

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUIS FILIPE FREITAS ALBERTINO

**IMPACTO DA PRESENÇA DE PARTICULADO NO ESCOAMENTO EM
VÁLVULAS TESLA**

**LONDRINA
2022**

LUIS FILIPE FREITAS ALBERTINO

**IMPACTO DA PRESENÇA DE PARTICULADO NO ESCOAMENTO EM
VÁLVULAS TESLA**

Impact of the presence of particulate matter on the flow of Tesla valves

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo

**LONDRINA
2022**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUIS FILIPE FREITAS ALBERTINO

**IMPACTO DA PRESENÇA DE PARTICULADO NO
ESCOAMENTO EM VÁLVULAS TESLA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 16/Novembro/2022

Ricardo de Vasconcelos Salvo
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ismael de Marchi Neto
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

RESUMO

Foi investigada a influência do particulado no escoamento em válvulas Tesla. A literatura atual cita a insensibilidade desse dispositivo ao particulado, entretanto não se encontram trabalhos corroborando tal hipótese, mesmo este sendo um dos parâmetros para escolha de tal modelo de válvula. Foram realizadas simulações numéricas, em duas dimensões, com modelo de válvula tesla já estudado na literatura. Investigou-se os efeitos do número de elementos da malha, utilização de modelo de turbulência $k-\omega$ SST e número de Reynolds 100, 200 e 400 com regime permanente. Utilizou-se regime transiente, modelo de turbulência $k-\omega$ SST e os números de Reynolds anteriores em simulações com porcentagens volumétricas de particulado entre 0 e aproximadamente 10%. Foi observado efeito positivo na diodicidade, importante parâmetro para avaliação da performance de válvulas passivas segundo a literatura, que, em geral, aumento conforme o aumento de porcentagem volumétrica de particulado. O particulado mostra-se como uma possível nova variável para otimização e escolha de válvulas Tesla, sendo necessários novos estudos avaliando a influência de características individualizadas do particulado tais como: densidade, tamanho e formato.

Palavras-chave: válvula; Tesla; particulado; diodicidade

ABSTRACT

The influence of particulate matter on the flow on Tesla valves was investigated. The current literature cites the insensibility of this device to particulate matter, however, literature corroborating that assertion was not found even though it was a parameter for choosing such valve. Two dimensional numeric simulations were made using a Tesla valve model already studied by the literature. The effects of the number of elements in the mesh, utilization of $k-\omega$ SST turbulence model and Reynolds numbers 100, 200 and 400 with steady state flow regime. Transient state, $k-\omega$ SST turbulence model, and the same Reynolds numbers were used in simulations with volumetric percentage of particulate matter between 0 and approximately 10% were used to evaluate the influence of the particulate matter. It was observed a positive effect on diodicity, an important parameter for the evaluation of the performance of passive valves as found on the literature, that, in general, grew with the growth of the particulate matter volumetric percentage. The particulate matter shows itself as a possible new variable for the optimization and choosing of Tesla Valves. New Studies are necessary to evaluate the influence of the individualized characteristics of the particulate matter such as: density, size, and shape.

Keywords: valve; Tesla; particulate; diodicity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho de válvula Tesla presente na patente original.	8
Figura 2 - Trocador de calor pulsátil.....	9
Figura 3 - Microbomba de deslocamento recíproco com válvulas tesla em acrílico.....	9
Figura 4 - Geometria de uma válvula Tesla típica.	15
Figura 5 - Arranjo de válvulas tesla com geometria não compreendida pela metodologia de construção.....	15
Figura 6 - Diodicidade vs. número de válvulas Tesla (N) para vários números de Reynolds com distância entre válvulas fixa.	17
Figura 7 - Diodicidade vs. distância adimensional entre válvulas para 6 válvulas em série com vários números de Reynolds.....	18
Figura 8 - Malha computacional de uma microbomba de baixa frequência.....	20
Figura 9 - Válvula tesla acoplada a meia taça.....	21
Figura 10 - Malha utilizada em um estudo de válvulas Tesla.	22
Figura 11 - Sistema utilizado para avaliação de modelos de turbulência.	23
Figura 12 - Modelo de válvula utilizado para simulação, com divisões de regiões para criação de malha aparentes na figura.	24
Figura 13 - Malha de 31.770 elementos utilizada para as simulações.	25
Figura 14 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400; regime permanente; campo de velocidades.....	29
Figura 15 - Fluxo Reverso; número de Reynolds 400; Regime permanente; campo de velocidades.	29
Figura 16 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; Regime permanente; campo de pressão.	30
Figura 17 - Fluxo Reverso; número de Reynolds 400; regime permanente; campo de pressão.....	30
Figura 18 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400; regime permanente; vetores de velocidade.....	31
Figura 19 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400, regime permanente; vetores de velocidade.....	31
Figura 20 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400; regime permanente; vetores de velocidade; foco em refluxo.	32
Figura 21 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; regime permanente; vetores de velocidade; foco em refluxo.	32
Figura 22 - Vetor velocidade; sentido reverso; número de Reynolds desconhecido.	33
Figura 23 - Comparação entre diodicidade calculada (CFD) e experimental (EXP) para a geometria otimizada (opt) e referência (ref).....	34
Figura 24 - Campo de pressão total para regime transiente; número de Reynolds 200; sentido reverso; escala adimensional. Porcentagem de particulado em volume: (A) - 0%; (B) - 2,47%; (C) - 4,95%; (D) - 9,91%.....	37
Figura 25 - Campo de pressão total para regime transiente; número de Reynolds 200; sentido frontal; escala adimensional. Porcentagem de particulado em volume: (A) - 0%; (B) - 2,47%; (C) - 4,95%; (D) - 9,91%.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	11
3	JUSTIFICATIVA	12
4	REVISÃO BIBIOGRÁFICA	13
4.1	Escoamento	13
4.1.1	Equação da quantidade de movimento	14
4.2	Geometria	15
4.3	Diodicidade	16
4.3.1	Mecanismos da diodicidade em válvulas Tesla.....	16
4.3.2	Parâmetros relevantes para a diodicidade	17
4.3.3	Valores típicos para válvulas Tesla	18
4.4	Modelos de turbulência	19
4.5	Malha computacional	20
4.5.1	Microbomba de baixa frequência.....	20
4.5.2	Melhoramento na performance de microbomba com otimização de forma de válvula	21
4.5.3	Estudo sobre mecanismo de diodicidade em válvulas Tesla	21
4.5.4	Investigação numérica de válvulas tesla multiestágio	22
4.5.5	Modelamento de fluxo transicional e turbulento em uma válvula Tesla....	22
5	METODOLOGIA	24
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
6.1	Regime permanente	27
6.1.1	Validação dos resultados	28
6.2	Regime transiente	35
6.2.1	Variação da diodicidade	36
6.2.2	Análise dos campos de pressão total	36
7	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	40
	APÊNCICE A – Figuras representativas dos campos de velocidade e pressão	43

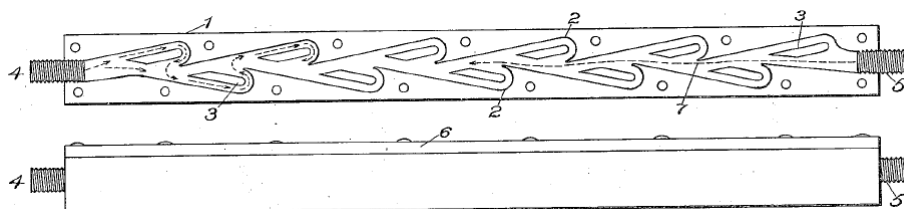
1 INTRODUÇÃO

Válvulas são dispositivos com a função de movimentar, parar ou regular a circulação de líquidos ou gases. Esse tipo de dispositivo permite a utilização de uma série de aparelhos essenciais para a vida cotidiana, dos quais vão desde uma simples torneira até válvulas de admissão de motores à combustão interna.

Para algumas aplicações é necessário, ou mais economicamente viável, a utilização de diminutas quantidades de fluido, esses sistemas são denominados sistemas micro fluídicos. Para essas aplicações são utilizadas as chamadas micro válvulas, que são válvulas geralmente menores que 10 milímetros nas dimensões externas. Tais componentes são geralmente utilizados na área biomédica, entrega de fármacos, selamento de biomoléculas, micro ou nano partículas, óleos, água, bolhas de gases, dentre outros (KWANG; CHONG, 2006).

Existem diversos tipos de microválvulas, cada uma com diferentes características para diferentes aplicações. Não há, atualmente, microválvula com boa performance em todas as possíveis métricas relevantes para esse tipo de componente, sendo necessário o comprometimento das características menos importantes (KWANG; CHONG, 2006).

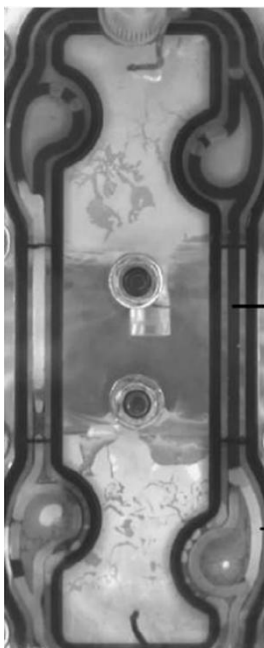
Figura 1 - Desenho de válvula Tesla presente na patente original.



Fonte: Adaptado de Tesla (1920).

As válvulas Tesla, cuja primeira representante aparece na Figura 1, são um tipo de válvula passiva sem partes móveis que apresentam diodicidade, ou seja, apresentam diferentes quedas de pressão a depender do sentido do fluxo. Esse tipo de válvula vem sendo estudada, e utilizada, para diversos tipos de aplicação tais como aumento de estabilidade no fluxo de CO₂ supercrítico (WAHIDI *et al.*, 2021), descompressão de hidrogênio (QIAN *et al.*, 2019), dissipadores de calor pulsáteis (VRIES *et al.*, 2017), representado na Figura 2, e microbombas de deslocamento recíproco (GAMBOA *et al.*, 2006), Figura 3.

Figura 2 - Trocador de calor pulsátil.



Fonte: Vries *et al.* (2017).

Figura 3 – Microbomba de deslocamento recíproco com válvulas tesla em acrílico.



Fonte: Gamboa *et al.* (2005).

Uma das vantagens desse tipo de válvula é uma suposta insensibilidade a presença de particulado ou de diferentes fases. A presença de fluxo no sentido reverso ao desejado apresenta-se como uma das desvantagens. Apesar de sua patente datar de 1920 (TESLA, 1920), estudos mais aprofundados sobre o

mecanismo de funcionamento e otimização do dispositivo surgem apenas recentemente.

2 OBJETIVOS

O presente estudo objetiva a verificação do impacto da presença de particulado sólido no comportamento do escoamento em válvulas Tesla. Para isso, são realizados estudos bidimensionais com base na Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) utilizando a formulação Euleriana para a fase contínua, composta pelo fluido, e a formulação Lagrangiana para a fase dispersa, determinada pelas partículas.

Como objetivos secundários, destacam-se:

- Modelar numericamente a válvula de Tesla com os parâmetros dados por Gamboa *et al.* (2005)
- Simular um arranjo de válvulas com esse modelo de forma similar ao utilizado por Gamboa *et al.* (2005)
- Realizar a validação dos resultados numéricos perante dados experimentais de Gamboa *et al.* (2015)

3 JUSTIFICATIVA

Uma afirmação que comumente aparece na literatura sobre as válvulas Tesla é a característica de conseguir operar com particulado de ordem de grandeza semelhante à do canal (KWANG; CHONG, 2006). Entretanto, contra intuitivamente, o autor não conseguiu encontrar nenhuma simulação ou estudo sobre a influência de particulado sólido na operação desse tipo de válvula.

A utilização do dispositivo em questão, em fluidos contendo impurezas, pode, possivelmente, ter impacto na performance do mesmo. Sem estudos iniciais avaliando, mesmo que tangencialmente, tais possibilidades, não haverá progresso nessa área, possivelmente negligenciando um fator importante para a otimização e seleção desse tipo de válvula.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada a base teórica para o estudo realizado que compreende os tipos de escoamento, geometria das válvulas Tesla, diodicidade, presença de particulado no escoamento, modelos de turbulência e independência de malha.

4.1 Escoamento

Existem ao menos quatro formas de se classificar o escoamento sendo elas relativas à viscosidade, compressibilidade, característica do movimento e onde corre o escoamento (FOX *et al.*, 2018).

A primeira delas, a viscosidade, está ligada as forças internas do fluido e a sua resistência ao cisalhamento de tal forma que a maioria dos fluidos obedecem a seguinte, Eq. (1), correlação:

$$\mu = \frac{\tau_{xy}}{\frac{du}{dy}} \quad (1)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica [N.s/m²], τ_{xy} é a tensão de cisalhamento [N/m²] no plano xy e $\frac{du}{dy}$ é a taxa de variação da velocidade no eixo x com relação a y (FOX *et al.*, 2018).

A compressibilidade é a capacidade do fluido mudar de volume quando submetido a uma determinada pressão. Água, assim como grande gama de líquidos, sofre pequena mudança de densidade devido a aplicação de pressões externas. Entre as pressões de 10Mpa e 50Mpa ocorre uma variação volumétrica inferior a 2% para a água líquida a 20°C (BORGNAKKE; SONNTAG, 2018).

O movimento do fluido depende da razão entre as forças viscosas e inerciais, conhecida pelo número de Reynolds Eq. (2), e, junto com a geometria, determina se o fluxo em questão é laminar ou turbulento. No fluxo laminar há a prevalência dos efeitos viscosos, enquanto no turbulento predominam os inerciais (FOX *et al.*, 2018). De tais efeitos resultam o característico movimento organizado do fluxo laminar e o movimento caótico do fluxo turbulento.

$$Re = \rho \frac{VD_h}{\mu} \quad (2)$$

Onde Re é o número de Reynolds, adimensional, ρ é a densidade, dada em $[\text{kg}/\text{m}^3]$, V a velocidade do fluxo, dada em $[\text{m}/\text{s}]$, e D_h o diâmetro hidráulico em metros.

O diâmetro hidráulico é utilizado para correlacionar dutos não circulares e as correlações empíricas utilizadas para tubos (circulares) e pode ser utilizado desde que as seções transversais não sejam demasiadamente grandes (FOX *et al.*, 2018). O diâmetro hidráulico é dado pela Eq. (3):

$$D_h = \frac{4A}{P}, \quad (3)$$

onde A representa a área da seção transversal, dada em $[\text{m}^2]$, e P é o perímetro em metros.

4.1.1 Equação da quantidade de movimento

A equação da quantidade de movimento, também conhecida como equação de Navier-Stokes, Eq.(4), pode ser deduzida a partir da aplicação da primeira lei de Newton a uma partícula infinitesimal com as premissas de fluido Newtoniano. Tal equação descreve uma grande gama de problemas envolvendo o escoamento, porem a sua natureza diferencial, parcial e não linear impedem sua resolução analítica, exceto nos mais simples dos casos (FOX *et al.*, 2018).

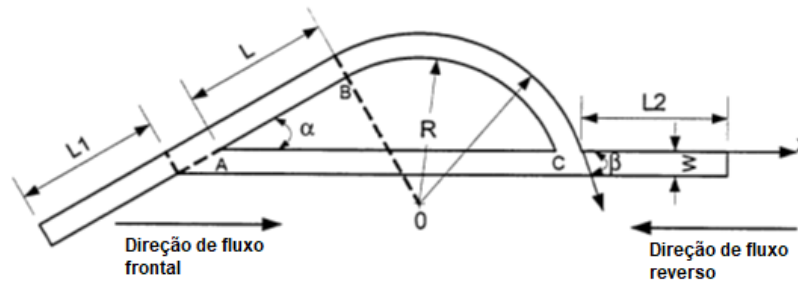
$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde u , v e w são componentes da velocidade V nas direções x , y e z respectivamente, $\frac{\partial p}{\partial i}$ é a taxa de variação da pressão referente a coordenada i em $[\text{Pa}/\text{m}]$, g_i é a aceleração gravitacional na coordenada i , dada em $[\text{m}/\text{s}^2]$ e t é o tempo em segundos.

4.2 Geometria

Em um dos primeiros estudos na área, segundo os próprios autores, Nguyen e Truong (2003) propõem um método de construção para as válvulas tesla que utiliza 6 variáveis independentes, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Geometria de uma válvula Tesla típica.

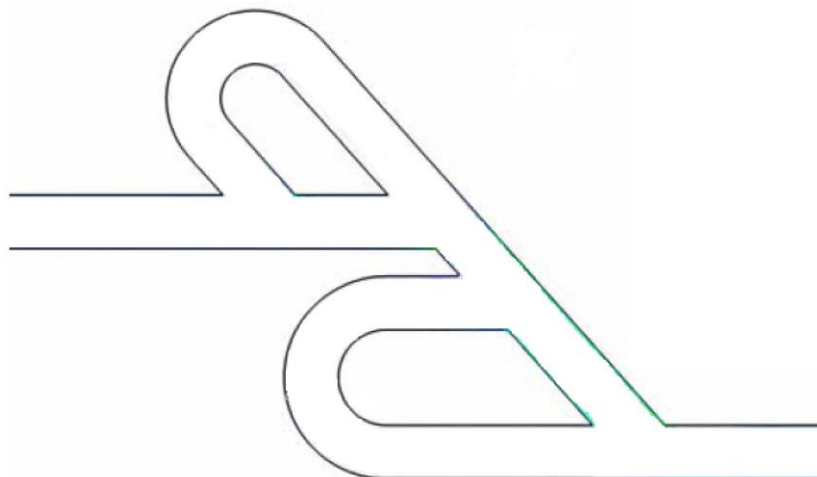


Fonte: Nguyen e Truong (2003), tradução minha.

Onde W é a largura do canal, comprimento de entrada L_1 , comprimento de saída L_2 , ângulo α , raio R e comprimento reto L . A variável faltante na figura é a profundidade do canal P . O ângulo β depende das outras variáveis.

Algumas geometrias, como a da Figura 5, não são abarcadas por tal metodologia.

Figura 5 - Arranjo de válvulas tesla com geometria não compreendida pela metodologia de construção.



Fonte: Adaptado de Anagnostopoulos e Mathioulakis (2020).

4.3 Diodicidade

A diodicidade D_i , dada na Eq. (5), é a razão adimensional entre a queda de pressão no sentido reverso Δp_r sobre a queda de pressão no sentido frontal Δp_f .

$$D_i = \frac{\Delta p_r}{\Delta p_f} \quad (5)$$

Segundo Forster *et al.* (1995), esse é o parâmetro mais importante para a avaliação da performance de válvulas sem partes móveis e geralmente é função do fluxo.

4.3.1 Mecanismos da diodicidade em válvulas Tesla

Atualmente, não existe consenso sobre qual o mecanismo gerador da diodicidade. Gamboa *et al.* (2005), encontrou diferença significativa entre o valor obtido numericamente, para modelo 2D em regime permanente, se comparado com o medido de forma experimental. Atribuiu-se esse fenômeno a uma possível vorticidade fora do plano. Entretanto, a existência de erro mesmo a baixos Re , inferior a 500, não seria explicado por tal hipótese.

Nguyen *et al.* (2021) sugere uma ligação entre escoamento turbulento e diodicidade. Tal fato é evidenciado pelo súbito aparecimento da diodicidade no mesmo estado em que a queda de pressão para de depender linearmente do número de Reynolds, por volta de Re igual a 100. Uma mudança de regime com baixo Re contribui para a hipótese de Gamboa *et al.* (2005).

A diodicidade também parece ser amplificada por fluxos pulsáteis. No estudo de Nguyen *et al.* (2021) construiu-se uma ponte retificadora, como seria feito para correntes elétricas, ao se utilizar as válvulas tesla analogamente a tiristores. O resultado foi um circuito de fluxo contínuo menos variável quanto mais pulsátil, maior intensidade e frequência, fosse o fluxo alternado.

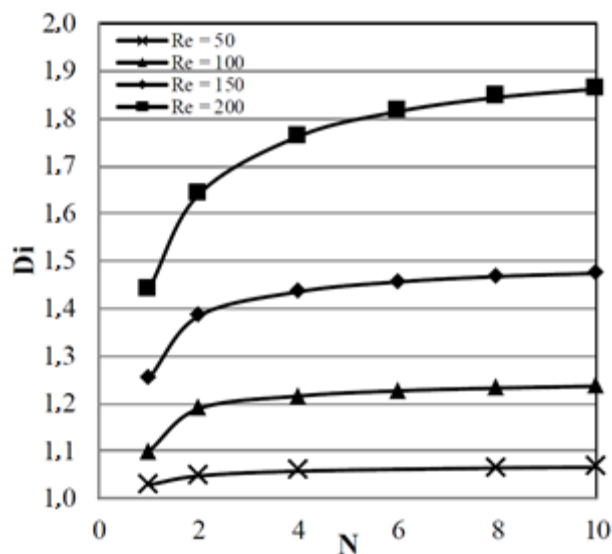
Em um sentido oposto ao já dito, Deng *et al.* (2010), por meio de otimização topológica, encontra uma geometria de válvula Tesla que tem diodicidade apreciável já com Re pouco a cima da unidade. O design em questão apresenta um aumento de performance até Re 100 – 200 e depois uma queda, o que não é usual, todos os outros estudos referenciados neste trabalho, que dispõe sobre o tema, apresentam

um crescimento monótono da diodicidade com Re . Infelizmente esse estudo não apresenta uma análise do campo de velocidade, do fator de atrito, ou outra variável que pudesse fornecer algum esclarecimento sobre o mecanismo gerador da diodicidade nesse caso com Re tão baixo. Vale ressaltar que Deng *et al.* (2010) confirmaram a diferença de queda de pressão experimentalmente para a geometria otimizada.

4.3.2 Parâmetros relevantes para a diodicidade

Thompson *et al.* (2013a) demonstra que dois parâmetros relevantes para o aumento da diodicidade são o número de válvulas empregadas em série N e a distância entre válvulas l , demonstrando haver grandes ganhos na utilização de 2 a 4 dispositivos em série, com ganhos pouco expressivos a partir desse número, o que pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Diodicidade vs. número de válvulas Tesla (N) para vários números de Reynolds com distância entre válvulas fixa.

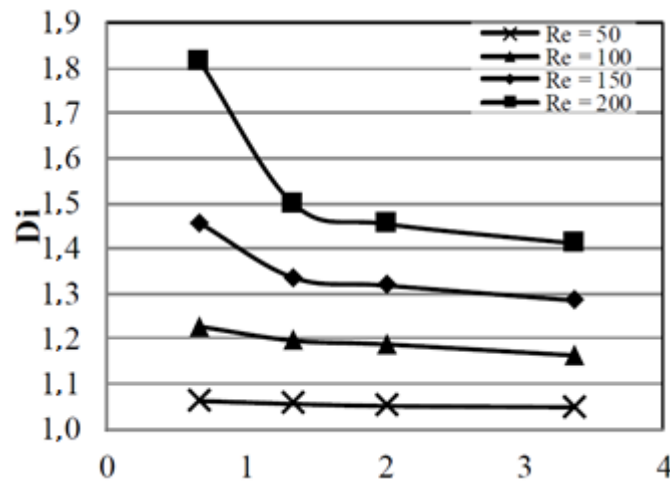


Fonte: Thompson *et al.* (2013a).

Há também a diminuição do parâmetro de performance com o aumento da distância adimensional G entre válvulas, ilustrado pela Figura 7, onde G é dado pela Eq. (6):

$$G = \frac{l}{D_h} \quad (6)$$

Figura 7 - Diodicidade vs. distância adimensional entre válvulas para 6 válvulas em série com vários números de Reynolds.



Fonte: Thompson *et al.* (2013a).

Nguyen e Truong (2003) encontraram equações de valores ótimos para α e $\frac{R}{W}$ que eram dependentes do número de Reynolds, evidenciando uma dependência de R_e para a geometria ótima. Assim, a otimização deve ser realizada para um dado número de Reynolds específico, não havendo geometria ótima para uma grande variação de R_e .

4.3.3 Valores típicos para válvulas tesla

Diodicidades máximas entre 1,1 e 1,8 foram obtidas com número de Reynolds entre 181 e 543, respectivamente, por Nguyen e Truong (2003).

Anagnostopoulos e Mathioulakis (2020) conseguiram alcançar diodicidade de 2,36 com um conjunto de duas válvulas não idênticas conforme ilustrado na Figura 6 com número de Reynolds cerca de 120.

