint_C V \cdot ds$$

De acordo com [5], depois de realizarem estudos a respeito da formação de vórtices em poços de sucção, podem ser definidos seis tipos de vórtices. Estes vórtices, podem também ser classificados de acordo com sua intensidade. A Figura 2 apresenta a representação pictográfica destas classificações.

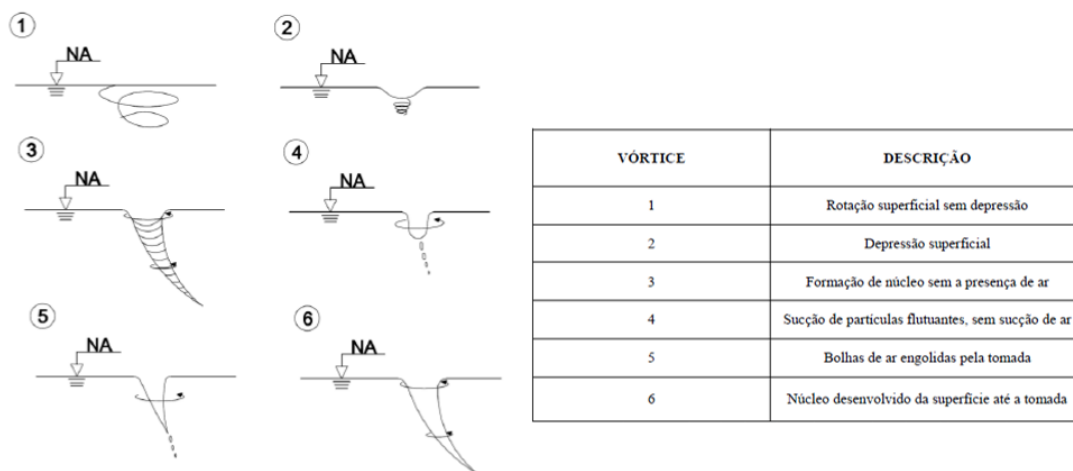


Figura 2. Tipos de vórtice, classificados por intensidade. [5]

1.2.3. Dispositivos Anti-vórtice

O estudo do fenômeno da formação de vórtices e sua minimização é amplo e pode ser vastamente encontrada na literatura técnico-científica, uma vez que esse ocorre em diversos processos seja em campos de estudos envolvendo diversas engenharias, fenômenos atmosféricos e naturais.

Segundo [6], que estudou o desenvolvimento de vórtices na tomada d'água, propondo geometrias diferentes para a válvula, o formato do furo não teve influência significativa nos resultados obtidos. Foram testados três formatos: circular, elíptico e quadrado. Esses foram comparados em quatro diferentes critérios: vazão, altura de formação do vórtice, espalhamento do fluxo de água e desgaste da peça.

Além disso, [6] também avaliou a quantidade de furos. As configurações testadas foram de um, dois, três e nove furos. A conclusão obtida foi de que quantidades ímpares de furos são superiores às pares, posto que, nessas, é observada uma interação maior entre os vórtices de sentido de rotação opostos. Dessa forma, existe uma probabilidade maior de controle e aniquilamento de vórtices. De acordo com [1], depois de realizar estudos semelhantes, porém acerca da formação de vórtices durante o vazamento da panela de aço para o distribuidor, outro fator que tem influência no fenômeno é a posição da válvula. Dessa maneira, testou-se duas configurações: centralizada e excêntrica. Essas foram comparadas em dois critérios: vazão volumétrica média e submergência crítica. Outra variável testada foi a geometria da válvula: avaliou-se diferentes formatos e quantidades de furos, além da posição relativa entre os furos. Foram testadas quatro configurações: de furo único circular, furo único elíptico, três furos circulares próximos entre si e três furos circulares afastados. Desse modo, [1] concluiu que a configuração de três furos circulares afastados apresenta o melhor desempenho em relação às demais, quando testada em posição centralizada. Já em posição excêntrica, a de furo único foi superior.

Para [7], um fator que, aliado à excentricidade da válvula, contribui de maneira significativa não só para que seja minimizada a formação de vórtice, como também para que a eficiência do processo seja melhorada, é a inclinação do fundo da panela.

Com o emprego de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD), foi possível concluir que a quantidade de metal restante na panela após a finalização do processo pode ser drasticamente reduzida com uma inclinação do fundo da panela com ângulos entre 2º a 5º graus.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1. Materiais e Métodos

Para a realização dos experimentos foi utilizado um modelo físico composto por um béquer de polipropileno simulando a panela de aço, água, no lugar do aço líquido, por conta da semelhança de viscosidade e pequenas esferas de poliestireno, no lugar da escória.

No fundo do béquer, foram acopladas diferentes configurações de válvula, fabricadas através do método de manufatura aditiva (impressão 3D), empregando o filamento termoplástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno). Realizou-se uma análise dimensional do sistema, a fim de se determinar a massa específica da escória, optando pelo uso de pequenas esferas de poliestireno expandido, para facilitar a visualização do comportamento do fluido sobrenadante, ou superfície livre (metal-escória).

As configurações desenvolvidas avaliaram o efeito do estrangulamento (diminuição da seção), de inserção de ângulos e novos posicionamentos dos dispositivos de transferência de fluido no centro e canto (deslocamento em relação ao centro) do béquer. Foram testadas $2^6 = 64$ novas configurações.

Foi adotada a metodologia de Planejamento de Experimentos (DOE). Utilizou-se o design fatorial fracionado com 2^{k-2} experimentos proposto por [8]. Dessa forma, o número de experimentos a serem realizados foi reduzido, seguindo o design com 2^{6-2} experimentos. Os seis fatores escolhidos, suas identificações e seus níveis podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Design com 2^{6-2} experimentos [8]

	A	B	C	D	E=ABC	F=BCD	ORDEM
1	-	-	-	-	-	-	5º
2	+	-	-	-	+	-	15º
3	-	+	-	-	+	+	9º
4	+	+	-	-	-	+	11º
5	-	-	+	-	+	+	8º
6	+	-	+	-	-	+	16º
7	-	+	+	-	-	-	4º
8	+	+	+	-	+	-	1º
9	-	-	-	+	-	+	10º
10	+	-	-	+	+	+	6º
11	-	+	-	+	+	-	2º
12	+	+	-	+	-	-	14º
13	-	-	+	+	+	-	7º
14	+	-	+	+	-	-	12º
15	-	+	+	+	-	+	13º
16	+	+	+	+	+	+	3º

Legenda:**A:** Número de Furos**B:** Posição da Válvula**C:** Ângulo (α)**D:** Tipo de Simetria **E:** Posição Longitudinal **F:** Inclinação do Fundo da Panela (β)

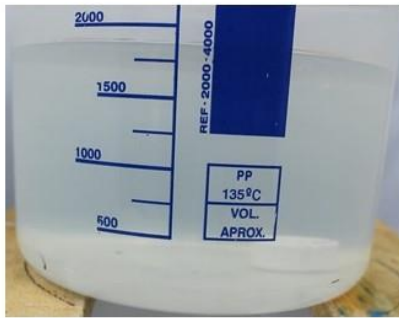
Posteriormente, com a análise dos resultados obtidos, foi realizado um refino das configurações, em uma segunda etapa de planejamento experimental, utilizando um design fatorial com 2^3 fatores. Neste caso, foram escolhidos os fatores: número de furos, geometria (α) e inclinação do fundo da panela em relação à horizontal (β).

Tabela 2. Fatores escolhidos e seus níveis

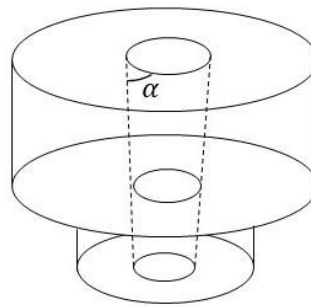
FATORES	-	+	IDENTIFICAÇÃO
Número de Furos	1	3	A
Posição da Válvula	Centralizada	Excêntrica	B
Ângulo (α)	90º	80º	C
Tipo de Simetria	Simétrica	Assimétrica	D
Posição Longitudinal (%)	0%/100%	0%/50%	E
Inclinação do Fundo da Panela (β)	0º	5º	F

As respostas experimentais avaliadas durante os ensaios foram: a vazão volumétrica média e altura de submergência crítica, na primeira série de experimentos, e, posteriormente, também o vazamento de escória e a massa de fluido restante ao final do processo, na segunda série.