Nobakht *et al.* (2013) simularam numericamente alguns modelos de válvulas fabricados pela *Stanford Nanofabrication Facility* e, variando diferença de pressão entre 0,1 atm e 0,9 atm com número de Reynolds pouco a cima de 500, obtendo diodicidades entre 1,099 e 1,29. Nesse estudo, diferentemente dos anteriores, a entrada e saída de fluido na válvula por um plenum em formato de taça foi simulada. Os autores indicaram que, removida as perdas de carga na entrada e na saída, seria possível aumentar, aproximadamente, a razão de perda de pressão de 1,2 para 2.

4.4 Modelos de turbulência

Modelos de turbulência são modelos matemáticos utilizados para diminuir a capacidade computacional requerida para a solução de um dado sistema. A simulação numérica de fluxos turbulentos não costuma ser acuradamente representada pelas equações de Navier-Stokes a não ser que a malha computacional seja suficientemente pequena para resolver todas as escalas de turbulência.

Davidson (2003) demonstra a matemática por trás de uma grande gama de modelos utilizados atualmente, essa matemática será omitida neste trabalho sendo citado apenas alguns aspectos importantes de modelos relevantes para este trabalho.

Dois modelos comumente utilizados atualmente são os modelos k - ε e k - ω , tais modelos resolvem o sistema de equações para novas variáveis. Enquanto ambos resolvem uma equação adicional uma energia cinética turbulenta k , o modelo k - ε trabalha também com a taxa de dissipação dessa energia ε , enquanto que o modelo k - ω utiliza a taxa de dissipação específica da mesma ω .

Segundo Frei (2017), o modelo k - ε tem rápida convergência e baixo requerimento computacional, mas não apresenta bons resultados para grandes gradientes de pressão, já o modelo k - ω tem resultados melhores nessas condições, porem tem convergência mais difícil.

Ainda segundo o mesmo autor, o modelo k - ω SST é uma combinação dos modelos k - ω e k - ε que consegue eliminar algumas de suas fraquezas.

4.5 Malha computacional

Formato, distribuição e quantidade de elementos computacionais, aos quais são aplicadas as equações que governam o sistema estudado, podem ter influência tanto na convergência da solução, como nos próprios valores da mesma.

Avaliações de formato e distribuição podem ser complexas devido a grande quantidade de possibilidades envolvidas, enquanto a avaliação do número de elementos é unidimensional. Nesta subsecção constam alguns exemplos de simulações numéricas de válvulas Tesla, com respectivos números de elementos, presentes na literatura.

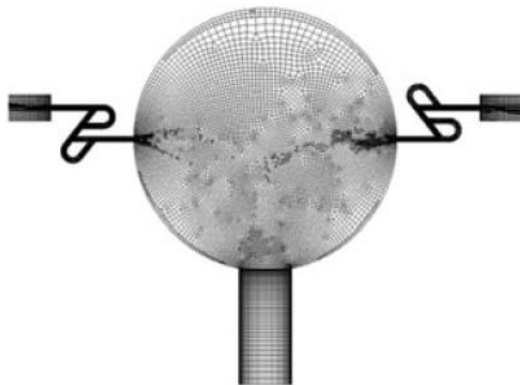
É importante acrescentar que os estudos aqui citados não explicitam se o número de elementos é apenas para as válvulas ou para todo o conjunto.

4.5.1 Microbomba de baixa frequência

Mohammadzadeh *et al.* (2013), em um estudo da performance de válvulas Tesla em uma microbomba recíproca com baixas frequências, utilizou 600.041 células para obter seus resultados. Foi utilizado um modelo tridimensional, transiente, propriedades do fluido constantes e o fluxo foi assumido como laminar.

Foram simulados o pistão utilizado para bombeamento, um plenum central e quadro válvulas tesla, sendo duas anteriores ao plenum e duas posteriores, assim como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 - Malha computacional de uma microbomba de baixa frequência.

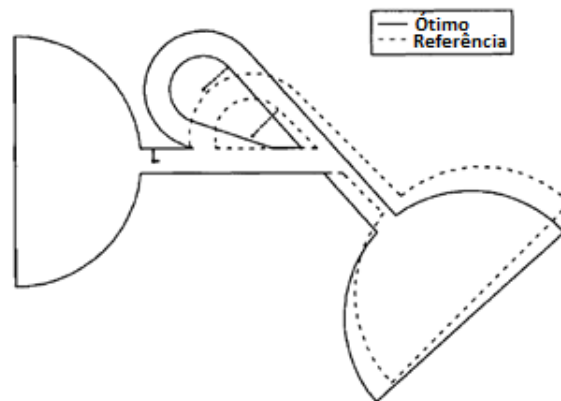


Fonte: Mohammadzadeh *et al.* (2013).

4.5.2 Melhoramento na performance de microbomba com otimização de forma de válvula

Gamboa *et al.* (2005) realizaram simulações numéricas e otimização de válvulas tesla acopladas a meias taça na entrada e saída conforme a Figura 9.

Figura 9 - Válvula tesla acoplada a meia taça.



Fonte: Gamboa *et al.* (2005), tradução minha.

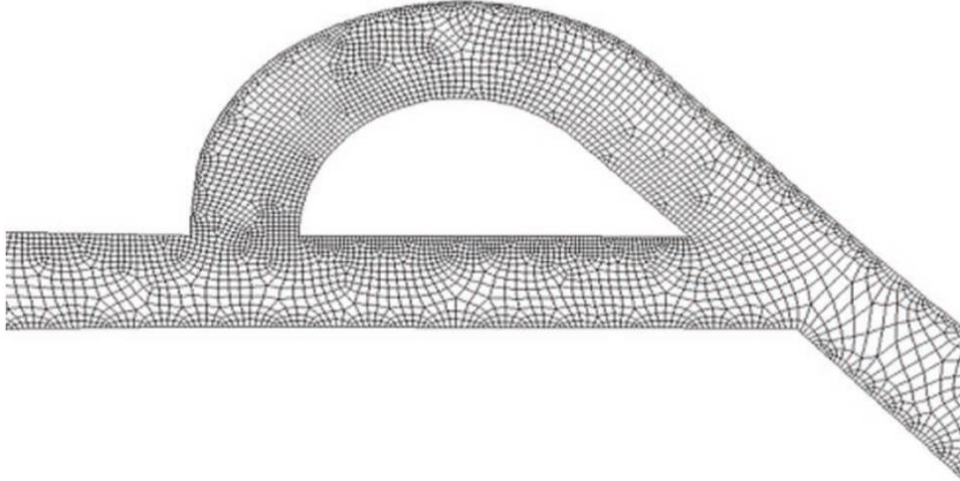
O estudo reporta malhas entre 7.000 e 10.000 elementos com a utilização das equações de Navier-Stokes em formato bidimensional, incompressível e em regime permanente. A independência de malha foi obtida ao se dobrar o número de elementos computacionais e o erro da solução foi calculado como inferior a 4%. Foram averiguadas soluções para números de Reynolds entre 0 e 200.

4.5.3 Estudo sobre mecanismo de diodicidade em válvulas Tesla

Nobakht *et al.* (2013) utilizaram entre 324.562 e 475.592 elementos para determinação do fluxo em um modelo tridimensional, laminar, em regime permanente, isotérmico, incompressível e com propriedades constantes utilizando as equações de quantidade de movimento. A independência de malha foi verificada pelo aumento de cerca de 20% no número de elementos e com erro próximo a 5%.

Foram utilizados vários modelos de válvulas diferentes com números de Reynolds entre cerca de 200 e 700. A malha de uma das geometrias utilizadas pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 - Malha utilizada em um estudo de válvulas Tesla.



Fonte: Nobakht *et al.* (2013).

4.5.4 Investigação numérica de válvulas Tesla multiestágio

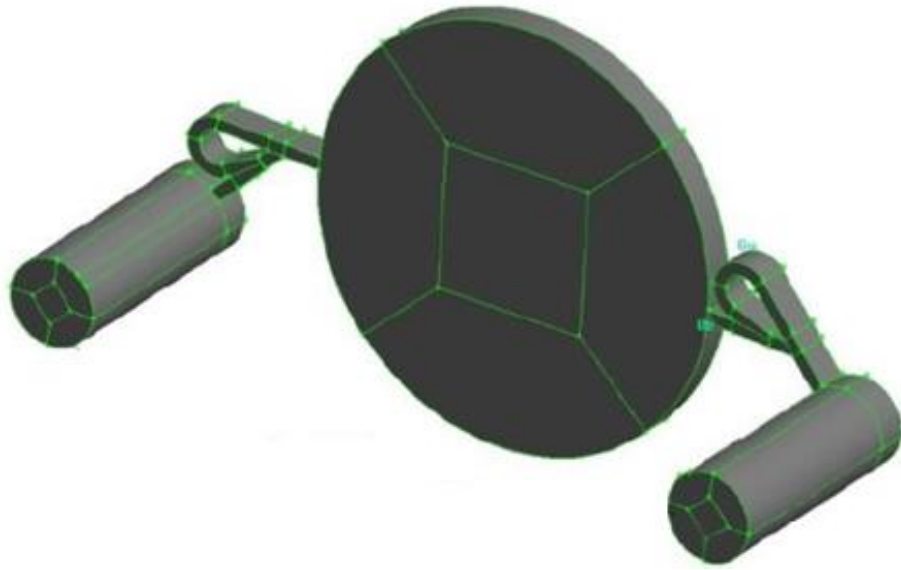
Thompson *et al.* (2013a) utilizou cerca de 400mil elementos para cada válvula tesla em um modelo tridimensional e 40mil para o modelo bidimensional. Os testes de independência de malha foram realizados com número de Reynolds igual a 300. A diodicidade teve variação inferior a 0,2% para as malhas avaliadas.

Para a solução foram utilizadas as equações de Navier-Stokes com propriedades de fluido constante, incompressível e regime permanente quando possível. Algumas soluções não convergiram quando o número de Reynolds foi superior a cerca de 500, atribuiu-se o fato a regiões de fluxo transicional na válvula, nessas ocasiões foi utilizado o modelo transiente.

4.5.5 Modelamento de fluxo transicional e turbulento em uma válvula Tesla

Thompson *et al.* (2013b) utilizaram uma malha composta de cerca de 3,3 milhões de elementos computacionais para descrever o comportamento do fluxo no sistema da Figura 11.

Figura 11 - Sistema utilizado para avaliação de modelos de turbulência.



Fonte: Adaptado de Thompson *et al.*, 2013b.

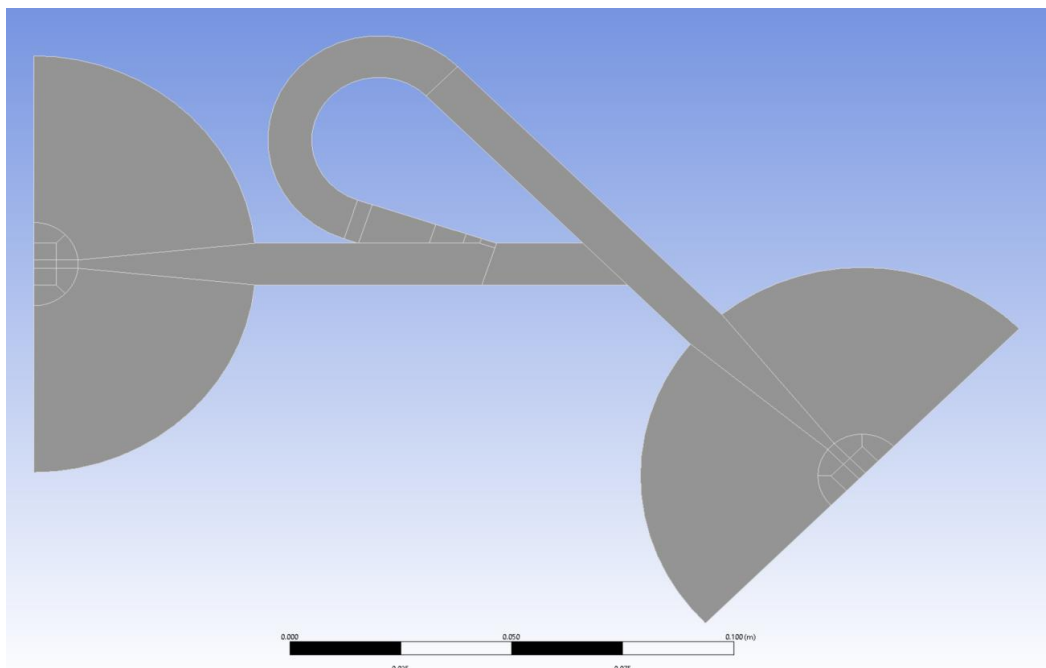
Foi utilizado um modelo tridimensional, fluido com propriedades constantes e incompressível. Os autores relatam terem tentado utilizar regime permanente mas o mesmo não convergiu.

Nesse trabalho foram avaliados os modelos de turbulência $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST e $k-k_l-k\omega$. Os modelos $k-\omega$ SST e $k-k_l-k\omega$ apresentaram diodicidades similares, próximas a 2, enquanto o modelo K-E apresentou grande discrepância com os modelos anteriores, diodicidade próxima a 1,5. A comparação com um modelo experimental encontrou erros maiores de $k-\varepsilon$ quando comparado aos outros modelos.

5 METODOLOGIA

Por meio dos parâmetros relevantes, tais como descritos na Figura 3, e figuras presentes em Gamboa *et al.* (2005), foi possível reproduzir virtualmente o modelo de válvula otimizado por tal autor, conforme pode ser visto na Figura 19. O Software utilizado foi o SpaceClaim. m diferença apreciável com o outro modelo ou número de elementos.

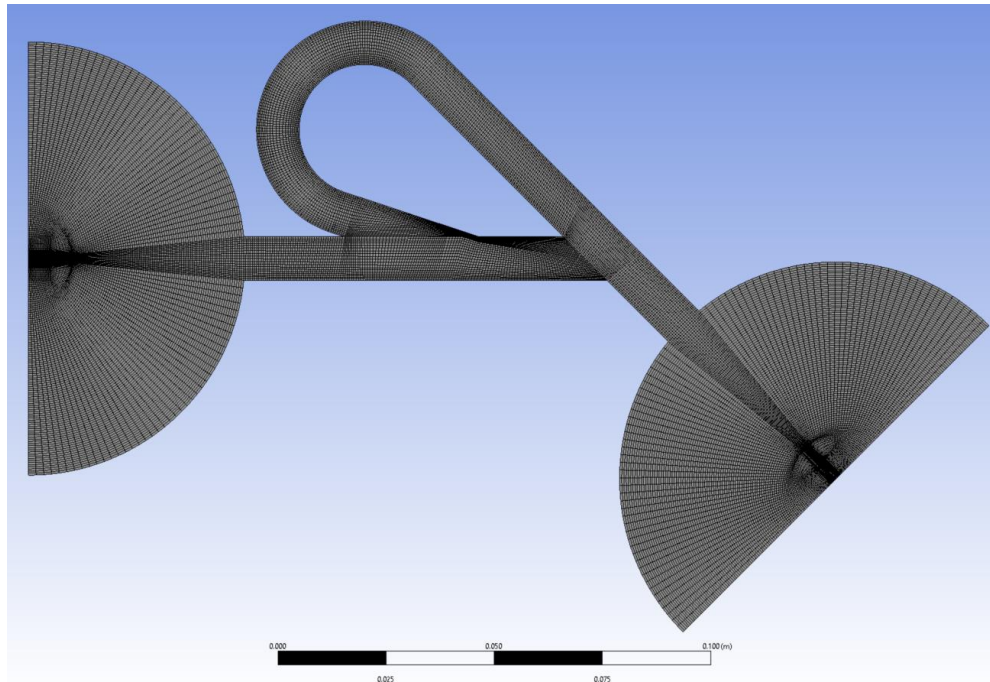
Figura 12 - Modelo de válvula utilizado para simulação, com divisões de regiões para criação de malha aparentes na figura.



Fonte: Próprio autor (2022).

A partir da geometria anterior foram criadas malhas 2D com 31.770, Figura 12, e 70.174 elementos, as quais foram utilizadas para avaliação da independência da solução com a malha utilizada.

Figura 13 - Malha de 31.770 elementos utilizada para as simulações.



Fonte: Próprio autor (2022).

A malha anterior foi então utilizada no software ANSYS Fluent. As condições de contorno foram definidas como pressão nula na saída, não escorregamento nas paredes e entrada de velocidade conforme o necessário para obter os números de Reynolds 100, 200 e 400, as quais foram de 0,0010048, 0,0020096 e 0,0040192 [m/s], respectivamente. É importante notar que, devido a região de entrada ter dez vezes o tamanho dos canais da válvula utilizado, a velocidade de entrada é dez vezes menor que a velocidade média na entrada válvula. O diâmetro da região de entrada foi de 100 milímetros.

A densidade utilizada para o fluido foi de 998,2 [kg/m³] e sua viscosidade foi de 0,001003 [kg/m.s], parâmetros encontrados na biblioteca do Fluent para água líquida.

Para os modelos do Fluent, utilizados na primeira fase do estudo, a de validação, foi utilizado o modelo $k-\omega$ SST e o laminar, os quais foram comparados para verificar possíveis influências do modelo de turbulência. O modelo de regime permanente foi utilizado nessa fase do trabalho assim como em Gamboa *et al.* (2005) e foram adotados residuais em 10^{-5} para todos os casos.

Foram então realizadas 24 simulações, variando o número de Reynolds, entrada e saída, modelo de turbulência e quantidade de elementos. Para a

independência de malha realizou-se a comparação das quedas de pressão entre as regiões de entrada e saída e diodicidade entre as duas malhas utilizadas. As diodicidades foram comparadas com as obtidas numericamente e experimentalmente por Gamboa *et al.* (2005).

Após a validação foi realizada a simulação da mesma geometria e condições de contorno, mas, desta vez, utilizando regime transiente, malha de 30.170 elementos, modelo $k-\omega$ SST, injeção de particulado inerte com interação com a fase contínua, atualização das fontes de particulado em toda iteração, *unsteady particle tracking* e *tracking* com o passo de tempo do fluido, cujos valores foram de 0,024, 0,012 e 0,006 [s] para números de Reynolds 100, 200 e 400 respectivamente. Além disso, as simulações em regime transiente tiveram todos os residuais definidos em 10^{-4} e número máximo de iterações por passo de tempo em 80.

Foi realizada a injeção de particulado durante toda a simulação, em cada passo de tempo as partículas foram inseridas na entrada de velocidade, em posições aleatórias, de forma a respeitar as razões volumétricas desejadas, essas partículas tinham 0,195 [mm] de diâmetro e densidade 2648 [kg/m³]. Tal densidade foi escolhida por ser igual à do quartzo-alfa, Varga *et al.* (2015), um dos elementos da composição da areia. Foram realizados testes com razões volumétricas de entrada de particulado em aproximadamente 0, 2,4768%, 4,9537% e 9,9074% para cada um dos números de Reynolds e sentidos da válvula, totalizando 24 simulações. Essas vazões volumétricas foram escolhidas para que exatamente 0, 2, 4 e 8 partículas, respectivamente, fossem inseridas na simulação por passo de tempo.

As diodicidades e os campos de pressão das simulações com particulado foram então comparadas com as diodicidades encontradas nas simulações sem particulado.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção encontram-se os resultados obtidos pela aplicação da metodologia descrita na seção anterior. Os resultados discordam dados fornecidos por Gamboa *et al.* (2005), entretanto os motivos possíveis para tais discrepâncias são apresentados.

Também foi possível verificar que a utilização do modelo de turbulência $k-\omega$ SST tem influência inferior à aproximadamente 2% no pior dos casos testados para tal variação, de forma que seu uso é preferível devido a maior velocidade de convergência de resultados.

O efeito do particulado é discutido e ganhos de performance de até aproximadamente 25% e 141% na diodicidade e diodicidade efetiva, respectivamente, são apresentados. Esse último parâmetro, a diodicidade efetiva, será introduzido junto com sua justificativa de utilização em detrimento à diodicidade.

6.1 Regime permanente

Os resultados das simulações em regime permanente geraram os dados que constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Independência de malha e influência de modelo de turbulência.

Reynolds	Modelo	Elementos	Pressão F (Pa)	Pressão R (Pa)	Diodicidade	Varição Pressao F	Varição Pressao R	Varição Diodicidade	Varição Modelo
100	k-w-SST	70174	0,2043	0,2102	1,029	-0,445%	-0,281%	0,165%	-0,049%
		31770	0,2034	0,2096	1,030				
	Laminar	70174	0,2045	0,2105	1,029	-0,440%	-0,203%	0,238%	
		35000	0,2036	0,2101	1,032				
200	k-w-SST	70174	0,6112	0,7393	1,210	-0,022%	-0,158%	-0,136%	-0,268%
		31770	0,6111	0,7382	1,208				
	Laminar	70174	0,6115	0,7416	1,213	0,050%	-0,018%	-0,068%	
		31770	0,6118	0,7415	1,212				
400	k-w-SST	70174	2,089	3,877	1,856	1,283%	1,443%	0,158%	-0,814%
		31770	2,115	3,933	1,859				
	Laminar	70174	2,089	3,910	1,872	1,198%	2,117%	0,908%	
		31770	2,114	3,993	1,889				

Fonte: Próprio autor (2022).

O cálculo das variações foi obtido utilizando a Eq. (7):

$$Var = \frac{Val_c - Val_r}{Val_r} \quad (7)$$

Onde Var é a variação, que pode ser da pressão F, pressão R, diodicidade ou do modelo, onde pressão F se refere ao sentido frontal e R ao sentido reverso, Val_c é o valor a ser comparado, e Val_r é a variável de referência. Destaca-se ainda que Val_c é referente aos valores com 31.770 elementos para todas as variações, exceto a variação do modelo, o qual compara os efeitos de 70.174 elementos para diferentes modelos com o mesmo número de Reynolds e Val_r refere-se aos valores para 70.174 elementos, sendo que na variação de modelo o modelo laminar com 70.174 elementos é a referência.

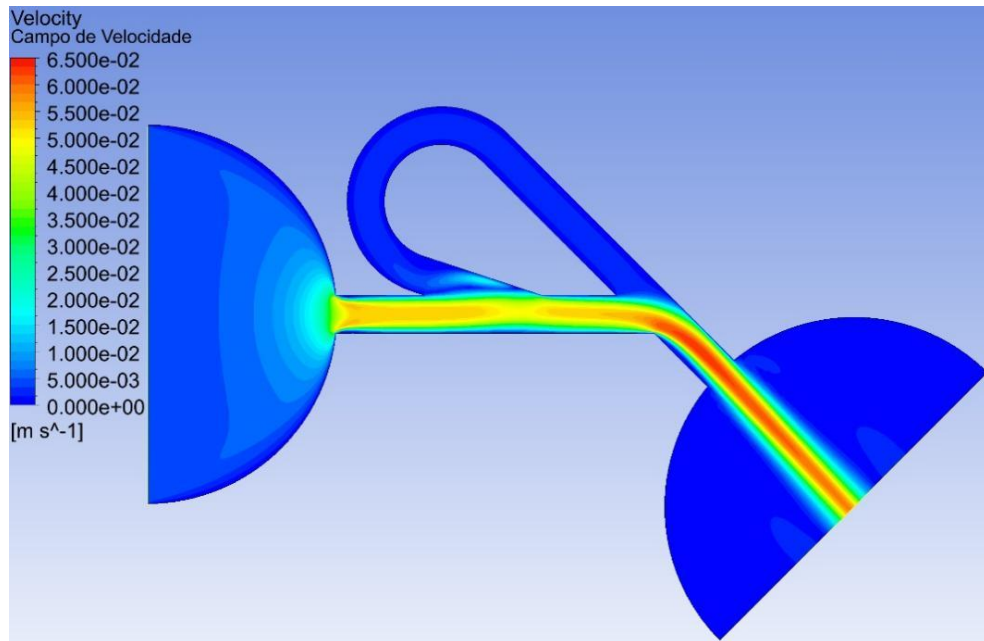
As pressões F e R correspondem a diferença de pressão entre a entrada e saída de fluido no sentido frontal e reverso respectivamente.

Foi possível verificar que a variação de modelo de turbulência não teve grande influência, de forma que a utilização do modelo $k-\omega$ SST, cuja convergência foi mais rápida para os casos estudados, não se demonstra como fonte de erro em primeira análise.