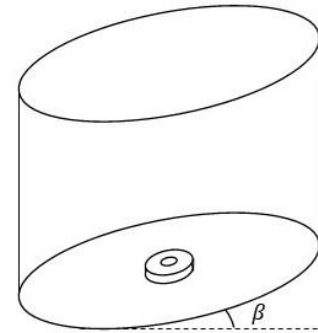
A vazão volumétrica média foi medida por meio do vazamento de um volume de fluido fixo em três litros e a medição da vazão mássica média do processo. Em relação à altura de submergência crítica, essa foi medida por meio do processamento das imagens captadas pelo sistema de gravação instalado no aparato experimental.



a)



b)



c)

Figura 3. a) Vista frontal do recipiente com a válvula instalada em seu interior; b) representação esquemática do ângulo α na válvula; c) representação esquemática do ângulo de inclinação β .

As simulações numéricas do fenômeno foram realizadas utilizando o software comercial de fluidodinâmica computacional (CFD) ANSYS FLUENT®. Para o vazamento da panela de aço para o distribuidor, a principal característica do escoamento é a presença de uma superfície livre (a interface água-ar), na qual pode ocorrer a formação de vórtices. Assim, é necessário utilizar um modelo multifásico, com a abordagem Euler-Euler, recomendada pelo fabricante para a modelagem desse problema. Nela, as fases presentes no escoamento são tratadas como interpenetrantes. Com o auxílio da ferramenta de modelagem “Volume of Fluid” (VOF), é possível identificar a posição da superfície-livre, por meio do acompanhamento das frações volumétricas durante todo o domínio [9].

Como pode ser observado na Figura 4, utilizou-se uma malha hexaédrica com $2,5 \times 10^5$ elementos. Foi adotado o modelo de turbulência “Realizable” $k - \varepsilon$, por apresentar os melhores resultados para fenômenos semelhantes. Inicialmente, foram realizadas apenas simulações bidimensionais em regime permanente, para auxiliar na compreensão do comportamento do fluido com a introdução dos fatores utilizados.

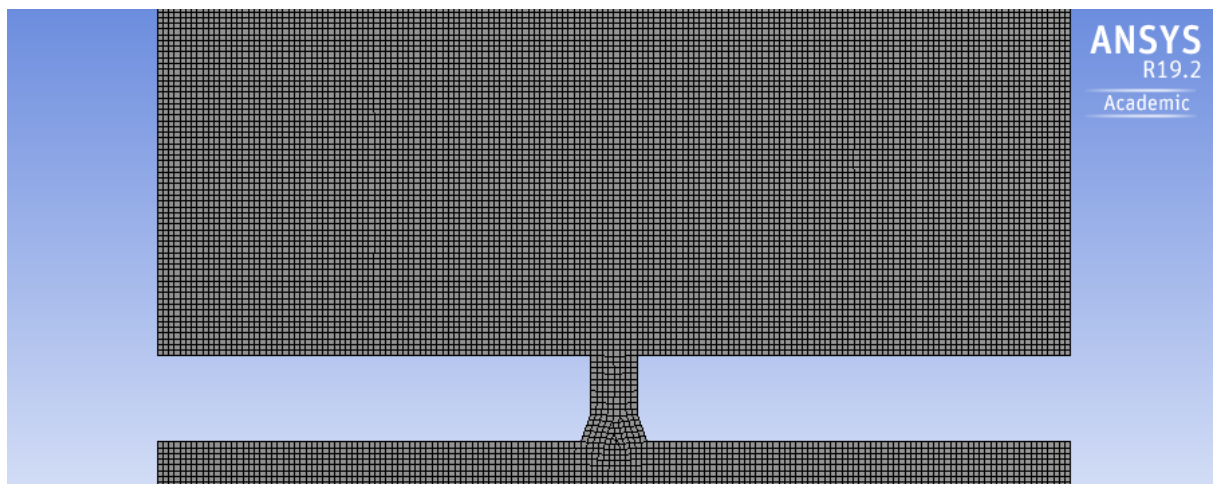


Figura 4. Malha hexaédrica utilizada para simulação do fenômeno.

2.2. Resultados e Discussão

A partir dos experimentos realizados conforme indicado na tabela 1, os dados foram analisados e modelados empregando regressão linear multivariada, sendo assim, foi possível definir as variáveis mais significativas. Para um nível de significância de 95%, obteve-se: vazão volumétrica média, como as variáveis mais significativas.

As figuras 5 e 6 resumizam o comportamento dos efeitos principais e suas interações. sendo esses: o ângulo α , identificado como C, e sua interação com o fator A, ou seja, o número de furos presentes na válvula. Outros fatores com influência menor foram a inclinação do fundo da panela em relação à horizontal (β) e a posição longitudinal (E).

Considerando apenas os efeitos principais individualmente, nota-se que os fatores A, B (posição da válvula), E e F possuem efeito positivo, ao passo que C e D (tipo de simetria), negativo. Assim como foi previsto pelos resultados obtidos por [1] e [6], a configuração com três furos (fator A positivo), obteve uma vazão volumétrica maior em comparação com a de furo único.

Em relação ao fator C, sua ação individual foi negativa, ou seja, o ângulo α reto apresentou uma vazão volumétrica média superior ao valor de α igual a 80° . Dessa forma, o efeito de aceleração do fluido, provocado pelo afunilamento da seção transversal, não foi preponderante ao efeito de perda de carga provocado. Resultando assim, em uma vazão volumétrica média menor.

A análise da interação das variáveis, mostrada na Figura 5, indica que existe interação entre os fatores AB, AC, BD, AE, AF, BF, BE, CD, CE, CF e DE. Como apenas a interação AC foi considerada significativa, deve-se considerá-la para otimizar a vazão volumétrica média. É possível notar que a maior vazão é obtida quando o ângulo α é de 90° e a válvula possui um único furo. Já a menor é obtida pela configuração com furo único e com o ângulo α de 80° .

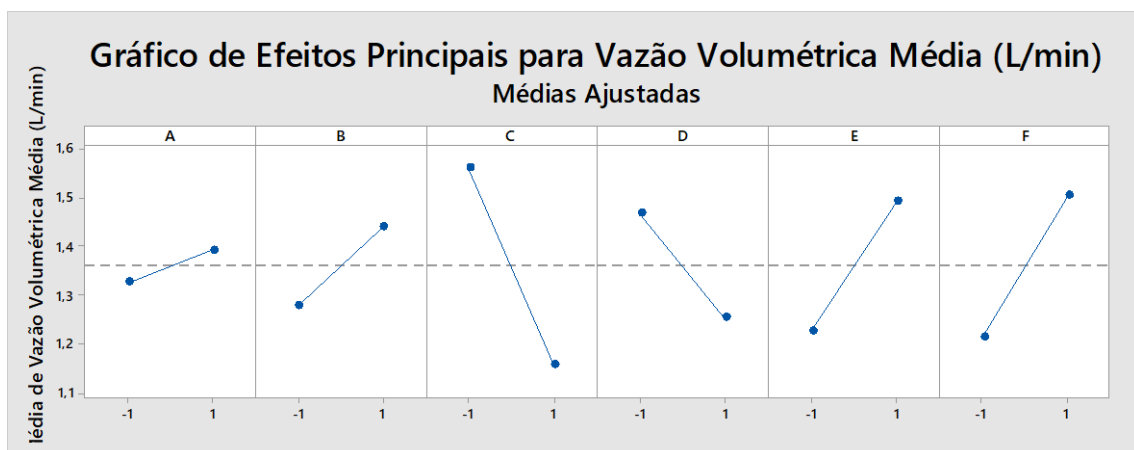


Figura 5. Efeitos principais para a vazão volumétrica média.