6.1.1 Validação de resultados

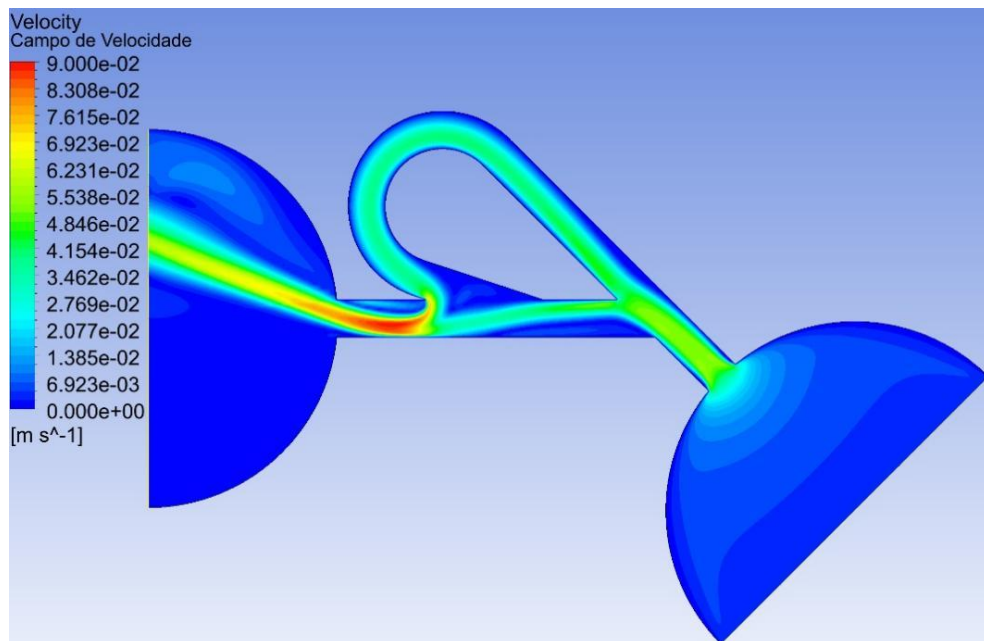
Nas Figuras 14 a 22 estão representados os campos de pressão, velocidade, vetores de velocidade e algumas regiões de interesse do escoamento. Todas as figuras são para o modelo $k-\omega$ SST e 31.770 elementos, porém, como esperado, não apresentam diferença apreciável com o outro modelo ou número de elementos.

Figura 14 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400; regime permanente; campo de velocidades.



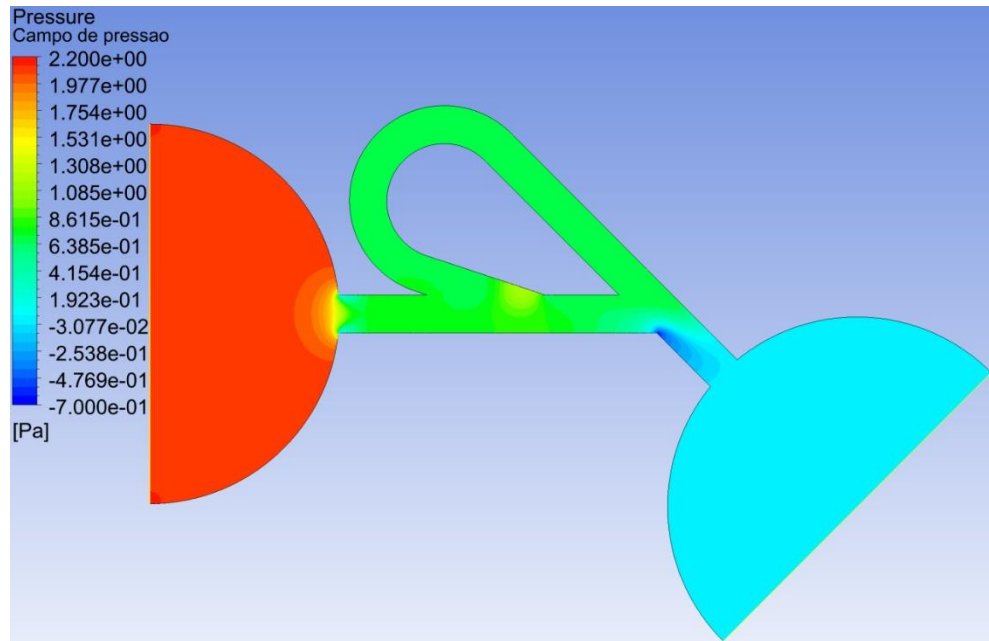
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 15 - Fluxo Reverso; número de Reynolds 400; Regime permanente; campo de velocidades.



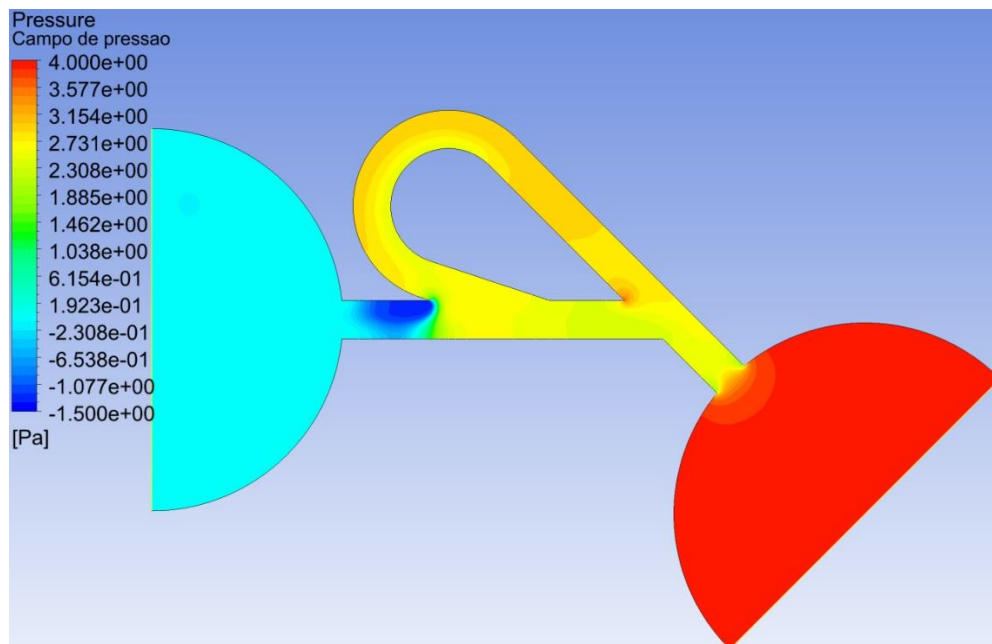
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 16 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; Regime permanente; campo de pressão.



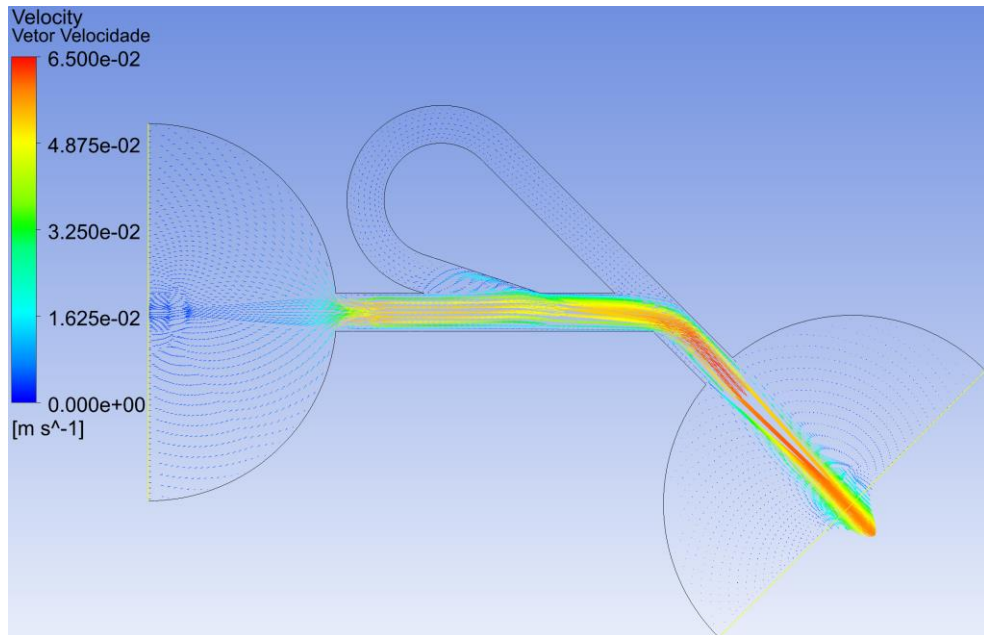
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 17 – Fluxo Reverso; número de Reynolds 400; regime permanente; campo de pressão.



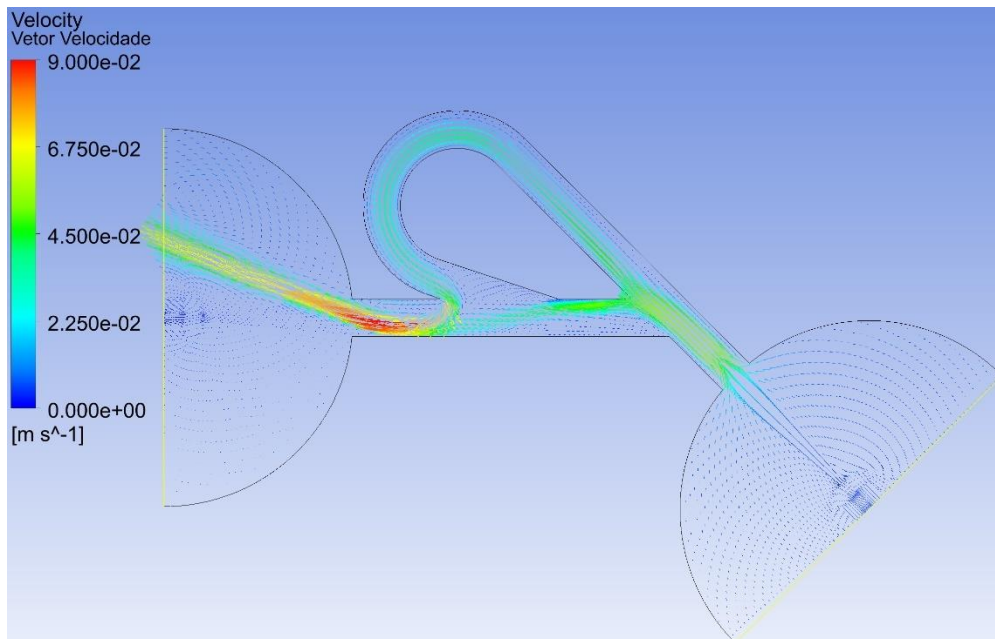
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 18 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400; regime permanente; vetores de velocidade.



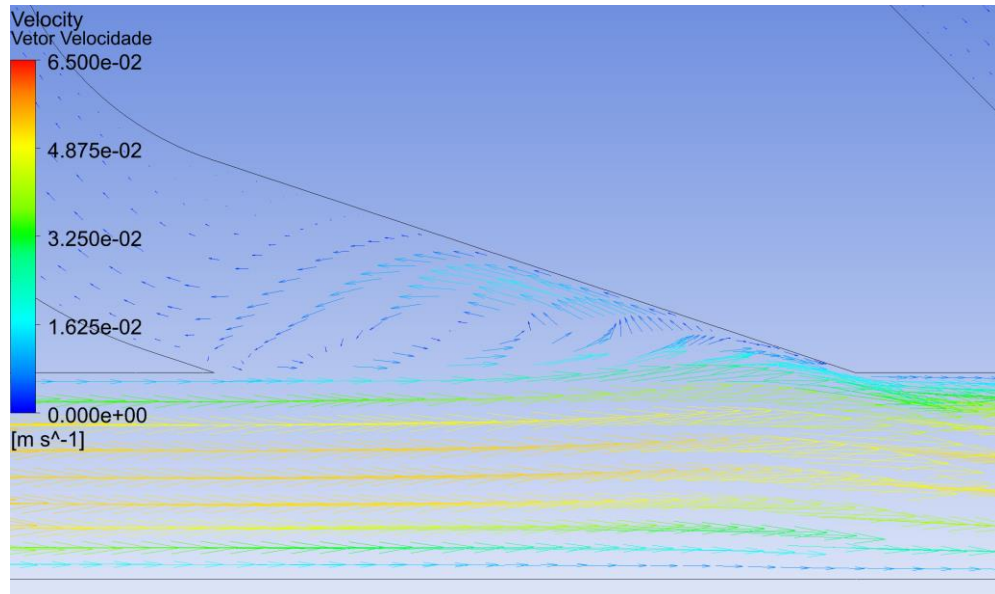
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 19 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400, regime permanente; vetores de velocidade.



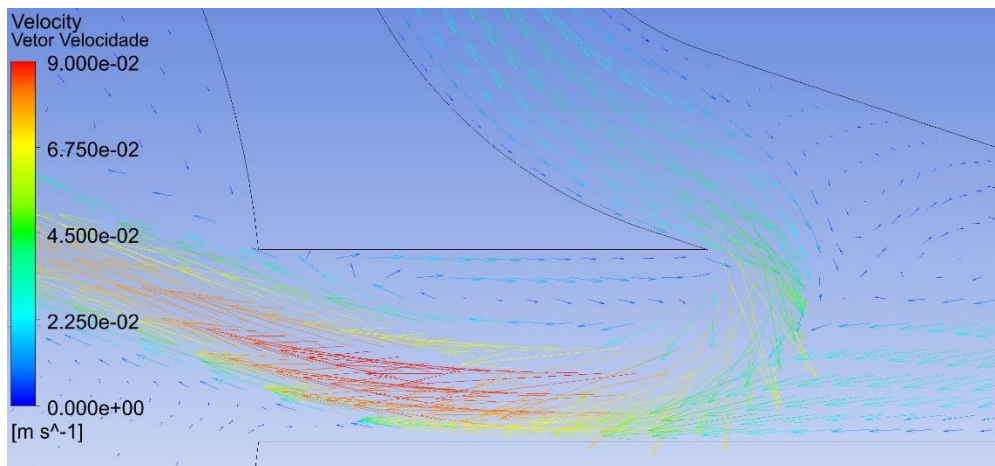
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 20 - Fluxo frontal; número de Reynolds 400; regime permanente; vetores de velocidade; foco em refluxo.



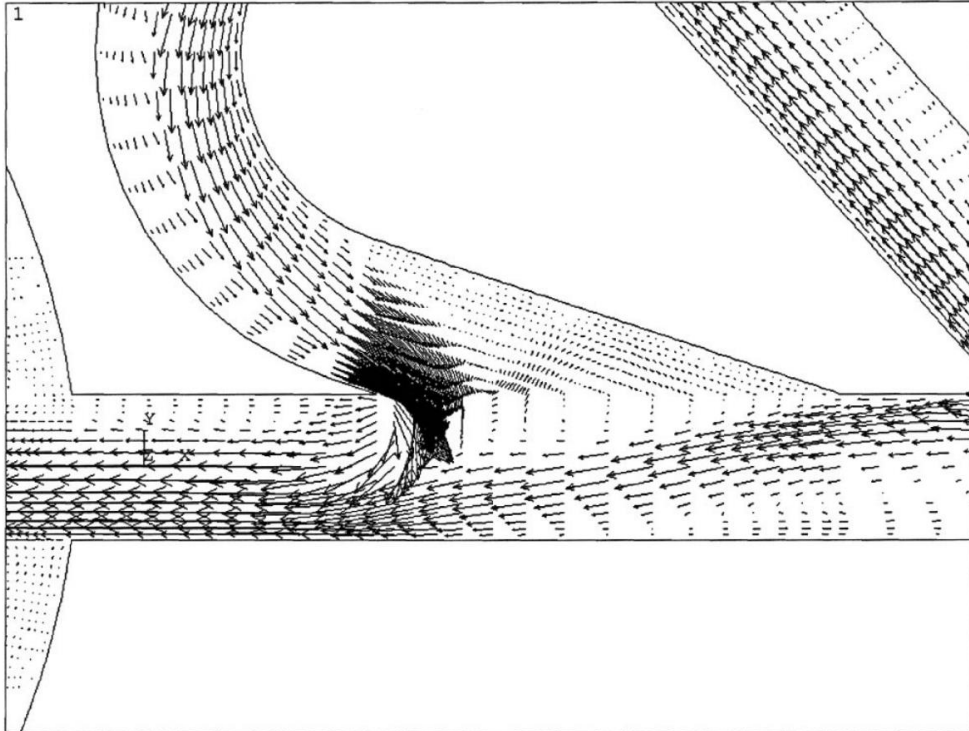
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 21 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; regime permanente; vetores de velocidade; foco em refluxo.



Fonte: Próprio autor (2022).

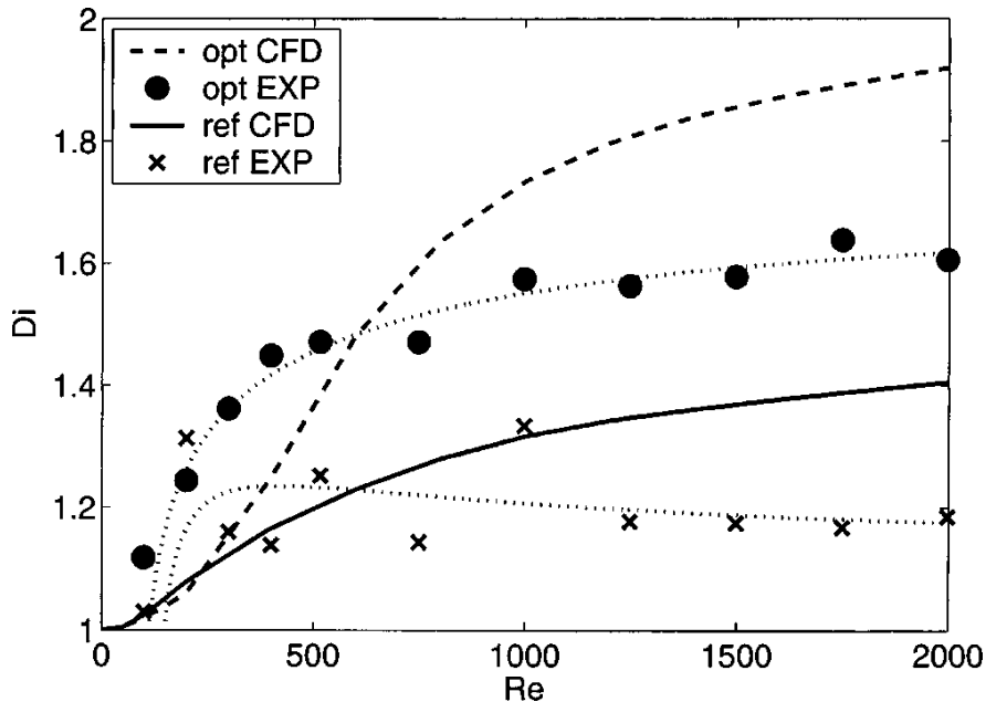
Figura 22 - Vetor velocidade; sentido reverso; número de Reynolds desconhecido.



Fonte: Gamboa *et al.* (2005).

É possível observar nas Figuras 21 e 22, comportamento bem similar do fluxo, como esperado, entretanto, a Figura 22 de Gamboa *et al.* (2005) não parece apresentar sinais de refluxo, o que pode ser explicado por um número de Reynolds mais baixo do que o da Figura 21, ou devido ao menor número de elementos utilizado. Também é possível notar um desvio no fluxo de saída presente na imagem gerada nesse trabalho, o que não é vista no estudo referenciado, o que reforça a ideia anterior.

Figura 23 - Comparação entre diodicidade calculada (CFD) e experimental (EXP) para a geometria otimizada (opt) e referência (ref).



Fonte: Gamboa et al. (2005).

Há grande diferença entre os valores de diodicidade encontrados neste trabalho, compilados na Tabela 1, e os apresentados por Gamboa *et al.* (2005). Essa diferença pode ser explicada pela metodologia utilizada no cálculo da diodicidade experimental pelo autor referenciado. Como o autor utilizou um sistema como o da Figura 3. para determinar tais valores, é possível verificar que o plenum central é maior do que as dimensões utilizadas na simulação computacional e, além disso, são utilizadas duas válvulas tesla.

Uma maior queda de pressão, devido a um grande plenum central, pode ter contribuído para uma menor diferença entre as quedas de pressão no sentido frontal e reverso, por diminuir a contribuição percentual da válvula tesla para a queda de pressão total nos dois sentidos. Em seu estudo, Gamboa *et al.* (2005) assume que as duas válvulas tem igual responsabilidade pela queda de pressão, entretanto, Thompson *et al.* (2013a) demonstrou que os efeitos de se adicionar uma válvula não são lineares e dependem, além do número de válvulas utilizado, da distância entre elas e do número de Reynolds. Tal conjunto de informações ajuda a explicar a diferença entre os dados experimentais e os obtidos nesse estudo. Nesse sentido,

Vries *et al.* (2017), indica que simulações 2D costumam superestimar a diodicidade quando comparados às 3D, mas permanecem úteis para comparação de funcionalidade entre geometrias.

Com esses valores foi possível verificar a independência da solução com a malha. Foi também constatada uma influência negligível do modelo de turbulência $k-\omega$ SST quando comparado com a simulação sem modelo de turbulência utilizada por Gamboa *et al.* (2005).

6.2 Regime transiente

Os resultados das simulações em regime transiente geraram os dados que constam na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de queda de pressão do modelo transiente.

Reynolds	Porcentagem	Pressão F (Pa)	Pressão R (Pa)	Diodicidade	Varição Diodicidade	Varição Diodicidade Efetiva
100	0	0,19814	0,20441	1,032	0,000%	0,000%
	2,47	0,20512	0,21304	1,039	0,675%	22,017%
	4,95	0,21212	0,22192	1,046	1,411%	45,999%
	9,91	0,22580	0,24078	1,066	3,363%	109,649%
200	0	0,58902	0,71541	1,215	0,000%	0,000%
	2,47	0,61753	0,79325	1,285	5,761%	32,611%
	4,95	0,67280	0,91368	1,358	11,811%	66,852%
	9,91	0,70411	1,0686	1,518	24,953%	141,241%
400	0	2,0212	3,8028	1,881	0,000%	0,000%
	2,47	2,1605	4,0872	1,892	0,549%	1,173%
	4,95	2,3909	4,4372	1,856	-1,359%	-2,900%
	9,91	2,5845	5,4840	2,122	12,781%	27,281%

Fonte: Próprio autor (2022).

As variações de diodicidade foram calculadas conforme a Eq. (7), tendo como base os resultados sem a presença de particulado.

Com os resultados da Tabela 2 foi possível constatar um problema ao se utilizar a variação de diodicidade como parâmetro de comparação entre válvulas. Um equipamento no qual o parâmetro em questão é 1, não apresenta diferença na queda de pressão entre seus dois sentidos, enquanto com parâmetro 2 temos o dobro da queda de pressão entre os sentidos. Normalmente, estamos apenas interessados na diferença entre as quedas de pressão, de forma que a diferença de efetividade de válvulas com diodicidade 1 e 2 respectivamente não é de 100% e sim infinita, uma vez que a primeira válvula não apresenta o efeito desejado.

Com o racional acima, foi definido um novo parâmetro nomeado Diodicidade Efetiva, o qual se dá pela Eq. (8).

$$D_e = D_i - 1 \quad (8)$$

Onde D_e é a diodicidade defetiva e D_i é, novamente, a diodicidade. É importante levar em consideração que D_i deve ter valor superior a unidade, o que é o esperado devido a forma como tal variável é calculada.

Com a variação da diodicidade efetiva é possível realizar uma melhor comparação entre as diferentes diodicidades, tendo uma melhor noção da magnitude do efeito de queda de pressão direcional em um caso com relação a outro.

6.2.1 Variação da diodicidade

Foi possível observar um ganho de performance com a introdução de particulado, medido pela variação de diodicidade efetiva relativa à condição sem partícula, significativo, chegando ao máximo de 141,24% com número Reynolds 200 e porcentagem volumétrica de 9,91%. Os únicos casos nos quais a variação por causa do particulado foi de menor relevância ou tiveram influência negativa foram os com número de Reynolds 400 e porcentagem de particulado de 2,47% e 4,95%.