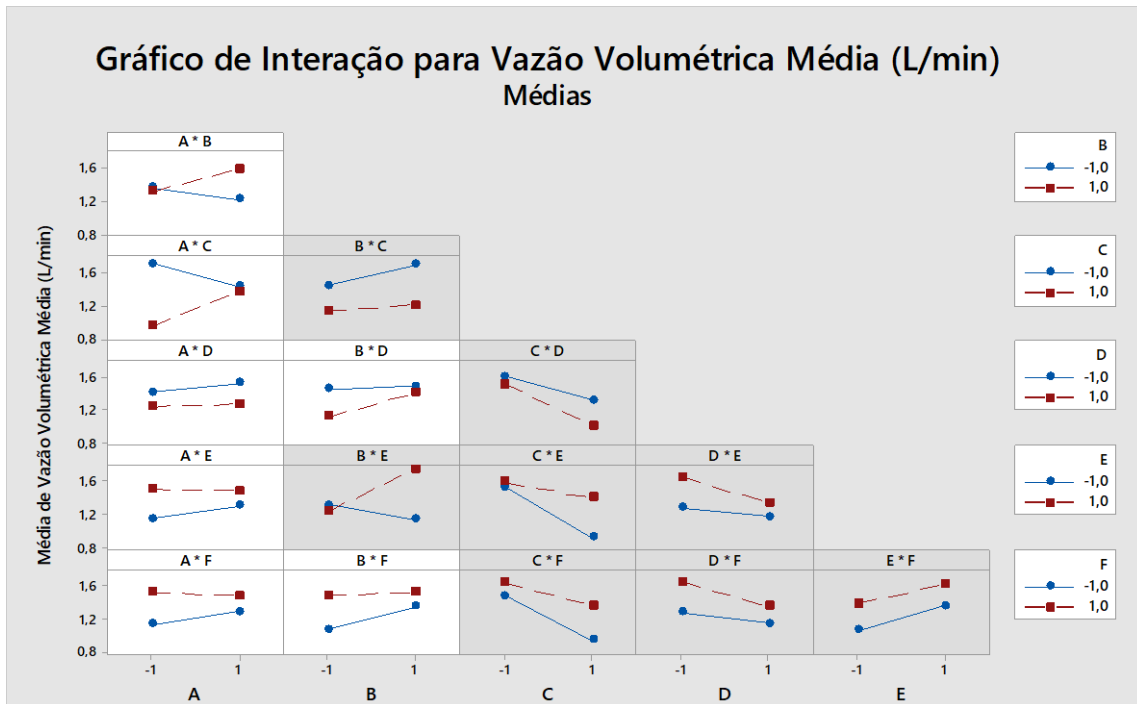


Figura 6. Interações entre fatores para a vazão volumétrica média.

Analogamente, a mesma análise foi feita para a altura de submersão crítica, obtendo os resultados presentes nas Figuras 7 e 8.

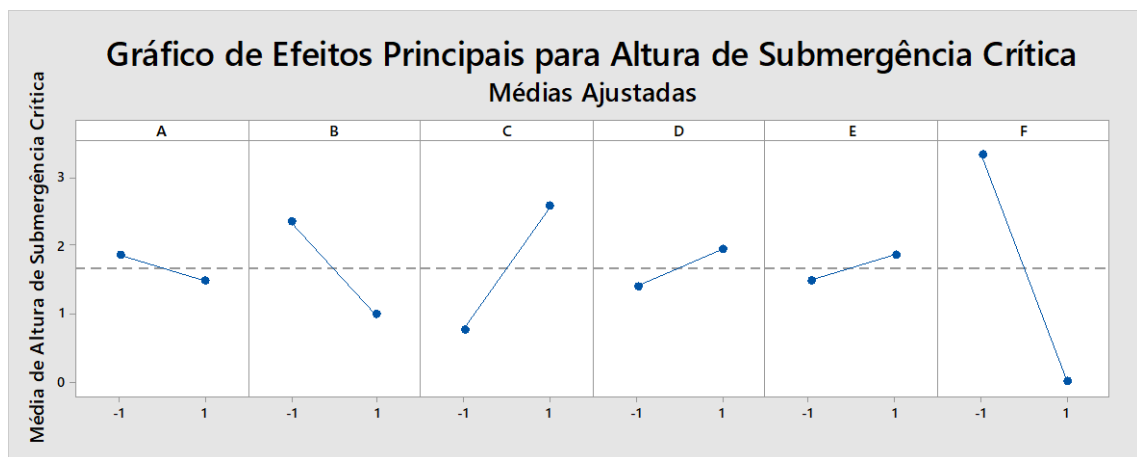


Figura 7. Efeitos principais para a altura de submersão crítica.