Os efeitos do particulado foram mais expressivos quando maior a sua concentração volumétrica em todos os casos estudados. Também é interessante notar uma maior influência com número de Reynolds 200, no qual é esperado o começo do regime de transição ou turbulento.

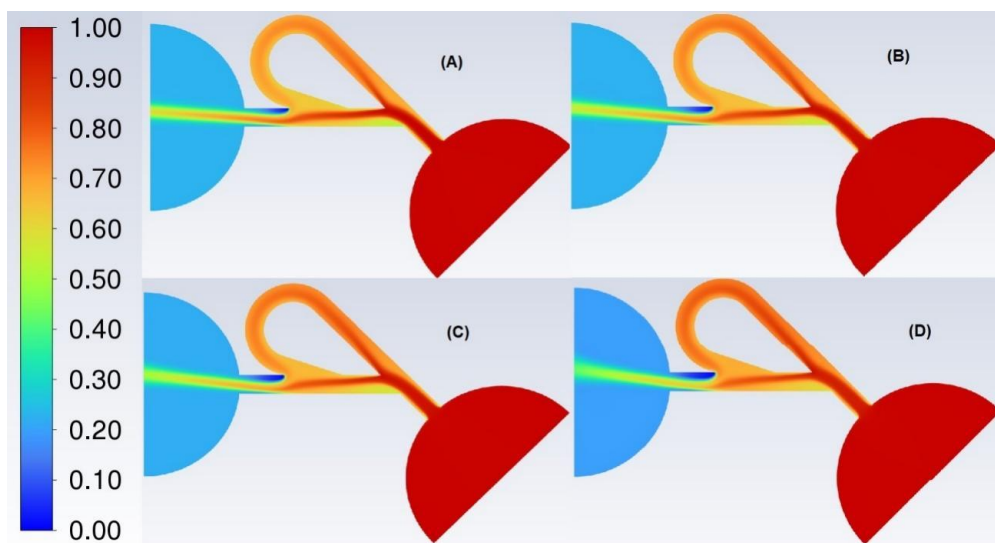
6.2.2 Análise dos campos de pressão total

Devido a grande quantidade de dados e figuras geradas por este trabalho serão apresentadas no corpo do texto apenas algumas figuras selecionadas, de número de Reynolds 200, as que tiveram resultados mais aparentes. No Apêndice A encontram-se as figuras contendo campos de pressão e velocidades de cada uma das configurações transientes analisadas nesse trabalho. As análises realizadas nessa seção podem ser replicadas para outros valores de número de Reynolds. A

pressão total foi escolhida para as análises, em detrimento da pressão estática, uma vez que ela foi a utilizada para o cálculo da diodicidade.

Na Figura 24 está apresentada a pressão total, composta pela somatória da pressão estática. Uma escala adimensional foi escolhida para que fosse possível visualizar com mais clareza como a distribuição da pressão, relativa à pressão máxima do escoamento, varia com a variação da porcentagem de particulado.

Figura 24 - Campo de pressão total para regime transiente; número de Reynolds 200; sentido reverso; escala adimensional. Porcentagem de particulado em volume: (A) - 0%; (B) - 2,47%; (C) - 4,95%; (D) - 9,91%.



Fonte: Próprio autor (2022).

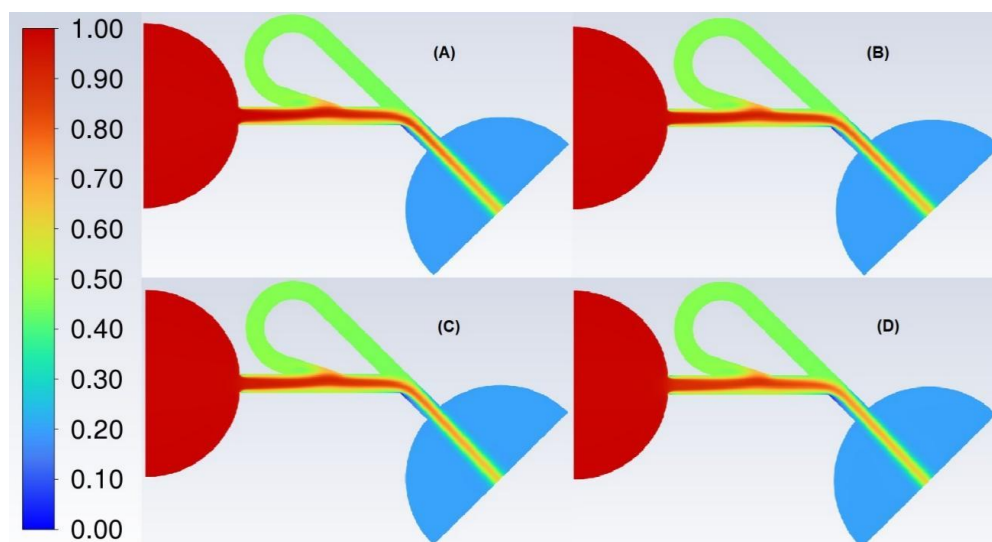
Uma vez que o interesse do estudo presente é a diodicidade, a qual é um fator adimensional e que depende apenas da razão entre as quedas de pressão entre o fluxo frontal e reverso, não das quedas de pressão em valores absolutos, não se julgou apropriado a utilização de escala fixa dimensional para a comparação de cada um dos casos. Entretanto, é importante mencionar que a pressão máxima aumentou no mesmo sentido da concentração de particulado, esse efeito, em uma escala dimensional, pode ser verificado nas figuras do Apêndice A.

Pela Figura 31 é possível notar a diminuição da intensidade da pressão total no trecho horizontal da válvula, o qual é gradativo com o aumento da concentração de particulado. De forma inversa, no laço superior é possível notar um

escurecimento do campo, o que denota um aumento da pressão com relação aos escoamentos de menor concentração.

Podemos então interpretar que há uma maior queda de pressão no trecho horizontal e uma menor queda de pressão no trecho superior quanto maior é a concentração de particulado, ao menos nos casos estudados. Quedas de pressão podem ser interpretadas como uma maior dificuldade, ou resistência, ao fluxo. Assim, com uma análise qualitativa, fica claro que a presença de particulado, no sentido reverso, dificulta o fluxo pelo canal horizontal enquanto facilita no canal superior, ao menos quando comparamos com valores relativos à pressão máxima.

Figura 25 - Campo de pressão total para regime transiente; número de Reynolds 200; sentido frontal; escala adimensional. Porcentagem de particulado em volume: (A) - 0%; (B) - 2,47%; (C) - 4,95%; (D) - 9,91%.



Fonte: Próprio autor (2022).

Já na Figura 25 é possível verificar que o trecho horizontal também demonstra um leve aumento da queda de pressão total relativa à pressão máxima, a qual se mantém constante no trecho superior.

Assim, com as duas análises, é possível concluir que as configurações de particulado utilizadas influenciam de forma diferente os dois sentidos de fluxo. Enquanto as mudanças no sentido reverso parecem ter efeito benéfico seriam necessários mais estudos, ou uma análise mais minuciosa, para dizer o mesmo sobre a influência no sentido frontal.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível investigar a influência do particulado sobre o fluxo de um tipo de válvula tesla. A literatura, conforme dizem Kwang e Chong (2006), expressa a insensibilidade desse tipo de válvula a partículas, o que, pelo presente trabalho, parece não ser o caso. É importante esclarecer, os autores, muito provavelmente, não estava a tratar da influência das partículas na diodicidade e sim de uma possível interrupção do fluxo.

Os significativos ganhos de performance encontrados podem ajudar a aumentar a utilização desse sistema para aplicações onde substâncias diferentes do fluido utilizado fazem parte intrínseca da operação. Outra possibilidade é a utilização de métodos numéricos para otimização, assim como feito em Anagnostopoulos e Mathioulakis (2020), mas com a presença de particulado. A adição dessa nova variável, o particulado, para a otimização, pode, possivelmente, aumentar em muito as diodicidades encontradas no tipo de válvula estudado.

Em estudos futuros, ou para uma geometria de válvula de grande interesse, pode ser possível calcular um número de Reynolds equivalente relacionando os parâmetros do particulado com o fluxo da válvula sem partícula. Esse cálculo pode ser de grande interesse no dimensionamento e escolha da válvula.

Não foram investigados os efeitos da densidade relativa entre fluido e partícula neste trabalho, de forma que não foi possível verificar o quão importante é o efeito da diferença de distribuição de momento no sistema. Tal estudo seria de grande importância para as aplicações em que as densidades forem mais próximas, ou cuja densidade da partícula é menor do que a do fluido.

Além disso, a investigação se o efeito de pequenas bolhas, do próprio fluido ou de outros gases, é semelhante pode abrir mais campo para utilização de válvulas tesla. O sentido contrário também seria de grande interesse, gotículas líquidas em suspensão no gás ou vapor. Nessa configuração a densidade relativa pode chegar a 2 ou 3 ordens de magnitude, podendo oferecer efeitos interessantes para aplicação futura caso a inércia seja relevante nos efeitos aqui observados.

REFERÊNCIAS

TESLA, Nikola. **VALVULAR CONDUIT**. Depositante: United States Patent Office. US nº1.329.599. Depósito: 21 fev.1916. Concessão: 3 fev. 1920.

FORSTER, F.K. *et al.* Design, fabrication and testing of fixed-valve micro-pumps. *In: THE 1995 ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 1995, San Francisco, California, EUA. **Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division** [...]. [S. l.: s. n.], 1995. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245883107_Design_fabrication_and_testing_of_fixed-valve_micro-pumps. Acesso em: 13 out. 2021.*

DAVIDSON, L. **An Introduction to Turbulence Models**. Goteborg: [s. n.], jan. 2003. Disponível em: Acesso em: 19 out. 2021.

NGUYEN, N-T.; TRUONG, T-Q. Simulation and Optimization of Tesla Valves. **Tech Connect Briefs**, [s. l.], 2003. Disponível em: <https://briefs.techconnect.org/papers/simulation-and-optimization-of-tesla-valves/>. Acesso em: 15 set. 2021.

GAMBOA, A.R. *et al.* Improvements in Fixed-Valve Micropump Performance Through Shape Optimization of Valves. **Journal of Fluids Engineering**, [s. l.], mar. 2005. Disponível em: <https://faculty.washington.edu/forster/forsterpubs/gamboa05a.pdf>. Acesso em: 13 set. 2021.

KWANG, W.O.; CHONG, H.A. A review of microvalves. **JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING**, [s. l.], 24 mar. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228619937_A_Review_of_Microvalves. Acesso em: 21 out. 2021.

DENG, Y. *et al.* Optimization of no-moving part fluidic resistance microvalves with low Reynolds number. *In: PR, 2010, Hong Kong, China. **Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)** [...]. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/224129251_Optimization_of_no-moving_part_fluidic_resistance_microvalves_with_low_Reynolds_number. Acesso em: 1 nov. 2021.*

THOMPSON, S.M *et al.* Investigation of a flat-plate oscillating heat pipe with Tesla-type checkvalves. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [s. l.], v. 35, out 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177711000823>. Acesso em: 26 out. 2021.

MOHAMMADZADEH, K.*et al.* Numerical study on the performance of Tesla typemicrovalve in a valvelessmicropump in the range oflowfrequencies. **JournalofMicro-BioRobotics**, [s. l.], 2013. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12213-013-0069-1>. Acesso em: 22 set. 2021.

THOMPSON, S.M *et al.* Transitional and Turbulent Flow Modeling in a Tesla Valve. *In: ASME 2013 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 2013, San Diego, California, EUA. **Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition** [...]. [S. l.: s. n.], 2013a. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings-abstract/IMECE2013/56321/V07BT08A027/261418>. Acesso em: 26 set. 2020.*

THOMPSON, S.M. *et al.* Numerical Investigation of Multistaged Tesla Valves. *In: ASME 2013 FLUIDS ENGINEERING DIVISION SUMMER MEETING, 2013, Incline Village, Nevada, EUA. **Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting** [...]. [S. l.: s. n.], 2013b. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-abstract/136/8/081102/372451/Numerical-Investigation-of-Multistaged-Tesla?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 25 set. 2021.*

NOBAKHT, A.Y. *et al.* Numerical Study of Diodicity Mechanism in Different Tesla-Type Microvalves. **Journal of Applied Research and Technology**, [s. l.], v. 11, dez. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642313715943>. Acesso em: 19 set. 2021.

VARGA, M *et al.* Quartz crystal microbalance gas sensor with nanocrystalline diamond sensitive layer. **Physica status solidi (b)**, [s. l.], v. 252, ed. 11, p. 2591-2597, 15 nov. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssb.201552229>. Acesso em: 19 maio 2022.

VRIES, S.F. *et al.* Design and operation of a Tesla-type valve for pulsating heatpipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 105, fev 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931016310560>. Acesso em: 28 out. 2021.

FREI, W. **Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?**. [S. l.], 6 jul. 2017. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>. Acesso em: 17 nov. 2021.
Modelos de turbulência

FOX, R.W. *et al.* **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

QIAN, J.Y. *et al.* Hydrogen decompression analysis by multi-stage Tesla valves for hydrogen fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], 21 maio 2019.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919312947>. Acesso em: 3 nov. 2021.

ANAGNOSTOPOULOS, J.S.; MATHIOULAKIS, D.S. **Numerical Simulation and Hydrodynamic Design Optimization of a Tesla-Type Valve for Micropumps**. Int. Conf. on FLUID DYNAMICS & AERODYNAMICS, Gorfú, Grécia, p.195-201, 22 ago. 2020.

WAHIDI, T. *et al.* Stability enhancement of supercritical CO₂ based natural circulation loop using a modified tesla valve. **The Journal of Supercritical Fluids**, [s. l.], v. 166, 1 dez. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844620302710>. Acesso em: 1 nov. 2021.

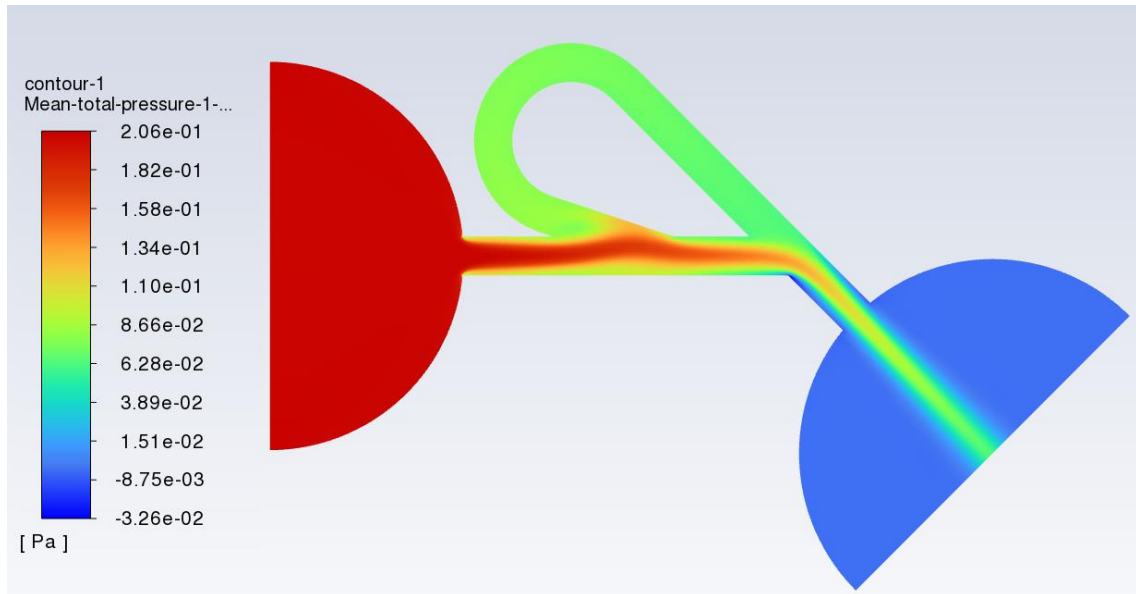
NGUYEN, Q.M. *et al.* Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macro fluidic valve. **Nature Communications**, [s. l.], 17 maio 2021.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/266574843_Numerical_Simulation_and_Hydrodynamic_Design_Optimization_of_a_Tesla-Type_Valve_for_Micropumps. Acesso em: 15 set. 2021.

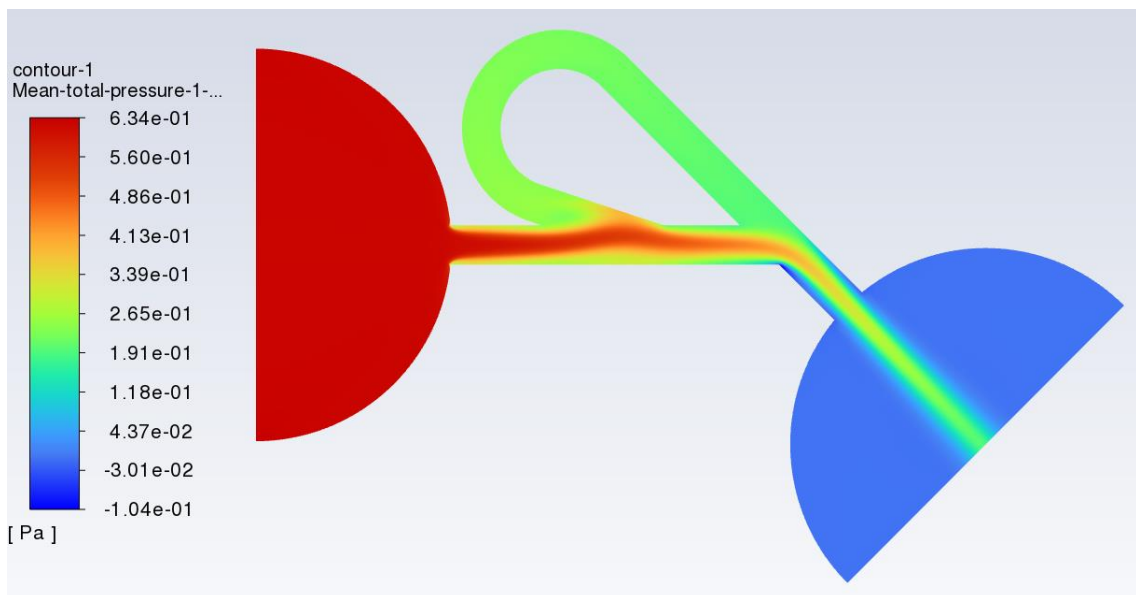
APÊNDICE A – Figuras representativas dos campos de velocidade e pressão

Figura 26 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de pressão total.



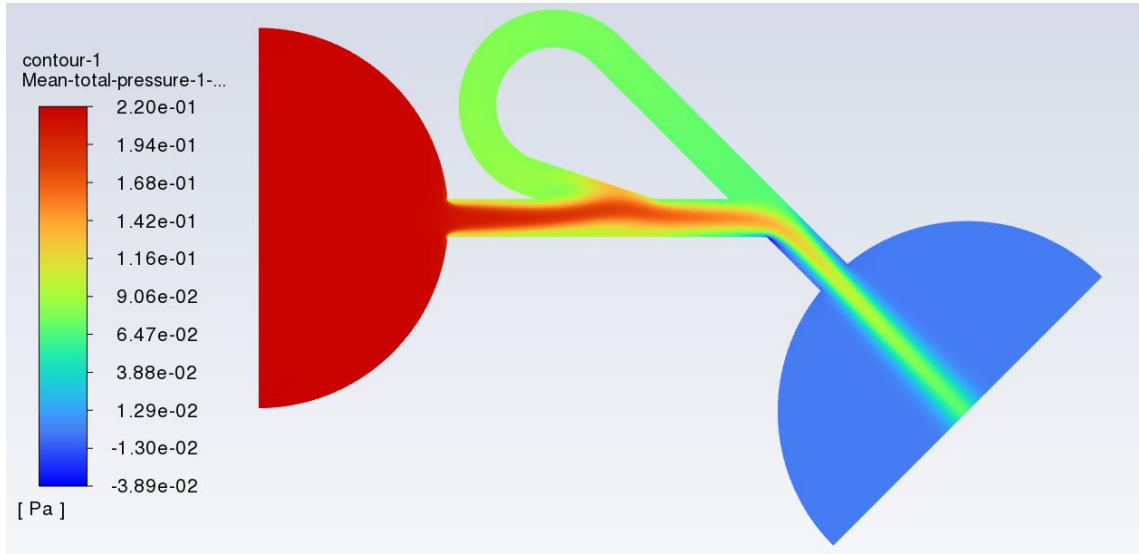
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 27 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de pressão total.



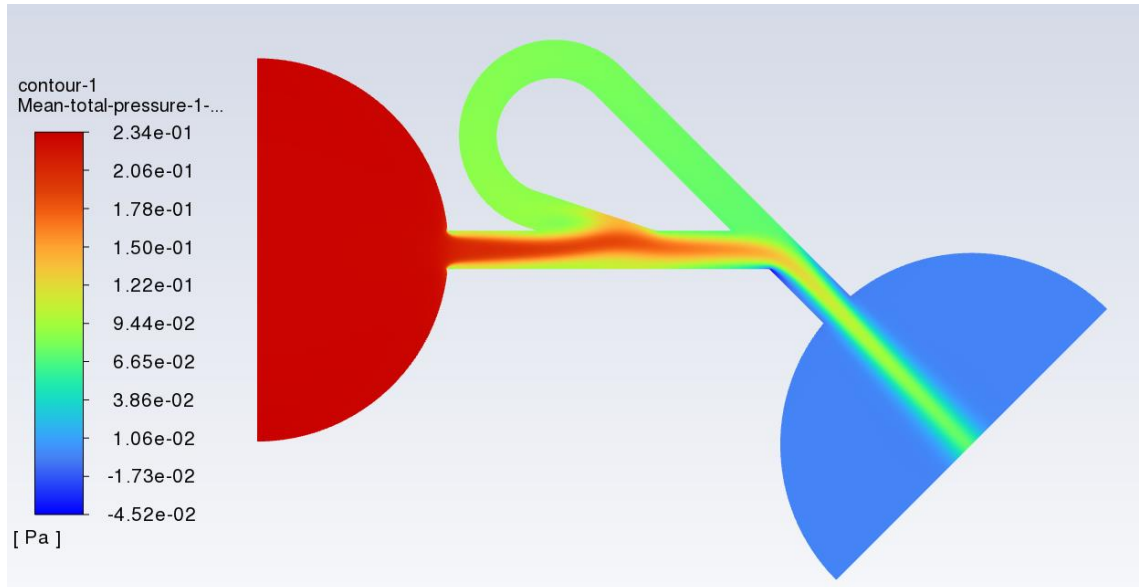
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 28 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de pressão total.



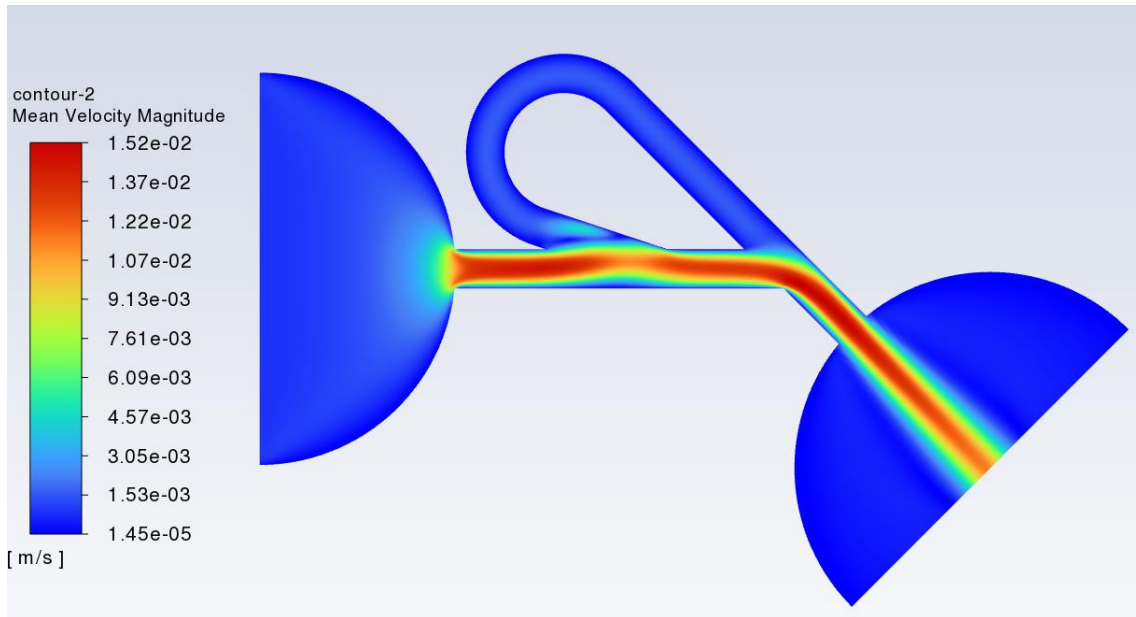
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 29 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de pressão total.



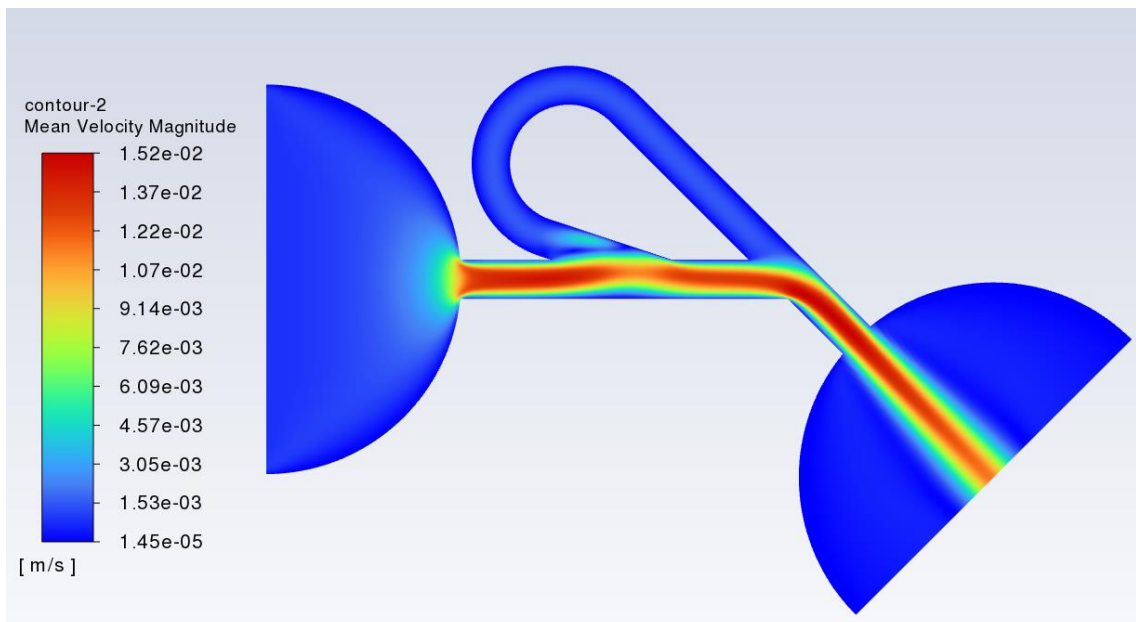
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 30 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de velocidade.



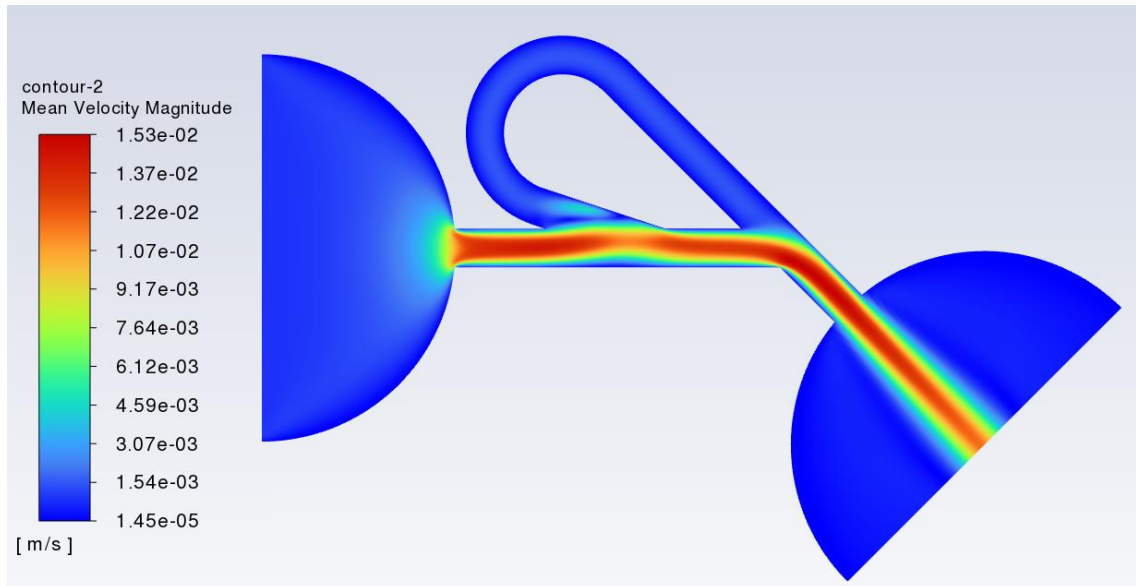
Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 31- Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de velocidade.



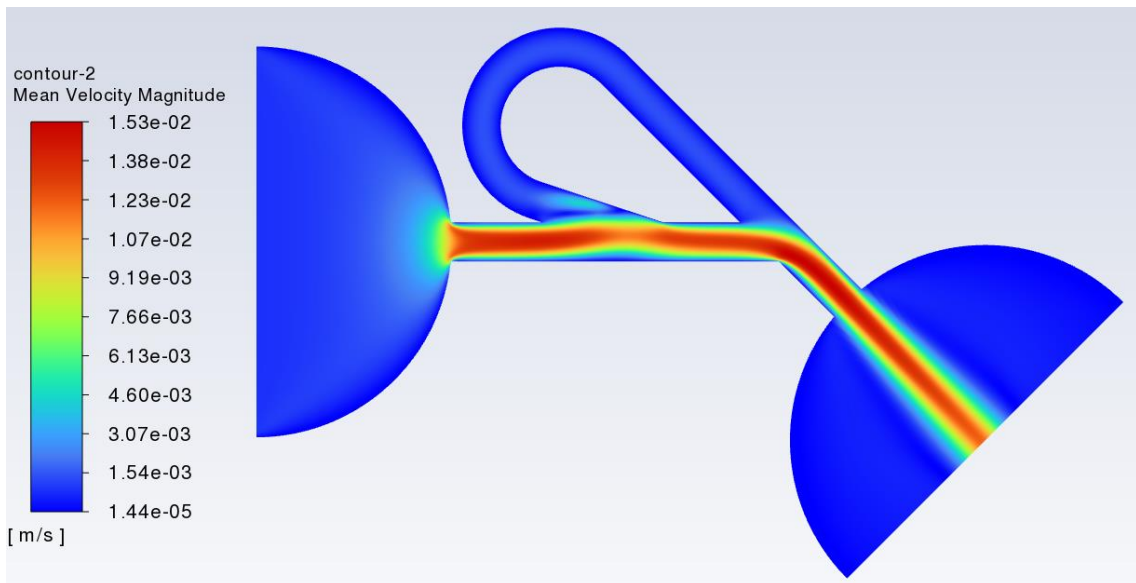
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 32 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de velocidade.



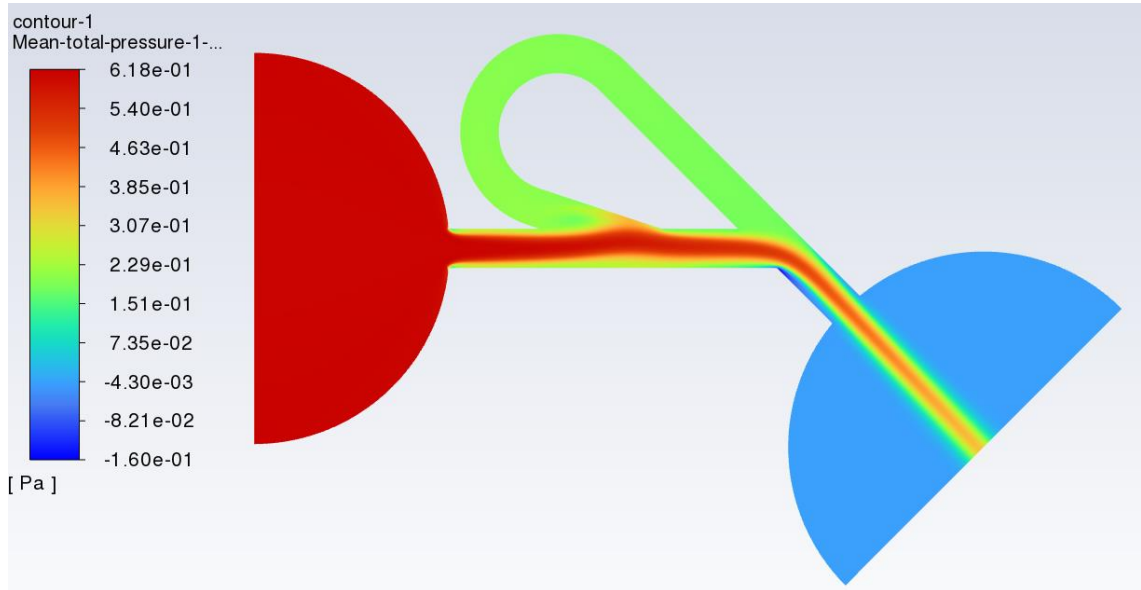
Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 33 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de velocidade.



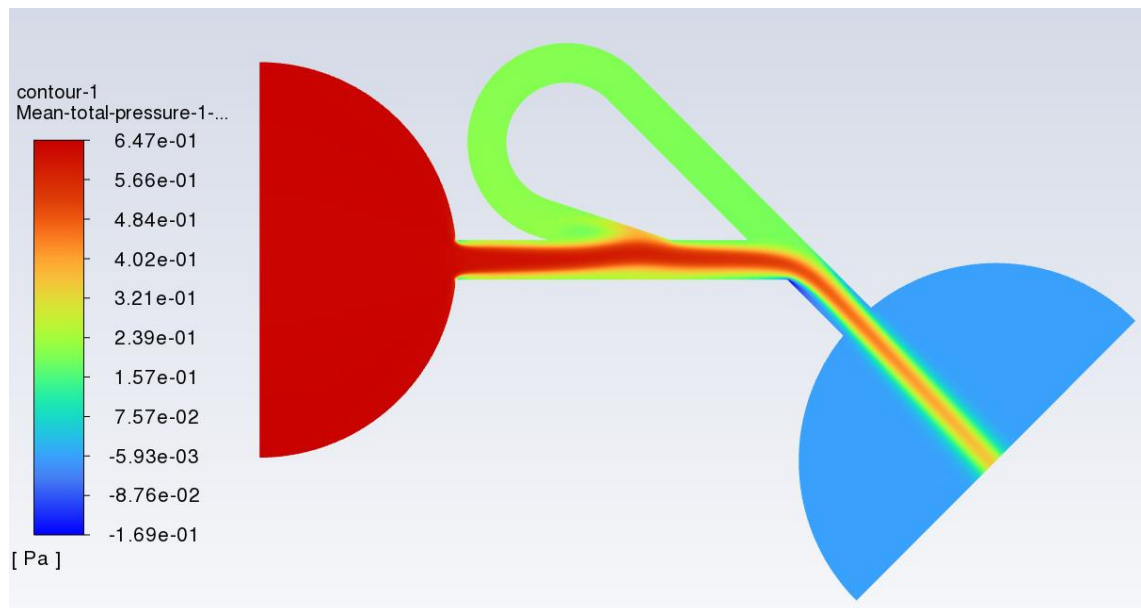
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 34 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de pressão total.



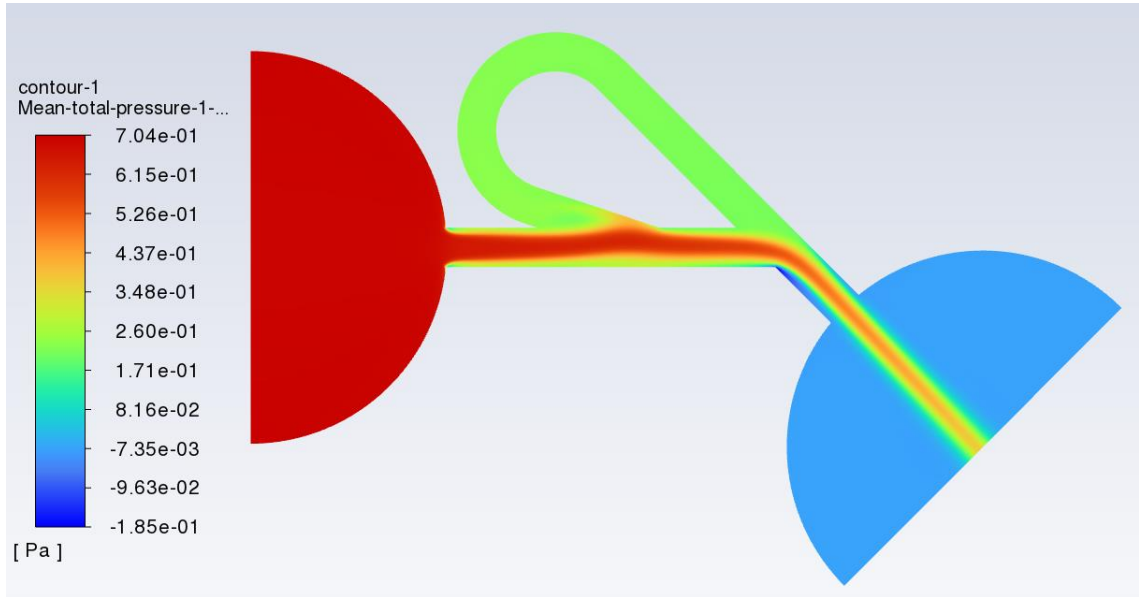
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 35 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de pressão total.



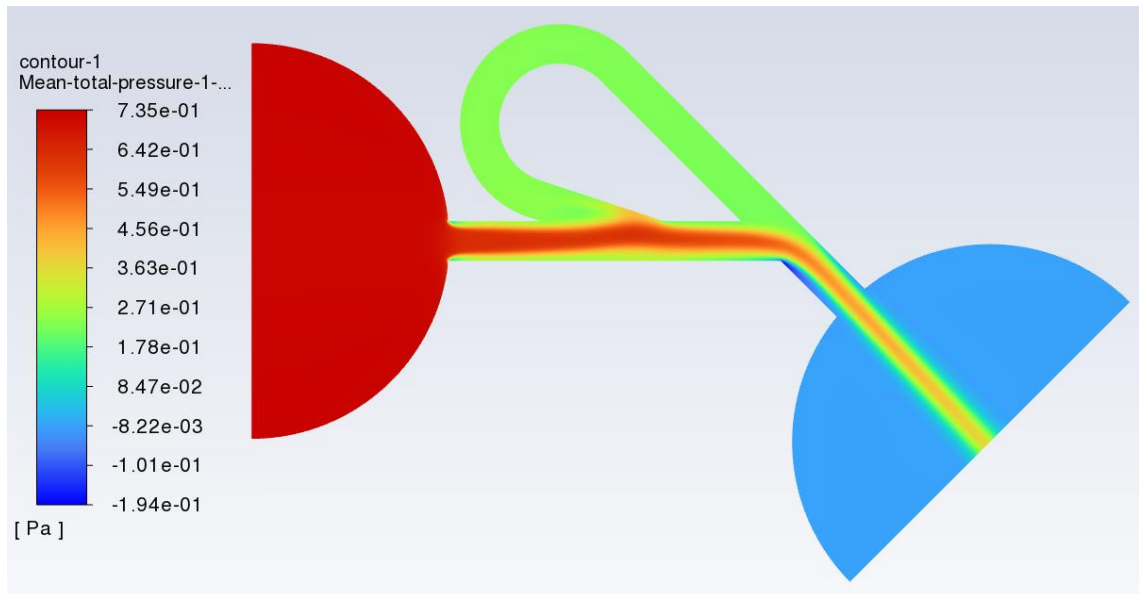
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 36 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de pressão total.



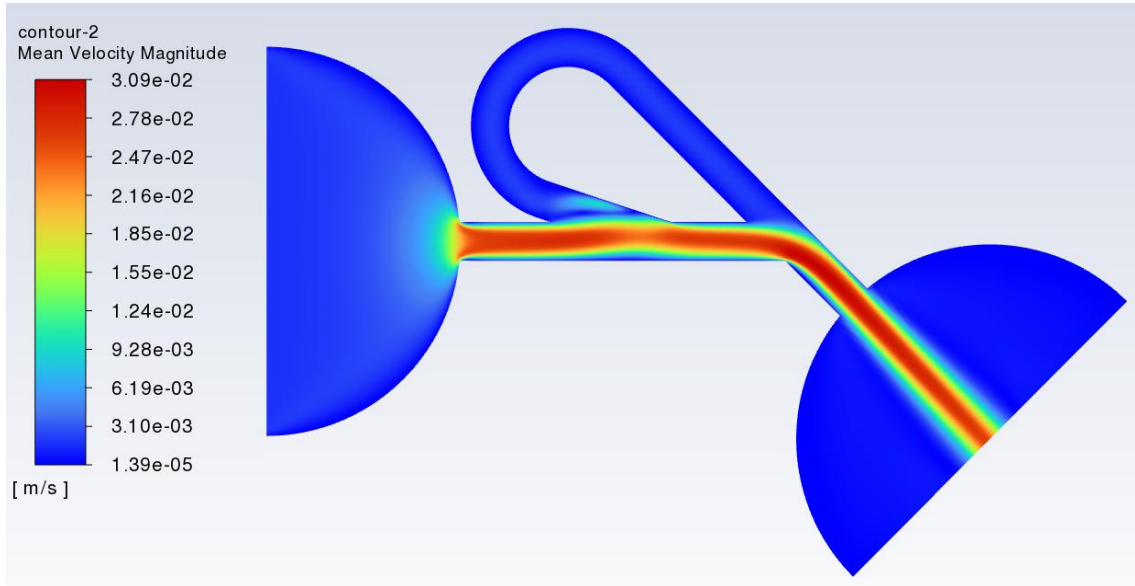
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 37 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de pressão total.



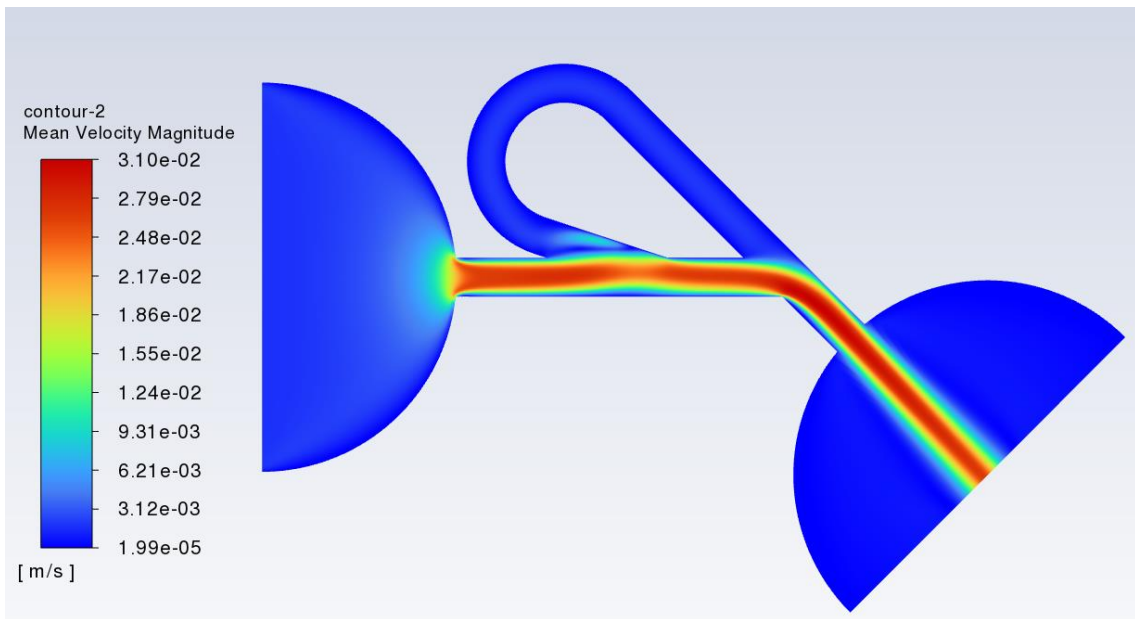
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 38 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de velocidade.



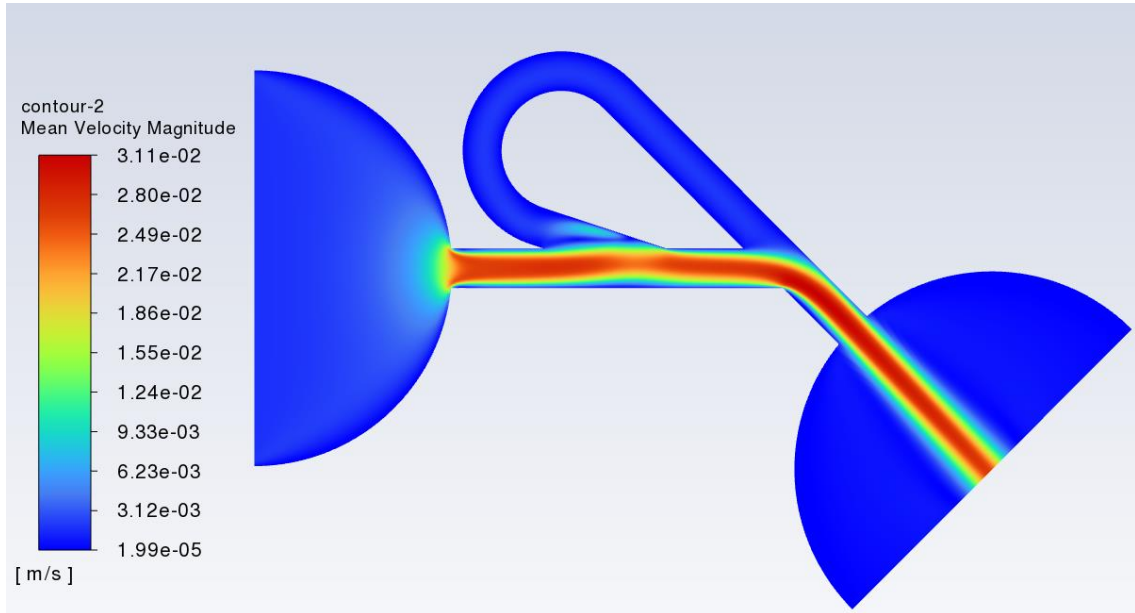
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 39 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de velocidade.



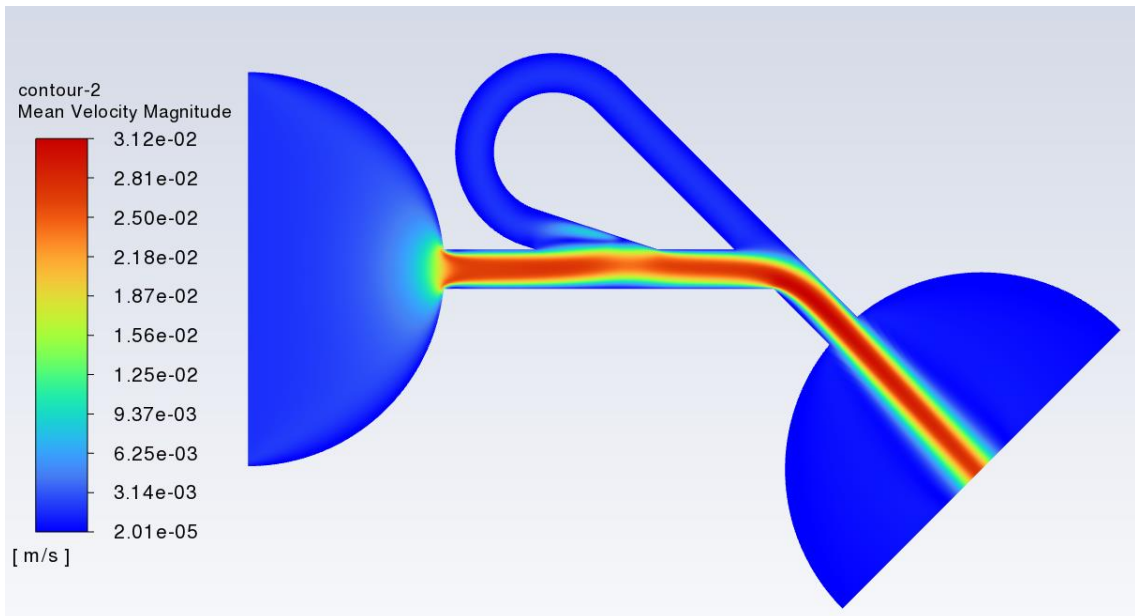
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 40 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de velocidade.