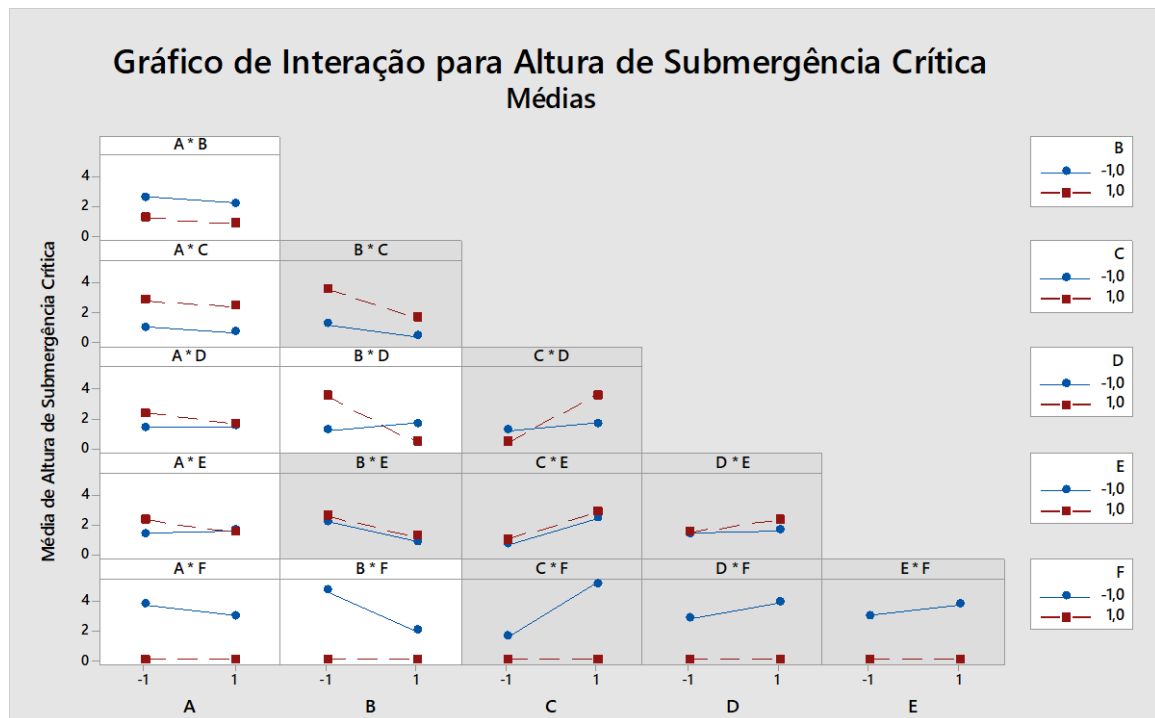


Figura 8. Interações entre fatores para a altura de submergência crítica.

Para a altura de submergência crítica, mais fatores tornam-se significativos. Sendo os principais a inclinação do fundo da panela em relação à horizontal (β), identificada como F, o ângulo geométrico α , identificado como C, a posição da válvula, identificada pela letra B e as interações BD e BF, sendo D o tipo de simetria.

Analisando somente os efeitos principais dos fatores individuais, nota-se que A, B e F apresentam efeito negativo, e C, D e E, positivo. Porém, como no caso da altura de submergência crítica, deseja-se que ela seja a mínima possível, esses valores se invertem.

Também conforme [1] e [6], as configurações com três furos obtiveram um desempenho melhor em comparação com as de furo único. Igualmente, o fator B também apresentou efeito negativo, como era esperado e descrito por [1], ou seja, a configuração com a válvula na posição excêntrica apresentou um desempenho superior à posição centralizada.

O fator C apresentou efeito positivo, significando que as configurações com ângulo α reto apresentaram resultados melhores em relação ao ângulo α de 80° . Isso pode ser explicado pelo fato de que, com o afunilamento da seção transversal da válvula, há uma aceleração do fluido. Com o aumento da turbulência do escoamento, a formação do vórtice é mais propícia a acontecer.

As configurações assimétricas apresentaram desempenho pior que as simétricas, como demonstrado pelo efeito do fator D. Assim, como as configurações com a posição longitudinal 0/50% apresentaram resultados piores que as 0/100%. Ambos podem ser explicados pelo fato de que, por possuírem um perfil com um comprimento longitudinal maior – em formato de tronco de cone – há uma maior indução de vorticidade ao escoamento.

O fator F apresentou o maior efeito em relação aos demais. Sendo capaz de praticamente anular a altura de submergência crítica quando o ângulo β tem o valor de 5° . O resultado apresentado encontra-se condizente com a literatura [7].

Nota-se, por meio da Figura 7, a presença de interação entre os fatores AD, BD, AE, AF, BF, CD, CF, DE e DF. No entanto, apenas BD, BF, AE, AD e AF são consideradas significativas e, portanto, devem ser consideradas para a otimização da altura de submergência crítica.

Por meio da interação AD, percebe-se que a altura de submergência crítica é praticamente insensível à variação do número de furos presentes na válvula, quando existe simetria. Já quando a válvula é assimétrica, há uma variação maior, sendo que o melhor desempenho ocorre quando existem três furos na válvula.

Em relação à interação BD, existe um comportamento semelhante: quando a válvula é simétrica, a variação da altura de submergência crítica é pequena, seja a posição da válvula excêntrica ou centralizada. Quando a válvula é assimétrica, a variação é maior, sendo que a excêntrica apresenta melhor resultado.

A interação entre os fatores A e E também repetem o mesmo padrão: quando a válvula possui posição longitudinal 0/100%, seu desempenho apresenta pouca variação quanto ao número de furos presentes. Ao passo que, quando possui 0/50%, há uma variação maior, sendo a de menor altura de submergência crítica, a com três furos.

Já em relação à interação AF, quando o ângulo β tem valor de 5° , a altura de submergência crítica é nula, independentemente do número de furos presentes na válvula. Quando β é nulo, há uma variação maior com o número de furos, com a configuração com três furos apresentando o melhor resultado.

Analogamente, a interação entre os fatores B e F apresentam resultados semelhantes: quando β vale 5° , a altura de submergência crítica é nula, sendo insensível à posição da válvula. Já quando o ângulo β é nulo, o desempenho é melhor quando a válvula encontra-se na posição excêntrica.

Realizando uma análise global, levando em conta tanto a vazão volumétrica média, quanto à altura de submergência crítica, decidiu-se manter o fator B constante com valor positivo, ou seja, com configurações cuja posição da válvula seja excêntrica, por conta do melhor desempenho nas duas respostas estabelecidas, seja pelo efeito individual, seja em decorrência de suas interações.

O fator D foi considerado constante com valor negativo, ou seja, configurações com válvulas simétricas, posto que essas apresentaram, majoritariamente, desempenhos melhores, com exceção apenas à interação BD, quando o fator B assume valor positivo.

Ademais, outro fator mantido constante foi a variável E com valor negativo, isso é, com configurações de válvula cuja posição longitudinal seja 0%/100%, isto foi decorrente de seu efeito individual e interações com outros fatores.

Assim, com o objetivo de refinar a busca por uma configuração ideal em ambas as respostas, decidiu-se utilizar, nos próximos experimentos, os fatores A, C e F como variáveis e os demais constantes com os valores mencionados.

Aplicando a mesma metodologia utilizada anteriormente, os resultados obtidos reforçaram os anteriores. Ademais, em relação à massa restante de fluido após o final do processo, foi confirmado que o fator mais significativo para esse quesito foi a inclinação do fundo, conforme [7].

Com os resultados obtidos das simulações iniciais em CFD, apresentados na Figura 9, foi possível confirmar e compreender detalhadamente o comportamento do fluido com a introdução dos fatores estudados.