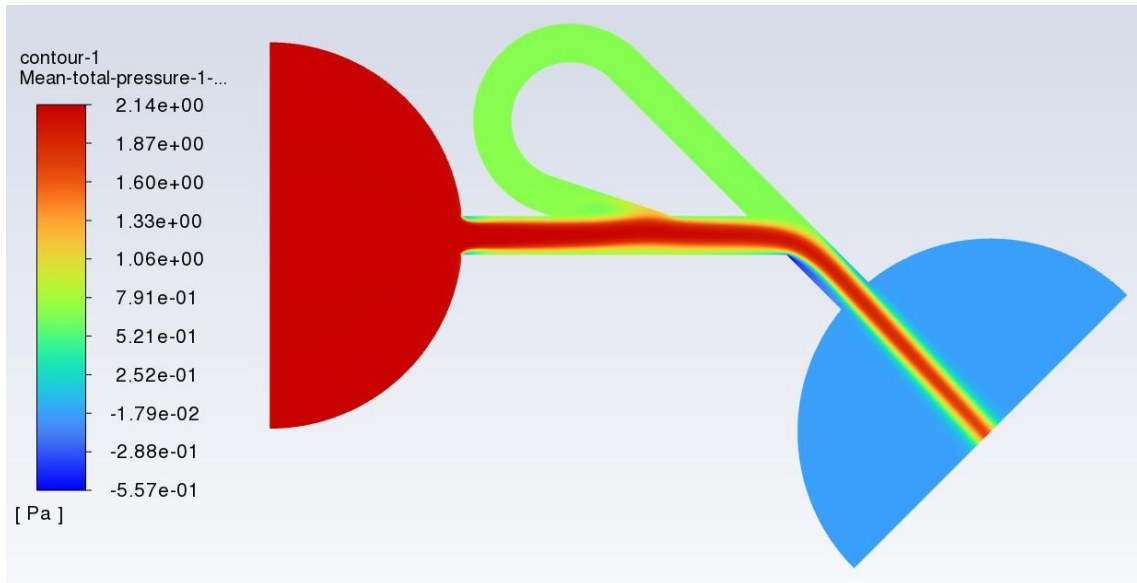
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 41 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de velocidade.



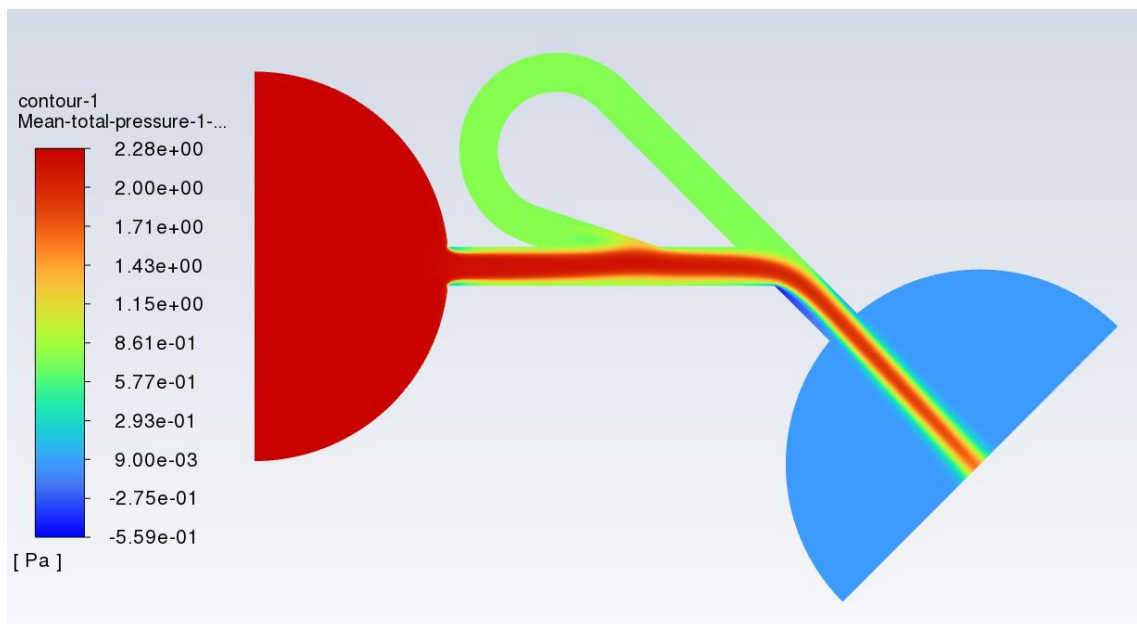
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 42 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de pressão total.



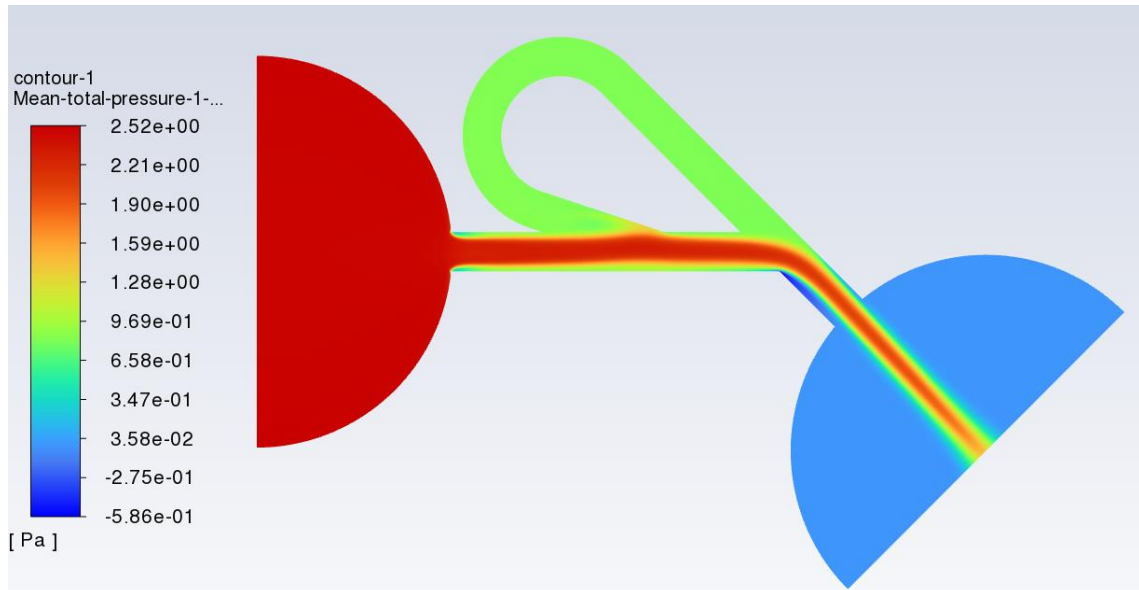
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 43 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de pressão total.



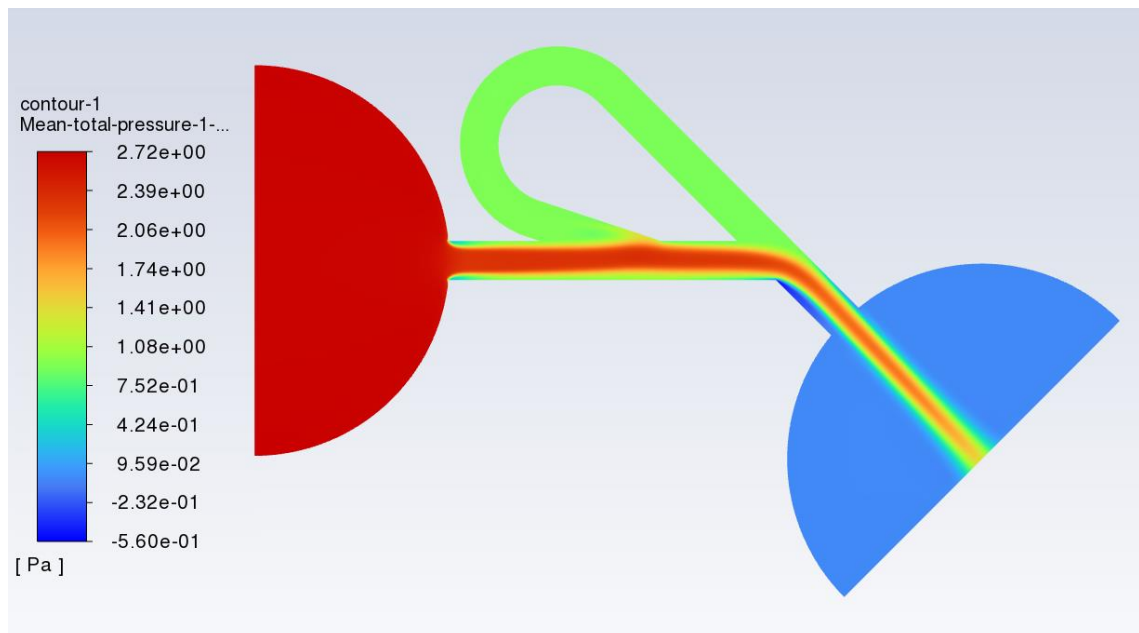
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 44 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de pressão total.



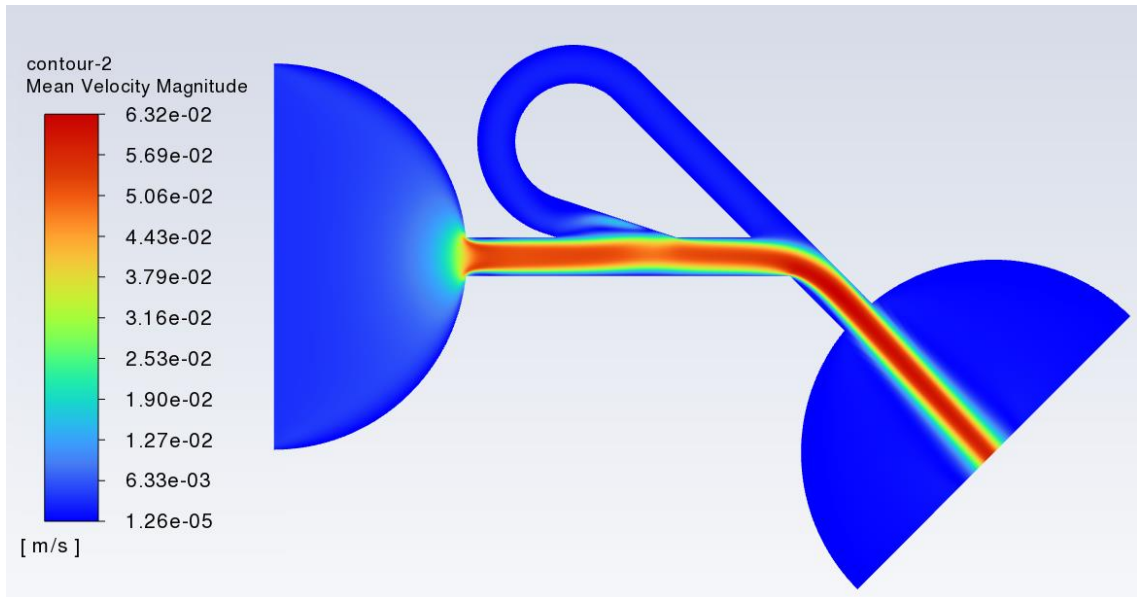
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 45 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de pressão total.



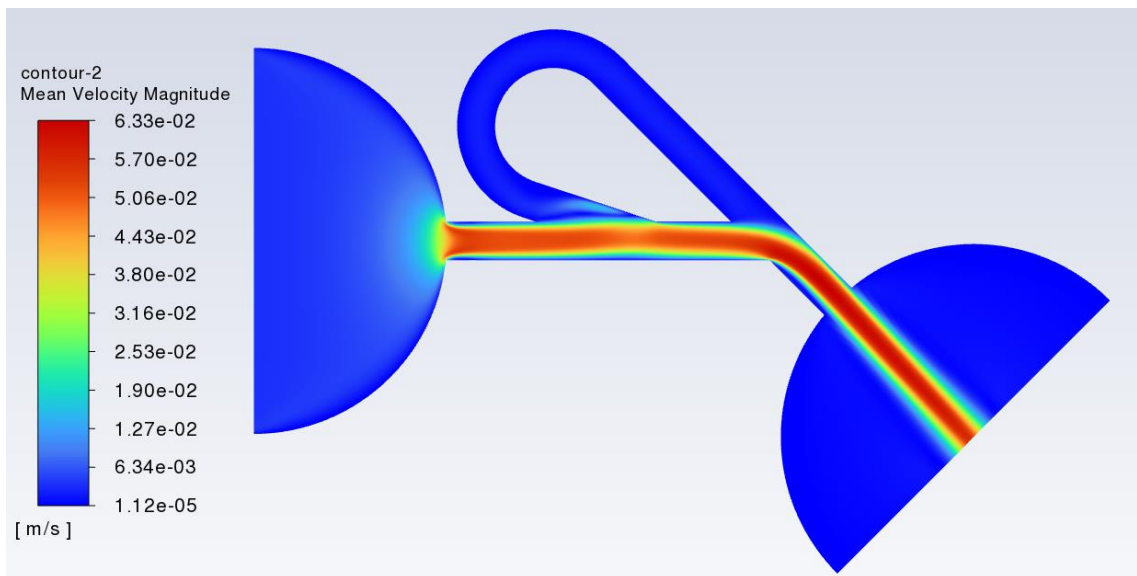
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 46 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de velocidade.



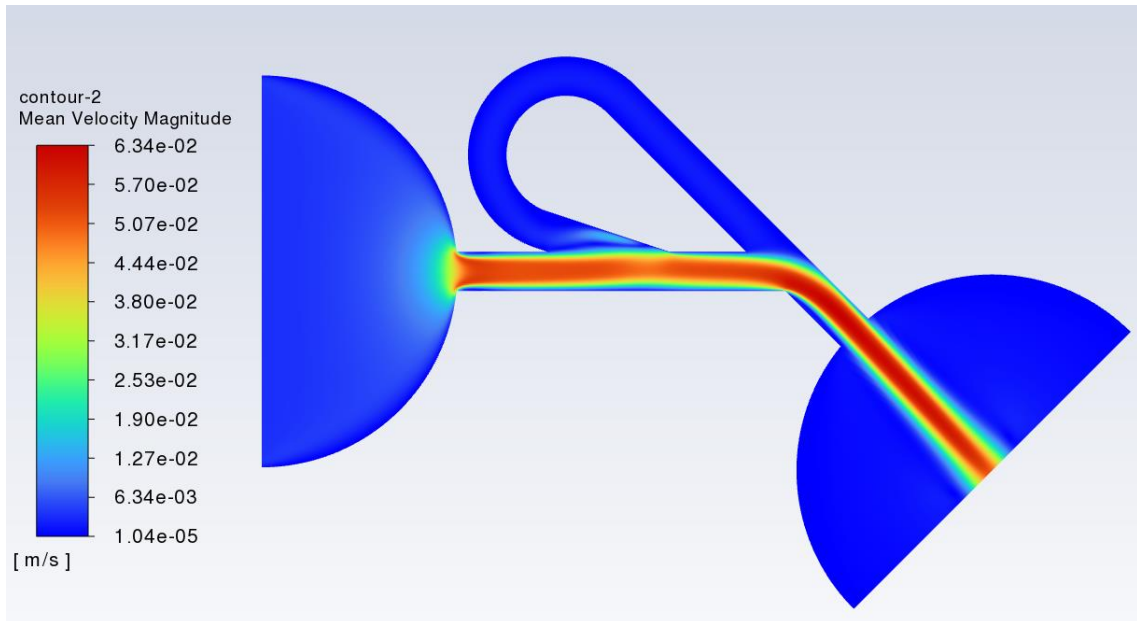
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 47 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de velocidade.



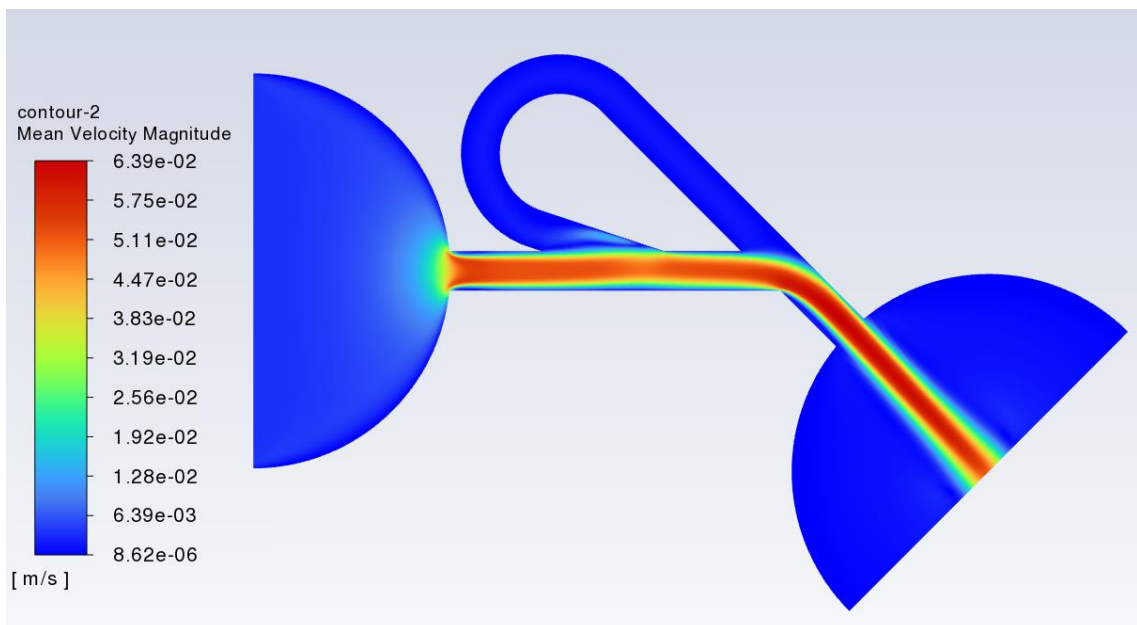
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 48 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de velocidade.



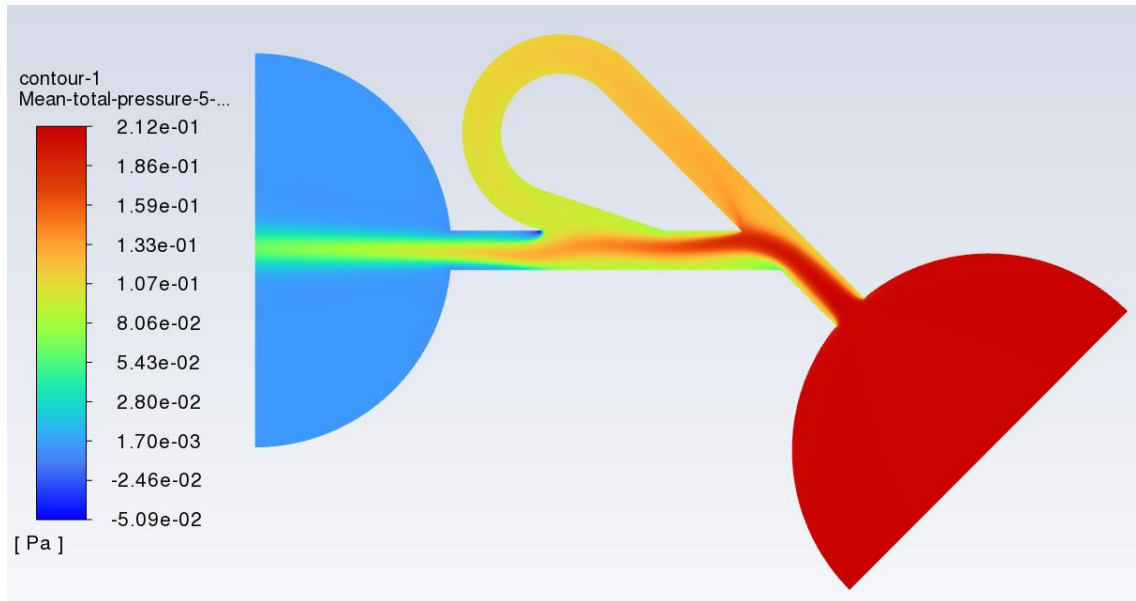
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 49 - Fluxo Frontal; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de velocidade.



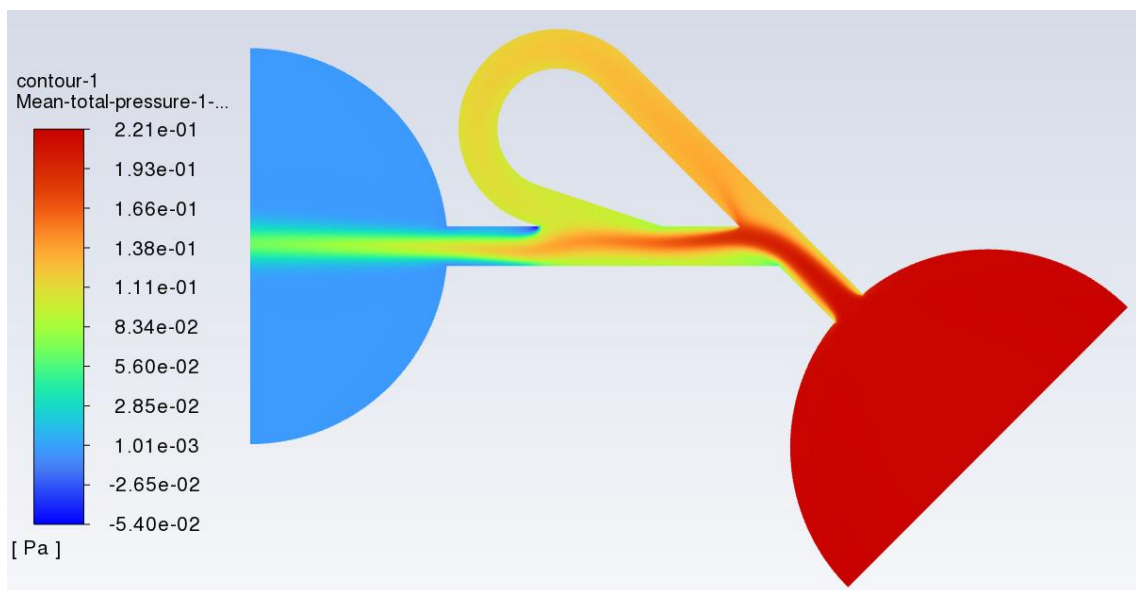
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 50 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de pressão total.



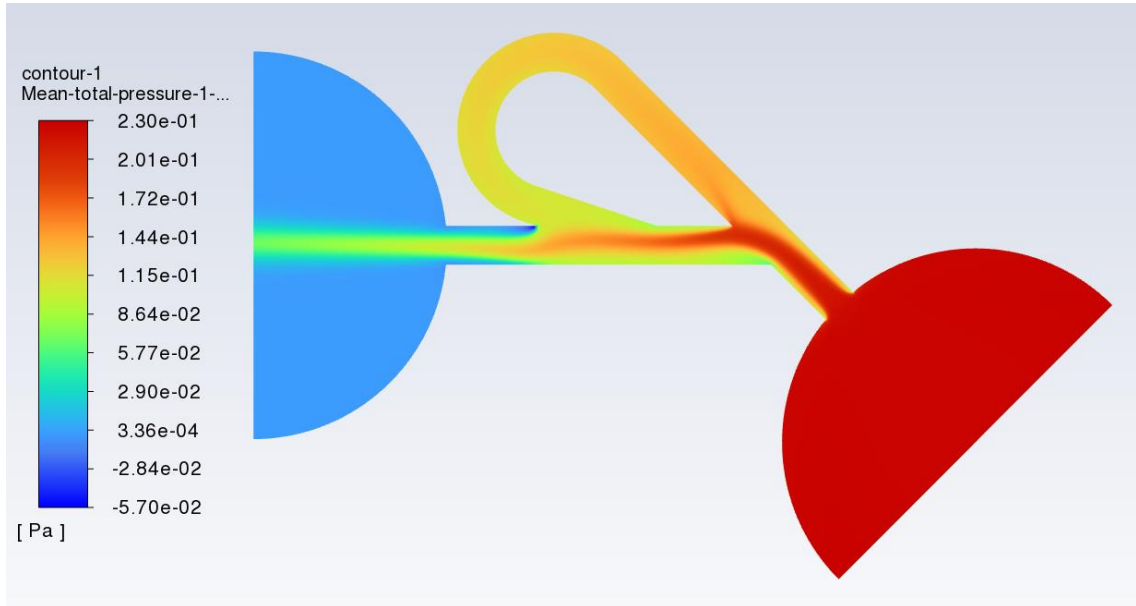
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 51 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de pressão total.



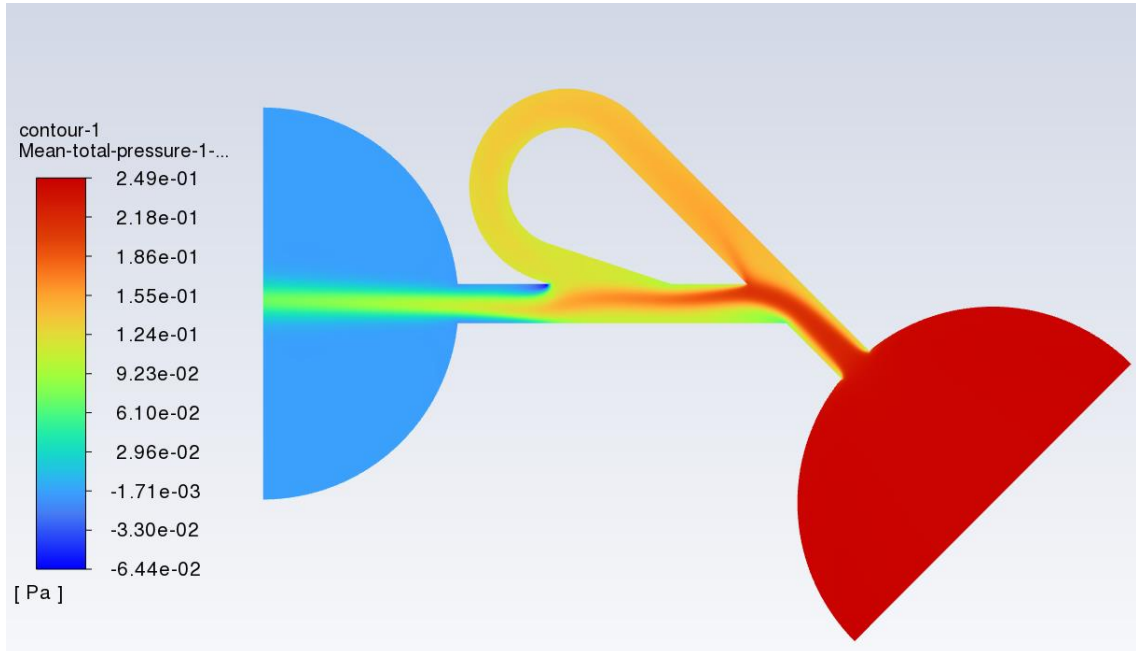
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 52 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de pressão total.



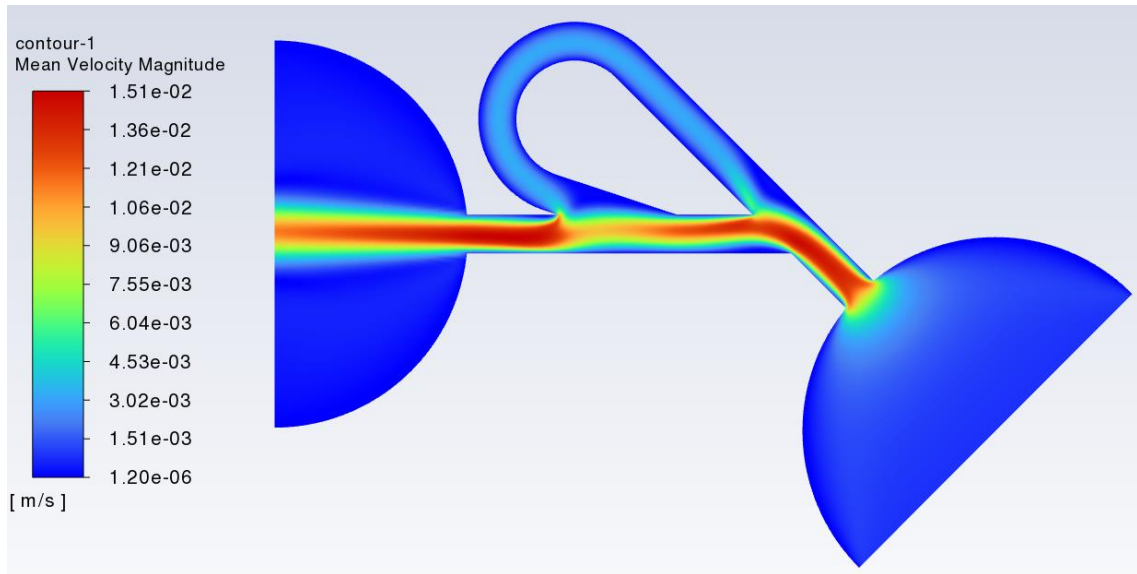
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 53 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de pressão total.



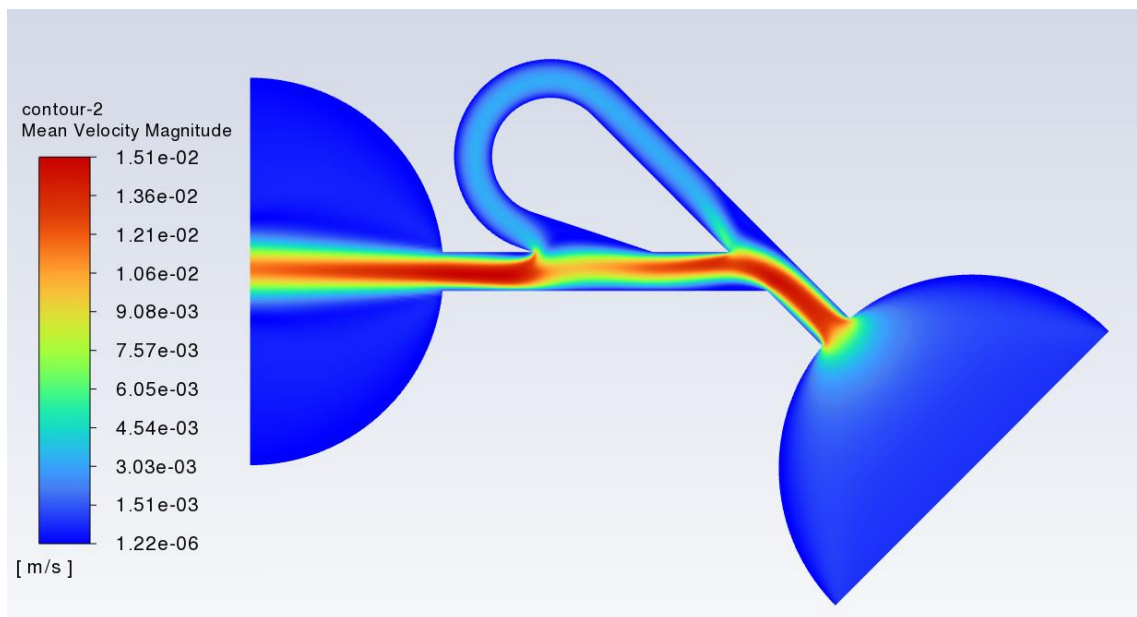
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 54 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de velocidade.



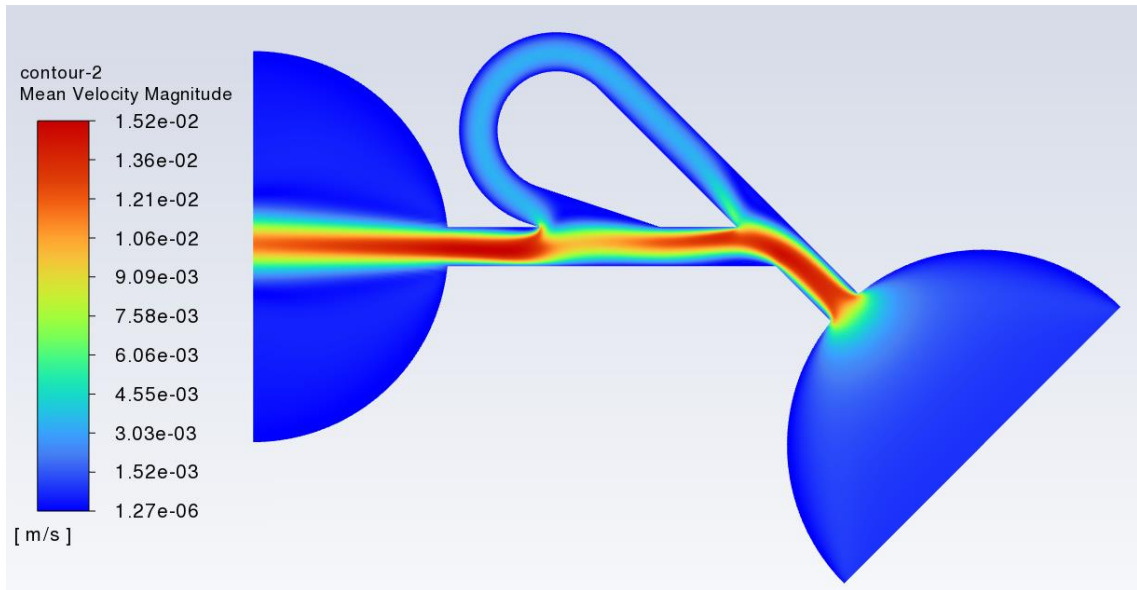
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 55 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de velocidade.



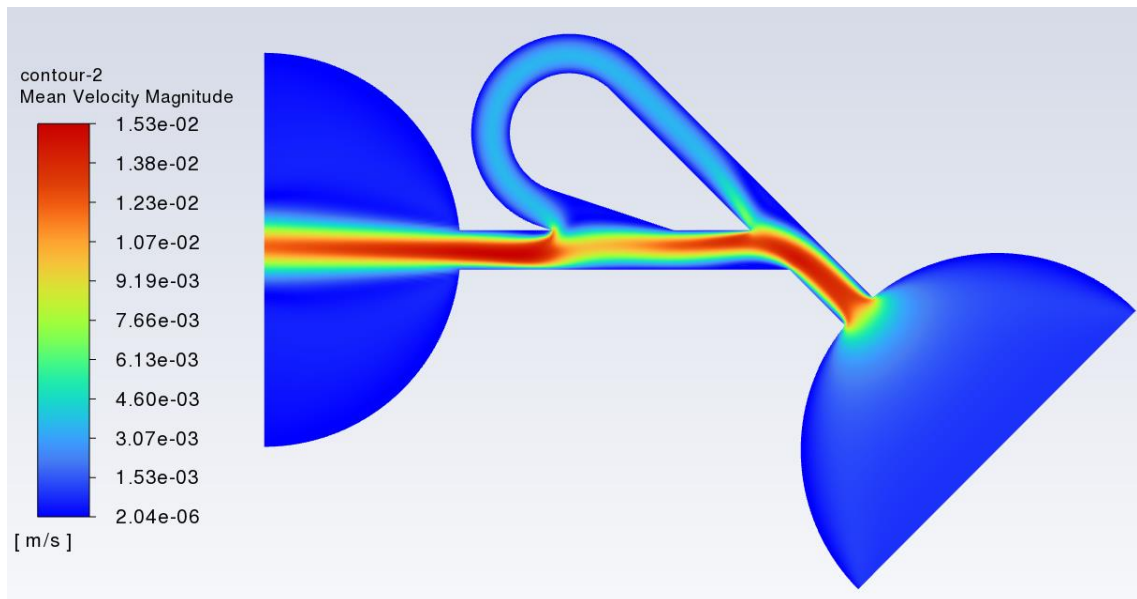
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 56 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de velocidade.



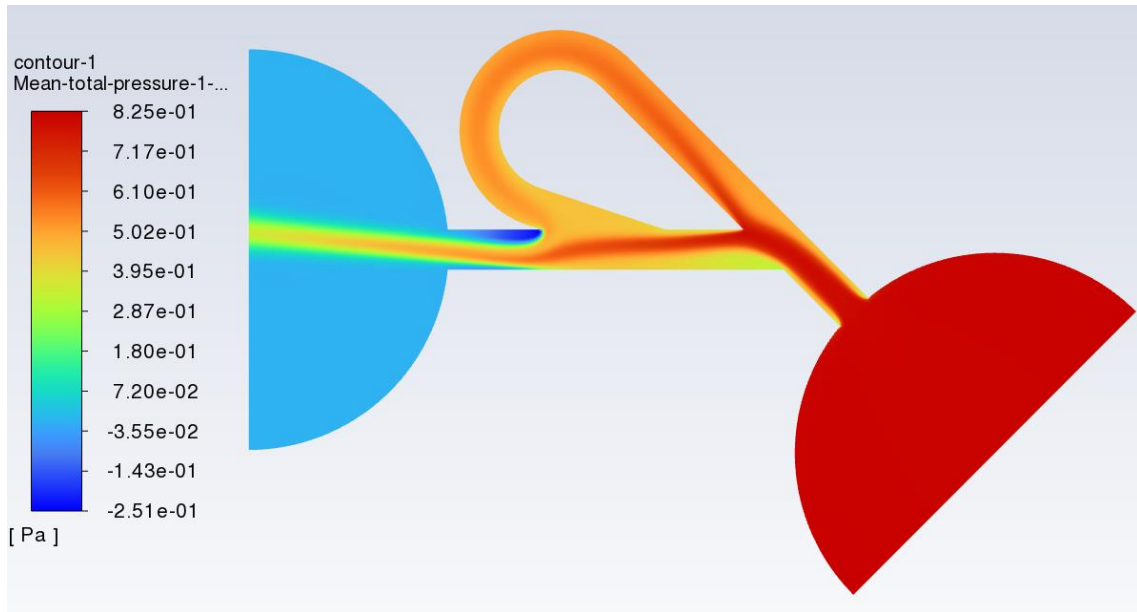
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 57 - Fluxo reverso; número de Reynolds 100; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de velocidade.



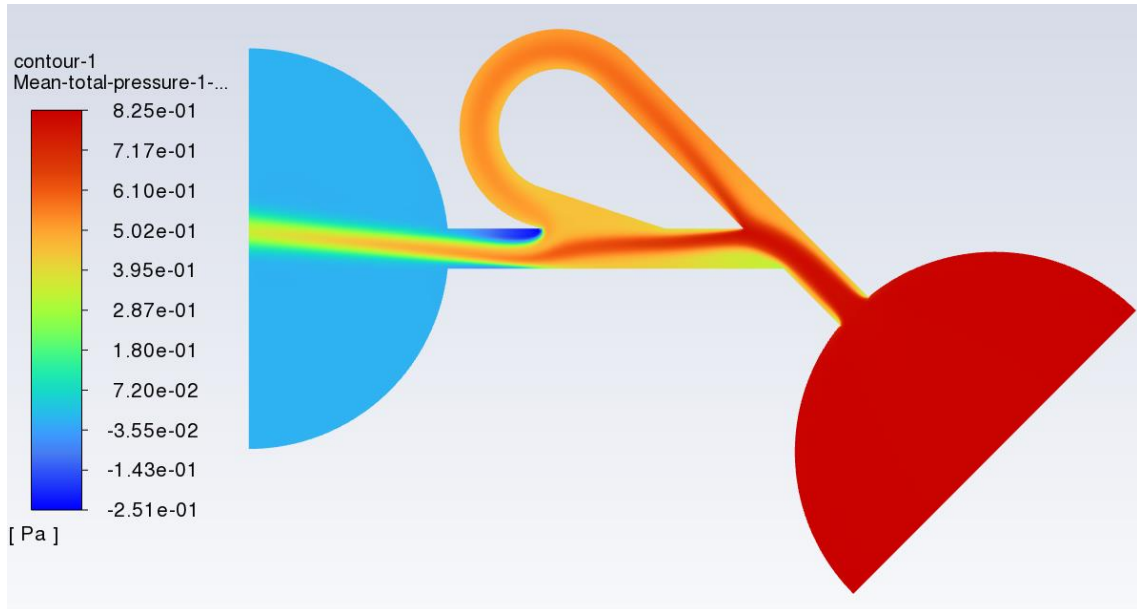
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 58 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de pressão total.



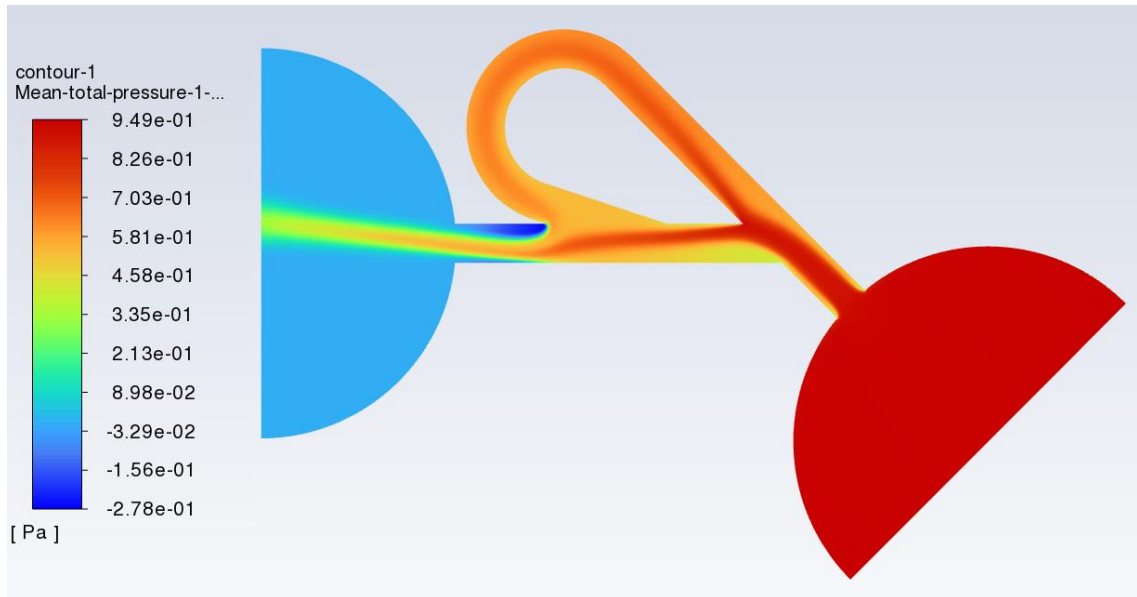
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 59 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de pressão total



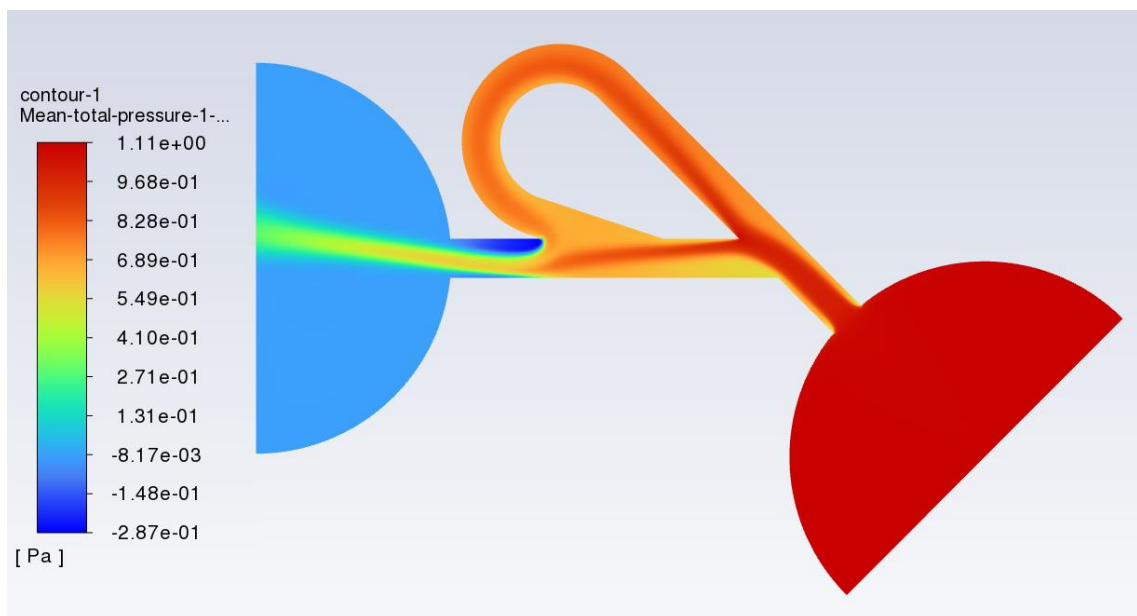
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 60 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de pressão total.



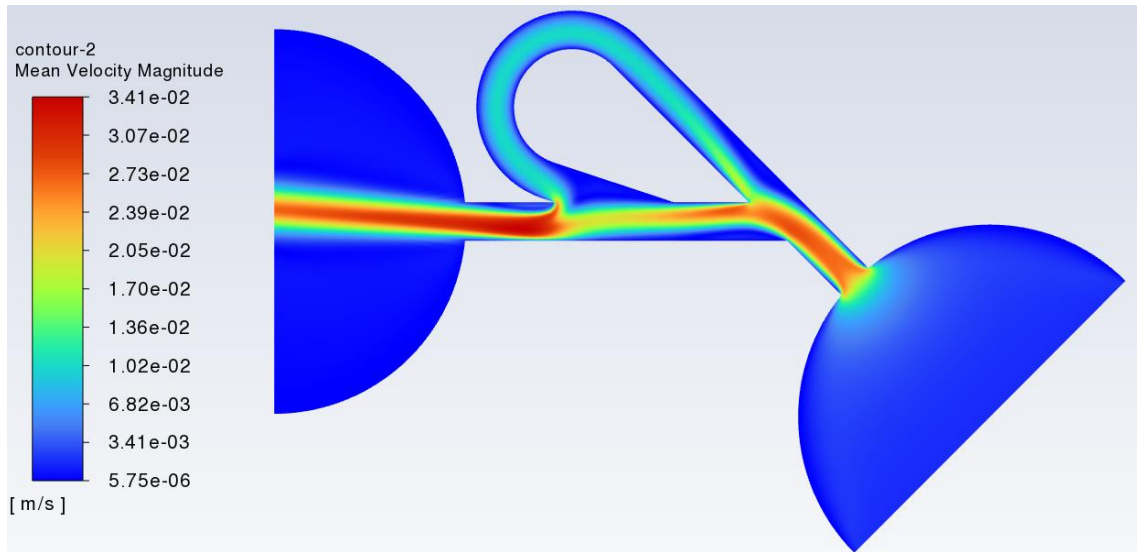
Fonte: Próprio autor (2022)

Figura 61 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de pressão total.