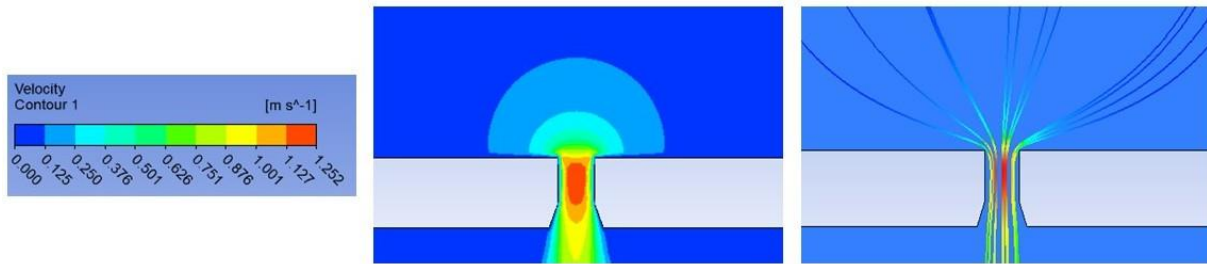


Figura 9. Resultados obtidos pelas simulações realizadas.

3 CONCLUSÃO

Os resultados avaliados por meio da metodologia de Planejamento de Experimentos, visando a validação de um modelo físico que represente a panela de aço líquido de uma indústria siderúrgica, com razão de escala 1:20 e com seus dispositivos de controle de vazão produzidos por meio de impressão 3D, indicaram que os fatores mais relevantes para o fenômeno são: número de furos do dispositivo, o ângulo de estrangulamento (diminuição da seção) e a inclinação do fundo da panela em relação à horizontal, obtidos por meio de uma regressão linear múltipla, com R^2 ajustado de 91,60%.

Assim, confirmou-se a constatação de [6] a respeito da minimização da formação de vórtices com a válvula em posição excêntrica.

Conclui-se também que, caso seja possível inclinar a panela de aço em um ângulo de 5° , a altura de submergência crítica é praticamente anulada, independentemente de como os demais fatores variem. Dessa forma, pode-se optar pela configuração com melhor desempenho em relação à vazão volumétrica média, ou seja, a utilizada como padrão na indústria: de furo único, com ângulo α reto.

Porém, caso não seja possível realizar a inclinação da panela de aço, com a válvula posicionada excêntrica, a configuração que minimiza a formação de vórtices com o melhor desempenho de vazão volumétrica média – 55% inferior a padrão – é a com válvula de três furos e ângulo α de 90° .

Se também não for possível posicionar a válvula na posição excêntrica, mas apenas na centralizada, a configuração que anula a altura de submergência crítica e possui o melhor desempenho para a vazão volumétrica média – 45% inferior à padrão – é a com três furos, assimétrica, com ângulo α de 90° e posição longitudinal 0%/100%.

Dessa forma, conclui-se que o fator mais significativo dentre os testados é a inclinação do fundo da panela em relação à horizontal, uma vez que, quando esse ângulo possui o valor de 5° , a formação de vórtice é praticamente anulada. Além disso, também há um aumento da vazão volumétrica média.

Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do CNPq pela bolsa concedida para a vigência 2018/2019 - projeto 2476.

REFERÊNCIAS

- 1 Souza AL. Adaptação da Válvula Superior da Panela de Aço para Minimização de Vórtices. Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2017.
- 2 Marques AIGC. Diagnóstico de um Defeito de Fundição: Aplicabilidade da Simulação Numérica em FLOWCast para Previsão e Resolução de Defeitos. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008 [Acesso em 05 ago. 2019]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58520/2/Texto%20integral.pdf>
- 3 Neto JC. Vórtices. Dissertação de Mestrado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1991.
- 4 Munson BR, Young DF, Okiishi TH. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Blucher. 2004.
- 5 Padmanabhan M, Hecker GE. Scale Effects in Pump Sump Models. Journal of Hydraulic Engineering. 1983; 110: 1540-1556.
- 6 Lima AAH. Desenvolvimento de um Dispositivo Anti-Vórtice para Tomada d'Água para Aumento da Eficiência de Usinas Hidrelétricas. Prêmio Jovem Cientista. 2013; 28: 39-42.
- 7 Mazzaferro GM. Experimental and Numerical Analysis of Ladle Teeming Process. Ironmaking & Steelmaking. 2004. 31(6): 503-508.
- 8 Montgomery DC. Design and Analysis of Experiments. Wiley. 1997.
- 9 ANSYS. ANSYS Fluent Theory Guide. Ansys Inc. 2013 [Acesso em 16 mai. 2019]. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/martoran/NotasModelosGrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>