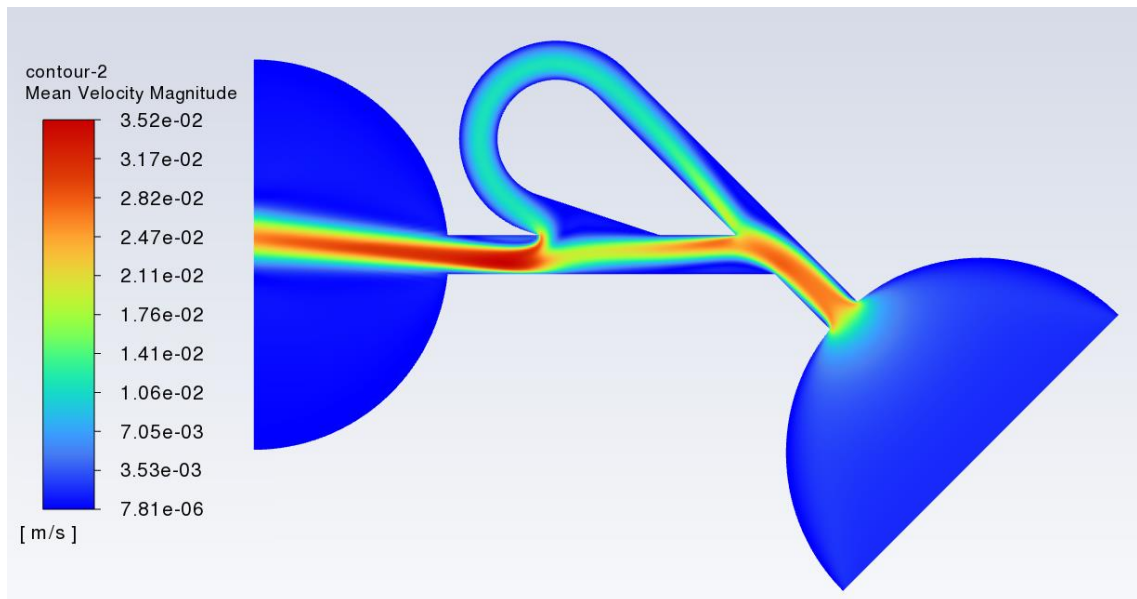
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 62 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de velocidade.



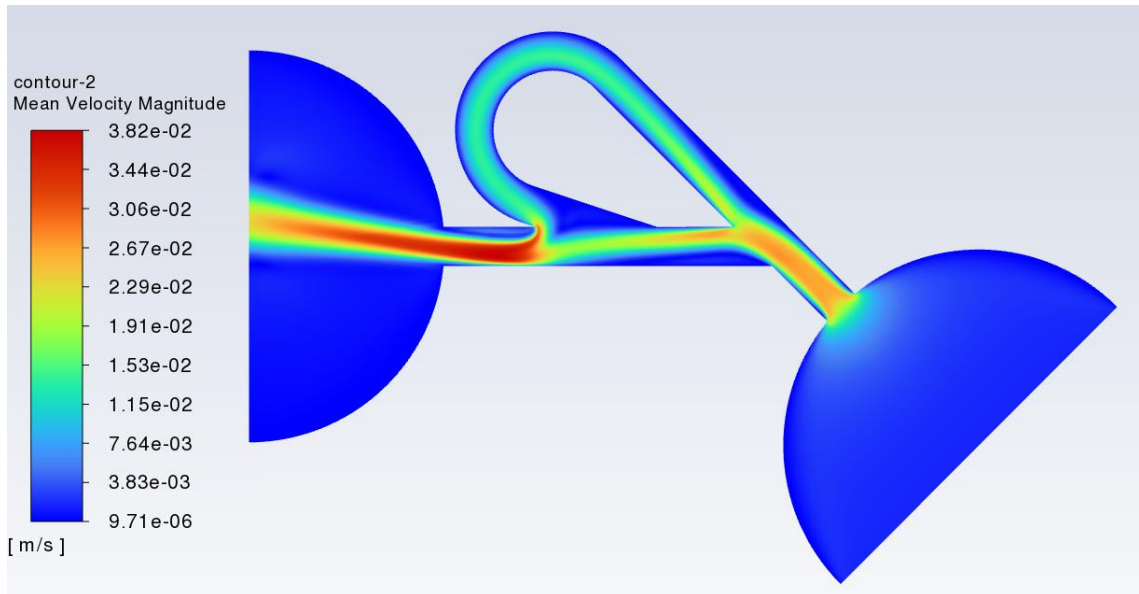
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 63 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de velocidade.



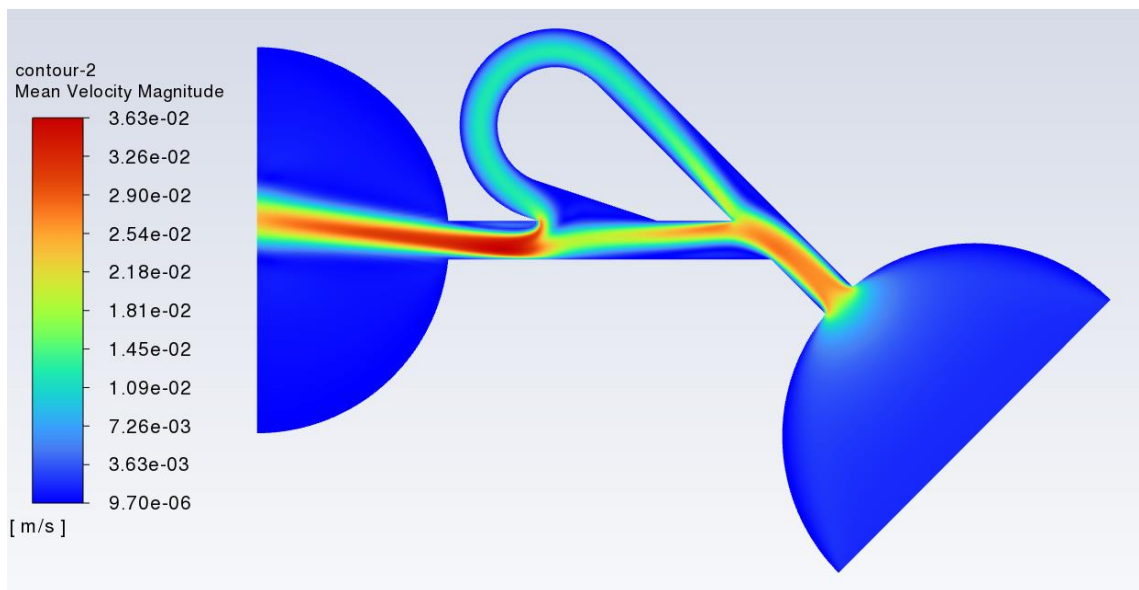
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 64 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de velocidade.



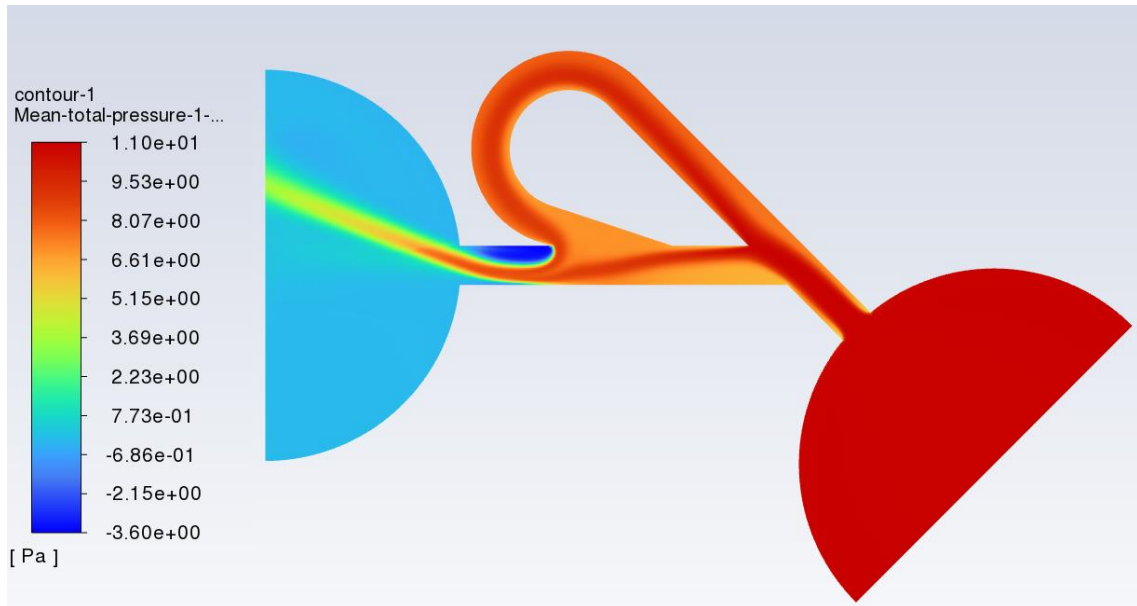
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 65 - Fluxo reverso; número de Reynolds 200; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de velocidade.



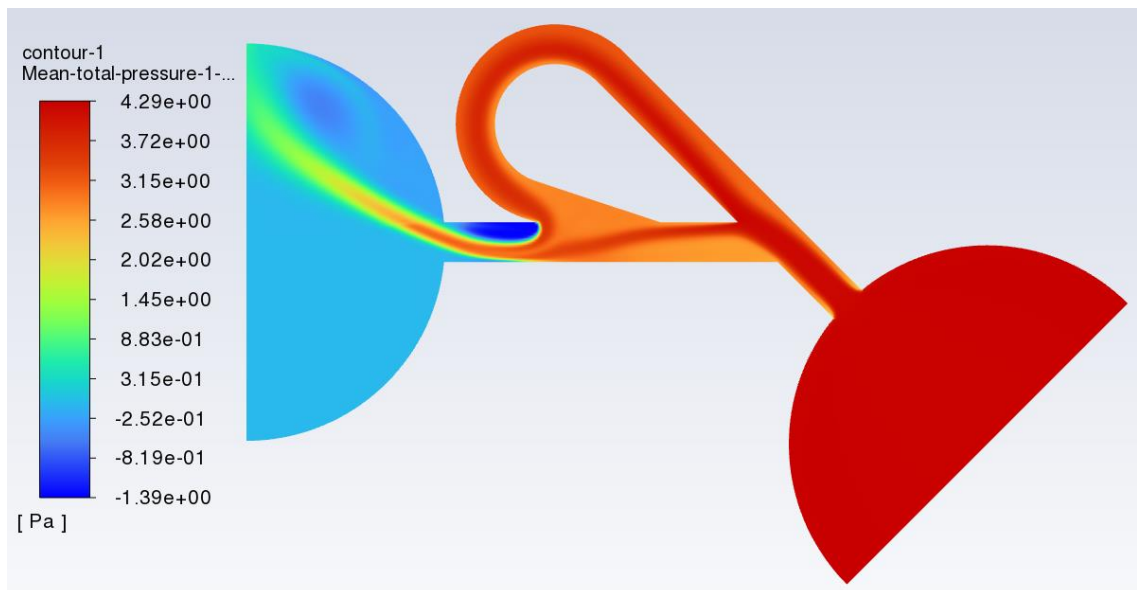
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 66 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de pressão total.



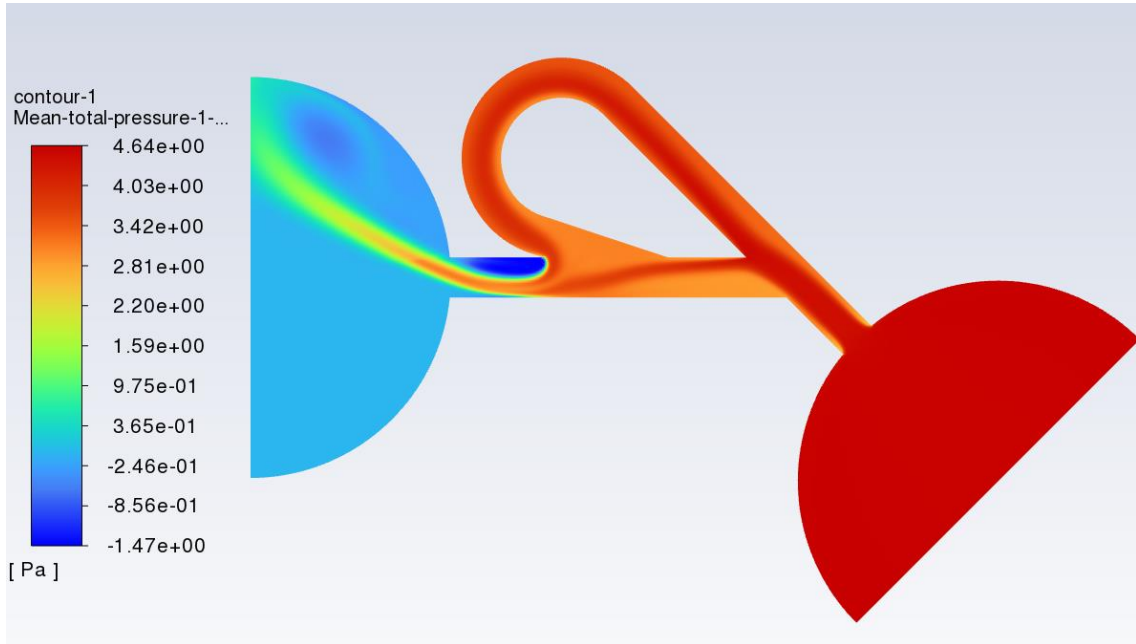
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 67 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de pressão total.



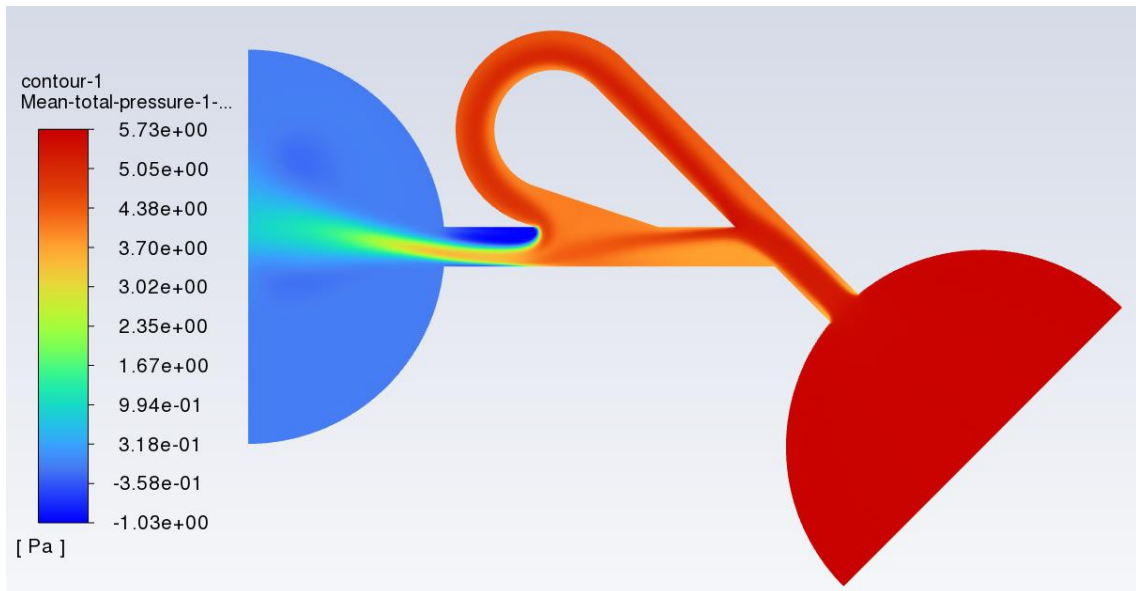
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 68 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de pressão total.



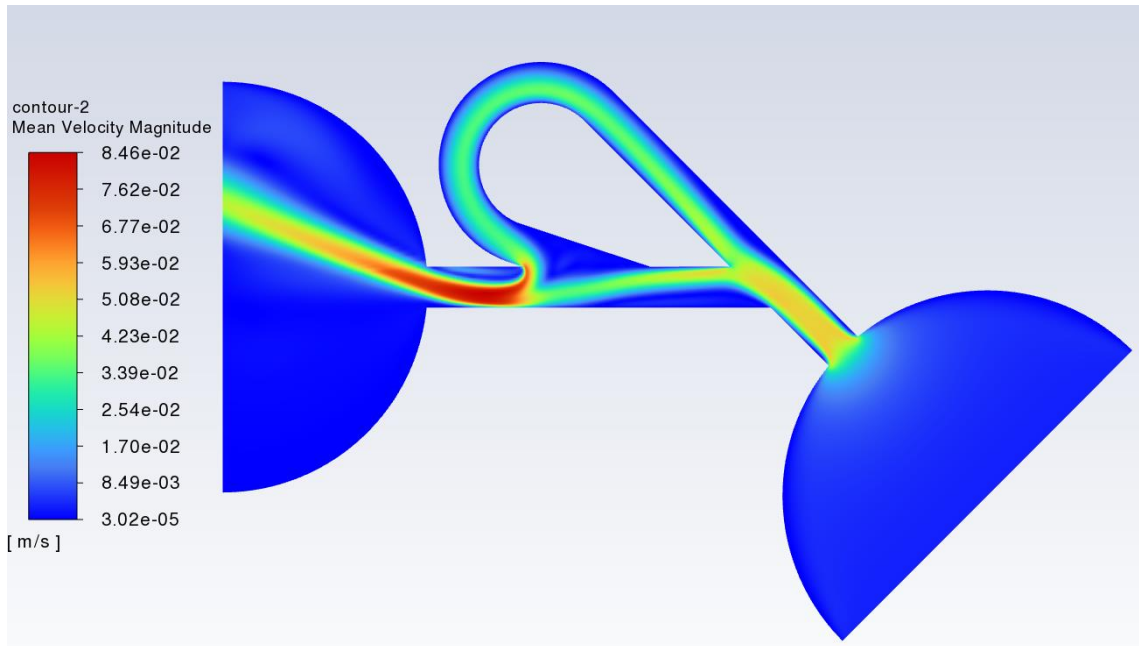
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 69 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de pressão total.



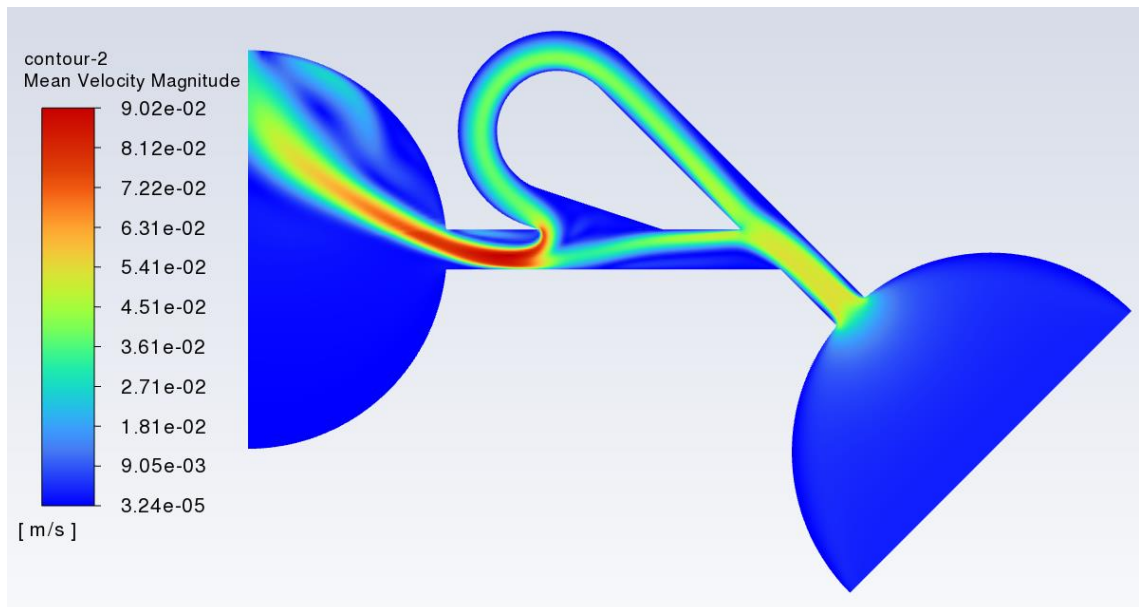
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 70 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 0%; regime transiente; campo de velocidade.



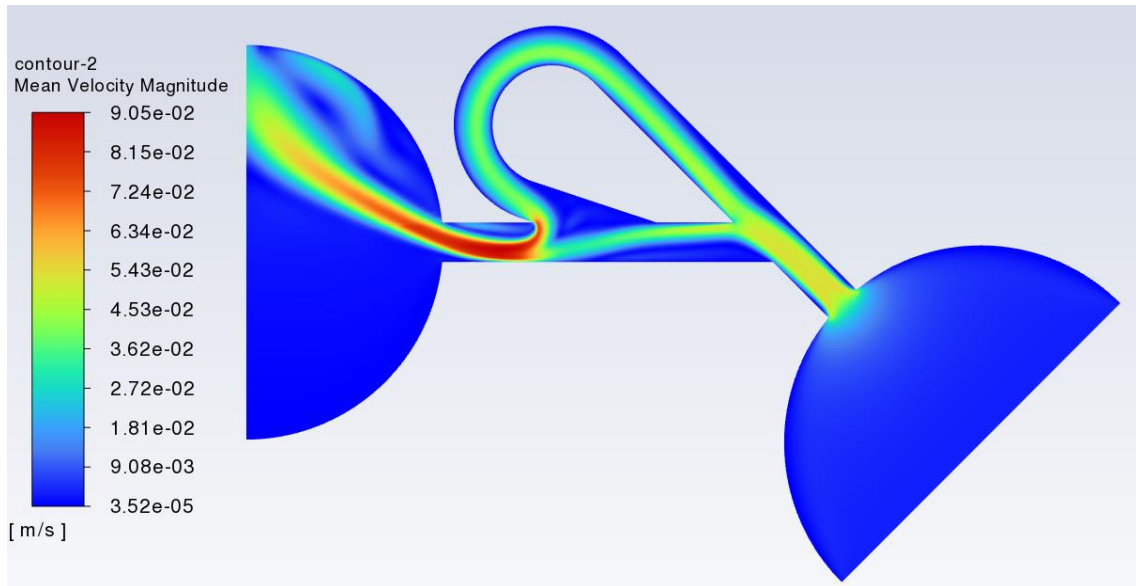
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 71 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 2,47%; regime transiente; campo de velocidade.



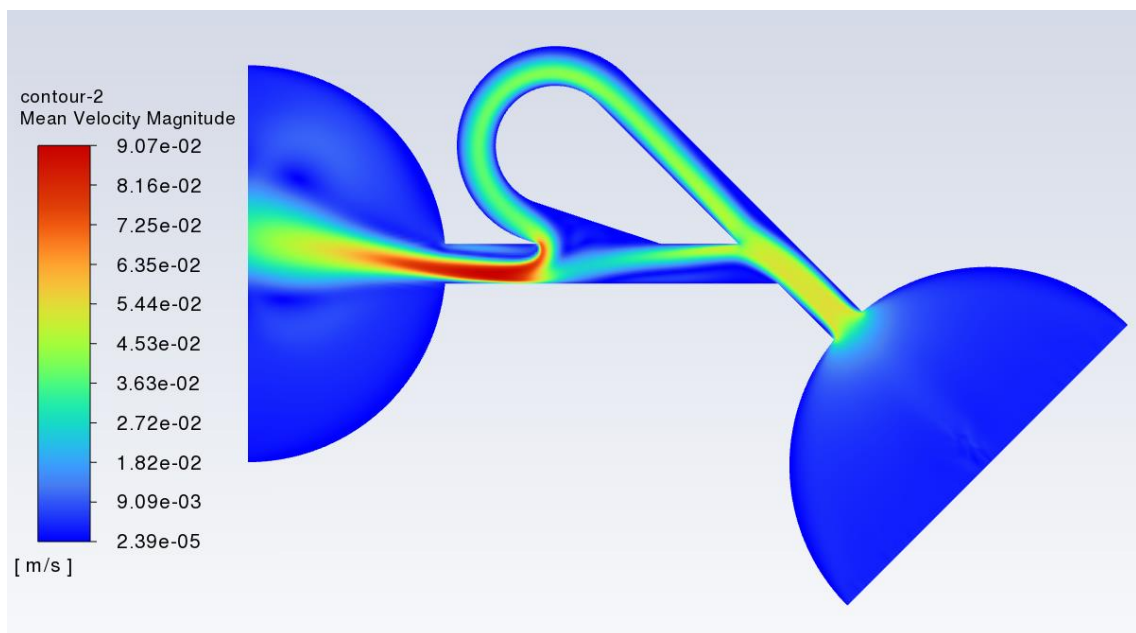
Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 72 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 4,95%; regime transiente; campo de velocidade.



Fonte: Próprio autor (2022).

Figura 73 - Fluxo reverso; número de Reynolds 400; fração volumétrica de particulado 9,91%; regime transiente; campo de velocidade.



Fonte: Próprio autor (2022).